

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第9期 Vol.34 No.9 **2014**

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 34 卷 第 9 期

2014 年 5 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 基于土壤食物网的生态系统复杂性-稳定性关系研究进展 陈云峰,唐政,李慧,等 (2173)
- 滇西北高原入湖河口退化湿地生态修复效益分析 符文超,田昆,肖德荣,等 (2187)
- 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究
..... 李阳兵,罗光杰,白晓永,等 (2195)
- 青藏高原东缘高寒草原有毒植物分布与高原鼠兔、高原麝鼠的相关性 ... 金樑,孙莉,崔慧君,等 (2208)
- 周边不同生境条件对茶园蜘蛛群落及叶蝉种群时空结构的影响 黎健龙,唐劲驰,黎秀娣,等 (2216)

个体与基础生态

- 三峡库区马尾松林土壤-凋落物层酶活性对凋落物分解的影响 葛晓改,肖文发,曾立雄,等 (2228)
- 芦苇、香蒲和蘆草 3 种挺水植物的养分吸收动力学 张熙灵,王立新,刘华民,等 (2238)
- 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响 ... 胡启武,聂兰琴,郑艳明,等 (2246)
- 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响 彭海英,李小雁,童绍玉 (2256)
- 遮阴对米槠和杉木原位排放甲烷的影响 陈细香,杨燕华,江军,等 (2266)
- 桔小实蝇和番石榴实蝇对 6 种寄主果实的产卵选择适应性 刘慧,侯柏华,张灿,等 (2274)
- 鼠尾草属东亚分支的传粉模式 黄艳波,魏宇昆,葛斌杰,等 (2282)

种群、群落和生态系统

- 养分资源脉冲供给对几种微藻种间竞争的影响 李伟 (2290)
- 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等 (2297)
- 黄土丘陵区植物功能性状的尺度变化与依赖 丁曼,温仲明,郑颖 (2308)
- 湘潭锰矿栎树叶片和土壤 N、P 化学计量特征 徐露燕,田大伦,王光军,等 (2316)
- 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素 阳伏林,张强,王文玉,等 (2323)
- 尾矿区不同植被恢复模式下高效固氮菌的筛选及 Biolog 鉴定 李雯,阎爱华,黄秋娟,等 (2329)
- 四川理县杂谷脑干旱河谷岷江柏造林恢复效果评价 李东胜,罗达,史作民,等 (2338)

景观、区域和全球生态

- 闽南-台湾浅滩渔场二长棘鲷群体景观多样性 蔡建堤,苏国强,马超,等 (2347)
- 面向土系调查制图的小尺度区域景观分类——以宁镇丘陵区中一小区域为例
..... 卢浩东,潘剑君,付传城,等 (2356)

气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响..... 胡 玮,严昌荣,李迎春,等 (2367)

资源与产业生态

基于 LMDI 分解的厦门市碳排放强度影响因素分析 刘 源,李向阳,林剑艺,等 (2378)

可持续生计目标下的生态旅游发展模式——以河北白洋淀湿地自然保护区王家寨社区为例.....

..... 王 瑾,张玉钧,石 玲 (2388)

荔枝树干液流速率与气象因子的关系 凡 超,邱燕萍,李志强,等 (2401)

肿腿蜂类寄生蜂室内控害效能评价——以松脊吉丁肿腿蜂为例 展茂魁,杨忠岐,王小艺,等 (2411)

城乡与社会生态

内蒙古草原人类福祉与生态系统服务及其动态变化——以锡林郭勒草原为例.....

..... 代光烁,娜日苏,董孝斌,等 (2422)

基于农业面源污染分区的三峡库区生态农业园建设研究 刘 涓,谢 谦,倪九派,等 (2431)

“交通廊道蔓延”视角下山地城市典型样带空间格局梯度分析 吕志强,代富强,周启刚 (2442)

学术信息与动态

美国地理学家协会 2014 年会述评 孙然好,肖荣波 (2450)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 280 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-05



封面图说: 峰丛洼地石漠化——峰丛主要分布在云贵高原的边缘部分及桂西、桂西北地区,相对高度一般为 200—300m,高的可达 600m 以上。在峰丛之间,岩溶洼地、漏斗、落水洞很发育,常形成峰丛洼地或峰丛漏斗的组合形态。峰丛洼地中的土地相当贫瘠,由于当地人们依靠这些土地种植庄稼为生,石漠化的发展趋势已经越来越明显。尤其在土地承载力低、人口压力大的区域石漠化相当严重,研究峰丛洼地耕地资源分布、土地利用强度和石漠化发育状况之间的机理,有助于从本质上认识石漠化的发生,对石漠化治理实施科学指导。

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

DOI: 10.5846/stxb201305261185

葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 周本智. 三峡库区马尾松林土壤-凋落物层酶活性对凋落物分解的影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2228-2237.

Ge X G, Xiao W F, Zeng L X, Huang Z L, Zhou B Z. Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2228-2237.

三峡库区马尾松林土壤-凋落物层酶活性 对凋落物分解的影响

葛晓改^{1, 2}, 肖文发^{2, *}, 曾立雄², 黄志霖², 周本智¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400;

2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要:凋落物的彻底降解是在凋落物和土壤酶系统的综合作用下完成, 酶活性的提高有利于凋落物-土壤有机物质的分解和养分解释放。通过对三峡库区 30 年生马尾松林凋落物分解、凋落物-土壤层酶活性季节动态及其对分解的影响进行研究, 结果表明: 30 年生马尾松林凋落物经过 540 d 的分解后干重剩余率是 59.80%; 凋落物层酶活性季节动态明显, 氧化还原酶活性均是 11 月最低, 3 月最高; 土壤过氧化物酶活性季节变化显著且均是 11 月最低, 多酚氧化酶活性 9 月较高, 而过氧化物酶活性则是 6 月较高。马尾松林凋落物层酶活性与土壤层酶活性差异较大, 且水解酶活性差异较氧化还原酶活性差异大, 凋落物层脲酶活性、纤维素酶活性和蔗糖酶活性 11 月、6 月、9 月分别是 0—5 cm 土壤层的 6.33 倍、3.24 倍、10.29 倍、68.14 倍、16.16 倍、24.81 倍、25.07 倍、31.88 倍、29.20 倍。凋落物分解速率均与土壤、凋落物层氧化还原酶活性呈极显著“S”形曲线, 与凋落物层水解酶活性呈二次函数关系, 与土壤层水解酶均呈极显著的线性关系。凋落物质量能引起凋落物-土壤层酶活性变化, 酶活性的改变反过来影响凋落物的分解, 因此, 凋落物-土壤层酶活性差异与凋落物分解阶段和对共同影响因素(凋落物质量、土壤温度、水分含量和土壤养分等)的敏感性不同有关, 凋落物-土壤层酶的相互作用共同影响森林生态系统的物质循环和养分循环过程。

