



2008 届研究生博士学位论文

学校代码：10269

学 号：52050802002

# 華東師範大學

## 天童常绿阔叶林大气降雨再分配 及降雨分量的化学特征

院 系： 资环学院环境科学系

专 业： 生 态 学

研 究 方 向： 植 被 生 态 学

指 导 教 师： 由文辉教授

博 士 研 究 生： 王 静

2008 年 6 月 上海

**A Dissertation in Ecology**

**University Code: 10269**

**To Be Submitted for The Degree of Ph.D.**

**Student ID: 52050802002**

**Partitioning and chemistry of rainfall in evergreen  
broad-leaved forest in Tiantong**

**By Wang Jing**

**Supervised by**

**Professor You Wenhui**

**East China Normal University**

**Shanghai, China**

**June, 2008**

## 学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是我在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确说明并表示谢意。

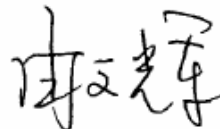
作者签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 学位论文使用授权声明

本人完全了解华东师范大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅。有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

学位论文作者签名：

导师签名：



日期：\_\_\_\_\_

日期：\_\_\_\_\_

## 王静博士学位论文答辩委员会成员名单

姓 名	职 称	单 位	备 注
陈小勇	教 授	华东师范大学	主 席
高 峻	教 授	上海师范大学	
张庆费	教授及高工	上海市园林绿化研究所	
达良俊	教 授	华东师范大学	
王希华	教 授	华东师范大学	

# 目 录

摘 要 .....	1
<b>Abstract.....</b>	<b>4</b>
引 言 .....	8
<b>第一章 森林生态系统水文生态特征研究现状 .....</b>	<b>13</b>
1.1 穿透雨的研究.....	13
1.2 树干径流的研究.....	15
1.3 树冠截留研究.....	19
1.4 展望.....	22
<b>第二章 研究内容和方法 .....</b>	<b>23</b>
2.1 研究目标和思路.....	23
2.2 研究地点概况.....	24
2.3 研究样地概况.....	26
2.4 研究方法.....	28
<b>第三章 群落乔木层特征和持水特征 .....</b>	<b>33</b>
3.1 群落乔木层特征.....	33
3.2 栲树和木荷的持水特征.....	36
3.3 群落枯落物持水特征.....	38
3.4 群落最大持水能力.....	41
3.5 讨论.....	42
3.6 结论.....	42
<b>第四章 常绿阔叶林林内雨特征 .....</b>	<b>46</b>
4.1 研究区降水特征.....	47
4.2 常绿阔叶林穿透雨特征.....	50
4.3 常绿阔叶林树干径流特征.....	55
4.4 常绿阔叶林树冠截留特征.....	61
4.5 讨论.....	66
4.6 结论.....	66

<b>第五章 常绿阔叶林大气降雨及降雨分量的化学特征 .....</b>	<b>70</b>
5.1 常绿阔叶林大气降雨及降雨分量的 pH 值特征.....	70
5.2 常绿阔叶林穿透雨和树干径流的确态氮特征.....	75
5.3 讨论.....	84
5.4 结论.....	85
<b>第六章 结论 .....</b>	<b>88</b>
6.1 栲树群落乔木层结构优于木荷群落.....	88
6.2 栲树群落最大持水能力优于木荷群落.....	88
6.3 栲树群落的降雨截留能力低于木荷群落.....	89
6.4 栲树群落和木荷群落对于酸性降雨的缓冲能力基本相似.....	90
6.5 栲树群落对硝态氮的淋溶作用明显强于木荷群落.....	91
6.6 天童常绿阔叶林降雨截持能力处于中等水平，树干径流富集作用最强.....	92
6.7 研究展望.....	92
<b>参 考 文 献 .....</b>	<b>93</b>
<b>附 论文成果和参加的科研课题 .....</b>	<b>107</b>
<b>后 记 .....</b>	<b>108</b>

## 表 目 录

表 2-1 降雨观测方法差异 .....	30
表 3-1 不同群落类型乔木层特征 .....	33
表 3-2 植物枝叶吸水量与植物干重和含水量相关性 .....	37
表 3-3 植物持水特征 .....	38
表 3-4 群落林冠最大持水能力 .....	38
表 3-5 两个群落枯落物持水特征 .....	40
表 3-6 两个群落枯落物结构特征 .....	41
表 4-1 穿透雨量（率）与降雨特征相关性 .....	55
表 4-2 树干径流漏斗比率与降雨量相关性 .....	59
表 4-3 栲树群落截留量（率）与穿透雨量（率）和树干径流量（率）相关分析 .....	62

表 4-4 截留量（率）与降雨量相关分析 .....	63
表 4-5 中国亚热带常绿阔叶林各降雨分量比较 .....	65
表 5-1 中国常绿阔叶林大气降雨及降雨分量 pH 值比较 .....	75
表 5-2 树干径流中硝态氮总量与树木胸径、树高和树冠投影面积相关关系 .....	79
表 5-3 大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮浓度与降雨量和降雨 pH 值相关关系 .....	80
表 5-4 大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮的输入量和林冠吸收量 .....	83

## 图 目 录

图 2-1 研究技术路线 .....	24
图 2-2 天童站全景及样地位置图 .....	25
图 2-3 鄞县，近天童气候图解（1990-2007） .....	26
图 3-1 不同群落树木胸径分布特征 .....	34
图 3-2 群落不同径阶生物量分布特征 .....	35
图 3-3 不同群落树木高度分布特征 .....	36
图 3-4 植物枝叶吸水速率 .....	37
图 3-5 群落枯落物吸水速率和吸水量 .....	39
图 3-6 两个群落最大持水能力 .....	41
图 4-1 鄞县，近天童地区 1990 年-2007 年降雨量 .....	47
图 4-2 2000 年到 2002 年降雨月变化 .....	48
图 4-3 研究期林外降雨月变化 .....	48
图 4-4 研究期降雨特征 .....	49
图 4-5 穿透雨量（率）月变化 .....	50
图 4-6 群落穿透雨量（率）和降雨量 .....	51
图 4-7 群落穿透雨量（率）季节变化 .....	52
图 4-8 穿透雨量（率）与开放度和叶面积指数关系 .....	54
图 4-9 穿透雨量与降雨量的关系 .....	55
图 4-10 两群落树干径流量（率）季节变化 .....	56
图 4-11 群落树干径流量和降雨量的关系 .....	57

图 4-12 同一群落不同径阶，不同群落同一径阶植物树干径流量（率） .....	58
图 4-13 不同群落中不同树种树干径流漏斗比率 .....	60
图 4-14 树干流漏斗比率和降雨量的关系 .....	60
图 4-15 树冠截留量（率）的季节变化 .....	61
图 4-16 林冠截留量与降雨量的关系 .....	63
图 5-1 大气降雨和穿透雨 pH 值 .....	71
图 5-2 大气降雨和穿透雨 pH 值季节变化 .....	72
图 5-3 大气降雨和树干径流 pH 值 .....	72
图 5-4 大气降雨和树干径流 pH 值季节变化 .....	73
图 5-5 穿透雨 pH 值和树干径流 pH 值与大气降雨 pH 值的关系.....	74
图 5-6 大气降雨和穿透雨中硝态氮浓度 .....	76
图 5-7 大气降雨和穿透雨硝态氮浓度季节变化 .....	76
图 5-8 大气降雨和树干径流中硝态氮浓度 .....	77
图 5-9 大气降雨和树干径流中硝态氮浓度的季节变化 .....	78
图 5-10 大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮浓度与降雨量的关系 .....	81
图 5-11 两个群落中大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮的月输入量 .....	83
图 5-12 硝态氮的林冠净流通量(穿透雨输入量+树干径流输入量-降雨输入量)的 季节格局.....	84



## 摘 要

森林植被对于降雨分配和径流调节具有重要意义。大气降雨输入森林后，林冠截留、穿透雨和树干径流构成了新的水量分布格局。本研究从森林结构和水文过程出发，通过对栲树林和木荷林森林水文特征的观测，比较了两个群落对降雨再分配和对养分循环的作用，为深入了解两个群落的生态水文功能提供科学基础。主要结果如下：

- (1) 在结构特征上，木荷群落的乔木密度明显大于栲树群落，栲树群落乔木的胸径、树高和生物量均显著高于木荷群落，且郁闭度也高于木荷群落。栲树群落建群种栲树的胸径以中等径阶个体最多，分布呈现不对称的单峰型。木荷群落建群种木荷的胸径分布以 10-15cm 径阶的个体数目最多，也呈单峰型。两群落的建群种种群目前的发展趋势属成熟稳定型。栲树群落中栲树的高度存在两个明显的亚层，23-24m 层和 19-20m 层。木荷的高度也可以分为两个亚层，较高一层的高度与栲树较低一层高度相近。木荷群落中木荷的高度没有明显的层次，呈现为单层。从乔木层的结构上看，栲树群落优于木荷群落。
- (2) 在最大持水能力上，栲树枝和叶的自然含水量均低于木荷，其枝的饱和亏高于木荷，叶的饱和亏低于木荷。栲树和木荷枝叶的吸水速率随着时间变化迅速下降，前期降幅极大，中后期下降幅度明显减小。林冠调蓄水分的功能在 1/2h 内发挥的作用最为突出，1/2h 后两种植物枝和叶的吸水速率均降至较低水平。林下枯落物吸水量均随着浸水时间的延长而增加，而吸水速率呈降低趋势，其调蓄水分功能在降雨后的 4h 内发挥的作用最为突出。栲树群落的林冠最大持水能力显著高于木荷群落，而木荷群落的枯落物最大持水能力高于栲树群落，栲树群落的枯落物表层较木荷群落疏松，表层枯落物对下层枯落物水分的保持作用较木荷群落大。
- (3) 在林冠降雨再分配上，穿透雨量、树干径流量和树冠截留量随时间的变化趋势与降雨量的变化趋势基本相同，穿透雨率和树干径流率也与降雨量具有相同的变化趋势，林冠截留率则与降雨量反向变化。穿透雨量、树干径流量和树冠截留量均与降雨量极显著相关。降雨的再分配过程受到降雨特征

和林地特征的共同作用。不同群落类型间，穿透雨差异主要受到其林冠结构的影响，如群落密度、观测点距主干距离、树木的分枝角度，这些因素的差异导致栲树群落的林下穿透雨较木荷群落大。同一群落不同地点的穿透雨量与观测点上方的开放度和叶面积指数密切相关，开放度较高，叶面积指数较小的地点，穿透雨量（率）较大。在同一群落中，胸径是导致单株树干径流差异的主要因素，而在不同群落中，乔木层树冠分层现象也会导致同径阶的同种树木单株树干径流的差异。树冠截留量（率）受降雨量影响，并与群落的穿透雨量（率）极显著相关。

- (4) 在化学性质上，夏季降雨充沛的季节大气降雨、穿透雨和树干径流 pH 值明显地高于冬季和春节降雨较少的季节。天童地区以栲树和木荷为建群种和优势种的常绿阔叶林类型对于酸性降雨具有一定的缓冲能力，pH 值大小顺序，穿透雨>大气降雨>树干径流。栲树群落和木荷群落二者的穿透雨 pH 值无显著差异，栲树的树干径流 pH 值显著低于木荷。穿透雨和树干径流对硝态氮均具有明显的富集作用。除了极个别情况，硝态氮浓度大小顺序为，树干径流>>穿透雨>大气降雨。穿透雨和树干径流的硝态氮浓度与降雨中硝态氮的浓度密切相关，同时，大气降雨和各降雨分量中硝态氮的浓度直接受到降雨量的影响，降雨量与降雨及其各分量中硝态氮的浓度呈显著负相关。此外，降雨强度、酸度以及枝叶分泌物等因素共同作用于各降雨分量的营养元素浓度和养分输入量，从而影响森林系统淋溶量大小。栲树群落和木荷群落穿透雨的硝态氮浓度差异不显著，而两个群落树干径流的硝态氮浓度存在显著差异，栲树群落树干径流的硝态氮浓度高于木荷群落。天童地区常绿阔叶林大气降雨及各降雨分量之间硝态氮的输入量具有明显的差异。大气降雨的硝态氮输入量除 1 月外均高于穿透雨的硝态氮输入量，硝态氮的树冠净流通量显示，1 月两个群落对降雨中的硝态氮均以林冠直接吸收为主。

- (5) 降雨量是造成降雨分量各地区间差异的主要因素。天童地区常绿阔叶林穿透雨率基本与各地区平均值相当，树冠截留略高于各地区平均值，表明该地区常绿阔叶林的降雨截持能力属于中等水平。天童地区常绿阔叶林对酸性

降雨具有一定的缓冲作用，并且，在各地区常绿阔叶林中，其树干径流对  $H^+$  的富集作用最强。

**关键词：** 大气降雨， 穿透雨， 树干径流， 树冠截留， pH值， 硝态氮

## Abstract

The forest vegetation is of great significance to rainfall distribution and regulation of runoff. Entered the forest, rainfall is distributed into interception, throughfall and stemflow, which constitute a new water distribution pattern. From the aspects of forest structure and hydrological processes, this paper observed the hydrological characteristics of the *Castanopsis fargesii* forest and *Schima superba* forest, compared the redistribution of rainfall and nutrient cycling in the two communities, and provided a scientific basis to further understand the hydrological ecological functions of the two communities. Main results are as follows:

(1) Structural characteristics:

The tree density of schima community is significantly higher than castanopsis community. And DBH, tree height and biomass of castanopsis community are significantly higher than those of schima community, and the canopy density is also higher than that of schima community. The number of medium DBH individuals of *C. fargesii* is the most in castanopsis community, and the individuals show asymmetric distribution of the single peak. In schima community, *S. superba* of 10-15 cm in diameter at breast height is the individual that tracks the largest number of bands, and the individuals also show a distribution of single peak. The current development trends of the constructive species in the two communities are both mature and stable. There are two obvious sublayers in *C. fargesii*, 23-24 m layer and 19-20 m layer, in castanopsis communities. The height of *S. superba* can also be two sublayers, the higher layer of *S. superba* is close to the lower layer of *C. fargesii*. The height of *S. superba* shows a single layer in schima community. From the tree layer structure, castanopsis community is better than schima community.

(2) The maximum water holding capacity:

The natural water content of *C. fargesii* branches and leaves are lower than that of *S. superba*. The water saturation deficit of *C. fargesii* leaves is lower than that of *S. superba*. And the water saturation deficit of castanopsis branches is higher than that of schima branches. The water absorption rate of branches and leaves decreased rapidly as time goes by. The early decrease amplitude is significantly, and reduces in the later. The function of canopy water storage plays the most prominent role in 1/2 hour, then the water absorption rate of branches and leaves drop to a lower level. Water absorption capacity of litter increases as time goes by, and water absorption rate decreased. The water storage function is the most prominent in the beginning 4 hours. The canopy maximum water holding capacity of castanopsis community is significantly higher than that of schima community, and the litter maximum water holding capacity of castanopsis community is lower than that of schima community. The surface litter in castanopsis community is looser than the surface litter in schima community. The function of water retention of the surface litter in castanopsis community is larger than that in schima community.

(3) The redistribution of rainfall in the canopy:

The trends of throughfall, stemflow and interception with time are basically the same with rainfall trend, and also the throughfall percentage and stemflow percentage. Interception percentage is in reverse with rainfall. Throughfall, stemflow and interception are highly significantly correlated with rainfall. The redistribution of rainfall is interacted by rainfall characteristics and forest features. In different communities, the main factor, which effects throughfall is the canopy structure, such as community density, distance between observation point and the trunk, branching angle of trees. These factors lead to differences between throughfall in castanopsis communities and that in schima community. In the same community, throughfall in different observation points is closely

related to openness and LAI. Throughfall and throughfall percentage are smaller at the observation points with higher openness and smaller leaf area index. In the same community, DBH is the main factor that leads to different single tree stemflow. And in different communities, stratification of the tree layer leads to the differences of single tree stemflow of the same species. Interception and interception percentage are effected by rainfall and was significantly related to throughfall and throughfall percentage.

(4) The chemical characteristics:

With plenty of rainfall in summer, pH value of throughfall and stemflow are significantly higher than that in winter and spring, the less rainfall season. Evergreen broad-leaved forest in Tiantong, in which *C. fargesii* and *S. superba* are constructive species and dominant species, has a buffer capacity for acid rain. The order of pH value is throughfall > rainfall > stemflow. There is no significantly difference between pH value of throughfall in castanopsis community and that in schima community. pH value of stemflow in castanopsis community is significantly lower than that in schima community. Nitrate nitrogen in throughfall and stemflow is obvious enrichment. Apart from a few cases, the order of the nitrate nitrogen concentration is stemflow >> throughfall > rainfall. Nitrate nitrogen concentration of throughfall and stemflow are closely related to that of rainfall. And the nitrate nitrogen concentration of rainfall in stand is directly affected by rainfall. There are negatively significantly correlation between them. In addition, rainfall intensity, acidity, branches secretions and other factors effect nutrient concentration and nutrient input of rainfall in stand and outer together, thus affecting leaching amount of forest system. There is no significant difference between nitrate nitrogen concentration of throughfall in castanopsis community and that in schima community. And nitrate nitrogen concentration has a significant difference between the two communities. Nitrate nitrogen concentration of stemflow in castanopsis

community is higher than that in schima community. There are obvious differences between nitrate nitrogen inputs of rainfall in stand and outer in evergreen broad-leaved forest of Tiantong. Nitrate nitrogen inputs of rainfall, except in January, are higher than that of throughfall. According to the net nitrate nitrogen flux, the nitrate nitrogen of rainfall is directly absorbed by two communities on January.

- (5) Rainfall is the main factor that leads to the differences of rainfall in stand among areas. Throughfall percentage of evergreen broad-leaved forest in Tiantong is basically the same with the average value of other areas, and interception percentage is slightly higher than that in other areas. These indicate that the rainfall interception capability of evergreen broad-leaved forest in Tiantong is at the middle level among all the evergreen broad-leaved forests in China. Evergreen broad-leaved forest in Tiantong has a cushioning action on acid rain, and among all evergreen broad-leaved forests, its enrichment on  $H^+$  in stemflow is the strongest.

Keywords: rainfall; throughfall; stemflow; interception; pH value; nitrate nitrogen

## 引 言

森林生态系统是陆地生态系统的主体，森林生态系统是维持和调节陆地生态系统平衡和改善生态环境的基础（王淑元和林升寿，1995）。森林水文系统是森林生态系统的重要组成部分，现代森林水文的研究是以生态系统为中心的，它结合森林生态系统的结构、功能及其生产力的探讨，参与森林生态系统能量流动和物质循环的研究来揭示各种水文现象的发生、发展规律及其内在的联系，并以包括森林水文循环、水质变化以及森林水文效益在内的森林生态系统的综合知识来调节森林生态系统的平衡，维持森林生态系统的稳定性和持续性（潘维铸等，1989）。森林水文过程是指在森林生态系统中水分受森林的影响而表现出来的水分分配和运动过程，包括降雨、降雨截留、蒸发散、地表径流等（高甲荣等，2001）。

将森林水文学作为一门科学来进行实际观测和分析研究开始于 19 世纪末至 20 世纪初。1898 年，美国开始在其东南部的森林中研究森林对气候、公众健康、土壤及暴雨的影响。1911 年，美国在科罗卡多州的 Wagon Wheel Gap 流域进行了森林采伐与溪流流量关系的实验。1921 年，美国农业部门在 Asheville 建立了阿帕拉契山森林实验站（现南方实验站），广泛的研究从 1926 年开始，包括径流和侵蚀控制的研究。

日本是最早提出通过流域实验进行森林水文研究的国家之一。在 1911 年大水灾之后，日本开始了第一期治水工程，随后在 1911 年到 1920 年的 9 年里，日本设立了 39 个森林观测所（即森林气象站），1920 年开始了真正全面地森林水文研究，开展了森林的治水和水源涵养功能的研究，进行了林内外地表蒸发、林地雨水下渗和地表径流量、林冠降雨截留、林木蒸腾、林内外积雪、融雪等项目的研究，同时，他们开始对小溪流流量进行测定（周梅，2003）。

Engler 从 1902 年开始在瑞典从事典型对比小流域的水文观测，对森林变化（主要是砍伐森林）对流域产水量的影响进行研究，该实验是这类研究的开端，也是现代实验森林水文学开端的标志。（王礼先和张志强，1998）1915 年，Engler 在 Emmental 对比流域设立了水文过程自记装置，此后，欧洲一些国家陆续在不同的条件下开展了同类实验。



1948年，美国学者 Kittredge 首次提出森林水文学的概念，并定义为：“森林水文学是一门专门研究森林植被对有关水文状况影响的科学”（周梅，2003）。

二十世纪中叶以后，在国际 MAB 和 IBP 计划的推动下，森林水文学研究不断系统化、全面化和规范化。日本在 1966-1972 年期间，实验观测流域达 86 个，对洪峰流量和低水流量与森林、地形、降雨等关系作了大量研究。在美国，先后建立了许多森林生态站、水文站，如 Coweeta 水文站和 Harboard Brook 生态站。其中，Borman 和 Likens 在二十世纪 60 年代创立的 Harboard Brook 生态站，出版发表了一系列的研究论文和著作，他们率先应用小集水区实验技术法，将森林水文学研究与森林生态系统定位研究相结合，从生态系统结构与功能角度，阐述森林水文运动规律和机制以及森林演替过程和森林环境变化对水分循环的影响，推动了森林水文学从水文要素的单项研究向系统综合的定位研究发展。

与国外相比，我国的森林水文学研究起步较晚。我国最早进行的森林水文研究始于二十世纪 20 年代。1924 年-1926 年间，前金陵大学美籍学者罗德民博士和李德毅先生等在山东、山西等地观测研究了不同森林植被类型对雨季径流和水土保持效应的影响，率先拉开了中国近代森林水文研究的帷幕。但在其后的相当长一段时间里，该领域的研究一直处在停滞或徘徊不前的状态。70 年代以后，该研究领域的发展出现了鼎盛时期，我国陆续建立了从寒带至热带不同地理区的各种类型森林生态站，开展了不同尺度的森林水文生态功能的长期定位观测研究，在森林对降雨的截持、森林土壤水分动态变化规律、水分循环、水土保持、水质影响以及森林对径流和洪峰调节等方面积累了大量的数据资料，为开展区域和全国大尺度的生态系统水文生态功能对比研究奠定了坚实的基础（刘世荣，1996）。

水量平衡是森林水文学的基本问题，也是营造和保护水源涵养林和水土保持防护林的重要理论依据。水量平衡作为生态系统物质平衡的一部分，它着眼于两个方面：即作为物质一部分的水分和作为其它物质载体的水分。前一个方面基本上只考虑量的大小及其变化规律，对于在量上不起眼的过程往往不受重视；而后一方面不同，因为很多在量上并不重视的过程，却是养分元素的主要携带者，特别是在系统内部的生物小循环中的水流，就更是如此。水量平衡的研究采用了生态学和水文学的一些研究方法。

森林林冠对大气降水的再分配是水分输入森林的第一个环节，其过程涉及到森林生态、森林水文、森林气象及水土保持等诸多方面，是经典森林水文学的主要研究内容之一。探究森林对大气降水的再分配状况，不仅为森林生态系统的水养平衡、能量流动提供基本的研究数据，对了解森林的水文生态功能、水资源管理与评价，以及寻找合理的土地利用方式有着极其重要的意义。

降落到森林中的雨滴，一部分首先落在树木的叶、枝、干等树体表面，由于表面张力和重力的均衡作用而被附着，或者积蓄在枝、叶的分叉处被保留下来。被保留的雨水一部分直接蒸发到大气中，但随着降雨的继续，保留雨量不断增加，当其达到一定数量时，表面张力和重力失去均衡，其中一部分自然地或由于风的吹动而从树上滴下，或者从叶转移到枝、从枝转移到树干而流到林地地面，前者的量成为树冠滴下雨量（drip），后者的量称为树干径流量（stemflow）。降雨一旦停止，树上的保留雨量逐渐通过蒸发而散失。降落到森林中的雨滴还有一部分未接触树体，而直接穿过林冠间隙落到林床上，这一部分雨量成为林冠通过雨量。把滴下量和通过量加在一起，即通常所说的林内雨量（目前所提到的穿透雨大部分均为这里所提到的林内雨）。

在降雨继续期间某段时间内林冠上空的雨量即林外雨量（或实际雨量），从中减去林内雨量和树干径流量，剩下部分即该段降雨时间内从树体表面通过蒸发返回到大气中的雨量和降雨终止时树体表面还保留的雨量，这部分雨量即称为该段时间内的树冠截留雨量（crown interception），或简称截留量。截留量所占林外雨量的百分比称为林冠截留率。（中野秀章，1983）

大气降水被林冠截留的部分是森林生态系统水分损失的重要方面之一。大部分降水则以穿透降雨和树干径流的形式到达林地，被树干、灌草层和枯枝落叶层截留后输入到林地土壤，是森林生态系统接收到的降雨部分，它在一定程度上反映了不同林分利用大气降水的效率。因此可以认为，大气降水输入森林后，林冠截留、穿透雨、树干径流构成了新的水量分布格局。

森林与水分的关系极其复杂，不同自然地理环境或相同自然地理环境下不同结构类型的森林对大气降水的截留、林内雨的再分配、地表径流、地下径流以及对蒸发散产生的影响不尽相同，由此产生各异的水分大循环、小循环和水量平衡的时空格局与过程。森林水文学研究的正是揭示森林与水的作用关系、森林

水文生态功能及其随自然地理、植被条件和人为干扰施加的环境影响下的变化机制。森林生态系统水文生态功能是森林和水相互作用后所产生的综合功能的体现，即调节气候、改变降水的分布、涵养水源、净化水质、保持水土、减洪、滞洪及抵御旱涝灾害等所发挥的巨大作用，另一方面，森林水循环作为全球物质循环中的重要环节，共同影响大气、土壤和植被的结构、功能、分布格局及动态变化，还影响地球能量收支、转换和分配，籍以在维持生物圈和地圈生态平衡过程中起着重要作用。森林水文生态研究不仅有助于了解森林生态系统中水分的运转过程与机制以及对系统结构、生物地球化学循环、能量代谢和生产力的影响，而且能正确评价和认识森林的作用，为森林合理经营利用、保护自然环境和水资源以及维持人类与自然的协调统一所需生存环境的稳定提供持续发展的科学理论（刘世荣等，1996）。

常绿阔叶林是分布在亚热带地区的一种地带性植被类型，它在中国的分布最广，面积最大，类型最为复杂多样。其群落结构复杂、树冠浓密、枝叶多层重叠、郁闭度大，对降雨的截留能力高于杉木林等林型，涵养水源的能力很强。在水土保持中，常绿阔叶林发挥着重大的作用。常绿阔叶林分布区是中国人口最为密集，经济最为发达的区域，尤其在其东部，农业耕作历史悠久，频繁长期的人类干扰导致这类森林日益减少，原生的常绿阔叶林所剩无几，替而代之的是大面积处于不同退化程度的次生林、退化灌丛、灌草丛和人工林等。在人类的长期干扰下，中国常绿阔叶林面临着分布面积日益缩小，群落类型和物种数量逐步减小的不利局面，表现出一系列的退化特征，如：群落结构趋于简单，涵养水源和储藏养分能力减弱，土壤退化等。在此过程中，植物种类组成的改变扰乱了区域的生物地球化学循环途径，其中水分循环过程，以及以水分为载体的养分循环过程也受到了重要的影响。此外，由于常绿阔叶林分布区域与人类活动的特殊关系，人类活动对环境所造成的各种影响，如环境污染等，对常绿阔叶林的生长发育和生态功能均产生了重大的影响，反过来，常绿阔叶林也对环境存在一定的反作用。目前国内对常绿阔叶林对降雨的再分配以及降雨分量化学特征的研究如火如荼，尤其是在对酸雨、氮沉降等方面的研究，更是受到广泛的重视。

天童常绿阔叶林位于亚热带，森林资源类型多样，以常绿阔叶树为地带性树种的森林类型具有复杂的树种组成和层次结构，形成了独特的水文特征和显著的

水文生态功能，同时地理位置靠近宁波市，人类活动对其产生了巨大的影响。因此对天童地区常绿阔叶林对大气降雨各分量特征的研究非常重要，对于探索森林与水的各种关系，研究并揭示该类型森林生态系统的各种水文生态功能，对今后区域森林资源的经营管理、小流域综合治理以及生态环境建设均具有重要的意义。由于 1958 年大炼钢铁时，天童地区的森林曾受到不同程度的采伐干扰，因而形成了比较完整的裸地、灌丛直到常绿阔叶林的次生演替系列，运用次生演替的空间序列代替时间序列的研究方法，可以划分为不同的演替阶段，其中栲树林和木荷林为发育成熟的常绿阔叶林，这两种林型的林地特征和物种组成均存在着明显的差异，本研究通过对栲树林和木荷林森林水文特征的观测，比较两个群落的生态水文功能，以期找出两个群落对降雨再分配和对养分循环的作用差异。

# 第一章 森林生态系统水文生态特征研究现状

大气降水输入到森林生态系统，首先要受到林冠的拦截作用，被拦截的这部分水分最终通过蒸发作用返回大气，大部分降水则以穿透雨和树干径流的形式到达林地，被树干、灌草层和枯枝落叶层截留后输入到林地土壤，是森林生态系统接收到的降水部分，它在一定程度上反映了不同林分利用大气降水的效率。因此，大气降水输入森林后，林冠截留、穿透雨和树干径流构成了新的水量分布格局。

## 1.1 穿透雨的研究

林下穿透雨是林冠对降水分配的主要部分，是林地水分重要来源（Gómez *et al.*, 2001；郭忠升等，2003）。林下穿透雨的变化，直接影响到达林地土壤的水分总量，进而影响地表径流量，特别是水土流失过程，而且穿透雨改变了林下水分输入的空间分布格局，影响了林地土壤的水分分布以及养分的循环和利用（Taniguchi *et al.*, 1996；Tobón-Marín *et al.*, 2000；Sun *et al.*, 2002；郭忠升等，2003），因而林下穿透雨变化，在森林生态系统水文循环和水量平衡中占有极其重要的地位（Jetten, 1996；Dunkerley, 2000；Van *et al.*, 2000；李崇巍等，2005）。

### 1.1.1 测量方法

通过将采集装置放置在被测树的树冠的下方来测量穿透雨（Návar *et al.*, 1990；Domingo *et al.*, 1998）。在以往的研究中有人使用roving gauges、数量巨大的雨量计或者数量巨大的roving gauges测量穿透雨，也有人采用V形长槽（long troughs）作为受雨器（David McJannet, 2007；Iroumé A., 2002.）。针对不同森林结构，可将集水设备放置在不同的位置，对不同的乔木层、灌木层的穿透雨进行分别的测量。通常将这些设备的承接雨水的组件放置在森林乔木层与灌草层之间，对穿过乔木层的穿透雨进行测量。但由于林冠的疏密和间隙分布不均匀，在不同地点测出的穿透雨量差异很大（中野秀章，1983）。常用的解决办法有放置大量的采集器（Asdak *et al.*, 1998a），或加大受雨器面积（Rutter *et al.*, 1971）；或者任意布设或沿等高线布设雨量器，在一次降水或间隔一段时间进行位置调换（Lloyd and Marques, 1988；Asdak *et al.*, 1998a；David Dunkerley, 2000；

马雪华, 1993)。平均穿透雨的测量由于与其相关的空间变异性, 则需要大量的量器。很多研究者对于采集器的数量、安装位置进行了深入的探讨, 提出了许多确定采样点的方法, 如随机抽样法(中野秀章, 1983)等, 并且很多研究者发现要使测量数据具有统计学意义, 采集器的数量需要非常巨大(Kimmins, 1973; Pressland, 1973; Asdak *et al.*, 1998a), 另有一些研究者, 通过增大受雨器的面积, 来弥补由于数量不足所造成的影响(Rutter *et al.*, 1971; David McJannet, 2007; Iroumé A., 2002.)。对于不同森林类型, 由于其空间变异性不同, 所需的采集器的数量也不同, 需要因时因地制宜。

### 1.1.2 穿透雨的影响因子

穿透降雨中, 自由穿落雨和冠滴水实际上受到不同的因子影响, 即使是同一因子, 对两者产生的影响也不尽相同。自由穿落雨由林冠覆盖度决定, 即自由穿落雨率(自由穿落雨与总雨量的比率)与林冠覆盖度之和为1(Gash, 1979; Calder, 1986); 但是, 实际降雨中风的存在使得雨滴不能垂直降落, 使自由穿落雨率变小。由于冠滴水量和林冠截留作用密不可分, 所以影响林冠截留的降雨因子(雨强、雨量、降雨历时和雨型)和林冠因子(主要是叶片质地和形状)都会影响到冠滴水量, 风在其中同样是不可忽视的环境因子, 由于风或其他干扰(如持续高强度的雨滴击打)对林冠的机械晃动作用, 枝叶可能未达到饱和就产生冠滴量(张一平等, 2004)。大部分研究认为穿透降雨和林外降雨存在较为密切的关系, 通常降水量和降水强度越大, 穿透雨量越大, 而且穿透雨率也在增加(曾杰和郭景唐, 1997; Gómez *et al.*, 2002; 巩合德等, 2005)。还有一些研究认为降雨强度越大, 阴雨持续时间越长, 林内相对湿度增大, 则穿透雨越大(曾庆波, 1994)。在降雨量较大时, 由于受降雨类型和气象条件的影响, 会降低穿透雨量与冠层分布特征之间的相关性(Iroumé and Huber, 2002; Carlyle-Moses *et al.*, 2004)。穿透雨率在降雨量低时, 变化大, 而降雨量高时, 穿透雨波动反而小(Schroth *et al.*, 1999; Price and Carlyle-Moses, 2003)。战伟庆等(2006)和时忠杰等(2006)也发现穿透雨的变异系数随降雨量或降雨强度的增加而减小, 当冠层达到饱和后变异系数趋于一稳定值。此外, 林冠结构对穿透降雨也有一定的影响。一些研究认为, 林冠水平结构上的差异是导致林下穿透雨空间变异, 以及降雨集中效应出

