

粗放和集约经营毛竹林叶片的生态化学计量特征

顾鸿昊¹, 翁俊¹, 孔佳杰¹, 叶小猛², 刘永军², 漆良华³, 宋新章¹

(1. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 2. 浙江省临安市气象局, 浙江 临安 311300; 3. 国际竹藤中心, 北京 100102)

摘要: 生态化学计量特征是认识植物响应环境变化的一条重要途径。中国约有一半面积的毛竹 *Phyllostachys edulis* 林实施了集约经营, 但关于经营水平对毛竹林生态化学计量特征的影响仍知之甚少。观测了粗放和集约 2 种经营水平对毛竹林叶片生态化学计量特征的影响。结果表明: 集约经营显著提高了 1 年生和 3 年生立竹叶片的碳、磷质量分数及 3 年生立竹叶片的氮质量分数 ($P < 0.05$), 增强了毛竹的碳同化能力和磷吸收能力。2 种经营水平下, 1 年生立竹叶片的碳质量分数均高于 3 年生立竹, 而磷质量分数均低于 3 年生立竹。经营水平对毛竹林叶片的碳、氮、磷质量分数及碳氮比 (C:N), 碳磷比 (C:P) 和氮磷比 (N:P) 均有显著影响, 毛竹年龄显著影响了竹叶的碳和磷质量分数及 C:N 和 C:P 比值, 两者的交互作用只显著影响了竹叶的氮质量分数和 C:N 比值。试验区 2 种经营水平下毛竹林的生长均受到氮素的制约, 施加氮肥可以促进该区域毛竹林生长, 有利于积累更多的生物量碳。图 2 表 4 参 26

关键词: 森林生态学; 毛竹; 生态化学计量; 粗放经营; 集约经营

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)05-0661-07

Ecological stoichiometry of *Phyllostachys edulis* leaves with extensive and intensive management

GU Honghao¹, WENG Jun¹, KONG Jiajie¹, YE Xiaomeng², LIU Yongjun², QI Lianghua³, SONG Xin Zhang¹

(1. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Meteorological Bureau of Lin'an City, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: Studying ecological stoichiometry is an approach to understand the response of plants to environmental change. To determine management patterns and their effect on ecological stoichiometry with *Phyllostachys edulis*, an experiment was conducted by respective sampling to observe the effects of extensive and intensive management patterns on ecological stoichiometry with *Phyllostachys edulis* leaves for a stand in subtropical China. One-way analysis of variance (ANOVA) and least significant difference (LSD) tests were used to test the statistical significance of differences between two management types of plantations. Results showed that, compared to extensive management, intensive management significantly increased C and P content of leaves from both 1-year-old and 3-year-old bamboo ($P < 0.05$), as well as N content from 3-year-old bamboo ($P < 0.05$). Management level significantly affected C, N, and P content ($P < 0.01$) as well as C:N, C:P, and N:P ratios of leaves ($P < 0.05$); *Phyllostachys edulis* age also had a significant effect on C and P content as well as the C:N and C:P ratios of leaves ($P < 0.01$). Meanwhile, the interaction of management level and age only significantly influenced N content and the C:N ratio of leaves ($P < 0.01$). Findings indicated that with the

收稿日期: 2014-12-10; 修回日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270517); 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(“948”计划)项目(2013-4-55); 浙江省本科院校中青年学科带头人学术攀登项目(pd2013234)

作者简介: 顾鸿昊, 从事森林生态学研究。E-mail: 775753531@qq.com。通信作者: 宋新章, 教授, 博士, 从事全球生态、森林生态和土壤生态学研究。E-mail: xzsong@126.com

two management patterns, N limited *Phyllostachys edulis* productivity, and that increasing N by fertilization would facilitate growth thereby contributing to more accumulation of biological carbon. [Ch, 2 fig. 4 tab. 26 ref.]

