

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第19期 Vol.32 No.19 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 (SHENTAI XUEBAO)

第32卷 第19期 2012年10月 (半月刊)

目 次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颚的形态差异	方舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	谭向峰, 杜宁, 葛秀丽, 等 (5998)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	王莉雯, 卫亚星 (6006)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	张亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	吕晋慧, 王玄, 冯雁梦, 等 (6033)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	顾韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	张荣, 刘彤 (6056)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	李茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	秦华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
H ₂ O ₂ 参与AM真菌与烟草共生过程	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
北京山区防护林优势树种分布与环境的关系	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
旱直播条件下强弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	熊君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	黄林, 王峰, 周立江, 等 (6110)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	王树芹, 赖娟, 赵秀兰 (6128)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及CO ₂ 排放量的影响	张俊丽, 高明博, 温晓霞, 等 (6147)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	孙特生, 李波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于FARSITE模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于非, 王晗, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价:方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江鑫, 赛珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解缓启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有13种,其中有大白鹭、中白鹭、白鹭(小白鹭)、黄嘴白鹭等,体羽皆是全白,世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽,状若双辫,肩和胸着生蓑羽,冬季时蓑羽常全部脱落,白鹭虹膜黄色,嘴黑色,脚部黑色,趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边,以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食,好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期3—7月。繁殖时成群,常和其他鹭类在一起,雌雄均参加营巢,次年常到旧巢处重新修葺使用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201109031291

顾韩, 牟长城, 张博文, 于丽丽. 火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响. 生态学报, 2012, 32(19): 6044-6055.
Gu H, Mu C C, Zhang B W, Yu L L. Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from hassock and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6044-6055.

火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体 短期排放的影响

顾 韩^{1,2}, 牟长城^{1,*}, 张博文³, 于丽丽⁴

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江科技大学, 哈尔滨 150027;
3. 佳木斯市环境科学院, 佳木斯 150040; 4. 内蒙古民族大学, 通辽 028000)

摘要:利用静态箱-气相色谱法,研究了火烧干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽生长季CH₄、CO₂、N₂O排放的季节变化及影响因子。结果表明:火干扰使草丛、灌丛沼泽生长季的平均气温和各层土壤温度提高0.1—2.0℃,水位平均下降2.7 cm。火干扰使草丛、灌丛沼泽样地CH₄排放通量提高了56%、524.9%,CO₂排放通量分别下降了57.3%、14.5%,N₂O排放通量分别下降27.1%,64.9%。火烧前后草丛沼泽CH₄、N₂O与灌丛沼泽CO₂排放通量季节性规律未发生变化。火干扰改变了草丛沼泽生长季CO₂、灌丛沼泽N₂O排放通量的季节性变化规律。

草丛沼泽对照样地CH₄排放通量与5 cm土壤温度存在显著相关性,草丛沼泽CH₄排放通量与水位相关性不显著。灌丛沼泽CH₄排放通量与各层土壤温度及水位均无显著相关性。草丛、灌丛沼泽对照样地土壤CO₂排放通量与0—15 cm土壤温度呈显著或极显著正相关,火烧样地与0—30 cm土壤温度呈显著或极显著正相关。草丛、灌丛沼泽对照、火烧样地土壤CO₂排放通量与水位极显著负相关。火干扰使草丛、灌丛沼泽CH₄排放源的强度增强,CO₂、N₂O的排放消弱,全球温室潜势下降约为23.3%。火干扰能够减少草丛、灌丛沼泽温室气体排放。

关键词:小兴安岭; 草丛森林沼泽、灌丛森林沼泽; 温室气体排放; 火干扰

Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from hassock and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China

GU Han, MU Changcheng*, ZHANG Bowen, YU Lili

1 College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China

3 The Jiamusi City Academy of Environmental Sciences, Jiamusi 154000, China

4 National University of the Inner Mongolia, Tongliao 028000, China

Abstract: Wetlands are important sources and sinks of greenhouse gases. Fire is an important disturbance factor in forested wetlands, the forestry of fire disturbance were 1% per year on average in the global. Fire-related disturbance in forests are more frequent in mid-to high latitudes than elsewhere. In the present study, two kinds of forested wetlands; *Carex schmidtii* wetland and *Betula ovalifolia-Carex schmidtii* shrub wetland, were studied to reveal the emission variation of CH₄, CO₂, and N₂O under fire disturbance during the growing season. The study area is located in the Lesser Xing'an Mountains. We used a static opaque chamber and gas chromatography methods, and we monitored related environmental factors. The results were as follows: disturbance by fire increased air and soil temperature by 0.1—2.0℃, and lowered the water table by an

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30670349)

收稿日期:2011-09-03; 修订日期:2012-04-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mccnefu@yahoo.com

average of 2.7 cm. Burning increased CH₄ emissions from marsh and shrub wetlands by 56% and 524.9%, respectively. Burning decreased the CO₂ and N₂O emissions by 27.1% and 64.9% respectively from the marsh, and 27.1% and 64.9% from the shrub wetland. Burning also changed the marsh wetland CO₂ and shrub wetland N₂O flux patterns in the growing season, but no marked variations were detected in the marsh wetland CH₄ and N₂O, and in the shrub wetland CO₂ flux patterns.

The CH₄ emissions and the seasonal change pattern were affected by fire disturbance. Before and after the fire disturbance, CH₄ emission flux remained unchanged during the growing season. The CH₄ was absorbed weakly by the wetland soil in spring and emitted in summer and autumn. The CH₄ emission flux in summer was less than that in autumn. However, the CO₂ and N₂O emission fluxes had changed. At the unburned site, the CO₂ flux had a seasonal variation where summer flux > spring > autumn; under fire disturbance, the CO₂ flux in summer > autumn > spring. The N₂O flux varied in the order of spring > summer > autumn under no fire disturbance, but under slight fire disturbance, the order was spring > summer > autumn. The CH₄ flux from the reference marsh wetland plot (unburned) was significantly correlated ($P<0.05$) with soil temperature at 5 cm depth, but it was not correlated with water table depth in the burned plot. No significant correlations were found between CH₄ flux and soil temperature in any soil horizons, or with water table depth in the shrub wetland. In the reference plots of shrub wetland and marsh wetland, the CO₂ flux had a significant positive correlation ($P<0.05$) with soil temperature at depths between 0—15 cm; at burned sites, the CO₂ flux had a highly positive correlation with soil temperature in the 0—30 cm depth. Fire disturbance enhanced CH₄ emission intensity, and reduced the CO₂ and N₂O emissions. Under such circumstances, the global warming potential at burned sites would be decreased by 23.3%. Therefore, fire disturbance could decrease the emission of greenhouse gases from the two types of forested wetlands. Statistically significant negative correlation ($P<0.05$) was found between CO₂ flux and water table depth within marsh, reference and burned plots of shrub wetlands. Burning increased CH₄ emission intensity, and reduced the CO₂ and N₂O emissions. The global warming potential at burned sites decreased by 23.3%. Therefore, fire disturbance could decrease the emission of greenhouse gases from the two types of forested wetlands.

