

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

(SHENTAI 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空间自相关分析 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 $TaNHX2$ 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 邓振墉, 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, 全 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

于丽丽, 牟长城, 顾韩, 张博文. 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.

Yu L L, Mu C C, Gu H, Zhang B W. Effects of fire disturbance on greenhouse gas emission from *Larix gmelinii-Carex schmidii* forested wetlands in XiaoXing'an Mountains, Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5180-5191.

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, 张博文

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要:利用静态箱-气相色谱法,研究火烧干扰(轻度、重度)对小兴安岭落叶松-苔草沼泽生长季 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放的影响。结果表明:火烧干扰使 CO_2 排放通量提高24.0%—45.9%, CH_4 提高135.1%(轻度)或下降31.3%(重度), N_2O 由吸收转化为排放。重度火烧改变了 CO_2 的季节排放规律,火烧干扰改变了 CH_4 与 N_2O 的季节排放规律。火烧与未火烧样地 CO_2 排放与水位呈显著负相关,与空气温度、土壤温度呈显著正相关;未火烧样地 CH_4 排放与水位呈显著负相关,与地表温度呈显著正相关,轻度火烧样地 CH_4 排放与气温和个别土壤温度呈显著正相关,而重度火烧样地 CH_4 排放、各样地的 N_2O 排放与水位和温度相关性均不显著。火烧干扰使 CO_2 排放源强度较未火烧提高,轻度火烧样地 CH_4 排放源强度较未火烧提高、重度样地则下降; N_2O 则由吸收汇转化为排放源。火烧样地温室效应贡献潜力较未火烧样地提高了1/4—1/2,且呈现出随火烧干扰强度增大而递增的变化规律。

关键词:小兴安岭; 落叶松-苔草沼泽; 温室气体排放; 火烧干扰

Effects of fire disturbance on greenhouse gas emission from *Larix gmelinii-Carex schmidii* forested wetlands in XiaoXing'an Mountains, Northeast China

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

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

Abstract: A static chamber and gas chromatography were employed to investigate the effects of low- and high-intensity burning on CH_4 , CO_2 and N_2O discharge by larch swamp of the Lesser Xing'an Mountains. The results show that the average seasonal CH_4 , CO_2 and N_2O fluxes were respectively 409.7, 508.1, and 597.8 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ at sites where there was no burning, 0.057, 0.134 and 0.043 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ at sites with low-intensity burning, and -0.0063, 0.0021 and 0.0059 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ at sites with high-intensity burning. Fire disturbance increased CO_2 fluxes by 24.0%—45.9% and increased CH_4 fluxes by 135.1% in the case of light burning and decreased CH_4 fluxes by 31.3% in the case of heavy burning, and shifted the burning site from a N_2O sink to a N_2O source. Severe fire disturbance greatly affected the seasonal dynamics of CO_2 fluxes, and the fire intensity affected seasonal variations in CH_4 and N_2O fluxes. CO_2 emissions at the study sites had significant negative correlation with the water level, and the temperature had significant positive correlation with the soil temperature. CH_4 emissions from the site at which there was low-intensity burning had significant negative correlation with the level of the water table and significant positive correlation with the soil temperature at 0 cm. The flux of CH_4 emissions from the site with low-intensity burning had positive correlation with air temperature and some individual soil temperatures, whereas that from the site with high-intensity burning and the flux of N_2O emissions from sites with low-intensity, high-intensity and no burning had no relationship with soil temperature or the level of the water table. The CO_2

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30670349)

收稿日期:2010-10-22; 修订日期:2011-04-07

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

emission intensity at burning sites and CH₄ emitted from the lightly burning site were both higher than respective values for the site where there was no burning, but the CH₄ emission intensity from the heavily burning site was less than that at the site where there was no burning. Fire disturbance converted a site from a weak sink of N₂O into a weak source. The global warming potential of the fire-disturbance sites increased by 1/4—1/2 relative to that of the site with no burning, with the potential increasing with the increasing intensity of the fire disturbance. Therefore, wetland management should be strengthened in view of the effective control of greenhouse gas emissions in wetlands, especially in terms of avoiding intense fire. In addition, both before and after fire in the investigated forest swamp, the effect of greenhouse gases mainly depends on the potential of soil CO₂ emissions (99%), and the role of N₂O CH₄ emissions is very small (a contribution of less than 1%). It is thus necessary to research the carbon cycle.

Key Words: XiaoXing'an Mountains; *Larixgmelinii-Carexschmidtiis* wamp; greenhouse gas emission; fire disturbance

目前全球地表平均温度已上升(0.6±0.2)℃,其主要诱因是由于人类使用化石燃料和土地覆盖与利用的变化使大气圈中CO₂、CH₄和N₂O等温室气体的浓度增加所致^[1]。因此,控制温室气体排放以减缓气候变化已经是亟待解决的最大环境问题。

天然湿地因其具有巨大的土壤碳库、高甲烷排放和高固碳潜力,使其成为全球碳动态的重要组成部分。例如,泥炭地仅占陆地表面的3%,却含有近1/3的全球土壤碳库(16%—33%)^[2-3],故天然湿地可能是碳的吸收汇^[4-9];但目前全球已有近50%的天然湿地被转变为其它的土地利用形式(如开垦农田或排水造林)^[10-11],湿地的退化已经导致其向大气中碳的净排放^[3,12],加之天然湿地每年还排放92—237 Tg CH₄,占全球甲烷通量(600 Tg CH₄/a)的较大比重(15%—39%)^[13],故湿地也有可能是碳的排放源^[9,14-15];此外,湿地也是N₂O的汇或弱源^[16-17]。因此,湿地是碳氮的源汇转换器,探讨人为活动干扰对湿地碳氮源与汇的转化的影响机制,采取相应的湿地管理措施,充分发挥其温室气体汇的作用显得尤为必要。

现有研究结果表明,天然湿地温室气体的排放主要受气候和环境条件的剧烈影响,特别是受到温度和水位的影响^[17-21]。一般认为随着温度的升高,光合作用速率和异养微生物活动增强促进了温室气体的产生,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^[22],因此,当水位达到或接近泥炭表层时,CH₄的排放速率最大^[21,23],水位进一步升高时其对CH₄排放影响不大,而此时泥炭地表温度对CH₄排放影响有所增强^[24]。由于在有氧条件下有机物具有更高的分解速率,CO₂的排放随水位的降低而增加^[20],且在水分条件不为限制因素时,温度对其具有显著的影响^[18]。水位也是影响常年积水沼泽生长季N₂O排放通量的主要因素,在较低水位时,具有较高的N₂O排放量^[25],其原因是硝化作用的增强提高了反硝化作用中NO₃⁻的可利用性^[16-17]。此外,也有研究认为沼泽湿地N₂O排放与土壤温度存在正相关关系^[26]。由此可见,温度和水位可能是天然湿地温室气体排放的主要控制因素。

湿地经过人为活动干扰(如排水、采伐或垦殖)后,可能引起湿地土壤温度^[27]和水位的变化^[28-29],进而可能对湿地温室气体排放产生较大的影响^[30]。如沼泽湿地经排水或垦殖后CH₄排放量一般会显著减少,而CO₂和N₂O的排放量会显著增加^[16,31-32];采伐后CH₄排放量变化不明显,CO₂和N₂O的排放量有所升高^[30]。但由于目前缺乏火烧干扰对湿地温室气体排放影响研究,有关火烧干扰对温室气体排放的影响程度与影响机制方面仍不十分清楚,有待进一步探讨。

