

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **2012**

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 32 卷 第 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
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	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201110181550

刘亚迪, 范少辉, 蔡春菊, 刘广路, 肖复明, 张大鹏. 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. 生态学报, 2012, 32(22): 6955-6963.

Liu Y D, Fan S H, Cai C J, Liu G L, Xiao F M, Zhang D P. Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for *Phyllostachys praecox* over soil-surface mulching. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 6955-6963.

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

刘亚迪¹, 范少辉^{1,*}, 蔡春菊¹, 刘广路¹, 肖复明², 张大鹏¹

(1. 国际竹藤中心, 竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102; 2. 江西省林业科学院, 江西 330032)

摘要: 为了解不同覆盖栽培年限雷竹林凋落物养分及其化学计量特征, 分析了换叶期雷竹林凋落物的凋落量, C、N、P、K 养分含量, 养分季节归还量以及养分元素生态化学计量比值在不同覆盖年限之间的差异。结果表明: (1) 雷竹林在连续覆盖 3a 后, 叶凋落量极显著性提高 ($P < 0.01$), 在总凋落量中比例增加, 但枝凋落量变化不明显。(2) 连续 3a 覆盖对雷竹林凋落物中的养分含量影响极显著 ($P < 0.01$), C、N 养分含量极显著降低, P 含量极显著升高, 而 K 养分含量在覆盖 2a 时就出现了显著增加的变化响应; 林地凋落物的养分归还量同时还受凋落量的影响, 其伴随覆盖年限增长的变化趋势与养分含量并不一致。(3) 覆盖 2a 内的雷竹林地凋落物表现出稳定的高 N:P 以及低 P 含量, 表明凋落物分解速率较低; 连续覆盖 3a 的林地凋落物 P 含量极显著升高, N:P 极显著下降 ($P < 0.01$), 表明此时凋落物分解速率加快。(4) 线性回归分析表明, 凋落物中 K 元素随覆盖年限增长而消耗的规律与 N、P 元素无显著相关关系。

关键词: 雷竹; 凋落物; 养分含量; 养分归还量; 化学计量特征

Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for *Phyllostachys praecox* over soil-surface mulching

LIU Yadi¹, FAN Shaohui^{1,*}, CAI Chunju¹, LIU Guanglu¹, XIAO Fuming², ZHANG Dapeng¹

1 Key Laboratory for Bamboo and Rattan, International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

2 Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China

Abstract: Litter plays an important part of the nutrient circle involving plants and soil in forest ecosystems, with its nutrient return determining the productivity of forestlands. The quality factors and relative decomposability of litter are internal factors that restrict nutrient contribution. Ecological stoichiometry, which is a theory applied in the nutrient elements' response to ecological environment interaction, has been widely incorporated into nutrient cycling research. Several analyses have indicated that nutrient contents and their stoichiometric ratio influence the litter decomposition rate and nutrient cycling. In the present work, we determined whether or not litter nutrients and the stoichiometric characteristics of these nutrients could be applicable in *Phyllostachys praecox*. Litter production, nutrient content, nutrient return, and nutrient mass ratios of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) were investigated to understand litter nutrient differentiation and the ecological stoichiometry of *P. praecox* over several years of mulching during refoliation. The results of the present study showed that: (1) Leaf litter production, which accounts for the majority of the total litter produced, increased by extremely significant levels ($P < 0.01$) over three years of mulching. In contrast, no significant

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费“退耕竹林水土保持功能高效经营技术研究”(201104021)

收稿日期: 2011-10-18; 修订日期: 2012-05-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fansh@icbr.ac.cn

changes were observed for twig litter production. (2) The nutrient contents of litter reflected highly significant differences ($P < 0.01$) over three years of mulching. The C and N contents significantly decreased, while the opposite trend was found in P. The K content increased significantly over two years of mulching. The litter nutrient return showed variations in change trends with nutrient contents and increasing number of mulching years. (3) Constantly high N:P ratios and low P concentrations were observed over the first two years of mulching, indicating a low litter decomposition rate. However, the N:P ratio decreased significantly ($P < 0.01$) on the third year of continuous mulching, exhibiting a higher litter decomposition rate in contrast to previous years. (4) Linear regression analysis showed that the consumption of K in litter was independent of elemental N and P.

Key Words: *Phyllostachys praecox* Z. D. Chu et C. S. Chao f. *prevelnalis*; litter; nutrient content; nutrient return; stoichiometry

凋落物是森林生态系统中连接植物与土壤养分循环的重要纽带,其养分的归还决定着森林生态系统林地生产力的高低。一方面,凋落物中有机成分(木质素、纤维素、半纤维素等)的降解是自然界中维持碳(C)素平衡不可缺少的过程^[1];另一方面,凋落物作为营养元素的基本载体,为森林物质生长发育提供了充足的养分,对于改善土壤的理化性质,增加土壤孔隙度和土壤肥力,提高森林的生产力都具有非常重要的作用。

