DOI: 10.5846/stxb201803200550
夏传格,宁晨,罗赵慧,邓湘雯,闫文德,田大伦.不同年龄毛竹林养分分布及生物循环特征.生态学报,2020,40(11):3715-3725.
Xia C G,Ning C,Luo Z H,Deng X W,Yan W D,Tian D L.Nutrient distribution and biochemical cycling in different aged moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) ecosystems.Acta Ecologica Sinica,2020,40(11):3715-3725.

不同年龄毛竹林养分分布及生物循环特征

夏传格[1],宁　晨[1,2,*],罗赵慧[3],邓湘雯[1,2],闫文德[1,2],田大伦[1,2]
1 中南林业科技大学, 长沙　410004
2 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙　410004
3 生态环境部华南环境科学研究所, 广州　510535

摘要:毛竹林是我国重要的森林资源类型,由于片面追求经济效益,许多竹阔混交林被改造为纯林,造成其土壤质量和立地生产力不同程度退化。因此研究毛竹林生产力和营养元素循环特征,对保持毛竹林持续生产力具有重要意义。以湖南桃江县桃花江林场毛竹林作为研究对象,将同一年龄毛竹的株数占据 60%以上林地的标准划分各年龄段毛竹林,并研究不同年龄(1 年,3 年和 5 年)毛竹林生态系统营养元素含量、积累和分布格局以及生物循环特征。结果表明:竹林层营养元素平均含量均以 N 和 K 含量最高,Ca 和 P 较低,各营养元素在毛竹不同器官的含量存在差异且随竹龄变化而变化;因毛竹林年龄不同,死地被物各层次的营养元素含量不同,并且同一年龄毛竹林亦随层次不同而异;土壤层 N、P、K 元素随着土层深度的增加而递减,Ca 则随土层深度增加而增加。竹林层营养元素总积累量为 338.31—1104.72 kg/hm^2,死地被物层为 37.69—46.94 kg/hm^2,土壤层为 56952.67—63783.22 kg/hm^2。不同年龄毛竹林生态系统营养元素年吸收量为 237.41—338.3 kg/hm^2,归还量为 20.84—86.47 kg/hm^2,存留量为 216.57—267.05 kg/hm^2,利用系数为 0.27—1.00,循环系数为 0.09—0.25,周转时间在 6.17—40.33 年之间。

关键词:毛竹林;养分含量;养分积累量;养分生物循环;桃江县

Nutrient distribution and biochemical cycling in different aged moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) ecosystems

XIA Chuange[1],NING Chen[1,2,*],LUO Zhaohui[3],DENG Xiangwen[1,2],YAN Wende[1,2],TIAN Dalun[1,2]
1 *Central South University of Forestry and Technology*, *Changsha* 410004, *China*
2 *South Forestry Ecological Applied Technology National Engineering Laboratory*, *Changsha* 410004,*China*
3 *South China Institute of Environmental Sciences*, *Guangzhou* 510535, *China*

Abstract: Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) is an important forest resource in southern China. The conversion from mixed bamboo and broad-leaf forest to pure bamboo forest may cause a potential degradation of soil fertility in pure bamboo plantations. Therefore, understanding the productivity and biochemical cycling process of bamboo forests is vital for maintaining the sustainability. In this study, we investigated nutrient allocation and biochemical cycling patterns in different aged (1 year, 3 years, and 5 years) bamboo forests. The age category was based on the age distribution of the individual bamboo in one forest site, which accounted for more than 50%—60% of the total individuals. Our results showed that the mean tissue concentrations of N and K were the highest in all the bamboo forests, whereas Ca and P were the lowest. The nutrient concentrations also varied in different organs nested in different aged stands of bamboo. Additionally, the nutrient contents varied in different dead floor layer among different aged stands or even in a same aged stand. N, P, and K in soil decreased with soil depth, while Ca content increased. The accumulated nutrients ranged 338.31—1104.72 kg/hm^2 in the

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201104009);长沙市科技局创新平台项目(K1003009-61)
收稿日期:2018-03-20;　　**网络出版日期**:2020-03-31
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ningchen0059@163.com

whole forest ecosystem, 37.69—46.94 kg/hm^2 in dead floor, and 56952.67—63783.22 kg/hm^2 in soil layers, respectively. The nutrient cycling index ranged from 237.41—338.30 kg hm^{-2} a^{-1} for annual absorption, 20.84—86.47 kg hm^{-2} a^{-1} for annual return, and 216.57—267.05 kg hm^{-2} a^{-1} for annual retention, respectively. The nutrients utilization coefficient was 0.27—1.00, 0.09—0.25 for cycling coefficient, and 6.17—40.33 years for recycling period, respectively. Our results indicated that bamboo forests had relatively high absorption, low return, and high retention of nutrient elements on an annual basis. Thus, more nutrients are needed and advanced scientific management is required in order to maintain a long-term productivity of bamboo forests comparing to other common forest types in this area.

Key Words: moso bamboo; nutrient content; nutrient accumulation; nutrient biological cycle; Taojiang County

毛竹(*Phyllostachys pubescens*)是我国重要的竹林资源类型,占竹林面积的70%,具有生长快、产量高、用途广和可持续更新等特点[1]。近年来,毛竹林的种植面积不断扩大,国家需求量逐年增加,其用途也突破了传统利用领域,已形成一个由资源培育到加工利用及出口创汇的新兴产业,并已成为山区农民脱贫致富奔小康的有效途径之一[2-3]。同时,毛竹林还具有良好的固碳释氧、保持水土等生态功能,其生态服务功能在我国森林生态系统中占有重要地位,在维系和促进当地社会经济发展和环境保护中发挥巨大作用[4]。

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。随着毛竹林的长期纯林集约经营,造成其土壤质量和立地生产力不同程度退化,生物多样性和生态系统的稳定性也逐渐降低[5-6]。因此,毛竹林纯林的地力维持,已经成为一个亟待解决的问题[5]。森林生物量和生产力是森林生态系统结构和功能最基本的特征之一[7],对研究物质生产和养分循环具有重要的科学价值[8]。而养分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[9]。研究毛竹林生物量、生产力和营养元素循环特征,对保持毛竹林持续生产力具有重要作用。

