

格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库

杨玉盛^{1,2*}, 郭剑芬³, 林 鹏³, 何宗明¹, 谢锦升¹, 陈光水^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建农林大学林学院, 南平 353001; 3. 厦门大学生命科学学院, 厦门 361005)

摘要:通过对福建三明格氏栲天然林及在其采伐迹地上营造的 33 年生格氏栲人工林和杉木人工林枯枝落叶层现存量与季节动态、C 库及养分库的研究表明, 格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林枯枝落叶层现存量分别为 $8.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $7.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $4.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 枯枝落叶层中叶占现存量的比例分别为 64.96%、61.38% 和 38.05%, 枝占比例分别为 31.59%、37.83% 和 42.62%。格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层现存量最大值均出现在春季, 而杉木人工林枯枝落叶层现存量最大值出现在夏季。格氏栲天然林枯枝落叶层 C 贮量为 $4.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别是格氏栲人工林和杉木人工林的 1.22 倍和 1.77 倍; 格氏栲天然林和人工林枯枝落叶层 C 库与杉木人工林的差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林枯枝落叶层养分贮量分别为 $138.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $113.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $72.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 除 Mg 外, 格氏栲天然林枯枝落叶层中各种养分贮量均最高。与人工林相比, 天然林枯枝落叶层现存量、C 和养分贮量均最大。枯枝落叶层对林地长期生产力维持具有重要作用。

关键词: 枯枝落叶层; 碳库; 养分库; 格氏栲; 杉木; 天然林; 人工林

Carbon and nutrient pools of forest floor in native forest and monoculture plantations in subtropical China

YANG Yu-Sheng^{1, 2}, GUO Jian-Fen³, LIN Peng³, HE Zong-Ming¹, XIE Jin-Sheng¹, CHEN Guang-Shui^{1, 2}

(1. College of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001, China; 3. College of Life Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (2): 359~367.

Abstract: In the last decades, large-scale native forests have been converted to fast-growing and high yield commercial forest plantations to meet the demands for timber, fuel material, and other forest products. Some silvicultural measures, such as planting pure stands, clear cutting and slash burning, are widely applied during this conversion. Yield decline and land deterioration in such disturbed ecosystem has become serious. In this context, the ecological comparisons between native forests and monoculture plantations are necessary in providing the implications for sustainable management. The forest floor is not only storage pools of carbon and nutrient but a central, functional component of forest ecosystems. However, few studies on forest floor have been conducted in natural and planted forests under same climatic and edaphic conditions in subtropical China.

The standing crop and seasonal dynamics of forest floor, its carbon and nutrient stocks were studied in a natural forest of *Castanopsis kawakamii* (NF) and adjacent monoculture plantations of *C. kawakamii* (CK) and Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*, CF) in Sanming, Fujian, China. Forest floor masses were $8.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the NF, $7.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the CK and $4.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the CF respectively; of the total amount, leaves constituted 64.96%, 61.38% and 38.05% respectively, twigs constituted 31.59%, 37.83% and 42.62% respectively. The standing crop of forest floor in the NF and CK showed

基金项目: 福建省重大基础研究资助项目(2000F004); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目

收稿日期: 2003-05-07; 修订日期: 2003-11-26

作者简介: 杨玉盛 (1964~), 男, 福建仙游人, 博士, 教授。主要从事亚热带常绿阔叶林 C、N 等元素循环的研究。

Foundation item: The Key Basic Research Project of Fujian Province (No. 2000F004) and the Teaching and Research Award Program for MOE P. R. C. (TRAPOYT)

Received date: 2003-05-07; **Accepted date:** 2003-11-26

Biography: Yang Yu-Sheng, Ph. D., Professor, principally engaged in study on C and N cycling in subtropical evergreen broad-leaved forests.
E-mail: ffcyys@public.np.tpt.fj.cn

similar seasonal trend with the maximal value in spring. While for the CF, the forest floor mass peak occurred in summer. Carbon storage in forest floor of the NF was $4.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, being 1.22 times and 1.77 times as much as that of the CK and the CF, respectively. Significant difference of stocks of forest floor C was found between NF (or CK) and CF ($P < 0.05$). Nutrient storage in forest floors ranged from $138.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the NF to $72.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the CF. Except for the highest Mg stock in the forest floor of the CK, the amounts of N, P, K and Ca storage were the highest in the forest floor of the NF. The results of this study demonstrate that the natural forest has a greater capability for maintaining site productivity than monoculture plantations due to higher forest floor mass coupled with greater carbon and nutrient pools. Therefore, conservation of the natural forest is recommended as a practical measure in forest management to realize sustainable development of forestry in mountainous areas of southern China.

Key words: forest floor; carbon pool; nutrient pool; *Castanopsis kawakamii*; *Cunninghamia lanceolata*; natural forest; monoculture plantation

文章编号:1000-0933(2004)02-0359-09 中图分类号:Q143,Q948,S718 文献标识码:A

森林枯枝落叶层是由覆盖地表面的未分解、半分解及已分解的死有机物组成的,是森林生态系统中重要组成部分之一,它是森林生态系统中腐屑食物链的起点,有机碳和养分的储库,并为生态系统的过程提供能量和物质,对维护林地土壤肥力和提高森林生产力具有重要的作用。

我国亚热带丘陵坡度陡,土壤抗蚀性能差。加上降雨量大且集中,天然林经皆伐、炼山和整地后改为人工林,群落结构简单与树种单一,且由于幼林郁闭前水土肥流失较为严重,人工林长期生产力维持日益引起人们关注^[1]。位于福建三明莘口的格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)保护区内格氏栲天然林是目前世界上独一无二的、树龄(约150a以上)和面积(700 hm²)较大,保存较为完整的中亚热带天然常绿阔叶林^[2]。20世纪60年代,部分的格氏栲天然林曾被皆伐后营造诸如杉木、福建柏、格氏栲、木英红豆树等人工纯林,这些人工林与现存格氏栲天然林毗邻、底条件(母岩、土层厚度、土壤层次)相似,从而为天然林和不同人工林的生态学比较提供良好的试验地条件。作者已对格氏栲天然林与人工林土壤肥力、根际土壤微生物及生化特性、水源涵养功能、凋落物、细根等进行过报道^[3~7],本文仅从枯枝落叶层碳库和养分库角度,比较格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林的生态学差异。