现的主要原因 (Jetten, 1996; Tobón-Marín *et al.*, 2000)。一般受树种、冠层厚度、枝叶倾角、雨前林冠的湿润程度、叶面积指数以及降水特性等多种因素的影响 (Johnson, 1990; Loustau *et al.*, 1992; 巩合德等, 2005)。但是李振新等 (2004) 研究发现尽管冠层覆盖度、枝叶层厚度与林下穿透雨率之间有一定的负相关关系, 但这种影响均没有达到显著水平, 说明影响林下的穿透雨率的因素十分复杂。

### 1.1.3 穿透雨化学性质

森林水化学特征反映森林生长的一般生态条件和生理特性。具体来说, 大气降水直接反映当地湿沉降情况, 间接反映当地受空气污染的现状。因为降水过程冲刷污染物 ( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和 $\text{NH}_3$ 等) 及尘埃 (含Ca、Mg、Al、Si和碳酸根等), 穿透雨和树干径流则反应了森林林冠和树干对湿沉降的缓冲能力 (表现在降水中pH值的升高与降低), 与大气降水的反应情况 (离子的释放与吸收) (Amezaga *et al.*, 1997; Fenn and Kiefer, 1999)。对穿透雨pH值的研究只要集中在酸沉降严重的区域, 穿透雨的pH值高于大气降雨的森林, 对酸性降雨具有一定的缓冲能力。常绿阔叶林通常对酸性降雨具有一定的缓冲能力, 降雨中的 $\text{H}^+$ 会被叶片吸收, 发生阳离子交换作用, 并且冠层中淋失的弱碱会与降雨中的酸中和, 形成弱酸和硫酸盐或硝酸盐, 从而导致穿透雨pH值高于大气降雨。而针叶林对酸性降雨的缓冲能力较差, 穿透雨的pH值通常低于大气降雨, 因此酸性降雨对于针叶林的危害通常较大 (刘菊秀, 2000, 2003; 樊后保等, 2000)。通过对大气降水和地表水养分的比较则可估计森林养分流失状况 (Niklinska *et al.*, 1995; 刘菊秀等, 2003)。

在森林冠层内, 植物代谢物的释放和运输, 蓄积在树叶表面的大气沉降物和植物分泌物的生物地球化学过程, 都会影响进入森林和土壤的雨水酸度、化学成分及含量, 并影响植物体的养分平衡, 从而使穿透水的化学成分发生较大的变化 (曾梅等, 2006)。

## 1.2 树干径流的研究

树干径流是降雨沿着树干流至树木根部的水量, 是降雨量和溶质在植物树干上的空间输入点, 避免了雨点对地面的击溅侵蚀, 并增加了树木根基周围的水分

及养分含量,通常干流量仅占降雨量的0.3%~3.8%,在水量平衡中可以忽略不计,但在研究大气降水化学输入、可溶性物质淋溶及森林对水质的影响中则有重要意义。因此在森林生态系统中,树干流具有重要水文学和生态学功能(Gómez *et al.*, 2001; Levia and Frost, 2003; 王礼先和孙宝平, 1990)。

### 1.2.1 树干径流的测量方法

最初树干径流的收集是用橡胶或金属环形圈或水槽环绕在树干上,考虑到如果要对树干流进行化学分析,则环形收集器需要是一种惰性材料,因此通常是用剖开的聚乙烯塑料管以螺旋形缠绕在树干上(Gene and John, 1970; Pressland, 1973; 李振新等, 2004; 尹光彩等, 2005)。树干径流的采集,在四川卧龙亚高山暗针叶林生态系统定位站和河南济源黄河小浪底森林生态系统定位研究站等,采用了一种新型的CR2 - Y型树干径流采集器(阮士松, 2006)。

样树的选择必须考虑树种、径级、林木生长状况及其树冠特点等,选取样树的方法有很多种。通常是在每块样地中随机选择样树(Pressland, 1973; Marin *et al.*, 2000),按径阶选取标准木的方法是比较普遍的(魏晓华和周晓峰, 1989; 周光益等, 1995; 李海涛等, 1997; 黄建辉等, 2000; 巩合德等, 2005)在样地内做若干横切面得到相应的样线、在样线上按照径级取样(Asdak *et al.*, 1998a),或者按照径阶选择标准木进行取样,然后将标准株干流量按林木径阶及其权重进行统计,利用加权平均法推算出单位面积林分的干流量(李振新等, 2004)。黄承标等(1993)尝试用平均木法测定树干径流,按样地林木的平均胸径、平均树高以及有代表性的枝下高、林冠疏密度、分枝角度中选择一株平均木,1株平均木法与14株加权平均木法相比较,测定的平均精度在87.3%~99.0%之间变动,平均测定精度达98.2%。卢俊培和曾庆波(1987)尝试在热带林中按林木重要值选定样树。刘曙光(1990)认为由于森林冠层对降水的再分配作用,要准确测定森林的树干径流量,单层林中可采用样树法或全样地法,而复层林中则必须采用全样地法(万师强和陈灵芝, 2000)。

郭景唐(1994)提出按照树枝特征函数选取样树。他认为,干流量与树枝特征函数的相关程度要比干流量与胸径的相关程度显著得多。林木的树枝特征函数揭示了干流形成的实质,在选择干流观测树时,如按树干特征函数的大小来选取,



将会较按径阶选取所测结果更接近实际,但该方法工作量很大,也忽视了树皮的光滑程度对干流的影响(王佑民,2000a,2000b)。

### 1.2.2 树干径流的影响因子

树干径流水量的影响因子包括生态区(气候条件)、气候变化(Crockford *et al.*, 1996; Levia and Herwitz, 2000)、季节变化(Neary and Gizyn, 1994)、降雨量的频率、持续时间、雨量和雨强(Tang, 1996; Crockford and Richardson, 2000; Koichiro *et al.*, 2001; 李海涛等, 1997; 鲍文等, 2004), 以及树种差异(Durocher, 1990; Návar *et al.*, 1999)、林冠面积(Feller, 1981; Peterson and Rolfe, 1982; Martíne-Meza and Whitford, 1996) 林冠结构和林分密度的三维空间变化(Durocher, 1990; 黄承标和梁宏温, 1994)、邻近树木的控制程度(Crockford and Richardson, 1990a; Sinun *et al.*, 1992)、树皮光滑程度(Crockford and Richarson, 1990a; Návar, 1993; Aboal *et al.*, 1999; Návar *et al.*, 1999)等。范世香等(1990, 1992)对树干径流进行了单因子模拟实验,发现降雨强度对干流的影响不明显,而降雨量对干流的影响较大,是对干流量具有最大贡献的主导因子。在不同树种之间,树皮的粗糙程度,枝叶的干湿程度,树枝对于树干的分枝角度和叶子的大小,是造成树干流差异的主要原因(Aboal *et al.*, 1999)。阔叶树种的干流量通常高于针叶树种,这个差别还与树龄有关。叶面积指数对干流量的影响明显,同时叶面积指数可以消除不同树种之间枝叶多寡影响干流量的差别(范世香等, 1990, 1992)。对于同一树种,林冠层的厚度及枝下高对干流量影响显著。在不同森林类型间,树干流量的变化受到气候模式、气象条件和树种组成的影响(Levia and Frost, 2003)。一般在降雨量达 3.0 mm 以上时出现树干流,并有随降雨量增加而增加的趋势(Harris, 1997; Paltineanu and Starr, 2000; Xiao *et al.*, 2000; Koichiro *et al.*, 2001; 刘世荣等, 1996; 鲍文等, 2004), Crockford and Richardson (2000)认为除了大风及雨强较大的天气状况外,树干径流量随林外雨强的增加而减少;连续的降雨事件由于使树干优先流的通道超载而使树干径流量减少。树干流量也受到风速(Tang, 1996; Koichiro *et al.*, 2001)和风向(Herwitz and Slye, 1995)的影响。在降雨特征一定的情况下,林冠持水能力是决定干流产生的关键因子。张一平(2003)在对西双版纳热带季雨林的

研究中，认为树干径流总量随着树木径级和树冠面积的增大而减小。而曾庆波（1994）、Potter（1991）的研究中则认为树干体积与树干径流的大小之间没有明显的关系。

### 1.2.3 树干径流模型

目前预测特定地区林分树干径流量的模型很多，主要是一些经验模型，半经验半理论模型，主要反映一次降雨或几次降雨的截留、穿透、干流量的多少。多数研究认为树干径流量与降雨量直线相关，即  $S = a + bP$ ，而干流率与降雨量则为幂指数或双曲线关系，如王彦辉根据对刺槐林的 134 组数据回归分析得出刺槐干流率  $S\%$  与林外降雨量  $P$  的回归式为：

$$S\% = 0.027P^{1.185};$$

董世仁等对油松干流率回归得出：

$$S\% = 11.9576 - 32.246 / P \quad (\text{王佑民, 2000a, 2000b})。$$

对于以上三个量随着降雨的动态响应过程及其规律，韩绍文等（1992）、裴铁璠等（1993）通过在实验室里进行人工降雨，以降雨强度作为控制量，干流流量作为系统输出，研究了二者之间的变化关系，提出下面的动态响应模型：

$$\alpha \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + cx(t) = u(t)$$

$x(t)$  表示干流流量， $u(t)$  表示降雨强度。该模型，给出了瞬时总量，还给出了瞬时强度，在计算机上逼真地模拟了穿透和干流过程。

### 1.2.4 树干径流对物质循环的影响

森林生态系统的水文过程是连接土壤-植被-大气连续体物质循环的一个关键环节，降水通过森林的截留后，其化学性质发生明显地变化。影响截留降水化学特征的两种主要机制是：（1）林木表面干沉降物的洗脱；（2）林冠代换作用，既植物养分的淋溶和降水中的离子被冠层所吸收（张一平等，2003）。树干流是引起部分化学物质输入土壤的途径之一（Crockford and Richardson, 1990; Neal *et al.*, 1990, 1993; Haworth and McPherson, 1995; Chang and Matzner, 2000; Matschonat and Falkengren-Grerup, 2000; 陈步峰等，1994），可以促进物质循

环,影响养分的再分配。大多数研究表明,树干径流表现出强烈的酸化和养分富集现象。甘健民等(1996)在云南哀牢山的研究中发现,除N元素外的其他P, K, Ca, Mg这四种元素的含量树干径流均大于大气降雨。刘云国等(1996)在对日本桐生自然保护区的混交林的研究中发现,树干径流的pH值小于大气降水,金属元素的浓度高于大气降水。樊后保等(2000a, 2000b)研究发现,在人工杉木林中树干流的养分富集现象十分明显,降水量越大,养分含量越低。石盛莉等(2001)在庐山森林生态系统的研究中发现树干径流中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量高于大气降水,在针叶林树干径流中 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量高于阔叶林。辛颖等(2006)在对黑龙江东部山地兴安落叶松人工林的研究中发现,大气降水、穿透水、树干径流和地表径流pH值的变化都不甚明显,变异系数都较低,穿透水和树干径流中K、Ca元素的淋溶量明显高于其他元素,且树干径流各元素的净淋溶和淋溶系数均高于穿透水。刘菊秀等(2000, 2003)的研究中,也发现在针叶林和阔叶林中,树干径流对酸的沉降作用不同。

影响树干流的化学性质的因子包括植物种类(Herwitz, 1991; 李海涛等, 1997)、林冠的结构(Crockford *et al.*, 1996; Levia and Herwitz, 2000)、季节变化(Neary and Gizyn, 1994)、气候变化(Crockford *et al.*, 1996; Levia and Herwitz, 2000)。

### 1.3 树冠截留研究

林冠截留是森林水文研究的热点之一。多年来国内外许多专家、学者对此做了大量研究,现已清楚地将其划分为降雨过程中湿润林冠上的雨水蒸发、雨后林冠蓄水蒸发和树干蓄水蒸发。(张光灿等, 2000)

#### 1.3.1 林冠截留的测量方法

树冠截留的测算一般采用水量平衡法,林外降水量除去林内降水量和树干径流量即为林冠截留量。

$$I = P - T - S$$

式中, I 为树冠截留; T 为穿透雨; S 为树干径流。

由于树干径流量非常微小,常常忽略不计。

### 1.3.2 林冠截留的影响因子

植被对于降雨截留和再分配的机制是非常复杂的（Gash and Monton, 1978; Gómez *et al.*, 2001）。林冠截留主要受叶的大小、形状、方向（Sobieraj *et al.*, 2002; 刘世荣等, 1996）、林冠结构和林分密度（Watanabe and Mizutani, 1996; Domingo *et al.*, 1996, 1998; 范世香等, 2000）、风对林冠的扰动（Aston, 1979）、雨中和雨后蒸发需求（Mizutani *et al.*, 1997）的共同影响。

林冠截留与各影响因子之间的量化研究, 目前主要集中在林冠截留与林分组成及大气降水特征的相互关系上。不同森林类型的截留率明显不同。从叶片形状来说, 针叶树种的截留降水率较大, 阔叶树种次之（马雪华, 1993; 刘世荣等, 1996）; 从林木生长规律来说, 常绿树种较大, 落叶树种次之, 常绿阔叶林对暴雨的截留率为5.0%-20.0%, 对于少量的降雨, 截留率可以高达50.0%, 甚至全部降雨量, 截留率变化范围10.0%-20.0%（Cheng *et al.*, 2002）, 热带山地雨林截留率为14.0%（周光益, 1995; 陈步峰等, 1998）, 温带针叶林为20.0%-40.0%（闫俊华, 1999）; 从林冠结构的复杂程度来说, 天然林较大, 人工林次之。大部分研究认为, 树冠截留量与降水量呈正相关关系, 即随着降雨量的增加, 林冠截留量增加（Domingo *et al.*, 1998; Crockford and Richardson, 2000; 唐常源, 1992; 曾庆波, 1994; 谢春华等, 2002; 巩合德等, 2005）, 这种关系在降水初始或雨量很小时表现十分明显, 但截留率随着降水量的增加而减少（Hall, 2003）, 随着降雨时间的增加, 林冠截留量逐渐达到最大持水量, 即饱和点（姜志林等, 1994; 常学向, 2002; 谢春华等, 2002; 周择福等, 2003）。降水量大小和降水频次的改变比雨强对林冠截留产生的影响更大（Hall, 2003）。

### 1.3.3 树冠截留模型

自从 Horton (1919) 通过一个方程描述了截留损失, 该方程在降雨量和树冠贮水能力中提到了蒸发率, 之后许多研究者进一步改进了他的研究（Calder, 1986; Gash, 1979; Gash *et al.*, 1995; Massman, 1983; Robin, 2003; Whitehead and Kelliher, 1991）。各种各样的树冠截留模型可以分为三种类型: 经验模型（在实测数据的基础上, 以概率论和数理统计为手段建立起来的统计或回归模型。这类模型以一元的最多, 描述的是截留量与大气降雨量的关系, 也有引入其它影响

林冠截留的因子而建立的多元模型) (Czarnowski, 1968; Jackson, 1975; Dykes, 1997; 董世仁等, 1987; 严顺国, 1989; 邓世宗和韦炳斌, 1990; 杨令宾, 1993; 罗天祥, 1995; 曾思齐, 1996; 吴厚水等, 1998; 谢春华等, 2002), 半经验理论模型 (在截留机制理论分析的基础上, 建立起截留模型的基本形式, 同时为计算和应用方便做出一些简化和假设, 利用实测数据建立起求解某些参数的经验公式而构建的模型。描述的是影响林冠截留的各种因子和截留量的关系) (Rutter *et al.*, 1971; Gash, 1979; Watanabe and Mizutani, 1996; 刘曙光, 1992) 和理论模型 (光传播理论模型和电路暂态理论模型) (张学培等, 1997; 裴铁璠和郑远长, 1996a, 1996b), 具有一定理论基础和使用价值的模型是最近三、四十年出现的 (Zhang *et al.*, 2000)。

在以前的研究中, 树冠截留量、穿透雨量和树干径流量大多是通过定位观测和定量分析获得 (经验模型) (裴铁璠等, 1993)。几乎没有对树干截留过程变化与降雨强度, 基于林分特征的植被常数, 和自然降水过程的勘测研究 (Asdak *et al.*, 1998b)。因此, 几乎没有可以直接用于建立降雨径流分布模型的研究结果。然而在实验室, 可以控制降雨强度和植被特征如叶面积指数 LAI), 精确的测量穿透雨量和树干径流量, 这使得构建模型在技术上成为可能 (Wang *et al.*, 2005)。目前, 在山坡、集水区、区域和全球尺度上的水文循环模型中, 常用有效降雨 (穿透雨和树干径流) 和树冠截留作为参数 (Ramrez and Senarath, 2000)。

在各种模型中, 修正后 Gash 的模型具有广泛的应用范围, 而且在不同类型森林中具有较好的应用效果 (Gash *et al.*, 1995; Carlyle-Moses and Price, 1999)。树冠饱和和所需降雨量  $P'_G$ :

$$P'_G = -\frac{\bar{R}S}{\bar{E}} \ln \left[ 1 - \frac{\bar{E}}{\bar{R}(1-p-p_t)} \right]$$

式中,  $S$  为蒸发为 0 时, 降雨和穿透雨结束后, 残留在树冠上的水量;

$p$  为未接触树冠直接落到林地内的降雨率 (通常与树冠覆盖度之和为 1) ;

$p_t$  为树干径流率;

$\bar{E}$  为降雨期间平均蒸发率;

$\bar{R}$  为平均降雨率。

## 1.4 展望

目前,森林生态系统水量平衡及森林水文各要素功能规律的研究已经取得了一定的成果,所采用的方法逐渐趋于成熟。但是在森林水文功能研究中,大多采用比较分析方法,同时缺少长期水文观测数据,而且关于森林生态系统结构、过程对森林水文调节功能的影响机制研究不够。

在未来的研究工作中,先进的方法和仪器将有利于进行长期水文监测,同时小径流场、小集水区、小流域和大流域等不同尺度上的水文观测相结合,便于全面探索森林水文变化规律,理解全球变化对森林水文的影响,将水文研究成果与实际应用更好的联系起来,找到其普遍性规律和统一性理论。

常绿阔叶林作为分布在亚热带地区的一种地带性植被类型,它在中国的分布最广,面积最大,类型最为复杂多样。其分布区又处于中国人口最为密集,经济最为发达的区域,在长期的人类干扰下,中国常绿阔叶林面临着分布面积日益缩小,群落类型和物种数量逐步减小的不利局面。因此对于常绿阔叶林生态水文功能的研究还需要进一步深入,尤其是对水质影响的机理研究。森林与水质之间的关系复杂,不仅受森林种类组成、土壤、地质、气候等因素的影响,而且受到人类各种活动(土地利用方式、采伐、火烧、大气污染等)干扰,因而森林对水质影响的机理研究显得更加重要。

## 第二章 研究内容和方法

### 2.1 研究目标和思路

#### 2.1.1 研究目标

本研究以浙江天童常绿阔叶林中两个主要群落类型为研究对象，测定了乔木层的生态水文特征，研究了乔木层建群种和优势种对水量平衡和水分循环的作用。通过对大气降雨的监测，对穿透雨、树干径流和树冠截留的观测，以及对大气降水、穿透雨和树干径流中化学元素的测量，探讨栲树和木荷在大气降水再分配以及养分循环过程中的作用。探索森林与水的各种关系，研究并揭示常绿阔叶林生态系统的各种水文生态功能，对今后区域森林资源的经营管理、小流域综合治理以及生态环境建设提供科学基础。

#### 2.1.2 研究内容

##### (1) 常绿阔叶林乔木层结构特征

比较常绿阔叶林两个群落中乔木层的物种组成，树木特征，分析不同群落乔木层结构特征的差异。

##### (2) 常绿阔叶林乔木层和凋落物层持水特征

测量常绿阔叶林树冠、树干和凋落物层的持水能力和吸水速率，比较两个群落建群种和优势种持水特征的差异，分析冠层结构对其持水能力的影响。

##### (3) 两种群落类型对大气降水再分配的水文调节特征

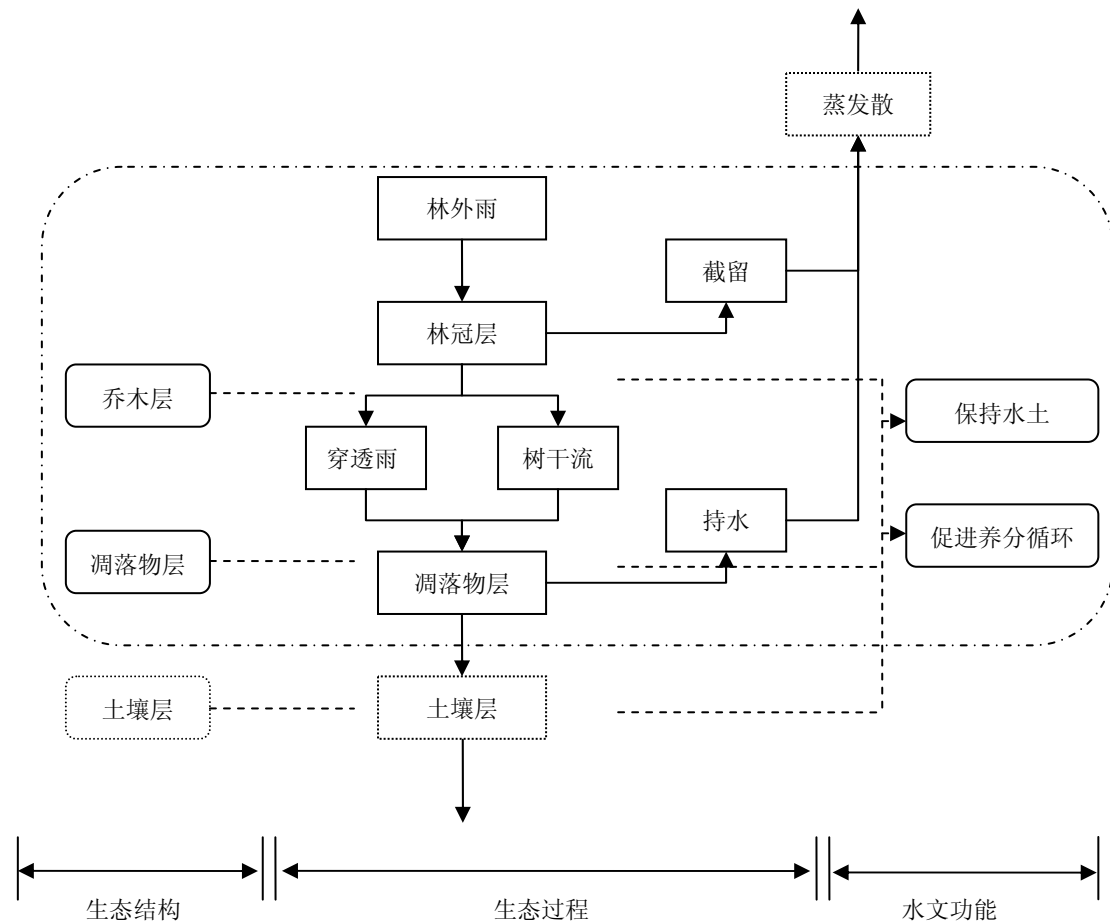
从林冠层降雨再分配的水文过程出发，研究不同群落类型间穿透雨、树干径流和树冠截留的时间和空间变化特征及其影响因素，比较不同类型间水分分配的差异，揭示其植被层水文调节功能。

##### (4) 大气降水再分配过程对化学元素循环的影响

从伴随大气降水的化学元素循环过程出发，研究大气降水、穿透雨和树干径流中硝态氮和可溶性正磷酸盐的含量随时间的变化，分析不同树木在养分循环过程中的作用。

### 2.1.3 研究思路

森林通过其独特的结构特征，影响林冠降雨再分配、林下降雨的空间分布、林冠层和凋落层持水能力等一系列相关水文过程，从而达到保持水土和促进养分循环的作用。在不同森林生态系统中，由于树种配置、枯枝落叶层的厚度的差异，导致不同森林类型间呈现出不同的生态水文调节功能，因此从森林生态系统的结构，水文过程与水文调节功能实现的角度出发，研究常绿阔叶林不同群落水文调节功能的机制。本研究技术路线如图 2-1。



注：-----内为本文研究范围

图 2-1 研究技术路线

Fig.2-1 Technological route of research

### 2.2 研究地点概况

研究地点选在浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站（以下简称：天童站）（如图 2-2），位于浙江省宁波市鄞州区东部天童国家森林公园(29°48'N,



121°47'E), 面积 349hm<sup>2</sup>, 最高峰为 653.3m。本区属典型的亚热带季风气候, 全年温和多雨, 四季分明, 据鄞县气象台 (29°31'N, 121°20'E) 记录 (1990-2007 年), 年平均气温 17.6℃; 最热月为 7 月, 平均气温 29.2℃, 极端最高气温 41.2℃; 最冷月为 1 月, 平均气温 5.7℃, 极端最低气温 -6.5℃, ≥10℃ 的活动积温为 5838.4℃, 无霜期 287.1 天。年平均降雨量为 1433.7mm, 多集中在夏季 (6~9 月), 占全年降水量的 33%~61%, 冬季 (12~2 月) 冷而干燥, 雨量仅占全年的 6%~26%, 春季雨量一般大于秋季。因受梅雨峰系和台风影响, 年内降水有两个高峰, 各在 5、6 月和 7、8 月。年平均相对湿度达 82%, 变率不大, 各季之间最大变率在 5% 以下。年蒸发量 1320.1mm, 小于降水量, 只有 7~10 月蒸发量稍大于降水量。雨量充沛, 热量充足, 水热同季有利于植物生长。土壤为山地黄红壤, 成土母质主要是中生代的沉积岩和部分酸性火成岩及石英砂岩和花岗岩残积风化物。土层厚薄不一, 一般在 1 m 左右, 质地以中壤至重壤为主, 全氮和有机质含量较高, 一般在 0.2%-0.4% 和 3%-5% 之间, 土壤 pH 值多为 4.5-5.0 (宋永昌等, 1995; 张庆费等, 1999; 丁圣彦和宋永昌, 1999; 丁圣彦, 1999, 2001)。

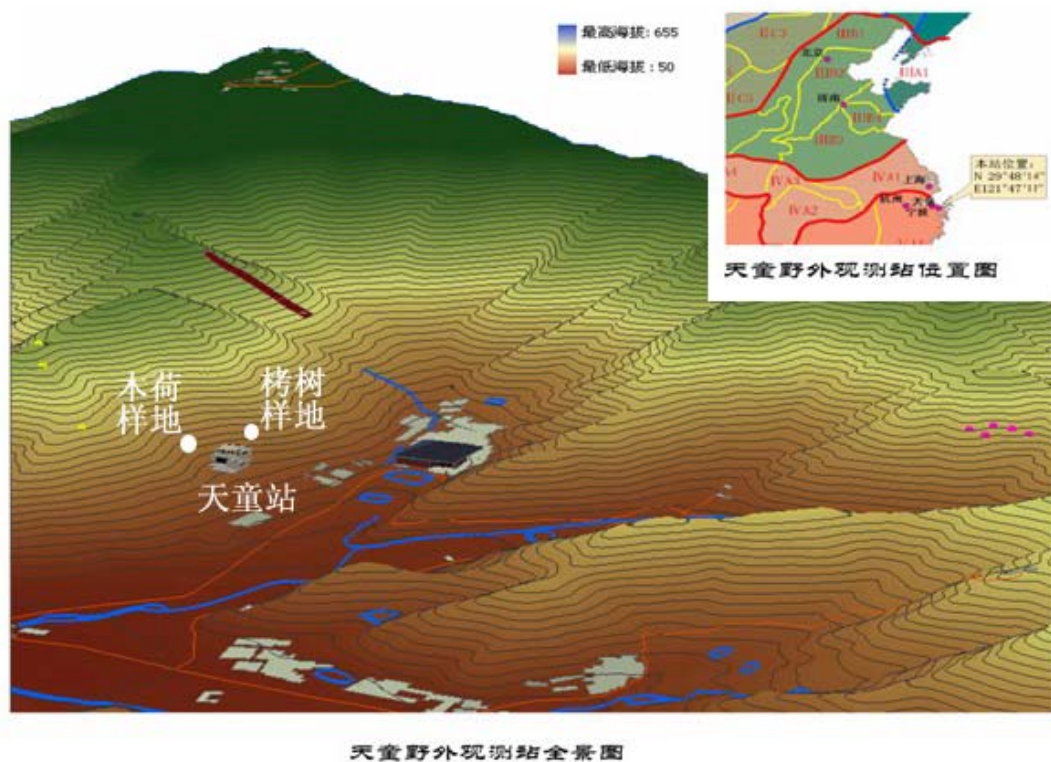


图 2-2 天童站全景及样地位置图

Fig.2-2 Panorama and plot location map of Tiantong

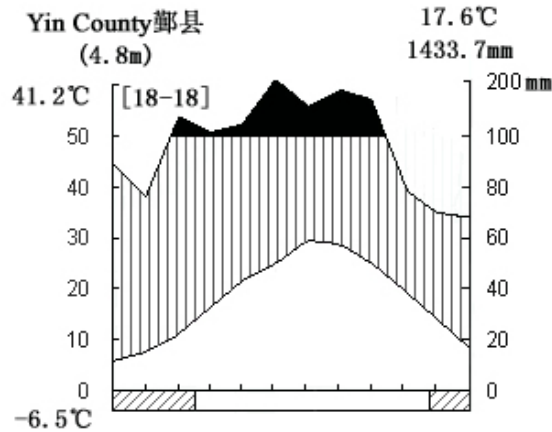


图 2-3 鄞县，近天童气候图解（1990-2007）

Fig.2-3 Climate diagram for Yin County, near Tiantong(1990-2007)

天童站所处地区具有鲜明的区域代表性，该地区属于浙闽山地常绿阔叶林生态区，位于浙闽丘陵东部。该生态区东北部丘陵山地海拔多在 500m 左右，是典型常绿阔叶林的分布地区，其组成种类北部地区中海拔以甜槠（*Castanopsis eyrei*）、木荷（*Schima superba*）为代表（吴征镒，1980），低海拔以米槠（*Castanopsis carlesii*）、木荷、青冈（*Cyclobalanopsis glauca*）等为优势种，伴生种类有绵柯（*Lithocarpus henryi*）、红楠（*Machilus thunbergii*）、黄丹木姜子（*Litsea elongata*）以及南酸枣（*Choerospondias axillaris*）、枫香（*Liquidambar formosana*）等，渐向西南则种类逐渐增多，有以栲树（*Castanopsis fargesii*）、云山青冈（*Cyclobalanopsis nubium*）为主的常绿阔叶林。丘陵山坡大面积分布马尾松（*Pinus massoniana*）、映山红（*Rhododendron simsii*）群落，在受人为影响较轻而土壤条件较好的山坡谷地，混生有杉木（*Cunninghamia lanceolata*）和阔叶树。常见的阔叶树包括苦槠（*Castanopsis sclerophylla*）、青冈、石栎（*Lithocarpus glaber*）、木荷等（吴征镒，1980）。

### 2.3 研究样地概况

亚热带常绿阔叶林分布地区，尤其在分布区东部，人口稠密、农垦悠久，森林采伐频繁，因而使得这一地区的常绿阔叶林大都处于人为干扰状态下的次生演替过程中。天童地区的森林植被在这种不断地干扰下，形成了一系列的次生演替类型（张庆费等，1997），其中栲树林和木荷林为次生演替系列中接近顶级的成

熟群落。通常认为栲树林为次生演替的顶级群落，其林地特征、物种组成与木荷林均存在明显的差异，因此本研究选取演替系列中两个主要的成熟群落，对天童地区常绿阔叶林的森林水文特征进行观测，比较两个群落水文功能间的差异。

### 2.3.1 栲树群落

栲树(*Castanopsis fargesii*)属壳斗科(Fagaceae)栲属，常绿乔木，为亚热带常绿阔叶林恢复演替顶级群落优势种。栲树群落位于天童站常绿阔叶林综合观测场，海拔高度200m，坡度39°，坡向SE30°，郁闭度0.90(张庆费等, 1997, 1999)。该观测场位于天童国家森林公园天童寺旁边(如图2-2)，是保护比较完整的森林核心地带，其植被类型为本地区低海拔地区典型的地带性植被—亚热带常绿阔叶林。观测场周围为公园内处于不同演替阶段的常绿阔叶林，森林公园外为各种人工林和次生林。

植被类型为亚热带常绿阔叶林，是亚热带东部低海拔地区的顶极群落类型，以栲树、米槠和木荷为标志种。群落高20-25米，群落结构可分为乔木层、灌木层、草本层和层间植物，其中乔木层可分为3个亚层(I, II, III)，群落盖度约90%。乔木层，主要以栲树组成，另有少量的木荷和枫香，层高度为15~25m，盖度90%。灌木层，层高度为1.5~5m，盖度100%，主要以连蕊茶、细齿柃和羊舌树组成，另有一些栲树幼树和交让木，第三层为草本植物层。群落地表凋落物较厚，分解较快，土壤肥沃。

综合观测场总投影面积2500m<sup>2</sup>，实验样地位于观测场一角，面积为25×25m<sup>2</sup>。样地内成年栲树共31株，平均高度为20m(10-25m)，平均胸径为26.1cm(14.8-40.1cm)；成年木荷共11株，平均高度为16.8m(8-23m)，平均胸径为14.6cm(10.3-21.5cm)。

### 2.3.2 木荷群落

木荷(*Schima superba*)属山茶科(Theaceae)木荷属，为亚热带常绿阔叶林恢复演替群落优势种。木荷群落位于天童站1号辅助观测场(图2-2)，海拔高度130m，坡度25°，坡向SE40°，郁闭度0.95(张庆费等, 1997, 1999)。该观测

场保护较为完整,其植被类型为本地区低海拔地区较典型的地带性植被—亚热带常绿阔叶林(次生林)。

群落高 15-20 米,群落结构可分为乔木层、灌木层、草本层和层间植物。乔木层,主要以木荷为主,另有少量的马尾松、栲树、石栎和苦槠,层高度为 12~20m,盖度为 80%。灌木层主要以马银花、山矾和窄基红褐柃为主,伴有老鼠矢、黑山山矾和连蕊茶等常绿灌木,层高度为 1.5~5m,盖度 100%,第三层为草本植物层。群落中枯枝落叶较厚,分解较快,土壤较肥沃。

