

凋落物和积雪覆盖对低温季节西南亚高山森林表层土壤脲酶动态的影响

马丽红¹, 黄雪菊², 秦纪洪³, 孙辉¹, 李沙¹

(1. 四川大学 环境科学与工程系, 成都 610065;

2. 四川省环境科学保护研究院, 成都 610041; 3. 成都大学 城乡建设学院环境工程系, 成都 610106)

摘要:土壤脲酶(URE)活性易受到温度、地表覆盖(凋落物和积雪覆盖)、土壤水热动态等的影响,是常用的表征土壤有机态氮转化与矿化状况的生物活性的指标之一。为探索凋落物和积雪覆盖对低温季节川西亚高山森林土壤脲酶活性的影响,以低温季节亚高山针叶林均质化土壤为研究对象,采用4种不同覆盖处理(裸露地表、凋落物覆盖、积雪覆盖、凋落物和积雪同时覆盖)进行原位培养,对各处理在低温季节(11月至翌年5月)表层(0—10 cm)和下层(10—20 cm)土壤进行采样并分析其脲酶活性动态。结果表明:(1)川西亚高山森林土壤脲酶活性在低温季节仍相对较高;整体呈现出先增高,随后急剧降低,到低温末期达到峰值的变化趋势。(2)整个低温季节凋落物和积雪对URE活性的影响均达到极显著水平,凋落物和积雪两因素之间存在显著的交互作用。凋落物和积雪覆盖动态格局深刻影响着亚高山森林的生态过程,亚高山森林高海拔土壤脲酶活性可以作为低温季节高海拔生态系统环境变化的一个短期响应特征。

关键词:亚高山森林; 低温季节; 土壤脲酶活性; 覆盖; 低温生态系统

中图分类号:S714.3; S154.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)02-0060-06

Impacts of Litter and Snow Cover on Topsoil Urease Activity Dynamics of Subalpine Forest in Southwestern China in the Cold Season

MA Li-hong¹, HUANG Xue-ju², QIN Ji-hong³, SUN Hui¹, LI Sha¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Sichuan University,

Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Research Academy of Environmental Science, Chengdu

610041, China; 3. College of Rural and Urban Construction, Chengdu University, Chengdu, 610106)

Abstract: Urease activity is often used as one of biochemical indices to assess soil organic nitrogen transformation and mineralization because of its vulnerability and sensitivity to soil temperature, surface cover, moisture dynamics. In order to determine impacts of litter and snow cover on topsoil urease activity dynamics of subalpine forest in southwestern China in the cold season, based on homogenized soil columns incubated in situ under four treatments (i. e., bare soil without snowcover, bare soil with snowcover, litter without snowcover, and litter with snowcover), soil of 0—10 cm and 10—20 cm layers of the four treatments were sampled in October, December, January, February, March and May, respectively, and their urease activities were analyzed. The results showed that: (1) urease activities were relatively higher in subalpine forest soil during the cold season from November to May, and it increased gradually in the initial period, then reduced sharply, and reached to the summit by the end of the cold season; (2) soil urease activities were impacted significantly by litter and snow cover in 0—10 cm and 10—20 cm layers during the cold season, and interaction of snow cover and litter cover on URE activity were significant. Soil urease activity could be used as one of soil biochemical indicators of short-term response to environment changes in subalpine cold ecosystems.

Key words: subalpine forest; cold season; soil urease activity; cover; cold ecosystem

收稿日期: 2012-09-24

修回日期: 2012-11-08

资助项目: 国家自然科学基金(40871124, 41271094); 成都市科技局项目(10YTYB130SF-023); 成都大学校基金(2010XJZ13)

作者简介: 马丽红(1989—), 女, 甘肃渭源人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态学。E-mail: malihong0526@126.com.