关键词: 三峡库区; 马尾松; 凋落物分解; 凋落物层酶活性; 土壤层酶活性

Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area

GE Xiaogai^{1, 2}, XIAO Wenfa^{2, *}, ZENG Lixiong², HUANG Zhilin², ZHOU Benzhi¹

1 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang, Zhejiang 311400, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, the State Forestry Administration; Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: The complete degradation of litter results from the combined enzyme activities in litter layer and soil layer, and their improvement is helpful to organic matter decomposition and nutrient release. Litter decomposition and the seasonal dynamic of soil-litter layer enzyme activities were studied on 30-year-old *P. massoniana* forest in Three Gorges Reservoir Area. The results showed that the remaining mass was 59.80% after 540 days decomposition. The decomposition rate was relatively fast during the decomposition 0—180 d, and relatively slow during 180—270 d. The period of 50% mass loss and 95% mass loss was 2.11 a and 9.15 a, respectively. The litter layer enzyme activities exhibited a remarkable seasonal dynamics, with the lowest enzyme activity occurring in November and the highest in March for oxidoreductase activity. Polyphenoloxidase activity and peroxidase activity of litter layer in March were 4.60 times and 6.07 times as high as those in

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201104008); “十二五”科技支撑资助项目(2011BAD38B04)

收稿日期: 2013-05-26; 修订日期: 2013-11-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

November, respectively, while the dynamic of hydrolase activity in litter layer was irregular variation. The seasonal dynamics of soil layer peroxidase activity was remarkable with the lowest value occurring in November, and the highest in June. Polyphenoloxidase activity was the highest in September. The seasonal dynamics of soil layer hydrolase activity was irregular variation, the seasonal dynamical of soil urease activity was not significant ($P>0.05$), while the cellulose activity and sucrase activity was significant ($P<0.05$) with the sequence of September<June<November for sucrase activity, and the sequence of November<September<June for cellulose activity. Soil enzyme activity in the vertical direction was decreased gradually with soil depth except peroxidase activity. There was a notable difference in enzyme activity between litter layer and soil layer, and the difference in hydrolase activity was greater than in oxidoreductase activity. Litter layer urease activity, cellulase activity and sucrase activity were 6.33 times, 3.24 times, 10.29 times as high as those in 0—5 cm soil layer in November; 68.14 times, 16.16 times, 24.81 times in June, and 25.07 times, 31.88 times, 29.20 times in September, respectively. Litter polyphenoloxidase activity in November, June and September were 1.76 times, 1.45 times and 2.07 times as high as those in 0—5 cm soil layer, and the corresponding value were 0.40 times, 0.64 times and 0.56 times for peroxidase activity, respectively. There was a close relationship between litter-soil enzyme activities. Litter decomposition rate was significantly correlated in S-shaped curve with oxidoreductase activity both in litter and soil layer, probably because oxidoreductase activity dynamic is complex and influenced by soil pH value, nutrient content, soil layer distribution and so on. There were significant quadratic function ($P<0.01$) between litter decomposition rate and hydrolase activity in litter layer, while litter decomposition rate was significantly linearly related ($P<0.01$) to the hydrolase in soil layer. Litter quality could change the enzyme activity in litter and soil layer, in return, enzyme activity could affect litter decomposition rate. Therefore, the difference of enzyme activity between litter and soil layer is related with litter decomposition stage and the different sensitivity of the common impact factors including litter quality, soil temperature, water content and soil nutrients. The interactions of litter-soil layer enzyme activity influence material circulation and nutrient cycling process of forest ecosystem.

Key Words: Three Gorges Reservoir Area; *Pinus massoniana*; Litter decomposition; litter layer enzyme activity; soil layer enzyme activity

森林凋落物在促进森林生态系统正常的物质循环、养分平衡及维持生态系统功能中具有重要作用;凋落物分解是陆地生态系统土壤有机质、有机养分矿化和碳平衡形成的重要环节^[1],在促进森林生态系统正常物质循环和养分平衡^[2]、维持土壤肥力、保证植物再生长养分的可利用性中起着重要作用^[3]。凋落物分解过程中胞外酶破坏了凋落物的结构组成并还原了有机 C、N、P,因而凋落物分解过程是一个受制于土壤和凋落物中酶系统的复杂生物化学过程^[4];凋落物的彻底降解是在凋落物和土壤中酶系统的综合作用下完成,酶活性的提高有利于凋落物和土壤有机物质的分解、养分释放,对于维持森林生态系统的物质循环和能量流动及提高森林土壤肥力具有重要意义^[5]。

森林凋落物的分解过程是基于分解者细胞水平的酶解过程,有关凋落物分解过程中土壤和凋落物

的酶活性动态已开展了研究,如张瑞清等^[6]在西双版纳对凋落物叶分解过程中酶活性动态研究表明,凋落物分解速率与蔗糖酶活性呈负相关,与多酚氧化酶活性呈正相关;张鹏等^[7]研究表明凋落物分解与土壤酶活性直接相关,土壤酶活性与温度之间都有一定的相关性,最高值均出现在温度较高的 7 月份;郑洪元等^[8]研究表明水解酶系(脲酶、蔗糖酶)主要在分解第一阶段起作用,土壤中可溶性物质(氨态氮、酮酸等)有所增加,随着分解的进行,土壤水解酶系和氧化还原酶系(多酚氧化酶)共同完成,土壤中可溶性物质明显下降,形成的腐殖质开始积累。这些研究均表明凋落物-土壤酶活性在森林凋落物中有着重要作用,森林生态系统凋落物分解与酶系统的相互作用机制将成为新的发展趋势^[9],对森林生态系统中物质循环速度和能量流动具有重要作用。目前,森林凋落物分解过程中酶活性的研究多集中

于酶活性的测定方法及其影响因素方面^[9],然而有关土壤和凋落物层酶对分解的影响研究多数是基于相关分析,凋落物分解过程中凋落物层酶活性和土壤酶活性数量关系及对分解的影响研究报道较少。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国亚热带地区主要的针叶树种,自然分布面积达到 220 万 hm^2 ,主要分布在南方 15 个省(区)^[10],因其适应性强、耐干旱与瘠薄,广泛用于荒山绿化,是亚热带地区主要的造林树种,也是三峡库区典型造林树种之一。本文以三峡库区 30 年生马尾松人工林为研究对象,对其凋落物分解动态、凋落物层酶活性、土壤酶活性及其关系进行研究,为凋落物分解过程中土壤肥力状况提供基础资料,为森林生态系统 C、N、P 等养分的转化提供一定的指示作用,为马尾松人工林土壤质量评价和亚热带地区森林可持续经营提供参考依据,对深入揭示森林生态系统养分循环研究具有重要意义。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省秭归县($30^{\circ}38'14''$ — $31^{\circ}11'31''\text{N}$, $110^{\circ}00'14''$ — $111^{\circ}18'41''\text{E}$),海拔 40—2057 m,该地区属于亚热带大陆性季风气候,年均气温 16.9 $^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 44 $^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 -2.5 $^{\circ}\text{C}$,年降水量 1000—1250 mm,降水集中在 4—9 月,空气湿度达 60%—80%,无霜期 300—340 d。秭归县海拔 500 m 以下以茶园、板栗、柑橘和农田为主,海拔 500 m 以上主要为灌木、马尾松、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和松栎混交林等。

本研究以 30 年生马尾松林(面积为 1 hm^2)为研究对象,林下灌木多为油茶(*Camellia oleifera*)、槲木(*Loropetalum chinense*)和白背叶(*Mallotus apeltus*)等,草本多为稗草(*Echinochloa crusgalli*)、腹水草(*Veronicastrum axillare*)、菝葜(*Smilax ocreata*)、蜈蚣草(*Eremochloa ciliaris*)等,样地基本概况见表 1。

