

# 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

闫恩荣, 王希华\*, 陈小勇

(华东师范大学环境科学系, 上海 200062)

**摘要:** 为了解常绿阔叶林退化对土壤碳库和养分库的影响, 采用空间代替时间的研究方法, 以常绿阔叶林顶级群落为参照, 选择了次生常绿阔叶幼年林、次生针阔混交林、次生针叶林、灌丛和灌草丛代表不同的退化类型, 分别对其土壤氮磷养分库、碳库进行了调查和分析。结果表明: 土壤氮库贮量从大到小依次为, 成熟常绿阔叶林、次生常绿阔叶幼年林、灌丛、次生针叶林、灌草丛和次生针阔混交林; 土壤总磷含量也是在成熟林最高, 次生针阔混交林和次生针叶林的总磷含量显著高于次生常绿阔叶幼年林和灌丛; 土壤有机碳含量从高到低依次为: 成熟常绿阔叶林、次生针叶林、次生常绿阔叶幼年林、灌丛、灌草丛和次生针阔混交林; 土壤铵态氮在成熟林、灌丛和灌草丛的库容量最大, 其次分别为次生幼年常绿阔叶林、次生针阔混交林, 最小的为次生针叶林; 硝态氮则在灌草丛的库容量最大, 其次分别为次生针叶林、次生针阔混交林和成熟林针叶林, 最小的为次生常绿阔叶幼年林和灌丛。统计显示, 常绿阔叶林退化不仅导致土壤有机碳库含量的显著下降, 也使得土壤氮磷养分库含量显著下降。可以认为, 砍伐导致的大量生物量输出和森林管理措施的影响, 植物种类组成的改变, 土壤物理性质的改变以及养分和有机碳的主要生物化学转化环节发生改变是导致此类变化的主要因素, 常绿阔叶林顶极群落土壤是该地区土壤的最大养分库和碳库。

**关键词:** 常绿阔叶林; 退化; 土壤碳库; 土壤养分库

文章编号: 1000-0933(2007)04-1646-10 中图分类号: Q948 文献标识码: A

## Impacts of evergreen broad-leaved forest, degradation on soil nutrients and carbon pools in Tiantong, Zhejiang Province

YAN En-Rong, WANG Xi-Hua\*, CHEN Xiao-Yong

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

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(4): 1646 ~ 1655.

**Abstract:** Evergreen broad-leaved forest (EBLF), covering a lot of area in China, is the zonal vegetation type in subtropical area. However, under long-term human disturbances, this forest is shifting to include much more degraded area dominated by secondary forests, shrub and grassland. Unfortunately, forest nutrients dynamics remain poorly qualified, despite the growing view that these processes might be extremely important in helping us understand changes of biogeochemical cycle in the context of the global change (particular in the change of land use), and shedding light on the conservation and restoration of EBLF.

**基金项目:** 国家自然科学基金重点资助项目 (30130060)

**收稿日期:** 2006-08-25; **修订日期:** 2006-12-13

**作者简介:** 闫恩荣 (1970 ~ ), 男, 甘肃天水人, 博士, 主要从事植被生态学, 植物策略与生态系统功能关系研究. E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhwang@des.ecnu.edu.cn

**致谢:** 感谢施家月、狄秋明和施展同学在野外取样和室内分析工作中给予的帮助, 同时感谢黄建军博士在统计软件使用上给予的方便和建议, 也感谢宋永昌教授在论文写作上给予的指导。

**Foundation item:** The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30130060)

**Received date:** 2006-08-25; **Accepted date:** 2006-12-13

**Biography:** YAN En-Rong, Ph. D., mainly engaged in vegetation ecology, the relationship between plant strategies and ecosystem function. E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn

To understand the impacts of the degradation of EBLF on soil carbon and nutrient pools, we chose mature EBLF as the reference climax forest, and secondary and young evergreen broad-leaved forest, secondary conifer and evergreen broad-leaved mixed forest, secondary coniferous forest, shrubs and grassland to represent different degradation stages in Tiantong National Forest Park. After examining soil nutrients and carbon pools, we obtained the following results and conclusions: (1) Soil total N stocks displayed the following order: mature evergreen broad-leaved forest > secondary and young broad-leaved forest > shrub > secondary coniferous forest > grassland > secondary conifer and broad-leaved mixed forest; (2) soil total P is in the order: mature evergreen broad forest > secondary coniferous forest > secondary conifer and broad-leaved mixed forest > secondary and young broad-leaved forest > grassland > shrub; (3) soil organic carbon is in the pattern of mature evergreen broad forest > secondary coniferous forest > secondary and young broad-leaved forest > shrub > grassland > secondary conifer and broad-leaved mixed forest; (4) stock of soil  $\text{NH}_4^+$ -N displayed an "U" shape in the series of EBLF degradation; and (5) stock of soil  $\text{NO}_3^-$  was highest in the grassland than other degraded types, in which significant differences were not found. These results suggested that soil carbon and nutrients pools decreased gradually during degradation of EBLF. The mature EBLF can be considered as a major carbon sink and a huge nutrient pools in this region.

