

不同林龄针阔混交林土壤生态化学计量特征^{*}

冼伟光¹ 周 丽² 唐洪辉² 陈伟光¹ 苏木荣¹
盘李军¹ 张卫强²

(1. 广东省佛山市云勇生态林养护中心, 广东 佛山 528518; 2. 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 以南亚热带不同林龄(分别为10~11 a、7~9 a和3~5 a生)针阔混交林土壤作为研究对象,对土壤有机碳、全氮、全磷和全钾储量及其生态化学计量特征进行了研究。结果表明,不同林龄针阔混交林土壤有机质碳储量(106.72~136.61 t·hm⁻²)、全氮储量(9.17~11.19 t·hm⁻²)、全磷储量(4.07~6.77 t·hm⁻²)及全钾储量(321.85~370.59 t·hm⁻²)均随林龄的增加表现为先降低后升高的趋势。C/N、C/P、C/K、N/P、N/K和P/K在不同林龄针阔混交林间差异不显著($P>0.05$)。土壤有机碳储量与土壤全氮储量、C/N、C/P、C/K、N/P和N/K呈极显著正相关($P<0.01$),且与土壤全氮储量相关系数最高,表现出相对一致的变化规律;土壤全氮储量与C/P、C/K、N/P、N/K极显著正相关($P<0.01$);土壤全磷储量与C/P、N/P呈极显著负相关($P<0.01$),而与C/N、P/K呈极显著正相关($P<0.01$)。研究结果可为南亚热带人工林的科学管理提供参考。

关键词 生态化学计量特征;针阔混交林;林龄;南亚热带

中图分类号:S714.2 文献标识码:A 文章编号:1006-4427(2015)01-0001-06

Soil Ecological Stoichiometry of Conifer-Broadleaved Plantations of Different Age in Southern Subtropical Region

XIAN Weiguang¹ ZHOU Li² TANG Honghui² CHEN Weiguang¹ SU Murong¹
PAN Lijun¹ ZHANG Weiqiang²

(1. Maintenance Center for Yunyong Ecological Forest of Foshan, Foshan, Guangdong 528518, China;

2. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract The objective of this study was to clarify the soil stoichiometric characteristics of conifer-broadleaved plantations (CBP) with different age in Southern subtropical region. The soil in different CBP were selected to measure soil organic carbon (C), total nitrogen (N), total phosphorous (P), and total potassium (K) storages. The results indicated that the storage of soil organic C, total N, total P and total K were 106.72—136.61 t·hm⁻², 9.17—11.19 t·hm⁻², 4.07—6.77 t·hm⁻² and 321.85—370.59 t·hm⁻², respectively, and storage of four kinds of elements first decreased and then increased with increasing forest age. Soil C/N, C/P, C/K, N/P, N/K, P/K ratio were relatively stable, and these were no significant difference ($P>0.05$) among different CBP. The soil organic carbon storage was significantly positively correlated with total N storage, C/N, C/P, C/K, N/P and N/K ($P<0.01$), and organic carbon storage of soil had an important impact on total N storage, and showed relatively consistent variation. The total nitrogen storage of soil was significantly positively correlated with C/P, C/K, N/P and N/K ($P<0.01$). The total phosphorous storage of soil was significantly negatively correlated with C/P and N/P ($P<0.01$), as well as positively correlated with C/N and P/K ($P<0.01$). The results could provide

^{*} 基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201404301)、广东省林业科技创新专项项目(2010KJCX013-02)、广东省佛山市生态景观林培育技术与推广示范和国家林业局广东东江源森林生态站联合资助。

第一作者:冼伟光(1982-),男,本科,主要从事森林经营研究,E-mail:guang0520@163.com。

通信作者:张卫强(1976-),男,博士,高级工程师,主要从事森林水文与植物生理生态研究,E-mail:happyzwq@sina.com。

a scientific basis for sustainable management of plantation.

