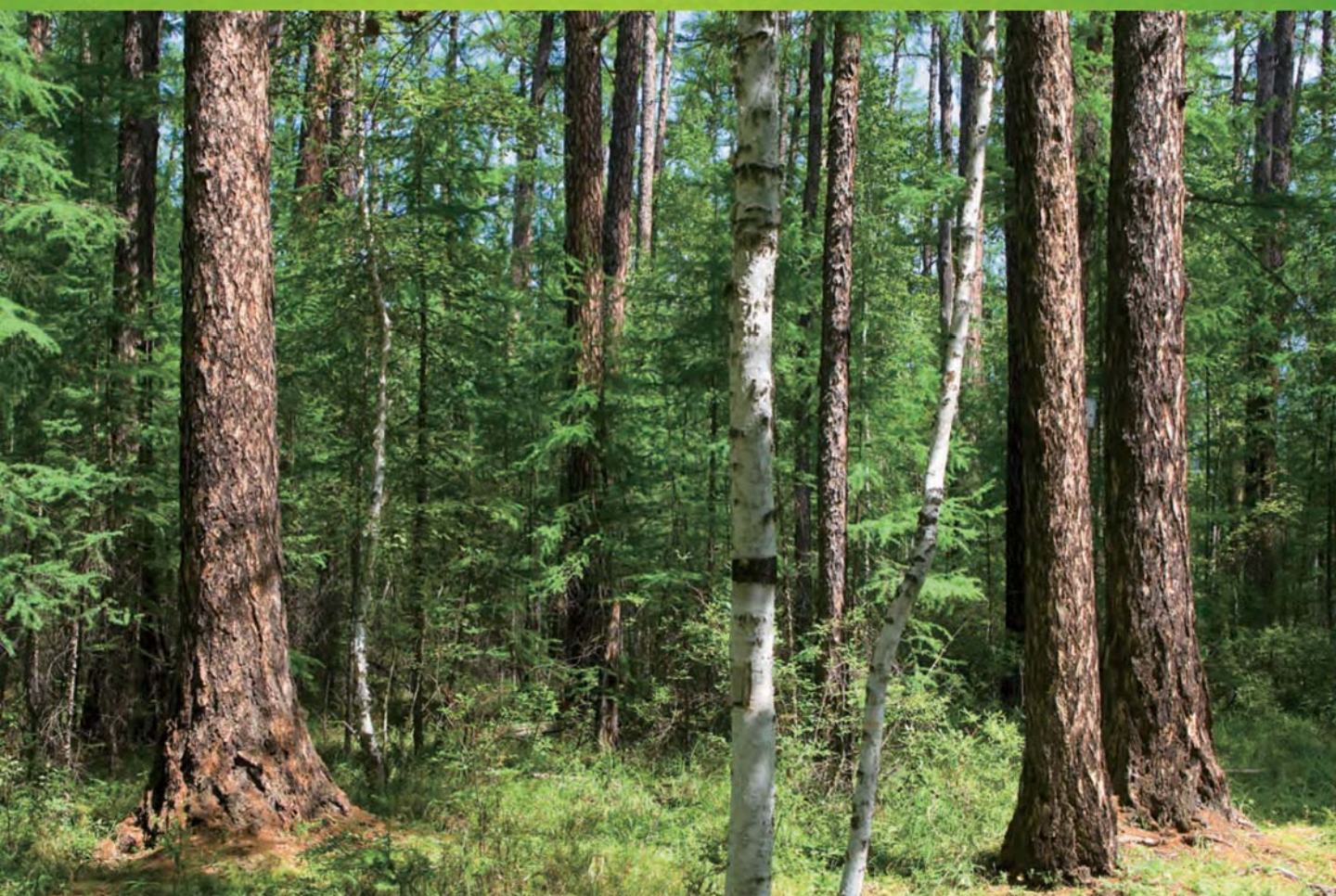


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

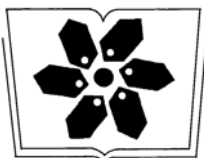
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 23 期 Vol.33 No.23 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 23 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究..... 王 华, 欧阳志云, 任玉芬, 等 (7323)
- 三疣梭子蟹增殖过程对野生种群的遗传影响——以海州湾为例..... 董志国, 李晓英, 张庆起, 等 (7332)
- 土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响..... 谭永芹, 柏新富, 侯玉平, 等 (7340)
- 南美斑潜蝇为害对黄瓜体内 4 种防御酶活性的影响..... 孙兴华, 周晓榕, 庞保平, 等 (7348)

个体与基础生态

- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响..... 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等 (7355)
- 茎瘤芥不同生长期植株营养特性及其与产量的关系..... 赵 欢, 李会合, 吕慧峰, 等 (7364)
- 雷竹覆盖物分解速率及其硅含量的变化..... 黄张婷, 张 艳, 宋照亮, 等 (7373)
- 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响..... 张树杰, 廖 星, 胡小加, 等 (7382)
- 广西扶绥黑叶猴的主要食源植物及其粗蛋白含量..... 李友邦, 丁 平, 黄乘明, 等 (7390)
- 氮素营养水平对膜下滴灌玉米穗位叶光合及氮代谢酶活性的影响..... 谷 岩, 胡文河, 徐百军, 等 (7399)
- PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应 夏继刚, 牛翠娟, 孙麓垠 (7408)
- 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用..... 韩秀荣, 高 嵩, 侯俊妮, 等 (7417)
- 基于柑橘木虱 CO I 基因的捕食性天敌捕食作用评估 孟 翔, 欧阳革成, Xia Yulu, 等 (7430)
- 健康和虫害的红松挥发物对赤松梢斑螟及其寄生蜂寄主选择行为的影响.....
..... 王 琪, 严善春, 严俊鑫, 等 (7437)

种群、群落和生态系统

- 小麦蚕豆间作对蚕豆根际微生物群落功能多样性的影响及其与蚕豆枯萎病发生的关系.....
..... 董 艳, 董 坤, 汤 利, 等 (7445)
- 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征..... 于 扬, 杜 虎, 宋同清, 等 (7455)
- 黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估..... 李文静, 王 振, 韩清芳, 等 (7467)

景观、区域和全球生态

- 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响..... 李轶冰, 逢焕成, 杨 雪, 等 (7478)
- 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响..... 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等 (7487)
- 基于 BP 神经网络与 ETM+ 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类..... 肖锦成, 欧维新, 符海月 (7496)
- 寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气氮沉降增加的初期响应..... 高文龙, 程淑兰, 方华军, 等 (7505)
- 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征..... 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等 (7516)

黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化..... 周小平,王效科,张红星,等 (7525)

不同排放源周边大气环境中 NH₃ 浓度动态..... 刘杰云,况福虹,唐傲寒,等 (7537)

施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N₂O 排放的影响 罗天相,胡 锋,李辉信 (7545)

资源与产业生态

基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测..... 孙明波,谷孝鸿,曾庆飞,等 (7553)

应用支持向量机评价太湖富营养化状态..... 张成成,沈爱春,张晓晴,等 (7563)

研究简报

亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 徐旺明,闫文德,李洁冰,等 (7570)

青蒿素对蔬菜种子发芽和幼苗生长的化感效应 白 祯,黄 玥,黄建国 (7576)

NO 参与 AM 真菌与烟草共生过程 王 玮,赵方贵,侯丽霞,等 (7583)

基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法..... 张桂铭,朱阿兴,杨胜天,等 (7590)

施氮方式对转基因棉花 Bt 蛋白含量及产量的影响 马宗斌,刘桂珍,严根土,等 (7601)

学术信息与动态

未来地球——全球可持续性研究计划..... 刘源鑫,赵文武 (7610)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 292 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说: 兴安落叶松林景观——中国的寒温带针叶林属于东西伯利亚森林向南的延伸部分,它是大兴安岭北部一带的地带性植被类型,一般可分为落叶针叶林和常绿针叶林两类。兴安落叶松林景观地下部分为棕色森林土,中上部为灰化棕色针叶林土,均呈酸性反应。随着全球气候持续变暖,寒温带针叶林生态系统潜在的巨大碳库将可能成为大气 CO₂ 的重要来源,研究表明,温度是寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用的主要调控因子,对温度的敏感性随纬度升高而增加,根系和凋落物与土壤呼吸作用表现出相似的空间变异性。

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

DOI: 10.5846/stxb201208251200

高文龙,程淑兰,方华军,陈燕,王永生,张裴雷,徐敏杰.寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气氮沉降增加的初期响应.生态学报,2013,33(23): 7505-7515.

