

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

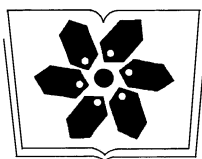
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 23 期
Vol.30 No.23
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 23 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

1940—2002 年长江中下游平原乡村景观区域中耕地类型及其土壤氮磷储量的变化	武俊喜,程 序,焦加国,等 (6309)
海洋生态资本概念与属性界定	陈 尚,任大川,李京梅,等 (6323)
海洋生态资本价值结构要素与评估指标体系	陈 尚,任大川,夏 涛,等 (6331)
黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与 N、P 分布格局及其循环特征	杜有新,潘根兴,李恋卿,等 (6338)
长白山阔叶红松林样地槭属树木木生真菌的群落组成和分布	魏玉莲,戴玉成,袁海生,等 (6348)
内蒙古退化荒漠草原土壤细菌群落结构特征	吴永胜,马万里,李 浩,等 (6355)
盐度对尖瓣海莲幼苗生长及其生理生态特性的影响	廖宝文,邱凤英,张留恩,等 (6363)
基于树轮火疤塔河蒙克山樟子松林火灾的频度分析	胡海清,赵致奎,王晓春,等 (6372)
不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响	赵紫华,石 云,贺达汉,等 (6380)
黑河中游荒漠灌丛斑块地面甲虫群落分布与微生境的关系	刘继亮,李锋瑞,刘七军,等 (6389)
刺槐树冠光合作用的空间异质性	郑 元,赵 忠,周 慧,等 (6399)
南海北部夏季基础生物生产力分布特征及影响因素	宋星宇,刘华雪,黄良民,等 (6409)
怒江三种裂腹鱼属鱼类种群遗传结构	岳兴建,汪登强,刘绍平,等 (6418)
大型水生植物对重金属的富集与转移	潘义宏,王宏镔,谷兆萍,等 (6430)
依据大规模捕捞统计资料分析东黄渤海白姑鱼种群划分和洄游路线	徐兆礼,陈佳杰 (6442)
正交试验法分析环境因子对苦草生长的影响	朱丹婷,李铭红,乔宁宁 (6451)
基于中分辨率 TM 数据的湿地水生植被提取	林 川,官兆宁,赵文吉 (6460)
基于 CVM 的三江平原湿地非使用价值评价	敖长林,李一军,冯 磊,等 (6470)
耕地易地补充经济补偿的生态价值——以江阴市和兴化市为例	方 斌,杨 叶,郑前进,等 (6478)
自然旅游地居民自然保护态度的影响因素——中国九寨沟和英国新森林国家公园的比较	程绍文,张 捷,徐菲菲 (6487)
基于 PSR 方法的区域生态安全评价	李中才,刘林德,孙玉峰,等 (6495)
灌浆期高温对水稻光合特性、内源激素和稻米品质的影响	滕中华,智 丽,吕 俊,等 (6504)
秦岭北坡不同生境栓皮栎实生苗生长及其影响因素	马莉薇,张文辉,薛瑶芹,等 (6512)
子午岭三种生境下辽东栎幼苗定居限制	郭 华,王孝安,朱志红 (6521)
温度、盐度对龟足胚胎发育和幼虫生长的联合影响	饶小珍,林 岗,张殿彩,等 (6530)
锡林郭勒盟气候干燥度的时空变化规律	王海梅,李政海,韩国栋,等 (6538)
北京市水足迹及农业用水结构变化特征	黄 晶,宋振伟,陈 阜 (6546)
延安北部丘陵沟壑区退耕还林(草)成效的遥感监测	孙智辉,雷延鹏,卓 静,等 (6555)
冰川前缘土壤微生物原生演替的生态特征——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	王晓霞,张 涛,孙 建,等 (6563)
储藏方式和时间对三峡水库消落区一年生植物种子萌发的影响	申建红,曾 波,施美芬,等 (6571)
云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征	刘万德,苏建荣,李帅锋,等 (6581)
青藏高原高寒矮嵩草草甸碳增汇潜力估测方法	曹广民,龙瑞军,张法伟,等 (6591)
基于 CEVSA2 模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟	顾峰雪,陶 波,温学发,等 (6598)
太原盆地土壤呼吸的空间异质性	张义辉,李洪建,荣燕美,等 (6606)
专论与综述	
热带森林碳汇或碳源之争	祁承经,曹福祥,曹受金 (6613)
景观对河流生态系统的影响	欧 洋,王晓燕 (6624)
自由空气中臭氧浓度升高对大豆的影响	杨连新,王云霞,赵秩鹏,等 (6635)
研究简报	
基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例	王女杰,刘 建,吴大千,等 (6646)
鹤伴山国家森林公园土壤甲螨群落结构	许士国,付荣恕 (6654)
栓皮栎人工林树干液流对不同时间尺度气象因子及水面蒸发的响应	桑玉强,张劲松,孟 平,党宏忠,等 (6661)
赤眼蜂发育速率对梯度恒温的响应	陈洪凡,岑冠军,黄寿山 (6669)
学术信息与动态	
GIS 和遥感技术在生态安全评价与生物多样性保护中的应用	李文杰,张时煌 (6674)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 374 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 42 * 2010-12	

云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物 和土壤 C、N、P 化学计量特征

刘万德¹, 苏建荣^{1,*}, 李帅锋¹, 张志钧¹, 李忠文²

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 昆明 650224; 2. 云南省普洱市自然保护区管理处, 云南普洱 665000)

摘要: 通过测定中国西南季风常绿阔叶林不同演替阶段(演替 15a, 演替 30a 及原始林)群落中植物叶片与土壤中 C、N、P 含量, 探索了季风常绿阔叶林不同演替阶段群落 C、N、P 化学计量特征及其与物种丰富度及多度的相关性。结果表明: 土壤及植物中全 N、全 P 含量及土壤中 C 含量均为演替 30a 群落中最低, 而植物中 C 含量在不同演替阶段群落间无显著性差异。在不同演替阶段共有种中, 40% 的物种 N 含量原始林中最高, 40% 的物种 P 含量演替 15a 群落中最高, 而 80% 的物种 C 含量无显著性差异。土壤中 C:N 比在不同演替阶段间无显著变化, 而 N:P 及 C:P 比则随演替呈减小趋势。植物中 C:N 及 C:P 比均为演替 30a 群落最高, 而 N:P 比则随演替呈增加趋势。不同演替阶段共有种的 C:N 比中, 40% 的物种原始林中最低, 40% 的物种无差异, 而 C:P 与 N:P 比中则均有 60% 物种无显著性差异, 但 70% 物种在演替 15a 群落中 N:P 小于 14, 演替 30a 群落中 50% 物种 N:P 在 14—16, 原始林中则有 80% 物种 N:P 大于 16。群落物种丰富度及个体多度均与 C:N、N:P、C:P 无显著的相关性, 但植物中的 N、P 与土壤的 N、P 分别具有显著的线性正相关, 说明土壤中 N、P 供应量影响植物体中的 N、P 含量。

