

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 22 期 Vol.33 No.22 **2013**

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 33 卷 第 22 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 利用分布有/无数据预测物种空间分布的研究方法综述 刘芳, 李晟, 李迪强 (7047)
- 景观服务研究进展 刘文平, 宇振荣 (7058)
- 土壤呼吸组分分离技术研究进展 陈敏鹏, 夏旭, 李银坤, 等 (7067)

个体与基础生态

- 平茬高度对四合木生长及生理特性的影响 王震, 张利文, 虞毅, 等 (7078)
- 不同水分梯度下珍稀植物四数木的光合特性及对变化光强的响应 邓云, 陈辉, 杨小飞, 等 (7088)
- 水稻主茎节位分蘖及生产力补偿能力 隗溟, 李冬霞 (7098)
- 基于辐热积法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量 张明达, 李蒙, 胡雪琼, 等 (7108)
- 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响 田慎重, 王瑜, 李娜, 等 (7116)
- 不同光照强度下兴安落叶松对舞毒蛾幼虫生长发育及防御酶的影响 鲁艺芳, 严俊鑫, 李霜雯, 等 (7125)
- 南方小花蝽在不同空间及笼罩条件下对西花蓟马的控制作用 莫利锋, 鄧军锐, 田甜 (7132)
- 浮游植物对溶解态 AI 的清除作用实验研究 王召伟, 任景玲, 闫丽, 等 (7140)
- 卧龙巴郎山川滇高山栎群落植物叶特性海拔梯度特征 刘兴良, 何飞, 樊华, 等 (7148)
- 春夏季闽江口和兴化湾虾类数量特征 徐兆礼, 孙岳 (7157)
- 啃食性端足类强壮藻钩虾对贫营养湖三种大型海藻的摄食选择性 郑新庆, 黄凌风, 李元超, 等 (7166)

种群、群落和生态系统

- 4 种农业措施对三化螟种群动态的控制作用 张振飞, 黄炳超, 肖汉祥, 等 (7173)
- 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (7181)
- 基于诊断学的生态系统健康评价 蔡霞, 徐颂军, 陈善浩, 等 (7190)
- 稻田生态系统中植硅体的产生与积累——以嘉兴稻田为例 李自民, 宋照亮, 姜培坤 (7197)
- 自由搜索算法的投影寻踪模型在湿地芦苇调查中的应用 李新虎, 赵成义 (7204)
- 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等 (7211)
- 内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响 彭海英, 李小雁, 童绍玉 (7221)
- 黄土丘陵沟壑区 80 种植物繁殖体形态特征及其物种分布 王东丽, 张小彦, 焦菊英, 等 (7230)
- 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价 刘振生, 高惠, 滕丽微, 等 (7243)
- 太湖湖岸带浮游植物初级生产力特征及影响因素 蔡琳琳, 朱广伟, 李向阳 (7250)

景观、区域和全球生态

- 艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应…………… 秦 璐,吕光辉,何学敏,等 (7259)
- 田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征…………… 张彦军,郭胜利,刘庆芳,等 (7270)

资源与产业生态

- 光核桃遗传资源的经济价值评估与保护 …………… 张丽荣,孟 锐,路国彬 (7277)
- 棉花节水灌溉气象等级指标…………… 肖晶晶,霍治国,姚益平,等 (7288)

研究简报

- 云南红豆杉人工林萌枝特性…………… 苏 磊,苏建荣,刘万德,等 (7300)
- 赣中亚热带森林转换对土壤氮素矿化及有效性的影响…………… 宋庆妮,杨清培,余定坤,等 (7309)

学术信息与动态

- 2013 年 European Geosciences Union 国际会议述评 …………… 钟莉娜,赵文武 (7319)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 山坡岩羊图——岩羊属国家二级保护动物,因喜攀登岩峰而得名,又名石羊。贺兰山岩羊主要分布于海拔 1500—2300m 的山势陡峭地带,羊群多以 2—10 只小群为主。生境适宜区主要为贺兰山东坡(宁夏贺兰山国家级自然保护区)的西南部,而贺兰山西坡(内蒙古贺兰山国家级自然保护区)也有少量分布。贺兰山建立国家级自然保护区以来,随着保护区环境的不断改善,这里岩羊的数量也开始急剧增长,每平方公里的分布数量现居世界之首,岩羊的活动范围也相应扩大到低山 900 米处的河谷。贺兰山岩羊生境选择的主要影响因子为海拔、坡度及植被。

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/stxb201207090962

秦璐, 吕光辉, 何学敏, 张雪妮, 张雪梅, 孙景鑫, 李尝君, 杨晓东. 艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应. 生态学报, 2013, 33(22): 7259-7269.

Qin L., Lv G. H., He X. M., Zhang X. N., Zhang X. M., Sun J. X., Li C. J., Yang X. D. Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7259-7269.

艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土 厚度变化的响应

秦 璐^{1,2}, 吕光辉^{1,2,*}, 何学敏^{1,2}, 张雪妮^{1,2}, 张雪梅^{1,3},
孙景鑫^{1,2}, 李尝君^{1,2}, 杨晓东^{1,4}

(1. 新疆绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 4. 华东师范大学环境科学与技术系, 上海 200241)

摘要: 利用 LI-8100 土壤 CO₂ 排放通量全自动测量系统, 于 2010 年 1—4 月测定了艾比湖地区不同植被类型样地的土壤呼吸速率, 结合环境因子、冻土厚度及室内土壤理化性质分析, 探讨了温带干旱区季节性冻土厚度变化对土壤呼吸的影响。结果表明: 土壤温度在冻结期是影响冻土厚度的最主要环境因子, 而解冻期冻土厚度变化与土壤温度等环境因子关系不显著 ($P>0.05$); 冻土厚度在不同时期影响土壤呼吸速率的程度不同, 冻结期两者呈显著正相关 ($R^2=0.782, P<0.05$), 解冻初期两者呈弱相关 ($P>0.05$); 土壤呼吸速率在土壤冻结期与解冻初期不存在显著差异 ($P>0.05$), 但在解冻完全期则表现出明显的增加趋势 (差值为 $0.14\text{—}0.37\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 表明冻土融化会明显地增加土壤碳排放, 从而增加大气中的 CO₂。结果阐明了艾比湖地区季节性冻土厚度变化对土壤呼吸的影响, 为揭示全球变暖背景下冻土退化过程中的碳排放机理提供理论基础。

关键词: 土壤呼吸; 冻土厚度; 响应; 干旱区

Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China

QIN Lu^{1,2}, LV Guanghui^{1,2,*}, HE Xuemin^{1,2}, ZHANG Xueni^{1,2}, ZHANG Xuemei^{1,3}, SUN Jingxin^{1,2}, LI Changjun^{1,2}, YANG Xiaodong^{1,4}

1 Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China

2 College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

4 Department of Environment Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: As a special process for soils in the regions of high altitude, the freeze-thaw process directly or indirectly influences the physical, chemical and biological properties of soils. Under the background of the global warming, increasing attention has been paid to the effect of soil freezing-thawing alternation on carbon cycles. By measuring the changes of depth of seasonal frozen soil, of soil properties and soil respiration, our main objective was to provide insight into the responses of soil properties and soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in arid area, and to further elaborate the effect of global warming on seasonal frozen soil and the resulted carbon release. Soil respiration rate (Rs) of Ebinur Lake area was

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (41130531); 国家自然科学基金资助项目 (41261087); 新疆大学绿洲生态重点实验室 (教育部省部共建) 开放课题经费资助项目 (XJDX0206-2009-01)

