

# 闽西北不同类型毛竹林养分分布及生物循环特征\*

刘广路<sup>1</sup> 范少辉<sup>1\*</sup> 漆良华<sup>1</sup> 肖复明<sup>2</sup> 黄永南<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 国际竹藤网络中心竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102; <sup>2</sup> 江西省林业科学院, 南昌 330032; <sup>3</sup> 福建省永安市林业局, 福建永安 366000)

**摘要** 以福建省永安市集约经营的毛竹纯林(Ⅰ)、竹阔混交林(Ⅱ)和竹针混交林(Ⅲ)3种类型林分为研究对象,对其N、P、K、Ca、Mg元素分布格局及生物循环特征进行了研究。结果表明,毛竹林N、P、K、Ca、Mg5种养分元素的排列顺序为土壤层>乔木层>凋落物层>灌木层>草本层,其中土壤层(0~60 cm)养分累积量占系统养分总量>99%。3种林分养分元素累积量的排列顺序为Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ,分别为146196.59、144466.35和105002.59 kg·hm<sup>-2</sup>,其中植被层养分累积量的排列顺序为Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ,凋落物层和土壤层养分累积量排列顺序为Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ,竹阔混交林土壤层和凋落物层养分累积量最高,立地生产潜力最大。林分Ⅰ和Ⅱ的养分利用系数显著高于林分Ⅲ,反映了林分维持高生产力需要消耗更多的养分元素;循环系数排列顺序为Ⅲ>Ⅱ>Ⅰ,竹针混交林和竹阔混交林维持林木生长所需的养分元素少于毛竹纯林;毛竹纯林养分周转时间最长,竹阔混交林次之,竹针混交林最短,分别为31.89年、12.39年和12.23年,混交林周转时间显著低于毛竹纯林。竹阔混交林既有较高的生产力,又有较强的养分归还能力,是一种较好的经营方式。

**关键词** 亚热带;毛竹林;养分分布;生物循环

**中图分类号** S714.7 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)11-2155-07

**Nutrient distribution and biological cycle characteristics in different types of *Phyllostachys pubescens* forest in Northwest Fujian.** LIU Guang-lu<sup>1</sup>, FAN Shao-hui<sup>1</sup>, QI Liang-hua<sup>1</sup>, XIAO Fu-ming<sup>2</sup>, HUANG Yong-nan<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Bamboo and Rattan, International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; <sup>2</sup>Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China; <sup>3</sup>Fujian Yong'an Forestry Bureau, Yong'an 366000, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2155-2161.

**Abstract:** Taking the intensively managed pure bamboo (*Phyllostachys pubescens*) stand (Ⅰ), bamboo stand mixed with broadleaved trees (Ⅱ), and bamboo stand mixed with coniferous trees (Ⅲ) in Yong'an County of Fujian Province as test objects, this paper studied the distribution patterns of N, P, K, Ca, and Mg and the characteristics of biological cycle in the stands. The nutrient accumulation in the stands was in the order of Ⅱ > Ⅰ > Ⅲ, being 146196.59, 144466.35, and 105002.59 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively, and that in different layers of the stands was in the order of soil layer > tree layer > litter layer > shrub layer > herb layer, with the proportion in soil layer (0-60 cm) accounted for more than 99% of the total. The nutrient accumulation in vegetation layers was in the order of Ⅰ > Ⅱ > Ⅲ, and that in soil layer and litter layer was in the order of Ⅱ > Ⅰ > Ⅲ. Stand Ⅱ had the highest nutrient accumulation in its soil layer and litter layer, and thus, the greatest productive potentiality. The nutrient utilization coefficient of stands Ⅰ and Ⅱ were significantly higher than that of stand Ⅲ. The higher productivity depended on more nutrients. The nutrient cycling coefficient was in the order of Ⅲ > Ⅱ > Ⅰ. Stands Ⅲ and Ⅱ needed lesser nutrients than stand Ⅰ. The nutrient turnover time was in the order of Ⅰ > Ⅱ > Ⅲ, being 31.89, 12.39, and 12.23 years, respectively, and there was a significant difference between stands Ⅰ, Ⅱ and Ⅲ. The bamboo stand mixed with broadleaved trees had higher productivity and stronger nutrient return ability, being a better management pattern of *P. pubescens*.

**Key words:** subtropics; *Phyllostachys pubescens* forest; nutrient distribution; biological cycle.

\* 国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD19B0104, 2006BAD19B0302)。