1 号辅助观测场总投影面积为 2500m<sup>2</sup>,实验样地位于 1 号辅助观测场一角,面积为 25×25m<sup>2</sup>。样地内成年木荷共 60 株平均高度为 18m (12-24m),平均胸径为 16cm (8-27cm);成年栲树共 3 株,平均高度为 18.3m (17-20m),平均胸径为 27cm (26.4-26.9cm)。

## 2.4 研究方法

### 2.4.1 群落调查

对每个样地乔木层,采用每木调查的方法分别测定样地内树木的高度、胸径、冠幅、枝下高、枝干夹角;灌木记录林下植物的种类、高度、株数和灌丛直径。

### 2.4.2 植物持水特征测定

- (1) 在每个样地,按径阶选择 3 株标准木,采集树冠上枝条。
- (2) 在取来的枝条中,将枝条和叶片分离,取出部分,称鲜重 ( $W_f$ ), 85℃烘至恒重后称干重 ( $W_d$ ), 3 个重复。按下式计算枝叶自然含水量 (Water Content, WC %):

$$WC(\%) = \left(1 - \frac{W_d}{W_f}\right) \times 100 \quad (1)$$

式中,  $W_f$ , 鲜重, g;  $W_d$ , 干重, g。

- (3) 另各取一份枝条和叶片,仔细擦掉灰尘,称鲜重,然后用蒸馏水浸泡直到恒重(叶约 24h, 枝条 24h),然后称重得到饱和重 ( $W_s$ ), 3 个重复,按下式计算植物枝条和叶片的饱和亏 (Water Saturation Deficit, WSD %) 和枝或叶的饱和持水量 (Saturation Moisture Capacity, SMC%)。

$$WSD(\%) = \frac{W_s - W_f}{W_s - W_d} \times 100 \quad (2)$$

$$SMC(\%) = \frac{W_s - W_d}{W_s} \times 100 \quad (3)$$

式中,  $W_f$ , 鲜重, g;  $W_s$ , 饱和重, g;  $W_d$ , 干重, g, 可根据公式(1)计算得出。

(4) 将剩余的枝条和叶片分离, 仔细擦掉灰尘, 每个样地的枝条和叶片各分为 24 份, 分 8 组, 每组 3 个重复, 称量鲜重 ( $W_0$ ) 作为起始重量, 然后分别放入容器中浸泡, 8 组浸泡时间分别 5min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h, 16h, 达到计划时间后取出, 滴干表面水分后称重 ( $W_i$ ,  $i=1\sim 8$ ), 然后烘干至恒重, 称干重  $W_2$ 。计算枝条和叶片的吸水量(Water Absorption Capacity, WAC g/g)和吸水速率(Water Absorption Rate, WAR  $g/g \cdot h^{-1}$ )。每份枝条选择细的、中等的和较粗的 3 种搭配在一起, 尽量用个较完整的长枝, 称过鲜重后, 将断口处用胶水封好, 粘住后再称一次鲜重, 差值为所涂胶水重量, 之后称量得到的重量去除此差值即为最终的吸水重。

$$WAC(g/g) = \frac{W_i - W_0}{W_2} \quad (4)$$

$$WAR(g/g \cdot h^{-1}) = \frac{W_i - W_0}{W_2 \times \Delta t} \quad (5)$$

式中,  $W_0$ , 鲜重, g;  $W_i$ , 吸水后重, g;  $W_2$ , 干重, g;  $\Delta t$ , 吸水时间, h。

### 2.4.3 凋落物持水特征实验

- (1) 在两个群落内用  $\Phi 30$  环刀采集地表凋落物, 分别测量新鲜凋落物层和强烈分解凋落物层的厚度, 分层采集, 共 6 个重复。
- (2) 将采回的凋落物各取部分, 称鲜重,  $80^\circ\text{C}$  烘干至恒重, 称干重。
- (3) 将每个样地剩余的新鲜凋落物仔细去除表面附着的土壤后混匀, 每个样地的样品分为 3 个重复, 在浸泡 0.5h, 1h, 1.5h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h, 12h, 16h 时, 取出放置到不滴水时称重, 然后继续浸泡直至 24h, 按枝叶持水特征计算方法计算凋落物饱和亏、吸水量和吸水速率。

#### 2.4.4 大气降水的观测

在距离林缘 50m 处的开阔地设置翻斗式自记雨量计（CR2 型，0.2mm，记录间隔 15min）一台，对林外降雨进行自动观测记录。另放置一个承接器，下连储水桶，收集大气降水。另在开阔地设有一台气象站（HOBO）记录湿度、温度、风速、风向和降雨量等气象因子。

文中使用的降雨记录，2007 年 7 月 25 日至 8 月 31 日和 2008 年 1 月 1 日至 3 月 6 日为气象站记录，2007 年 9 月 1 日至 12 月 31 日为 CR2 型翻斗雨量计记录，2008 年 3 月 8 日至 3 月 31 日为人工测量。通过 t-检验，3 种记录方法间无显著差异。

表 2-1 降雨观测方法差异

Tab.2-1 Difference among three methods of measuring rainfall

	t	df	P
$P_{\text{气象站}} - P_{\text{雨量计}}$	-1.84	11	0.09
$P_{\text{人工测量}} - P_{\text{雨量计}}$	1.43	5	0.21

#### 2.4.5 穿透雨的测定

在每个样地内，沿坡向分两列，放置穿透雨承接器（面积  $30 \times 40 \text{cm}^2$ ），每列 4 个，每隔 5m 一个。其中 4 个用 PVC 管与放置在样地边缘的与 CR2-D 型多通道数据采集系统联接的翻斗雨量计（0.2mm 和 1mm，记录间隔 5min）相连，接口处密封，2007 年 7 月开始进行连续自动记录。另 4 个也连接 PVC 水管与放置于样地外边缘的聚乙烯储水桶，为避免沿水管流下的水所造成的误差，用塑料布包裹水管覆盖在储水桶的入口位置。为了避免草本植物对穿透雨的影响，承接器距离地面不低于 0.7 m。在承接器出水口处安装圆筒形筛网，防止凋落物及昆虫进入，定期清理承接器内的凋落物。2007 年的 7 月、8 月、10 月、11 月和 2008 年 1 月、3 月，雨后测定穿透雨体积（ $\text{cm}^3$ ），然后换算成雨量深（mm），并收集穿透雨样品。

#### 2.4.6 树干流的测定

采用薄管收集法 (Durocher, 1990)。样树按林地径级和数目的多少来划分, 栲树群落共选择栲树 11 株, 木荷 3 株, 木荷群落共选择木荷 14 株, 石栎 3 株, 栲树 3 株, 在树干基部以上 100-130 cm 间, 安装 ST-H 型 (缠绕式, 胸径大于 20cm) 和 ST-Y 型 (漏斗式, 胸径小于 20cm) 树干径流采集器 (阮士松, 2006), 然后将栲树群落中 4 株栲树, 木荷群落中 4 株木荷分别与翻斗雨量计 (同穿透雨) 相连, 其余用 PVC 水管导入样地外边缘的储水桶内, 水管与储水桶相连位置同样包裹塑料布, 防止沿水管流下的水造成误差。与穿透雨同期观测, 雨后测量树干径流体积 ( $\text{cm}^3$ ), 换算成雨量深 (mm), 并收集树干流量样品。树干流计算公式 (曹云等, 2007b) :

$$SF = \sum_{i=1}^n \frac{C_n \times M_n}{S \times 10^3}$$

SF 为树干径流 (mm) ;

n 为树干径阶数;

$C_n$  为第 n 径阶树干径流 ( $\text{cm}^3$ ) ;

$M_n$  为第 n 径阶的株数;

S 为样地面积 ( $\text{m}^2$ ) 。

树干径流漏斗比率计算 (Gómez *et al.*, 2002; 曹云等, 2007b) :

$$FR = 10 \times V / (B \times P)$$

FR 为树干径流漏斗比率;

V 为树干径流体积 ( $\text{cm}^3$ ) ;

B 为树干断面积 ( $\text{cm}^2$ ) ;

P 为降雨量 (mm) 。

#### 2.4.7 截留量计算

采用水量平衡法, 计算截留量(I)。计算公式:

$$I = P - (TF + SF)$$

式中，I 为林冠截留量(mm)；P 为林外降雨量(mm)；TF 为穿透雨量(mm)；SF 为树干流量(mm)。

#### **2.4.8 水样 pH 值的测定**

采用 PHB-3 pH 计，测量大气降水、穿透雨和树干径流 pH 值，定期用精密 pH 试纸进行校准。

#### **2.4.9 水样中硝态氮含量的测定**

采集的水样，用硫酸酸化到  $\text{pH} < 2$ ， $4^{\circ}\text{C}$  保存，采用酚二磺酸光度法（国家环境保护总局等，2002）在 24h 内进行测定。酚二磺酸光度法为经典的硝态氮测量方法，广泛应用于对土壤和水中硝态氮的测定（黄绍敏等，2000a，2000b；刘方春等，2005；闫志英等，2006）。

#### **2.4.10 数据分析**

使用传统统计学(SPSS 15.0)统计软件对数据进行分析。



### 第三章 群落乔木层特征和持水特征

林冠持水能力是影响林冠截留降雨的重要因素之一。其大小由降雨特征和林冠特征决定，在特定的降雨情况下，由林分物种组成、林冠结构特征以及林冠中叶、枝、茎的持水性能所决定（王馨和张一平，2006）。林地枯落物层是森林水文效应的第二层次，其水源涵养效能的强弱及拦蓄大气降水的多少与本身的积累数量、分解状况和自然含水量有关。林下枯落物的存在，不仅能促进森林生态系统的物质循环和养分平衡，而且在水土保持、水源涵养等方面具有较重要作用。森林枯落物层可以缓冲雨滴动能，减少雨滴击溅造成的土壤表层结构破坏和土壤侵蚀。同时，枯落物层具有较土壤更多更大的孔隙，能够吸持水分，促进下渗，迟滞径流产生时间，减少表层径流量，减轻径流侵蚀程度，并对土壤水分的补充和植物水分的供应产生影响。因此，研究林下枯落物层持水特性就成为森林生态系统研究中的重要内容（龚伟等，2006）。本章对天童常绿阔叶林栲树群落和木荷群落乔木层的组成和结构特征进行了比较分析，探讨了林冠和林下枯落物的持水能力，为深入研究林地持水和林冠截留的基础。

#### 3.1 群落乔木层特征

采用空间代替时间的方法，即以胸径级代替年龄分析种群的结构，进而反映出群落的结构和发展趋势（达良俊等，2004）。在两个群落中调查了胸径>5cm的乔木个体，调查结果如下。

木荷群落的乔木密度明显大于栲树群落，栲树群落乔木的胸径和树高均显著高于木荷群落，且郁闭度也高于木荷群落（表 3-1）。

表 3-1 不同群落类型乔木层特征

Tab. 3-1 Characteristics of different communities (values are presented as the mean±std.)

	密度 (棵·hm <sup>-2</sup> )	胸径 (cm)	高度 (m)	郁闭度
栲树群落	816	24.9±8.0	19.6±4.0	0.85
木荷群落	1200	16.9±5.0	17.4±3.4	0.80

栲树群落中（图 3-1 a），栲树的个体数目约为木荷个体数目的 3 倍，占群落中乔木总个体的 68.09%。栲树的胸径分布范围很大，呈现不对称的单峰型，以中等径阶 20-25cm 的个体数目最多，占群落总个体的 23.40%，随着径阶的增大个体数目逐渐减少，25-30cm 和 30-35cm 个体数分别占群落总个体的 17.02%和 12.77%，不存在 <15cm 径阶个体分布；个体数 20-25cm > 25-30cm > 30-35cm > 15-20cm > >35cm。木荷的胸径分布呈现间歇型，10-15cm 和 20-25cm 两个径阶个体数目最多，各占群落总个体的 8.51%，不存在 15-20cm，25-30cm 和 >35cm 径阶的个体；个体数 10-15cm = 20-25cm > 30-35cm > 5-10cm。栲树群落中总体的胸径分布范围较大，各径阶均有个体分布，小径阶的个体比例少于大径阶的个体比例。

木荷群落中（图 3-1 b），大部分乔木为木荷，占群落中乔木总个体的 80%，栲树仅为 4%。木荷的胸径分布也呈现不对称的单峰型，以 10-15cm 径阶的个体数最多，5-10cm 的个体数最少，不存在 >30cm 的个体；个体数 10-15cm > 15-20cm > 20-25cm > 25-30cm > 5-10cm。栲树的胸径均分布在 25-30cm 范围内。整体上，木荷群落胸径的分布情况与木荷个体的胸径分布情况相似。

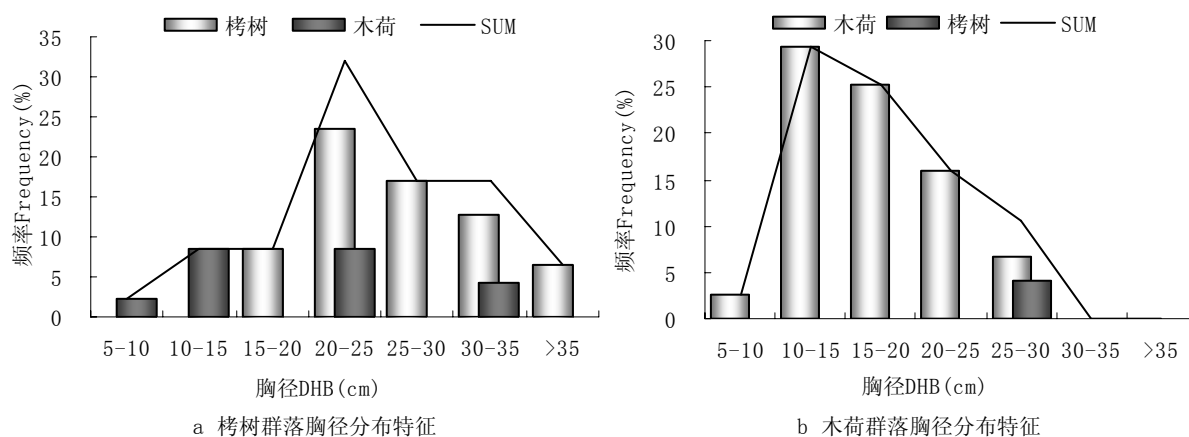


图 3-1 不同群落树木胸径分布特征

Fig.3-1 Distribution of diameter at breast height (DBH) in two communities

通过前人建立的天童常绿阔叶林主要组成树种生物量回归模型（杨同辉，2005；宋永昌等，2007）推算群落中栲树和木荷枝和叶的生物量。在栲树群落中胸径为 20-35cm 之间的个体对生物量的贡献最大。与胸径的分布不同的是，20-35cm 之间的 3 个胸径阶栲树的生物量差距不大，总生物量分别在胸径 20-25cm

和 30-35cm 出现了两个峰值，小径阶个体对生物量的贡献较小，大径阶个体虽然数目不多，但对生物量的贡献较大。

木荷群落中生物量在不同径阶的分布情况与个体数目的分布情况相反，10-15cm 径阶的个体数目最多，但对生物量的贡献小于个体数目相对较少的 15-20cm，20-25cm 和 25-30cm 径阶。

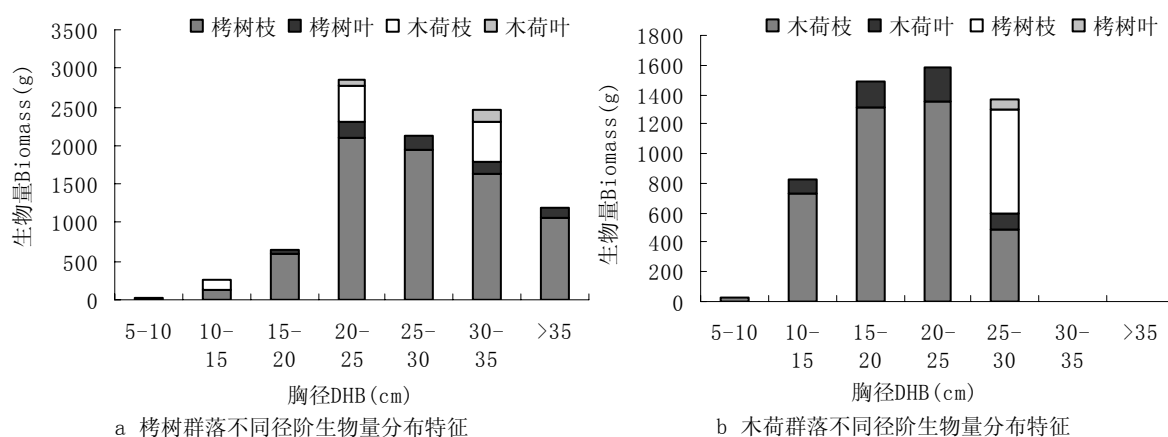


图 3-2 群落不同径阶生物量分布特征

Tab.3-2 Distribution of biomass of different DBH in two communities

在高度分布特征情况中（图 3-3），栲树群落中栲树的高度分布呈现两个较大峰值，为 19-20m 和 23-24m，分别占群落乔木总个体的 25.49%和 13.73%，其次为 17-18m 和高于 24m 的个体，分别占总个体的 7.84%和 5.88%，高度较小的个体数很少，不存在 11-14m 的个体，<11m 的个体仅占 1.96%。木荷的个体高度在 13-24m 的范围内分布较为均匀，频率 1.96%-5.88%，不存在低于 13m 和高于 24m 的个体。

木荷群落中木荷的高度分布集中，呈现对称的单峰型，15-20m 范围内的个体占总体的 62.67%，其中，以 17-18m 高度的个体最多，占群落乔木总个体的 30.67%，向高低两个方向，个体数目明显减少，不存在高于 24m 个体。栲树的个体高度分布在 17-20m 范围内。

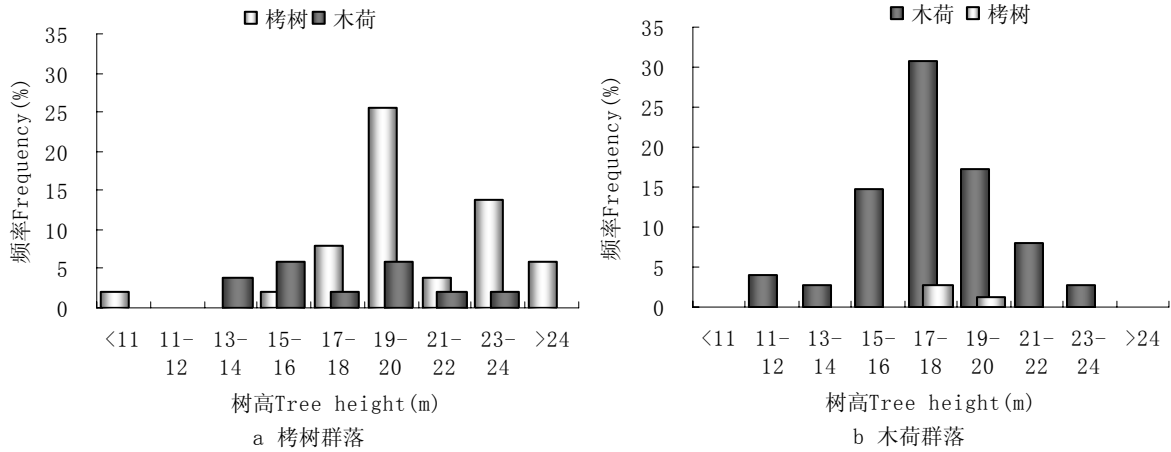


图 3-3 不同群落树木高度分布特征

Fig.3-3 Distribution of tree height in two communities

## 3.2 栲树和木荷的持水特征

### 3.2.1 栲树和木荷的吸水特性

由图 3-4，栲树和木荷枝叶的吸水速率随时间的变化趋势基本相同，在浸水的初始阶段吸水速率较大，随着时间的变化，吸水速率剧烈下降，1/4h 后吸水速率的下降幅度变小。栲树叶与木荷叶，栲树枝与木荷枝的吸水速率几乎完全相同，吸水速率曲线几乎完全重叠，栲树和木荷叶的吸水速率仅在最初的 1/12h 和 1/2h 时略有不同，但差异很小。同一物种枝与叶的吸水速率存在极显著差异( $p < 0.01$ )，叶的吸水速率显著高于枝的吸水速率。在整个过程中，栲树叶的吸水速率为其枝吸水速率的 1.64-4.08 倍，木荷叶的吸水速率为其枝的吸水速率的 1.56-3.32 倍。虽然枝和叶的吸水速率差异很大，但在 4h 后枝和叶的吸水速率下降到一个较接近的低水平。植物枝叶吸水量与植物干重和含水量有关，除栲树叶外，均与干重呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ )，木荷枝叶的吸水量与含水量显著相关 ( $p < 0.05$ )，栲树不相关。这说明一个植物的吸水特征受到其自然含水量的影响，而干重越大，吸水量越小，是由于测量时选取的枝叶长度基本相同，差别主要存在于直径，也就是说，较粗的树枝吸水量并未高于较细的树枝，同样干重的粗树枝和细树枝，由于表面积差异，而导致了吸水量的不同。

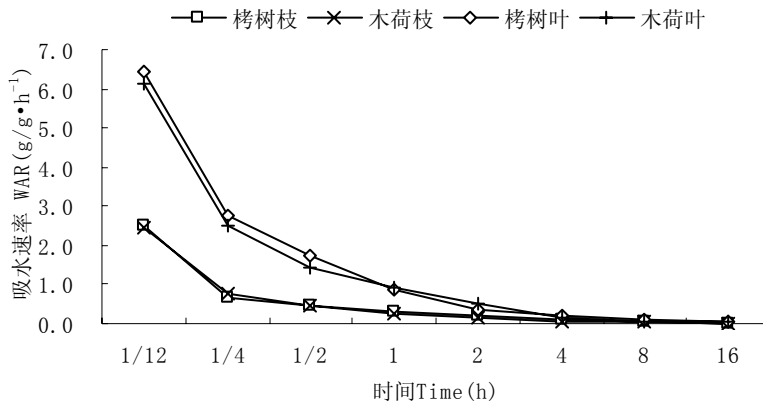


图 3-4 植物枝叶吸水速率

Fig.3-4 Water absorption rate of leaf and branch

表 3-2 植物枝叶吸水量与植物干重和含水量相关性

Tab.3-2 Correlation between WAC and biomass, WAC and WC

		栲树枝	栲树叶	木荷枝	木荷叶
干重	Pearson Correlation	-0.656**	-0.193	-0.635**	-0.541**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.365	0.001	0.006
	N	24	24	24	24
自然含水量	Pearson Correlation	0.398	-0.131	0.797**	0.418*
	Sig. (2-tailed)	0.054	0.542	0.000	0.042
	N	24	24	24	24

\*\* p<0.01, \*p<0.05

### 3.2.2 栲树和木荷的持水能力

通过对栲树和木荷不同组分同时间段水分情况的测定（表 3-3），栲树枝和叶的含水量均低于木荷，二者含水量存在极显著差异（ $p<0.01$ ）。二者叶的含水量均高于枝的含水量，枝叶含水量间差异极显著（ $p<0.01$ ）。

木荷的叶饱和亏较栲树高，两者枝饱和亏相差不多，枝叶饱和亏差异极为显著，两个树种叶的水分亏缺明显高于枝的水分亏缺，叶的饱和亏接近枝饱和亏的二倍。

木荷的枝和叶的饱和持水量与栲树的枝和叶的饱和持水量相差不多，枝的饱和持水量木荷略高，叶的饱和持水量栲树略高。两种植物叶的饱和持水量均明显高于枝的饱和持水量。

表 3-3 植物持水特征

Tab.3-3 Characteristics of water holding capacity of two species

		含水量%	饱和亏%	饱和持水量%
栲树	枝	46.98	24.84	55.37
	叶	51.69	49.94	67.10
木荷	枝	53.78	26.96	58.70
	叶	62.54	42.97	64.59

根据各群落枝叶饱和持水量和单位面积生物量来推算林冠最大持水能力 (Maximum water holding capacity of canopy, MWHCC) (表 3-4)。栲树群落中栲树林冠的最大持水能力为  $71.844\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，木荷林冠的最大持水能力为  $15.118\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。叶最大持水能力占 12.19%，枝最大持水能力占 87.81%。木荷群落中木荷林冠最大持水能力为  $50.627\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，栲树林冠的最大持水能力为  $6.719\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，其中叶最大持水能力占 12.36%，枝最大持水能力占 87.64%。栲树群落林冠最大持水能力为木荷群落林冠最大持水能力的 1.52 倍。

表 3-4 群落林冠最大持水能力

Tab.3-4 Maximum water holding capacity of canopy of two communities

	栲树群落				木荷群落			
	栲树		木荷		木荷		栲树	
	叶	枝	叶	枝	叶	枝	叶	枝
生物量 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	5.821	59.766	2.062	8.770	4.825	31.306	0.544	5.590
最大持水能力 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	7.890	63.954	2.715	12.404	6.352	44.276	0.738	5.982
林冠最大持水能力 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	86.962				57.347			

### 3.3 群落枯落物持水特征

森林枯落物是森林生态系统的重要组分和物质循环的一个重要方面。森林枯落物层结构疏松，吸水能力和透水性强，不仅减缓林内降水对地面的直接冲击，

阻滞和分散降水，吸收通过林冠而降落到地表的水分，而且能增加地表的粗糙度，减缓及减少地表径流，增加土壤水分下渗，因此，对于防止土壤冲刷和水源涵养具有重要作用（薛立等，2005）。

### 3.3.1 枯落物的吸水特性

由图 3-5a，栲树群落和木荷群落枯落物吸水速率的变化趋势基本相同，在浸水的初始阶段吸水速率较高，然后大幅度下降，随着时间的推移，下降的速度逐渐变缓。栲树群落表层和下层枯落物，木荷群落表层和下层枯落物的吸水速率 1.5h 后分别下降到初始吸水速率的 53.42%，42.57%，57.62%，45.02%，4h 后分别下降到初始吸水速率的 24.21%，17.16%，26.37%，17.87%。

栲树群落枯落物的吸水速率极显著高于木荷群落枯落物的吸水速率 ( $p < 0.01$ )。初始阶段栲树群落表层枯落物吸水速率约为木荷群落的 2 倍，下层枯落物的吸水速率约为木荷群落的 1.4 倍，随着时间的变化，二者的差异逐渐缩小，4h 后两个群落的吸水速率下降到较为接近的水平。

对于同一群落枯落物不同层次，吸水速率也存在很大差异，表层枯落物的吸水速率均低于下层，但差异不显著，在初始阶段栲树群落和木荷群落下层枯落物吸水速率分别为表层枯落物吸水速率的 1.45 和 1.99 倍。随着时间的变化，这种差异越来越小，最终表层和下层枯落物的吸水速率趋于同一水平。

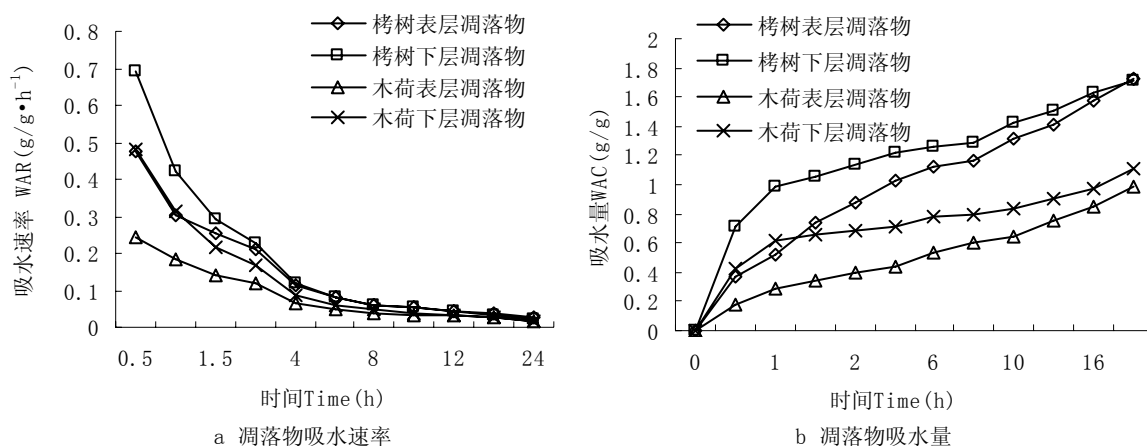


图 3-5 群落枯落物吸水速率和吸水量

Fig.3-5 WAC and WAR of litterfall in two communities

群落枯落物吸水量的变化趋势与吸水速率完全相反（图 3-5 b），吸水量随着时间的变化逐渐升高，在初始阶段吸水量的增长幅度较大，而在后期增长幅度明显变小。栲树群落枯落物的吸水量极显著高于木荷群落（ $p<0.01$ ），表层枯落物各时间段的吸水量为木荷群落表层枯落物吸水量的 1.75-2.10 倍，下层枯落物吸水量为木荷群落下层枯落物的 1.55-1.71 倍。

同一群落不同层次枯落物的吸水量存在极显著差异（ $p<0.01$ ），表层枯落物吸水量低于下层枯落物吸水量。下层枯落物吸水量在初始阶段有较大增幅，但在后期增长缓慢，表层枯落物吸水量在初始阶段的增幅较下层枯落物小，但后期的增幅较下层枯落物大，最终表层和下层枯落物的吸水量趋于一致。

### 3.3.2 枯落物的持水能力

栲树群落和木荷群落表层新鲜枯落物的含水量均低于下层强烈分解的枯落物含水量（表 3-5），尤其是栲树群落，两层凋落物含水量相差很大，下层枯落物含水量为表层枯落物含水量的 1.57 倍。木荷群落表层枯落物含水量明显高于栲树群落表层枯落物的含水量，两个群落下层强烈分解的枯落物含水量基本相同。

栲树群落枯落物厚度大于木荷群落，干重与厚度的比值小于木荷群落（表 3-6），这说明栲树群落枯落物较木荷群落疏松，因此，虽然栲树群落表层枯落物含水量较低，但下层枯落物的含水量却能保持较高水平，表层枯落物对保持下层枯落物水分具有较大作用。木荷群落的枯落物较栲树群落紧实，两层枯落物含水量差异不大，木荷群落表层枯落物对保持下层枯落物水分作用相对栲树群落较小。

表 3-5 两个群落枯落物持水特征

Tab.3-5 Characteristics of water holding capacity of litterfall in two communities

		生物量 t·hm <sup>-2</sup>	饱和持水量 %	饱和亏 %	含水量 %	最大持水能力 t·hm <sup>-2</sup>
栲树群落	新鲜表层	1.33	65.26	78.06	15.96	1.22
	强烈分解层	3.52	56.07	-	25.02	2.79
木荷群落	新鲜表层	1.29	62.79	72.93	21.53	1.17
	强烈分解层	5.30	45.05	-	25.92	3.45



表 3-6 两个群落枯落物结构特征

Tab.3-6 Structure characteristics of litterfall in two communities

		厚度 cm	鲜重 g·m <sup>-2</sup>	干重 g·m <sup>-2</sup>	干重/厚度 g·cm <sup>-3</sup>
栲树群落	新鲜表层	3.52±2.19	157.98	132.51	3.77×10 <sup>-03</sup>
	强烈分解层	2.45±1.27	469.45	352.26	1.44×10 <sup>-02</sup>
木荷群落	新鲜表层	2.60±0.78	165.05	129.21	4.97×10 <sup>-03</sup>
	强烈分解层	2.37±1.41	732.82	529.57	2.24×10 <sup>-02</sup>

根据两个群落枯落物最大饱和持水量和单位面积枯落物的生物量，来推算群落枯落物最大持水能力（Maximum water holding capacity of litterfall, MWHCL）（表 3-4）。栲树群落枯落物最大持水能力为 4.02t·hm<sup>-2</sup>，其中表层新鲜枯落物层的持水能力占 30.45%，下层强烈分解枯落物层的持水能力占 69.55%。木荷群落枯落物最大持水能力为 4.63t·hm<sup>-2</sup>，其中表层新鲜枯落物层的持水能力占 25.38%，下层强烈分解枯落物层的持水能力占 74.62%。

### 3.4 群落最大持水能力

由图 3-6，栲树群落的最大持水能力高于木荷群落。栲树群落林冠最大持水能力高于木荷群落，枯落物最大持水能力略低于木荷群落。林冠最大持水能力直接决定了群落最大持水能力的整体水平，在群落的水文调节功能中发挥了巨大的作用。但枯落物层作为与大气降水与土壤接触的中间环节，其最大持水能力在森林水文调节功能中也占有重要的地位。

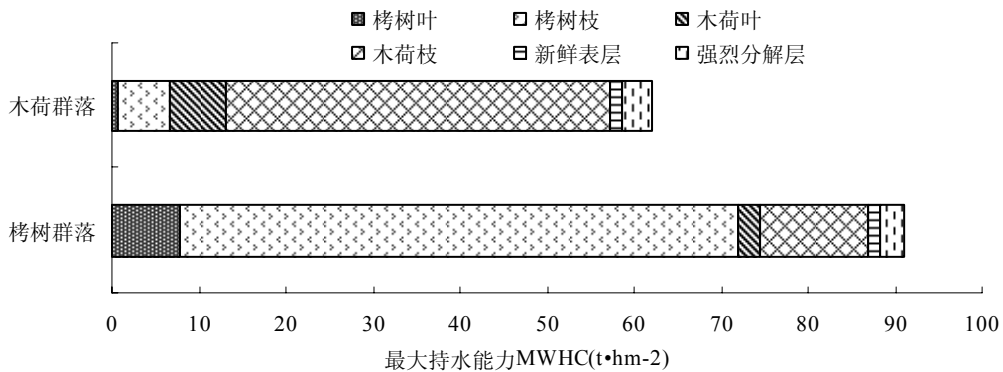


图 3-6 两个群落最大持水能力

Fig.3-6 Maximum water holding capacity of two communities

### 3.5 讨论

在以往的研究中, 栲树群落始终作为天童地区常绿阔叶林恢复演替的顶级群落, 木荷群落为接近顶级的次生演替群落(宋永昌, 1995; 张庆费等, 1997, 1999; 易兰等, 2005; 闫恩荣, 2006)。木荷群落的乔木密度明显大于栲树群落, 栲树群落乔木的胸径、树高和生物量均显著高于木荷群落, 且郁闭度也高于木荷群落。这些特征均反映出木荷群落在恢复演替过程中位于栲树群落之前。