Key words: forest ecology; *Phyllostachys edulis*; stoichiometry; extensive management; intensive management

生态化学计量学是研究生态系统中能量平衡和多重化学元素(主要是碳、氮、磷)平衡的科学^[1]。从分子到生态系统都是由元素按照一定比例组成的,生态化学计量学从元素比率的角度把不同尺度(分子、细胞、有机体、种群、生态系统和全球尺度)的研究结果有机统一起来进行分析研究,为研究土壤—植物相互作用与碳(C),氮(N),磷(P)循环提供了新的思路,成为当前生态学研究的前沿领域和热点^[2-3]。目前,生态化学计量学研究主要集中在碳、氮、磷的计量关系上,已经广泛应用于生物体营养动态、种群动态、微生物营养、生物共生关系、限制养分元素的判断及养分利用效率、森林演替与衰退及全球碳、氮、磷生物地球化学循环、C:N:P与生物生长率的关系、资源竞争理论等研究中,其中在土壤养分循环与限制作用研究中的应用受到了更多的关注^[2-4]。碳的积累与限制植物生长的氮磷元素的供应密切相关。生物量中碳与化学计量比值的差异能够调控和影响生态系统中碳的消耗或固定过程,是评价氮磷变异性机制的重要工具,因此,可用C:N:P化学计量比来分析生态系统碳循环、氮磷元素平衡与制约关系^[2-3]。一些学者研究了环境因素或人为经营措施对植物化学计量特征的影响,如密度^[5]、生产力水平^[6]、施肥^[7]、地表覆盖^[8-9]等均影响到植物的生态化学计量特征,但有关经营水平对毛竹 *Phyllostachys edulis* 化学计量特征,进而对毛竹林生态系统碳循环及生产力限制元素的影响,人们仍知之甚少。毛竹是中国分布最广,栽培和利用历史最悠久,经济价值最高的竹种,面积达386.8万hm²,并以年均3%左右的速度递增,约占全国竹林面积的70%,是中国重要的森林资源,具有生长快、材质好、用途广、采伐周期短等优良特性,在中国林业生产中占有非常重要的地位,也是南方山区农民经济收入的重要来源^[10]。亚热带地区是中国毛竹最主要的分布区。近年来随着效益林业的推进,有40%~50%的毛竹林实行了集约化经营^[11]。与传统的保持天然状态的粗放经营毛竹林相比,集约经营毛竹林的主要措施是林分结构调控、土壤管理和施用化肥等。这些经营管理措施,会改变原有林分的生物地球化学循环过程,特别是碳、氮循环过程,最终影响到毛竹林生态系统功能的发挥^[12]。为此,本试验以浙江省临安市青山镇毛竹林长期研究样地为对象,研究粗放和集约2种经营水平下毛竹林叶片生态化学计量特征的差异,目的是了解经营水平对毛竹生态化学计量学特征的影响,揭示碳、氮、磷元素之间的相互作用及平衡制约关系,深入认识植物—凋落物—土壤相互作用的养分调控因素,丰富植物种群化学计量学内容,为更大尺度上的群落或生态系统化学计量学研究提供参考,同时也为竹林经营中土壤营养诊断提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江省临安市青山镇(30° 14' N, 119° 42' E)。该地区处于中亚热带季风气候区的北缘,四季分明,气候温和,雨水充沛,年均降水量为1420mm左右,年均气温15.6℃,年均无霜期230d左右。土壤为黄土壤,地形地貌为低山丘陵,海拔为100~300m。

研究区内的毛竹林主要有集约经营(intensive management, IM)和粗放经营(extensive management, EM)2种类型。集约经营毛竹林经营历史10a左右,经营措施为除去林下灌木和杂草,结合翻耕、施用化肥。9月上、中旬施肥1次·a⁻¹,施肥量为尿素450kg·hm⁻²·a⁻¹,过磷酸钙450kg·hm⁻²,氯化钾150kg·hm⁻²。肥料进行地表撒施,施肥后翻耕1次,深度为30cm。粗放经营水平毛竹林不进行施肥和林地垦复,只进行伐竹采笋活动,保留林下植物,种类主要有檫木 *Loropetalum chinensis*, 青冈栎 *Cyclobalanopsis glauca*, 乌饭 *Vaccinium bracteatum*, 木荷 *Schima superba* 和 杨桐 *Adinandra millettii* 等。研究区内竹林隔年留养新竹并采伐老竹。一般4年生以上老竹就采伐,现存竹林是1年生和3年生类型。本研究采用典型选样方法,2012年在研究区设立林分条件和环境状况较一致的代表性样方6个,其中集约经营和粗放经营样地各3个,样方面积为20m×20m,样方之间间隔20m以上。样地的林分和土壤特征见表1。

