

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

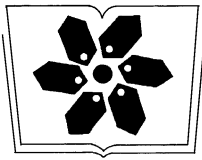
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第18期 Vol.31 No.18 **2011**

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 31 卷 第 18 期 2011 年 9 月 (半月刊)

目 次

高寒矮嵩草草甸冬季 CO ₂ 释放特征	吴 琴, 胡启武, 曹广民, 等 (5107)
开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响	黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等 (5113)
施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响	祁 瑜, 黄永梅, 王 艳, 等 (5121)
浙江天台山甜槠种群遗传结构的时空自相关分析	祁彩虹, 金则新, 李钧敏 (5130)
大兴安岭林区不同植被对冻土地温的影响	常晓丽, 金会军, 于少鹏, 等 (5138)
樟子松树轮不同组分的稳定碳同位素分析	商志远, 王 建, 崔明星, 等 (5148)
内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算	柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等 (5159)
杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响	史 绮, 焦 锋, 陈 莹, 等 (5171)
火干扰对小兴安岭落叶松-苔草沼泽温室气体排放的影响	于丽丽, 牟长城, 顾 韩, 等 (5180)
黄河中游连伯滩湿地景观格局变化	郭东罡, 上官铁梁, 白中科, 等 (5192)
黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响	李 婷, 赵世伟, 张 扬, 等 (5199)
我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性	祖元刚, 李 冉, 王文杰, 等 (5207)
黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子	高会议, 郭胜利, 刘文兆 (5217)
宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性	安韶山, 李国辉, 陈利顶 (5225)
岩溶山区和石漠化区表土孢粉组合的差异性——以重庆市南川区为例	郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友 (5235)
夏蜡梅及其主要伴生种叶的灰分含量和热值	金则新, 李钧敏, 马金娥 (5246)
苏柳 172 和垂柳对 Cu ²⁺ 的吸收特性及有机酸影响	陈彩虹, 刘治昆, 陈光才, 等 (5255)
导入 <i>TaNHX2</i> 基因提高了转基因普那菊苣的耐盐性	张丽君, 程林梅, 杜建中, 等 (5264)
空气湿度与土壤水分胁迫对紫花苜蓿叶表皮蜡质特性的影响	郭彦军, 倪 郁, 郭芸江, 等 (5273)
黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响	邓振镛, 张 强, 王 强, 等 (5281)
咸阳地区近年苹果林地土壤含水量动态变化	赵景波, 周 旗, 陈宝群, 等 (5291)
苗药大果木姜子挥发油成分变化及其地理分布	张小波, 周 涛, 郭兰萍, 等 (5299)
环境因子对小球藻生长的影响及高产油培养条件的优化	丁彦聪, 高 群, 刘家尧, 等 (5307)
不同基质对北草蜥和中国石龙子运动表现的影响	林植华, 樊晓丽, 雷焕宗, 等 (5316)
安徽沿江浅水湖泊越冬水鸟群落的集团结构	陈锦云, 周立志 (5323)
黑胸散白蚁肠道共生锐滴虫目鞭毛虫的多样性分析与原位杂交鉴定	陈 文, 石 玉, 彭建新, 等 (5332)
基于熵权的珠江三角洲自然保护区综合评价	张林英, 徐颂军 (5341)
专论与综述	
中小尺度生态用地规划方法	荣冰凌, 李 栋, 谢映霞 (5351)
土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展	陈 朝, 吕昌河, 范 兰, 等 (5358)
海洋浮游植物与生物碳汇	孙 军 (5372)
多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展	孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 等 (5379)
生源要素有效性及生物因子对湿地土壤碳矿化的影响	张林海, 曾从盛, 仝 川 (5387)
生态网络分析方法研究综述	李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 等 (5396)
研究简报	
不同群落中米氏冰草和羊草的年龄结构动态	金晓明, 艾 琳, 刘及东, 等 (5406)
主题分辨率对 NDVI 空间格局的影响	黄彩霞, 李小梅, 沙晋明 (5414)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-09



封面图说: 在树上嬉戏的大熊猫——大熊猫是中国的国宝, 自然分布狭窄, 数量极少, 世界上仅分布在中国的四川、陕西、甘肃三省的部分地区, 属第四纪冰川孑遗物种, 异常珍贵。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录, 濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。瞧, 够得上“功夫熊猫”吧。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 毛 蓉, 郭跃东, 路永正. 多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展. 生态学报, 2011, 31 (18): 5379-5386.

Sun X X, Song C C, Wang X W, Mao R, Guo Y D, Lu Y Z. Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (18): 5379-5386.

多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展

孙晓新, 宋长春*, 王宪伟, 毛 蓉, 郭跃东, 路永正

(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要: 全球气候变暖导致北半球大部分多年冻土区的冻土已经开始退化。多年冻土退化对冻土区湿地 CH₄ 排放产生重要影响, 可能直接决定冻土区湿地对全球气候变暖的反馈方式。综述了近年来多年冻土退化对湿地 CH₄ 排放影响的研究。多年冻土退化导致的土壤活动层深度增加和植被类型由中生向湿生的转变都可能会大大增加冻土区湿地 CH₄ 排放量, 从而可能对全球气候变暖产生正反馈作用。但多年冻土退化导致的水文条件变化、土壤温度变化和微生物组成及活性变化对湿地 CH₄ 排放的影响却存在一定的不确定性。多年冻土退化除了影响湿地 CH₄ 排放量之外, 还可能通过改变土壤冻融过程而影响湿地 CH₄ 排放的季节分配模式。最后提出目前研究中存在的问题, 并对未来研究方向进行了展望。