通信作者: 孙辉(1971—), 男, 四川南充人, 副研究员, 主要从事土壤退化过程及恢复生态方面的研究。Email: sunhuifiles@gmail.com

政府间气候变化专门委员会(IPCC)预计,全球平均气温在未来 100 a 增幅可能达到 $1.8 \sim 4.0^{\circ}\text{C}$ ^[1],高纬度和高海拔地区温度的增幅可能将更大^[2]。全球气候变化会引起高海拔和高纬度季节性积雪区域的积雪覆盖时间缩短、覆盖面积和积雪深度减小,并导致一些区域的降雨量增加^[3]。温度变化对于高纬度和高海拔冻土地带的相关生物与生化效应影响研究已受到关注^[4-5],已有研究表明,土壤酶活性在低温条件下对温度变化更加敏感^[6-7]。位于青藏高原东南边缘的西南亚高山森林,海拔多在 3 000 m 以上,低温季节长达 7~8 个月(一般是指任意连续 5 d 日均温低于 10°C 的期间)^[8-11],被认为是气候变化的敏感区和脆弱区,且正受到全球暖化效应的重大影响^[8]。川西亚高山近年来通过自然演替、退耕还林、天然林保护以及大规模的人工造林,使亚高山森林植被类型及林下地表覆盖发生了巨大变化,凋落物厚度与质量、季节性积雪格局等也随之发生了变化,因而也可能对土壤剖面温度状况、生物与生物化学过程等产生影响。

土壤脲酶主要参与氮素的生物地化循环和生物有效性转化过程,氮素的活性尤其是在漫长的低温季节的活性动态,对氮素的生物有效性转化至关重要^[8,12-13],可表征土壤中有有机态氮的矿化与转化状况^[14]。不同土壤的脲酶活性在不同时间段的温度敏感性不同,存在明显的时空差异^[15]。由于高寒低温生态系统环境条件的制约,对西南亚高山森林等低温生态系统的土壤脲酶在整个低温季节的活性动态及其变化规律和凋落物与积雪格局变化后的影响研究还未见比较系统的报道。而对于每年低温期长达 7~8 个月的亚高山森林土壤生态系统来说,覆盖状况动态格局可能深刻影响高山森林土壤氮素转化过程及生物有效性。因此,本文选取低温季节土壤脲酶作为指标,尝试分析整个低温季节不同覆盖处理下原位培养的均质化土壤脲酶活性动态,以期揭示低温季节地表凋落物和积雪对高海拔土壤脲酶活性的影响。

1 研究材料与方法

研究区位于四川阿坝藏族羌族自治州小金县梦笔山,是大雪山与邛崃山系交界的北部地段,由数个海拔 4 000 m 以上的高峰组成,研究区域内亚高山针叶林分布的海拔高度多为 3 000~4 300 m,为西南亚高山暗针叶林典型生态系统类型之一。实验点地处梦笔山西南坡玛嘉沟,小金川支流抚边河上游山麓,排水良好,坡向为东北,坡度 35° 左右,海拔 3 250 m,处于 $102^{\circ}24.92'\text{E}$, $31^{\circ}33.25'\text{N}$ 。主要植被是亚高山人工暗针叶林,建群种为岷江冷杉(*Abies faxoniana*

Rehd. et Wils.) 和紫果云杉(*Picea Purpurea* Mast.),林龄 40~50 a,林下阴生灌木较少,细枝茶藨子(*Ribes tenue* Jancz.)、四川忍冬(*Lonicera szechuanica* Batal.)、红毛五加(*Acanthopanax giraldii* Harms.)等零星分布。岷江冷杉林是与岷江上游和大渡河上游区域气候适应的最主要的天然或人工林植被。实验样地土壤为山地棕色针叶林土,凋落物层厚度 10~30 cm。每年 9 月下旬多开始降雪,一般到次年 5 月底终雪,这期间形成断续的季节性雪被覆盖地表,次降雪积雪厚度可达到 10 cm 以上。在此低温季节,土壤表层 0—20 cm 冻结期(从每年秋季第一次冻结到次年春末夏初最后解冻的期间)长达 5~7 个月。野外实验期间测定的实验点气温状况见图 1。