Key words soil ecological stoichiometry; conifer-broadleaved plantation; forest age; southern subtropical region

生态化学计量学是近年来新兴的研究领域,依据生态学和化学计量学的基本原理,是分析多重化学元素的质量平衡及其对生态交互作用影响的一种理论和科学^[1-2]。目前,我国学者对生态化学计量特征的研究主要集中于植物组织的元素生态化学计量学特征^[3-7],而较少关注土壤生态化学计量特征^[1,8-11]。土壤养分含量是衡量土壤肥沃程度的量化指标,也是植物生长发育的基础,影响着土壤生态功能的发挥^[8],研究其生态化学计量学特征,可以揭示养分的可获得性,对于认识 C、N、P 元素的循环和平衡机制具有重要意义^[12]。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方亚热带地区主要的造林树种之一,近几十年来,由于经济利益的驱动,大面积天然林被具有高经济价值的杉木人工林所取代^[13]。然而,长期连栽杉木却导致地力下降^[14]、生物多样性减少^[15]等生态问题的发生。为了减少杉木人工纯林所带来的不利影响,目前大量采用乡土阔叶树种对杉木林进行改造,但人工改造后的针阔混交林生态系统的土壤生态化学计量特征研究还比较缺乏^[13]。本研究探讨了我国南亚热带地区不同林龄针阔混交林土壤生态化学计量特征,以期为森林生态系统的科学管理提供参考。

1 研究区概况

研究区位于广东省佛山市高明区云勇林场,地理坐标为 22°43'N,112°40'E,属南亚热带湿润季风气候,水热资源丰富,年平均气温 22.0℃,年平均降水量 2 000 mm,集中在 4—8 月,有明显的干湿季之分。地势属丘陵地带,土层深厚,土壤为花岗岩发育的酸性赤红壤,有机质含量较为丰富^[16-17]。

2 研究方法

2002—2011 年云勇林场先后对杉木纯林进行皆伐改造,引入常见阔叶树种造林,造林方式一致,造林密度均为 1 650 株/hm²,经过多年改造,形成了针阔混交林。根据林龄将针阔混交林分为 3 种,针阔混交林 I、II 和 III 的林龄分别为 10~11 a、7~9 a 和 3~5 a,各林分的地形地貌、海拔、母岩、土壤类型等立地条件基本一致,避免造林前土地利用类型的差异对土壤养分产生影响,样地概况见参考文献[18]。每种试验林有 4 个样地重复,在每个研究样地内分别设计 4 个土壤养分调查样地。

2.1 土壤理化性质测定

2013 年 8 月,在每个调查样地内选择有代表性的部位,分别挖取 3 个土壤剖面,在 4 个层次(0~25、25~50、50~75 和 75~100 cm)分别用 100 cm³ 环刀和密封袋取样,每层采用 3 个环刀和 3 个密封袋取土。土壤容重采用环刀法测定,土壤有机碳、全氮、全磷和全钾分别采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法、开氏—蒸馏滴定法、氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法、氢氧化钠熔融—火焰原子吸收分光光度法测定。

2.2 土壤有机碳、氮、磷和钾储量计算

土壤有机碳、N、P 和 K 储量的计算公式为:

$$S_i = C_i \cdot B_i \cdot D_i \cdot (1 - G_i) \dots\dots\dots (1)$$

式(1)中, S_i 为第*i*层土壤有机碳、全氮、全磷和全钾储量(t·hm⁻²); C_i 为第*i*层土壤有机碳、N、P 和 K 含量(%); B_i 、 D_i 和 G_i 分别为土壤容重(g·cm⁻³)、土层厚度(m)和砾石含量(%)。

2.3 数据分析

运用 Excel 将数据进行整理和预处理,利用 SPSS 16.0 进行单因素方差(one-way ANOVA),采用 Duncan 新复极差法比较各指标在各观测样地的差异性,显著性水平设为 α=0.05。采用双变量相关分析法计算各项理化指标相互之间的 Pearson 相关系数。