目前,我国有关沼泽湿地温室气体排放研究主要集中在天然沼泽湿地,如若尔盖和青藏高原的草丛湿地^[33-36]、辽河三角洲芦苇湿地^[37]、三江平原草丛湿地^[25-26,38-40]、沿海红树林湿地^[41]和东北山区森林湿地^[42-45],对天然湿地温室气体(CO₂、CH₄和N₂O)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。但干扰对湿地温室气体排放的研究相对薄弱,仅见有沼泽湿地垦殖^[46-47]、排水造林^[48]和森林湿地采伐此类型干扰^[49-50]对湿地CO₂、CH₄和N₂O排放的影响研究,而在火烧干扰对湿地温室气体排放影响方面尚未见

有报道。本研究于2009年5—9月生长季节,在小兴安岭林区,运用静态箱-气相色谱法,原位同步观测了不同火烧强度的落叶松-苔草沼泽林土壤CO₂、CH₄和N₂O排放通量的季节变化,分析其与空气温度、土壤温度、土壤水位等环境因子的关系及影响机制。旨在为客观估算我国温室气体排放总量及科学经营管理湿地资源与控制湿地温室气体排放提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于小兴安岭中段的黑龙江省伊春市友好林业局岭峰林场(48°13'7"–48°33'15"N, 128°10'15"–128°33'25"E),平均海拔在436—546 m之间。该地区属温带大陆湿润季风气候,受海洋暖湿气流和西伯利亚冷空气的双重影响,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-1℃,年平均降水量629.6 mm,全年有两个降水高峰期:冬季降雪、7—8月的降雨,占全年降水量的70%。无霜期约100 d,最早霜期在9月上旬,最晚霜期在次年的5月中旬结束。地带性土壤主要为暗棕壤,占土壤类型的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%。主要湿地类型有草丛沼泽、灌丛沼泽、森林沼泽、藓类沼泽和浅水沼泽等多种类型,但以森林沼泽为主体,落叶松-苔草沼泽是典型的森林沼泽类型之一。由于研究区春秋季节干燥多风,火灾频繁发生,火烧干扰是该区域主要干扰类型之一,最近一次火灾发生于2009年4月下旬,伊南河林场火灾烧入伊春林区,使研究区过火面积达近万公顷,本实验选取的火灾类型主要包括属于重度火灾(烧死木比例≥70%)^[51]和轻度火灾(烧死木比例≤30%)^[51]两种类型。因此,该区域是研究火烧干扰对湿地温室气体排放影响的理想场所。

1.2 样地设置

本研究于2009年5月上旬,在研究区相同海拔高度、同一坡度范围内、地势平坦的地段选取原始自然植被基本一致的落叶松苔草沼泽林,分别设置落叶松-苔草沼泽对照样地(未发生火灾地段:LTC)、轻度火烧样地(LTL)和重度火烧样地(LTH),对照与火烧迹地之间有公路阻断,各样地面积均为80 m×80 m,以减少地向差异对温室气体排放通量的影响。其中,对照样地主要乔木树种为落叶松(*Larix gmelinii*),灌木有油桦(*Betula ovalifolia*)、笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum*)、细叶杜香(*Ledum palustre* var. *angustum*)草本植物有蕨囊苔草(*Carex schmidii*)、白毛杨胡子草(*Eriophorum vaginatum*)和小叶樟(*Calamagrostis angustifolia*)。轻度火烧样地乔木树种为落叶松,灌木树种主要以油桦、笃斯越橘为主,伴有细叶杜香,草本主要为蕨囊苔草。重度火烧样地乔木为落叶松,灌木有细叶杜香,草本有蕨囊苔草。并在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 气体采集与分析

采用静态暗箱法-气相色谱法进行气体的采集分析。采样箱可分为不锈钢顶箱(50 cm×50 cm×50 cm)和不锈钢底座(50 cm×50 cm×10 cm)两部分,在观测前数天,每块样地内设置3个采样箱(3个重复采样点),3个样地共设置9个采样箱。将不锈钢底座插入10 cm土壤中固定,底座上部四周内有凹槽,取样时注水密封,整个观测时间内底座始终固定在土壤中以保证对底座底部内的植被和土壤的干扰最小。顶箱外部设有保温材料,用以减少箱内温度波动,箱内顶部安装直径10 cm的小风扇,用12 V蓄电池供电,以保持箱内气体浓度差均匀。箱顶部中央开有直径1 cm的小孔,内置橡胶塞作为取样口。用60 mL聚氯乙烯医用注射器经三通阀连接针头通过箱顶部橡胶塞取样。取样时间为2009年5月22至9月22日的8:00—11:00,每10 d取样1次。取样时,在静态箱封闭后的0、10、20、30 min,每10 min用注射器抽气注入500 mL气体采集袋,每次采集4袋气体样品。在1周之内,用HP5890Ⅱ气相色谱仪分析气体浓度。用离子火焰化检测器(FID)检测甲烷和二氧化碳气体,用电子捕获检测器(ECD)检测氧化亚氮气体。所有样品的气体浓度和采样时间的相关系数(R^2)>0.95时被视为有效。

在每次抽取气体的同时,同步测量空气温度(*T_a*)、土壤0、5、10、15、20、30、40 cm深的温度。并在采样箱附近挖井,测取温度的同时测量其地下水位深度。

利用公式计算气体通量: $F = \frac{dc}{dt} \frac{M}{V_0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} H$, 式中, F 为气体通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), 正值为排放, 负值为吸收; 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; V_0, P_0, T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积、标准大气压和绝对温度; H 为采样箱高度。

采用 One-way ANOVA 对 3 个重复点的温度和水位进行分析, 采用 Pearson 相关系数分析排放通量与环境因素的关系。所有统计均用 SPSS16.0 统计分析软件包分析处理, 所有图形采用 Sigma Plot10.0 软件绘制。

2 结果

2.1 火烧干扰后落叶松-苔草沼泽环境因子的变化

对照样地、轻度火烧样地、重度火烧样地生长季节平均空气温度依次为 15.5、17.8、18.1 °C, 火烧样地较对照样地提高了 2.3—2.6 °C; 三者 0—40 cm 土壤平均温度依次分布在 0.5—15.6、1.9—14.0、2.1—16.4 °C, 轻度火烧样地较对照样地提高了 0.9—2.6 °C (除地表温度低于对照 1.6 °C 外), 重度火烧样地各层土壤平均温度均高于对照样地各层土壤平均温度 (提高幅度在 0.5—4.7 °C) (图 1)。经单因素方差分析, 重度火烧样地与对照样地空气温度存在显著差异 ($P < 0.05, df = 2$), 轻度火烧与对照样地空气温度存在差异 ($P < 0.1, df = 2$) 但不显著; 火烧样地与对照样地在 5—15 cm 和 40 cm 的土壤温度存在显著差异 ($P < 0.05, df = 2$)。经单因素方差分析, 轻度火烧样地与对照样地空气温度存在极显著差异 ($P < 0.01, df = 2$), 重度火烧与对照样地空气温度存在差异 ($P < 0.10, df = 2$) 但不显著; 火烧样地与对照样地在 5—15 cm 和 40 cm 的土壤温度存在显著差异 ($P < 0.05, df = 2$)。进一步分析火干扰对各季节空气温度与土壤温度的影响得到: 对照样地、轻度和重度火烧样地春季 (5 月下旬—6 月下旬) 平均气温依次为 14.4 °C、17.4 °C、15.6 °C, 火烧样地较对照样地提高了 1.2—3.0 °C; 0—40 cm 土壤平均温度依次分布在 0.9—15.4 °C、2.9—15.7 °C、1.1—14.0 °C, 轻度火烧样地较对照样地提高了 0.3—4.0 °C, 重度火烧样地与对照样地相近 (变化幅度为 -1.4—1.1 °C), 轻度火烧干扰