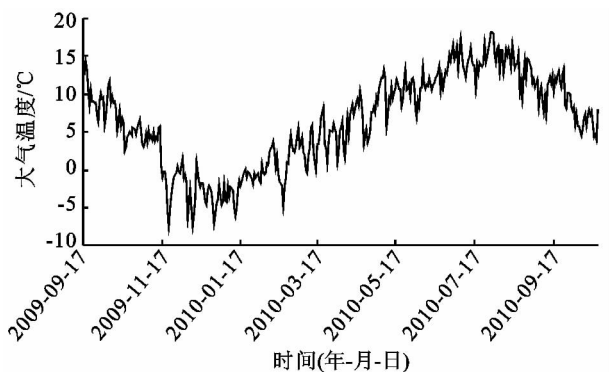


图1 2009—2010年川西亚高山森林野外原位实验点气温动态

1.1 实验材料

土壤均质化:2009年9月初收集实验点亚高山针叶林 0—20 cm 处的土壤,清除树根和石块后过 5 mm 筛,并充分混合均匀。土壤均质化有机质含量为 $(441.94 \pm 3.99) \text{ g/kg}$,DOC 含量为 $(4.25 \pm 0.14) \text{ g/kg}$,全氮含量为 $(8.85 \pm 1.32) \text{ g/kg}$,磷含量为 $(0.68 \pm 0.08) \text{ g/kg}$,pH 值为 6.52 ± 0.05 。预处理时将土样含水量调节至田间持水量的 80%。

重装土柱:将上述处理好的均质化土壤按照原容重重装土柱。将直径 30 cm 的 PVC 管截为 20 cm 长的短管,剖为两半,用扎带扎紧后重装土柱(这样便于从管中取出土柱而不破坏土柱的结构),土柱埋入原土壤中,最上部与土壤表面齐平,土柱间用森林土壤压实填平。

凋落物收集:利用尼龙网在林下收集秋天新鲜凋落物,去掉其中的树枝和树皮,混匀后用于实验(LNS 和 LS 处理)。

1.2 样方设置与采样方法

野外实验设置:4 个处理,3 个重复,每个处理为 3 组土柱,共设 12 组土柱。每组内土柱间距离 10 cm,每组间距离 30 cm。4 个处理详见表 1。

表 1 亚高山均质化森林土壤原位培养实验设计及处理		
处理代号	处理	处理方式
BNS	裸土除雪处理	裸露土壤+扫除降雪
BS	裸土覆雪处理	裸露土壤+自然降雪
LNS	凋落物除雪处理	凋落物覆盖(10 cm)+扫除降雪
LS	凋落物覆雪处理	凋落物覆盖(10 cm)+自然降雪

注:实验期间该地区自然凋落物厚度约为 10 cm。

裸土除雪处理(BNS):即在该处理上方支撑白色尼龙网将凋落物和雪阻隔并及时清除;裸土覆雪处理(BS):即人工清除凋落物;凋落物除雪处理(LNS):即在该处理上方支撑白色尼龙网将雪阻隔并及时清除,同时人工覆盖 10 cm 厚之前收集的凋落物(实验期间该地区自然凋落物覆盖约为 10 cm);凋落物覆雪处理(LS):即该处理下保持自然凋落物状态和积雪。

土壤采样与预处理:经过两个月原位培养后开始采样。每次采样每组随机采集 3 个土柱。土柱收集后立即置于冰盒中带回实验室,剪开扎带分开 PVC 管取出土柱,将每个土柱截为长为 10 cm 的上下两段,即 0—10 cm 深度和 10—20 cm 深度的土样,过 1 mm 筛。

1.3 分析方法与数据处理

脲酶(URE)活性分析方法参见文献[16],URE

表 2 不同处理下亚高山森林低温季节(2009 年 10 月—2010 年 5 月)土壤剖面温度特征

深度	处理	冻融期间	冻融天数/d	冻融交替次数	最低温度/℃
上层(5 cm)	BNS	2009-11-23—2010-03-21	107	81	−8.5
	BS	2009-11-28—2010-03-21	113	70	−10.5
	LNS	2009-11-23—2010-03-02	99	47	−6.0
	LS	2009-12-04—2010-03-21	107	40	−4.5
下层(15 cm)	BNS	2009-12-31—2010-02-23	65	12	−1.5
	BS	2009-12-23—2010-02-23	68	12	−3.0
	LNS	2009-12-23—2010-02-23	69	10	−2.0
	LS	2009-12-31—2010-02-23	60	9	−1.5

