

文章编号:1000-5641(2009)02-0011-10

## 天童常绿阔叶林主要演替阶段的 土壤剖面及碳密度特征

周武<sup>1</sup>, 郭明<sup>1</sup>, 仲强<sup>1</sup>, 王希华<sup>1,2</sup>, 阎恩荣<sup>1,2</sup>

(1. 华东师范大学 环境科学系, 上海 200062; 2. 浙江天童森林生态系统国家野外  
科学观测研究站, 浙江 宁波 315114)

**摘要:** 选择浙江天童常绿阔叶林次生演替的四个主要阶段: 灌草丛、马尾松林、木荷林与栲树林, 研究其土壤剖面特征和碳密度的变化规律. 结果显示: (1) 随演替进行, 演替后期土壤机械组成的细颗粒比例增加, 土壤容重显著降低, pH 值略有降低(但不显著), 有机质含量显著增加, 10~20 cm层含水率显著增加; (2) 碳密度在演替前期和后期高于演替中期, 而在剖面中间层(10~20 cm)最低; (3) 土壤细颗粒比例与含水率显著正相关, 与土壤容重显著负相关, 土壤有机质与碳密度显著正相关( $P < 0.01$ ), 可以认为, 随着常绿阔叶林次生演替进行, 土壤剖面理化性质明显改善.

**关键词:** 演替; 土壤剖面; 碳密度; 机械组成; 土壤 pH

**中图分类号:** Q948 **文献标识码:** A

## Characteristics of soil profile and organic carbon density among succession stages in the evergreen broad-leaved forests of Tiantong region, Zhejiang province

ZHOU Wu<sup>1</sup>, GUO Ming<sup>1</sup>, ZHONG Qiang<sup>1</sup>, WANG Xi-hua<sup>1,2</sup>, YAN En-rong<sup>1,2</sup>

(1. Department of Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Tiantong National Station of Forest Ecosystem, Chinese National Ecosystem Observation  
and Research Network, Ningbo Zhejiang 315114, China)

**Abstract:** The main successional stages including grassland, *Pinus massoniana* dominated forests, *Schima superba* dominated forests and *Castanopsis fargesii* dominated forests in the Tiantong region, were selected to examine temporal trends of soil profile and carbon density. The results showed: (1) soil physical and chemical properties exhibited contrasting temporal patterns, with proportion of soil particulates, soil organic matter and soil moisture (10~20 cm) displaying a gradual increasing trends through succession, and with soil pH and soil bulk density generally decreasing with time; (2) soil carbon density was the lowest in the intermediate layer (10~20

收稿日期:2008-08

基金项目:国家自然科学基金(30770365),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

第一作者:周武,男,硕士研究生. E-mail: lionelchow@sina.com.

通讯作者:阎恩荣,男,副教授,从事土壤生态学与代谢生态学研究. E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn.

cm) along soil profile, and was "U-shaped" through succession; and (3) among soil properties, proportion of soil particulates was positively correlated with soil moisture and negatively correlated with soil bulk density; soil organic carbon positively correlated with soil carbon density. It is concluded that soil physical and chemical properties substantially improve during secondary succession of evergreen broad-leaved forests.

**Key words:** succession; soil profile; soil organic carbon density; soil mechanism composition; soil pH

## 0 引 言

土壤与植物群落是森林生态系统的两个重要组成部分,它们之间具有非常密切的联系<sup>[1,2]</sup>.一方面,土壤的物理、化学和生物学特性决定着地上植物群落的种类组成、种间关系和群落动态等<sup>[3]</sup>;另一方面,植物群落对土壤性质也有重要影响<sup>[4-6]</sup>.因此,同一气候类型下,在土壤母质和地形条件等相同时,土壤成为决定植物群落分布的主导因子,同时,植物群落也成为影响土壤性质的决定因素之一<sup>[7-9]</sup>.

群落演替过程中,土壤-植被系统的结构和功能会发生相应变化,土壤理化性质的改变尤为明显<sup>[10-12]</sup>.研究表明:随群落演替,土壤容重下降、含水率上升<sup>[13]</sup>,土壤有机质及速效氮、磷增加<sup>[14]</sup>,综合肥力提高<sup>[10,15]</sup>.土壤碳密度大小是影响全球气候变化的重要因素,在区域尺度上,土壤碳密度的变化是决定区域碳源碳汇转化的重要机制之一.在生态系统演替过程中,土壤碳密度不仅受植被类型和植物群落特征的影响,也受土壤性质和其他环境因素的间接影响.随着全球变化问题的日益突出(尤其是大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高),研究者对演替过程中的 C 动态给予了重视,初步提出了演替过程中的 C 积累假说<sup>[16]</sup>.