有关竹林系统养分循环的研究已有报道,主要集中在竹林系统与水文特征相互影响的养分输入和输出[10-11],地上部分的养分积累与分布[12-13],凋落物养分含量与贮量[14],不同年龄营养器官养分分布与土壤环境的关系[15]。这些研究成果,为全面的掌握毛竹林营养状况,科学的毛竹林养分管理,长期的维持毛竹林地生产力基础的奠定作出了重要贡献。然而,不同于一般树木的生长,竹类在抽枝展叶形成幼竹后,即从量的生长转为质的生长,并随年龄的增加,生物量和养分含量逐渐累积,并呈现出不同的养分循环和利用模式[16-18]。目前关于不同年龄毛竹林养分分布及养分循环功能过程的研究还不够系统,与其他森林类型相比,仍需加强基础性研究。本研究以湖南桃江县桃花江林场的毛竹林作为研究对象,对不同年龄毛竹林生态系统的养分分布格局和生物循环特征进行了研究,旨为深入研究集约经营毛竹纯林立地长期生产力的维持提供基础数据,并为毛竹林生态经营和可持续发展提供科学依据。

1 研究地概况

桃江县被称为中国十大“竹子之乡”,位于湖南省中部偏北(111°36′E—112°19′E,28°13′N—28°41′N),居资江中下游,处于雪峰山余脉,向洞庭湖平原过渡的环湖丘岗地带。属中亚热带大陆性季风湿润气候,年均温16.6 ℃,年均降雨量1400—2000 mm,土壤为山地红壤,且土层浅薄。植被为中亚热带常绿阔叶林带,自然植被主要有杉木(*Cunninghamia Lanceolata* (Lamb.) Hook)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)、茶树(*Camellia sinensis* Kuntze)、甜槠(*Castanopsis eyrei* (Champ.ex Benth.) Tuch)等。研究区设在桃江县桃花江林场。桃花江林场建于1958年,为国有林场,林场林地总面积1390 hm^2,竹林面积1000 hm^2,毛竹总数300余万株,为其支柱产业之一。

2 研究方法

2.1 标准地设置和调查

在林场选取立地条件基本一致,生长健康的毛竹林地设置标准地。新造竹林在定植三年内,于每年的

5 月和 7 月进行锄草和松土,对成年的竹林每年于夏季进行钩梢,在冬季进行挖山。依据对毛竹年龄的判别方法,以及在询问林场员工毛竹栽种时间的基础上,分别在 1 年生,3 年生或 5 年生的毛竹株数占据了 60%以上的竹林中设置 20 m × 33.3 m 的标准地各 6 块,共 18 块。在各标准地内进行调查测定(只调查测定 1 年生、3 年生或 5 年生毛竹,其他少数年龄的毛竹,不计算其内),记录毛竹株数、胸径、株高等因子,经计算后分别建立 1 年生、3 年生和 5 年生为主的毛竹林标准地(表 1),并在各不同年龄标准地内选出 1 年生、3 年生或 5 年生平均木 1 株,则 1 年生或 3 年生或 5 年生标准木各 6 株,共 18 株。

表 1　标准地竹林特征

Table 1　Characteristics of different aged *P. pubescens* sampling plots

年龄 Age/a	标准地数 Number of sample plots/块	林分密度 Stand density/(株/hm²)				平均胸径 Average diameter at breast height/cm	平均树高 Average height/m
		1 年生	3 年生	5 年生	合计		
1	6	1250 (17.33)	315 (76.24)	230 (73.74)	1795 (44.95)	11.06 (0.87)	10.14 (0.32)
3	6	263 (90.48)	1300 (102.60)	283 (86.12)	1846 (164.68)	9.13 (1.06)	9.01 (2.50)
5	6	500 (197.48)	600 (262.68)	2400 (450.78)	3500 (723.88)	9.80 (0.85)	10.90 (0.91)

括号内数据为标准差

2.2　生物量测定

毛竹地上各器官生物量采用“分层切割法”测定。将标准木以根竿交界处为界限,以 1 m 为区分段,分层截取竹竿、竹枝、竹叶,称取鲜重,并分别取样 1.0 kg;地下根系采用挖掘法,在标准竹周围 0.5 m × 0.5 m 范围内的土层挖出竹蔸、竹鞭和鞭根(分侧根和须根),挖到无根为止,用水进行细心漂洗,再在水中用筛子筛后捡出所有根系,风干其表面水,称取鲜重,各取样 1.0 kg。然后置于实验室 80 ℃烘箱,烘干至恒重,求得含水率后,推算出毛竹单株生物量。

选择在标准地内同龄毛竹相对集中的地方,布设死地被物层样方(1 m × 1 m)各 3 个,共设样方 54 个。记录各样方内灌木和草本植物种类后,采用“样方收获法”测定其生物量。死地被物层分为未分解、半分解和已分解层,分别称其鲜重,并各取样 1.0 kg。所有样品都带回实验室,放置 80 ℃烘箱,烘干至恒重,求得含水率后,推算出死地被物层生物量。

2.3　土壤样品采集

在未挖取标准竹和采集土样之前,用 100 cm^3环刀取各层原状土,测定土壤容重,并用小铝盒取土测定土样含水率。

在标准地挖取标准竹的同时,在标准竹周围分别布设 3 个采样点,按照 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 三个土层,分别取样 500 g,共采得土样 162 个。除去夹杂石砾和根系等杂物,风干后再用 20 目和 100 目过筛备用。

2.4　土壤理化性质分析

土壤容重—环刀法;土壤和植物 N—半微量凯氏法, P—比色法, K—火焰光度法, Ca、Mg—原子吸收分光光度计(岛津 AA7000)测定

2.5　数据计算与分析

毛竹生产力估算:依据生物量和年龄可推算出毛竹林的生产力[17]。由于竹类植物均为爆发式生长,在出笋后不到一年里各器官已构建成型,以后其生物量就趋于恒量。也就是说当计算竹类生产力时,竹类的年龄越大,常常导致推算出的平均生产力反而越低[18]。而鉴于 1 年生毛竹已换叶,叶量不计入生产力,3 年生毛竹叶只换过一次,则以 2 年的叶量作为生产力,5 年生毛竹叶换过 2 次,则以 3 年叶量作为生产力。凡 1 年生、3 年生和 5 年生毛竹叶没有计入生产力的叶量,而均将其计入归还量内。

各养分累积量计算公式为：

林分营养元素积累量(kg/hm^2)= 毛竹单株生物量（6 株标准竹生物量的平均值)×林分中的株数(仅为 1 年生或 3 年生或 5 年生毛竹的株数)×营养元素含量；

死地被物层营养元素积累量(kg/hm^2)=(未分解层生物量×营养元素含量)+(半分解层生物量×营养元素含量)+(已分解层生物量×营养元素含量)；

土壤层营养元素积累量(kg/hm^2) = 土壤容重(g/cm^3)×土层深度(cm)×营养元素含量；营养元素总贮存量(kg/hm^2)= 营养元素各层积累量相加；

