

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

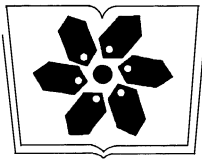
## Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 21 期 Vol.32 No.21 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 21 期

2012 年 11 月 (半月刊)

## 目次

白洋淀富营养化湖泊湿地厌氧氨氧化菌的分布及对氮循环的影响.....	王衫允,祝贵兵,曲冬梅,等 (6591)
造纸废水灌溉对滨海退化盐碱湿地土壤酶活性的响应.....	夏孟婧,苗颖,陆兆华,等 (6599)
图们江下游湿地生态系统健康评价.....	朱卫红,郭艳丽,孙鹏,等 (6609)
适应白洋淀湿地健康评价的 IBI 方法.....	陈展,林波,尚鹤,等 (6619)
基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应.....	梁婕,蔡青,郭生练,等 (6628)
崇明东滩湿地不同潮汐带入侵植物互花米草根际细菌的多样性.....	章振亚,丁陈利,肖明 (6636)
中国东部亚热带地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的谐波分析.....	赵兴云,李宝惠,王建,等 (6647)
甘肃臭草型退化草地优势种群空间格局及其关联性.....	高福元,赵成章 (6661)
川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应.....	谭波,吴福忠,杨万勤,等 (6670)
模拟分类经营对小兴安岭林区森林生物量的影响.....	邓华卫,布仁仓,刘晓梅,等 (6679)
苹果三维树冠的净光合速率分布模拟.....	高照全,赵晨霞,张显川,等 (6688)
拟茎点霉 B3 与有机肥配施对连作草莓生长的影响.....	郝玉敏,戴传超,戴志东,等 (6695)
落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系.....	苏冬雪,王文杰,邱岭,等 (6705)
人工固沙区与流沙区准噶尔无叶豆种群数量特征与空间格局对比研究.....	张永宽,陶冶,刘会良,等 (6715)
山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究——以重庆开县东河为例.....	王强,袁兴中,刘红 (6726)
荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系.....	吴忠鑫,张磊,张秀梅,等 (6737)
北黄海秋、冬季浮游动物多样性及年间变化.....	杨青,王真良,樊景凤,等 (6747)
鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建.....	蒙古军,朱利凯,杨倩,等 (6755)
村落文化林与非文化林多尺度物种多样性加性分配.....	高虹,陈圣宾,欧阳志云 (6767)
不同生计方式农户的环境感知——以甘南高原为例.....	赵雪雁 (6776)
两种预测模型在地下水动态中的比较与应用.....	张霞,李占斌,张振文,等 (6788)
四川黄龙沟少花鹤顶兰繁殖成功特征.....	黄宝强,寇勇,安德军 (6795)
硝化抑制剂对蔬菜土硝化和反硝化细菌的影响.....	杨扬,孟德龙,秦红灵,等 (6803)
新疆两典型微咸水湖水体免培养古菌多样性.....	邓丽娟,娄恺,曾军,等 (6811)
白洋淀异养鞭毛虫群落特征及其与环境因子的相关性.....	赵玉娟,李凤超,张强,等 (6819)
双酚 A 对萼花臂尾轮虫毒性及生活史的影响.....	陆正和,赵宝坤,杨家新 (6828)
孵化温度对双斑锦蛇初生幼体行为和呼吸代谢的影响.....	曹梦洁,祝思,蔡若茹,等 (6836)
黄玛草蛉捕食米蛾卵的功能反应与数值反应.....	李水泉,黄寿山,韩诗畴,等 (6842)
互惠-寄生耦合系统的稳定性.....	高磊,杨燕,贺军州,等 (6848)
超微七味白术散对肠道微生物及酶活性的影响.....	谭周进,吴海,刘富林,等 (6856)
<b>专论与综述</b>	
氮沉降对森林生态系统碳吸存的影响.....	陈浩,莫江明,张炜,等 (6864)
全球 $\text{CO}_2$ 水平升高对浮游植物生理和生态影响的研究进展.....	赵旭辉,孔繁翔,谢薇薇,等 (6880)
跨界自然保护区——实现生物多样性保护的新手段.....	石龙宇,李杜,陈蕾,等 (6892)
<b>研究简报</b>	
会同和朱亭 11 年生杉木林能量积累与分配.....	康文星,熊振湘,何介南,等 (6901)
退化草地阿尔泰针茅生殖株丛与非生殖株丛的空间格局.....	任珩,赵成章,高福元,等 (6909)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 326 \* zh \* P \* ¥70.00 \* 1510 \* 35 \* 2012-11



**封面图说:** 白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊湿地。淀区内沟壕纵横交织错落,村庄、苇地、园田星罗棋布,在水文、水化学、生物地球化学循环以及生物多样性等方面,具有非常复杂的异质性。随着上游城镇污废水、农田径流进入水域,淀区富营养化日益加剧。复杂的水环境特点、高度的景观异质性和良好的生物多样性,使得该地区成为探索规模性厌氧氨氧化反应的良好研究地点(详见本期第 6591—6598 页)。

**彩图提供:** 王为东博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: wdwangh@yahoo.com

DOI: 10.5846/stxb201109251406

谭波, 吴福忠, 杨万勤, 余胜, 刘利, 王奥, 杨玉莲. 川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应. 生态学报, 2012, 32(21): 6670-6678.

Tan B, Wu F Z, Yang W Q, Yu S, Liu L, Wang A, Yang Y L. Activities of soil oxidoreductase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6670-6678.

## 川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性 及其对季节性冻融的响应

谭 波<sup>1</sup>, 吴福忠<sup>1</sup>, 杨万勤<sup>1,\*</sup>, 余 胜<sup>2</sup>, 刘 利<sup>3</sup>, 王 奥<sup>1</sup>, 杨玉莲<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学生态林业研究所, 林业生态工程重点实验室, 成都 611130;

2. 重庆市开县林业局, 开县 405400; 3. 都江堰市环境保护监测站, 都江堰 611830)

