

文章编号:1000-5641(2010)06-0035-10

# 天童常绿阔叶林不同演替阶段枯落物和土壤水文特征

沈会涛, 由文辉, 蒋跃

(华东师范大学 环境科学系, 上海 200062)

**摘要:** 森林枯落物层和土壤层具有重要的生态水文功能. 对天童地区常绿阔叶林不同演替阶段的研究表明: 次生灌丛的枯落物层现存量( $6.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) > 栲树群落( $6.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) > 木荷群落( $6.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ); 栲树群落、木荷群落和次生灌丛群落枯落物层的最大持水量分别为 10.58, 11.29 和  $13.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 3 种群落类型的有效拦蓄量分别为 0.49, 0.55 和 0.73 mm. 在整个持水过程中, 各群落中前 2 小时内各林分枯落物层持水作用较强. 林下枯落物层持水量、吸水速率与浸水时间之间的关系式分别为  $Q = a \ln t + b$  和  $V = k t^n$ . 与栲树群落和木荷群落相比, 次生灌丛在改善土壤物理性质和持水性能方面并不落后于这两种乔木林群落类型; 研究期内, 各群落类型 0~30 cm 土壤蓄水量在 67.2~150.0 mm, 不同演替阶段群落的土壤层持水能力远大于枯落物层.

**关键词:** 天童国家森林公园; 枯落物层; 土壤层; 生态水文功能

**中图分类号:** S715-3 **文献标识码:** A

## Eco-hydrological functions of the evergreen broad-leaved forest litter and soil at different succession stages in Tiantong, Zhejiang

SHEN Hui-tao, YOU Wen-hui, JIANG Yue

(Department of Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** To study the eco-hydrological functions of the litter and soil, we selected shrubland (*Lithocarpus glaber* + *Loropetalum chinense* community), secondary and young evergreen broad-leaved forest (EBLF) (*Schima superba* community) and mature EBLF (*Castanopsis fargesii* community) as research stands. The results showed that the storage of litter layer was as follows: *Lithocarpus glaber* + *Loropetalum chinense* community ( $6.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) > mature *Castanopsis fargesii* community ( $6.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) > *Schima superba* community ( $6.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). The water holding capacity in mature EBLF, secondary and young EBLF, shrubs were 10.58, 11.29 and  $13.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the corresponding effective water holding depth of litter layer in these

收稿日期: 2009-08

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20090076110021); 天童国家生态站开发课题(200702);

华东师范大学 2008 年优秀博士研究生培养基金(2009068)

第一作者: 沈会涛, 男, 博士研究生. E-mail: shenhuitao80@126.com.

通讯作者: 由文辉, 男, 教授, 研究方向为植被生态学和水域生态学. E-mail: youwenhui1964@126.com.

three types were 0.49, 0.55 and 0.73 mm respectively. During the process in water holding of litter layer, the water holding capacity and absorption speed in the first 2 hours were superior to the rest of time. The equations of water holding capacity and water absorption speed with immersed time are  $Q = a \ln t + b$  and  $V = kt^n$ . Compared with *Castanopsis fargesii* community and *Schima superba* community, the physical properties and water holding capacity of soil of *Lithocarpus glaber* + *Loropetalum chinense* community didn't drop behind the other two types of forests. During the studying period, the water storage of three forest soil within the depth of 30 cm was 67.2~150.0 mm. These results suggested that the soil layer had a better water holding capacity than that of the litter layer in different types of the forest.

**Key words:** Tiantong National Forest Park (TNFP); forest litter layer; soil layer; eco-hydrological function

## 0 引 言

森林以其林地上富集的枯落物层以及深厚的土壤层截留和储蓄大气降水,发挥着森林生态系统涵养水源、净化水质、保持水土和减少旱涝灾害的水文生态功能<sup>[1]</sup>. 林下枯落物层作为森林生态系统中重要的结构层次,直接覆盖地表<sup>[2-4]</sup>,能防止土壤水分的蒸发<sup>[5]</sup>,而且其疏松的结构,具有良好持水能力,能够削弱雨滴对土壤的直接击溅<sup>[6-8]</sup>,并吸持部分降水,减少入渗到土壤中的水量<sup>[9]</sup>,从而减少地表径流的产生,起到保持水土和涵养水源的作用<sup>[10-12]</sup>. 土壤水分是评价森林生态系统的重要标准之一<sup>[13]</sup>,生态系统中的水文过程大多是通过土壤作为介质进行的<sup>[14]</sup>. 森林土壤水分对理解和预测一系列包含径流、土壤侵蚀、水分传输与运移、土壤-大气界面间的物质和能量交换等水文过程都具有重要的意义<sup>[15-17]</sup>,对于森林土壤水分的分布和运动规律的研究一直是水文学家密切关注的重大课题.