Gao W L, Cheng S L, Fang H J, Chen Y, Wang Y S, Zhang P L, Xu M J. Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7505-7515.

寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气 氮沉降增加的初期响应

高文龙^{1,2}, 程淑兰², 方华军^{1,*}, 陈 燕³, 王永生¹, 张裴雷², 徐敏杰²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 土壤甲烷(CH₄)吸收是森林生态系统碳循环的重要环节, 研究大气氮(N)沉降增加情景下北方森林土壤 CH₄ 吸收通量及其驱动机制至关重要。以大兴安岭寒温带针叶林作为研究对象, 构建了低剂量、多形态的增 N 控制实验, 研究了 2010 年生长季(6—10 月)土壤 CH₄ 吸收通量对增 N 的初期响应及其环境驱动机制。结果表明: 整个生长季, 寒温带针叶林土壤表现为大气 CH₄ 的汇, 土壤 CH₄ 平均吸收通量为(51.5±4.7) μg m⁻²h⁻¹, 主要由 0—10 cm 层土壤水分驱动。除了低剂量的 NO₃⁻-N 输入促进了土壤 CH₄ 氧化外, 低剂量的 N 输入总体上没有显著改变寒温带针叶林土壤 CH₄ 净吸收通量。另外, 增 N 没有显著改变 0—10 cm 层土壤水分、温度和土壤 pH 值, 但显著增加了 0—10 cm 矿质土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量。研究表明, 受 N 限制的北方森林土壤 CH₄ 吸收对增 N 响应的敏感程度与土壤 CH₄ 活性氧化区域、土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的空间分布格局以及相对比例有关。在分析北方森林土壤 CH₄ 通量及其驱动因子对 N 沉降增加的响应时, 除要考虑 N 沉降水平影响外, 还应考虑 N 沉降类型(NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N)的相对影响。

关键词: CH₄ 吸收; 大气 N 沉降; 土壤无机 N; 初期响应; 北方森林

Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest

GAO Wenlong^{1,2}, CHENG Shulan², FANG Huajun^{1,*}, CHEN Yan³, WANG Yongsheng¹, ZHANG Peilei², XU Minjie²

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: Methane (CH₄) oxidation in boreal forest soils is an important factor in the global CH₄ budget. Previous studies have shown that nitrogen (N) deposition alters the magnitude and direction of CH₄ uptake in boreal forest soils. However, the critical rate of atmospheric N deposition that causes the shift from stimulation of soil CH₄ uptake to inhibition, and the mechanisms responsible for these trends, are poorly understood. Investigation into the responses of CH₄ uptake flux from these soils and its driving factors relating to N input is important. In this study, a cold-temperate coniferous forest in the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41071166, 31070435, 31130009, 31290221); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB833502, 2010CB833501, 2012CB417103); 中国科学院地理与资源研究所“兼维”优秀青年人才基金资助项目(2011RC202); 中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA05050600)

收稿日期: 2012-08-25; 修订日期: 2013-01-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanghj@igsrr.ac.cn

Great Xing'an Mountains was selected for conducting an N addition manipulative experiment. Two forms of N ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$) and three N addition rates (0, 10 and 40 kg N $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) were designed to assess the responses of soil CH_4 fluxes to N addition. In the growing season (June to September) of 2010, soil atmospheric CH_4 exchange flux was measured every ten days using closed chambers. Simultaneously, soil environmental variables including soil moisture, soil temperature in the 0—10 cm horizon, soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents in the organic and mineral horizons, and soil pH values in the mineral soil horizon were also measured to determine the main factors affecting soil CH_4 uptake. The results showed that the average rate of CH_4 uptake in the cold-temperate coniferous forest soil was $(51.5 \pm 4.70) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, and this was mainly controlled by soil moisture content at 0—10 cm. Although N input did not significantly affect the soil CH_4 uptake, low level $\text{NO}_3^-\text{-N}$ input did slightly stimulate soil CH_4 uptake. Further analysis revealed that soil moisture and soil temperature at 0—10 cm were not affected by N input. Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents decreased greatly with soil depth and the vertical distribution pattern was obvious. In the organic layer, soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content increased with increasing N input, whereas soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content was not affected by N addition. In the mineral layer, soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents in the upper 10 cm were significantly affected by the levels and forms of N input, but soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents in the same soil horizon were only sensitive to $\text{NO}_3^-\text{-N}$ fertilizer addition. However, no significant changes in the soil pH at 0—10 cm were found among different N addition treatments. These results, to some degree, suggested that the sensitivity of CH_4 uptake from the N limited boreal soils in response to N input might be closely associated with the active CH_4 oxidizing zone and the vertical distribution and relative proportions of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$. Whether chronic atmospheric N deposition will alter the trends in soil CH_4 uptake in cold-temperate coniferous forests remains uncertain and needs to be further investigated. In addition, during the analysis of the responses of CH_4 uptake to N deposition from the N limited boreal soils and its control factors, both the levels and forms of N deposition should be taken into account.

Key Words: CH_4 uptake; atmospheric N deposition; soil inorganic N; early response; boreal forest

甲烷(CH_4)作为地球大气中第二大温室气体,百年时间尺度上单分子的增温潜势是二氧化碳(CO_2)的 23 倍,对全球变暖的贡献约为 20%^[1]。已有的资料表明,大气 CH_4 浓度的历史变化趋势基本如下^[2-3]:在过去 150a 间,其浓度基本上呈单调性增加;1999—2007 年,大气 CH_4 浓度较为平稳;2007 年之后又有所增加。大气中 CH_4 浓度持续升高是其源增加和汇减弱综合的结果。作为大气 CH_4 唯一的生物汇,水分非饱和的土壤年均消耗 30 Tg CH_4 与大气 CH_4 年均增加量大致相当^[4]。其中,森林土壤是大气 CH_4 最为有效的陆地生物汇^[5-6]。一旦森林土壤 CH_4 吸收发生波动,将会影响区域甚至全球大气 CH_4 收支平衡。外源性 N 素输入是影响森林土壤 CH_4 吸收过程的最为关键的因子之一,分析土壤 CH_4 吸收对增 N 的响应及其驱动机制至关重要。

自然条件下,森林土壤吸收大气 CH_4 通量的时空变异主要归因于降水和温度的波动^[3,7]。此外,植被类型、土壤甲烷氧化菌群落组成,土壤 pH 值,有效氮(N 含量,土壤质地以及凋落物累积等也是影响森林土壤 CH_4 吸收的重要因素。然而,森林土壤-大气界面 CH_4 净交换通量在很大程度上还受人为活动如土地利用变化^[8-9] 和外源性 N 素输入的干扰^[10-11]。据估计,人为活动产生的活性 N 从 1860 年 15 Tg/a 增加到 2005 年的 187 Tg/a,相应地同期全球大气 N 沉降量也成比例上升,从 34 Tg/a 增加到 105 Tg/a,并呈逐年递增趋势^[12-14]。在全球大气 N 沉降增加的背景下,对不同林地开展的定点大气 N 沉降模拟试验发现,N 沉降作为驱动因子会改变森林土壤-大气界面 CH_4 净交换通量,包括促进、抑制和无显著影响等结论^[10, 15-18]。仅次于热带雨林,北方森林占全球陆地面积的 14.5%^[19],对减缓全球大气 CH_4 浓度增加起着举足轻重的作用^[20]。然而,北方森林土壤温度低,凋落物质量差,土壤 N 素矿化速度较慢,土壤无机 N 含量仅占总 N 的 1%左右,土壤有效 N 十分贫乏^[21-22]。尽管如此,N 限制的北方森林土壤 CH_4 吸收对大气 N 沉降增加的响应存在很大的不确定性。一些研究发现,施加高剂量的 N 或长期高频率施 N 并没有改变美国阿拉斯加云杉林和芬兰云杉林