3 结果与分析

3.1 针阔混交林土壤有机碳、全 N、全 P 和全 K 储量

从图 1 可知,在 0 ~ 100 cm 土层内,不同林龄土壤有机质碳储量为 106.72 ~ 136.61 t·hm⁻²,全氮储量介于 9.17 ~ 11.19 t·hm⁻²之间,针阔混交林Ⅲ土壤有机碳储量和全氮储量显著高于针阔混交林Ⅱ($P < 0.05$),而与针阔混交林Ⅰ差异不显著($P > 0.05$),说明有机碳储量和全氮储量随林龄的增加呈现出先降低后升高的趋势,表明杉木林改造前期一定程度上降低了土壤有机碳和全氮的含量,随着树种生长、林下植被恢复及凋落物增加,凋落物归还和根系及其分泌物增加了碳和氮素的输入量。土壤有机碳储量和全氮储量随土层深度的增加呈下降的趋势,这主要因为表层土壤受外界环境因素及植被枯落物养分归还的影响,导致养分首先在土壤表层密集,然后再随水或者其他介质向下层迁移扩散^[10]。0 ~ 25 cm 土层有机碳储量和全氮储量与土壤其它土层相比为最高,分别占整个土层土壤有机碳储量的 36.62% ~ 40.81% 和全氮储量的 36.07% ~ 37.84%。

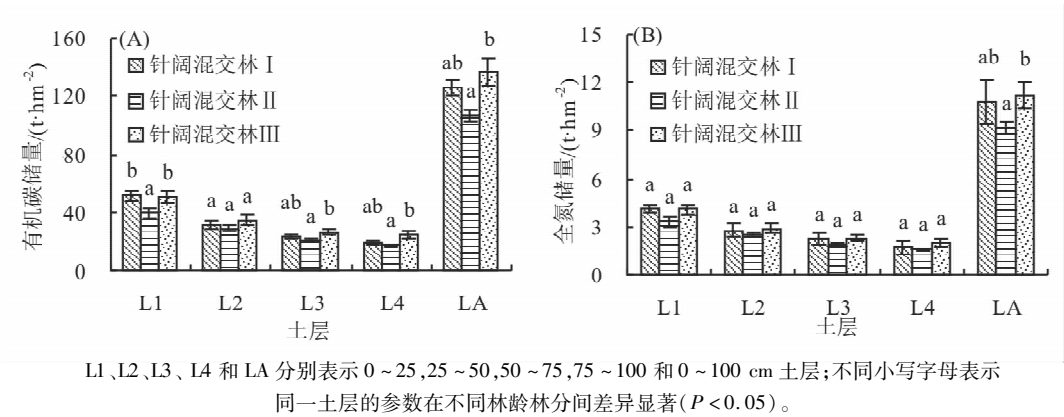


图 1 不同林龄针阔混交林各土层土壤有机碳 (A) 和全氮 (B) 储量

从图 2 可知,在 0 ~ 100 cm 土层内,不同林龄土壤全磷储量为 4.07 ~ 6.77 t·hm⁻²,全钾储量为 321.85 ~ 370.59 t·hm⁻²,不同林龄针阔混交林间土壤全磷储量和全钾储量差异不显著($P > 0.05$),土壤全磷储量表现为针阔混交林Ⅰ > 针阔混交林Ⅲ > 针阔混交林Ⅱ,而全钾储量表现为针阔混交林Ⅲ > 针阔混交林Ⅰ > 针阔混交林Ⅱ。土壤全磷储量和全钾储量随土层深度的增加表现出先增加后降低的趋势,但各土层间全磷储量和全钾储量差异不大。

