

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

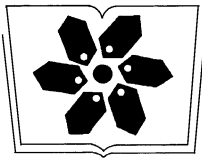
Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 11 期 Vol.31 No.11 **2011**

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 31 卷 第 11 期

2011 年 6 月 (半月刊)

目 次

微生物介导的碳氮循环过程对全球气候变化的响应·····	沈菊培, 贺纪正 (2957)
巢湖蓝藻水华形成原因探索及“优势种光合假说”·····	贾晓会, 施定基, 史绵红, 等 (2968)
我国甜菜夜蛾间歇性暴发的非均衡性循环波动·····	文礼章, 张友军, 朱 亮, 等 (2978)
庞泉沟自然保护区华北落叶松林的自组织特征映射网络分类与排序·····	张钦弟, 张金屯, 苏日古嘎, 等 (2990)
上海大莲湖湖滨带湿地的生态修复·····	吴 迪, 岳 峰, 罗祖奎, 等 (2999)
芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量·····	武小钢, 郭晋平, 杨秀云, 等 (3009)
土壤微生物群落结构对中亚热带三种典型阔叶树种凋落物分解过程的响应·····	张圣喜, 陈法霖, 郑 华 (3020)
中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响·····	陈法霖, 郑 华, 阳柏苏, 等 (3027)
桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征·····	刘淑娟, 张 伟, 王克林, 等 (3036)
重金属 Cd 胁迫对红树蚬的抗氧化酶、消化酶活性和 MDA 含量的影响·····	赖廷和, 何斌源, 范航清, 等 (3044)
海南霸王岭天然次生林边缘效应下木质藤本与树木的关系·····	乌玉娜, 陶建平, 奚为民, 等 (3054)
半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺·····	杨 磊, 卫 伟, 莫保儒, 等 (3060)
季节性干旱对中亚热带人工林显热和潜热通量日变化的影响·····	贺有为, 王秋兵, 温学发, 等 (3069)
新疆古尔班通古特沙漠南缘多枝桉柳光合作用及水分利用的生态适应性·····	王珊珊, 陈 曦, 王 权, 等 (3082)
利用数字图像估测棉花叶面积指数·····	王方永, 王克如, 李少昆, 等 (3090)
野生大豆和栽培大豆光合机构对 NaCl 胁迫的不同响应·····	薛忠财, 高辉远, 柳 洁 (3101)
水磷耦合对小麦次生根特殊根毛形态与结构的影响·····	张 均, 贺德先, 段增强 (3110)
应用物种指示值法解析昆崙山植物群落类型和植物多样性·····	孙志强, 张星耀, 朱彦鹏, 等 (3120)
基于 MSIASM 方法的中国省级行政区体外能代谢分析·····	刘 晔, 耿 涌, 赵恒心 (3133)
不同生态区烟草的叶面腺毛基因表达·····	崔 红, 冀 浩, 杨惠娟, 等 (3143)
B 型烟粉虱对 23 种寄主植物适应度的评估和聚类分析·····	安新城, 郭 强, 胡琼波 (3150)
杀虫剂啶虫脒和毒死蜱对捕食蜘蛛血细胞 DNA 的损伤作用·····	李 锐, 李生才, 刘 佳 (3156)
杀真菌剂咪鲜安对蓼花臂尾轮虫的影响·····	李大命, 陆正和, 封 琦, 等 (3163)
长、短期连续孤雌生殖对蓼花臂尾轮虫生活史和遗传特征的影响·····	葛雅丽, 席貽龙 (3170)
专论与综述	
区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展·····	赵 军, 杨 凯, 邵 俊, 等 (3180)
露水对植物的作用效应研究进展·····	叶有华, 彭少麟 (3190)
葡萄座腔菌科研究进展——鉴定, 系统发育学和分子生态学·····	程燕林, 梁 军, 吕 全, 等 (3197)
人工林生产力年龄效应及衰退机理研究进展·····	毛培利, 曹帮华, 田文侠, 等 (3208)
树木年轮在干扰历史重建中的应用·····	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (3215)
植物中逆境反应相关的 WRKY 转录因子研究进展·····	李 冉, 娄永根 (3223)
研究简报	
三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量·····	任佐华, 张于光, 李迪强, 等 (3232)
3 种黑杨无性系水分利用效率差异性分析及相关 <i>ERECTA</i> 基因的克隆与表达·····	郭 鹏, 夏新莉, 尹伟伦 (3239)
猕猴桃园节肢动物群落重建及主要类群的生态位·····	杜 超, 赵惠燕, 高欢欢, 等 (3246)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 298 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-06



封面图说: 盘锦市盘山县水稻田——盘锦市位于辽宁省西南部, 自古就有“鱼米之乡”的美称。这里地处温带大陆半湿润季风气候, 有适宜的温度条件和较长的生长期以供水稻生长发育, 农业以种植水稻为主, 年出口大米达 1 亿多公斤, 是国家级水稻高产创建示范区和重要的水稻产区。

彩图提供: 沈菊培博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: jpshe@reccs.ac.cn

中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响

陈法霖¹, 郑 华^{1,*}, 阳柏苏², 欧阳志云¹, 张 凯¹, 肖 焱¹, 屠乃美³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 湖南第一师范学院, 长沙 410205; 3. 湖南农业大学, 长沙 410128)

摘要:通过小盆模拟试验,用 BIOLOG 微平板培养的方法研究了南方红壤丘陵区典型物种马尾松和湿地松的凋落物分别与白栎和青冈的凋落物混合,与单一针叶凋落物分解时相比,针阔混合凋落物分解过程中土壤微生物群落功能多样性的差异。结果表明:(1)针叶和阔叶混合分解提高了土壤微生物群落碳代谢的强度、丰富度以及多样性,针阔混合凋落物分解时土壤微生物群落的碳源代谢方式与单一针叶分解时差异显著;(2)凋落物分解前期土壤微生物群落碳代谢强度、丰富度和多样性与凋落物初始 C/N 呈显著负相关,分解后期土壤微生物群落碳代谢强度与凋落物初始木质素/N 比呈显著负相关,碳代谢多样性与初始 P 含量呈显著正相关;(3)通过改变凋落物物种组成,进而改变凋落物元素组成(C/N、木质素/N 和 P),能显著影响土壤微生物群落的碳代谢强度和代谢多样性。在南方红壤丘陵区,针-阔叶混合的凋落物比单一针叶凋落物更有利于提高土壤微生物群落的功能。