营养元素年吸收量($kg\ hm^{-2}\ a^{-1}$)= 年存留量+年归还量；

营养元素年归还量($kg\ hm^{-2}\ a^{-1}$)= 年凋落物量×营养元素含量；

营养元素年存留量($kg\ hm^{-2}\ a^{-1}$)= 年吸收量-年归还量；

营养元素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(a)为营养元素总贮量 ÷ 归还量。

所有数据均采用 Excel 2010 和 SPSS 13.0 软件进行处理和分析。数据统计采用单因子方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)，对不同年龄毛竹林的营养元素积累量进行比较，显著性水平设定为 $a = 0.05$。

3 结果与分析

3.1 毛竹林营养元素含量与贮量

由表 2 可知，毛竹不同年龄立竹叶片中营养元素含量不仅明显高于其他器官，而且变化较大。其中 N 含量最高，为 22.242—27.726 g/kg，K 次之为 13.527—18.728 g/kg，再次为 Mg 含量 8.588—11.036 g/kg。Ca 和 P 含量相对较低，分别为 2.388—3.023 g/kg 和 1.342—2.247 g/kg。

不同年龄立竹各器官 N、P、K 的加权平均含量为 1 年生毛竹至 3 年生毛竹呈上升的趋势，而生长到 5 年时却表现出下降状态，如 N 元素，1 年生毛竹各器官平均含量为 8.188 g/kg，3 年生毛竹上升为 10.568 g/kg，至 5 年生毛竹却下降为 9.501 g/kg。但 Ca 和 Mg 平均含量却随竹龄的增大而增加，其平均含量分别为 0.84 g/kg(1 年生)<1.281 g/kg(3 年生)<1.625 g/kg(5 年生)和 3.822 g/kg(1 年生)<5.098 g/kg(3 年生)<5.314 g/kg(5 年生)。

从图 1 中可以看出，毛竹林中营养元素总积累量为 338.305—1104.715 kg/hm^2，随着年龄的增大而增加，营养元素积累量增加。从不同营养元素的总积累量来看，N、K 的积累量最高，分别为 117.553—374.695 kg/hm^2、114.023—287.846 kg/hm^2，其次是 Mg(58.645—212.533 kg/hm^2)和 Ca(32.168—189.443 kg/hm^2)，以 P(15.916—40.198 kg/hm^2)最低。

毛竹林的地上部分各器官营养元素积累量的分配比率总体表现为竿(53.37%—65.31%)>叶(13.60%—21.06%)>枝(9.99%—12.97%)。而地下部分各器官营养元素积累量的分配率大小顺序却表现为，1 年生毛竹林为蔸(5.86%)>鞭(5.08%)>侧根(1.15%)>须根(0.51%)、3 年生毛竹林为蔸(5.27%)>须根(1.70%)>鞭(1.43%)>侧根(1.37%)、5 年生毛竹林则为蔸(5.03%)>须根(4.85%)>侧根(2.71%)>鞭(1.69%)。

3.2 死地被物层营养元素含量和贮量

由表 3 所示，不同年龄毛竹林中死地被物层营养元素含量均以 N 和 Mg 元素的含量最高，分别为 7.606—15.697 g/kg 和 3.400—7.907 g/kg，其次为 Ca 和 K 元素含量为 2.385—6.033 g/kg 和 0.950—6.921 g/kg，以 P 元素含量最低，为 0.399—1.345 g/kg，且呈现出因毛竹林年龄不同，死地被物各层次的营养元素含量不同，并且在同一林龄毛竹林中亦随层次的不同而异。

表 2　不同年龄毛竹营养元素含量/(g/kg)

Table 2　Nutrient concentrations of organs in different aged *P. pubescens*

年龄 Age/a	元素 Elements	竿 Stem	枝 Branch	叶 Leaf	须根 Fibril root	竹鞭 Rhizomes	侧根 Lateral root	竹蔸 Stump	加权均值 Average
1	N	3.736a (0.700)	6.058a (0.571)	22.24a (8.808)	5.723a (1.072)	7.234a (0.311)	5.328a (0.925)	6.994a (2.448)	8.188B (3.468)
	P	0.691b (0.375)	0.713b (0.323)	1.376b (0.685)	0.701b (0.437)	0.962b (0.277)	0.753b (0.183)	1.231b (0.718)	0.917A (0.328)
	K	4.834a (0.187)	4.852c (2.142)	13.527c (4.965)	4.055c (2.420)	5.909c (0.637)	2.083c (0.283)	7.812a (1.835)	6.513B (1.745)
	Ca	2.059c (0.715)	0.136b (0.126)	2.388b (1.332)	0.296b (0.154)	0.156b (0.023)	0.434b (0.080)	0.408b (0.246)	0.84B (0.15)
	Mg	2.21c (0.446)	3.05d (0.720)	8.588c (1.484)	3.414c (1.269)	3.181e (0.486)	3.761d (0.390)	13.436b (0.877)	3.822B (0.789)
3	N	5.630a (1.176)	8.834a (5.813)	27.726a (1.990)	7.278a (0.946)	8.070a (0.513)	6.243a (1.237)	10.194a (1.127)	10.568A (1.257)
	P	0.658b (0.346)	0.995b (0.347)	2.247b (0.557)	0.750b (0.261)	0.690b (0.139)	0.852b (0.365)	1.259b (0.594)	1.064A (0.43)
	K	11.277c (5.507)	8.454a (2.834)	18.728c (2.793)	5.821c (2.188)	8.300a (4.298)	5.147a (2.141)	13.821a (6.622)	10.221A (3.632)
	Ca	3.889ab (0.232)	0.488b (0.304)	2.769b (0.397)	0.462b (0.167)	0.293b (0.131)	0.546b (0.125)	0.523b (0.294)	1.281A (0.196)
	Mg	2.218ab (0.484)	4.239b (1.049)	11.036d (1.316)	5.446c (0.985)	5.668a (1.957)	3.288c (0.997)	3.789b (1.327)	5.098A (1.587)
5	N	4.561a (0.738)	6.003a (1.003)	26.044a (2.779)	7.341a (1.665)	7.941a (2.800)	7.229a (1.524)	7.387a (2.056)	9.501AB (3.016)
	P	0.638b (0.154)	0.685b (0.242)	1.342b (0.509)	0.692b (0.206)	0.57b (0.273)	1.018b (0.179)	0.905b (0.466)	0.836B (0.106)
	K	4.959a (2.395)	3.512c (1.699)	13.727c (6.193)	3.674c (2.309)	3.706c (1.247)	2.763c (0.808)	4.054c (1.973)	5.199C (1.823)
	Ca	4.619a (0.461)	1.074b (0.670)	3.203b (0.841)	0.619b (0.397)	0.386b (0.151)	0.696b (0.342)	0.775b (0.125)	1.625A (0.455)
	Mg	2.806c (1.303)	3.754c (0.647)	10.901d (2.549)	4.449c (1.180)	4.698c (0.526)	6.246a (0.763)	4.165c (1.122)	5.314A (1.123)