表 1 研究样地概况

Table 1 General situation of sample sites

海拔 Elevation /m	胸径 DBH /cm	坡度 Slope /($^{\circ}$)	坡向 Exposure	郁闭度 Canopy density	土壤厚度 Soil depth /cm	凋落物现存量 Litter standing crop /(t/hm^2)	凋落物层厚度 Litter layer depth /cm
357	25.3	25 $^{\circ}$	Ss	0.95	60—80	9.26 $\pm$ 2.97	5.77 $\pm$ 0.85

Ss: 半阴坡 Semi-shady

1.2 研究方法

1.2.1 凋落物分解

凋落物分解采用分解袋法。在 30 年生马尾松林中设置 3 个 20 m $\times$ 30 m 的样方。于 2010 年 5—6 月在林地样方外收集新近自然凋落、上层未分解的凋落物叶,将收集的凋落物叶充分混合,风干后称取凋落物叶 15 g,直接装入尼龙分解袋中。尼龙网袋大小为 20 cm $\times$ 20 cm,孔径 1 mm。于 2010 年 7 月底将凋落物袋随机放置在 3 个样方中,除去地表凋落物层,使凋落物叶分解袋贴近地面,让凋落物自然分解;放置凋落物分解袋后每月底进行新凋落物清理;3 个样方中共放置 90 袋。

自放置日期起,每 3 个月每样方随机取回 5 袋凋落物;取回凋落物分解袋后,清除侵入的根系、泥沙,3 袋烘至恒重,测干重并计算干重剩余率和分解速率。另外 2 袋保留新鲜样品,剪碎后过 2 mm 筛,

于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱内保存,用于凋落物层酶活性测定。同时,取 3 种林分凋落物叶各 15 g,重复 3 次,在 70 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,算出风干与烘干重转换系数。

1.2.2 土壤采样

于 2010 年 11 月(分解 90 d)、2011 年 6 月(270 d)、9 月初(360 d)(与凋落物袋回收同步)分别在 30 年生马尾松林样方中用直径 5 cm 的土钻取凋落物分解袋下面的土壤,分 3 层(0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm)约 0.5 kg,同一样方的同层土壤充分混合后作为一个样,每土样重复 3 次。带回实验室低温保存(4 $^{\circ}\text{C}$),样品去掉石砾、动植物残体、根系后混匀,过 2 mm 筛,装入保鲜袋 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存,并尽快进行土壤酶活性测定。

1.2.3 酶活性测定

凋落物层酶活性和土壤酶活性参照关松荫^[11]的方法分析。蔗糖酶活性测定采用 3,5-二硝基水杨

酸比色法,酶活性以 24 h 后 1 g 土壤生成的葡萄糖毫克数表示;纤维素酶活性测定采用硝基水杨酸比色法,酶活性以 72 h 后 10 g 土壤生成的葡萄糖毫克数表示;脲酶活性测定采用苯酚钠-次氯酸钠比色法,酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的毫克数表示;过氧化物酶活性测定采用容量法,酶活性以 2 h 后 1 g 土壤消耗 0.005 mol/L I_2 标准液的毫升数表示;多酚氧化酶测定采用比色法,酶活性以 2 h 后 1 g 土壤中紫色没食子素的毫克数表示。

1.3 数据处理

凋落物叶分解干重剩余率计算公式采用:

$$R = \frac{M_t}{M_0} \times k \times 100\%$$

式中, R 为凋落物叶分解干重剩余率(%), k 为凋落物风干样品与烘干样品转换系数, M_t 为凋落物 t 时间烘干样品重量, M_0 为凋落物起始风干样品重量。

凋落物叶分解速率计算公式采用:

$$L = 100\% - R$$

式中, L 为凋落物叶分解速率(%), R 为凋落物叶分解干重剩余率(%)。

干重剩余率用 Olson^[12] 负指数衰减模型进行拟合:

$$Y = a \cdot e^{-kt}$$

式中, Y 为干质量年残留率(%), a 为拟合参数, k 为年分解系数($\text{kg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$), t 为分解时间(a)。凋落物分解半衰期(50%分解)计算式, $t_{0.05} = \ln 0.5 / (-k)$;完全分解时间(95%分解)计算式, $t_{0.95} = \ln 0.05 / (-k)$ 。

利用 SigmaPlot 11.0 和 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析和作图。凋落物层酶活性和土壤层酶活性显著性检验采用单因子方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD),显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。图表中数据均用平均值 $\pm$ 标准差表示;凋落物分解速率与凋落物层、土壤层酶活性关系用 SPSS 16.0 软件的回归分析。

2 结果与分析

2.1 马尾松林凋落物叶分解动态

马尾松林凋落物叶经过 540 d 的分解干重剩余率是 59.80%(表 2)。凋落物叶分解速率在 0—180 d 相对较快,在分解的 180—270 d 相对较慢(即 2011 年 2—5 月反常干旱,几乎没有降雨);凋落物叶分解速率在夏季分解最高(即分解的 0—90 d、270—360 d)。马尾松林年凋落物叶分解常数是 0.33,除分解的第 6—9 月外,实测的凋落物叶分解速率比预测的高;凋落物叶分解 50%、95%的时间分别是 2.11 a、9.15 a。

表 2 马尾松林凋落物叶分解动态

Table 2 Litter leaf decomposition dynamic on *P. massoniana* forest

分解动态 Decomposition dynamic	取样时间 Sampling time					
	90 d	180 d	270 d	360 d	450 d	540 d
干重剩余率 Dry mass remaining/%	91.68	82.00	83.66	73.89	63.32	59.80
标准差 Standard deviation/%	2.60	3.35	5.01	4.43	5.44	1.60
变异系数 Coefficient of variation/%	2.84	4.08	6.00	6.00	8.58	2.84

凋落物叶分解样品的 90 d、180 d、270 d、360 d、450 d、540 d 对应于 2010 年 11 月、2011 年 3 月、2011 年 6 月、2011 年 9 月、2011 年 11 月、2012 年 1 月

2.2 凋落物层酶活性季节动态

马尾松林凋落物层酶活性季节动态明显(图 1)。凋落物层氧化还原酶活性变化相似,多酚氧化酶活性和过氧化物酶活性均是 11 月最低,3 月份最高,3 月酶活性分别是 11 月酶活性的 4.60 倍、6.07 倍;多酚氧化酶活性则是 11 月<6 月<9 月<3 月;过氧化物酶活性则是 11 月<9 月<6 月<3 月。凋落物层水解酶变化不一致,脲酶活性是 9 月最高,6 月最低,且差异显著($P<0.05$);纤维素酶活性则是 6 月<9 月<3 月<11 月,最高酶活性是最低时的 1.52 倍,