1 试验地概况

试验地位于福建省三明市莘口镇,试验地自然概况及格氏栲天然林(NF)、格氏栲人工林(CK)和杉木人工林(CF)林分特征、土壤性质请参见文献^[5,6]。

2 研究方法

2.1 枯枝落叶层现存量调查

2001年的1月(冬)、4月(春)、7月(夏)、10月(秋)在格氏栲天然林、格氏栲人工林与杉木人工林上、中、下坡分别设一条平行于等高线的样线,在每条样线上每隔5 m设1个25 cm×25 cm小样方,每条样线共设5个,每种林分每次调查共设15个小样方。调查每个样方内枯枝落叶层的厚度,分别未分解层(L层)中叶、枝和半分解层(F层)中叶、枝、及花、果和其它等组分称重,并分别取L层和F层中叶、枝、花、果和其它组分等样品带回室内。每种样品中小部分用于测定自然含水率(105℃),据此推算单位面积干重,其余样品烘干粉碎,过1 mm筛,贮存在玻璃瓶中待测定。

2.2 鲜叶及凋落叶的收集

凋落叶收集同参考文献^[5]。在每月底收集凋落物的同时,用高枝剪从东、西、南、北四个方向采摘与收集框临近的林木树冠中上部的鲜叶,并立即在40℃下杀青。将烘干凋落叶和鲜叶粉碎,过1 mm筛,贮存在玻璃瓶中待测定。

2.3 枯枝落叶层各组分碳和养分分析

采用硫酸—高氯酸消煮法,在上海嘉定纤检仪器厂生产的KDN-消化炉上制备待测液,用上海嘉定纤检仪器厂生产的KDN-C型定氮仪测定全N,钼锑抗比色法测定全P,火焰光度计法测定全K,AA-670原子吸收分光光度计测Ca和Mg^[8]。用重铬酸钾氧化-外加热法测定有机C浓度^[8]。

2.4 统计分析

统计分析用SPSS(11.0)软件进行。用配对t检验法检验不同林分间枯枝落叶层现存量、碳库及养分库的差异($P < 0.05$)。

3 结果

3.1 不同林分类型枯枝落叶层的现存量及动态

3.1.1 枯枝落叶层现存量 格氏栲天然林枯枝落叶层现存量平均值为 $8.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别是格氏栲和杉木人工林的1.19倍

和 1.87 倍, 格氏栲天然林和人工林与杉木人工林枯枝落叶层现存量差异均达显著水平 ($P<0.05$)。3 种林分枯枝落叶层中叶占现存量的比例分别为 64.96%、61.38% 和 38.05%, 枝占比例分别为 31.59%、37.83% 和 42.62% (表 1)。枯枝落叶层现存量/年凋落量比值 (用 k 表示) 杉木人工林最大 (0.879), 格氏栲人工林最小 (0.792)。

表 1 不同林分类型下枯枝落叶层现存量及年凋落量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)
Table 1 Reserves of forest floor and annual average litterfall in three forests

林分类型 Forest type	叶 Leaf			枝 Twig			花 Flower	果 Fruit	其它 Other	现存量 Total reserve	年均凋落量 Annual average litterfall	现存量/ 年均凋落 量(k)
	L	F	小计 Subtotal	L	F	小计 Subtotal						
NF ⁺	2.43±0.86a	3.41±1.02a	5.84±1.19a	0.52±0.21a	2.32±0.56ab	2.84±1.02a	0.02±0.01a	0.06±0.02a	0.23±0.03a	8.99±1.02a	11.01±0.53a	0.817
			(64.96)			(31.59)	(0.22)	(0.67)	(2.56)	(100.0%)		
CK	1.52±0.26a	3.12±0.49a	4.64±0.52a	—	2.86±0.46a	2.86±0.46a	—	0.02±0.01b	0.04±0.02b	7.56±0.62a	9.54±0.53b	0.792
			(61.38)			(37.83)		(0.26)	(0.53)	(100.0%)		
CF	0.45±0.05b	1.38±0.19b	1.83±0.22b	0.73±0.36a	1.32±0.39b	2.05±0.56a	0.04±0.02a	0.08±0.05a	0.81±0.13c	4.81±0.53b	5.47±0.43c	0.879
			(38.05)			(42.62)	(0.83)	(1.66)	(16.84)	(100.0%)		

+ 同一列中标有不同字母的数值表示存在显著性差异, $P<0.05$; Different letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$, $n=15$

3.1.2 枯枝落叶层现存量的季节变化 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层现存量季节变化模式相似, 最大值均出现在春季, 秋季降至全年最小值; 而杉木人工林枯枝落叶层现存量最大值出现在夏季, 最小值出现在秋季 (图 1)。

3.2 不同林分枯枝落叶层碳库

格氏栲天然林和人工林与杉木人工林枯枝落叶层中除了 L 层和 F 层枯叶及其它组分含 C 量差异显著外, 其它器官之间差异均未达显著水平 (表 2)。格氏栲天然林枯枝落叶层 C 贮量为 $4.02 t \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别比格氏栲人工林和杉木人工林的增加 22.19% 和 76.32%; 格氏栲天然林和人工林与杉木人工林枯枝落叶层 C 库差异达到显著水平 ($P<0.05$)。3 种林分枯叶和枯枝 C 贮量分别占枯枝落叶层的 96.21%、99.15% 和 82.94% (表 2)。

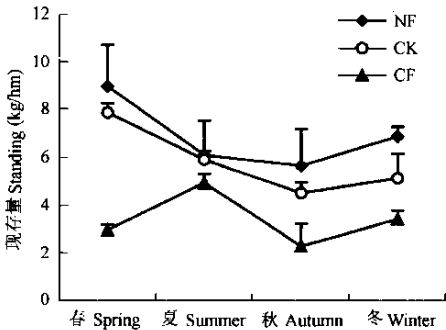


图 1 枯枝落叶层贮量季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of standing crop of forest floor