括号内数据为标准差;同列不同大写字母表示不同年龄平均养分含量差异显著 (P <0.05)

表 3　毛竹林死地被物层营养元素含量(g/kg)

Table 3　Nutrient concentrations of litter layers in different aged *P. pubescens*

年龄 Age/a	层次 Layer	N	P	K	Ca	Mg
1	未分解	12.953aA (7.692)	1.345aA (0.279)	6.921aA (9.567)	5.327aA (1.423)	7.225aA (5.713)
	半分解	8.487aA (3.587)	0.606bA (0.319)	2.436bA (1.859)	4.871aA (2.245)	5.979abA (1.283)
	已分解	7.606aB (2.352)	0.399bA (0.282)	0.950cA (0.047)	4.509aA (4.925)	3.400bB (1.129)
3	未分解	9.421aA (3.147)	0.653aA (0.303)	1.441bB (0.582)	6.033aA (0.768)	7.907aA (1.619)
	半分解	13.393aA (3.789)	0.634aA (0.213)	3.916aA (4.735)	5.420aA (1.765)	6.228aA (1.733)
	已分解	8.517aB (2.762)	0.683aA (0.238)	1.707bA (1.926)	5.442aA (1.188)	3.847bB (1.147)
5	未分解	15.697aA (1.535)	0.994aA (0.159)	1.274aB (0.462)	5.225aA (0.684)	6.325aA (0.332)
	半分解	15.649aA (0.845)	0.743aA (0.089)	1.815aA (0.278)	4.553aA (2.420)	5.935aA (0.093)
	已分解	14.739aA (2.738)	0.536aA (0.259)	1.128aA (0.092)	2.385bA (1.861)	4.891aA (0.482)

括号内数据为标准差;同列不同小写字母表示不同分解层养分差异显著(P<0.05);同列不同大写字母表示不同年龄同一分解层养分差异显著(P<0.05)

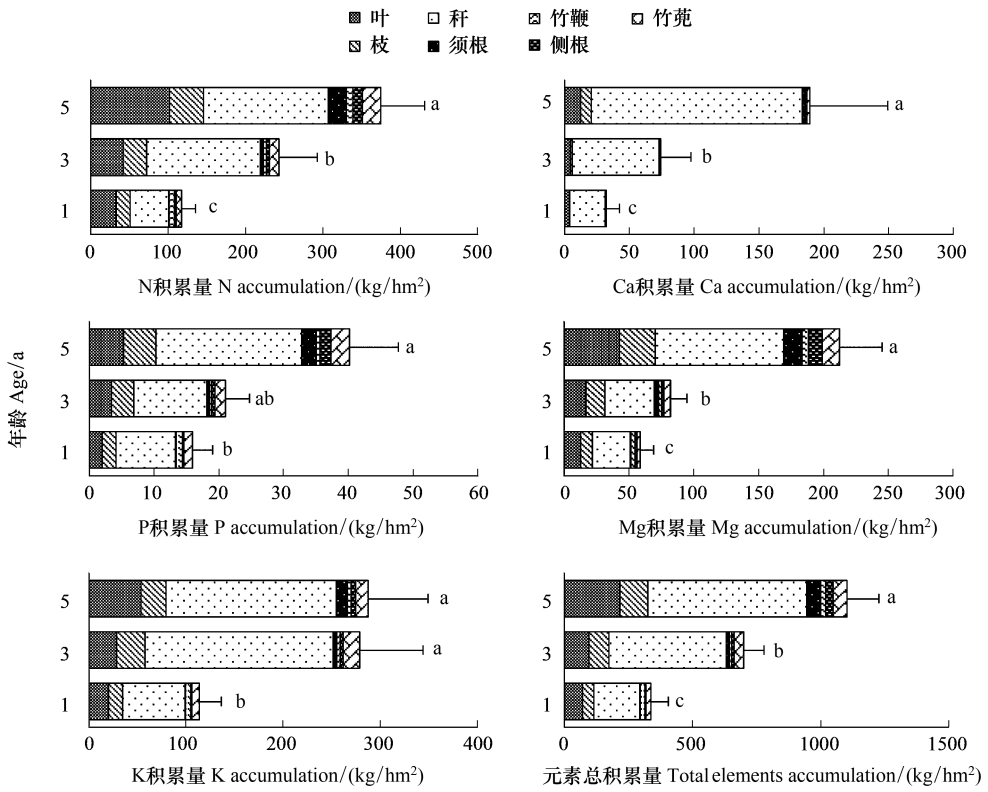

图 1 不同年龄毛竹各器官营养元素积累量变化

Fig.1 Nutrient accumulation of organs in different aged *P. pubescens*

图中数值为平均值±标准误差($n=6$);不同小写字母表示不同年龄毛竹总积累量之间有显著差异 ($P<0.05$)

从图 2 中看出,不同年龄毛竹林地死地物层中营养元素积累量以 N 为最多,达 14.678—26.036 kg/hm^2,其次为 Mg 8.447—10.325 kg/hm^2,P 最低,仅为 1.041—1.378 kg/hm^2。各林龄林地死地被物层营养元素总积累量为 37.685—46.939 kg/hm^2,这些营养元素是竹林有机质和矿质元素的重要来源,它们在保持地力,提高森林生产力中起着特别重要的作用。

3.3 毛竹林地土壤营养元素含量与贮量

表 4 列出了毛竹林土壤层营养元素含量情况。其中土壤 K 元素含量最高,Mg 次之,Ca 含量最低。各元素含量排序为:K>Mg>N>P>Ca。各元素含量在土壤层中呈垂直分布,随土壤深度增加而减小。从不同年龄毛竹林土壤元素均值分布看,P、Ca、Mg 元素含量随土层深度增加而逐渐减小;K 元素随土层深度增加而逐渐增加,说明在毛竹林土壤中 K 元素易被雨水淋溶而向下迁移;N 元素含量变化随土层深度增加并没有表现出一致的规律性,表明竹林土壤 N 元素被淋溶向下迁移不明显。

表 4 毛竹林土壤营养元素含量/(g/kg)

