

杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量

黄宇^{1,2}, 冯宗炜^{3*}, 汪思龙⁴, 冯兆忠³, 张红星³, 徐永荣³

(1. 湖南农业大学生态研究所, 长沙 410128; 2. 湖南省科技厅, 长沙 410001;

3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4. 中国科学院会同森林生态实验站, 湖南会同 418307)

摘要: 研究比较第 2 代连栽杉木纯林、杉木与火力楠混交林以及火力楠纯林 3 种人工林生态系统的 C、N 贮量。结果表明, 杉木与火力楠混交林生态系统 C 贮量要高于杉木纯林和火力楠纯林, 而生态系统 N 贮量是火力楠纯林和杉木与火力楠混交林高于杉木纯林; 生态系统 C 和 N 贮量的空间分布基本一致, 土壤层占主要部分, 其次为乔木层, 再次是根系, 林下植被层和凋落层所占比例最小; 相关分析表明, 土壤 C、N 贮量分别和林下植被生物量以及森林凋落物现存量之间都具有良好的线性关系, 说明林下植被和森林凋落物对土壤 C、N 贮量有着深刻的影响。

关键词: 杉木人工林; 混交林; 碳贮量; 氮贮量

文章编号: 1000-0933(2005)12-3146-09 中图分类号: Q 948.1 文献标识码: A

C and N stocks under three plantation forest ecosystems of Chinese fir, *Michelia macclurei* and their mixture

HUANG Yu^{1,2}, FENG Zong-Wei^{3*}, WANG Si-Long⁴, FENG Zhao-Zhong³, ZHANG Hong-Xing³, XU Yong-Rong³

(1. *Research Institute of Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China*; 2. *Science and Technology Department of Hunan Province, Changsha 410001, China*; 3. *Department of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*; 4. *Huitong Experimental Station of Forest Ecology, Chinese Academy of Sciences, Hunan Province, 418307, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3146~ 3154

Abstract: Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), a type of subtropical fast-growing conifer tree, widely distributed in South China, and its plantation area in China is more than $7 \times 10^6 \text{ hm}^2$, accounting for 24% of total area of plantation forest in China. In recent decades, the system of successive plantation of Chinese fir is widely used in the southern China for an anticipated high economic return. However, recent studies have documented that the practice of this system led to dramatic decreases in soil fertility and forest environment as well as in productivity.

Some forest ecologists and managers recognize the ecological role performed by broadleaf trees growing in mixtures with conifers, and a great deal of studies on mixtures effects have been conducted, particularly on mixture species of temperate and boreal forest, but these research results were not completely consistent. Maybe the mixtures effects depend in large part on specific site conditions, the interactions among species in mixtures and biological characteristics of species, etc. Although some researchers also studied the effects of mixtures of Chinese fir and broadleaf tree species on soil fertility, forest environment and tree growth status, little information is available about the effects of Chinese fir and its mixtures with broadleaves on carbon and nitrogen stocks.

The experimental site was situated at Huitong Experimental Station of Forest Ecology, Chinese Academy of Sciences, Hunan Province (N 26°40' ~ 27°09' latitude and E 109°26' ~ 110°08' longitude). It locates at the transition zone from the Yunnan-Guizhou Plateau to the low mountains and hills of southern bank of Yangtze River at an altitude of 300~ 1100 m above

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX3-SW-418, KZCX2-406)

收稿日期: 2005-05-19; 修订日期: 2005-10-09

作者简介: 黄宇(1974~), 男, 湖南益阳人, 博士, 主要从事区域研究与开发环境生态学研究. E-mail: huangcosmos@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence

Foundation item: The Knowledge Innovation Project of CAS (No. KZCX3-SW-418 & No. KZCX2-406)

Received date: 2005-05-19; Accepted date: 2005-10-09

Biography: HUANG Yu, Ph. D., mainly engaged in regional research and exploitation, environment ecology. E-mail: huangcosmos@163.com

mean sea level and at the same time, it is also a member of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN), sponsored by the Chinese Academy of Sciences (CAS). This region has a humid subtropical monsoon climate with a mean annual precipitation of 1200~1400 mm, most of the rain falling between April and August, and a mean temperature of 16.5 °C with a mean minimum of 4.9 °C in January and a mean maximum of 26.6 °C in July. The soil of the experimental field is red-yellow soil.

After a clear-cutting of the first generation Chinese-fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation forest in 1982, three different plantation forest ecosystems, viz. mixture of *Michelia macclurei* and Chinese-fir (MCM), pure *Michelia macclurei* stand (PMS) and pure Chinese-fir stand (PCS), were established in spring of 1983. Comparative study on C and N stocks under these three plantation forest ecosystems was conducted in 2004. The results showed that, the carbon stocks were greater under the mixtures than under the pure Chinese fir forest and the pure broad-leaved forest, and the broadleaves and the mixtures showed higher values in the nitrogen stocks compared with the pure Chinese fir forest. The spatial distribution of carbon and nitrogen stocks was basically consistent, the value being greater in soil layer, followed by tree layer, roots, understory and then litter layer. The carbon and nitrogen stocks in soil layer were, respectively both highly correlated with the biomass in understory and litter layer, indicating understory and forest litterfall exerted a profound effect on soil carbon and nitrogen stocks under plantation ecosystems. However, correlations between soil carbon, nitrogen stocks and below ground biomass of stand have not been observed in this study.