但从另一个角度看, 栲树群落和木荷群落的建群种胸径分布均呈现了不对称的单峰型, 分布连续, 峰值靠近小胸径位置, 两个群落的建群种的种群发展趋势均属于成熟稳定型。而木荷群落中的栲树种群胸径分布呈现单柱型, 仅存在较大胸径的个体, 而栲树群落中的木荷种群的胸径分布却呈现间歇型分布。这样看来, 两个群落似乎并不存在演替上的连续性。

从生态功能角度, 演替后期的群落其生态功能应优于演替前期的群落。栲树群落的最大持水能力明显地高于木荷群落, 也就是说, 从一片林地的植被持水能力来看, 栲树群落这一生态功能优于木荷群落, 栲树群落较木荷群落接近演替顶级。

胸径分布与群落其他特征和功能特征所造成的, 两个群落在演替过程关系上的矛盾需要对群落中栲树种群和木荷种群的更新情况进行进一步的调查, 以明确木荷群落中的栲树种群是否有可能得到有利的更新, 进而取代木荷成为群落的建群种, 抑或演替过程朝向栲树群落之外的方向发展。

### 3.6 结论

#### 3.6.1 栲树群落结构优于木荷群落

栲树群落建群种栲树的胸径分布范围较大, 中等径阶个体最多, 随着径阶增大, 个体数目逐渐减少, 呈现不对称的单峰型。这表明栲树种群的目前的发展趋势属成熟稳定型, 但由于不存在小径阶个体, 未来的发展趋势会转变为衰退型。栲树群落中的木荷胸径分布呈现间歇型, 个体在胸径的分布上呈现间断分布, 大胸径个体, 中等胸径个体和小胸径个体数目相差不多, 但分布不连续, 种群的发展趋势呈现间歇型。

木荷群落建群种木荷的胸径分布范围较大, 10-25cm 之间各径阶均有为数不少的个体分布, 以 10-15cm 径阶的个体数目最大, 随径阶的增大, 个体数目逐渐减少, 5-10cm 的小径阶个体数目最少。这表明木荷种群也呈现成熟稳定的发展趋势, 但由于缺乏小径阶的后继更新个体, 未来可能转变为衰退型。木荷群落中的栲树仅有少数大胸径个体出现, 种群发展趋势呈现衰退型。

群落的树高分布特征反映了群落乔木层的结构。栲树群落中栲树的高度分布呈现双峰型, 这表明栲树的高度存在两个明显的亚层, 23-24m 层和 19-20m 层。木荷的高度分布也呈现双峰型, 表明木荷的高度也可以分为两个亚层, 较高一层的高度与栲树较低一层高度相近。木荷群落中, 高度的分布较为集中, 呈现单峰, 以 17-18m 的个体最多, 因此群落中木荷的高度没有明显的层次, 呈现为单层。

在栲树和木荷两个群落类型中, 木荷群落的密度明显高于栲树群落。但群落的生物量分布与密度关系不大, 主要受胸径分布的影响, 大胸径个体对生物量的贡献大于小胸径个体。由于栲树群落的胸径相对木荷群落较大, 因此群落的生物量高于木荷群落。

整体看来, 栲树群落的年龄较木荷群落大, 群落冠层层次多于木荷群落, 密度较木荷群落低, 表明栲树群落结构优于木荷群落, 较木荷群落发育更为成熟。

### 3.6.2 栲树群落林冠最大持水能力高于木荷群落

栲树和木荷枝叶的吸水速率随时间的变化趋势基本相同, 在实验的初始阶段吸水速率较高, 下降的幅度极大, 实验中后期吸水速率下降到较低的水平, 下降幅度明显减小。栲树叶与木荷叶, 栲树枝与木荷枝的吸水速率几乎完全相同, 同一物种枝与叶的吸水速率存在极显著差异, 叶的吸水速率显著高于枝的吸水速率。虽然枝和叶的吸水速率差异很大, 但在 4h 后枝和叶的吸水速率下降到一个较接近的低水平。整体上, 两种植物吸水速率在 1/2h 后下降到较低水平, 这表明其林冠调蓄水分的功能在 1/2h 内发挥的作用最为突出。

栲树和木荷的自然含水量以木荷居高, 二者的含水量无论是枝还是叶均存在极显著的差异。但二者的饱和持水量较为接近, 叶的饱和亏也较接近, 枝的饱和亏栲树高于木荷, 这表明两种植物叶的水分亏缺相差不大, 而栲树枝的水分亏缺高于木荷。两种植物的自然含水量、饱和亏和饱和持水量均是叶高于枝, 尤其是

饱和亏差距最大，叶的饱和亏接近枝饱和亏的二倍，说明叶的水分亏缺显著高于枝的。

林冠最大持水能力的大小是林冠层水文作用的重要反映。由于两个群落中建群种栲树和木荷饱和含水量相差不大，因此林冠生物量成为其林冠最大持水能力的决定因素。而栲树和木荷林冠的生物量中绝大部分为枝的生物量，因此枝的最大持水能力就决定了整个林冠的最大持水能力。栲树群落和木荷群落叶的生物量相差不大，但栲树群落枝的生物量远大于木荷群落枝的生物量，因此，枝生物量较大的栲树群落的林冠最大持水能力显著地高于木荷群落。栲树林冠最大持水能力是木荷的 1.52 倍。

### 3.6.3 木荷群落枯落物层最大持水能力优于栲树群落

枯落物的吸水特性是其水文功能的重要部分。栲树群落和木荷群落吸水速率的变化趋势完全相同，初始阶段极高，随后急剧下降，2h 后吸水速率下降到较低水平，下降的幅度变缓。这表明两个群落表层枯落物的水分调节功能在最初的 2h 内发挥的作用最大。栲树群落表层枯落物的初始吸水速率高于木荷群落，这是由于其含水量相对较低，水分亏缺程度高于木荷群落，4h 后二者的吸水速率趋于一致。

枯落物的持水能力决定于枯落物的质和量，栲树群落的枯落物较木荷群落疏松，虽然厚度大于木荷群落，但其生物量低于木荷群落。而栲树群落枯落物，尤其是生物量比例较大的下层强烈分解枯落物，饱和持水量明显高于木荷群落，高于木荷群落 11.02%。但木荷群落下层枯落物的生物量显著高于栲树群落，为栲树群落的 1.5 倍，导致木荷群落枯落物最大持水能力高于栲树群落。木荷枯落物层对水分的调蓄能力优于栲树群落。

### 3.6.4 栲树群落的持水能力显著高于木荷群落

由于栲树群落和木荷群落中林冠的生物量巨大，因此林冠层的最大持水能力决定了整个群落的最大持水能力。栲树群落林冠最大持水能力远大于木荷群落，总体的群落持水能力大于木荷群落，木荷群落枯落物最大持水能力略大于栲树群落。栲树群落林冠的水文调蓄功能优于木荷群落，林冠作为大气降水输入森林的

第一个环节，其水文调蓄功能至关重要，直接决定了进入森林的水分的质和量。枯落物层的持水能力是整个森林生态系统水分分配的重要一环，枯落物在林下水土保持具有非常重要的作用，栲树群落和木荷群落枯落物的持水能力基本相当。从总体上讲，栲树群落的水文调蓄功能要明显优于木荷群落。

## 第四章 常绿阔叶林林内雨特征

大气降水输入森林后，林冠截留、穿透雨和树干径流构成了新的水量分布格局。大气降水输入到森林生态系统，首先要受到林冠的拦截作用，被拦截的这部分水分最终通过蒸发作用返回大气，大部分降水则以穿透雨和树干径流的形式到达林地，被树干、灌草层和枯枝落叶层截留后输入到林地土壤，是森林生态系统接收到的降水部分，它在一定程度上反映了不同林分利用大气降水的效率。林下穿透雨是林冠对降水分配的主要部分，是林地水分重要来源（Gómez *et al.*, 2001; 郭忠升等, 2003）。林下穿透雨的变化，直接影响到达林地土壤的水分总量，进而影响地表径流量，特别是水土流失过程，而且穿透雨改变了林下水分输入的空间分布格局，影响了林地土壤的水分分布以及养分的循环和利用（Taniguchi *et al.*, 1996; Tobón-Marín *et al.*, 2000; Sun *et al.*, 2002; 郭忠升等, 2003）树干径流是降雨沿着树干流至树木根部的水量，是降雨量和溶质在植物树干上的空间输入点，避免了雨点对地面的击溅侵蚀，并增加了树木根基周围的水分及养分含量，通常径流量仅占降雨量的 0.3%~3.8%，在水量平衡中可以忽略不计，但在研究大气降水化学输入、可溶性物质淋溶及森林对水质的影响中则有重要意义。林冠截留是森林水文研究的热点之一，可划分为降雨过程中湿润林冠上的雨水蒸发、雨后林冠蓄水蒸发和树干蓄水蒸发。树冠截留的测算一般采用水量平衡法，林外降水量除去林内降水量和树干径流量即为林冠截留量。

对于不同类型森林植被，其物种组成、生长状况、群落结构及其所处的演替阶段上的差异，明显影响森林截留、蒸散、地表径流以及土壤入渗等水文过程，最终导致森林在涵养水源、净化水质、保持水土的能力差异。同时，林冠和凋落物层的截留量，以及林地枯枝落叶在数量、厚度等均与森林生态系统水文过程及调节功能的实现密切相关。

第三章的研究表明，天童地区常绿阔叶林中栲树群落和木荷群落在物种组成和群落结构上存在明显的差异，两个群落林冠和凋落物层持水能力也存在很大不同。综合这两个方面，栲树群落的群落结构较木荷群落更为成熟，林冠持水能力也较木荷群落大，但两个群落在演替上的关系并不明朗，木荷群落是否会向栲树群落方向发展还有待进一步观察。本章在第三章的基础上，对天童地区常绿阔叶

林栲树和木荷两个群落的生态水文功能进行研究,进一步探索在降雨的再分配功能上两个群落存在哪些相同和不同,群落的结构差异对此造成的影响,以及天童常绿阔叶林的降雨格局。

## 4.1 研究区降水特征

### 4.1.1 研究区 2000 年-2002 年降水特征

天童地区降水季节分配不均匀,降水主要集中在春夏,冬季降水较少(图4-2)。降水季节分配情况年际间波动剧烈,变异系数达608.6,5-7年出现一个少雨年(图4-1)。2000年、2001年和2002年降雨量分别为1516.0mm、1434.1mm和1619.7mm,降水最多月份分别为9月、6月和7月,降水最少月份分别为12月、10月和2月,2001年较其他两年降水年内波动更为剧烈,6月份降水量达到375.4mm,10月份降水量仅为14.2mm。降水频率变化趋势在春季和冬季与降雨量基本相似,而在夏秋两季变化趋势与降雨量不同,这主要是由于夏秋季降雨以台风雨为主,多为暴雨或大暴雨,甚至出现超大暴雨,雨量级均高于冬春季节降雨。虽然夏秋季降雨对全年降雨的贡献很大,但由于降雨集中,多以地表径流形式流失,不能有效地被生态系统吸收利用。

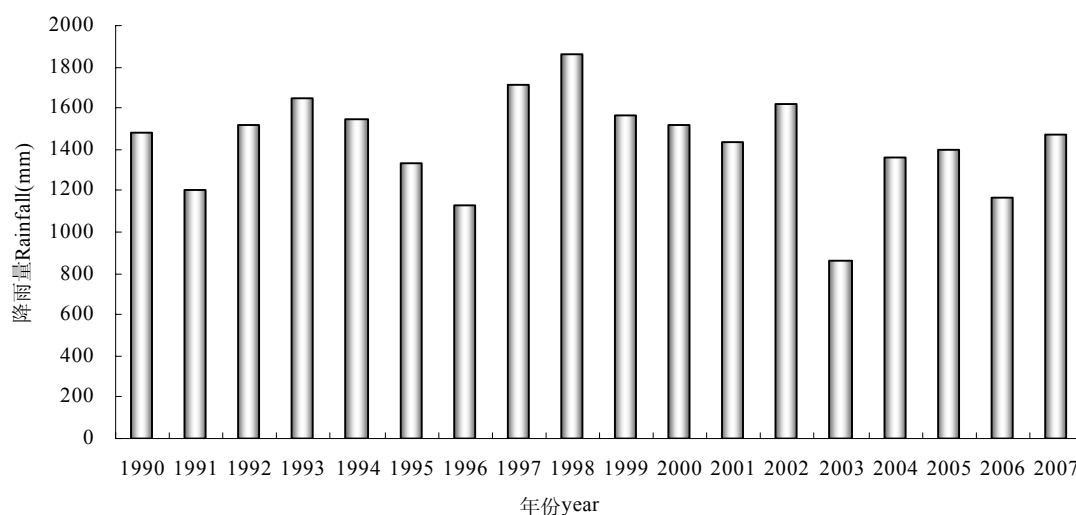


图 4-1 鄞县, 近天童地区 1990 年-2007 年降雨量

Fig.4-1 Rainfall for Yin County, near Tiantong from 1990 to 2007

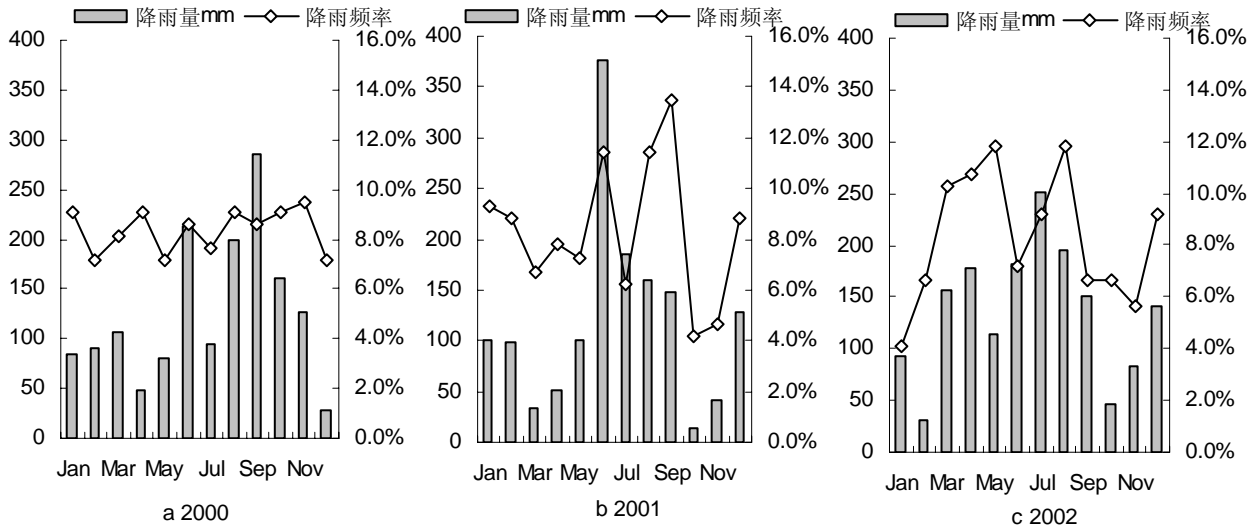


图 4-2 2000 年到 2002 年降雨月变化

Fig.4-2 Monthly changes of rainfall from 2000 to 2002

#### 4.1.2 研究期内林外降雨特征

在 2007 年 7 月 25 日到 2008 年 3 月 31 日期间 (251d)，共记录到 92 次降雨过程，平均 2.7 天就有一次降雨过程，总降雨量 1365.50mm，平均每次降雨 14.84mm。2007 年 8 月、9 月、10 月的降雨量均超过 300mm，10 月降雨量高达 396.48mm，但 10 月降雨频率只占研究期降雨次数 5.43% (图 4-3)。而其它月份的降雨量虽然相对较低，但降雨频率均高于 10 月。

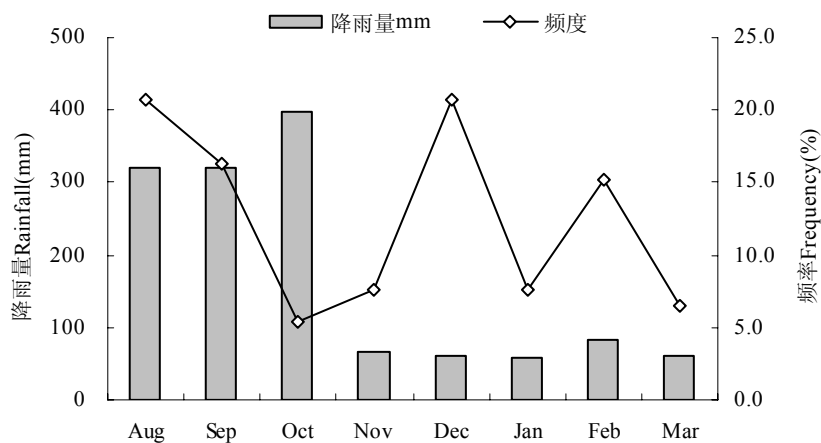


图 4-3 研究期林外降雨月变化

Fig.4-3 Monthly changes of rainfall over the measurement period



从雨量分级的统计结果来看（图 4-4a），大雨量级的降雨，雨量多，但是频率低，而小雨量级的降雨，雨量虽小，但频率最高。 $\leq 0.9\text{mm}$  的降雨占 51.06%，但雨量为 14.82mm，仅占总降雨量的 1.16%； $\geq 250\text{mm}$  的降雨（超大暴雨）频率仅为 1.06%，但其雨量为 364.35mm，占总量的 28.64%；10.0-24.9mm 的降雨（中雨）雨量和频率均较高，降雨频率为 13.83%，雨量为 215.15mm，占总量的 16.91%。

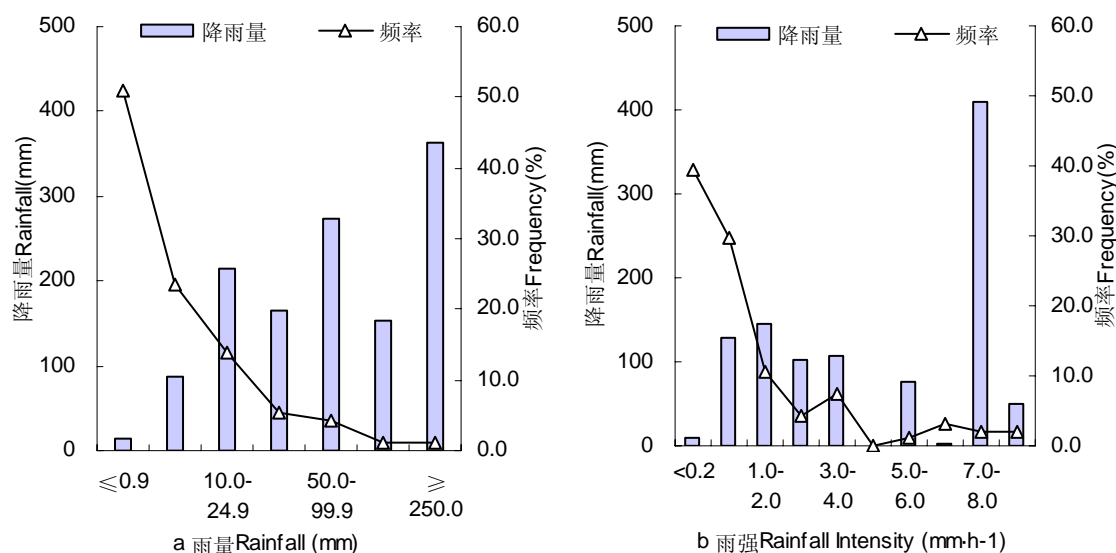


图 4-4 研究期降雨特征

Fig.4-4 Rainfall characteristics over the measurement period

从降雨强度的统计结果可以看出（图 4-4 b），低降雨强度的降雨次数多，雨量少，高降雨强度的降雨次数少，但雨量多。降雨强度 $<0.2\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降雨频度高达 39.36%，但雨量仅为 8.93mm，占总降雨量的 0.87%；降雨强度  $7.0\text{--}8.0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降雨频度仅为 2.13%，但雨量高达 409.69mm，占总降雨量的 39.72%；雨强为  $1.0\text{--}2.0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降雨雨量和频率相对均较高，雨量为 144.71mm，占总降雨量的 14.03%，降雨频率为 10.64%。

可以看出，雨量大，雨强大的降雨对总降雨量贡献最大，但这类降雨对土壤贮水，植被的生长利用贡献很小。相反地，雨量和雨强相对较小的降雨，对生态系统具有相对较大的有效性。

## 4.2 常绿阔叶林穿透雨特征

### 4.2.1 栲树群落穿透雨时间分布特征

栲树群落林下穿透雨量随着降雨量的月变化而波动（图4-5，由于未记录2月的穿透雨，故图中略去），穿透雨量与降雨量具有极显著相关性， $R=0.997$ ， $P<0.01$ （表4-1）。在降雨量最高的10月，穿透雨量也达到最高，为308.12mm，降雨最少的1月，穿透雨量最低，仅为19.15mm。穿透雨量集中于降雨较多的8-10月份，占整个研究期穿透雨量的76.01%。

研究期内的穿透雨率以9月最高，为85.15%，1月最低，为32.55%。穿透雨率的月变幅极大，为52.60%，这主要是由于1月份的穿透雨率极低，仅为32.55%（图4-5）。2008年1月气温较低，月均温为4.2℃，中旬中期温度骤降，由11日的16.7℃降至14日的1.7℃，低温情况一直持续，并于1月29日日均温降至0℃以下，日均温低于4℃的情况持续到2月17日才逐渐改善。这段时期的降水形式由雨变为雨夹雪和小雪，穿透雨量和穿透雨率均受到了极大的影响。除去1月，其它月份的穿透雨率变幅为16.67%，变幅仍然较大。

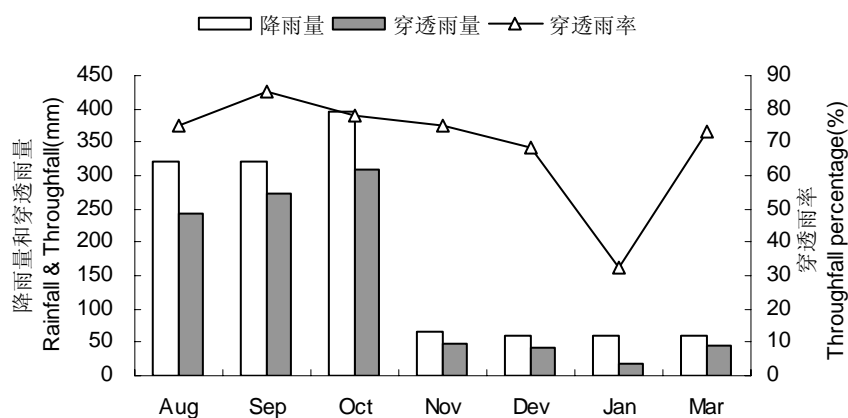


图 4-5 穿透雨量（率）月变化

Fig.4-5 Monthly changes of throughfall and throughfall percentage

### 4.2.2 栲树群落和木荷群落林下穿透雨分析

栲树群落和木荷群落林下穿透雨量的时间变化趋势基本相同（图 4-6），大部分研究认为穿透降雨和林外降雨存在较为密切的关系，通常降水量越大，穿透雨量越大（曾杰和郭景唐，1997；Gómez *et al.*，2002；巩合德等，2005）。

在本研究中，栲树和木荷两个群落林下穿透雨量明显受大气降雨影响，均与大气降雨呈极显著正相关，相关系数分别为栲树群落 0.997 ( $p < 0.01$ )，木荷群落 0.969 ( $p < 0.01$ )。

通过对一年中四季里各一个月穿透雨的分析发现（图 4-7），两个群落穿透雨量的季节变化趋势与降雨量完全相同，在降雨量最多的夏季，两个群落的穿透雨量达到最高，分别为栲树群落 120.00mm，木荷群落 79.27mm，在降雨量最少的冬季，穿透雨量分别为 19.15mm 和 10.34mm。这与大部分研究结果相同，在穿透雨的最大和最小值分别出现在降雨最大和最小的月份（甘健民等，1999；崔向慧等，2006）。

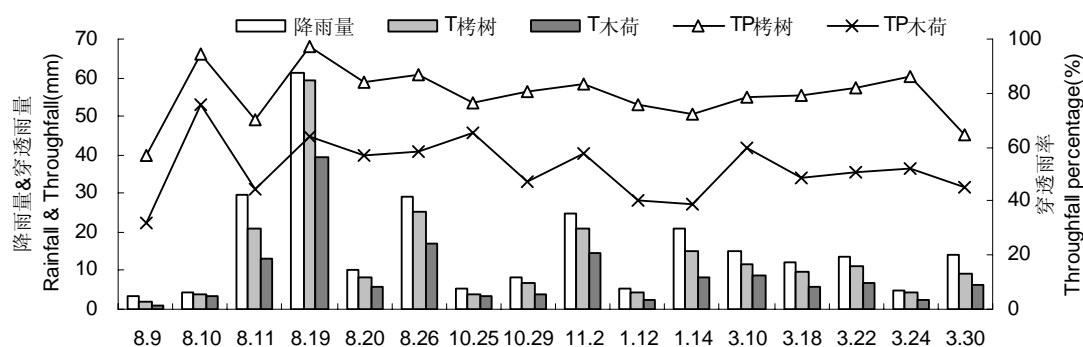


图 4-6 群落穿透雨量（率）和降雨量

Fig.4-6 Rainfall, throughfall and throughfall percentage of two communities

穿透雨率也随着季节有明显地变化，与穿透雨量的变化趋势基本相同（图 4-7）。平均穿透雨率夏秋季（8 月、10 月）较高，冬季（1 月）降低，春季（3 月）升高到与秋季基本相似的程度。在降雨量最高的 8 月，栲树群落的月穿透雨率为 87.20%，木荷群落仅为 57.61%，在降雨量最低的 1 月，栲树群落的月穿透雨率为 73.00%，木荷群落的月穿透雨率下降至 39.41%。降雨强度对穿透雨率具有显著的影响（Cheng *et al.*, 2002；张一平等，2003；曹云等，2006），这是由于 1 月期间的降雨强度均较小，为  $0.19-0.43\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，8 月的降雨基本都是台风雨，不仅雨量大，而且降雨强度也较大，降雨强度最高达到  $12.43\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。因此出现 1 月穿透雨率极低的现象。

观测期间最低穿透雨率为 8 月 9 日，穿透雨率分别为栲树群落 57.09%，木荷群落 31.72%；栲树群落最高穿透雨率出现在 8 月 19 日，97.51%，木荷群落出现在 10 月 25 日，65.52%，8 月 19 日的穿透雨率也达到 64.18%（图 4-6）。

这是由于，7月24日到8月8日的16天中，没有任何降雨，并伴有持续高温，日间最高温度连续8天超过35.00℃，日均温27.62℃-29.84℃。树冠极为干燥，冠层的蒸发量较大，林冠的持水容量也较高，导致穿透雨率极度下降。而在8月19日，经过接近10天的降雨过程后，树冠湿润度明显升高，产生穿透雨的降雨阈值也随之下降，此外，8月19日的降雨量大（61.02mm），降雨强度也较大（3.08mm·h<sup>-1</sup>），也对穿透雨率的升高起到很大的作用。

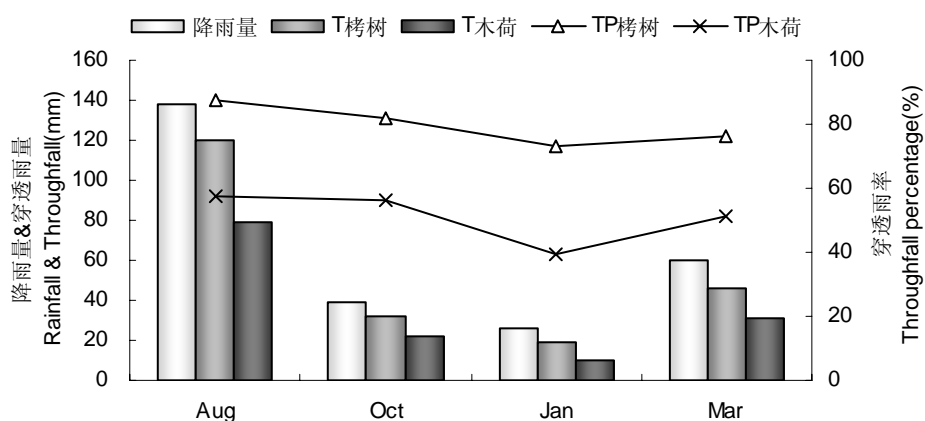


图 4-7 群落穿透雨量（率）季节变化

Fig.4-7 Season changes of throughfall and throughfall percentage of two communities

栲树群落的月穿透雨率明显高于木荷群落，栲树群落穿透雨率的季节间变幅为14.20%，木荷群落高于栲树群落，为18.20%。两个群落穿透雨率存在极显著差异（ $p < 0.01$ ）

周传艳等(2005)通过对鼎湖山3个处于不同演替阶段的群落马尾松针叶林、马尾松针阔混交林和季风常绿阔叶林的对比发现，穿透水量与大气降水皆呈线性相关，它们的相关系数随演替的进展而减小，穿透水率也随演替进展而减少。在本研究中，处于演替顶级的栲树群落，穿透雨量（率）显著高于木荷群落，穿透雨量与大气降雨的相关系数，栲树群落也高于木荷群落，并为显示出随着演替的进展而减小的趋势。这一方面是因为栲树和木荷群落虽然处于演替的不同阶段，物种组成存在较大的差异，但均属于常绿阔叶林，林地的结构和林冠特征成为决定二者穿透雨量（率）之间差异的决定因素。

很多研究均发现，不同林地类型间，穿透雨差异主要受到其林冠结构的影响，林下穿透雨率与观测点的冠层厚度、距主干的距离、盖度一级分枝角度密切相关，穿透雨率随着冠层厚度和盖度增加而逐渐的减小，但是穿透雨率与距主干距离和

分枝角度具有明显的正相关性，距主干距离远，分枝角度大的林下穿透雨大（Jetten, 1996; Johnson, 1990; Loustau *et al.*, 1992; Tobón-Marín *et al.*, 2000; 巩合德等, 2005; 曹云等, 2006）。观测点上方平均郁闭度，栲树群落为 84.36，木荷群落为 80.62，二者相差较小。栲树和木荷的分枝角度具有明显的差异，栲树的分枝角度 60°-90°，木荷的分枝角度为 30°-70°。此外，栲树群落树木密度小于木荷群落，林下穿透雨观测点与树干距离大于木荷群落。多方面的因素综合作用，最终导致穿透雨量（率）木荷群落明显低于栲树群落。

### 4.2.3 穿透雨影响因子

穿透雨的大小不仅受到树种类型的影响也受到林地特征的影响。同一群落不同地点的穿透雨量与观测点上方的开放度和叶面积指数密切相关。穿透雨量的变化趋势与观测点上方开放度的变化趋势基本相同（图 4-8a），开放度较高的地点穿透雨量较高。叶面积指数与开放度是一对相互关联的因子，叶面积指数较高的地点，开放度必然较小。穿透雨量的变化趋势而与观测点上方叶面积指数的变化趋势相反（图 4-8b），叶面积指数较高的观测点穿透雨量较小。穿透雨率的变化趋势与穿透雨量基本相同（图 4-8c d），同一群落中，不同地点的穿透雨率变化趋势与开放度变化趋势相同和叶面积指数变化趋势相反。

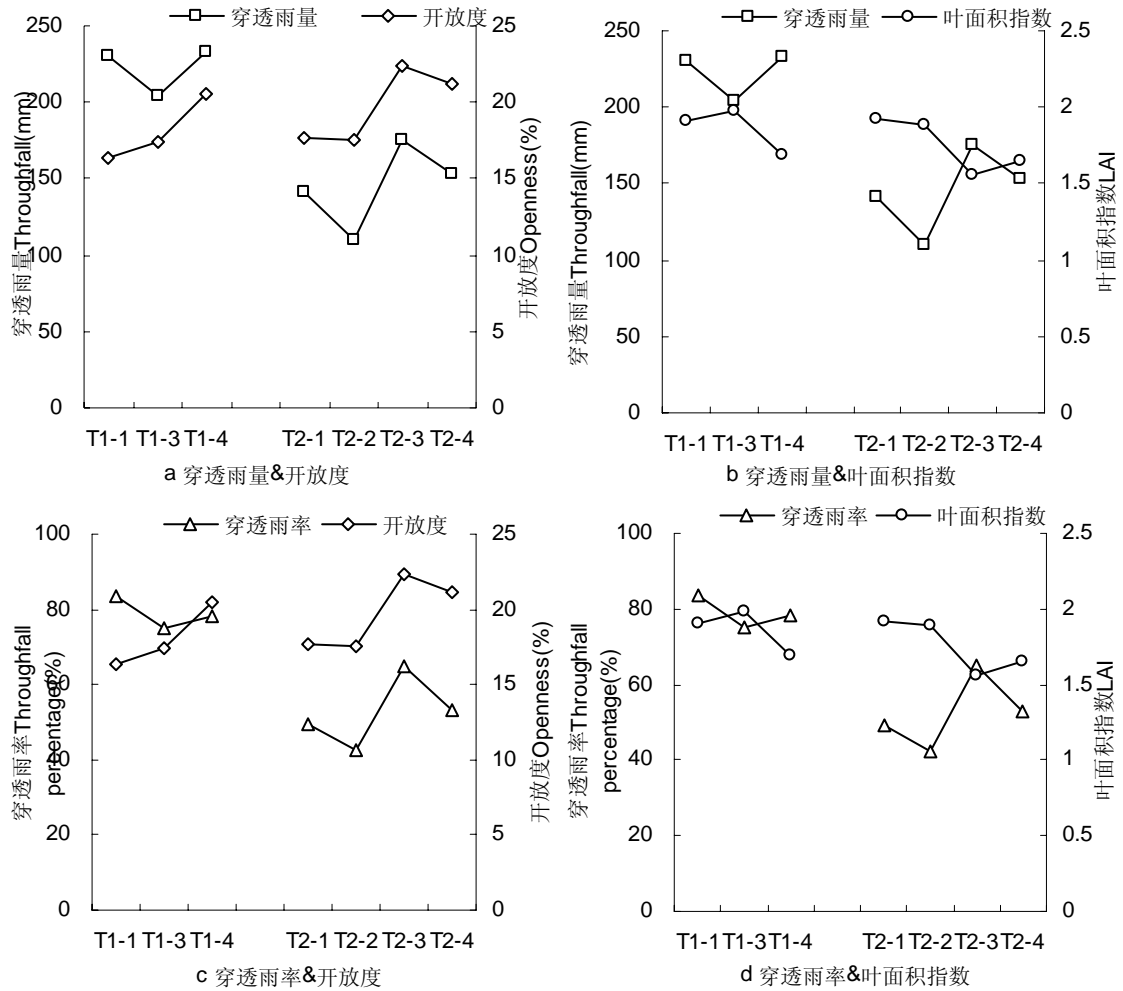


图 4-8 穿透雨量（率）与开放度和叶面积指数关系

Fig.4-8 Relationship among Throughfall, Throughfall percentage, Openness and LAI

穿透雨的大小不仅受到树种类型和林地特征等因素影响，也受雨量和雨强等降雨特征的制约（Cheng *et al.*, 2002；张一平等，2003；曹云，2006，2007a，2007b，2007c），对于某一特定林分来讲，主要受到降雨特征的影响。通过对栲树群落穿透雨与降雨特征的相关分析（表 4-1），结果表明穿透雨量与降雨量、降雨时长、降雨强度和降雨时的风速极显著相关。穿透雨率与降雨量和降雨时长极显著相关，与降雨强度和降雨时风速显著相关。从穿透雨量与降雨量的散点图中也可以看出（图 4-9），穿透雨量与降雨量之间存在明显线性关系，方程判定系数  $R^2$  达到 0.99 以上。