关键词: 演替阶段; 相关性分析; 化学计量; 季风常绿阔叶林

Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Pu'er, Yunnan Province

LIU Wande¹, SU Jianrong^{1,*}, LI Shuaifeng¹, ZHANG Zhijun¹, LI Zhongwen²

1 Research Institute of Resources Insect, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China

2 The Administrative Department of Pu'er Nature Reserve, Yunnan Pu'er 665000, China

Abstract: One of the principal insights of Darwin's theory of evolution by natural selection is the common descent of all organisms. Perhaps the strongest evidence for common descent is the shared underlying biochemistry based on nucleic acids, proteins, lipids, and other biomolecules. At the same time, natural selection has generated a plethora of morphologies, life history strategies and other differences that reflect variation in the way that organisms take up and transform energy and a variety of material elements. Ecological stoichiometry provides a framework for linking this variation with species interactions, food web dynamics, and nutrient cycling, and is a useful tool to study the effect of elemental composition of organisms on the nutrient cycling. Ecological stoichiometry is a complementary model of ecosystem functioning, potentially supplementing and extending insights from ecological energetics, which has been the dominant mode of biophysical analysis in ecology. Central to the stoichiometric application in ecology is realizing biological entities (such as molecules, organelles, cells, and organisms) varied considerably in terms of their elemental composition and these differences are fundamentally linked to important aspects of ecological functioning. Thus, the ways that organisms interact with each other and with their abiotic environment can be strongly and reciprocally influenced by the elemental requirements of organisms involved and the balance of chemical elements presented to them in their environment. In this study, we explored the relationship between the stoichiometry properties and the species diversity by testing C, N and P contents of

基金项目: 中国林业科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(riricaf201002M 和 CAFYBB2008001)

收稿日期: 2010-09-01; **修订日期:** 2010-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianrongsu@vip.sina.com

plant and soil across three successional stages (15 years old (CF), 30 years old (CT), and primary forest (CP)) of monsoon evergreen broad-leaved forests in Southwest China. The results showed that N and P contents in the soil and plants as well as soil C content were the lowest in the CT, and there was no significant difference in C content in plants across three successional stages. The N content of 40% common species were the highest in CP, and P content of 40% common species were the highest in CF, while no significant difference were detected to C content of 80% common species. The N/P and C/P ratios in soil decreased with succession, while no significant difference existed for the C/N ratio in soil. The C/N and C/P ratios in plants were the highest in CT, and the N/P ratio in plants increased with succession well. The C/N ratio of 40% common species were the lowest in CP, while there were no significant difference for the C/P and N/P ratios of 60% common species in three successional stage. However, the N/P ratio of 70% common species in CF were lower than 14, and 50% common species in CT were 14–16, and 80% common species in CP were higher than 16. There were no significant correlations between species richness (or abundance) and C/N, N/P and C/P ratios. However, N and P content in plants were positively correlated with their contents in soil respectively. Our test finally indicated that N and P content in soil would affect N and P content in plants.

Key Words: successional stages; correlation analysis; stoichiometry; monsoon evergreen broad-leaved forest

化学元素是生物体最本质的组成成分,它能够对有机体的许多行为进行有序调控^[1]。C、N、P 作为植物的基本化学元素,在植物生长和各种生理调节机能中发挥着重要作用^[2]。C 是构成植物体内干物质的最主要元素^[3],而 N 和 P 是各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素。由于自然界中 N 和 P 元素供应往往受限,因此成为生态系统生产力的主要限制因素^[4]。作为重要的生理指标,C:N 和 C:P 比值反映了植物生长速度^[5],并与植物对 N 和 P 的利用效率有关,N:P 比则是决定群落结构和功能的关键性指标,并且可以作为对生产力起限制性作用的营养元素的指示剂^[6]。因此,研究 C、N、P 在植物群落中的含量和分布格局十分必要。

近年来,生态化学计量学的提出,为研究生态系统中相互作用中的多种化学元素(如 C、N、P)提供了一种综合方法。生态化学计量学主要研究生态过程中化学元素的组成,强调的是活有机体的主要组成元素(特别是 C、N、P)的关系,因此跨越了个体、种群、群落、生态系统、景观和区域各个层次^[7]。尽管化学计量学在国外研究十分活跃^[6, 8–11],但在中国则刚刚起步。曾德慧和陈广生^[12]于 2005 年首次在国内系统的介绍了生态化学计量学的理论和发展,随后,高三平等^[13]和阎恩荣等^[14]对天童山演替系列群落进行了 N、P 的生态化学计量学研究,韩文轩等^[15]对北京周边植物叶片的 C、N、P 化学计量特征进行了测定。然而,目前这些研究多是关注不同的生态系统^[16–17],而对演替系列研究较少^[13–14, 18–19]。不同演替系列中 C、N、P 化学计量特征能够反应出生态系统中的主要限制性元素及 N、P 等元素的指示作用^[13–14, 18],从而为恢复群落的正确经营管理提供科学指导。此外,化学元素限制与物种组成更替具有密切的关系^[20],同一地点不同化学元素限制对植物群落的种类组成特征具有极强的选择作用^[6],进而影响植被动态以及生态系统生产力等功能特征^[20]。尽管 C、N、P 化学计量特征对恢复群落的经营管理具有重要意义,然而,C、N、P 化学计量特征是否在所有的演替系列群落中均具有相同的变化规律还没有得到确认,其影响因素如是否受群落的物种丰富度及个体多度影响还不清楚,对退化的指示意义还有哪些,所有这些问题的解决均需对 C、N、P 化学计量特征进行深入的研究。

中国西南季风常绿阔叶林是我国最复杂、生产力最高、生物多样性最丰富的地带性植被类型之一。但由于人类干扰活动的长期破坏,森林退化严重。本文通过对季风常绿阔叶林不同演替阶段(演替 15a、30a 和原始林)群落调查及树木叶片及土壤 C、N、P 的测定,分析不同演替阶段群落水平及共有物种 C、N、P 化学计量比特征,探讨群落水平 C、N、P 化学计量比特征与群落物种丰富度及个体多度和土壤 C、N、P 的相关性,从而揭示物种丰富度及个体多度和土壤 C、N、P 对植物群落 C、N、P 化学计量比特征的影响,并通过共有物种 C、N、P 化学计量比特征随演替时间的变化揭示演替时间的影响,同时对 N、P 养分限制作用进行判断,从而为该区域植被恢复策略的制定提供参考资料。