Key words: Chinese fir plantation; mixtures of Chinese fir and broad-leaved forest; carbon stock; nitrogen stock

碳循环是森林生态系统物质和能量循环的主要过程, 森林植物一方面吸收空气中的 CO₂, 通过光合作用将 CO₂ 转化为有机化合物, 固定在森林植物体内; 另一方面植物在维持自身的生命活动中的呼吸, 动物、微生物的呼吸和枯枝落叶的分解又向大气中释放 CO₂, 这就是森林的碳汇和碳源(森林生态系统碳平衡包括输入和输出两个过程, 两者之差即为生态系统的净生产量 NEP, 若 NEP 为正, 表明生态系统是 CO₂ 汇, 反之则为 CO₂ 源)。这也决定了森林生态系统碳循环研究的复杂性。

国内外对森林生态系统碳贮量和贮存潜力进行了大量的研究, 但大都局限于天然林^[1,2], 对人工林的研究不多。关于杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林的研究更少, 到目前为止只有陈楚莹等^[1]、方晰等^[2,3]和何宗明等^[4]作过一些报道, 而对连栽杉木纯林、杉-阔混交林以及阔叶纯林等不同人工林生态系统的比较研究未曾报道。本研究对杉木纯林、杉-阔混交林、阔叶纯林等 3 种不同人工林生态系统碳贮量作初步研究与探讨, 旨在为杉木林可持续生产力提供科学依据, 同时也为我国森林生态系统 C 平衡的估算和动态模拟提供基础数据, 进而也可政府部门制定森林发展规划和环境保护政策提供理论支撑。

氮是生态系统中含量最丰富的元素之一, 也是大多数陆地生态系统初级生产过程中受限制的元素之一^[4~8]。同时, 氮与碳、磷、硫等元素的循环是相互耦合的, 氮素也能形成多种温室气体^[9,10]。因此, 有关氮素的研究一直倍受关注。N 作为一种大量营养元素, 在森林生态系统物质循环中同样扮演着非常重要的角色, 国内外对森林生态系统氮贮量研究甚少, 关于杉木人工林系统氮贮量研究到目前为止未见报道。研究杉木纯林、杉-阔混交林等不同人工林生态系统的氮贮量, 旨在了解和预测系统的物质生产潜力, 通过对比杉木纯林和混交林的 N 贮量, 为杉木林土地可持续生产力提供理论基础。

1 材料与方

1.1 试验地概况

本研究设在中国科学院会同森林生态试验站(CERN)进行, 该站位于湖南省西部地区——会同县, 属典型的亚热带湿润气候, 年平均气温 16.5 °C, 1 月平均气温 4.5 °C, 7 月平均气温 27.5 °C, 年降水量 1200~1400 mm, 年蒸发量 1100~1300 mm, 相对湿度在 80% 以上, 林地土壤为山地红黄壤。

1982 年秋第 1 代人工杉木林皆伐后, 1983 年春在皆伐迹地上设置了 3 种人工林生态系统, 即杉木(*Cunninghamia lanceolata*)纯林(PCS)、火力楠(*Michelia macclurei*)纯林(PMS)以及杉木与火力楠的针阔混交林(MCM)。3 种人工林密度均为 2000 株/hm²。针阔混交林的杉木与阔叶树的比例为 8:2。在整个试验过程中, 除调查与取样外, 没有其它包括人为的干扰。

1.2 土样采集、生物量调查以及与元素的测定

2005 年 3 月分别在 3 种林型采用多点法取 6 个土壤层次的土壤(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm), 制样供室内分析。乔木层生物量按平均木法测定, 根系采用挖掘法测定, 林下植被和草本生物量采用收获法, 林分凋落物量采用收集法^[11]。土壤容重测定采用环刀法; 全氮含量采用凯氏法; 有机质含量采用重铬酸钾法^[12]。

1.3 碳和氮贮量的测算

对所采集的树干、树枝、树皮、树叶、树根样品测定其碳含量, 并计算出单位生物量的碳含量。在树干每 2m 间取 10~20g 鲜

样进行称重,对枝、叶分层(上、中、下),根系分级(粗、中、细),然后各层(级)分别取 10~20g 鲜样,凋落物则取其混合样品 100~200g 各 4 个样品进行称重和测定其含碳量和含氮量。植被部分(包括乔木层、根系和凋落物)C、N 贮量采用每部分生物量与其碳(氮)含量之积进行计算^[13]。

土壤碳和氮含量的测定则按 6 个土壤层次进行,即 0~10cm、10~20cm、20~40cm、40~60cm、60~80cm、80~100cm 分别取土样进行碳和氮含量测定。100 cm 土层 C、N 贮量 S (g/cm^2) 采用以容重 BD (g/cm^3)、C 或 N 含量 C (%) 及土层厚度 T (cm) 进行计算,其计算公式为^[14]:

$$S = BD \times C \times T$$

1.4 数据处理方法

根据野外调查观测资料和实验室内的分析资料,用 EXCEL (2000) 图表处理软件和 SPSS (10.0) 统计分析软件进行数据处理分析。

2 结果与讨论

2.1 人工林生态系统植被 C 贮量及其空间分布格局

根据植被各部分 C 含量可以计算出系统植被各部分 C 贮量(表 1)。从表 1 可以看出,杉-阔混交林的植被 C 贮量要高于杉木纯林与阔叶纯林。杉木-火力楠混交林植被 C 贮量为 $86.29 \text{ t}/\text{hm}^2$,比杉木纯林增加 8.79%;与火力楠纯林相比提高幅度更大,达 31.70%。本研究杉木纯林植被 C 贮量与陈楚莹等人的研究结果大体一致^[1]。另外,将不同人工林生态系统植被 C 贮量与植被生物量进行回归分析发现,植被 C 贮量与植被生物量呈线性相关(图 1),但与植被 C 平均含量线性关系不明显,说明植被 C 贮量主要受植被生物量的影响。

从各林分植被 C 贮量空间分布来看,植被 C 主要集中在乔木层,基本占整个植被 C 贮量的 95% 以上;而树干又是乔木层 C 贮量的主体,基本维持在各林分植被 C 贮量的 60% 以上,占乔木层 C 贮量的比例一般都超过了 70%;林下植被层和凋落层 C 贮量所占比例非常小,一般不超过 2% (表 1)。植被 C 贮量的空间分配格局也因树种不同而存在差异。在杉木纯林中,乔木层 C 贮量占整个植被 C 贮量的 97.31%,林下植被层和凋落层分别占 1.58% 和 1.11%;其中乔木层树干 C 贮量所占比例最大,为 61.54%,其次是根系(14.31%),然后依次为树皮(9.04%)、树叶(7.02%)和树枝(5.40%)。而作为常绿阔叶树种的火力楠,乔木层 C 贮量占整个植被 C 贮量的 96.05%,林下植被层和凋落层分别占 2.30% 和 1.65%;其中乔木层树干 C 贮量的所占比例也是最大(63.08%),根系所占的比例次之(11.68%);但与杉木不同的是,火力楠树叶(8.17%)和树枝(7.55%)所占的比例大于树皮(5.57%)所占的比例,这种差异可能主要是不同树种间生物学特性引起的。杉木-火力楠混交林植被 C 贮量其空间分布为:树干 > 根系 > 树皮 > 树叶 > 树枝。