\*\* 通讯作者 E-mail: fansh@icbr.ac.cn

收稿日期: 2010-05-27 接受日期: 2010-08-17

毛竹 (*Phyllostachys pubescens*) 林是我国重要的竹林资源类型, 占竹林面积的 70% 左右。近年来, 由于片面追求经济效益, 许多竹阔混交林被改造为纯林, 由粗放经营状态转变为集约经营状态 (徐秋芳等, 2003), 在获得较高经济收益的同时, 也造成了系统稳定性、生物多样性下降等生态问题, 集约经营竹林地力维持问题成为一个亟需解决的问题。毛竹群落生物量是研究竹林物质生产和群落养分动态的基础, 是反映群落结构与功能的主要标志之一, 而营养元素循环作为森林生态系统基本功能过程之一, 是系统生产力及持久性的决定因素 (张希彪和上官周平, 2005)。因此, 阐明不同类型毛竹林生物量、生产力和营养元素的循环特征对保持毛竹林持续生产力有重要的作用。毛竹林是由复杂的鞭竹系统组成, 其同时进行内部、内部与外界的物质和能量交换 (周本智和傅懋毅, 2004)。同时, 毛竹由长出地面到秆型生长结束仅需一个多月的时间, 其后仅进行物质积累, 胸径和树高不再发生变化 (Shanmughavel & Francis, 1997; 江泽慧, 2002)。因此, 准确地测定毛竹林的年养分动态, 揭示毛竹林生物循环特征十分困难。当前, 有关毛竹林系统养分的研究, 主要集中在竹林系统与外界环境间的养分输入、输出 (傅懋毅等, 1992; 方敏瑜等, 1998), 对毛竹林地上部分养分积累与分布 (吴家森等, 2005a, 2005b)、毛竹林凋落物及分解 (傅懋毅和方敏瑜, 1989; 高志勤, 2006; 黄启堂等, 2006) 也有报道, 但缺乏对集约经营的不同混交类型毛竹林养分元素分布及生物循环特征的系统研究。本文以福建省天宝岩自然保护区集约经营的毛竹纯林、竹阔混交林及竹针混交林为研究对象, 对其养分分布格局和生物循环特征进行了研究, 揭示集约经营毛竹养分循环特征, 为毛竹林生态经营、长期生产力保持提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 自然概况

福建省永安市天宝岩国家级自然保护区 (25°55'N—25°58'N, 117°31'E—117°33.5'E), 戴云山余脉, 中低山地貌, 海拔 580~1604.8 m。亚热带东南季风气候型, 平均气温 23℃, 最低温 -11℃, 最高温 40℃, 无霜期 290 d 左右, 平均降水量 2000 mm,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的活动积温在 4520℃~5800℃, 持续天数为 225~250 d, 空气相对湿度月均为 80% 左右。竹林

主要分布在海拔 800 m 以下, 土壤为红黄壤。研究区内竹林覆盖率 96.8%, 主要为毛竹, 其间混生江南油杉 (*Keteleeria cyclolepis*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、杨梅 (*Myrica rubra*)、南酸枣 (*Chorospondias axillaris*)、鹅掌楸 (*Liriodendron chinense*) 和木荷 (*Schima superba*) 等树种。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地调查** 2007年9月在福建省永安市天宝岩国家级自然保护区一个小流域南坡上 (桂溪) 选择有代表性的毛竹纯林 (I)、竹阔混交林 (混交比例 8:2, 混交树种为木荷) (II)、竹针混交林 (混交比例 8:2, 混交树种为杉木) (III) 样地各 4 块, 样地大小为 20 m×20 m, 具体情况见表 1。母岩类型为沉积岩, 土壤类型为黄红壤, 土层厚度 65~75 cm, 腐殖质厚度 4~5 cm, 土壤湿润较疏松。样地自 1996 年起, 每年劈草 1 次, 每 2 年施用毛竹专用肥 1 次 (总养分含量  $\geq 30\%$ , N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=9:5:6), 施肥用量为每株 0.25 kg, 兜穴施, 穴深度为 40 cm。对样地进行调查, 记录毛竹的立竹密度、立竹胸径、树高、竹笋产量、经营历史等, 2008 年 9 月对实验样地进行复查。

**1.2.2 生物量和生产力的测定** 毛竹生物量采用收获法, 根据样地调查资料, 分别计算出毛竹纯林、竹阔混交林和竹针混交林地中 1~6 年生毛竹的平均胸径, 根据平均胸径每个年龄各选取 2 株作为标准竹, 每种类型林分伐标准竹 12 根, 共 36 根。毛竹伐倒后, 按秆、枝、叶称取鲜重, 然后各取一部分带回实验室测定含水率, 测定地上部分生物量。挖出竹兜, 清除掉附着在竹兜上的土壤, 小心剪断竹兜上的根, 称取竹根和秆基+秆柄的鲜重, 取一部分带回实验室测定含水率, 测定竹兜的生物量。竹鞭生物量的测定采用典型样方挖掘法。沿样地对角线设置 1 m×1 m 的小样方 5 个, 每 20 cm 为一层, 逐层挖出竹鞭和鞭根, 洗净泥土后滤干称鲜质量, 取一部分带回实验室测定样品含水率, 竹鞭年龄根据颜色和毛竹年龄推断得出。

灌木层和草本层生物量采用收割法, 在标准地内沿对角线布设 5 个 1 m×1 m 的小样方, 收割样方内所有的灌木和草本, 称其鲜重, 并采集 1.0 kg 灌木、草本样品测其含水量, 以测其干重。根系生物量采用样方法挖取、洗净、烘干称量推算而来。

