

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

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 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤 CH_4 吸收速率对模拟 N 沉降的响应 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 伟,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度 O_3 及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方3种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....	何苑擘,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....	申家朋,张文辉 (2746)
景观、区域和全球生态	
南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)
资源与产业生态	
基于GIS的山西省矿产资源规划环境影响评价	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)
学术信息与动态	
全球土地计划第二次开放科学大会(GLP 2 nd Open Science Meeting)会议述评	段宝玲,卜玉山 (2796)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05	



封面图说: 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

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/stxb201306101618

陈朝琪, 杨智杰, 刘小飞, 吴君君, 黄永梅. 中亚热带天然林土壤 CH_4 吸收速率对模拟 N 沉降的响应. 生态学报, 2014, 34(10): 2498-2508.

Chen C Q, Yang Z J, Liu X F, Wu J J, Huang Y M. Responses of CH_4 uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2498-2508.

中亚热带天然林土壤 CH_4 吸收速率 对模拟 N 沉降的响应

陈朝琪^{1,2}, 杨智杰^{1,2,*}, 刘小飞^{1,2}, 吴君君^{1,2}, 黄永梅^{1,2}

(1. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 陆地森林土壤是重要的大气甲烷(CH_4)汇, 大气氮(N)沉降增加对森林土壤 CH_4 吸收速率影响突出。运用静态箱-气相色谱法对中亚热带天然林土壤 CH_4 吸收速率对模拟 N 沉降的响应进行连续 3a 的观测; 试验作 3 种 N 处理, 分别为对照(CK, $0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、低氮(LN, $50 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和高氮(HN, $100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 每种处理重复 3 次, 每个月采集气体 1 次, 同时测定 0—5 cm 土壤温度和 0—12 cm 土壤含水量; 分析不同 N 沉降水平土壤 CH_4 吸收速率的差异、动态变化以及对土壤含水量和土壤温度响应, 并探讨 N 沉降对土壤理化性质的影响。结果显示: 天然林土壤(CK)平均 CH_4 吸收速率为 $(-62.78 \pm 14.39) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, LN 和 HN 土壤平均 CH_4 吸收速率分别下降了 30.21%、7.24%, CK、LN 和 HN 处理土壤 CH_4 吸收速率季节变化趋势相似; 观测期间土壤 CH_4 吸收速率对 LN 响应达到显著水平($P < 0.05$), 对 HN 响应则不显著($P > 0.05$); LN、HN 处理前两年对土壤 CH_4 吸收速率抑制作用均不显著($P > 0.05$), 但在第 3 年 LN 极显著降低了土壤 CH_4 吸收速率($P < 0.01$), HN 处理对土壤 CH_4 吸收速率的影响则在第 3 年表现为显著抑制作用($P < 0.05$), 表明土壤 CH_4 吸收速率对 N 沉降的响应随着 N 沉降时间的持续呈抑制效应加剧的趋势。相关分析表明: CK 与 HN 土壤 CH_4 吸收速率与土壤温度和土壤含水量均有显著相关性($P < 0.05$), 但 LN 土壤 CH_4 吸收速率仅与土壤含水量显著相关($P < 0.05$), 表明土壤含水量是控制各 N 沉降处理土壤 CH_4 吸收速率动态的主要环境因子。此外, LN、HN 处理下土壤 pH 均极显著降低($P < 0.01$), 但 LN 土壤 pH 极显著低于 HN($P < 0.01$); LN 处理极显著提高了土壤 C/N 比($P < 0.01$), HN 处理则相反; LN 和 HN 处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、可溶性总 N(TDN)、可溶性有机碳(DOC)、地面凋落物量、地下 0—10 cm 细根生物量影响均不显著($P > 0.05$), 表明一定时期内 N 沉降首先引起了土壤 pH 和土壤 C/N 比的显著变化。

关键词: 中亚热带天然林; 土壤 CH_4 吸收速率; N 沉降; 土壤可溶性 N; 土壤 pH

Responses of CH_4 uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China

CHEN Chaoqi^{1,2}, YANG Zhijie^{1,2,*}, LIU Xiaofei^{1,2}, WU Junjun^{1,2}, HUANG Yongmei^{1,2}