土壤 CH₄吸收通量^[20-23]。相反,Maljanen 等^[16]发现在北方云杉林土壤中添加草木灰和硝铵,原位土壤 CH₄氧化速率提高了 25 μg m⁻² h⁻¹。由此产生的问题是,高剂量增 N 试验结果可能难以真实反映贫 N 生境下 CH₄氧化菌群落对低水平 N 沉降的响应,也难以确定引起北方森林土壤 CH₄吸收通量发生显著性改变的大气 N 沉降临界负荷及其响应机制。

在我国,相关的研究主要集中在亚热带和温带的森林生态系统中^[17, 24],对寒温带森林生态系统关注较少。占我国森林总面积的 29.9%的北方森林,主要分布在大兴安岭地区^[25]。由于地区经济的发展和反应性 N 的远距离传输,大兴安岭寒温带针叶林区大气 N 沉降略高于北欧、加拿大和阿拉斯加地区的北方森林,达到 9.87—14.25 kgN hm⁻² a⁻¹^[26]。长期低水平的 N 沉降输入势必会增加大兴安岭寒温带针叶林土壤生物可利用性 N,改善植被生产力和提高固碳潜力。然而,目前我们并不清楚大兴安岭寒温带针叶林土壤 CH₄吸收对大气 N 沉降增加的响应是增加、降低或无显著变化? 本研究主要目的是研究 N 输入水平、类型对大兴安岭寒温带针叶林土壤 CH₄吸收通量及其驱动因子的影响,研究结果有助于降低我国北方森林土壤 CH₄吸收对未来大气 N 沉降增加响应的不确定性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测站以东的开拉气林场。试验区位于大兴安岭西北坡(50°20′—50°30′N, 121°45′—122°00′E),海拔 826 m。该区属于寒温带半湿润气候,年均气温 -5.4 °C,年降水量 450—550 mm,其中 60%集中在 6—8 月。9 月末到翌年 5 月初为降雪期,降雪厚度 20—40 cm,降雪量占全年降水总量的 12%。全年地表蒸发量 800—1200 mm,年均日照时数 2594 h,无霜期 80 d。土壤类型为棕色针叶林土,有机层和矿质层平均厚度分别为 10 cm 和 20 cm,其中矿质土壤石砾较多。土壤主要理化性质如下:腐殖质含量 10%—20%,全 N 2.9—4.7 g/kg,全磷 0.5—1.1 g/kg,土壤 pH 值 4.5—6.5,土壤容重 0.15—0.74 g/cm³。林分类型为杜香-落叶松林,林龄约为 150a,主要物种为兴安落叶松(*Larix gmelinii* Rupr.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk)、杜香(*Ledum palustre* var. *Dilatatum*)、杜鹃(*Folium Rhododendri daurici*)、红豆越橘(*Vaccinium vitisidaea*)等。

1.2 实验设计

为模拟分析 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 输入,参照大兴安岭站实际大气 N 沉降通量(10 kgN hm⁻² a⁻¹)^[27],设置氯化铵(NH₄Cl)、硝酸钾(KNO₃)两种类型 N 肥和低 N(Low N, 10 kgN hm⁻² a⁻¹)、高 N(High N, 40 kgN hm⁻² a⁻¹)两种水平 N 肥的处理,分别模拟未来大气 N 沉降增加 1 倍和 4 倍的情形,每种处理 3 次重复。每个 N 水平设置一个对照(Control, 0 kgN hm⁻² a⁻¹)以消除微地形等环境异质性对实验结果的可能影响。地势平坦,树木均匀分布样地 6 块(110 m×10 m),每块样地设置样方 3 个,样方大小为 10 m×20 m,间隔为 10 m。在生长季(6—10 月),每月月初将各形态 N 肥(分析纯)溶于 20 L 水中,用喷雾器均匀喷洒于各样方内。

1.3 土壤-大气界面 CH₄净交换通量监测

土壤 CH₄通量采用静态箱-气相色谱法测定^[17]。静态箱由不锈钢材料制成,盖箱长、宽、高分别为 50 cm、50 cm 和 40 cm,10 cm 高的底座埋入地下,采样时注水密封。盖箱表面覆盖白色防水面罩以减少取样时太阳辐射对箱内温度的影响。2010 年 6 月初开始采样,采样频率为每旬 1 次,采样时间为 9:00—11:00。扣上盖箱后,采用 100 mL 注射器分别在 0, 10, 20 min 和 30 min 时段采样 4 次,注入密封性良好的铝箔气袋(Delin, China),利用气相色谱仪(Agilent7890, USA)测定 CH₄浓度。土壤 CH₄通量根据箱内气体浓度随着时间的线性变化率计算^[28]。测定 CH₄时气相色谱柱箱温度为 55 °C,检测器 FID 的温度为 250 °C;载气(干空气及高纯 H₂)流量分别为 300 mL/min 和 50 mL/min,尾吹气(N₂)流量为 10 mL/min。采集气体时利用电子温度计(JM624, China)同步记录大气温度、箱内温度、地下 10 cm 温度值。利用土壤水分仪(TDR200, USA)测定土壤 10 cm 体积含水量。

1.4 土壤采集和分析

采样频率为生长季(6—10月)每月中旬1次。土样按有机层和矿质层分层采集,移除有机层后,采集0—10 cm 矿质土样。同一样方,沿对角线用土钻(直径为2.5 cm)随机采样,同层土壤5个土样均匀混合成一个样品。新鲜土样在田间条件下过2 mm筛子,冷冻带回实验室冷藏。土壤重量含水量采用烘干法测定,在105℃烘干8 h至恒重。土壤无机N($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用0.2 mol/L 氯化钾(KCl)浸提,含量采用流动化学分析仪(Bran Luebbe, Germany)测定。0—10 cm 矿质风干土 pH 值采用 pH 计(Mettler Toledo, Switzerland)进行测定,其中水土比为2.5:1。

1.5 数据处理

采用重复测量方差分析(Repeated measures ANOVAs),比较不同样地、施N处理和月份下0—10 cm 土壤含水量和温度、无机N含量、pH值和 CH_4 通量的差异。方差分析的结果显示,各样地和月份间的交互作用对土壤 CH_4 通量和土壤0—10 cm 含水量和温度、无机N含量、pH值影响均不显著,所以本文不考虑两者之间的交互作用。采用Pearson相关分析评价了土壤 CH_4 通量和土壤水分、土壤温度、土壤无机N含量、土壤pH值的相关关系。利用SPSS 16.0软件进行统计分析,利用SigmaPlot 10.0软件进行统计绘图。由于统计结果显示土壤10 cm 含水量基本上不受施N水平和类型影响,绘图时土壤含水量只考虑不同施N类型处理下的季节动态。除特殊说明外,显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤水分、温度和 CH_4 通量

整个生长季,表层土壤(0—10 cm)体积含水量呈现显著的季节变化(表1, $P<0.001$),与实验区的气温、降水格局相对应。土壤水分在冻融期(6月初)和降水集中期(7、8月中旬)形成3个峰值,在降水相对较少的干燥期(6月末和9月初)较低(图1)。土壤10 cm 温度季节变化明显,平均变化范围为3.48—11.98℃。总体而言,表层土壤水分含量和温度基本上不受N素输入影响(表1)。方差分析的结果表明,月份和施N水平的交互作用对土壤水分影响显著(表1, $P=0.003$),可能受7、8月份降水集中的影响,体现水氮之间的交互作用。土壤 CH_4 净吸收通量的季节变化显著(表1, $P<0.001$),与表层土壤水分变化格局相对应,而0—10 cm 土壤温度对其影响较小。自然状态下,土壤 CH_4 月均吸收通量在9月份最高,6月份最低,生长季平均吸收量为(51.5 ± 4.70) $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。总体上,N输入对大兴安岭寒温带针叶林土壤 CH_4 吸收影响不显著(表1)。然而,添加 KNO_3 处理和对照之间土壤 CH_4 净吸收通量差异显著($P=0.043$),尤其是低N处理情形。

表1 月份、施N类型、施N水平及其交互作用对土壤水分、温度和 CH_4 通量影响的重复测量方差分析

Table 1 Results of repeated measures ANOVAs on the effects of month, nitrogen (N) addition forms and levels as well as their interactions on methane (CH_4) flux and soil moisture, temperature