凋落物的积累和分解是维持森林生态系统功能及养分循环的重要因素^[2]。相关研究认为,森林每年通过凋落物分解归还给土壤的总氮(N)量占森林生长所需总N量的70%—80%,总磷(P)量占65%—80%,总钾(K)量占30%—40%^[3]。而凋落物的质量因素及其相对可分解性是制约其对林地生产力贡献量的内在因素^[4]。它依赖于构成组织的易分解成分(N、P、K等)和难分解有机成分(木质素、纤维素、半纤维素、多酚类物质等)的组合比例、组织的养分含量以及组织的结构^[5]。在此基础上,学者们近年来普遍运用生态化学计量学来研究元素的质量平衡对生态系统内生物群落与无机环境之间交互作用的影响^[6],认为N含量^[7]、P含量^[8]、C:N^[9]、C:P^[10]、N:P^[11]是制约凋落物分解速率重要的质量因素。因此,凋落物养分元素的化学计量特征是目前研究森林生态系统林地生产力的重要指示性指标。目前国内外对于养分化学计量学与生产力关系的研究主要集中在N、P这两大对植物生长最重要的元素上,然而K作为对光能的转化以及糖类产物的转移具有显著作用的一种重要元素^[8],关于N:K和P:K相关方面的研究却很少,森林生态系统凋落物K元素化学计量特征对系统稳定性指示作用方面的报道尤其缺乏。

雷竹(*Phyllostachys praecox* Z. D. Chu et C. S. Chao f. *prevelnalis*)是禾本科(Gramineae)竹亚科(Bambusoideae)刚竹属(*Phyllostachys*)的一种优良的栽培笋用竹种。近年来,以冬季地表增温覆盖和施肥为核心的雷竹早产高效栽培技术的实施^[12],显著提高了雷竹林的经济产出效益。但随着竹产区长期集约经营,雷竹林已经提早出现了土壤质量下降^[13-14]、竹笋产量和品质下降^[15-16]以及立竹开花^[17-18]等不同程度的退化现象,严重影响到竹农家庭经济收入的稳定增加。针对这一问题科研工作者做了大量研究,大多从外因的角度围绕人为经营措施对土壤环境的影响展开,而人为干扰下雷竹林养分的流失亏缺及其代谢循环的失衡是导致植被退化乃至系统稳定性失衡的重要诱因之一^[19],雷竹植物体组织中的营养元素含量可以很好的表征退化林地中营养元素的限制作用^[20],而与最小养分定律密切相关的植物体元素化学计量特征可以指示所在生态系统的C积累动态和N、P、K等养分的限制格局^[21-22],凋落物的养分化学计量特征则能进一步表征植物体的养分重吸收特征,从一定程度上更体现了植物体养分归还能力^[9,11]以及调整自身代谢规律以适应外界环境养分限制的过程^[23],由此对地表覆盖栽培雷竹林养分代谢规律展开研究也就极具意义。而目前从雷竹林凋落物特征方面着手,关于雷竹林养分吸收、转移以及归还动态的研究少有报道。本文试图对换叶期不同覆盖年限雷竹林凋落物量、养分含量以及养分归还特征进行观测,从凋落物质量指标着手,研究覆盖年限对凋落物养分生态化学计量特征的影响,为进一步探索覆盖栽培雷竹林退化机理提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究试验地位于江西省万年县大源镇荷溪村(E 117°09'33", N 28°43'45")。该县属亚热带湿润性季风气候,气候温和,光照充足,雨量充沛,无霜期 261 d,年均日照 1 887.2 h,年均气温 17.7 °C,年均降雨量 1 766 mm,林业用地面积 6.46 万 hm²,森林覆盖率达 64.2%。土壤以水稻土为主,红壤、湖土次之,并有少量的紫色土和红色灰土,适应多种农作物和亚热带植被的生长。自 20 世纪 90 年代末,在国家“退耕还林工程”建设的积极响应下,针对山区农民人均耕地少的实际,该县开始鼓励农民种植雷竹,并引进了覆盖栽培技术,目前该县已立足把雷竹做成优势产业,预计到 2012 年,全县雷竹种植面积将达到 0.67 万 hm²。研究区的试验林为 2003 年统一由水稻田退耕改植的雷竹林,种植后一般从第 5 年开始进行地表覆盖和大量施肥,基本上采用的是稻草+砻糠双层覆盖法,即下层增温层采用稻草作为发热增温材料,厚度约为 10 cm;上层保温层采用砻糠作为保温材料,厚度约为 20 cm。施肥一般每年 3 次,分别于 6 月、9 月和 12 月覆盖前进行,3 次肥料用量的比例分别控制在 40%、30% 和 40%。整个管理方式采用统一规范经营,受农户个体经营差异的影响小,易于试验的开展。

1.2 样地设置与凋落物的收集

选择立地条件一致的不同覆盖年限的雷竹林 3 块,分别为覆盖 1a、覆盖 2a、覆盖 3a,于 2011 年 6 月采集各试验林耕层土壤(0—30 cm)进行土壤养分特征分析^[24],结果见表 1。在每块试验林中设置 5 m × 5 m 固定样地 3 个(样地闭合差不得大于 1/100),在每一样地按照对角线布置 3 个凋落物收集器,收集器由遮阴网和 4 根固定支柱制成,呈规格为 0.5 m × 0.5 m × 0.2 m 的立方体型,底面遮阴网离地面 10 cm。在雷竹林换叶期(2011 年 3 月 30 日至 6 月 30 日)将每一收集器中的地上凋落物(包括叶、枝、箨片以及鸟粪、昆虫尸体等杂物)分别收集起来(每月收集一次,3 次混合取样),编号后用封口袋封好带回实验室进行分析测试。采样前要求连续 3 d 晴朗无雨。