收稿日期: 2012-07-09; **修订日期:** 2013-07-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ler@xju.edu.cn

measured from January to April in 2010 in the field using an automated CO₂ efflux system (LI-8100). Meanwhile, temperature (air temperature), atmospheric relative humidity and wind speed were measured 150 cm above the ground. Temperature, atmospheric relative humidity and wind speed were also measured at 10 cm above the ground, with a handheld weather instrument. Soil temperatures were measured at 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm and 25 cm below soil surface with two geo-thermometers. The results showed that: during the frozen period, soil temperature is the most important factor determining the depth of frozen soil, while during thawing period, the depth of frozen soil was not influenced by temperature ($P>0.05$). There was significant positive correlation between soil respiration rate and depth of frozen soil during most of the freezing period ($R^2=0.782$, $P<0.05$), this correlation did not apply to the initial stage of freezing period ($P>0.05$). There was no significant difference in soil respiration rate between the freezing period and the initial stage of freezing period, but soil respiration rate significantly increased with the temperature during thawing period until the soil was unfrozen completely (the changes was $0.14\text{--}0.37\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), indicating that permafrost melting significantly increased soil carbon emissions. Climate change impact on seasonal frozen soil depth, on the duration of frozen period, will change the seasonal crop production in permafrost regions. The natural vegetation biomass, spatial distribution pattern of vegetation and ranges of natural native plants distribution will also be changed. Even the plant community succession direction and patterns may also be altered by the changes in duration and depth of frozen soil. All those will affect the ecosystem carbon cycling process. The difference in soil respiration rate of different periods was influenced by soil organic content, snow-melt recharging to soil water and other factors, which may have a collectively effect on carbon cycle of the local ecosystem. Our preliminary findings in the current study revealed the impacts of seasonal frozen-thawing process on soil respiration in Ebinur Lake area, and provided theoretical basis for revealing carbon release mechanism during frozen-thawing processes under the background of global warming.

Key Words: soil respiration rate; frozen soil depth; response; arid area

冻土是冰冻圈的重要组成部分,它覆盖了全球陆地表面的很大部分,其中多年冻土约占北半球陆地表面的 24%,季节性冻土则高达 30%^[1]。冻土分布广泛且具有独特的水热特性,已成为地球陆地表面过程中一个非常重要的因子。冻土和气候系统之间的协同作用,使得多年冻土成为气候变化的敏感指示器^[2],而季节性冻结和融化层(活动层)由于更接近地表、在温度年变化层的上部,对气候变化更为敏感^[3-4]。IPCC 最大估计,由于冬季增温和雪被变化,1901—2002 年季节性冻土层面积缩小了 7%,在北半球,春季冻土面积减少量高达 15%^[5]。

冻土是北方和北极地区生态系统重要的碳汇^[6]。最近的估测表明多年冻土储藏了 1600PgC,约是全球陆地碳储藏的 50%,是目前大气碳库的 2 倍^[7-8],从而对稳定气候变化状况具有相当大的潜力^[9],因此对冻土区域碳源碳汇的研究已成为热点。全球变暖,寒区永冻层逐渐融化、土壤温度升高、湿度下降,使得冻土中微生物活性增加,释放出更多的 CO₂^[10-11],改变了生态系统的源汇功能,而全球气候变暖引起的雪被和季节性冻融变化也将进一步影响土壤碳循环过程,正反馈影响着冬季土壤生态过程^[12],如 Dutta 等在西伯利亚的研究发现,如果该地区气温增加 5℃,那么 10%的冻土将会融化,会有大约 1PgC 释放到大气中,经过 40a 大约会有 40PgC 释放到大气中^[6],空气中增加的 CO₂势必会加剧全球气候变暖。自然或人为原因造成冻土融化,使冻土厚度或面积减少的现象称为冻土退化^[5]。冻土分布数值模型预测结果表明,未来全球冻土处于退化状态^[13],在气候持续变暖的情形下,冻土的退化速度将会进一步加大^[14],如 Osterkamp^[15]于 1977—2003 年在阿拉斯加地区的研究发现,随着气温变暖、雪厚度增加,多年冻土温度会持续上升,且自 1980 年以来,冻土自顶部融化的速度为 10cm/a,2000 年以后冻土自底部融化的速度由 4cm/a 上升到 9cm/a。对于冻融作用的研究,目前仅限于冻土水文、冻土湿地及与冻土植被关系和冻土微生物方面^[16],而对全球变化背景下冻融作用与碳排放的研究仅集中在近几年,且仍具有许多不确定性^[12,17-18]。Lee 等^[11]在阿拉斯加和西伯利亚多年冻土区的

研究表明冻土碳可能非常不稳定,并依土壤类型的不同差异显著,这有赖于特殊景观下的原始冻土碳的积累过程。如冻土融化可产生两个完全不同的土壤环境:排水条件相对好的高地(有氧条件)和厌氧条件下排水不好的湿地,且有氧条件下碳释放量是无氧条件下的3.9—10.0倍。因此对冻土区不同土壤类型、植被类型土壤碳的研究成为必须。此外,冻土融化深度和 CO_2 通量观测对准确估算冻土区碳循环至关重要^[19]。

中国季节性冻土面积约占国土地总面积的53.5%^[20],在全球变暖的背景下,冻融变化影响着生态系统的结构和功能^[19,21],无疑将深远地影响陆地生态系统过程^[16,22-23],如碳氮元素的生物地球化学循环^[24-25],湿地土壤磷吸收^[22],地表径流和陆面水文循环过程^[26-27]等。然而,国内目前开展冻土与碳循环关系的研究很少,且侧重于多年冻土。王宪伟等^[28]通过室内培养实验分析大兴安岭北坡多年冻土区湿地泥炭有机碳矿化的影响,研究发现随着温度的升高,有机碳的矿化具有增加的趋势,其变化范围为24.87—112.92mg/g。模型模拟显示在温室气体排放的背景下,从1980年到2100年间每10a青藏高原气温增加0.58℃,21世纪中期青藏高原地表冻土面积减少约39%,直至21世纪末其减少约81%^[29]。

艾比湖地区位于中纬度地带的西北干旱区,气候干燥,植被稀疏,生态环境脆弱,冬季寒冷,是我国季节性冻土的主要分布区之一,其特殊的生态系统碳源/汇功能对区域性气候变化反应敏感,研究其冻土厚度变化对土壤碳的影响具有十分重要的理论和应用价值。因此本文以准噶尔盆地西部的季节性冻土为研究对象,采用定位连续观测的方法测定土壤呼吸,研究了土壤呼吸在不同冻融时期的变化特征及土壤理化性质的变化特征,并进一步量化研究了干旱区土壤呼吸速率对季节性冻土厚度变化的响应,旨在揭示全球变暖背景下冻土退化过程中的碳释放机理提供理论基础,并进一步探讨全球温度升高对冻土区生态系统的潜在影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖地区位于准噶尔盆地西北边缘,地理坐标为东经82°36'—83°50',北纬44°30'—45°09'(图1)。气候极端干燥,降水稀少,蒸发量大,日照充足,冬季寒冷,夏季炎热,属典型温带干旱大陆性气候^[30]。2010年1—4月测定期间极端最低气温达到-33.5℃,最高气温18.1℃,平均气温-2.8℃。降雪比往年频繁,冻土深度较往年加深。且2月底有暴雪突袭,厚度超过60cm^[31]。

