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 主办
科学出版社 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，线岩相洼，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/stxb201110131507
杨玉莲, 吴福忠, 杨万勤,谭波, 徐振锋, 刘洋, 康丽娜. 雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响. 生态学报,2012,32(22): 7045-7052.
Yang Y L, Wu F Z, Yang W Q, Tan B, Xu Z F, Liu Y, Kang L N. Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine *Abies faxoniana* forest of western Sichuan. Acta Ecologica Sinica,2012,32(22):7045-7052.

# 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*,谭 波, 徐振锋, 刘 洋, 康丽娜
(四川农业大学生态林业研究所,林业生态工程四川省重点实验室,成都 611130)

**摘要**:为了解气候变暖情景下雪被减少对土壤水解酶活性的影响,采用人工遮雪的方法,研究了雪被去除对川西高山原始冷杉林(*Abies faxoniana*)冬季有机层和矿质层土壤转化酶、脲酶和磷酸酶活性的影响。结果表明,雪被去除显著降低了雪被形成初期至雪被融化后土壤脲酶和中性磷酸酶的活性。受土壤温度和冻融交替的影响,土壤转化酶、酸性和碱性磷酸酶活性在雪被形成初期和雪被融化后期有所提高,但不同土层的土壤酶对雪被去除的响应存在差异。雪被处理、土壤层次和采样时间及其交互作用显著影响了土壤酶的活性。此外,川西高山冷杉林有机层土壤转化酶与土壤温度和冻融循环次数呈极显著相关关系,土壤脲酶和酸性磷酸酶与土壤温度关系密切,中性磷酸酶受土壤冻融循环影响较大,而碱性磷酸酶与土壤温度和冻融循环的关系不明显。这些结果表明,未来气候变暖所引起的雪被减少及冻融变化将改变土壤酶活性特征,进而影响到与 C、N 和 P 相关的土壤生物化学过程。

**关键词**:雪被; 全球变暖; 冻融循环;土壤水解酶; 高山冷杉林

# Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine *Abies faxoniana* forest of western Sichuan

YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin*, TAN Bo, XU Zhenfeng, LIU Yang, KANG Lina
*Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering in Sichuan, Institute of Ecological Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu* 611130, *China*

**Abstract**: Soil ecological processes in cold season, particularly those associated with snow accumulation and ablation, play a central role in the structure and function of alpine forest ecosystem. With its high albedo, low thermal conductivity, large energy requirement for melting, and significant soil water input during melting, snow pack causes the surface energy balance and soil microclimate to be fundamentally important in winter in cold regions. More and more recent studies have documented that climate change may cause a decrease in snow cover, resulting in more severe soil frost and more complicated temperature variation. These studies also showed that snow pack disappear in the future remarkable affected soil water content, nutrient cycle, even the group and quantity of soil microorganisms and other ecological processes. As yet, little attention has been given to the effects of soil enzyme activities, although as the important component in soil system, they often display sensitive responses to environment changes. Therefore, in order to understand the responses of soil hydrolase enzyme activities in winter to the losing of snow pack in the scenarios of global warming, a field snow - shading experiment was conducted in a primary fir (*Abies faxoniana*) forest in western Sichuan. Soil invertase, urease, and

**基金项目**:国家自然科学基金项目(31170423, 31000213); 国家"十二五"科技支撑计划(2011BAC09B05); 教育部博士点基金项目(20105103110002); 中国博士后科学基金(20110491732);四川省科技支撑计划项目(2010NZ0051)
**收稿日期**:2011-10-13; **修订日期**:2012-05-11
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scyangwq@163.com

phosphatase activities in soil organic layer and mineral layer were investigated under the snow pack and non-snow pack during different winter periods as snow pack formed and melted from October 19, 2009 to May 18, 2010. Snow pack removal significantly decreased soil urease and neutral phosphatase activities in both soil organic layer and mineral layer from the early period of snow forming to the period after snow melt. Due to the effects of soil temperature and frequently freezing and thawing, soil urease, acid phosphatase and alkaline phosphatase activities slightly increased at the early period of snow forming and the later period of snow melting, although the responses of soil enzymes to snow pack removal were different in different soil layer. Moreover, snow pack removal, soil layers, sampling time and their interaction obviously influenced the activities of soil hydrolase enzymes. According to the relationships bentween soil hydrolase enzymes (invertase, urease, acid phosphatase, neutral phosphatase and alkaline phosphatase) as well as soil temperature and the number of freeze-thaw cycles in soil organic layer, we detected that soil invertase activity was remarkably related with soil temperature and the number of freeze-thaw cycles. No significant correlation was observed between alkaline phosphatas activity and soil temperature and freeze-thaw cycles, but the activities of soil urease and acid phosphatase showed closely relationships with temperature. Although soil neutral phosphatase activity was significantly related to soil freeze-thaw cycles, soil alkaline phosphatase activity showed little relationship with temperature and freeze-thaw cycles. The results indicated that the disappear of snow pack in winter in the scenarios of global warming would significantly affect soil hydrolase activity, and then soil processes related with carbon, nitrogen and phosphorus cycling in the primary fir forest in western Sichuan, China.