**摘要:**川西亚高山/高山森林土壤通常具有明显的季节性冻融特征。为深入了解川西亚高山/高山森林冬季土壤生态过程, 于 2008 年 11 月—2009 年 10 月, 在土壤初冻期、冻结期和融化期及生长季节, 研究了不同海拔(3582 m、3292 m 和 3023 m)岷江冷杉林的土壤氧化还原酶活性及其对土壤冻融的响应。土壤冻结时间和冻融循环次数随海拔的增加而增加。冻融格局显著影响了土壤氧化还原酶活性, 但不同土壤酶在不同海拔表现出明显差异。土壤过氧化物酶和脱氢酶活性受初冻期冻融循环和温度降低影响显著下降, 而过氧化氢酶活性明显上升。3 种土壤氧化还原酶活性在土壤温度相对稳定的冻结期变化不显著, 但在融化期随着土壤温度急剧增加经历一个明显的活性高峰后快速降低, 且冻结时间最长和冻融循环次数最多的 3582 m 变化更为显著。此外, 海拔和土层的交互作用显著影响了过氧化物酶活性, 但对脱氢酶和过氧化氢酶活性不显著。脱氢酶活性与土壤温度极显著相关, 但过氧化物酶和过氧化氢酶活性与土壤温度的相关性随海拔差异而不同。这些结果表明川西亚高山/高山森林冬季土壤氧化还原酶仍然具有较高的活性, 但受到季节性冻融及其变化的显著影响。

**关键词:**冬季生态学; 季节性冻融; 土壤氧化还原酶; 亚高山/高山森林

## Activities of soil oxidoreductase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan

TAN Bo<sup>1</sup>, WU Fuzhong<sup>1</sup>, YANG Wanqin<sup>1,\*</sup>, YU Sheng<sup>2</sup>, LIU Li<sup>3</sup>, WANG Ao<sup>1</sup>, YANG Yulian<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecological Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

2 Kaixian Forestry Bureau, Kaixian 405400, Chongqing, China

3 Dujiangyan Environmental Monitoring Station, Dujiangyan 611830, Sichuan, China

**Abstract:** Soil enzyme, the sensitive bio-indicator to environmental change in soil ecosystem, plays an essential role in soil ecological processes, such as litter decomposition, organic matter accumulation and nutrient cycling. Including others, climate change with temperature dynamics always have a great effect on soil enzyme activity. Seasonal freeze-thaw cycle in the subalpine/alpine region is a common climate phenomenon, which could change soil enzyme activity, and then soil ecological processes. However, little information has been available. In order to understand soil oxidoreductases activities and their responses to seasonal freeze-thaw cycle in the subalpine/alpine forests of western Sichuan, three fir (*Abies faxoniana*) forests were selected covering a 600 m vertical transition zone. The primary fir forest at 3852 m of altitude, fir and birch mixed forest at 3298 m of altitude, and secondary fir forest at 3023 m of altitude are representative forests in the

**基金项目:**国家自然科学基金(30771702, 31000213); 国家“十二五”科技支撑计划(2011BAC09B05); 教育部博士点基金(20105103110002); 四川省科技支撑计划(2010NZ0051); 四川省杰出青年学术技术带头人培育计划(2011JQ0035)

收稿日期: 2011-09-25; 修订日期: 2012-02-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scyangwq@163.com



subalpine and alpine region of west Sichuan. Based on the simultaneous monitoring of soil temperature, soils were sampled in different stages as the onset of soil freezing period, soil frozen period, soil thawing period and growing period from November 2008 to October 2009. The activities of soil peroxidase, dehydrogenase, and catalase were measured. There were obvious seasonal freeze-thaw processes in sampled forests at different altitudes, and the length of seasonal freeze-thaw and the number of freeze-thaw cycle increased with the increase of altitude. Seasonal freeze-thaw cycle significantly affected the activities of soil oxidoreductases, but the responses of soil oxidoreductase activities were varied with soil enzyme types. The activities of soil peroxidase and dehydrogenase decreased in the onset of soil freezing period with the decrease of soil temperature, but soil catalase activity increased. Soil oxidoreductases activities displayed few changes in soil frozen period. However, soil oxidoreductases activities sharply increased with the increase of soil temperature in soil thawing period. The activities of all investigated soil oxidoreductases reached to an obvious peak in soil thawing period. The changes of soil oxidoreductases activity at 2583 m were more significant in comparison with those at 3298 m and 3023 m due to longer freezing length and more freeze-thaw cycles. Meanwhile, the interaction of altitude and soil layer had significant effects on soil peroxidase activities, but had insignificant effects on soil dehydrogenase and catalase activities. Additionally, soil dehydrogenase activities were significantly correlated with soil temperature, but the correlations between soil temperature and the activity of soil peroxidase and catalase differed with altitudes. The results suggest that soil oxidoreductases in wintertime still keep relative higher activities in the subalpine and alpine forest of western Sichuan, although the seasonal freeze-thaw cycle and its changes have significant effects on the activities of soil oxidoreductases.

**Key Words:** Wintertime ecology; seasonal freeze-thaw; soil oxidoreductase; subalpine/alpine forest

土壤氧化还原酶是生态系统中生物化学代谢的重要参与者,在凋落物分解、有机质积累、养分循环等过程中起着十分重要的作用<sup>[1-2]</sup>。温度是控制土壤酶活性的一个重要环境因子<sup>[3-4]</sup>,温度变化驱动下的土壤冻融是高寒生态系统普遍存在的自然现象<sup>[4]</sup>。早期研究认为,冬季严酷的温度条件能降低土壤酶活性甚至使酶钝化失活<sup>[1, 5-6]</sup>。但近期研究表明,雪被的保温作用能使土壤温度维持在 0 °C 附近<sup>[7-8]</sup>,冻融交替的破坏作用能增加土壤中嗜冷生物的底物有效性<sup>[9-10]</sup>,为冬季维持相对较高的土壤酶活性提供有利条件。受季节性雪被和冻融影响的高寒森林土壤在冬季(非生长季节)通常存在明显的冻融、冻结和融化过程<sup>[11-12]</sup>。海拔变化通常会导致冬季温度、降水(雪)及冻融特征(冻融时间、强度、频次)等环境因子连续变化<sup>[6-7, 10]</sup>,可能深刻作用于土壤氧化还原酶活性及其参与的氧化还原过程,并进一步影响冬季土壤养分循环<sup>[5-7]</sup>。然而,迄今为止的研究更加关注生长季节土壤氧化还原酶活性及其相关生态学过程<sup>[3, 13-14]</sup>。这不仅限制了对冬季土壤生态过程的深入认识,也不利于进一步探讨高寒森林非生长季节与生长季节的生态联系。