关键词:森林凋落物;土壤微生物群落;功能多样性;BIOLOG

The decomposition of coniferous and broadleaf mixed litters significantly changes the carbon metabolism diversity of soil microbial communities in subtropical area, southern China

CHEN Falin¹, ZHENG Hua^{1,*}, YANG Bosu², OUYANG Zhiyun¹, ZHANG Kai¹, XIAO Yi¹, TU Naimei³

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Hunan First Normal University, Changsha 410205, China

3 Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

Abstract: Litters are the important component of forest ecosystem and play a key role in plant growth and ecosystem nutrient cycle. Soil microbial communities, as one of the driving factors of forest litter decomposition, can significantly influenced by composition of litters. To understand the responses of carbon metabolism diversity of soil microbial communities to the leaf litter composition plays a key role in the sustainable management of plantations. We designed a simulation experiment with flowerpots at the Ecological Benefit Monitoring Station of the Yangtze River Protection Forest, which is located in Hengyang County of southern Hunan Province, to determine the impacts of litter composition on carbon metabolism diversity of soil microbial communities. The litters of masson pine (*Pinus massoniana*), slash pine (*Pinus elliottii*), white oak (*Quercus fabri*) and blue Japanese oak (*Cyclobalanopsis glauca*), which are all the typical species of the southern China, were chosen as study species. With the BIOLOG method, the carbon metabolism diversity of soil microbial communities were studied during the decomposition of different leaf litters, including two single coniferous leaf litter treatments (masson pine and slash pine) and four coniferous and broadleaf mixed litter treatments (masson pine+ white oak, masson pine+ blue Japanese oak, slash pine+ white oak and slash pine+ blue Japanese oak). The results showed that: (1) the decomposition of coniferous and broadleaf mixed litter increased the carbon metabolic intensity, richness and diversity of soil microbial

基金项目:国家自然科学基金项目(30600474;40871130);湖南省自然科学基金项目(07jj3082)

收稿日期:2010-03-22; 修订日期:2010-12-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

communities in comparison with the decomposition of single coniferous leaf litter. Soil microbial communities under the coniferous and broadleaf mixed litters had significantly different carbon metabolic patterns in comparison with those of the single coniferous leaf litter treatment. In comparison with those of single coniferous leaf litter treatment, soil microbial communities under the coniferous and broadleaf mixed litters had higher utilization ability for the following carbohydrates: Tween 80, Phenylethylamine, 4-hydroxy benzoic acid, D-mannitol, N-acetyl-D-glucosamine, D-galacturonic acid, γ -hydroxy butyric acid, D-glucosaminic acid and D, L- α -Glycerol phosphate. (2) At the early stage of litter decomposition carbon metabolic intensity, richness and diversity of soil microbial communities showed significantly negative correlation with the initial carbon-nitrogen ratio of litters. However, at the latter stage of litter decomposition carbon metabolic intensity of soil microbial communities correlated with the initial lignin-nitrogen ratio of litters negatively ($P < 0.05$) and the carbon metabolic diversity correlated with the initial phosphorus concentration of litters positively ($P < 0.05$). (3) The species composition changes of litter significantly altered the intensity and diversity of carbon metabolism of soil microbial communities due to different carbon-nitrogen ratio, lignin-nitrogen ratio and phosphorus concentration. The coniferous and broadleaf mixed litter strengthened the carbon metabolic function of soil microbial communities in comparison with single coniferous leaf litter in hilly red soil region of southern China.

Key Words: forest litters; soil microbial communities; functional diversity; BIOLOG

人工林生态系统物种组成是影响生态系统功能及其可持续性经营的关键,针阔叶树种的混合种植通过增加生态系统物种多样性、改善凋落物化学组成等途径,有效改善了土壤肥力、森林生态系统的结构与功能^[1-6]。已有研究表明:针叶与阔叶混合凋落物分解时,加快了凋落物的分解速率^[5-6]、提高了微生物生物量^[4]、改善了土壤酶活性^[4],但对于土壤微生物群落碳代谢功能如何响应凋落物物种组成研究较少。

土壤微生物碳代谢对于凋落物的分解、土壤养分的转化以及植物氮素的供应等至关重要,本研究拟通过控制实验,探讨南方红壤丘陵区典型针叶树种马尾松(*Pinus massoniana*)和湿地松(*Pinus elliottii*)的凋落物分别与白栎(*Quercus fabri*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)两个阔叶树种的凋落物混合,针阔混合凋落物分解过程中土壤微生物碳代谢多样性的变化,其目的是:(1)明确与单一针叶凋落物分解时相比,针阔叶混合凋落物分解时对土壤微生物碳代谢强度及多样性的影响;(2)初步明确针叶与阔叶混合凋落物分解过程中土壤微生物碳代谢强度及多样性的影响因素,为揭示森林凋落物分解的微生物学机理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验点选在湘南红壤丘陵区国家长江防护林生态效应监测站,位于湖南省衡阳县栏垅乡长冲村小流域,地处 27°05'N, 112°18'E;海拔 86—147m,属典型的红壤低丘岗地;母岩为砂页岩,土壤为红壤, pH 值 4—5;该流域严寒期短,盛夏期长,春温多变,寒潮频繁。年平均气温 17.9℃, 1 月份平均气温 5.7℃, 7 月份平均气温 29.3℃, 年平均降雨量为 1 237 mm,主要集中在 5—8 月^[7],属亚热带季风湿润性气候。

该区域植被类型属亚热带常绿阔叶林和针叶林,目前主要是马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliottii*)等人工林及马尾松和壳斗科(*Fagaceae*)阔叶树种混交的天然次生林。

1.2 试验设计

本研究采用小盆模拟+凋落物袋的方法。选取林边小气象观测站边上 10 m × 10 m 大小空地模拟林内环境搭建大棚,大棚用遮光率 85 % 的遮阳网覆盖,大棚内置直径 30 cm、深度 20 cm 塑料小盆若干,小盆埋于土中,挖取林边空地 0—40cm 土层的土壤,去除土壤中原有的植物碎屑、死根等其他杂质,弄碎混匀移至小盆中,各小盆内的供试土壤性质基本一致,供试土壤性质如表 1。