常绿阔叶林是我国亚热带地区的地带性植被,由于长期频繁的人类干扰,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演替阶段的次生植被<sup>[17]</sup>.自灌草丛至演替后期的栲树林,植物优势种<sup>[18]</sup>、土壤微生物和土壤动物类群更替明显,土壤 C 含量增加显著<sup>[19]</sup>.总体来看,前期研究较好地揭示了演替过程中土壤理化性质的变化规律,但对演替过程中的土壤剖面特征,以及剖面碳密度随演替进展变化规律的研究不够深入.显然,这种状况不能满足在日益严峻的全球变化形势下,研究者和管理者对该类生态系统响应机制的及时认识和理解,从而限制了迅速制定出科学合理的保护和管理措施.基于此,本研究选择浙江天童的常绿阔叶林次生演替系列,以前期研究为基础<sup>[19]</sup>,继续深入探索土壤剖面及碳密度特征随演替进展的变化规律,为诊断该类生态系统在全球变化形势下的响应特征提供参考.

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域概况和样地描述

研究地位于浙江宁波天童国家森林公园,区域概况文献已多有报道<sup>[20]</sup>.本研究选择了天童地区的灌草丛、马尾松(*Pinus massoniana*)群落、木荷(*Schima superba*)群落和栲树(*Castanopsis fargesii*)群落代表常绿阔叶林次生演替的4个不同阶段.

灌草丛位于天童少白岭的近山脊防火线(29°47.180' N, 121°45.163' E),海拔145 m,是

为了森林防火连年砍伐清理形成,由于该地区优越的水热条件,在清理当年,会有马尾松和赤楠(*Syzygium buxifolium*)等木本幼苗,以及五节芒(*Miscanthus floridulus*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)和蕨(*Pteridium aquilinum*)等草本定居,在植物生长旺季,群落盖度一般在40%左右。

马尾松林也位于少白岭,前述灌草丛下方(29°47.841' N, 121°45.213' E),海拔135 m。群落可分为3层:乔木层主要以马尾松和木荷组成,高度为7~9 m,盖度80%;灌木层高度1.5~4 m,盖度为90%,主要由檫木和山矾组成,草本层稀疏;地表枯枝落叶较薄,主要以马尾松针叶为主,分解较差。

木荷群落和栲树群落位于公园内玲珑岩附近,诸多文献中已有介绍,此处不再赘述<sup>[12]</sup>。

## 1.2 野外采样

在四个演替阶段各设三个平行样地,2007年11月,在每个样地选取典型地段,采挖土壤剖面,剖面深度为1 m左右。土壤剖面建成后,观察并记录其质地和结构分层情况。土壤剖面描述主要包括:每层土壤根系的多少、松紧度、结构、干湿度和质地。在完成土壤剖面描述后,按腐殖质层、A层、B层和BC层四层分别取土样,现场编号后装入保鲜袋,在天童国家站实验室进行预处理后,带回上海华东师范大学以供理化性质分析;同时,用环刀取样,测量土壤容重,由于本区土壤下层砾石含量较多,因此仅测定了40 cm以上土层的容重。

## 1.3 实验室测定

在实验室,土壤容重采用环刀法,含水率采用烘干法测定。土壤pH值采用DELTA型pH计测定,土壤有机质采用重铬酸钾-稀释热法进行测定。

土壤机械组成采用LS13320粒度仪测定。称取约0.08 g过2 mm土壤筛的风干土样,加入20 mL的2 mol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>溶液去除有机质,在电热板上低温煮沸近干后,再加入15 mL去离子水,滴加0.5 mol/L NaOH 2滴,浸泡过夜,再用超声震荡机震荡30 min,最后将样品分散液洗入进样槽中,读取土壤粒径所占比例。土壤颗粒的划分参照以下原则,小于0.002 mm的组分划分为黏粒,0.002~0.05 mm的组分划分为粉粒,大于0.05 mm的组分划分为砂粒,并据此将土壤机械组成划分为3个组成成分。

## 1.4 数据处理及统计分析

土壤碳密度(SOC<sub>density</sub>)运用以下公式估算<sup>[21]</sup>,本研究中的碳密度为各剖面40 cm深度以上的数据。

$$SOC_{density} (g \cdot cm^{-2}) = \text{土壤容重} (g \cdot cm^{-3}) \times \text{有机碳含量} (\%) \times \text{土层厚度} (cm).$$

各演替群落土壤剖面特征数据为3个平行样地的平均值,使用单因素方差分析法(One-way ANOVA)检验演替过程对各剖面特征是否具有显著影响,以及剖面层次对土壤性质是否具有显著影响。分析前,首先判断各组数据是否满足正态分布以及方差是否具有齐性,如不满足,则进行对数转换以满足单因素方差分析的假定条件。方差分析过程中,将不同演替群落和土壤不同层次作为自变量,各土壤剖面特征和土壤理化性质作为因变量。另外,采用Pearson相关分析法对各土壤剖面特征间进行了成对相关分析。上述分析通过SPSS11.5完成。

## 2 结 果

### 2.1 不同演替阶段的土壤剖面特征

### 2.1.1 描述性特征

土壤腐殖质层厚度在灌草丛最小,在马尾松群落阶段最大,其余两阶段介于中等.方差分析显示,演替前期两阶段腐殖质厚度差异显著,后期没有明显差异( $P>0.05$ )(见表1).