差异显著($P<0.05$);蔗糖酶活性则是 9 月<6 月<11 月<3 月,3 月蔗糖酶活性是 9 月的 2.06 倍。

2.3 马尾松林土壤层酶活性季节动态

马尾松林土壤酶活性季节动态明显(图 2)。30 年生马尾松林土壤氧化还原酶均是 11 月最低,多酚氧化酶活性 9 月较高,过氧化物酶活性则是 6 月较高,且最低酶活性与最高酶活性差异显著($P<0.05$)。马尾松林土壤水解酶中土壤脲酶活性季节变化不明显($P>0.05$),纤维素酶活性和蔗糖酶活性季节变化明显,蔗糖酶活性是 9 月<6 月<11 月,纤维素酶活性

是 11 月<9 月<6 月。

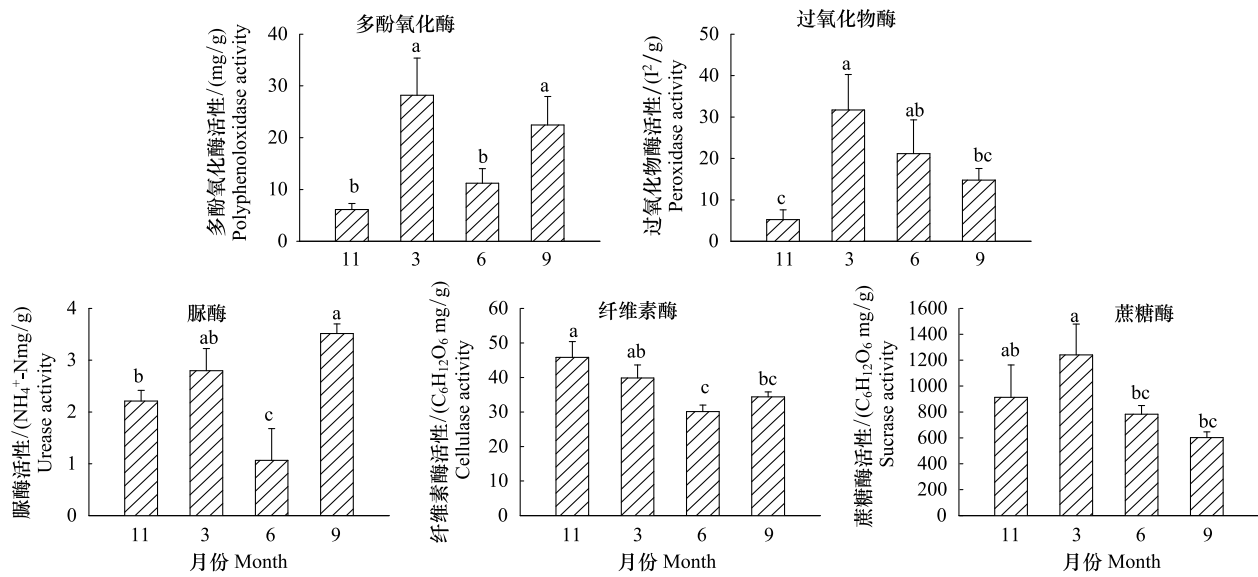


图 1 尾松林凋落物层酶活性季节动态
Fig.1 Seasonal dynamics of litter layer enzymes activities on *P. massoniana* forest

马尾松林土壤酶活性在垂直方向上随着土层深度的增加,除过氧化物酶外,其它酶活性均逐渐降低(图 2)。多酚氧化酶和过氧化物酶活性 11 月和 6 月垂直方向上差异不显著,9 月多酚氧化酶活性随土层深度的增加明显降低,过氧化物酶活性 9 月随土层

深度的增加先增加后降低。马尾松土壤脲酶活性 11 月和 6 月在垂直方向上差异显著 ($P<0.05$);纤维素酶活性和蔗糖酶活性各个月份在垂直方向上均差异显著。

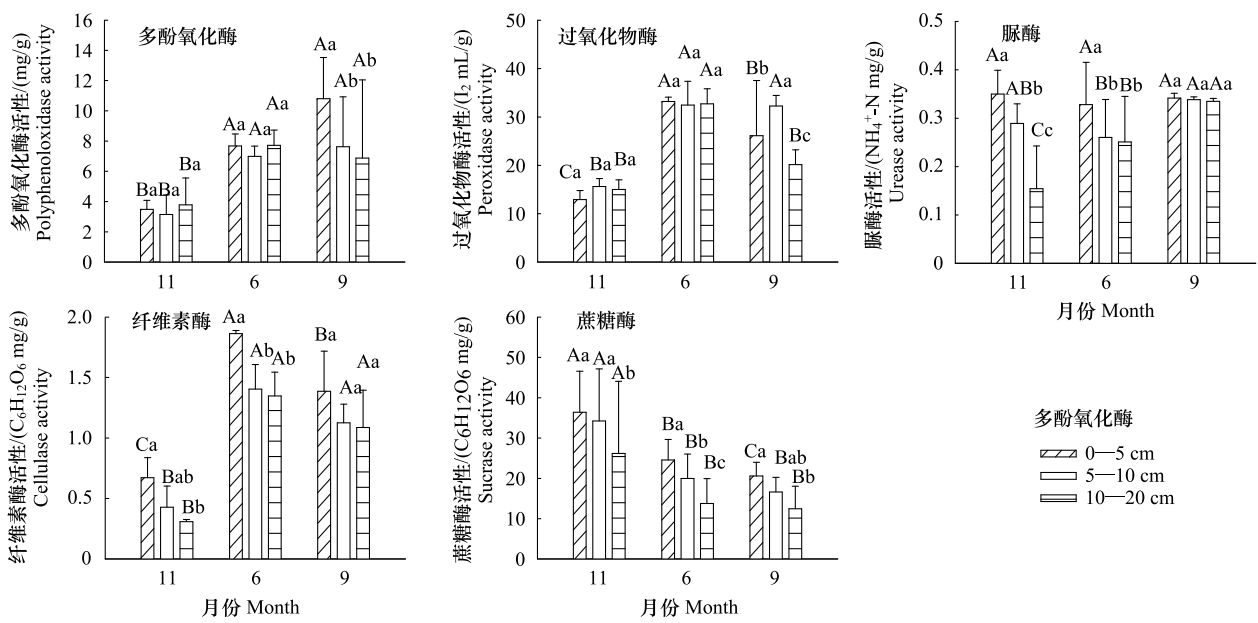


图 2 马尾松林土壤层(0—20 cm)酶活性特征
Fig.2 Enzyme activities characteristic of soil layer (0—20 cm) on *P. massoniana* forest
不同大写字母表示不同月份同种酶活性间差异显著,小写字母表示不同土层间差异显著 ($P<0.05$)

2.4 凋落物层酶和土壤层酶活性对分解的影响

马尾松林凋落物层酶活性与土壤层酶活性差异较大(图 3)。凋落物层多酚氧化酶活性 11 月、6 月、9 月分别是 0—5 cm 土壤层的 1.76 倍、1.46 倍、2.07 倍,过氧化物酶活性分别是 0.40 倍、0.64 倍、0.56

倍。水解酶活性差异较氧化还原酶活性差异大,凋落物层脲酶活性、纤维素酶活性和蔗糖酶活性 11 月、6 月、9 月分别是 0—5 cm 土壤层的 6.33 倍、3.24 倍、10.29 倍;68.14 倍、16.16 倍、24.81 倍;25.07 倍、31.88 倍、29.20 倍。