关键词: 多年冻土退化; 甲烷排放; 季节分配模式; 湿地

Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review

SUN Xiaoxin, SONG Changchun*, WANG Xianwei, MAO Rong, GUO Yuedong, LU Yongzheng

Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

Abstract: In the northern hemisphere, global warming is resulting in the thawing of permafrost. Permafrost degradation would have a dramatic impact on methane emission from wetlands in the permafrost area and thus regulate the feedback effects of wetlands in relation to global warming. In this paper, we reviewed the effect of permafrost degradation on methane emission in the northern wetland ecosystem. Permafrost degradation increased the active soil layer depth and caused a shift in plant species from neutral-growing to wet-growing, which enhanced methane emission in wetlands and produced positive feedback for global warming. The effect of altered water regimes on methane emission in wetlands was different among different types of permafrost regions. In continuous and discontinuous permafrost regions, wetter soil conditions due to permafrost degradation enhanced methane emission in wetlands. However, in sporadic permafrost regions, island permafrost thawing caused wetland drought conditions, leading to the disappearance of the soil surface water and thus decreasing methane emissions. Increased soil temperature induced by permafrost degradation increased methanogenic activity and thereby accelerated methane production; however, these warmer temperatures also increased methanotrophic activities, concurrently accelerating methane oxidation. Nonetheless, the composition of methanogens and methanotrophs in wetlands was changed dramatically by permafrost degradation; thereby, with the process of permafrost degradation, the ultimate effects of soil temperature and microbial composition and activity on methane emission in wetlands remain uncertain. In addition, permafrost degradation altered the soil freeze-thawing process, and thus seasonal patterns of methane emissions in wetlands. Finally, we addressed existing gaps in the research and identified a prospect for further study.

Key Words: permafrost degradation; methane emission; seasonal pattern; wetlands

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40930527, 41001052, 40771189); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2009CB421103); 中国科学院重要方向性项目 (KZCX2-YW-JC301)

收稿日期: 2010-10-27; 修订日期: 2011-06-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songcc@neigae.ac.cn

多年冻土是指处在 0℃ 或 0℃ 以下 2 a 或更多年的土地(土壤和岩石,并包括了冰和有机物)^[1]。北半球现有多年冻土面积 $22.79 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占北半球陆地面积的 23.9%^[2]。多年冻土分布范围非常广泛,从 26°N 的喜马拉雅山至 84°N 的格陵兰岛北部都有分布^[2]。多年冻土由于冷湿的环境抑制有机物分解,导致其具有非常高的平均土壤碳含量,据最新的研究估算值,全球多年冻土区土壤碳库大约为 1672 Pg (其中 0—100 cm 为 496 Pg, 0—300 cm 为 1024 Pg, 300 cm 以下为 648 Pg), 这些有机碳约为全球地下有机碳库的 50%, 远远超过了植被(650 Pg)和大气(730 Pg)中的碳含量^[3-4]。

由于全球气候不断变暖,大部分多年冻土区的冻土已经开始融化^[5-9],并且在未来一个世纪,融化的速度和面积都可能会随着气候变暖而进一步增强^[10]。多年冻土融化将导致储存在冻土中的大量土壤有机碳迅速释放出来^[11-14],碳释放主要通过以下 3 种形式: CH_4 、 CO_2 和 DOC^[15]。 CH_4 和 CO_2 是最重要的温室气体,与 DOC 不同,它们可以对大气化学组成产生直接影响,因此,多年冻土融化释放的 CH_4 和 CO_2 可能会对气候变暖产生强烈的正反馈。又由于 CH_4 相对于 CO_2 约 25 倍的全球增温潜势^[16],在气候变化对多年冻土区湿地碳循环影响的研究中, CH_4 通量变化的研究显得尤其重要。现有部分研究结果显示:由于多年冻土退化引起湿地植被总的净吸收碳和异养呼吸释放的碳可能同时增加,导致生长季 CO_2 汇的功能增加,这本应对全球变暖产生负反馈,但是,如果考虑到 CH_4 排放也增加,用 CO_2 等价(GWP_{100})的方法折算后,增加的 CH_4 排放将会部分地(或完全)抵消增加的碳汇^[17],甚至可能使总的辐射强迫增加,从而反映出对气候变暖的正反馈^[18]。由此可见, CH_4 排放的变化不仅是多年冻土退化背景下湿地 C 循环研究中的重要组成部分,甚至可能决定湿地生态系统对全球气候变暖产生反馈作用的方向。

多年冻土能够阻止地表水向地下渗透,使活动层土壤长期饱和,有利于形成湿地^[19-20],因此,多年冻土区同时也是全球湿地的主要分布区,北方高纬度地区分布了全球 50% 以上的湿地^[21]。多年冻土退化会对分布在冻土之上的湿地产生多方面的影响,包括湿地冻土活动层深度变化^[8, 22]、水文变化^[23]、土壤温度变化^[24]、植被组成及生产力变化^[18]、微生物组成和活性变化^[25-26]等,这些都是湿地 CH_4 通量的主要控制因子。这一系列环境和生物因子的变化,都可能对该区湿地目前的 CH_4 排放及其未来变化趋势产生重要影响。因此,进一步研究和探讨多年冻土退化对湿地 CH_4 排放的影响程度、影响机理及其对全球气候变化的反馈机制,对于准确预测全球气候变化及其影响将具有重要意义。

1 多年冻土退化对湿地 CH_4 排放量的影响

北方高纬度地区生态系统对气候变化高度敏感,并且占陆地表面的比例较大,因此,对地球系统非常重要,尤其对全球碳循环非常重要^[27]。研究表明:北方高纬度地区陆地生态系统是大气 CO_2 的汇(0.3—0.6 PgC/a),占全球陆地 CO_2 汇的 30%—60%^[28]。同时,北方高纬度地区的湿地为全球大气 CH_4 的主要天然来源之一,年 CH_4 排放量约占全球 CH_4 天然排放量的 20%—60%^[21, 29-30]。全球气候变暖将导致这些地区越来越多的被冻结的有机碳可以被微生物分解,由于北方高纬度地区湿地较多^[21],湿地具有较高的厌氧条件,因此,厌氧菌产生的 CH_4 是本区冻土退化后碳释放的最主要形式之一。而多年冻土退化将直接导致控制湿地甲烷产生和排放的环境因素和生物因素的改变,因此,必将对湿地 CH_4 排放产生重要影响。