对常绿阔叶林而言,在不同人类干扰方式和干扰强度的影响下,植物群落大多处于不同演替阶段<sup>[18]</sup>. 浙江宁波天童国家森林公园的常绿阔叶林是浙江东部丘陵地区地带性植被类型的代表性地段,也是我国东部植被的典型类型之一,这里既分布着处于不同退化程度的次生林、灌丛、旱生草地和人工林等,也保存着较完好的地带性常绿阔叶林<sup>[19,20]</sup>. 恢复和保护该区域森林植被对保持水土、涵养水源和改善生态环境等具有重要意义. 本文通过研究天童地区常绿阔叶林不同演替阶段群落类型的枯落物和土壤层的水源涵养功能,为该地区常绿阔叶林的科学经营与保护提供基础数据资料.

## 1 研究区概况和样地选择

研究区天童国家森林公园位于北纬 29°48', 东经 121°47', 距宁波市 27 km. 该地气候全年温暖潮湿,属典型的亚热带季风气候,年均气温 16.2 °C,年平均降雨量 1 374.7 mm. 一般山高海拔 300 m 左右,最高峰太白山海拔 653.3 m. 由南向北三面被沙发地形包围,对北来的寒流和南来的季风起着天然屏障作用. 土壤主要为山地红黄壤, pH 值为 4.01~4.79, 偏酸性,有机质含量丰富<sup>[18,21]</sup>.

由于不同历史阶段干扰强度的差异和受保护年限的不同,自公园外围至玲珑岩一带发育着处于不同演替阶段的次生常绿阔叶林,形成了以铁芒萁(*Dicranopteris pedata*)-五节芒(*Miscanthus floridulus*)灌草丛为初始阶段的次生演替系列,其它主要阶段包括:演替前

期的櫟木(*Loropetalum chinense*) - 石栎(*Lithocarpus glaber*)灌丛,演替中期的针叶林马尾松(*Pinus massoniana*)群落和针阔混交林木荷(*Schima superba*) - 马尾松群落,演替中后期的木荷群落和栲树(*Castanopsis fargesii*)群落<sup>[22]</sup>.本研究利用空间代替时间法,选取栲树群落、木荷群落和石栎 - 櫟木群落分别代表成熟常绿阔叶林顶级群落、次生常绿阔叶林幼年林和次生灌丛,各演替阶段样地概况见表1.

表1 不同演替阶段群落样地概况

Tab.1 The sampling characteristics in the different succession stage communities

林分类型	年龄/a	海拔/m	坡度/(°)	坡向	高度/m	主要植物种类
栲树群落	150	196	26	SE 45°	25	栲树占优势,其他种类有木荷和枫香等
木荷群落	90	163	20	SE 70°	20	木荷占优势,其他种类有石栎等
石栎 - 櫟木	17	164	25	SE 20°	5	高灌层有石栎、櫟木、木荷和杨梅等

注:数据引自文献<sup>[23]</sup>.

## 2 研究方法

### 2.1 枯落物现存量及持水率测定

于2009年4月对枯落物进行采样测定,在栲树群落、木荷群落和石栎 - 櫟木群落3种不同群落内,分别设置20 m × 20 m的样地,按上、中、下坡面布设3个小样方,每个样方各取样2次,取样面积为31.6 cm × 31.6 cm,测量其枯落物厚度,样品带回实验室后称重,在烘箱中85 °C烘干至恒重后,计算枯落物储量及自然含水率<sup>[1,24]</sup>.将烘干的枯落物装入尼龙袋后称重,再浸入水中,分别测定其在0.5,1,2,4,7,10,15,20,24 h时的质量,计算持水量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和持水率(%),分析其变化过程,每隔一定时间从浸泡容器中取出称重,所得的枯落物湿重与其烘干重的差值,即为枯落物浸泡不同时间的持水量,该差值与浸泡时间的比值为枯落物的吸水速率<sup>[25]</sup>,将浸水24 h后的枯落物含水率视为最大持水率<sup>[25,26]</sup>.由于半分解层很薄,而未进行未分解层与半分解层的分层取样.