表1 天童常绿阔叶林主要演替阶段土壤剖面特征描述

Tab.1 Characteristics of soil profiles in different successional stages of the evergreen broad-leaved forests in Tiantong region

分层	剖面深度/cm	根系比例	松紧度	结构 <sup>#</sup>	干湿度	质地
灌草丛						
腐殖质	1 <sup>a*</sup>					
A	0~20	多	松	块、碎块	润	成条
B	20~29	少	紧	大块、块、碎块	润	成条
BC	29~60 以下	少	紧实	大石块、块、碎块	润	成条
马尾松群落						
腐殖质	7 <sup>b</sup>					
A	0~14	多	松	小块、碎块	润	成条
B	14~36	较少	稍紧	块、碎块	润	成条
BC	36~60 以下	多	松	块、碎块	润	成条
木荷群落						
腐殖质	3 <sup>a</sup>					
A	0~19	多	稍紧	碎块、粒	潮	成条
B	19~30	较少	紧	块、碎块	潮	成条
BC	30 以下	多	稍紧	块	潮	成条
栲树群落						
腐殖质	4 <sup>ab</sup>					
A	0~13	少	松	小块、碎块	潮	成条
AB	13~21	多	稍紧	块、小块	潮	成条
B	21~35	较少	紧	块、小块	潮	成环
BC	35~70 以下	多	稍紧	小块、碎块	潮	成环

注:分层划分标准 A 聚集有与矿质组分充分混合的腐殖化有机质的土层,B 完全或几乎完全丧失岩石构造的土层,C 母质层,无明显层次发育;+ 在同一列中用不同字母,表示腐殖质厚度存在显著差异, $P<0.05$ ,下同;# 体积划分,大石块>块>小块>碎块>粒

从表1可以看出,灌草丛阶段植物根系所占比例随土壤深度增加而减少,在后三个演替阶段无明显规律.土壤松紧度在灌草丛阶段表现出随深度增加的趋势,在后三个演替阶段也无明显规律.土壤结构在四个演替阶段均表现为随深度增加石块数量增多,说明越接近母质,岩石的分化程度越低,根系伸展困难程度增加.土壤干湿度在同一个剖面中差别不大,但随着演替进展呈现出越来越湿润的特点,说明土壤持水性随着演替进展而增强.土样质地结果显示:四个演替群落土壤均可成条(除栲树林B层和BC层成环),说明天童地区的土质黏着性适中,演替对土壤质地的影响较小.

### 2.1.2 土壤容重与含水率

由表2可见,在同一阶段,随土壤深度增加,土壤容重有增大的趋势,而土壤含水率变化并没有明显的规律性;随演替进展,土壤容重减小,土壤含水率上升.

表 2 天童常绿阔叶林主要演替阶段土壤容重与含水率沿剖面的变化

Tab. 2 The changes of soil bulk density and soil water content along soil profile among successional stages in the evergreen broad-leaved forests of Tiantong region( $n=3$ )

演替阶段	土壤剖面容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )				土壤剖面的含水率/%			
	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	平均	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	平均
灌草丛	1.08 ± 0.06 <sup>a</sup>	1.17 ± 0.12 <sup>a</sup>	1.30 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.18 ± 0.11 <sup>a</sup>	15.90 ± 0.58 <sup>a</sup>	17.07 ± 2.23 <sup>a</sup>	15.75 ± 1.31 <sup>a</sup>	16.24 ± 1.46 <sup>a</sup>
马尾松群落	0.98 ± 0.07 <sup>ab</sup>	0.96 ± 0.08 <sup>ac</sup>	1.09 ± 0.21 <sup>ab</sup>	1.01 ± 0.13 <sup>ac</sup>	18.06 ± 2.90 <sup>ab</sup>	16.27 ± 0.80 <sup>a</sup>	18.17 ± 4.84 <sup>ab</sup>	17.50 ± 3.00 <sup>ab</sup>
木荷群落	0.90 ± 0.05 <sup>ab</sup>	0.93 ± 0.10 <sup>bc</sup>	1.01 ± 0.09 <sup>ab</sup>	0.95 ± 0.09 <sup>bc</sup>	25.11 ± 1.67 <sup>ab</sup>	22.23 ± 2.10 <sup>b</sup>	21.39 ± 1.45 <sup>ab</sup>	22.91 ± 2.40 <sup>bc</sup>
栲树群落	0.73 ± 0.19 <sup>b</sup>	0.76 ± 0.03 <sup>c</sup>	0.85 ± 0.15 <sup>b</sup>	0.78 ± 0.14 <sup>c</sup>	27.52 ± 12.28 <sup>b</sup>	29.55 ± 1.12 <sup>c</sup>	31.77 ± 11.74 <sup>b</sup>	29.61 ± 8.71 <sup>d</sup>