Key Words: Lesser Xing'an Mountains; hassock and shrubs forested wetland; greenhouse gas emission; fire disturbance

气候变暖的主要原因是大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等温室气体浓度的不断增加的结果,3 种温室气体对全球气候变暖的温室效应贡献约占 87%^[1-2],目前,大气中 3 种温室气体浓度分别为 355、1.72 和 0.312 μmol/mol,并且每年以 0.4% 的速率增长^[3],尤其对中高纬度的森林及湿地影响最为显著,而天然湿地又是全球碳动态的重要组成部分,它存储了巨大的有机固态碳^[4],对气候变化表现出较高的敏感性和不确定性^[5-6]。目前全球近一半以上的天然湿地被改造成其它土地利用形式^[1],导致湿地碳的净排放增加^[7],加之天然湿地每年自然排放的 CH₄^[1],湿地可能成为碳的排放源^[8];此外,湿地也是 N₂O 的汇或弱源^[9]。因此,通过湿地碳通量研究,探讨湿地碳氮源与汇的转化的影响机制,明确温室气体源汇作用。

我国关于天然沼泽湿地温室气体排放通量的研究已开展了较为深入的探究,如若尔盖和青藏高原的草丛湿地^[10-13]、辽河三角洲芦苇湿地^[14]、三江平原草丛湿地^[15-19]、沿海红树林湿地^[20]和东北山区森林湿地^[21-23],对天然湿地温室气体的排放通量、季节变化规律和影响因素有了比较深入的认识。但对火干扰状态下湿地温室气体排放通量研究相对较少。在全球范围内,每年平均大约有 1% 的森林受火干扰影响,在中高纬地区,林火出现频繁,火是森林湿地一个重要干扰因子。火干扰不仅改变植被群落的林相结构,同时也改变了土壤的物理(温度、湿度)^[24-25]及生物^[26]特性。温度和水文条件是影响湿地温室气体排放的重要环境因素^[1]。土壤温度升高可增强地上植物根系与土壤微生物的活性,促进土壤呼吸作用增强,进而增加了土壤向大气中排放的 CO₂ 的含量。有研究表明小兴安岭阔叶林沼泽土壤 CO₂ 排放通量与土壤温度呈正相关^[22],水位决定了湿地有氧和厌氧微生物过程在泥炭层中的位置和程度^[27],进而影响 CH₄ 菌活性及有机物质厌氧分解程度,研究

表明,沼泽 CH₄ 仅在地表积水或地下水位较高时排,当地下水位较低时,则转变为 CH₄ 的汇,湿地水分状况是决定 N₂O 季节变化的主要因素^[16],水位较低时,有利于硝化和反硝化细菌反应,提高 NO₃⁻ 的利用性^[28],因此温度、水位与湿地温室气体密切相关。东北林区的大、小兴安岭和长白山是我国森林沼泽集中分布区,占该区域天然湿地面积的 44%^[29]。火在森林湿地中是常见的影响因素^[30],火烧干扰是该区域主要干扰类型之一。运用静态箱-气相色谱法,原位同步观测了火烧草丛、灌丛沼泽土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 季节性排放通量特征,深入认识森林沼泽湿地温室气体排放的特征及主导影响因子,进一步揭示火干扰对 CO₂、CH₄ 和 N₂O 产生和排放的机理。因此,通过了解火干扰下森林湿地温室气体排放的季节变化,探讨其碳氮源与汇的转化机制,对控制温室气体排放以减缓气候变化有着重要意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

实验设置在小兴安岭的中段,黑龙江省伊春市友好林业局岭峰林场(48°03'53"-48°17'11" N, 128°30'36"-128°45'00" E),该区域春秋季节干燥多风,火灾发生频繁,2009 年 4 月下旬发生火灾,由伊春河林场火烧进入伊春林区,过火面积近万公顷,本实验选取的火灾类型主要为地面火(属于轻度火灾,主要烧毁凋落物层、草本层、灌木层及幼树等)类型。林冠火(属于重度火灾,不仅烧毁土壤表层、凋落物层、草本层、灌木层,而且烧毁全部或部分乔木层)类型未发现。研究区平均海拔在 436—546 m 之间,属温带大陆湿润季风气候,受西伯利亚冷空气和海洋暖湿气流的双重影响,四季气候变化明显。主要表现为:春季风大干旱,夏季温湿多雨,秋季多风干燥,冬季寒冷漫长。年平均气温为-1℃,年平均降水量为 629.6 mm,全年的两个降水高峰期分别为冬季降雪和 7—8 月的降雨,约占全年降水量的 70%。无霜期约 100 d,早霜出现在 9 月上旬,晚霜期约在翌年的 5 月中旬结束。地带性土壤主要为暗棕壤,面积约占所有土壤类型的 71%。非地带性土壤有:草甸土、沼泽土和泥炭土,草甸土和沼泽土占 27%,泥炭土占 2%。

1.2 样地设置

本研究于 2009 年 5 月下旬,在研究区相同海拔高度、地势平坦的地段,分别选择小兴安岭典型森林湿地类型:修氏苔草(*Carex schmidii*)沼泽、油桦-修氏苔草(*Betula ovalifolia-Carex schmidii*)灌丛沼泽,2 种类型中设置对照样地(未过火地段)和火烧样地(轻火),各样地面积均为 80 m×80 m。草丛沼泽优势种为修氏苔草(*Carex schmidii*);灌丛沼泽灌木主要为油桦(*Betula ovalifolia*),草本层优势种为修氏苔草;各试验样地简称为,草丛对照(C₀)、草丛火烧(C₁)样地,灌丛对照(G₀)、灌丛火烧(G₁)样地在每种处理样地,重复设置 3 个静态箱,共设置静态箱 12 个,于 2009 年 5 月 22 日至 9 月 22 日对各样地进行野外原位测定。

1.3 样品采集与分析

采用静态暗箱-气相色谱法进行气体采集分析。采样箱为(50 cm×50 cm×50 cm)四周和顶部密闭不锈钢保温箱体和不锈钢底座(50 cm×50 cm×10 cm)两部分,每次采气时先将顶箱扣在底座上,往槽里灌水以防止箱子和底座的接触处漏气,在箱内顶部安装直径 10 cm 小风扇,用 12 V 的蓄电池供电,以保持箱内气体浓度差均匀。用 60 ml 的聚氯乙烯医用注射器经过三通阀连接针头通过箱顶的部橡胶塞取样。取样时间为 2009 年 5 月 22 至 9 月 22 日的 8:00—11:00,每月取样 3 次,约 10 d 取样 1 次。取样时,在静态箱封闭后 0、10、20、30 min,用注射器取气注入 500 mL 的气体采集袋。在 1 周之内,用 HP5890 II 型气相色谱仪分析气体浓度。用离子火焰化检测器(FID)检测 CH₄ 和 CO₂ 气体,用电子捕获检测器(ECD)检测 N₂O。所有样品气体浓度和采样时间相关系数(R²)> 0.95 时被视为有效。利用气体通量公式计算^[31]:

$$F = \frac{dc}{dt} \frac{M}{V_0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} H$$

式中,F 为气体通量(mg·m⁻²·h⁻¹),正值为排放,负值为吸收;P₀、V₀、T₀ 分别为标准状态下的标准大气压、气体摩尔体积和绝对温度;dc/dt 为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率;M 为被测气体的摩尔质量;P、T 为采样点的实际大气压和温度;H 为采样箱高度。

1.4 数据处理

采用 SPSS16.0 统计分析软件包和 Microsoft Office Excel 2007 对数据进行分析处理。采用最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,用 Pearson 相关系数评价不同因子间的关系;显著性水平设定为 $\alpha=0.05$,所有绘图采用 SigmaPlot10.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 火干扰对草丛、灌丛沼泽环境因子产生的变化

由图 1 可以看出,火干扰对空气温度和土壤温度具有较大的影响。草丛沼泽、灌丛沼泽火干扰后生长季的平均气温和 0—10 cm 各层土壤温度较对照地提高了 0.1—2.0 ℃, 15—40 cm 各层土壤平均温度与对照地相近,变化幅度仅在 -1.1—0.2 ℃ 之间。进一步经配对样本 *t* 检验,草丛、灌丛火烧样地以同类型沼泽对照样地在气温和各层土壤平均温度之间均存在显著差异($P<0.05$)。

由图 2 可知,火干扰对草丛、灌丛沼泽水位具有明显的影响。草丛、灌丛沼泽火烧样地生长季节平均水位均较对照样地有所下降约 2.7 cm。草丛、灌丛沼泽对照和火烧样地整个生长季均在春夏两季维持较高水位,秋季水位下降显著,呈负值。经配对样本 *t* 检验,火烧样地与对照样地水位之间存在显著差异($P<0.05$)。可见,火干扰显著提高了草丛、灌丛沼泽的空气、地表及各层土壤温度,降低了土壤水位,改变了水位的季节分布格局。