表 2 不同林分类型下枯枝落叶层有机 C 含量 (%) 和贮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 2 Concentrations and reserves of organic carbon of forest floor in three forests

层次 Layer	组分 Components	NF ⁺		CK		CF	
		含量 Concentration	贮量 Reserve	含量 Concentration	贮量 Reserve	含量 Concentration	贮量 Reserve
L	叶 Leaf	45.48±8.16a	1105.71±392.76a	45.76±1.76a	695.55±117.51a	49.35±2.17b	222.24±24.35b
	枝 Twig	47.65±7.71a	247.78±81.77a	—	—	50.52±6.45a	368.80±118.60a
F	叶 Leaf	42.33±8.47a	1444.13±432.28a	39.11±6.25a	1220.00±190.80a	47.47±1.90b	656.04±89.98b
	枝 Twig	46.25±5.91a	1073.00±288.64a	47.17±7.97a	1349.35±217.46a	48.42±0.97a	641.24±189.18b
	花 Flower	48.68±7.59a	5.84±2.61a	—	—	49.90±9.96a	20.13±13.22b
	果 Fruit	45.06±7.30a	27.04±6.99ac	47.49±6.75a	9.18±4.68b	44.48±1.16a	36.03±23.07c
	其它 Other	52.04±9.08a	119.69±36.05a	53.79±6.51a	18.93±7.73b	40.92±7.71b	332.13±52.07c
	总计 Total		4023.19±1138.62a		3293.01±405.04a		2276.61±587.36b

+ 同一行中标有不同字母的数值表示存在显著性差异, $P<0.05$; Different letters on the same row indicate significant differences at $P<0.05$, $n=15$

3.3 不同林分枯枝落叶层养分库

格氏栲天然林、格氏栲和杉木人工林枯枝落叶层中叶养分浓度均以 N 为最高, P 浓度最低。格氏栲天然林和人工林枯枝养分浓度顺序皆为: $N>Ca>K>Mg>P$, 而杉木人工林的为: $Ca>N>K>Mg>P$ 。格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层 N、P、K 平均浓度略高于杉木人工林, 而 Ca 和 Mg 平均浓度则以杉木人工林枯枝落叶层的高 (表 3)。未分解层枝的营养元素浓度基本上小于半分解层, 而叶的情况略有不同 (表 3)。

表 3 不同林分类型下枯枝落叶层养分浓度

Table 3 Nutrient concentrations of forest floor in three forests (g · kg ⁻¹)							
林分类型 Forest type	层次 Layer	组分 Components	N	P	K	Ca	Mg
NF	L	叶 Leaf	8.079±0.505	0.494±0.061	4.236±0.572	2.352±0.316	1.185±0.133
		枝 Twig	4.377±0.206	0.265±0.042	2.727±0.311	2.982±0.295	0.644±0.082
	F	叶 Leaf	8.578±0.691	0.456±0.035	4.217±0.452	2.975±0.332	0.949±0.100
		枝 Twig	5.883±0.605	0.332±0.033	2.746±0.351	3.749±0.375	0.610±0.060
		花 Flower	10.760±1.081	0.965±0.118	2.703±0.292	2.248±0.222	0.709±0.068
		果 Fruit	5.841±0.522	0.553±0.050	5.375±0.633	1.689±0.188	1.047±0.111
		其它 Other	4.766±0.413	0.401±0.054	2.302±0.241	2.424±0.283	0.522±0.047
CK	L	叶 Leaf	5.298±0.682	0.761±0.088	5.159±0.791	2.224±0.286	1.822±0.180
		枝 Twig	—	—	—	—	—
	F	叶 Leaf	7.983±0.466	0.418±0.042	3.120±0.363	2.529±0.288	1.586±0.168
		枝 Twig	7.172±0.611	0.325±0.031	2.416±0.255	3.147±0.437	1.028±0.128
		花 Flower	—	—	—	—	—
		果 Fruit	4.503±0.346	0.419±0.050	3.363±0.375	1.805±0.195	1.443±0.148
		其它 Other	6.282±0.722	0.676±0.082	4.336±0.541	3.823±0.489	1.079±0.107
CF	L	叶 Leaf	8.665±0.581	0.524±0.058	1.941±0.206	6.530±0.829	1.212±0.136
		枝 Twig	3.815±0.213	0.363±0.044	1.836±0.251	3.982±0.442	0.757±0.072
	F	叶 Leaf	7.831±0.705	0.378±0.032	1.921±0.223	6.436±0.875	1.209±0.132
		枝 Twig	4.044±0.362	0.595±0.055	2.742±0.274	4.220±0.493	1.026±0.126
		花 Flower	8.110±0.431	0.799±0.071	2.369±0.308	3.801±0.412	1.112±0.118
		果 Fruit	4.106±0.205	0.634±0.050	5.544±0.652	2.017±0.258	1.237±0.154
		其它 Other	6.061±0.364	0.595±0.054	2.722±0.245	5.339±0.816	1.362±0.144

格氏栲天然林和人工林枯枝落叶层总养分库与杉木人工林的差异均达到显著水平($P<0.05$)。从表 4 可见,除 Mg 外,格氏栲天然林枯枝落叶层中各种养分贮量均最高。地表养分周转率用凋落物养分年归还量与枯枝落叶层养分贮量的比值表示,其中格氏栲人工林地表 N 和 K 的周转率最大,P 周转率最大值(1.75)出现在格氏栲天然林,而杉木人工林地表 Ca 和 Mg 周转率最大(表 5)。