**Key Words**: snow pack; global warming; freeze-thaw cycle; soil hydrolase enzyme; alpine forest

土壤酶是土壤生态系统的重要组成部分,作为土壤物质循环和能量流动的重要参与者,它在陆地生态系统地下生态过程中扮演着重要的角色[1]。全球中高纬度和高海拔地区普遍存在季节性雪被现象[2],冬季雪被的绝热作用不仅可以防止土壤深度冻结,积雪也为冬季生物生长过程提供了水分和能量,和其他非生物因子共同调节着森林土壤生态过程[2-3]。全球气候变化已是不争的事实[4],随着全球平均气温的升高,中高纬度和高海拔地区冬季雪被也将发生明显改变[5]。气候变暖情境下,冬季雪被的减少或消除可明显降低土壤温度[6],增加土壤冻结程度和冻融循环次数[7-8],改变土壤物理和化学性质。受土壤温度和冻融格局的显著影响,土壤酶的活性也势必会因生物和非生物因子的改变而变化。一方面,土壤冻结作用可直接致死土壤生物和植物根系[9],降低土壤酶的合成和分泌;另一方面,死亡生物细胞破裂释放的酶可在短期内提高土壤酶的活性[10];此外,雪被和冻融变化综合影响下土壤养分的释放和流失过程也可能改变生物化学过程进行的方向,提高或降低土壤酶活性的大小[2,11]。可见,在全球气候变化背景下,冬季雪被减少可能对高纬度和高海拔地区土壤酶活性产生复杂影响,这对了解高寒地区土壤生态系统对气候变化的响应具有重要的意义。

川西高山森林位于青藏高原东缘的高海拔地带,在区域气候调节、水源涵养和生物多样性保护等方面有着重要的作用[12]。该区土壤冻结时间长达5—6个月,并且伴随着明显的季节性雪被覆盖现象[13-14]。全球气候变暖背景下冬季雪被格局的变化可能影响高寒地区土壤生态过程。前期研究表明,冬季雪被去除显著影响了该区土壤温度日变化幅度和冻融格局,同时土壤碳、氮、磷等元素含量和贮量也发生了显著变化[15],国内外的研究也多围绕雪被变化对土壤养分和微生物的影响[3,5-7],而对冬季土壤酶随雪被的变化特征关注较少。因此,在前期研究基础上,本文以川西高山典型岷江冷杉(*Abies faxoniana*)原始林为对象,以自然状态下雪被覆盖为对照,采用人工遮雪的方式,研究雪被去除对与C、N、P等元素循环密切相关的土壤转化酶、脲酶和磷酸酶活性的影响,为进一步了解该区冬季森林土壤生态过程及其对气候变化的响应提供一定的科学依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域概况

研究区位于四川省理县毕棚沟(102°53′—102°57′ E,31°14′—31°19′ N),地处青藏高原东缘与四川盆地

的过渡带,海拔 2458—4619 m。年均降雨量约 850 mm,年平均气温 2—4 ℃(最高气温 23 ℃,最低气温-18 ℃)。研究区域的主要森林植被为落叶阔叶林、针阔混交林、针叶林,高山灌丛和草甸。其中,岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、川西云杉(*Picea balfouriana*)和红桦(*Betula albo-sinensis*)为该区域最典型的森林植被[13,15]。

本研究选取岷江冷杉原始林(海拔 3582 m)为试验样地,土壤基本化学性质见表 1,每年的 11 月初至次年 4 月中旬为土壤的季节性冻融期,并且每年的 11 月下旬(或 12 月初)开始形成早期雪被(10—20 cm),雪被厚度至次年 2 月下旬(3 月初)达最大(>40 cm),3 月中旬雪被开始融化[15]。

**表 1　样地土壤基本化学性质**

**Table 1　Soil chemical properties in the primitive fir forest**

| 土层 Layer | 土壤厚度 Thickness /cm | pH | 有机碳 Organic C /(g/kg) | 全氮 Total N/(g/kg) | 全磷 Total P /(g/kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| 有机层 Organic layer | 15±2 | 6.1±0.5 | 150.3±15.9 | 9.7±0.9 | 1.2±0.2 |
| 矿质层 Mineral layer | 23±3 | 5.7±0.4 | 45.2±5.0 | 1.9±0.3 | 0.7±0.1 |

### 1.2　样地设计

雪被去除试验于 2009 年 11 月初开始。在试验样地内随机选取 10 个 5 m×5 m 的均质样方,均分为两部分:5 个样方不做任何处理,另外 5 个样方用架设的拱形聚乙烯塑料膜(高 0.8 m)去除冬季雪被。整个雪被去除处理至 2010 年土壤完全解冻后(4 月下旬)结束。为弥补雪被去除处理的冬季降雨和降雪水分输入,在雪被形成初期、雪被覆盖期和雪被融化期补充水分 3 次,每次 1000 mL/$m^2$ 雪融水,补水量根据林内积雪平均厚度估算。