乔木、灌木、草本层生产力, 根据其生物量和年龄推算所得。

表 1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information of sampling plots

样地类型	海拔 (m)	坡度 (°)	坡向	坡位	胸径 (cm)	树高 (m)	竹材产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	竹笋产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	密度		
									混交树种 (株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ )	立竹密度 (株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ )	平均
I	730	30	南	下	10.70	14.07	99696.19	1191.18	0	2751	2707.25±108.73a
I	734	35	南	下	11.30	14.42	99128.85	1201.35	0	2801	
I	724	30	南	下	11.00	14.33	92702.43	1122.34	0	2551	
I	719	25	南	下	9.90	13.65	93263.26	1098.49	0	2726	
II	686	15	南	下	12.50	14.12	84979.29	1156.76	38	2551	2587.25±127.50a
II	727	15	南	下	10.90	13.99	80709.70	1223.25	50	2501	
II	722	25	南	下	10.20	13.71	80339.74	1068.75	63	2521	
II	716	20	南	下	9.80	12.02	80162.22	1184.32	58	2776	
III	739	15	南	下	11.10	14.27	78592.35	1100.22	50	2501	2582.25±134.44a
III	728	15	南	下	10.80	14.11	78343.09	1096.37	75	2451	
III	723	20	南	下	11.10	14.65	79685.65	1123.85	75	2751	
III	703	30	西南	下	9.30	12.31	77985.36	1083.25	64	2626	

**1.2.3 混生树种的生物量与生产力** 本研究毛竹林中伴生树种木荷的生物量采用冯宗炜(1999)主编的《森林生态系统生物量 and 生产力》一书中常绿伴生乔木回归方程拟合所得,杉木生物量采用叶镜中等(1984)在洋口林场杉木生物量模型计算而来。

**1.2.4 凋落物量及分解速率** 凋落物现存量采用样方收集法测定:样地内沿对角线方向设置  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  小样方 5 个,收集样方内的凋落物,测定样地的现存量。年凋落量采用凋落物筐收集法,在所设置的样地内随机设置  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  的凋落物框 36 个,2007 年 9 月—2008 年 9 月,每月收集一次凋落物,计算林分年凋落量。凋落物年归还量通过凋落物分解实验所拟合模型推测所得。在 3 种林分类型中分别放置凋落物分解袋 36 袋,每月取回 3 袋,共收回凋落物分解袋 108 个,每袋干重 20 g,分解袋规格为  $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。

**1.2.5 样品采集与分析** 2007 年 9 月,在标准样地内沿对角线布点 5 个,从下至上分 3 层(每 20 cm 为一层)取土样,进行风干处理,制成待测土样。全 N:碱解扩散法;全 P:酸溶-钼锑抗比色法;全 K:NaOH 熔融,原子吸收光谱法;交换性 Ca、Mg:EDTA 络合滴定法。进行生物量调查时,分不同器官选取样品 500 g,在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  下杀青 0.5 h,烘干、粉碎、过 2 mm 筛备用。用硫酸-高氯酸消煮制成待测液,半微量凯氏法测定植物 N;钼锑抗比色法测定 P;火焰光度计法测定 K。Ca、Mg 的测定采用 EDTA 络合滴定法(参照《森林土壤分析方法》(LY/T 1210-1275-1999))。

### 1.3 数据处理

养分元素的年吸收量通过林分生产力及不同器

官养分元素含量推算所得;养分归还量为凋落物年分解归还土壤的养分量;年存留量=年吸收量-年归还量;养分贮存量为林分不同器官养分元素累积量;养分利用系数为吸收量与贮存量的比值;循环系数为归还量与吸收量的比值;周转时间为养分元素经历一个循环周期所需的时间,由养分的总贮存量除以归还量。

采用一元方差分析法对不同类型毛竹林观测变量差异进行显著性检验,采用 LSD 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 毛竹林养分元素分布格局

**2.1.1 乔木层养分元素分布** 3 种林分 N、P、K、Ca、Mg 5 种养分元素累积量的排列顺序为  $\text{I} > \text{II} > \text{III}$ ,其中林分 I 和 II 之间的差异未达到显著水平,但均显著高于林分 III 的养分累积量(表 2)。反映了毛竹纯林和竹阔混交林具有较高的生产力,养分累积量显著高于竹针混交林。3 种类型毛竹林 5 种养分元素累积量的排列顺序均为  $\text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{P}$ ,乔木层累积较多的 N、K 元素,较少的 P 元素。5 种养分元素在不同类型林分中的累积量存在一定的差异,林分 I 与林分 II 之间 5 种养分元素的差异均未达到显著水平,但林分 I 中的 N、P、K、Mg 的累积量显著或极显著高于林分 III 的累积量,Ca 元素累积量的差异未达到显著水平,但 5 种元素合计累积量达到了显著水平。

**2.1.2 灌木层养分元素分布** 灌木层 N、P、K、Ca、Mg 5 种养分元素累积量的排列顺序为  $\text{III} > \text{I} > \text{II}$ ,其

表2 不同类型毛竹林乔木层养分分布 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Tab.2 Nutrient distribution in tree layer of different bamboo forest types