通常采用有效拦蓄量来估算枯落物对降雨的实际拦蓄量<sup>[27]</sup>,其计算公式为 $W = (0.85 \times R_m - R_0) \times M$ .式中, $W$ —有效拦蓄量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ );0.85—系数; $R_m$ —最大持水率(%); $R_0$ —平均自然含水率(%),自然含水率(%) = (枯落物湿重 - 枯落物干重) × 100% / 枯落物干重; $M$ —枯落物现存量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ).

### 2.2 土壤水文物理性质测定

在各标准样地周围选择代表性地点挖掘土壤剖面.由于研究地的自然情况所限,本研究工作所挖剖面深度均为30 cm,用100 cm<sup>3</sup>的环刀按照土层深度0~10,10~20,20~30 cm分层次取土,重复3次,测定土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和最大持水量等土壤水分指标<sup>[28]</sup>.本文各土壤物理性质数据均系3个重复取样的平均值.

### 2.3 土壤水分的测定

2008年10月 - 2009年7月在样地内采用环刀法测定土壤含水量,每月10 - 20日之间取样,避免降雨后立即采样,以此来减少某次降雨对土壤当月含水量的影响.按照0~10,10~20,20~30 cm分层取土,每层3个重复,称量湿重后在105 °C条件下烘干,称量其干重,计算土壤含水率、体积含水量和土壤蓄水量<sup>[29]</sup>.

土壤蓄水量的计算公式为:土壤蓄水量(mm) = 体积含水量(%) × 土层厚度(mm).

### 3 结果与分析

#### 3.1 枯落物现存量及有效拦蓄量

枯落物现存量主要取决于枯落物的输入量、分解速度和累计年限,而森林的树种组成不同或林分所处的水热条件不同都对枯落物现存量有较大影响<sup>[11]</sup>. 枯落物现存量及其前期自然含水率是影响枯落物层的持水性能的主要原因<sup>[1]</sup>.

由表 2 可以看出,所研究的 3 种群落中,枯落物最大持水率变化为自身的 1~2 倍,最大持水率变化幅度为 164.53%~208.46%,而有效持水率变化幅度在 75.46%~109.19%间. 有效拦蓄量是反映枯落物层对一次降水拦蓄能力的指标<sup>[30]</sup>,石栎-榿木次生灌丛群落的有效拦蓄量为 7.27 t·hm<sup>-2</sup>,相当于可拦蓄 0.73 mm 的降水量;而栲树群落和木荷群落两种林分类型相当于可拦蓄 0.49 和 0.55 mm 的降水量. 可见,在枯落物层的有效拦蓄方面次生灌丛并不落后于乔木林的木荷群落和栲树群落;同时,次生灌丛的枯落物现存量高于其余两种群落类型,从而导致其总体持水量略高于两种乔木林群落. 出现这一现象的主要原因是由于次生灌丛群落内物种丰富,每年归还林地的枯落物量高于其余两种群落类型,而木荷群落和栲树群落林内主要优势种为常绿树种,枯落物归还林地的量也较少,因而在现存量方面低于次生灌丛群落.

表 2 不同演替阶段群落中枯落物层的持水能力

Tab. 2 Water holding capacity of litter floors under the different succession stage communities

林分类型	现存量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	自然含水率/ %	最大持水率/ %	最大持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	有效持水率/ %	有效持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
栲树群落	6.43	64.4	164.53	10.58	75.46	4.85
木荷群落	6.10	66.6	185.04	11.29	90.68	5.53
石栎-榿木	6.66	68.0	208.46	13.88	109.19	7.27

#### 3.2 枯落物层持水量及吸水过程分析

枯落物层持水能力是整个森林生态系统水循环中重要一环,是反映枯落物层水文作用的重要指标<sup>[31]</sup>. 由图 1 可以看出,常绿阔叶林次生灌丛群落枯落物层浸泡 24 h 持水量与木荷群落和栲树群落相比,灌丛群落枯落物持水量最大,为 2 085 g/kg,是其烘干重的 208.5%;栲树群落次之,为 1 645 g/kg,是其烘干重的 164.5%;木荷群落最小,为 1 605 g/kg,是其烘干重的 160.5%. 一般来说,枯落物层积累多、层次厚、分解快,具有孔隙多、细、小、吸水面积大的特点,因而表面张力亦较大,其蓄水性能好<sup>[32]</sup>.