川西亚高山/高山森林是我国第二大林区(西南林区)的主体,在调节区域气候、涵养水源和保育生物多样性等方面具有十分重要的作用<sup>[15]</sup>。相对于同纬度低海拔森林,川西亚高山/高山森林土壤冬季存在明显的冻融、冻结和融化过程<sup>[16]</sup>,且由于气温降低常常是沿海拔自上而下的,因而季节性冻融特征也随海拔垂直分异连续变化<sup>[17]</sup>。这为研究中低纬度高海拔森林冬季土壤生态过程及其对环境变化的响应提供了理想的天然实验室<sup>[15]</sup>。前期研究表明,冬季冻融循环和冻结显著影响了该地区森林凋落物分解、土壤生物群落结构和多样性及养分特征<sup>[16-18]</sup>,但有关冬季土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应特征仍不清晰。因此,以川西亚高山/高山地区广泛分布的岷江冷杉林(*Abies faxoniana*)为研究对象,研究了海拔梯度上冬季不同冻融时期及生长季节土壤氧化还原酶活性,以期为深入认识中低纬度高海拔森林冬季土壤生态过程,探讨冬季与生长季节土壤生态学过程的相互联系提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于四川省理县毕棚沟(102°53′—102°57′ E, 31°14′—31°19′ N, 海拔 2458—4619 m),地处青

藏高原东缘与四川盆地的过渡带。年平均气温 2—4 ℃,最高气温(7 月) 23 ℃,最低气温(1 月) -18 ℃,年均降雨量约 850 mm。土壤季节性冻结期为每年 11 月上旬至翌年 4 月中旬<sup>[16-17]</sup>。研究区域的主要森林植被随海拔分异为落叶阔叶林、针阔混交林、针叶林,高山灌丛和草甸<sup>[15, 17]</sup>。其中,岷江冷杉、川西云杉(*Picea likiangensis* var *balfouriana*) 和红桦(*Betula albo-sinensis*) 是研究区域最典型的森林植被<sup>[20]</sup> 和构成乔木层的主要树种。林下灌木主要有箭竹(*Fargesia spathacea*)、高山杜鹃(*Rhododendron delavayi*)、三颗针(*Berberis julianae*)、红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*) 和扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii*) 等;草本主要有蟹甲草(*Cacalia auriculata*)、高山冷蕨(*Cystopteris montana*)、苔草属(*Carex* spp.) 和莎草属(*Cyperus* spp.) 等<sup>[17-18]</sup>。

## 1.2 样地设置

研究区域内沿海拔跨度约 300 m 选取三个海拔森林群落作为研究样地。海拔 3582 m 的乔木层以岷江冷杉为主,树龄约 120a,林下植物主要为高山杜鹃、三颗针、冷蕨等;海拔 3298 m 的乔木层,以岷江冷杉和红桦为主,树龄约 80a,林下植物主要为箭竹、红毛花楸、高山柳等;海拔 3023 m 的乔木层以岷江冷杉次生林为主,树龄约 70a,林下植物主要为箭竹、三颗针、扁刺蔷薇等<sup>[17]</sup>。森林群落土壤为雏形土(Cambisols)<sup>[17]</sup>,基本理化性质见表 1。

表 1 不同海拔森林群落的土壤理化性质

Table 1 Soil properties in the sampled forests at different altitudes

海拔/m Altitude	土层 Layer	土壤厚度 Thickness /cm	pH	有机碳 Organic carbon /(g/kg)	全氮 Nitrogen /(g/kg)	全磷 Phosphorus /(g/kg)	坡向/(°) Aspect	坡度/(°) Slope
3582	I	15±2	6.2±0.3	161.4±20.3	9.5±1.9	1.2±0.2	NE45°	34°
	II	23±3	5.8±0.2	41.9±15.8	2.8±0.2	0.7±0.2		
3298	I	12±2	6.6±0.2	174.0±55.8	9.5±2.1	1.5±0.1	NE42°	31°
	II	24±4	5.9±0.2	53.7±17.2	3.2±0.2	1.2±0.3		
3023	I	12±2	6.5±0.3	161.9±31.1	8.1±1.6	0.9±0.1	NE38°	24°
	II	21±3	5.9±0.3	43.8±10.8	2.0±0.5	0.8±0.1		

I:土壤有机层; II:矿质土壤层

## 1.3 样品采集及测定

2008 年 11 月 1 日,在研究样地内土壤 5 cm 处埋设纽扣式温度传感器(DS1923-F5#, Maxim/Dallas semiconductor Inc., USA)连续监测土壤温度,1 h 记录 1 次数据。温度监测期间,土壤温度连续 3 d 出现低于 0 ℃ 的时期定义为土壤冻结开始,随后土壤温度连续 3 d 出现高于 0 ℃ 的时期定义为土壤融化开始<sup>[19]</sup>,并且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一次冻融循环<sup>[20]</sup>。

于 2008—2009 年季节性冻融期间及 2009 年生长季节进行土壤样品采集。基于前期监测结果<sup>[16]</sup>,研究区域内土壤冬季具有显著的冻融、冻结和融化过程,且土壤冻结通常从 11 月开始(初冻期,土壤温度开始低于 0 ℃ 到持续低于 0 ℃),到 12 月完全冻结(冻结期,土壤温度持续低于 0 ℃),到翌年 3 月下旬或 4 月初开始融化(融化期,土壤温度开始高于 0 ℃ 到持续高于 0 ℃)。因此,具体的采样时间包括:土壤初冻期(11 月 5 日、11 月 15 日和 11 月 25 日)、土壤冻结期(12 月 15 日、1 月 15 日和 2 月 15 日)、土壤融化期(3 月 5 日、3 月 25 日、4 月 5 日和 4 月 25 日)和生长季节(5 月 25 日、8 月 5 日和 10 月 25 日)。在样地内随机选取 5 个 5 m×5 m 的均质样方采样。由于地处高山峡谷区的川西亚高山/高山森林土壤发育经常受阻,且普遍存在较厚的土壤有机层和浅薄的矿质土壤层<sup>[15]</sup>。因此,本研究按照土壤有机层(0—15 cm, I)和矿质土壤层(15—30 cm, II)采集样品。将样品装入冰盒低温处理,24 h 内运回实验室,然后将每个样品分成 3 份:一份样品去掉石块、动植物残体和根系后,混匀,过 2 mm 筛,装入保鲜袋,贮于 4 ℃ 冰箱供土壤酶活性测定;一份样品风干,研磨,分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛,装入保鲜袋,室温保存供土壤全量养分测定;其余样品则立即测定土壤含

水量。

土壤酶活性测定参照文献<sup>[21]</sup>的方法。过氧化物酶(POD)采用比色法测定,一个酶活性单位( $\text{EU}_{\text{POD}}$ )以 1 g 土壤样品在 30℃ 条件下,2 h 后产生的没食子素的毫克数表示;脱氢酶(DHA)采用比色法测定,一个酶活性单位( $\text{EU}_{\text{DHA}}$ )以 1 g 土壤样品在 30℃ 条件下,24 h 内产生的  $\text{H}^+$  微升数表示;过氧化氢酶(CAT)采用  $\text{KMnO}_4$  滴定法测定,一个酶活性单位( $\text{EU}_{\text{CAT}}$ )以 1 g 土壤样品在 30℃ 条件下,20 min 内消耗 0.02 mol/L 的  $\text{KMnO}_4$  的毫升数表示。土壤含水量采用烘干法测定,pH 值采用电位法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,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<sup>[22]</sup>。