表 1 试验地基本概况

Table 1 Stand and soil characteristics of study sites in the moso bamboo forest

经营类型	密度/(株·hm ⁻²)	胸径/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)	土壤有机碳/ (mg·g ⁻¹)	土壤全氮/ (mg·g ⁻¹)	土壤全磷/ (mg·g ⁻¹)	土壤 pH 值
粗放经营	3 106 ± 386	10.08 ± 0.38	1.06 ± 0.07	27.8 ± 0.3	0.9 ± 0.03	0.4 ± 0.01	4.53 ± 0.02
集约经营	3 362 ± 309	10.16 ± 0.13	0.97 ± 0.07	23.7 ± 0.2	1.1 ± 0.04	0.5 ± 0.01	4.46 ± 0.01

1.2 叶片样品采集与处理

于 2013 年年底在各样地内随机选取 3 年生立竹(2010 年出笋成竹)和 1 年生立竹(2012 年出笋成竹)各 5 株,用高枝剪采集每株冠层中上部东南西北 4 个方向的竹叶约 40 片,混合后带回实验室,先在 105 ℃下杀青 0.5 h,然后在 65 ℃下烘干至恒量,粉碎用于分析碳、氮和磷质量分数。

1.3 叶片碳、氮、磷质量分数测定

碳质量分数用重铬酸钾容量法-外加热(油浴加热)法测定;氮质量分数用硫酸-过氧化氢(H₂SO₄-H₂O₂)消煮后,半微量凯氏法测定;磷质量分数用硫酸-过氧化氢消煮后,钼锑抗比色法测定^[13]。

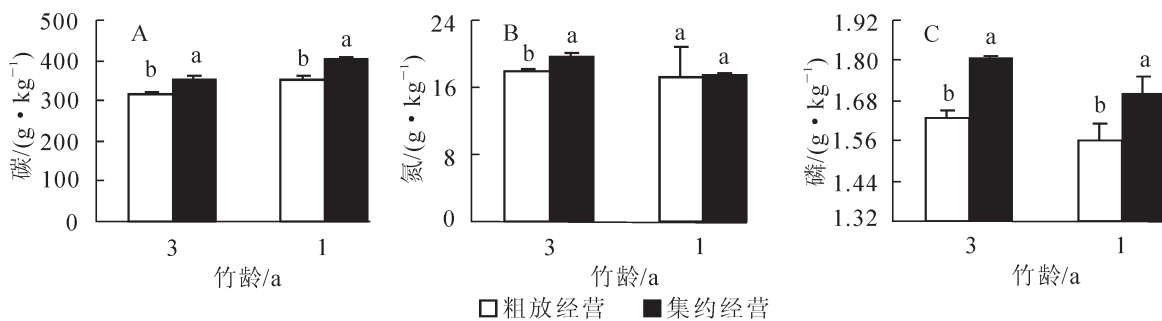
1.4 数据处理

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)分析粗放和集约 2 种经营水平下 3 年生立竹和 1 年生立竹叶片生态化学计量特征的差异。统计分析用 SPSS 13.0 实现,用经营水平和毛竹年龄作为影响因子进行双因素方差分析。统计用 Excel 2007 实现。

2 结果与分析

2.1 经营水平对毛竹叶片碳、氮、磷质量分数的影响

从图 1A 可见:无论 3 年生立竹和 1 年生立竹,集约经营水平下毛竹叶片碳质量分数相比粗放经营均有显著的增加($P < 0.05$),且 1 年生立竹的碳质时分数均高于相同经营水平的 3 年生立竹。从图 1B 可见:3 年生立竹叶片氮质量分数在集约经营水平下比粗放经营有显著增加,但 1 年生立竹叶片氮质量分数在集约和粗放经营方式间差别不显著。从图 1C 可见:集约经营水平下 3 年生和 1 年生立竹叶片的磷质量分数均显著高于粗放经营,但在同一经营水平下 3 年生立竹叶片的磷质量分数要高于 1 年生立竹。总体来看,集约经营水平下毛竹叶片的碳、氮、磷质量分数高于粗放经营。相同经营水平下,不同年龄毛竹叶片的碳、氮、磷质量分数未表现出明显的规律性变化。