1 研究地和研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于云南省中南部的普洱市,地理位置为 $22^{\circ}02' - 24^{\circ}50'N$, $99^{\circ}09' - 102^{\circ}19'E$, 海拔 317—3370m。该区地处热带北缘向南亚热带的过渡地区,气候主要受印度洋及太平洋季风控制,形成夏秋季多雨、冬春季干旱、年温差小、日温差大、干湿季明显的气候特征。该地区年平均气温 $17.7^{\circ}C$, 年均降雨量 1547.6mm, 雨水主要集中在 5—10 月份, 占全年降雨量的 87.3%, 年平均蒸发量 1590mm, 相对湿度 82%。土壤以赤红壤为主。

季风常绿阔叶林是该地区主要的森林植被类型之一。由于森林距离人类活动区域较近,季风常绿阔叶林常被砍伐作为薪炭、改造成茶园及农地等。但近年来,随着各种森林保护措施的出台,森林得以不断恢复,形成了不同演替时间的季风常绿阔叶林群落。本文选择的季风常绿阔叶林演替系列群落均为皆伐后自然恢复群落。演替 15a 群落林分密度较大,平均高较低,缺乏大径级树木。其中,乔木物种个体最多的分别为华南石栎(*Lithocarpus fenestratus*)、母猪果(*Helicia nilagirica*)、山鸡椒(*Litsea cubeba*)、短刺栲(*Castanopsis echidnocarpa*)、红木荷(*Schima wallichii*), 灌木主要包括猪肚木(*Canthium horridum*)、多裂黄檀(*Dalbergia rimosa*)等,草本多为毛果珍珠茅(*Scleria herbearpa*)及蕨类(*Pteridophyta*)等。演替 30a 群落林分密度较 15a 为小,平均高较高,林内出现 20cm 以上树木。乔木组成包括短刺栲、华南石栎、毛银柴(*Aporosa villosa*)、粗壮润楠(*Machilus robusta*)、刺栲(*Castanopsis hystrix*)等,灌木则包括猪肚木、粗叶榕(*Ficus hirta*)等,草本较少,主要为蕨类。该区未被干扰的季风常绿阔叶林乔木主要以短刺栲、刺栲等为优势树种;灌木则以珍珠伞(*Ardisia maculosa*)、小叶干花豆(*Fordia microphylla*)等为主;草本多为毛果珍珠茅及蕨类等;同时群落中乔木的树干和林冠上附生有蕨类和兰科(*Orchidaceae*)植物,此外,板根现象和层间植物是该地区季风常绿阔叶林的一个重要特征。

1.2 野外调查及取样

野外调查选择在云南普洱地区。选择季风常绿阔叶林干扰(皆伐)后不同演替阶段的群落(演替 15a、30a 及原始林群落)设置调查样地。样地面积为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 每个演替阶段群落设置 3 个重复。利用网格样方法将样地分割成 36 个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的小样方,在小样方内对所有高度(或长度) $> 1.3\text{ m}$ 的植物进行每株调查。其中,乔木和灌木记录物种名称、高度、胸径、冠幅并进行定位,藤本植物则记录物种名称、胸径、长度并定位。同时,调查过程中按照梅花形在样地四角及中心取土壤样品,土层厚度为 0—20 cm,样品量约为 1 kg。此外,还对调查过程中样地出现的物种进行叶片采集,原则上是每个物种采集 10 株、每株采集成熟阳生叶片 2 片(由于所采叶片为阳生叶,采样部位一般选择树木的中、上部,利用高枝剪取枝条后选择完整、成熟叶片采集),对于样地中个体少于 10 株的物种则根据物种的个体多度进行分配每株的叶片采集数量,总数保证 20 片。

1.3 样品处理及测定

土壤样品采集后,剔除石粒和树根等杂物风干后,用玛瑙研磨仪研磨后过筛,装瓶待用。叶片则放入信封自然风干后磨碎,过筛后装瓶待用。本次共取得土壤样品 45 份和植物样品 256 份。植物和土壤中全氮采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮法(半微量凯氏法 GB 7173-87)测定,全磷用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法(GB 9837-88)测定,有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法(GB 9834-88)测定。

1.4 数据分析

不同演替阶段群落水平的植物叶片 C、N、P 含量采用加权平均值来表示。不同演替阶段群落植物与土壤 C、N、P、C:N、N:P 及 C:P 比、共有物种的 C、N、P、C:N、N:P、C:P 比及不同 N:P 植物种类及个体数量采用 SPSS 13.0 统计软件进行 ANOVA 分析,不同演替阶段群落物种丰富度及个体多度与群落 C、N、P 化学计量比、植物与土壤 C、N、P 之间的关系采用 SPSS 13.0 统计软件进行相关性分析。显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤 C、N、P 含量及化学计量比

不同演替阶段群落土壤 C 含量之间存在显著性差异(图 1A)。演替 15a 群落土壤 C 含量在 43.5—

56.9 g/kg, 平均值为 49.8 g/kg, 而演替 30a 群落土壤 C 含量平均值则为 31.2 g/kg (25.7—36.9 g/kg), 原始林土壤 C 含量平均值为 45.8 g/kg (29.4—56.1 g/kg), 演替 15a 群落土壤 C 含量显著高于演替 30a 群落, 而与原始林无显著性差异。

不同演替阶段群落土壤 N、P 含量变化趋势与 C 含量相同, 均是演替 15a 群落显著高于演替 30a 群落, 而与原始林无显著性差异 (图 1A)。

土壤 C:N 比随演替的发展呈现“圆柱体”分布模式, 但在 3 个演替阶段之间无显著性的差异 (图 1B); N:P 及 C:P 比则呈现出“倒金字塔”分布模式, N:P 比在演替 15a 群落中显著高于演替 30a 及原始林群落, 而 C:P 比则是演替 15a 群落显著高于原始林群落, 而与演替 30a 群落无显著性差异 (图 1B)。

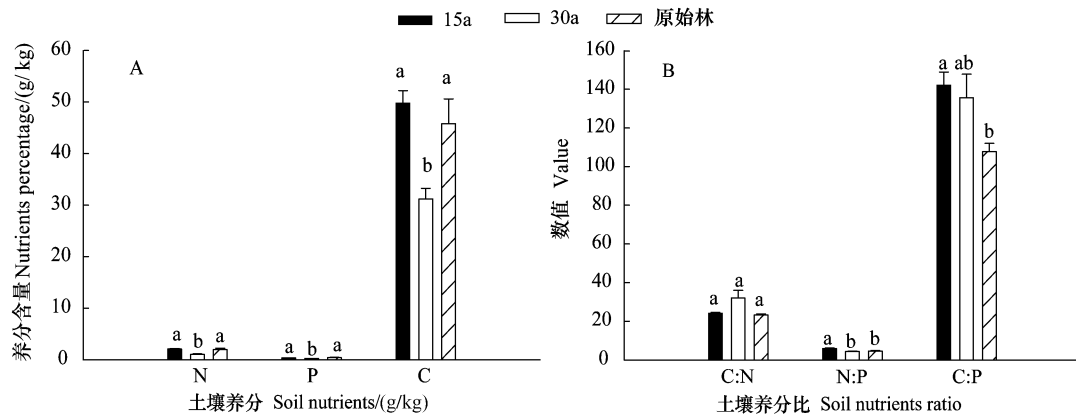


图 1 不同演替阶段土壤碳、氮、磷含量及化学计量比

Fig. 1 C, N and P concentrations and stoichiometry of soil at different succession stages communities