表 1 人工林生态系统植被 C 贮量(t/hm^2)及其空间分布

Table 1 C stocks(t/hm^2) of vegetation and its spatial distribution under different plantation ecosystems

项目 Item	杉木纯林 PCS		杉木+ 火力楠混交林 MCM		火力楠纯林 PMS	
	C stock (t/hm^2)	(%)	C stock (t/hm^2)	(%)	C stock (t/hm^2)	(%)
树干 Stemwood	48.81	61.54	53.31	61.78	41.33	63.08
树皮 Stem bark	7.17	9.04	7.58	8.78	3.65	5.57
树枝 Branch	4.28	5.40	5.10	5.91	4.95	7.55
树叶 Foliage	5.57	7.02	5.56	6.44	5.35	8.17
根系 Root	11.35	14.31	12.03	13.94	7.65	11.68
合计 Sum	77.18	97.31	83.58	96.85	62.93	96.05
林下植被和草本 Understory and herbage	1.25	1.58	1.70	1.97	1.51	2.30
凋落层 Litter	0.89	1.11	1.01	1.18	1.08	1.65
总计 Total	79.32	100	86.29	100	65.52	100

2.2 人工林生态系统植被 N 贮量及其空间分布格局

根据植被各部分 N 含量可以计算出各人工林生态系统不同部分植被 N 贮量(表 2)。从表 2 可以看出,杉-阔混交林的植被 N 贮量要高于杉木纯林与阔叶纯林。杉木-火力楠混交林植被 N 贮量为 $0.94 \text{ t}/\text{hm}^2$,比杉木纯林增加 8.05%,与火力楠纯林相比提高幅度高达 28.77%。本研究中的 3 个人工林生态系统植被 N 贮量都高于平均林龄超过 140a 的挪威杉混交林植被(根系和凋落物也包括在内)N 贮量($0.584 \text{ t}/\text{hm}^2$)^[13]。另外,将不同人工林生态系统植被 N 贮量与植被生物量进行回归分析发现两者之间有着良好的线性相关(图 2),同样说明植被 N 贮量主要受植被生物量的影响。

从各林分植被 N 贮量空间分布来看,植被 N 主要集中在乔木层,基本占整个植被 N 贮量的 90% 以上(但杉木-火力楠混交林乔木层 N 贮量除外,为 89.32%);而树干又是乔木层 N 贮量的主体,基本在各林分植被 N 贮量的 27.40%~44.83% 之间波动,

占乔木层N 贮量的比例处于 30.59% ~ 48.15% 之间;凋落层N 贮量所占比例非常小,一般不超过 5%;林下植被层N 贮量也比较低。植被N 贮量的空间分配格局也因树种不同而存在差异。在杉木纯林中,乔木层N 贮量占整个植被N 贮量的 93.10%,林下植被层和凋落层分别占 4.37% 和 2.53%;其中乔木层树干N 贮量所占比例最大,为 44.83%,其次是树叶(18.39%),然后依次为根系(17.24%)、树皮(9.08%)和树枝(3.56%)。而火力楠乔木层N 贮量占整个植被N 贮量的 89.32%,林下植被层和凋落层分别占 6.30% 和 4.38%,其中乔木层树干N 贮量所占比例也是最大(27.40%),树叶所占的比例次之,高达 23.29%,然后再依次为根系(13.70%)、树枝(13.01%)和树皮(11.92%)。杉木植被N 贮量明显集中于树干、树叶和根系 3 个部分,三者所占植被N 总贮量的比例高达 80.46%;但火力楠没有这么集中,它这 3 个部分的比例为 64.39%,而林下植被和草本以及凋落层三者N 贮量占植被N 总贮量的比例是杉木的 3.21 倍,这种差异也可能主要是因不同树种生物学特性引起的。

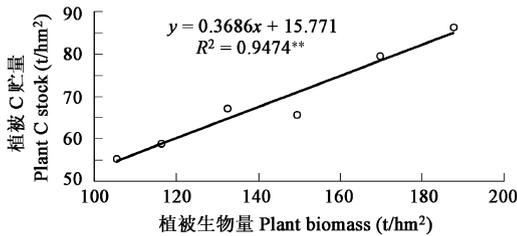


图 1 植被 C 贮量与植被生物量之间的关系

Fig 1 Relationship between plant C stock and plant biomass

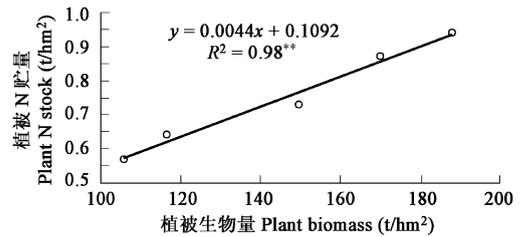


图 2 植被 N 贮量与植被生物量之间的关系

Fig 2 Relationship between plant N stock and plant biomass

表 2 人工林生态系统植被 N 贮量(t/hm²)及其空间分布

Table 2 N stocks(t/hm²) of vegetation and its spatial distribution under different plantation ecosystems

项目 Item	杉木纯林 PCS		火力楠纯林 MCM		杉木+ 火力楠混交林 PMS	
	N stock (t/hm²)	%	N stock (t/hm²)	%	N stock (t/hm²)	%
树干 Stemwood	0.39	44.83	0.39	41.49	0.20	27.40
树皮 Stem bark	0.079	9.08	0.10	10.64	0.087	11.92
树枝 Branch	0.031	3.56	0.049	5.21	0.095	13.01
树叶 Foliage	0.16	18.39	0.16	17.02	0.17	23.29
根系 Root	0.15	17.24	0.16	17.02	0.10	13.70
合计 Sum	0.81	93.10	0.86	91.38	0.65	89.32
林下植被和草本 Understory and herbage	0.038	4.37	0.055	5.85	0.046	6.30
凋落层 Litter	0.019	2.53	0.026	2.77	0.033	4.38
总计 Total	0.87	100	0.94	100	0.73	100