表 1 供试土壤性质 (平均值±标准差, $n=7$)Table 1 Properties of experimental soils (means±SD, $n=7$)

土壤有机碳 Soil organic C /(g/kg)	总氮 Total N /(g/kg)	总磷 Total P /(mg/kg)	总钾 Total K /(g/kg)	碱解氮 Available N /(mg/kg)	速效磷 Available P /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)	酸碱度 pH (H ₂ O)
8.9±1.1	0.6±0.1	73.2±11.6	16.1±0.9	28.7±6.5	0.4±0.1	21.7±4.3	4.3±0.1

所选凋落物袋为尼龙网袋, 大小为 25 cm×30 cm, 网孔为 1 mm²。各种凋落物为 2006 年底收集的新近凋落叶。本研究选取 6 种单一(组合)叶凋落物处理: 马尾松、湿地松、马尾松+白栎、马尾松+青冈、湿地松+白栎以及湿地松+青冈, 供试叶凋落物性质如表 2。称取各凋落叶 20 g(风干后叶重)分别装入网袋, 每种 45 袋, 共 270 袋。根据研究区域天然次生林中针阔叶凋落物的比例为 2:1 及以上, 本研究确定针叶与阔叶凋落物的质量比为 2:1, 所有凋落物袋完全随机放置于各小盆内土壤表面。

表 2 供试凋落物性质 (平均值±标准差, $n=3$)Table 2 Properties of experimental litters (means±SD, $n=3$)

凋落物 Litters	碳 C/(g/kg)	木质素 Lignin/(g/kg)	氮 N/(g/kg)	磷 P/(mg/kg)	碳氮比 C/N	木质素/氮 Lignin/N
MP ⁽¹⁾	528.4±0.9	403.6±4.4	6.7±0.1	0.16±0.01	78.64±0.80	60.06±0.66
SP ⁽²⁾	537.8±1.3	469.2±3.1	4.9±0.2	0.20±0.02	109.07±3.15	95.16±2.68
WO ⁽³⁾	482.3±0.9	148.5±0.7	17.8±0.1	0.46±0.02	27.07±0.17	8.34±0.78
BJO ⁽⁴⁾	498.4±0.7	343.7±1.9	13.0±0.1	0.27±0.02	38.29±0.22	26.40±0.26
MB ⁽⁵⁾	518.4±0.7	383.6±3.6	8.8±0.1	0.20±0.01	58.91±0.57	43.59±0.56
MW ⁽⁶⁾	513.1±0.5	318.6±3.2	10.4±0.1	0.26±0.01	49.34±2.56	30.63±1.18
SB ⁽⁷⁾	524.7±0.7	427.4±4.0	7.6±0.1	0.22±0.02	69.04±0.18	56.24±0.35
SW ⁽⁸⁾	519.3±1.2	362.3±2.3	9.2±0.1	0.28±0.02	56.45±1.06	39.38±1.52

(1) 马尾松 *Pinus massoniana*; (2) 湿地松 *Pinus elliotii*; (3) 白栎 *Quercus fabri*; (4) 青冈 *Cyclobalanopsis glauca*; (5) 马尾松+青冈; (6) 马尾松+白栎; (7) 湿地松+青冈; (8) 湿地松+白栎

1.3 样品采集与分析

将装有凋落叶的网袋于 2007 年 4 月中旬投放到样地大棚内, 分别于凋落物放置 9 个月和 18 个月后取凋落袋下面土壤装入聚乙烯自封袋中, 每种凋落物处理随机取 3 袋, 于 4℃ 条件下运回实验室。

微生物群落功能应用 BIOLOG 微生物自动分析系统进行测定。BIOLOG 实验在取样后 48h 内进行。实验方法参照参考文献^[7]的方法进行: 相当于 10 g 干重的新鲜土壤外加 90 mL 无菌的 0.85% (质量比) NaCl 溶液在摇床上振荡 30 min, 然后将土壤悬浊液再稀释 100 倍, 再用移液器从中取 150 μL 悬浮液接种至生态板 (BIOLOG-ECO PLATE) 的每一个孔中, 将接种好的板放置于 25℃ 恒温培养 10 d, 每 12 h 于波长为 595nm 处的 BIOLOG 仪上读 1 次数。

1.4 数据处理

孔的平均颜色变化率 (Average well colour development, AWCD) 计算方法^[8]如下:

$$AWCD = \sum (C - R) / n$$

式中, C 为每个有培养基孔的光密度值, R 为对照孔 (A_1) 的光密度值, n 为培养基碳源种类, Eco 板 n 值为 31。

采用曲线整合方法^[9]估计碳源代谢强度:

$$\text{梯形面积} \quad S = \sum [(v_i + v_{i-1}) / 2 \times (t_i + t_{i-1})]$$

式中, v_i 为 i 时刻的 AWCD 值。

本研究用培养 120 h 后的数据来表征 BIOLOG 板中的微生物代谢功能多样性特征: 包括利用碳源丰富

度、香农多样性指数(Shannon index, H')和主成分分析(PCA)。

香农多样性指数的计算公式为:

$$H' = - \sum P_i \ln P_i$$

式中, $P_i = n_i/N$, n_i 是第 i 种培养基的光密度值, N 为样品中所有培养基光密度值的总和; 利用碳源的丰富度以 $(C-R) > 0.25$ 的数据为准。

用主成分分析(PCA)和单因子方差分析(ANOVA)确定不同处理间土壤微生物群落碳代谢特征是否有显著差异。用主成分分析结果中的 Component Matrix(即各碳源的光密度值与主成分得分系数的相关系数)确定 31 种碳源与主成分的关系。统计分析通过 SPSS 16.0 统计软件实现。