Table 4 Nutrient concentrations of soil layers in different aged *P. pubescens*

年龄 Age/a	土层 Soil depth/cm	N	P	K	Ca	Mg
1	0—20	1.63a	0.52a	3.61a	0.26a	2.79a
		(1.14)	(0.08)	(0.27)	(0.18)	(0.25)
	20—40	1.55a	0.48a	3.41a	0.30a	2.62a
		(1.09)	(0.08)	(0.19)	(0.21)	(0.34)
	40—60	1.07a	0.45a	2.9a	0.42a	2.64a
		(0.95)	(0.07)	(0.81)	(0.18)	(0.37)

续表

年龄 Age/a	土层 Soil depth/cm	N	P	K	Ca	Mg
	均值	1.42A	0.48A	3.31A	0.33A	2.68A
		(0.30)	(0.04)	(0.37)	(0.08)	(0.09)
3	0—20	1.98a	0.40a	4.12a	0.27a	2.48a
		(0.94)	(0.09)	(1.58)	(0.08)	(0.43)
	20—40	0.90b	0.39a	3.95a	0.33ab	2.59a
		(0.20)	(0.08)	(1.59)	(0.09)	(0.62)
	40—60	0.68b	0.38a	3.71a	0.4b	2.63a
		(0.15)	(0.08)	(1.62)	(0.11)	(0.72)
	均值	1.19A	0.39B	3.93B	0.33A	2.57A
		(0.70)	(0.01)	(0.21)	(0.06)	(0.08)
5	0—20	2.09a	0.41a	5.23a	0.20a	2.48a
		(0.40)	(0.06)	(0.98)	(0.12)	(0.24)
	20—40	1.55a	0.39a	5.01a	0.22a	2.15a
		(0.83)	(0.05)	(0.90)	(0.07)	(0.33)
	40—60	0.95a	0.35a	4.71a	0.26a	2.00a
		(0.62)	(0.06)	(0.77)	(0.04)	(0.44)
	均值	1.53A	0.38B	4.98C	0.23B	2.21B
		(0.57)	(0.03)	(0.26)	(0.03)	(0.25)

括号内数据表示标准差;同列不同小写字母表示同一年龄阶段不同层土壤养分差异显著($P<0.05$);同列不同大写字母表示不同年龄同一层土壤养分差异显著($P<0.05$)

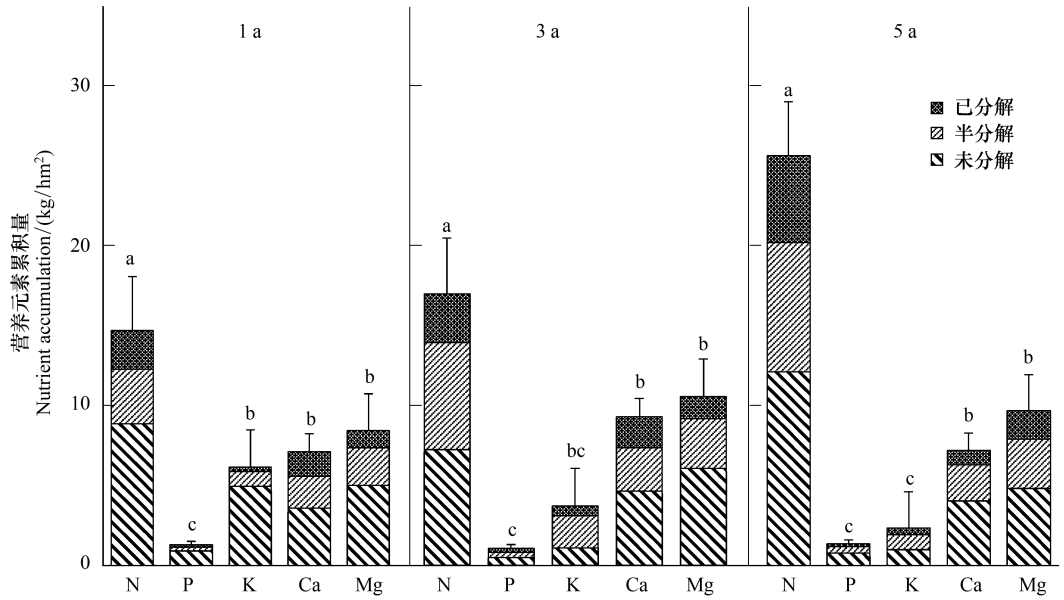

图 2　毛竹林死地被物层营养元素积累量

Fig.2　Nutrient accumulation of litter layers in different aged *P. pubescens*

图中数值为平均值±标准误差($n=18$);不同小写字母表示同一年龄不同养分元素总累积量之间有显著差异($P<0.05$)

从图 3 可以看出,各毛竹林土壤中 K 元素的贮量显著高于其他元素,其次为 Mg 元素的贮量,再次为 N 元素,以 Ca 元素最低。Ca 元素贮量在各年龄毛竹林土壤中差异不显著($P>0.05$),且呈现元素贮量随着土层的加深而增多的趋势。相反,N 元素贮量随着土层的加深而减少。P 和 Mg 元素在 1 年生毛竹林土壤中的平均贮量显著高于 3 年生和 5 年生毛竹林($P<0.05$),而 K 元素平均值在 5 年生毛竹林土壤中的贮量显著高于3 年