**Key Words:** evergreen broad-leaved forest; degradation; soil carbon pool; soil nutrient pool

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,取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<sup>[1]</sup>。总体来看,在长期的人类干扰下,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少,土壤退化等一系列问题<sup>[2]</sup>。退化土壤在强降雨的进一步侵蚀影响下,土层变薄,发生层毁损,养分含量降低,保水保肥,供水供肥能力下降,抗蚀性减弱。显然,在亚热带东部经济快速发展,常绿阔叶林分布面积日益缩小的背景下,研究常绿阔叶林退化对土壤碳库和养分库的影响,不仅是探索该类植被退化机制的基础性工作,也对揭示全球变化背景下该区域的碳平衡机制和养分循环途径具有重要意义。

森林土壤退化的原因是多方面的,其中人类干扰(如过度采伐、不适当的利用等)是主要的外在驱动因素之一,各类退化森林土壤的形成大都和人类的干扰史有关<sup>[3-9]</sup>。研究表明,对森林砍伐后进行耕作平均减少土壤碳含量 40%~50%<sup>[5]</sup>,平均减少土壤氮含量 8%<sup>[10]</sup>,而由废弃耕地上发展而来的人工林,在经过 75a 后,表层土壤有机质含量仍然较低,土壤结构(如紧实度)改变后的影响在 150a 后仍然存在<sup>[9,11]</sup>。但是,对具有重要碳汇和养分库贡献的常绿阔叶林来说,其退化过程对土壤碳库和养分库的维持特征产生了怎样的影响,尤其是人类干扰方式,以及群落种类组成改变后的作用,一直以来缺乏详细而系统地研究。

在人类活动频繁的浙东丘陵,既分布有处于不同退化程度的次生林、灌丛、旱生草地和人工林等,还在寺庙周围保存着较完好的地带性常绿阔叶林。本文借助空间代替时间法,通过对该地区常绿阔叶林退化过程中土壤碳库和养分库的调查和分析,分别回答以下 3 个问题:(1)常绿阔叶林退化为次生林、灌丛、灌草丛后,土壤养分库和碳库的变化特征如何?(2)常绿阔叶林顶级群落土壤是否是该区域最大的养分库和碳库?(3)影响土壤养分库和碳库变化的主要因素是哪些?

## 1 研究方法

### 1.1 研究地概况

研究地位于浙江省宁波市东钱湖镇(121°47'E, 29°48'N)到天童(121°39'E, 29°52'N)区域,涉及鄞州区的东吴乡、五乡镇和东钱湖镇 3 个行政乡。该区域处于浙东低山丘陵东北部,是天台山余脉和四明山余脉在滨海平原的延伸部分,境内均为丘陵地貌,海拔一般在 200m 左右。该地区山地土壤为黄红壤,土层厚薄不一,一般在 1m 以下。境内气候属中亚热带湿润季风气候,雨量充沛,年平均气温 16.2℃,年平均降水量

1389.7mm。其地带性植被是以栲树 (*Castanopsis fargesii*)、米楮 (*Castanopsis carlesii*) 和木荷 (*Schima superba*) 为优势种的常绿阔叶林<sup>[12]</sup>。

## 1.2 样地选择和资料来源

本研究选取该区域的成熟常绿阔叶林、次生常绿阔叶幼年林、次生针阔混交林、次生针叶林、灌丛和灌草丛为研究对象,通过空间代替时间的研究方法,以成熟常绿阔叶林顶极群落为对照,比较各退化类型间土壤养分库和有机碳库的差异,各样地特征如表 1 所示。

表 1 中的成熟常绿阔叶林为位于天童林场的栲树群落;退化阶段中的次生常绿阔叶幼年林包括天童林场的木荷群落和木荷 + 米楮群落,次生针阔混交林为马尾松 (*Pinus massoniana*) + 木荷群落,次生针叶林为马尾松群落。灌丛在东钱湖选取了以黄檀 (*Dalbergia hupeana*) + 榿木 (*Loropetalum chinense*) 为主的 7 个群落,在天童林区选取了石栎 (*Lithocarpus glaber*) + 榿木灌丛 1 个群落。灌草丛在天童林区选取了 2 个,在东钱湖地区选择 3 个以五节芒 (*Miscanthus floridulus*) + 铁芒萁 (*Dicranopteris pedata*) 为优势种的群落。整个区域共选择了 18 个群落类型,代表 6 种常绿阔叶林不同退化植被类型,另外,为了减小群落内各样本间的差异,在每个群落内再各设置 4 个重复样地(面积  $10 \times 10 \text{ m}^2$ ),重复样地间距离 5m 以上,共获得样地 72 个。样地选择时,为了避免环境因素造成的影响,所选样地环境条件大体相似(表 1)。

另外,还对本地区已有的研究结果<sup>[12]</sup>和林业部门的土壤普查资料进行了选择引用,为避免环境因素造成的影响,引用标准是海拔在 250m 以下,100m 以上,地形地貌(坡度、坡向、坡位等)与本研究所选样地尽量类似,且土壤取样厚度包含 0~20cm 土层。前者包括:天童林区的 5 个栲树群落,3 个次生木荷群落,5 个次生木荷 + 米楮群落。引用样地资料共 13 个,共有样地 85 个(表 1)。在处理引用样地资料时,为了消除不同年代和不同实验方法造成的差异,也利用本研究中同类型群落的实验结果对引用资料进行了校验,结果发现,两者间基本无显著差异(总氮:  $P=0.861$ ,  $df=12$ ; 总磷:  $P=0.121$ ,  $df=12$ ;  $t$  test)。

## 1.3 样品采集和室内分析

按照五点法,分别于 2004 年 7 月至 10 月在选定的 72 个样地内取样,共获得样品 360 个。采样时,先除去地面凋落物,然后将内径 7.5cm,长 20cm 的 PVC 管砸入土壤,获取 0~20cm 的土壤样品,在现场编号后装入塑料保鲜袋带回天童生态实验站,于 24h 内对每个样品称取 5g 进行土壤无机氮的提取,剩余样品在室内风干,然后按照常规方法研磨粉碎、过筛,然后装入保鲜袋待测定有机碳、总氮和总磷。在采样时,每个样地同时随机多采 3 个样品,每种类型共 12 个样品,进行土壤容重分析( $105^\circ\text{C}$ , 24h)。