2 结果

2.1 土壤微生物群落碳代谢强度

AWCD 可以评判土壤中微生物群落的碳源利用能力。本研究采用 AWCD 曲线整合方法估计土壤微生物群落的代谢强度。如图 1 结果所示,凋落物分解 9 个月时,土壤微生物群落代谢强度在不同处理间的差异表现为:单一马尾松(MP)显著低于马尾松+白栎(MW)和马尾松+青冈(MB)混合凋落物处理,单一湿地松(SP)显著低于湿地松+白栎(SW)和湿地松+青冈(SB)混合处理;凋落物分解至 18 个月时的规律与分解 9 个月时的相似,也都是针阔混合高于单一针叶,其中湿地松混合和单一处理之间差异达到显著水平。

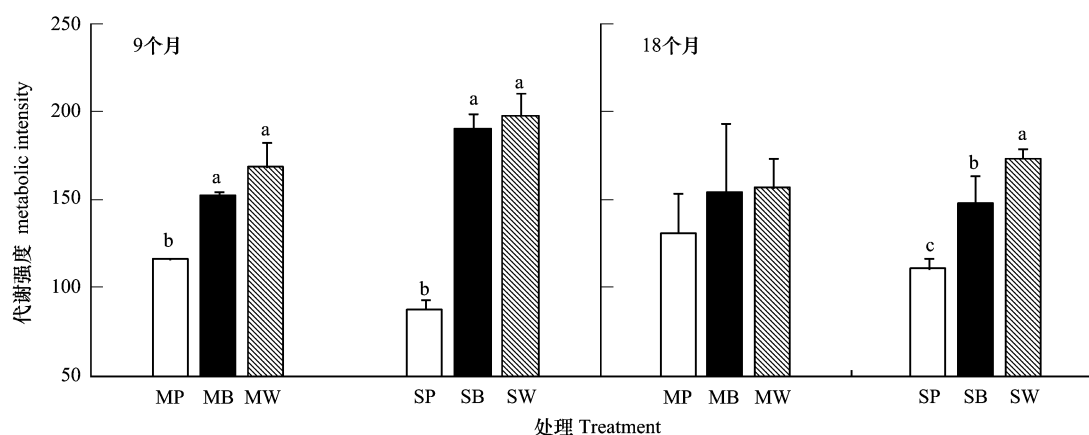


图1 不同凋落物处理下土壤微生物群落利用碳源的强度

Fig. 1 Carbon metabolic intensity of soil microbial communities for different litters

MP: 马尾松 *Pinus massoniana*; MB: 马尾松+青冈 *Cyclobalanopsis glauca*; MW: 马尾松+白栎 *Quercus fabri*; SP: 湿地松 *Pinus elliottii*; SB: 湿地松+青冈; SW: 湿地松+白栎

2.2 土壤微生物群落碳代谢的方式

对 31 种碳源进行主成分分析结果(图 2)表明:不同凋落物处理土壤中微生物群落碳源利用方式表现出明显分异,混合凋落物处理下土壤微生物群落代谢方式较为接近,与单一针叶处理之间差异显著。单一针叶与针阔混合的差异主要表现在主成分 1 上。主成分 1 得分系数方差分析的结果表明:两个时期,单一马尾松与马尾松+白栎、马尾松+青冈之间,单一湿地松与湿地松+白栎、湿地松+青冈之间的差异都达到显著水平($P < 0.05$)。

与主成分 1 具有较高相关系数(相关系数大于 0.6)的碳源见表 3。9 个月时,31 种碳源中,有 21 种碳源对主成分 1 起分异作用;18 个月时,对主成分 1 起分异作用的碳源主要有 10 种。结合图 2 和表 3 可以看出,9 个月时,混合凋落物处理土壤微生物群落对 4-羟基安息香酸、吐温 80、 γ -羟基酪酸、D-葡萄糖胺等 21 种碳源都具有相对较高的利用能力,这也验证了上述对土壤微生物群落碳源代谢总体活性差异的解释机制。18 个月时,混合凋落物处理土壤微生物群落对 D-葡萄糖胺、N-乙酰基-D-葡萄糖胺、 γ -羟基酪酸等碳源的利用高于

单一针叶凋落物处理。不同凋落物对微生物群落在上述碳源的利用能力的影响是导致其活性差异的主要原因。

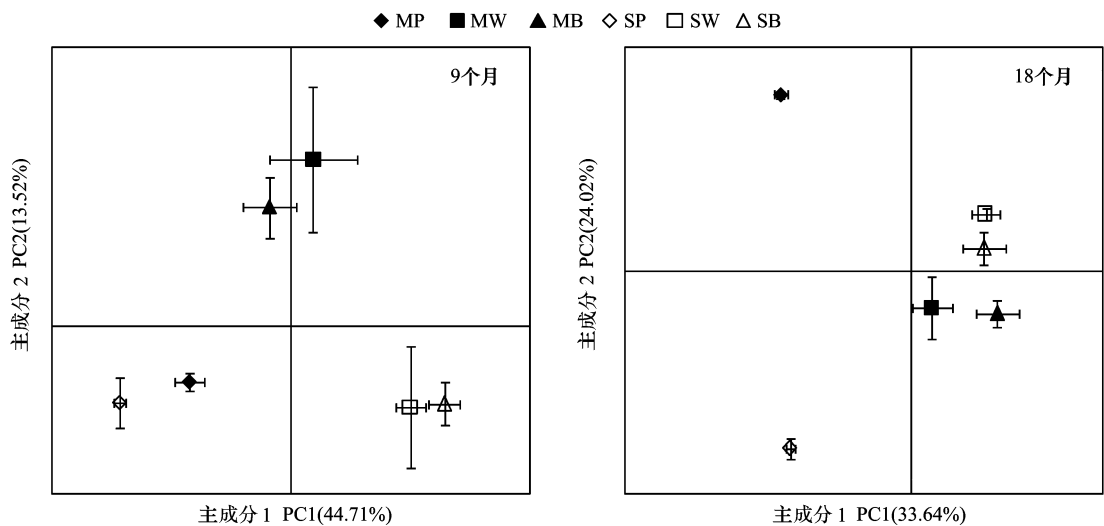


图 2 土壤微生物碳源利用类型的主成分分析

Fig. 2 Principal components analysis of carbon utilization profiles by soil microbial