1 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: The anthropogenic emission of nitrogen (N) compounds is increasing globally. As a developing country, China has a dramatic increase in atmospheric N deposition since 1980s, and the rate of N addition in China is increasing at a speed of $0.41 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ from 1980 to 2010. China has become one of the most important N deposition zones in the world. By comparison with the national average, the rates of N deposition are higher in southeast China. Excess N deposition has aroused concerns about its negative impacts on ecosystem health and services such as loss of biodiversity, N saturation and soil acidification, and inhibition of the capability of methane (CH_4) uptake in upland soils. Forest soils are an important

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901296); 福建省自然科学基金(2011J01142)

收稿日期: 2013-06-10; 网络出版日期: 2014-02-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: daoyang9@163.com

CH₄ sink or source through the activity of methanotrophic and methanogenes bacteria. The diffusivity of CH₄ through the soil profile is the primary limiting factor upon CH₄ uptake, which is influenced by soil moisture and bulk density. Furthermore, soil available N contents (NH₄⁺ and NO₃⁻) can limit CH₄ uptake directly by competing with the monooxygenase enzyme of methanotrophs. Many studies including field and laboratory studies have reported that increased N availability due to N deposition may inhibit the uptake capacity of forest soils for atmospheric CH₄. However, some studies in subtropical China get different results. Further studies should be undertaken to better understand the mechanisms responsible for N deposition-induced suppression of CH₄ uptake in forest soils.

In this research, we studied the responses of soil CH₄ uptake rates to simulated N deposition in a natural forest in Jianou, Fujian, China based on the design and methods used in the European N ITREX project. Treatments included three N levels (three replicates for each level), viz. 0, 50, and 100 kg N·hm⁻²·a⁻¹ for control (CK), low-N (LN), and high-N (HN) treatment, respectively. From December 2009 to November 2012, monthly CH₄ uptake rates were measured using a static chamber and gas chromatography technique. Average CH₄ uptake rate in control was (-62.78±14.39) μg·m⁻²·h⁻¹. Comparing with the control, average CH₄ uptake rate of the LN ((-43.82±4.72) μg·m⁻²·h⁻¹) was decreased by 30.21%. However, there was no significant difference between HN ((-58.23±5.58) μg·m⁻²·h⁻¹) and the control ($P>0.05$). The average rates of CH₄ uptake for the LN and HN were both significantly lower than the control in the third year ($P<0.05$), which demonstrated that, the CH₄ uptake rates for all N treatments might be seriously inhibited with continuing N addition. Seasonal changes of CH₄ uptake rate in all N treatments were similar. Correlation analysis showed that CH₄ uptake rates were significantly correlated with soil temperature and soil moisture both in the control and HN treatments ($P<0.05$), but only significant correlation between CH₄ uptake rates and soil moisture was found for LN ($P<0.05$). It suggested that the change of soil moisture was the most important factor which regulated the dynamics of CH₄ uptake rates. In addition, soil pH values for the LN and HN were significantly lower than that in the control ($P<0.01$). Also, the LN treatment had lower soil pH value than the HN treatment. Soil C/N ratio for the LN treatment increased significantly compared with the control ($P<0.01$), while the reverse was for the HN treatment. There were no significant effects of N treatments on soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, total dissolved N, dissolved organic carbon(C), litterfall mass, fine root biomass in 0—10 cm soil ($P>0.05$). Thus, it indicated that N deposition might firstly induce the changes of soil pH and soil C/N ratio.

Key Words: mid-subtropical natural forest; CH₄ uptake rate; N deposition; soil soluble N; soil pH

人类的活动,如农业化肥的大量使用、化石燃料的燃烧、土地利用方式的改变等,导致了大气氮(N)沉降急剧增加^[1]。据估计,全球 N 沉降已由 1950 年的 41 Tg N a⁻¹增加到 2000 年的 103 Tg N a⁻¹^[2],预计到 2030 年将增加 50%—100%,未来 N 沉降增加将主要发生在东亚地区^[3]。我国 N 沉降问题已十分严重,是全球三大 N 沉降集中区之一^[4]。从 1980—2010 年,我国 N 沉降平均每年以 0.41 kg N hm⁻²的速度增加,东南地区 N 沉降速度和增长速率均高于全国平均水平^[5]。N 沉降引起的生物多样性降低、土壤 N 饱和、土壤酸化、大气温室气体浓度变化等一系列生态环境问题亦越来越受到人们的关注^[2]。