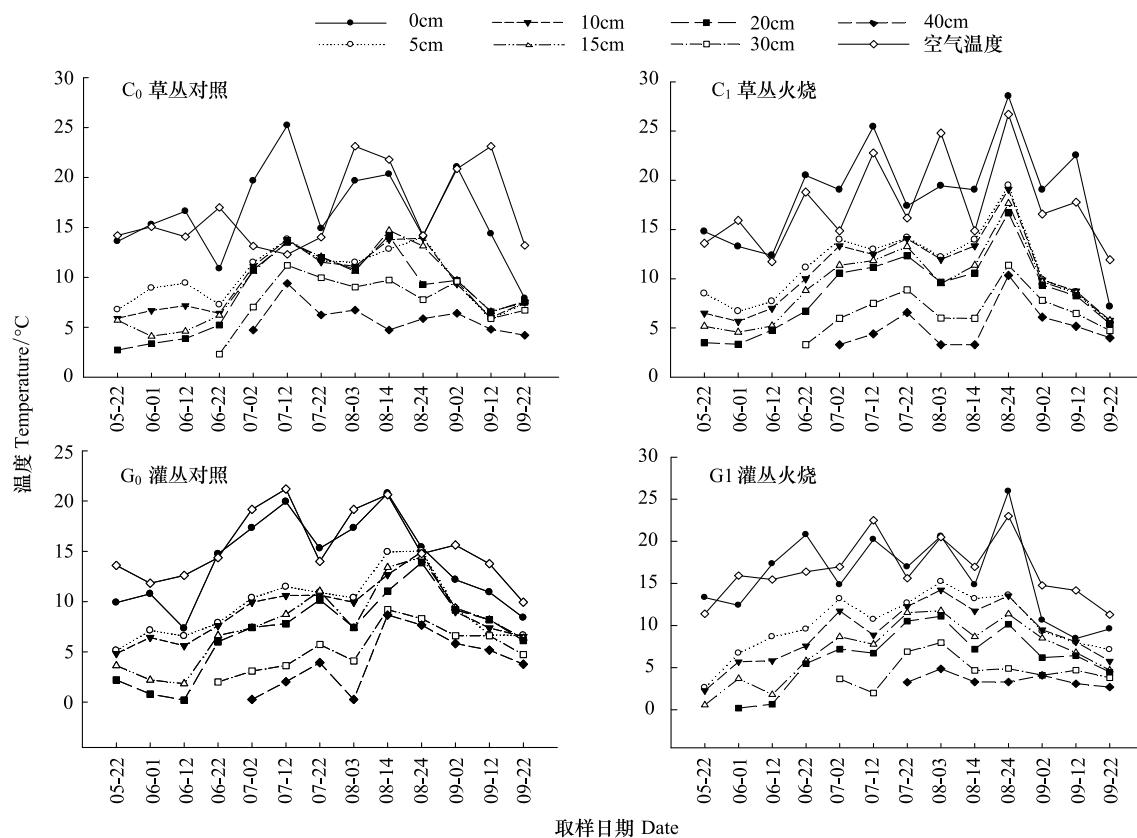


图 1 火干扰草丛、灌丛沼泽温度的季节变化

Fig. 1 Seasonal dynamics of temperature of hassock and shrubs swamps disturbed by fire

2.2 火干扰后草丛、灌丛沼泽湿地温室气体季节性排放影响

2.2.1 CH_4 排放通量季节变化

火干扰前后草丛沼泽对照、火烧样地 CH_4 排放通量的季节性规律未发生变化(图 3),均呈现秋季>夏季>春季的规律。其生长季节 CH_4 平均排放通量依次为 $14.3439, 22.3728 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 火烧样地较对照样地提高了 56.0%。经配对样本 *t* 检验,各样地之间差异不显著。对照、火烧样地春季(5 月下旬—6 月下旬)、夏季(7

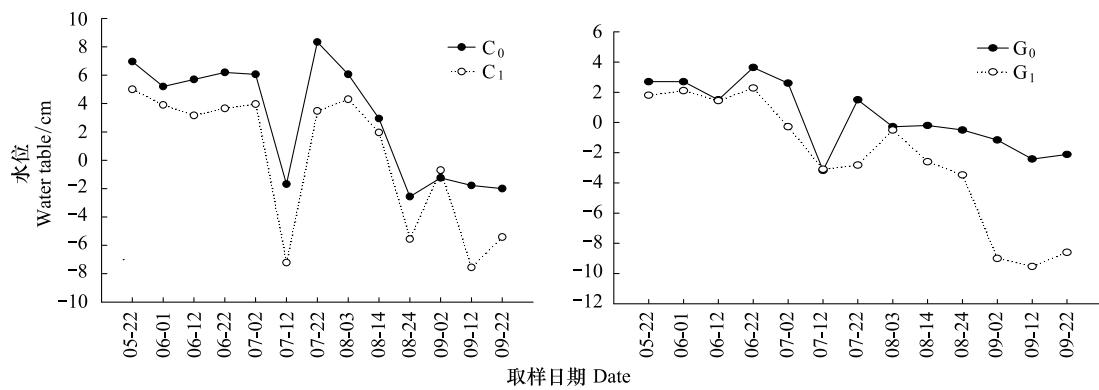
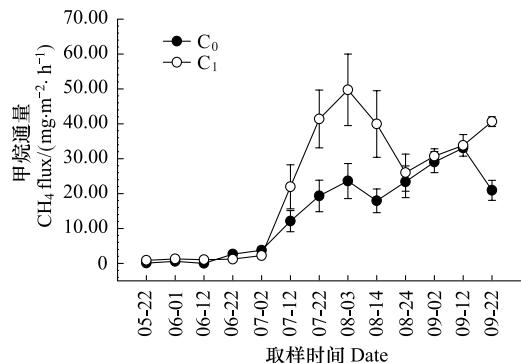
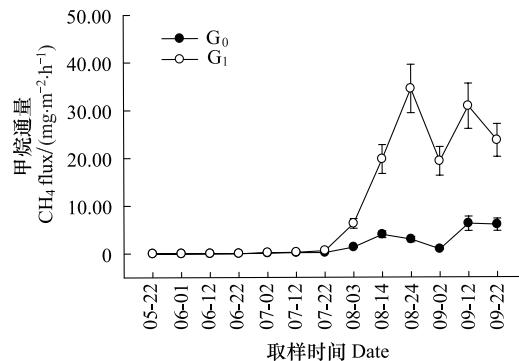


图2 火干扰后草丛、灌丛沼泽水位的季节变化

Fig. 2 Seasonal dynamics of water table of hassock and shrubs swamps disturbed by fire

月上旬—8月下旬)和秋季(9月上旬—9月下旬)的CH₄平均通量分别为0.2253、1.0725 mg·m⁻²·h⁻¹, 14.6807、26.0628 mg·m⁻²·h⁻¹和27.6766、35.0630 mg·m⁻²·h⁻¹。

火干扰对灌丛沼泽生长季节CH₄平均排放通量及季节变化具有一定影响(图4)。灌丛沼泽对照样地和火烧样地均排放CH₄,其生长季节CH₄平均排放通量依次为1.6645、10.4024 mg·m⁻²·h⁻¹,火烧样地较对照样地提高了524.9%。经配对样本t检验,各样地之间差异不显著。对照、火烧样地CH₄排放通量的季节变化规律基本一致,均呈现出春季弱吸收(平均通量为-0.0136、-0.0065 mg·m⁻²·h⁻¹)、夏季排放(1.2255、8.7834 mg·m⁻²·h⁻¹)、秋季强排放(4.3671、24.5892 mg·m⁻²·h⁻¹)的季节变化规律。