表 3 与主成分 1 显著相关的主要碳源

Table 3 Correlation coefficients between main substrates and PC1

			9 个月 9 months	18 个月 18 months
糖类 Carbohydrates	D2	D-甘露醇 (D-mannitol)	0.793	0.742
	E2	N-乙酰基-D-葡萄糖胺 (N-acetyl-D-glucosamine)	0.902	
羧酸类 Carboxylic acids	A3	D-半乳糖-γ-内脂 (D-galactonic acid γ-lactone)	0.704	
	B3	D-半乳糖醛酸 (D-galacturonic acid)	0.795	0.704
	D3	4-羟基安息香酸 (4-hydroxy benzoic acid)	0.846	
	E3	γ-羟基酪酸 (γ-hydroxy butyric acid)	0.816	0.825
	F2	D-葡萄糖胺酸 (D-glucosaminic acid)	0.805	0.958
氨基酸 Amino acids	F3	甲叉丁二酸 (Itaconic Acid)	0.733	
	A4	L-精氨酸 (L-Arginine)	0.747	
	B4	L-天冬酰胺酸 (L-Asparagine)	0.629	
	C4	L-苯丙氨酸 (L-Phenylalanine)	0.623	
其他 Miscellaneous	G2	葡萄糖-1-磷酸 (Glucose-1-Phosphate)	0.606	
	H2	D, L-α-磷酸甘油酯 (D, L-α-Glycerol phosphate)	0.673	
聚合物类 Polymers	C1	吐温 40 (Tween 40)	0.632	0.758
	D1	吐温 80 (Tween 80)	0.841	
胺类 Amines/amides	G4	苯乙胺 (Phenylethylamine)	0.774	
	H4	腐胺 (Putrescine)	0.761	

2.3 土壤微生物群落碳代谢多样性

图 3 列出了土壤微生物在用 BIOLOG 生态板培养 120 h 后所利用碳源的丰富度和 Shannon 多样性指数。不同凋落物处理下土壤微生物群落利用碳源的丰富度差异显著。9 个月时,马尾松+白栎和马尾松+青冈混合凋落物显著高于单一马尾松,湿地松+白栎和湿地松+青冈也显著高于单一湿地松;18 个月时的规律与分解 9 个月时的相似,也都是针阔混合高于单一针叶,湿地松混合和单一处理之间差异达到显著水平。

Shannon 多样性指数规律与丰富度相似。9 个月时,两种针叶的混合处理均显著高各自的单一处理;18 个月时,湿地松与白栎的混合处理显著高于单一湿地松。

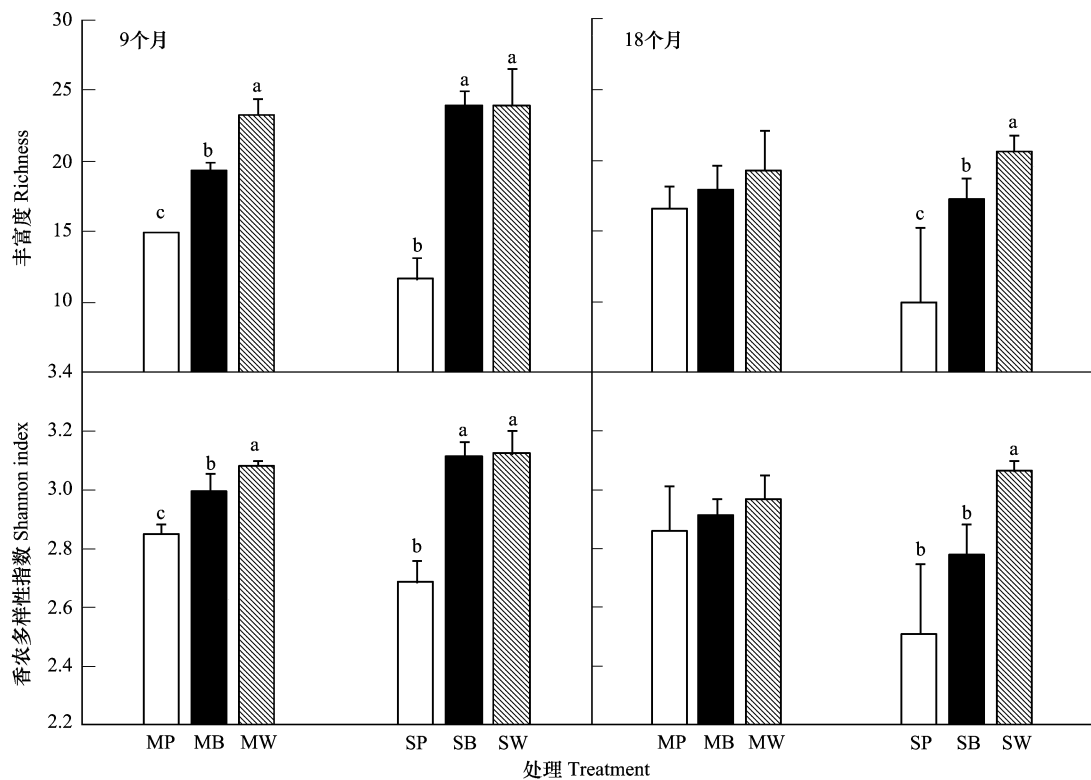


图3 不同凋落物处理下土壤微生物群落利用碳源的丰富度和多样性

Fig. 3 Carbon metabolic richness and diversity of soil microbial communities for different litters

2.4 碳代谢功能与凋落物初始化学组成的关系

微生物群落功能多样性与凋落物初始 P 含量的相关分析表明(表 4):土壤微生物群落在凋落物分解至 18 个月时代谢碳源的丰富度和多样性与凋落物初始 P 含量显著正相关,相关系数为 0.959 ($P < 0.01$)和 0.877 ($P < 0.05$)。

表 4 土壤微生物功能多样性与凋落物初始 P 含量、C/N 以及木质素/N 的关系

Table 4 Correlation between Carbon metabolic function of soil microbial communities and initial P concentration, C/N and Lignin/N of litters