不同小写字母表示不同经营水平毛竹林相同年龄立竹叶片元素质量分数存在显著差异($P < 0.05$)。

图 1 不同经营水平下毛竹叶片的碳、氮、磷质量分数

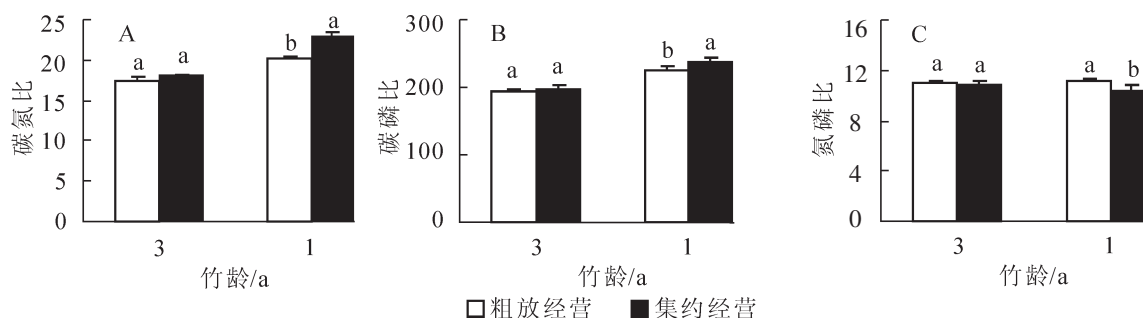
Figure 1 Contents of C, N and P of leaves of *Phyllostachys edulis* forest with extensive management and intensive management

2.2 经营水平对毛竹叶片碳氮比(C:N), 碳磷比(C:P)和氮磷比(N:P)的影响

从图 2 可见:毛竹林集约经营 10 a 后,3 年生立竹叶片的 C:N, C:P 和 N:P 均高于粗放经营毛竹林,但没有表现出显著差异;1 年生立竹叶片的 C:N 和 C:P 显著高于粗放经营毛竹林($P < 0.05$),但 N:P 显著低于粗放经营毛竹林。2 种经营水平下 3 年生和 1 年生立竹叶片的 N:P 比值均小于 14。

2.3 毛竹叶片生态化学计量的影响因素

从表 2 可见:同一竹龄的叶片,集约经营水平下的 C:N:P 值均高于粗放经营,但不论是粗放经



不同小写字母表示不同经营水平毛竹林相同年龄立竹叶片元素比值存在显著差异($P < 0.05$)。

图2 粗放和集约经营毛竹林叶片 C:N, C:P 和 N:P

Figure 2 Characteristics of C:N, C:P and N:P of leaves of *Phyllostachys edulis* with extensive management and intensive management

表2 不同经营水平毛竹林 1a 和 3a 立竹叶片 C:N:P

Table 2 C:N:P ratio of leaves of *Phyllostachys edulis*

竹龄/a	粗放经营	集约经营
3	193:11:1	196:11:1
1	225:11:1	238:10:1

营还是集约经营, 1年生立竹叶片的 C:N:P 值均明显高于3年生立竹。

如表3所示: 粗放经营水平下3年生和1年生竹叶片的碳、氮和磷质量分数相互间均无显著相关性($P > 0.05$); 集约经营水平下3年生竹叶片的碳、氮和磷质量分数相互间均无显著相关性($P > 0.05$), 1年生竹叶片的氮与磷质量分数存在显著负相关($P < 0.05$)。

表3 毛竹叶片碳、氮和磷质量分数之间的相关性

Table 3 Pearson correlations between C, N, P content of leaves of *Phyllostachys edulis*

经营方式	竹龄/a	元素	碳	氮	经营方式	竹龄/a	元素	碳	氮
粗放经营	3	氮	-0.701		集约经营	3	氮	0.996	
		磷	-0.231	0.856			磷	-0.966	-0.986
	1	氮	0.971			1	氮	-0.949	
		磷	0.971	0.884			磷	0.932	-0.999*

说明: *表示差异显著水平($P < 0.05$)。

双因素方差分析结果表明(表4): 经营水平对毛竹叶片的碳、氮、磷质量分数以及 C:N, C:P, N:P 比值均有显著影响, 毛竹年龄显著影响了竹叶的碳、氮、磷质量分数以及 C:N 和 C:P 比值, 两者的交互作用只显著影响了氮质量分数和 C:N 比值。

表4 经营水平和毛竹年龄对毛竹叶片生态化学计量特征影响的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA of the effects of management level and *Phyllostachys edulis* age on stoichiometry of leaves