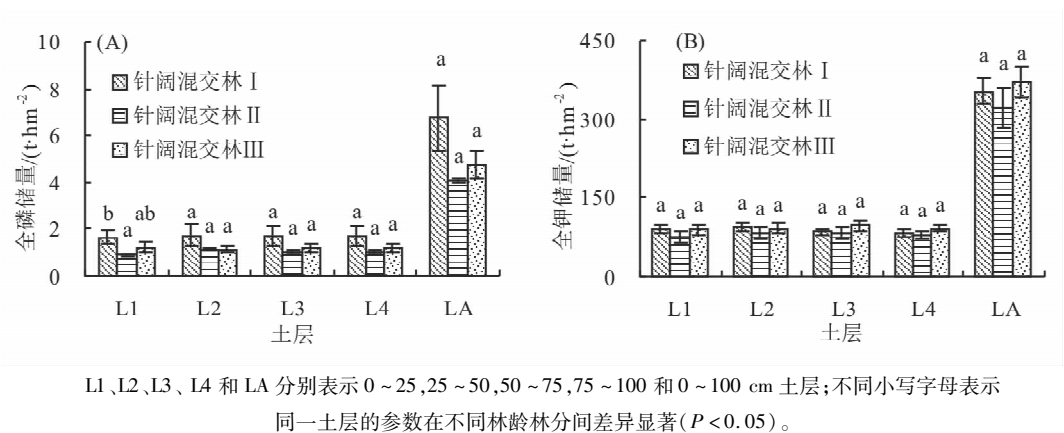


图 2 不同林龄针阔混交林各土层土壤全磷 (A) 和全钾 (B) 储量

3.2 土壤有机 C、全 N、全 P、全 K 的生态化学计量特征

土壤 C:N:P 比是有机质或其他成分中的 C 素与 N 素、P 素总质量的比值,是土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标^[11]。碳氮比是土壤氮素矿化能力的标志,低碳氮比利于微生物分解,提高氮的矿化速率^[19]。从表 1 可知,在 0 ~ 100 cm 土层内,土壤化学计量特征参数在不同林龄针阔混交林间差异不显著

($P>0.05$)。而相同林分的不同土层间土壤化学计量特征参数的变化规律为:随着土层深度的增加,不同林龄针阔混交林土壤 C/N 整体上小幅下降,其他土层相对于表层(0~25 cm)土壤的降幅在 0.5%~16.0% 之间;C/P、C/K、N/P 和 N/K 随土层深度的增加呈急剧下降趋势,75~100 cm 土层相对于 0~25 cm 土层的降幅均在 50% 以上;而 P/K 随土层深度的增加呈小幅波动。经方差分析表明,针阔混交林Ⅱ和针阔混交林Ⅲ土壤 C/N 比在不同土层间差异不显著($P>0.05$),但随着林龄的增加,针阔混交林Ⅰ上层(0~25 和 25~50 cm)土壤显著高于底层(50~75 和 75~100 cm)土壤;各针阔混交林表层(0~25 cm)土壤的 C/P、C/K、N/P 和 N/K 显著高于底层(75~100 cm)土壤,这主要是由于 P、K 元素含量较稳定,在不同土层间差异不大,所以 C/P、C/K、N/P 和 N/K 主要受 C、N 元素含量的影响,故 C/P 与 C/K 与有机碳的变化规律一致,而 N/P 和 N/K 与全氮的变化规律一致^[10];针阔混交林Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ土壤 P/K 在不同土层间差异不显著($P>0.05$)。

表 1 不同林龄针阔混交林各土层的土壤化学计量特征

林分	土层/cm	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
针阔混交林Ⅰ	0~25	12.71±0.23 b	40.36±5.65 c	0.66±0.11 b	3.22±0.48 b	0.053±0.009 b	0.019±0.003 a
	25~50	11.61±0.41 b	31.11±5.55 bc	0.38±0.06 a	2.86±0.59 b	0.033±0.005 a	0.018±0.004 a
	50~75	10.68±0.41 a	20.38±2.95 ab	0.30±0.03 b	1.99±0.31 ab	0.028±0.003 a	0.021±0.005 a
	75~100	11.48±0.39 a	17.18±2.66 a	0.26±0.03 a	1.53±0.25 a	0.022±0.002 a	0.022±0.005 a
	0~100	11.76±0.25 a	27.14±3.81 a	0.39±0.05 a	2.36±0.36 a	0.034±0.004 a	0.020±0.004 a
针阔混交林Ⅱ	0~25	12.00±0.44 a	43.93±4.00 c	0.79±0.20 b	3.70±0.33 c	0.066±0.016 b	0.017±0.003 a
	25~50	11.94±0.36 a	26.55±2.03 b	0.46±0.09 ab	2.24±0.17 b	0.038±0.007 a	0.017±0.003 a
	50~75	11.46±0.41 a	21.00±0.90 ab	0.31±0.05 a	1.87±0.12 ab	0.027±0.004 a	0.015±0.002 a
	75~100	11.30±0.44 a	17.44±1.12 a	0.27±0.04 a	1.59±0.14 a	0.023±0.003 a	0.017±0.003 a
	0~100	11.69±0.27 A	26.28±1.05 A	0.43±0.08 A	2.27±0.11 A	0.036±0.006 A	0.016±0.003 A
针阔混交林Ⅲ	0~25	12.54±0.33 a	49.31±6.82 c	0.62±0.08 b	4.01±0.58 c	0.049±0.006 b	0.014±0.001 a
	25~50	12.10±0.33 a	34.25±4.41 b	0.41±0.05 a	2.86±0.41 b	0.034±0.004 a	0.013±0.001 a
	50~75	11.59±0.44 a	23.56±2.30 ab	0.29±0.03 a	2.06±0.23 ab	0.025±0.003 a	0.013±0.001 a
	75~100	12.32±0.55 a	20.79±1.76 a	0.28±0.04 a	1.71±0.15 a	0.022±0.002 a	0.013±0.001 a
	0~100	12.22±0.27 A	31.39±3.10 A	0.39±0.04 A	2.61±0.29 A	0.032±0.003 A	0.013±0.001 A