1.1 活动层深度变化对 CH_4 排放的影响

活动层深度变化是多年冻土退化的最主要标志之一,可以直接或间接影响冻土区湿地的 CH_4 通量。网格法观测瑞典北部 9 个多年冻土地点 29 a 的活动层厚度变化的结果表明^[9]:气温增加导致了所有地点的活动层都变厚了,增加速率为每年 0.7—1.3 cm,在多年冻土厚度较薄的一些地点,增加速率可达每年 2 cm。用模型估计中等气候变化情景下的欧亚大陆多年冻土区变化结果显示^[31]:到 2050 年,最北部多年冻土区活动层深度将增加超过 50%,而其它的大部分地区也将超过 30%—50%。Stendel 和 Christensen 模拟北半球多年冻土变化的结果也表明:到 21 世纪末,全球变暖(IPCC 第二次报告的 A2 情景)将导致北半球大部分多年冻土区的活动层深度增加 30%—40%,其中,增加程度最大的地区为西伯利亚东北和加拿大西部,其次为中国东北和蒙古,以及加拿大和阿拉斯加的部分地区^[32]。活动层厚度非常重要,因为它影响植物根的深度、水文过

程以及能暴露在 0℃ 以上的土壤有机质的数量^[14]。多年冻土区的陆地和大气间大部分能量、水分和气体交换都必须经过活动层才能完成。因此,活动层深度增加必将对多年冻土区湿地 CH₄ 通量产生重要影响。最直接的影响就是将土壤中冻结的、相对稳定的有机碳转变为冰点温度以上的、易被微生物利用的有机碳,引起湿地中产甲烷菌可利用底物增加,从而导致 CH₄ 产生和排放量增加^[33-34]。在将活动层深度与 CH₄ 通量进行相关分析时发现,有些多年冻土区活动层深度与 CH₄ 排放有一定的相关性^[35-36],尤其在春季融化期,CH₄ 排放量可能随着土壤融化后活动层深度的增加而显著增加^[37-38]。陆地生态系统模型的模拟结果也显示:CH₄ 净排放对活动层深度非常敏感,活动层深度增加 10 cm,将导致 CH₄ 净排放增加 38%^[39]。根据模型模拟的俄罗斯多年冻土退化结果显示:到 2150 年,多年冻土活动层深度会增加 30%—50%,由此导致的俄罗斯多年冻土区湿地 CH₄ 排放将增加超过 25%—30%^[40]。但也有一些研究地点发现活动层深度与 CH₄ 排放无显著相关性^[41-42],这说明活动层深度的变化对 CH₄ 通量的影响可能更多地来源于间接作用,虽然有时候二者之间无法建立直接的联系,但活动层深度变化通过改变湿地微地形、水文和土壤温度等一系列环境因素从而间接地对 CH₄ 通量产生较大影响。

1.2 土壤温度变化对 CH₄ 排放的影响

多年冻土退化导致土壤温度升高对冻土区湿地 CH₄ 排放量产生较大影响。全球气候变暖导致的气温升高可能会改变冻土层及活动层温度,虽然在北方高纬度湿地中,地温的变化受到地表泥炭藓层及地下有机质层的影响,可能与气温变化有一定的差异,两种温度的年际变化可能并不一致,但从 10 a 或更长的时间尺度来看,多年冻土的地温与气温之间具有显著相关性^[43]。也就是说,随着气温升高和多年冻土退化,多年冻土区的冻土层和活动层温度也有逐渐升高的趋势。多年冻土不同深度的地温增加的速率略有不同,在距离地表 2 m 的范围内,地温增加速率一般为 0.03—0.05℃/a^[43-44],个别地点甚至高达 0.2℃/a^[24],并且最近 10 a 的变暖速率还在加速^[45]。温度升高可以增加产甲烷菌的活性,因此,可能会增加产 CH₄ 速率。即使在冰点以下的温度少量增加,也可能引起甲烷生成的大量增加,如取自西伯利亚北极圈的多年冻土在室内培养产甲烷潜能的结果显示:培养温度从在 -6℃ 升至 -3℃ 时,CH₄ 生成速率从每克土壤约 0.14 nmolCH₄/h 增加到 0.78 nmolCH₄/h^[25]。但温度升高同时也会增加甲烷氧化菌的活性,使产生的甲烷更多地被氧化。因此,由土壤温度升高导致的产甲烷菌和甲烷氧化菌的活性变化对甲烷排放的综合影响目前尚难以确定。但土壤温度升高可以导致活动层深度增加^[24, 44],活动层深度增加直接或间接导致 CH₄ 排放增加^[31]。同时,温度升高导致的多年冻土中所含的冰向液体水的变化对生态系统演替的影响是非线性的^[14]。而水文条件是甲烷排放的最重要影响因素,因此,由升温导致的土壤水文条件变化对甲烷排放产生的影响可能会远远大于温度本身的影响。可见,评价土壤温度这一单一因素对冻土融化后甲烷排放的影响是比较困难的,还需要和水文条件、产甲烷菌和甲烷氧化菌的种类和活性的变化以及底物的变化等因素综合起来考虑才能得到更精确的预测结果。

1.3 水文条件变化对 CH₄ 排放的影响

多年冻土退化导致的水文条件变化对 CH₄ 排放产生重要影响。在连续和不连续多年冻土区,冻土融化后会改变湿地微地形,形成斑块状热卡斯特湖和池塘^[5, 46],这使得局部水分条件增加^[47-48],尤其是水位高度增加。水位是 CH₄ 生产和排放的主要驱动者,高水位导致更大的厌氧 CH₄ 产生区,增加 CH₄ 排放^[49]。因此,湖和池塘及其边缘会成为 CH₄ 排放的“热点”^[34],这些“热点”的 CH₄ 排放速率可能比附近多年冻土未融化区域湿地的 CH₄ 排放速率高几十倍^[50-52]。此外,多年冻土区湿地内由这些热卡斯特作用形成的湖和池塘可能在上百年的时间尺度上存在,因此,多年冻土退化导致的湿地水文条件的变化对 CH₄ 排放升高的影响将是长期的^[51]。相反,在多年冻土分布区的南界附近,多年冻土仅以岛状存在,多年冻土层非常薄,这些薄的岛状多年冻土退化的特点是其本身完全消失,因此,失去对湿地的保水作用^[53],导致湿地变干,进而减少 CH₄ 排放^[54]。