类别	差异源	离均差平方和	F 值	P 值	类别	差异源	离均差平方和	F 值	P 值
碳	经营水平	62.167 9	201.553 4	5.90E-07	C:N	经营水平	8.354 8	101.076 3	8.20E-06
	年龄	53.561 7	173.651 3	1.00E-06		年龄	44.774 9	541.685 8	1.20E-08
	交互	1.499 7	4.862 0	0.058 5		交互	3.638 1	44.013 6	0.000 2
氮	经营水平	0.023 2	21.885 5	0.001 6	C:P	经营水平	172.605 1	6.256 7	0.036 865
	年龄	0.058 8	55.447 3	7.30E-05		年龄	4139.37 2	150.047 6	1.80E-06
	交互	0.013 7	12.962 2	0.007 0		交互	72.954 4	2.644 5	0.142 6
磷	经营水平	0.000 7	53.402 4	8.30E-05	N:P	经营水平	0.731 7	8.528 4	0.019 3
	年龄	0.000 3	19.417 3	0.002 3		年龄	0.130 3	1.518 5	0.252 8
	交互	9.15E-06	0.664 8	0.438 5		交互	0.258 2	3.009 7	0.121 0

3 结论与讨论

3.1 经营水平对毛竹叶片碳、氮、磷质量分数的影响

本研究发现：集约经营水平下，3年生和1年生立竹毛竹的叶片碳和磷质量分数均显著高于粗放经营，表明以施肥、垦复等土壤管理为核心的集约经营措施显著增强了毛竹的碳同化能力和磷吸收能力。周国模等^[14]也观测到集约经营显著增加了毛竹林的固碳能力。郭子武等^[7]也发现长期施肥显著提高了红哺鸡竹 *Phyllostachys iridescens* 叶片的碳含量，同本研究结果相一致。2种经营水平下1年生立竹的叶片碳质量分数均高于3年生立竹，而磷质量分数均低于3年生立竹，表明毛竹叶片的碳同化能力随年龄而下降，但磷吸收能力则逐渐增强。1年生立竹叶片氮质量分数在2种经营水平下无显著差异，而集约经营毛竹林3年生立竹叶片的氮质量分数显著高于粗放经营毛竹林，表明集约经营对毛竹生长初期的氮吸收影响不大，但随着毛竹年龄而增强了叶片对氮的储存和利用。

植物体内的光合代谢和矿质代谢间存在内在联系，植物体内碳的固定需要大量蛋白酶(氮库)的参与，而蛋白酶的装配需要大量核酸的复制(磷库)^[15]，因此，植物体的碳与氮、磷含量有着明显的相关性。本实验中，粗放和集约经营下毛竹叶片碳和磷质量分数有显著差异，经营方式对毛竹固碳能力的影响应得到重视。

3.2 经营水平对毛竹叶片生态化学计量比的影响

在长期的进化过程中，为了适应环境因子的波动，植物逐渐发育了较强的生理生化调节能力(可塑性)^[16]。植物吸收营养所能同化碳的能力、植物对氮和磷的利用效率以及土壤中氮和磷的供应状况，一定程度上体现在植物体的 C : N 和 N : P 上，因而具有重要的生态学意义^[17-18]。通常碳在大多数植物体内含量很高且变异较小，所以碳不作为植物生长的限制元素。因此氮和磷质量分数的变化是影响 C : N 和 C : P 的主要因素^[19]。

本研究发现，集约经营水平下毛竹林3年生立竹叶片的 C : N, C : P, N : P 高于粗放经营毛竹林，但无显著差异，1年生立竹叶片的 C : N 和 C : P 均显著高于粗放经营毛竹林，N : P 则显著低于粗放经营毛竹林，表明集约经营显著提高了新生竹的氮和磷利用效率，但这种积极影响随毛竹年龄而减弱。而且，由于集约经营过程中施肥等措施提供了相对充足的氮素，使得新生竹对磷的吸收相对不足，但这种对磷吸收的影响随时间而趋于消失。由于本研究样地中只有1年生和3年生立竹，本研究观测到的竹叶生态化学计量(比)随毛竹年龄变化的一些特点和规律仍需在具有更多龄级的毛竹林中进行研究和验证。