甲烷(CH₄)是仅次于二氧化碳(CO₂)的重要温室气体,其单分子增温潜势是 CO₂ 的 23 倍,对全球变暖贡献占 20%左右^[6]。森林土壤是重要的大气 CH₄ 汇,每年约吸收 30 Tg CH₄^[7]。由 N 沉降、施肥活动、改变森林管理措施等引起了森林土壤 CH₄ 汇

的变化已经成为全球性的问题。Liu 等^[8]推测全球范围内人为 N 输入每年减少了 3.9—9.1 Tg CH₄,约占森林土壤年 CH₄ 吸收量的 13%—30.33%。由此可见 N 沉降对大气 CH₄ 浓度变化的影响十分重要。许多野外和室内实验都为 N 沉降增加降低森林土壤 CH₄ 吸收速率提供了证据^[8-11]。关于 N 沉降对森林土壤 CH₄ 吸收速率的影响,多解释为 N 沉降引起土壤生物化学机制(如土壤酸化、NH₃ 和 CH₄ 竞争 CH₄ 单氧酶、Al³⁺ 溶出等)和土壤物理扩散性能(如凋落物层厚度变化等)的变化,但对于某个典型森林生态系统而言,这两个过程对土壤 CH₄ 吸收的贡献尚不明确^[12]。Veldkamp 等^[10]和 Saari 等^[14]分别对受 N 限制热带森林土壤和北方森林土壤 CH₄ 吸收进行了 4—12a 和 27a 研究,均发现模拟 N 沉降对森林土壤 CH₄ 吸收均无显著影响,原因是森林土壤 N 含量未达到对土壤 CH₄ 吸收产生抑制的阈值。我国在南亚热带和北亚热带不同森林生态系统均开展了模拟

N 沉降对森林土壤 CH_4 吸收影响的研究^[9-10,15-16],但得到的结论不尽相同,既有 N 沉降对土壤 CH_4 吸收的抑制作用,也有影响不显著,甚至为促进作用。但尚未发现模拟 N 沉降对中亚热带森林土壤 CH_4 吸收速率影响的研究。不受土壤 N 限制的亚热带森林土壤 CH_4 吸收过程可能不同于受 N 限制的北方森林和热带森林土壤,该地区森林土壤 CH_4 吸收对不同施 N 剂量的响应机制缺乏长期的实验研究,引起不同地带性森林土壤 CH_4 吸收转变的大气 N 沉降临界负荷至今尚未确定^[12]。因此在该地区深入开展森林土壤 CH_4 吸收速率对不同 N 沉降水平响应的研究,有利于评估大气 N 沉降对亚热带森林土壤 CH_4 汇功能及对大气 CH_4 浓度变化的贡献。本研究以中亚热带天然阔叶林为对象,通过 3a 模拟 N 沉降试验,初步探讨不同 N 沉降水平对中亚热带天然林森林土壤 CH_4 吸收速率以及土壤理化性质的影响,为了解 N 沉降引起大气 CH_4 浓度变化的机理及对森林生态系统的影响提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本试验地位于福建省建瓯市万木林自然保护区(27°03'N, 118°09'E),海拔 234—556 m,面积 189 hm^2 ,地处武夷山脉东南,鹫峰山脉西北;属中亚热带季风气候,年均气温 19.4 °C,年均降水量 1731 mm,年均蒸发量 1466 mm,相对湿度 81%,全年无霜期 277d。天然林为东北坡向,平均坡度 26°,海拔 390 m,林龄 160 a,密度 235 株/ hm^2 ,林分平均树高为 28 m,平均胸径为 45.2 cm。乔木层主要树种有细柄阿丁枫(*Altingia gracilipes*)、少叶黄杞(*Engelhardtia fenzelii*)、木荷(*Schima superba*)、浙江桂(*Cinnamomum chekiangense*)、杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、米槠(*Castanopsis carlesii*)等,以细柄阿丁枫为主。灌木层以草珊瑚(*Sarcandra glabra*)、狗骨柴(*Tricalysia dubia*)为主。草本层以狗脊(*Woodwardia japonica*)为主。

1.2 研究方法

在试验地分上中下坡设置 3 块 20 m×20 m 标准地,在每个标准样地设置 3 块 5 m×5 m 的实验样地,样方与样方之间留一条 2 m 宽的缓冲带,防止相互间的干扰,并在样方上方及左右两边插入隔板,防