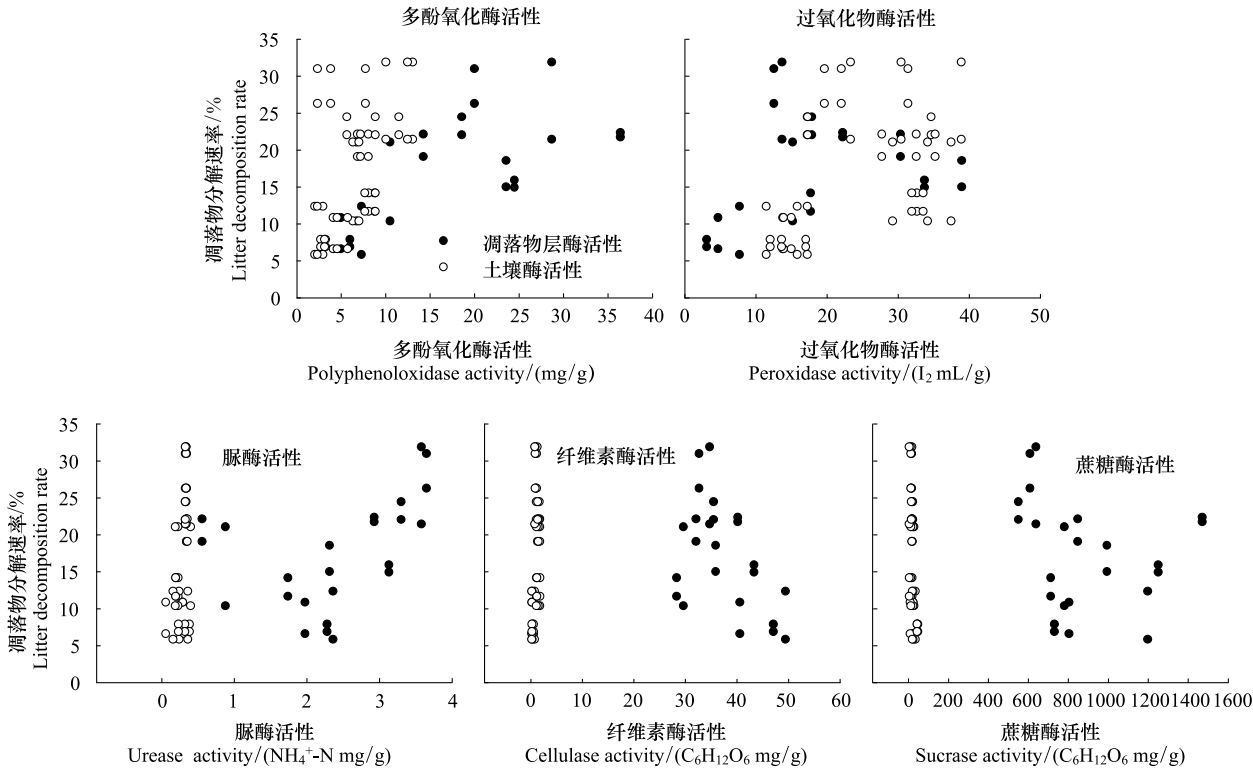


图 3 马尾松林凋落物叶分解速率与凋落物层酶活性、土壤层酶活性关系

Fig.3 The relationships between litter leaf decomposition rate and litter layer enzyme activities, soil layer enzyme activities on *P. massoniana* forest

马尾松林凋落物叶分解速率与凋落物层和土壤层酶活性关系紧密(表 3)。马尾松林凋落物分解速率与凋落物层和土壤层中氧化还原酶活性关系一致,均呈极显著的“S”形函数关系。凋落物分解速率

与凋落物层水解酶酶活性关系一致,且均呈极显著的二次函数关系($P<0.01$),与土壤层水解酶活性呈极显著线性关系($P<0.01$)。

表 3 凋落物叶分解速率与凋落物层酶活性、土壤层酶活性回归拟合

Table 3 Regression fit between litter leaf decomposition rate and litter enzyme activities, soil layer enzyme activities					
酶活性 Enzyme activities		来源 Source	回归方程 Regression equation	R^2	P
氧化还原酶活性 Oxidoreductase activity	多酚氧化酶活性	凋落物层 Litter layer	$y=e^{(3.362-7.253)/x}$	0.68	0.000
	多酚氧化酶活性	土壤层 Soil layer	$y=e^{(3.175-2.358)/x}$	0.25	0.000
	过氧化物酶活性	凋落物层 Litter layer	$y=e^{(3.102-3.887)/x}$	0.46	0.000
	过氧化物酶活性	土壤层 Soil layer	$y=e^{(3.516-17.32)/x}$	0.37	0.000
水解酶活性 Hydrolase activity	脲酶活性 Urease activity	凋落物层 Litter layer	$y=30.517-21.337x+5.682x^2$	0.70	0.000
	脲酶活性 Urease activity	土壤层 Soil layer	$y=3.742+44.823x$	0.19	0.001
	纤维素酶活性	凋落物层 Litter layer	$y=-79.52+5.667x-0.08x^2$	0.43	0.003
	纤维素酶活性	土壤层 Soil layer	$y=8.752+7.642x$	0.22	0.000
	蔗糖酶活性	凋落物层 Litter layer	$y=76.18-0.125x+5.975\times10^{-2}x^2$	0.36	0.010
	蔗糖酶活性	土壤层 Soil layer	$y=25.924-0.396x$	0.28	0.000

3 讨论和结论

3.1 凋落物层酶活性对分解的影响

凋落物分解是森林生态系统养分循环中至关重要的过程,凋落物分解与酶活性直接相关,森林凋落物分解过程中酶活性是一个动态过程,不同凋落物层酶活性季节变化明显^[7]。Fioretto 等^[13]在地中海对灰白岩蔷薇 (*Cistus incanus*) 和香桃木 (*Myrtus communis*) 凋落物叶分解过程中酶动态研究表明:两种凋落物叶酶活性均呈现明显的季节动态,最低值均出现在夏季。Kshattriya 等^[14]研究表明纤维素等水解酶具有明显的季节动态,蔗糖酶活性在分解初期较高,而纤维素酶活性等随着分解活性增加。本研究中过氧化物酶活性(多酚氧化酶和过氧化物酶活性)和水解酶活性(纤维素酶和蔗糖酶活性)均是 11 月份最低,3 月份最高,这可能因为生长季初期(3 月)植物根系生长促进酶合成^[15],微生物开始迅速繁殖,与细菌和真菌的数量有关的纤维素酶活性等水解酶活性明显增加;这与 Di Nardo 等^[16]研究结果一致,即过氧化物酶活性在分解第 1 年较低,在分解第 2 年的 10—1 月增加,酶活性最高在 1 月份;而邓仁菊等^[17]研究则表明凋落物层蔗糖酶活性、脲酶活性、脱氢酶活性均是秋季最高(8—10 月),因为 8—10 月的气温更有利于凋落物中微生物群落的生长。不同地区相同酶活性的季节动态不同,可能因为森林凋落物分解过程中酶活性受气候因素(温度和湿度)、土壤化学性质和呼吸活动等多种因素的影响^[9],同时,不同的酶活性的产量受植被类型和凋落物的影响也较大,不同的植被类型林下 5 cm 土壤温度差异较大^[14]。