1.4 植物组成变化对 CH₄ 排放的影响

下层多年冻土分布的变化及其引起的湿地水文条件的变化,将导致植物种类组成的变化,不同植物的底物供应能力和 CH₄ 传输能力的差异将导致 CH₄ 排放发生显著变化。亚北极地区湿地生态系统近 30 a 研究结

果显示:随着多年冻土退化,区域内植被组成发生显著变化,适应相对干燥环境的青姬木(*Andromeda polifolia*)和岩高兰(*Empetrum hermaphroditum*)等灌木类型减少,相应地适应低湿环境的羊胡子草(*Eriophorum vaginatum*)和灰株苔草(*Carex rostrata*)等禾草植物增加^[47, 55]。加拿大不连续多年冻土区的研究结果也显示:多年冻土退化导致泥炭地内的乔木树种黑云杉(*Picea mariana*)急剧减少,而苔草属(*Carex* spp.)植物显著增加^[55-56]。与乔木、灌木和苔藓相比,禾草和莎草科植物的枯落物和根系分泌物可以为产甲烷菌提供更多的有效底物^[57],促进 CH_4 生成,同时还可以提供更多的 CH_4 传输通道^[58-59],进而增加 CH_4 排放。很多野外研究证实了湿地内不同植被覆盖点间的 CH_4 通量差异,几乎所有结果一致地认为:禾草为优势地点的 CH_4 排放速率高于乔木、灌木或苔藓为优势地点的排放速率^[50, 57, 60]。因此,如果单独考虑植被这个因子,它可能会导致多年冻土退化后的湿地 CH_4 排放显著增加。

1.5 微生物组成及活性变化对 CH_4 排放的影响

微生物组成和活性对多年冻土退化后环境变化的响应可能会决定多年冻土区湿地 CH_4 产生与排放的变化,这方面的研究以前较少,但近年逐渐引起研究者的重视。虽然全球总 CH_4 排放的 80%—90% 都来源于微生物活动^[61],但仅有少数研究涉及了微生物过程对湿地 CH_4 产生和氧化的影响^[62-63]。湿地 CH_4 的产生和氧化过程都是通过专门的产甲烷菌和甲烷氧化菌来完成的,这两种微生物的组成及活性共同决定 CH_4 排放数量。尽管多年冻土区湿地创造了极端冷湿的恶劣土壤条件,但土壤中仍然存在大量产甲烷菌和甲烷氧化菌。在多年冻土的活动层中,产甲烷菌和甲烷氧化菌的细胞数量可以分别高达每克土壤 3×10^8 和 1×10^8 个,占总细胞数量的 0.5%—22.4%^[64-65]。产甲烷菌和甲烷氧化菌种群丰富度和多样性也较高,甚至可能与温带土壤相当^[65-66]。适应了极端条件的产甲烷菌和甲烷氧化菌在多年冻土中仍然保持着一定的活性,产甲烷菌在 -3—-6 °C 的培养条件下的 CH_4 生成速率仍然可以达到每克土壤约 0.14—0.78 nmolCH_4/h ^[25]。原位观测也表明:产甲烷菌在冬季还保持活性,甚至可能超过生长季的活性^[67],这可能是冬季中湿地仍然排放 CH_4 的原因^[68-69]。此外,多年冻土区不同水文条件下的产甲烷菌组成和活性也有一定的差异,这可能是导致大尺度空间上 CH_4 排放随着土壤水文变化的主要原因^[70]。

由于产甲烷菌和甲烷氧化菌组成及其活性受土壤温度、水文条件以及土壤养分可利用性等的影响^[66],而多年冻土退化会导致冻土区湿地的这些环境条件产生巨大变化,因此,产甲烷菌和甲烷氧化菌对多年冻土退化的响应将可能决定多年冻土退化后湿地 CH_4 通量变化。事实上,现在已经有结果初步证明了这一推论。高北极泥炭地产甲烷菌的丰富度和多样性随温度升高而增加,进而对 CH_4 生成速率有很强的促进作用^[71]。西伯利亚泥炭地产甲烷菌活性随温度的轻微增加而有较大程度的增强,因此,多年冻土退化后活动层土壤温度增加将可能导致总的 CH_4 排放量显著增加^[25, 72]。温度升高还能导致多年冻土的土壤中高活性甲烷氧化菌群落中的类型 I 甲烷氧化菌的重要性下降,而类型 II 甲烷氧化菌的重要性增加^[26]。在冻土环境中,类型 I 甲烷氧化菌占有绝对优势^[66]。由于类型 I 甲烷氧化菌存在于较低的 CH_4 浓度环境下,而类型 II 甲烷氧化菌可以存在于低氧和高浓度 CH_4 的环境中^[65],因此,这一转变可能会加速厌氧层所产生 CH_4 的氧化速率,从而减少 CH_4 排放量。由于多年冻土退化对环境的影响是复杂的,产甲烷菌和甲烷氧化菌对环境变化的响应也非常复杂,因此,这些微生物组成、多样性及其活性变化对退化的多年冻土区湿地 CH_4 排放的影响还存在很大的不确定性,非常有必要对这方面进行进一步深入研究。