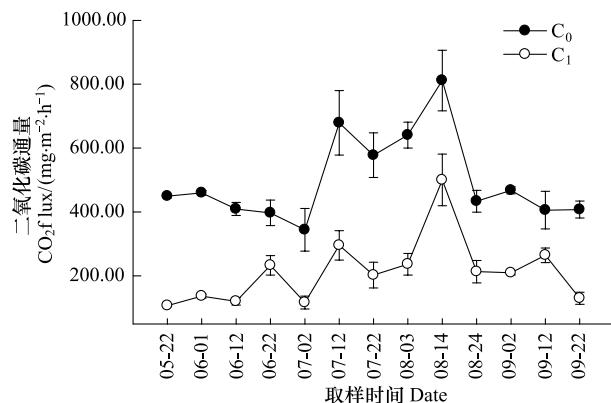
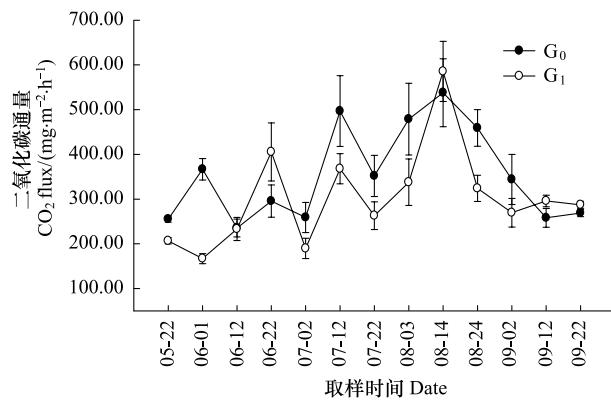
图3 草丛沼泽CH₄排放通量的季节变化Fig. 3 Seasonal variations of CH₄ flux of the hassock swamp图4 灌丛沼泽CH₄排放通量的季节变化Fig. 4 Seasonal variations of CH₄ flux of the shrubs swamp.

2.2.2 CO₂排放通量季节变化

由图5可知,火干扰降低了土壤CO₂排放通量,改变了草丛沼泽生长季节的土壤CO₂排放通量以及其季节变化规律。草丛、灌丛对照、火烧样地均排放CO₂,其生长季节土壤CO₂的平均排放通量分别为498.877、212.857 mg·m⁻²·h⁻¹,但火烧样地较对照样地下降了57.3%。经配对样本t检验,火烧样地与对照样地差异显著。对照样地春秋两季土壤CO₂排放通量(分别为439.723、427.238 mg·m⁻²·h⁻¹)相对较低且相近(变化幅度2.8%),夏季排放通量(554.932 mg·m⁻²·h⁻¹)最高,较春秋季土壤CO₂通量分别高出26.2%、29.9%;火烧样地土壤CO₂排放通量呈现出夏季(256.880 mg·m⁻²·h⁻¹;较春秋季分别高27.5%、111.4%)>秋季(201.518 mg·m⁻²·h⁻¹)>春季(121.474 mg·m⁻²·h⁻¹)的季节变化规律。因此,火干扰改变了草丛沼泽土壤CO₂排放通量的季节分布格局并降低了其排放强度。

火干扰前后灌丛沼泽样地均排放CO₂,火干扰后排放强度减弱(图6)。对照、火烧样其生长季节土壤

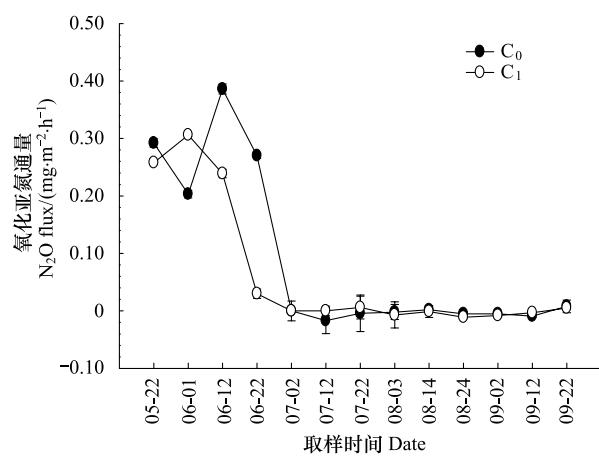
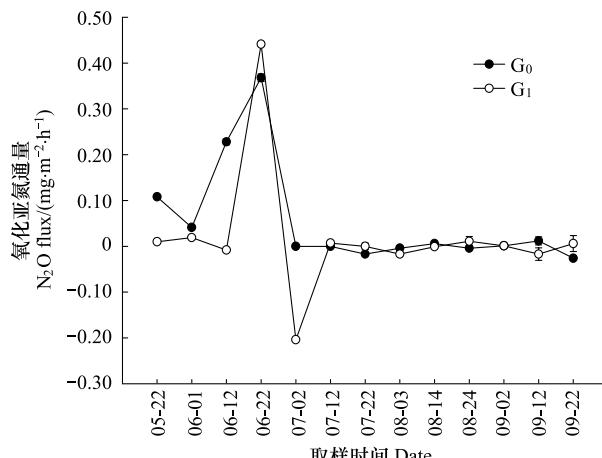
CO_2 的平均排放通量分别为 $354.344, 302.475 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 火烧样地较对照样地下降了 14.5%。经配对样本 t 检验, 火烧样地与对照样地差异显著。对照样地春秋两季土壤 CO_2 排放通量(分别为 $285.723, 290.306 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)相对较低且相近(变化幅度 1.6%), 夏季排放通量($411.197 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)最高, 较春秋季土壤 CO_2 通量分别高出 41.6%、43.9%;火烧样地土壤 CO_2 排放通量呈现出夏季($353.269 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;较秋春季分别高 24.3%、74.7%)>秋季($284.200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)>春季($202.230 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)的季节变化规律。因此,火干扰改变了灌丛沼泽土壤 CO_2 排放通量的季节分布格局并降低了其排放强度。

图 5 草丛沼泽 CO_2 排放通量的季节变化Fig. 5 Seasonal variations of CO_2 flux of the hassock swamp图 6 灌丛沼泽 CO_2 排放通量的季节变化Fig. 6 Seasonal variations of CO_2 flux of the shrubs swamp

2.2.3 N_2O 排放通量季节变化

火干扰前后草丛沼泽生长季节 N_2O 排放通量季节规律未发生变化(图 7)。草丛沼泽长季节 N_2O 平均排放通量分别为 $0.0859, 0.0626 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 火烧使 N_2O 排放通量降低了 27.1%。经过配对样本 t 检验, 各样地间的差异性不显著。草丛沼泽对照、火烧样地 N_2O 排放通量的季节变化规律相一致, 均呈现春季强排放(平均通量为 $0.2938, 0.2677 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)、夏季弱排放($0.0346, 0.0023 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)、秋季弱吸收($-0.0022, -0.0016 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)的规律。

火干扰对灌丛沼泽生长季节 N_2O 排放通量及季节变化产生影响(图 8)。其生长季节的 N_2O 平均排放通量分别为 $0.0547, 0.0192 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 火烧样地较对照样地降低了 64.9%。经过配对样本 t 检验, 各样地间的

图 7 草丛沼泽 N_2O 排放通量的季节变化Fig. 7 Seasonal variations of N_2O flux of the hassock swamp图 8 灌木沼泽 N_2O 排放通量的季节变化Fig. 8 Seasonal variations of N_2O flux of the shrubs swamp

差异性不显著。对照、火烧样地 N_2O 排放通量呈现不同的季节变化规律。对照样地 N_2O 春季强排放(平均通量为 $0.1254 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)、夏季弱排放($0.0497 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)、秋季弱吸收($-0.004 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)；火烧样地 N_2O 春夏季排放(平均通量分别为 0.0071 、 $0.0340 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)，秋季弱吸收($-0.0033 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)，排放量夏季>春季。

2.3 火干扰对草丛、灌丛沼泽温室气体排放与环境因子相关性的影响

草丛沼泽对照样地 CH_4 排放通量与地表土壤温度存在显著相关性($P<0.05$)，草丛和灌丛沼泽火干扰前后甲烷排放与水位相关性均不显著(表1)。草丛、灌丛沼泽对照样地土壤 CO_2 排放通量与 $0\text{--}15 \text{ cm}$ 土壤温度呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关，火烧样地与 $0\text{--}30 \text{ cm}$ 土壤温度呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关。草丛、灌丛对照、火烧样地土壤 CO_2 排放通量与水位极显著负相关($P<0.01$)。可见，土壤温度和地下水位是影响二氧化碳排放的主控因子，并且火干扰提高了 CO_2 排放通量与深层土壤温度的相关性。干扰对生长季 N_2O 排放环境因子的影响较小。灌丛沼泽火烧样地 N_2O 通量与地下 15cm 土壤温度显著相关($P<0.05$)，各类型沼泽 N_2O 排放通量与水位相关性均不显著。