### 1.3　样品采集与测定

土壤样品分雪被形成前(10 月 19 日, Ⅰ)、雪被形成初期(12 月 21 日, Ⅱ)、雪被覆盖期(1 月 21 日和 3 月 5 日, Ⅲ)、雪被融化期(3 月 22 日和 4 月 18 日, Ⅳ)和雪被融化后(5 月 18 日, Ⅴ)5 个时期进行采集。分别采集雪被去除处理和雪被覆盖下土壤有机层和矿质土壤层的土壤样品。随即将所采集的样品装入冰盒,24 h 内运回实验室。随后将每个样品分成两份,一份用于测定土壤含水量,另一部分样品过 2 mm 筛,去掉石块、动植物残体和根系后,混匀装入保鲜袋,贮于 4 ℃的冰箱中备用,用于测定土壤酶活性。

土壤酶活性测定依照《土壤酶及其研究法》进行[16]。转化酶采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定;脲酶采用尿素比色法测定;酸性磷酸酶、中性磷酸酶和碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定。一个酶活性单位(EU)以 1 g 土壤在 37 ℃、24 h 内各自水解产生的葡萄糖和酚的毫克数、减少的尿素毫克数表示。土壤 pH 值采用电位法测定;土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法测定;全氮采用半微量凯氏定氮法测定;全磷采用钼锑抗比色法测定[17]。

### 1.4　环境因子监测

2009 年 10 月 1 日,在林内距地面 1.5 m 和土壤深度 5 cm 处(雪被去除与雪被覆盖)分别安置一个纽扣式温度记录器(iButton DS1923-F5, Maxim Com. USA),同步监测空气温度和土壤温度,每 1 h 记录 1 次数据(图 1)。在温度监测期间,任何时段土壤温度低于 0 ℃持续至少 3 h,随后回升到 0 ℃持续至少 3 h(或高于 0 ℃持续至少 3 h,随后跌至 0 ℃以下持续至少 3 h)的土壤温度动态过程记作 1 次冻融循环[15],雪被去除和雪被覆盖的土壤冻融循环特征见表 2。

### 1.5　统计分析

所有数据均采用 SPSS 13.0 软件进行分析。采用重复测量方差分析(repeated measures ANOVA)检验不同处理、采样时间和土壤层次及其交互作用对土壤酶活性的影响;采用 $t$ 检验分析土壤酶活性处理间的差异显著性;采用 Pearson 相关系数评价 5 cm 土壤温度、土壤冻融循环次数与土壤酶活性的相关关系(土壤温度和冻融循环次数分别是采用雪被各阶段平均温度和冻融循环总次数)。显著性水平设定为 $\alpha=0.05$。

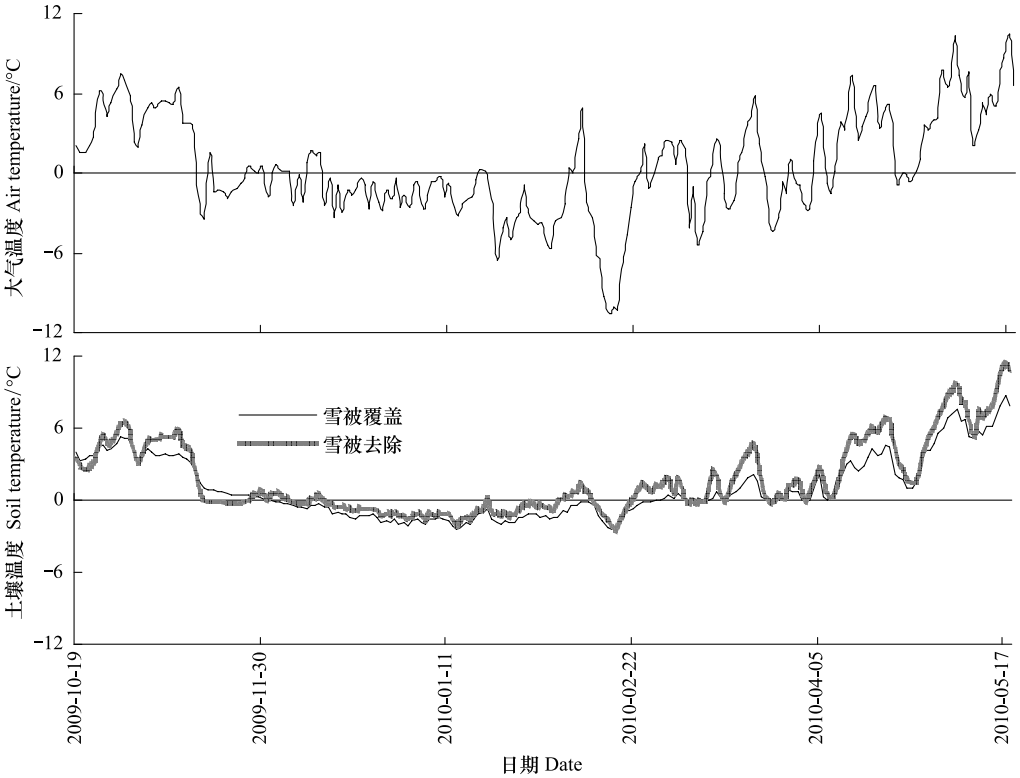


**图 1 雪被去除和雪被覆盖处理下川西高山冷杉林气温和土壤温度的动态变化**

**Fig. 1 Dynamics of air and soil temperature in the alpine *Abies faxoniana* forest in western Sichuan with non-snow pack and snow pack**