	代谢强度 Metabolic intensity		丰富度 Richness		香农多样性指数 Shannon index	
	9 个月 9 months	18 个月 18 months	9 个月 9 months	18 个月 18 months	9 个月 9 months	18 个月 18 months
磷 P	0.728(0.101)	0.728(0.101)	0.753(0.084)	0.959**	0.673(0.143)	0.877*
碳/氮 C/N	-0.827*	-0.927**	-0.854*	-0.634(0.176)	-0.894*	-0.495(0.318)
木质素/氮 Lignin/N	-0.786(0.064)	-0.912*	-0.814*	-0.613(0.196)	-0.859*	-0.492(0.332)

括号里数值为 P 值, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

微生物群落功能多样性与凋落物初始 C/N 的相关分析表明(表 4):9 个月时,土壤微生物群落代谢碳源的强度、丰富度和多样性指数与凋落物初始 C/N 呈显著负相关关系,相关系数分别为-0.827、-0.854 和 -0.894($P < 0.05$);18 个月时,土壤微生物群落代谢碳源的强度与凋落物初始 C/N 显著负相关,相关系数为 -0.927 ($P < 0.01$)。

微生物群落功能多样性与凋落物初始木质素/N 的相关分析表明(表 4):9 个月时,土壤微生物群落代谢碳源的丰富度和多样性指数与凋落物初始木质素/N 显著负相关,相关系数分别为-0.814 和-0.859($P < 0.05$);18 个月时,虽然土壤微生物群落代谢碳源的丰富度和多样性指数与凋落物初始木质素/N 的相关性没有达到显著水平,但是代谢碳源的强度却与凋落物初始木质素/N 呈显著负相关关系,相关系数为-0.912($P <$

0.05)。

3 讨论

森林凋落物的分解一般受到凋落物质量、气候、土壤等因子的综合影响,凋落物在不同林型下分解,难以明确具体某一因子对土壤微生物群落的影响。本研究采用控制实验,在土壤条件基本一致(表1)、微气候条件基本一致的情况下,比较凋落物分解对土壤微生物碳代谢多样性的影响,有助于增强研究结果的可比性。

本研究中,针阔叶混合分解相比单一针叶凋落物不仅提高了土壤微生物群落的代谢强度(图1),而且提高了土壤微生物群落的代谢多样性和丰富度(图2,图3),这一结论与以往报道的野外观测结果相吻合:与纯杉木叶凋落物相比,杉木分别与桉木、火力楠、刺楸混合叶凋落物对土壤呼吸均表现出促进作用^[1],混交林土壤微生物利用土壤碳的效率高于马尾松林^[10]。在碳源利用方面,9个月时,混合凋落物处理土壤微生物群落对4-羟基安息香酸、吐温80、 γ -羟基酪酸、D-葡萄糖胺等21种碳源都具有相对较高的利用能力;18个月时,混合凋落物处理土壤微生物群落对D-葡萄糖胺、N-乙酰基-D-葡萄糖胺、 γ -羟基酪酸等碳源的利用高于单一针叶凋落物处理。不同凋落物对微生物群落在上述碳源的利用能力的影响是导致其活性差异的主要原因。针叶与阔叶凋落物混合分解显著影响土壤微生物群落碳代谢功能的主要原因在于其化学组成的改变^[11-13]。

(1)C/N比 细菌是凋落物生物降解的主要类群之一,且与凋落物相比它们具有较低的碳氮比^[14],微生物需要C/N约为25:1的底物来满足他们的需氮量^[15],即分解者具有较高的N素需求,至少是在分解的早期阶段^[16]。本研究中马尾松和湿地松针叶的C/N分别为78.64和109.07,而白栎和青冈的只有27.07和38.29(表2),混合凋落物C/N比的降低显著影响了土壤微生物群落碳代谢强度、多样性和丰富度(表4)。这也进一步证明了Manzoni^[17]等人的观点:在初始氮浓度较低的情况下,分解者将采用降低碳利用效率的策略分解凋落物^[17]。

(2)C的质量 凋落物中的化合物初步分为可溶性的代谢化合物,如:糖类、氨基酸;中等稳定结构的化合物,如:纤维素、半纤维素;和难分解的物质,如:木质素和角质^[15]。只有当支持微生物生长的可溶性碳可获得的情况下,氮素浓度似乎才直接限制有机质的分解速率^[18]。在其他情况下,碳的可溶性,而非氮素是控制分解速率的主要因子^[19]。本研究中,凋落物初始化学组成-土壤微生物群落功能关系在分解9个月和分解18个月时,表现出一定的差异,分解9个月时,针阔叶混合处理土壤微生物群落碳源利用的强度、丰富度和多样性指数都显著高于单一针叶处理;但是分解18个月时规律没有9个月时明显,例如:马尾松混合和单一处理之间碳代谢强度差异不显著;只有湿地松+白栎处理丰富度显著高于单一湿地松;湿地松+青冈与湿地松间多样性指数差异也没达到显著水平(图1和图3)。导致分解前后微生物群落代谢差异的原因可能与不同时期凋落物碳的可利用性有关:分解前期,混合凋落物中可利用碳源相对丰富,微生物群落功能较高;分解后期,凋落物碳源质量下降(纤维素和木质素为主),木质素/N比例增加,微生物群落代谢功能和多样性相应降低。分解至18个月时,微生物群落代谢强度与木质素/N比成显著负相关(表4)也进一步说明了碳的质量是影响土壤微生物群落功能的重要因子。

(3)P的含量 P是细菌生长所必需的营养元素,一般而言,细菌和真菌生长的N:P比例为10—15^[20]。在凋落物分解中,P的相对缺乏提高了P的相对重要性^[19,21],尤其在土壤缺磷比较严重的红壤地区。此外,土壤微生物对养分的要求也趋向于有较高的N、P含量^[22-24],因生长需求,细菌常常耗尽凋落物中的N、P。研究表明:随着基质C/N、C/P比例的提高,细菌生长效率(分配用于生长的碳的比例)将降低100倍^[24],高N、P含量凋落物能促使微生物种群生长迅速,而过量的碳将导致养分制约的矿质再补充^[23-24]。本研究中土壤微生物群落在凋落物分解至18个月时代谢碳源的丰富度和多样性与凋落物初始P含量显著正相关(表4),这也说明了P是影响土壤微生物群落的重要因素,尤其在分解后期,这种制约效果更为显著。