表 1 试验雷竹林耕层土壤(0—30 cm)的养分特征

Table 1 Characteristic of soil nutrient in arable layer (0—30 cm) for *Phyllostachys praecox* stands

覆盖年限/a Years of mulching	pH	有机质 Organic matter content /(g/kg)	全氮 Total N content /(g/kg)	全磷 Total P content /(g/kg)	全钾 Total K content /(g/kg)	水解氮 Hydrolysable N content /(g/kg)	有效磷 Available P content /(g/kg)	速效钾 Available K content /(g/kg)
1	4.86	12.32	1.66	1.31	24.32	0.17	0.25	0.88
2	4.49	13.63	1.65	1.40	25.91	0.17	0.27	0.83
3	4.15	15.12	1.69	1.97	21.39	0.22	0.37	0.56

1.3 样品的测定分析

将收集的凋落物在室内除去鸟粪、昆虫尸体等杂物以后进行分类,分为叶、枝(其中箨片所占的比例极小,忽略不计)成分,分别于 65 °C 条件下烘 48 h 至恒重,用万分之一天平称重,计算收集到的单位面积不同凋落物各组成部分的量及总量。其中凋落量为单位面积凋落物各组分之和;凋落物养分含量是各组分养分含量的加权平均值(加权系数按各组分占总量的比例计算);养分归还量为凋落物养分含量与单位面积内凋落物量的乘积^[25]。将烘干的样品用粉碎机碾磨后过 60 目筛进行营养元素含量的测定。其中 C 采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 氧化法,全 N、P、K 含量用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,分别用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和原子吸收法测定^[24],测定结果以单位质量的养分含量表示,C、N、P 化学计量比采用质量比表示。

1.4 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 13.0 软件进行数据处理及统计分析。采用方差分析中单因素(one-way ANOVA)和最小显著性多重比较(LSD)检验不同覆盖年限雷竹林凋落量以及凋落物 C、N、P、K 养分含量、养分归还量和 C、N、P、K 化学计量比之间的差异;采用 Pearson 相关分析测度凋落物养分归还量与养分含量之间相关关系的

强弱程度;采用线性回归分析 N、P、K 养分含量及其化学计量比值之间的相关关系^[26]。

2 结果

2.1 不同覆盖年限雷竹林凋落物组成及凋落量

由表 2 可以看出,雷竹林凋落物组分中叶占的比例比较大,且随着覆盖年限的增加凋落量呈递增的趋势。与覆盖 1a 的相比,覆盖 2a 的雷竹林凋落物各组分的凋落量变化并不显著 ($P>0.05$),覆盖 3a 的雷竹林变化程度达到极显著水平 ($P<0.01$),其中叶凋落增加量为 0.39 t/hm^2 ,而枝的凋落量在覆盖年限层面上的差异与叶相比并不明显;总凋落量与叶凋落量随覆盖年限而变化的趋势一致,且覆盖 3a 的雷竹林的凋落总量比覆盖 1a 的增加了 0.41 t/hm^2 ,其中凋落叶在总凋落物中的比例高达 77%。

表 2 不同覆盖年限雷竹林凋落物组成及凋落量(平均值±标准方差)

Table 2 Composition and seasonal amounts of litter in <i>Phyllostachys praecox</i> of different years of mulching (mean±SD)			
覆盖年限/a Years of mulching	叶 Leaves /(t/hm ²)	枝 Twigs /(t/hm ²)	总计 Total /(t/hm ²)
1	0.90±0.06 bB	0.36±0.01 bA	1.26±0.05 bB
2	0.98±0.08 bB	0.38±0.01 aA	1.36±0.09 bB
3	1.29±0.04 aA	0.39±0.01 aA	1.67±0.04 aA

小写字母表示达到显著水平($P<0.05$),大写字母表示达到极显著水平($P<0.01$)

2.2 不同覆盖年限雷竹林凋落物养分含量以及养分归还量

由表 3 可以看出,覆盖栽培促使雷竹林凋落物 C、N、P、K 养分含量以及养分归还量发生显著变化 ($P<0.05$),各养分含量的变化趋势与养分归还量的趋势并不一致。随着覆盖年限的增加,C 含量呈极显著下降的趋势 ($P<0.01$),而 C 归还量则呈相反的趋势,二者的相关关系比较(表 4)也显示 C 含量与 C 归还量之间并不存在显著相关关系 ($P>0.05$);N、P 养分含量均在覆盖 3a 时才发生极显著变化 ($P<0.01$),其中 N 含量极显著降低,为 9.86 mg/g ,而 P 含量极显著升高,为 4.00 mg/g ;N 归还量随着覆盖年限的增加并没有表现出线性规律,而呈波动性状态,在覆盖 2a 时极显著升高 ($P<0.01$),覆盖 3a 后又极显著下降 ($P<0.01$),P 的归还量在覆盖 3a 时极显著升高 ($P<0.01$),达到 6.70 kg/hm^2 ,为覆盖 1a 的 2.43 倍。K 养分的含量和归还量则随覆盖年限的增长均呈显著起伏变化趋势 ($P<0.05$),在覆盖 2a 时值最大。N、P 和 K 养分含量与养分归还量的相关关系比较表明(表 4),只有 P 含量与 P 养分归还量之间存在显著相关 ($P<0.05$, $R^2=0.998$)。