林分类型	树种	N	P	K	Ca	Mg	合计
I	毛竹	376.31±37.30 a	31.94±3.06 a	182.83±17.19 A	80.92±7.69a	120.18±11.52 Aa	792.18±76.76 a
II	毛竹	333.43±34.46	29.34±3.13	183.01±18.22	74.50±7.90	109.48±11.56	729.76±75.27
	木荷	3.89±1.36	1.62±0.56	1.80±0.64	15.53±5.03	4.29±1.43	27.13±9.02
	合计	337.33±35.82 a	30.97±3.69 a	184.82±18.85 A	90.04±12.93 a	113.78±12.98 Aa	756.94±84.27 a
III	毛竹	248.30±8.48	20.07±0.93	123.04±5.47	54.47±2.07	80.35±2.97	526.23±19.92
	杉木	54.22±19.22	4.06±1.42	29.10±10.25	24.67±8.54	9.64±3.35	121.69±42.78
	合计	302.52±17.09 ab	24.13±1.28 ab	152.14±9.53 B	79.14±7.78 a	89.99± <sup>3.62</sup> <sub>ABb</sub>	647.92±39.30 b

同列字母相同表示差异不显著,其中大写字母  $P < 0.01$ ,小写字母为  $P < 0.05$ 。字母项为林分 I、II、III 之间方差分析及多重比较分析结果,采用 LSD 法。下同。

中林分 I 和 III 的累积量差异未达到显著水平,但均极显著高于林分 II 的累积量(表 3)。3 种林分中 5 种元素的排列顺序为  $\text{Ca} > \text{K} > \text{N} > \text{Mg} > \text{P}$ ,与乔木层中 5 种元素的累积量排列顺序不尽相同,其中灌木层中 K 的累积量高于 N 的累积量,灌木层植被与乔木层植被对养分吸收具有一定的互补性,这可能是不同植物所处的生态位不同造成的。3 种林分灌木层养分元素累积量表现出叶最高,枝次之,根最少的特征,毛竹林进行劈草作业,在增加林地养分归还方面具有积极的作用。

**2.1.3 草本层养分元素分布格局** 草本层 N、P、K、Ca、Mg 的累积量排列顺序为  $\text{III} > \text{I} > \text{II}$ (表 4),与灌木层 5 种养分元素累积量的排列顺序相同,分别为  $(20.64 \pm 1.85)$ 、 $(18.85 \pm 2.02)$  和  $(16.46 \pm 1.10)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,林分 II 5 种元素累积量显著低于林分 III 的累积量,林分 I 和 III 之间的差异不明显。草本层叶的养分累积量显著高于根累积量,5 种元素叶的排列顺序为  $\text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{N} > \text{P}$ ,根的为  $\text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{N} > \text{P}$ ,草本层累积较多 K 元素,其次为 Ca、Mg 元素,P 元素最少。

**2.1.4 凋落物层养分元素分布** 3 种林分凋落物层 N、P、K、Ca、Mg 5 种元素累积量的排列顺序为  $\text{II} > \text{I} > \text{III}$ (表 5),分别为  $(73.74 \pm 3.21)$ 、 $(68.63 \pm 7.17)$  和  $(40.88 \pm 6.69)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,林分 I 和 II 元素累积量极显著高于林分 III 的累积量,林分 II 5 种元素累积量与林分 I 的累积量差异也达到显著水平。竹阔混交林凋落物养分元素累积量最大,具有较高的养分归还能力。毛竹纯林 N 元素累积量最少,Mg 元素累积量最多;竹阔混交林 N 元素累积量最大,P 元素累积量最少;竹针混交林 Mg 元素累积量最多,P 元素累积量最少,混交经营可以提高凋落物层 N 的累积量,降低 P 的累积量。

**2.1.5 土壤层养分元素分布** 3 种类型林分土壤 0~60 cm 土层 N、P、K、Ca、Mg 5 种元素总累积量的排列顺序为  $\text{II} > \text{I} > \text{III}$ ,其中林分 I 与 II 的养分贮量差异未达到显著水平,但均极显著高于林分 III 的养分贮量(表 6),林分 II 具有较高生产力的同时,其土壤养分库的贮量最高,反映了竹阔混交经营立地生产潜力较大。3 种类型林分 N 累积量均表现为 0~20、40~60 cm 土层累积量较高,而 20~40 cm 土层

表3 不同类型毛竹林灌木层养分分布 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Tab.3 Nutrient distribution in shrub layer of different bamboo forest types