## 2 结果与分析

### 2.1 雪被去除对不同土层转化酶活性的影响

不同雪被处理土壤有机层和矿质土壤层的转化酶活性均具相似的季节变化规律(表 3),表现为先降低后升高再降低的变化趋势(图 2)。在雪被形成前,雪被去除对土壤转化酶活性无显著影响。雪被形成初期,雪被去除显著降低土壤有机层转化酶活性,而显著增加了矿质土壤层转化酶活性。雪被覆盖期,雪被去除显著降低了土壤有机层和矿质土壤层土壤转化酶活性。雪被去除处理下土壤转化酶活性在雪被融化前期显著降低,而在雪被融化后期显著增加。雪被融化后雪被去除显著降低了各土层土壤转化酶活性。同时,土壤转化酶活性对雪被去除的响应与土壤层次和季节密切相关(表 3)。对于土壤有机层,土壤温度和冻融循环次数与土壤转化酶活性呈极显著的相关关系(表 4)。

**表 2 雪被去除和雪被覆盖处理下川西高山冷杉林土壤冻融循环特征**

**Table 2 Characteristics of soil freeze-thaw cycle in alpine *Abies faxoniana* forest in western Sichuan with non-snow pack and snow pack**

| 雪被阶段 Stages of snow pack | 雪被覆盖 Snow pack | 雪被去除 Non-snow pack |
|---|---|---|
| | 冻融循环 Freeze-thaw cycle (次数) | |
| Ⅰ | — | — |
| Ⅱ | 2 | 14 |
| Ⅲ | 9 | 43 |
| Ⅳ | 17 | 16 |
| Ⅴ | — | — |

### 2.2 雪被去除对不同土层脲酶活性的影响

不同雪被处理土壤有机层和矿质土壤层的脲酶活性均呈明显的季节变化规律(表 3),雪被覆盖土壤脲酶活性表现为先增加后降低的变化趋势,但在雪被形成初期雪被去除使土壤脲酶活性急剧下降(图 3)。与雪被覆盖比较,雪被去除还显著降低了雪被覆盖期、雪被融化期和雪被融化后土壤有机层和矿质土壤层土壤脲酶活性(矿质土壤层 4 月除外)。对于土壤有机层,和冻融循环次数比较,土壤温度对脲酶活性的影响更为重要(表 4)。

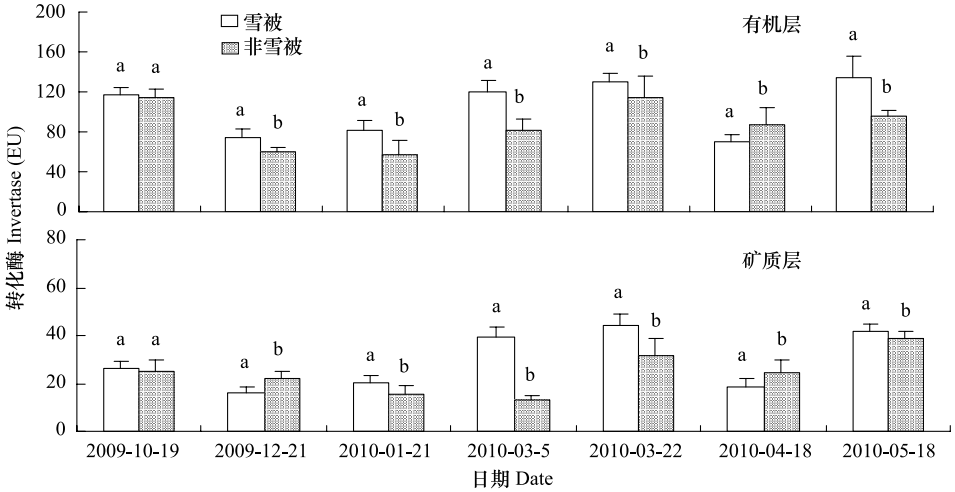


**图 2　雪被去除和雪被覆盖条件下川西高山冷杉林土壤转化酶活性的动态变化**

**Fig. 2　Dynamics of soil invertase activity in alpine *Abies faxoniana* forest in western Sichuan without snow pack and with snow pack**