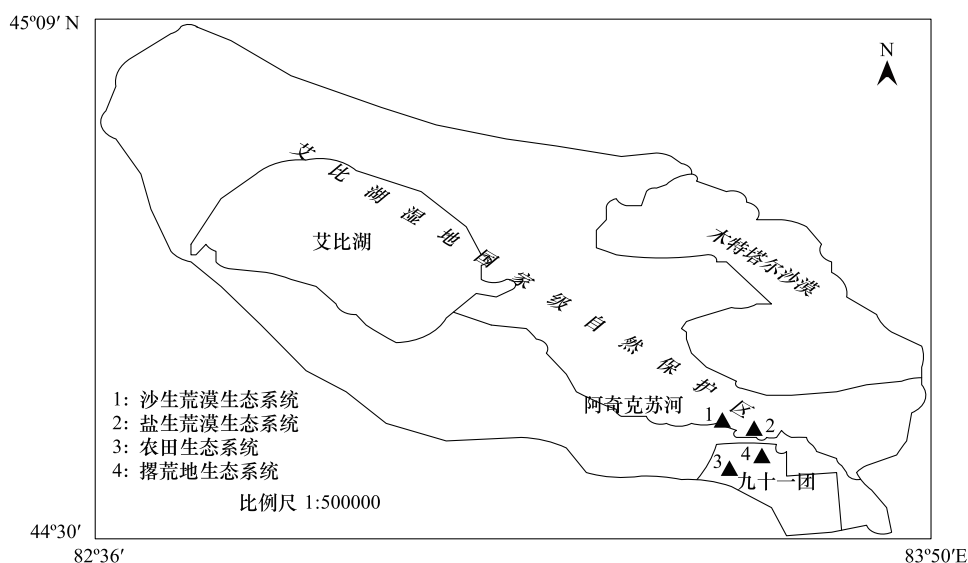


图1 研究区示意图

Fig.1 Study area schemes

研究区主要由农田、撂荒地、盐土荒漠及沙质荒漠生态系统组成。依据当地水分和植被状况的梯度变化,于研究区内布设了一条西北-东南走向,长约15km的样带,样带内共选定7个样地。其中,农田生态系统选于

紧邻艾比湖湿地自然保护区的托托乡,选取不同耕作年限棉田样地 2 个,撂荒地生态系统选取 2 个相似条件下弃耕不同年限的撂荒地。荒漠生态系统在艾比湖湿地自然保护区内选取,荒漠生态系统包括盐土荒漠和沙质荒漠生态系统,对于盐土荒漠生态系统,选择胡杨(*Populus euphratica*)群落和芦苇(*Phragmites australis*)群落作为研究对象;而对于沙质荒漠,选取无天然植被覆盖的流动半流动沙丘为对象(图 1,表 1)。

表 1 研究样地描述
Table 1 Research sample description

样地 Sample	地理坐标 Geographic coordinates	样地描述 Sample description
50a 棉田 50a Cotton field	83°31.989'E 44°29.106'N	灌溉方式为滴灌,深层土壤为沙土
7a 撂荒地 7a Abandoned land	83°32.332'E 44°33.696'N	毗邻农田,农田浇水时,有水漫过,土壤表层轻度盐渍化
9a 棉田 9a Cotton field	83°32.331'E 44°33.697'N	灌溉方式为漫灌,土壤表层轻度盐渍化
3a 撂荒地 3a Abandoned land	83°33.176'E 44°33.815'N	毗邻水渠,农田浇水时,有大片水漫过,土壤表层轻度盐渍化
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	83°33.864'E 44°37.079'N	伴生种有白刺、罗布麻。土壤为盐碱土
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	83°33.833'E 44°37.119'N	无伴生种,土壤为盐碱土
沙漠 Desert	83°32.731'E 44°36.996'N	固定半固定沙丘,土壤为沙土

1.2 研究方法与数据采集

1.2.1 土壤呼吸速率测定

土壤呼吸速率采用 LI-8100 土壤 CO₂ 排放通量全自动测量系统。在每个样地内选择一处地势平坦、均匀一致的地段进行野外测定。每个样地设 3 个样方,每个样方之间的距离不小于 20m,每个样方设置 3 个样点,共计 9 个样点(图 2)。在每次测定时,提前 1d 将直径 20cm、高 13cm 的聚氯乙烯圆柱体测定基座(Soil collar)嵌入平均深度约 10cm 土壤中。基座经过 24 h 的平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免了由于安置气室对土壤扰动而造成的短期内呼吸速率的波动。

观测期内最低温度达到-33.5℃,为避免仪器由于温度太低无法正常工作,测量时将 LI-8100 土壤通量测量系统主机箱装在保温箱中,并用保温材料紧密包裹,确保主机箱电路板温度达到正常工作要求。

1.2.2 测量时间

根据当地土壤不同的冻融阶段,分别于冻结期的 2010 年 1 月、冻融期[包括土壤解冻初期(2010 年 3 月)和土壤解冻完全期(2010 年 4 月)]^[32],共 3 个时期在样地定点观测了土壤呼吸速率。每个观测期内,选择天气稳定的几天进行野外昼夜观测,因此可忽略天气条件引起的测量差异性,昼间每隔 2 h 测定 1 次,共 7 次(地方时 7:00,9:00,11:00,13:00,15:00,17:00,19:00);夜间每隔 3 h 测定 1 次,共 3 次(地方时 22:00,01:00,04:00)。

1.2.3 环境因子测定

测定土壤呼吸速率的同时,用地温计(冀字:30260139)同步测定 5、10、15、20 cm 和 25 cm 地温;用手持式气象仪(Kestrel 4500NV)分别测定地表 10 cm(近地面)和 150 cm(大气)温度、湿度和风速。

1.2.4 季节性冻土厚度测定

主要通过直接挖掘法确定^[33]。即用铁锹和十字镐在样地内附近挖 3 个垂直土壤剖面,直至冻土层结

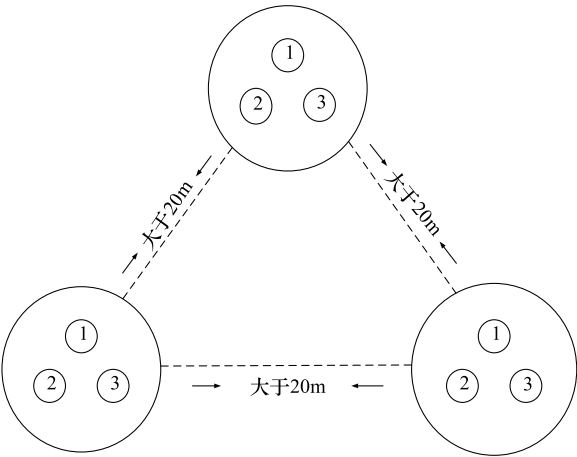


图 2 小样方设计图
Fig. 2 Representation of the quadrat of soil collars used in the studies

束(即无明显冰冻板结现象),用钢卷尺量取冻土厚度。每个样地的冻土厚度值通过 3 个土壤剖面测量的平均值计算得出。

1.2.4 土壤样品采集与处理

在各观测点附近设置表面积为 50cm×30cm 的 3 个土壤剖面,按 0—5cm、5—10cm 深度采样,用三点法均匀混合取样,土样装入灭菌袋中,进行微生物数量的测定;剩余土样装入密封袋,进行土壤理化性质测定。土壤水分的测定用烘干法,土壤有机质的测定方法选用重铬酸钾容量法—稀释热法^[34],土壤全氮的测定用凯氏定氮法测,土壤 pH 值与电导率用玻璃电极法测,土壤容重用环刀法测^[34],土壤总孔隙度用相对密度和容重计算求得^[34],微生物数量的测定为稀释平板法^[35],所测得的微生物种类包括:细菌、真菌及放线菌。所有样地土壤特性见表 2。