灌木组分	林分类型	养分元素累积质量					合计
		N	P	K	Ca	Mg	
枝	I	0.77±0.09 A	0.18±0.02 A	4.28±0.33 A	5.78±0.14 A	0.70±0.11 A	11.71±0.69 A
	II	0.54±0.02 B	0.12±0.02 B	2.63±0.28 B	4.33±0.35 B	0.83±0.04 A	8.45±0.71 B
	III	1.19±0.08 C	0.28±0.01 C	2.75±0.19 B	8.09±0.40 C	0.97±0.12 A	13.28±0.80 A
叶	I	1.45±0.10 A	0.19±0.01 A	5.92±0.45 A	8.77±0.21 A	1.40±0.23 A	17.73±1.00 A
	II	1.02±0.02 B	0.13±0.01 B	3.64±0.38 B	6.57±0.53 B	1.66±0.08 A	13.02±1.02 B
	III	2.27±0.08 C	0.29±0.01 C	3.81±0.46 B	12.28±0.60 C	1.93±0.23 A	20.58±1.38 A
根	I	0.99±0.07 A	0.20±0.01 A	4.07±0.31 A	3.65±0.09 A	2.10±0.34 A	11.01±0.82 A
	II	0.69±0.01 B	0.14±0.01 B	2.50±0.26 B	2.74±0.22 B	2.49±0.12 A	8.56±0.62 B
	III	1.54±0.06 C	0.32±0.01 C	2.62±0.18 B	5.11±0.25 C	2.90±0.35 A	12.49±0.85 A
合计	I	3.21±0.23 A	0.57±0.03 A	14.28±1.09 A	18.20±0.44 A	4.21±0.68 A	40.47±0.29 A
	II	2.25±0.05 B	0.40±0.04 B	8.78±0.93 B	13.65±1.11 B	4.98±0.24 A	30.06±2.37 B
	III	5.00±0.18 C	0.89±0.02 C	9.18±0.63 B	25.48±1.25 C	5.80±0.70 A	46.35±2.77 A

表 4 不同类型毛竹林草本层养分分布 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Tab. 4 Nutrient distribution in grass layer of different bamboo forest types

林分类型	叶						根						总计
	N	P	K	Ca	Mg	合计	N	P	K	Ca	Mg	合计	
I	1.20±0.08	0.32±0.02	7.66±0.59	1.72±0.04	1.52±0.25	12.42±0.98 A	0.42±0.07	0.08±0.01	2.33±0.38	0.42±0.07	3.19±0.51	6.44±1.04 a	18.86±2.02 ab
	0.84±0.02	0.22±0.02	4.71±0.50	1.29±0.10	1.79±0.09	8.85±0.73 B	0.49±0.02	0.10±0.00	2.75±0.14	0.49±0.02	3.77±0.18	7.60±0.37 ab	16.45±1.10a
III	1.87±0.07	0.50±0.01	4.93±0.34	2.41±0.12	2.09±0.25	11.80±0.79 A	0.57±0.07	0.11±0.01	3.20±0.39	0.58±0.07	4.39±0.53	8.85±1.06 b	20.65±1.85b

表 5 不同类型林分凋落物养分累积量及分布

Tab. 5 Litter nutrient accumulation and distribution in different type of forest

林分类型	N		P		K		Ca		Mg		合计 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
	累积量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	比例 (%)									
I	38.26±4.00	55.74	3.11±0.32	4.53	9.52±0.99	13.87	6.94±0.73	10.11	10.80±1.13	15.74	68.63±7.17 Aa
II	48.49±2.11	65.76	2.47±0.11	3.35	3.48±0.15	4.72	7.35±0.32	9.97	11.95±0.52	16.20	73.74±3.21 Ab
III	24.46±4.00	59.82	1.07±0.18	2.62	6.11±1.00	14.94	3.49±0.57	8.53	5.76±0.94	14.09	40.88±6.69 B

N 累积量较少的现象,毛竹根系主要分布在 0~40 cm 土层范围内,N 的消耗较多,通过化学肥料对土壤 N 素的补充主要发生在 0~20 cm 土层范围内,20~40 cm 土层 N 素补充的较少。在林分 I 和 II 中 P、K、Ca、Mg 元素的累积量随着土层的加深而增多的趋势,林分 III 中随着土层深度增加而降低的趋势,反映了林分 I 和 II 养分元素的流动主要集中在 0~40 cm 土层,而林分 III 的养分元素流动在 0~60 cm 均较活跃。毛竹纯林中引入阔叶树可能对表层土的养分累积量有重要影响,而引入针叶树种对深层土壤的养分累积有重要的影响。

**2.1.6 毛竹林养分元素累积与分布** 3 种类型毛竹林分 N、P、K、Ca、Mg 元素的总储量排列顺序为: II>I>III(表 7),林分 I 和 II 之间的差异不显著,但均极显著高于林分 III 的累积量。通过对上文不同

层次养分累积量分析表明土壤层养分累积量>乔木层>凋落物层>灌木层>草本层,其中养分累积量主要集中在土壤层中,林分 I、II 和 III 中土壤层养分累积量所占比例达到 99.36%、99.40% 和 99.28%,混交林土壤中的养分储量最高,具有较强的生产力维持能力。林分类型不同,累积的养分元素丰缺不同,N、Ca、Mg 的排列顺序为 II>I>III,P 的排列顺序为 III>II>I,K 的排列顺序为 I>II>III,竹阔混交林累积的 N、Ca、Mg 较多,竹针混交林 P 较多,毛竹纯林中的 P 较多。