土壤无机氮提取液在天童生态站完成提取后,立即在冰箱进行冷冻,一星期内用冷藏器皿带回华东师范大学实验室进行铵态氮和硝态氮分析。土壤无机氮采用 2mol/L 的 KCl 溶液提取,土壤总氮的测定采用标准凯氏法,土壤总磷采用高氯酸-浓硫酸法分别进行消解,消解采用德国产(VELP)温控消解炉进行,样品消解定容后进行仪器分析,以上分析都采用 Skalar 养分流动注射分析仪完成。土壤有机碳测定采用外加热法。

## 1.4 数据处理和统计分析

由于引用资料中一般没有土壤容重记录,但均记录有土壤有机质含量,因此采用以下公式间接计算引用样地的土壤容重<sup>[5]</sup>。在应用该公式之前,利用本研究所选择的 72 个样地所测定的土壤有机质含量间接推算了各样地的土壤容重,通过与实测土壤容重的比较用来检验该公式的精确程度,结果发现,该公式的精确度达 95.11% ( $n=72$ ,  $SD=0.073$ )。

$$BD = \frac{100}{\frac{\% OM}{0.244} + \frac{100 - \% OM}{1.64}}$$

式中,BD 为土壤容重,%OM 土壤有机质含量。

另外,采用响应率 R 判断常绿阔叶林退化对土壤碳库和养分库产生的效应,通过以下公式获得:

$$R(\%) = \frac{X_e - X_c}{X_c} \times 100$$

式中,  $X_0$  和  $X_t$  分别表示常绿阔叶林退化前后各类型土壤的碳(或养分)库含量,  $R$  为响应率, 正值表示增加, 负值表示减少, 值越大表明变化越剧烈(积累或衰减)。

统计分析采用单因素方差分析法(ANOVA)判断常绿阔叶林退化对土壤碳库、养分库的影响, 方差分析前, 首先判断各组数值是否满足正态分布以及方差是否具有齐性, 如果不满足, 则对相应数值进行 Log 转换以满足单因素方差分析的假定条件。方差分析结束后, 采用 Tukey 检验进行各水平间均值的配对比较检验。方差分析过程中, 将不同退化类型作为自变量, 土壤有机碳、铵态氮、硝态氮、总氮、总磷含量和土壤容重分别作为因变量。上述分析通过 SPSS11.5 统计软件完成, 同时, 也利用 SAS 软件对该统计过程进行验证。

## 2 结果与分析

### 2.1 常绿阔叶林退化过程中土壤的氮磷养分库动态

不同退化阶段间土壤总氮含量的大小是: 成熟常绿阔叶林最高, 其次分别为次生常绿阔叶幼年林、灌丛、次生针叶林和灌草丛, 最小的为次生针阔混交林(见表 2)。常绿阔叶林退化不仅导致了土壤氮库含量的显著下降(ANOVA,  $df = 5, F = 117.12, P < 0.001$ ), 也使得单位重量土壤氮含量显著下降(ANOVA,  $df = 5, F = 189.63, P < 0.001$ )。各类型间的显著性差异程度如图 1a 所示。

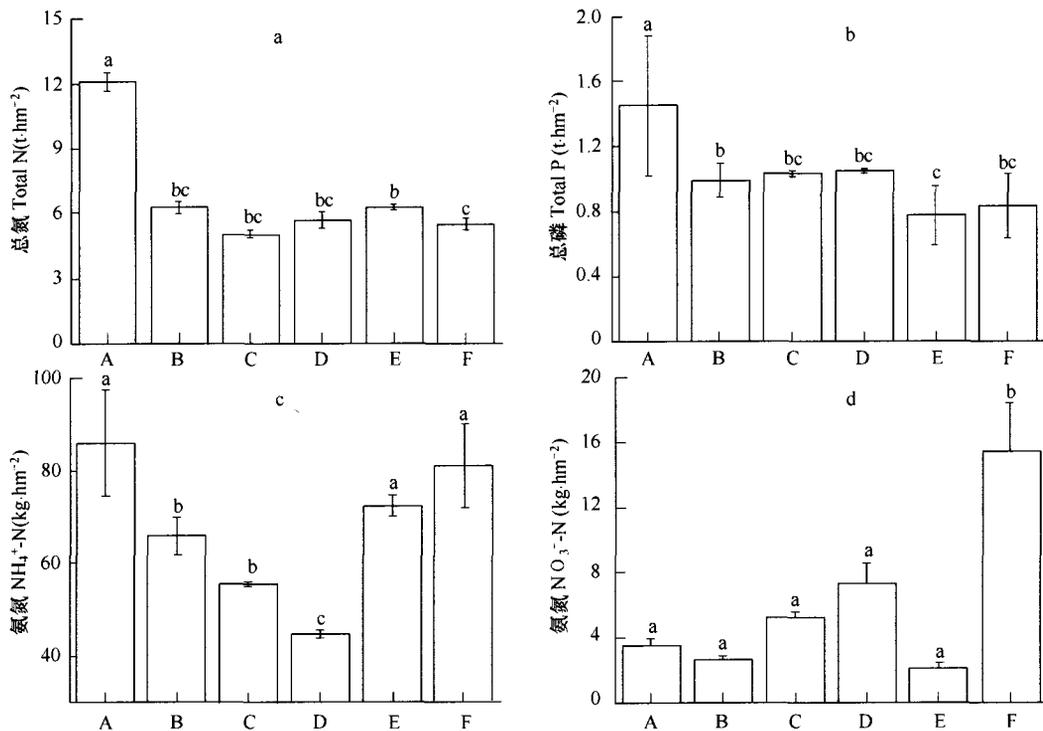


图 1 常绿阔叶林不同退化阶段土壤的氮磷养分库

Fig. 1 Stocks of soil nutrient pools in various degraded types of evergreen broad-leaved forests