表 2 各样地不同月份土壤特性比较

Table 2 Comparison of soil properties in all samples in different month

样地 Sample	1 月 Jan.				3 月 Mar.			
	全氮 Total N /(g/kg)	电导率 Ec/(ms/cm)	pH	总孔隙度/% Total porosity	全氮 Total N /(g/kg)	电导率 Ec/(ms/cm)	pH	总孔隙度/% Total porosity
50a 棉田 50a Cotton field	0.153	0.12	8.27	55.25	0.216	0.20	8.23	35.94
9a 棉田 9a Cotton field	0.271	1.51	8.05	70.44	0.290	2.81	7.64	62.82
7a 撂荒地 7a Abandoned land	0.191	2.40	8.22	66.73	0.253	3.02	7.67	59.80
3a 撂荒地 3a Abandoned land	0.300	2.86	8.41	70.41	0.294	4.15	7.61	34.24
胡杨 Populus euphratica	0.345	12.18	8.70	70.18	0.389	14.72	8.29	64.99
芦苇 Phragmites australis	0.164	7.75	8.64	68.10	0.131	8.25	8.50	59.14
沙漠 Desert	0.087	0.97	7.85	48.85	0.083	1.27	7.86	46.69

1.3 数据分析

利用 SAS8.0 中的 one-way ANOVA 模块对数据进行方差分析,采用 Fisher LSD 法进行多重比较。文中统计数据显著水平为 $\alpha=0.05$ 。采用 Sigmaplot10.0 和 Microsoft Visio 2007 辅助作图。

2 结果与分析

2.1 不同时期冻土厚度变化

由于 4 月积雪融化完全、冻土解冻完全,只将 1、3 月份的冻土厚度列入表 3。从表中可看出,冻结期 1 月农田和撂荒地生态系统的冻土厚度(75.0—135.0cm)高于荒漠生态系统(0.1—7.4cm);近地面气温(10cm 大气温度)与 5cm 土壤温度均高于荒漠生态系统。从 1 到 3 月期间,农田和撂荒地生态系统冻土厚度明显下

表 3 不同时期冻土厚度及温度变化

Table 3 Changes of depth of seasonal frozen soil and temperature in different periods

生态系统类型 Ecosystem type	样地 Sample	1 月 Jan.			3 月 Mar.		
		T_0 /℃	T_{-5} /℃	冻土厚度 Depth/cm	T_0 /℃	T_{-5} /℃	冻土厚度 Depth/cm
农田生态系统 Farmland ecosystem	50a 棉田 50a Cotton field	-10.44	-9.98	75.0	0.66	0.3	4.8
	9a 棉田 9a Cotton field	-14.66	-12.65	84.0	-2.9	-3.7	3.3
撂荒地生态系统 Abandoned land ecosystem	7a 撂荒地 7a Abandoned land	-14.00	-12.67	85.0	-2.1	-2	3.4
	3a 撂荒地 3a Abandoned land	-10.67	-8.63	135.0	3.63	-0.94	7
荒漠生态系统 Desert ecosystem	胡杨 Populus euphratica	-18.26	-16.57	3.2	-0.79	-2.52	2.3
	芦苇 Phragmites australis	-23.72	-21.67	0.1	-0.85	-3.64	0.1
	沙漠 Desert	-19.96	-21.25	7.4	-5.69	-4.65	6.5

T_0 : 近地面气温 Air temperature near soil surface; T_{-5} : 5cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth

降,相对于荒漠生态系统的冻土厚度减小程度较大,这是因为农田和撂荒地生态系统的含水量较高(表6),且在1—3月期间,农田和撂荒地生态系统近地面气温增温幅度、5cm地温增温幅度分别为11.1—14.3℃、7.69—10.67℃,均低于荒漠生态系统(近地面、5cm地温增温幅度为14.27—22.87℃和14.05—18.03℃)。由此可见,冻融期间,随着温度升高,土体中的地下冰发生融化,消耗了大量热量,使冻结期时冻土厚度高的地区温度变化小于冻土厚度低的地区,表现为:农田和撂荒地生态系统增温幅度低于没有人类干扰的荒漠生态系统,而冻土厚度变化却高于后者。

为了定量说明温度升高对冻土厚度变化的影响,分别将3种生态系统冻融期间冻土厚度的变化值与近地面气温和5cm土壤温度的变化值做比值(表4)。

表4 每摄氏度冻土厚度变化率

Table 4 Seasonal frozen soil depth change rate at per degree celsius

生态系统类型 Ecosystem type	$\Delta D / \Delta T_0 / (cm/^\circ C)$	$\Delta D / \Delta T_{-5} / (cm/^\circ C)$
农田生态系统 Farmland ecosystem	6.586	7.940
撂荒地生态系统 Abandoned land ecosystem	7.920	12.146
荒漠生态系统 Desert ecosystem	0.038	0.039

ΔD :冻土厚度变化 Change of depth of seasonal frozen soil; ΔT_0 :近地面气温变化 Change of air temperature near soil surface; ΔT_{-5} :5cm土壤温度变化 Change of soil temperature at 5cm depth

所有生态系统地温变化引起的冻土厚度变化率均高于气温变化引起的冻土厚度变化率(表4),表明地温更能反映冻土对外界热干扰反映的敏感程度及自身热稳定性。农田和撂荒地生态系统每摄氏度冻土厚度变化率(7.940—12.146cm/℃)高于荒漠生态系统(0.039 cm/℃),说明在干旱区季节性冻土区随着气候的变暖,受人类干扰大的生态系统对外界热干扰的敏感性更高,而自身热稳定性更差。

2.2 冻土厚度的影响因子

将各样地1月份、3月份冻土厚度分别与近地面气温,5cm和10cm土壤温度及土壤含水量做相关分析(表5)。从表中可知,不同月份冻土厚度与环境因子的相关性存在差异。其中,冻结期1月份的冻土深度与0—5cm土壤含水量为弱的正相关,与5—10cm土壤温度和土壤含水量显著正相关,与近地面气温、5cm土壤温度达到极显著正相关。然而,冻融初期(3月)的冻土厚度与上述环境因子均未达到显著水平,这可能是由于观测时不同样地冻土厚度差异不大所致(表3)。

表5 不同月份冻土厚度与环境因子的相关关系

Table 5 Correlativity between depth of frozen soil and environmental factors in different months

月份 Month	T_0	T_{-5}	T_{-10}	W_{-5}	W_{-10}
1月 January	0.882 **	0.912 **	0.824 *	0.709	0.767 *
3月 March	0.104	0.317	0.198	0.118	0.289

T_0 :近地面气温 Air temperature near soil surface; T_{-5} :5cm土壤温度 Soil temperature at 5cm depth; T_{-10} :10cm土壤温度 Soil temperature at 10cm depth; W_{-5} :0—5cm土壤含水量 Soil moisture at 5cm depth; W_{-10} :5—10cm土壤含水量 Soil moisture at 10cm depth; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$

2.3 冻土土壤的理化性质变化

土壤冻融作用的本质是土体内水分体积变化引起的土壤特性的变化,即冻融改变了土壤结构^[24],并对土壤的化学性质、物理性质和生物学性质都产生重要影响^[36]。1—4月,随冻土厚度持续降低,土壤含水量在所有生态系统中均表现出冻融期比冻结期增加的趋势(表6),这是因为冻融期积雪的融化,增加了土壤含水量。

表6中,土壤有机质含量在冻结期至冻融期结束减少,是由于在冻结期,冬季雪覆盖有效地隔离土壤与大气,对土壤形成良好的保温层^[37],使土壤中仍有生命活动^[38],且冬季无枯落物进入土壤补充土壤有机质,而微生物的活动又持续消耗着土壤中的有机质含量。