## 2.2 毛竹林养分循环

**2.2.1 毛竹林主要养分生物循环量** 3 种林分 N、P、K、Ca、Mg 5 种养分元素年吸收量的排列顺序为 I>II>III;归还量的排列顺序为 II>III>I;留存量的排列顺序为 I>II>III,且其差异达到极显著水平

表 6 不同类型毛竹林土壤层养分分布 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Tab. 6 Nutrient distribution in soil layer of different bamboo forest types

林分类型	土层深度 (cm)	N	P	K	Ca	Mg	合计
I	0~20	2241.46±293.88	325.76±18.64	31692.81±3831.62	1038.92±67.94	1368.24±95.13	36667.19±3949.87
	20~40	1350.63±211.46	328.84±22.14	39674.25±1240.04	1123.07±37.45	1403.62±57.22	43880.41±1568.31
	40~60	1902.49±126.31	321.20±44.63	57908.09±3996.35	1263.79±39.09	1603.04±50.99	62998.61±4257.37
	合计	5494.58±631.65 A	975.80±85.41 Aa	129275.15±9068.02 A	3425.78±144.48 A	4374.90±203.34 A	143546.21±9775.55 A
II	0~20	2329.93±578.03	364.77±13.05	40066.94±4393.02	1335.46±67.30	1717.51±115.67	45814.61±5167.07
	20~40	1341.44±184.36	406.67±24.00	41969.25±3806.74	1391.72±45.66	1716.39±56.72	46825.47±4117.48
	40~60	2744.24±425.93	429.83±24.48	46254.94±1157.65	1412.17±51.74	1838.15±85.59	52679.33±1745.39
	合计	6415.61±1188.32 A	1201.27±61.53 Ab	128291.13±9357.42 A	4139.35±164.70 B	5272.05±257.98 B	145319.41±11029.94 A
III	0~20	1697.88±81.74	424.53±20.74	41381.07±5350.58	1284.73±57.53	1619.09±70.28	46407.30±5580.87
	20~40	1279.60±96.69	410.49±24.35	27216.05±1478.24	1268.95±59.14	1571.23±72.62	31746.32±1731.04
	40~60	1805.19±144.39	422.53±48.91	21222.98±4751.93	1159.75±40.93	1482.72±58.51	26093.17±5044.67
	合计	4782.67±322.82 B	1257.55±94.00 ABb	89820.10±11580.74 B	3713.43±157.60 AB	4673.04±201.41 A	104246.79±12356.58 B

表 7 不同类型毛竹林养分分布 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Tab. 7 Nutrient distribution of different bamboo ecosystems

林分类型	N	P	K	Ca	Mg	合计
I	5913.97±47.33 A	1011.82±6.82 A	129491.77±5103.07 A	3533.98±47.33 A	4514.79±33.94 A	144466.35±3177.36 A
II	6805.01±60.62 B	1235.43±20.46 B	128495.67±4904.98 A	4252.17±57.83 B	5408.32±57.92 B	146196.59±3577.60 A
III	5117.09±60.67 C	1284.25±57.88 B	89995.66±1157.97 B	3824.52±71.89 C	4781.06±201.53 A	105002.59±1646.94 B

表 8 不同类型毛竹林主要养分元素贮存量和循环量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Tab. 8 Nutrient storage capacity and circulation quantity of bamboo soil with different styles

林分类型	循环参数	N	P	K	Ca	Mg	合计
I	年吸	164.63 ±15.74 A	15.56±1.53 Aa	105.98±9.70 A	48.38 ±4.60 a	35.80 ±3.25 A	370.35±34.81 A
II	收量	153.72±14.63 B	14.08±1.24 Ab	99.25±9.27 B	48.58±3.33 a	32.68±3.60 B	348.32±32.07 B
III		123.48 ±4.25 C	11.53 ±0.43 B	77.65 ±3.56 C	49.25 ±2.05 a	28.31 ±1.49 C	290.22 ±11.78 C
I	年归	14.88±1.56 A	3.70±0.85 A	1.21±0.13 Aa	2.70±0.28 A	4.20±0.44 A	26.70±2.79 A
II	还量	42.56±2.45 B	4.79±0.28 A	1.68±0.10 Ab	5.94±0.34 B	9.87±0.57 B	64.84±3.73 B
III		33.33±6.86 C	10.55±2.17 B	2.33±0.48 B	4.57±0.94 C	7.69±1.58 C	58.47±12.04 C
I	年留	149.75±14.18 A	11.86±0.68 A	104.77±9.57 A	45.68±4.32 a	31.60±2.81 A	343.65±29.02 A
II	存量	111.16±7.77 B	9.29±1.46 B	97.57±8.22 B	42.64±3.66 b	22.81±1.76 B	283.48±21.77 B
III		90.15±2.20 C	0.98±0.15 C	75.32±3.46 C	44.68±1.71 ab	20.62±0.92 C	231.75±8.05 C

表 9 不同类型毛竹林主要养分循环参数

Tab. 9 Biological cycling characteristic parameters of nutrient element in bamboo forest