表 4-1 穿透雨量（率）与降雨特征相关性

Tab.4-1 Correlation among Throughfall, Throughfall percentage and characteristic of Rainfall

		穿透雨率%	降雨量 mm	降雨时长 min	雨强 mm/h	风速 m/s
	Pearson Correlation	0.530**	0.994**	0.794**	0.411**	0.417**
穿透雨量 mm	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.005	0.003
	n	45	45	45	45	48
	Pearson Correlation		0.513**	0.582**	0.345*	0.310*
穿透雨率%	Sig. (2-tailed)		0.000	0.000	0.020	0.032
	n		45	45	45	48

\*\*p<0.01 \*p<0.05

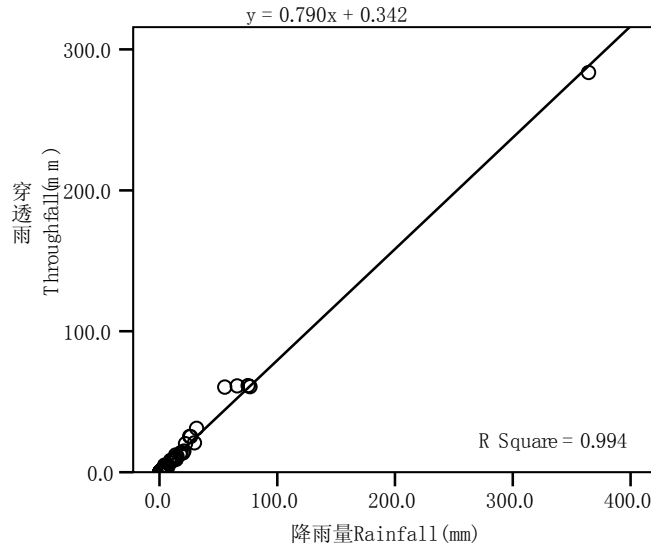


图 4-9 穿透雨量与降雨量的关系

Fig.4-9 Scatter for throughfall against rainfall

### 4.3 常绿阔叶林树干径流特征

#### 4.3.1 树干径流的时间分布特征

栲树群落和木荷群落树干径流量随时间的变化趋势完全相同。树干径流量随降雨量的变化而变化（图 4-10a），降雨量最高的 8 月树干径流量最高，降雨量最低的 1 月树干径流量最低。栲树群落的树干径流量在各月中均高于木荷群落。

栲树群落和木荷群落树干径流率的变化趋势也基本相同。树干径流率的变化趋势与树干径流量的变化趋势相似（图 4-10b），在 8 月最高，1 月最低，但变幅很小。栲树群落的树干径流率在各月里均高于木荷群落。

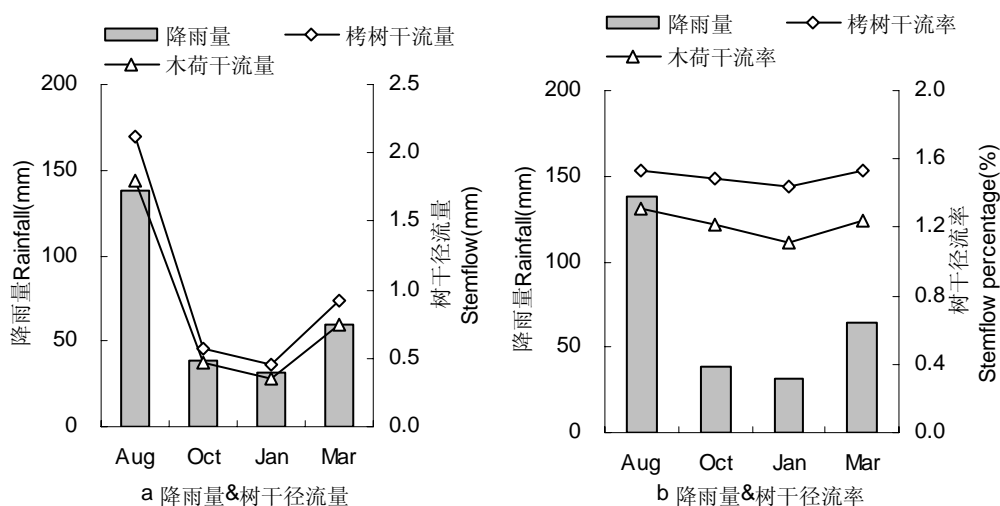


图 4-10 两群落树干径流量（率）季节变化

Fig.4-10 Season changes of Stemflow and Stemflow percentage of two communities

### 4.3.2 树干径流影响因子

栲树群落和木荷群落单株树木的树干径流量均于降雨量极显著相关 ( $p < 0.01$ )，但树干径流率与降雨量相关性不显著 ( $p > 0.05$ )。各林地树干流量随降雨量的变化趋势相同，随着降雨量的增加，树干流量明显增加，两者间存在明显的线性关系（图 4-11），而且方程判定系数  $R^2$  达到 0.95 以上。通过回归方程，不同群落类型产生林下树干流的最小降雨量不同，栲树群落为 2.4mm，木荷群落为 1.2mm。



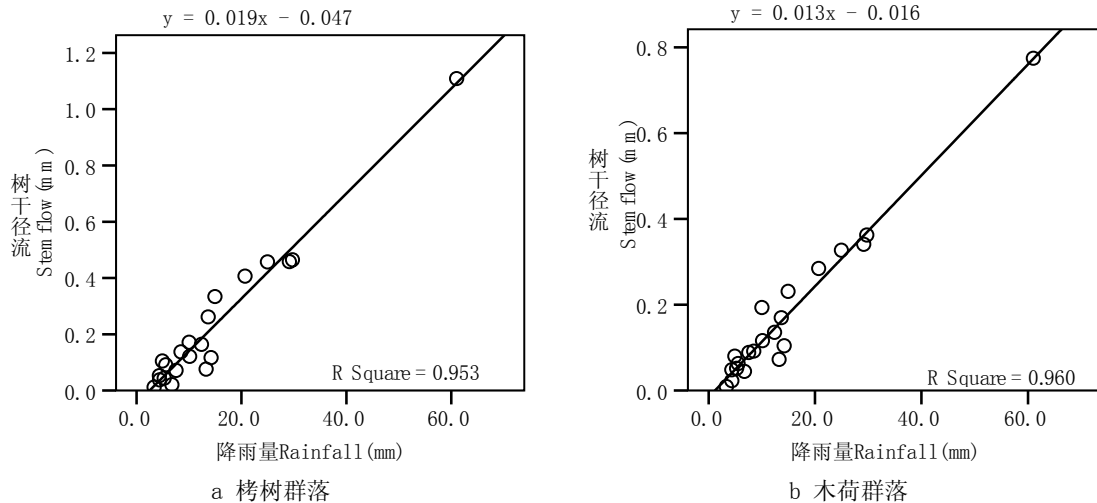


图 4-11 群落树干径流量和降雨量的关系

Fig.4-11 Scatter for stemflow against rainfall

除了降雨的影响，树干径流还受到树木自身结构的影响（Martine-Meza and Whitford, 1996; Aboal *et al.*, 1999; Levia and Frost, 2003; 黄承标和梁宏温, 1994; 张一平等, 2003）。对栲树和木荷的树干径流量与其胸径、树冠垂直投影面积和树高进行相关分析，结果表明木荷的树干径流量与胸径显著相关 ( $p < 0.05$ )，与树冠垂直投影面积和树高相关性不显著，栲树的树干径流量与树冠垂直投影面积显著相关 ( $p < 0.05$ )，与胸径和树高相关性不显著。而树冠垂直投影面积和树高均与胸径极显著相关 ( $p < 0.01$ )。将所有的被测树的胸径、树冠垂直投影面积和树高与树干径流量进行相关分析，发现胸径与树干径流量极显著相关 ( $p < 0.01$ )。

分别比较栲树和木荷不同径阶树干径流量和树干径流率（图 4-12ab），发现径阶为 15-25cm 和 25-35cm 的栲树树干径流量和树干径流率存在明显差异。25-35cm 径阶的栲树树干径流量和树干径流率均高于 15-25cm 径阶的栲树，约为 15-25cm 径阶栲树的 1.75 倍。15-25cm 径阶的木荷树干径流量和树干径流率均明显高于 5-15cm 径阶的木荷，其树干径流量（率）约为 5-15cm 径阶木荷的 2.16 倍。

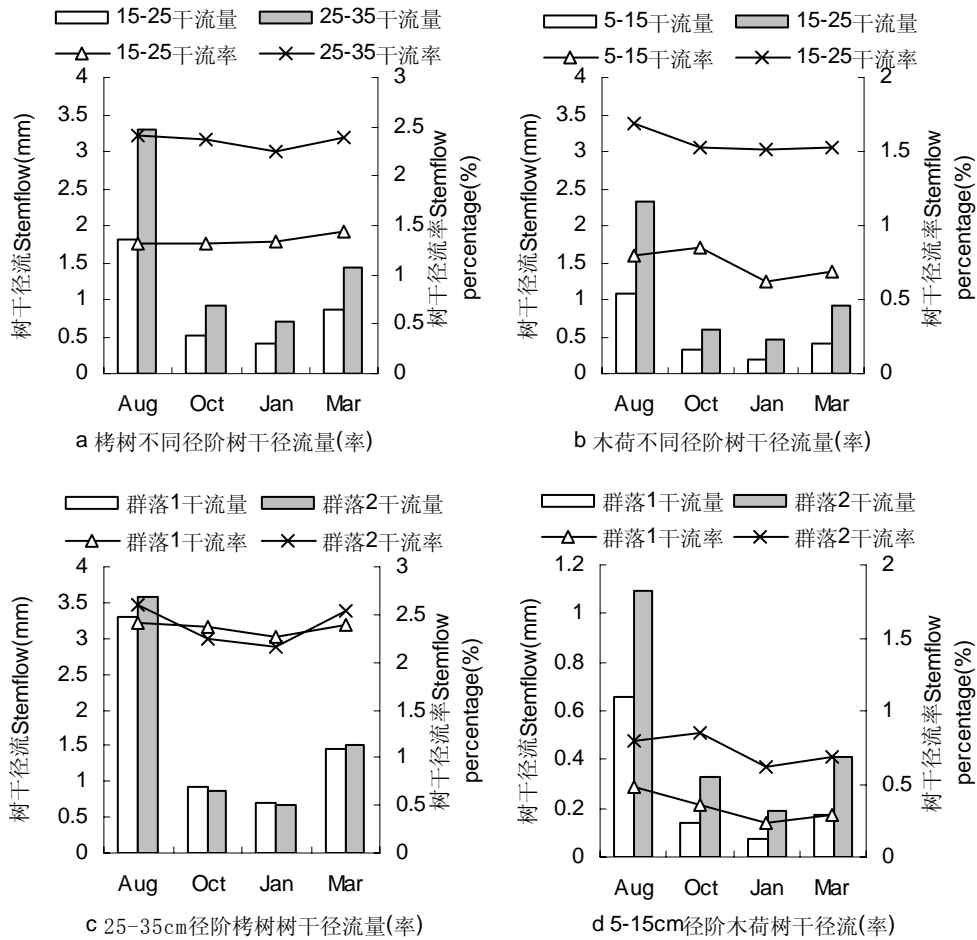


图 4-12 同一群落不同径阶，不同群落同一径阶植物树干径流量（率）

Fig.4-12 Stemflow and stemflow percentage between different DHB in same community or between same DHB in different communities

对栲树群落和木荷群落中同径阶的栲树和木荷的树干径流量和树干径流率进行比较（图 4-12cd），发现不同群落间同径阶栲树的树干径流量和树干径流率的差异较小，而同径阶木荷的树干径流量和树干径流率在群落间的差异较大，木荷群落中木荷的树干径流量和树干径流率均明显高于栲树群落，约为栲树群落中木荷树干径流量（率）的 2.27 倍。这与群落的冠层结构有密切的关系，在栲树群落中乔木层在高度上存在分层现象，木荷的树冠基本都位于栲树树冠的下层，因此，栲树的树冠对降水的截留对木荷具有很大的影响，而木荷群落的乔木层树冠不存在分层现象，木荷树冠上方没有其他树冠的阻挡，直接与大气降水接触，因此其树干径流量和树干径流率均高于栲树群落中的木荷。

### 4.3.3 树干径流的降雨汇集作用

栲树和木荷的树干径流明显低于穿透雨量，仅为降雨量的 1.5%和 1.2%。很多研究者发现，树干径流较少，占降雨量的比例低于 3.0% (Návar *et al.*, 1999; Tobón-Marín *et al.*, 2000)，有研究也发现树干径流达到降雨量的 7.0%甚至 9.2% (Crockford and Richardson, 2000; 周光益等, 1995; 万师强和陈灵芝, 1999)。树干流是降雨量和溶质在植物树干上的空间输入点，引起林地特别在树干周围的土壤性质和土壤水分的空间变化(Waidi *et al.*, 1992; Chang and Matzner, 2000; Gómez *et al.*, 2001; 张一平等, 2003)，而且树干流能够显著地汇集降水，提高降雨的有效性，增加土壤水分输入(Návar *et al.*, 1999; 万师强和陈灵芝, 2000)。本研究也发现各林地树干流对降雨也具有明显的汇集作用(图 4-13)，一般在树干周围输入的雨量是同期降雨量几倍，甚至几十倍。其中栲树群落中栲树的平均漏斗比率为 7.7，木荷的平均漏斗比率为 7.3，在整个观测期间，栲树群落树干径流漏斗比率最高达到 60.3。木荷群落中木荷的平均漏斗比率为 13.5，栲树的平均漏斗比率为 11.7，观测期间木荷群落树干径流漏斗比率最高达到 96.5。两个群落中栲树和木荷的漏斗比率均与降雨量极显著相关 ( $p<0.01$ ) (表 4-2)。随着降雨量的增加，漏斗比率逐渐升高，漏斗比率与降雨量呈线性相关 (图 4-14)。木荷群落的漏斗比率高于栲树群落。

表 4-2 树干径流漏斗比率与降雨量相关性

Tab.4-2 Correlation funneling ratio and rainfall

		栲树群落		木荷群落	
		栲树	木荷	木荷	栲树
	Pearson Correlation	0.974**	0.963**	0.979**	0.941**
降雨量	Sig. (2-tailed)	$1.04 \times 10^{-13}$	$2.79 \times 10^{-12}$	$1.36 \times 10^{-14}$	$2.20 \times 10^{-10}$
	N	21	21	21	21

\*\*  $p<0.01$

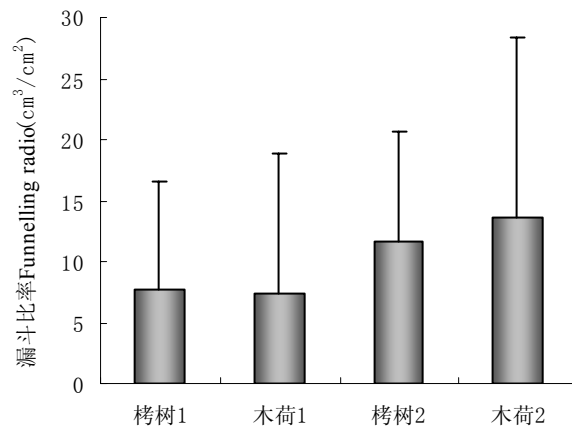


图 4-13 不同群落中不同树种树干径流漏斗比率

Fig.4-13 Funneling ratio of different species in two communities

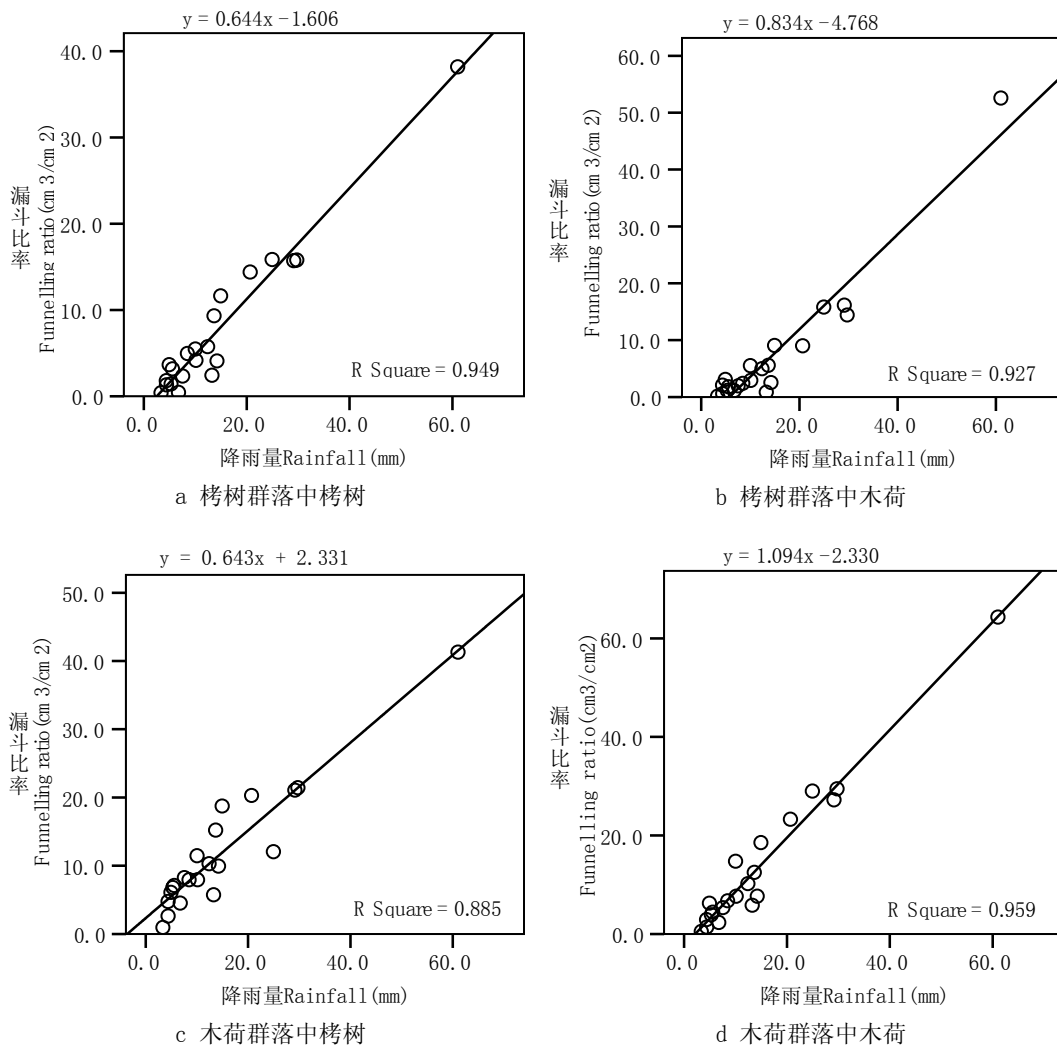


图 4-14 树干流漏斗比率和降雨量的关系

Fig.4-14 Scatter for funneling ratio against rainfall

## 4.4 常绿阔叶林树冠截留特征

林冠层对雨水的截留和缓冲作用，明显减少了进入林地的水量，使可能产生地表径流的量减少，从而起到削弱洪峰流量、涵养水源的功能，同时减少降水的动能和势能总量，对防止土壤侵蚀有良好的效益(Brown and Binkley, 1993)。

### 4.4.1 树冠截留的时间分布特征

栲树群落和木荷群落树冠截留的变化趋势基本相同(图 4-15)。栲树群落的树冠截留量季节变化幅度较小，夏季的截留量略高于其他季节，木荷群落的树冠截留量变化趋势与降雨量的变化趋势基本相同，截留量在降雨量最高的夏季达到最大，在降雨量最少的冬季达到最低，与木荷群落穿透雨和树干径流的变化趋势基本相同，但变幅相对较小。栲树群落的树冠截留量在不同的季节始终低于木荷群落。

两个群落的树冠截留率与降雨量的变化趋势完全相反，在降雨量较高的季节(夏季和春季)，树冠截留率较低，在降雨量较低的秋冬季，树冠截留率反而较高。栲树群落的树冠截留率在不同季节均低于木荷群落。

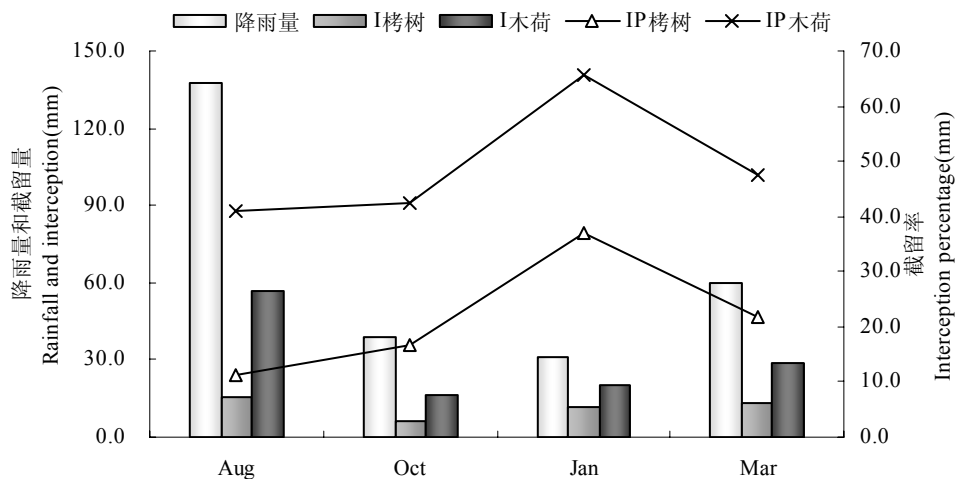


图 4-15 树冠截留量(率)的季节变化

Fig.4-15 Season changes of interception and interception percentage of two communities

栲树群落和木荷群落的树冠截留量与两个群落的穿透雨量和树干径流量极显著相关(表 4-3)，栲树群落树冠截留率与穿透雨率极显著负相关，与树干径流率显著负相关，木荷群落树冠截留率与穿透雨率极显著负相关。由于栲树群落

的穿透雨量较木荷群落高，且穿透雨量较木荷群落更接近降雨量，因此仅在降雨量显著高于其他季节的夏季，栲树群落的树冠截留量才表现的略高，而其他三个季节的截留量变幅极小，基本持平，进而导致栲树群落的树冠截留率与降雨量呈现相反的变化趋势。由于木荷群落的穿透雨和树干径流量均显著低于栲树群落，因此其树冠截留量明显高于栲树群落，截留量的变幅也较栲树群落大。

表 4-3 栲树群落截留量（率）与穿透雨量（率）和树干径流量（率）相关分析

Tab.4-3 Correlation between interception (percentage) and throughfall (percentage) or stemflow (percentage) in two communities

		栲树群落/木荷群落				
		穿透雨量	穿透雨率	树干径流量	树干径流率	
栲树群落	树冠截留量	Pearson Correlation	0.858**	0.058	0.870**	0.207
		Sig. (2-tailed)	2.09E-05	0.831	1.18E-05	0.441
		N	16	16	16	16
	树冠截留率	Pearson Correlation	-0.161	-0.918**	-0.149	-0.543*
		Sig. (2-tailed)	0.550	5.40E-07	0.581	0.030
		N	16	16	16	16
木荷群落	树冠截留量	Pearson Correlation	0.880**	-0.013	0.934**	0.140
		Sig. (2-tailed)	6.89E-06	0.963	1.21E-07	0.606
		N	16	16	16	16
	树冠截留率	Pearson Correlation	-0.313	-0.9996**	-0.241	-0.401
		Sig. (2-tailed)	0.237	6.82E-23	0.369	0.124
		N	16	16	16	16

\*\* p<0.01; \* p<0.05

#### 4.4.2 树冠截留与降雨量的关系

树冠截留与降雨量密切相关，栲树和木荷群落的树冠截留量均与降雨量极显著相关（表 4-4），截留率与降水量相关性不显著。两个群落的树冠截留量均随着降雨量的增加而增加（图 4-16），有研究表明（曹云等，2007b），在大雨量时，树冠截留量上升趋势较小雨量时平缓，截留量逐渐达到稳定。在本研究中，

由于缺少大雨量时的观测数据，因此无法获知每个群落截留量的最终稳定值，但从总体趋势仍可以看出在降雨量增大到 60mm 时，树冠截留量的上升趋势变得相对平缓。

表 4-4 截留量（率）与降雨量相关分析

Tab.4-4 Correlation between interception or interception percentage and rainfall

		栲树群落		木荷群落	
		截留量	截留率	截留量	截留率
	Pearson Correlation	0.829**	-0.025	0.959**	0.049
降雨量	Sig. (2-tailed)	1.32E-04	0.929	1.70E-08	0.862
	N	15	15	15	15

\*\* p<0.01

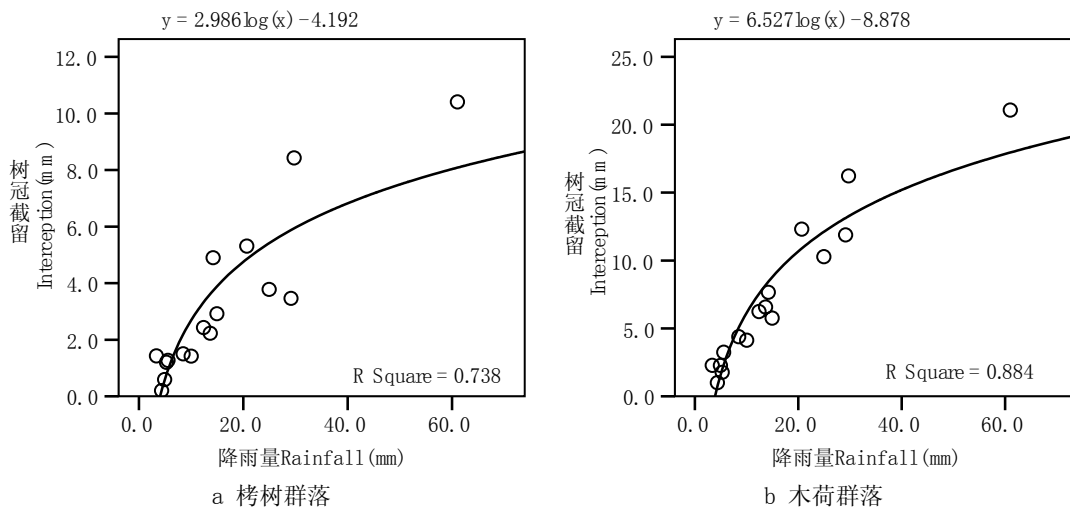


图 4-16 林冠截留量与降雨量的关系

Fig.4-16 Scatter for interception against rainfall in two communities

#### 4.4.3 中国亚热带常绿阔叶林各降雨分量比较

中国亚热带各地区常绿阔叶林降雨量在 1182.6-2075.9mm 之间变动，降雨分量存在较大差异，尤其是树干径流的差异最显著，在 3.1-133.2mm 之间变动，变异系数高达 79.8%。穿透雨在 490.8-1709.5mm 之间变动，树冠截留在 193.7 - 660.6mm 之间变动，变异系数分别为 29.6%和 46.0%。各地区降雨分量出现了 3.4-42.4 倍的变异，刘世荣（1996）认为，这种变异是由各地悬殊的降雨量及其

时空分布和森林树种及其林分结构的分异所导致的。通过相关分析发现，不同地区降雨量和穿透雨量存在极显著的正相关关系 ( $R^2 = 0.891$ ,  $p < 0.01$ )，与树干径流量呈极显著负相关 ( $R^2 = -0.808$ ,  $p < 0.01$ )，但与树冠截留量相关性不显著 ( $p > 0.05$ )。这表明，降雨量的地区间差异是造成林内雨差异的一个主要因素。

各地常绿阔叶林之间树干径流率的差异极其显著，变异系数达到 98.5%，在 0.2%-11.3%之间变化。穿透雨率和树冠截留率的变异系数分别为 19.7%和 58.4%，可见穿透雨的地区间差异相对较小，变动在 41.5%-87.8%之间，树干截留率的变动范围为 9.9%-47.2%。三个指标与降雨量均存在极显著或显著相关，相关系数分别为，穿透雨率  $R^2 = 0.619$  ( $p < 0.05$ )，树干径流率  $R^2 = -0.888$  ( $p < 0.01$ )，树冠截留率  $R^2 = -0.584$  ( $p < 0.05$ )。

降雨量最小的杭州午潮山地区，穿透雨量（率）最小，树干径流量（率）和树冠截留率最大，虽然树冠截留量不是最大，但也远高于平均水平；穿透雨量（率）最大的地区为广西龙胜，该地区同样为树冠截留量（率）最小的地区，但该地区的降雨量并不是各地区中的最大，低于广东鼎湖山和广西里骆。广东鼎湖山的降雨量虽然居于首位，但其各个降雨分量均未达到最大或最小；云南哀牢山的树干径流量（率）为最低。

天童地区与其他地区相比，降雨量、穿透雨量和树干径流量均低于平均水平，穿透雨率接近平均值，树干径流率低于平均值。树冠截留量（率）栲树群落低于平均水平，而木荷群落高于平均水平，两群落的平均值略高于各地区的平均水平。



表 4-1 中国亚热带常绿阔叶林各降雨分量比较

Tab.4-5 Comparison between rainfall in stand and outer in subtropical evergreen broad-leaved forest in China

地点	森林类型	观测年份	降雨量 mm	穿透雨		树干径流		树冠截留		文献来源
				mm	%	mm	%	mm	%	
广东鼎湖山	季风常绿阔叶林	1989-1990	2075.9**	1526.4	73.5	36.4	1.8	513.1	24.7	黄忠良,1994
		1985-1988	1839.3	1472.4	80.1	-	-	366.9	19.9	刘世荣,1996
广西岑溪	常绿阔叶林	1981-1991	1581.1	1325.8	83.9	51.7	3.3	203.6	12.9	刘世荣,1996
广西里骆	常绿阔叶林	1980-1990	1947.6	1706.5	87.6	46.9	2.4	194.2	10.0	黄承标,1993
广西龙胜	常绿阔叶林	1981-1991	1946.9	1709.5**	87.8**	43.7	2.2	193.7*	9.9*	刘世荣,1996
江西大冈山	常绿阔叶林	2000.5-2004.6	1713.5	1316.3	76.8	92.1	5.4	305.1	17.8	崔向慧,2004
江西九连山	常绿阔叶林	1988	1875.3	1543.4	82.3	14.1	0.8	317.8	16.9	李昌华,1997
杭州午潮山	常绿阔叶林	1988-1990	1182.6*	490.8*	41.5*	133.2**	11.3**	558.6	47.2**	俞似军,1994
云南哀牢山	常绿阔叶林	1986	1900.0	1664.5	87.6	-	-	235.5	12.4	刘世荣,1996
		1991.5-1995.4	1884.1	1637.1	86.9	3.1*	0.2*	243.9	12.9	甘健民,1999
云南西双版纳	季节雨林	1996-2001	1594.5	853.2	53.5	80.7	5.1	660.6**	41.4	张一平,2003
浙江天童	常绿阔叶林	1990-1991	1551.0	1201.7	77.5	-	-	349.3	22.5	肖金喜,1993
		2007.8-2008.3	1351.0	1114.8	82.5	20.5	1.5	215.7	16.0	本文(栲树群落)
			731.8	54.2	17.0	1.3	602.2	44.6	本文(木荷群落)	
平均值			1726.4	1306.7	75.4	49.0	3.2	354.3	22.1	
标准差			260.7	386.4	14.8	39.1	3.1	163.1	12.9	
变异系数%			15.1	29.6	19.7	79.8	98.5	46.0	58.4	

\*不同地区中最小值；\*\*不同地区中最大值。

## 4.5 讨论

栲树群落的林冠最大持水能力高于木荷群落，但其林冠截留量（率）显著地低于木荷群落，林下穿透雨量（率）明显高于木荷群落，这表明在降雨过程中，栲树群落的林冠的潜在截留能力并未得到良好的发挥。穿透雨和林冠截留受到多方面因素的影响，包括降雨特征（降雨量、降雨强度和降雨时长等）和林冠特征（枝干夹角、郁闭度和林冠厚度等），林冠最大持水能力取决于枝干的生理结构，如树皮的粗糙程度、枝叶的吸水特征以及叶片表面结构。在计算林冠最大持水能力时，并未考虑枝叶在林冠中的立体分布情况（如叶倾角和枝干夹角），因此林冠最大持水能力并不能全面地反映林冠截留降雨的能力，导致林冠最大持水能力较高的栲树群落，其林冠截留量（率）反低于林冠最大持水能力较低的木荷群落。