农田、荒漠和撂荒地生态系统的微生物总数、土壤呼吸速率变化趋势不同。在撂荒地生态系统中,微生物

总数、土壤呼吸速率表现为先减少后增加,而在农田和荒漠生态系统中,微生物总数、土壤呼吸速率持续增加。这是因为土壤解冻初期撂荒地生态系统土壤含水量过多(35.19%),抑制了微生物呼吸,而冻融期农田和荒漠生态系统随着融化雪水补给土壤水分,达到微生物活动适应的土壤含水量(11.52%—23.09%),进而促进微生物的活动。

表 6 农田、撂荒地、荒漠生态系统土壤环境因子

Table 6 Soil environmental factors in farmland, abandoned and desert ecosystems

生态系统类型 Ecosystem type	月份 Month	0—5cm 土壤含水量 Soil moisture in 0—5cm layer/%	土壤有机质 Organic matter /(g/kg)	微生物总数 Total microbial number /(个/g)	土壤呼吸速率 Rs /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
农田生态系统 Farmland ecosystem	1 月 Jan.	15.62	6.20	325455	0.62±0.036
	3 月 Mar.	28.48	5.79	588365	0.56±0.048
	4 月 Apr.	22.11	5.60	426238	0.90±0.116
撂荒地生态系统 Abandoned land ecosystem	1 月 Jan.	17.13	7.15	200548	0.47±0.035
	3 月 Mar.	35.19	5.97	188708	0.20±0.063
	4 月 Apr.	27.3	5.66	528882	0.48±0.172
荒漠生态系统 Desert ecosystem	1 月 Jan.	11.43	3.87	68574	0.17±0.030
	3 月 Mar.	11.52	4.52	299492	0.31±0.097
	4 月 Apr.	23.09	3.52	319650	0.54±0.113

土壤呼吸速率数据为“平均值±标准误差”

2.4 冻土厚度与土壤呼吸的关系

在艾比湖地区,4 月土壤解冻完全,故在图 3 中只存在 1 月和 3 月的冻土厚度与土壤呼吸速率变化值。结合表 4 和图 3 可以发现,农田和撂荒地生态系统冻土厚度减小幅度大于荒漠生态系统(前者为 70.2—128cm,后者为 0—0.9cm),而土壤呼吸速率变化则表现为:农田和撂荒地生态系统减小,荒漠生态系统增加。然而随着土壤解冻完全,所有生态系统土壤呼吸速率逐渐增高。说明在冻土解冻初期,有无人干扰的生态系统土壤呼吸对环境的变化响应不同,而随着时间的推移,两者的响应趋于一致,即:土壤冻融完全,会向大气中释放碳。进一步分析不同月份的土壤呼吸速率和冻土厚度值,发现在冻结期,土壤呼吸速率与冻土厚度呈显著正相关($R=0.884, P<0.05$),而解冻期初期土壤呼吸速率与冻土厚度之间不存在显著相关关系($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 冻土厚度变化的温度响应特征

冻土的冻结时间受温度的影响比较大,且同稳定冻结的温度相关性显著^[39]。艾比湖地区,冻结期冻土厚度与温度、土壤含水量相关性显著(表 5, $P<0.05$),这和甘肃陇东地区开展的研究结果一致^[39]。然而与杨小利和王劲松在西北地区的研究结果稍有不同^[40],他们认为在影响冻土的因素中,干旱区以冬季气温较为显著,而半干旱半湿润区则以地温和封冻前的土壤水分的影响更为显著。

在冻结期时仅从所有样地来看,冻土厚度与温度呈显著正相关,却与许多研究结果不同^[39],这主要是由不同植被类型、不同土地利用方式下土壤理化性质不同等多种因素共同引起的,同时也说明研究区是个复杂的生态系统,多种因素共同影响着其生态过程。然而从季节变化来看,随着天气变暖,冻土温度增加,土壤会

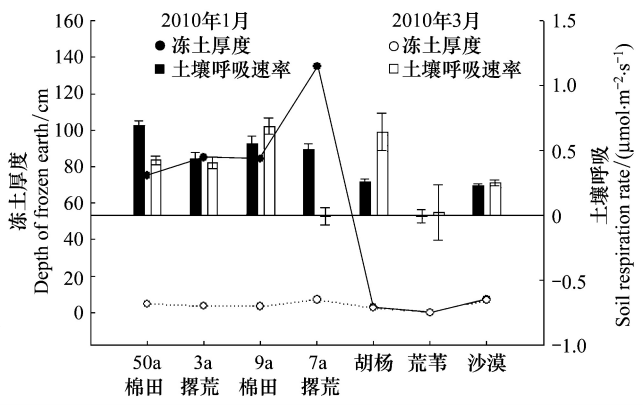


图 3 2010 年 1 月冻土厚度和土壤呼吸速率,2010 年 3 月冻土厚度和土壤呼吸速率

Fig.3 Depth of frozen soil and soil respiration rate in January 2010, as well as depth of frozen soil and soil respiration rate in March 2010

50a 棉田 50a Cotton field; 9a 棉田 9a Cotton field; 7a 撂荒地 7a Abandoned land; 3a 撂荒地 3a Abandoned land; 胡杨 Populus euphratica; 芦苇 Phragmites australis; 沙漠 Desert

释放更多的 CO_2 , 加速气候变暖过程。

气候变化背景下对此复杂的生态系统过程必然有更复杂的潜在影响。如气候变暖会推后土壤冻结时间, 并使融化时间提前^[41], 使得霜冻日天数呈减少趋势; 暖日、生长期和无霜期天数呈增长趋势, 严重影响植物和作物的生长, 同时气候变化使得干旱区热害与冷害等极端气温事件增加, 光照资源显著减少, 水资源严重缺乏和分布不均, 造成农业生产不稳定性增加^[42]。另一方面, 也使荒漠植被空间分布格局和植物适宜分布范围改变^[43], 这将会影响植物演替方向和演替格局。

3.2 冻结-冻融期土壤因子的变化

杨万勤等^[23]认为, 冬季的低温、雪被和季节性冻融循环可能通过物理、化学和生物作用对土壤生物活性、凋落物分解过程、C/N 矿化、土壤物理和养分过程以及植物群落的养分内循环等关键生态学过程施加不同程度的影响。因此, 在冻融循环中, 冻土厚度的变化会影响土壤含水量、土壤有机质、土壤微生物数量的变化, 而这些因子又正反馈于土壤呼吸速率的变化。艾比湖地区, 随着冻结层和积雪的融化过程, 冻融期土壤含水量比冻结期增加。然而, 在冻融期的不同阶段, 不同生态系统中土壤含水量的变化不同, 具体表现为农田和撂荒地生态系统土壤含水量在土壤解冻前期比解冻完全期高, 而荒漠生态系统则相反, 这可能是由两种生态系统不同的土壤质地所导致。

随着温度升高, 冻土厚度减少, 艾比湖地区土壤有机质含量表现出减小的趋势(减小率为 13.63%), 这是因为冻结期的冬季雪覆盖促进了土壤有机碳、氮的矿化^[44], 而土壤微生物数量表现出增加的趋势(增加率为 54.9%)。是微生物对融雪的强烈反映^[45]。季节性冻融循环能破坏凋落物的细胞, 提高凋落物的可降解性^[46], 释放的碳和养分为存活的土壤生物群落提高了有效基质^[47], 同时, 冬季低温期间反复的冻融循环能改变土壤物理结构和含水量分布, 促进土壤微生物活性以及有机质矿化^[48]。

将研究区冻融期土壤微生物与土壤呼吸变化量进行拟合(图 4), 可以看出, 研究区土壤微生物变化量和土壤呼吸速率变化量具有较好的二次方程拟合($R^2 = 0.6137$), 即温度升高、冻土厚度减少对土壤微生物的影响会极大地引起土壤呼吸速率的变化。