表 3 不同覆盖年限雷竹林凋落物养分含量以及季节养分归还量(平均值±标准方差)

Table 3 Nutrient content and seasonal nutrient return of litter in <i>Phyllostachys praecox</i> of different years of mulching (mean±SD)								
覆盖年限/a Years of mulching	养分含量 Nutrient content/(mg/g)				养分归还量 Nutrient return/(kg/hm ²)			
	C	N	P	K	C	N	P	K
1	407.01±2.80aA	14.15±0.06 aA	2.20±0.02 bB	1.75±0.14bB	511.75±3.52 cC	17.79±0.07 bB	2.76±0.03cB	2.20±0.18cB
2	389.84±2.31bB	14.30±0.03 aA	2.14±0.01 bB	2.93±0.31aA	531.23±3.14 bB	19.48±0.04 aA	2.91±0.01bB	3.99±0.42aA
3	374.66±1.15cC	9.86±0.13 bB	4.00±0.04 aA	1.82±0.01bAB	627.43±1.93 aA	16.51±0.21 cC	6.70±0.06aA	3.05±0.02bAB

表 4 覆盖栽培雷竹林凋落物养分含量与养分归还量的相关关系

Table 4 Relationship between nutrient content and nutrient return of litter in <i>Phyllostachys praecox</i>				
养分含量 Nutrient content	C 含量 Carbon content	N 含量 Nitrogen content	P 含量 Phosphorus content	K 含量 Potassium content
养分归还量 Nutrient return	C 归还量 Carbon return	N 归还量 Nitrogen return	P 归还量 Phosphorus return	K 归还量 Potassium return
相关系数 Correlation coefficient	0.947	0.840	0.998 *	0.904

* 表示达到显著水平($P<0.05$)

2.3 不同覆盖年限雷竹林凋落物养分的化学计量比

表 5 所示,覆盖 2a 雷竹林 C:N、C:P、N:P 与覆盖 1a 雷竹林相比,变化差异并没有达到极显著水平 ($P>0.01$),其中 C:N、C:P 均有下降的趋势,N:P 则有所升高;而覆盖 3a 雷竹林却有极显著性变化 ($P<0.01$),C:N 极显著性升高 ($P<0.01$),而 C:P、N:P 则极显著性降低 ($P<0.01$),分别为覆盖 1a 雷竹林相应比值的 0.51 倍和 0.38 倍。N:K、P:K 随覆盖年限的增加呈显著的先降低后升高的起伏波动变化 ($P<0.05$)。

表 5 不同覆盖年限雷竹林凋落物养分元素化学计量特征(平均值±标准方差)

Table 5 Stoichiometry of nutrient elements of litter in *Phyllostachys praecox* of different years of mulching (mean±SD)

覆盖年限/a Years of mulching	C:N C:N ratio	C:P C:P ratio	N:P N:P ratio	N:K N:K ratio	P:K P:K ratio
1	28.77±0.32bB	185.24±0.76aA	6.44±0.10bA	8.10±0.69aA	1.26±0.09bB
2	27.27±0.21cB	182.28±1.89aA	6.68±0.02aA	4.90±0.50bB	0.73±0.07cC
3	38.01±0.37aA	93.69±1.11bB	2.46±0.05cB	5.42±0.03bAB	2.20±0.03aA

凋落物中 N、P、K 不同养分含量之间及其化学计量比之间的线性回归分析结果显示(表 6),凋落物 N、P 含量之间存在极显著的线性负相关 ($P<0.01$),其中 N 含量与 N:P 呈显著正相关 ($P<0.05$),而 P 含量与 N:P 呈显著负相关 ($P<0.05$);K 含量与 N、P 含量之间均不存在显著线性关系 ($P>0.05$)。

表 6 覆盖栽培雷竹林凋落物 N、P、K 养分含量及其化学计量比的线性回归分析

Table 6 Linear regression analysis of N、P、K content and stoichiometric ratio of litter in *Phyllostachys praecox*

	N 含量 Content N	K 含量 Content K	K 含量 Content K	N 含量 Content N	P 含量 Content P
	P 含量 Content P	N 含量 Content N	P 含量 Content P	N:P 比 ratio	N:P 比 ratio
	$y=8.134-0.419x$	—	—	$y=-6.793+0.939x$	$y=11.420-2.239x$
P	0.001	0.681	0.682	0.013	0.014

$P<0.05$ 表示显著水平, $P<0.01$ 表示极显著水平

3 讨论

3.1 人工经营雷竹林覆盖栽培年限的增长与凋落物凋落量的关系

人工经营雷竹林受人为干扰影响比较大,凋落物的组成成分相对比较单一,生产数量也不稳定,这给准确地评估雷竹林凋落特征带来一定的难度。一般来说,竹林的地上凋落物组分一般包括叶片、枝、箨片组成,本实验中选择雷竹林换叶期对林内凋落物进行集中收集,可以避免经营过程中人为因素对其的干扰。