生和 1 年生毛竹林($P<0.05$)。

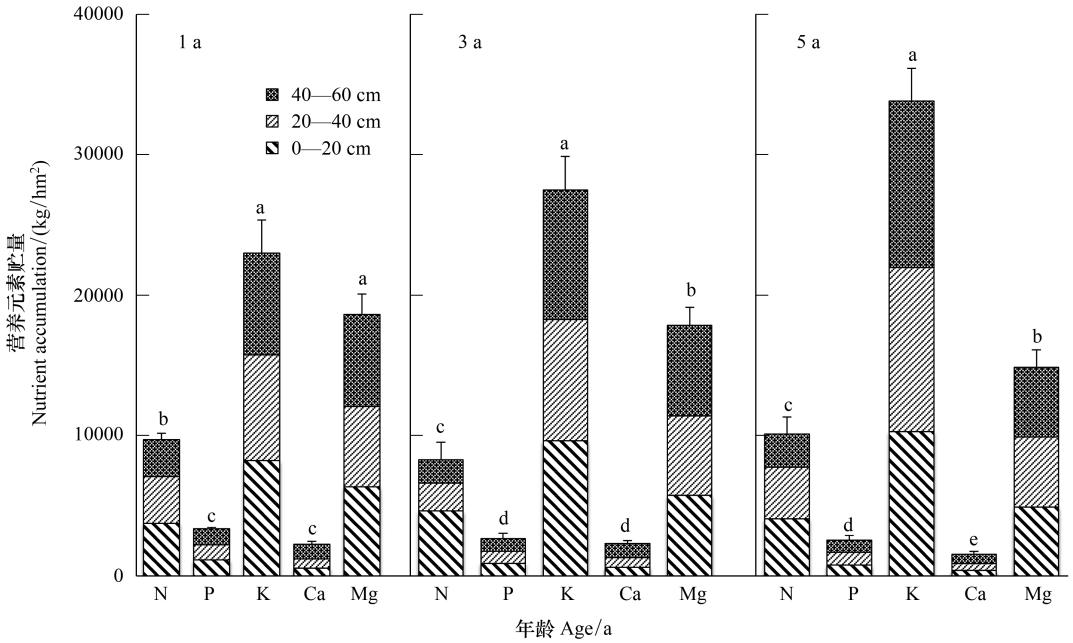

图 3 毛竹林土壤层营养元素贮量

Fig.3 Nutrient accumulation in soil layers in different aged *P. pubescens*

图中数值为平均值±标准误差($n=18$);不同小写字母表示同一年龄不同养分元素总累积量之间有显著差异($P<0.05$)

3.4 毛竹林生态系统营养元素的生物循环特征

由表 5 可知,毛竹林生态系统营养元素年吸收总量为 237.41—338.30 kg hm^{-2} a^{-1},其中 N 和 K 元素吸收量较大,分别占吸收量的 31.1%—37.6% 和 25.7%—41.8%。毛竹林总归还量在 20.84—86.47 kg hm^{-2} a^{-1}之间,归还量以 N 最多,其次是 K。年存留量为 216.57—267.05 kg hm^{-2} a^{-1},N 存留量占总存留量的 29.8%—33.9%,K 则占 26.1%—42.9%,P 存留量最低,仅占 3.3%—5.2%。可见,毛竹林养分元素生物循环的特征表现为:具有较大的年吸收量、较小的年归还量和较高的年存留量。

表 5 毛竹林生态系统营养元素生物循环/(kg hm^{-2} a^{-1})

Table 5 Biochemical cycling of nutrients in different aged *P. pubescens* ecosystem

林龄 Age/a	参数 Parameters	N	P	K	Ca	Mg	合计 Total
1	吸收量	117.552	15.916	114.023	32.168	58.645	338.304
	归还量	32.940	2.025	20.033	3.537	12.718	71.253
	存留量	84.612	13.891	93.990	28.631	45.927	267.051
3	吸收量	73.814	7.745	99.218	25.639	30.990	237.406
	归还量	9.242	0.749	6.243	0.923	3.679	20.836
	存留量	64.572	6.996	92.975	24.716	27.311	216.570
5	吸收量	115.723	10.141	79.065	42.904	59.578	307.411
	归还量	40.785	2.102	21.496	5.015	17.071	86.469
	存留量	74.938	8.039	57.569	37.889	42.507	220.942

从表 6 可以看出,毛竹林营养元素利用系数在 0.27—1.00 之间,而利用系数越小,则利用效率就高[19],5 年生毛竹林营养元素利用效率高于 3 年生毛竹林和 1 年生毛竹林,以 1 年生毛竹林的营养元素利用效率最低,表明 1 年生毛竹林维持高生产力需要消耗更多的养分元素。

养分循环系数越大,林木对土壤库营养元素的消耗就越小。从循环系数看,研究区毛竹林营养元素循环系数为 0.09—0.25(表 6)。从不同年龄的毛竹林对土壤营养元素的消耗看,3 年生毛竹林各元素的循环系数均高于 1 年生和 5 年生,可见,在毛竹生长初期或后期,林木对土壤库营养元素的消耗较小。在 3 年生毛竹林中,林木对 N 和 Mg 元素的消耗量小于其他元素。

1 年生毛竹林营养元素的周转期为 6.17 年,3 年生毛竹林为 40.33 年,5 年生毛竹林为 18.38 年。表明 3 年生毛竹林养分循环速率低,周转时间慢,消耗的土壤养分元素多。

综上所述,正是因为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,从维持毛竹林生产力说,毛竹林相比其他常见树种有需要投入更多的养分元素和更科学化的精细管理和经营。

表 6　毛竹林营养元素循环参数

Table 6　Biochemical cycling characteristic parameters of nutrients in different aged *P. pubescens* ecosystems

林龄 Age/a	参数 Parameters	N	P	K	Ca	Mg	平均值 Average
1	利用系数	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00 (0.00)
	循环系数	0.28	0.13	0.18	0.11	0.22	0.18 (0.07)
	周转时间 (a)	3.57	7.86	5.69	9.10	4.61	6.17 (2.28)
3	利用系数	0.30	0.37	0.36	0.35	0.38	0.35 (0.03)
	循环系数	0.13	0.10	0.06	0.04	0.12	0.09 (0.04)
	周转时间 (a)	26.35	28.02	44.68	80.33	22.27	40.33 (23.93)
5	利用系数	0.31	0.25	0.27	0.23	0.28	0.27 (0.03)
	循环系数	0.35	0.21	0.27	0.12	0.29	0.25 (0.09)
	周转时间 (a)	9.19	19.12	13.39	37.77	12.45	18.38 (11.42)

括号内数据为标准差

4　结论与讨论

4.1　毛竹林营养元素含量与贮量

研究表明各营养元素在毛竹不同器官的含量有明显的不同,而且各器官中营养元素的含量随着竹龄的变化而变化,其含量高低与器官的代谢活动和营养元素的特性有关[19]。

比较不同地区毛竹各组分营养元素含量可知,毛竹各组分中元素含量会随分布地理位置、立地条件和气候环境因子不同而存在差异。湖南桃江毛竹叶、竿、枝、鞭中 N 和 Mg 的含量明显高于其他地区[12,15,20],而叶中 P、K、Ca 含量分别低于浙江临安[12]、福建永安[15]和福建南靖[20];竿和鞭中 P 含量除低于福建永安外,N、K、Ca、Mg 含量均高于浙江临安和福建南靖;枝中 K 含量低于浙江临安[12]外,其余元素含量均高于福建永安和福建南靖。

再将毛竹各组分元素含量与同一地区其他植物进行比较,结果表明,桃江毛竹叶中 N、P、K、Mg 含量、地下鞭和根中 K 的含量及毛竹各组分中 Mg 的含量均比杉木[21]、马尾松[22]和樟树[23]叶中对应元素高。可见,这些元素在毛竹器官中的代谢功能很旺盛。Ca 在毛竹叶中的含量却远低于杉木叶[21]和樟树叶[23],仅与马尾松叶[22]接近,毛竹竿中 Ca 含量却高于杉木干[21]、马尾松干[22]和樟树干[23],表明毛竹竿中固定 Ca 较多。