从枯落物层持水量与浸泡时间之间的关系来看(见图 1),次生灌丛枯落物层在各浸泡时间的持水量均高于木荷群落和栲树群落;而前 2 小时吸水过程中,木荷群落枯落物层浸入水中 0~2 h 其持水量高于栲树群落,而从第 2 小时后,木荷群落枯落物持水量低于栲树群落. 龚伟等研究结果表明,不同林分林下地表枯落物层浸入水中 0~2 h,其持水量都有一个急速上升的过程,2 h 后随着浸泡时间的延长,枯落物层持水量的增加变缓并趋于最大值<sup>[25]</sup>. 这表明在一定降雨量足以浸湿枯落物层的情况下,各林分林下枯落物层前 2 小时对降雨的吸持作用最强. 石栎-榿木灌丛、木荷群落和栲树群落林下枯落物层浸泡 2 h 持水量分别占其 24 h 持水量的 79.6%,82.5%和 76.7%.

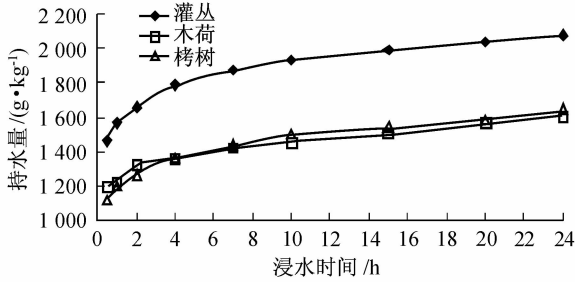


图1 不同演替阶段群落中枯落物层持水量与浸水时间关系

Fig. 1 Correlation between water capacity of litter floors and saturated time under the different succession stage communities

栲树群落、木荷群落和次生灌丛群落枯落物层吸水速率与浸水时间的关系见图2。从中可以看出,次生灌丛群落枯落物层各浸泡时间吸水速率均高于其余两种林分类型,最大吸水速率为 $2912\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,木荷林次之,为 $2383\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,栲树林最小,为 $2239\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。不同林分下枯落物层初始吸水速率相差较大,但随浸泡时间的延长,各林分枯落物层吸水速率趋向一致。在整个吸水过程中,前0~2 h内3种群落的枯落物层吸水速率几乎呈直线下降,2 h后吸水速率的变化逐渐趋于平稳。

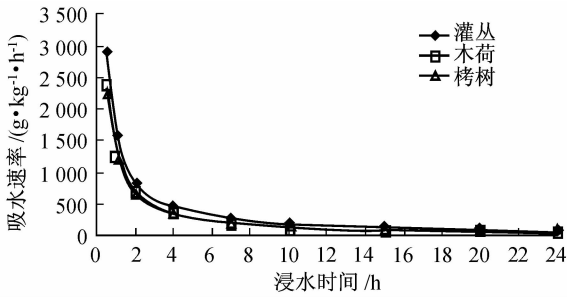


图2 不同演替阶段群落中枯落物层吸水速率与浸水时间关系

Fig. 2 Correlation between water absorption speed rate of litter floors and immersed time under the different succession stage communities

对栲树群落、木荷群落和次生灌丛群落枯落物层持水量、吸水速率与浸水时间之间关系进行回归分析,得到持水量与浸水时间的关系为 $Q = a \ln t + b$ ;吸水速率与浸水时间的关系为 $V = k t^n$ 。

式中: $Q$ —枯落物层持水量( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $t$ —浸水时间(h); $V$ —枯落物层吸水速率( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ); $a, b, k$ —方程系数; $n$ —为指数。

枯落物层持水量、吸水速率与浸水时间之间的关系式见表3。

### 3.3 林地土壤的水文生态功能

林地土壤的发育直接受森林植被的影响,森林类型不同,林地表层的枯落物构成及地下根系的生长发育也各异,所造成土壤物理性质的差异,引起了各森林类型土壤蓄水能力上的变化<sup>[6]</sup>。