从凋落物各组分来看,随着雷竹林覆盖年限的增加,凋落量总体上呈不同程度的升高趋势(表 2)。考虑到凋落物数量主要与样地的生产力状况相关,这种变化特征从林分凋落物凋落层面验证了覆盖栽培对雷竹林的物质循环的影响。覆盖栽培一定程度上增加了竹林的立竹结构,提高了林地生产力,地上物质库增加了凋落物的物质来源。此外,结果中显示枝凋落量的变化趋势并不显著,叶凋落物的变化趋势相对显著,并且在总凋落量中所占的比例较大,这说明叶片在覆盖雷竹林凋落物量方面起决定作用。有研究^[25]认为群落系统的稳定性越高,凋落物的物质来源更丰富,而退化群落里一般凋落叶占主要组成成分。因而本研究中连续覆盖 3a 雷竹林中凋落叶比例的增大从一定层面上表明了此时雷竹林的不稳定性。此外,有报道^[27]称雷竹林连续覆盖不得超过 2a,连续覆盖栽培 3 次后,应适当控制覆盖频率和次数,因此本文中随着覆盖年限的增加,雷竹林是否能保持稳定的物质循环特征,需要对雷竹林物质归还以及吸收代谢的综合分析来展开进一步研究。

3.2 不同覆盖年限雷竹林凋落物养分循环特征

林木通过物质代谢循环每年归还一定数量的枯落物,以此向林地输入相当数量的养分,为土壤动物、微生物提供食物来源。从生态系统物质循环的角度看,凋落物作为对植被及其环境变化作出敏感反馈的生态系统

组分,其养分暂时贮存库的作用不容小觑。本研究中 C 养分含量随覆盖年限的增长而减少,而 C 的归还量却呈相反的趋势,二者不存在显著的相关关系,由于养分归还量由养分含量和凋落量共同决定,因此凋落量在 C 归还量层面起决定作用,即凋落物 C 归还主要受到凋落物生产的控制。而逐渐降低的 C 素水平说明覆盖栽培促使林地凋落叶的比重显著增加,而凋落物中 C 素比重大的竹枝等有机碎屑量的降低。此外,凋落物的 C 归还量作为生态系统中生物 C 库向土壤 C 库转移过程中发挥重要作用的组成部分^[28],在连续覆盖 3a 的林地中出现极显著的变化,势必影响到此时雷竹林系统内 C 元素的代谢途径,进而影响生态系统的代谢平衡。

考虑到 N 素与植被光合速率的密切关系,凋落物在覆盖 3a 时的低 N 含量可能是由于覆盖栽培促使竹林快速生长,参与光合作用等生命代谢活动的 N 素增多,较高的 N 转移率降低了凋落物中的 N 素水平^[29]。此外,作为 N 素形态转化的载体的竹枝等有机碎屑凋落量比重的减少也可能是凋落物 N 素水平降低的原因。凋落物中 P 含量以及养分归还量在覆盖 3a 时均达到最高值,而表 1 中测定的此时土壤中有有效 P 的水平也相对较高,我们可以由此推断连年覆盖可能会导致林地土壤有效 P 水平的增加,此时雷竹林对土壤 P 养分具有较高的吸收能力,叶片中也相应具有较高的 P 含量,而有研究证明成熟叶片 P 含量在衰老过程中并不存在着较高的转移率^[30-31],因而致使凋落物中 P 元素含量的显著升高。这一论断也有相关研究加以证明,黄芳等^[32]就认为有机物覆盖为特征的集约经营模式会导致雷竹林土壤全 P、有效 P 均随种植年限的延长而不断提高,这可能是由于冬季地表稻草、苍糠等覆盖物提高了土壤的温度和湿度,大大刺激了土壤微生物的活性,从而使土壤 P 素矿化作用增强,进而导致土壤有效 P 的上升^[33]。

K 养分含量以及归还量在覆盖 2a 时就表现出显著升高,而此时林地土壤中的速效 K 并没有显著变化(表 1),这就可能与此时叶片在衰老凋落前的 K 素的转移能力有关;在连续覆盖 3a 后凋落物中 K 养分含量及归还量又显著降低,而此时土壤中 K 素水平也存在同样的变化趋势,说明连年林地覆盖也同样会影响雷竹林 K 素的代谢水平。

3.3 不同覆盖年限雷竹林凋落物 C、N、P 养分化学计量特征

C、N 和 P 元素对植物的生长、发育以及行为都起着非常重要的作用,在植物体内存在功能上的联系。目前学者们普遍认为植物组织 C、N、P 等元素的化学计量比值的变化可能是植物通过调整自身的生长速率来适应环境的一种表现^[34-35],凋落物养分分解以及归还速度的快慢就在一定程度上受凋落物养分元素化学计量比的制约^[11]。