3.3 毛竹叶片生态化学计量的影响因素

“内稳态理论”和“生长速率理论”是生态化学计量学的重要理论基础。内稳态理论认为大多数正常的生物体内，化学元素组成不会因所依赖的生存环境的化学元素组成发生改变而改变，依旧可以保持相对稳定^[2-3,20]。如 Demars 等^[21]研究发现：41种野生湿地植物和水生植物组织在养分供应条件各异的情况下，N : P 变化幅度较小。McGroddy 等^[19]发现：植物叶片的 C : N : P 虽然在全球来看存在较大变化，但在生物群区的水平上相对稳定。郭宝华等^[6]也观测到不同生产力水平的毛竹林 C : N : P 的化学计量比值具有内在的稳定性。本研究发现，3年生立竹和1年生立竹叶片在粗放和集约经营下均处于相对稳定状态，也验证了这一理论。一般来讲，不同的元素、元素比率，内稳性是不同的。氮元素的内稳性高于磷，这主要是因为氮元素在植物体中的质量分数远远高于磷元素。本研究中毛竹林叶片的氮质量分数也远远大于磷质量分数。生长速率理论核心观点认为：生物体必须改变元素组成及其比率(C : N : P)以适应生长速率的改变^[15]。生物的生长过程实质上就是元素的积累和相对比例的调节过程。本研究中，不论是粗放经营还是集约经营，随着立竹年龄的增加，叶片的 C : N : P 值变小，即对养分的利用效率降低，导致生长速率下降，符合生长速率理论。

3.4 毛竹生长的限制性元素

叶片作为植物的主要光合器官，经常用其 N : P 值来研究生态系统生产力受到哪种元素的限制作用。根据植物叶片的 N : P 值判断环境对植物生长养分供应的状况是生态化学计量学应用的一个重要方面^[18]。在对不同植物进行施肥实验的基础上，Koerselman 等^[22]认为：当 N : P 大于 16 时表示生态系统受磷限制，N : P 小于 14 时表示生态系统受氮限制，N : P 在 14~16 时，表示生态系统受氮和磷的共同限制

或者均不受两者限制。但这个比值范围随研究区域、植物的生长阶段、植物的组织及植物种类而改变, 从而影响 N:P 临界值的变化^[18,23]。

本试验中, 2种经营水平下3年生立竹叶片的 N:P 变化范围为 10.53~11.14, 1年生立竹叶片的 N:P 变化范围为 9.86~11.37, 均明显低于中国的 N:P 平均值(14.40)和世界上植物的平均值(13.80)^[24], 表明在 2种经营水平下, 氮素仍是研究区域毛竹生长的主要限制元素。类似地, 郭宝华等^[6]也观测到福建永安不同生产力水平的毛竹林均受到氮素的制约。可见, 氮素缺乏仍是中国南方毛竹林生长的主要限制因子之一, 施加氮肥或该地区日益增强的氮沉降^[25-26]将有利于促进毛竹生长, 提高其生产力。Han 等^[24]对中国的 753 种高等陆地植物进行了大尺度水平上的化学计量特征研究, 认为磷对中国陆地植物生长的制约最为普遍, 但本研究中毛竹林的生长尚未表现出受磷的限制, 郭宝华等^[6]在福建永安也观测到类似的现象。这为中国南方毛竹林经营过程中的合理施肥和科学管理提供了科学依据。