4 讨论

4.1 枯枝落叶层现存量及动态

森林枯枝落叶层现存量与其所在气候带、群落结构、树龄、树种生物学特性及干扰程度等有关^[9, 10]。本研究中格氏栲天然林和格氏栲人工林枯枝落叶层现存量(8.99 和 7.56 t · hm⁻²)均低于寒温带和暖温带森林(10.27~62.50 t · hm⁻²)^[11, 12],但高于热带雨林或季雨林(5.10 t · hm⁻²)^[13]。而杉木人工林枯枝落叶层现存量与同气候带针叶树人工林的相似^[14]。格氏栲天然林枯枝落叶层现存量最大(表 1),这与其林龄大(约 150a)、群落结构复杂、植物多样性高和凋落物年归还量大等有关^[2, 5, 6]。虽然阔叶树凋落物分解速度大于针叶树,但由于阔叶树凋落量远大于针叶树^[5, 10, 15],因而格氏栲人工林枯枝落叶层现存量仍比杉木人工林的高(表 1)。

枯枝落叶层现存量是森林凋落物归还与地表枯枝落叶分解动态平衡的结果^[10]。地表枯枝落叶现存量与当年凋落物总量之比(k)反映凋落物分解快慢, k 值越大,凋落物分解越慢^[16]。本研究中 3 种林分枯枝落叶层现存量均小于凋落物年产量,说明该试验地凋落物分解速率比较高;而格氏栲天然林与人工林中 k 值均小于杉木人工林的,这与阔叶树凋落物分解速度快于针叶树的结果一致^[5, 12],亦与本课题采用网袋法研究结果相一致^[5]。

受树种生物学特性和年内降水量、气温、风力等气候因子的综合影响,枯枝落叶层现存量随季节波动。格氏栲天然林和格氏栲人工林一年中春季枯枝落叶层现存量最大,这与两种林分在

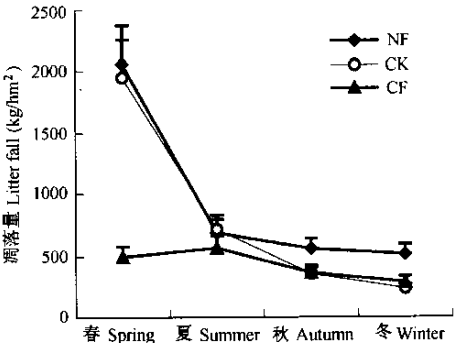


图 2 总凋落量季节动态

Fig. 2 Seasonal dynamics of total litterfall

该季节凋落量最大相一致(图2)。随着气温的升高,枯枝落叶分解加快,枯枝落叶层现存量逐渐减少,在秋季时降至一年中最低值。随后气候变得干冷,分解缓慢,因而冬季枯枝落叶层现存量又有所增加(图1)。而杉木人工林的凋落量在夏季出现峰值(图2),使得此时枯枝落叶层现存量达最高值(图1)。

表4 不同林分类型下枯枝落叶层养分元素贮量
Table 4 Nutrient reserves of forest floor in three forests(kg·hm⁻²)

林分类型 Forest type	层次 Layer	组分 Components	N	P	K	Ca	Mg	小计 Subtotal
NF ⁺	L	叶 Leaf	19.64±6.98	1.20±0.43	10.30±3.66	5.72±2.03	2.88±0.29	39.74±4.79
		枝 Twig	2.28±0.81	0.14±0.05	1.42±0.47	1.55±0.42	0.33±0.04	5.72±0.59
	F	叶 Leaf	29.26±8.76	1.56±0.46	14.39±4.31	10.15±3.04	3.24±0.38	58.6±6.59
		枝 Twig	13.65±4.78	0.77±0.18	6.37±2.38	8.70±2.25	1.42±0.18	30.91±3.72
		花 Flower	0.13±0.06	0.01±0.00	0.03±0.01	0.01±0.00	0.01±0.00	0.19±0.02
		果 Fruit	0.35±0.10	0.03±0.01	0.32±0.09	0.10±0.04	0.06±0.01	0.86±0.11
		其它 Other	1.10±0.39	0.09±0.03	0.53±0.14	0.56±0.15	0.12±0.02	2.40±0.32
		总计 Total	66.41±15.40a	3.80±1.01a	33.36±6.98a	26.79±7.24a	8.06±1.09a	138.42±14.66a
CK	L	叶 Leaf	8.05±1.36	1.16±0.20	7.84±1.48	3.88±0.57	2.77±0.31	23.70±2.56
		枝 Twig	—	—	—	—	—	—
	F	叶 Leaf	24.90±3.89	1.30±0.20	9.73±1.52	7.89±1.23	4.95±0.54	48.77±6.23
		枝 Twig	20.52±3.31	0.93±0.15	6.91±1.11	9.00±1.45	2.94±0.33	40.30±4.63
		花 Flower	—	—	—	—	—	—
		果 Fruit	0.09±0.05	0.01±0.00	0.07±0.04	0.03±0.01	0.03±0.01	0.23±0.03
		其它 Other	0.22±0.09	0.02±0.01	0.15±0.06	0.13±0.05	0.04±0.01	0.56±0.08
		总计 Total	53.78±6.62a	3.42±0.33a	24.70±2.68a	20.93±2.34a	10.73±1.63a	113.56±13.60a
CF	L	叶 Leaf	3.90±0.43	0.24±0.03	0.87±0.10	2.94±0.32	0.55±0.06	8.50±0.89
		枝 Twig	2.78±0.88	0.26±0.13	1.34±0.46	2.91±0.33	0.55±0.12	7.84±0.91
	F	叶 Leaf	10.82±1.48	0.52±0.06	2.65±0.36	8.89±1.22	1.67±0.23	24.55±2.96
		枝 Twig	5.36±1.58	0.79±0.23	3.63±1.07	5.59±1.65	1.35±0.21	16.72±2.26
		花 Flower	0.33±0.22	0.03±0.02	0.10±0.06	0.15±0.10	0.04±0.01	0.65±0.08
		果 Fruit	0.33±0.21	0.05±0.03	0.45±0.29	0.16±0.10	0.10±0.02	1.09±0.14
		其它 Other	4.92±0.77	0.48±0.08	2.21±0.35	4.33±0.68	1.10±0.19	13.04±1.70
		总计 Total	28.44±3.19b	2.37±0.21b	11.25±1.13b	24.97±2.38a	5.36±0.78b	72.39±8.75b