注:数据为平均值 ± 标准差( $n=3$ );同一列中标有不同字母的数值表示存在显著性差异, $P<0.05$ ,下同。

方差分析显示,随演替进行,土壤剖面容重在各层均显著降低( $P<0.05$ );含水率在 0~10 cm 和 20~40 cm 两层变化不显著( $P>0.05$ ),10~20 cm 有显著变化( $P<0.05$ ),说明演替对土壤剖面容重以及含水率影响较大。

### 2.1.3 土壤 pH 值

由表 3 可见,不同演替阶段土壤剖面从表层到底层,pH 值略有增高,但方差分析显示剖面各层 pH 值变化不显著( $P>0.05$ ),随演替进行,各层 pH 具有降低的趋势,但也不显著( $P>0.05$ )。

表 3 天童常绿阔叶林主要演替阶段土壤 pH 值沿剖面的变化

Tab. 3 The changes of soil pH along soil profile among successional stages in the evergreen broad-leaved forests of Tiantong region( $n=3$ )

演替阶段	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	平均
灌草丛	3.79 ± 0.23 <sup>a</sup>	3.74 ± 0.18 <sup>a</sup>	3.85 ± 0.20 <sup>a</sup>	3.79 ± 0.18 <sup>a</sup>
马尾松群落	3.79 ± 0.24 <sup>a</sup>	3.79 ± 0.35 <sup>a</sup>	4.02 ± 0.22 <sup>a</sup>	3.86 ± 0.27 <sup>a</sup>
木荷群落	3.56 ± 0.21 <sup>a</sup>	3.81 ± 0.19 <sup>a</sup>	3.87 ± 0.25 <sup>a</sup>	3.75 ± 0.24 <sup>a</sup>
栲树群落	3.60 ± 0.18 <sup>a</sup>	3.64 ± 0.20 <sup>a</sup>	3.69 ± 0.26 <sup>a</sup>	3.64 ± 0.19 <sup>a</sup>

### 2.1.4 土壤机械组成

由图 1 可见,在各演替阶段土壤剖面,表层黏粒( $<0.002$  mm)从上到下均有增加趋势,即土壤表层细颗粒相对较少,而下层较多;土壤粉粒与砂粒没有明显的变化规律。从演替进程来看,黏粒在演替前期的变化并不明显,但到演替后期的木荷群落和栲树群落阶段明显增大;粉粒在演替前期的灌草丛和马尾松群落所占比例较低,而在演替后期的木荷与栲树群落所占比例较高;砂粒与粉粒的变化趋势相反,即在演替前期的灌草丛和马尾松群落含量最高,而在演替后期阶段比例下降显著。

### 2.1.5 土壤有机质及碳密度

不同演替阶段同一剖面层次比较显示,腐殖质层的有机质含量差异显著( $P<0.05$ )。两两比较表明:栲树群落与灌草丛群落有显著差异( $P<0.05$ ),与其它群落差异不显著( $P>0.05$ );其它两两差异不显著。这一现象反映,常绿阔叶林演替初期与后期土壤腐殖质含量变

化较大,演替中期变化平稳.各演替阶段有机质含量差异不显著( $P>0.05$ ).将剖面各层进行平均后,演替前期(灌草丛和马尾松群落)土壤有机质含量变化较小,后期(木荷和栲树群落)增加,但不显著( $P>0.05$ )(见表 4).