本研究中连续覆盖 3a 的雷竹林凋落物的 C:P 和 N:P 的比值均显著性降低,这可能是由于连年覆盖导致的林地生长速率较快,这时细胞中就需要更多的 rRNA 来快速地合成蛋白质以支持快速生长,从而反映了分配到 rRNA 中 P 的增加^[36-37]。此外,N:P 值是制约凋落物分解和养分循环的重要因素。有研究显示,凋落物在 P 素较低的情况下具有较高的 N 素含量^[38],高 N:P 值以及低 P 含量会使凋落物的分解受 P 的限制作用比较强,分解速率较低^[39];反之,凋落物中的养分分解快速。本研究中覆盖 3a 的雷竹林凋落物 N:P 比值要比覆盖 2a 内的显著降低,而 P 含量明显升高,表明雷竹林连续覆盖 3a 后林地凋落物分解速率加快,受 P 素的限制作用降低,转化为土壤腐殖质的过程越强烈,从一定程度上改善了土壤的状况,而随覆盖年限快速增长的 P 养分归还量是否会造成土壤中 P 素的富集还有待于进一步研究。此外,李雪峰等^[40]曾研究表明凋落物中的 C:N 与凋落物的分解速率有正相关关系,因此本研究中连续覆盖 3a 后林地凋落物的高 C:N 同样也可以证明此时较高的凋落物分解速率。

N、P 等养分含量间的关系用线性回归方程表示后,方程中的回归斜率的大小具有重要的生态意义^[23]。本研究中凋落物 N、P 含量间存在极显著的线性负相关关系(表 6),其回归斜率(0.419)极显著小于 1($P < 0.01$),表明凋落物形成过程中,不存在 N、P 按比例损耗关系,这与阎恩荣等^[23]在进行浙江天童常绿阔叶林和常绿针叶林相关研究时的结论相同。N、P 含量分别与 N:P 呈显著正相关和负相关关系($P < 0.01$),而前者的回归斜率(0.939)小于 1,后者的回归斜率(2.239)大于 1,由此可见该生长季节内雷竹林 P 含量的变异性对 N:P 的动态变化起主导作用^[36]。

从生态化学计量学的角度考虑,国外学者近年来提出了化学计量内稳性这一概念来表述生物在长期的进化过程中,通过调整自身 C:N:P 来适应生长速率的改变,从而形成一种对外界环境生长的适应策略。它是指环境中的养分组成发生变化而生物体维持相应的元素相对不变的一种能力^[35],中国科学院植物研究所韩兴国研究组^[41]又通过试验从时间和空间尺度证明了内稳性高的生态系统具有较高的生产力和稳定性。本研究中覆盖栽培 2a 内凋落物 C、N、P 的化学计量比值一直处于相对稳定状态,而连续覆盖 3a 后比值显著变化,说明连续 3a 的覆盖有可能已经显著影响了竹林系统的化学计量内稳性状态,但这还需要通过对叶片以及土壤环境中相关元素的化学计量比值进行研究才能下此定论,这也将是本文后续研究工作的重点。

3.4 不同覆盖年限雷竹林凋落物 K 元素化学计量特征

N、P、K 是陆地生态系统植物生长的主要限制因子,关于植物的 N 和 P 的化学计量学已经展开了大量研究^[11,42-43],相比来说,对于植物生长特性与组织中 N:K 和 P:K 比值关系的研究却较少。本研究中随着覆盖年限的增加,N:K 和 P:K 呈相应的先降低后增加的趋势,在覆盖 2a 时比值即呈现显著变化,且立即表现出较高的 K 素含量,说明覆盖栽培对 N:K 和 P:K 以及 K 元素含量的影响作用显著($P<0.05$)。而上述线性回归分析中显示凋落物中 K 含量与 N、P 含量之间并无显著相关关系,说明地表覆盖 3a 内凋落物 K 含量的消耗并不依赖于 N、P 元素,N:K 和 P:K 随覆盖年限增加而变化的趋势可能是受覆盖栽培经营措施的影响,凋落物 N:K 和 P:K 化学计量比值是否对凋落物分解以及地表覆盖雷竹林系统的稳定具有指示意义还有待于通过对各种不同经营程度雷竹林展开进一步的研究。

4 结论

雷竹林在连续覆盖 3a 后,叶凋落量极显著性提高,可以从一定程度上说明覆盖栽培增加了林地土壤的腐殖质水平,但叶凋落量在总凋落量中比例的增加,竹枝等有机碎屑凋落量比重的减小,成为系统中稳定的养分代谢循环的不利因素。

雷竹林凋落物中 C、N、P、K 养分含量及归还量随着覆盖年限的增长具有不同程度的变化趋势。连续 3a 覆盖对雷竹林凋落物中的养分含量影响极显著,C、N 养分含量极显著降低,P 含量极显著升高,而 K 养分含量在覆盖 2a 时就发生了明显的响应;林地凋落物的养分归还量同时还受凋落量的影响,其伴随覆盖年限增长的变化趋势与养分含量并不一致。

雷竹林覆盖栽培与凋落物养分的化学计量特征关系密切。覆盖 2a 内的雷竹林地表现出稳定的 N:P 以及低 P 含量会使凋落物的分解受 P 的限制作用比较强,分解速率较低;连续覆盖 3a 的林地 N:P 极显著下降,凋落物分解速率加快,受 P 的限制作用下降;凋落物中 K 元素随覆盖年限增长而消耗的规律与 N、P 元素无关。