图中数据为平均值(标准偏差); 不同字母表示存在显著性差异,  $P < 0.05$  (Tukey test); A: 成熟林 Mature forest; B: 次生常绿阔叶幼年林 Secondary and young evergreen broad-leaved forest; C: 次生针阔混交林 Secondary conifer and broad-leaved mixed forest; D: 次生针叶林 Secondary conifer forest; E: 灌丛 Shrub; F: 灌草丛 Grassland; Data are means (SD); Different letters on the column indicate significant differences at  $P < 0.05$  (Tukey test)

土壤总磷含量也是在成熟林最高, 另一个显著特征是: 次生针阔混交林和次生针叶林的总磷含量显著高于其他退化类型, 次生常绿阔叶幼年林和灌丛的土壤磷库含量最小。总体来看, 常绿阔叶林退化导致了土壤磷库含量(ANOVA,  $df = 5, F = 33.06, P < 0.001$ ) 和单位重量土壤磷含量(ANOVA,  $df = 5, F = 51.69, P < 0.001$ ) 的显著下降。各类型间的显著性差异程度如图 1b 所示。

表 1 浙东丘陵常绿阔叶林退化类型及其样地特征  
Table 1 Degraded types of evergreen broad-leaved forest and characteristics of selected plots in hills of eastern Zhejiang Province, China

植被类型 Vegetation types	群落类型 Community types	年龄 Age(a)	海拔(m) Altitude(m)	坡度(°) Slope(°)	坡向 Exposure	群落高度 Height(m)	主要优势种类 Dominant tree species	a	b	干扰历史 Disturbance history
成熟常绿阔叶林 Mature evergreen broad-leaved forest	栲树群落 <i>Castanopsis fargesii</i> Comm.	150	196	26	SE45°	25	栲树 <i>Castanopsis fargesii</i> 木荷 <i>Schima superba</i> 枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	4	5	受保护 Protected from disturbance
次生常绿阔叶幼年林 Secondary and young evergreen broad-leaved forest	木荷群落 <i>Schima superba</i> Comm.	90	163	20	SE70°	20	木荷 <i>Schima superba</i> 石栎 <i>Lithocarpus glabe</i> 马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	4	3	
	木荷 + 米槠群落 <i>Schima superba</i> + <i>Castanopsis carlesii</i> Comm.	80	160	20	SE50°	18	木荷 <i>Schima superba</i> 米槠 <i>Castanopsis carlesii</i> 石栎 <i>Lithocarpus glabe</i>	4	5	废弃前有皆伐历史, 废弃后自然更新 Clear-cut prior to abandonment, and then protected for natural regeneration
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	马尾松 + 木荷群落 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Schima superba</i> comm.	70	121	10	SE45°	15 ~ 20	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> 木荷 <i>Schima superba</i> 栲树 <i>Castanopsis fargesii</i>	4	0	
针叶林 Coniferous forest	马尾松群落 <i>Pinus massoniana</i> comm.	60	135	15	SE10°	16	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> 木荷 <i>Schima superba</i> 枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	4	0	
	石栎 + 榿木群落 <i>Lithocarpus glaber</i> + <i>Loropetalum chinense</i> comm.	17	164	25	SE20°	5	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> 木荷 <i>Schima superba</i> 石栎 <i>Lithocarpus glabe</i>	4	0	
灌丛 Shrub	黄檀 + 榿木群落 <i>Dalbergia hupeana</i> + <i>Loropetalum chinense</i> comm.	17	110 ~ 140	20 ~ 25	SE20 ~ 30°	6	黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i> 榿木 <i>Loropetalum chinense</i> 山合欢 <i>Albizia kalkora</i>	28	0	薪炭林 Fuel forest
灌草丛 Grassland	五节芒 + 铁芒萁群落 <i>Miscanthus floridulus</i> + <i>Dicranopteris pedata</i> Comm	2	120 ~ 150	20 ~ 25	SE20 ~ 40°	0.5	五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i> 铁芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i> 山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>	20	0	每隔 2a 清理 1 次 Clear-cutting every two years

\* a, b 表示样地个数, a 是本研究所选样地数, b 为引用样地数 Number of plot, a is in this study and b is incited from literature<sup>[12]</sup> and documents in local forestry administration

表 2 常绿阔叶林不同退化阶段各群落类型的土壤氮磷养分库  
Table 2 Stocks of soil nutrient pools in various degraded types of evergreen broad-leaved forests