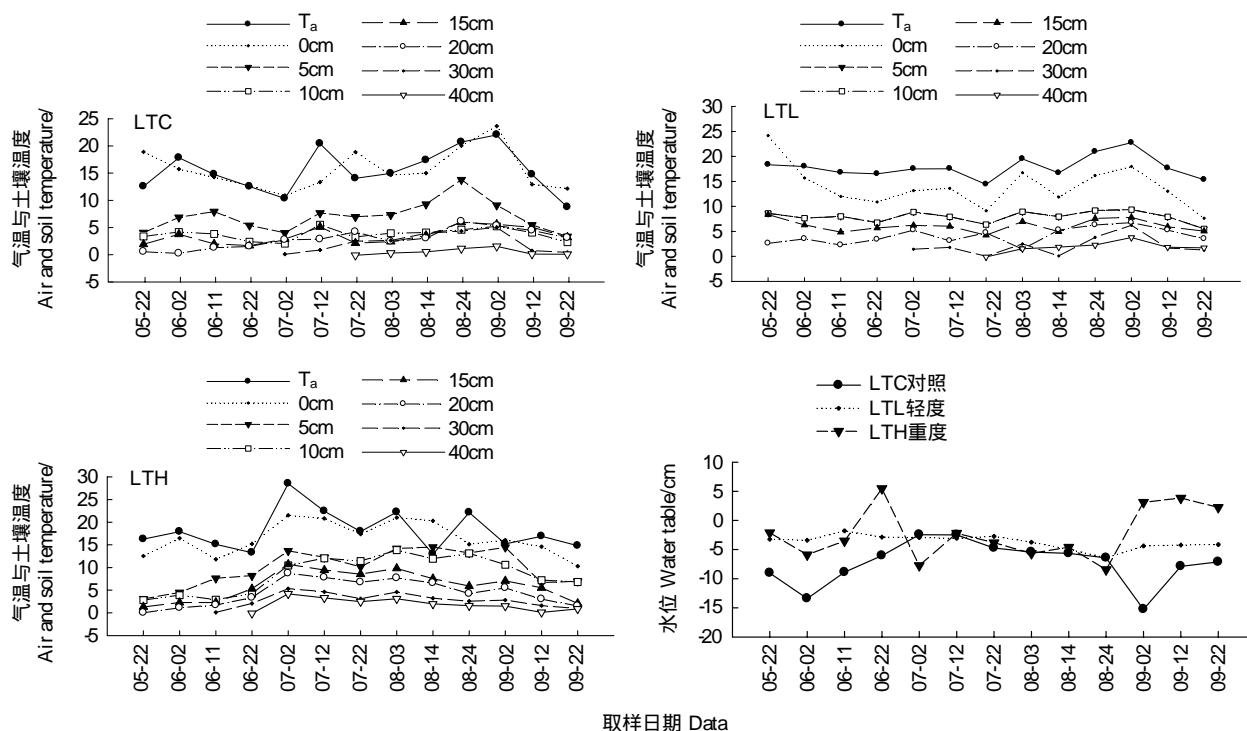


图 1 落叶松-苔草沼泽 (LTC、LTL、LTH) 气温、土壤温度与落叶松-苔草沼泽水位 (LTW) 的季节变化

Fig. 1 Seasonal changes of temperature and water table of *Larix gmelinii-Carex schmidti* swamps

LTC: 对照地 contrast; LTL: 轻度火烧样地 lightly burned; LTH: 重度火烧样地 Heavily burned; LTW: 水位 water table level; T_a : 气温 Air temperature; 0—40: 土壤温度 Soil temperature

增温幅度相对较大。夏季(7月上旬—8月下旬)三者平均气温依次为16.3、17.8、21.0℃,火烧样地较对照样地提高了1.5—4.7℃;0—40cm土壤平均温度依次分布在0.5—15.5℃、1.5—13.4℃、2.8—19.4℃,轻度火烧样地与对照样地的变化幅度相对较小(-2.1—2.3℃),而重度火烧样地较对照样地提高了1.5—8.2℃,重度火烧干扰增温幅度相对较大。秋季(9月上旬—9月下旬)三者平均气温依次为15.2、18.6、15.6℃,火烧样地较对照样地提高了0.4—3.4℃;0—40cm土壤平均温度依次分布在0.6—16.2、2.4—12.9、0.8—13.7℃,轻度火烧样地除地表以外(低于对照3.3)其它土壤层的平均温度较对照样地提高了0.9—2.7℃;重度火烧样地地表温度也低于对照样地(2.3℃),但5—10cm土壤层的平均温度较对照样地提高了3.4—4.3℃,其它层次的土壤温度与对照样地相近(-1.0—0.3℃),轻度火烧干扰增温幅度相对较大。

落叶松-苔草沼泽对照样地、轻度火烧样地和重度火烧样地生长季节平均水位依次为-7.3、-3.7、-2.3cm,火烧样地较对照样地提高了3.6—5.0cm,呈现出重度火烧干扰>轻度火烧干扰>未干扰的变化趋势。经单因素方差分析(图1),火烧样地与对照样地的水位之间存在显著差异($P<0.05$, $df=2$)。因此,火烧干扰显著提高了落叶松-苔草沼泽生长季节的水位。进一步分析火干扰对各季节水位的影响得到:春季三者的平均水位依次为-9.4、-2.8、-1.5cm,火烧样地较对照样地提高了6.6—7.9cm;夏季三者的平均水位依次为-4.5、-4.0、-5.4cm,变化幅度不大(-0.5—0.9cm);秋季三者的平均水位依次为-10.1、-4.2、3.0cm,变化幅度相对较大,火烧样地较对照样地提高了5.9—13.1cm。