此外，林冠的截留情况还与林冠蒸腾密切相关，因此对林冠的蒸腾产生影响的因子均会间接影响林冠截留特征。要进一步对林冠截留的规律进行深入研究，需对林冠的蒸腾特征进行观测。作为森林生态系统水分循环的一个重要环节，林冠的蒸腾可以有效地将水分归还到大气中，达到增加大气湿度和降雨概率的作用。

## 4.6 结论

### 4.6.1 大雨量级、高降雨强度的降雨占研究区降雨比重较大

天童地区降水季节分配不均匀，降水主要集中在春夏，冬季降水较少。降水季节分配情况年间间存在一定差异，夏秋季降雨以台风雨为主，多为暴雨或大暴雨，甚至出现超大暴雨，雨量级均高于冬春季节降雨，造成在春季和冬季降水频率变化趋势与降雨量基本相似，而在夏秋两季变化趋势与降雨量不同。虽然夏秋季降雨对全年降雨的贡献很大，但由于降雨集中，多以地表径流形式流失，不能有效地被生态系统吸收利用。

在研究期内，2007年10月的降雨量最高，但降雨频率低于其他月份。从雨量分级的统计结果来看，大雨量级的降雨，雨量多，但是频率低，而小雨量级的降雨，雨量虽小，但频率最高。从降雨强度的统计结果可以看出，低降雨强度的

降雨次数多，雨量少，高降雨强度的降雨次数少，但雨量多。雨量大，雨强大的降雨对总降雨量贡献最大，但这类降雨对土壤贮水，植被的生长利用贡献很小。相反地，雨量和雨强相对较小的降雨，对生态系统的有效性相对较大。

#### 4.6.2 穿透雨量（率）受林地特征和降雨特征的共同作用

栲树群落林下穿透雨随时间的变化趋势与降雨量的变化趋势基本相同，随着降雨量的月变化而波动，穿透雨量与降雨量极显著相关，穿透雨率的变化趋势与降雨量的变化基本相符，但月变幅较大。冬季受降水形式的影响，穿透雨量和穿透雨率均极低。

栲树群落和木荷群落林下穿透雨随时间的变化趋势基本相同，栲树群落的穿透雨量和穿透雨率均高于木荷群落，两个群落的穿透雨量（率）存在极显著差异。通过对四季中各一个月穿透雨的分析发现，两个群落穿透雨量的季节变化趋势与降雨量完全相同，在降雨量最多的夏季，两个群落的穿透雨量达到最高，在降雨量最少的冬季最低。穿透雨率也随着季节变更有明显地变化，与穿透雨量的变化趋势基本相同。

穿透雨量和穿透雨率受到林地特征和降雨特征的共同作用。不同群落类型间，穿透雨差异主要受到其林冠结构的影响，栲树群落密度较小，导致观测点距主干距离远，栲树的分枝角度大于木荷，因此栲树群落的林下穿透雨较木荷群落大。同一群落不同地点的穿透雨量与观测点上方的开放度和叶面积指数密切相关，开放度较高，叶面积指数较小的地点，穿透雨量（率）较大。降雨量、降雨时长、降雨强度和降雨时的风速对穿透雨量（率）均有显著的影响，尤其是降雨量与穿透雨量之间存在明显线性关系， $y = 0.7903x + 0.3427$ ， $R^2=0.9942$ 。

#### 4.6.3 降雨量和胸径对树干径流具有重要的作用

栲树群落和木荷群落树干径流随时间的变化趋势完全相同，随着降雨的变化而变化，栲树群落的树干径流量在各月中均高于木荷群落。树干径流率的变化趋势与树干径流量基本相同，但变幅较小。栲树群落的树干径流量（率）均高于木荷群落。

两个群落中单株树木的树干径流量与降雨量均极显著相关,两者间存在明显的线性关系,两个群落的树干径流量与降雨量也极显著相关,呈线性关系,栲树群落  $y = 0.0187x - 0.0465$ ,  $R^2 = 0.9532$ , 木荷群落  $y = 0.0129x - 0.0157$ ,  $R^2 = 0.9596$ 。

除了降雨的影响,树干径流还受到树木自身结构的影响,胸径和树冠垂直投影面积均与树干径流量密切相关。通过对同一群落不同径阶栲树或木荷,不同群落同一径阶的栲树或木荷的树干径流量和树干径流率的比较分析,发现同一群落不同径阶的栲树或木荷,树干径流量和树干径流率均存在极显著差异,胸径阶较大的树木树干径流量和树干径流率均较高。不同群落同一径阶的栲树树干径流量和树干径流率差异不明显,但不同群落同一径阶木荷的树干径流量和树干径流率存在显著的差异,木荷群落中的木荷树干径流量和树干径流率均高于栲树群落中的木荷,这是由群落乔木层树冠分层现象造成的。

树干径流虽然占降雨量的比例很小,栲树群落仅为 1.5%,木荷群落仅为 1.2%,但树干径流具有明显的降雨汇集作用,在树干周围输入的雨量是同期降雨量几倍,甚至几十倍。栲树群落中栲树的平均漏斗比率为 7.7,木荷的平均漏斗比率为 7.3,木荷群落中木荷的平均漏斗比率为 13.5,栲树的平均漏斗比率为 11.7。在观测期间,两个群落最高漏斗比率分别达到 60.3 和 96.5,栲树群落的平均漏斗比率低于木荷群落,对降雨的汇集作用小于木荷群落。树干径流的漏斗比率与降雨量极显著相关,呈线性关系。

#### 4.6.4 树冠截留与降雨量、穿透雨和群落类型存在密切关系

栲树群落树冠截留量的季节变化幅度较小,夏季略高于其他三个季节,其他三个季节树冠截留量间差异很小。木荷群落树冠截留量随降雨量的变化而变化,二者的变化趋势基本相同。两个群落树冠截留率的变化趋势与降雨量相反,降雨量高的季节树冠截留率较低。

树冠截留量(率)与群落的穿透雨量(率)极显著相关,因此穿透雨量(率)较高的栲树群落,树冠截留量(率)相对较低。栲树群落树冠对降雨的截留作用较木荷群落弱。

降雨量与群落树冠截留量呈极显著正相关，但与树冠截留率相关性不显著。随着降雨量的增大，树冠截留量逐渐升高，在大雨量时，树冠截留量上升趋势较小雨量时平缓，最终截留量将逐渐达到稳定。

#### **4.6.5 降雨量是造成中国亚热带常绿阔叶林各降雨分量差异的主要因素**

通过对中国 10 处亚热带常绿阔叶林降雨量和各降雨分量的比较发现，降雨量是造成降雨分量各地区间差异的主要因素。天童地区常绿阔叶林穿透雨率基本与各地区平均值相当，树冠截留略高于各地区平均值，表明该地区常绿阔叶林的降雨截持能力属于中等水平。

## 第五章 常绿阔叶林大气降雨及降雨分量的化学特征

森林生态系统的水文过程是连接土壤-植被-大气连续体物质循环的一个关键环节,降水通过森林的截留后,其化学性质发生明显的变化。林木表面干沉降物的洗脱和林冠代换作用是影响截留降水化学特征的两种主要机制。穿透雨和树干径流改变了雨水的化学特征,这种作用受到群落物种组成、群落结构、群落对降雨的分配格局等多方面的影响。在上面两个章节中,分别对群落的结构、持水能力、对降雨的再分配进行了研究,发现天童常绿阔叶林中栲树群落的结构和持水能力优于木荷群落,但其对降雨的截留能力低于木荷群落。在本章中,将对伴随降雨再分配过程发生的雨水化学性质的变化进行探索研究,由于氮是构成植物体的基本元素之一,也是植物体生命活动所必需的营养元素,常常是森林生态系统的养分限制因子,同时,降雨的酸度反映了地区酸沉降情况而广泛受到关注,因此以降雨和降雨分量的 pH 值和硝态氮的特征作为本章研究的重点。

### 5.1 常绿阔叶林大气降雨及降雨分量的 pH 值特征

#### 5.1.1 常绿阔叶林穿透雨 pH 值特征

林外降雨的 pH 值高低,直接影响到森林生态系统的结构、功能和系统的平衡以及森林环境(刘云国等,1996)。天童地区大气降雨的 pH 值在 4.8-6.6 的范围内变化, pH 值平均为  $6.2 \pm 0.5$ 。大气降雨的化学成分受大气中二氧化碳和其它污染气体以及大气中悬浮颗粒易溶成份含量的直接影响,大气降雨 pH 值反映大气中酸性物质的浓度。在观测期间,大气降雨 pH 值存在几个较低点,均为连续无雨后的第一场降雨, pH 值下降到 6.0 以下,在观测其间有两天,2008 年 1 月 14 日和 3 月 10 日,的降雨为 pH 值低于 5.6 的酸雨。

栲树群落和木荷群落穿透雨的 pH 值与大气降雨 pH 值较为接近,高于大气降雨,并随着大气降雨 pH 值的变化而波动(图 5-1),穿透雨 pH 值与大气降雨 pH 值之间存在极显著差异 ( $p < 0.01$ )。周光益等(1995)在海南尖峰岭,刘菊秀等在广东鹤山(2000)和鼎湖山(2003),黄忠良等(2000)在鼎湖山,樊后保等(2000)在福建南平的研究中也发现常绿阔叶林穿透雨的 pH 值高于大气降

雨的 pH 值，但这个结果与程伯容等（1989）在重庆巴县和周国逸等（1996）在重庆南山的结果相反。这表明天童常绿阔叶林对酸性降雨具有一定的缓冲能力，降雨中的  $H^+$  会被叶片吸收，发生阳离子交换作用，并且冠层中淋失的弱碱会与降雨中的酸中和，形成弱酸和硫酸盐或硝酸盐，从而导致穿透雨 pH 值高于大气降雨。森林对酸性降雨的缓冲能力是有限的，树种和降雨的 pH 值均会影响到缓冲能力的发挥。虽然天童地区临近的宁波市属于酸雨区，但由于天童位于宁波市东部，受季风影响大气污染物较少扩散到该地区，大气降雨的 pH 值相对较高，酸雨概率很小，因此森林对酸性降雨的缓冲能力可以得到有效地发挥。

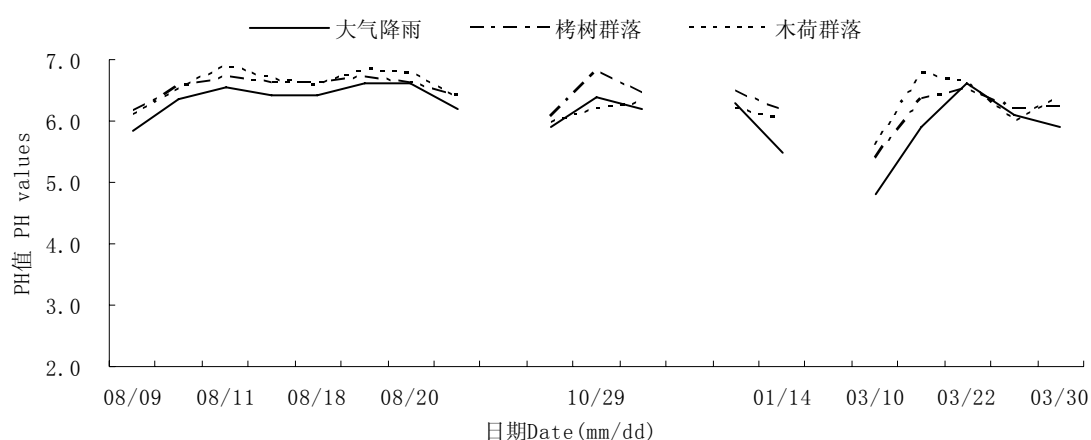


图 5-1 大气降雨和穿透雨 pH 值

Fig.5-1 pH values of rainfall and throughfall

天童地区的大气降雨 pH 值在不同的季节有较大的波动（图 5-2），夏季 pH 值最高，冬季和春季的 pH 值较低，变幅达到 1.1，这是由于天童地区夏季降雨较多，降雨频率较高，pH 值相对较高。整体上看，四个季节降雨的平均 pH 值都高于 5.6，表明该地区大气污染物浓度较低。栲树群落在夏季穿透雨的 pH 值与大气降雨极为接近，但在其他三个季节，穿透雨的 pH 值明显高于大气降雨。木荷群落除秋季外，其他季节穿透雨的 pH 值均高于大气降雨。在大气降雨 pH 值较高，雨水接近中性时，林冠对酸性降雨的缓冲作用并不明显，但在降雨的 pH 值相对较低时，缓冲作用表现突出。此外，穿透雨 pH 值的变化还与树种的生理特性以及生长情况有关。

栲树群落和木荷群落穿透雨的 pH 值之间差异不显著，在夏季和春季，栲树群落的 pH 值低于木荷群落，而在秋季和冬季，栲树群落的 pH 值高于木荷群落。这表明两个群落冠层对酸性降雨的缓冲能力相似。

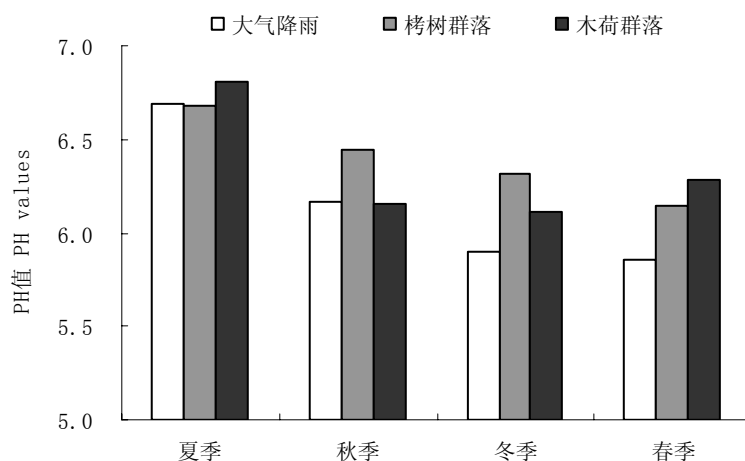


图 5-2 大气降雨和穿透雨 pH 值季节变化

Fig.5-2 Season changes of pH values of rainfall and throughfall

### 5.1.2 常绿阔叶林树干径流 pH 值特征

树干径流的 pH 值显著低于大气降雨的 pH 值 (图 5-3)。除黄忠良等 (2000) 外，在其他对各种森林类型的研究中均出现与本研究相同的结果 (程伯容, 1989; 周国逸, 1996; 刘云国等, 1996; 樊后保等, 2000; 刘菊秀等, 2000, 2003; 辛颖等, 2006)，主要是因为雨水下流过程中溶入了树干分泌的有机酸和无机酸。

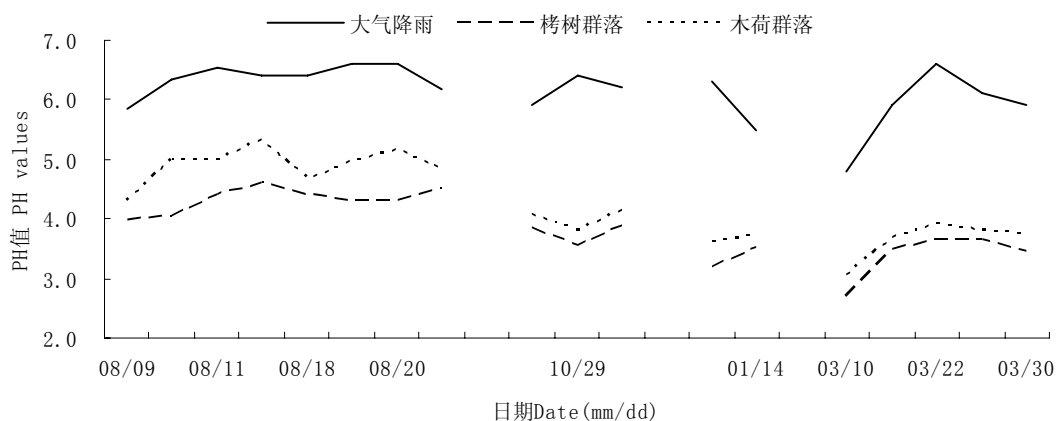


图 5-3 大气降雨和树干径流 pH 值

Fig.5-3 pH values of rainfall and stemflow



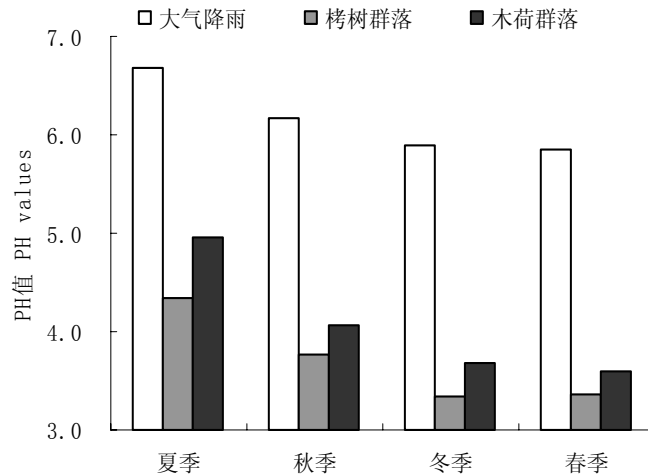


图 5-4 大气降雨和树干径流 pH 值季节变化

Fig.5-4 Season changes of pH values of rainfall and stemflow

栲树群落树干径流的 pH 值在 8 月、10 月和 1 月与大气降雨 pH 值的变化趋势相反，3 月与大气降雨 pH 值变化趋势相同。木荷群落 8 月树干径流 pH 值的变化趋势较为复杂，与大气降雨 pH 值的变化趋势部分相吻合，10 月和 1 月树干径流 pH 值与大气降雨 pH 值变化趋势相反，3 月与大气降雨 pH 值得变化趋势基本相同。夏季和秋季为树木生长代谢旺盛的季节，树干径流的 pH 值除受到大气降雨 pH 值的影响外，还受树木生理和生长情况的影响。树干径流的 pH 值与大气降雨的 pH 值之间存在极显著相关 ( $p < 0.01$ )。栲树群落树干径流的 pH 值显著低于木荷群落树干径流 pH 值，二者存在极显著的差异 ( $p < 0.01$ )，这表明栲树树干分泌的有机酸和无机酸含量明显高于木荷。

树干径流 pH 值随季节的变化趋势与大气降雨完全相同，夏季明显高于其他三个季节，冬季和春季较低。由于夏季降雨量大，降雨频率高，对树干上分泌的有机酸和无机酸淋洗的密度和强度均较高，树干径流中淋洗的有机酸和无机酸浓度降低，因此 pH 值较其他季节为高。

### 5.1.3 常绿阔叶林穿透雨和树干径流 pH 值与大气降雨 pH 值的关系

在降雨截留过程中，pH 值的大小依次为：栲树群落穿透雨=木荷群落穿透雨 > 大气降雨 > 木荷群落树干径流 > 栲树群落树干径流。栲树群落和木荷群落穿透雨和树干径流的 pH 值均与大气降雨 pH 值极显著相关，呈线性关系（图 5-5）。

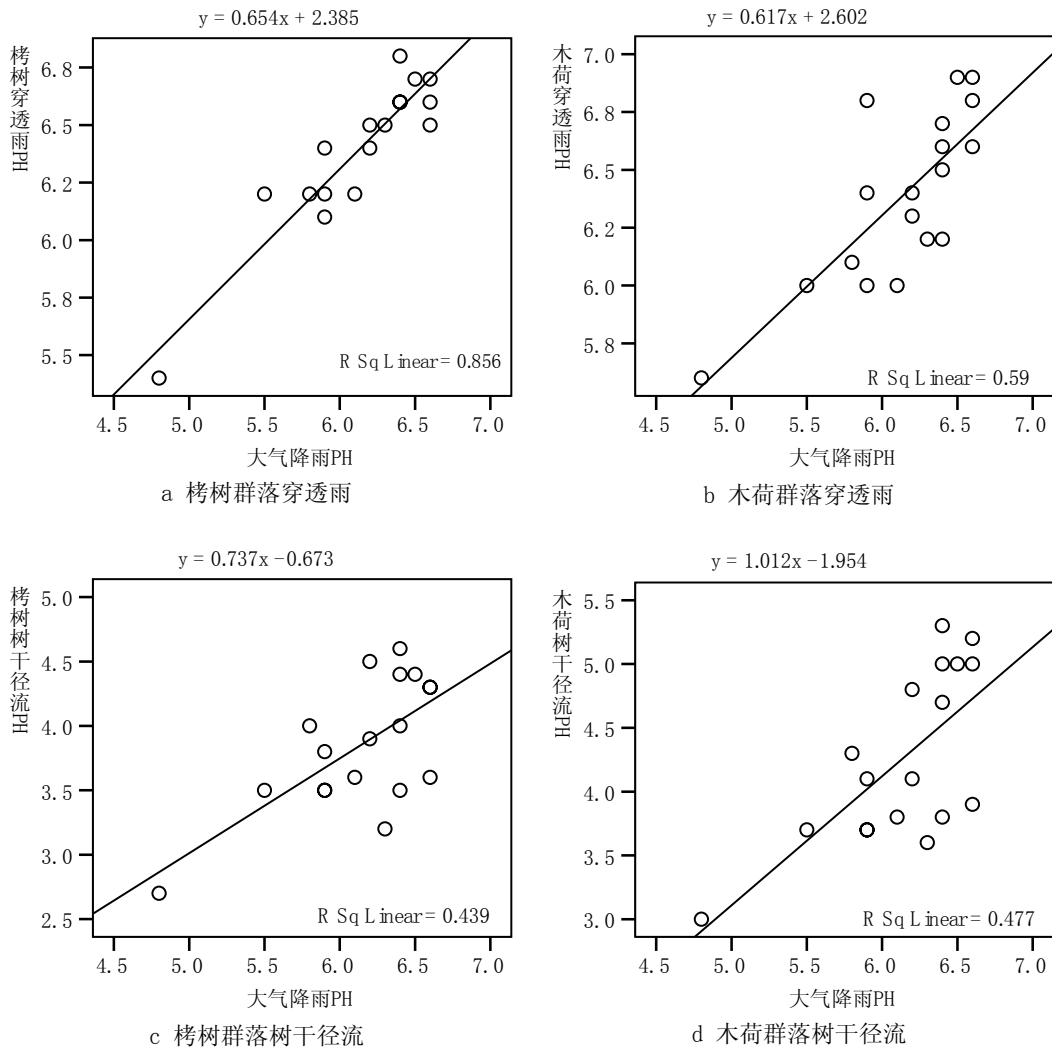


图 5-5 穿透雨 pH 值和树干径流 pH 值与大气降雨 pH 值的关系

Fig.5-5 Scatter for pH values of throughfall or stemflow against pH values of rainfall

#### 5.1.4 中国常绿阔叶林大气降雨及降雨分量 pH 值比较

通过对不同地区常绿阔叶林大气降雨、穿透雨和树干径流 pH 值的比较发现，天童常绿阔叶林大气降雨 pH 值高于其他地区，穿透雨 pH 值高于其他地区，而树干径流 pH 值在各地区中最低。这表明天童地区常绿阔叶林树干径流  $H^+$  富集程度高于其他地区。在这五个地区中，海南尖峰岭、广东鼎湖山和天童地区均是穿透雨 pH 值高于大气降雨 pH 值。大气降雨 pH 值较低的杭州午潮山和重庆巴县穿透雨 pH 值低于大气降雨 pH 值。这表明，天童地区和海南尖峰岭、广东鼎湖山三个地区的常绿阔叶林对降雨中的酸性物质具有一定的缓冲作用，其余两个地区，林地对酸性降雨不具备缓冲作用，或者由于大气降雨 pH 值较低，导致超出

了林地对酸性降雨的缓冲范围。天童广东鼎湖山树干径流 pH 值高于大气降雨和穿透雨 pH 值。

表 5-1 中国常绿阔叶林大气降雨及降雨分量 pH 值比较

Tab.5-1 Comparison between pH of rainfall in stand and outer in evergreen broad-leaved forest in China

地点	森林类型	观测年份	大气降雨	穿透雨	树干径流	文献引用
海南尖峰岭	热带雨林	1989-1992	5.84	6.06	5.30	周光益,1995
广东鼎湖山	季风常绿阔叶林	1993-1995	5.30	5.80	6.00	黄忠良,2000
杭州午潮山	常绿阔叶林	1995	4.85	4.52	-	许利群,1999
重庆市巴县	檫木	1986	4.85	4.30	-	程伯容,1989
浙江天童	常绿阔叶林	2007.8-2008.3	6.14	6.39	3.87	本文(栲树群落)
				6.38	4.26	本文(木荷群落)

## 5.2 常绿阔叶林穿透雨和树干径流的硝态氮特征

在森林生态系统养分循环中，降雨对植物体的淋溶是养分循环中归还的途径之一，凋落物须经较慢的分解方可被植物吸收利用，而淋溶归还养分物是被水所携带的水溶物，能够较快的被植物吸收利用，这样就有效地提高养分的利用效率，加速了养分循环的速率，水循环对其具有支配的主导作用（刘世荣，1996）。氮是构成植物体的基本元素之一，也是植物体生命活动所必需的营养元素，常常是森林生态系统的养分限制因子，因此，氮循环的动态和特征是大气降雨及其分量研究的重点。

### 5.2.1 常绿阔叶林穿透雨硝态氮浓度的时间分布特征

单场降雨过程之间硝态氮的变化规律较复杂，在夏秋两季，随着降雨过程的连续进行，大气降雨中硝态氮浓度由高到低，然后稳定在一个较低的水平，而冬春季节不存在这种规律。穿透雨中硝态氮浓度在夏秋两季与大气降雨中硝态氮浓度的变化趋势相一致，在冬春季节与之相反（图 5-6），在连续的降雨过程中，穿透雨的硝态氮浓度随着降雨过程的持续而逐渐下降，经过一个短暂的无雨阶段后第一场降雨的穿透雨硝态氮浓度又再次升高。

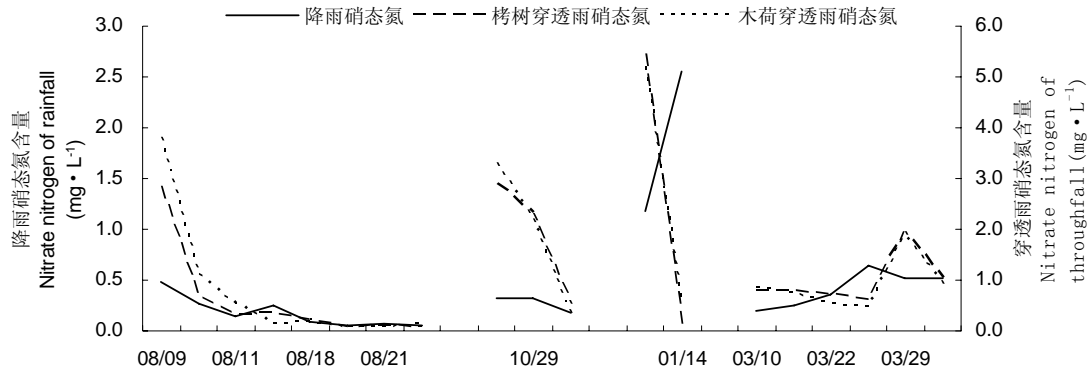


图 5-6 大气降雨和穿透雨中硝态氮浓度

Fig.5-6 Nitrate nitrogen concentration of rainfall and throughfall

穿透雨的硝态氮浓度季节变化趋势与大气降雨中硝态氮浓度变化趋势基本相同，夏季最低，冬季最高。大气降雨硝态氮浓度的季节差异极大，冬季为夏季的 10.6 倍。栲树群落穿透雨硝态氮浓度冬季为夏季的 6.0 倍，木荷群落为 2.9 倍。穿透雨的硝态氮浓度在全年中均高于大气降雨，为大气降雨的 1.1-7.0 倍。这一结果与黄忠良（1994，2000）在鼎湖山的研究结果一致，但与甘健民等（1997）在云南哀牢山，姜文华（2003）在重庆四面山，蒋益民等（2003）在湖南韶山，以及吕旭晨（2005）在重庆观音桥的研究结果有所不同。在成熟森林里，植物对降雨中氮的吸收量和吸收速率都迅速下降，铵态氮转化为硝态氮的比例较发育期的森林有所升高，成熟林内硝态氮的淋失相对较大（姜文华，2003）。本研究中的栲树群落和木荷群落均为发育成熟的林地，因此出现了穿透雨中硝态氮浓度明显高于大气降雨的现象。两个群落穿透雨的硝态氮浓度在冬季相差较大，整体平均值栲树群落略高于木荷群落，两群落之间差异不显著（ $p>0.05$ ）。

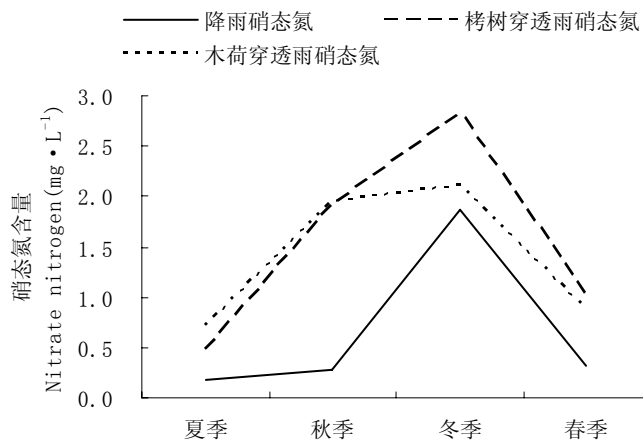


图 5-7 大气降雨和穿透雨硝态氮浓度季节变化

Fig.5-7 Season changes of nitrate nitrogen concentration of rainfall and throughfall

## 5.2.2 常绿阔叶林树干径流硝态氮浓度的时间分布特征

将测得的单株树木树干径流的硝态氮浓度与其树干径流量相乘，然后求和得到群落中所有测树的树干径流中硝态氮含量总和，再除以所有测树的树干径流总量，得到群落树干径流硝态氮的平均浓度用来进行分析。结果显示（图 5-8），单场降雨过程中，夏秋两季树干径流硝态氮浓度与大气降雨中硝态氮浓度的变化趋势基本相同，冬季和春季与之相反。除 2008 年 1 月 14 日，其他观测日树干径流中硝态氮浓度都显著地高于大气降雨中硝态氮的浓度，达到大气降雨中硝态氮浓度的 1.2-16.4 倍，表现出明显的富集作用。

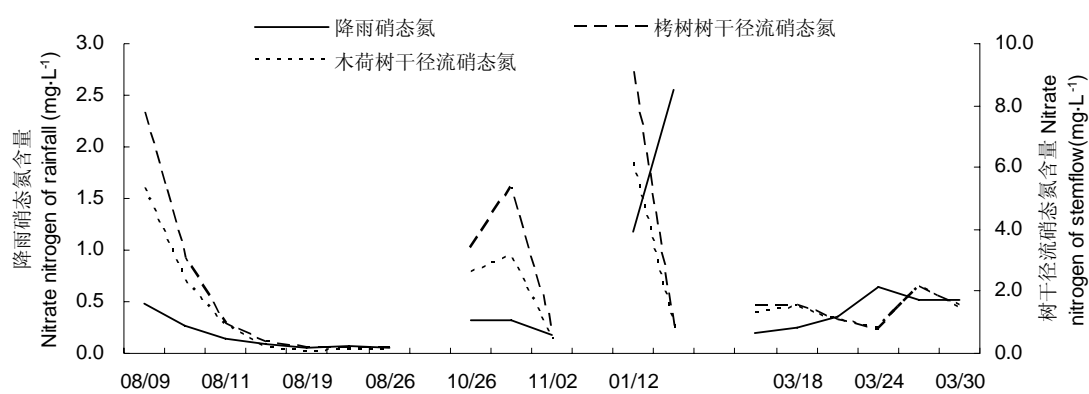


图 5-8 大气降雨和树干径流中硝态氮浓度

Fig.5-8 Nitrate nitrogen concentration of rainfall and stemflow

树干径流中硝态氮浓度的季节变化与大气降雨相一致（图 5-9），夏、秋、春三季明显低于冬季，栲树群落硝态氮浓度冬季为夏季的 2.7 倍，为春季的 3.4 倍，木荷群落硝态氮浓度冬季为夏季的 2.7 倍，为春季的 2.5 倍。两个群落树干径流中硝态氮浓度均明显高于大气降雨，为大气降雨硝态氮浓度的 1.9-11.5 倍之多。该结果与与黄忠良（1994，2000）的研究结果一致，但与甘健民等（1997），姜文华（2003）和蒋益民等（2003）的研究结果有所不同。在作为研究对象的栲树群落和木荷群落中，降雨对硝态氮的作用以淋溶过程为主导，因此导致树干径流中的硝态氮含量远高于大气降雨。

栲树群落和木荷群落树干径流中硝态氮含量存在显著的差异 ( $p < 0.05$ )，这表明两个群落在降雨过程中对硝态氮的淋洗和吸收情况有所不同，木荷群落树干径流中硝态氮含量显著低于栲树群落，说明木荷群落在降雨过程中对硝态氮的吸收量要高于栲树群落或者其对大气中氮氧化物的吸附作用弱于栲树群落。

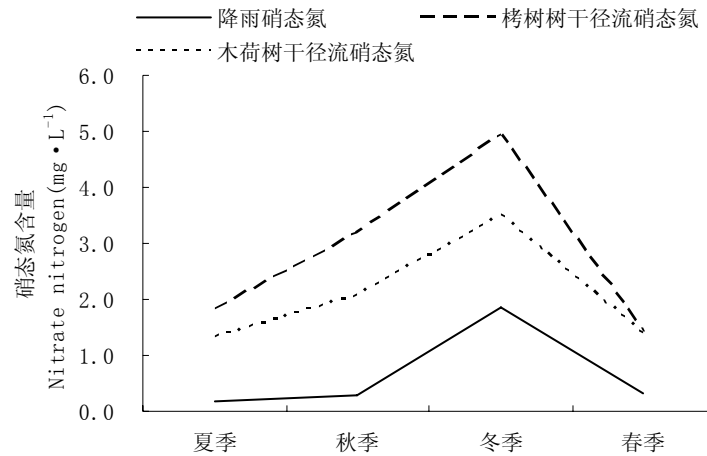


图 5-9 大气降雨和树干径流中硝态氮浓度的季节变化

Fig.5-9 Season changes of nitrate nitrogen concentration of rainfall and stemflow