2.3 人工林生态系统土壤 C 贮量及其空间分布格局

根据土壤 C 含量和土壤容重可以计算出林地土壤 C 贮量(图 3)。从图 3 可以看出,杉-阔混交林和火力楠纯林的土壤 C 贮量要高于杉木纯林。其中,杉木-火力楠混交林土壤 C 贮量为 100.59 t/hm²,比杉木纯林增加 11.51%,火力楠纯林与杉木纯林相比提高幅度更大,达 16.23%。从空间尺度分析,土壤 C 贮量基本上也是杉-阔混交林和阔叶纯林稍大于同一土壤层次相对应的杉木纯林。40 cm 土层以下土壤 C 贮量呈递减趋势。本研究所得的杉木纯林土壤 C 贮量与方晰等人的研究结果基本一致^[3],但本研究中的阔叶纯林、针阔混交林、杉木针叶纯林其土壤 C 贮量要低于周玉荣等人曾报道过的我国类似森林类型土壤 C 贮量平均值(这 3 种森林类型土壤 C 贮量平均值分别为 205.23、335.58、101.30 t/hm²)^[15],特别是前两种森林类型其土壤 C 贮量仅为平均水平的 1/2 和 1/3 左右。其原因可能主要是以下几个方面:

(1) 土层厚度的差异 考虑到人为干扰和全球变化对土壤影响的深度一般不超过 1 m,一些研究对土壤碳库的计算,传统上是根据 1m 以内的含量得出。而我国森林多分布山区,地形起伏大,土壤土层厚度不一,这就直接影响了森林土壤碳库的估算。有研究表明土壤碳密度与土层厚度有着密切的正相关^[16]。

(2) 研究方法的差异 对森林土壤碳贮量的估算,很多是基于土壤普查或收集一些文献上的数据,而对实地调查较少,包括森林和植被类型、土壤质地等,从而影响最终的估算结果;即使是相同的土壤质地与森林和植被类型,不同的林龄也可能导致土壤 C 贮量的估算差异。例如,据方晰等人对不同林龄的杉木林土壤 C 贮量的研究发现,10 年生杉木林土壤 C 贮量为 107.73 t/hm²,而 7 年生杉木林土壤 C 贮量为 88.06 t/hm²,前者比后者高出 22.34%^[3]。另外,对森林生态系统类型的选择也是一个重

要原因之一。

(3) 不同气候带对土壤有机C的积累有影响。热带地区,全年热量丰富,雨量充沛,生物循环旺盛,有机物质代谢快,不利于土壤有机质的积累。据方运霆等人研究发现,水热因子是限制土壤碳密度大小的重要因素^[16]。

另外,本研究20年生杉木纯林土壤C贮量要高于陈楚莹等人对相同林龄杉木林的土壤C贮量,其原因可能主要是取样深度的差异,陈楚莹等人对土壤C贮量的估算是基于0~60 cm土层^[11],而本研究测算的是0~100 cm土层的土壤C贮量。

所以,在同一气候带下只有全面考虑土壤质地、森林和植被类型以及林龄的基础上,采用不同的土壤碳含量才可较准确地估算森林生态系统的碳贮量。对于我国整个杉木林生态系统土壤碳贮量的较准确估算则需在考虑气候带、土壤质地和林龄3个基本要素的前提下进行。

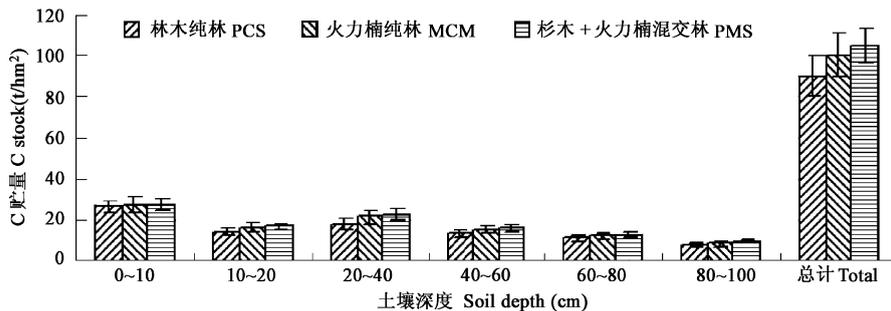


图3 土壤有机C贮量

Fig. 3 C stocks of soil in different soil depths

森林动植物的残体和森林枯枝落叶作为土壤有机C的主要来源,并由于气候、生物等因素的作用,在林地土壤中形成了层次结构,其有机C含量和C贮量也将随着土壤深度的变化而变化。从林地土壤C贮量空间分布来看,林地土壤表层(0~10 cm)的有机C含量明显高于其它土壤层次,其C贮量占土壤总C贮量的24.49%~29.32%;然后是20~40 cm土层,占土壤C贮量的19.27%~21.35%。所以,0~40 cm土层C是土壤C贮量的主体,占土壤C总贮量的60.45%~64.79%。方晰等人也曾经报道,杉木林地0~30 cm土层C贮量占土壤总C贮量的53.52%^[12]。正因为土壤中的C主要分布在土壤表层,而人类的各种经营活动也主要作用于土壤表层,因此,人类的经营活动方式对土壤中的C必将产生深刻的影响,这也往往决定了森林土壤中的C库是“源”或是“汇”的作用。根据Batjes对全球各类土壤C贮量的研究,0~100 cm的土壤C贮量中,0~30 cm和0~50 cm所占的比例在37%~59%和62%~81%之间,平均为49%和67%^[16]。另据Detwiler关于热带和亚热带地区土地利用变化对土壤碳库影响的研究,0~40 cm所贮存的碳占0~100 cm总C的比例为35%~80%,平均为57%^[12]。可见本研究试区0~40 cm土层所贮存的碳量的比重略高于其它地区,这从另一个侧面可反映出该人工林土壤较脆弱,人为干扰容易造成土壤碳损失,因此,减少人为对森林的干扰活动,加强对森林植被的保护以维持和增加土壤碳贮量,对维护全球气候变化,特别是减缓大气CO₂浓度上升等有着重要的意义。