2.2 火烧干扰后落叶松-苔草沼泽温室气体排放及其季节规律的变化

2.2.1 火烧干扰后CO₂排放通量及其季节排放规律的变化

对照样地生长季土壤CO₂排放通量分布在136.216—957.503 mg·m⁻²·h⁻¹,平均值为409.673 mg·m⁻²·h⁻¹;其春、夏、秋季土壤CO₂平均排放量依次为323.887、413.580、516.241 mg·m⁻²·h⁻¹,呈现出秋季>夏季>春季(秋季较春、夏季提高了37.3%、19.9%)的季节变化规律性(图2)。轻度火烧样地CO₂排放通量分布在257.531—1217.017 mg·m⁻²·h⁻¹,平均值为508.140 mg·m⁻²·h⁻¹,较对照样地提高了24.0%;其春、夏、秋季土壤CO₂平均排放通量依次为429.005、503.160、623.613 mg·m⁻²·h⁻¹,也呈现出秋季>夏季>春季(秋季较春、夏季提高了31.2%、19.3%)的季节变化规律性(图2)。重度火烧样地CO₂排放通量分布在292.591—905.716 mg·m⁻²·h⁻¹,平均值为597.786 mg·m⁻²·h⁻¹,较对照样地提高了45.9%,经过配对样本t检验,此样地和对照样地CO₂排放通量之间存在差异显著($P<0.05$, $df=2$);其春、夏、秋季土壤CO₂平均排放量依次为518.455、

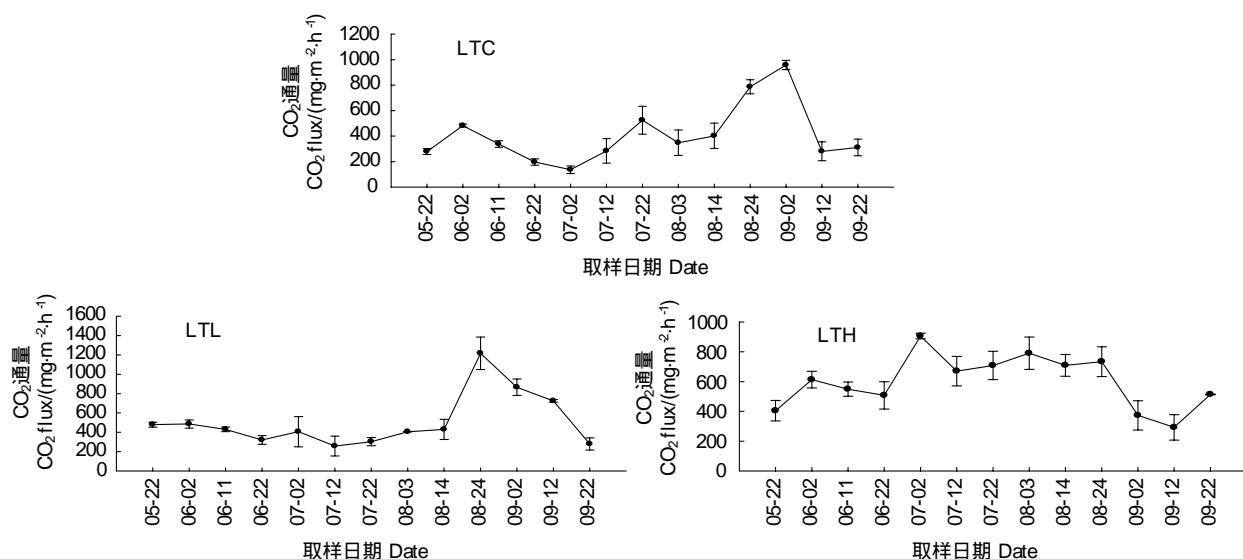


图2 落叶松-苔草沼泽CO₂排放通量季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of CO₂ emission from *Larix gmelinii*-*Carex schmidii* swamp

752.984、393.166 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,呈现出夏季>春季>秋季(夏季较春、秋季提高了31.1%、47.8%)的季节变化规律(图2)。

2.2.2 火烧干扰后 CH_4 排放通量及其季节排放规律的变化

对照地生长季 CH_4 排放通量分布在-0.0443—0.2853 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值为0.0569 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,总体上呈排放趋势;其春季、夏季、秋季 CH_4 平均排放量依次为:0.0581、0.0056、0.1578 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,各季节均排放 CH_4 ,呈现出秋季>春季>夏季(秋季为春季和夏季的2.7倍和28.4倍)的季节变化规律(图3)。轻度火烧样地 CH_4 排放量分布在-0.4500—0.3042 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值为0.1337 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,总体上也呈排放趋势,但较对照样地提高了135.1%;其春、夏、秋季平均排放通量依次为:0.0013、0.0275、0.5226 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,各季节均排放 CH_4 ,但呈现出秋季>夏季>春季(秋季为夏季和春季的19.0倍和401.5倍)的季节变化规律(图3)。重度火烧样地 CH_4 排放量分布在-0.1630—0.1402 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值为0.0433 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,总体上呈排放趋势,但较对照样地下降了31.3%;其春季、夏季、秋季平均排放量依次为:-0.0305、0.0067、0.2148 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,呈现出春季吸收、夏秋季排放(秋季为夏季的31.9倍)的季节变化规律(图3)。

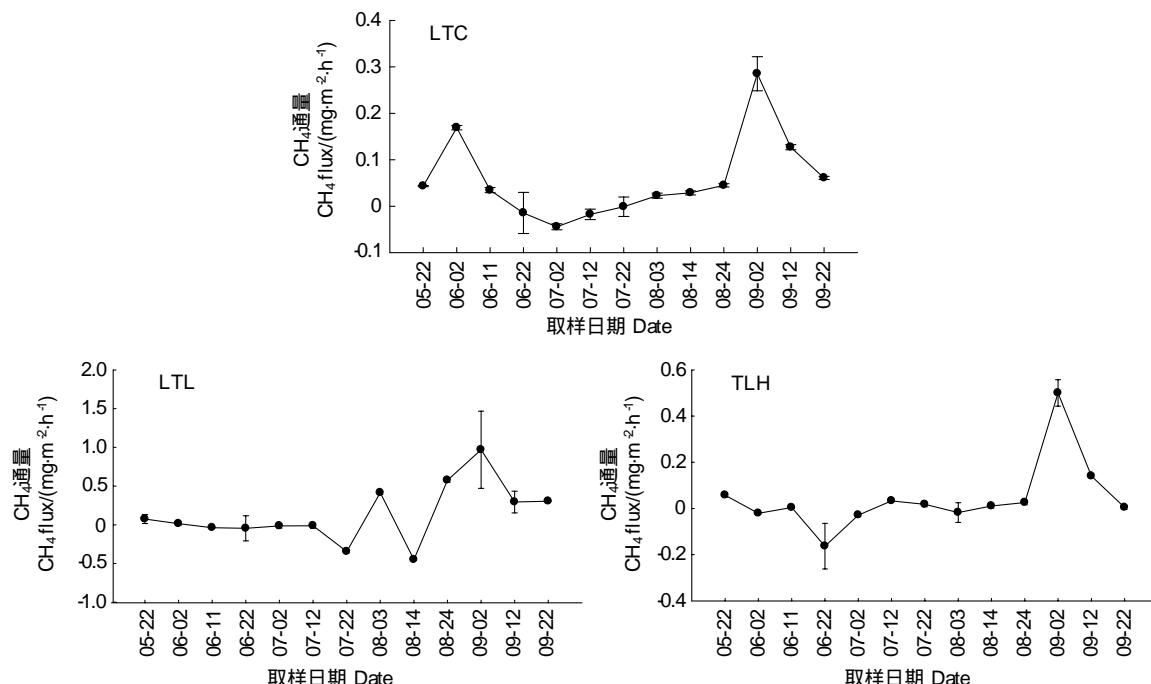


图3 落叶松-苔草沼泽 CH_4 排放通量季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of CH_4 flux in the *Larix gmelinii-Carex schmidtii* Swamp