注:(1) 土壤冻融期间与冻融天数:是指在低温季节特定深度土壤日最低温度低于 0℃的第一天到日最低温度不超过 0℃的最后一天之间的持续时间。这期间土壤发生频繁反复的冻结—解冻(冻融交替),这期间的天数称为冻融天数。(2) 冻融期间的表示:日期格式为年-月-日,如 2009-11-24—2010-04-08 表示 2009 年 11 月 24 日至 2010 年 4 月 8 日。

2.2 低温季节表层(0—10 cm)土壤脲酶活性动态

低温季节不同处理下表层(0—10 cm)土壤脲酶(URE)活性动态见图 2。从时间动态来看,经过 2 个月的培养(到 11 月份),裸地除雪(BNS)处理脲酶活性高于其余 3 种处理;相比于 11 月份,12 月份 LNS,LS,BS 三种处理下的脲酶活性显著提高;进入 12 月、1 月,各处理下的表层土壤 URE 活性均处于较高水平,且除 BNS 处理外各组 URE 活性波动不大;从 1 月底到 2 月、3 月,进入低温季节的后期,相对于 1 月份,四种处理下表层土壤脲酶活性均显著下降;进入完全解冻的 5 月,表层 URE 活性相比于 3 月呈现极

活性单位为 $\mu\text{g}(\text{NH}_3-\text{N})/(\text{g}\cdot\text{d})(37^\circ\text{C})$ 。

所用数据均采用 SPSS 17.0 软件进行分析处理,对不同覆盖状况处理下不同采样时间同一土层土壤脲酶活性差异以及土壤脲酶活性影响因子差异进行重复性多因素方差分析和最小显著性差异法(LSD)多重比较。

2 结果与分析

2.1 低温季节土壤剖面温度特征分析

低温季节不同处理下亚高山森林土壤剖面温度特征见表 2。表层(0—10 cm)土壤温度以 5 cm 深度的土壤温度表示,下层(10—20 cm)的土壤温度以 15 cm 深度的土壤温度表示。表层土壤,BNS 处理下的土壤冻融期间最长,冻融交替的次数最多;BS 处理下的冻融天数最多,最低温度达到 −10.5℃。下层(10—20 cm)土壤中 4 个处理之间差异不大,冻融天数和冻融交替的次数都相近。整个低温季节上下层土壤相比,表层土壤的冻融期都比下层持续时间更长,冻融交替次数更多,最低温度也更低。凋落物覆盖可提高 0—10 cm 和 10—20 cm 土层温度,积雪覆盖降低了 0—10 cm 和 10—20 cm 土层温度,凋落物与积雪均可降低这两个土层的冻融交替次数。

显著升高,其中 BS、LS 处理下的升高幅度较其余两种处理高。

从不同处理间来看,在整个低温季节,5 月份 LS 处理的土壤 URE 活性达到了整个实验期的最高值,3 月份 BS 处理土壤 URE 活性最低。有凋落物覆盖的 LNS 和 LS 处理在 12 月、2 月、3 月、5 月较冻结前(11 月)变化均较大,有雪被覆盖的 BS 和 LS 在 12 月、2 月、3 月、5 月 URE 活性变化较 BNS 和 LNS 两种处理大,这都说明地表覆盖状况对低温季节土壤表层 URE 活性具有较大影响。除 1 月份,BS 处理较 BNS 处理在实验期间变化幅度大,说明覆雪对于 URE 活