表1 甲烷、二氧化碳、氧化亚氮气体排放通量与温度、水位的相关系数

Table 1 Correlation between methane, carbon dioxide, nitrous oxide fluxes with temperature and water table ($n=13$)

样地 Sites	气体 Air	水位 Water table	土壤温度 Soil temperature /°C					
			0	5	10	15	20	30
C ₀	CH ₄	0.229	0.574 *	0.397	0.177	0.273	0.257	0.273
C ₁		0.399	0.405	0.316	0.145	0.193	0.254	0.184
G ₀		0.049	0.057	0.294	0.238	0.231	0.261	0.108
G ₁		0.424	0.089	0.014	0.043	0.104	0.113	0.186
C ₀	CO ₂	-0.670 **	0.801 **	0.806 **	0.772 **	0.608 *	0.405	0.196
C ₁		-0.570 **	0.821 **	0.820 **	0.862 **	0.775 *	0.711 **	0.495 *
G ₀		-0.588 **	0.699 **	0.659 **	0.564 *	0.439	0.373	0.157
G ₁		-0.765 **	0.756 **	0.830 **	0.874 **	0.852 **	0.802 **	0.650 **
C ₀	N ₂ O	0.445	0.259	-0.183	-0.306	-0.357	-0.348	-0.455
C ₁		0.384	0.204	-0.007	-0.011	0.061	0.087	0.034
G ₀		-0.108	0.342	0.249	0.289	0.266	0.290	0.050
G ₁		0.332	-0.283	-0.264	-0.138	0.562 *	0.027	0.033

* * $P<0.01$ ；* $P<0.05$ ；C₀：草丛对照 Hassock Control；C₁：草丛火烧 Hassock Burned；G₀ 灌丛对照 Shrubs Control；G₁ 灌丛火烧 Shrubs Burned

2.4 火干扰对草丛、灌丛沼泽温室气体源、汇功能的影响

火干扰后草丛、灌丛沼泽 CH_4 排放量均上升，其火烧样地排放量分别是对照样的 1.6 、 6.2 倍。经火烧以后， CH_4 排放源的强度均增强。草丛、灌丛沼泽火干扰前后均为 CO_2 排放源，但火烧样地 CO_2 排放源强度分别较对照地下降了 57.3% 、 14.6% 。因此，火干扰削弱了两个类型沼泽生长季节土壤 CO_2 的排放。草丛、灌丛沼泽火干扰前后均排放 N_2O ，但火烧使草丛、灌丛沼泽 N_2O 排放强度分别较对照地下降了 27.1% 、 64.9% ，火干扰削弱了生长季节 N_2O 的排放。在百年尺度上， CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的 GWP^[1](全球变暖潜势值 global warming potential GWP) 值依次为 1 、 23 和 296 。

通过计算，草丛、灌丛沼泽对照、火烧样地在生长季节温室效应贡献潜力依次为 26.481 、 23.126 、 12.674 、 $16.970 \text{ hm}^{-2}/\text{a}$ 。火干扰增强了灌丛沼泽温室气体全球变暖潜势值 33.9% ，削弱了草丛沼泽温室效应贡献潜力 12.7% 。

3 讨论

3.1 火干扰对草丛、灌丛沼泽生长季节环境因子的影响

火干扰对草丛、灌丛火烧样地 $0\text{--}10 \text{ cm}$ 各层土壤温度较对照样地显著提高。火烧除了地上部分小灌

木、草本,改变了植被、大气、土壤和地表凋零物之间的热平衡,导致太阳辐射很容易到达地表致使土壤温度提高,使得更多的地表热量能传到土壤^[24];同时生物燃烧残留的黑色灰烬提高了太阳辐射吸收率和降低反射率,使得土壤温度提高。

草丛、灌丛沼泽经火干扰后水位降低,灌丛火干扰样地水位下降显著。可能是火灾过程中地表植被层及其物质被破坏、消耗,增加了沼泽热量的输入,促进了土壤、植被层蒸发和蒸散等水分交换过程,因而出现了不同程度的水位下降。这与湿地垦殖或排水造林干扰提高土壤温度与降低水位的研究结论^[32-34]基本一致。

3.2 火干扰对草丛、灌丛沼泽生长季温室气体排放季节变化规律的影响

3.2.1 火干扰对 CH₄ 排放季节变化的影响

火干扰后草丛、灌丛沼泽 CH₄ 排放通量显著提高。但火干扰前后排放通量规律未发生变化,均呈现出秋季>夏季>春季。从实验观察结果看,秋季 CH₄ 排放的增强,可能与碳的输入有关;春季火烧后,经生长季积累,秋季地表凋落物增加,同时部分植物根系分解,碳物质输入得到加强^[35],火烧后水中溶解有机碳和氨态氮含量有所增加^[26],提供了 CH₄ 产生的底物,火烧灰分在一定程度上提高了土壤水的 pH 值^[36],提供了产 CH₄ 菌适宜水环境;同时,低强度的火烧增加了土壤微生物的数量及活性^[37],促进了 CH₄ 的形成。

3.2.2 火干扰对 CO₂ 排放季节变化的影响

草丛对照样地 CO₂ 地生长季排放通量为夏季>春季>秋季。草丛火烧样地、灌丛对照与火烧样地生长季 CO₂ 排放通量均为夏季>秋季>春季,且排放强度呈现明显降低的变化规律。两个类型的沼泽湿地,夏季 CO₂ 通量排放高,春秋季较低。这与火干扰有关,CO₂ 的排放以土壤呼吸为主,主要包括植物根系、土壤微生物、动物呼吸及含碳物质的化学氧化作用^[38]。本次林火发生于春季,草丛(以修氏苔草为主)沼泽植被群落结构单一,植被根系浅,受火干扰最为显著,草丛沼泽地表枯落物烧毁严重,反应底物锐减或完全烧毁,同时土壤有机质、微生物、动物,也受不同程度的受到影响或破坏,抑制了 CO₂ 的排放。因此,春季土壤呼吸降低,CO₂ 排放通量较低。夏季草丛生长迅速,植物光合作用强烈,增进光合作用的大量产物在土壤中积聚,同时夏季空气、土壤温度,水位都维持较高水平,增强了土壤微生物和地上植物根系的活性,从而促进土壤呼吸作用增强^[39]。有研究表明,土壤水分、植被覆盖或凋落物量、根系分布及其生物量、微生物数量等都对土壤呼吸都产生影响^[40],Verville J H 等发现,湿地 CO₂ 释放最重要的调节因素是植被组成^[41],而不是土壤温度或者水位深度。被火干扰的植被、土壤微生物经夏季的生长与恢复,至秋季植物根呼吸及微生物分解作用得到加强,凋落物的积累也了增加反应底物,出现秋季土壤呼吸大于春季的观察结果;同时,由于火烧抑制了植物根系呼吸及微生物分解过程,使整个生长季节土壤 CO₂ 的排放减少。Sawamoto^[42],Richter^[43]等分别对西伯利亚及阿拉斯加火灾地区研究发现,火灾后土壤呼吸降低,二氧化碳排放减少。阿拉斯加地区火灾后区域的土壤呼吸与未干扰区域相比,降低了约 50%。可见,火干扰改变了土壤 CO₂ 排放通量的季节分布格局并降低了其排放强度。

3.2.3 火干扰对 N₂O 排放季节变化的影响

草丛沼泽对照、火烧样地及灌丛沼泽对照样地 N₂O 排放通量季节变化规律未发生变化,均呈现春季强排放、夏季弱排放、秋季弱吸收的规律。这与土壤 N₂O 排放的硝化—反硝化作用有密切关系,土壤的硝化—反硝化作用是一个微生物生化过程,影响土壤微生物活动的因素均对这一过程产生作用^[42]。如土壤的气热条件变化,当土壤温度升高会促进 N₂O 的产生和排放^[44],当土壤中 O₂ 供应充足时,硝化的最终产物是 NO₃⁻,反之,当土壤 O₂ 供应不足或处于严格的厌氧环境,反硝化作用生成 N₂^[45]。当某一时期土壤中 O₂ 供给处于硝化与反硝化过程产 N₂O 的临界,N₂O 排放将大量增加^[46]。火干扰改变了湿地水汽热供给状况,结果使得 N₂O 排放的季节变化规律性发生了变化。