注: 柱状图顶部字母的不同表示存在显著性差异 ($P < 0.05$)

2.2 植物叶片 C、N、P 含量及化学计量比

2.2.1 群落水平上的 C、N、P 含量及化学计量比

不同演替阶段群落植物叶片 C 含量平均值在 469.3—486.3 g/kg, 彼此之间无显著性差异, 而 N 和 P 含量则是演替 15a 及原始林显著高于演替 30a 群落, 前两者之间无显著性差异 (表 1)。

演替 30a 群落 C:N 比显著高于演替 15a 及原始林群落, 而后两者之间无显著性差异; N:P 比则在原始林群落最高; 而 C:P 比由高到低依次为演替 30a 群落 > 原始林 > 演替 15a 群落 (表 1)。

表 1 不同演替时间群落 C、N、P 含量及化学计量比

Table 1 C, N, P concentrations and stoichiometry of plant at different succession stages communities

化学元素/(g/kg) Elements	演替时间 Succession stages/a		
	15	30	原始林 Primary forest
N	20.9 ± 1.4a	14.4 ± 0.5b	23.3 ± 1.3a
P	1.4 ± 0.1a	0.9 ± 0.1b	1.3 ± 0.1a
C	475.1 ± 6.1a	486.3 ± 6.2a	469.3 ± 6.2a
C:N	24.6 ± 1.8a	35.2 ± 0.6b	24.0 ± 1.3a
N:P	15.2 ± 0.6a	15.8 ± 0.9ab	17.8 ± 0.5b
C:P	358.7 ± 11.8a	553.2 ± 43.7b	419.1 ± 12.0c

字母的不同表示存在显著性差异 ($P < 0.05$)

2.2.2 共有物种的叶片 C、N、P 含量及化学计量比

通过对数据的整理, 统计出 3 个演替阶段群落中共有的、个体多度前 10 位的乔木物种列于表 2。杯状栲和华南石栎 N 含量在恢复 15a 及原始林中均显著高于恢复 30a 群落, 红木荷与粗壮润楠 N 含量则在原始林中最高, 而其它物种 N 含量在 3 个演替阶段群落中无显著性差异 (表 2)。茶梨、红木荷、毛银柴及腺叶木樨榄 P

含量均是演替 15a 群落中最高,但华南石栎 P 含量则是原始林中最,而其它 5 个物种 P 含量在 3 个演替阶段群落中无显著性差异(表 2)。红木荷及密花树 C 含量均是演替 15a 群落显著高于演替 30a 及原始林群落,其它物种 C 含量则在 3 个演替阶段群落中无显著性差异(表 2)。

表 2 不同演替阶段群落中共有物种叶片 C、N、P 含量及化学计量比

Table 2 C, N and P concentrations and stoichiometry of common species at different succession stages

物种 Species	恢复时间 Restoration time/a	N/ (g/kg)	P/ (g/kg)	C/ (g/kg)	C:N	N:P	C:P
杯状栲	15	21.3 ± 1.0a	1.4 ± 0.1a	485.1 ± 6.8a	22.9 ± 0.8a	15.0 ± 0.7a	344.4 ± 29.2a
<i>Castanopsis</i>	30	16.1 ± 0.9b	1.3 ± 0.1a	478.8 ± 2.7a	29.9 ± 1.8b	12.8 ± 0.2b	380.9 ± 19.8a
<i>calathiformis</i>	原始林	20.1 ± 0.4a	1.4 ± 0.1a	472.3 ± 1.2a	23.5 ± 0.5a	14.9 ± 0.7a	350.1 ± 15.0a
茶梨	15	11.6 ± 1.2a	1.0 ± 0.0a	524.5 ± 13.2a	45.6 ± 5.9a	12.0 ± 1.2a	539.9 ± 14.9a
<i>Anneslea</i>	30	11.9 ± 1.1a	0.7 ± 0.0b	506.3 ± 7.0a	43.2 ± 3.7a	18.1 ± 2.0a	767.7 ± 18.1b
<i>fragrans</i>	原始林	13.3 ± 0.5a	0.7 ± 0.1b	521.3 ± 8.6a	39.3 ± 1.3a	19.3 ± 3.4a	753.7 ± 118.6ab
粗壮润楠	15	13.2 ± 0.5a	1.0 ± 0.1a	501.3 ± 6.3a	37.9 ± 1.35a	12.9 ± 0.44a	491.0 ± 29.76ab
<i>Machilus</i>	30	13.5 ± 1.1a	0.9 ± 0.1a	509.2 ± 5.4a	38.34 ± 3.22a	15.48 ± 0.32ab	591.59 ± 38.30a
<i>robusta</i>	原始林	18.1 ± 1.7b	1.1 ± 0.1a	461.8 ± 17.8a	26.17 ± 3.22b	16.87 ± 1.32b	437.36 ± 50.27b
短刺栲	15	13.9 ± 0.6a	1.1 ± 0.1a	485.9 ± 5.7a	34.96 ± 1.13ab	12.36 ± 0.94a	431.78 ± 32.79a
<i>Castanopsis</i>	30	13.0 ± 0.9a	0.8 ± 0.1a	488.8 ± 8.1a	37.83 ± 2.5a	16.79 ± 2.3a	631.21 ± 75.8a
<i>echidnocarpa</i>	原始林	15.8 ± 0.7a	0.9 ± 0.1a	465.5 ± 11.2a	29.4 ± 0.6b	17.4 ± 1.3a	512.8 ± 49.6a
华南石栎	15	17.7 ± 0.8a	1.2 ± 0.0ab	515.0 ± 9.1a	29.3 ± 1.6ab	14.5 ± 0.9a	422.4 ± 7.0a
<i>Lithocarpus</i>	30	1.45 ± 0.1b	0.10 ± 0.0a	51.4 ± 0.6a	35.8 ± 3.2a	15.0 ± 2.5a	525.5 ± 63.6a
<i>fenestratus</i>	原始林	18.5 ± 0.3a	1.3 ± 0.0b	498.4 ± 6.3a	26.9 ± 0.7b	14.5 ± 0.4a	389.1 ± 4.9b
山鸡椒	15	22.9 ± 1.7a	1.4 ± 0.2a	497.8 ± 12.5a	22.0 ± 1.8a	16.4 ± 1.0a	363.9 ± 47.9a
<i>Litsea</i>	30	19.2 ± 2.0a	1.1 ± 0.1a	508.3 ± 19.5a	26.8 ± 1.9a	17.1 ± 1.7ab	455.8 ± 52.9a
<i>cubeba</i>	原始林	24.8 ± 1.1a	1.1 ± 0.1a	503.7 ± 0.2a	20.4 ± 0.9a	22.2 ± 0.1b	451.7 ± 21.7a
红木荷	15	14.9 ± 1.4ab	1.4 ± 0.4a	481.0 ± 3.0a	32.6 ± 3.2ab	11.4 ± 2.1a	377.7 ± 106.3a
<i>Schima</i>	30	12.0 ± 0.1a	0.7 ± 0.0b	437.7 ± 5.0b	36.5 ± 1.2a	18.2 ± 0.2a	662.7 ± 12.3b
<i>wallichii</i>	原始林	15.5 ± 0.2b	0.9 ± 0.1b	458.0 ± 24.5b	29.6 ± 1.0b	18.2 ± 0.8a	537.8 ± 45.2ab
毛银柴	15	17.7 ± 0.1a	1.7 ± 0.1a	382.3 ± 0.1a	21.6 ± 0.0a	10.1 ± 0.0a	219.1 ± 15.4a
<i>Aporosa</i>	30	17.6 ± 1.1a	1.2 ± 0.1b	384.8 ± 4.1a	22.0 ± 1.6a	15.1 ± 0.2b	333.4 ± 27.8a
<i>illosa</i>	原始林	20.6 ± 1.9a	1.3 ± 0.3ab	384.3 ± 14.4a	18.7 ± 1.0a	17.0 ± 2.1b	319.6 ± 57.1a
密花树	15	11.8 ± 0.1a	0.9 ± 0.1a	540.0 ± 12.5a	45.5 ± 1.0a	12.7 ± 0.4a	578.8 ± 12.3a
<i>Rapanea</i>	30	12.7 ± 0.8a	0.9 ± 0.1a	493.5 ± 1.4b	39.2 ± 2.6ab	14.9 ± 1.0a	579.9 ± 37.7a
<i>neriifolia</i>	原始林	14.0 ± 0.9a	0.9 ± 0.2a	476.7 ± 21.8b	34.1 ± 0.6b	17.1 ± 5.0a	579.5 ± 161.7a
腺叶木樨榄	15	14.9 ± 0.8a	1.1 ± 0.3a	494.3 ± 8.4a	33.4 ± 2.3a	13.7 ± 0.5a	454.0 ± 14.5a
<i>Olea</i>	30	12.2 ± 0.4a	0.9 ± 0.1b	469.0 ± 51.2a	38.4 ± 2.1a	13.4 ± 1.2a	515.4 ± 52.1a
<i>glandulifera</i>	原始林	15.1 ± 1.8a	0.9 ± 0.2ab	481.5 ± 3.7a	32.3 ± 4.1a	17.5 ± 2.3a	573.6 ± 147.0a