比较其他地区毛竹林营养元素(N、P、K 、Ca、Mg)积累量可知,本研究 1 年生毛竹林营养元素积累量 338.31 kg/hm^{2}低于闽南毛竹林营养元素积累量[20],但 3 年生和 5 年生毛竹林营养元素积累量高于闽南毛竹林的营养元素积累量[20];闽西北毛竹林营养元素积累量[5]高于本研究区 1 年生和 3 年生毛竹林的营养元素积累量,而低于 5 年生毛竹林的营养元素积累量;湖南省会同毛竹林营养元素积累量为 1310.25 kg/hm^2[24],均比本研究区毛竹林的营养元素积累量高。可见,毛竹林营养元素积累量与毛竹林生物量和其营养元素含量有关。

若与其他竹类植物的营养元素积累量进行比较,可以看出,青皮竹林(*Bambusa textilis*)[25]营养元素积累

量低于本研究区 5 年生毛竹林;绿竹林(*Dendrocalamopsis oldhami*)[26]营养元素积累量与本研究 3 年生营养元素积累量接近,而高于 1 年生毛竹林营养元素积累量,低于 5 年生毛竹林营养元素积累量。这表明,同为竹类植物,种类不同,其营养元素积累量仍与生物量和营养元素含量存在相关关系。

4.2 土壤层营养元素含量和贮量

土壤是森林植被存在与发展的物质基础,影响土壤的形成和发育[27]。林木生长所需的养分主要来自于土壤,因此土壤养分高低对林木生长发育起着关键作用[28],是毛竹林生长发育的必要条件。

桃江毛竹林地土壤 N 含量处于 0.68—2.09 g/kg 之间,这一数值与周云娥等[29]研究结果接近,而低于丁正亮等[2]、黄承标等[30]和罗治建等[31]研究结果,高于刘广路等[5]和黄启堂等[32]等研究结果。本研究中土壤 P 含量与黄作舟[33]研究结果近似,而低于黄承标等[30]和丁正亮等[2]研究结果,高于黄启堂等[32]和刘广路等[5]研究结果。土壤含 K 含量在 2.90—5.23 g/kg 之间,远低于全国土壤的含 K 量[34]以及刘广路等[5]和黄启堂等[32]对研究结果,但高于周云娥等[29]研究结果。土壤 Ca、Mg 含量分别为 0.20—0.42 g/kg、2.00—2.79 g/kg,低于长江以南红壤区的 Ca、Mg 含量[35],但在华中红壤 Ca、Mg 含量范围内[35]。

桃江毛竹林土层中 N 和 P 贮量明显高于福建永安毛竹林土层[15],但 K 的贮量却远低于该地区毛竹林土层,呈现出数量级的差异。K 能增加植物细胞的膨压,使细胞富有弹性,能更好地调节气孔的张开和关闭,有利于光合作用的顺利进行,因而土壤中的 K 与植物叶中的 N 和 P 密切相关[36]。不同抚育方式也会影响土壤中的 K 的贮量。严晨[37]建议对毛竹林的抚育方式上,应大力推广劈草抚育,谨慎采用化学除草和浅锄抚育,杜绝深翻抚育,以促进毛竹林生态系统持续性生产力和稳定性的提高。

4.3 毛竹林营养元素循环特征

本研究中不同年龄毛竹林营养元素存留量在 216.57—267.05 kg hm^{-2} a^{-1}之间,低于福建省永安市集约经营的毛竹纯林[5],但高于广西马尾松林和湿地松林[22]以及会同杉木林营养元素的年存留量[21]。表明营养元素在不同类型森林中的存留量是有所差异的。

本研究中毛竹林的年吸收量要远大于亚热带常见的树种马尾松、湿地松和杉木的吸收量;归还量要低于马尾松、湿地松和杉木;存留量远高于马尾松、湿地松和杉木[38-39],且与闽西北不同类型毛竹林养分元素生物循环特征一致[4]。可见,毛竹林养分元素生物循环的特征表现为:具有较大的年吸收量、较小的年归还量和较高的年存留量。

与其他毛竹林类型和森林类型养分元素生物循环的比较发现,1 年生毛竹林 P、K 年循环总量高于闽西北毛竹林等其他森林[5],N 年循环总量仅低于闽西北竹阔和竹针混交林,而高于马尾松、杉木和湿地松林[23-24,40],Mg 年循环总量只低于 5 年生毛竹林却高于马尾松、杉木和湿地松林,Ca 年循环总量除稍高于 3 年生毛竹林外,均低于马尾松、杉木和湿地松林;3 年生毛竹林除 K、Mg 年循环总量稍微高外,其余 N、P、Ca 年循环总量均较低于马尾松、杉木和湿地松林;5 年生毛竹林 Mg 年循环总量均高于马尾松、杉木和湿地松林,N 年循环总量稍低于闽西北竹阔、竹针混交林[5]和 1 年生毛竹林,P、K 循环总量除低于闽西北毛竹纯林、竹阔和竹针混交林[5]外,而高于马尾松、杉木和湿地松林,Ca 循环总量相对较低,与 16 年生湿地松林[24]和第 2 代杉木林[40]的循环总量差异较大。

研究区毛竹林营养元素循环系数为 0.09—0.25,高于闽西北不同类型毛竹林[5],但低于马尾松林和湿地松林[39]。表明毛竹林比马尾松和湿地松需要的养分多,维持地力的能力较差,消耗的养分多。尤其是毛竹纯林自肥的能力差[41]。据徐秋芳等[40]研究表明,毛竹消耗土壤养分很高,有的加上挖笋又带走了大量营养,仅靠毛竹本身的生物循环将不能满足林地土壤自肥的需求,因而应适时适当对土壤施肥以补充营养的不足,特别是施用有机肥十分重要。

营养元素的周转期是植物与土壤之间元素的生物循环,是以凋落物作为中间转移的一个过渡环节。本研究中 1 年生、3 年生和 5 年生毛竹林营养元素的周转期分别为 6.17 年 40.33 年和 18.38 年。1 年生和 5 年生毛竹林营养元素的循环周转时间比闽西北毛竹纯林短,而 3 年生毛竹林养分周转期却比闽西北毛竹纯林长[5]。

表明 3 年生毛竹林养分循环速率低,周转时间慢,消耗的土壤养分元素多。

综上所述,正是因为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,从维持毛竹林生产力说,毛竹林相比其他常见树种有需要投入更多的养分元素和更科学化的精细管理和经营[5]。