误差来源 Source of variation	土壤水分 Soil moisture		土壤温度 Soil temperature		土壤 CH_4 通量 Soil CH_4 flux	
	F	P	F	P	F	P
组内变异 Within Subjects						
月份 Month	45.65	<0.001 ***	552.82	<0.001 ***	8.05	<0.001 ***
月份×N水平 Month × N Level	3.32	0.003 **	0.76	0.523	2.05	0.12
月份×N类型 Month × N Form	0.53	0.66	<0.01	0.999	1.06	0.374
月份×N水平×N类型 Month×N level×N Form	0.59	0.625	<0.01	0.999	0.68	0.572
组间变异 Between Subjects						
N水平 N level	9.34	0.351	1.88	0.194	0.78	0.382
N类型 N Form	0.28	0.606	<0.01	0.999	0.61	0.439
N水平×N类型 N level × N Form	0.68	0.423	<0.01	0.999	1.29	0.721

2.2 土壤无机N含量

自然状态下,大兴安岭寒温带针叶林不同土层土壤无机N含量以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较低(图2)。

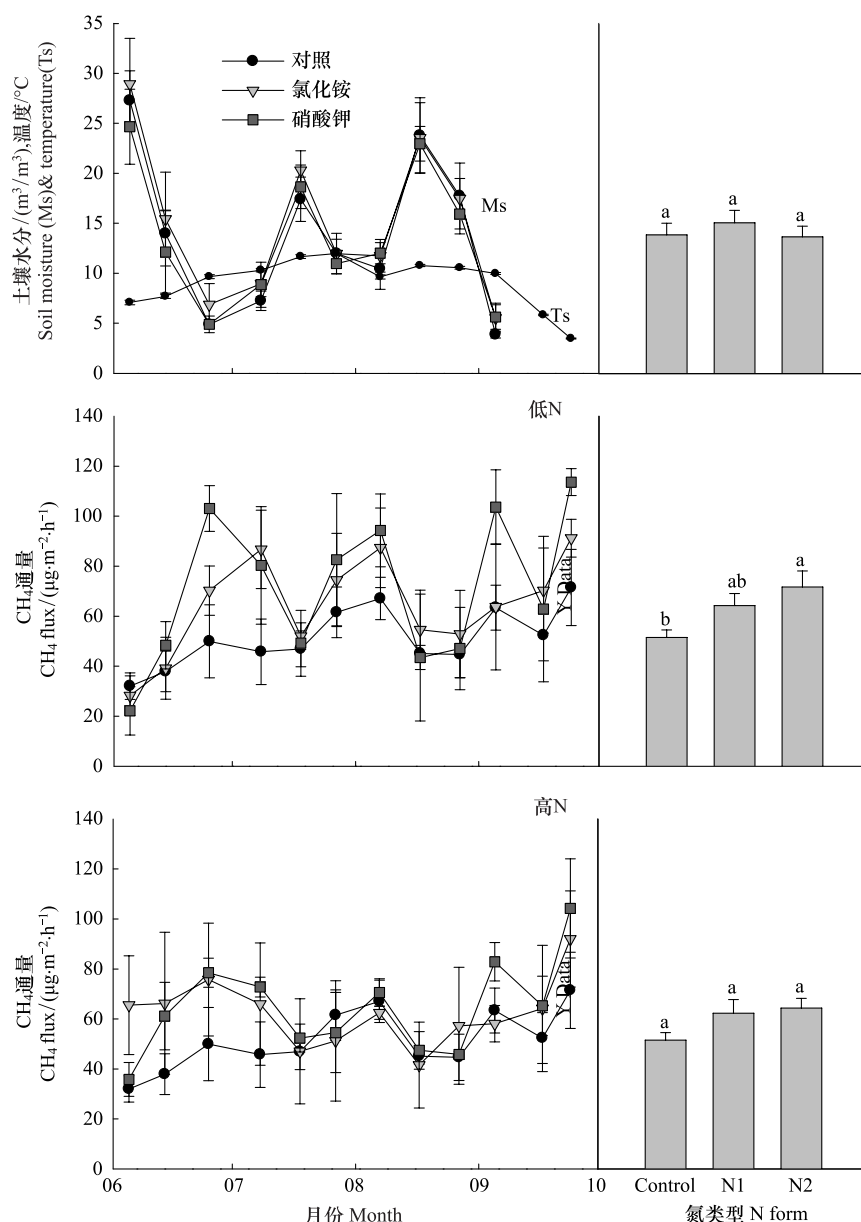


图1 0—10cm 土壤含水量和 CH₄通量的季节变化及其对增 N 的响应

Fig.1 Seasonal variation and responses to nitrogen (N) addition in 0—10 cm soil moisture content and methane (CH₄) flux under low N and high N treatments

不同字母表示二者均值差异显著

除 0—10 cm 矿质土壤 NH₄⁺-N 含量季节性变化不明显外,有机层和矿质层土壤无机 N 含量均呈现显著的季节变化(表 2)。

土壤 NH₄⁺-N 对增 N 的响应敏感。有机层土壤 NH₄⁺-N 含量受施 N 剂量的影响显著(表 2, $P=0.026$),高 N 处理的促进效应更为突出;在 0—10 cm 矿质层,土壤 NH₄⁺-N 含量则同时受施 N 水平和类型影响(图 2, $P=0.023$ 和 $P=0.049$)。与此不同的是,有机层和 0—10 cm 矿质土壤 NO₃⁻-N 含量对增 N 的响应存在差异。除月份和 N 水平交互作用有显著影响外,有机层 NO₃⁻-N 含量基本上不受外源性 N 输入的影响,而 0—10 cm 矿质土壤 NO₃⁻-N 含量受 KNO₃ 输入影响较为明显。施 N 水平对土壤 NO₃⁻-N 含量影响不显著,可能是由于土壤硝化作用弱和反硝化潜势大以及 NO₃⁻-N 淋溶性强,导致土壤 NO₃⁻-N 累积不明显。此外,月份、施 N 水平和施 N 类型的交互作用对矿质表层土壤 NO₃⁻-N 含量影响显著(表 2, $P=0.041$)。

2.3 土壤 pH 值的变化

在生长季,0—10 cm 矿质土壤 pH 值季节性变化显著(表 2, $P < 0.001$)。自然条件下,表层土壤 pH 值整体上呈单峰式波动,7、8 月份较高,6、9 月份较低,与表层土壤 NO_3^- -N 含量变化格局相似(图 2)。在降水量多的 8 月份,高 N 处理下表层土壤 pH 值之所以没有显著降低,可能是硝化作用较弱(图 1,图 2)。类似地,月份和 N 水平,月份, N 水平和 N 类型的交互作用对 0—10 cm 土壤 pH 值影响显著(表 2, $P = 0.002$ 和 $P = 0.028$)。

表 2 月份、施 N 对土壤无机 N 含量和 pH 值影响的重复测量方差分析

Table 2 Results of repeated measures ANOVAs on the effects of month, N addition and their interactions on soil inorganic N contents and soil pH values

误差来源 Source of variation	土壤 NH_4^+ -N 含量 Soil NH_4^+ -N content				土壤 NO_3^- -N 含量 Soil NO_3^- -N content				土壤 pH Soil pH	
	有机层 Organic layer		矿质层 Mineral layer		有机层 Organic layer		矿质层 Mineral layer			
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
组内变异 Within Subjects										
月份 Month	11.27	0.002 **	2.1	0.118	5.37	0.018 *	13.87	0.001 **	11.55	<0.001 ***
月份×N 水平 Month×N Level	2.91	0.880	1.15	0.343	6.15	0.012 *	2.09	0.166	10.03	0.002 **
月份×N 类型 Month×N Form	1.69	0.232	0.089	0.965	0.05	0.984	1.61	0.249	1.34	0.310
月份×N 水平×N 类型 Month×N level×N Form	1.29	0.329	0.45	0.722	0.42	0.745	4.01	0.041 *	4.47	0.028 *
组间变异 Between Subjects										
N 水平 N level	6.43	0.026 *	6.82	0.023 *	0.02	0.881	2.66	0.129	0.63	0.557
N 类型 N Form	0.68	0.425	4.79	0.049 *	0.37	0.852	4.38	0.058	2.94	0.110
N 水平×N 类型 N level×N Form	0.01	0.990	1.94	0.190	0.43	0.526	0.77	0.400	2.36	0.149