性影响较大。此外,这四种处理下的 URE 活性均呈现显著相关性。

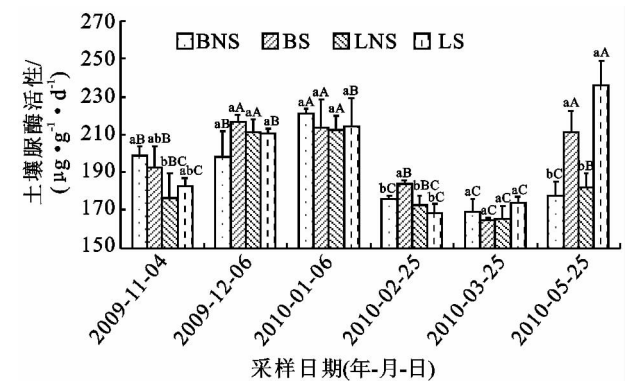


图2 不同地表覆盖情况下亚高山森林土壤

表层(0—10 cm)URE 活性在低温季节的动态

注:(1) BNS:裸露土壤+清除积雪;BS:裸露土壤+自然积雪;LNS:凋落物覆盖(10 cm)+清除积雪;LS:凋落物覆盖(10 cm)+自然积雪,下同。(2)图中值为平均值±标准差;条形图上标注的字母为 Duncan 法进行多重比较后的结果。小写字母不同者表示同一采样日期不同处理下脲酶活性差异达到显著性水平($P<0.05$);大写字母不同者表示同一处理不同采样时间脲酶活性差异达到显著性水平($P<0.05$),下同。

2.3 低温季节下层土壤(10—20 cm)脲酶活性动态

低温季节不同处理下层(10—20 cm)土壤脲酶(URE)活性动态如图3所示。从时间动态来看,下层土壤脲酶(URE)活性变化规律和上层相似,总体呈现先增高,随后急剧降低,到低温季节末期又增高的趋势。在处理初期(11月),无凋落物覆盖的两种处理 BNS 和 BS 土壤 URE 活性高于其余两种处理;进入冻融初期 12 月,各种处理下的土壤脲酶活性均有显著提高,以 LS 的增长幅度最大;相比于 12 月,1 月土壤脲酶活性继续增长,且 BNS 和 LNS 的升高幅度较大,此时土壤 URE 活性达到实验期的最高值;在 2 月和 3 月,土壤进入冻融期,四种处理下的脲酶活性均呈现一定程度的下降;进入 5 月,即土壤完全解冻期,与 3 月相比 URE 活性显著升高,尤其以 BS 和 LS 处理最为突出。

从不同处理来看,在整个低温季节,1 月 BNS 处

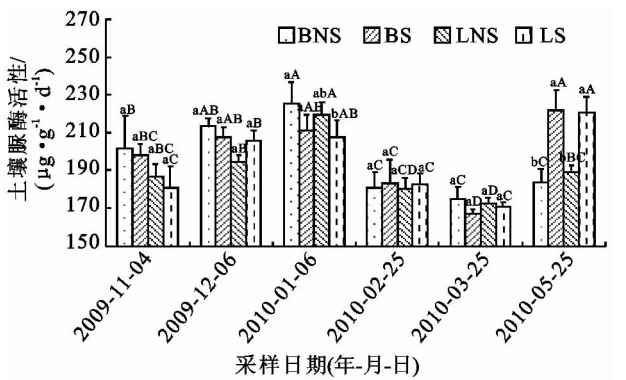


图3 不同地表覆盖情况下亚高山森林土壤

表层(10—20 cm)URE 活性在低温季节的动态

理下的 URE 活性最高,3 月 BS 处理下的 URE 活性最低。无凋落物覆盖的 BNS 或 BS 处理下的土壤 URE 活性高于其它两种处理,BS 和 LS 处理相比并没有显现出明显差异,说明凋落物覆盖对土壤 URE 活性并没有明显作用。到土壤完全解冻的 5 月,以覆雪的 BS 和 LS 处理较无覆雪的两个处理上升幅度大,说明覆雪对 URE 活性的影响较大。