2.2.3 火烧干扰后 N_2O 排放通量及其季节排放规律的变化

对照样地生长季节 N_2O 的排放通量分布在-0.0070—0.0091 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值为-0.0063 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,总体上呈现出 N_2O 的弱吸收;其春、夏、秋季 N_2O 平均排放通量依次为-0.0036、-0.0089、-0.0047 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,各季节均表现出 N_2O 的吸收,且 N_2O 的吸收通量呈现出夏季>秋季>春季(夏季为春、秋季的2.5倍和1.9倍)的季节变化规律(图4)。轻度火烧样地 N_2O 排放通量分布在-0.0055—0.0119 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值为0.0021 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,总体上呈现出 N_2O 的弱排放,经过单因素方差分析,轻度火烧样地与对照地的 N_2O 通量之间存在差异($P<0.05$, $df=2$);其春、夏、秋季 N_2O 的平均排放通量依次为0.0072、-0.0017、0.0031 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,呈现出春、秋季(春季平均排放量是秋季的2.3倍)排放,夏季吸收的季节变化规律(图4)。重度火烧样地 N_2O 排放通量分布在-0.0083—0.0101 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均值为0.0059 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,总体上呈现出 N_2O 的强排放,重度火烧样地与对照地的 N_2O 排放通量之间存在着极显著差异性($P<0.05$, $df=2$),且平均排

放量为轻度火烧干扰样地的2.8倍;其春、夏秋季 N_2O 的平均通量依次为0.0057、0.0086、0.0006 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,各季节均表现为 N_2O 的排放,且呈现出夏季>春季>秋季(夏季为春、秋季的1.5倍和14.3倍)的季节变化规律(图4)。

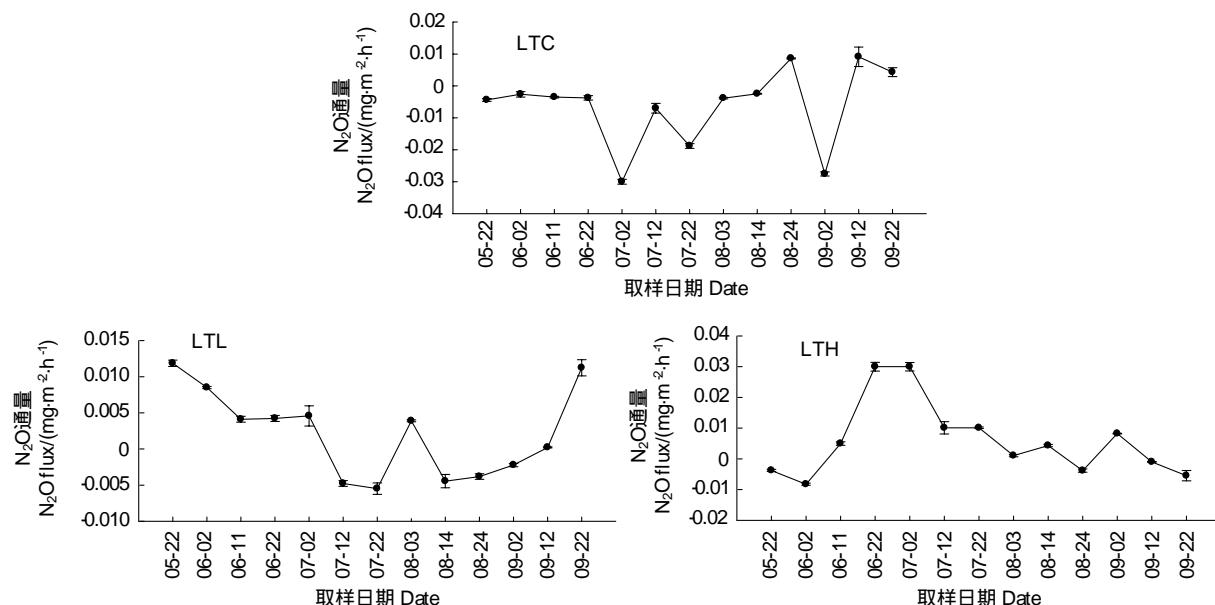


图4 落叶松-苔草沼泽 N_2O 排放通量季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of N_2O flux in the *Larix gmelinii-Carex schmidtii* swamp

2.3 火烧干扰后落叶松-苔草沼泽温室气体排放主控因子的变化(表1)

落叶松-苔草沼泽对照样地生长季节土壤 CO_2 排放通量与水位呈显著负相关,而轻度火烧样地和重度火烧样地与水位呈极显著负相关,三者生长季节土壤 CO_2 排放通量一般均与空气温度、0—40 cm土壤温度呈极显著或显著正相关关系(除轻度火烧样地30 cm土壤温度相关不显著外)。

表1 小兴安岭火烧干扰落叶松-苔草沼泽温室气体排放通量与环境因子相关分析

Table 1 Correlation analysis between fluxes of greenhouse gas emission and environmental factors of *Larix gmelinii-Carex schmidtii* forested wetlands disturbed by fire in XiaoXing'an Mountains

气体 Gg	火烧 Fd	水位 WT	气温 Ta	土壤温度 Soil temperature						
				0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	40 cm
CO_2	对照	-0.584 *	0.581 *	0.880 **	0.722 **	0.594 *	0.599 *	0.619 *	0.875 **	0.847 **
CO_2	轻度	-0.738 **	0.756 **	0.580 *	0.598 *	0.705 **	0.549 *	0.641 *	0.400	0.611 *
CO_2	重度	-0.801 **	0.634 *	0.684 **	0.566 *	0.574 *	0.613 *	0.667 *	0.682 *	0.811 **
CH_4	对照	-0.914 **	0.441	0.577 *	0.190	0.472	0.513	0.236	0.508	0.668
CH_4	轻度	-0.453	0.818 **	0.395	0.459	0.782 **	0.671 *	0.288	0.925 **	0.763 *
CH_4	重度	0.286	-0.113	-0.082	0.245	0.193	0.056	0.052	-0.044	-0.073
N_2O	对照	0.041	-0.013	-0.218	0.164	0.098	0.134	-0.048	-0.064	-0.312
N_2O	轻度	0.312	-0.145	0.224	-0.210	-0.250	0.204	-0.537	-0.054	0.046
N_2O	重度	0.148	0.181	0.414	0.358	0.091	0.538	0.522	0.395	0.221

Gg: Greenhouse gas; Fd: Fire disturbance; WT: Water table; Ta: air temperature; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

落叶松-苔草沼泽对照样地 CH_4 排放通量与水位呈极显著负相关,与0 cm土壤温度呈显著正相关;轻度火烧样地 CH_4 与水位呈负相关但不显著,与空气温度、10 cm、15 cm、30 cm、40 cm土壤温度呈显著或极显著正相关;重度火烧样地 CH_4 排放通量与水位、空气温度、土壤温度相关性均不显著。