2.4 土壤 CH_4 通量和环境变量的相关关系

通常,土壤 CH_4 通量和土壤水分的关系采用线性拟合方法;与土壤温度的关系则较为复杂,采取简单的线性拟合和分层的线性拟合,原因在于在区分土壤水分和温度对土壤 CH_4 吸收通量影响的相对作用时,需要考虑温度阈值。研究结果表明,土壤 CH_4 净吸收通量和土壤 10 cm 体积含水量呈现负相关性($R^2 = 0.20$, $P < 0.001$),与土壤 10 cm 温度关系不明显(图 3)。诸多研究表明,土壤 CH_4 氧化速率与土壤 NH_4^+ -N 含量呈负相关或正相关,与 NO_3^- -N 含量呈负相关或正相关,与土壤 pH 值呈负相关。本研究结果表明,土壤 CH_4 净吸收通量和土壤 NH_4^+ -N 含量呈弱负相关(图 3, $R^2 = 0.09$, $P < 0.016$)。除此之外,土壤 CH_4 净吸收通量与土壤 NO_3^- -N 含量、总无机 N 含量、pH 值之间相关性不明显(图 3)。

3 讨论

3.1 N 输入对寒温带针叶林土壤 CH_4 通量的影响

整个生长季,大兴安岭寒温带针叶林土壤表现为大气 CH_4 的汇, CH_4 平均吸收通量为 $(51.5 \pm 4.70) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$,主要受 0—10 cm 土壤水分控制。总体上,短期内寒温带针叶林生长季土壤 CH_4 吸收通量对增 N 的响应不敏感,这和 Gullledge 等^[23] 在阿拉斯加北方森林的研究结果一致。施 N ($60 \text{ kg NH}_4\text{NO}_3\text{-N/hm}^2$) 3a,阿拉斯加北方云杉林土壤 CH_4 吸收通量没有发生显著性改变。同样,Whalen 等^[20] 发现高 N ($140 \text{ kg (NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-N/hm}^2$) 对阿拉斯加北方森林生长季土壤 CH_4 汇没有影响。Saari 等^[21] 也发现长期高频率施 N 对芬兰的北方云杉林土壤 CH_4 吸收影响不显著。类似地,在德国西南部 N 限制的暗针叶林中,土壤长期高剂量施 N ($150 \text{ kg$