2.4 土壤脲酶活性的影响因子间的相互作用

西南亚高山森林土壤脲酶活性的影响因子:覆盖(覆雪 S、凋落物 L)、采样时间 D、土壤深度 La 及其协同效应分析见表 3。在整个低温季节,积雪(S)或凋落物覆盖(L)处理、采样时间(D)对于土壤 URE 活性影响显著,而且这些因素的交互作用包括 $S\times L$ 、 $S\times D$ 、 $La\times D$ 、 $S\times La\times L\times D$ 对 URE 活性的影响均达到极显著水平。经相关性分析,LNS 和 LS 处理的上下层土壤脲酶(URE)活性分别在 12 月和 2 月有显著性差异(P 值分别为 0.020,0.029),采样时间与 URE 活性显著相关(P 值为 0.04)。这表明,西南亚高山森林土壤低温季节 URE 活性受到凋落物覆盖、积雪、采样时间的影响,积雪、凋落物、采样时间和土层之间存在显著的交互作用。从各因素的效应分析来看,单个因素对于 URE 活性的贡献较小,而 $La\times L\times D$ 、 $S\times L\times D$ 、 $S\times La\times L$ 、 $S\times La\times D$ 等因素的交互作用的贡献较大。

表3 各影响因素及其对 URE 活性的协同效应分析

影响因素	S	L	La	D	S×La	S×L	S×D	La×L	La×D	L×D	S×La×L	S×La×D	S×L×D	La×L×D	S×La×L×D
URE	0.000*	0.039*	0.174	0.000*	0.238	0.047*	0.000*	0.248	0.001*	0.476	0.893	0.684	0.924	0.925	0.040*

3 讨论

土壤酶是土壤生态系统物质和能量流动过程中最活跃的生物活性物质,土壤酶活性是土壤生物和非生物环境变化的“感应器”,而脲酶活性更易受到土壤温度、地表覆盖、土壤水热动态以及有机质状况等的影响。温度是控制土壤脲酶活性的一个重要环境因

子,有研究表明,温度通过改变土壤呼吸和养分矿化速率而增加土壤微生物量,改变土壤微生物群落的组成与结构,增加土壤动物特定种群数量和丰富度,这些都可能有利于土壤脲酶产生和活性提高^[17-19]。本课题组的其他研究发现,低温季节川西亚高山森林土壤微生物量处于较高水平且呈现单峰变化^[11],这更充分地佐证本研究中脲酶活性在整个低温季节呈现明

显的先升高、显著降低到再回升的季节动态与温度变化有密切关系。从不同处理下 0—10 cm 和 10—20 cm 的土壤冻结持续时间以及冻融交替次数来看,覆盖(积雪或凋落物)对低温土壤具有良好的缓冲作用,这种作用主要表现为热量在大气与土壤的传递过程,所以低温季节没有任何缓冲层的裸露土壤表面温度变化比有积雪或凋落物覆盖更加剧烈^[20],覆雪能够在晚秋和初冬提供一个温度较为稳定的环境,保障微生物处于较高的活性状态^[6],这也是本研究中 BNS 处理相对其它处理脲酶活性变化幅度较小的原因。低温生态系统中土壤酶活性依赖于产生相关土壤酶的微生物类群的活性、土壤特定养分或酶的底物有效性。土壤 N 的生物有效性在冬季末期最高^[21],因为土壤解冻、团聚体破坏和反复冻融导致微生物量 N 和其他有机 N 短期内释放出来,而脲酶活性与土壤有效性 N 含量显著相关^[18],这可能也是本研究中土壤脲酶活性在冬季末期会随着有效氮含量的增加而升高的一个重要原因。此外,土壤含水量也是影响土壤脲酶活性的重要因素^[22],本研究中土壤脲酶活性在土壤水分有效性较高的冻结前期(12 月至翌年 1 月)和完全解冻期(5 月)均维持在相对较高的水平上,可能与此有关。