### 5.2.3 连续降雨过程中穿透雨和树干径流中硝态氮的变化

甘建民等（1996）认为，大气降雨量的变化，降雨时间的长短及降雨强度，前期无雨期的长短等，也影响着降雨对植物林冠的淋溶程度。针对短时间尺度内的变化状态对连续降雨过程中的硝态氮浓度进行了初步观察，两个样地得到相似的结果。

由图 5-6 和图 5-8 可知，随着降雨过程的连续进行，大气降雨中硝态氮浓度由高到低，但趋势并不明显。与穿透雨和树干径流相比，大气降雨受森林生态系统的影响较小。大气降雨受到相对更广的区域影响，如云团长距离移动，雷电产生氮化合物，周边地区大气污染源持续供给等，所以大气降雨给森林生态系统带来的硝态氮浓度较为稳定。

穿透雨和树干径流的中硝态氮浓度随着降雨过程进行的变化趋势基本相似，均为一定程度的下降状态。因其他季节降雨频率和观察时间所限，仅以 8 月份连续降雨过程为例。冯宗炜等（1985）认为，阴离子浓度的增加主要是雨水对林冠沉积物冲洗的结果。由于夏季晴天气温高，蒸发量大，积累了大量的干沉降，因此降雨初期林内降雨硝态氮浓度较高；同时由于夏季降雨量大，降雨强度高，因此可以观察到一个急剧下降的过程，继而处于相对稳定的状态。如果两次连续降雨的时间间隔不长，那么下一次连续降雨时，这一稳定趋势将继续保持，如本实验中 8 月 18 日的降雨，这与干沉降的重新积累需要一定时间有关；如果前期无

雨期较长, 树冠积累了大量的干沉降, 将导致降雨初期林内降雨硝态氮浓度较高, 如本实验中 8 月 9 日的降雨是在半个月无雨期之后, 因而林内降雨硝态氮浓度明显较高。由于观察次数所限, 这一推测以及其他季节的变化规律都需要进一步验证。

### 5.2.3 树干径流中硝态氮与测树因子的关系

树干径流中硝态氮的含量与树木自身的特征存在密切的关系, 通过对栲树和木荷测量期间树干径流中硝态氮的总量与树木的胸径、树冠投影面积和树高进行相关分析 (表 5-2), 发现硝态氮总量与胸径显著相关。胸径作为树木的重要特征与树木的其他特征存在密切的关系, 栲树的胸径与树高极显著相关 ( $p < 0.01$ ), 木荷的胸径与树冠投影面积显著相关 ( $p < 0.01$ ), 不同胸径的树木树干表面积、树冠面积和树高不同, 因此降雨淋洗的面积也有所不同, 进而对树干径流中硝态氮的含量产生影响。

表 5-2 树干径流中硝态氮总量与树木胸径、树高和树冠投影面积相关关系

Fig.5-2 Correlation between sum nitrate nitrogen content in stemflow and DHB or tree height or canopy projective area

		胸径	树高	树冠投影面积
栲树树干径流硝氮总量	Pearson Correlation	0.680*	0.559	0.625
	Sig. (2-tailed)	0.044	0.117	0.072
	N	9	9	9
木荷树干径流硝氮总量	Pearson Correlation	0.855**	-0.235	0.615
	Sig. (2-tailed)	0.002	0.513	0.058
	N	10	10	10

\*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ 。

### 5.2.4 穿透雨和树干径流硝态氮浓度与降雨量的关系

冯宗玮等 (1985) 认为, 林内穿透雨中营养元素浓度的增加, 是来自细胞壁的蒸腾液, 而细胞原生质只是在选择性的从液流中吸收当时所需要的营养元素, 其余的营养物质聚结在细胞壁和角质层内, 当降雨时它们被氢离子所交换出来。

李凌浩等（1994）则认为外部雨水与叶片及其他组织的外部空间和细胞内部自由空间之间的离子交换反应是物质淋溶的主要机制。因此，大气降雨对林冠及树干枝叶淋溶的过程既是降雨对枝叶分泌物冲洗和淋溶的过程，又是枝叶对降雨营养物质吸收吸附的过程。

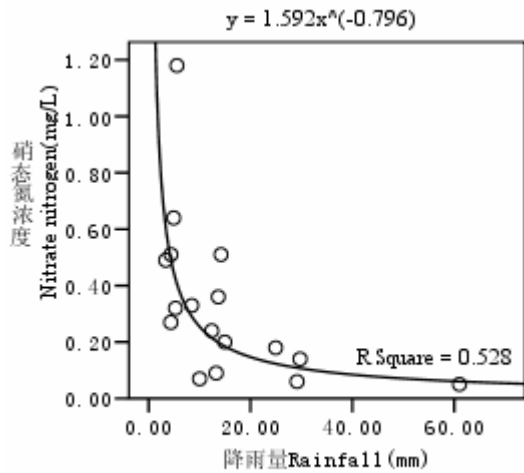
表 5-3 大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮浓度与降雨量和降雨 pH 值相关关系

Tab.5-3 Correlation between nitrate nitrogen concentration in rainfall or throughfall or stemflow and rainfall or pH value of rainfall

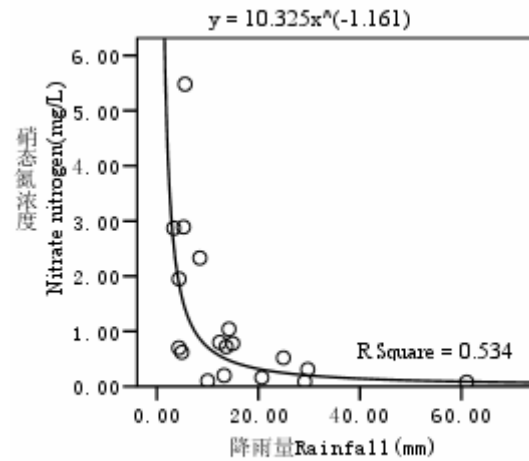
		降雨量	降雨硝态氮浓度	大气降雨 pH 值
降雨硝态氮浓度	Pearson Correlation	-0.511*	1.000	-0.091
	Sig. (2-tailed)	0.036		0.736
	N	17	18	16
栲树穿透雨硝态氮浓度	Pearson Correlation	-0.484*	0.824**	-0.063
	Sig. (2-tailed)	0.042	4.82×10 <sup>-05</sup>	0.810
	N	18	17	17
木荷穿透雨硝态氮浓度	Pearson Correlation	-0.496*	0.756**	-0.123
	Sig. (2-tailed)	0.036	4.45×10 <sup>-04</sup>	0.637
	N	18	17	17
栲树树干径流硝态氮浓度	Pearson Correlation	-0.482*	0.724**	-0.069
	Sig. (2-tailed)	0.043	0.001	0.793
	N	18	17	17
木荷树干径流硝态氮浓度	Pearson Correlation	-0.528*	0.765**	-0.116
	Sig. (2-tailed)	0.024	3.46×10 <sup>-04</sup>	0.657
	N	18	17	17

\*\* p<0.01; \* p<0.05

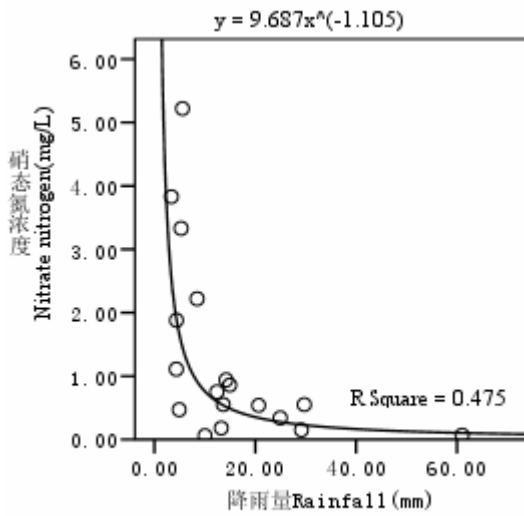




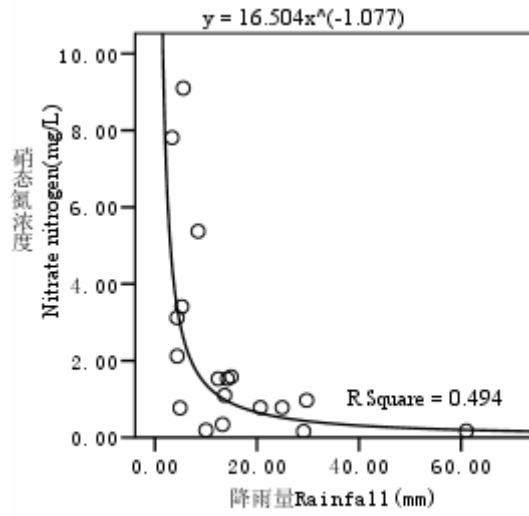
a 大气降雨



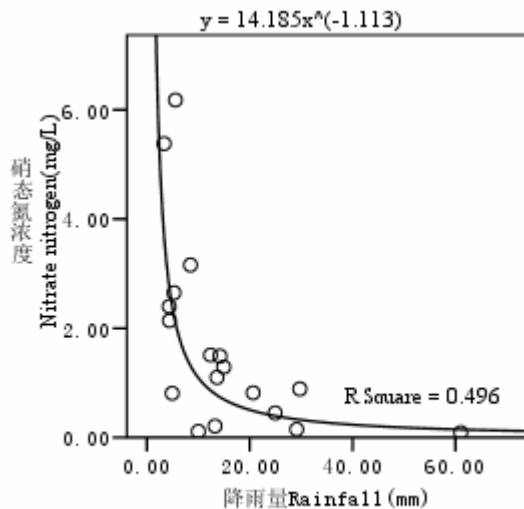
b 栲树群落穿透雨



c 木荷群落穿透雨



d 栲树群落树干径流



e 木荷群落树干径流

图 5-10 大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮浓度与降雨量的关系

Fig.5-10 Scatter for nitrate nitrogen concentration in rainfall, throughfall and stemflow against rainfall

在这个动态过程中，降雨量是一个非常重要的因素。通过对降雨量和大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮浓度的相关分析，发现硝态氮浓度与降雨量呈显著负相关（表 5-3）。大降雨量能起到稀释穿透雨和树干径流中硝态氮的作用，从而降低其中硝态氮的浓度。降雨量与硝态氮浓度呈幂函数关系（图 5-12）。

此外，有研究者（吕旭晨，2005）认为大气降雨对林冠及树干枝叶淋溶的过程，还取决于降雨强度、酸度和降雨中的营养物质浓度。通过相关分析发现（表 5-3），大气降雨的 pH 值与硝态氮浓度相关性不显著，大气降雨中硝态氮浓度与穿透雨和树干径流中硝态氮浓度极显著相关。这表明，天童地区常绿阔叶林穿透雨和树干径流中硝态氮的浓度与大气降雨中硝态氮浓度的密切相关，但受降雨酸度的影响较小。

另一方面大气降雨的淋溶过程还取决于枝叶的分泌物。枝叶对降雨营养元素和大气尘埃等干沉降的吸收或吸附以及植被的蒸散过程（吕旭晨，2005）。所有这些因素相互联系，最终决定了穿透雨和树干径流的营养元素浓度和养分输入量，从而影响森林系统淋溶量大小。

### 5.2.5 常绿阔叶林降雨截留过程中硝态氮输入量

观测期间各月降雨各分量硝态氮的输入量如图 5-11。2008 年 1 月大气降雨硝态氮的输入量明显高于其他月份。栲树群落穿透雨中硝态氮的输入量波动较小（图 5-11a），除 2008 年 1 月外，其他月份均低于大气降雨中硝态氮的输入量，树干径流中硝态氮的输入量波动很小，各月均低于大气降雨和穿透雨中硝态氮的输入量。木荷群落穿透雨中硝态氮的输入量各月份间差异较大，8 月、10 月、1 月逐步降低，3 月略有回升，除 2008 年 1 月外，其他月份均低于大气降雨中硝态氮的月输入量，树干径流中硝态氮的月输入量波动很小，各月均低于大气降雨和穿透雨中硝态氮的月输入量。大气降雨的水质会对林内雨的水质产生影响。Yawney 指出，外部雨水的浓度通过对冲洗、淋溶和吸收过程的影响来改变林内雨的化学物质浓度。淋洗和枝叶吸收是一个相互对立的动态过程，在低的雨水浓度下以淋溶为主，在高雨水浓度时则枝叶吸收占优势（李凌浩等，1994），因此在大气降雨中硝态氮浓度最高的 1 月，群落穿透雨中硝态氮的输入量较低。

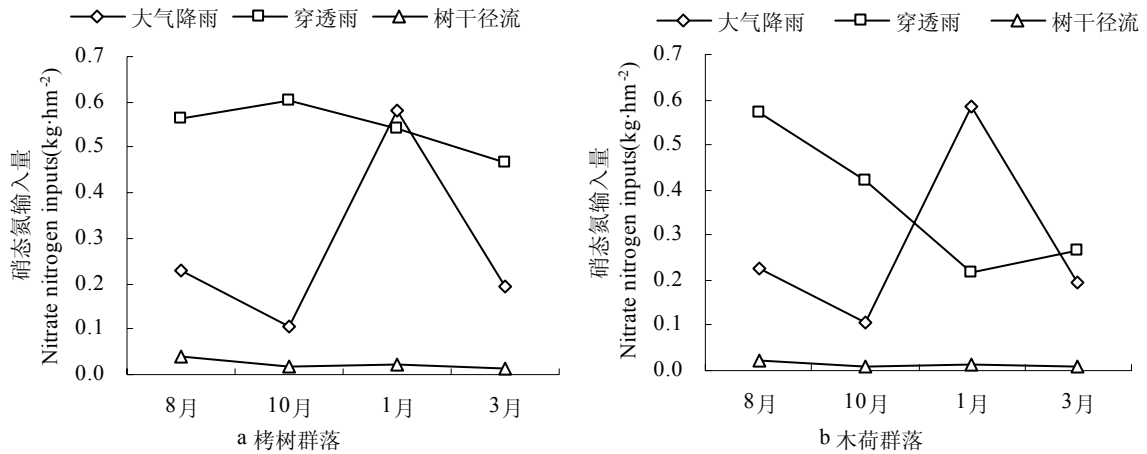


图 5-11 两个群落中大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮的月输入量

Fig.5-11 Monthly nitrate nitrogen inputs in rainfall, throughfall and stemflow in two communities

将截留降雨(包括穿透雨和树干径流)中养分的输入量减去降雨中养分的输入量就可得到该养分的林冠净流通量(net canopy flux), 它揭示林冠与降雨中养分相互作用的行为。正值表明林冠养分被降雨淋溶, 负值则说明降雨中的养分被林冠直接吸收(樊后保, 2000)。如图 5-12, 栲树群落和木荷群落在 8 月、10 月和 3 月硝态氮以淋溶作用为主导, 1 月硝态氮以被林冠直接吸收为主。天童常绿阔叶林每年从降雨中输入的硝态氮的总量约为  $3.339\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 栲树群落林内穿透雨硝态氮输入总量约为  $6.531\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 木荷群落为  $4.432\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。年林冠净流通量栲树群落为  $3.468\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 木荷群落为  $1.261\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (表 5-4)。

表 5-4 大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮的输入量和林冠吸收量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

Tab.5-4 Nitrate nitrogen input in rainfall, throughfall and stemflow, and direct uptake quantity by tree crown( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

	栲树群落			木荷群落		
	大气降雨	穿透雨	树干径流	大气降雨	穿透雨	树干径流
8 月	0.228	0.565	0.039	0.228	0.571	0.024
10 月	0.107	0.604	0.018	0.107	0.423	0.010
1 月	0.583	0.540	0.022	0.583	0.217	0.012
3 月	0.195	0.468	0.013	0.195	0.267	0.010
年度 ( $3\times\sum 4\text{months}$ )	3.339	6.531	0.277	3.339	4.432	0.168

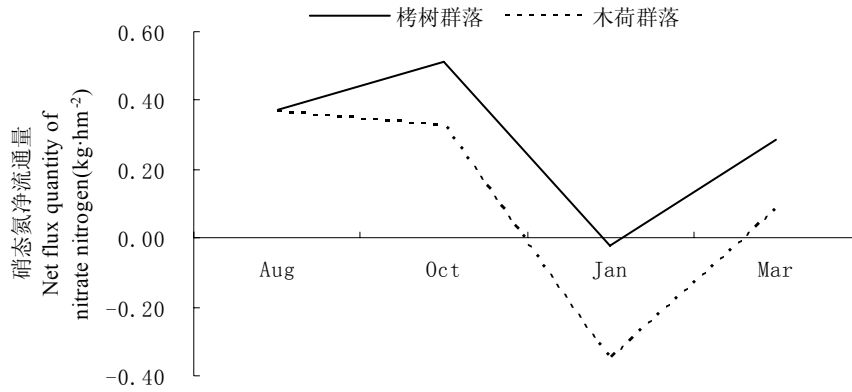


图 5-12 硝态氮的林冠净流量(穿透雨输入量+树干径流输入量-降雨输入量)的季节格局

Fig.5-12 Seasonal patterns in net canopy flux for nitrate nitrogen (input in throughfall plus input in stemflow minus input in rainfall)

### 5.3 讨论

穿透雨和树干径流中硝态氮浓度与大气降雨中硝态氮浓度显著相关，因此影响大气降雨中硝态氮浓度的各因子，如云团长距离移动，雷电产生氮化合物，周边地区大气污染源持续供给等，均对穿透雨和树干径流中硝态氮浓度产生间接的作用。因此要进一步了解大气降雨、穿透雨和树干径流中硝态氮的变化规律，需对当地大气中氮氧化物进行同期监测。

在降雨淋洗过程中，离子交换过程以及氮素化学形态的转变均对硝态氮的浓度产生影响，尤其是铵态氮和硝态氮的相互转化。由于实验条件限制，本文仅对降雨分量中硝态氮进行了测定，在后续的工作中将增加对铵态氮的测定。

土壤水以及径流水作为水文循环的一个重要环节，也是氮素循环的重要环节，要对氮素随降雨产生的循环过程和机制进行完整的研究，这两个环节是不可缺少的，在未来的工作中需要把这两个部分和降雨分量中氮素的测定同步进行，结合土壤以及枯落物氮素的转化，对氮素循环进行深入的研究。

## 5.4 结论

### 5.4.1 天童常绿阔叶林对大气降雨中酸性物质具有一定缓冲作用

天童地区大气降雨的 pH 值在 4.8-6.6 的范围内变化, pH 值平均为  $6.2\pm 0.5$ 。在观测期间, 大气降雨的 pH 值夏季最高, 冬季和春季较低, 变幅为 1.1, 酸雨概率为 11.11%, 出现在冬季和春季降雨较少的时期。穿透雨的 pH 值随着大气降雨的 pH 值的波动而波动, 同时显著高于大气降雨的 pH 值。不同的森林类型对酸性降雨的缓冲能力有所不同, 穿透雨的 pH 值是指示一个森林类型这种缓冲能力的重要指标, 在以往的研究中发现, 通常阔叶林的缓冲能力优于针叶林, 不同类型的阔叶林这种缓冲能力又有所不同。天童常绿阔叶林穿透雨的 pH 值显著地高于大气降雨的 pH 值, 尤其是在大气降雨的 pH 值较低时 ( $<5.6$ ), 二者的差值达到 0.5-0.9, 这表明天童地区以栲树和木荷为建群种和优势种的常绿阔叶林类型对于酸性降雨具有很强的缓冲能力。栲树群落和木荷群落二者的穿透雨 pH 值不存在显著地差异, 两个群落对于酸性降雨的缓冲能力基本相似。

树干径流中的 pH 值极显著地低于大气降雨和穿透雨的 pH 值, 在对各种森林类型的研究中均出现相同结果。树干径流的 pH 值与大气降雨的 pH 值密切相关, 同时还受到树木生长状况的影响, 在不同的季节里表现出不同的变化趋势。不同的树种之间, 由于树干分泌物的成分和含量的差异, 树干径流的 pH 值存在很大的差异, 栲树的树干径流 pH 值显著低于木荷, 这表明栲树的树干分泌的有机酸和无机酸含量高于木荷。

穿透雨和树干径流的 pH 值随季节的变化趋势与大气降雨 pH 值的变化趋势基本相同, 夏季降雨充沛的季节 pH 值明显的高于冬季和春节降雨较少的季节。穿透雨和树干径流的 pH 值与大气降雨的 pH 值极显著相关, 经回归拟合, 均呈线性关系。

### 5.4.2 栲树群落对硝态氮的淋溶作用明显强于木荷群落

单场降雨过程之间降雨硝态氮的变化规律较为复杂, 在不同的季节变化趋势有所不同, 在降雨较多的夏秋两季, 大气降雨的硝态氮浓度随着降雨的连续进行逐渐降低, 而在冬春两季不存在这种规律, 甚至相反。并且降雨中硝态氮浓度的

季节差异极大，冬季远高于夏季，甚至到达夏季的 10.6 倍之多，这表明大气降雨中的硝态氮主要来源于对大气中氮氧化物的淋洗，其浓度与降雨量的多寡密切相关，夏季较多的降雨起到了很大的稀释作用，并且频繁的降雨也使得大气中积累的氮氧化物含量较少，冬春季节的降雨量少，降雨的频率也较夏季低，因此大气中累积的氮氧化物的含量高于夏季，又由于降雨的强度也较小，对氮氧化物的淋洗力度也较小。因此，单场降雨不能像夏季一样有效地降低大气中的氮氧化物含量，导致连续降雨的过程中，降雨中硝态氮的浓度变化趋势与夏秋季节存在差异。

各季节单场降雨过程之间穿透雨的硝态氮浓度的变化趋势基本相同，随着降雨过程的连续进行，穿透雨的硝态氮浓度逐渐降低，在经过一个短暂的无雨阶段后第一场降雨的穿透雨硝态氮浓度再次升高。穿透雨的硝态氮浓度与降雨中硝态氮的浓度密切相关，除极个别情况，穿透雨的硝态氮浓度均明显地高于大气降雨的硝态氮浓度，降雨的硝态氮浓度越高，穿透雨的硝态氮浓度与其差值越大。森林的林冠对于大气中的尘埃和污染物具有很强的吸附作用，由于所选取的研究对象均为较成熟的林地类型，因此植物对降雨中氮的吸收量和吸收速率都迅速下降，铵态氮转化为硝态氮的比例较发育期的森林有所升高，成熟林内硝态氮的淋失相对较大，造成穿透雨的硝态氮浓度极显著地高于大气降雨的硝态氮浓度。

不同季节，穿透雨的硝态氮浓度的差异很大，与大气降雨的硝态氮浓度的季节变化趋势相同，冬季明显高于其他三个季节，夏季最低，表明穿透雨的硝态氮浓度明显受到不同季节降雨特征的影响。栲树群落和木荷群落穿透雨的硝态氮浓度差异不显著，除冬季相差较大外，其他季节都极为接近。

单场降雨之间树干径流的硝态氮浓度变化趋势与穿透雨的硝态氮变化趋势相同，在连续降雨过程中，树干径流的硝态氮浓度逐渐降低，在经过一个短暂的无雨阶段后第一场降雨的树干径流硝态氮浓度再次升高。树干径流的硝态氮浓度的季节变化趋势与大气降雨和穿透雨基本相同，冬季明显高于其他三个季节。树干径流的硝态氮浓度极显著地高于大气降雨和穿透雨中的硝态氮浓度，表现出明显的富集作用。在天童地区常绿阔叶林，降雨对硝态氮的作用以淋洗过程为主导，但在栲树群落和木荷群落情况略有不同，两个群落树干径流的硝态氮浓度存在显著的差异，栲树群落树干径流的硝态氮浓度高于木荷群落。这表明由于两个群落

个体的成熟程度有所不同，树木对硝态氮的淋洗和吸收情况存在差异。栲树群落为天童常绿阔叶林退化恢复演替的顶级群落，个体的年龄高于木荷群落，整体较木荷群落更为成熟，这可能导致栲树群落对硝态氮的吸收量小于木荷群落，另一方面，树木的胸径对于其所产生的树干径流中硝态氮的含量有着重要的影响，木荷群落整体胸径阶较栲树群落小，导致对大气中氮氧化物的吸附能力小于栲树群落。一方面是吸收量的增加，另一方面是淋洗量的减少，二者结合导致两个群落树干径流中硝态氮浓度差异的产生。

大气降雨和各降雨分量中硝态氮的浓度直接受到降雨量的影响，作为一个重要的因素，降雨量与降雨及其各分量中硝态氮的浓度呈显著负相关，雨量大，则稀释作用强。此外，降雨中硝态氮的浓度对各降雨分量中硝态氮的浓度具有极显著的影响。这两个主要因素与降雨强度、酸度以及枝叶分泌物等因素共同作用，各降雨分量的营养元素浓度和养分输入量，从而影响森林系统淋溶量大小。

天童地区常绿阔叶林大气降雨及各降雨分量之间硝态氮的输入量具有明显的差异。冬季大气降雨的硝态氮输入量明显高于其他季节。栲树群落穿透雨的硝态氮输入量的季节波动较小，木荷群落的波动较大，两群落树干径流的硝态氮输入量季节波动均较小，且远低于大气降雨和穿透雨的硝态氮输入量，这与树干径流量在降雨截留过程中所占比例较小有关。大气降雨的硝态氮输入量除1月外均高于穿透雨的硝态氮输入量，硝态氮的树冠净流通量显示，1月两个群落对降雨中的硝态氮均以林冠直接吸收为主。天童常绿阔叶林从降雨中输入的硝态氮的总量约为  $3.339\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，栲树群落林内穿透雨硝态氮输入总量约为  $6.531\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，木荷群落为  $4.432\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。年林冠净流通量栲树群落为  $3.468\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，木荷群落为  $1.261\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。栲树群落的林内雨的硝态氮输入量高于木荷群落，林冠净流通量在各月均高于木荷群落，栲树群落对硝态氮的淋溶作用明显强于木荷群落。

## 第六章 结论

森林通过其林地独特的结构，截留部分降水，减小了进入林地的水分，减小降雨对林地的冲击，通过穿透雨、树干径流和林冠截留对大气降雨进行重新分配，同时通过植物蒸腾和凋落层水分吸收等过程，发挥林地水文作用，是森林生态系统水文调节功能具体表现。本研究以森林结构及其对降雨再分配功能影响为主线，研究了中国东部天童常绿阔叶林区两个成熟森林恢复类型的持水特征，分析了降雨再分配的功能特征以及各降雨分量的化学特征，探讨了在两种不同林地类型间，森林生态系统对降雨过程以及对养分循环的影响，主要研究结果如下：

### 6.1 栲树群落乔木层结构优于木荷群落

木荷群落的乔木密度明显大于栲树群落，栲树群落乔木的胸径、树高和生物量均显著高于木荷群落，且郁闭度也高于木荷群落。从乔木层的结构上看，栲树群落优于木荷群落。

栲树群落建群种栲树的胸径分布范围较大，中等径阶个体最多，随着径阶增大，个体数目逐渐减少，呈现不对称的单峰型，栲树群落中的木荷胸径分布呈现间歇型。木荷群落建群种木荷的胸径分布范围也较大，以10-15cm径阶的个体数目最大，随径阶的增大和减小，个体数目逐渐减少，呈单峰型，木荷群落中的栲树胸径分布呈现单柱型。两群落的建群种种群目前的发展趋势属成熟稳定型。

栲树群落中栲树的高度分布呈现双峰型，表明栲树的高度存在两个明显的亚层，23-24m层和19-20m层。木荷的高度分布也呈现双峰型，表明木荷的高度也可以分为两个亚层，较上一层的高度与栲树较低一层高度相近。木荷群落中，高度的分布较为集中，呈现单峰，以17-18m的个体最多，因此群落中木荷的高度没有明显的层次，呈现为单层。

### 6.2 栲树群落最大持水能力优于木荷群落

木荷枝和叶的自然含水量均高于栲树，但二者的饱和持水量较为接近。栲树叶的饱和亏接近木荷叶，枝的饱和亏高于木荷枝。两种植物的自然含水量、饱和亏和饱和持水量均是叶高于枝，叶的水分亏缺显著高于枝的，叶的饱和亏接近枝



饱和亏的二倍。

栲树和木荷枝叶的吸水速率随时间的变化趋势基本相同，前期吸水速率较高，随着时间变化迅速下降，降幅极大，中后期吸水速率下降到较低的水平，下降幅度明显减小。栲树叶与木荷叶，栲树枝与木荷枝的吸水速率几乎完全相同，而枝与叶的吸水速率存在极显著差异，叶的吸水速率显著高于枝的吸水速率。林冠调蓄水分的功能在1/2h内发挥的作用最为突出，1/2h后两种植物枝和叶的吸水速率均降至较低水平。

林下枯落物吸水量均随着浸水时间的延长而增加，而吸水速率呈降低趋势，其调蓄水分功能在降雨后的4h内发挥的作用最为突出（4h后吸水速率降至起始的27%以下），凋落物吸水速率大小顺序，栲树下层凋落物>栲树表层凋落物≈木荷下层凋落物>木荷上层凋落物。

栲树群落的林冠最大持水能力显著地高于木荷群落，其林冠最大持水能力是木荷的1.52倍，为 $86.962 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，木荷林冠最大持水能力为 $57.347\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而木荷群落的枯落物最大持水能力高于栲树群落，为 $4.63\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，栲树群落为 $4.02\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。但栲树群落的枯落物表层较木荷群落疏松，表层枯落物对下层枯落物水分的保持作用较木荷群落大。

### 6.3 栲树群落的降雨截留能力低于木荷群落

穿透雨量、树干径流量和树冠截留量随时间的变化趋势与降雨量的变化趋势基本相同，穿透雨率和树干径流率也与降雨量具有相同的变化趋势，林冠截留率则与降雨量反向变化。

穿透雨量与降雨量极显著相关。冬季受降水形式的影响，穿透雨量和穿透雨率均极低。栲树群落和木荷群落林下穿透雨随时间的变化趋势基本相同，栲树群落的穿透雨量和穿透雨率均高于木荷群落，两个群落的穿透雨量（率）存在极显著差异。

穿透雨量和穿透雨率受到林地特征和降雨特征的共同作用。不同群落类型间，穿透雨差异主要受到其林冠结构的影响，栲树群落密度较小，导致观测点距主干距离远，栲树的分枝角度大于木荷，因此栲树群落的林下穿透雨较木荷群落大。同一群落不同地点的穿透雨量与观测点上方的开放度和叶面积指数密切相

关，开放度较高，叶面积指数较小的地点，穿透雨量（率）较大。降雨量、降雨时长、降雨强度和降雨时的风速对穿透雨量（率）均有显著的影响，尤其是降雨量与穿透雨量之间存在明显线性关系， $y = 0.7903x + 0.3427$ ， $R^2=0.9942$ 。

单株树木的树干径流量与降雨量均极显著相关，两者间存在明显的线性关系。栲树群落的树干径流量在各月中均高于木荷群落两个群落的树干径流量与降雨量也极显著相关，呈线性关系，栲树群落 $y = 0.0187x - 0.0465$ ， $R^2 = 0.9532$ ，木荷群落 $y = 0.0129x - 0.0157$ ， $R^2 = 0.9596$ 。

树干径流不仅受到降雨特征的影响，也与树木自身结构（胸径和冠层结构）密切相关。同一群落不同径阶的栲树或木荷，树干径流量和树干径流率均存在极显著差异，胸径阶较大的树木树干径流量和树干径流率均较高。不同群落同一径阶的栲树树干径流量和树干径流率差异不明显，乔木层树冠分层现象造成，不同群落同一径阶木荷的树干径流量和树干径流率存在显著地差异，木荷群落中的木荷树干径流量和树干径流率均高于栲树群落中的木荷。

树干径流虽然占降雨量的比例很小，栲树群落仅为 1.5%，木荷群落仅为 1.2%，但树干径流具有明显的降雨汇集作用，在树干周围输入的雨量是同期降雨量几倍，甚至几十倍。栲树群落中栲树的平均漏斗比率为 7.7，木荷的平均漏斗比率为 7.3，木荷群落中木荷的平均漏斗比率为 13.5，栲树的平均漏斗比率为 11.7。在观测期间，两个群落最高漏斗比率分别达到 60.3 和 96.5，栲树群落的平均漏斗比率低于木荷群落，对降雨的汇集作用小于木荷群落。树干径流的漏斗比率与降雨量极显著相关，呈线性关系。

树冠截留量（率）与群落的穿透雨量（率）极显著相关，同时，降雨量与群落树冠截留量呈极显著正相关，但与树冠截留率相关性不显著。随着降雨量的增大，树冠截留量逐渐升高，在大雨量时，树冠截留量上升趋势较小雨量时平缓，最终截留量将逐渐达到稳定。

#### 6.4 栲树群落和木荷群落对于酸性降雨的缓冲能力基本相似

穿透雨和树干径流的 pH 值随季节的变化趋势与大气降雨 pH 值的变化趋势基本相同，夏季降雨充沛的季节 pH 值明显地高于冬季和春节降雨较少的季节。pH 值大小顺序，穿透雨>大气降雨>树干径流。穿透雨的 pH 值是指示一个森林

类型这种缓冲能力的重要指标,天童地区以栲树和木荷为建群种和优势种的常绿阔叶林类型对于酸性降雨具有很强的缓冲能力。栲树群落和木荷群落二者的穿透雨 pH 值无显著差异,两个群落对于酸性降雨的缓冲能力基本相似。树干径流的 pH 值不仅与大气降雨的 pH 值密切相关,同时还受到树木生长状况的影响,在不同的季节里表现出不同的变化趋势。栲树的树干径流 pH 值显著低于木荷,其树干分泌的有机酸和无机酸含量高于木荷。