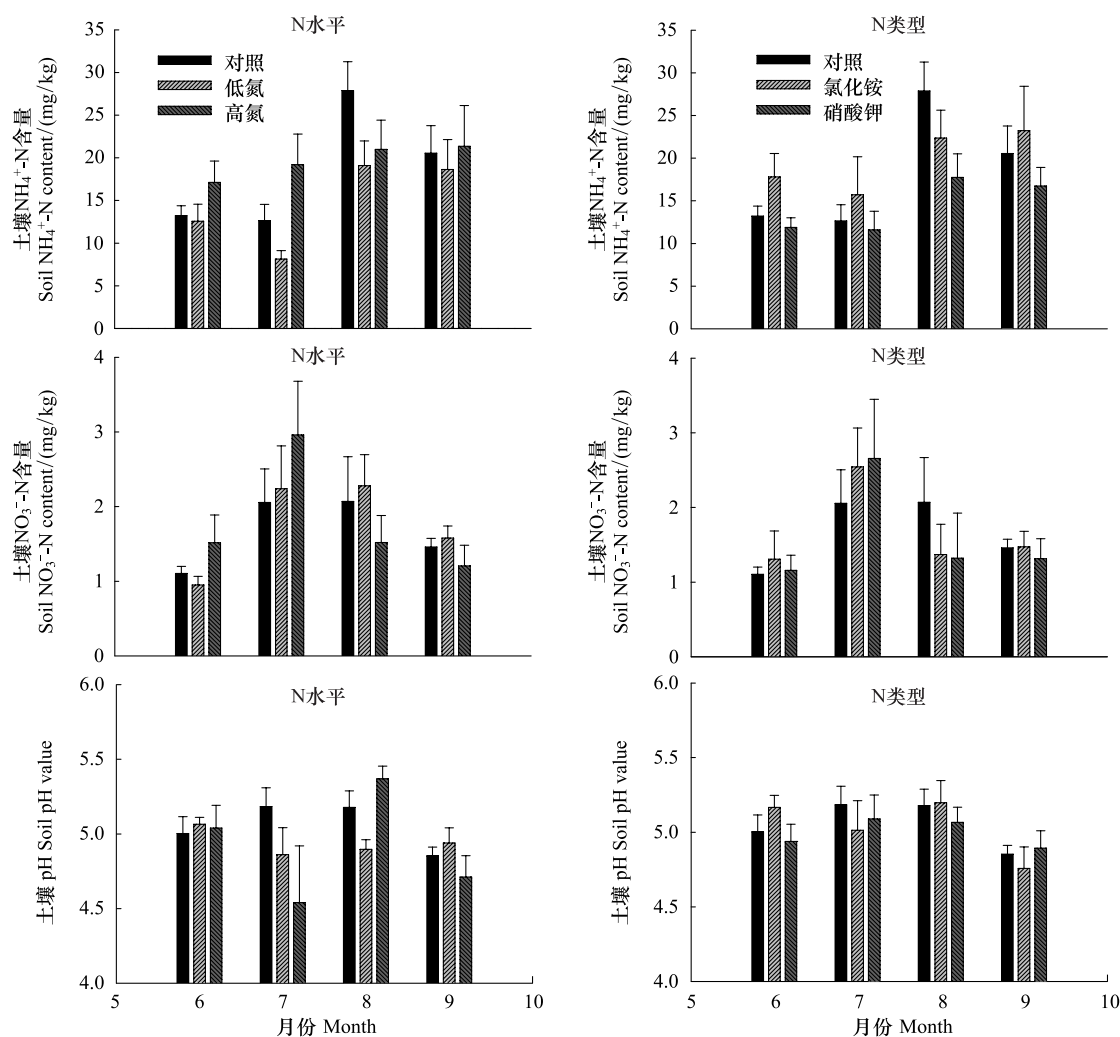


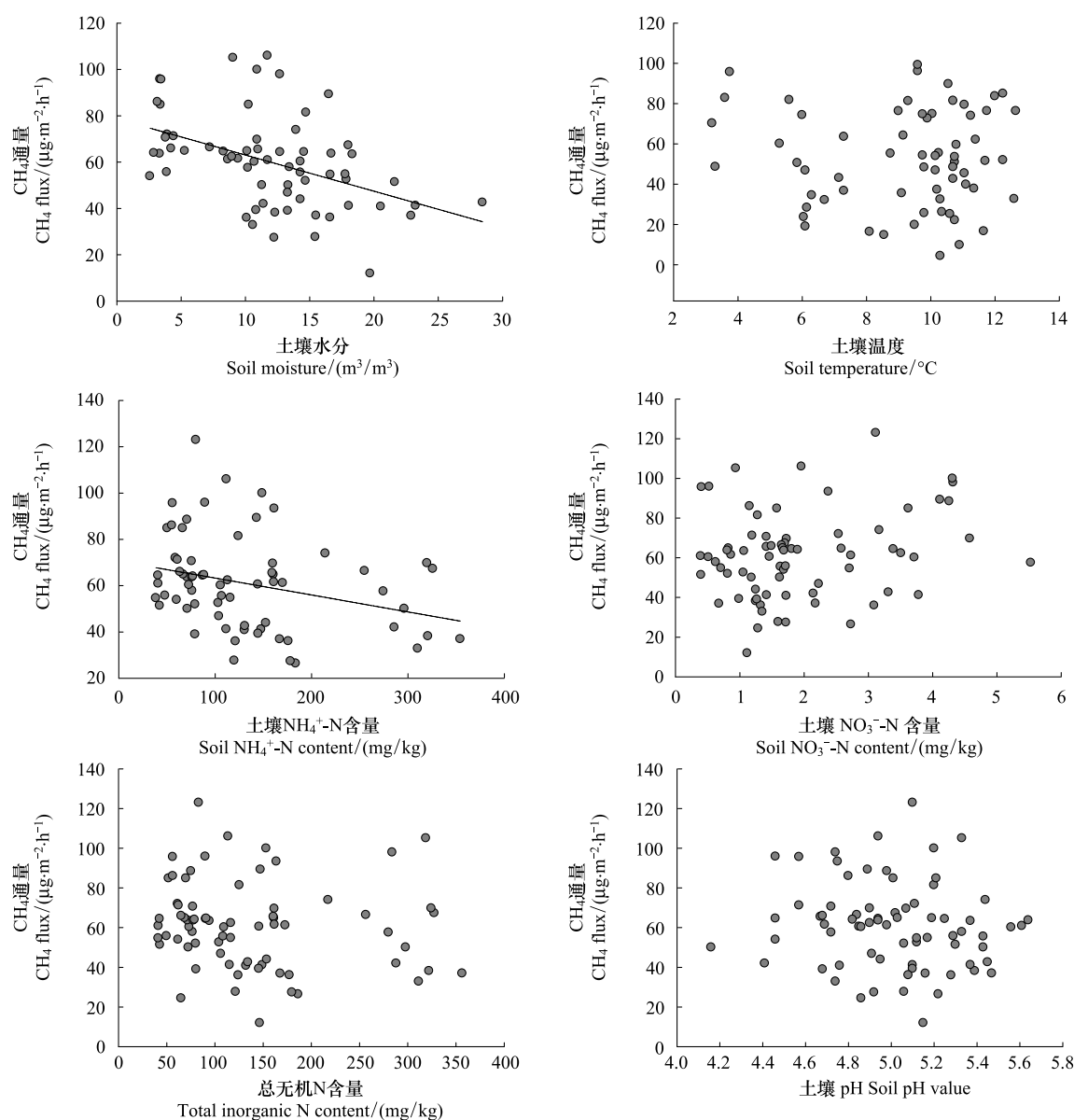
图2 0—10cm 矿质土壤无机 N 含量和 pH 值的季节变化及其对增 N 的响应

Fig.2 The seasonal variation and responses to N addition of inorganic N content and pH values in the upper 0—10cm mineral soil during the 2010 growing season (from June to September)

数据为 2010 年生长期 (6—9 月) 均值和标准误差 ($n=3$)

($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-N}/\text{hm}^2$) 的样方和对照样方土壤平均 CH_4 氧化速率差异不明显^[29]。不同的是, Maljanen 等^[16]发现北方云杉林土壤采用硝铵和木灰混合处理, 原位土壤 CH_4 氧化速率平均提高约 16%。Borjesson 和 Nohrstedt 则指出长期施 N 引起的生态系统碳截留会提高寒温带森林土壤 CH_4 的氧化潜力。值得注意的是, Aronson 和 Helliker 通过整合分析指出, 引起水分非饱和土壤 CH_4 吸收发生转变的大气 N 沉降临界负荷为 $100 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[3]。然而, 本研究难以确定引起我国北方森林土壤 CH_4 吸收通量发生显著性改变的大气 N 沉降阈值, 需要更长期的野外监测数据来确定。

在生长季, 大兴安岭寒温带针叶林 KNO_3 处理样方和对照样方土壤 CH_4 净吸收通量差异边缘显著 ($P=0.043$), 尤其是低 N 处理情形 (图 1)。尽管存在较大的变异性, 整个生长季 KNO_3 处理的样方土壤 CH_4 平均吸收速率要明显高于对照样方 (图 1)。和本研究结果相似, Jang 等^[28]发现韩国温带森林土壤原位 CH_4 氧化速率和土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量呈正相关。他们短期的室内控制实验进一步显示: 在大气环境浓度的条件下 ($-1.7 \mu\text{L/L}$), 添加 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ($0.20\text{—}1.95 \mu\text{g N/g 土}$) 显著促进土壤 CH_4 氧化。大兴安岭寒温带针叶林土壤有效 N 贫乏, 再加上土壤无机 N 含量以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为主, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 输入是否会促进土壤 CH_4 氧化? 长期的施 N 效应尚待确定。相反, Reay 等^[30]则发现模拟添加和实验样地土壤相同的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量, 橡树林土壤高、低亲和力的 CH_4

图3 土壤 CH_4 通量和环境变量的相关关系Fig.3 Relationships between soil CH_4 fluxes and environmental variables

氧化完全被抑制,和 Wang 和 Ineson 室内控制实验得出的结论一致,即 NO_3^- -N 而非 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 对土壤 CH_4 氧化的抑制作用最大。但是,本研究没有发现土壤 CH_4 净吸收通量和土壤 NO_3^- -N 含量存在明显的相关性,归因于土壤 NO_3^- -N 含量较低以及累积不显著。

在响应格局上,大量研究报道施 N 会抑制森林土壤 CH_4 吸收,尤其在非 N 限制的温带森林和热带森林^[10-11, 17-18]。在南亚热带鼎湖山地区,Zhang 等^[17]发现低 N (50 kg NH_4NO_3 -N/hm²)、中 N (100 kg NH_4NO_3 -N/hm²) 和高 N (150 kg NH_4NO_3 -N/hm²) 处理导致季风常绿阔叶林土壤 CH_4 平均吸收速率分别下降了 6%, 14% 和 32%。施加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 或 NH_4Cl (45 kg N/hm²) 一定程度上降低了东北温带老龄林土壤 CH_4 吸收速率^[24]。本项研究则表明,低剂量的外源性 N 输入没有显著改变大兴安岭寒温带针叶林生长季土壤 CH_4 吸收通量。

3.2 寒温带针叶林土壤 CH_4 吸收对增 N 的响应机制

森林土壤 CH_4 氧化过程主要由高亲和力的甲烷氧化菌(MOB)如旱地土壤 α 簇(USC α), γ 簇(USC γ) 和进

化学上难以分类的簇完成的,其中 USC α 在酸性森林土壤占主导地位,USC γ 则在 pH 值中性的土壤(如草地)中较为活跃^[31]。由于土壤介导的 CH₄氧化是一个微生物学过程,对外界环境扰动如 N 沉降的响应极其敏感。据报道,无机 N 如 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 均能抑制森林土壤 CH₄氧化^[30,32]。有关森林土壤 CH₄氧化的 N 素调控机理主要包括^[8, 24, 32-36]: NH₃ 和 CH₄ 在分子水平上对甲烷单加氧酶的竞争,土壤酸化,中间产物如亚硝酸根(NO₂⁻)、羟胺和溶出产物铝离子(Al³⁺)的毒害作用,渗透压效应,N 素周转机制,MOB 对 N 素耐受力的差异,MOB 对无机 N 的驱动响应,凋落物和根系增加阻碍 CH₄扩散等。