项目	林分类型	N	P	K	Ca	Mg	合计
利用系数	I	0.43±0.00 A	0.47 ±0.02 a	0.51 ±0.02 Aa	0.48 ±0.01 a	0.28 ±0.01 a	0.43 ±0.01 A
	II	0.45 ±0.00 B	0.44 ±0.01 a	0.49 ±0.02 Ab	0.46 ±0.01 a	0.26 ±0.00 b	0.43±0.02 A
	III	0.40 ±0.00 C	0.45±0.03 a	0.46±0.00 B	0.46 ±0.02 a	0.28 ±0.02 a	0.41±0.00 B
循环系数	I	0.09±0.00 A	0.24±0.01 A	0.01±0.00 Aa	0.06±0.00 A	0.12±0.00 A	0.07±0.00 A
	II	0.28±0.00 Ba	0.34±0.01 B	0.02±0.00 Ab	0.12±0.00 B	0.30±0.01 B	0.19±0.00 B
	III	0.27±0.00 Bb	0.92±0.06 C	0.03±0.00 B	0.09±0.01 C	0.27±0.00 C	0.20±0.01 C
周转时间 (a)	I	25.61±0.41 A	8.89±0.68 A	171.37±15.71 A	37.50±1.39 A	30.71±1.84 A	31.89±1.16 A
	II	8.01±0.08 B	6.62±0.29 B	120.00±8.60 B	17.75±0.78 B	12.60±0.42 B	12.39±0.26 B
	III	9.30±0.19 C	2.43±0.27 C	72.85±11.90 C	23.54±2.24 C	13.29±0.19 B	12.23±0.57 B

(表 8)。林分 I 年吸收量和留存量在 3 种林分中最大,归还量最少;林分 II 具有较大的吸收量、留存量和最大的归还量,进一步证实了竹阔混交林比毛竹纯林具有更好的养分归还能力。林分 III 5 种养分元素的吸收量、留存量最低,归还量较高,在低生产力水平上,林分对养分的消耗较少。

**2.2.2 生物循环参数** 林分 I 和 II 的养分利用系数极显著高于林分 III 的养分利用系数(表 9),林分维持高生产力需要消耗更多的养分元素。养分元素周转时间的排列顺序为 I > II > III,其中林分 II 和林分 III 5 种养分元素周转时间均极显著低于林分 I 的周转时间,混交经营可以加速养分元素的周转,养分归还速度较快,消耗的土壤养分元素相对较少。3 种林分养分循环系数的排列顺序为 III > II > I,其差异达到极显著水平,林分 III 和 II 养分归还能力强于

林分 I 的养分归还能力,土壤养分消耗较少,自肥能力较强。3 种林分不同种类养分循环系数排列顺序不同,N、Ca、Mg 养分循环系数排列顺序为 II > III > I, P、K 养分循环系数的排列顺序为 III > II > I,毛竹纯林比混交林消耗的 N、P、K、Ca、Mg 最多。

### 3 讨论

毛竹林不同层次 N、P、K、Ca、Mg 5 种元素的排列顺序为土壤层 > 乔木层 > 凋落物层 > 灌木层 > 草本层,其中土壤层养分累积量占养分总累积量 99% 以上,与川西 34 年生云杉人工林土壤养分库所占比例相似(99.43%),但绝对值明显低于云杉林的 210493.2  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (刘兴良等,2001),反映了毛竹林地养分贮量较低,竹林持续地力的保持需要增加土壤养分贮量。3 种林分类型土壤中养分元素贮量

的排列顺序均为  $K > N > P$ , 吸收量的排列顺序为  $N > K > P$ , 南方土壤通常  $K$  含量较高, 但是  $N$ 、 $P$  较少(刘长娥和杨永兴, 2008), 竹林地及时进行  $N$  和  $P$  素的补充十分重要。3 种类型林分土壤层、凋落物层的排列顺序为  $II > I > III$ , 凋落物含量与养分归还量密切相关, 占养分归还总量的大部分(刘文飞等, 2009), 在小尺度上调落物归还速度主要受到凋落物质量(Köchy & Wilson, 1997), 即凋落物本身化学组分和凋落物组成(Shaw & Harte, 2001; William *et al.*, 2008) 的影响, 竹阔混交林凋落物总量较多, 且凋落物组类型多于毛竹纯林, 可以加速凋落物的分解速度, 进而对林分养分循环产生重要的影响(盛炜彤等, 2002; 杨玉盛和陈光水, 2002)。竹阔混交林较高养分归还量和土壤养分贮量, 使竹阔混交林具有较强的持续养分供给能力。