3.3 温度升高对季节性冻土区的影响

在前面的分析中, 冻结期土壤呼吸速率与冻土厚度显著正相关, 而在解冻期两者弱相关, 土壤解冻完全时土壤呼吸速率比冻结期时明显增加。研究结果与 Ohkubo 等^[49]在日本的研究不同, 他认为由于研究区是微弱的碳源, 故没有发现土壤呼吸和冻土深度存在显著的相关性。然而通过相关分析发现, 除了冻结期, 其他时期土壤温度、土壤含水量与土壤呼吸均无显著相关性, 表明土壤温度、含水量对土壤呼吸速率没有直接影响, 影响土壤呼吸的还有其它因子。可见, 冻融循环引起的季节冻土中温度、冰(水)、营养物质、含盐度、pH 和 Eh 等因素的季节性振荡^[50]和日冻融循环^[25]引起的日振荡使得冻融期间土壤呼吸过程变得更为复杂。

农田和撂荒地生态系统的土壤含水量在冻融初期比冻结期增加了 82.3%—105.4%, 过多的水分抑制了微生物活动, 使土壤呼吸速率比冻结期小; 但随着温度持续升高, 土壤蒸发量增加, 土壤含水量减少, 促进微生物活动, 最终使土壤呼吸速率增加。在荒漠生态系统中, 季节性冻融循环(冻结期—冻融期)使土壤含水量持续增加, 加之融雪水将地面营养物质带入土壤, 促进微生物活动, 增加了土壤呼吸速率。

在整个干旱区冬季的季节性冻融循环期间, 农田和撂荒地生态系统土壤解冻初期的土壤呼吸速率均低于

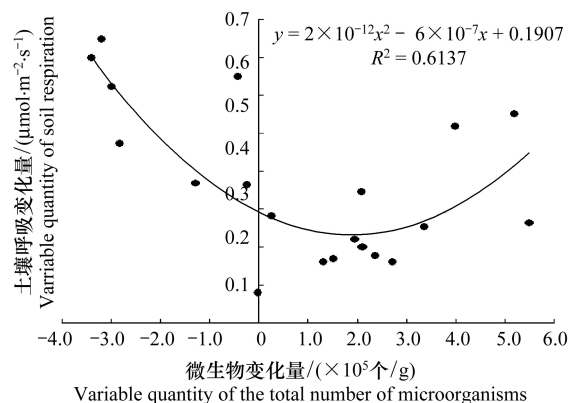


图 4 土壤微生物变化量和土壤呼吸速率变化量的拟合曲线

Fig. 4 Fitted curve about variable quantity of soil microorganism and soil respiration rate

图中横坐标负半轴表示微生物减小区域, 正半轴表示微生物增加区域

冻结期和土壤解冻完全期值,而荒漠生态系统的呼吸速率值,自冻结期到冻融期结束持续增加。表明在季节性冻土区,不同生态系统类型的土壤呼吸速率对冻土厚度变化的响应机制不同,脆弱的生态系统在整个冻融期会更明显地增加土壤碳排放,如荒漠生态系统的增幅($0.37\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)高于撂荒地和农田生态系统的增幅($0.01\text{—}0.28\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。Wang 等^[51]在中国北方森林-草原生态过渡带的不同生态系统中研究发现,冻结期的土壤呼吸速率约为 $0.10\text{—}0.29\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,解冻期的速率约为 $0.40\text{—}1.00\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,解冻期约是冻结期的 1.38—10 倍,变幅很大。王琼等^[52]研究发现一次冻融土壤呼吸速率显著低于多次冻融土壤呼吸速率,说明早春冻土融化阶段土壤呼吸速率高于深冬冻结期土壤呼吸速率。而今全球持续变暖,也影响着干旱区冬季土壤的冻融过程,若冻土大面积融化,土壤呼吸速率增加,会消耗较多的土壤碳储量,势必增加空气中的 CO_2 量,加剧全球变暖,正反馈影响着全球的升温趋势。这也和 Micken 等^[53]在北极苔原的研究结果相同,即温度升高冻土融化后会增加土壤微生物活动,从而增加土壤碳排放。

综上所述,在冻结-冻融期对艾比湖地区不同植被类型样地的土壤呼吸速率进行定位观测,研究发现:土壤温度在冻结期与冻土厚度呈显著正相关($P<0.05$),而解冻期两者相关性则不显著($P>0.05$);随着气候变暖,干旱区季节性冻土区人类干扰大的生态系统对外界热干扰的敏感性更高,自身热稳定性更差;脆弱的生态系统在整个冻融期会更明显地增加土壤碳排放,与气候变暖形成正反馈;冻土厚度在不同时期影响土壤呼吸速率的程度不同,冻结期土壤呼吸速率与冻土厚度呈显著正相关($R=0.884, P<0.05$),而解冻期初期土壤呼吸速率与冻土厚度之间不存在显著相关关系($P>0.05$)。气候变暖会降低研究区冻土深度、缩短其冻结持续时间,增加土壤碳排放速率(约为 $0.14\text{—}0.37\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),从而影响生态系统碳循环过程。

然而,由于野外观测条件的限制,无法测出解冻时温度逐渐升高、冻土厚度逐渐减少对土壤呼吸速率的影响,也没能得出土壤呼吸速率与冻土厚度从正相关到没有相关性的临界值。同时在测量期的 3—4 月,土壤存在白天融而夜间冻的短期冻融循环,可能影响了对冻土深度等土壤因子的准确判断。

致谢:感谢艾比湖湿地国家级自然保护区工作人员在野外工作中给予的帮助。感谢中国科学院生态与地理研究所李彦研究员对本文写作的帮助。

References:

- [1] Li X, Cheng G D. Review on the Interaction Models between Climatic System and Frozen Soil. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24 (3): 316-320.
- [2] Pavlov A V. Current change of climate and permafrost in the Arctic and sub-Arctic of Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1994, b: 101-110.
- [3] Wang C H, Dong W J, Wei Z G. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(5): 523-531.
- [4] Li X, Jin R, Pan X D, Zhang T J, Guo J W. Changes in the near-surface soil freeze-thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 33-42.
- [5] IPCC. The Physical Science Basis (UNEP and WHO). *Climate Change 2007*. 2007. [2012-06-17]. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch4s4-7-2-3.html.
- [6] Duttaa K, Schuur E A G, Neff J C, Zimov S A. Potential carbon release from permafrost soils of Northeastern Siberia. *Global Change Biology*, 2006, 12: 2336-2351.
- [7] Schuur E A G, Vogel J G, Crummer K G, Lee H, Sickman J O, Osterkamp T E. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra. *Nature*, 2009, 459: 556-559.
- [8] Tarnocai C, Canadell J G, Schuur E A G, Kuhry P, Mazhitova G, Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23, GB2023, doi: 10.1029/2008GB003327.
- [9] Hua L. Study says Arctic forest expansion would result in permafrost carbon dioxide released. (2012-06-20) [2012-09-02]. http://www.nsf.gov.cn/Portal0/InfoModule_385/49385.htm.
- [10] Goulden M L, Wofsey S C, Harden J W, Trumbore S E, Crill P M, Gower S T, Fries T, Daube B C, Fan S-M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger J W. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science*, 1998, 279(5348): 214-217.
- [11] Lee H, Schuur E A G, Inglett K S, Lavoie M, Chanton J P. The rate of permafrost carbon release under aerobic and anaerobic conditions and its potential effects on climate *Global Change Biology*. 2012, 18(2): 515-527.
- [12] Boike J, Langer M, Lantuit H, Muster S, Roth K, Sachs T, Overduin P, Westermann S, McGuire A D. Permafrost-physical aspects, carbon cycling, databases and uncertainties. *Recarbonization of the Biosphere*, 2012, 159-185.