植被类型 Vegetation types	群落类型 Community types	总氮 Total N (t/hm <sup>2</sup> )	铵氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (t/hm <sup>2</sup> )	硝氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (t/hm <sup>2</sup> )	总磷 Total P (t/hm <sup>2</sup> )
成熟常绿阔叶林 Mature evergreen broad-leaved forest	栲树群落 <i>Castanopsis fargesii</i> Comm.	12.13 ± 0.44 *	86.09 ± 11.14	3.47 ± 0.43	1.45 ± 0.43 *
次生常绿阔叶幼年林 Secondary and young evergreen broad-leaved forest	木荷群落 <i>Schima superba</i> Comm.	5.68 ± 0.19 *	76.32 ± 2.01	2.72 ± 0.43	1.03 ± 0.05 *
	木荷 + 米槠群落 <i>Schima superba</i> + <i>Castanopsis carlesii</i> comm.	7.15 ± 0.33 *	55.80 ± 1.28	2.42 ± 0.42	0.94 ± 0.14 *
	组均值 Group average	6.29 ± 0.25	66.06 ± 4.03	2.57 ± 0.28	0.99 ± 0.10
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	马尾松 + 木荷群落 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Schima superba</i> comm.	5.05 ± 0.15	55.63 ± 0.49	5.19 ± 0.37	1.03 ± 0.02
针叶林 Coniferous forest	马尾松群落 <i>Pinus massoniana</i> comm.	5.69 ± 0.35	44.99 ± 0.66	7.32 ± 1.22	1.05 ± 0.01
灌丛 Shrub	石栎 + 榿木群落 <i>Lithocarpus glaber</i> + <i>Loropetalum chinense</i> comm.	6.61 ± 0.15	72.98 ± 3.42	1.74 ± 0.13	0.63 ± 0.01
	黄檀 + 榿木群落 <i>Dalbergia hupeana</i> + <i>Loropetalum chinense</i> comm.	6.24 ± 0.11	72.16 ± 3.31	2.42 ± 0.47	0.79 ± 0.18
	组均值 Group average	6.29 ± 0.11	72.57 ± 2.21	2.08 ± 0.26	0.77 ± 0.18
灌草丛 Grassland	五节芒 + 铁芒萁群落 <i>Miscanthus floridulu</i> + <i>Dicranopteris pedata</i> comm.	5.50 ± 0.24	81.1 ± 9.02	15.47 ± 2.96	0.83 ± 0.20

数据为平均值 ± 标准误差, \* 表示其中也包括了引用的数据,引自宋永昌和王祥荣(1996)以及当地林场的土壤普查结果 Data are means ± SD; \* indicate it includes the data that incited from literature<sup>[12]</sup> and the document of local forestry administration

土壤铵态氮在成熟林、灌丛和灌草丛的库容量最大,其次分别为次生幼年常绿阔叶林、次生针阔混交林,最小的为次生针叶林;硝态氮则在灌草丛的库容量最大,其次分别为次生针叶林、次生针阔混交林和成熟常绿阔叶林,最小的为次生常绿阔叶幼年林和灌丛,表现出与有机碳、总氮和总磷完全不同的分布格局。ANOVA 显示,常绿阔叶林退化导致了土壤无机氮库含量的显著变化(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:  $df=5$ ,  $F=4.61$ ,  $P < 0.01$ ; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:  $df=5$ ,  $F=11.94$ ,  $P < 0.001$ )。各类型间的显著性差异程度如图 1cd 所示。

### 2.1.1 次生常绿阔叶幼年林、次生针阔混交林和次生针叶林的土壤养分库

成熟林退化为次生林不仅导致了土壤氮库含量的显著下降(-48.39%,  $P < 0.001$ ),也导致土壤磷库含量的显著下降(-35.17%,  $P=0.019$ )。这是因为当森林被砍伐后,光照增强,温度升高,加速了土壤氮素的矿化速率,大量的养分元素转化为无机形态,硝态氮库含量增加了 19.0%,在缺乏植物吸收,地表径流增强的情况下,硝态氮不但通过地表冲刷流失,也通过反硝化、挥发和渗漏等方式损失,因此大大减小了土壤氮素的养分库储量。其次,砍伐干扰造成的生物量大量输出也加速了氮、磷养分的损失;同时,由于粗死木质残体(Coarse woody debris)为非共生固氮过程和与其相关的固氮菌提供生境、营养和碳库储存<sup>[13]</sup>,因此,当地林业管理部门的逐年清理措施,极大地破坏了次生林氮素的补充来源。另外,群落种类组成的改变也是导致次生林土壤养分库下降的重要原因,即:演替中前期的优势种类马尾松采取的是保守的养分利用策略<sup>[14]</sup>,不但养分转移率高,返还土壤的氮素量少<sup>[15]</sup>,而且凋落物难以分解,养分释放缓慢<sup>[16]</sup>,这些特征都不利于土壤养分库含量的增加。

### 2.1.2 灌丛与灌草丛的土壤养分库

次生林退化为灌丛未造成土壤氮库含量的显著下降( $P > 0.05$ ),反而略有增加(+1.31),一方面是由于

在高强度的砍伐干扰下,生境条件发生显著改变,种类组成也相应改变,此类型生境中往往能使那些豆科种类成功定居和生长,如黄檀、山合欢等,这些种类都具固氮能力,无疑可以补充土壤氮库含量,弥补砍伐造成的氮输出。另一方面,砍伐造成的枯落物积累在地表,加之灌丛内光照增强,加速了凋落物的分解,一定程度上使得铵态氮含量急剧增加(+27.17%)。由此可见,灌丛比次生林的土壤氮输入途径更多,氮循环机制更趋复杂。另外,砍伐导致地表植被稀疏,土壤与空气的接触面积大,相对森林来说,大气氮沉降的输入量更多,也在一定程度上平衡了土壤氮库的输入输出逆差。

而当灌丛被砍伐形成灌草丛后,单位重量土壤氮含量虽然降低显著( $P=0.016$ ),但氮库储量未发生显著降低(-11.83, $P=0.082$ )。当裸地形成后,由于光照充足、一定程度上提高了土壤氮素的矿化速率,铵态氮和硝态氮分别增加了11.89%和768.82%。但是硝态氮含量的增多意味着氮损失的风险也增大,即:在缺乏植物吸收,地表径流增强的情况下,硝态氮非常容易通过地表径流、渗漏和反硝化而损失,最终势必导致土壤氮含量的减少;然而由于裸地形成过程中伴随着土壤容重的增大,因此使得土壤氮库含量的下降程度相对而言不显著。