参考文献(References):

[1] 张文元, 范少辉, 苏文会, 漆良华, 周金民. 毛竹成竹期各器官营养元素动态变化规律. 安徽农业大学, 2009, 37(36): 18227-18232.
[2] 丁正亮, 王雷, 刘西军, 徐小牛. 安徽霍山毛竹林生产力及其土壤养分的特点. 经济林研究, 2011, 29(1): 72-76.
[3] 蓝斌, 何东进, 吴承祯, 洪伟. 闽北毛竹林生态系统能量分配规律的研究. 应用生态学报, 2000, 11(2): 193-195.
[4] 王兵, 魏江, 胡文. 中国灌木林-经济林-竹林的生态系统服务功能评估. 生态学报, 2011, 31(7): 1936-1945.
[5] 刘广路, 范少辉, 漆良华, 肖复明, 黄永南. 闽西北不同类型毛竹林养分分布及生物循环特征. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2155-2161.
[6] 陈双林, 杨伟真. 我国毛竹人工林地力衰退成因分析. 林业科技开发, 2002, 16(5): 3-6.
[7] 杜虎, 曾馥平, 王克林, 宋同清, 温远光, 李春干, 彭晚霞, 梁宏温, 朱宏光, 曾昭霞. 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化. 生态学报, 2014, 34(10): 2712-2724.
[8] Garkoti S C. Estimates of biomass and primary productivity in a high-altitude maple forest of the west central Himalayas. Ecological Research, 2008, 23(1): 41-49.
[9] 张希彪, 上官周平. 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, 2005, 25(3): 527-537.
[10] 方敏瑜, 傅懋毅, 谢锦忠. 竹林养分循环规律研究: III. 毛竹纯林竹秆流及其养分输入. 竹子研究会刊, 1998, 17(2): 59-64.
[11] 傅懋毅, 曹银群, 方敏瑜, 谢锦忠. 竹林养分循环: II 毛竹林内降水的养分输入及其林地迳流的养分输出. 林业科学研究, 1992, 5(5): 497-505.
[12] 吴家森, 周国模, 钱新标, 杨芳, 吴学敏. 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, 2005, 22(5): 486-489.
[13] 吴家森, 周国模, 徐秋芳, 杨芳. 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, 2005, 41(3): 171-173.
[14] 高志勤. 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, 2006, 30(3): 51-54.
[15] 刘广路, 范少辉, 官凤英, 杜满意, 黄永南. 不同年龄毛竹营养器官主要养分元素分布及与土壤环境的关系. 林业科学研究, 2010, 23(2): 252-258.
[16] Shanmughavel P, Francis K. Balance and turnover of nutrients in a bamboo plantation (*Bambusa bambos*) of different ages. Biology and Fertility of Soils, 1997, 25(1): 69-74.
[17] 范少辉, 刘广路, 苏文会, 杜满义, 吴继林. 闽西北不同类型毛竹林生物量分布格局. 安徽农业大学学报, 2011, 38(6): 842-847.
[18] 郝云庆, 江洪, 向成华, 马元丹, 金静, 余树全. 天目山毛竹种群生物量结构. 四川林业科技, 2010, 31(4): 29-33.
[19] 陈灵芝, 黄建辉, 严昌荣. 中国森林生态系统养分循环. 北京: 气象出版社, 1997.
[20] 李振基, 林鹏. 闽南毛竹林几种元素的累积和分配. 应用生态学报, 1995, 6(S1): 9-13.
[21] 田大伦, 康文星, 文仕知. 杉木林生态系统学. 北京: 科学出版社, 2003.
[22] 田大伦. 马尾松和湿地松生态系统结构与功能. 北京: 科学出版社, 2005.
[23] 高述超. 长沙城市森林生态系统养分循环与碳平衡研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
[24] 陈灵芝, 黄建辉, 严昌荣. 中国森林生态系统养分循环. 北京: 气象出版社, 1997.
[25] 叶晶, 葛高波, 应雨骐, 项婷婷, 陶立华, 吴家森. 青皮竹地上部营养元素的吸收、积累和分配特性研究. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 164-170.
[26] 叶晶, 陶立华, 柯和佳, 项婷婷, 吴家森. 绿竹地上部营养元素的吸收、积累和分配特性. 浙江农林大学学报, 2015, 32(4): 545-550.
[27] Peri P L, Gargaglione V, Pastur G M. Above- and belowground nutrients storage and biomass accumulation in marginal *Nothofagus antarctica* forests in Southern Patagonia. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2502-2511.
[28] Van Heerwaarden L M, Toet S, Aerts R. Nitrogen and phosphorus resorption efficiency and proficiency in six sub-arctic bog species after 4 years of nitrogen fertilization. Journal of Ecology, 2003, 91(6): 1060-1070.
[29] 周云娥, 毛美红, 朱志建. 湖州市不同竹林土壤理化性质比较分析. 竹子研究汇刊, 2008, 27(3): 31-36.
[30] 黄承标, 尹华田, 王凌晖, 杨怀刚, 孙成荣, 李保平. 毛竹林不同经营管理措施对土壤理化性质的影响. 竹子研究汇刊, 2010, 29(3): 35-41.
[31] 罗治建, 陈卫文, 鲁剑巍, 陈防. 鄂南地区毛竹林的土壤肥力. 东北林业大学学报, 2003, 31(3): 19-23.
[32] 黄启堂, 陈爱玲, 贺军. 不同毛竹林林地土壤理化性质特征比较. 福建林学院学报, 2006, 26(4): 299-302.
[33] 黄作舟. 闽南不同类型毛竹林地土壤分析. 河北林业科技, 2011, (2): 18-20.
[34] 李志洪, 赵兰坡, 窦森. 土壤学. 北京: 化学工业出版社, 2005: 80-86.
[35] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1978: 508-509.
[36] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. Ecology, 2000, 81(1): 275-280.
[37] 严晨. 不同抚育方式对毛竹林土壤化学性质的影响. 世界竹藤通讯, 2009, 7(2): 32-34.
[38] 田大伦, 项文化, 闫文德. 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, 2004, 24(10): 2207-2210.
[39] 项文化, 田大伦, 闫文德, 康文星, 方海波. 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, 2002, 38(2): 2-8.
[40] 徐秋芳, 姜培坤, 董敦义. 毛竹林地土壤养分动态研究. 竹子研究汇刊, 2000, 19(4): 46-49.
[41] 张贻荣. 武夷山不同毛竹林类型毛竹生长与土壤养分研究. 防护林科技, 2010, (5): 38-40.