- [13] Der Beek T A, Teichert E. Global simulation of permafrost distribution in the past, present, and future using the frost number method// Proceedings, NICOP (Vol. I), 2008: 71-76.
- [14] Cheng G D. Glaciology and geocryology of China in the past 40 years: progress and prospect. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(3): 213-226.
- [15] Osterkamp T E. The recent warming of permafrost in Alaska. Global and Planetary Change. 2005, 49(3/4): 187-202.
- [16] Jin H, Li S, Cheng G, Wang S L, Li X. Permafrost and climate change in China. Global Planet Change, 2000, 26: 387-404.
- [17] Burke E J, Hartley I P, Jones C D. Uncertainties in the global temperature change caused by carbon release from permafrost thawing. The Cryosphere Discuss, 2012, 6: 1367-1404.
- [18] Trucco C, Schuur E A G, Natali S M, Belshe E F, Bracho R, Vogel J. Seven-year trends of CO₂ exchange in a tundra ecosystem affected by long-term permafrost thaw. Journal of Geophysical Research, vol. 117, G02031, 12 PP., 2012 doi:10.1029/2011JG001907.
- [19] Yang Z P, Ou Y H, Xu X L, Zhao L, Song M H, Zhou C P. Effects of permafrost degradation on ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30: 33-39.
- [20] Guo D X. Frozen ground of China. Lan Zhou: Gansu education press, 1990.
- [21] Zhao L, Ping C L, Yang D Q, Cheng G D, Ding Y J, Liu S L. Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China. Global Planet Change. 2004, 43: 19-31.
- [22] Wang G P, Liu J S, Zhao H Y, Wang J D, Yu J B. Phosphorus sorption by freeze-thaw treated wetland soils derived from a winter-cold zone (Sanjiang Plain, Northeast China). Geoderma, 2007, 138: 153-161.
- [23] Yang W Q, Wu F Z, Z J. Advances in wintertime ecological process in the seasonal frozen area//Dong M, Wei G E. A spectrum of ecological studies. Chong Qing: Southwest China Normal University Press, 2009: 269-274.
- [24] Yang H L, Qin J H, Sun H. A review: response of soil CO₂ and N₂O Emissions to Freeze-thaw pattern change. Soil, 2010, 42(4): 519-525.
- [25] Wang J Y, Song C C, Wang X W, Wang L L. Progress in the study of effect of freeze-thaw processes on the organic carbon pool and microorganisms in Soils. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 442-425.
- [26] Li Q, Sun S F. Development of frozen soil model. Advances in Earth Science, 2006, 21(12): 1339-1349.
- [27] Zhao L, Liu G Y, Jiao K Q, Li R, Qiao Y P, Chien-Lu P. Variation of the permafrost in the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains since 1991. Journal of Glaciology and geocryology, 2010, 32(2): 223-230.
- [28] Wang X W, Li X Z, Lv J J, Sun J, Li Z M, Wu Z F. Effects of temperature on the carbon mineralization of peat in the permafrost wetland in the Da Xing'an Mountains. Quaternary Sciences, 2010, 30(3): 591-597.
- [29] Guo D L, Wang H J, Li D. A projection of permafrost degradation on the Tibetan Plateau during the 21st century. Journal of Geophysical Research, VOL. 117, D05106, doi: 10.1029/2011JD016545, 2012.
- [30] Chen S J, Hou P, Li W H. Comprehensive Scientific Survey in Ebinur Lake Wetlands Nature Reserve. Xin Jiang Science and Technology Press, 2006.
- [31] Wang Z G. Strong blizzard raid Toto Township in Jinghe and the snow thickness is more than 60 cm. (2010-02-25) [2011-04-03]. <http://www.xjboz.gov.cn/html/2010-02/10-02-25-TV3I.html>. 2010-2-25.
- [32] Guo Z R, Jing E C, Nie Z L, Jiao P C, Dong H. Analysis on the characteristics of soil moisture transfer during freezing and thawing period. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 290-294.
- [33] Wang C H. Freeze-thaw cycles and Frozen Regions Construction in the Northeastern China. Beijing: Science Press, 1999.
- [34] Editor in Chief of Chinese Academy of Sciences in Nanjing Institute of Soil. Soil physical and chemical analysis. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1977.
- [35] Shen P, Fan X R, Li G W. Microbiology experiments. Beijing: Higher education press, 2003: 50-100.
- [36] Piao H C, Yuan Z Y, Liu G S, Hong Y T. The effect of abiotic stress on the soil properties. Soil and Fertilizer, 1998(3): 17-21.
- [37] 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 American Journal, 2003, 67: 1234-1242.
- [38] Panikov N S, Sizova M V. Growth kinetics of microorganisms isolated from Alaskan soil and permafrost in solid media frozen down to -35 °C. FEMS Microbial Ecology, 2007, 59: 500-512.
- [39] Pu J Y, Wang W T, Yao X Y, Wang Y L. Effects of climate warming on seasonal frozen soil in east Gansu. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(9): 1562-1566.
- [40] Yang X L, Wang J S. The change characteristics of maximum frozen soil depth of seasonal frozen soil in northwest China. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2): 238-243.
- [41] Chen B, Li J P. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short-term frozen soil in China in recent 50 years. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 3(32): 432-443.
- [42] Sun Y, Zhang X Q, Zheng D. The impact of climate warming on agricultural climate resources in the arid region of northwest China. Journal of natural resources, 2010, 25(7): 1153-1162.
- [43] Wu J G. Effects of climate changes on distribution of seven desert plants in China. Chin J Appl Environ Biol, 2010, 16(5): 650-661.

- [44] Matzner E, Borken W. Do freeze-thaw events enhance C and N losses from soils of different ecosystem? A review. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59: 274-284.
- [45] Monson R K, Lipson D L, Burns S P, Turnipseed A A, Delany A C, Williams M W, Schmidt S K. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, 2006, 439: 711-714.
- [46] Taylor B R. Does repeated freezing and thawing accelerate decay of leaf litter?. *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, 20: 657-665.
- [47] Lipson D A, Schmidt S K. Seasonal changes in an alpine bacterial community in the Colorado Rocky Mountains. *Applied Environmental Microbiology*, 2004, 70: 2867-2879.
- [48] Don A, Kalbitz K. Amounts and degradability of dissolved organic carbon from foliar litter at different decomposition stages. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 2171-2179.
- [49] Ohkubo S, Iwata Y, Hirota T. Influence of snow-cover and soil-frost variations on continuously monitored CO₂ flux from agricultural land. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 165(15): 25-34.
- [50] Gilichinsky D A. Permafrost model of extraterrestrial habit//Homeck G, Baumstark-Khan C eds *Astrobiology: the quest for the conditions of life*. Springer Berlin, 2001: 125-14.
- [51] Wang W, Peng S S, Wang T, Fang J Y. Winter soil CO₂ efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, north China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42: 451-458.
- [52] Wang Q, Fan Z P, Wang M G, Zhang X H, Sun X K, Zeng D H. Effects of freezing-thawing cycle on soil respiration under different land-use patterns in Keriqin Sandy Lands. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(7): 1333-1339.
- [53] Mickan 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: 1785-1795.