2 多年冻土退化对湿地 CH_4 排放季节分配模式的影响

多年冻土退化导致的冻-融作用变化可能会改变多年冻土区湿地 CH_4 排放的季节分配模式。多年冻土区湿地的冻-融作用期是一年中时间较长且相对重要的时期,冻-融作用对湿地 CH_4 的排放产生重要影响,使多年冻土区湿地在生长季以外也可能出现 CH_4 排放的高峰值。由于产 CH_4 微生物冬季还保持着可能较高的活性^[67],在冬季也产生大量 CH_4 ,这些 CH_4 积累在冻层下,在春季融冻期集中释放出来,形成 CH_4 排放峰值^[38, 73-74]。随着气候变暖和多年冻土退化,春季的土壤融冻期可能会提前,那么春季 CH_4 排放的高峰期也会提前。土壤融冻期提前可能会导致生长季延长,生长季 CH_4 排放量在全年中所占的比例将可能会提高,相应

的冬季所占比例有可能会降低。此外,最新的研究表明,在生长季结束后,多年冻土的活动层内会积累大量 CH_4 ,随着冬季初土壤开始冻结,冻结过程中的物理挤压作用使积累的 CH_4 从土壤中释放出来,从而使冬季初具有与生长季相似的 CH_4 排放速率^[41],甚至可能产生高于生长季的 CH_4 排放速率^[75],这可能是高纬度地区一个重要的、但目前还未被认识的 CH_4 排放季节分配组分。Mastepanov 等还推测,这一现象之所以在低纬度非多年冻土区的研究中还没有发现过,可能是由于多年冻土层是阻止 CH_4 向下扩散的必要条件^[75]。如果这一结果在多年冻土区具有普遍性,那么多年冻土融化后,多年冻土上限下降或者多年冻土层完全消失后,都可能使这种冻结期的高排放消失,从而改变现有湿地 CH_4 排放季节分配模式。

3 结论及研究展望

全球气候变暖引起的多年冻土退化将导致环境因素的多方面变化,这些因素进一步影响冻土区湿地 CH_4 产生和排放的变化,这种变化不仅体现在 CH_4 排放量上,也体现在 CH_4 排放的季节分配模式上。同时,多年冻土退化对环境因素的影响以及这些变化的环境因素对湿地 CH_4 排放的作用都存在着非线性关系的复杂性,这使得湿地 CH_4 排放对多年冻土退化的响应具有很大的不确定性。因此,多年冻土退化对冻土区湿地 CH_4 排放的影响效果及其主要影响机理方面的研究,对于预测全球气候变化及北方高纬度地区生态系统对气候变化的响应机制有重要意义。但目前研究中尚存在以下问题:

(1) 研究主要集中在连续多年冻土区和不连续多年冻土区,如美国阿拉斯加中部和北部^[23, 46, 52],加拿大中北部^[17, 51]和俄罗斯的西伯利亚地区等^[31, 34]。但是,岛状和零星多年冻土区的冻土对气候变化最敏感,例如欧亚大陆多年冻土区南部,但这些地区的多年冻土退化状况及其产生的影响还很少被人们所了解^[76]。因此,应该注意对这些敏感地区进行集中研究。此外,多年冻土退化导致的环境条件变化具有非常大的不确定性,对湿地 CH_4 排放的影响也有很大的变异性,因此,应该加强跨纬度、跨区域的多点同步观测研究。

(2) 目前研究大多停留在观测水平上,缺乏机理方面的研究,尤其是冻土退化过程中湿地土壤微生物群落组成、多样性和活性变化等对 CH_4 产生、氧化及排放变化影响机理的研究较少,这是以后的研究中应该重点关注的地方,很可能会成为未来研究的热点。

(3) 全球气候变化引起的多年冻土区湿地 CH_4 排放的变化可能对气候系统产生强烈的反馈作用,但目前大多数预测全球气候变化的模型都未能将这种反馈作用考虑进去,这可能会造成在预测全球气候变化的方向和强度时产生较大偏差,因此,以后的全球气候变化预测模型应该将这一作用耦合进去。

(4) 多年冻土退化导致湿地土壤原有的相对稳定的有机碳变得易于分解,但这些易分解的有机碳通过有氧分解产生 CO_2 和厌氧分解产生 CH_4 的相对量现在还是未知数,而 CH_4 比 CO_2 具有更高的全球增温潜势,少量 CH_4 就可能对气候系统产生较大影响。因此,确定这部分有机碳厌氧分解产生的 CH_4 的相对量及其对气候反馈作用的相对程度,将有助于准确预测未来全球气候变化。

References:

- [1] van Everdingen R O. Multilanguage Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. Boulder: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology, 1998.
- [2] Zhang T, Barry R G, Knowles K, Heginbottom J A, Brown J. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, 2008, 31(1/2): 47-68.
- [3] Zimov S A, Schuur E A G, Chapin F S III. Permafrost and the global carbon budget. *Science*, 2006, 312(5780): 1612-1613.
- [4] 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.
- [5] Payette S, Delwaide A, Caccianiga M, Beauchemin M. Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L18208, doi:10.1029/2004GL020358.
- [6] Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming. *Climatic Change*, 2005, 68(1/2): 135-152.
- [7] Jin H J, Li S X, Wang S L, Zhao L. Impacts of climatic change on permafrost and cold regions environments in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 161-173.