2.4 人工林生态系统土壤N贮量及其空间分布格局

根据土壤全N含量和土壤容重可以计算出林地土壤全N贮量(图4)。从图4可以看出,杉-阔混交林和阔叶纯林的土壤全N总贮量要高于杉木纯林。其中杉木-火力楠混交林土壤全N总贮量为15.42 t/hm²,比杉木纯林增加14.99%,火力楠纯林与杉木纯林相比提高幅度更大,达18.34%。从不同土壤层次来看,土壤全N贮量一般也是杉-阔混交林和阔叶纯林大于同一土壤层次的杉木纯林。与C贮量基本一致,40 cm土层以下土壤全N贮量呈递减趋势。3个人工林土壤N贮量远比原始热带山地雨林土壤N贮量(9.58 t/hm²)高^[13],也远超过了平均林龄140多年的挪威杉混交林土壤N贮量(2.258 t/hm²)^[13]。所以,正如估算森林生态系统的碳贮量一样,只有在全面考虑土壤质地、森林和植被类型、气候带以及林龄等的基础上,采用不同的土壤氮含量才可较准确地估算森林生态系统的氮贮量。对于我国杉木林生态系统土壤氮贮量的较准确估算则同样需在考虑气候带、土壤质地和林龄3个基本要素的前提下进行。

森林动植物的残体、森林凋落物和降雨作为土壤N的主要来源,并由于气候、生物等因素的作用,在林地土壤中形成层次结构,其全N含量和全N贮量也将随着土壤深度的变化而变化。从林地土壤全N贮量空间分布来看,与C贮量的分布不同,虽然林地表层(0~10 cm)土壤全N含量高于其它土层,但20~40 cm土层全N贮量最高,一般占土壤总贮量的20.03%~25.95%,这说明土壤容重与土壤深度对土壤N贮量影响很大;表层(0~10 cm)土壤N贮量仅次于20~40 cm的土层,一般占土壤总贮量的15.19%~20.03%;40 cm以下土层N贮量占土壤总贮量的比例也都在40%以上。碳贮量的分布相对集中于土

壤上层特别是 0~40 cm 土层, 而氮贮量的分布则相对分散, 0~40 cm 土层 N 占土壤总贮量的比例未超过 60%, 一般在 52.62%~58.39% 之间波动。因此, 人类的经营活动方式对土壤 N 必将会产生影响, 但一些自然的生态过程, 包括降雨、淋溶、矿质化作用等等, 对土壤中营养元素的含量和分布的影响也不容忽视。

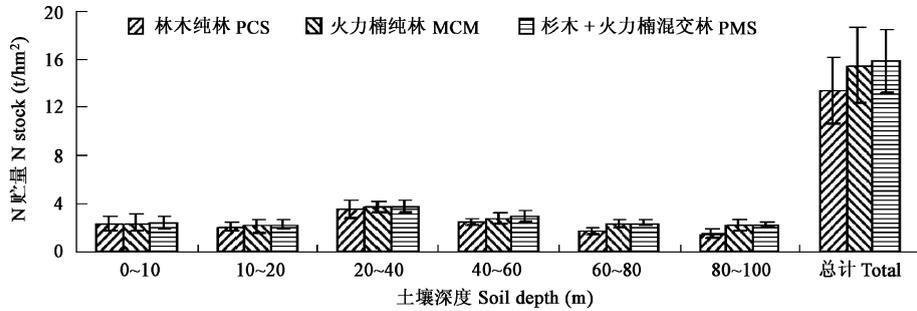


图4 土壤N贮量

Fig 4 N stocks of soil in different soil depths

2.5 人工林生态系统 C 贮量及其空间分布格局

从图 5 可以看出, 杉-阔混交林生态系统总 C 贮量要高于杉木纯林和阔叶纯林, 其 C 贮量依次为: 杉木-火力楠混交林 (186.88 t/hm²) > 火力楠纯林 (170.37 t/hm²) > 杉木纯林 (169.53 t/hm²)。火力楠纯林虽然其土壤 C 贮量要高于杉木纯林, 但因生物量低于杉木纯林, 其植被 C 贮量比杉木纯林低, 所以两个林分的 C 贮量相差不大。本研究的 3 个人工林 C 贮量都高于暖性针叶林平均水平 163.8 t/hm²[14]。20 年生杉木纯林 C 贮量要高于 11 年生杉木纯林 C 贮量 (144.22 t/hm²) [18]。一般说来, 随着林龄的增长, 杉木林生态系统中 C 贮量增加, 7 年生、10 年生、11 年生杉木林 C 贮量分别为 106.01 t/hm²、139.80 t/hm²、144.22 t/hm² [18]。另外, 本研究中 20 年生杉木纯林 C 贮量要高于陈楚莹等人的研究结果 (144.9 t/hm²), 这与估算的土壤深度不一致有关 [1]。

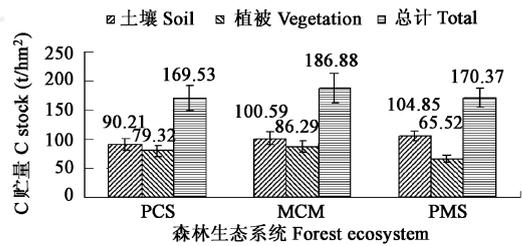


图5 人工林生态系统 C 贮量

Fig 5 C stocks under different plantation ecosystems

表3 人工林生态系统有机 C 贮量的空间分布 (%)

Table 3 Spatial distribution (%) of C stocks under different plantation ecosystems

项目 Item	土壤层 Soil layer	乔木层 Tree layer	根系 Root layer	林下植被和草本 Understory and herbage layer	凋落层 Litter layer	总计 Total
PCS	53.21 (8.96)	38.83 (5.03)	6.69 (1.14)	0.74 (0.17)	0.52 (0.18)	100
MCM	53.83 (9.12)	38.29 (6.41)	6.44 (1.47)	0.91 (0.16)	0.54 (0.17)	100
PMS	61.54 (7.87)	32.45 (4.79)	4.49 (0.47)	0.89 (0.21)	0.63 (0.14)	100