覆盖 3a 林地凋落物分解速率加快,但此时凋落物的 C、N、P 化学计量比值发生了显著变化,这是否说明了连续 3a 的覆盖已经显著影响了竹林系统的内稳性状态,还需要通过对叶片以及土壤环境中相关元素的化学计量比值的研究展开进一步的论证。此外,随着 P 养分归还量的显著提高以及 N、K 养分元素归还量的降低,是否会造成林地土壤 P 素的富集或其他元素的亏缺,还有待于对雷竹林养分利用效率以及土壤-植被系统整个养分循环过程更加深入的研究。

致谢:感谢浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地在室内样品测试中给予的帮助;感谢江西省林业科学院的曾伟博士以及江西省万年县林业局在野外考察采样中给予的支持与帮助。

References:

- [1] Hulson H J. Fungal Saprophytism. 2nd ed. United Kingdom: Edward Arnold, 1980: 21-22.
- [2] Wan M, Tian D L, Fan W. Amount, composition and seasonal dynamics of litterfall in Poplar-Crop agroforestry ecosystems in Henan Eastern Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2507-2513.
- [3] Zhou C Y. Litter's roles in forest ecosystem and its research progress. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2003, 23(2): 140-145.
- [4] Peng S L, Liu Q. The dynamics of forest litter and its responses to global warming. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1534-1544.

- [5] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1979.
- [6] Elser J J, Dobberfuhl D R, Mackay N A, Schampel J H. Organism size, life history, and N:P stoichiometry: towards a unified view of cellular and ecosystem processes. *BioScience*, 1996, 46(9): 674-684.
- [7] Vitousek P M. Nutrient Cycling and Limitation: Hawaii as a Model System. New Jersey: Princeton University Press, 2004.
- [8] Li H T, Yu G R, Li J Y, Liang T, Chen Y R. Dynamics of litter decomposition and phosphorus and potassium release in Jinggang Mountain region of Jiangxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2): 233-240.
- [9] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology*, 1989, 70(1): 97-104.
- [10] Xu X N, Hirata E. Decomposition patterns of leaf litter of seven common canopy species in a subtropical forest: N and P dynamics. *Plant and Soil*, 2005, 273(1/2): 279-289.
- [11] Pan F J, Zhang W, Wang K L, He X Y, Liang S C, Wei G F. Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 335-343.
- [12] Fang W, He J C, Lu X K, Chen J H. Cultivation techniques of early shooting and high yielding for lei bamboo sprout. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1994, 11(2): 121-128.
- [13] Xie B L, Wu J S, Xu Q F, Jiang P K. Effect of different fertilization and mulching on water soluble organic N of the soil under *Phyllostachys praecox* stands. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6): 1168-1171.
- [14] Jiang P K, Xu Q F, Qian X B, Zhang R H, Yang F F. Dynamic changes of chemical properties of warmer soil covered with different organic materials in *Phyllostachys praecox* forests. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1999, 16(2): 123-130.
- [15] Jiang P K, Xu Q F, Luo X Q, Wang J Q. Changes in heavy metal amount of bamboo shoots of *Phyllostachys praecox* responsive to nitrogen rate. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2004, 21(4): 424-427.
- [16] Liu L, Chen S L. Research summary of the negative influences of the mulched ecosystem of *Phyllostachys praecox* f. *prevernalis* forests with organic materials. *Guihaia*, 2009, 29(3): 327-330.
- [17] Zhou G M, Jin A W, Zheng B S, Fang W H, Yu W D. Preliminary study on composition of Lei bamboo in protected plot. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1998, 15(2): 111-115.
- [18] Jin A W, Zhou G M, Zheng B S, Zhao X W. A preliminary study on degenerative mechanism of *Phyllostachys praecox* stand planted in a protected site. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1999, 19(1): 94-96.
- [19] Liu S R, Li C Y. Nutrient cycling and stability of soil fertility in larch plantation in the eastern part of northern China. *Journal of Northeast Forestry University*, 1993, 21(2): 19-24.
- [20] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [21] He J S, Fang J Y, Wang Z H, Guo D, Flynn D F B, Gerg Z. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, 149(1): 115-122.
- [22] He J S, Wang L, Flynn D F B, Wang X P, Ma W H, Fang J Y. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, 2008, 155(2): 301-310.
- [23] 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.
- [24] Lu R K. Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [25] Yan E R, Wang X H, Zhou W. Characteristics of litterfall in relation to soil nutrients in mature and degraded evergreen broad-leaved forests of Tiantong, East China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1): 1-12.
- [26] Wu T G, Wu M, Liu L, Xiao J H. Seasonal variations of leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of three herbaceous species in Hangzhou Bay coastal wetlands, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 23-28.
- [27] Gao Z Q. Changing of soil quality for extensive management in *Phyllostachys praecox* forest—taking NP nutrient as example. *World Bamboo and Rattan*, 2011, 9(2): 10-12.
- [28] Guo J F, Xie J S, Lu H L, Liu D X, Yang Y S, Chen G S. Carbon return and dynamics of litterfall in natural forest and monoculture plantation of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. *Forestry Studies in China*, 2004, 6(1): 33-36.
- [29] Takashima T, Hikosake K, Himse T. Photosynthesis or persistence: nitrogen allocation in leaves of evergreen and deciduous *Quercus* species. *Plant, Cell and Environment*, 2004, 27(8): 1047-1054.
- [30] Chapin F S III, Kedrowski R A. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous taiga trees. *The Journal of Ecology*, 1983, 64(2): 376-391.
- [31] Aerts R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns?. *Ecology*, 1996, 84(4): 597-608.
- [32] Huang F, Jin B H, Sun D, Jiang P K, Zhuang S Y, Cao Z H. Variation of soil phosphorus content and components in a chronosequence of *Phyllostachys praecox* stands under intensive management. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 347-355.