#### 3.3.1 土壤物理性质与持水性能分析

表4是常绿阔叶林不同演替阶段群落类型土壤层的物理性质及持水特征的比较。从表

中可以看出,3种林分类型的表层土(0~10 cm)的容重均小于土层(10~20 cm,20~30 cm)的容重,这是由于森林枯落物层长期积累并腐烂形成了表层土,使该层容重小于深层土容重.林地土壤的持水性能是评价森林涵养水源能力的主要指标,常以非毛管孔隙度计算一定厚度土壤的持水能力作为其水源涵养能力的重要指标<sup>[33]</sup>.测定结果表明,灌丛群落的最大持水率、毛管持水率、毛管孔隙度和毛管持水量与木荷群落、栲树群落的差距并不是很明显,而非毛管孔隙度和非毛管持水量甚至高于其余两种群落.由此可知,次生灌丛在改善土壤物理性质和持水性能方面也发挥着较大的作用.

表 3 不同演替阶段群落中枯落物层持水量(Q),吸水速率(V)与时间(t)的关系式

Tab. 3 The equations of water holding capacity(Q) and water absorption speed (V) with immersed time (t) under the different succession stage communities

林分类型	持水量(Q)与时间(t)关系		吸水速率(V)与时间(t)关系	
栲树群落	$Q = 161.18 \ln t + 1562.9$	$R^2 = 0.9987$	$V = 1562.2 t^{-0.9085}$	$R^2 = 1.0000$
木荷群落	$Q = 103.35 \ln t + 1238.8$	$R^2 = 0.9728$	$V = 1239.8 t^{-0.9251}$	$R^2 = 0.9999$
次生灌丛	$Q = 133.46 \ln t + 1190.0$	$R^2 = 0.9905$	$V = 1190.6 t^{-0.9021}$	$R^2 = 1.0000$

表 4 不同演替阶段群落中土壤物理性质及持水特性

Tab. 4 Physical characters and water-holding capacity of soil under different forests types under the different succession stage communities

林分类型	土层/ cm	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	最大持 水率/%	毛管持 水率/%	毛管孔 隙度/%	非毛管孔 隙度/%	毛管持水 量/mm	非毛管持 水量/mm
栲树群落	0~10	0.83	59.95	53.69	44.68	5.21	44.68	5.21
	10~20	0.97	49.74	44.53	43.28	5.06	43.28	5.06
	20~30	1.16	40.49	38.47	44.45	2.34	44.45	2.34
木荷群落	0~10	0.97	44.90	40.03	38.75	4.71	38.75	4.71
	10~20	1.01	43.68	39.47	40.00	4.27	40.00	4.27
	20~30	0.99	44.49	40.84	40.32	3.61	40.32	3.61
灌丛群落	0~10	0.94	51.10	43.88	41.04	6.75	41.04	6.75
	10~20	1.42	33.75	30.31	43.11	4.90	43.11	4.90
	20~30	1.16	38.37	34.24	39.65	4.78	39.65	4.78

### 3.3.2 土壤蓄水能力变化分析

研究期内不同演替阶段群落的土壤蓄水量变化趋势见图3,根据2008年12月-2009年7月降雨资料,将研究期划分为两个时期:干季(2008年10月-2009年1月)和雨季(2009年3月-7月).干季是土壤水分稳定期,这是由于进入冬季后,降雨减少,太阳辐射减弱,气温和土温降低,空气湿度增大,林地蒸散降低,同时,由于根系从深层土壤中吸收水分来维持树木的生长,这也是土壤水分稳定的一个原因.雨季内充沛的降雨使土壤水分得以补充,但由于该时期内,乔木层和林下灌木草本植物生长茂密,消耗土壤水分,造成土壤蓄水量月份之间波动较大;同时,雨季内不同月份的降雨量差异也较大,这也是土壤蓄水量波动较大的原因之一.这与黄志宏等对桉树人工林土壤蓄水量变异系数雨季大于干季的研究结果相类似<sup>[34]</sup>.