参考文献:

- [1] 李新, 程国栋. 冻土-气候关系模型评述. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 316-320.
- [3] 王澄海, 董文杰, 韦至刚. 青藏高原季节性冻土年际变化的异常特征. *地理学报*, 2001, 56(5): 523-531.
- [9] 华凌. 研究称北极森林扩张或致冻土下二氧化碳释放. (2012-06-20) [2012-09-02]. http://www.nsf.gov.cn/Portal0/InfoModule_385/49385.htm.
- [14] 程国栋. 中国冰川学和冻土学研究 40 年进展和展望. *冰川冻土*, 1998, 20(3): 213-226.
- [20] 郭东信. 中国冻土. 兰州: 甘肃教育出版社, 1990.
- [23] 杨万勤, 吴福忠, 张健. 季节性冻土区冬季生态过程研究进展//董鸣, 维尔格. 生态学文集. 重庆: 西南师范大学出版社, 2009: 269-274.
- [24] 杨红露, 秦纪洪, 孙辉. 冻融交替对土壤 CO₂ 及 N₂O 释放效应的研究进展. *土壤*, 2010, 42(4): 519-525.
- [25] 王娇月, 宋长春, 王宪伟, 王丽丽. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 442-452.
- [26] 李倩, 孙淑芬. 冻土模式的改进和发展. *地球科学进展*, 2006, 21(12): 1339-1349.
- [27] 赵林, 刘广岳, 焦克勤, 李韧, 乔永平, Chen-Lu Ping. 1991—2008 年天山乌鲁木齐河源区多年冻土的变化. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 223-230.
- [28] 王宪伟, 李秀珍, 吕久俊, 孙菊, 李宗梅, 吴志丰. 温度对大兴安岭北坡多年冻土湿地泥炭有机碳矿化的影响. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 591-597.
- [30] 陈蜀江, 侯平, 李文华. 新疆艾比湖湿地自然保护区综合科学考察. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006.
- [31] 王志刚. 强暴雪突袭精河县托托乡降雪厚度已超过 60 厘米. (2010-02-25) [2011-04-03]. <http://www.xjboz.gov.cn/html/2010-02/10-02-25-TV3I.html>.
- [32] 郭占荣, 荆恩春, 聂振龙, 焦鹏程, 董华. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析. *水科学进展*, 2002, 13(3): 290-294.
- [33] 王春鹤. 中国东北冻土区融冻作用与寒区开发建设. 北京: 科学出版社, 1999.
- [34] 中国科学院南京土壤研究所主编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1977.
- [35] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验. 北京: 高等教育出版社, 2003: 50-100.
- [36] 朴河春, 袁芷云, 刘广深, 洪业汤. 非生物应力对土壤性质的影响. *土壤肥料*, 1998(3): 17-21.
- [39] 蒲金涌, 王位泰, 姚小英, 王彦凌. 甘肃陇东地区季节冻土变化对气候变暖的响应. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1562-1566.
- [40] 杨小利, 王劲松. 西北地区季节性最大冻土深度的分布和变化特征. *土壤通报*, 2008, 39(2): 238-243.
- [41] 陈博, 李建平. 近 50 年来中国季节性冻土与短时段冻土的时空变化特征. *大气科学*, 2008, 3(32): 432-443.
- [42] 孙杨, 张雪芹, 郑度. 气候变暖对西北干旱区农业气候资源的影响. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1153-1162.
- [43] 吴建国. 气候变化对 7 种荒漠植被分布的潜在影响. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(5): 650-661.
- [52] 王琼, 范志平, 王满贵, 张新厚, 孙学凯, 曾德慧. 冻融交替对科尔沁沙地不同土地利用方式土壤呼吸的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(7): 1333-1339.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.22 Nov., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data LIU Fang, LI Sheng, LI Diqiang (7047)
- A research review of landscape service LIU Wenping, YU Zhenrong (7058)
- Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem CHEN Minpeng, XIA Xu, LI Yinkun, MEI Xurong (7067)

Autecology & Fundamentals

- Effect of different stubble height treatments on the annual growth index and physiological characteristics of *Tetraena mongolica* in two growing seasons WANG Zhen, ZHANG Liwen, YU Yi, et al (7078)
- Photosynthetic characteristics of an endangered species *Tetrameles nudiflora* under different light and water conditions DENG Yun, CHEN Hui, YANG Xiaofei, et al (7088)
- The compensation capacity of tillering and production of main stem nodes in rice WEI Ming, LI Dongxia (7098)
- Simulation of leaf area and dry matter production of tobacco leaves based on product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation ZHANG Mingda, LI Meng, HU Xueqiong, et al (7108)
- Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al (7116)
- Effects of the *Larix gmelinii* grown under different light intensities on the development and defensive enzyme activities of *Lymantria dispar* larvae LU Yifang, YAN Junxin, LI Shuangwen, et al (7125)
- Biological control efficiency of *Orius similis* Zheng (Hemiptera: Anthocoridae) on *Frankliniella occidentalis* (Pergande) under different spatial and caged conditions MO Lifeng, ZHI Junrui, TIAN Tian (7132)
- Preliminary study on scavenging mechanism of dissolved aluminum by phytoplankton WANG Zhaowei, REN Jingling, YAN Li, et al (7140)
- Leaf-form characteristics of plants in *Quercus aquifolioides* community along an elevational gradient on the Balang Mountain in Wolong Nature Reserve, Sichuan, China LIU Xingliang, HE Fei, FAN Hua, et al (7148)
- Comparison of shrimp density between the Minjiang estuary and Xinhua bay during spring and summer XU Zhaoli, SUN Yue (7157)
- The feeding selectivity of an herbivorous amphipod *Ampithoe valida* on three dominant macroalgal species of Yundang Lagoon ZHENG Xinqing, HUANG Lingfeng, LI Yuanchao, et al (7166)

Population, Community and Ecosystem

- Effects of four different agricultural prevention and control measures on rice yellow stem borer *Tryporyza incertulas* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) ZHANG Zhenfei, HUANG Bingchao, XIAO Hanxiang, et al (7173)
- Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (7181)
- Ecosystem health assessment based on diagnosis CAI Xia, XU Songjun, CHEN Shanhao, et al (7190)
- The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: a case study to Jiaxing Paddy Field LI Zimin, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun (7197)
- Application of a free search-based projection pursuit model in investigating reed in wetlands LI Xinhua, ZHAO Chengyi (7204)

- Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains LIU Bingru, ZHANG Xiuzhen, HU Tianhua, et al (7211)
- Effects of shrub encroachment on biomass and biodiversity in the typical steppe of Inner Mongolia PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (7221)
- Research on diaspore morphology and species distribution of 80 plants in the hill-gully Loess Plateau WANG Dongli, ZHANG Xiaoyan, JIAO Juying, et al (7230)
- Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling LIU Zhensheng, GAO Hui, TENG Liwei, et al (7243)
- Characteristic of phytoplankton primary productivity and influencing factors in littoral zone of Lake Taihu CAI Linlin, ZHU Guangwei, LI Xiangyang (7250)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China QIN Lu, LV Guanghui, HE Xuemin, et al (7259)
- Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field ZHANG Yanjun, GUO Shengli, LIU Qingfang, et al (7270)
- Resource and Industrial Ecology**
- Economic evaluation and protection of *Amygdalus mira* genetic resource ZHANG Lirong, MENG Rui, LU Guobin (7277)
- Meteorological grading indexes of water-saving irrigation for cotton XIAO Jingjing, HUO Zhiguo, YAO Yiping, et al (7288)
- Research Notes**
- Sprouts characteristic structure of *Taxus yunnanensis* plantation SU Lei, SU Jianrong, LIU Wande, et al (7300)
- The effects of forest conversion on soil N mineralization and its availability in central jiangxi subtropical region SONG Qingni, YANG Qingpei, YU Dingkun, et al (7309)

《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 杨志峰

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 33 卷 第 22 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 22 (November, 2013)

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

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元