土壤磷含量在次生林改变为灌丛后下降显著(-16.19, $P < 0.05$ ),长期的地上生物量输出无疑是造成土壤磷含量大量下降的主要原因。而当灌丛退化为灌草丛后,土壤总磷含量未发生显著下降( $P > 0.05$ ),反而略有增加(+4.56),这与灌草丛光线充足,凋落物分解快,有利于磷素释放有关,也与裸地类型中容易受到水蚀、风蚀等因素有关,即:增加了土壤和岩石磷素的释放。

## 2.2 常绿阔叶林不同退化类型的土壤有机碳库动态

在不同的退化类型中,土壤有机碳含量从高到低依次为:成熟常绿阔叶林,次生针叶林、次生常绿阔叶幼年林、灌丛、灌草丛和次生针阔混交林(图2)。单因素方差分析(ANOVA)显示,常绿阔叶林退化不仅导致了土壤碳库储量的显著下降( $df = 5, F = 14.77, P < 0.001$ ),也导致了单位重量土壤碳含量的显著下降( $df = 5, F = 22.21, P < 0.001$ )。进一步配对检验后发现,成熟常绿阔叶林与其余各类型间都存在显著差异( $P < 0.05$ ),其余各类型间的显著差异情况如图2所示。另外一个显著特征是,在次生常绿阔叶林中,木荷群落与木荷+米槠间存在显著差异( $P < 0.05$ );灌丛类型间则无显著差异( $P > 0.05$ )。可以认为,在亚热带丘陵地区的众多植被类型中,常绿阔叶林顶极群落具有最大的土壤碳库容量,是区域生态系统最大的碳库之一,对维持区域的生物地球化学循环具有重要贡献。

### 2.2.1 次生常绿阔叶幼年林、次生针阔混交林和次生针叶林的土壤碳库

次生林大都是经大规模伐木废弃后,任其自然更新形成。此类干扰不仅造成地上生物量的大量输出,也导致了土壤碳库含量( $P=0.001$ )的显著下降(-37.71%)。原因主要为,首先,砍伐强度大,林地清理强度高(如收获地面凋落物),因而导致了大量的土壤碳输出;其次,当地林业部门采取的抚育管理措施是导致土壤碳库不能有效恢复的重要因素,如逐年清理林地内的枯死木,清理林下灌木,并焚烧残余凋落物等;另外,常绿阔叶林在砍伐后,首先侵入林地的为马尾松等针叶树种,在演替的中前期,马尾松几乎一直是优势种,马尾松不但凋落叶分解缓慢,细根比例也较少<sup>[17]</sup>,这些特性都不利于土壤碳库恢复。

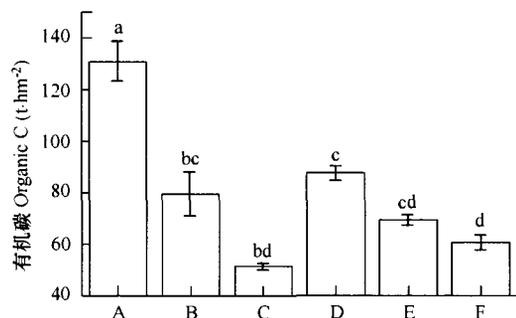


图2 常绿阔叶林不同退化阶段土壤的有机碳库

Fig. 2 Content of soil organic carbon pools in various degraded types of evergreen broad-leaved forests

数据为平均值(标准偏差);不同字母表示存在显著性差异, $P < 0.05$ (Tukey test); A: 成熟林 Mature forest; B: 次生常绿阔叶幼年林 Secondary and young evergreen broad-leaved forest; C: 次生针阔混交林 Secondary conifer and broad-leaved mixed forest; D: 次生针叶林 Secondary conifer forest; E: 灌丛 Shrub; F: 灌草丛 Grassland Data are means (SD); Different letters on the column indicate significant differences at  $P < 0.05$  (Tukey test)

### 2.2.2 灌丛与灌草丛的土壤碳库

当次生林退化为灌丛后,土壤碳含量下降了 16.34%,但差异不显著( $P > 0.05$ ),而灌丛继续退化为灌草丛也未导致土壤碳库的显著差异(-11.22%, $P > 0.05$ )。据访问当地林业管理人员,该地区以前对薪炭林的收获每隔 5~6a 进行一次,频繁的干扰使得土壤紧实度显著增加,进而导致了碳密度的增大,即单位重量土壤碳含量增多,因此碳库含量虽有下降,但不显著。其次,砍伐频率高使得马尾松等针叶树种基本难以持久占据竞争优势,反而为铁芒萁、五节芒等草本植物和强阳性的落叶灌木提供了定居和迅速生长的机会,这些草本植物生命周期短,返还土壤的碳多,增加土壤碳库的输入。另外,一些具有萌枝能力的植物种类,即使在两年一次的砍伐周期下,残留根系上产生的萌枝仍然能够迅速生长,具有较强的碳库维持能力。因此,总体来说,在中亚热带地区,由于良好的水热资源,在人类适当频率的砍伐干扰下,灌丛和灌草丛甚至比马尾松次生林具有更强的碳库缓冲能力,这种优势主要表现在土壤碳库的输入方面。

## 3 讨论

### 3.1 影响退化群落土壤养分库和碳库的因素分析

常绿阔叶林退化过程中土壤养分库和碳库贮量下降是一个复杂的过程,虽然空间代替时间的研究方法不可避免的产生空间自相关现象,对研究结果产生一定影响,但是,从本研究来看,不同性质的人类干扰方式、土地利用历史及其植物种类组成的变化等的影响更为显著。这些因素可以概括为以下 4 方面:(1)砍伐导致的大量生物量输出和森林管理措施的影响;(2)植物种类组成的改变;(3)土壤物理性质的改变;(4)养分和有机碳的主要生物化学转化环节发生改变。