4 参考文献

- [1] ELSER J J, STEMER R W, GOROKHOVA E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecol Lett*, 2000, **3**(6): 540 – 550.
- [2] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3937 – 3947.
WANG Shaoqiang, YU Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(8): 3937 – 3947.
- [3] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5484 – 5492.
ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, *et al.* Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(18): 5484 – 5492.
- [4] 张丽霞, 白永飞, 韩兴国. N:P 化学计量学在生态学研究中的应用[J]. 植物学报, 2003, **45**(3): 1009 – 1018.
ZHANG Lixia, BAI Yongfei, HAN Xingguo. Application of N:P stoichiometry to ecology studies [J]. *Acta Bot Sin*, 2003, **45**(3): 1009 – 1018.
- [5] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 等. 密度对四季竹叶片 C, N, P 化学计量和养分重吸收特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(4): 893 – 899.
GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, *et al.* Effects of stand density on *Oligostachyum lubricum* leaf carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and nutrient resorption [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(4): 893 – 899.
- [6] 郭宝华, 刘广路, 范少辉, 等. 不同生产力水平毛竹林碳氮磷的分布格局和计量特征[J]. 林业科学, 2014, **50**(6): 1 – 9.
GUO Baohua, LIU Guanglu, FAN Shaohui, *et al.* Distribution patterns and stoichiometry characteristics of C, N, P in *Phyllostachys edulis* forests of different productivity levels [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(6): 1 – 9.
- [7] 郭子武, 虞敏之, 郑连喜, 等. 长期施用不同肥料对红哺鸡竹叶片碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(12): 2667 – 2671.
GUO Ziwu, YU Minzhi, ZHENG Lianxi, *et al.* Stoichiometry of C, N and P in *Phyllostachys iridescens* leaves under long-term application of different fertilizers [J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30**(12): 2667 – 2671.
- [8] 刘亚迪, 范少辉, 蔡春菊, 等. 地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(22): 6955 – 6963.
LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, *et al.* Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for *Phyllostachys praecox* over soil-surface mulching [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(22): 6955 – 6963.
- [9] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 等. 雷竹林土壤和叶片 N, P 化学计量特征对林地覆盖的响应[J]. 生态学报, 2012, **32**(20): 6361 – 6368.
GUO Ziwu, CHEN Shuanlin, YANG Qingping, *et al.* Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of *Phyllostachys praecox* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(20): 6361 – 6368.
- [10] SONG Xinzhang, ZHOU Guomo, JIANG Hong, *et al.* Carbon sequestration by Chinese bamboo forests and their ecological benefits: assessment of potential, problems, and future challenges [J]. *Environ Rev*, 2011, **19**(1): 418 – 428.
- [11] 杜丽君, 金涛, 阮雷雷. 鄂南 4 种典型土地利用方式红壤 CO₂ 排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2007, **28**

- (7): 1607 – 1613.
- DU Lijun, JIN Tao, RUAN Leilei. CO₂ fluxes from red soil under four land use types in mid-subtropical, China [J]. *Environ Sci*, 2007, **28**(7): 1607 – 1613.
- [12] DAVIDSON E A, ACKEMAN I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. *Biogeochemistry*, 1993, **20**(3): 161 – 193.
- [13] 张万儒, 杨光谨, 屠星南, 等. 中华人民共和国林业行业标准: LY/T 1210~1275-1999 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [14] 周国模, 吴家森, 姜培坤. 不同管理模式对毛竹林碳储量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(6): 51 – 55.
- ZHOU Guomo, WU Jiasen, JIANG Peikun. Effects of different management models on carbon in *Phyllostachys pubescens* forests [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**(6): 51 – 55.
- [15] STEMER R W, ELSER J J. *Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to The Biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [16] 翁恩生, 周广胜. 用于全球变化研究的中国植物功能型划分 [J]. 植物生态学报, 2005, **29**(1): 81 – 97.
- WENG Ensheng, ZHOU Guangsheng. Different plant functional types in China for global change studies [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2005, **29**(1): 81 – 97.
- [17] 黄建军, 王希华. 浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2003(1): 92 – 97.
- HUANG Jianjun, WANG Xihua. Leaf nutrient and structural characteristics of 32 evergreen broad-leaved species [J]. *J East China Norm Univ Nat Sci*, 2003(1): 92 – 97.
- [18] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, **29**(6): 1007 – 1019.
- ZENG Dehui, CHEN Guangsheng. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2005, **29**(6): 1007 – 1019.
- [19] McGRODDY M E, DAUFRESNE T, HEDIN L O. Scaling of C : N : P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios [J]. *Ecology*, 2004, **85**(9): 2390 – 2401.
- [20] KOOJIMAN S. The stoichiometry of animal energetics [J]. *J Theor Biol*, 1995, **177**(2): 139 – 149.
- [21] DEMARS B O L, EDWARDS A C. Tissue nutrient concentrations in freshwater aquatic macrophytes: high inter-taxon differences and low phenotypic response to nutrient supply [J]. *Freshwater Biol*, 2007, **52**(11): 2073 – 2086.
- [22] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *J Appl Ecol*, 1996, **33**(6): 1441 – 1450.
- [23] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytol*, 2004, **164**(2): 243 – 266.
- [24] HAN Wenxuan, FANG Jingyuan, GUO Dali, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol*, 2005, **168**(2): 377 – 385. doi:10.1111/j.1469 8137.2005.01530.x.
- [25] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions and potential solutions [J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889 – 892.
- [26] LÜ Chaoqun, TIAN Hanqin. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data (1984–2012) [J]. *J Geophys Res Atmo*, 2007, **112**(D22)S05. doi:10.1029/2006JD007990.