+同一列中标有不同字母的数值表示存在显著性差异, $P<0.05$ 。Different letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$

格氏栲天然林林地长期一直覆盖着一层厚厚的枯枝落叶,与林冠层一道起到良好截持雨水,消解雨滴动能,避免雨滴直接击打表土,增加林地粗糙度,降低径流流速,增加渗透,改善土壤结构等功能,这是天然林土壤具有良好的结构和持水供水性能的重要原因^[1]。而天然林皆伐火烧后营造人工林,在幼林郁闭前3~5a内(特别是炼山后1~2a),土壤由于彻底失去植被和枯枝落叶层(或采伐剩余物层)覆盖,加上高温灼烧,表层土壤结构遭一定程度破坏,随后雨水直接击打表层土壤导致土壤结构变差,土壤抗蚀性下降,发生严重水土流失^[1,17]。采伐迹地炼山造林后第一、二年的水、土流失量为5179 m³·hm⁻²和35 t·hm⁻²,分别是不炼山林地的8倍和54倍^[1]。格氏栲人工林表层土壤>0.25mm水稳性团聚体含量比格氏栲天然林少21.58%,而土壤结构体破坏率却是格氏栲天然林的1.96倍^[1]。山坡上70年生老龄杉木林土壤容重比山脊上保留杂木林的大0.314 g·cm⁻³,而表层土壤>0.25mm水稳性团聚体含量却减少4.73%^[17]。可见皆伐火烧等彻底清除林冠层和枯枝落叶层,时间虽短(3~5a),但对土壤结构影响是相当长远的。

4.2 枯枝落叶层碳库

枯枝落叶层是处于地上生物库与地下土壤库之间的一个十分活跃的碳“库”,一方面通过矿质化释放出CO₂,另一方面通过腐殖质化进入表层矿质土壤。本研究中格氏栲天然林(4.02 t·hm⁻²)和人工林(3.29 t·hm⁻²)枯枝落叶层碳贮量均高于尖峰岭热带山地雨林枯枝落叶层碳(2.98 t·hm⁻²)的贮量^[18],亦高于我国针叶阔叶林平均水平(2.58 t·hm⁻²)^[19]。但杉木人工林枯枝落叶层碳贮量(2.28 t·hm⁻²)远低于红松云冷杉林(20 t·hm⁻²)^[19]和挪威云杉林(44.6 t·hm⁻²)^[15]。3种林分枯枝落叶层中叶和枝碳贮量占枯枝落叶层碳总贮量的比例均大于80%,表明叶和枝是森林枯枝落叶层向土壤归还有机碳的主体。

天然林经皆伐、炼山后,地表采伐剩余物和枯枝落叶层瞬间化为灰烬,大量CO₂直接输入大气。Galdwell发现白冷杉林火

烧后,枯枝落叶层碳损失 $6.1\sim 17.98\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2[20]}$;哥伦比亚西部海岸铁杉林规定火烧造成 $48\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的碳挥发^[21]。火直接灼烧导致表层土壤有机碳挥发损失,同时裸露幼林地伴随水土流失,土壤有机碳大量流失(炼山后第 1 年流失有机碳达 $283.87\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[1];加上较长时期(3~5a)地表裸露,土壤有机碳分解加速。西黄松/扭叶松林火烧 1 年后土壤(0~60cm)有机 C 量比对照林地土壤低 $25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中面蚀和细沟侵蚀造成的土壤有机碳流失量达 $280\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2[22]}$ 。“刀耕火种”地每年排放的 CO₂ 量为 $14.48\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,比有林地多 37.9%,相当于 20 cm 土壤有机质(或有机碳)年递减 0.8%^[23]。格氏栲人工林和杉木人工林表层土壤有机碳贮量分别比格氏栲天然林的低 23.35%和 17.25%^[6],亦说明强度干扰后,土壤有机碳恢复需要相当长时间。

4.3 枯枝落叶层养分库

森林枯枝落叶层作为森林土壤生态系统物质循环过程中的一个“养分库”,储存着各种营养元素,经土壤原生动物及微生物的分解矿化后将营养元素以速效性养分归还土壤供植物吸收利用^[9]。本研究 3 种林分枯枝落叶层大部分养分浓度比卧龙自然保护区的常绿阔叶林低^[9],亦比鼎湖山季风常绿阔叶林的低^[24]。从枯枝落叶层中不同分解层次养分浓度来看,枯叶养分的周转比枯枝快,除格氏栲天然林和人工林 N、Ca 两元素在 F 层有所富集外,大部分养分随枯叶的分解而减少(表 3),这与红云杉(*Picea ruben*)林、黄松(*Pinus ponderosa laus*)林等林分死地被物层的枯枝落叶分解过程中养分浓度变化规律相似^[25],与华北针叶林枯枝落叶层研究结果不同^[26]。从表 6 可见,鲜叶中 N、P、K 浓度明显高于凋落叶中的浓度,而 Ca 则呈相反的规律。这表明在叶凋落之前,N、P、K 发生了内转移,其中 K 的内转移量最大,而 Ca 则相对富集。与新近凋落叶相比,格氏栲天然林和杉木人工林 L 层枯叶 N 浓度升高(表 6),这与柳桉木(*Shorea robusta*)、非洲圆柏(*Juniperus procera*)等落叶分解结果相似^[27]。而格氏栲人工林 L 层枯叶 N 浓度下降,与樟子松(*Mongolian scots pine*)落叶研究结果相似^[28]。3 种林分 L 层枯叶 P 却相对积累(表 6)。本研究中凋落叶 K 浓度从 L 层到 F 层不断下降,与国内外大量研究结果相似^[5, 13, 15]。