#### 1.4 统计分析

采用三因素方差分析(three-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验海拔、土层、冻融时期及各因子交互作用对土壤过氧化物酶、脱氢酶和过氧化氢酶活性的影响。独立样本检验(Independent t-tests)不同海拔 5 cm 土壤温度差异。采用 Pearson 相关系数评价 5 cm 土壤温度与土壤氧化还原酶活性的相关关系(土壤温度用样品采集前 5d 和后 5d 的平均值)。所有统计分析采用 SPSS13.0 完成,显著性水平设定为  $P=0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 土壤季节性冻融特征

如图 1 所示,3582 m、3298 m 和 3023 m 土壤的季节性冻结持续时间分别为 157,127 d 和 120 d。土壤开始冻结的时间随海拔的增加而提前,而土壤开始融化的时间以 3298 m 最早,3582 m 最晚。土壤初冻期冻融循环次数以 3298 m 最高,3582 m 最低,但融化期随海拔的增加而增加,冻结期没有发现明显的冻融循环(表 2)。

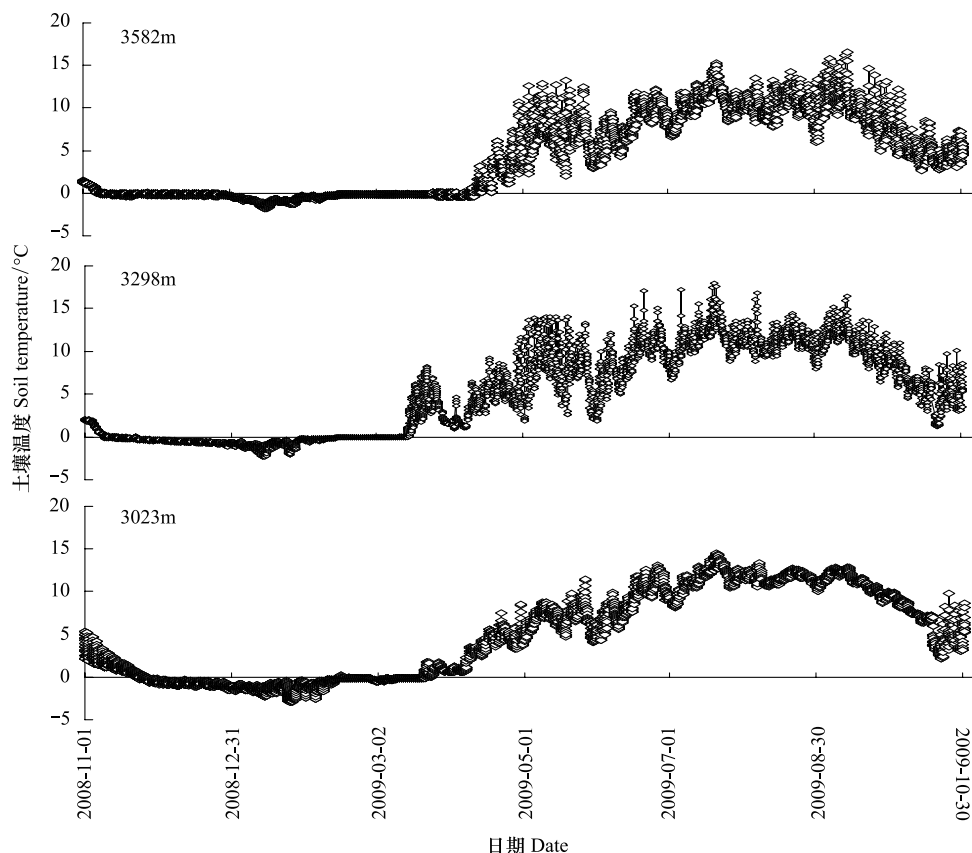


图 1 不同海拔森林土壤 5cm 温度动态

Fig. 1 Dynamics of soil temperature (at the soil depth of 5cm) in the forests at different altitudes from November 1, 2008 to October 31, 2009

表 2 不同海拔森林土壤冻融循环和温度特征

Table 2 Characteristics of freeze-thaw cycle in the forests at different altitudes during seasonal freeze-thaw period

海拔/m Altitude	冻融循环/n Number of freeze-thaw cycles			土壤平均温度/℃ Soil average temperature		
	土壤初冻期 Onset of soil freezing period	土壤冻结期 Soil frozen period	土壤融化期 Soil thawing period	土壤初冻期 Onset of soil freezing period	土壤冻结期 Soil frozen period	土壤融化期 Soil thawing period
3582	4	0	16	0.105	-0.422	0.442
3298	10	0	8	0.211	-0.562	2.601
3023	5	0	6	1.150	-0.900	1.193

2.2 土壤过氧化物酶活性

3 个海拔土壤有机层和矿质土壤层的过氧化物酶活性均表现出随初冻期土壤温度降低而显著降低,在冻结期变化不明显,在土壤融化期迅速增加的趋势(图 2)。3582 m 过氧化物酶活性在融化初期(3 月 5 日)达冬季最高值后显著降低,而 3298 m 和 3023 m 土壤有机层过氧化物酶活性随土壤融化过程持续增加,在融化末期(4 月 25 日)达冬季最高值,且矿质土壤层的过氧化物酶活性随土壤融化过程表现出先降低后增加的趋势。两个土层过氧化物酶活性均以 10 月最低。相对于 3298 m 和 3023 m,冻结持续时间和冻融循环次数更高的 3582 m 的土壤过氧化物酶活性变化更加明显。