砍伐最显著的影响是降低森林的生物量,当自然森林被退化植被所代替,地上生物量通常都会不同程度的降低<sup>[6,18]</sup>。据研究,不定期砍伐的森林生物量比自然森林低 30%~80%,温带地区生产性森林的生物量比同区的自然森林低 40%~50%,平均而言,在经过数个“生长-收获”的周期后,管理森林的碳贮量仅是未受干扰森林的 30%<sup>[19]</sup>。本研究也表明,砍伐森林过程中地上生物量的大量输出,导致了土壤碳库和氮素养分库含量的显著下降。随着砍伐频率的增高,虽然土壤无机氮库含量会显著上升,但同时意味着系统的氮损失风险显著加大,因此,从长远而言,由砍伐而导致的土壤无机氮库增加只是瞬间现象,在缺少植物吸收的情况下,其最终结果是从系统内输出,从而导致了被砍伐森林的总氮库含量显著下降。

亚热带东部丘陵地区的地带性植被为常绿阔叶林,但在长期的人类干扰下,当森林遭受长期砍伐而被改变为次生林、灌丛直至灌草丛后,顶极群落的优势种类大大减少甚至消失,新形成的生境被那些耐砍伐、高生长以及耐瘠薄的植物种类所占据,群落种类组成发生了根本性的改变<sup>[4]</sup>。这些完全不同于顶极种特性的种类,则对生态系统功能产生了完全不同的影响<sup>[20]</sup>,例如草本的增多使得整个群落的光合途径比例发生改变,从而改变了碳库的积累过程<sup>[21,22]</sup>;豆科植物的增多改变了氮素的生物地球化学循环途径<sup>[23]</sup>;针叶植物的增多使得群落的养分循环途径更多采用了内循环的形式<sup>[14,15]</sup>,大大减少了对土壤的养分归还量。

在常绿阔叶林退化过程中,由于人类干扰强度的增大,使得土壤紧实度增加,导致植物根系的伸展能力下降,土壤持水能力减弱和气体交换能力衰退,从而进一步导致了土壤物理性质的退化,这种改变加速了土壤有机质和养分元素的流失<sup>[24]</sup>。另外,土壤温度、水分条件以及其它非生物因子的改变,间接的引发了土壤微生物、土壤动物种类组成和结构的变化,在这些因素的综合影响下,土壤有机碳和氮磷养分元素的主要生物化学周转环节也受到了极大的影响,比如随着土壤温度升高,土壤氮素矿化速率增加,土壤呼吸消耗增大,土壤死有机体的养分释放加快等<sup>[25-29]</sup>,这些过程进一步加剧了养分元素和碳素的外流。

总之,从以上分析可以看出,砍伐干扰改变了地表植物群落的分布格局和结构,植物群落种类组成的改变反过来又影响到土壤的形成和发育进程,也从根本上改变了土壤的养分库和碳库大小。在此过程中,森林砍伐强度的增大意味着生态系统生物量的输出越大,同时也意味着采取不同生活史策略的植物种类侵入受干扰群落的机会越大,也意味着生态系统结构和功能发生改变的风险越大,这些变化对土壤养分库和碳库的影响是显著的,彻底改变了土壤和植物之间原有的相互作用关系。

### 3.2 常绿阔叶林顶极群落土壤在区域土壤碳库和养分库中的地位

随着人类干扰强度的增大,在常绿阔叶林退化为次生林、灌丛和灌草丛的过程中,土壤有机碳库的含量逐步递减,相对而言,成熟常绿阔叶林的土壤有机碳库显著高于退化类型(表2)。因此,可以认为常绿阔叶林顶极群落土壤是亚热带丘陵地区最大的碳库之一,对维持区域碳平衡具有重要贡献。常绿阔叶林退化过程中土壤碳汇消失的机制主要包括以下方面:(1)与砍伐干扰相联系的地上生物量的大量输出;(2)地上生物量的燃烧;(3)光照和温度增强后土壤有机质的快速分解;(4)植物种类组成的改变导致碳循环数量和质量的改变;(5)退化过程使得土壤紧实度增加,导致植物根系的伸展能力下降,土壤持水能力减弱和气体交换能力衰退,从而导致了土壤物理性质的退化,这种改变加速了土壤有机质的流失。

对于土壤氮磷养分库而言,常绿阔叶林显著高于其它退化类型,尤其是总氮含量高其它退化类型平均值的2倍之多,总磷含量高出将近1倍(表2),可见,常绿阔叶林顶极群落土壤也具有最大的养分库容量。

### 4 结论

常绿阔叶林退化为次生林、灌丛和灌草丛,既导致了土壤碳库含量的显著降低,也导致了土壤养分库含量的极大衰竭,极大的改变了区域碳、氮和磷的生物地球化学循环。在此过程中,人类干扰引起的生物量输出,植物种类组成的改变,土壤物理性质的改变,以及氮磷和有机碳主要生物化学转化环节发生的改变为主要影响因素。相对而言,成熟常绿阔叶林土壤是亚热带丘陵地区土壤中最大的碳库和养分库之一,保护和恢复常绿阔叶林对维持区域碳收支,以及养分平衡具有重要意义。