不同小写字母表示雪被处理间差异达 0.05 显著水平

**表 3　雪被处理、采样日期和土壤层次对土壤酶活性的重复测量方差分析**

**Table 3　Results of repeated measures ANOVA for the effects of sampling treatment, sampling date and soil layer on soil enzyme activities**

| 因子 Factor | 转化酶 Invertase | 脲酶 Urease | 酸性磷酸酶 Acid phosphatase | 中性磷酸酶 Neutral phosphatase | 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase |
|---|---|---|---|---|---|
| T | <0.001 | 0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| D | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| L | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| T×D | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| T×L | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| D×L | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| T×L×D | 0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |

T: 雪被处理 snow treatment, D: 采样日期 Sampling date, L: 土壤层次 Soil layer

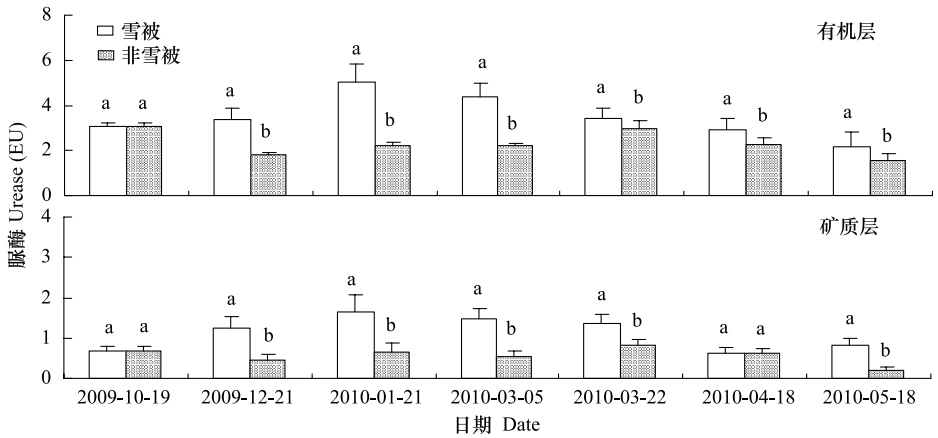


**图 3　雪被去除和雪被覆盖条件下川西高山冷杉林土壤脲酶活性的动态变化**

**Fig. 3　Dynamics of urease activity in alpine *Abies faxoniana* forest in western Sichuan without snow pack and with snow pack**

## 2.3　雪被去除对不同土层磷酸酶活性的影响

不同雪被处理土壤有机层和矿质土壤层的磷酸酶活性也呈明显季节动态(表 3),雪被覆盖土壤磷酸酶活性在 3 月呈现冬季峰值,而雪被去除处理下土壤磷酸酶冬季峰值提前至 12 月或 1 月(图 4)。在雪被形成前,

雪被去除对土壤磷酸酶活性无显著影响。雪被形成初期,雪被去除显著降低了土壤有机层酸性、中性磷酸酶的活性,显著增加了土壤碱性磷酸酶活性。而在矿质土壤层中,酸性磷酸酶活性显著升高,中性磷酸酶活性显著降低,碱性磷酸酶活性无显著变化。雪被覆盖期,雪被去除显著降低了土壤酸性、中性磷酸酶活性,尽管土壤有机层土壤碱性磷酸酶活性也显著降低,但矿质土壤层碱性磷酸酶活性仅在雪被覆盖后期显著下降。雪被融化期,雪被去除显著降低了土壤有机层 3 种磷酸酶活性,并且也显著降低了矿质土壤层中性磷酸酶活性,同时酸性、碱性磷酸酶活性在雪被融化前期显著降低,而在雪被融化后期无显著变化。雪被融化后,雪被去除显著降低 3 种磷酸酶活性(矿质土壤层碱性磷酸酶除外)。对于土壤有机层,土壤温度和冻融循环次数分别对酸性磷酸酶和中性磷酸酶更为重要,碱性磷酸酶活性与土壤温度和冻融循环次数的相关性都较低(表 4)。