- [8] Jin H J, Yu Q H, Lu L Z, Guo D X, He R X, Yu S P, Sun G Y, Li Y W. Degradation of permafrost in the Xing'anling Mountains, northeastern China. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2007, 18(3): 245-258.
- [9] Åkerman H J, Johansson M. Thawing permafrost and thicker active layers in sub-arctic Sweden. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, 19(3): 279-292.
- [10] Lawrence D M, Slater A G. A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L24401, doi:10.1029/2005GL025080.
- [11] Dutta 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(12): 2336-2351.
- [12] Uhlířová E, Šantrůčková H, Davidov S P. Quality and potential biodegradability of soil organic matter preserved in permafrost of Siberian tussock tundra. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 1978-1989.
- [13] Khvorostyanov D V, Ciais P, Krinner G, Zimov S A. Vulnerability of East Siberia's frozen carbon stores to future warming. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L10703, doi:10.1029/2008GL033639.
- [14] Schuur E A G, Bockheim J, Canadell J G, Euskirchen E, Field C B, Goryachkin S V, Hagemann S, Kuhry P, Lafleur P M, Lee H, Mazhitova G, Nelson F E, Rinke A, Romanovsky V E, Shiklomanov N, Tarnocai C, Venevsky S, Vogel J G, Zimov S A. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the global carbon cycle. *BioScience*, 2008, 58(8): 701-714.
- [15] 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(7246): 556-559.
- [16] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Bernsten T, Betts R, Fahey D W, Haywood J, Lean J, Lowe D C, Myhre G, Nganga J, Prinn R, Raga G, Schulz M, van Dorland R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing//Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 140-143.
- [17] Turetsky M R, Wieder R K, Vitt D H, Evans R J, Scott K D. The disappearance of relict permafrost in boreal north America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1922-1934.
- [18] Johansson T, Malmer N, Crill P M, Friberg T, Åkerman J H, Mastepanov M, Christensen T R. Decadal vegetation changes in a northern peatland, greenhouse gas fluxes and net radiative forcing. *Global Change Biology*, 2006, 12(12): 2352-2369.
- [19] Woo M K. Permafrost hydrology//Prowse T D, Ommann C S L, eds. *Northern Hydrology: Canadian Perspectives*. NHRI Science Report No 1. Saskatoon: Minister of Supply and Services, 1990: 63-76.
- [20] Sun G Y, Jin H J, Yu S P. The symbiosis models of marshes and permafrost — a case study in Daxing'an and Xiaoxing'an Mountain range. *Wetland Science*, 2008, 6(4): 479-485.
- [21] Mathews E, Fung I. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycles*, 1987, 1(1): 61-86.
- [22] Zhang T J, Frauenfeld O W, Serreze M C, Etringer A, Oelke C, McCreight J, Barry R G, Gilichinsky D, Yang D Q, Ye H C, Ling F, Chudinova S. Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D16101, doi:10.1029/2004JD005642.
- [23] Jorgenson M T, Racine C H, Walters J C, Osterkamp T E. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change*, 2001, 48(4): 551-579.
- [24] Osterkamp T E, Romanovsky V E. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1999, 10: 17-37.
- [25] Wagner D, Gatterger A, Embacher A, Pfeiffer E M, Schlöter M, Lipski A. Methanogenic activity and biomass in Holocene permafrost deposits of the Lena Delta, Siberian Arctic and its implication for the global methane budget. *Global Change Biology*, 2007, 13(5): 1089-1099.
- [26] Knoblauch C, Zimmermann U, Blumenberg M, Michaelis W, Pfeiffer E M. Methane turnover and temperature response of methane-oxidizing bacteria in permafrost-affected soils of northeast Siberia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(12): 3004-3013.
- [27] Chapin F S III, McGuire A D, Randerson J, Pielkes R, Baldocchi D, Hobbie S E, Roulet N, Eugster W, Kasichke E, Rastetter E B, Zimov S A, Running S W. Arctic and boreal ecosystems of western North America as components of the climate system. *Global Change Biology*, 2000, 6(S1): 211-223.
- [28] McGuire A D, Anderson L G, Christensen T R, Dallimore S, Guo L, Hayes D, Heimann M, Lorenson T D, Macdonald R W, Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. *Ecological Monographs*, 2009, 79(4): 523-555.
- [29] Cao M K, Gregson K, Marshall S. Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(19): 3293-3299.

- [30] Huttunen J T, Nykänen H, Turunen J, Martikainen P J. Methane emissions from natural peatlands in the northern boreal zone in Finland, Fennoscandia. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(1): 147-151.
- [31] Anisimov O A. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission. *Environmental Research Letters*, 2007, 4(4): 045016, doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045016.
- [32] Stendel M, Christensen J H. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(13): 1632, doi: 10.1029/2001GL014345.
- [33] Zimov S A, Voropaev Y V, Semiletov I P, Davidov S P, Prosiannikov S F, Chapin F S III, Chapin M C, Trumbore S, Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fueled by Pleistocene carbon. *Science*, 1997, 277(5327): 800-802.
- [34] Walter K M, Zimov S A, Chanton J P, Verbyla D, Chapin F S III. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 2006, 443(7107): 71-75.
- [35] Friborg T, Christensen T R, Hansen B U, Nordstroem C, Soegaard H. Trace gas exchange in a high-arctic valley 2: Landscape CH₄ fluxes measured and modeled using eddy correlation data. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 715-724.
- [36] van Huissteden J, Maximov T C, Dolman A J. High methane flux from an arctic floodplain (Indigirka lowlands, eastern Siberia). *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: G02002, doi:10.1029/2005JG000010.
- [37] Joabsson A, Christensen T R. Methane emissions from wetlands and their relationship with vascular plants; an Arctic example. *Global Change Biology*, 2001, 7(8): 919-932.
- [38] Wagner D, Kobabe S, Pfeiffer E M, Hubberten H W. Microbial controls on methane fluxes from a polygonal tundra of the Lena Delta, Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, 14(2): 173-185.
- [39] Zhuang Q, Melillo J M, Kicklighter D W, Prinn R G, McGuire A D, Steudler P A, Felzer B S, Hu S. Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: a retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18: GB3010, doi:10.1029/2004GB002239.
- [40] Anisimov O A, Reneva S. Permafrost and changing climate: the Russian perspective. *Ambio*, 2006, 35(4): 169-175.
- [41] Sachs T, Wille C, Boike J, Kutzbach L. Environmental controls on ecosystem-scale CH₄ emission from polygonal tundra in the Lena River Delta, Siberia. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: G00A03, doi:10.1029/2007JG000505.
- [42] Wille C, Kutzbach L, Sachs T, Wagner D, Pfeiffer E M. Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: eddy covariance measurements and modeling. *Global Change Biology*, 2008, 14(6): 1395-1408.
- [43] Romanovsky V E, Sazonova T S, Balobaev V T, Shender N I, Sergueev D O. Past and recent changes in air and permafrost temperatures in eastern Siberia. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(3/4): 399-413.
- [44] Johansson M, Åkerman H J, Jonasson C, Christensen T R, Callaghan T V. Increasing permafrost temperatures in Subarctic Sweden//Kane D L, Hinkel K M, eds. Ninth International Conference on Permafrost Proceedings. Vol 1. Fairbanks: Institute of Northern Engineering, University of Alaska. 2008: 851-856.
- [45] Isaksen K, Sollid J L, Holmlund P, Harris C. Recent warming in mountain permafrost in Svalbard and Scandinavia. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: F02S04, doi:10.1029/2006JF000522.
- [46] Jorgenson M T, Shur Y L, Pullman E R. Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L02503, doi:10.1029/2005GL024960.
- [47] Christensen T R, Johansson T R, Åkerman H J, Mastepanov M, Malmer N, Friborg T, Crill P, Svensson B H. Thawing sub-arctic permafrost: effects on vegetation and methane emissions. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L04501, doi:10.1029/2003GL018680.
- [48] Ström L, Christensen T R. Below ground carbon turnover and greenhouse gas exchanges in a sub-arctic wetland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(7): 1689-1698.
- [49] Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H, Li X P. Effect of standing water depth on methane emissions from freshwater marshes in northeast China. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(33): 5149-5157.
- [50] Liblik L, Moore T R, Bubier J L, Robinson S D. Methane emissions from wetlands in the zone of discontinuous permafrost: Fort Simpson, NWT, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(4): 485-494.
- [51] Turetsky M R, Wieder R K, Vitt D H. Boreal peatland C fluxes under varying permafrost regimes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(7): 907-912.
- [52] Wickland K P, Striegl R G, Neff J C, Sachs T. Effects of permafrost melting on CO₂ and CH₄ exchange of a poorly drained black spruce lowland. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: G02001, doi: 10.1029/2005JG000099.
- [53] Burkett V, Kusler J. Climate change potential impacts and interactions in wetlands of the united states. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(2): 313-340.