凋落物分解与土壤微生物群落结构功能变化是相互影响、相互制约的过程,凋落物组成影响土壤微生物群落,土壤微生物群落也相应的影响凋落物分解过程。本研究表明:通过改变凋落物物种组成,进而改变凋落物养分组成,能显著影响土壤微生物群落的代谢强度和代谢多样性。该结果为通过凋落物养分组成调控土壤

微生物群落功能提供了依据,因此,在南方红壤丘陵区,针-阔混合凋落物比单一针叶凋落物更有利于提高土壤微生物群落的功能。

研究表明,尽管利用 BIOLOG 方法评估土壤细菌功能有潜在的缺陷,但它仍然是研究土壤细菌代谢功能的一种快速有效方法^[25]。由于土壤微生物的复杂性和土壤中绝大多数微生物不可培养性,需要采用多种研究方法特别是现代微生物多样性研究方法,从不同角度进行研究。随着研究的深入和测试技术的改进,结合其他土壤微生物研究方法,如脂肪酸甲酯技术(Fatty Acid Methyl Ester, FAME),分子生物学技术(如 PCR-DGGE),这将有助于获得土壤微生物群落多样性的更全面而完整的信息。

References:

- [1] Wang Q K, Wang S L, Yu X J, Zhang J, Liu Y X. Effects of *Cunninghamia lanceolata*-broadleaved tree species mixed leaf litters on active soil organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [2] Wang S L, Huang Z Q, Wang Q K, Yu X J. Effects of species diversity of litter on the ecological functions of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. plantation soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 474-480.
- [3] Lin K M, Zhang Z Q, Zou S Q, Cao G Q. The influence of Chinese fir mixed with broadleaf litter decomposition on character of forest soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 258-262.
- [4] Hu Y L, Wang S L, Huang Y, Yu X J. Effects of litter chemistry on soil biological property and enzymatic activity. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2662-2668.
- [5] Lin K M, Zhang Z Q, Cao G Q, He Z M, Ma X Q. Decomposition characteristics and its nutrient dynamics of leaf litter mixtures of both Chinese fir and *Phoebe bournei*. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2732-2738.
- [6] Liao L P, Ma Y Q, Wang S L, Gao H, Yu X J. Decomposition of leaf litter of Chinese fir in mixture with major associated broad-leaved plantation specie. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1): 27-33.
- [7] Zheng H, Chen F L, Ouyang Z Y, Fang Z G, Wang X K, Miao H. Utilization of different carbon sources types in biolog-GN microplates by soil microbial communities from four forest types. *Environmental Science*, 2007, 28(5): 1126-1130.
- [8] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied and Environment Microbiology*, 1991, 57(8): 2351-2359.
- [9] Guckert J B, Carr G J, Johnson T D, Hamm B G, Davidson D H, Kumagai Y. Community analysis by biolog: curve integration for statistical analysis of activated sludge microbial habitats. *Journal of Microbiological Methods*, 1996, 27(2/3): 183-197.
- [10] Yi Z G, Yi W M, Zhou L X, Wang X M. Soil microbial biomass of the main forests in Dinghushan Biosphere Reserve. *Ecology and Environment*, 2005, 14(5): 727-729.
- [11] Tian G, Brussaard L, Kang B T. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions: effects on soil fauna. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(6): 731-737.
- [12] Heal O W, Anderson J M, Swift M J. Plant litter quality and decomposition: an historical overview// Cadisch G, Giller K E, eds. *Driven by Nature*. Oxon, UK: CAB International, 1997: 3-30.
- [13] Polyakova O, Billor N. Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands. *Forest Ecology and Management*, 2007, 253(1/3): 11-18.
- [14] Berg B, McClaugherty C A. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Berlin: Springer, 2003.
- [15] Chapin F S III, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer-Verlag, 2002: 206-206.
- [16] Ågren G I, Bosatta E. *Theoretical Ecosystem Ecology: Understanding Element Cycles*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [17] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, Porporato A. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. *Science*, 2008, 321(5889): 684-686.
- [18] Haynes R J. The decomposition process: Mineralization, immobilization, humus formation, and degradation// Haynes R J, ed. *Mineral Nitrogen in the Plant-Soil System*. Orlando FL: Academic Press, 1986: 52-126.
- [19] Hobbie S E, Vitousek P M. Nutrient regulation of decomposition in Hawaiian montane forest: Do the same nutrients limit production and decomposition? *Ecology*, 2000, 81: 1867-1877.
- [20] Cadisch G, Giller K E, eds. *Driven by Nature. Plant Litter Quality and Decomposition*. Wallingford, UK: CAB International, 1997.

- [21] Aerts R, De Caluwe H. Nutritional and plant-mediated controls on leaf litter decomposition of *Carex* species. *Ecology*, 1997, 78(1): 244-260.
- [22] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems (Studies in Ecology Vol 5)*. Oxford: Blackwell, 1979.
- [23] Olav V, Olsen Y. Chemical composition and phosphate uptake kinetics of limnetic bacterial communities cultures in chemostats under phosphorus limitation. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(5): 939-946.
- [24] Goldman J C, Caron D A, Dennett M R. Regulation of gross growth efficiency and ammonium regeneration in bacteria by substrate C: N ratio. *Limnology and Oceanography*, 1987, 32(6): 1239-1252.
- [25] Graham M H, Haynes R J. Catabolic diversity of soil microbial communities under sugarcane and other land uses estimated by biologic and substrate-induced respiration methods. *Applied Soil Ecology*, 2005, 29(2): 155-164.