凋落物层水解酶活性和氧化还原酶活性对分解的影响不同。郑洪元等^[8]研究表明水解酶系在分解第一阶段起作用,有机残体分解的第二阶段由水解酶系和氧化还原酶系共同完成。本研究中马尾松林凋落物分解速率与凋落物层水解酶活性均呈极显著的二次函数关系($P < 0.01$),因为在分解早期阶段凋落物纤维素等可溶性物质先分解^[13],水解酶活性通常先增加后降低,尤其是凋落物分解 30%—40% 时,水解酶活性保持相对较高^[13];季晓燕等^[18]研究表明在一定范围内,凋落物分解酶活性随凋落物厚度的增加而增加,随分解时间的延长,脲酶、纤维素酶、蔗

糖酶活性均有下降趋势。张瑞清等^[6]对西双版纳热带雨林凋落叶分解过程中酶活性动态研究表明,蔗糖酶等水解酶活性在凋落物分解初级阶段发挥重要作用,参与易分解成分的转化和分解;多酚氧化酶等氧化还原酶活性在分解后期迅速上升,对凋落叶中、后期木质素的分解起到关键作用,这与本研究中凋落物叶分解速率与凋落物层氧化还原酶活性均呈极显著的“S”形函数关系($P < 0.01$)一致。Waring^[19]研究表明胞外酶是凋落物叶分解的体现者,凋落物层纤维素酶活性、葡萄糖酶活性等与凋落物叶 394 d 分解速率呈正相关。因此,凋落物层水解酶活性主要在初期有助于凋落物中可溶性物质水解,随着分解时间的进行,氧化还原酶活性参与复杂有机化合物的分解;此外,凋落物分解速率与酶活性关系不同主要由凋落物层酶活性自身结构决定^[20]。

3.2 土壤酶活性对凋落物分解的影响

土壤酶是土壤生物化学过程的积极参与者,研究林分土壤酶活性的季节动态和差异对评价土壤和维持生态系统养分循环有重要意义^[5]。陶宝先等^[21]对苏南丘陵地区森林土壤酶活性季节变化研究表明,蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化物酶活性季节变化明显,夏、秋季酶活性相对较高,冬季酶活性均最低,高温因提高土壤酶活性而加速凋落物分解,这与本研究中 6 月份过氧化物酶活性、纤维素酶活性比 11 月份高一致,Fioretto 等^[13]研究也表明夏季 0—5 cm 土壤温度对酶活性的影响比冬季大,说明过氧化物酶活性、纤维素酶活性对温度较敏感,尤其在水分适宜条件下土壤温度-水分的协同作用促进凋落物分解的温度敏感性^[22];支持熊浩仲等^[23]在川西亚高山对冷杉林 (*Betula platyphylla*) 和白桦林 (*Abies faxoniana*) 土壤酶活性季节动态研究结论:即冷杉林表层过氧化氢酶活性 7 月最高,脲酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性均是 10 月最高;白桦林表层土壤蔗糖酶活性 7 月最高,多酚氧化酶 10 月最高,脲酶和过氧化氢酶活性 4 月最高;因为温度能提高土壤酶活性,多酚氧化酶明显比其它土壤酶的温度敏感性高,多酚氧化酶活性的 Q_{10} 明显比纤维素酶、蔗糖酶、脲酶高^[24];说明不同土壤酶活性对温度的敏感程度不同,且酶活性的温度敏感性由酶内部构型和结构决定^[25]。

土壤层水解酶活性和氧化还原酶活性对分解的

影响不同。当某一类酶活性高时,可以反映出某一特定微生物类群具有对凋落物中特定化学成分的高利用性。本研究中马尾松林凋落物叶分解速率与土壤层中氧化还原酶活性和水解酶活性呈不同的函数关系($P<0.01$),可能因为土壤水解酶活性与氧化还原酶活性的主导影响因素不同,水解酶类的活性主要受到土壤水热动态的控制,水解酶活性的高低直接影响土壤中养分的供给,通常表现出先增加后降低的趋势;而土壤多酚氧化酶活性在春季最高,加速木质素降解、腐殖化、碳矿化、溶解性有机碳的输出等,多酚氧化酶活性高限制土壤有机碳的积累,酶活性低则会促进土壤有机碳的积累^[26];而过氧化物酶活性同水解酶一样,酶活性在夏季最高、春季最小,主要加速土壤有机物的分解和腐殖质的合成。总之,氧化还原酶活性动态变化较为复杂,受土壤 pH 值、养分含量、土层分布等多种因素影响^[4]。

3.3 凋落物层酶和土壤层酶活性的影响因素

森林凋落物分解过程中的酶活性动态对指示凋落物分解过程具有重要意义,凋落物-土壤层酶活性动态是森林凋落物分解过程的重要指标^[5]。本研究中马尾松林凋落物层酶活性与土壤层酶活性差异较大,且水解酶活性差异较氧化还原酶活性差异大,可能因为凋落物分解过程中凋落物层酶活性比土壤酶活性对凋落物分解质量动态变化敏感^[4]。Keiblinger 等^[27]研究表明纤维素酶活性、过氧化物酶活性和多酚氧化酶活性与凋落物 C/N 比呈负相关,与凋落物 P 含量和凋落物 C/P 比呈正相关;季晓燕等^[18]开展凋落物叶厚度对其分解速率及酶活性的影响研究表明,水解酶活性随凋落物层厚度的增加而增加,因为凋落物叶较厚时,微生物可利用的物质能源越丰富,微生物的数量和种类相对较高;因此,凋落物质量是凋落物分解中酶活性的重要决定因素^[28],微生物产生酶的数量由凋落物质量决定,微生物利用其不同的易溶和顽固复合物维持新陈代谢^[14]。胡亚林等^[29]用不同质量的混合凋落物分解对土壤酶活性影响研究表明,混合凋落物下土壤脲酶、蔗糖酶、脱氢酶活性升高,土壤多酚氧化酶活性下降;其主要原因是凋落物质量的不同导致土壤微生物量、区系组成以及代谢过程改变,致使主要由土壤微生物产生的土壤酶的数量和活性发生变化。

森林凋落物分解过程中酶活性除受凋落物质量

的影响外,还受生物因素、非生物因素的影响,微生物群落是影响酶活性的主要生物因素,土壤有机质、温度和湿度等是影响酶活性的重要非生物因素^[9]。Fioretto 等^[30]在地中海对灰白蔷薇(*Cistus incanus*)凋落物叶分解和酶活性研究表明,凋落物层水分含量明显与纤维素酶和木聚糖酶活性呈正相关;Wallenstein 等^[22]研究表明北美红栎(*Quercus rubra*)和西黄松(*Pinus ponderosa* Douglas ex Lawson)凋落物叶培养 14 d 时,25 ℃ 时的凋落物层酶活性比 35 ℃ 时高 2 倍。而土壤酶活性的影响因素较复杂,即土壤湿度、温度、pH 值、可利用养分有效性均能影响土壤酶活性;徐振锋等^[31]研究表明模拟增温增加了土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性,土壤酶活性季节动态与土壤温度有着较大相关性,而与土壤水分季节变化关系不明显;Wallenstein 等^[25]研究表明不同的酶活性对土壤养分的敏感性不同,夏季酶活性可能易受 N 含量的限制;葛晓改等^[32]研究表明土壤养分对土壤酶活性影响显著,土壤主要养分含量高,蔗糖酶活性较高,过氧化物酶活性相对较低;杨万勤和王开运^[5]研究表明土壤酶活性与土壤微生物数量、微生物多样性、微生物生物量及土壤动物数量等呈显著相关。凋落物层和土壤层酶活性的差异性不仅与凋落物分解阶段有关,最重要的是对共同影响因素(凋落物质量、温度、水分、土壤养分等)的敏感性不同,同时凋落物质量均能引起土壤酶活性的变化,酶活性的改变反过来又影响凋落物的分解^[29];凋落物-土壤层酶相互作用,共同影响森林生态系统的物质循环和养分循环过程。