大量研究表明,高剂量施 N 或长期高频率施 N 并没有改变阿拉斯加、芬兰有效 N 贫乏的北方森林土壤 CH₄氧化潜力,可能的原因在于液态 N 难以穿透到土壤活性的 CH₄氧化区域^[20]。由此产生的问题是,森林土壤 CH₄吸收对增 N 的响应敏感程度与土壤 CH₄活性氧化区域有关,特别是北方森林^[20]。北方森林土壤有效 N 贫乏,植物和土壤微生物对 N 素需求量大,外源性输入的 N 一般被截留在植被根系和微生物相对丰富的有机层。再者,森林土壤 CH₄氧化呈现垂直氧化的现象,最大的氧化速率往往出现在 0—10 cm 表层土壤,CH₄和 O₂难以扩散到更深的土层导致供应不足^[11, 36]。通常,有机层不适合 MOB 生存,主要因为半分解层和分解层土壤温度、水分剧烈波动,以及有机层无机 N 浓度较高,北方森林土壤更是如此^[32]。借助¹³C 磷脂脂肪酸(PLFA)同位素示踪技术,Bengtson 等^[34]也发现不同土层的¹³CH₄结合到 PLFA 的速率存在差异,即有机层较低,矿质层较高。研究显示,生长季大兴安岭寒温带针叶林 0—10 cm 表层土壤 NH₄⁺-N 含量随外加 N 增加而显著增高,且 NH₄⁺-N 如 NH₄Cl 直接输入对其影响显著。然而,土壤介导的 CH₄氧化对增 N 的响应不敏感。产生上述差异的可能原因是:(1)土壤 CH₄活性氧化区域位于 0—10 cm 矿质土壤中下部位或更深土层,而 NH₄⁺-N 沿土层垂直下降,分布不均匀,且富集于表层土壤中;(2)NH₄⁺-N 和游离 NH₃的相对比例随土壤 pH 值降低而下降,而 NH₄⁺-N 浓度升高会降低土壤微环境 pH 值,因而抑制作用较小^[37];(3)外源性 N 输入并没有引起 MOB 和氨氧化菌相对比例显著改变;一般认为,森林土壤 CH₄吸收汇的增加可能是 CH₄氧化菌和氨氧化菌的数量和活性得以提高,而后者氧化 CH₄的速率要比前者低许多^[20, 33]。与诸多研究结果不同的是,我们研究显示 NO₃⁻-N 输入倾向于促进大兴安岭寒温带针叶林土壤 CH₄吸收。对此,Jang 等^[28]给出的解释为外加 N 如 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 对不同类型的 MOB 的氧化能力有不同程度的激发或抑制作用。Menyailo 等^[8]则从侧面指出,土壤 CH₄吸收强度的改变主要归因于 MOB 的数量及其细胞活性的改变。然而,确切的机制仍不清楚。本研究中,土壤 CH₄氧化对增 N 响应格局潜在的解释是由于大兴安岭寒温带针叶林土壤 NO₃⁻-N 含量低,外源性输入的 NO₃⁻-N 对不同类型的 MOB 的氧化潜力诱导效应更为明显。

N 沉降或增 N 引起的土壤 pH 值下降对 MOB 的生理活性和大气 CH₄氧化的动力学过程有不同程度的抑制作用^[37-38]。然而,土壤 pH 值有所下降,可能对 MOB 的氧化活性影响不大。其一,和森林土壤氧化大气 CH₄的最佳 pH 值或最佳 pH 值区间有关^[37];其二,NH₄⁺-N 和游离 NH₃的相对比例随土壤 pH 值降低而下降^[39]。再者,在 N 限制的北方森林,土壤 pH 值一般受土壤无机 N 含量最为丰富的 NH₄⁺-N 控制,植物吸收作用强且土壤硝化作用弱,因而受外源性 N 添加的干扰小。本研究就发现施 N 对 0—10 cm 层土壤 pH 值影响并不显著。

综合而言,短期内外源性 N 输入不会抑制大兴安岭北方寒温带针叶林生长季土壤 CH₄吸收,NO₃⁻-N 输入甚至表现出促进效应。然而,长期低水平的大气 N 沉降或 N 输入是否会促使 N 限制的北方森林凋落物积累和植被根系增加,进而阻碍 CH₄扩散和氧化?对此,也有研究者指出,植被根系生物量增加在降低土壤空气填充空隙度的同时也改善了根系周围土壤的透气状况^[33]。由此可见,寒温带针叶林土壤 CH₄吸收对增 N 响应十分复杂,需要深入研究。

4 结论

本研究以我国寒温带针叶林为研究对象,分析了 2010 年生长季土壤 CH₄吸收通量及其主控因子对模拟大气 N 沉降增加的初期响应。研究表明:

(1) 大兴安岭寒温带针叶林土壤表现为大气 CH_4 的汇, CH_4 平均吸收通量为 $(51.5 \pm 4.70) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 主要受 0—10 cm 层土壤水分控制;

(2) 低剂量的外源性 N 输入对大兴安岭寒温带针叶林土壤-大气界面 CH_4 净交换通量的影响不显著, 但是低剂量的 NO_3^- -N 输入促进了土壤的 CH_4 氧化;

(3) 短期内, 0—10 cm 层矿质土壤 NH_4^+ -N 含量对增 N 响应敏感, 同层土壤 NO_3^- -N 含量受 NO_3^- -N 输入影响显著, 但没有显著改变土壤 pH 值;

(4) 寒温带针叶林土壤 CH_4 吸收对增 N 响应的敏感程度可能与土壤 CH_4 活性氧化区域, 土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量的空间垂直分布格局和相对比例有关。

References:

- [1] Houghton J T. Working Group I: 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: 881-881.
- [2] Rigby M, Prinn R G, Fraser P J, Simmonds P G, Langenfelds R L, Huang J, Cunnold D M, Steele L P, Krummel P B, Weiss R F, O'Doherty S, Salameh P K, Wang H J, Harth C M, Mühle J, Porter L W. Renewed growth of atmospheric methane. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L22805, doi: 10.1029/2008GL036037.
- [3] Aronson E L, Helliker B R. Methane flux in non-wetland soils in response to nitrogen addition: a meta-analysis. *Ecology*, 2010, 91(11): 3242-3251.
- [4] Solomon S. Intergovernmental Panel on Climate Change and Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I. 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: 996-996.
- [5] Smith K A, Dobbie K E, Ball B C, Bakken L R, Sitaula B K, Hansen S, Brumme R, Borken W, Christensen S, Priemé A, Fowler D, Macdonald J A, Skiba U, Klemedtsson L, Kasimir-Klemedtsson A, Degorska A, Orlanski P. Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology*, 2000, 6(7): 791-803.
- [6] Dunfield P F, Yuryev A, Senin P, Smirnova A V, Stott M B, Hou S B, Ly B, Saw J H, Zhou Z M, Ren Y, Wang J M, Mountain B W, Crowe M A, Weatherby T M, Bodelier P L E, Liesack W, Feng L, Wang L, Alam M. Methane oxidation by an extremely acidophilic bacterium of the phylum Verrucomicrobia. *Nature*, 2007, 450(7171): 879-883.
- [7] Guckland A, Flessa H, Prenzel J. Controls of temporal and spatial variability of methane uptake in soils of a temperate deciduous forest with different abundance of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(8): 1659-1667.
- [8] Menyailo O V, Hungate B A, Abraham W R, Conrad R. Changing land use reduces soil CH_4 uptake by altering biomass and activity but not composition of high-affinity methanotrophs. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2405-2419.
- [9] Saggar S, Tate K R, Giltrap D L, Singh J. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide and methane in New Zealand terrestrial ecosystems and their mitigation options: a review. *Plant and Soil*, 2008, 309(1/2): 25-42.
- [10] Steudler P A, Bowden R D, Melillo J M, Aber J D. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest Soils. *Nature*, 1989, 341(6240): 314-316.
- [11] Gullledge J, Hrywna Y, Cavanaugh C, Steudler P A. Effects of long-term nitrogen fertilization on the uptake kinetics of atmospheric methane in temperate forest soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 49(3): 389-400.
- [12] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, Seitzinger S P, Howarth R W, Cowling E B, Cosby B J. The nitrogen cascade. *Bioscience*, 2003, 53(4): 341-356.
- [13] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [14] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J, Turnbull J, Bowman W D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 2002, 419(6910): 915-917.
- [15] Macdonald J A, Skiba U, Sheppard L J, Ball B, Roberts J D, Smith K A, Fowler D. The effect of nitrogen deposition and seasonal variability on methane oxidation and nitrous oxide emission rates in an upland spruce plantation and moorland. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(22): 3693-3706.
- [16] Maljanen M, Jokinen H, Saari A, Strommer R, Martikainen P J. Methane and nitrous oxide fluxes, and carbon dioxide production in boreal forest soil fertilized with wood ash and nitrogen. *Soil Use and Management*, 2006, 22(2): 151-157.
- [17] Zhang W, Mo J M, Zhou G Y, Gundersen P, Fang Y T, Lu X K, Zhang T, Dong S F. Methane uptake responses to nitrogen deposition in three tropical forests in southern China. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D1116, doi: 10.1029/2007JD009195.