此外,轻度火烧样地、重度火烧样地与对照样地的 N_2O 排放通量与水位和温度相关性均不显著。

2.4 火烧干扰对落叶松-苔草沼泽温室气体源/汇功能的影响

落叶松-苔草沼泽对照样地、轻度火烧样地和重度火烧样地生长季节土壤 CO_2 排放量(生长季排放量=温室气体平均排放通量×生长季天数)依次为 6.6039 、 8.1912 、 $9.6363 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (本实验生长季天数为 124 d)，轻度火烧样地较对照样地提高了 24.0% ，重度火烧样地较对照样地提高了 45.9% 。火烧干扰使落叶松-苔草沼泽生长季节土壤 CO_2 排放源强度有所增大，且随着火干扰强度增强而增大。

三者生长季节 CH_4 排放量依次为 0.91668 、 2.15505 、 $0.69791 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，轻度火烧样地较对照样地提高了 135.1% ，重度火烧样地较对照样地下降了 31.3% 。火烧干扰对其 CH_4 排放的影响与火干扰强度有关，轻度火烧使 CH_4 排放源强度增大，重度火烧使 CH_4 排放源强度减弱。

三者生长季节 N_2O 排放量依次为 -0.10139 、 0.034509 、 $0.094906 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，对照样地为 N_2O 的弱吸收汇，火烧样地则转化为 N_2O 的弱排放源，且重度火烧样地 N_2O 排放量为轻度火烧样地的 2.8 倍。其 N_2O 排放量随火烧干扰强度的增大而增加。

进一步结合全球增温潜势(global warming potential GWP)， CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的 GWP 值依次为 1 、 23 和 $296^{[52]}$ (分别为 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 生长季排放总量的 1 、 23 和 296 倍)，得到落叶松-苔草沼泽对照样地、轻度火烧样地、重度火烧样地在生长季节温室效应贡献潜力依次为 6.5950 、 8.2510 和 $9.6805 \text{ t CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，轻度火烧样地较对照样地提高了 25.1% ，重度火烧样地较对照样地提高了 46.8% 。其温室效应贡献潜力随火烧干扰强度增强而增大。此外，三者 GWP 组成结构(CO_2 、 CH_4 和 N_2O)依次为 100.1% 、 0.3% 、 -0.4% ， 99.3% 、 0.6% 、 0.1% ， 99.5% 、 0.2% 、 0.3% ，均以 CO_2 排放占绝对优势地位， CH_4 和 N_2O 所占比例不足 1% ，仅处于极为次要地位。

3 讨论

3.1 火烧干扰对落叶松-苔草沼泽生长季环境因子的影响

火烧干扰对小兴安岭落叶松-苔草沼泽生长季节环境因子具有显著影响。火烧干扰显著提高了落叶松-苔草沼泽的空气温度和部分土壤层温度以及春季和秋季的水位，且均随火烧强度增大而升高。分析其原因，可能主要是由于火干扰烧除了部分或全部乔木、灌木、草本，导致太阳辐射很容易到达林内和地表致使林内空气温度、土壤温度有所提高，特别是重度火烧样地，因植被遭到严重破坏，在夏季随着太阳辐射强度的增加，使其夏季平均温度明显高于轻度火烧和对照样地。而水位升高可能主要是由于火干扰烧毁或部分烧毁林地的植被层，降低了植被的蒸腾作用，有利于维持较高的水位；加之火干扰后地表升温加快了冻土融化进程，也可能使水位升高。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^[28-29,47-48]有所不同，而与森林湿地采伐干扰提高土壤温度与水位的研究结论^[49-50]基本一致。

3.2 火烧干扰对落叶松-苔草沼泽生长季温室气体排放及其季节变化规律的影响

火烧干扰使落叶松-苔草沼泽生长季节土壤 CO_2 的排放通量有较大幅度的提高($24.0\%-45.9\%$)，且呈现出随着火烧强度的增大而增大的变化趋势；但轻度火烧干扰未改变其 CO_2 排放通量的季节分布格局，重度火烧干扰却改变了其 CO_2 排放通量的季节分布格局。火烧干扰使其生长季节 CO_2 排放通量增大可能主要是由于火烧后土壤温度的显著升高，促进了植物根系呼吸及微生物的分解活动所致^[17-22]。

火烧干扰对落叶松-苔草沼泽生长季 CH_4 排放具有较大影响。火烧干扰不仅改变了落叶松-苔草沼泽生长季节 CH_4 排放的季节变化规律，而且轻度火烧提高了落叶松-苔草沼泽生长季节 CH_4 排放通量，重度火烧却降低了其生长季节 CH_4 排放通量。分析其原因，可能是与不同火烧干扰强度对地表植被和凋落物的破坏程度不同有关，轻度火烧样地干扰相对较弱，植被恢复与产甲烷菌群所需的反应底物积累过程相对较快，加之火烧干扰使土壤温度与水位均有所提高，致使其甲烷排放较对照地有较大幅度的提高，且呈现出随时间的推移甲烷排放通量逐渐增大的变化趋势；而重度火烧样地受火烧影响相对强烈(地表植被及凋落物几乎全部烧毁)，春季可能是由于缺少产甲烷菌群所需的反应底物，导致春季不但不产生甲烷反而吸收甲烷，加之植被恢复与反应底物积累过程相对较慢，直至秋季才逐步积累了较多的反应底物，势必导致其甲烷排放通量下降及其季

节分布格局的改变。

火烧干扰对落叶松-苔草沼泽生长季 N_2O 排放有较大影响。火烧干扰不仅改变了落叶松-苔草沼泽生长季 N_2O 排放通量的季节变化格局,而且也使 N_2O 的排放由吸收汇转化为其排放源。这可能与火烧干扰显著地提高了土壤温度和水位促进了反硝化过程有密切的关系,也可能与干扰后植被的恢复过程有关,确切的影响机制尚有待进一步探讨。

本次研究结果中, CH_4 的通量,轻度火烧样地较对照样地提高了 135.1%,重度火烧样地较对照样地下降了 31.3%; CO_2 的季节通量,轻度火烧样地较对照样地提高了 24.0%,重度火烧样地较对照样地提高了 45.9%; N_2O 由吸收汇转变为排放源。与其它人为活动干扰(如湿地排水、垦殖或采伐)后 CH_4 排放量一般会显著减少或变化不明显, CO_2 和 N_2O 的排放量会显著增加^[16,30-32,46-47,49-50]的现有研究结论基本一致;但本研究还发现火烧干扰对湿地温室气体排放的影响与火烧强度有关,如 CO_2 和 N_2O 的排放量随火干扰强度增大而递增,而 CH_4 排放量却随火干扰强度增大到一定程度后而递减。