总之,马尾松林凋落物-土壤层过氧化物酶活性季节变化显著,凋落物分解速率均与土壤和凋落物层氧化还原酶活性呈极显著“S”形曲线,与凋落物层水解酶活性呈二次函数关系,与土壤层水解酶均呈极显著的线性关系;可能因为水解酶在凋落物分解初级阶段发挥重要作用,参与易分解成分的转化和分解;氧化还原酶类在分解后期迅速上升,对凋落叶中、后期木质素的分解起到关键作用。凋落物-土壤层酶活性的差异主要由凋落物分解阶段和共同影响因素的敏感性不同引起。

References:

- [1] Austin A T, Ballaré C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. Proceeding of the National

- Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107 (10): 4618-4622.
- [2] Song X Z, Jiang H, Zhang H L, Yu S Q, Zhou G M, Ma Y D, Chang S X. A review on the effects of global environment change on litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (9): 4414-4423.
- [3] Pan K W, He J, Wu N. Effect of forest litter on microenvironment conditions of forestland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 153-158.
- [4] Kong A H. The Soil and Litters Enzyme Activity in *Pinus tabulaeformis* and *Quercus variabilis* Forest at Lower Mountain Area Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012: 57-57.
- [5] Yang W Q, Wang K Y. Advances in forest soil enzymology. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(2): 152-159.
- [6] Zhang R Q, Sun Z J, Wang C, Yuan T Y. Ecological process of leaf litter decomposition in tropical rainforest in Xishuangbanna, SW China III. Enzyme dynamics. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 622-631.
- [7] Zhang P, Tian X J, He X B, Song F Q, Ren L L. Enzyme activities in litter, fragmentation and humus layers of subtropical forests. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3): 1024-1029.
- [8] Zheng H Y, Zhang D S, Zhou W X, Zhang X W. Decomposition on forest organic detritus and soil enzyme activities. *Chinese Journal of Soil Science*, 1983, 14(1): 36-39.
- [9] Zhang D L, Mao Z J, Zhang L, Zhu S Y. Advances of enzyme activities in the process of litter decomposition. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(1): 105-109.
- [10] Zhou Z X. *Masson pine* in China. Beijing: China Forestry press, 2000.
- [11] Guan S Y. *Soil Enzyme and Its Research Methods*. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [12] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44 (2): 322-331.
- [13] Fioretto A, Papa S, Curcio E, Sorrentino G, Fuggi A. Enzyme dynamics on decomposing leaf litter of *Cistus incanus* and *Myrtus communis* in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1847-1855.
- [14] Kshatriya S, Sharma G D, Mishra R R. Enzyme activities related to litter decomposition in forests of different age and altitude in North East India. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(3): 265-270.
- [15] Tierney G L, Fahey T J, Groffman P M, Hardy J P, Fitzhugh R D, Charles C T. Driscoll. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 2001, 56 (2): 175-190.
- [16] Di Nardo C, Cinquegrana A, Papa S, Fuggi A, Fioretto A. Laccase and peroxidase isoenzymes during leaf litter decomposition of *Quercus ilex* in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(10): 1539-1544.
- [17] Deng R J, Yang W Q, Wu F Z. Effects of seasonal freeze-thaw on the enzyme activities in *Abies faxoniana* and *Betula platyphylla* litters. *China Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (5): 1026-1031.
- [18] Ji X Y, Jiang H, Hong J H, Ma Y D. Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (6): 1731-1739.
- [19] Waring B G. Exploring relationships between enzyme activities and leaf litter decomposition in a wet tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 64(9): 89-95.
- [20] Dilly O, Munch J C. Microbial biomass content, basal respiration and enzyme activities during the course of decomposition of leaf litter in a black alder (*Alnus glutinosa* L. Gaertn.) forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(8): 1073-1081.
- [21] Tao B X, Zhang J C, Yu Y C, Cong R L. Season variations of forest soil enzyme activities in the hilly region of southern Jiangsu province. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2349-2354.
- [22] Wallenstein M D, Haddix M L, Lee D D, Conant R T, Paul E A. A litter-slurry technique elucidates the key role of enzyme production and microbial dynamics in temperature sensitivity of organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47(1): 18-26.
- [23] Xiong H Z, Wang K Y, Yang W Q. Seasonal variations of soil enzyme activities in fir and birch forests in subalpine area of western Sichuan. *Chinese Journal Applied and Environmental Biology*, 2004, 10(4): 416-420.
- [24] Wang C Y, Han G M, Jia Y, Feng X G, Tian X J. Insight into the temperature sensitivity of forest litter decomposition and soil enzymes in subtropical forest in China. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 5(3): 279-286.
- [25] Wallenstein M D, McMahon S K, Schimel J P. Seasonal variation in enzyme activities and temperature sensitivities in Arctic tundra soils. *Global Change Biology*, 2009, 15(7): 1631-1639.
- [26] Hu S, Zhang Y, Shi R J, Han S Q, Li H, Xu H. Temporal variations of soil microbial biomass and enzyme activities during the secondary succession of primary broadleaved-*Pinuskoraensis* forest in Changbai Mountains of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 366-372.
- [27] Keiblinger K M, Schneider T, Roschitzkl B, Schmid E, Eberl L, Hämmerle I, Leitner S, Richter A, Wanek W, Riedel K, Zechmeister-Boltenstern S. Effects of stoichiometry and temperature perturbation on beech litter decomposition, enzyme activities and protein expression. *Biogeosciences Discuss*, 2011, 8 (6): 11827-11861.
- [28] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Huang W Z. Enzyme activities during litter decomposition of two exotic and two native plant