注:表中数据为平均值±标准误,不同小写字母表示各参数在同一林分不同土层间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示 0~100 cm 土层各参数均值在不同林龄段间差异显著($P<0.05$)。

3.3 土壤有机碳、全 N、全 P、全 K 的生态化学计量比的相关性

从表 2 可知,土壤有机碳储量与土壤全 N 储量、C/N、C/P、C/K、N/P 和 N/K 呈极显著正相关($P<0.01$),其中与土壤全 N 储量相关系数最高,表现出相对一致的变化规律。土壤全 N 储量与 C/P、C/K、N/P、N/K 极显著正相关($P<0.01$);土壤全 P 储量与全 K 储量显著正相关,与 C/N、P/K 呈极显著正相关($P<0.01$),而与 C/P、N/P 呈极显著负相关($P<0.01$);土壤全 K 储量与 C/P 显著负相关($P<0.05$),与 C/K、N/K、P/K 呈极显著负相关($P<0.01$)。

表 2 土壤有机碳、全 N、全 P、全 K 储量及生态化学计量比的相关性

	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
X ₁	0.959**	0.061	0.020	0.329**	0.732**	0.645**	0.647**	0.622**	0.047
X ₂	1	0.005	0.062	0.067	0.762**	0.599**	0.744**	0.618**	-0.021

X ₃	1	0.210 *	0.232 * *	-0.467 * *	-0.110	-0.494 * *	-0.136	0.753 * *
X ₄		1	-0.139	-0.176 *	-0.593 * *	-0.121	-0.590 * *	-0.416 * *
X ₅			1	0.058	0.264 * *	-0.165 *	0.130	0.270 * *
X ₆				1	0.631 * *	0.968 * *	0.644 * *	-0.321 * *
X ₇					1	0.545 * *	0.987 * *	0.337 * *
X ₈						1	0.593 * *	-0.373 * *
X ₉							1	0.313 * *
X ₁₀								1

注：“*”表示显著相关($P<0.05$),“* *”表示极显著相关($P<0.01$)。X₁:土壤有机碳储量($t\cdot hm^{-2}$);X₂:土壤全 N 储量($t\cdot hm^{-2}$);X₃:土壤全 P 储量($t\cdot hm^{-2}$);X₄:土壤全 K 储量($t\cdot hm^{-2}$);X₅:C/N;X₆:C/P;X₇:C/K;X₈:N/P;X₉:N/K;X₁₀:P/K。