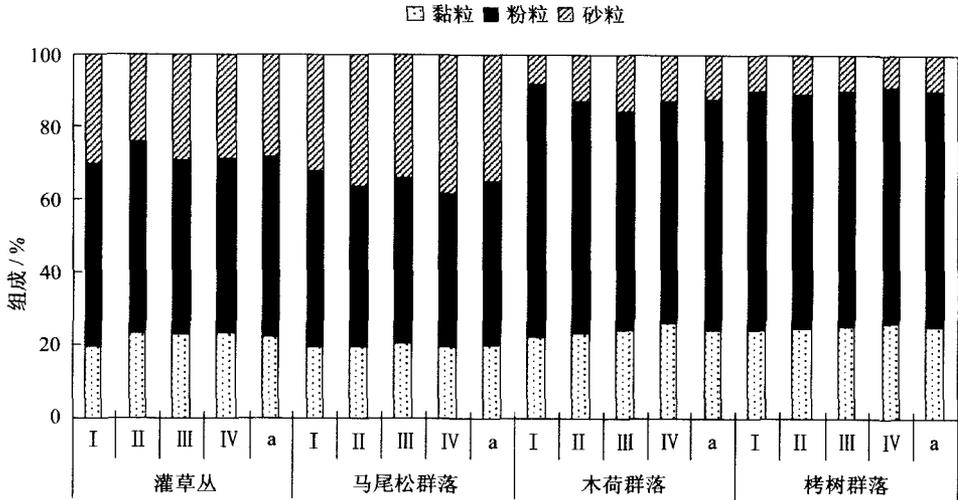


图 1 天童常绿阔叶林主要演替阶段土壤剖面的机械组成

Fig. 1 Changes of mechanical composition along soil profile among successional stages in the evergreen broad-leaved forest of Tiantong region

I 0~10 cm; II 10~20 cm; III 20~40 cm; IV 40~60 cm; a 平均值

表 4 天童常绿阔叶林主要演替阶段土壤剖面有机质含量与有机碳密度

Tab. 4 The changes of soil organic matter and soil organic carbon density along soil profile among successional stages in the evergreen broad-leaved forests of Tiantong region ( $n = 3$ )

演替阶段	有机质/( $g \cdot kg^{-1}$ )					碳密度/( $kg \cdot m^{-2}$ )			
	腐殖质	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	平均	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	平均
灌草丛	92.29 ± 1.15 <sup>a</sup>	46.14 ± 0.27 <sup>a</sup>	26.91 ± 0.22 <sup>a</sup>	18.38 ± 0.64 <sup>a</sup>	30.47 ± 12.84 <sup>a</sup>	4.96 ± 0.02 <sup>a</sup>	3.17 ± 0.05 <sup>a</sup>	4.80 ± 0.17 <sup>a</sup>	4.31 ± 1.25 <sup>a</sup>
马尾松群落	125.39 ± 1.89 <sup>ab</sup>	47.10 ± 0.96 <sup>a</sup>	29.00 ± 0.20 <sup>a</sup>	16.40 ± 0.21 <sup>a</sup>	30.83 ± 14.27 <sup>a</sup>	4.67 ± 0.12 <sup>a</sup>	2.79 ± 0.03 <sup>a</sup>	3.64 ± 0.11 <sup>a</sup>	3.70 ± 1.18 <sup>a</sup>
木荷群落	105.05 ± 1.38 <sup>ab</sup>	57.97 ± 1.18 <sup>a</sup>	32.05 ± 0.64 <sup>a</sup>	15.05 ± 0.43 <sup>a</sup>	35.02 ± 20.00 <sup>a</sup>	5.24 ± 0.14 <sup>a</sup>	2.94 ± 0.03 <sup>a</sup>	3.11 ± 0.12 <sup>a</sup>	3.76 ± 1.43 <sup>a</sup>
栲树群落	128.74 ± 0.57 <sup>b</sup>	46.58 ± 0.68 <sup>a</sup>	24.15 ± 0.15 <sup>a</sup>	38.69 ± 2.50 <sup>a</sup>	36.47 ± 17.93 <sup>a</sup>	3.48 ± 0.14 <sup>a</sup>	1.83 ± 0.11 <sup>a</sup>	7.07 ± 0.50 <sup>b</sup>	4.12 ± 3.53 <sup>a</sup>

在同一演替阶段土壤剖面上,除栲树群落 20~40 cm 层土壤碳密度显著增高外,其它群落上层(0~10 cm)土壤碳密度最高,中间层(10~20 cm)最低,最底层(20~40 cm)处于中等水平.从整个演替系列看,除中间层(10~20 cm)逐渐降低外,其它两层无明显规律.剖面各层有机碳密度平均后的结果显示,随演替进行,土壤碳密度具有先下降再升高的格局.

### 2.2 土壤剖面各特征的关系

由表 5 可见,土壤剖面上土壤容重与含水率显著负相关( $P<0.01$ );土壤含水率与土壤机械组成各组分相关性均达到极显著水平,其中,与黏粒和粉粒为正相关,与砂粒为负相关.