表中字母的不同表示存在显著性差异($P < 0.05$)

在 3 个演替阶段群落共有物种 C:N 比中,杯状栲和华南石栎演替 30a 群落中最高,而粗壮润楠、短刺栲、红木荷及密花树则是原始林中最,其它物种如茶梨、山鸡椒、毛银柴和腺叶木樨榄在 3 个演替阶段中则无显著性差异(表 2)。C:P 比中,茶梨和红木荷在演替 15a 的群落中最低,而粗壮润楠和华南石栎则在原始林中最,其它物种则无显著性差异(表 2)。在 3 个演替阶段群落共有物种 N:P 比中,杯状栲在演替 30a 群落中最低,仅为 12.8,而粗壮润楠和山鸡椒则在原始林中最,均大于 16,毛银柴则是恢复 15a 群落中最低为 10.1,其它物种在 3 个演替阶段中则无显著性差异(表 2)。此外,在所列的 10 个共有物种中,演替 15a 群落中 7 个物种 N:P 小于 14,1 个物种大于 16,2 个物种在 14—16 之间;演替 30a 群落中, N:P 小于 14 的物种仅有 1 个,而大于 16 的物种有 4 个,5 个物种在 14—16;而在原始林群落中, N:P 大于 16 的物种有 8 个,2 个物种在

14—16。

2.3 物种丰富度及个体多度与群落水平 C、N、P 化学计量比的关系

2.3.1 物种丰富度及个体多度与植物中 C、N、P 化学计量比的相关性

乔木、灌木、藤本及总物种丰富度均与C:N、N:P、C:P比无显著的相关性,乔木、灌木、藤本及总物种个体多度也均与C:N、N:P、C:P比无显著的相关性(表3)。

表3 物种丰富度及个体多度与 C、N、P 化学计量比的相关性

Table 3 Correlation between species richness, abundance and C, N and P stoichiometry

指标 Index	生长型 Growform	C:N	N:P	C:P
物种丰富度 Species richness	乔木	-0.163 ns	0.276 ns	-0.055 ns
	灌木	-0.158 ns	0.066 ns	-0.201 ns
	藤本	-0.485 ns	0.013 ns	-0.499 ns
	合计	-0.277 ns	0.246 ns	-0.202 ns
多度 Abundance	乔木	-0.117 ns	-0.095 ns	-0.195 ns
	灌木	-0.625 ns	0.150 ns	-0.572 ns
	藤本	-0.375 ns	-0.253 ns	-0.520 ns
	合计	-0.465 ns	-0.114 ns	-0.571 ns

ns 表示没有显著相关性

2.3.2 不同N:P比植物的物种丰富度及个体多度

植物叶片中N:P比值不同表明物种受不同养分元素限制。当植被的N:P小于14时,表明植物生长较大程度受到N素的限制作用,而大于16时,则反映植被生产力受P素的限制更为强烈,介于两者中间表明受到N、P元素的共同限制作用^[21]。N:P小于14和介于14—16的物种丰富度和多度在3个演替阶段中均无显著性差异,但N:P大于16的物种丰富度和多度在原始林中均显著高于演替15a和30a的群落,说明原始林中物种较恢复群落中更受P元素限制(表4)。

表4 三个演替阶段群落中不同N:P植物的物种丰富度与多度

Table 4 Species richness and abundance of different N:P at three succession stages communities