### 6.5 栲树群落对硝态氮的淋溶作用明显强于木荷群落

大气降雨中的硝态氮主要来源于对大气中氮氧化物的淋洗,其浓度与降雨量的多寡密切相关,季节差异极大。雨量充沛的夏季,硝态氮浓度远低于降雨较少的冬春季节。穿透雨和树干径流的硝态氮浓度与降雨中硝态氮的浓度密切相关,树干径流对硝态氮具有明显的富集作用。除了极个别情况,硝态氮浓度大小顺序为,树干径流>>穿透雨>大气降雨。穿透雨和树干径流随季节的变化趋势相似,冬季>秋季>春季>夏季。大气降雨和各降雨分量中硝态氮的浓度直接受到降雨量的影响,降雨量与降雨及其各分量中硝态氮的浓度呈显著负相关。此外,降雨中硝态氮的浓度对各降雨分量中硝态氮的浓度具有极显著的影响。这两个主要因素与降雨强度、酸度以及枝叶分泌物等因素共同作用于各降雨分量的营养元素浓度和养分输入量,从而影响森林系统淋溶量大小。

栲树群落和木荷群落穿透雨的硝态氮浓度差异不显著,除冬季相差较大外,其他季节都极为接近。而两个群落树干径流的硝态氮浓度存在显著的差异,栲树群落树干径流的硝态氮浓度高于木荷群落。这是由于两个群落个体的成熟程度有所不同,树木对硝态氮的淋洗和吸收情况存在差异。

天童地区常绿阔叶林大气降雨及各降雨分量之间硝态氮的输入量具有明显的差异。大气降雨的硝态氮输入量除 1 月外均高于穿透雨的硝态氮输入量,硝态氮的树冠净流通量显示,1 月两个群落对降雨中的硝态氮均以林冠直接吸收为主。天童常绿阔叶林从降雨中输入的硝态氮的总量约为  $3.339\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,栲树群落林内穿透雨硝态氮输入总量约为  $6.531\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,木荷群落为  $4.432\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。年林冠净流通量栲树群落为  $3.468\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,木荷群落为  $1.261$

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。栲树群落的林内雨的确态氮输入量高于木荷群落，林冠净流量在各月均高于木荷群落，栲树群落对确态氮的淋溶作用明显强于木荷群落。

## 6.6 天童常绿阔叶林降雨截持能力处于中等水平，树干径流富集作用最强

降雨量是造成降雨分量各地区间差异的主要因素。天童地区常绿阔叶林穿透雨率基本与各地区平均值相当，树冠截留略高于各地区平均值，表明该地区常绿阔叶林的降雨截持能力属于中等水平。天童地区常绿阔叶林对酸性降雨具有一定的缓冲作用，并且，在各地区常绿阔叶林中，其树干径流对  $\text{H}^+$  的富集作用最强。

## 6.7 研究展望

本文侧重于群落乔木层对降雨的再分配作用，未探讨灌木层和草本层在水分循环和再分配中起到的作用。灌木层和草本层作为林下植被的重要组成部分，在水文过程中也起到了重要的作用，在生态系统水文功能重要占据重要的地方，在今后的工作中，应分别对群落不同层次在水分循环和养分循环中的作用进行研究。

林下穿透雨的空间分布特征是降雨再分配的重要组成部分，在自然林中穿透雨的空间异质性通常较大，除了开放度和叶面积指数外，林冠的其他特征也对穿透雨的空间分布特征具有重要的影响。

此外，对于水量平衡研究，林冠的蒸腾过程和径流过程必不可少，因此要完善水量平衡的研究，还需开展这两个方面的观测工作。另一方面，土壤水和径流水的化学特征，也是养分循环的重要组成部分，要深入完整地探讨养分循环的机理以及养分循环对群落造成的影响作用，均需要增加这个方面的研究，包括对多种阴阳离子含量的测定 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  等)，尤其是  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$ ，对于降雨的酸度影响很大，对于位于酸雨区的天童常绿阔叶林的水文化学研究具有重要的意义。

天童地区其他森林类型（如马尾松林等）的降雨分配及化学特征的观测目前正在着手开展，森林类型间的差别会导致水文过程的差异，尤其是在酸度上，很多研究均表明，针叶林对酸性降雨非常敏感。因此这方面的研究具有很重要的意义。

## 参 考 文 献

1. Aboal J R, Morales D, Hernández M, *et al.* The measurement and modelling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands. *Journal of Hydrology*. 1999, 221:161-175.
2. Amezaga I, Arias A G, Domingo M, *et al.* Atmospheric deposition and canopy interactions for conifer and deciduous forests in northern Spain. *Water Air Soil Pollution*. 1997, 97: 303- 313.
3. Asdak C, Jarvis P G, Van Gardingen P, Fraser A. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology*. 1998a, 206:237-244.
4. Asdak C, Jarvis P G, Gardingen P V. Modelling rainfall interception in unlogged and logged forest areas of central Kalimantan, Indonesia. *Hydrology and Earth System Sciences*. 1998b, 2: 211–220.
5. Aston A R. Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology*. 1979, 42: 383-396.
6. Calder I R. A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*. 1986, 89: 65-71.
7. Carlyle-Moses D E, Flores-Laureano J S, Price A G. Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*. 2004, 297: 124-135.
8. Carlyle-Moses D E, Price A G. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology*. 1999, 214: 103-110.
9. Chang S C, Matzner E. The effect of beech stemflow on spatial patterns of soil solution chemistry and seepage fluxes in a mixed beech/oak stand. *Hydrological Processes*. 2000, 14: 135-144.
10. Cheng J D, Lin L L, Lu H S. Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2002, 165: 11-28.
11. Crockford R H, Richardson D P, Sageman R. Chemistry of rainfall, throughfall

- and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in south-eastern Australia:  
3. Stemflow and total inputs. *Hydrological Processes*. 1996, 10: 25-42.
12. Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall in an eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia. II: stemflow and factors affecting stemflow in a dry sclerophyll eucalypt forest and *Pinus radiata* plantation. *Hydrological Processes*. 1990a, 4: 145-155.
  13. Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall in an eucalypt forest and pineplantation in southeastern Australia. III: determination of the canopy storage capacity of a dry sclerophyll eucalypt forest. *Hydrological Processes*. 1990b, 4: 157-167.
  14. Crockford R F, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrogeology Processes*. 2000, 14: 2903-2920.
  15. Czarnowski M S, Olszewski J L. Rainfall interception by a forest canopy. *Oikos*, 1968, 19:345-350.
  16. David McJannet. Precipitation interception in Australian tropical rainforests- I. Measurement of stemflow, throughfall and cloud interception. *Hydrological Process*. 2007, 21:1692–1702.
  17. Domingo F, Sánchez G, Moro M J, *et al.* Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1998, 91: 275-292.
  18. Domingo F, van Gardingen P R, Brenner A J. Leaf boundary layer conductance of two native species in southeast Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1996, 81: 179-199.
  19. Dunkerley D. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation-a brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Process*. 2000, 14: 669-678.
  20. Durocher M G. Monitoring spatial variability of forest interception. *Hydrological Processes*. 1990, 4: 215-229.
  21. Dykes A P. Rainfall interception from a lowland tropical rainforest in Brunei.

- Journal of Hydrology. 1997, 200:260-279.
22. Feller M C. Water balances in *Eucalyptus regnans*, *E.oblicua* and *P.radiata* forests in Victoria. Australian Forestry. 1981, 44:153-161.
  23. Fenn M E, Kiefer J W. Throughfall deposition of nitrogen and sulfur in a Jeffrey pine forest in the San Gabriel Mountains, southern California. Environmental Pollution. 1999, 104: 179-187
  24. Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1979, 105: 43–55.
  25. Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. Journal of Hydrology. 1995,170:79–86.
  26. Gash J H C, Monton A J. An application of the Rutter model to forest. Journal of Hydrology. 1978, 38: 49-58.
  27. Gene E Likens, John S Eaton. A Polyurethane Stemflow Collector for Trees and Shrubs. Ecology. 1970, 51(5): 938-939.
  28. Gómez J A, Giraldez J V, Fereres E. Rainfall interception by olive trees in relation to leaf area. Agricultural Water Management. 2001, 49: 65-76.
  29. Gómez J A, Vanderlinden K, Giráldez J V, et al. Rainfall concentration under olive trees. Agricultural Water Management. 2002, 55:53-70.
  30. Hall R L. Interception loss as a function of rainfall and forest types:stochastic modelling for tropical canopies revisited. Journal of hydrology. 2003, 280:1-12.
  31. Harris D. The partitioning of rainfall by a banana canopy in St. Lucia, Windward Islands. Tropical Agriculture. 1997, 74:198-202.
  32. Haworth K, McPherson G R. Effects of *Quercus emoryi* trees on precipitation distribution and microclimate in a semiarid savanna. Journal of Arid Environments. 1995, 31: 153-170.
  33. Herwitz S R, Slye R E. Three-dimensional modeling of canopy tree interception of wind-driven rainfall. Journal of Hydrology. 1995, 168: 205-226.
  34. Herwitz S R. Aboveground adventitious roots and stemflow chemistry of *Ceratopetalum virchowii* in an Australian montane tropical rain forest. Biotropica. 1991, 23 (3): 210-218.

35. Iroumé A. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile. *Hydrological Process*. 2002, 16: 2347–2361.
36. Jackson I J. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *Journal of Hydrology*. 1975, 24:215-238.
37. Jetten V G. Interception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model. *Hydrological Processes*. 1996, 10: 671-685.
38. Johnson R C. The interception, throughfall and stemflow in a forest in Highland Scotland and the comparison with other upland forests in the UK. *Journal of Hydrology*. 1990, 118: 281-287.
39. Kimmins J P. Some Statistical Aspects of Sampling Throughfall Precipitation in Nutrient Cycling Studies in British Columbian Coastal Forests. *Ecology*. 1973, 54(5):1008-1019.
40. Koichiro K, Yuri T, Nobuaki T, *et al.* Generation of stemflow volume and chemistry in a mature Japanese cypress forest. *Hydrological Processes*. 2001, 15: 1967-1978.
41. Levia D F Jr, Frost E F. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*. 2003, 274: 1-29.
42. Levia D F Jr, Herwitz S R. Physical properties of water in relation to stemflow leachate dynamics: implications for nutrient cycling. *Canadian Journal of Forest Research*. 2000, 30: 662-666.
43. Lloyd C R, Marques F A de O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1988, 42: 63-73.
44. Loustau D, Berbigier P, Granier A, *et al.* Interception loss, throughfall and stemflow in maritime pine stand I: Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *Journal of Hydrology*. 1992, 138: 449-467.
45. Marin C T, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in



- western Amazonia. *Journal of Hydrology*. 2000, 237: 40-57.
46. Martine-Meza E, Whitford WG. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. *Journal of Arid Environments*. 1996, 32: 271-287.
  47. Massman W J. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forests. *Agricultural Meteorology*. 1983, 28:261–286.
  48. Matschonat G, Falkengren-Grerup U. Recovery of soil pH, cation-exchange capacity and the saturation of exchange sites from stemflow-induced soil acidification in three Swedish beech (*Fagus sylvatica* L.) forests *Scand. Scandinavian Journal of Forest Research*. 2000, 15: 39-48.
  49. Mizutani K, Yamanoi K, Ikeda T, *et al.* Applicability of the eddy correlation method to measure sensible heat transfer to forest under rainfall conditions. *Agriculture and Forest Meteorology*. 1997, 86: 193-203.
  50. Návar J, Bryan R. Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*. 1990, 115: 51-63.
  51. Návar J, Charles F, Jurado E. Spatial variations of interception loss components by *Tamaulipan thornscrub* in northeastern Mexico. *Forest Ecology and Management*. 1999, 124: 231-239.
  52. Neal C, Robson A J, Bharwaj C L, *et al.* Relationships between precipitation, stemflow and throughfall for a lowland beech plantation, black Wood; Hampshire, southern England: findings on interception at a forest edge and effect of storm damage. *Journal of Hydrology*. 1993, 146: 221-233.
  53. Neal C, Smith C J, Walls J, *et al.* Comments on the hydrochemical regulation of the halogen elements in rainfall, stemflow, throughfall and stream waters at the acidic forested area in mid-Wales. *The Science of The Total Environment*. 1990, 91: 1-11.
  54. Neary A J, Gizyn W I. Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*. 1994, 24: 1089-1100.
  55. Niklinska M, Maryanski M, Szarek G, *et al.* Chemical input/output balance for a

- moderately polluted forest catchment in southern Poland. *Water, Air, and, Soil Pollution*.1995, 3:1771 – 1776.
56. Paltineanu I C, Starr J L. Preferential water flow through corn canopy and soil water dynamics across rows. *Soil Science Society of America*. 2000, 64: 44-54.
  57. Peterson D L, Rolfe G L. Precipitation components as nutrient pathways in floodplain and upland forest of central Illinois. *Forest Science*. 1982, 28: 321-332.
  58. Potter C S ,Ragsdale H L, Swank W T. Atmospheric deposition and foliar leaching in a regenerating southern Appalachian forest canopy. *Journal of Ecology*. 1991, 79: 97-115.
  59. Pressland A J. Rainfall partitioning by an arid woodland (*Acacia aneura* F. Muell.) in south- western Queensland. *Australian Journal of Botany*. 1973, 21: 235-245.
  60. Price A G, Carlyle-Moses D E. Measurement and modeling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2003, 119: 69-85.
  61. Ramrez J A, Senarath S U S. Astatistical-dynamical parameterization of interception and land surface–atmosphere interactions. *Journal of Climate*. 2000,13: 4050–4063.
  62. Robin L H. Interception loss as a function of rainfall and forest types: Stochastic modeling for tropical canopies revisited. *Journal of Hydrology*. 2003, 280: 1–12.
  63. Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*. 1971, 9: 367-384.
  64. Schroth G, da Silva L F, Wolf M A, *et al*. Distribution of throughfall and stemflow in multi-strata agroforestry, perennial monoculture, fallow and primary forest in central Amazonia, Brazil. *Hydrological Processes*. 1999, 13: 1423-1436.
  65. Sinun W, Meng W W, Douglas I, *et al*. Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the Ulu Segama rain forest, Sabah, Malaysia. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*. 1992, 335: 389-395.
  66. Sobieraj J A, Elsenbeer H, Coelho R M, *et al*. Spatial variability of soil hydraulic

- conductivity along a tropical rainforest catena. *Geoderma*. 2002, 108: 79-90.
67. Tang C. Interception and recharge processes beneath a *Pinus elliotii* forest. *Hydrological Processes*. 1996, 10: 1427-1434.
  68. Taniguchi M, Tsujimura M, Tanaka T. Significance of stemflow in groundwater recharge. 1: evaluation of the stemflow contribution to recharge using a mass balance approach. *Hydrological Processes*. 1996, 10: 71-80
  69. Tobón-Marín C, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*. 2000, 237: 40-57.
  70. Van Dijk A I J M, Bruijnzeel L A. Modeling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. *Journal of Hydrology*. 2001, 247: 230-238.
  71. Wang A Zh , Li J Zh, Liu J M. A semi-theoretical model of canopy rainfall interception for *Pinus Koraiensis* Nakai. *Ecological Modelling*. 2005, 184: 355-361.
  72. Watanabe T, Mizutani K. Model study on micrometeorological aspects of rainfall interception over an evergreen broad-leaved forest. *Agricultural and forest meteorology*. 1996, 80: 195-214.
  73. Whitehead D, Kelliher F M. Modeling the water balance of a small *Pinus radiata* catchment. *Tree Physiology*. 1991, 9: 17-33.
  74. Xiao Q, McPherson E G, Ustin S L, *et al.* Winter rainfall interception by two mature opengrown trees in Davis, California. *Hydrological Processes*. 2000, 14: 763-784.
  75. 鲍文,包维楷,何丙辉,等. 岷江上游油松人工林对降雨的截留分配效应. *北京林业大学学报*. 2004, 26(5):10-16.
  76. 曹云,黄志刚,欧阳志云,等. 湖南省张家界马尾松林冠生态水文效应及其影响因素分析. *林业科学*. 2006,42(12):13-20.
  77. 曹云,黄志刚,欧阳志云,等.长江防护林——樟树林对降雨再分配的影响. *长江流域资源与环境*.2007,16(5):603-608.

78. 曹云,欧阳志云,黄志刚,等.中亚热带杜仲人工林对降雨资源再分配的水文特征.资源科学.2007a, 29(2):52-59.
79. 曹云,欧阳志云,黄志刚,等.中亚热带红壤地区油桐(*Vernicia fordii*)林冠水文效应特征.生态学报.2007b,27(5):1740-1747.
80. 常学向,赵爱芬,王金叶,等.祁连山林区大气降水特征与森林对降水的截留作用.高原气象.2002, 21(3): 274-280.
81. 陈步峰,曾庆波,黄全,等.热带山地雨林生态系统的水分生态效应-冠层淋溶、水化学贮滤.生态学报.1998, 18(4): 364-370.
82. 陈步峰,周光益,曾庆波,等.热带山地次生雨林生态系统的水文学过程及养分动态.林业科学研究.1994, 7(5): 525-530.
83. 程伯容,许广山,高世东.森林林冠对酸性降水化学组成的影响.中国环境科学.1989, 9(3):155-157.
84. 崔向慧,李海静,王兵.江西大岗山常绿阔叶林生态系统水量平衡的研究.林业科学.2006, 42(2):8-12.
85. 崔向慧,李海静,王兵.江西大冈山常绿阔叶林水文生态效应的研究.江西农业大学学报.2004, 26(5):661-667.
86. 邓世宗,韦炳斌.不同森林类型林冠对大气降雨量再分配研究.林业科学.1990, 6(3):271-276
87. 丁圣彦,宋永昌.浙江常绿阔叶林演替系列优势种光合生理生态的比较.生态学报.1999,19(3): 319-323.
88. 丁圣彦.常绿阔叶林演替系列比较生态学.开封:河南大学出版社.1999,2.
89. 丁圣彦.浙江天童常绿阔叶林演替系列栲树和木荷成为优势种的原因.河南大学学报(自然科学版).2001,31(1):79-83.
90. 董世仁,郭景唐,满荣洲.华北油松人工林的透流、干流与树冠截留.北京林业大学学报.1987,9(1):58-67.
91. 樊后保,苏兵强,林德喜.杉木人工林生态系统的生物地球化学循环II:氮素沉降动态.应用与环境生物学报.2000b,6(2):133-137.
92. 樊后保,苏兵强.杉木人工林生态系统的生物地球化学循环I:养分归还动态,应用与环境生物学报.2000a, 6(2):127-132.

93. 范世香,裴铁番,蒋德明,等. 两种不同林分截留能力的比较研究.应用生态学学报. 2000, 11(5):671-674.
94. 范世香,裴铁番,迟振文.树干径流及林冠截留规律分析,辽宁林业科技.1992, (1):54-57.
95. 范世香,裴铁番,韩绍文.树干径流单因子模拟实验分析,生态学杂志.1990, 9(5):32-35.
96. 冯宗炜,陈楚莹,王开平.亚热带杉木纯林生长生态系统中营养元素的积累、分配和循环的研究.植物生态学与地植物学丛刊.1985, 9(4):246—256.
97. 甘健民,薛敬意,谢寿昌. 云南中山湿性常绿阔叶林中降雨对养分淋溶的影响.植物生态学报.1996, 20(3):279-284.
98. 甘健民,赵恒康,薛敬意. 云南哀牢山常绿阔叶林林冠对降雨的再分配. 林业科技.1999, 24(4):16-18.
99. 高甲荣,肖斌,张东升,等.国外森林水文研究进展述评.水土保持学报. 2001,15(5): 60-64.
100. 巩合德,王开运,杨万勤,等. 川西亚高山原始云杉林内降雨分配研究. 林业科学. 2005, 41(1): 198-201.
101. 郭景唐. 华北油松人工林树枝特征函数对干流量影响的研究. 周晓峰主编. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社. 1994. 268-273.
102. 郭忠升,邵明安. 雨水资源、土壤水资源与土壤水分植被承载力. 自然资源学报. 2003, 18(5): 522-528.
103. 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社.2002.
104. 韩绍文,顾连宏,王本楠. 树干径流过程的动态响应模型,应用生态学报. 1992, 3(3):207-214.
105. 黄承标,梁宏温. 广西亚热带主要林型的树干茎流. 植物资源与环境. 1994, 3(4): 10-17.
106. 黄承标,元昌安,韦峰. 用平均木法测定杉木林树干茎流的初步尝试. 广西农业大学学报. 1993, 12(4):63-68.
107. 黄承标,文受春.里骆林区常绿阔叶林和人工杉木林气候水文效应.生态学杂志. 1993, 12(3):1-7.

- 108.黄建辉,李海涛,韩兴国,等. 暖温带两种针叶林生态系统中茎流和穿透雨的养分特征研究. 植物生态学报. 2000, 24(2):248-251.
- 109.黄绍敏,宝德俊,皇甫湘荣.施氮对潮土土壤及地下水硝态氮含量的影响. 2000a, 19(4):228-229,241.
- 110.黄绍敏,张鸿程,宝德俊,等.施肥对土壤硝态氮含量及分布的影响及合理施肥研究.土壤与环境.2000b,9(3):201-203.
- 111.黄忠良,丁铭懋,张祝平,等.鼎湖山季风常绿阔叶林的水文学过程及其氮素动态.植物生态学报. 1994, 18(2): 194-199
- 112.姜志林,王冬米,叶镜中. 苏南丘陵主要森林类型对降水分配格局的影响. 见周晓峰主编, 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社. 1994, 327-335.
- 113.李昌华,铃木雅一,刘曙光,等.江西九连山区常绿阔叶林林冠截流量的估算.自然资源学报. 1997, 12(3):233-243
- 114.李海涛,韩兴国,陈灵芝. 华北暖温带山地落叶阔叶混交林的茎流研究. 生态学报. 1997, 17(4): 371-376.
- 115.李振新,郑华,欧阳志云,等. 岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征的研究. 生态学报. 2004, 24(5): 1015-1021.
- 116.刘方春,轰俊华,刘春生,等.不同施肥措施对土壤硝态氮垂直分布的特征影响. 土壤通报. 2005, 36(1):50-53.
- 117.刘菊秀,温达志,周国逸. 广东鹤山酸雨地区针叶林与阔叶林降水化学特征,中国环境科学. 2000,20(3):198-202.
- 118.刘菊秀,张德强,周国逸. 鼎湖山酸沉降背景下主要森林类型水化学特征初步研究,应用生态学报. 2003,14(8):1223-1228.
- 119.刘世荣,温远光,王兵, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社. 1996.
- 120.刘曙光. 降雨在林冠中的分割研究透视. 林业科技通讯. 1990, (12): 16-18.
- 121.刘曙光.树冠截留模型.林业科学. 1992,28(5):445-449
- 122.刘云国,片山幸土,西村和雄,等.降水中的pH值和金属元素在松柏混交林内变化动态,植物生态学报. 1996, 20(3):216-224.

- 123.卢俊培,曾庆波. 热带森林水文学研究议.热带林业科技. 1987, (2):1-9.
- 124.吕旭晨.重庆市主城区与铁山坪流域森林降水化学研究.西南师范大学.2005.
- 125.罗天祥.龙胜里骆杉木人工林群落的降雨截留和养分淋溶归还.自然资源.1995,(6):44-50.
- 126.马雪华.森林水文学.北京:中国林业出版社.1993.
- 127.潘维铸,田大伦,谌小勇.亚热带杉木人工林生态系统中的水文学过程和养分动态.中南林学院学报.1989, 9(18):1-18.
- 128.裴铁璠,郑远长.林冠分配降雨过程模型. I 常雨强下穿透降雨、树干径流和林冠截留模型.林业科学.1996a,32(1):1-10
- 129.裴铁璠,范世香,韩绍文等.林冠分配降雨过程的模拟实验分析,应用生态学报.1993, 4(3):250-255.
- 130.阮士松. 一种新型的树干径流采集器的研制. 四川林业科技. 2006, 27(1): 95-96.
- 131.石盛莉,潘根兴,张乐华. 酸沉降影响下庐山森林生态系统水相疏的分布与动态研究,生态学报. 2001,21(9):1463-1468.
- 132.时忠杰,王彦辉,熊伟, 等. 单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性. 生态学报. 2006, 26(9): 2877-2886.
- 133.宋永昌.天童国家森林公园的植被.见:浙江天童国家森林公园的植被和区系. 上海:上海科学技术文献出版社. 1995,1-44.
- 134.唐常源. 亚热带马尾松人工林的降雨截留作用. 地理学报. 1992, 47(6): 545-551.
- 135.万师强,陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流. 生态学报. 2000, 20(1): 61-67.
- 136.王礼先,孙宝平.森林水文研究及流域治理综述.水土保持科技情报. 1990,(2):10-15.
- 137.王礼先,张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展.世界林业研究. 1998, 11(6): 14-23.
- 138.王淑元,林升寿. 我国森林生态系统定位研究的进展. 世界林业研究. 1995, (4): 44-49.

- 139.王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(I). 西北林学院学报. 2000a, 15 (3): 1-7.
- 140.王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(II). 西北林学院学报. 2000b, 15 (4): 1-5.
- 141.魏晓华,周晓峰.三种阔叶次生林的茎流研究.生态学报.1989, 9(4):325-329.
- 142.吴厚水,刘慧屏,黄大基. 鼎湖山季风常绿阔叶林对降水的截留作用. 热带亚热带森林生态系统研究. 1998, (8): 146-149.
- 143.吴征镒. 中国植被编辑委员会.中国植被.科学出版社. 北京: 1980.
- 144.肖金喜,宋永昌.天童国家森林公园常绿阔叶林水文作用的初步研究.山西师大学报(增刊).1993, (2):84-89.
- 145.谢春华,关文彬,吴建安,等. 贡嘎山暗针叶林生态系统林冠截留特征研究. 北京林业大学学报. 2002,24(4):68-71
- 146.辛颖,赵雨森,潘保原. 黑龙江东部山地兴安落叶松人工林对水质的影响. 中国水土保持科学. 2006,4(2):29-33.
- 147.许利群,周重光,杭韵亚.常绿阔叶林对酸雨的影响.浙江林业科技.1999, 19(1): 8-13.
- 148.闫恩荣.常绿阔叶林退化过程中土壤的养分库动态及植物的养分利用策略. 华东师范大学.2006.
- 149.闫俊华. 森林水文学研究进展. 热带亚热带植物学报. 1999, 7(4): 347-356.
- 150.闫志英,廖银章,李旭东.固定化细胞去除废水中硝态氮的实验研究.水资源保护. 2006, 22(3):54-55,59.
- 151.严顺国.桥山区油松林水源涵养功能的探讨.水土保持学报.1989,3(2):57-64.
- 152.杨令宾.长白山地区森林的水文效应.地理科学,1993,13(4):375-38
- 153.易兰,由文辉,宋永昌. 天童常绿阔叶林五个演替阶段凋落物中的土壤动物群落. 生态学报. 2005, 25(3):466-473.
- 154.尹光彩,周国逸,张德强. 鼎湖山针阔叶混交林水文学过程中总有机碳动态.应用生态学报. 2005, 16(9): 1655 -1660.
- 155.俞似军,许利群,杭韵亚.常绿阔叶林生态系统水文效应研究.浙江林业科技. 1994, 14(3):32-36.



- 156.曾杰,郭景唐. 太岳山油松人工林生态系统降雨的第一次分配. 北京林业大学学报. 1997, 19(3):21-27.
- 157.曾梅,曾光明,张龚.酸沉降影响下水相硫和氮在森林冠层的动态过程.生态学杂志. 2006, 25( 1):1-6.
- 158.曾庆波. 海南岛尖峰岭热带林生态系统的水分循环研究. 周晓峰. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社. 1994, 413-429.
- 159.曾思齐.马尾松水土保持林水文功能计量研究(I):林冠截留与土壤贮水能力.中南林学院学报. 1996,16(3):1-8.
- 160.战伟庆,张志强,武军, 等. 华北油松人工林冠层穿透雨空间变异性研究. 中国水土保持科学. 2006, 4(3): 26-30.
- 161.张光灿,刘霞,赵玫. 树冠截留降雨模型研究进展及其述评. 南京林业大学学报. 2000, 24(1): 64-68.
- 162.张庆费,由文辉,宋永昌. 浙江天童植物群落演替对土壤物理性质的影响. 植物资源与环境. 1997, 6(2): 36-40.
- 163.张庆费,由文辉,宋永昌.浙江天童植物群落演替对土壤化学性质的影响.应用生态学报.1999, 10(1):19-22.
- 164.张学培,郭冬青,王本楠.林冠截留模型的应用.北京林业大学学报. 1997, 19(2): 30-34.
- 165.张一平,王馨,王玉杰,等. 西双版纳地区热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究.生态学报.2003, 23 (12): 2653-2665.
- 166.张一平,王馨,刘文杰. 热带森林林冠对降水再分配作用的研究综述.福建林学院学报.2004, 24(3):274-282.
- 167.郑远长,裴铁璠.林冠分配降雨过程模拟与模型. II 模型扩展与参数确定.林业科学.1996b,32(2):97-10.
- 168.周光益,曾庆波,黄全,等. 热带山地雨林林冠对降雨的影响分析. 植物生态学报. 1995, 19: 201-207.
- 169.周梅. 大兴安岭落叶松林生态系统水文过程与规律研究. 北京林业大学. 2003.
- 170.周择福,林富荣,宋吉红. 不同经营模式的水源涵养林生态防护功能研究. 林

业科学研究. 2003, 16(2): 189-195.

171.王馨,张一平.西双版纳热带季节雨林与橡胶林林冠的持水能力. 应用生态学报.2006,17(10): 1782-1788

172.龚伟,胡庭兴,王景燕,等.川南天然常绿阔叶林人工更新后枯落物层持水特性研究. 水土保持学报.2006, 20(3):51-55.

## 附 论文成果和参加的科研课题

第一作者:

羊草草原不同退化阶段群落蒸散量比较, 生态学杂志, 2007, 26(8)

天童常绿阔叶林树干径流中硝态氮特征, 内蒙古大学学报, 接收

第二作者:

退化羊草草原在浅耕翻处理后植物多样性动态研究, 中国沙漠, 2006, 26(2)

科研课题:

浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站开放课题——常绿阔叶林中大气降水再分配的研究

## 后 记

明媚的六月里，我终于完成了毕业论文。回顾三年的博士生活，很多感慨涌上心头。首先，要对我的导师由文辉教授致以诚挚的谢意。从论文题目的敲定，到实验计划的实施，以及论文的写作，都倾注了导师的心血。在学习和生活上导师对我影响颇多。同样感谢王希华教授，在实验中给予我大量的指导和帮助。

在博士生活的最初，我一度很迷茫。曾经对生态学的热爱之情变得模糊，不断地问自己所学究竟有何意义，就像在灰蒙蒙的大雾里迷失了方向，学习的脚步也停滞不前。在那段时间里，我思考了很多，为什么选择生态学专业，以及是否还要继续生态学的学习是想得最多的两个问题。最终的答案很简单也很肤浅，我喜欢生态学，喜欢与花花草草打交道，自然界的每一个奇妙细节都让我兴奋，我就是无法放弃。现在每每想起，总觉得有些失望，想了那么久只得了个如此简单的答案，也许世界就是简单的，做每件事情也不需要深究其意义。

实验从开始着手到结束，花费了我近两年的时间，中间遇到了很多我想象不到的困难。正应了那句“万事开头难”，实验计划一改再改，实验时间也是一推再推。不顺利的时候，感觉压力很大，不停地怀疑自己是否具备一个博士的能力。让我感觉最灰暗的时候却是一段阳光明媚的日子。2007年7月底到8月初的半个月，实验刚刚开展就遇到了连续15天的高温天气，气象台不断发布高温警报，样地的土壤都干得要裂开。这让靠天吃饭的实验无法正常地进行下去，看到其他同学在站里忙忙碌碌地采样，做实验，我的心情特别沉重，每天做的最多的事，就是研究中央气象台未来十天的天气趋势。看着晴空万里的蓝天，生平第一次产生的却是阴沉沉的感觉。我要感谢一起在天童生活学习的各位朋友，特别是虞伊林和鄢光瑜同学，陪伴我度过了这个艰难的阶段。也许上天就是要告诉我，只要不放弃，就一定能够战胜困难。此后的实验进展非常顺利，虽然忙起来总是睡眠不足、浑身乏累，但是感觉很充实，也很开心。

感谢我的同学曹云博士，为我的实验设计提供了大量的建议。感谢石珺师妹，在天童大部分的日子里有你陪伴，在实验和生活上都给予了我很多支持和帮助。感谢赵杭美师妹，那个只有我们两个人在天童的短暂冬日让我终生难忘，没有能干的你，我的实验一定无法顺利开始。感谢易兰老师、闫恩荣老师和钱晓海老师对我的关心和帮助。感谢李俊祥教授为我提供气象数据，李老师的热情帮助让我感动。感谢天童站的工作人员，王波、王阿昌老场长和王良衍场长，为我的实验和生活提供了大量的帮助。感谢我的师姐师弟师妹，王金凤博士、李丽娜博士、罗扬、薄芳芳、陈小鸟、沈会涛，感谢所有一起在天童生活过的同学、朋友，康敏明博士、陈艳博士、刘志国博士、宋坤、杨徐烽、孟陈、高三平、徐明策、曾凡荣、赵亮、周武、杨庆松、冯丽丽、张奇平、孙灿。还要感谢周国逸教授，热情地回复了素不相识的我关于实验设计上的问题。

感谢父母，生我养我，支持我走到今天。在遇到困难，心情沮丧的时候，你们陪我哭，陪我笑，为我操碎了心。女儿不孝，活了快30年还未报答养育之恩。仅把此文献给你们。

本想只记录自己三年博士生活的心情和经历，但记忆中的每一个瞬间都充满了大家都我的关心和帮助，所以我忍不住要感谢每一个人，没有你们的关心、帮助和支持，我无法独自走过这段路程。三年的生活充满了欢声笑语、沮丧悲伤，让我终生难忘，既收获了知识，又收获了友情。我将永远铭记这段幸福时光！

2008年6月6日  
于华东师大博士楼322