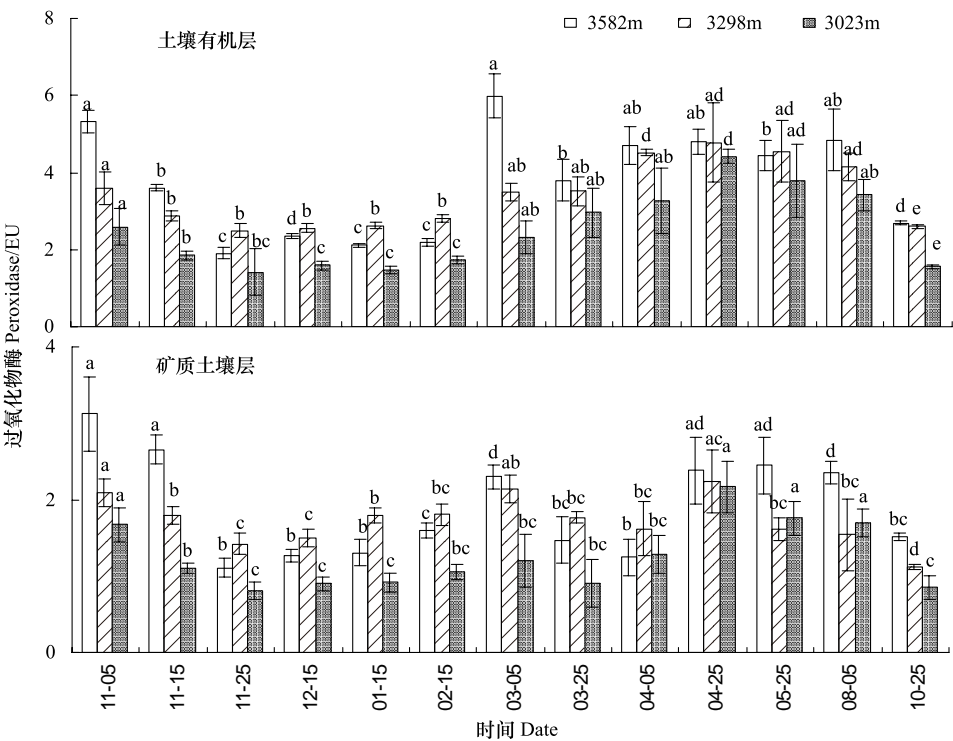


图 2 不同海拔森林土壤过氧化物酶活性动态变化

Fig. 2 Dynamics of peroxidase activity in the forests at different altitudes from November 5, 2008 to October 25, 2009

不同小写字母表示差异达 0.05 水平

2.3 脱氢酶活性

土壤有机层和矿质土壤层的脱氢酶活性受初冻期冻融循环影响显著降低,且在初冻期末(11 月 25 日)降至冬季的最低值(图 3)。两个土层的脱氢酶活性在冻结期变化不明显,但冻融和冻结持续时间更长的 3582 m 的脱氢酶维持着较高活性水平。3 个海拔土壤有机层和矿质土壤层的脱氢酶活性随融化期土壤温度增加显著增加,且在 3 月 5 日 3582 m、4 月 5 日 3298 m 和 4 月 25 日 3023 m 出现一个明显的活性高峰。同时,

3582 m 和 3023 m 土壤有机层和矿质土壤层脱氢酶活性均以 8 月最高,但 3298 m 以 5 月最高。

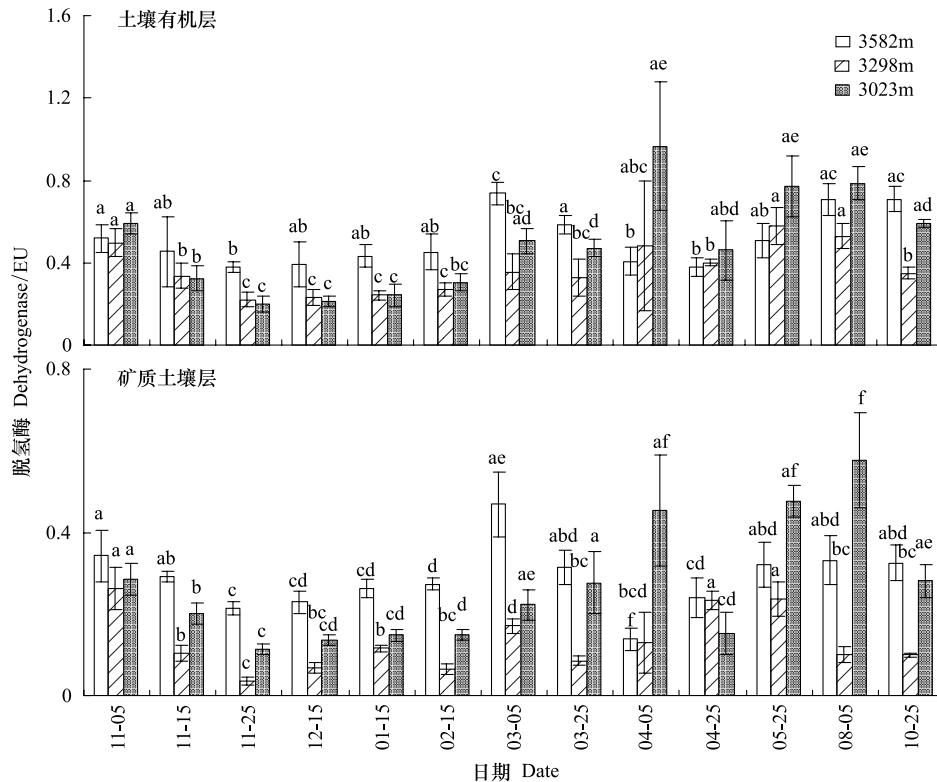


图 3 不同海拔森林土壤脱氢酶活性动态变化

Fig. 3 Dynamics of dehydrogenase activity in the forests at different altitudes from November 5, 2008 to October 25, 2009

不同小写字母表示差异达 0.05 水平

## 2.4 过氧化氢酶活性

土壤有机层和矿质土壤层的过氧化氢酶活性随初冻期土壤温度降低逐渐增加(图 4),但在土壤冻结期的活性变化不明显。在土壤融化期,各土层的过氧化氢酶活性在融化初期(3 月 5 日)经历了一个急剧增加然后快速降低的过程。3298 m 和 3023 m 土壤有机层和矿质土壤层过氧化氢酶活性均以 5 月最高,但 3582 m 以 8 月最高。相对于 3298 m 和 3023 m,冻融作用时间更长的 3582 m 土壤过氧化氢酶活性变化更加明显。

## 2.5 土壤氧化还原酶与环境因素关系

海拔和土层变化均显著影响了土壤氧化还原酶活性(表 3)。海拔和土层的交互作用显著影响了过氧化物酶活性,但对脱氢酶和过氧化氢酶活性不显著。然而,海拔、土层和冻融时期的交互作用显著影响了过氧化氢酶活性,但并不显著影响过氧化物酶和脱氢酶活性。同时,土壤温度与脱氢酶活性密切相关,但与过氧化物酶和过氧化氢酶活性的相关性因海拔变化而不同(表 4)。

表 3 海拔、土层和冻融时期对土壤酶活性影响的三因素方差分析

Table 3 Three-way ANOVA for soil enzyme activities to altitude, soil layer, and freeze-thaw stage