指标 Index	N:P	演替时间 Succession stages/a		
		15	30	原始林 Primary forest
物种丰富度 Species richness	<14	12.3 ± 3.7a	7.3 ± 1.9a	4.7 ± 1.5a
	14—16	5.7 ± 1.3a	7.7 ± 2.2a	8.3 ± 3.3a
	>16	8.7 ± 1.2a	10.3 ± 1.7a	20.3 ± 3.8b
多度 Abundance	<14	332.7 ± 143.3a	148.0 ± 40.1a	57.7 ± 18.0a
	14—16	178.3 ± 53.0a	303.7 ± 106.6a	181.3 ± 6.2a
	>16	269.3 ± 78.7a	184.0 ± 66.1a	598.3 ± 77.4b

表中字母的不同表示存在显著性差异($P < 0.05$)

2.4 植物与土壤 C、N、P 间的关系

植物叶片 N、P、C:N 比均与土壤的 N、P、C:N 分别具有显著的线性正相关(图2),而植物中的 C、N:P、C:P 则与土壤中的 C、N:P、C:P 无显著的相关性,说明土壤中 N、P 供应量影响植物体中的 N、P 含量,是限制植物生长的主要营养元素。

3 讨论

3.1 植物群落中叶片 N、P 含量及植物群落对 N、P 养分适应特征

3.1.1 植物群落中叶片 N、P 含量

N、P 等营养元素含量的高低影响植物的生长与群落动态。本研究中,不同演替阶段群落中植物叶片 N 和 P 含量平均值分别为 19.2 g/kg 和 1.2 g/kg,均在中国东部南北样带叶片 N 和 P 含量范围内(N:2.2—52.6

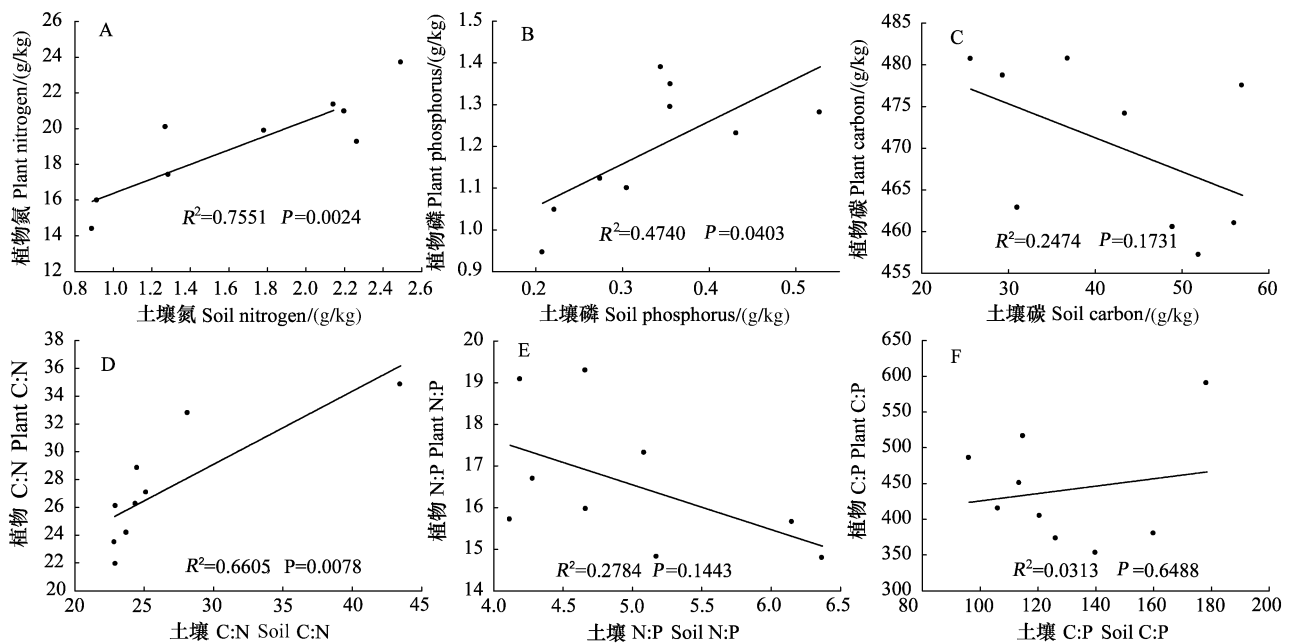


图2 不同演替阶段植物与土壤碳、氮、磷的关系

Fig. 2 Relationships of C, N and P concentrations between plant and soil

mg/g; P: 0.1—10.3 mg/g)^[22], 略低于全球植物叶片 N (20.6 mg/g) 与 P (2.0 mg/g) 平均含量^[6] 及我国植物叶片 N (20.2 mg/g)^[23] 与 P (1.5 mg/g)^[24] 平均含量, 但却高于珠江三角洲典型植被叶片 N (11.4 mg/g) 和 P (1.0 mg/g) 含量^[24]。植物叶片中 N 和 P 含量随群落的演替均呈现先减后增趋势。

植物体中化学元素主要来源于土壤, 其含量的高低与土壤中含量密切相关。本研究, 植物叶片及土壤 N 和 P 含量均随群落的演替均呈现先减后增趋势 (图 1A 和表 1), 表现出完全的一致性, 同时, 植物与土壤 N 和 P 之间也存在显著正相关关系 (图 2A 和 B), 这表明二者之间存在密切的关系。土壤 N 含量主要来源于凋落物归还、大气 N 沉降及一些固氮植物^[18], 而云南普洱地区, 凋落物归还还是土壤 N 含量的主要来源。在演替初期, 由于采伐产生了大量的枝、叶等采伐残余物及采伐引起幼苗、幼树的损伤或死亡, 短时间内迅速增加了采伐迹地的凋落物数量。与此同时, 森林采伐后, 林内环境发生改变, 林分郁闭度降低, 光照增加, 温度上升, 这增加了林下及土壤中微生物的活性, 使得凋落物分解速率加快, 凋落物 N 向土壤归还加速, 导致土壤 N 含量增高。随着演替的进行, 由于植物生长需要的养分不断增加, 而本身产生的凋落物量在演替初期较少, 导致土壤 N 含量降低。而在原始林中, 由于大量较大植物个体的存在, 凋落物产量明显高于演替中期, 由此产生的归还于土壤的 N 也高于演替中期, 土壤 N 含量再次升高。土壤 P 含量则主要来源于岩石的风化及凋落物归还。凋落物归还 P 过程类似于 N 归还过程, 而岩石的风化则是一个漫长的过程, 相对较稳定。正是由于土壤中 N 和 P 含量随群落演替过程的这种变化规律, 加之植物与土壤 N 和 P 的显著正相关关系, 导致了植物 N 和 P 含量随群落演替呈现初期高一中期低一后期高这种变化规律。