- [18] Ambus P, Robertson G P. The effect of increased N deposition on nitrous oxide, methane and carbon dioxide fluxes from unmanaged forest and grassland communities in Michigan. *Biogeochemistry*, 2006, 79(3): 315-337.
- [19] Gower S T, Krankina O, Olson R J, Apps M, Linder S, Wang C. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecological Applications*, 2001, 11(5): 1395-1411.
- [20] Whalen S C, Reeburgh W S. Effect of nitrogen fertilization on atmospheric methane oxidation in boreal forest soils. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2(2): 151-155.
- [21] Saari A, Smolander A, Martikainen P J. Methane consumption in a frequently nitrogen-fertilized and limed spruce forest soil after clear-cutting. *Soil Use and Management*, 2004, 20(1): 65-73.
- [22] Fang Y T, Mo J M, Gundersen P, Zhou G Y, Li D J. Nitrogen transformations in forest soils and its responses to atmospheric nitrogen deposition: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [23] Gullett J, Doyle A P, Schimel J P. Different NH₄⁺-inhibition patterns of soil CH₄ consumption: a result of distinct CH₄-oxidizer populations across sites? *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(1): 13-21.
- [24] Xu X K, Han L, Luo X B, Han S J. Synergistic effects of nitrogen amendments and ethylene on atmospheric methane uptake under a temperate old-growth forest. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(4): 843-854.
- [25] Fang J Y, Piao S L, Zhao S Q. The carbon sink: the role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the Northern Hemisphere. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 594-602.
- [26] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D22S05, doi: 10.1029/2006JD007990.
- [27] Wendu R N, Fang H J, Yu G R, Cheng S L, Zhou M, Gao W L, Zhang P L, Xu M J. Early nitrogen deposition effects on CO₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2185-2195.
- [28] Jang I, Lee S, Zoh K D, Kang H. Methane concentrations and methanotrophic community structure influence the response of soil methane oxidation to nitrogen content in a temperate forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 620-627.
- [29] Steinkamp R, Butterbach-Bahl K, Papen H. Methane oxidation by soils of an N limited and N fertilized spruce forest in the Black Forest, Germany. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 145-153.
- [30] Reay D S, Nedwell D B. Methane oxidation in temperate soils: effects of inorganic N. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12): 2059-2065.
- [31] Kolb S. The quest for atmospheric methane oxidizers in forest soils. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, 1(5): 336-346.
- [32] Wang Z P, Ineson P. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 427-433.
- [33] Bodelier P L E, Laanbroek H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 47(3): 265-277.
- [34] Bengtson P, Basiliko N, Dumont M G, Hills M, Murrell J C, Roy R, Grayston S J. Links between methanotroph community composition and CH₄ oxidation in a pine forest soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, 70(3): 356-366.
- [35] Nyerges G, Stein L Y. Ammonia cometabolism and product inhibition vary considerably among species of methanotrophic bacteria. *FEMS Microbiology Letters*, 2009, 297(1): 131-136.
- [36] Sjögersten S, Melander E, Wookey P A. Depth distribution of net methanotrophic activity at a mountain birch forest-tundra heath ecotone, northern Sweden. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2007, 39(3): 477-480.
- [37] Saari A, Rinnan R, Martikainen P J. Methane oxidation in boreal forest soils: kinetics and sensitivity to pH and ammonium. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(7): 1037-1046.
- [38] Tamai N, Takenaka C, Ishizuka S. Water-soluble Al inhibits methane oxidation at atmospheric concentration levels in Japanese forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(7): 1730-1736.
- [39] Borken W, Beese F, Brumme R, Lamersdorf N. Long-term reduction in nitrogen and proton inputs did not affect atmospheric methane uptake and nitrous oxide emission from a German spruce forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11): 1815-1819.

参考文献:

- [22] 方运霆, 莫江明, Gundersen P, 周国逸, 李德军. 森林土壤 N 素转换及其对 N 沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [25] 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 594-602.
- [27] 温都如娜, 方华军, 于贵瑞, 程淑兰, 周梅, 高文龙, 张裴雷, 徐敏杰. 模拟 N 沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响. *生态学报*, 2012, 32(7): 2185-2195.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.23 Dec., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (7323)
- Genetic impact of swimming crab *Portunus trituberculatus* farming on wild genetic resources in Haizhou Bay DONG Zhiguo, LI Xiaoying, ZHANG Qingqi, et al (7332)
- The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush TAN Yongqin, BAI Xinfu, HOU Yuping, et al (7340)
- Effects of *Liriomyza huidobrensis* infestation on the activities of four defensive enzymes in the leaves of cucumber plants SUN Xinghua, ZHOU Xiaorong, PANG Baoping, et al (7348)

Autecology & Fundamentals

- Early effects of simulated nitrogen deposition on annual nutrient input from litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (7355)
- Relationship between nutrient characteristics and yields of tumorous stem mustard at different growth stage ZHAO Huan, LI Huihe, LÜ Huifeng, et al (7364)
- Decomposition rate and silicon dynamic of mulching residue under *Phyllostachys praecox* stands HUANG Zhangting, ZHANG Yan, SONG Zhaoliang, et al (7373)
- Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape ZHANG Shujie, LIAO Xing, HU Xiaojia, et al (7382)
- The crude protein content of main food plants of François' langur (*Trachypithecus francoisi*) in Fusui, Guangxi, China LI Youbang, DING Ping, HUANG Chengming, et al (7390)
- Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and enzyme activity of nitrogen metabolism in maize under-mulch-drip irrigation GU Yan, HU Wenhe, XU Baijun, et al (7399)
- Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zbrafish *Danio rerio* XIA Jigang, NIU Cuijuan, SUN Luyin (7408)
- Allelopathic effects of extracts from *Ulva prolifera* powders on the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* HAN Xiurong, GAO Song, HOU Junni, et al (7417)
- Predation evaluation of *Diaphorina citri*'s (Homoptera: Chermidae) natural enemies using the CO I marker gene MENG Xiang, OUYANG Gecheng, XIA Yulu, et al (7430)
- Effect of volatiles from healthy or worm bored Korean pine on host selective behavior of *Dioryctria sylvestrella* and its parasitoid *Macrocentrus* sp. WANG Qi, YAN Shanchun, YAN Junxin, et al (7437)

Population, Community and Ecosystem

- Relationship between rhizosphere microbial community functional diversity and faba bean fusarium wilt occurrence in wheat and faba bean intercropping system DONG Yan, DONG Kun, TANG Li, et al (7445)
- Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills YU Yang, DU Hu, SONG Tongqing, et al (7455)
- Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area LI Wenjing, WANG Zhen, HAN Qingfang, et al (7467)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai Region LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al (7478)

- Effects of landscape patterns on runoff and sediment export from typical agroforestry watersheds in the Three Gorges Reservoir area, China HUANG Zhilin, TIAN Yaowu, XIAO Wenfa, et al (7487)
- Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM+ remote sensing data XIAO Jincheng, OU Weixin, FU Haiyue (7496)
- Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest GAO Wenlong, CHENG Shulan, FANG Huajun, et al (7505)
- Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem JIA Bingrui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (7516)
- Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China ZHOU Xiaoping, WANG Xiaoke, ZHANG Hongxing, et al (7525)
- Dynamics of atmospheric ammonia concentrations near different emission sources LIU Jieyun, KUANG Fuhong, TANG Aohan, et al (7537)
- Influence of residues and earthworms application on N₂O emissions of winter wheat ... LUO Tianxiang, HU Feng, LI Huixin (7545)
- Resource and Industrial Ecology**
- Ecological monitoring of the fish resources catching and stocking in Lake Tianmu basing on the hydroacoustic method SUN Mingbo, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (7553)
- Application of support vector machine to evaluate the eutrophication status of Taihu Lake ZHANG Chengcheng, SHEN Aichun, ZHANG Xiaoqing, et al (7563)
- Research Notes**
- Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China XU Wangming, YAN Wende, LI Jiebing, et al (7570)
- Allelopathic effects of artemisinin on seed germination and seedling growth of vegetables BAI Zhen, HUANG Yue, HUANG Jianguo (7576)
- Nitric oxide participates symbiosis between am fungi and tobacco plants WANG Wei, ZHAO Fanggui, HOU Lixia, et al (7583)
- Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation ZHANG Guiming, ZHU A'xing, YANG Shengtian, et al (7590)
- Effects of nitrogen fertilizer methods on the content of *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein and yield of transgenic cotton MA Zongbin, LIU Guizhen, YAN Gentu, et al (7601)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 王德利

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 23 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 23 (December, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元