- [33] Qiu Y, Zhang D H. Research progress on phosphorus transformation in southern acid soils. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 2003, 21(3): 14-17.
- [34] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [35] Vanni M J, Flecker A S, Hood J M, Headworth J L. Stoichiometry of nutrient recycling by vertebrates in a tropical stream: linking species identity and ecosystem processes. *Ecology Letters*, 2002, 5(2): 285-293.
- [36] Elser J J, Acharya K, Kyle M, Cotner J, Makino W, 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.
- [37] Makino W, Coffer J B, Sterner R W, Elser J J. Are bacteria more like Plants or animals? Growth rate and resource dependence of bacterial C: N: P stoichiometry. *Functional Ecology*, 2003, 17(1): 121-130.
- [38] Gallardo A, Merino J. Leaf decomposition in two Mediterranean ecosystems of southwest Spain: influence of substrate quality. *Ecology*, 1993, 74(1): 152-161.
- [39] Gusewell S, Verhoeven J T A. Litter N:P ratios indicate whether N or P limits the decomposability of graminoid leaf litter. *Plant and Soil*, 2006, 287(1/2): 131-143.
- [40] Li X F, Han S J, Hu Y L, Zhao Y T. Decomposition of litter organic matter and its relations to C, N and P release in secondary conifer and broadleaf mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 245-251.
- [41] Yu Q, Chen Q S, Elser J J, He N P, Wu H H, Zhang G M, Wu J G, Bai Y F, Han X G. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability. *Ecology Letters*, 2010, 13(11): 1390-1399.
- [42] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [43] Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Application of N:P Stoichiometry to Ecology Studies. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(9): 1009-1018.

参考文献:

- [2] 万猛, 田大伦, 樊巍. 豫东平原杨-农复合系统凋落物的数量、组成及其动态. *生态学报*, 2009, 29(5): 2507-2513.
- [3] 周存宇. 凋落物在森林生态系统中的作用及其研究进展. *湖北农学院学报*, 2003, 23(2): 140-145.
- [4] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. *生态学报*, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [8] 李海涛, 于贵瑞, 李家永, 梁涛, 陈永瑞. 井冈山森林凋落物分解动态及磷、钾释放速率. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 233-240.
- [11] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征. *生态学报*, 2011, 31(2): 335-343.
- [12] 方伟, 何钧潮, 卢学可, 陈健华. 雷竹早产高效栽培技术. *浙江林学院学报*, 1994, 11(2): 121-128.
- [13] 谢秉楼, 吴家森, 徐秋芳, 姜培坤. 覆盖与施肥处理对雷竹林土壤水溶性有机氮的影响. *土壤学报*, 2009, 46(6): 1168-1171.
- [14] 姜培坤, 徐秋芳, 钱新标, 张瑞华, 杨飞峰. 雷竹林地覆盖增温过程中土壤化学性质的动态变化. *浙江林学院学报*, 1999, 16(2): 123-130.
- [15] 姜培坤, 徐秋芳, 罗煦钦, 王俊奇. 雷竹笋重金属含量及其与施肥的关系. *浙江林学院学报*, 2004, 21(4): 424-427.
- [16] 刘丽, 陈双林. 有机材料林地覆盖对雷竹林生态系统的负面影响研究综述. *广西植物*, 2009, 29(3): 327-330.
- [17] 周国模, 金爱武, 郑炳松, 方伟浩, 余伟朵. 雷竹保护地栽培林分立竹结构的初步研究. *浙江林学院学报*, 1998, 15(2): 111-115.
- [18] 金爱武, 周国模, 郑炳松, 赵夏威. 雷竹保护地栽培林分退化机制的初步研究. *福建林学院学报*, 1999, 19(1): 94-96.
- [19] 刘世荣, 李春阳. 落叶松人工林养分循环过程与潜在地力衰退趋势的研究. *东北林业大学学报*, 1993, 21(2): 19-24.
- [23] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 仲强, 周武. 浙江天童常绿阔叶林、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.
- [24] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [25] 阎恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林不同退化群落的凋落物特征及与土壤养分动态的关系. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 1-12.
- [26] 吴统贵, 吴明, 刘丽, 萧江华. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 23-28.
- [27] 高志勤. 集约经营雷竹林土壤质量的演变——以氮磷养分变化为例. *世界竹藤通讯*, 2011, 9(2): 10-12.
- [32] 黄芳, 金炳华, 孙达, 姜培坤, 庄舜尧, 曹志洪. 集约经营雷竹林序列的土壤磷素含量与组分. *土壤学报*, 2011, 48(2): 347-355.
- [33] 邱燕, 张鼎华. 南方酸性土壤磷素化学研究进展. *福建稻麦科技*, 2003, 21(3): 14-17.
- [40] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 赵玉涛. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 245-251.
- [42] 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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in Fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of Jiaozhou Bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

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 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

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:1000717	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