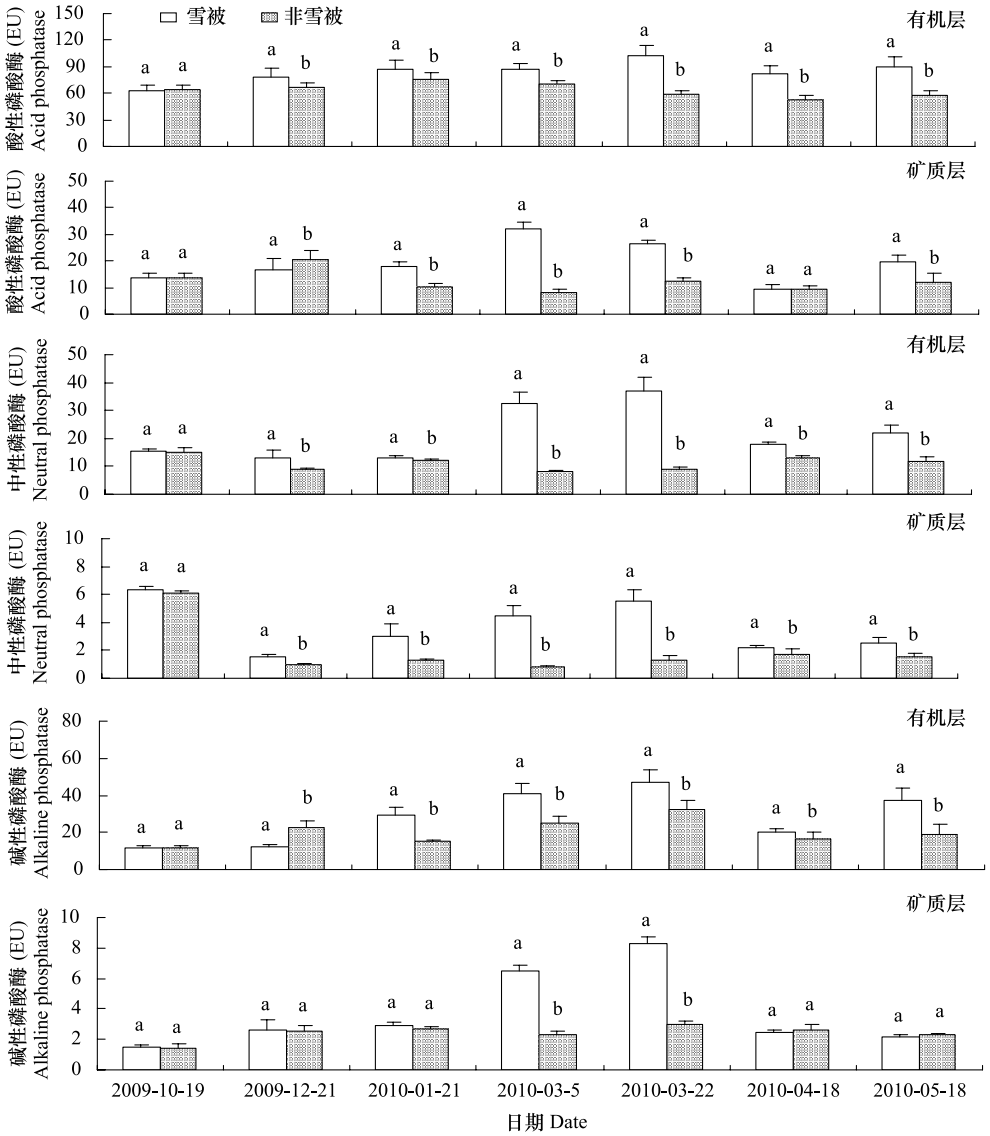


**图 4 雪被去除和雪被覆盖条件下川西高山冷杉林土壤磷酸酶活性的动态**

**Fig. 4 Dynamics of phosphatese activity in alpine *Abies faxoniana* forest in western Sichuan without snow pack and with snow pack**

## 3 讨论

冬季土壤酶活性动态对于认识冬季土壤生态过程有重要意义,冬季雪被减少或去除可增加土壤冻结程度[2,7],频繁的冻融交替也会改变土壤物理和化学性质[8],影响土壤能量流动和物质循环的方向[18]。本研究结果表明,不同土壤酶在雪被不同时期对雪被去除的响应存在明显差异,雪被去除抑制了整个雪被阶段土壤脲酶和中性磷酸酶的活性,而土壤转化酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性仅在雪被覆盖期显著降低。这一方

面说明了川西高山森林冬季积雪能为维持冬季土壤生物化学过程提供有利条件,同时也表明,未来气候变暖背景下,冬季雪被减少导致的土壤酶活性降低也会削弱土壤生物化学反应强度及养分循环速度。

**表 4　土壤酶活性与土壤温度和冻融循环次数的相关系数**

**Table 4　Correlation coefficients between soil enzyme activities and soil temperature and freeze-thaw cycle**

| 环境因子 Environmental factor | 转化酶 Invertase | 脲酶 Urease | 酸性磷酸酶 Acid phosphatase | 中性磷酸酶 Neutral phosphatase | 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatases |
|---|---|---|---|---|---|
| 土壤温度 Soil temperature | 0.454 ** | -0.454 ** | -2.96 ** | -0.32ns | -0.127 ns |
| 冻融循环次数 Freeze-thaw cycle | -0.444 ** | -1.97 * | 0.027 ns | -1.99 * | 0.46 ns |

ns: $P>0.05$; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$

土壤酶活性是土壤生物和非生物环境变化的“感应器”[19]。气候变暖导致的高纬度和高海拔地区冬季雪被减少使土壤环境更为严峻[15,18],川西高山原始冷杉林雪被去除导致土壤酶活性显著降低,原因可能如下:一方面,雪被去除增加的土壤冻结可致死大量植物根系、土壤微生物和土壤动物,减少了土壤酶的来源[20-21]。大量研究发现,较浅雪被或雪被去除下,土壤微生物生物量较小且土壤微生物群落结构改变[7,22-24],这也可能降低土壤酶的产生及其活性。另一方面,雪被去除下频繁的冻融交替(表 2)促进了土壤的机械破碎,凋落物和根系残体的分解释放出的大量养分可通过产物反馈作用抑制土壤酶活性[9,25]。当然,死亡生物细胞破裂释放出的胞内酶也可在短期内提高土壤酶的活性[7],同时,雪被去除下,冬季休眠植物因土壤融化时间提前而提早复苏[15],土壤中有机质分解转化加快,底物含量和有效性的增加势必会增加土壤酶的活性。因此,土壤转化酶、酸性和碱性磷酸酶活性在雪被形成初期和雪被融化后期表现为:雪被去除大于雪被覆盖。