灌丛沼泽火干扰样地 N₂O 排放通量季节变化规律发生变化,春夏季排放,秋季弱吸收,排放量夏季>春季。火烧样地夏季 N₂O 排放通量高于秋季,原因可能为夏季降雨时,样地地表积水,天晴时地表积水消失但土壤保持湿润,这种干湿交替有利于 N₂O 的产生和排放,导致了同时适宜硝化和反硝化过程的 O₂ 供应状况,因而引起 N₂O 排放通量的增加。土壤处于干湿交替过程中,会有较高的反硝化作用率^[47]。

从生长季观察得出,火干扰降低了 N_2O 排放强度,其原因可能是,火干扰后,改变了底物及土壤环境结构,如土壤含水量降低,表层温度升高^[44],pH 值增大,这些因素均对土壤硝化和反硝化作用产生影响^[47],反硝化速率的最佳 pH 范围为 7.1—8.1^[34,48],酸性条件下,反应产物中 N_2O/N_2 的比例较大,随着 pH 值的上升,反应产物中 N_2O/N_2 的比例逐渐下降^[34,28]。夏季草丛、灌丛沼泽处于高水位,较低 O_2 含量和较丰富 C、N 营养物质被视为反硝化作用 N_2O 排放的主要因素。研究发现,土壤含水量高促进厌氧微生物生长,有利于 C、N 营养物质的扩散及反硝化细菌的吸收^[33]。因此,火干改变了环境中的诸多因素,是造成 N_2O 的排放通量下降的因素,但各影响因子间的关系还需进一步研究。

3.3 火干扰对草丛、灌丛沼泽温室气体排放与环境因子关系的影响

火干扰前后环境因子对草丛、灌丛沼泽生长季 CH_4 排放影响较弱, CH_4 排放量仅与地表土壤温度呈显著相关。与以往的研究得出的结论相一致, CH_4 通量与任何一层土壤温度(或泥炭温度和水温)都无显著相关性^[17,49]。

CH_4 排放主要经过 CH_4 产生、消耗(氧化)和传输 3 个过程,每个过程都受温度的影响^[50],因此, CH_4 排放可能与温度存在相关性,有研究表明当水位达到或接近地表时,温度才会成为 CH_4 排放的主要控制因子^[51,53]。本研究中草丛对照样地生长季平均水位为 2.94 cm,水位到或刚刚超过地表,因此, CH_4 排放表现出与 0 cm 土壤温度具有相关性。

CH_4 排放通量与水位无显著相关性,在加拿大北方森林湿地,有实验研究表明,不论是单个样点还是所有样点结合起来,均未发现甲烷排放通量和水深之间的相关性^[53],本研究与之相吻合。原因可能是水位对 CH_4 通量排放的影响具有时滞效应,当水位上高或下降时,并未对 CH_4 通量排放立即产生影响,而是经过一段时间后,才对 CH_4 的生成和排放产生作用^[24]。

火干扰对草丛、灌丛沼泽生长季土壤 CO_2 排放与环境因子存在显著或极显著相关性。草丛沼泽对照与火烧样地与 0、5、10 cm 土壤温度极显著相关。灌丛沼泽对照样地与 0、5 cm 土壤温度及相关,火干扰样地与 0—30 cm 土壤温度均及相关。可见,火干扰使土壤 CO_2 排放通量与土壤温度的相关性提高,这是火干扰影在一定程度上响了植物群落与土壤之间的水气热平衡,改变了土壤的水热状况^[54],而土壤温度和湿度为微生物异养呼吸和植物根系呼吸产生 CO_2 过程的主要影响因素^[55]。研究表明,在一定的水分含量范围内, CO_2 释放量与水分含量呈极显著相关^[56]。也有研究认为,北方湿地土壤 CO_2 排放与水位呈正相关关系^[57],但是大多数研究结果表明, CO_2 释放量与水位呈负相关。Freeman C 等研究发现,水位高度对泥碳地温室气体通量影响显著, CO_2 通量与水位高度呈强烈的负相关^[58]。本研究同样也发现,无论是草丛、灌丛沼泽对照、火烧样地, CO_2 通量与水位呈显著负相关。

火干扰对草丛、灌丛沼泽生长季 N_2O 排放环境因子的影响较弱,除灌丛火烧样地 N_2O 排放与土壤 15 cm 温度具有相关性,与其他各层土壤温度及水位均无明显相关性。原因可能是 N_2O 的排放是硝化作用和反硝化作用共同的产物,而硝化—反硝化作用是一个微生物过程,凡是影响土壤微生物活动的因素均影响土壤硝化和反硝化作用^[42,21]。火干扰不仅改变植被群落的林相结构,同时也改变了土壤的物理(温度、湿度)^[59-60]及生物^[26]特性,从而对温室气体的排放产生影响。因此,受诸多因素的影响和制约,湿地中 N_2O 通量排放具有很强的时间变异性^[61]。

4 结论

火干扰对草丛、灌丛沼泽生长季节空气、土壤温度以及水位均具有显著影响。草丛、灌丛沼泽火干扰后生长季的平均气温和 0—10 cm 各层土壤温度较对照地提高了 0.1—2.0 ℃。草丛、灌丛沼泽样地整个生长季维持在较高水位。 CH_4 通量的季节变化格局一致,均呈现春季吸收、夏秋季排放,排放量秋季>夏季的季节变化规律。

火干扰改变了土壤 CO_2 排放通量的季节分布格局,未火烧样地 CO_2 排放通量春秋季节较低且相近,夏季排放量最高,火干扰使其则转化为夏季>秋季>春季的季节分布格局。

草丛、灌丛沼泽火干扰前后 N_2O 排放通量季节变化规律性不同,草丛对照、火烧样地 N_2O 排放通量的季节变化规律相一致,均呈现春季强排放、夏季弱排放、秋季弱吸收的规律。灌丛沼泽对照样地 N_2O 春季强排放、夏季弱排放、秋季弱吸收;火烧样地 N_2O 春夏季排放,秋季弱吸收,且排放通量夏季>春季。

两种类型沼泽样地,仅草丛沼泽对照样地 CH_4 通量与个别土层土壤温度显著相关($P<0.05$)。土壤温度和地下水位是影响 CO_2 排放的主控因子,火干扰前后草丛、灌丛沼泽 CO_2 排放与土壤温度和水位均呈显著相关性,并且火干扰提高了 CO_2 排放通量与深层土壤温度的相关性。火干扰对生长季 N_2O 排放环境因子的影响较小。仅灌丛沼泽火烧样地 N_2O 通量与 15cm 土壤温度显著相关($P<0.05$)。草丛、灌丛沼泽水位与 CH_4 、 N_2O 排放的相关性均不显著,与 CO_2 显著负相关。

经火干扰后, CH_4 排放源的强度均增强。火干扰削弱了草丛、灌丛类型沼泽生长季节土壤 CO_2 和 N_2O 的排放。草丛、灌丛沼泽火烧样地 CO_2 和 N_2O 排放源强度分别较对照地下降了 57.3%、14.6% 和 27.1%、64.9%。

火干扰增强了灌丛沼泽温室气体全球变暖潜势值 33.9%,削弱了草丛型沼泽温室气体全球变暖潜势值 12.7%。因此从控制温室气体排放角度考虑,湿地管理实践中可以适当开展计划火烧。

References:

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Watson R, eds. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001:267-269.
- [2] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, Schulze E D, Rebmann C. Respiration as main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404: 861-865.
- [3] Mu C C, Cheng W, Sun X X, Wu Y X. Seasonal variation of emission fluxes of CO_2 , N_2O and CH_4 from *Larix gmelinii* swamps soils in Xiaoxing'an Mountains of China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46 (7): 7-15.
- [4] Bubier J L, Bhatia G, Moore T R, Roulet N T, Lafleur P M. Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide Exchange at a Large Peatland in Ontario Canada, *Ecosystems*. 2003, 6: 353-367.
- [5] Alm J, Schulman L, Walden J, Nykanen H, Martikainen PJ, Silvola J. Carbon balance of boreal bog during a year with an exceptionally dry summer. *Ecology*, 1999, 80 (1):161-174.
- [6] Baron J S, Hartman M D, Band L E, Lammers R. Sensitivity of a high elevation Rocky Mountain watershed to altered climate and CO_2 . *Water Resource Res.*, 2000, 36 (1):89-99.
- [7] Alongi D M, Trott L A, Pfitzner J. Deposition, mineralization and storage of carbon and nitrogen in sediments of the far northern Great Barrier Reef shelf. *Continental Shelf Research*, 2007, 27:2595-2622.
- [8] Whitting G J, Chanton J P. Greenhouse carbon balance of wetlands: Methane emission versus carbon sequestration. *Tellus*, 2001, 53: 521-528.
- [9] Martikainen P J, Nykänen H, Silvola P M. Effect of a lower water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature*, 1993, 366: 51-53.
- [10] Wang D X, Lu X G, Ding W X, Cai Z C, Gao J F, Yang F M. Methane emission from marshes in Zoige Plateau. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(6):877-880.
- [11] Wang D X, Song C C, Wang Y S, Wang Y Y, Yan B X, Zhao Z C. Carbon dioxide flux from peat mire in Ruoergai Plateau. *Ecology and Environment*, 2005, 14(6): 880-883.
- [12] Wang D X, Song C C, Wang Y S, Wang Y Y, Yan B X, Zhao Z C. N_2O flux from the mire in Ruoergai Plateau. *Ecologic Science*, 2005, 24 (3) : 193-196.
- [13] Zhang F W, Liu A H, LI Y N, Zhao L, Wang Q X, Du M Y. CO_2 flux in alpine wetland ecosystem on Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (2) : 453-462.
- [14] Huang G H, Xiao D N, Li Y X, Cheng G X, Yang Y C, Zhao C W. CH_4 emissions from the reed wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9) : 1494-1497.
- [15] Yang J S, Liu J S, Wang J D, Yu J B, Sun Z G, LI X H. Emissions of CH_4 and N_2O from a wetland in the Sanjiang Plain. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3) : 432-440.
- [16] Song C C, Zhang L H, Wang Y Y, Zhao Z C. Annual dynamics of CO_2 , CH_4 , N_2O emissions from freshwater marshes and affected by nitrogen fertilization. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27: 2369-2375.
- [17] Song C C, Yan B X, Wang Y S, Wang Y Y, Lou Y J, Zhao Z C. Fluxes of carbon dioxide and methane from swamp and impact factors in Sanjiang Plain, China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(23) : 2473-2477.
- [18] Yang J S, Yu J B, Liu J S, Wang J D, Sun Z G, Li X H. N_2O and CH_4 fluxes in an island forest in wetland, Sanjiang Plain. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4) : 476-479.

- [19] Wang Y Y, Zheng X H, Song C C, Zhao Z C. N₂O flux in typical wetlands of Sanjiang Plain. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3) : 493-497.
- [20] Ye Y, Lu C Y, Lin P. Seasonal and spatial changes of methane emissions from mangrove wetlands in Hainan Island and Xiamen. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(2) : 152-156.
- [21] Mu C C, Shi L Y, Sun X X. Fluxes and controls of CO₂, CH₄ and N₂O in a marsh wetland of Xiaoxing'an Mountains, Northeastern China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(3) : 617-623.
- [22] Mu C C, Liu X, Sun X X, Shi L Y, Feng D J, Cheng W, Wu Y X. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from broad-leaved forested swamp soils in Xiaoxing'an Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17) : 4598-4608.
- [23] Sun X X, Mu C C, Shi L Y, Cheng W, Liu X, Wu Y X, Feng D J. Methane emission from forested swamps in Xiaoxing'an Mountains, Northeastern China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(3) : 535-545.
- [24] O'Neill K P, Kasischke E S, Richter D D. Seasonal and decadal patterns of soil carbon uptake and emission along an age sequence of burned black spruce stands in interior Alaska. J. Geophys. Res., 2003, 108 : 8155-8170.
- [25] Kasischke E S, French N H F. Constraints on using AVHRR composite imagery to study patterns of vegetation cover in boreal forests. Int. J. Remote Sens., 1997, 18 : 2403-2426.
- [26] Andersson M, Michelsen A, Jensen M, Michael J, Annelise K. Tropical savannah woodland: effects of experimental fire on soil microorganisms and soil emissions of carbon dioxide. Soil Biol. Biochem., 2004, 36 : 849-858.
- [27] Liikanen A, Huttunen J T, Karjalainen S M, Heikkilä K, Vaisanen T S, Nykänen H, Martikainen P J. Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters. Ecological Engineering, 2006, 26(3) : 241-251.
- [28] Yu L L, Mu C C, Gu H, Zhang B W. Effects of fire disturbance on greenhouse gas emission from Larix gmelinii-Carex schmidtii forested wetlands in XiaoXing'an Mountains, Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18) : 5180-5191.
- [29] Lang H Q. Chinese wetlands vegetation. Beijing: Science Press, 1999, 35-37.
- [30] Zhao H M, Yu X F, Wang J. Effects of Fire on Wetland Ecosystems-A Review. Advance In Earth Science, 2010, 25(4) : 374-380.
- [31] Wang, Y S. Chamber methods for measuring carbon exchange. Chen P Q ed. Carbon Circling in Earth System. Beijing: Science Press, 2004 : 130-145.
- [32] Singh J S, Gupta W H. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. Botanical Review. 1977, 43 : 449-529.
- [33] Luo J, Tillman R W, Ball P R. Factors regulating denitrification in a soil under pasture. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31 : 913-927.
- [34] Feng K, Yin S X. Factors affecting N₂O formation and emission from soils. Progress in Soil Science, 1995, 23(6) : 35-40.
- [35] Kang H, Freeman C. The influence of hydrochemistry on methane emissions from two contrasting northern wetlands. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, 141 : 263-272.
- [36] Christensen NL. The effect of fire on physical and chemical properties of soil in Mediterranean climate shrubland // Moreno J M, ed. The Role of Fire in Mediterranean type Ecosystems. New York: Springer, 1994: 79-95
- [37] Zhao K Y, Zhang W F, Zhou Y W, Yang Y X. Effects of Fire in Great Xing'an Mountains on Environment and the Strategies. Beijing: Science Press, 1994.
- [38] Singh J S, Gupta W H. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. Botanical Review, 1977, 43 : 449-529.
- [39] Chen P Q. Carbon Cycle in Earth System. China Science Press, Beijing, 2004, 266-268.
- [40] Stoyan H, De-Poll H, Bohm S, Robertson G P, Paul EA. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. Plant and Soil, 2000, 222 : 203-214.
- [41] Verville J H, Hobbie S E, Chapin F S III, Hooper D. U. Response of tundra CH₄ and CO₂ flux to manipulation of temperature and vegetation. Biogeochemistry, 1998, 41 : 217-235.
- [42] Sawamoto T, Hatano R, Yajima T, Takahashi K, Isaev A P. Soil respiration in Siberian taiga ecosystems with different histories of forest fire. Soil Science and Plant Nutrition, 2000, 46 : 31-42. [43] Richter D D, O'Neil K P, Kasischke E S. Postfire stimulation of microbial decomposition in black spruce (*Picea mariana* L.) forest soils: a hypothesis // Kasischke E S, Stocks B J, eds. Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecological Studies Series, New York: Springer, 2000. 197-213.
- [44] Sharroff S H, Wright H A. Effects of fire, ash, and litter on soil nitrate, temperature, moisture and tobosa grass production in the Rolling Plains. Journal of Range Management, 1977, 30 : 266-270.
- [45] Parton W J, Mosier A R, Ojima D S, Valentine D, Schimel K, Weier, Kulmala A. Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10 (3) : 401-412.
- [46] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, Shen R X, ShangGuan H J, Kogge M, Heyer J, Papen H, Jin X S, Li L T. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in southeast China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1997, 21(2) : 231-237.
- [47] Smith C J, Delaunay R D, Patrick W H Jr, Nitrous oxide emission from Gulf Coast Wetlands. Geochemical et Cosmochimica Acta, 1983, 47 : 1805-1814.
- [48] Struwe S, Kjeller A. Potential for N₂O production from beech (*Fagus sylvatica*) forest soils with varying pH. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26 : 1003-1009.
- [49] Morrissey L A, Livingston G P. Methane emissions from Alaska Arctic Tundra: An assessment of local spatial variability. Journal of Geophysical Research, 1992, 97 : 661-670.
- [50] Segers R. Methane production and methane consumption: A review of processes underlying wetland methane fluxes. Biogeochemistry, 1998, 41 :

23-51.