因子 Factor	过氧化物酶 Peroxidase	脱氢酶 Dehydrogenase	过氧化氢酶 Catalase
A	<0.001	<0.001	<0.001
L	<0.001	<0.001	<0.001
FS	<0.001	<0.001	<0.001
A×L	0.002	0.785	0.363
A×FS	0.001	<0.001	<0.001
L×FS	<0.001	<0.001	<0.001
A×L×FS	0.136	0.401	<0.001

A:海拔 Altitude; L:土层 Soil layer; FS:冻融时期 Freeze-thaw stage



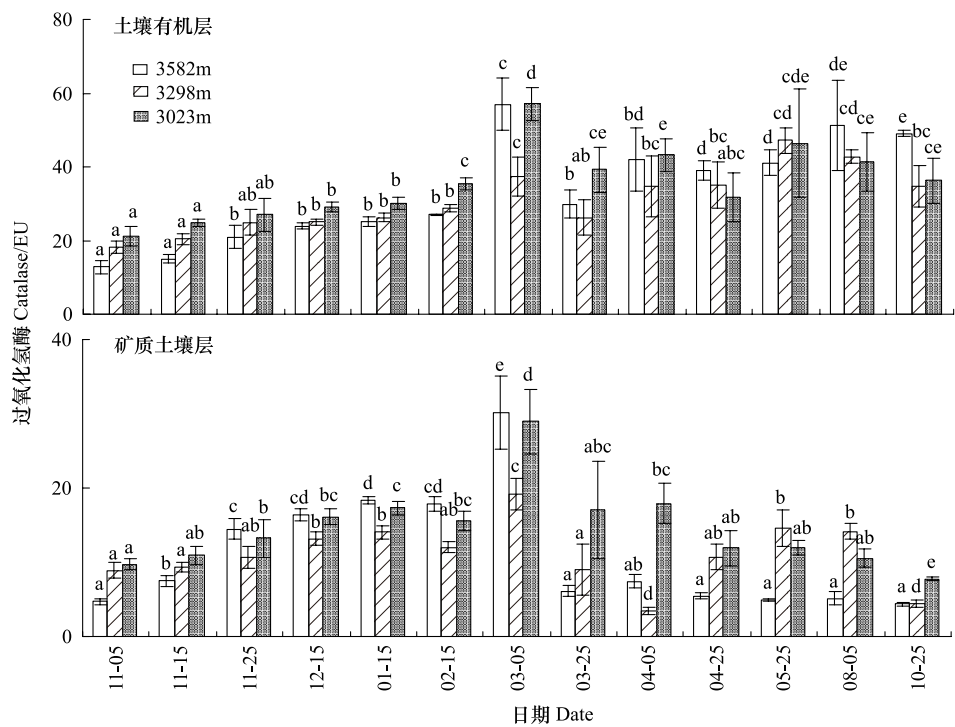


图4 不同海拔森林土壤过氧化氢酶活性动态变化

Fig. 4 Dynamics of catalase activity in the forests at different altitudes from November 5, 2008 to October 25, 2009  
不同小写字母表示差异达 0.05 水平

表4 土壤酶活性与土壤温度的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil enzyme activities and soil temperature				
海拔/m Altitude	环境因子 Environmental factor	过氧化物酶 Peroxidase	脱氢酶 Dehydrogenase	过氧化氢酶 Catalase
3582	土壤温度 Soil temperature	0.206 *	0.346 **	0.121 ns
3298	土壤温度 Soil temperature	0.455 **	0.309 **	0.348 **
3023	土壤温度 Soil temperature	0.167 ns	0.553 **	0.025 ns

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

3 讨论

冬季低温环境维持的土壤氧化还原酶活性可能对土壤生态过程具有重要作用<sup>[8, 23]</sup>。本研究中,土壤氧化还原酶即使在严酷的冬季仍维持着活性,其动态随冻融过程不断变化,在土壤融化期出现一个明显的活性高峰。同时,土壤氧化还原酶活性动态随各海拔土壤冻融特征和土壤温度及酶类型的不同表现出差异明显。表明低温环境维持的土壤氧化还原酶活性对冬季土壤生态系统过程具有重要意义。

由于温度、降水和植被等环境因子的差异,不同海拔往往表现出不同的土壤冻融特征<sup>[23-26]</sup>。本研究中,土壤的冻融周期和冻融循环等在不同海拔具有明显差异。由于气温降低常常沿海拔是自上而下的<sup>[19]</sup>,所以 3582 m 的冻融周期和冻融循环次数更高(图 1 和表 2),这与以往的研究结果一致<sup>[10, 20, 25]</sup>。而各海拔不同的冻融循环可通过改变酶的底物有效性和土壤生物群落结构对土壤氧化还原酶活性产生影响<sup>[9-10]</sup>。同时,相对于低海拔,高海拔冬季的降雪量和积雪厚度较高,雪被的保温作用会随着雪被厚度增加而增强<sup>[19]</sup>。本研究中,冻结期土壤平均温度在 3582 m 显著高于 3298 m 和 3023 m(表 2),与 Brooks 等和 Tierney 等研究结果相似<sup>[23, 26]</sup>。而雪被维持的土壤微环境可能通过对土壤温度的影响改变土壤氧化还原酶活性。因此,川西亚高山/高山森林不同海拔的冻融特征可能深刻作用于土壤氧化还原酶活性,进而影响系统的物质循环和能量流动。

土壤过氧化物酶和脱氢酶能催化有机物质的合成与转化,其活性能表征土壤生物化学代谢强度<sup>[21]</sup>。高海拔地区冬季严酷环境下的土壤生化过程可能与土壤酶活性更为密切<sup>[8, 23-25]</sup>。本研究中,过氧化物酶和脱氢酶活性也随土壤冻融过程变化而变化。其可能的机制包括:1) 较高的土壤温度(图 1)和新鲜凋落物输入<sup>[15]</sup>使土壤酶在初冻期(11 月 5 日)维持高的活性,而生长季节末期(10 月 25 日)和初冻期土壤酶活性的差异可能与植物根系生长促进酶合成有关<sup>[26]</sup>。但土壤温度急剧下降和冻融交替抑制了酶合成及土壤生物活性<sup>[1, 6-8, 27]</sup>,降低了初冻期土壤酶活性。2) 雪被的保温为土壤微生物提供了较为稳定的微环境<sup>[19, 23]</sup>,因而土壤冻结后土壤酶活性缓慢增加。脱氢酶在 3582 m 的高活性可能与土壤温度有关(表 2 和表 4)。3) 凋落物解冻和土壤生物死亡释放的胞内酶能短期促发酶活性提高,同时释放的可溶性养分等能促进微生物群落生长合成土壤酶<sup>[4, 8, 10, 27]</sup>。因而土壤酶在土壤融化期都出现了一个明显的活性高峰。3582 m 土壤酶活性在融化初期达最高可能与高山森林冬季雪被厚度在这期间<sup>[19]</sup>(3 月初)达最大有关。4) 土壤融化淋洗流失和植物萌动利用及死亡生物残体快速降解限制了酶活性的持续增加<sup>[4, 9, 19]</sup>。因此,土壤酶活性随后迅速降低,这与熊浩仲等<sup>[14]</sup>的研究结果基本一致。这表明过氧化物酶和脱氢酶活性维持着冬季土壤有机物质的合成与转化,其变化将影响土壤有机物质循环。同时,本研究中,季节变化明显影响了过氧化物酶和脱氢酶活性动态(表 3),这是土壤生物和环境因子季节变化综合调控的结果<sup>[3, 5, 8]</sup>。并且过氧化物酶和脱氢酶活性变化在 3582 m 更为明显,但对土壤温度及海拔和土层交互作用的敏感性具有一定差异(表 3 和表 4)。这是由于 3582 m 冻融周期更长和冻融循环更频繁(图 1 和表 2),而不同土壤氧化还原酶来源不同,且对冻融特征和土壤温度变化反应不同的原因<sup>[1, 3, 18]</sup>。这表明川西亚高山/高山森林的土壤氧化还原酶活性对季节性冻融及其变化敏感响应。