- [54] Moore T R, Roulet N T, Waddington J M. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands. *Climatic Change*, 1998, 40(2): 229-245.
- [55] Camill P, Chihara L, Adams B, Andreassi C, Barry A, Kalim S, Limmer J, Mandell M, Rafert G. Early life history transitions and recruitment of *Picea mariana* in thawed boreal permafrost peatlands. *Ecology*, 2010, 91(2): 448-459.
- [56] Camill P, Lynch J A, Clark J S, Adams J B, Jordan B. Changes in biomass, aboveground net primary production, and peat accumulation following permafrost thaw in the boreal peatlands of Manitoba, Canada. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 461-478.
- [57] Bubier J L, Moore T R, Savage K, Crill P. A comparison of methane flux in a boreal landscape between a dry and a wet year. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19: 1-11.
- [58] Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H. Methane concentration and emission as affected by methane transport capacity of plants in freshwater marsh. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 158(1): 99-111.
- [59] Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H. Plant species effects on methane emissions from freshwater marshes. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(18): 3199-3207.
- [60] Moore T R, Knowles R. Methane emissions from fen, bog and swamp peatlands in Quebec. *Biogeochemistry*, 1990, 11(1): 45-61.
- [61] Ehhalt D H, Schmidt U. Sources and sinks of atmospheric methane. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116(2/3): 452-464.
- [62] Schimel J P, Gullledge J. Microbial community structure and global trace gases. *Global Change Biology*, 1998, 4(7): 745-758.
- [63] Wagner D, Liebner S. Global warming and carbon dynamics in permafrost soils: methane production and oxidation//Margesin R, ed. *Permafrost Soils. Soil Biology*, Vol 16. Berlin: Springer, 2009: 219-236.
- [64] Kobabe S, Wagner D, Pfeiffer E M. Characterization of microbial community composition of a Siberian tundra soil by fluorescence in situ hybridization. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 50(1): 13-23.
- [65] Liebner S, Wagner D. Abundance, distribution and potential activity of methane oxidizing bacteria in permafrost soils from the Lena Delta, Siberia. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(1): 107-117.
- [66] Wagner D, Lipski A, Embacher A, Gattinger A. Methane fluxes in permafrost habitats of the Lena Delta effects of microbial community structure and organic matter quality. *Environmental Microbiology*, 2005, 7(10): 1582-1592.
- [67] Juottonen H, Tuittila E S, Juutinen S, Fritze H, Yrjälä K. Seasonality of rDNA-and rRNA-derived archaeal communities and methanogenic potential in a boreal mire. *The ISME Journal*, 2008, 2: 1157-1168.
- [68] Dise N B. Winter fluxes of methane from Minnesota peatlands. *Biogeochemistry*, 1992, 17(2): 71-83.
- [69] Alm J, Saarnio S, Nykänen H, Silvola J, Martikainen P J. Winter CO₂, CH₄, N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeochemistry*, 1999, 44(2): 163-186.
- [70] Høj L, Rusten M, Haugen L E, Olsen R A, Torsvik V L. Effects of water regime on archaeal community composition in Arctic soils. *Environmental Microbiology*, 2006, 8(6): 984-996.
- [71] Høj L, Olsen R A, Torsvik V L. Effects of temperature on the diversity and community structure of known methanogenic groups and other archaea in high Arctic peat. *The ISME Journal*, 2008, 2: 37-48.
- [72] Metje M, Frenzel P. Methanogenesis and methanogenic pathways in a peat from subarctic permafrost. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(4): 954-964.
- [73] Friberg T, Christensen T R, Sogaard H. Rapid response of greenhouse gas emission to early spring thaw in a subarctic mire as shown by micrometeorological techniques. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(23): 3061-3064.
- [74] Song C C, Wang Y S, Wang Y Y, Zhao Z C. Emission of CO₂, CH₄ and N₂O from freshwater marsh during freeze - thaw period in Northeast of China. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(35): 6879-6885.
- [75] Mastepanov M, Sigsgaard C, Dlugokencky E J, Houweling S, Ström L, Tamstorf M P, Christensen T R. Large tundra methane burst during onset of freezing. *Nature*, 2008, 456(7222): 628-630.
- [76] French H. Recent contributions to the study of past permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, 19(2): 179-194.