### References:

- [ 1 ] Wang X H, Yan E R, Yan X, *et al.* Analysis of degraded evergreen broad-leaved forest communities in Eastern China and issues in forest restoration. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1796 – 1803.
- [ 2 ] Huang Q L, Li Y H. A brief review on the research of natural broad-leaved forest in the Mid-subtropical Zone. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1999, 19 (2), 189 – 192.
- [ 3 ] Foster D R, Zebryk T M. Long-term vegetation dynamics and disturbance history of a Tsuga-dominated forest in New England. *Ecology*, 1993, 74 (4): 982 – 998.
- [ 4 ] Dupouey J L, Dambrine E, Laffite J D, *et al.* Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, 2002, 83(11): 2978 – 2984.
- [ 5 ] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345 – 360.
- [ 6 ] Lugo A E, Brown S. Management of tropical soils as sinks or source of atmospheric carbon. *Plant and Soil*, 1993, 149: 27 – 41.
- [ 7 ] Verheyen K, Bossuyt B, Hermy M, *et al.* The land use history (1278 – 1990) of a mixed hardwood forest in western Belgium and its relationship with chemical soil characteristics. *Journal of Biogeography*, 1999, 26: 1115 – 1128.
- [ 8 ] Powers G S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems*, 2004, 7: 134 – 146.
- [ 9 ] Latty E F, Canham C D, Marks P L. The effects of land-use history on soil properties and nutrient dynamics in northern hardwood forest of the Adirondack mountains. *Ecosystems*, 2004, 7: 193 – 207.
- [ 10 ] Compton J E, Boone R D, Motzkin G, *et al.* Soil carbon and nitrogen in a pine-oak sand plain in central Massachusetts: Role of vegetation and land-use history. *Oecologia*, 1998, 116: 536 – 542.
- [ 11 ] Koerner W, Dupouey J L, Dambrine E, *et al.* Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forests in the Vosges mountains, France. *Journal of Ecology*, 1997, 85: 351 – 358.
- [ 12 ] Song Y C, Wang X R, eds. *Vegetation and flora of Tiantong national forest park Zhejiang Province*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Document Publishing House. 1995.
- [ 13 ] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, *et al.* Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15: 133 – 302.
- [ 14 ] Wang X H, Huang J J, Yan E R. Study on Leaf Nutrient Use Efficiency of Some Trees in Tiantong National Forest Park. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4), 13 – 16.
- [ 15 ] Wang X H, Huang J J, Yan E R. A study on leaf nutrient resorption of some trees in Tiantong national forest park. *Guihaia*. 2004, 24(1), 81 –

- 85.
- [16] Wang X H, Huang J J, Yan E R. Leaf Litter Decomposition of Common Trees in Tiantong. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 457–467.
- [17] Shi J Y. Fine root turnover and nutrient dynamics in the secondary succession of evergreen broad-leaved forest in Tiantong. Master theme, East China Normal University, Shanghai, 2005, 21–34.
- [18] McGrath D A, Smith K C, Gholz H L, *et al.* Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazonia. *Ecosystems*, 2001, 4:625–645.
- [19] Cooper C F. Carbon storage in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1983, 13: 155–166.
- [20] Herbert D A, Rastetter E B, Shaver G R, *et al.* Effects of plant growth characteristics on biogeochemistry and community composition in a changing climate. *Ecosystems*, 1999, 2: 367–382.
- [21] Fynn R W S, Morris C D, Kirkman K P. Plant strategies and trait trade-offs influence trends in competitive ability along gradients of soil fertility and disturbance. *Journal of Ecology*, 2005, 93: 384–394.
- [22] Knops J M H, Bradley K, Wedin D A. Mechanism of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling. *Ecology Letters*, 2002, 5: 454–466.
- [23] Dechert G, Veldkamp E, Anas I. Is soil degradation unrelated to deforestation? Examining soil parameters of land use systems in upland central Sulawesi, Indonesia. *Plant and Soil*, 2004, 265: 197–209.
- [24] Kauffman J B, Cummings D L, Ward D E. Fire in the Brazilian Amazon: biomass, nutrient pools, and losses in cattle pastures. *Oecologia*, 1998, 113:415–427.
- [25] Jaramillo V J, Kauffman J B, Renteria-Rodríguez L, *et al.* Biomass, carbon, and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes. *Ecosystems*, 2003, 6: 609–629.
- [26] Hughes R F, Kauffman J B, Cummings D L. Dynamics of aboveground and soil carbon and nitrogen stocks and cycling of available nitrogen along a land-use gradient in Rondônia, Brazil. *Ecosystems*, 2002, 5:244–259.
- [27] Osher L J, Matson P A, Amundson R. Effects of land use change on soil carbon in Hawaii. *Biogeochemistry*, 2003, 65: 213–232.
- [28] Fisk M C, Zak D R, Crow T R. Nitrogen storage and cycling in old- and second-growth Northern hardwood forests. *Ecology*, 2002, 83(1): 73–87.
- [29] Montagnini F, Buschbacher R. Nitrification rates in two undisturbed tropical rain forests and three slash-and burn sites of the Venezuelan Amazon. *Biotropica*, 1989, 21:9–14.

#### 参考文献:

- [1] 王希华, 闫恩荣, 严晓, 等. 中国东部常绿阔叶林退化群落分析及恢复重建研究的一些问题. *生态学报*, 2005, 25(7): 1796–1803.
- [2] 黄清麟, 李元红. 中亚热带天然阔叶林研究综述. *福建林学院学报*, 1999, 19(2): 189–192.
- [12] 宋永昌, 王祥荣. 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. 11–12
- [14] 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童国家森林公园若干树种叶水平上养分利用效率的研究. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 13–16.
- [15] 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童常绿阔叶林若干树种的叶片营养转移研究. *广西植物*, 2004, 24(1): 81–85.
- [16] 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 457–467.
- [17] 施家月. 天童常绿阔叶林次生演替过程中细根的周转和养分动态. 华东师范大学硕士论文, 2005, 21–34.