过氧化氢酶能降解土壤中过量的过氧化氢,防止过氧化氢毒害作用<sup>[21]</sup>。本研究中,过氧化氢酶活性随土壤冻融格局变化显著增加,且在土壤融化初期(3 月 5 日)经历了一个急剧增加然后降低的变化。初冻期冻融循环破坏的凋落物和土壤团聚体及土壤生物细胞能释放过量的过氧化氢<sup>[7-9]</sup>,提高了过氧化氢酶活性。土壤冻结后形成局部厌氧环境,且存在死亡的生物残体<sup>[5, 8]</sup>,导致土壤中累积过氧化氢。因而雪被形成后相对稳定的微环境<sup>[18]</sup>维持的过氧化氢酶活性有利于降解过量的过氧化氢。与冻结期过氧化物酶和脱氢酶活性动态明显的差异可能与过氧化氢酶的低温适应及底物有效性相关<sup>[1, 3, 8]</sup>。随着土壤融化和温度增加,凋落物和生物残体细胞中的过氧化氢快速释放,同时释放大量的有效基质,促进土壤生物的快速生长和繁殖<sup>[4, 18, 20]</sup>,进而触发了过氧化氢酶活性的急剧增加。然而,这种短期的触发效应随着反应底物和有效基质的耗散而迅速降低<sup>[18, 26]</sup>。当然,这些过程是同时发生,且相互反馈和相互刺激的<sup>[3]</sup>。这表明冬季维持的过氧化氢酶活性能为土壤有机物质的合成与转化提供有利条件,其变化将对土壤有机物质循环过程产生重要影响。同样地,土壤过氧化氢酶活性也受到海拔梯度上环境因子季节变化的综合影响。过氧化氢酶活性动态在季节性冻融特征更明显的 3582 m 海拔变化更大,且对海拔,土层和冻融时期的交互作用表现出敏感响应特征(表 3),但对土壤温度的敏感性随海拔不同存在差异(表 4)。这进一步表明川西亚高山/高山森林的土壤氧化还原酶活性对季节性冻融及其变化敏感响应。

## References:

- [1] Burns R G, Dick R P. *Enzymes in the Environment: Ecology, Activity and Applications*. New York: Marcel Dekker, 2002: 1-342.
- [2] Yang W Q, Wang K Y. *Advances in forest soil enzymology*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(2): 152-159.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Clein J S, Schimel J P. Microbial activity of tundra and taiga soils at sub-zero temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(9): 1231-1234.
- [6] Mikan C J, Schimel J P, Doyle A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11): 1785-1795.

- [7] 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.
- [8] Koponen H T, Jaakkola T, Keinänen-Toivola M M, Kaipainen S, Tuomainen J, Servomaa K, Martikainen P J. Microbial communities, biomass, and activities in soils as affected by freeze thaw cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(7):1861-1871.
- [9] Hentschel K, Borken W, Matzner E. Repeated freeze-thaw events affect leaching losses of nitrogen and dissolved organic matter in a forest soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(5):699-706.
- [10] Freppaz M, Williams B L, Edwards A C, Scalenghe R, Zanini E. Simulating soil freeze / thaw cycles typical of winter alpine conditions: implications for N and P availability. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(1):247-255.
- [11] Olsson P Q, Sturm M, Racine C H, Romanovsky V, Liston G E. Five stages of the Alaskan Arctic cold season with ecosystem implications. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2003, 35(1):74-81.
- [12] Zhou X Q, Wu F Z, Yang W Q, Zhu J X. Dynamics of microbial biomass during litter decomposition in the alpine forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14):4144-4152.
- [13] 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 of Applied and Environmental Biology*, 2004, 10(4):416-420.
- [14] Feng R F, Yang W Q, Zhang J, Deng R J, Jian Y, Lin J. Effects of simulated elevated atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10):4019-4026.
- [15] Liu Q. *Ecological Research on Subalpine Coniferous Forests in China*. Chengdu: Sichuan University Press, 2002:1-50.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Tan B, Wu F Z, Yang W Q, Yu S, Liu L, Wang A. The dynamics pattern of soil carbon and nutrients as soil thawing proceeded in the alpine/subalpine forest. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant and Soil Science*, 2011, 61(7):670-679.
- [19] Jones H G. *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems*. Cambridge University Press, 2001:1-302.
- [20] Konestabo H S, Michelsen A, Holmström M. Responses of springtail and mite populations to prolonged periods of soil freeze-thaw cycles in a sub-arctic ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36(2/3):136-146.
- [21] Guan S Y. *Soil Enzyme and Its Research Methods*. Beijing: Agriculture Press, 1986:260-339.
- [22] Lu R K. *Soil and Agro-Chemical Analytical Methods*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999:296-338.
- [23] Brooks P D, Williams M W, Schmidt S K. Inorganic nitrogen and microbial biomass dynamics before and during spring snowmelt. *Biogeochemistry*, 1998, 43(1):1-15.
- [24] Coxson D S, Parkinson D. Winter respiratory activity in aspen woodland forest floor litter and soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(1):49-59.
- [25] Lipson D A, Schadt C W, Schmidt S K. Changes in soil microbial community structure and function in an alpine dry meadow following spring snow melt. *Microbial Ecology*, 2002, 43(3):307-314.
- [26] 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.
- [27] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(3):187-195.