Vitousek 提出用地表养分周转率测算植物群落养分的循环速率及利用效率^[29]。本研究 3 种林分地表各养分周转率均大于 1(表 5),表明该试验地养分循环强度均较高,这与凋落物分解速率相类似(表 1)。格氏栲人工林地表 N 和 K 周转率大于格氏栲天然林和杉木人工林,这与格氏栲人工林处于旺盛生长相吻合。格氏栲天然林地表 P 周转率高于格氏栲人工林和杉木人工林,这与天然林群落中物种多样性高,土壤持水和供水性能优越等有关^[1, 2, 7]。林分地表 P 周转率高,意味着 P 的利用效率也较高,这可能亦是作为地带性植被的常绿阔叶林长期以来对缺 P 南方红壤的生态适应方式之一,有利于群落的稳定性和生产力提高。

表 5 不同林分类型地表养分周转率
Table 5 Nutrient turnover rate of forest floor in three forests

林分类型 Forest type	项目 Item	N	P	K	Ca	Mg
NF	凋落物养分年归还量 Annual nutrient return	78.44±15.43	6.65±1.38	50.89±9.26	38.19±5.19	10.60±1.68
	枯枝落叶层养分贮量 Nutrient reserves of forest floor	66.41±15.40	3.80±1.01	33.36±6.98	26.79±7.24	8.06±1.09
	地表养分周转率 Nutrient turnover rate	1.18	1.75	1.53	1.43	1.32
CK	凋落物养分年归还量 Annual nutrient return	70.07±11.48	5.47±0.82	48.71±7.55	31.54±4.75	14.17±2.37
	枯枝落叶层养分贮量 Nutrient reserves of forest floor	53.78±6.62	3.42±0.33	24.70±2.68	20.93±2.34	10.73±1.63
	地表养分周转率 Nutrient turnover rate	1.30	1.60	1.97	1.51	1.32
CF	凋落物养分年归还量 Annual nutrient return	36.60±5.59	2.43±0.33	14.56±2.21	50.19±6.26	9.06±1.13
	枯枝落叶层养分贮量 Nutrient reserves of forest floor	28.44±3.19	2.37±0.21	11.25±1.13	24.97±2.38	5.36±0.78
	地表养分周转率 Nutrient turnover rate	1.28	1.03	1.29	2.01	1.69

与人工林相比,格氏栲天然林枯枝落叶层现存量和养分贮量大,加上凋落物分解速率较快^[5],其表层 0~20cm 土壤全 N 和全 P 及速效性 N、P、K 养分浓度均远高于人工林的^[6],同时,土壤微生物种类和区系数量大,土壤酶活性高,具有较高的自我培

肥地力的能力^[3,4]。而天然林经皆伐炼山后营造格氏栲人工林和杉木人工林, 33a 后土壤肥力远不及天然林, 这与传统纯林经营措施对林地过度扰动、林分郁闭前幼林地发生较为严重水土肥流失有关^[1]。皆伐使得大量养分以木材形式移出森林生态系统, 炼山使采伐剩余物和枯枝落叶层迅速矿化, 大量营养元素以气态、飞灰(细颗粒)等各种形式挥发而迁移出林地。据报道, 常绿阔叶林、马尾松林、杉木林采伐迹地火烧后 N 损失量分别达 644.8 kg·hm⁻²、557.72 kg·hm⁻²和 302.29 kg·hm⁻²^[1]。针阔叶混交林采伐迹地炼山后, 枯枝落叶层 N 挥发损失量为 193~480 kg·hm⁻²^[30]。短叶果松林采伐剩余物火烧造成 27%~33% 的全 P 挥发^[31]。强度火烧除了采伐剩余物遭焚烧外, 表层土壤易挥发的营养元素(如 N 等)亦有一定程度损失。马尾松林采伐迹地炼山后表层土壤(0~10 cm)全 N 浓度下降 9.65%^[1]。Rupert 林区火烧 1a 后土壤全 N 量下降 371 kg·hm⁻²^[32]。同时, 雨滴的击溅、径流浸提和机械搬运使得火烧后林地表层土壤中增加的大量速效养分输出生态系统^[1]。采伐迹地炼山后第 1 年林地全 N、全 P 和全 K 流失量分别可达 10、7 和 247 kg·hm⁻², 分别是不炼山林地的 15 倍、22 倍、17 倍和 11 倍^[1]。常绿阔叶林皆伐火烧 1a 后表土(0~10cm)侵蚀伴随全 N、全 P 和全 K 流失量分别为 59、11 和 396 kg·hm⁻²^[33]。针阔叶混交林采伐迹地炼山后林地 N 流失量为 20~400 kg·hm⁻²^[34]。即使幼林郁闭后, 随林龄增加, 养分流失量逐渐下降^[1], 凋落物量和枯枝落叶层贮量亦由少到多不断增加(作者曾在 1989 年对 23 年生格氏栲人工林枯枝落叶层进行调查, 年平均贮量仅为 7.04 t·hm⁻², 而 10 余年后调查时增加 6.9%), 同时大量养分通过根系吸收积累在树干树枝等部分, 养分存留量多, 归还量少。而天然林枯枝落叶层贮量则一直是相对稳定, 林分养分存留量少, 而归还量大。说明天然林和人工林有机 C 和养分周转速率和通量差异相当大, 这可能是天然林土壤肥力高又一原因。

表 6 不同林分鲜叶、新近凋落叶与不同分解程度枯叶养分浓度 (g·kg⁻¹)