不同类型的土壤酶对土壤温度和冻融循环的敏感性存在差异[19,26],因此,土壤转化酶、脲酶和磷酸酶对雪被去除的响应也有所不同。土壤转化酶和脲酶分别是参与土壤有机碳循环和氮转化的关键酶[17]。本研究中,在雪被形成初期,雪被去除显著降低土壤有机层转化酶和脲酶活性,这与土壤有机层可溶性 C、N 含量显著下降有关[15],对于矿质土壤层,可溶性 C 含量升高,而可溶性 N 含量下降[15],所以雪被去除处理提高了矿质土壤层转化酶活性,而降低了脲酶活性。在雪被覆盖期,虽然雪被去除下频繁的冻融交替(表 2)显著提高了各层土壤可溶性 C、N 含量[15],但土壤转化酶和脲酶活性反而显著降低,这可能是因为底物反馈作用改变了生物化学反应的方向,抑制了土壤酶的产生,与前期研究结果中 $NH_4^+$ 含量呈显著降低的趋势相符[15]。雪被融化后期,雪被去除使冬季植物提前复苏,土壤中有机质分解加快,可溶性 C 含量显著增加,土壤各层转化酶活性也明显提高。磷酸酶是土壤磷循环和有机磷分解转化的驱动力[27],和土壤转化酶和脲酶相同,在雪被形成初期,有效磷含量在雪被去除下明显上升,但仅矿质土壤层酸性磷酸酶和土壤有机层碱性磷酸酶显著提高,这可能与 3 种磷酸酶底物来源和对土壤 pH 值的响应不同有关。在雪被覆盖期至雪被融化期,雪被去除使土壤有机层 3 种磷酸酶总体呈现下降趋势,这与土壤有效磷含量降低相符,同时,土壤表层微生物对恶劣环境的向下逃避作用,提高了雪被去除矿质土壤层有效磷的含量,但土壤中有效磷基质的增多通过底物反馈作用也会抑制土壤磷酸酶活性,所以,雪被去除也降低了矿质土壤层磷酸酶活性。

综上所述,川西高山冷杉林冬季雪被去除显著降低了土壤脲酶和中性磷酸酶活性,受土壤温度和冻融格局的影响土壤转化酶、酸性和碱性磷酸酶活性在不同的雪被时期也存在明显差异。这不仅说明了气候变暖引起冬季雪被的减少可能改变土壤酶活性,同时也会限制与 C、N 和 P 相关的土壤生物化学过程。尽管这些结果出现的机制还有待进一步研究,但本研究为深入认识气候变化情景下冬季土壤生态过程提供了一定的科学依据。

**References:**

[1] Prieto L H, Bertiller M B, Carrera A L, Olivera N L. Soil enzyme and microbial activities in a grazing ecosystem of Patagonian Monte, Argentina. Geoderma, 2011, 162(3/4): 281-287.

[2] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, Hardy J P, Fttzhugh R D, Tierney G L. Colder soils in a warmer world: a snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 135-150.