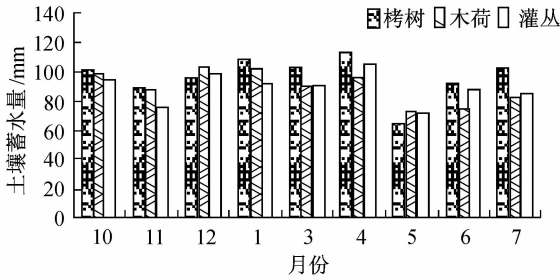


图3 不同演替阶段群落中土壤蓄水量变化

Fig. 3 Monthly variation of soil water storage under the different succession stage communities

#### 4 结论与讨论

枯落物层的水文作用主要体现在枯枝落叶的持水方面, 持水量的多少与其林地现存量、分解状况、自身的含水量以及天气状况等多种因子有关<sup>[4]</sup>. 在研究的常绿阔叶林不同演替阶段的群落中, 次生灌丛枯落物层的现存量、自然含水率、最大持水率(量)和有效持水率(量)等指标均高于栲树群落和木荷群落, 这表明次生灌丛枯落物层在水文功能方面并不落后于处于演替高级阶段的两种群落类型.

常绿阔叶林不同演替阶段群落枯落物持水量随时间变化过程均是在前2小时内持水量和吸水速率增加较快, 之后增加趋势明显变缓. 王云琦等<sup>[4]</sup>和程金花等<sup>[35]</sup>的研究结果都表明, 不同林分林下枯落物层的持水作用主要表现在降雨前期的2 h内.

经分析拟合, 得到3种林分类型枯落物层持水量和吸水速率与浸水时间之间关系式分别为  $Q = a \ln t + b$  和  $V = k t^n$ , 这与龚伟等<sup>[25]</sup>和张洪江等<sup>[36]</sup>的研究结果相同, 而与王云琦等对枯落物层吸水速率与浸泡时间的关系式  $V = k/t + c$  有一定的差异.

森林枯落物层和土壤层都在涵养水源方面具有重要的作用, 但森林土壤的持水能力远大于枯落物层, 是涵养水源的主体<sup>[26]</sup>. 土壤涵养水源的能力受植被类型和土壤厚度等条件的影响<sup>[37]</sup>. 本研究结果表明, 不同林分类型的表层土(0~10 cm)的容重小于各自土层(10~20 cm, 20~30 cm)的容重, 但0~10 cm土层的最大持水率、毛管持水率和非毛管持水量等都高于土层(10~20 cm, 20~30 cm)的各项指标; 常绿阔叶林不同演替群落0~30 cm的非毛管持水量为次生灌丛(16.43 mm) > 栲树群落(12.61 mm) ≈ 木荷群落(12.59 mm). 在土壤蓄水量方面, 干季内各群落类型的土壤蓄水量月变化较为稳定, 而雨季内波动较大, 这是因为林内植被由于处于生长旺盛期, 植物根系从土壤中吸收大量水分进行蒸腾作用, 而土壤蒸散作用也较强.

作为亚热带的地带性植被和自然演替的顶级群落类型, 常绿阔叶林具有丰富的植物种类和稳定的群落结构, 森林冠层郁闭度高, 凋落物产量及枯落物层现存量<sup>[38]</sup>, 并且在合适的气候条件下, 枯落物层分解较快而有利于增大土壤的非毛管孔隙度, 使土壤层具有良好的蓄水功能. 本研究的结果表明, 次生灌丛的枯落物层和土壤层在水文功能方面并不落后于乔木林的两种群落类型, 但是次生灌丛在人类频繁长期的干扰下, 会进一步退化为草地甚至裸地, 使群落结构趋于简单, 涵养水源和储藏养分能力减弱, 造成水土流失等. 因此, 应适时有效地控制常绿阔叶林退化过程, 提高林分的稳定性, 以有利于提高森林生态系统涵养水源和

保持水土的功能.