括号内数字为标准方差 Standard deviation in parentheses

3 种人工林生态系统有机 C 贮量的空间分布基本一致, 土壤层是主要部分, 一般占总量的 52.23%~61.54%, 其次为乔木层 (32.45%~41.71%), 再次是根系, 林下植被层和凋落层所占比例最小 (都不到 1%) (表 3), 这与陈楚莹等人的研究结果不一致 [1]。据陈楚莹等人研究指出, 植被层 (包括凋落层) 是杉木林生态系统的主要碳库, 占总量的 59.7%, 而土壤只占 40.3% [1]。植被层 (包括凋落层) C 贮量所占总量的比例 (38.46%~47.77%) 要高于暖性针叶林植被层 (未包括林下植被层和凋落层) C 贮量所占总量的平均百分数 32.66% [15], 说明该研究试区土壤 C 贮量相对较低。据阮宏华等人对亚热带苏南地区不同森林类型地上部分与地下部分 C 贮量之比的研究发现, 40 年生栎林为 1:1.1, 27 年生杉木林为 1:1.2, 18 年生国外松林为 1:1.0 [19]。本研究结果表明, 地上部分与地下部分 C 贮量比例分别为: 杉木纯林 1:1.53, 杉木-火力楠混交林 1:1.55, 火力楠纯林 1:2.0。可见, 本研究中的 3 种人工林生态系统地上部分与地下部分 C 贮量比例相对较低, 说明 3 种人工林生态系统还有一定的固碳潜

力,特别是植被部分,理论上的固碳潜力以阔叶纯林最大。另外,尽管凋落层C贮量不到总量的1%,但它却是土壤有机C的主要来源,也是土壤-植物系统碳循环的联结库,而且因覆盖于地面,有效地减少或防止了土壤的碳流失。有研究指出,森林凋落物现存量的变化对土壤C贮量影响很大^[18,19]。杉木人工林凋落物现存量为0.72~5.944 t/hm²之间,其土壤(0~60 cm)C贮量为88.06~107.33 t/hm²之间^[18]。另据阮宏华等人的研究结果显示,大兴安岭落叶松林凋落物现存量为42.8 t/hm²,其土壤(10~78 cm)C贮量为347.4 t/hm²;下蜀次生栎林凋落物现存量为9.2 t/hm²,其土壤C贮量为69.7 t/hm²^[19]。

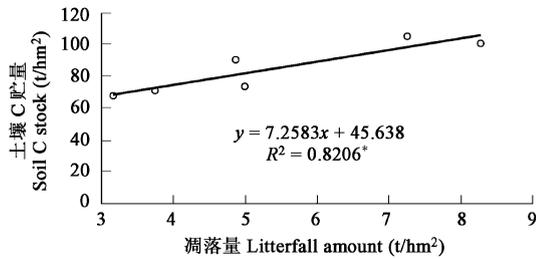


图6 森林凋落物现存量和土壤C贮量之间的关系
Fig. 6 Relationship between litterfall and C stock

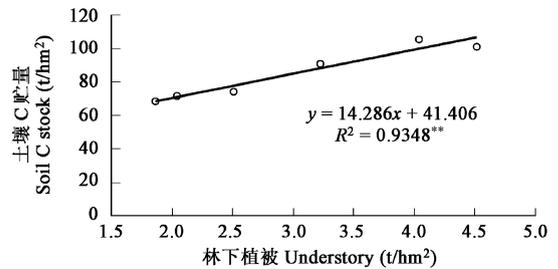


图7 林下植被层生物量和土壤C贮量之间的关系
Fig. 7 Relationship between understory and C stock

根据森林凋落物现存量、林下植被量和根系量,分别建立凋落物现存量、林下植被量、根系量和土壤C贮量关系的散点图(图6、图7和图8),根系量和土壤C贮量之间线性关系不是很明显(图8),但图6和图7表明土壤C贮量和森林凋落物现存量($y = 7.2583x + 45.638, R^2 = 0.8206, p < 0.05$)以及土壤C贮量和林下植被生物量($y = 14.286x + 41.406, R^2 = 0.9348, p < 0.01$)之间都具有良好的线性关系,说明林下植被和森林凋落物对土壤C贮量有着非常重要的影响。

2.6 人工林生态系统N贮量及其空间分布格局

从图9可以看出,生态系统N贮量以阔叶纯林最高,其次为混交林,杉木纯林最小。20年生人工林其系统N贮量以火力楠纯林最高,为16.60 t/hm²,其次是杉木-火力楠混交林(16.36 t/hm²),杉木纯林最低(14.28 t/hm²)。火力楠纯林和杉木-火力楠混交林N贮量要高于有关科研工作者报道的成熟林阶段杉木纯林平均N贮量(14.03 t/hm²),而20年生杉木纯林N贮量与此平均值大体一致^[18]。本研究中的3种人工林生态系统N贮量远超过了平均林龄140多年的挪威杉混交林生态系统N贮量(2.842 t/hm²)^[14]。