Table 6 Comparison of nutrient concentrations of fresh leaf, freshly fallen leaf litter and leaf litter with different decomposition degree				
养分 Nutrient	项目 Item	林分类型 Forest type		
		NF	CK	CF
N	鲜叶 Fresh leaf	10.708±0.669	11.100±0.675	12.359±0.689
	新近凋落叶 Fresh fallen leaf litter	7.022±0.419	9.532±0.651	6.671±0.400
	L 层枯叶 Non-decomposed leaf litter	8.079±0.505	5.298±0.682	8.665±0.581
	F 层枯叶 Decomposing leaf litter	8.578±0.691	7.983±0.466	7.831±0.705
P	鲜叶 Fresh leaf	1.158±0.126	0.720±0.076	1.321±0.144
	新近凋落叶 Fresh fallen leaf litter	0.291±0.031	0.394±0.043	0.386±0.048
	L 层枯叶 Non-decomposed leaf litter	0.494±0.061	0.761±0.088	0.524±0.058
	F 层枯叶 Decomposing leaf litter	0.456±0.035	0.418±0.042	0.378±0.032
K	鲜叶 Fresh leaf	10.309±1.392	9.467±1.143	11.756±1.361
	新近凋落叶 Fresh fallen leaf litter	7.126±0.819	6.338±0.765	3.089±0.385
	L 层枯叶 Non-decomposed leaf litter	4.236±0.572	5.159±0.791	1.941±0.206
	F 层枯叶 Decomposing leaf litter	4.217±0.452	3.120±0.363	1.921±0.223
Ca	鲜叶 Fresh leaf	1.724±0.231	1.467±0.183	4.251±0.501
	新近凋落叶 Fresh fallen leaf litter	4.361±0.525	5.108±0.668	15.150±1.755
	L 层枯叶 Non-decomposed leaf litter	2.352±0.316	2.224±0.286	6.530±0.829
	F 层枯叶 Decomposing leaf litter	2.975±0.332	2.529±0.288	6.436±0.875
Mg	鲜叶 Fresh leaf	1.364±0.153	1.996±0.241	3.028±0.365
	新近凋落叶 Fresh fallen leaf litter	1.049±0.121	1.491±0.186	1.300±0.146
	L 层枯叶 Non-decomposed leaf litter	1.185±0.133	1.822±0.180	1.212±0.136
	F 层枯叶 Decomposing leaf litter	0.949±0.100	1.586±0.168	1.209±0.132

从格氏栲天然林皆伐迹地上经全面劈草炼山、穴状整地营造的格氏栲人工林和杉木人工林, 虽然格氏栲和杉木生长较快, 但土壤肥力却远不及天然林^[6]。即使格氏栲人工林年凋落物数量显著大于杉木人工林^[5], 且其枯枝落叶现存量亦显著高于杉木人工林(表 1), 但两林分土壤肥力有关指标十分接近^[6], 说明在亚热带具有潜在脆弱山地生态系统, 其天然林经皆伐、全面炼山后, 不管营造的是阔叶林还是针叶林, 亦不管其林分生产力是高是低, 其土壤肥力下降是不可避免的。鉴于本区林冠层和枯枝落叶层对养分保持和土壤肥力维护有重要作用, 应对现有天然林采取保护措施以维持其林冠层和枯枝落叶层长期稳定地覆盖林地; 在确需局部皆伐天然林地段应采用不炼山以保留采伐剩余物和枯枝落叶层, 并采用人工促进天然更新的办法迅速恢复植被; 而经营杉木林数据采用不炼山、穴状整地办法尽量减少对林地采伐剩余物和枯枝落叶层的扰动, 以维护林地长期土壤生产力。

References:

- [1] Yang Y S. *Sustainable management of Chinese fir plantations*. Beijing: China Forestry Press, 1998.
- [2] Lin P, Qiu X Z. Study on the *Castanopsis kawakamii* forest in the Wakeng area of Sanming city, Fujian Province. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1986, **10**(4): 241~252.
- [3] Yang Y S, Li Z W, Liu A Q. Studies on soil fertility for natural forest of *Castanopsis kawakamii* replaced by broad-leaved plantation. *Journal of Northeast Forestry University*, 1993, **21**(5): 14~21.
- [4] Yang Y S, He Z M, Zhou S Q. A study on the soil microbes and biochemistry of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis kawakamii*. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(2): 198~202.
- [5] Yang Y S, Lin P, Guo J F, *et al.* Litter Production, Nutrient Return and Leaf-Litter Decomposition in Natural and Monoculture Plantation Forests of *Castanopsis kawakamii* in Subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(7): 1278~1289.
- [6] Yang Y S, Chen G S, Lin P, *et al.* Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(9): 1719~1730.
- [7] Yang Y S, Zhou S Q, Liu A Q. A study on the water conservation function of the natural forest of GE's evergreen chinquapin. *Journal of Natural Resources*, 1992, **7**(3): 217~233.
- [8] Department of National Forestry. *Forest soil analysis methods*. Beijing: Chinese Criteria Press, 2000.
- [9] Zhang W R, Xu B T, Yang C D, *et al.* Studies on structure and function of forest floors of mountain forest soils. *Acta Pedologica Sinica*, 1990, **27**(2): 121~131.
- [10] Xu X N, Hirata E. Forest floor mass and litterfall in *Pinus luchuensis* plantations with and without broad-leaved trees. *For. Ecol. Manage.*, 2002, **157**: 165~173.
- [11] Zhan H Z, Liu J C, Ren S W. Ecological role of litter layer in the hard wood Korean pine forest. *Bulletin of Botanical Research*, 1989, **9**(1): 95~102.
- [12] Kavvadias V A, Alifragis D, Tsiontsis A, Brofas G, Stamatielos G. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *For. Ecol. Manage.*, 2001, **144**: 113~127.
- [13] Vitousek P M. Litterfall, nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology*, 1984, **65**(1): 285~298.
- [14] Liu W Y, Jing G F, He A J. Nutrient dynamics in the litter-fall and forest floor of evergreen broad-leaved forest and *Pinus yunnanensis* forest in central Yunnan. *Acta Botanica Sinica*, 1990, **32**(8): 637~646.
- [15] Pedersen L B, Hansen J B. A comparison of litterfall and element fluxes in even aged Norway spruce, sitka spruce and beech stands in Denmark. *For. Ecol. Manage.*, 1999, **114**: 55~70.
- [16] Nie D P. Biological cycling of the nutrient elements in forest ecosystems. *Forest Research*, 1991, **4**(4): 435~439.
- [17] Yang Y S, Yu X T, Liu A Q, *et al.* Studies on soil fertility for broadleaved forest replaced by Chinese fir forest in Xihou, Nanping. *Acta Phytoecologia Sinica*, 1994, **18**(3): 236~242.
- [18] Wu Z M, Li Y D, Zeng Q B, *et al.* Carbon pool of tropical mountain rain forests in Jianfengling and effect of clear-cutting on it. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, **9**(4): 341~344.
- [19] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytoecologia Sinica*, 2000, **24**(5): 518~522.
- [20] Galdwell T G, Johnson D W, Miller W W, *et al.* Forest floor carbon and nitrogen losses due to prescription fire. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, **66**: 262~267.
- [21] Belillas C M, Feller M C. Relationships between fire severity and atmospheric and leaching nutrient losses in British Colombia's coastal western hemlock zone forests. *Int. J. Wildland Fire*, 1998, **8**: 87~101.
- [22] Baird M, Zabowski D, Everett R L. Wildfire effects on carbon and nitrogen in inland coniferous forests. *Plant and Soil*, 1999, **209**: 233~243.
- [23] Wu Z M, Zeng Q B, Li Y D, *et al.* A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling, Hainan Island, China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1997, **21**(5): 416~423.
- [24] Zhang D Q, Yu Q F, Kong G H, *et al.* Chemical properties of forest floor litter in Dinghushan monsoon evergreen broad-leaved forest. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(1): 96~100.
- [25] Lockaby B G. and Taylorboyd J E. Nutrient dynamics in the litter fall and forest floor of an 18-year-old loblolly pine plantation. *Can. J. For. Res.*, 1996, **26**: 1109~1112.
- [26] Jin X Q. Chemical properties of litter layer under major coniferous forests in northern China. *Chinese Journal of Ecology*, 1991, **10**(6): 441~446.