[3] Zhang Y S, Wang S S, Barr A G, Black T A. Impact of snow cover on soil temperature and its simulation in a boreal aspen forest. Cold Regions Science and Technology, 2008, 52(3): 355-370.
[4] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. The Fourth Assessment Report of Working Group [EB/OL]. (2007-05-14) [2008-01-12]. http://www.ipcc.ch/cited.
[5] Steinweg J M, Fisk M C, McAlexander B, Groffman P M, Hardy J P. Experimental snowpack reduction alters organic matter and net N mineralization potential of soil macroaggregates in a northern hardwood forest. Biology and Fertility of Soils, 2008, 45(1): 1-10.
[6] Luetschg M, Bartelt P, Lehning M, Stoeckli V, Haeberli W. Numerical simulation of the interaction processes between snow cover and alpine permafrost. // Phillips M, Springman S, Arenson L Eds. 8th International Conference on Permafrost. Proceedings. Swets & Zeitlinger, Lisse, Zürich, 2003, 697-702.
[7] Decker K L M, Wang D, Waite C, Scherbatskoy T. Snow removal and ambient air temperature effects on forest soil temperatures in northern Vermont. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(4): 1234-1242.
[8] Campbell J L, Ollinger S V, Flerchinger G N, Wicklein H, Hayhoe K, Bailey A S. Past and projected future changes in snowpack and soil frost at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, USA. Hydrological Process, 2010, 24(17): 2465-2480.
[9] Hardy J P, Groffman P M, Fitzhugh R D, Henry K S, Welman A T, Demers J D, Fahey T J, Driscoll C T, Tierney G L, Nolan S. Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 151-174.
[10] Tan B, Wu F Z, Yang W Q, Yu S, Yang Y L, Wang A. Soil hydrolase characteristics in late soil-thawing period in subalpine/alpine forests of west Sichuan. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1162-1168.
[11] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, Hardy J P, Fitzhugh R D, Tierney G L. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 191-213.
[12] Liu L, Wu F Z, Yang W Q, Wang A, Tan B, Yu S. Soil bacterial diversity in the subalpine/alpine forests of western Sichuan at the early stage of freeze-thaw season. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(20): 5687-5694.
[13] Wu F Z, Yang W Q, Zhang J, Deng R J. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season. Acta Oecologica, 2010, 36(1): 135-140.
[14] Tan B, Wu F Z, Yang W Q, Liu L, Yu S. Characteristics of soil animal community in the subalpine/alpine forests of western Sichuan during onset of freezing. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 93-99.
[15] Tan B, Wu F Z, Yang W Q, Yang Y L, Wang A, Kang L N. Effects of snow pack removal on the dynamics of winter time soil temperature, carbon, nitrogen, and phosphorus in alpine forests of west Sichuan. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2553-2559.
[16] Guan S Y. Soil Enzyme and Its Research Methods. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
[17] Lu R K. Soil and Agro-chemical Analytical Methods. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
[18] Campbell J L, Mitchell M J, Groffman P M, Christenson L M, Hardy J P. Winter in northeastern North America: a critical period for ecological processes. Frontiers in Ecology and the Environment, 2005, 3(6): 314-322.
[19] 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.
[20] Tierney G L, Fahey T J, Groffman P M, Hardy J P, Fitzhugh R D, Driscoll C T. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 175-190.
[21] Repo T, Roitto M, Sutinen S. Does the removal of snowpack and the consequent changes in soil frost affect the physiology of Norway spruce needles? Environmental and Experimental Botany, 2011, 72(3): 387-396.
[22] Buckeridge K M, Grogan P. Deepened snow alters soil microbial nutrient limitations in arctic birch hummock tundra. Applied Soil Ecology, 2008, 39(2): 210-222.
[23] Brooks P D, Williams M W, Schmidt S K. Microbial activity under alpine snowpacks, Niwot Ridge, Colorado. Biogeochemistry, 1996, 32(2): 93-113.
[24] Schmidt K S, Lipson A D. Microbial growth under the snow: implications for nutrient and allelochemical availability in temperate soils. Plant and Soil, 2004, 259(1/2): 1-7.
[25] Pilon C E, Côté B, Fyles J W. Effect of snow removal on leaf water potential, soil moisture, leaf and soil nutrient status and leaf peroxidase activity of sugar maple. Plant and Soil, 1994, 162(1): 81-88.
[26] Allison S D, Treseder K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. Global Change Biology, 2008, 14(12): 2898-2909.
[27] Peng Y L, Qian C, Cai X B, Zhang R Q, Xue H Y. Soil enzyme activities in different degraded alpine grassland of Tibet. Journal of Mountain Science, 2005, 25(3): 344-350.

**参考文献:**

[10] 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 余胜, 杨玉莲, 王奥. 冻融末期川西亚高山/高山森林土壤水解酶活性特征. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1162-1168.
[12] 刘利, 吴福忠, 杨万勤, 王奥, 谭波, 余胜. 季节性冻结初期川西亚高山/高山森林土壤细菌多样性. 生态学报, 2010, 30(20): 5687-5694.
[15] 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 杨玉莲, 王奥, 康丽娜. 雪被去除对川西高山森林冬季土壤温度及碳、氮、磷动态的影响. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2553-2559.
[16] 鲁如坤. 土壤农化分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999.
[17] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
[19] 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, 21(11): 2727-2733.
[27] 彭岳林, 钱成, 蔡晓布, 张永青, 薛会英. 西藏不同退化高寒草地土壤酶的活性. 山地学报, 2005, 25(3): 344-350.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 22 November, 2012 (Semimonthly)

## 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 *Stipa krylovii* population in Alpine Degraded Grassland ····· ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for *Phyllostachys praecox* over soil-surface mulching ····· LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in *Acacia confusa* and *Leucaena glauca* 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 Xinping (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 *Ageratina adenophora* 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 *Abies faxoniana* 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 *Fomes fomentarius* by SRAP marker among populations ····· CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by *Solidago canadensis* 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-fractioned 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 *Microcystis* 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 *Chlorella vulgaris* 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<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | **Edited** by | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>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<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085 | **Sponsored** by | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China |
| 出　版 | 科学出版社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:1R00717 | **Published** by | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing　100717, China |
| 印　刷 | 北京北林印刷厂 | **Printed** by | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China |
| 发　行 | 科学出版社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net | **Distributed** by | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>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<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044 | **Foreign** | China International Book Trading<br>Corporation<br>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

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