### [参 考 文 献]

- [1] 孔亮, 陈祥伟. 黑龙江省东部山地灌木林地的静态持水能力[J]. 山地学报, 2005, 23(5): 626-630.  
KONG L, CHEN X W. Static water-holding capacity of the shrub in East Mountainous region of Heilongjiang Province[J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(5): 626-630.
- [2] PUTUHENA W M, CORDERY I. Estimation of interception capacity of forest floor [J]. Journal of Hydrology, 1996, 180: 283-299.
- [3] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 23-28.  
WU Q X, ZHAO H Y, LIU X D, et al. Evaluation of role of forest litter to water source conservation and soil and water conservation[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(2): 23-28.
- [4] 王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山几种典型植被枯落物水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 41-44.  
WANG Y Q, WANG Y J, ZHANG H J, et al. Research on litter hydrology characteristic of typical vegetation in Jinyun Mountain in Chongqing city[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 41-44.
- [5] SATO Y, KUMAGAI T, KUME A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers—the effects of rainfall conditions and leaf shapes[J]. Hydrological Process, 2004, 18(16): 3007-3018.
- [6] 郝占庆, 王力华. 辽东山区主要森林类型林地土壤涵蓄水性能的研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(3): 237-241.  
HAO Z Q, WANG L H. Water conservaion capacities of soils with major forest types in mountainous regions of east Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(3): 237-241.
- [7] GEDDES N, DUNKERLEY D. The influence of organic litter on the erosive effects of raindrops and gravity drops released from desert shrubs[J]. Catena, 1999, 36: 303-313.
- [8] MIYATA S, KOSUGI K, GOMI T, et al. Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests [J]. Water Resources Research, 2009, 45: 1-17.
- [9] JANEAU J L, MAUCHAMP A, TARIN G. The soil surface characteristics of vegetation stripes in Northern Mexico and their influence on the system hydrodynamics—an experimental approach[J]. Catena, 1999, 37: 165-173.
- [10] 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[J]. Journal of Hydrology, 2000, 237: 40-57.
- [11] 高人, 周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型枯落物层持水性能研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(2): 115-118.  
GAO R, ZHOU G Z. A study of water-holding properties of litter layer for various major forest vegetation types in Eastern Mountainous region in Liaoning Province[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(2): 115-118.
- [12] 余新晓, 赵玉涛, 程根伟. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林地物分布及其水文效应初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5-6): 14-18.  
YU X X, ZHAO Y T, CHENG G W. Distribution patterns and hydrological effects of moss and litters in *Abies fabric* forests on eastern slope of Gongga mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5-6): 14-18.
- [13] JOST G, HEUVELINK G, PAPRITZ A. Analysing the space-time distribution of soil water storage of a forest ecosystem using spatio-temporal kriging[J]. Geoderma, 2005, 128: 258-273.
- [14] 程根伟, 余新晓, 赵玉涛, 等. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
CHENG G W, YU X X, ZHAO Y T, et al. The Hydrological Cycle and Its Mathematical Models of Forest Ecosystem in Mountains[M]. Beijing: Science Press, 2004.



- [15] QIU Y, FU B J, WANG J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 240: 243-263.
- [16] PELLENQ J, KALMA J, BOULET G, et al. A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 276: 112-127.
- [17] CHEN X, HU Q. Groundwater influences on soil moisture and surface evaporation [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 297: 285-300.
- [18] 宋永昌, 王祥荣. 浙江天童国家森林公园的植被和区系[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1995.  
SONG Y C, WANG X R. *Vegetation and Flora of Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province China*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1995.
- [19] 闫恩荣, 王希华, 陈小勇. 浙江天童地区常绿阔叶林退化对土壤养分库和碳库的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(4): 1646-1655.  
YAN E R, WANG X H, CHEN X Y. Impacts of evergreen broad-leaved forest, degradation on soil nutrients and carbon pools in Tiantong, Zhejiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1646-1655.
- [20] 杨同辉, 达良俊, 李修鹏. 浙江天童国家森林公园常绿阔叶林生物量研究(II)群落生物量及其分配规律[J]. *浙江林学院学报*, 2007, 24(4): 389-395.  
YANG T H, DA L J, LI X P. Biomass of evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province (II) Aboveground biomass and its allocation pattern[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2007, 24(4): 389-395.
- [21] 易兰, 由文辉. 天童植被演替过程中环境因子对土壤动物群落的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2006(6): 109-116.  
YI L, YOU W H. Influences of changes of environmental factors on soil animal community in the succession of the vegetation in Tiantong[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2006(6): 109-116.
- [22] 闫恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N:P 化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 13-22.  
YAN E R, WANG X H, ZHOU W. N : P Stoichiometry in secondary succession in evergreen broad-leaved forest, Tiantong, East China[J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(1): 13-22.
- [23] 闫恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林不同退化群落的凋落物特征及与土壤养分动态的关系[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 1-12.  
YAN E R, WANG X H, ZHOU W. Characteristics of litterfall in relation to soil nutrients in mature and degraded evergreen broad-leaved forests of Tiantong, East China[J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(1): 1-12.
- [24] 刘少冲, 段文标, 赵雨森. 莲花湖库区几种主要林型枯落物层的持水性能[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 81-86.  
LIU S C, DUAN W B, ZHAO Y S. Water-holding capacity of litter layer for various major forest types in Lianhua Lake reservoir area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 81-86.
- [25] 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[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 51-55.  
GONG W, HU T X, WANG J Y, et al. Water holding characteristics of litter layer after natural evergreen broad-leaved forest artificial regeneration in southern Sichuan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 51-55.
- [26] 张雷燕, 刘常富, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山南侧森林枯落物及土壤的水文生态功能研究[J]. *林业科学研究*, 2007, 20(1): 15-20.  
ZHANG L Y, LIU C F, WANG Y H, et al. Study on eco-hydrological function of forest-litter and soil in the south side of Liupan Mountains, Ningxia Hui Autonomous Region, China[J]. *Forest Research*, 2007, 20(1): 15-20.
- [27] 张振明, 余新晓, 牛健植, 等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 139-143.  
ZHANG Z M, YU X X, NIU J Z, et al. Ecohydrological functions of litter on different forest stands [J]. *Journal*