4 讨论与结论

4.1 讨论

森林土壤是森林生态系统的—个极重要的碳、氮存储库,对于大气中温室气体的平衡发挥重要的作用^[20]。本研究中不同林龄针阔混交林土壤有机质碳储量均值介于 106.72 ~ 136.61 $t\cdot hm^{-2}$ 之间,平均为 126.67 $t\cdot hm^{-2}$,略高于人工林平均土壤碳储量 107.1 $t\cdot hm^{-2}$ ^[21],低于 27 a 生观光木(*Tsoongiodendron odorum*)人工林 0 ~ 80 cm 土壤层碳储量 131.31 $t\cdot hm^{-2}$ 、29 a 生格木(*Erythrophleum fordii*)人工林土壤碳储量 131.73 $t\cdot hm^{-2}$ 和 33 a 生红椎(*Castanopsis hystrix*)人工林土壤碳储量 167.45 $t\cdot hm^{-2}$ ^[22-23]。研究发现,随着林龄的增加,森林土壤碳储量呈增大的趋势^[24-25],而本研究中,针阔混交林土壤有机质碳储量随林龄的增加呈现出先降低后升高的趋势,这可能为试验林处于中幼林期,营林措施对土壤的扰动会加速土壤有机质的分解或流失^[21],林下植被抚育降低了森林土壤碳储量^[26],随着造林树种生长加快、林下植被恢复及凋落物增加,凋落物归还和根系及其分泌物增加了碳素的输入量,造林后第 10 ~ 11 年土壤有机碳储量出现升高。不同林龄土壤全氮储量均值介于 9.17 ~ 11.19 $t\cdot hm^{-2}$,平均为 10.18 $t\cdot hm^{-2}$,与红椎(11.61 $t\cdot hm^{-2}$)和马尾松(*Pinus massoniana*)人工林(10.11 $t\cdot hm^{-2}$)土壤全氮储量基本一致^[23],而远低于固氮树种格木人工林土壤全氮储量(16.48 $t\cdot hm^{-2}$)^[23]。

C/N 比是土壤质量的敏感指标,且 C/N 会影响到土壤中有有机 C 和 N 的循环^[27],不同林龄针阔混交林间土壤 C/N 差异不显著($P>0.05$),说明土壤有机质分解速度相近;不同林龄针阔混交林土壤有机层 C/N 介于 11.69 ~ 12.22 之间,平均为 11.96,低于 19 a 生阔叶人工林(16.04)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林(14.95)^[13]和桂东南 31 a 生不同密度生柳杉(*Cryptomeria fortunei*)人工林(15.8 ~ 17.5)^[28],高于黄土丘陵沟壑区 3 个植被区土壤平均 C/N 比(9.44)^[10]和北京市东灵山落叶阔叶林(5.95)^[29]。

4.2 结论

在 0 ~ 100 cm 土层内,不同林龄土壤有机质碳储量为 106.72 ~ 136.61 $t\cdot hm^{-2}$,全氮储量为 9.17 ~ 11.19 $t\cdot hm^{-2}$,全磷储量为 4.07 ~ 6.77 $t\cdot hm^{-2}$,全钾储量介于 321.85 ~ 370.59 $t\cdot hm^{-2}$ 之间。4 种元素储量均随林龄的增加表现为先降低后升高的趋势。土壤有机碳储量和全氮储量土层表聚性明显,即随土层深度的增加呈下降的趋势;而土壤全磷储量和全钾储量随土层深度变化趋势不明显。

不同林龄针阔混交林土壤 C/N、C/P、C/K、N/P、N/K 及 P/K 比分别介于 11.69 ~ 12.22、26.28 ~ 31.39、0.39 ~ 0.43、2.27 ~ 2.61、0.032 ~ 0.034 和 0.013 ~ 0.020 之间,且化学计量比在 3 种试验林间差异不显著($P>0.05$),表明这几种元素的化学计量比在中幼龄针阔混交林土壤中都较稳定。土壤有机碳储量与土壤全 N 储量极显著正相关,相关系数高达 0.959,二者表现出相对一致的变化规律,因此土壤有机碳储量与 C、N 相关的化学计量比都极显著正相关。土壤全 P 储量与全 K 储量显著正相关,与 C/N、P/K 呈极显著正相关($P<0.01$),而与 C/P、N/P 呈极显著负相关($P<0.01$);土壤全 K 储量与 C/P 显著负相关($P<0.05$),与 C/K、N/K、P/K 呈极显著负相关($P<0.01$)。