- species in hardwood forests of New Jersey. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1207-1218.
- [29] 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.
- [30] Fioretto A, Papa S, Sorrentino G, Fuggi A. Decomposition of *Cistus incanus* leaf litter in a Mediterranean maquis ecosystem: mass loss, microbial enzyme activities and nutrient changes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(3): 311-321.
- [31] Xu Z F, Tang Z, Wan C, Xiong P, Cao G, Liu Q. Effects of simulated warming on soil enzyme activities in two subalpine coniferous forests in west Sichuan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2727-2733.
- [32] Ge X G, Xiao W F, Zeng L X, Huang Z L, Huang L L, Tan B W. Relationship between soil nutrient contents and soil enzyme activities in *Pinus massoniana* stands with different ages in Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 445-451.
- 参考文献:**
- [2] 宋新章, 江洪, 张慧玲, 余树全, 周国模, 马元丹, Chang S X. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响. *生态学报*, 2008, 28(9): 4414-4423.
- [3] 潘开文, 何静, 吴宁. 森林凋落物对林地微生境的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 153-158.
- [4] 孔爱辉. 北京低山区栓皮栎和油松林土壤与凋落物酶活性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012: 57-57.
- [5] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展. *林业科学*, 2004, 40(2): 152-159.
- [6] 张瑞清, 孙振钧, 王冲, 袁堂玉. 西双版纳热带雨林凋落物叶分解的生态过程 III. 酶活性动态. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 622-631.
- [7] 张鹏, 田兴军, 何兴兵, 宋富强, 任利利. 亚热带森林凋落物层土壤酶活性的季节动态. *生态环境*, 2007, 16(3): 1024-1029.
- [8] 郑洪元, 张德生, 周维新, 张宪武. 森林有机残体分解与土壤酶活性. *土壤通报*, 1983, 14(1): 36-39.
- [9] 张东来, 毛子军, 张玲, 朱胜英. 森林凋落物分解过程中酶活性研究进展. *林业科学*, 2006, 42(1): 105-109.
- [10] 周正贤. 中国马尾松. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 中国农业大学出版社, 1986.
- [17] 邓仁菊, 杨万勤, 吴福忠. 季节性冻融对岷江冷杉和白桦凋落物酶活性的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1026-1031.
- [18] 季晓燕, 江洪, 洪江华, 马元丹. 亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响. *生态学报*, 2013, 33(6): 1731-1739.
- [21] 陶宝先, 张金池, 愈元春, 丛日亮. 苏南丘陵地区森林土壤酶活性季节变化. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2349-2354.
- [23] 熊浩仲, 王开运, 杨万勤. 川西亚高山冷杉林和白桦林土壤酶活性季节动态. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(4): 416-420.
- [26] 胡嵩, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李慧, 徐慧. 长白山原始红松林次生演替过程中土壤微生物生物量和酶活性变化. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 366-372.
- [29] 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.
- [31] 徐振锋, 唐正, 万川, 熊沛, 曹刚, 刘庆. 模拟增温对川西亚高山两类针叶林土壤酶活性的影响. *应用生态学报*, 2010(11): 2727-2733.
- [32] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 黄玲玲, 谭本旺. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 445-451.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34 ,No.9 May ,2014(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on ecosystem complexity-stability relationships based on soil food web CHEN Yunfeng, TANG Zheng, LI Hui, et al (2173)
- The ecological restoration effort of degraded estuarine wetland in Northwest Yunnan Plateau, China FU Wenchao, TIAN Kun, XIAO Derong, et al (2187)
- The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification-cases study based on typical peak-cluster depression ... LI Yangbing, LUO Guangjie, BAI Xiaoyong, et al (2195)
- Correlation between the distribution characteristics of poisonous plants and *Ochotona curzoniae*, *Myospalax baileyi* in the East of Tibetan Plateau Alpine meadow ecosystem JIN Liang, SUN Li, CUI Huijun, et al (2208)
- Effects of the surrounding habitat on the spider community and leafhopper population in tea plantations LI Jianlong, TANG Jingchi, LI Xiudi, et al (2216)

Autecology & Fundamentals

- Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (2228)
- Kinetics of nutrient uptake by three emergent plants, *Phragmites australis*, *Typha orientalis* and *Scirpus triquetra* ZHANG Xiling, WANG Lixin, LIU Huamin, et al (2238)
- Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliottii* plantation HU Qiwei, NIE Lanqin, ZHENG Yanming, et al (2246)
- Effects of shrub (*Caragana microphalla* Lam.) encroachment on water redistribution and utilization in the typical steppe of Inner Mongolia PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (2256)
- Effects of shadowing on methane Emissions from *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* CHEN Xixiang, YANG Yanhua, JIANG Jun, et al (2266)
- Oviposition preference and offspring performance of the oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* and guava fruit fly *B. correcta* (Diptera: Tephritidae) on six host fruits LIU Hui, HOU Bohua, ZHANG Can, et al (2274)
- Pollination Mechanisms of genus *Salvia* (Lamiaceae) in East Asia (China) HUANG Yanbo, WEI Yukun, GE Binjie, et al (2282)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of resource pulse supply on interspecific competition of a few algal species LI Wei (2290)
- Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns LI Jingpeng, XU Mingfeng, SU Zhiyao, et al (2297)
- Scale change and dependence of plant functional traits in hilly areas of the loess region, Shaanxi Province, China DING Man, WEN Zhongming, ZHENG Ying (2308)
- N and P stoichiometry of *Koeleria paniculata* leaf and soil in Xiangtan Manganese Mine wasteland XU Luyan, TIAN Dalun, WANG Guangjun, et al (2316)
- Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau YANG Fulin, ZHANG Qiang, WANG Wenyu, et al (2323)
- Isolation and Biolog identification of the high-efficiency azotobacter from iron tailing under different vegetation restoration modes LI Wen, YAN Aihua, HUANG Qiuxian, et al (2329)
- Assessing effects of *Cupressus chengiana* plantations in the dry valley of Zagunao River, Li county of Sichuan Province LI Dongsheng, LUO Da, SHI Zuomin, et al (2338)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape diversity of *Paerargyrops edita* Tanaka stock in Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground CAI Jiandi, SU Guoqiang, MA Chao, et al (2347)
- Landscape classification in a small area for soil series survey and mapping: a case study in the Ningzhen hills, China LU Haodong, PAN Jianjun, FU Chuancheng, et al (2356)
- Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the north china plain HU Wei, YAN Changrong, LI Yingchun, et al (2367)

Resource and Industrial Ecology

- Factor decomposition of carbon intensity in Xiamen City based on LMDI method LIU Yuan, LI Xiangyang, LIN Jianyi, et al (2378)
- Evaluation index system of sustainable livelihoods ecotourism strategy: a case study of wangjiazhai community in baiyangdian wetland nature reserve, Hebei WANG Jin, ZHANG Yujun, SHI Ling (2388)
- Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters FAN Chao, QIU Yanping, LI Zhiqiang, et al (2401)
- Evaluation on control efficiency of bethylid parasitoids on pest insects indoor: a case of *Sclerodermus* sp. (Hymenoptera: Bethylidae) ZHAN Maokui, YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, et al (2411)

Urban, Rural and Social Ecology

- The dynamic change of herdsmen well-being and ecosystem services in grassland of Inner Mongolia: take Xilinguole League as example DAI Guangshuo, NA Risu, DONG Xiaobin, et al (2422)
- The construction of the eco-agricultural yards in three gorges reservoir area based on agricultural non-point source pollution zones LIU Juan, XIE Qian, Ni Jiupai, et al (2431)
- Spatial pattern gradient analysis of a transect in a hilly urban area in China from the perspective of transportation corridor sprawl LÜ Zhiqiang, DAI Fuqiang, ZHOU Qigang (2442)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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,280 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

本期责任副主编 于贵瑞

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 34 卷 第 9 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 9 (May, 2014)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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: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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元