土壤容重与机械组成各组分也具有显著相关性,其中,与黏粒和粉粒显著负相关,与砂粒显著正相关,说明土壤机械组成中高比例的粗颗粒( $>0.05\text{ mm}$ )是增加土壤容重的主要原因。机械组成各组分(黏粒、粉粒和砂粒)相关分析显示黏粒和粉粒均与砂粒显著负相关,而黏粒与粉粒显著正相关。土壤 pH 值与其它土壤特征参数之间相关性不显著。土壤碳密度只与土壤有机质显著正相关。

表 5 天童常绿阔叶林主要演替阶段土壤剖面各特征的 Pearson 相关分析结果

Tab. 5 Pearson correlation coefficients between soil properties along soil profile among successional stages in the evergreen broad-leaved forests of Tiantong region ( $n = 36$ )

	容重	含水率	pH 值	黏粒	粉粒	砂粒	有机质
含水率	-0.795**						
pH 值	0.271	-0.203					
黏粒	-0.394*	0.555**	0.057				
粉粒	-0.620**	0.670**	-0.317	0.730**			
砂粒	0.607**	-0.682**	0.247	-0.828**	-0.986**		
有机质	-0.200	-0.020	-0.288	-0.150	0.296	-0.207	
碳密度	0.310	-0.245	-0.047	-0.101	0.026	0.000	0.632**

注: \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$

### 3 讨 论

#### 3.1 常绿阔叶林次生演替对土壤剖面特征的影响

研究表明,在森林演替过程中,土壤的理化性质逐步得到改善<sup>[13,22,23]</sup>。在天童地区,随着常绿阔叶林次生演替的进行,植物群落物种组成趋于多样,结构趋于复杂,高大乔木逐渐增多,植物根系趋向发达,土壤则渐趋疏松。从本研究结果来看,在植被演替过程中,土壤松紧度与土壤所含根系的比例有关,即根系越多土壤越疏松(见表 1),说明根系在疏松土壤方面有重要作用,也说明植被演替对土壤质地具有重要的改善作用。该作用也可从土壤腐殖质随演替的变化而得到反映,即:土壤腐殖质在灌草丛最低,而当植被覆盖地表后,土壤腐殖质发生了积累。本研究中,土壤腐殖质在马尾松群落最高,而演替后期的木荷和栲树群落中等。造成这一格局的主要原因包括以下几方面:(1)灌草丛植被生物量不高,返还土壤的枯枝落叶本身较少,加之灌草丛遮荫条件差,光照充足,土壤有机质分解较快,因此,灌草丛的土壤腐殖质最低;(2)马尾松群落土壤腐殖质含量较高主要与马尾松凋落叶分解缓慢有关,即大量的马尾松凋落叶滞留在土壤表层,在长期的雨水淋溶条件下,使得该群落土壤表层的腐殖质增加;(3)木荷林和栲树林的凋落叶主要以常绿阔叶植物为主,分解速率显著高于针叶植物<sup>[24]</sup>,加之当演替进行到后期阶段,林内水热条件得到极大改善,养分循环速率加快,因而腐殖质分解也较快,因此,会降低表层土壤的腐殖质含量。

本研究显示,土壤碳密度虽在演替前期的灌草丛较高,但在马尾松至栲树群落的演替系列上逐渐升高,基本符合演替过程中的碳积累假说<sup>[16]</sup>。演替前期灌草丛碳密度较高,主要与该阶段的土壤容重最大,土壤紧密有关。而自马尾松到栲树群落的演替过程中,土壤碳密度逐渐增加,主要是由于随着植物物种组成的更替,植被返还土壤的凋落物质量逐渐提高(如 C/N 下降)<sup>[25]</sup>,导致了土壤动物和土壤微生物类群的增加<sup>[26]</sup>,又由于不同土壤动物和土壤微生物类群参与凋落物分解的作用不同,对土壤结构的改造作用增强。因此,土壤机械组成

中粉粒比例增加,土壤颗粒比表面积增大,能够吸附更多的有机物质;同时,土壤容重降低和含水率增加,也能为土壤动物和微生物提供更好的生存环境,加快有机物质分解,从而使得凋落物分解和有机质矿化速率提高,进而导致了土壤碳密度的增加。

土壤酸碱性可以综合反映土壤化学性质,土壤中几乎所有的反应和过程都涉及到氢离子的传递和转换,它对土壤的其它一系列性质有深刻影响<sup>[27]</sup>。随演替进行,土壤表层凋落物性质的改善<sup>[25]</sup>,以及水热条件的优化,导致土壤真菌活动逐渐旺盛<sup>[23]</sup>,土壤进一步酸化,因而pH值下降。需要指出的是:本研究中土壤的pH值显著低于丁圣彦的研究结果<sup>[23]</sup>,如栲树群落土壤表层pH在1993年为4.03,而本次测定的数值为3.60,木荷与马尾松群落也有不同程度的降低。出现这种现象的原因可能有:(1)实验方法不同;(2)采样时间不同,不同季节有机质分解产生的有机酸、氨等含量不同;同时降雨量不同,对盐基离子、氢离子、铝离子和有机酸的淋溶强度也不同,酸性物质积累有差异<sup>[28]</sup>;(3)更需值得关注的原因可能是随着该地区工业化程度的加剧,酸沉降增加显著,从而导致土壤进一步酸化。