参考文献

- [1] 欧阳林梅,曾冬萍,闵庆文,等. 鼓山茶园土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报,2014,28(2):297-301.
- [2] Elser J J, Dobberfuhl D R, MacKay N A, et al. Organism size, life history, and N: P stoichiometry[J]. BioScience,1996,46: 674-684.
- [3] 牛得草,李茜,江世高,等. 阿拉善荒漠区6种主要灌木植物叶片 C: N: P 化学计量比的季节变化[J]. 植物生态学报, 2013,37(4):317-325.
- [4] 崔宁洁,刘小兵,张丹桔,等. 不同林龄马尾松(*Pinus massoniana*)人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J]. 生态环境学报,2014,23(2):188-195.
- [5] 郑艳明,尧波,吴琴,等. 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片 C、N、P 动态特征[J]. 生态学报,2013,33(20):6488-6496.
- [6] 陈军强,张蕊,侯尧宸,等. 亚高山草甸植物群落物种多样性与群落 C、N、P 生态化学计量的关系[J]. 植物生态学报, 2013,37(11):979-987.
- [7] 胡耀升,么旭阳,刘艳红. 长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征[J]. 应用生态学报,2014,25(3): 632-638.
- [8] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014,25(4):947-954.
- [9] 王维奇,王纯,曾从盛,等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2012,32(13): 4087-4093.
- [10] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [11] 罗亚勇,张宇,张静辉,等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J]. 生态学杂志,2012,31(2):254-260.
- [12] 魏孝荣,邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报,2007,27(2):603-612.
- [13] 万晓华,黄志群,何宗明,等. 阔叶和杉木人工林对土壤碳氮库的影响比较[J]. 应用生态学报,2013,24(2):345-350.
- [14] 杨承栋,张小泉,焦如珍,等. 杉木连栽土壤组成、结构、性质变化及其对林木生长的影响[J]. 林业科学,1996,32(2): 175-181.
- [15] 周霆,盛炜彤. 关于我国人工林可持续问题[J]. 世界林业研究,2008,21(3):49-53.
- [16] 盘李军,王明怀,冼干标,等. 云勇生态公益林树种选择及配置研究初报[J]. 广东林业科技,2013,29(5):1-6.
- [17] 苏木荣,胡新颖,李召青,等. 云勇生态林空气负离子浓度及变化规律[J]. 广东林业科技,2012,28(4):11-16.
- [18] 苏木荣,张卫强,冼伟光,等. 南亚热带不同林龄杉木针阔混交林土壤理化性质分析[J]. 广东林业科技,2014,30(5): 43-47.
- [19] Don A, Schumacher J, Scherer-Lorenzen M, et al. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites implications for measuring soil carbon stocks[J]. Geoderma,2007,141(3/4):272-282.
- [20] Thompson J A, Kolka R K. Soil carbon storage estimation in a forested watershed using quantitative soil-landscape modeling [J]. Soil Science Society of America Journal,2005,69(4):1086-1093.
- [21] 刘世荣,王晖,栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. 生态学报,2011,31(19):5437-5448.
- [22] 黄松殿,吴庆标,廖克波,等. 观光木人工林生态系统碳储量及其分布格局[J]. 生态学杂志,2011,30(11):2400-2404.
- [23] 王卫霞,史作民,罗达,等. 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量[J]. 生态学报,2013,33(3):925-933.
- [24] 吴建国,张小全,徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. 植物生态学报,2004,28(5): 657-664.
- [25] 官超,汪思龙,曾掌权,等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征[J]. 生态学杂志,2011,30(9):1935-1941.
- [26] 吴亚丛,李正才,程彩芳,等. 林下植被抚育对樟人工林生态系统碳储量的影响[J]. 植物生态学报,2013,37(2):142-149.
- [27] 任书杰,曹明奎,陶波,等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用进展[J]. 地理科学进展,2006,25(4):58-67.
- [28] 莫德祥,吴庆标,林宁,等. 桂东南柳杉人工林碳氮储量及其分配格局[J]. 生态学杂志,2012,31(4):794-799.
- [29] 李娜,李建,刘海丰,等. 东灵山3种落叶阔叶林的碳氮元素含量及比率[J]. 林业科学,2009,45(8):82-87.