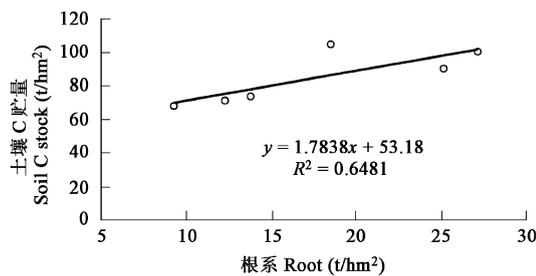


图8 根系生物量和土壤C贮量之间的关系
Fig. 8 Relationship between root and C stock

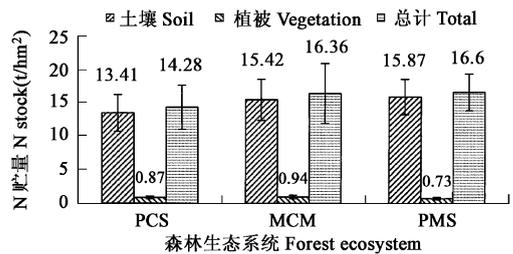


图9 人工林生态系统N贮量(t/hm²)
Fig. 9 N stocks under different plantation ecosystem s

3种人工林生态系统N贮量的空间分布基本一致,土壤N贮量占绝对优势,一般是总量的91.54%~95.60%,其次为乔木层(3.31%~7.01%),然后是根系,林下植被层和凋落层所占比例最小(都不到1%) (表4)。这种生态系统N贮量的空间分布格局大体与Leena等的研究结果一致^[13]。杨玉盛等也曾研究指出,在杉木人工林生态系统中,营养元素绝大部分贮存于土壤中,植被层营养元素的贮量是很有限的;在植被部分(未包括根系部分),乔木层所含营养元素的贮量占主导地位,1代、2代、3代杉木林乔木层占植被部分(未包括根系部分)营养元素总量的比例分别为92.90%、88.37%和80.57%^[20]。根据对中亚热带地区不同林龄的杉木林地上部分与地下部分N贮量之比的研究发现,速生阶段为1:79.19,杆材阶段为1:59.49,成熟阶段为1:31.18,过熟阶段为1:31.87^[18]。本研究地上部分与地下部分N贮量比例分别为:杉木纯林1:18.21,杉木-火力楠混交林1:19.45,火力楠纯林1:25.54。可见,本研究中的6个人工林生态系统地上部分与地下部分N贮量比例相对较高,说明此6个人工林生态系统还有较大空间的固氮潜力,特别是土壤N部分,其中以阔叶纯林理论上的固氮潜力最大。另外,尽管凋落层N贮量不到总量的1%,但它却是土壤N的主要来源之一,也是土壤-植物系统氮循环的联结库,而且因覆盖于地面,有效地减

少或防止了土壤氮的淋失。

表 4 人工林生态系统 N 贮量的空间分布 (%)

Table 4 Spatial distribution (%) of N stocks under different plantation ecosystems

项目 Item	土壤层 Soil layer	乔木层 Tree layer	根系 Root layer	林下植被和草本 Understory and herbage layer	凋落层 Litter layer	总计 Total
PCS	93.91 (10.19)	4.62 (1.13)	1.05 (0.27)	0.27 (0.065)	0.13 (0.033)	100
MCM	94.25 (12.14)	4.28 (1.51)	0.98 (0.30)	0.34 (0.079)	0.16 (0.047)	100
PM S	95.60 (8.79)	3.31 (0.94)	0.60 (0.14)	0.28 (0.045)	0.20 (0.029)	100

括号内数字为标准方差 Standard deviation in parentheses

根据森林凋落物现存量、林下植被量和根系量, 分别建立凋落物现存量、林下植被量、根系量和土壤 N 贮量关系的散点图 (图 10、图 11 和图 12), 与土壤 C 贮量一样, 土壤 N 贮量和森林凋落物现存量 ($R^2 = 0.8388, p < 0.01$) 以及土壤 N 贮量和林下植被生物量 ($R^2 = 0.9485, p < 0.01$) 之间也都具有良好的线性关系, 说明森林凋落物和林下植被对土壤 N 贮量都有着非常重要的影响; 而根系量和土壤 N 贮量之间线性关系不明显 (图 12)。由于林下植被营养元素含量较高而寿命较短, 因此林下植被在营养元素生物循环研究中倍受人们重视^[20~23]。据杨玉盛等人对杉木人工林生态系统的研究, 虽然林下植被数量相当有限, 但林下植被中营养元素的年积累量除第 1 代低于乔木层外, 第 2 代和第 3 代林下植被中营养元素年积累量均高于乔木层, 其中第 3 代林下植被营养元素年积累量是乔木层的 3.28 倍^[20], 这也再次证明了林下植被对杉木人工林包括 N 在内的土壤养分的积累具有很大影响, 其数量和质量对林地地力的恢复起着极其重要的作用。

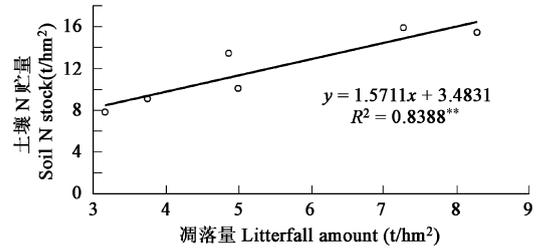


图 10 森林凋落物现存量和土壤 N 贮量之间的关系
Fig. 10 Relationship between litterfall and N stock

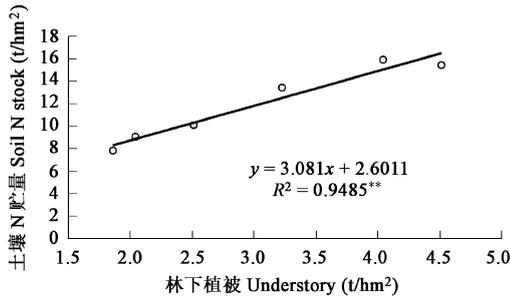


图 11 林下植被生物量和土壤 N 贮量之间的关系
Fig. 11 Relationship between understory and N stock

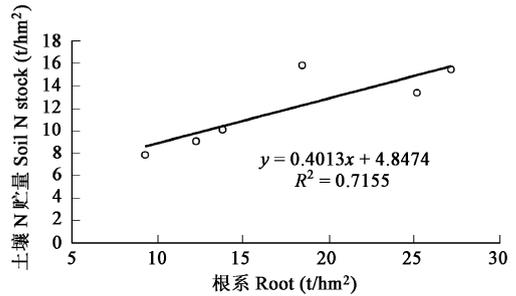


图 12 根系生物量和土壤 N 贮量之间的关系
Fig. 12 Relationship between root and N stock

3 小结

杉-阔混交林生态系统 C、N 贮量都要高于杉木纯林和阔叶纯林。3 种人工林生态系统有机 C、N 贮量的空间分布格局基本一致, 土壤层是主要部分, 其次为乔木层, 然后是根系, 林下植被层和凋落层所占比例最小 (都不到 1%)。土壤 C、N 贮量分别和林下植被生物量、森林凋落物现存量之间都具有良好的线性关系, 说明林下植被和森林凋落物对土壤 C、N 贮量有着深刻的影响。同时, 只有在全面考虑土壤质地、森林和植被类型、气候带以及林龄等的基础上, 采用不同的土壤碳、氮含量才可较准确地估算森林生态系统的碳、氮贮量。对于我国杉木林生态系统土壤碳、氮贮量的较准确估算则同样需在考虑气候带、土壤质地和林龄 3 个基本要素的前提下进行。

References

[1] Chen C Y, Liao L P, Wang S L. Carbon allocation and storage in Chinese fir plantation ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (supp.): 175~ 178.