3.1.2 植物群落对 N、P 养分适应特征

N 和 P 是植物的基本营养元素, 对植物的生长、发育以及行为都起着重要的作用, 它们的循环限制着生态系统中的大多数过程^[25]。由于自然界中 N 和 P 元素供应往往受限, 成为生态系统生产力的主要限制因素^[4], 因此, 植物叶片的 N:P 临界比值被认为可以作为判断环境对植物生长的养分供应状况的指标^[26]。本研究中, 植物叶片 N:P 比值随群落演替逐渐增加, 共有种中 N:P 比值大于 16 的物种数也显示出随演替的进行而逐渐增多的趋势。研究显示, 当植物 N:P < 14 时, 植物生长表现为受 N 的限制; 当 N:P > 16 时, 表现为受 P 的限制, 14 < N:P < 16 时则同时受 N、P 限制或两者均不缺少^[27]。根据上述判断限制性因子的 N:P 阈值, 演替 30a 及原始林群落中 N:P 比值均大于 16, 说明这两个演替阶段群落中植物生长主要受 P 限制。随着演替的进

行,群落共有种 $N:P < 14$ 的物种数量比为7:1:0, $N:P > 16$ 的物种数量比为1:4:8,说明在演替初期,植物生长主要受N限制,而在演替后期主要受P限制。将群落水平及物种水平 $N:P$ 比值结合起来分析,不难看出,在演替初期群落中植物生长受N、P共同限制(群落水平 $N:P$ 为15,而多数共有物种受N限制,说明演替初期群落中植物生长受N、P共同限制),而随着演替的进行,植物生长转向P限制。这与大多数学者的研究结果是相一致的^[16, 19, 28]。森林生态系统原生演替或次生演替的后期阶段,常常伴随着生产力的下降以及腐殖质和新鲜凋落物中 $N:P$ 比的增加,表明随着时间推移森林生态系统越来越受到P的限制^[28]。

$N:P$ 比值在决定群落结构和功能上是个关键性的指标,对植物来说,高的生长速率不仅对应高的 $N:C$ 和 $P:C$ 比,而且对应低的 $N:P$ 比值^[29],植物的N和P共同决定着生态系统的生产力^[30]。由于N、P元素在陆地生态系统中有着紧密的交互作用^[31],群体水平的N、P含量、分布特征及其比值可能对我们了解整个生态系统对N、P的需求更加重要。因此,应用 $N:P$ 化学计量学的原理和方法,探索不同演替阶段群落及物种水平 $N:P$ 比值的变化,掌握不同演替阶段限制植物生长的主要因素,对于目标物种的存在和生长及制定相应的群落恢复策略以加速群落的演替进程并提高生态系统生产力具有重要意义。

3.2 植物群落中叶片C含量及 $C:N$ 与 $C:P$ 比

3.2.1 植物群落中叶片C含量及其与N、P的化学计量比

C作为大气和温室气体的主要组成元素,特别是由于森林具有C的“源”与“汇”双重功能而倍受关注^[32]。本研究中,不同演替阶段群落中植物叶片C含量平均值为470.3 g/kg,略高于全球植物叶片C平均含量(464 mg/g)^[6]及我国黄土高原植被叶片C含量(438 mg/g)^[33],但却低于珠江三角洲典型植被叶片C含量(502.3 mg/g)^[24]。不同演替阶段植物群落 $C:N$ 比在23.9—31.6,高于全球平均水平(22.5)^[6]及我国草原区植物叶片的平均水平(17.9)^[16]和黄土高原的植物叶片平均水平(21.2)^[33],但却低于浙江天童山常绿阔叶林(39.9)和常绿针叶林(48.1)^[34]。不同演替阶段植物群落 $C:P$ 比在370.0—508.7,高于全球平均水平(232)^[6]及我国浙江天童山落叶阔叶林(337.9)^[34]和黄土高原的植物叶片平均水平(312)^[33],而低于浙江天童山的常绿阔叶林(758)和常绿针叶林(677.9)。在不同演替阶段群落之间比较上, $C:N$ 和 $C:P$ 均为演替30a群落中最高,这与各演替阶段群落中C、N、P含量是相一致的。在3个演替阶段的群落中,N和P含量均是演替30a群落中最低,而C含量演替30a群落与演替15a群落及原始林无差异(表1),从而导致了 $C:N$ 和 $C:P$ 比在演替30a群落中最高。 $C:N$ 和 $C:P$ 比大小除与群落水平上植物体中养分含量高低有关外,也可能与植物的生长速度改变有关。一般来说,较低的 $C:P$ 比值反映了分配到rRNA中P的增加,用以满足核糖体快速地合成蛋白质以支持植物快速生长的需要^[5]。

3.2.2 $C:N$ 、 $C:P$ 化学计量比与全球C循环

植物群落中叶片 $C:N$ 和 $C:P$ 比代表着植物吸收营养元素时所能同化C的能力,反映了植物营养元素的利用效率,同时也代表着不同群落或植物固C效率的高低,即C积累速率和存储能力是与限制植物生长的N和P供应相联系的^[35]。本研究中,演替30a群落中叶片 $C:N$ 和 $C:P$ 均为最高,表明演替30a群落中吸收相同数量营养元素时固定的C量最高。C与N、P化学计量比的研究表明,生态系统中C储存在一定程度上是由关键养分N、P的可获得量所控制的,N、P稀缺意味着C的相对过量($C:N$ 和 $C:P$ 上升),反之,N、P充裕意味着C的相对不足($C:N$ 和 $C:P$ 下降)^[26]。因此,生态系统在养分库增加、C:养分(N、P)比增加或者养分从低C:养分比组分到高C:养分比组分的再分配过程中C储量会有所增加^[36]。本研究则显示,演替30a群落中C固定效率要高于演替初期及演替末期。生物体中C与关键养分元素(N、P)化学计量比值的差异能够调控和影响生态系统中C的消耗或固定(C循环)过程^[12],即通过对C、N、P化学计量比的研究可以很好地了解生态系统的C循环。利用 $C:N:P$ 比这样易获取的生态参数预测生态系统C、N、P的平衡趋势,有助于估算生态系统碳汇潜力。尽管C循环是生态学领域的一个热点问题,然而全球C“失汇”及全球C循环的稳定性如何维持仍然困扰着生态学家,而通过C、N、P化学计量比的分析,探讨生态系统元素平衡的 $C:N:P$ 比临界值,预测养分循环速率,并着重从生态化学计量学的理论认识植物-凋落物-土壤相互作用的养分调控因素,进而掌握C循环

调控机制,对于揭示 C、N、P 元素之间的交互作用及平衡制约关系,促进生态化学计量学理论的发展,为减缓温室效应提供新思路 and 理论依据^[12]。因此,利用生态化学计量学方法研究全球 C 循环将可能是今后的热点。