研究表明,在冻融末期(3—4 月)和其它生长季节(4—10 月),土壤脲酶活性呈明显的季节动态,而这种动态因林型不同而有差异^[4,17]。本研究证实,即使在整个低温季节,随温度变化亚高山土壤脲酶仍然具有先升高后降低,完全解冻后又迅速达到峰值的季节动态,这与谭波等^[4]的研究结果是吻合的。在低温季节 12 月至翌年 1 月,相对于 11 月土壤脲酶活性显著升高,一方面冻融作用破坏土壤团聚体结构^[23],并且改变了土壤微生物的种群和结构,从而使土壤中有效养分增加,间接提高了脲酶活性。此外,冻融作用可使土壤氮素排放增加^[23],已有研究表明土壤氮有效性在冬季最高^[21],冻融期 NO₂ 的排放量约占全年排放量的 65%^[24],由于脲酶活性与氮素生物有效性密切相关,这也间接证实了土壤脲酶活性在此期间有较高活性。低温季节初期和末期温度波动大导致土壤频繁发生冻融交替,导致土壤微生物大量死亡释放营养物质到土壤中^[25],处于冻结状态的有效养分也随着土壤完全融化逐渐释放到土壤溶液中,这也可能是 5 月份脲酶活性达到峰值的另外一个原因。本研究中土壤表层(0—10 cm)与土壤下层(10—20 cm)脲酶活性差异不显著,这与土壤有机层脲酶活性均显著高于矿质土壤层的研究结果^[4]是有差异的,还需要对土壤脲酶活性在低温阶段的温度敏感性作进一步的研究。

4 结论

(1) 低温季节川西亚高山森林土壤脲酶活性仍处于较高水平,且具有明显的季节动态,显示出低温季节是亚高山土壤生态过程的重要时期。URE 活性在整个低温季节呈现先升高、显著降低到低温季节末期回升的明显的季节动态。在冻结前期和解冻初期均处在较高水平,2 月急剧降低,5 月随着土壤解冻,URE 活性又一次达到峰值。

(2) 各处理下脲酶活性时间动态的影响不同。BS 和 LS 处理下 URE 活性变化比 BNS 和 LNS 处理小,表明积雪有助于保持脲酶在低温季节的稳定性。积雪(BS)和凋落物覆盖加积雪(LS)对于解冻末期(5 月)土壤脲酶活性有显著的提升作用,而没有积雪则导致脲酶活性在低温季节后期显著降低。

(3) 效应和交互作用分析显示:积雪、凋落物覆盖、采样时间及土层深度对低温季节土壤表层 URE 活性均有影响,这 4 个因素尤其凋落物和积雪这两个因素之间存在显著的交互作用。

致谢:感谢王建、鲜宸坤等同志在高寒艰苦环境下对土壤原位培养实验样地的管理,以及张宁、杨红露、赵利坤等在实验室分析方面的工作;感谢本文责任编辑及审稿人提出的中肯意见。

参考文献:

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 2007: The Physical Scientific Basis[EB/OL]. <http://www.ipcc.ch/cited>.
- [2] 陈红君. 岷江冷杉叶功能特性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应[D]. 四川雅安:四川农业大学,2011.
- [3] Groisman P Y, Davies T D. Snow Cover and the Climate Systems[M]//Jones H G, Pomeroy J W, Walker D A. Snow Ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems. New York: Cambridge University Press,2001.
- [4] 谭波,吴福忠,杨万勤,等. 冻融末期川西亚高山/高山森林土壤水解酶活性特征[J]. 应用生态学报,2011,22(5): 1162-1168.
- [5] Lipson D A, Schmidt S K, Monson R K. Carbon availability and temperature control the post-snowmelt decline in alpine soil microbial biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry,2000,32(4):441-448.
- [6] Campbell J L, Mitchell M J, Groffman P M, et al. Winter in northeastern North America: a critical period for ecological processes[J]. Frontier in Ecology and the Environment,2005,3(6):314-322.

[7] Mikan C J, Schimal J P, Doyle A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soil above and below freezing[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002,34(11):1785-1795.

[8] Yu H, Luedeling E, Xu J. Winter and springs warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. *PNAS*,2010,107(51):22151-22156.