- [2] Fang X, Tian D L, Xiang W H. Effects of different management patterns on soil carbon storage of the deforested lands in Chinese fir plantation. *Journal of Central South Forestry University*, 2004, **24**(1): 1~ 5
- [3] Fang X, Tian D L, Xiang W H, *et al*. Carbon dynamics and balance in the ecosystem of the young and middle-aged second-generation Chinese fir plantation. *Journal of Central South Forestry University*, 2002, **22**(1): 1~ 6
- [4] He Z M, Li L H, Wang Y X, *et al*. Carbon stock and carbon sequestration of a 33-year-old *Fokienia hodginsii* plantation. *Journal of Mountain Science*, 2003, **21**(3): 298~ 303
- [5] Han X G, Li L H, Huang J H. An Introduction to Biogeochemistry. Beijing: Higher Education Press, 1999. 197~ 244
- [6] Vitousek P M, Gosz J R, Grier C C, *et al*. Nitrate losses from distributed ecosystems. *Science*, 1979, **204**: 469~ 474
- [7] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, **13**: 87~ 115
- [8] Mooney H A, Vitousek P V, Matson P A. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *Science*, 1987, **238**: 926~ 932
- [9] Ludwig J A, Whitford W G, Cornelius J M. Effects of water, nitrogen and sulfur amendments on cover, density and size of Chihuahuan desert ephemerals. *Journal of Arid Environment*, 1989, **16**: 35~ 42
- [10] Peterjohn W T, Schlesinger W H. Nitrogen loss from deserts in the southwestern United States. *Biogeochemistry*, 1990, **10**: 67~ 79
- [11] Feng Z W, Wang X K, Wu G. Biomass and productivity of forest ecosystems in China. Beijing: Science Press, 1999.
- [12] Liu G S. Observation and standard analysis method of Chinese Ecosystem Research Network: Physicochemical analysis and profile description of soil. Beijing: China Standard Press, 1996
- [13] Leena F, Hannu M, Sirpa P, *et al*. Carbon and nitrogen pools in an old-growth, Norway spruce mixed forest in eastern Finland and changes associated with clear-cutting. *Forest Ecology and Management*, 2003, **174**: 51~ 63
- [14] Luo T S, Chen B F, Chen Y F, *et al*. Variation of the soil carbon and nitrogen for initial stage after the felling in tropical montane rainforest of Bawangling, Hainan Island. *Forest Research*, 2000, **13**(2): 123~ 128
- [15] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(5): 518~ 522
- [16] Fang Y T, Mo J M, Sandra Brown, *et al*. Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan Biosphere Reserve, 2004, **24**(1): 135~ 142
- [17] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**: 151~ 163
- [18] Tian D L, Kang W X, Wen S Z, *et al*. *Studies on Chinese fir plantation ecosystem*. Beijing: Science Press, 2003
- [19] Ruan H H, Jiang Z L, Gao S M. Study on carbon cycling of major forest types in South Jiangsu: content and distribution. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, **16**(6): 17~ 21
- [20] Yang Y S, *et al*. *Studies on sustainable management of Chinese fir stands*. Beijing: China Forestry Press, 1998
- [21] Feng Z W, Chen C Y, Wang K P, *et al*. Studies on the accumulation, distribution and cycling of nutrient elements in the ecosystem of the pure stand of subtropical *Cunninghamia lanceolata* forests. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1985, **9**(4): 245~ 256
- [22] Feng Z W, Chen C Y, Zhang J W, *et al*. A coniferous broad-leaved mixed forest with higher productivity and ecological harmony in subtropics—study on mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei*. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1988, **12**(3): 165~ 180
- [23] Robert F L. Vegetation management in tropical forest plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, **23**(10): 2006~ 2014

参考文献:

- [1] 陈楚莹, 廖利平, 汪思龙. 杉木人工林生态系统的碳素分配与贮量的研究. *应用生态学报*, 2000, **11**(增刊): 175~ 178
- [2] 方晰, 田大伦, 项文化. 不同经营方式对杉木林采伐迹地土壤C储量的影响. *中南林学院学报*, 2004, **24**(1): 1~ 5
- [3] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡. *中南林学院学报*, 2002, **22**(1): 1~ 6
- [4] 何宗明, 李丽红, 王义祥, 等. 33年生福建柏人工林碳库与碳吸存. *山地学报*, 2003, **21**(3): 298~ 303
- [5] 韩兴国, 李凌浩, 黄建辉. *生物地球化学导论*. 北京: 高等教育出版社, 1999. 197~ 244
- [11] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. *中国森林生态系统的生物量和生产力*. 北京: 科学出版社, 1999
- [12] 刘光崧主编. *中国生态系统研究网络观测与分析标准方法——土壤理化分析与剖面描述*. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [14] 骆士寿, 陈步峰, 陈永富, 等. 海南岛霸王岭热带山地雨林采伐经营初期土壤碳氮储量. *林业科学研究*, 2000, **13**(2): 123~ 128
- [15] 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
- [16] 方运霆, 莫江明, Sandra Brown, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征. *生态学报*, 2004, **24**(1): 135~ 142
- [18] 田大伦, 康文星, 文仕知, 等著. *杉木林生态系统学*. 北京: 科学出版社, 2003
- [19] 阮宏华, 姜志林, 高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究——含量与分布规律. *生态学杂志*, 1997, **16**(6): 17~ 21
- [20] 杨玉盛, 等. *杉木林可持续经营的研究*. 北京: 中国林业出版社, 1998
- [21] 冯宗炜, 陈楚莹, 等. 亚热带杉木纯林生态系统中营养元素的积累、分配和循环的研究. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1985, **9**(4): 245~ 256
- [22] 冯宗炜, 陈楚莹, 等. 一种高生产力和生态协调的亚热带针阔混交林-杉木火力楠混交林的研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1988, **12**(3): 165~ 180