参考文献:

- [1] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 张剑, 刘燕新. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [2] 汪思龙, 黄志群, 王清奎, 于小军. 凋落物的树种多样性与杉木人工林土壤生态功能. *生态学报*, 2005, 25(3): 474-480.
- [3] 林开敏, 章志琴, 邹双全, 曹光球. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤性质的影响. *土壤通报*, 2006, 37(2): 258-262.
- [4] 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 于小军. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2005, 25(10): 2662-2668.
- [5] 林开敏, 章志琴, 曹光球, 何宗明, 马祥庆. 杉木与楠木叶凋落物混合分解及其养分动态. *生态学报*, 2006, 26(8): 2732-2738.
- [6] 廖利平, 马越强, 汪思龙, 高洪, 于小军. 杉木与主要阔叶造林树种叶凋落物的混合分解. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 27-33.
- [7] 郑华, 陈法霖, 欧阳志云, 方治国, 王效科, 苗鸿. 不同森林土壤微生物群落对 Biolog-GN 板碳源的利用. *环境科学*, 2007, 28(5): 1126-1130.
- [10] 易志刚, 蚁伟民, 周丽霞, 王新明. 鼎湖山主要植被类型土壤微生物生物量研究. *生态环境*, 2005, 14(5): 727-729.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 11 June, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Responses of microbes-mediated carbon and nitrogen cycles to global climate change	SHEN Jupei, HE Jizheng (2957)
Formation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and the photosynthesis of dominant species hypothesis	JIA Xiaohui, SHI Dingji, SHI Mianhong, et al (2968)
Unbalanced cyclical fluctuation pattern of intermittent outbreaks of beet armyworm <i>Spodoptera exigua</i> (Hübner) in China	WEN Lizhang, ZHANG Youjun, ZHU Liang, et al (2978)
Self-organizing feature map classification and ordination of <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest in Pangquangou Nature Reserve	ZHANG Qindi, ZHANG Jintun, Suriguga, et al (2990)
Ecological effects of lakeside wetlands restoration in Dalian Lake, Shanghai	WU Di, YUE Feng, LUO Zukui, et al (2999)
Soil organic carbon storage and profile inventory in the different vegetation types of Luya Mountain	WU Xiaogang, GUO Jinping, YANG Xiuyun, et al (3009)
Response of soil microbial community structure to the leaf litter decomposition of three typical broadleaf species in mid-subtropical area, southern China	ZHANG Shengxi, CHEN Falin, ZHENG Hua (3020)
The decomposition of coniferous and broadleaf mixed litters significantly changes the carbon metabolism diversity of soil microbial communities in subtropical area, southern China	CHEN Falin, ZHENG Hua, YANG Bosu, et al (3027)
Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst Peak-Cluster depression area of Northwest Guangxi, China	LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (3036)
Effects of cadmium stress on the activities of antioxidant enzymes, digestive enzymes and the membrane lipid peroxidation of the mangrove mud clam <i>Geloina coaxans</i> (Gmelin)	LAI Tinghe, HE Binyuan, FAN Hangqing, et al (3044)
The edge effects on tree-liana relationship in a secondary natural forest in Bawangling Nature Reserve, Hainan Island, China	WU Yuna, TAO Jianping, XI Weimin, et al (3054)
Soilwater deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau	YANG Lei, WEI Wei, MO Baoru, et al (3060)
The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought	HE Youwei, WANG Qiubing, WEN Xuefa, et al (3069)
Ecological adaptability of photosynthesis and water use for <i>Tamarix ramosissima</i> in the southern periphery of Gurbantungut Desert, Xinjiang	WANG Shanshan, CHEN Xi, WANG Quan, et al (3082)
Estimation of leaf area index of cotton using digital Imaging	WANG Fangyong, WANG Keru, LI Shaokun, et al (3090)
Different response of photosynthetic apparatus between wild soybean (<i>Glycine soja</i>) and cultivated soybean (<i>Glycine max</i>) to NaCl stress	XUE Zhongcai, GAO Huiyuan, LIU Jie (3101)
Effects of water and phosphorus supply on morphology and structure of special root hairs on nodal roots of wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.)	ZHANG Jun, HE Dexian, DUAN Zengqiang (3110)
Applications of species indicator for analyzing plant community types and their biodiversity at Kunyushan National Forest Reserve	SUN Zhiqiang, ZHANG Xingyao, ZHU Yanpeng, et al (3120)
Societal metabolism for chinese provinces based on multi-scale integrated analysis of societal metabolism (MSIASM)	LIU Ye, GENG Yong, ZHAO Hengxin (3133)
Comparative gene expression analysis for leaf trichomes of tobacco grown in two different regions in China	CUI Hong, JI Hao, YANG Huijuan, et al (3143)
Performance evaluation of B biotype whitefly, <i>Bemisia tabaci</i> on 23 host plants	AN Xincheng, GUO Qiang, HU Qiongbo (3150)
Studies of hemocytes DNA damage by two pesticides acetamiprid and chlorpyrifos in predaceous spiders of <i>Pardosa astrigera</i> Koch	LI Rui, LI Shengcai, LIU Jia, (3156)
Effects of the fungicide prochloraz on the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i>	LI Daming, LU Zhenghe, FENG Qi, et al (3163)
Effects of long- and short-term successive parthenogenesis on life history and genetics characteristics of <i>Brachionus calyciflorus</i>	GE Yali, XI Yilong (3170)
Review and Monograph	
Review of the relationship between regional landscape pattern and surface water quality	ZHAO Jun, YANG Kai, TAI Jun, et al (3180)
Review of dew action effect on plants	YE Youhua, PENG Shaolin (3190)
Advances in Botryosphaeriaceae: identification, phylogeny and molecular ecology	CHENG Yanlin, LIANG Jun, LÜ Quan, et al (3197)
Advances in research on the mechanisms of age-related productivity decline of planted forests	MAO Peili, CAO Banghua, TIAN Wenxia, et al (3208)
The application of tree-ring on forest disturbance history reconstruction	FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (3215)
Research advances on stress responsive WRKY transcription factors in plants	LI Ran, LOU Yonggen (3223)
Scientific Note	
The soil microbial activities and microbial biomass in Sanjiangyuan Alpine grassland	REN Zuohua, ZHANG Yuguang, LI Diqiang, et al (3232)
The differences of water use efficiency (WUE) among three <i>Populus deltoids</i> clones, and the cloning and characterization of related gene, <i>PdERECTA</i>	GUO Peng, XIA Xinli, YIN Weilun (3239)
Arthropod community reestablishment and niche of the main groups in kiwifruit orchards	DU Chao, ZHAO Huiyan, GAO Huanhuan, et al (3246)

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 31 卷 第 11 期 (2011 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 11 2011

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