- of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 139-143.
- [28] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.  
Technology Department of Forestry Ministry. Methods of Forest Ecosystem Research [M]. Beijing: Chinese Scientific and Technical Press, 1994.
- [29] 黄志刚, 曹云, 欧阳志云, 等. 南方红壤丘陵区油桐人工林土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 241-246.  
HUANG Z G, CAO Y, OUYANG Z Y, et al. Dynamics of soil water under *Vernicia fordii* plantation in hilly red soil region of Southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 241-246.
- [30] 杨澄, 刘建军, 张万庆. 桥山主要森林类型枯落物持水性能及养分含量测定初报[J]. 西北林学院学报, 1996, 11(4): 7-11.  
YANG C, LIU J J, ZHANG W Q. Water holding behaviour and nutrients content of litters in some major forest types in the Qiaoshan Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry College, 1996, 11(4): 7-11.
- [31] 朱丽晖, 李冬, 邢宝振. 辽东山区天然次生林枯落物层的水文生态功能[J]. 辽宁林业科技, 2001(1): 35-37.  
ZHU L H, LI D, XING B Z. Eco-hydrological function of forest-litter for secondary natural forest in Eastern Mountainous region in Liaoning Province[J]. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology, 2001(1): 35-37.
- [32] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 川西亚高山人工针叶林枯枝落叶及苔藓层的持水性能[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(3): 234-238.  
LIN B, LIU Q, WU Y, et al. Water holding capacity of moss and litter layers of subalpine coniferous plantations in Western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, 8(3): 234-238.
- [33] 吴建平, 袁正科, 袁通志. 湘西南沟谷森林土壤水文—物理特性与涵养水源功能研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 74-77, 81.  
WU J P, YUAN Z K, YUAN T Z. Hydrological and physical characteristics of forest soil at mountain valley in Southwest of Hunan and its headwater conservation capacity[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(1): 74-77, 81.
- [34] 黄志宏, 周国逸, MORRIS J, 等. 桉树人工林冠层气象因子对雨季土壤水分的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(3): 197-204.  
HUANG Z H, ZHOU G Y, MORRIS J, et al. Effects of canopy meteorological factors on soil moisture content during rainy seasons in an eucalypt plantation[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2003, 11(3): 197-204.
- [35] 程金花, 张洪江, 史玉虎, 等. 三峡库区三种林下地被物储水特性[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1825-1828.  
CHENG J H, ZHANG H J, SHI Y H, et al. Water storage characteristics of ground covers under three forests in Three Gorges area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1825-1828.
- [36] 张洪江, 程金花, 史玉虎, 等. 三峡库区3种林下枯落物储量及其持水特性[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 55-58, 123.  
ZHANG H J, CHENG J H, SHI Y H, et al. Reserves and water capacity characteristics of three kinds of litter of Three Gorges area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 55-58, 123.
- [37] 李德生, 张萍, 张水龙, 等. 黄前库区森林土壤蓄水能力研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(1): 24-28.  
LI D S, ZHANG P, ZHANG S L, et al. A study on water conservation capacity of forest soil in Huangqian Reservoir area [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science), 2004, 28(1): 24-28.
- [38] 郭剑芬, 杨玉盛, 林鹏. 木荷与杉木人工林枯枝落叶层水文生态功能[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(4): 49-51, 58.  
GUO J F, YANG Y S, LIN P. Eco-hydrological function of forest floors in *Schima superba* and *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(4): 49-51, 58.