- [51] Moore T R, Knowles R. Methane emission from fen bog and swamp peatlands in Quebec. *Biogeochemistry*, 1990, 11: 45-61.
- [52] Song C C, Wang Y Y, Wang Y S, Zhao Z C. Character of the greenhouse gas emission in the freshwater mire under human activities. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(1):82-86.
- [53] Holly R, Jeff S, Darwin A. Factors influencing methaneflux from a boreal forest wetland in Saskatchewan, Canada. *Soil Biol. Biochem*, 2002, 34: 435-443.
- [54] Ogee J, Brunet Y. A forest floor model for heat and moisture including a litter layer. *Journal of Hydrology*, 2002, 255: 212-233.
- [55] Bartlett KB, Crill PM, Sass RL, Harriss R, Dise N. Methane Emissions From Tundra Environments in the Yukon-Kuskokwim Delta, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97 (16): 645-660.
- [56] Chimner R A, Cooper D J. Influence of water table levels on CO₂ emissions in a Colorado subalpine fen: an in situ microcosm study. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(3): 345-351.
- [57] Silvoli J. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology*, 1996, 84: 219-228.
- [58] Freeman C, Lock M A, Reynolds B. Flux of CO₂, CH₄ and N₂O from a Welsh peatland following simulation ofwater table drawdown: Potential feedback to climate change. *Biogeochemistry*, 1993, 19:51-56
- [59] O'Neill K P, Kasischke E S, Rich terD D. Seasonal and decadal patterns of soil carbon up take and emission along an age sequence of burned black spruce stands ininterior Alaska. *J Geophys Res*, 2003, 108: 8155-8170.
- [60] Kasischke E S, French N H F. Constraints on using AVHRR composito site index imagery to study patterns of vegetation cover in boreal forests. *Int J Remote Sens*, 1997, 18: 2403-2426.
- [61] Groffmann P, Brumme R, Butterbach-Bahl K, Dobbie K E, Mosier A R, Ojima D, Papen H, Parton W J, A. Smith K, Wagner-Riddle C. Evaluating nitrous oxide fluxes at the ecosystem scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14: 1061-1070.

参考文献:

- [3] 牟长城,程伟,孙晓新,吴云霞. 小兴安岭落叶松沼泽林土壤CO₂, N₂O 和CH₄ 的排放规律. *林业科学*, 2010, 46(7): 7-15.
- [10] 王德宣,吕宪国,丁维新,蔡祖聪,高景福,杨福明. 若尔盖高原沼泽湿地CH₄ 排放研究. *地球科学进展*, 2002, 17(6): 877-880.
- [11] 王德宣,宋长春,王跃思,王毅勇,阎百兴,赵志春. 若尔盖高原泥炭沼泽湿地CO₂ 呼吸通量特征. *生态环境*, 2005, 14(6): 880-883.
- [12] 王德宣,宋长春,王跃思,王毅勇,阎百兴,赵志春. 若尔盖高原沼泽湿地N₂O 排放通量研究. *生态科学*, 2005, 24(3): 193-196.
- [13] 张法伟,刘安花,李英年,赵亮,王勤学,杜明远. 青藏高原高寒湿地生态系统CO₂ 通量. *生态学报*, 2008, 28(2): 453-462.
- [14] 黄国宏,肖笃宁,李玉祥,陈冠雄,杨玉成,赵长伟. 芦苇湿地温室气体甲烷(CH₄)排放研究. *生态学报*, 2001, 21(9): 1494-1497.
- [15] 杨继松,刘景双,王金达,于君宝,孙志高,李新华. 三江平原生长季沼泽湿地CH₄、N₂O 排放及其影响因素. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 432-440.
- [16] 宋长春,张丽华,王毅勇,赵志春. 淡水沼泽湿地CO₂、CH₄ 和N₂O 排放通量年际变化及其对氮输入的响应. *环境科学*, 2006, 27(12): 2369-2375.
- [17] 宋长春,阎百兴,王跃思,王毅勇,娄彦景,赵志春. 三江平原沼泽湿地CO₂ 和CH₄ 通量及影响因子. *科学通报*, 2003, 48(23): 2473-2477.
- [18] 杨继松,于君宝,刘景双,王金达,孙志高,李新华. 三江平原湿地岛状林CH₄ 和N₂O 排放通量的特征. *生态环境*, 2004, 13(4): 476-479.
- [19] 王毅勇,郑循华,宋长春,赵志春. 三江平原典型沼泽湿地氧化亚氮通量. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 493-497.
- [20] 叶勇,卢昌义,林鹏. 海南岛和厦门红树林湿地CH₄ 排放的时空变化. *大气科学*, 2000, 24(2): 152-156.
- [21] 牟长城,石兰英,孙晓新. 小兴安岭典型草丛沼泽湿地CO₂、CH₄ 和N₂O 的排放动态及其影响因素. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 617-623.
- [22] 牟长城,刘霞,孙晓新,石兰英,冯登军,程伟,吴云霞. 小兴安岭阔叶林沼泽土壤CO₂、CH₄ 和N₂O 排放规律及其影响因子. *生态学报*, 2010, 30(17): 4598-4608.
- [23] 孙晓新,牟长城,石兰英,程伟,刘霞,吴云霞,冯登军. 小兴安岭森林沼泽甲烷排放及其影响因子. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 535-545.
- [28] 于丽丽,牟长城,顾韩. 火干扰对小兴安岭落叶松-苔草沼泽温室气体排放的影响. *生态学报*, 2011, 31(18):5180-5191.
- [29] 郎惠卿. 中国湿地植被. 北京:科学出版社, 1999, 35-74.
- [30] 赵红梅,于晓菲,王健. 火烧对湿地生态系统影响研究进展. *地球科学进展*, 2010, 25(4) 374-380.
- [31] 王跃思. 碳交换的箱法测定. 陈泮勤主编. 地球系统碳循环. 北京:科学出版社,2004:130-145.
- [34] 封克、殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素. *土壤学进展*, 1995, 23(6):35-42.
- [37] 赵魁义,张文芬,周幼吾,杨永兴主编. 大兴安岭森林火灾对环境的影响与对策. 北京:科学出版社,1994
- [39] 陈泮勤. 地球系统碳循环. 北京:科学出版社,2004,266-268.
- [46] 郑循华,王明星,王跃思,沈壬兴,上官行健,Kogge M, Heyer J, Papen H,金继生,李老土. 华东稻田CH₄ 和N₂O 排放. *大气科学*, 1997, 21(2): 231-237
- [52] 宋长春,王毅勇,王跃思,赵志春. 人类活动影响下淡水沼泽湿地温室气体排放变化. *地理科学*, 2006, 26(1):82-86.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32 ,No. 19 October ,2012(Semimonthly)
CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from hassock and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	ZHANG Rong, LIU Tong (6056)
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	XIONG Jun, LIN Hufeng, LI Zhenfang, et al (6100)
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	ZHAN Lijie, GUO Liyue, NING Tangyuan, et al (6120)
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	PU Xinning, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)
Advances in ecological immunology	XU Deli, WANG Dehua (6251)
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)

《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

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 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

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:1000717

印 刷 北京北林印刷厂
行 销 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

订 购 全国各地邮局
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

广 告 经 营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010) 64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933
19
9 771000093125