3.3 火烧干扰对落叶松-苔草沼泽温室气体排放主控因子的影响

火干扰对落叶松-苔草沼泽 CO_2 排放通量的主控因子有一定程度的影响。火烧干扰后土壤 CO_2 排放通量与水位的相关性有所提高,分析其原因,可能主要是由于水位升高,湿地土壤易形成厌氧环境,抑制植物根系呼吸及微生物的分解作用,导致 CO_2 排放减少,使得 CO_2 排放与水位呈显著负相关,加之火烧干扰使水位进一步得到提升,结果势必导致两者相关性进一步加强;同时,温度升高可以促进植物根系呼吸和微生物的分解作用,结果导致 CO_2 排放增加,使得 CO_2 排放与温度、各层土壤温度(除轻度火烧样地 30 cm 土壤温度外)呈显著正相关关系。轻度火烧样地 30 cm 土壤温度相关不显著,可能是由于轻度火烧样地 30 cm 平均土壤温度(2.08 °C)分别较对照样地和重度火烧样地平均温度低(0.2—0.73 °C),可能抑制了该样地内土壤微生物的呼吸作用,导致轻度火烧样地 CO_2 排放与此土层土壤温度相关性不显著。这些研究结论与“天然湿地 CO_2 的排放随水位的降低而增加^[20],且在水分条件不为限制因素时,温度对其具有显著的影响^[18]”的现有研究结论基本一致。

火干扰对 CH_4 排放通量主控因子有一定的影响。对照、轻度火烧样地排放通量与水位和土层温度相关或弱或部分不相关,可能是由于水位对 CH_4 排放大部分都存在时滞效应,即水位升高或下降后,不会立即对 CH_4 排放产生影响,而是在过一段时间(几小时至几周)后,才对 CH_4 排放产生作用^[53]; CH_4 排放受环境的影响非常复杂, CH_4 排放要经过 CH_4 生成、 CH_4 氧化与 CH_4 传输和 CH_4 释放 3 个过程,每个过程都要受温度的影响^[54],温度对各个过程的综合影响才是最后结果,因而甲烷排放结果必然具有复杂性^[48]。重度火烧样地 CH_4 排放通量与水位、温度则均不相关,此样地结果与以往研究得出的 CH_4 通量与任何一层土壤温度都无显著性相关一致^[38,55]。

火干扰对 N_2O 排放通量与水位和温度相关性均影响均不显著,说明火烧干扰对落叶松-苔草沼泽 N_2O 排放通量的主控因子影响相对较弱。

4 结论

火烧样地生长季节土壤 CO_2 平均排放通量较未火烧样地提高较大,但轻度火烧干扰未改变其 CO_2 排放的季节分布格局,排放仍集中在夏秋季;重度火烧干扰却改变了其 CO_2 排放的季节分布格局使其排放集中在春夏季。轻度火烧样地生长季节 CH_4 平均排放通量较未火烧地有所提高;重度火烧样地却有所下降。未火烧样地 CH_4 排放集中在春秋季节,轻度火烧样地 CH_4 排放集中在夏秋季;重度火烧样地则春季吸收、夏秋季排放。未火烧样地生长季节表现为各季节均吸收 N_2O ,但主要集中在夏秋季;轻度火烧样地为表现出吸收与排放交替发生且排放集中在春秋季节、吸收集中在夏季;重度火烧样地各季节均排放 N_2O 且主要集中在春夏季。

火烧干扰对落叶松-苔草沼泽温室气体源/汇功能具有较大影响。未火烧样地土壤为 CO_2 的排放源,火烧干扰使其 CO_2 排放源强度提高了 24.0%—45.9%,且随火烧干扰强度增大而增强;未火烧样地为 CH_4 的弱排放源,轻度火烧使其 CH_4 排放源强度提高了 135.1%,而重度火烧却使其下降了 31.3%;未火烧样地为 N_2O 的

弱吸收汇,火烧干扰使其转化为 N_2O 的弱排放源。因此,小兴安岭天然或火烧干扰的落叶松-苔草沼泽在生长季节温室效应主要贡献者是其土壤 CO_2 的排放,而不是 CH_4 和 N_2O 的排放,故有必要对其碳循环过程加以深入研究。

火烧干扰对落叶松-苔草沼泽温室效应贡献潜力具有较大影响。未火烧样地的温室效应贡献潜力为 $6.5950\ t\ CO_2\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$,轻度火烧干扰使其提高了 $1/4$,重度火烧干扰使其提高近 $1/2$,呈现出随火烧干扰强度的增大而递增的变化规律。因此,从有效控制湿地温室气体排放角度考虑,应该加强该类型森林湿地的火源管理,特别是应避免重度火烧的发生。此外,该类型的森林沼泽无论是火烧前还是火烧后其温室效应贡献潜力主要取决于土壤 CO_2 的排放(99%以上),而 CH_4 和 N_2O 的排放所起的作用甚微(不足1%)。故有必要对其碳循环过程开展系统研究。

References:

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. IPCC, Climate Change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 182-195.
- [3] Maltby E, Immirzi P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils regional and global perspectives. *Chemosphere*, 1993, 27(6): 999-1023.
- [4] Alongi D M, Trott L A, Pfitzner J. Deposition, mineralization, and storage of carbon and nitrogen in sediments of the far northern and northern Great Barrier Reef shelf. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(20): 2595-2622.
- [5] Bedard-Haughn A, Jongbloed F, Akkerman J, Uijl A, De Jong E, Yates T, Pennock D. The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes. *Geoderma*, 2006, 135: 296-306.
- [6] Brevik E C, Homburg J A. A 5000 year record of carbon sequestration from a coastal lagoon and wetland complex, southern California, USA. *Catena*, 2004. 57(3): 221-232.
- [7] Euliss N H Jr, Gleason R A, Olness A, McDougal R L, Murkin H R, Robarts R D, Bourbonniere R A, Warner B G. North American prairie wetlands are important nonforested land-based carbon storage sites. *Science of the Total Environment*, 2006, 361: 179-188.
- [8] Krogh L, Noergaard A, Hermansen M, Greve M H, Balstroem T, Breuning-Madsen H. Preliminary estimates of contemporary soil organic carbon stocks in Denmark using multiple datasets and four scaling-up methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 96(1/3): 19-28.
- [9] Whitting G J, Chanton J P. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus B*, 2001, 53(5): 521-528.
- [10] Dugan P, Bellamy D. Wetlands in Danger: A world Conservation Atlas. New York. NY: Oxford University Press, 1993.
- [11] OECD. Guidelines for Aid Agencies for Improved Conservation and Sustainable Use of Tropical and Subtropical Wetlands. Paris: Organization for Economic Co-Operation and Development, 1996.
- [12] Armentano T V, Menges E S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone. *Journal of Ecology*, 1986, 74(3): 755-774.
- [13] Ehnhalt D M, Prather M. Atmospheric chemistry and greenhouse gases//Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A, eds. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 239-287.
- [14] Carroll P, Crill P M. Carbon balance of a temperate poor fen. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(3): 349-356.
- [15] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Cold season CH_4 , CO_2 and N_2O fluxes from freshwater marshes in northeast China. *Chemosphere*, 2005, 59(11): 1703-1705.
- [16] Regina K, Nykänen H, Silvola J, Martikainen P J. Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity. *Biogeochemistry*, 1996, 35(3): 401-418.
- [17] Martikainen P J, Nykänen H, Crill P, Silvola J. Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature*, 1993, 366: 51-53.
- [18] Bubier J L, Bhatia G, Moor 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(4): 353-367.
- [19] MacDonald J A, Fowler D, Hargreaves K J, Skiba U, Leith I D, Murray M B. Methane emission rates from a northern wetland: response to temperature, water table and transport. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(19): 3219-3227.
- [20] Silvola J, Alm J, Ahtholm U, Nykanen H, Martikainen P J. CO_2 fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology*, 1996, 84(2): 219-228.
- [21] Moore T R, Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emission from laboratory columns of