### 3.2 土壤剖面特征的关系

本研究中土壤剖面各特征的相关分析显示,土壤容重与含水率显著负相关( $P < 0.01$ ),反映了土壤容重大,则土壤密实,持水量减少,含水率降低。土壤含水率与土壤机械组成各组分相关性均达到显著水平,其中,与黏粒和粉粒为正相关,与砂粒为负相关,表明高比例土壤细小颗粒( $< 0.05$  mm)能够增加土壤的持水性,而粗颗粒( $> 0.05$  mm)持水性较差。土壤容重与机械组成各分组的黏粒和粉粒显著负相关,与砂粒显著正相关,说明土壤机械组成中高比例的粗颗粒( $> 0.05$  mm)是增加土壤容重的主要原因。土壤碳密度只与土壤有机质显著正相关,说明虽然碳密度由有机质、容重和土层厚度共同决定,但土壤碳密度大小的决定因素是有机质含量。这与其它的研究结果一致,如何立新<sup>[29]</sup>和刘义<sup>[30]</sup>的研究表明,土壤机械组成与多种生物营养元素的含量有较高的相关性,土壤有机质与机械组成中砂粒含量呈负相关,与粉粒和黏粒含量呈正相关。又如唐严林等<sup>[31]</sup>在研究西双版纳热带季雨林与橡胶林中的土壤机械组成中发现,土壤有机质、全N、全P、全K与土壤砂粒含量负相关,与粉粒和黏粒呈正相关。

在本研究中,虽然土壤容重与碳密度的相关性不显著,但是土壤容重是影响碳密度的重要因素之一,因此必定也会影响碳密度的变化。由于土壤机械组成强烈影响土壤质地和结构<sup>[32]</sup>,显著影响土壤容重和含水率等,因此也会影响土壤碳密度。另一方面,土壤碳密度反映土壤肥力大小,而土壤营养水平会引起土壤微生物和土壤动物数量,以及植被根系的变化,其反过来也会影响土壤剖面特征。

### [参 考 文 献]

- [1] WILLIS K J, BRAUN M, SUMEGI P, et al. Does soil change cause vegetation change or vice versa? a temporal perspective from Hungray[J]. Ecology, 1997, 78:740-750.
- [2] PORAZINSKA D L, BARDGETT R D, BLAAUW M B, et al. Relationships at the aboveground-belowground interface: plants, soil biota, and soil processes[J]. Ecology, 2003, 73:377-395.
- [3] FITTER A H. Darkness visible: reflections on underground ecology [J]. Journal of Ecology, 2005, 93: 231-243.
- [4] CHAPIN III F S, MATSON P A, MOONEY H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology[M]. New York: Springer-Verlag New York, 2002.
- [5] TEMPLER P H, LOVETT G M, WEATHERS K C, et al. Influence of tree species on forest nitrogen retention

- in the Catskill mountains, New York, USA[J]. *Ecosystems*, 2005(8): 1-16.
- [6] CHAPMAN S K, LANGLEY J A, HART S C, et al. Plants actively control nitrogen cycling: uncorking the microbial bottleneck[J]. *New Phytologist*, 2006, 169: 27-34.
- [7] BONANOMI G, GIANNINO F, MAZZOLENI S. Negative plant-soil feedback and species coexistence[J]. *Oikos*, 2005, 111: 311-321.
- [8] FINZI A, VAN BREEMEN N, CANHAM C D. Canopy tree-soil interactions within temperate forest: species effects on soil carbon and nitrogen[J]. *Ecological Application*, 1998(8): 440-446.
- [9] 欧阳学军,黄忠良,周国逸,等.鼎湖山亚热带森林群落演替对土壤化学性质影响的累积效应研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 51-54.
- OUYANG X J, HUANG Z L, ZHOU G Y, et al. Accumulative effects of forest community succession on soil chemical properties in Dinghushan of tropical China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4): 51-54.
- [10] 张庆费,宋永昌,由文辉.浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J]. *生态学报*, 1999, 19(2): 174-178.
- ZHANG Q F, SONG Y C, YOU W H. Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in Tiantong, Zhejiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 174-178.
- [11] WARDLE D A, WALKER L R, BARDGETT R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences[J]. *Science*, 2004, 305: 509-513.
- [12] 阎恩荣,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: 13-22.
- YAN E R, WANG X H, ZHOU W. N:P stoichiometry in secondary succession in evergreen broadleaved forest, Tiantong, East China[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2008, 32: 13-22.
- [13] 庞学勇,刘世全,刘庆,等.川西亚高山针叶林人工重建过程中植物群落演替对土壤性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 42-45, 50.
- PANG X Y, LIU S Q, LIU Q, et al. Influence of plant community succession on soil physical properties during subalpine coniferous plantation rehabilitation in western Sichuan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4): 42-45, 50.
- [14] 王凯博,陈美玲,秦娟,等.子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(10): 2089-2096.
- WANG K B, CHEN M L, QIN J, et al. Plant species diversity and the relation with soil properties in natural succession process in Ziwuling area[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(10): 2089-2096.
- [15] 王韵,王克林,邹冬生,等.广西喀斯特地区植被演替对土壤质量的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 130-134.
- WANG Y, WANG K L, ZOU D S, et al. Effects of vegetation succession on soil quality in karst region of Guangxi, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 130-134.
- [16] ZHOU G Y, LIU S G, LI Z, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils[J]. *Science*, 2006, 314: 1417.
- [17] 宋永昌,陈小勇.中国东部常绿阔叶林生态系统退化机制与生态恢复[M].北京:科学出版社,2007.
- SONG Y C, CHEN X Y. *Degradation Mechanism and Ecological Restoration of Evergreen Broad-Leaved Forest Ecosystem in East China*[M]. Beijing: Science Publishing House, 2007.
- [18] 丁圣彦,宋永昌.常绿阔叶林演替过程中马尾松消退的原因[J]. *植物学报(英文版)*, 1998, 40(8): 755-760.
- DING S Y, SONG Y C. Declining causes of *Pinus massoniana* in the processes of succession of evergreen broad-leaved forest[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(8): 755-760.
- [19] YAN E R, WANG X H, HUANG J J. Shifts in plant nutrient use strategies under secondary forest succession[J]. *Plant Soil*, 2006, 289: 187-197.
- [20] 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*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Document Publishing House, 1995.