毛竹林具有较大的年吸收量和较小的养分归还量, 年存留量较高。在所调查的 3 种类型毛竹林年吸收量远大于亚热带常见树种马尾松、湿地松和杉木的吸收量; 归还量低于马尾松、湿地松和杉木; 留存量远高于马尾松、湿地松(田大伦等, 2004) 和杉木存留量(项文华等, 2002)。毛竹林较大的年吸收量、较小的归还量和较高的年存留量决定了毛竹林具有较大的养分利用系数、较小的循环系数和较长的周转时间, 决定了毛竹林生产力的维持比其他常见树种需要更多的养分元素投入和更科学的管理。在 3 种类型毛竹林中, 竹阔混交林  $N$ 、 $Ca$ 、 $Mg$  的循环系数最高, 竹针混交林次之, 毛竹纯林最差; 周转时间与循环系数的变化趋势相反。 $P$ 、 $K$  的排列顺序由大到小为竹针混交林、竹阔混交林和毛竹纯林。 $N$  是林分维持生产力最重要的元素,  $Ca$  的流失与土壤酸度密切相关(吴飞华等, 2010), 竹阔混交林主要养分元素具有较大的循环强度, 较短的周转时间, 同时竹阔混交林具有较高的生产力, 是一种较好的经营模式。

## 参考文献

方敏瑜, 傅懋毅, 谢锦忠. 1998. 竹林养分循环规律研究: III. 毛竹纯林竹秆流及其养分输入. 竹子研究汇刊, **17**(2): 59-64.

冯宗炜, 王效科, 吴刚. 1999. 中国森林生态系统的生物量 and 生产力. 北京: 科学出版社.

傅懋毅, 曹根群, 方敏瑜. 1992. 竹林养分循环: II. 毛竹林内降水的养分输入及其林地径流的养分输出. 林业科学研究, **5**(5): 497-505.

傅懋毅, 方敏瑜. 1989. 竹林养分循环: I. 毛竹纯林的叶凋

落物及其分解. 林业科学研究, **2**(3): 207-213.

高志勤. 2006. 不同毛竹纯林枯落物养分含量和贮量的比较. 南京林业大学学报(自然科学版), **30**(3): 51-54.

黄启堂, 陈爱玲, 贺军. 2006. 不同毛竹纯林枯落物养分含量和贮量的比较. 福建林学院学报, **25**(4): 299-302.

江泽慧. 2002. 世界竹藤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社.

刘长娥, 杨永兴. 2008. 九段沙芦苇湿地生态系统  $N$ 、 $P$ 、 $K$  的循环特征. 生态学杂志, **27**(3): 418-424.

刘文飞, 樊后保, 高春芬, 等. 2009. 连续年龄序列桉树人工林凋落物量及养分通量. 生态学杂志, **28**(10): 1928-1934.

刘兴良, 宿以明, 向成华, 等. 2001. 川西云杉人工林养分含量、贮量及分配的研究. 林业科学, **37**(4): 10-18.

盛炜彤, 范少辉. 2002. 杉木及其人工林自身特性对长期立地生产力的影响. 林业科学研究, **15**(6): 629-636.

田大伦, 项文华, 闫文德, 等. 2004. 马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征. 生态学报, **24**(10): 2207-2210.

吴飞华, 刘廷武, 裴真明, 等. 2010. 酸雨引起森林生态系统钙流失研究进展. 生态学报, **30**(4): 1081-1088.

吴家森, 周国模, 钱新标, 等. 2005a. 不同经营类型毛竹林营养元素的空间分布. 浙江林学院学报, **22**(5): 486-489.

吴家森, 周国模, 徐秋芳, 等. 2005b. 不同年份毛竹营养元素的空间分布及与土壤养分的关系. 林业科学, **41**(3): 171-173.

项文华, 田大伦, 闫文德. 2002. 第 2 代杉木林速生阶段营养元素的空间分布特征和生物循环. 林业科学, **38**(2): 2-8.

徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 2003. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究. 水土保持学报, **17**(4): 15-17, 21.

杨玉盛, 陈光水. 2002. 杉木观光木混交林和杉木纯林群落细根生产力、分布及养分归还. 应用与环境生物学报, **8**(3): 223-233.

叶镜中, 姜志林, 周本琳, 等. 1984. 福建省洋口林场杉木林生物量的年变化动态. 南京林学院学报, (4): 1-9.

张希彪, 上官周平. 2005. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征. 生态学报, **25**(3): 527-537.

周本智, 傅懋毅. 2004. 竹林地下鞭根系统研究进展. 林业科学研究, **17**(4): 533-540.

Cornwell WK, Cornelissen JH, Amatangelo K, *et al.* 2008. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. *Ecology Letters*, **11**: 1065-1071.

Köchy M, Wilson SD. 1997. Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and mixed-grass prairie. *Ecology*, **78**: 732-739.

Shanmughavel P, Francis K. 1997. Balance and turnover of nutrients in a bamboo plantation (*Bambusa bambos*) of different ages. *Biology and Fertility of Soils*, **25**: 69-74.

Shaw MR, Harte J. 2001. Control of litter decomposition in a subalpine meadow-sagebrush steppe ecotone under climate change. *Ecological Applications*, **11**: 1206-1223.

作者简介 刘广路,男,1975 年生,博士。主要从事竹林培育和竹林生态方面的研究。E-mail: liuguanglu@icbr.ac.cn  
责任编辑 王伟