24~29.

[27] Singh K P, Singh P K, Tripathi S K. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India. *Biol. Fertil. Soils*, 1999, **29**: 371~378.

[28] Shen H L, Ding B Y, Shen G F. Decomposing dynamics of several coniferous and broadleaved litters in Mongolian Scots pine plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, **32** (5): 393~402.

[29] Vitousek P M, Sanford R L Jr. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 1986, **17**: 137~167.

[30] Vose J M, Swank W T. Site preparation burning to improve southern Appalachian pine-hardwood stands: aboveground biomass, forest floor mass, and nitrogen and carbon pools. *Can. J. For. Res.*, 1993, **23**: 2255~2262.

[31] Mackensen J, Holscher D, Klinge R, *et al.* Nutrient transfer to the atmosphere by burning of debris in eastern Amazonia. *For. Ecol. Manage.*, 1996, **86**: 121~128.

[32] Driscoll K G, Arocena J M, Massicotte H B. Post-fire soil nitrogen content and vegetation composition in Sub-Boreal spruce forests of British Columbia's central interior, Canada. *For. Ecol. Manage.*, 1999, **121**: 227~237.

[33] Yang Y S, Guo J F, Chen G S. Effects of slash burning on nutrient removal and soil fertility in Chinese fir and evergreen broadleaved forests of mid-subtropical China. *Pedosphere*, 2003, **13**(1): 87~96.

[34] Vose J M, Swank W T. Site preparation burning to improve southern Appalachian pine-hardwood stands: aboveground biomass, forest floor mass, and nitrogen and carbon pools. *Can. J. For. Res.*, 1993, **23** (10): 2255~2262.

参考文献:

[1] 杨玉盛. 杉木林可持续经营的研究. 北京: 中国林业出版社, 1998.

[2] 林鹏, 丘喜昭. 三明瓦坑格氏栲林的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1986, **10**(4): 241~252.

[3] 杨玉盛, 李振问, 刘爱琴. 人工阔叶林取代格氏栲天然林后土壤肥力变化的研究. 东北林业大学学报, 1993, **21**(5): 14~21.

[4] 杨玉盛, 何宗明, 邹双全. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性差异的研究. 生态学报, 1998, **18**(2): 198~202.

[5] 杨玉盛, 林鹏, 郭剑芬, 等. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解(英文). 生态学报, 2003, **23**(7): 1278~1289.

[6] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力. 生态学报, 2003, **23**(9): 1278~1289.

[7] 杨玉盛, 邹双全, 刘爱琴. 格氏栲天然林水源涵养功能的研究. 自然资源学报, 1992, **7**(3): 217~233.

[8] 中华人民共和国林业行业标准. 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 2000

[9] 张万儒, 许本彤, 杨承栋, 等. 山地森林土壤枯枝落叶层结构和功能的研究. 土壤学报, 1990, **27**(2): 121~131.

[11] 詹鸿振, 刘吉春, 任淑文. 阔叶林红松内枯枝落叶层的生态作用. 植物研究通报, 1989, **9**(1): 95~102.

[14] 刘文耀, 荆桂芬, 和爱军. 滇中常绿阔叶林及云南松林凋落物和死地被物中的养分动态. 植物学报, 1990, **32**(8): 637~646.

[16] 聂道平. 森林生态系统营养元素生物循环. 林业科学研究, 1991, **4**(4): 435~439.

[17] 杨玉盛, 俞新妥, 刘爱琴, 等. 南平溪后杉木林取代杂木林后土壤肥力变化的研究. 植物生态学报, 1994, **18**(3): 236~242.

[18] 吴仲民, 李意德, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林 C 素库及皆伐影响的初步研究. 应用生态学报, 1998, **9**(4): 341~344.

[19] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, **24**(5): 518~522.

[23] 吴仲民, 曾庆波, 李意德, 等. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究. 植物生态学报, 1997, **21**(5): 416~423.

[24] 张德强, 余清发, 孔国辉, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林凋落物层化学性质的研究. 生态学报, 1998, **18**(1): 96~100.

[26] 金小麒. 华北地区针叶林下凋落物层化学性质的研究. 生态学杂志, 1991, **10** (6): 24~29.

[28] 沈海龙, 丁宝永, 沈国防等. 樟子松人工林下针阔叶凋落物分解动态. 林业科学, 1996, **32** (5): 393~402.

[33] 杨玉盛, 郭剑芬, 陈光水, 等. 炼山对杉木林和常绿阔叶林养分迁移及土壤肥力的影响(英文). *Pedosphere*, 2003, **13**(1): 87~96.