- [21] 方运霆,莫江明,SANDRA B,等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报,2004,24(1):135-142.  
FANG Y T, MO J M, SANDRA B, et al. Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan biosphere reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 135-142.
- [22] LU D, MORAN E, MAUSEL P. Linking Amazonian secondary succession forest growth to soil properties[J]. *Land Degradation & Development*, 2002, 13:331-343.
- [23] 丁圣彦. 常绿阔叶林演替系列群落下土壤性质的比较[J]. 河南大学学报,1999,29(3):92-96.  
DING S Y. Comparison of soil characteristics under different successive communities of evergreen broad-leaved forest[J]. *Henan Univ (Nat Sci)*, 1999, 29(3): 92-96.
- [24] 黄建军,王希华. 浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2003(1):92-97.  
HUANG J J, WANG X H. Leaf nutrient and structural characteristics of 32 evergreen broad-leaved species[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2003, 1(3): 92-97.
- [25] 阎恩荣,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 ever green Broad-Leaved forests of Tiantong, East of China[J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(1):1-12.
- [26] 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(11):109-116.
- [27] 王志刚,赵永存,廖启林,等. 近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力[J]. 生态学报,2008,28(2):720-727.  
WANG Z G, ZHAO Y C, LIAO Q L, et al. Spatio-temporal variation and associated affecting factors of soil pH in the past 20 years of Jiangsu Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica* 2008, 28(2):720-727.
- [28] 刘鸿雁,黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2041-2046.  
LIU H Y, HUANG J G. Dynamics of soil properties under secondary succession forest communities in Mt. Jinyun [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2005,16(11):2041-2046.
- [29] 何立新. 湘中丘陵区两类林分生产力与土壤肥力的比较研究[J]. 中南林业学院学报,1998,18(1):53-59.  
HE L X. Comparative studies of productivity and soil fertility of two forest stands in central Hunan's Hilly Country[J]. *Journal of Central South Forestry University*,1998, 18(1):53-59.
- [30] 刘义,关继义,葛建平. 不同森林类型土壤肥力的差异分析[J]. 东北林业大学学报,2002,30(3):76-78.  
LIU Y, GUAN J Y, GE J P. Comparison of soil fertility for different forest types[J]. *Journal of Northeast Forestry University*,2002, 30(3):76-78.
- [31] 唐炎林,邓晓保,李玉武,等. 西双版纳不同林分土壤机械组成及其肥力比较[J]. 中南林业科技大学学报(自然科学版),2007,27(1):70-75.  
TANG Y L, DENG X B, LI Y W, et al. Comparison of the mechanical composition and soil fertility between tropical seasonal rain forest soil and rubber forest soil in Xishuangbanna[J]. *Journal of Central South Forestry University*,2007, 27(1):70-75.
- [32] 金发会,李世清,卢红玲,等. 石灰性土壤微生物量碳、氮与土壤颗粒组成和氮矿化势的关系[J]. 应用生态学报,2007,18(12):2739-2746.  
JIN F H, LI S Q, LU H L, et al. Relationships of microbial biomass carbon and nitrogen with particle composition and nitrogen mineralization potential in calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (12): 2739-2746.