[9] 秦纪洪,武艳镯,孙辉,等. 低温季节西南亚高山森林土壤轻组分有机碳动态[J]. *土壤*,2012,44(3):413-420.

[10] 王琴,范曾丽,孙辉,等. 低温季节西南亚高山森林土壤可溶性有机碳动态[J]. *四川农业大学学报*,2012,30(1):18-23.

[11] 黄雪菊,王琴,孙辉,等. 不同地表覆盖下低温季节对西南亚高山土壤微生物量碳动态的影响[J]. *山地学报*, 2012,30(1):543-549.

[12] 汤懋苍,程国栋. 青藏高原近代气候变化及其对环境的影响[M]. 广州:广东科技出版社,1998.

[13] 郭继勋,姜世成,林海俊,等. 不同草原植被碱化草甸土的酶活性[J]. *应用生态学报*,1997,8(4):412-416.

[14] 余方明,刘华,刘可慧,等. 川西亚高山暗针叶林恢复初期土壤酶活性研究[J]. *生态环境学报*,2012,21(1):64-68.

[15] 杨万勤,钟章成,陶建平,等. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系[J]. *林业科学*,2001,37(4):124-128.

[16] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京:农业出版社, 1986.

[17] 杨涛,李玉英. 高寒草甸土壤脲酶活性的研究[J]. *生态学报*,1988,8(3):220-225.

[18] 徐振锋,唐正,万川,等. 模拟增温对川西亚高山两类针叶林土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*,2010,21(11):2727-2733.

[19] 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[J]. *应用与环境生物学报*,2004,10(4):416-420.

[20] 秦纪洪,孙辉,易之煦. 低温季节西南亚高山森林土壤多酚氧化酶动态研究[J]. *土壤通报*,2012,43(5):1074-1079.

[21] Schimel J P, Bilbrough C, Welker J M. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2004,36(2):217-227.

[22] Tiwari M B, Tiwari B K, Mishra R R. Enzyme activity and carbon dioxide evolution from upland and wetland rice soils under three agricultural practices in hilly regions[J]. *Biology and Fertility of Soils*,1989,7(4):359-364.

[23] van Bochove E, Prévost D, Pelletier F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2000,64(5):1638-1643.

[24] Wagner-Riddle C, Thurtell G W, Kidd G K, et al. Estimates of nitrous oxide emissions from agricultural fields over 28 months[J]. *Canadian Journal of Soil Science*,1997,77(2):135-144.

[25] Buckeridge K M, Grogan P. Deepened snow alters soil microbial nutrient limitations in arctic birch hummock tundra [J]. *Applied Soil Ecology*,2008,39(2):210-222.

(上接第 52 页)

[11] 王佑汉,赵宏达,任茜. 成都平原土地利用景观格局变化及驱动因素分析:以成都市龙泉驿区为例[J]. *水土保持研究*,2007,14(6):198-201.

[12] 高凯,周志翔,滕明君. 基于知识分类法的 TM 遥感影像景观分类制图:以武汉市为例[J]. *山东建筑大学学报*,2010,25(4):456-459.

[13] 李欢,刘霞,姚孝友,等. 蒙阴县土地利用景观格局动态分析[J]. *水土保持研究*,2011,18(5):43-47.

[14] 郭砾,杜世宏,赵松婷,等. 黔东南地区景观格局的动态变化及驱动力[J]. *山地学报*,2011,29(5):543-550.

[15] 刘晶,刘学录,王哲锋. 祁连山东段景观格局变化及其驱动因子研究[J]. *草业学报*,2011,20(6):26-33.

[16] 徐嘉兴,李钢,渠俊峰,等. 洪泽湖地区土地利用与景观格局演变[J]. *长江流域资源与环境*,2011,20(10):1211-1215.

[17] 郑忠明,李华,周志翔,等. 城市化背景下近 30 年武汉市湿地的景观变化[J]. *生态学杂志*,2009,28(8):1619-1623.

[18] 张静,马彩虹,王启名,等. 汉中市土地利用变化的动态变化研究[J]. *水土保持研究*,2012,19(1):112-116.