3.3 群落物种丰富度、个体多度与 C、N、P 化学计量比的关系

物种丰富度和个体多度是群落的两个基本特征,前者反映了群落多样性的 size,后者则反映了群落的密度特征。不同演替阶段群落的物种丰富度及个体多度存在一定的变化规律^[37],而群落水平的 C、N、P 化学计量比是群落中所有物种及它们个体多度的加权平均结果,这必然与群落中的物种及多度存在密切关系。但本研究中,物种丰富度、个体多度与 C:N、N:P、C:P 的相关性分析并未检测出具有显著的相关性,表明在本研究中物种丰富度及个体多度对群落水平的 C、N、P 化学计量比没有影响。这一结果是否适用所有的同类及其它类型森林还有待进一步验证。然而,群落水平的 C、N、P 化学计量比的计算过程告诉我们,C:N、N:P、C:P 比与每个物种的 C:N、N:P、C:P 比值大小和物种个体多度存在密切关系,那么,群落水平的 C、N、P 化学计量比是否受群落的物种组成以及不同物种的个体多度影响有待进一步研究。

References:

- [1] Michaels A F. The ratios of life. *Science*, 2003, 300(5621): 906-907.
- [2] Reich P B, Tjoelker M G, Machado J L, Oleksyn J. Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants. *Nature*, 2006, 439(7095): 457-461.
- [3] Xiang W H, Huang Z H, Yan W D, Tian D L, Lei P F. Review on coupling of interactive functions between carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2365-2372.
- [4] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [5] Ågren G I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs-theory and observations. *Ecology Letters*, 2004, 7(3): 185-191.
- [6] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [7] He J S, Han X G. Ecological stoichiometry: searching for unifying principles from individuals to ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 2-6.
- [8] Schade J D, Espeleta J F, Klausmeier C A, McGroddy M E, Thomas S A, Zhang L. A conceptual framework for ecosystem stoichiometry: balancing resource supply and demand. *Oikos*, 2005, 109(1): 40-51.
- [9] Hall S R, Leibold M A, Lytle D A, Smith V H. Inedible producers in food webs: Controls on stoichiometric food quality and composition of grazers. *American Naturalist*, 2006, 167(5): 628-637.
- [10] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 1958, 46(1): 205-221.
- [11] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390-2401.
- [12] Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [13] Gao S P, Li J X, Xu M C, Chen X, Dai J. Leaf N and P stoichiometry of common species in successional stages of the evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 947-952.
- [14] Yan E R, Wang X H, Zhou W. N:P stoichiometry in secondary succession in evergreen broad-leaved forest, Tiantong, East China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(1): 13-22.
- [15] Han W X, Wu Y, Tang L Y, Chen Y H, Li L P, He J S, Fang J Y. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry across plant species in Beijing and its periphery. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(5): 855-860.
- [16] He J S, Wang L, Flynn D F B, Wang X, Ma W, Fang J. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, 2008, 155(2): 301-310.
- [17] Yang K, Huang J H, Dong D, Ma W H, He J S. Canopy leaf N and P stoichiometry in grassland communities of Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 17-22.
- [18] Liu X Z, Zhou G Y, Zhang D Q, Liu S Z, Chu G W, Yan J H. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 64-71.
- [19] Yin X R, Liang C Z, Wang L X, Wang W, Liu Z L, Liu X P. Ecological stoichiometry of plant nutrients at different restoration succession stages in typical steppe of Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 39-47.
- [20] Andersen T, Elser J J, Hessen D O. Stoichiometry and population dynamics. *Ecology Letters*, 2004, 7(9): 884-900.
- [21] Drenovsky R E, Richards J H. Critical N:P values: predicting nutrient deficiencies in desert shrublands. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2):

59-69.

- [22] Ren S J, Yu G R, Tao B, Wang S Q. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 1-9.
- [23] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Yan Z. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [24] Wu T G, Chen B F, Xiao Y H, Pan Y J, Chen Y, Xiao J H. Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 58-63.
- [25] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30(2): 1-68.
- [26] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [27] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523-534.
- [28] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. *Science*, 2004, 305(5683): 509-513.
- [29] Elser J J, Acharya K, Kyle M, Cotner J, Makino W, Markow T, Watts T, Hobbie S, Fagan W, Schade J, Hood J, Sterner R W. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecology Letters*, 2003, 6(10): 936-943.
- [30] Treseder K K, Vitousek P M. Effects of soil nutrient availability on investment in acquisition of N and P in Hawaiian rain forests. *Ecology*, 2001, 82(4): 946-954.
- [31] Chapin III F S, Mstson P A, Mooney H A, Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer, 2002: 298.
- [32] Svensson M, Jansson P E, Gustafsson D, Kleja D B, Langvall O, Lindroth A. Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand. *Ecological Modelling*, 2008, 213(3/4): 331-344.
- [33] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial distribution of leaf nutrition composition in Loess Plateau. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(8): 965-973.
- [34] Yan E R, Wang X H, Guo M, Zhong Q, Zhou W. C:N:P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 48-57.
- [35] Herbert D A, Williams M, Rastetter E B. A model analysis of N and P limitation on carbon accumulation in Amazonian secondary forest after alternate land-use abandonment. *Biogeochemistry*, 2003, 65(1): 121-150.
- [36] Rastetter E B, Shaver G R. A model of multiple-element limitation for acclimating vegetation. *Ecology*, 1992, 73(4): 1157-1174.
- [37] Cutler N A, Belyea L R, Dugmore A J. The spatiotemporal dynamics of a primary succession. *Journal of Ecology*, 2008, 96(2): 231-246.

参考文献:

- [3] 项文化, 黄志宏, 闫文德, 田大伦, 雷丕锋. 森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述. *生态学报*, 2006, 26(7): 2365-2372.
- [7] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.
- [12] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [13] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 陈熙, 戴杰. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征. *生态学报*, 2007, 27(3): 947-952.
- [14] 阎恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N:P 化学计量特征. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 13-22.
- [15] 韩文轩, 吴漪, 汤璐瑛, 陈雅涵, 李利平, 贺金生, 方精云. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征. *北京大学学报*, 2009, 45(5): 855-860.
- [17] 杨阔, 黄建辉, 董丹, 马文红, 贺金生. 青藏高原草地植物群落冠层叶片氮磷化学计量学. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 17-22.
- [18] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量学. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- [19] 银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 王炜, 刘钟龄, 刘小平. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 39-47.
- [22] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. *环境科学*, 2007, 28(12): 1-9.
- [24] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 潘勇军, 陈勇, 萧江华. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 58-63.
- [33] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局. *自然科学进展*, 2006, 16(8): 965-973.
- [34] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 仲强, 周武. 浙江天童山常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C:N:P 化学计量特征. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 48-57.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 23 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 23 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元