参考文献:

- [7] 金会军, 李述训, 王绍令, 赵林. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响. *地理学报*, 2000, 55(5): 161-173.
- [20] 孙广友, 金会军, 于少鹏. 沼泽湿地与多年冻土的共生模式——以中国大兴安岭和小兴安岭为例. *湿地科学*, 2008, 6(4): 479-485.

CONTENTS

CO ₂ emission from an alpine <i>Kobresia humilis</i> meadow in winters	WU Qin, HU Qiwu, CAO Guangmin, et al (5107)
Effect of cultivation on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in Cele oasis croplands and their relation to crop yield	HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (5113)
Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels	QI Yu, HUANG Yongmei, WANG Yan, et al (5121)
Small-scale spatial patterns of genetic structure in <i>Castanopsis eyrei</i> populations based on autocorrelation analysis in the Tiantai Mountain of Zhejiang Province	QI Caihong, JIN Zexin, LI Junmin (5130)
Influence of vegetation on frozen ground temperatures the forested area in the Da Xing'anling Mountains, Northeastern China	CHANG Xiaoli, JIN Huijun, YU Shaopeng, et al (5138)
Analysis of stable carbon isotopes in different components of tree rings of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	SHANG Zhiyuan, WANG Jian, CUI Mingxing, et al (5148)
Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data	LIU Yibo, JU Weimin, ZHU Gaolong, et al (5159)
Decomposition of lotus leaf litter and its effect on the aquatic environment of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	SHI Qi, JIAO Feng, CHEN Ying, et al (5171)
Effects of fire disturbance on greenhouse gas emission from <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> forested wetlands in XiaoXing'an Mountains, Northeast China	YU Lili, MU Changcheng, GU Han, et al (5180)
Wetland landscape transition pattern of Lianbo Beach along the Middle Yellow River	GUO Donggang, SHANGGUAN Tieliang, BAI Zhongke, et al (5192)
Effect of revegetation on functional groups of soil organic carbon on the Loess Plateau	LI Ting, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, et al (5199)
Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China	ZU Yuangang, LI Ran, WANG Wenjie, et al (5207)
Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau	GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao (5217)
Soil microbial functional diversity between rhizosphere and non- rhizosphere of typical plants in the hilly area of southern Nixia	AN Shaoshan, LI Guohui, CHEN Liding (5225)
Differences in the surface palynomorph assemblages on a karst mountain and rocky desertification areas: a case in Nanchuan District, Chongqing	HAO Xiudong, OUYANG Xuhong, XIE Shiyu (5235)
Ash content and caloric value in the leaves of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> and its accompanying species	JIN Zexin, LI Junmin, MA Jine (5246)
Uptake kinetic characteristics of Cu ²⁺ by <i>Salix jiangsuensis</i> CL J-172 and <i>Salix babylonica</i> Linn and the influence of organic acids	CHEN Caihong, LIU Zhikun, CHEN Guangcai, et al (5255)
Introduction of <i>TaNHX2</i> gene enhanced salt tolerance of transgenic puna chicory plants	ZHANG Lijun, CHENG Linmei, DU Jianzhong, et al (5264)
Effects of air humidity and soil water deficit on characteristics of leaf cuticular waxes in alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	GUO Yanjun, NI Yu, GUO Yunjiang, et al (5273)
Influence of water storage capacity on yield of winter wheat in dry farming area in the Loess Plateau	DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, WANG Qiang, et al (5281)
Research of dynamic variation of moisture in apple orchard soil in the area of Xianyang in recent years	ZHAO Jingbo, ZHOU Qi, CHEN Baoqun, et al (5291)
Volatile oil contents correlate with geographical distribution patterns of the miao ethnic herb <i>Fructus Cinnamomi</i>	ZHANG Xiaobo, ZHOU Tao, GUO Lanping, et al (5299)
Effect of environmental factors on growth of <i>Chlorella</i> sp. and optimization of culture conditions for high oil production	DING Yancong, GAO Qun, LIU Jiayao, et al (5307)
The effects of substrates on locomotor performance of two sympatric lizards, <i>Takydromus septentrionalis</i> and <i>Plestiodon chinensis</i>	LIN Zhihua, FAN Xiaoli, LEI Huanzong, et al (5316)
Guild structure of wintering waterbird assemblages in shallow lakes along Yangtze River in Anhui Province, China	CHEN Jinyun, ZHOU Lizhi (5323)
Phylogenetic diversity analysis and <i>in situ</i> hybridization of symbiotic Oxymonad flagellates in the hindgut of <i>Reticulitermes chinensis</i> Snyder	CHEN Wen, SHI Yu, PENG Jianxin, et al (5332)
An entropy weight approach on the comprehensive evaluation of the Pearl River Delta Nature Reserve	ZHANG Linying, XU Songjun (5341)
Review and Monograph	
On planning method of mesoscale and microscale ecological land	RONG Bingling, LI Dong, XIE Yingxia (5351)
Effects of land use change on soil organic carbon: a review	CHEN Zhao, LÜ Changhe, FAN Lan, et al (5358)
Marine phytoplankton and biological carbon sink	SUN Jun (5372)
Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review	SUN Xiaoxin, SONG Changchun, WANG Xianwei, et al (5379)
A review on the effects of biogenic elements and biological factors on wetland soil carbon mineralization	ZHANG Linhai, ZENG Congsheng, TONG Chuan (5387)
A review of studies using ecological network analysis	LI Zhongcai, Xu Junyan, WU Changyou, et al (5396)
Scientific Note	
Dynamics of age structures on <i>Agropyron michnoi</i> and <i>Leymus chinensis</i> in different communities	JIN Xiaoming, AI Lin, LIU Jidong, et al (5406)
The impact of thematic resolution on NDVI spatial pattern	HUANG Caixia, LI Xiaomei, SHA Jinming (5414)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 18 期 (2011 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 18 2011

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 70.00 元