#### 参考文献:

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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] 周晓庆, 吴福忠, 杨万勤, 朱剑霄. 高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态. *生态学报*, 2011, 31(14):4144-4152.
- [13] 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.
- [14] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健, 邓仁菊, 简毅, 林静. 模拟大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对亚高山冷杉 (*Abies faxoniana*) 林土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2007, 27(10):4019-4026.
- [15] 刘庆. *亚高山针叶林生态学研究*. 成都: 四川大学出版社, 2002:1-50.
- [21] 关松荫. *土壤酶及其研究方法*. 北京: 农业出版社, 1986:260-339.
- [22] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999:296-338.

CONTENTS

Widespread of anaerobic ammonia oxidation bacteria in an eutrophic freshwater lake wetland and its impact on nitrogen cycle .....	WANG Shanyun, ZHU Guibing, QU Dongmei, et al (6591)
Responses of soil enzyme activities of degraded coastal saline wetlands to irrigation with treated paper mill effluent .....	XIA Mengjing, MIAO Ying, LU Zhaozhua, et al (6599)
Wetland ecosystem health assessment of the Tumen River downstream .....	ZHU Weihong, GUO Yanli, SUN Peng, et al (6609)
An index of biological integrity: developing the methodology for assessing the health of the Baiyangdian wetland .....	CHEN Zhan, LIN Bo, SHANG He, et al (6619)
MODIS-based analysis of wetland area responses to hydrological processes in the Dongting Lake .....	LIANG Jie, CAI Qing, GUO Shenglian, et al (6628)
The diversity of invasive plant <i>Spartina Alterniflora</i> rhizosphere bacteria in a tidal salt marshes at Chongming Dongtan in the Yangtze River estuary .....	ZHANG Zhengya, DING Chengli, XIAO Ming (6636)
Analyzing the azimuth distribution of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ in subtropical regions of eastern China using the harmonic analysis .....	ZHAO Xingyun, LI Baohui, WANG Jian, et al (6647)
In the process of grassland degradation the spatial pattern and spatial association of dominant species .....	GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (6661)
Activities of soil oxidoreductase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan .....	TAN Bo, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (6670)
Simulating the effects of forestry classified management on forest biomass in Xiao Xing'an Mountains .....	DENG Huawei, BU Rencang, LIU Xiaomei, et al (6679)
The simulation of three-dimensional canopy net photosynthetic rate of apple tree .....	GAO Zhaoquan, ZHAO Chenxia, ZHANG Xianchuan, et al (6688)
The effect of <i>Phomopsis</i> B3 and organic fertilizer used together during continuous cropping of strawberry ( <i>Fragaria ananassa</i> Duch) ...	HAO Yumin, DAI Chuanchao, DAI Zhidong, et al (6695)
Temporal and spatial variations of DOC, DON and their function group characteristics in larch plantations and possible relations with other physical-chemical properties .....	SU Dongxue, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (6705)
Comparisons of quantitative characteristics and spatial distribution patterns of <i>Eremosparton songoricum</i> populations in an artificial sand fixed area and a natural bare sand area in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China .....	ZHANG Yongkuan, TAO Ye, LIU Huiliang, et al (6715)
Comparison study on macroinvertebrate assemblage of riffles and pools: a case study of Dong River in Kaixian County of Chongqing, China .....	WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong (6726)
Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng .....	WU Zhongxin, ZHANG Lei, ZHANG Xiumei, et al (6737)
Zooplankton diversity and its variation in the Northern Yellow Sea in the autumn and winter of 1959, 1982 and 2009 .....	YANG Qing, WANG Zhenliang, FAN Jingfeng, et al (6747)
Building ecological security pattern based on land use: a case study of Ordos, Northern China .....	MENG Jijun, ZHU Likai, YANG Qianet al (6755)
Additive partition of species diversity across multiple spatial scales in community culturally protected forests and non-culturally protected forests .....	GAO Hong, CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun (6767)
Environmental perception of farmers of different livelihood strategies; a case of Gannan Plateau .....	ZHAO Xueyan (6776)
Application and comparison of two prediction models for groundwater dynamics .....	ZHANG Xia, LI Zhanbin, ZHANG Zhenwen, et al (6788)
Pollination success of <i>Phaius delavayi</i> in Huanglong Valley, Sichuan .....	HUANG Baoqiang, KOU Yong, AN Dejun (6795)
Mechanism of nitrification inhibitor on nitrogen-transformation bacteria in vegetable soil .....	YANG Yang, MENG Denglong, QIN Hongling, et al (6803)
Archaea diversity in water of two typical brackish lakes in Xinjiang .....	DENG Lijuan, LOU Kai, ZENG Jun, et al (6811)
Abundance and biomass of heterotrophic flagellates in Baiyangdian Lake, as well as their relationship with environmental factors .....	ZHAO Yujuan, LI Fengchao, ZHANG Qiang, et al (6819)
Effects of bisphenol A on the toxicity and life history of the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i> .....	LU Zhenghe, ZHAO Baokun, YANG Jiaxin (6828)
Effect of incubation temperature on behavior and metabolism in the Chinese cornsnake, <i>Elaphe bimaculata</i> .....	CAO Mengjie, ZHU Si, CAI Ruoru, et al (6836)
Functional and numerical responses of <i>Mallada besalis</i> feeding on <i>Coreyra cephalonica</i> eggs .....	LI Shuiquan, HUANG Shoushan, HAN Shichou, et al (6842)
Stability analysis of mutualistic-parasitic coupled system .....	GAO Lei, YANG Yan, HE Junzhou, et al (6848)
Effect of ultra-micro powder qiweibaishuan on the intestinal microbiota and enzyme activities in mice .....	TAN Zhoujin, WU Hai, LIU Fulin, et al (6856)
<b>Review and Monograph</b>	
The effects of nitrogen deposition on forest carbon sequestration: a review .....	CHEN Hao, MO Jiangming, ZHANG Wei, et al (6864)
Effect of enhanced CO <sub>2</sub> level on the physiology and ecology of phytoplankton .....	ZHAO Xuhui, KONG Fanxiang, XIE Weiwei, et al (6880)
Transboundary protected areas as a means to biodiversity conservation .....	SHI Longyu, LI Du, CHEN Lei, et al (6892)
<b>Scientific Note</b>	
The energy storage and its distribution in 11-year-old chinese fir plantations in Huitong and Zhuting .....	KANG Wenxing, XIONG Zhengxiang, HE Jienan, et al (6901)
Spatial pattern of sexual plants and vegetative plants of <i>Stipa krylovii</i> population in alpine degraded grassland .....	REN Heng, ZHAO Chengzhang, GAO Fuyuan, et al (6909)



# 《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 21 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 21 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元