- peatland soils. *Journal of Soil Science*, 1993, 44(4) : 651-604.
- [22] 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.
- [23] Jauhainen J, Takahashi H, Heikkilä J E P, Martikainen P J, Vasander H. Carbon fluxes from a tropical peat swamp forest floor. *Global Change Biology*, 2005, 11(10) : 1788-1797.
- [24] Hargreaves K J, Fowler D, Pitcairn C E R, Aurela M. Annual methane emission from Finnish mires estimated from eddy covariance campaign measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 2001, 70(1/4) : 203-213.
- [25] Yang J S, Liu J S, Wang J D, Yu J B, Sun Z G, Li X H. Emissions of CH₄ and N₂O from a wetland in the Sanjiang Plain. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3) : 432-440.
- [26] Song C C, Zhang L H, Wang Y Y, Zhao Z C. Annual dynamics of CO₂, CH₄, N₂O emissions from freshwater marshes and affected by nitrogen fertilization. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27 : 2369-2375.
- [27] Zerva A, Mencuccini M. Short-term effects of clearfelling on soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in a Sitka spruce plantation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11) : 2025-2036.
- [28] Dubé S, Plamondon A P, Rothwell R L. Watering up after clear-cutting on forested wetlands of the St. Lawrence lowland. *Water Resources Research*, 1995, 31(7) : 1741-1750.
- [29] Sun G, Riekerk H, Komhak L V. Ground-water-table rise after forest harvesting on cypress-pine flat woods in Florida. *Wetlands*, 2000, 20(1) : 101-112.
- [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] Maljanen M, Hytönen J, Martikainen P J. Fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ on afforested boreal agricultural soils. *Plant and Soil*, 2001, 231(1) : 113-121.
- [32] Martikainen P J, Nykänen H, Alm J, Silvola J. Change in fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide due to forest drainage of mire sites of different trophy. *Plant and Soil*, 1995, (1) : 168-169, 571-577.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Wang D X, Song C C, Wang Y S, Wang Y Y, Yan B X, Zhao Z C. N₂O flux from the mire in Ruoergai Plateau. *Ecologic Science*, 2005, 24 (3) : 193-196.
- [36] Zhang F W, Liu A H, Li Y N, Zhao L, Wang Q X, Du M Y. CO₂ flux in alpine wetland ecosystem on Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2) : 453-462.
- [37] Huang G H, Xiao D N, Li Y X, Cheng G X, Yang Y C, Zhao C W. CH₄ emissions from the reed wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9) : 1494-1497.
- [38] 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.
- [39] Yang J S, Yu J B, Liu J S, Wang J D, Sun Z G, Li X H. N₂O and CH₄ fluxes in an island forest in wetland, Sanjiang Plain. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4) : 476-479.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Mu C C, Cheng W, Sun X X, Wu Y X. Seasonal variation of emission fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ from *Larix gmelinii* swamps soils in Xiaoxing'an Mountains of China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46 (7) : 7-15.
- [45] 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.
- [46] Song C C, Wang Y Y, Wang S Y, Zhao Z C. Character of the greenhouse gas emission in the freshwater mire under human activities. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(1) : 82-86.
- [47] Hao Q J, Wang Y S, Song C C, Jiang C S. Effects of marsh reclamation on methane and nitrous oxide emissions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (8) : 3417-3426.
- [48] Sun X X, Mu C C, Feng D J, Liu X, Cheng W, Shi L Y. Effects of wetland draining for forestation on methane emissions in Xiaoxing'an

- Mountains, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4251-4259.
- [49] Liu X, Mu C C, Li W S, Feng D J, Yu B. Emissions of CH₄ and N₂O from *Alnus sibirica* swamps and the response to human disturbance in the Xiaoxing'an Mountains. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29 (12): 2642-2650.
- [50] Mu C C, Wu Y X, Li W S, Xu R. Effects of forest cutting on greenhouse gas emissions from *Larix gmelinii-Sphagnum swamps* in Lesser Xing'an Mountains of Heilongjiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2):287-293.
- [51] Panels of Production Recovery and Rebuild Hometown of State Council for Greater Hinggan Mountain Fire Disaster Area. *Integrated Investigation Report of Forest Resources Restoration and Ecological Environment of Greater Hinggan Mountain Fire Disaster Area*. Beijing: China Forestry Press, 1987.
- [52] Moore T R, Roulet N T. Methane flux: water table relations in northern wetlands. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(7): 587-590.
- [53] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [54] Segers R. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry*, 1998, 41 (1): 23-51
- [55] Morrissey L A, Livingston G P. Methane emissions from alaska arctic tundra-an assessment of local spatial variability. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D15): 16661-16670.

参考文献:

- [25] 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.
- [26] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 江长胜. 垚殖对沼泽湿地 CH₄ 和 N₂O 排放的影响. *生态学报*, 2007, 27(8): 3417-3426.
- [48] 孙晓新, 牟长城, 冯登军, 刘霞, 程伟, 石兰英. 排水造林对小兴安岭沼泽甲烷排放的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4251-4259.
- [49] 刘霞, 牟长城, 李碗妹, 冯登军, 于波. 小兴安岭毛赤杨沼泽 CH₄、N₂O 排放规律及其对人为干扰的响应. *环境科学学报*, 2009, 29 (12): 2642-2650.
- [50] 牟长城, 吴云霞, 李碗妹, 徐蕊. 采伐对小兴安岭落叶松-泥炭藓沼泽温室气体排放的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 287-293.
- [51] 国务院大兴安岭灾区恢复生产重建家园领导小组专家组. 大兴安岭特大森林火灾恢复森林资源和生态环境考察报告汇编. 北京: 中国林业出版社, 1987.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31 ,No. 18 September, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

- CO₂ emission from an alpine *Kobresia humilis* meadow in winters WU Qin, HU Qiuwu, 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 *Castanopsis eyrei* 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 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 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 *Larix gmelinii*-*Carex schmidii* 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, SHANGLUAN 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 Shiyou (5235)
Ash content and calorific value in the leaves of *Sinocalycanthus chinensis* and its accompanying species JIN Zexin, LI Junmin, MA Jine (5246)
Uptake kinetic characteristics of Cu²⁺ by *Salix jiangsuensis* CL J-172 and *Salix babylonica* Linn and the influence of organic acids CHEN Caihong, LIU Zhikun, CHEN Guangcui, et al (5255)
Introduction of *TaNH2* 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 (*Medicago sativa*) 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 *Fructus Cinnamomi* ZHANG Xiaobo, ZHOU Tao, GUO Lanping, et al (5299)
Effect of environmental factors on growth of *Chlorella* 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, *Takydromus septentrionalis* and *Plestiodon chinensis* 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 *in situ* hybridization of symbiotic Oxymonad flagellates in the hindgut of *Reticulitermes chinensis* 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 *Agropyron michnoi* and *Leymus chinensis* 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	京海工商广字第 8013 号	
许 可 证		



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