止下雨时造成土壤侵蚀带走外源 N。外源 N 输入设计本研究参照 NITREX 项目和北美 Harvard Forest 等类似试验,在设置好的 9 块样方内按 N 输入量的高低,分 3 种处理,从低到高分别记为对照(CK, 0 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、低氮(LN, 50 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和高氮(HN, 100 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)表示,每个处理重复 3 次。为了避免土壤取样对样地造成破坏,在每个 5 m×5 m 样方中划出 1 个 2 m×2 m 小样方用于土壤取样。

从 2009 年 12 月开始进行模拟 N 沉降,每月以溶液的形式给样地喷洒。按照处理水平的要求,将每个样方每次所需要喷洒的 NH_4NO_3 溶解在 2 L (相当年降雨量增加约 1 mm) 去离子水中后,用背式喷雾器在林地人工来回均匀喷洒。对照样方喷洒等量的去离子水,以减少因外加水而造成对森林生物地球化学循环的影响。

1.3 样品采集、处理和测定

采用静态箱-气相色谱技术对土壤 CH_4 吸收速率进行原位测定。静态箱由底座和顶箱 2 部分组成,底座为直径 20 cm、高 10 cm 的 PVC 圈,插入地表以下 5 cm;顶箱为白铁皮制成,圆台型(底部和顶部直径分别为 20 cm 和 10 cm,高 20 cm,体积 4.58 L),顶部密封,顶箱底部、中部各有 2 个小孔,底部的一个小孔用于箱内温度测定,另一小孔装一小气球,用于平衡箱内气压,中部一个孔外部连接一个气囊,在抽气前用于混匀箱内气体,另一个孔用胶塞密封,作为采样口。底座安装后固定不动,顶箱与底座间采用橡胶密封圈密封。每个样方随机设置 6 个静态箱。自 2009 年 12 月开始每个月采集 1 次气体样品,连续观测 3a。观测时将顶箱安置在底座上,在顶箱盖上后的 0、10、20、30 min 分别用注射器采集 20 mL 箱内气体样品并用气袋储存。同时使用便携式数字温度计(JM624)测定空气温度、静态箱内气温、5cm 深处土壤温度;使用时域反射仪(TDR)(Model TDR300, Spectrum 公司,美国)测定 12 cm 深处土壤含水量。采集的气体样品用气相色谱仪(GC-2014,岛津 日本)测定 CH_4 浓度, CH_4 检测器为脉冲放电氦离子检测器(PDD),分离柱内填充料为 80—100 目 5A 分子筛,载气为高纯氦气(99.9%),流量 30 mL/min,检测器温度 250 °C,柱箱温度 60 °C,进样口温度 120 °C。

CH₄ 吸收速率计算公式:

$$F = \frac{16}{22.4} \cdot \frac{V}{S} \cdot \frac{dc}{dt} \cdot \frac{273}{273 + T}$$

式中, F 为 CH₄ 吸收速率 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); 16 为 CH₄ 的摩尔质量; 22.4 为标准状况下 1 mol 气体体积; V : 静态箱体积+底座露出体积 (L); S 为底座面积 (m^2); $\frac{dc}{dt}$ 为气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率; T 为静态箱内温度 ($^{\circ}\text{C}$); F 负值表示土壤吸收 CH₄, 正值表示土壤排放 CH₄。

土壤采集利用土钻在 2 m×2 m 小样方内采集, 采样深度为 0—10 cm, 利用 S 形采样方法采取, 由多点 (10—15 个点) 采集混合而成。土样带回实验室, 手捡植物根系、石块和其他杂物后过 2 mm 筛。取 10 g 土样用 2 mol/L KCl 溶液浸提, 用连续流动注射分析仪 (荷兰 SKALAR SAN++) 测定土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量。取 10 g 土样用去离子水浸提, 用 TOC 分析仪测定土壤可溶性碳 (DOC), 用连续流动注射分析仪测定土壤可溶性总 N (TDN); 取 10 g 土样按 1:2.5 土水比混合, 采用电位法测定土壤 pH 值; 土壤 C/N 采用土壤 C、N 元素分析仪测定。

1.4 数据处理

数据分析用 SPSS 13.0 软件进行, 由 Origin 7.5 软件绘图。采用重复测量方差分析检验土壤 CH₄ 吸收速率对不同 N 处理的响应, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 检验不同 N 处理对土壤 pH 值、土壤 C/N 比、土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、可溶性总氮 (TDN)、可溶性有机碳 (DOC)、凋落物量、地下 0—10 cm 细根生物量的影响。采用相关分析方法分析土壤 CH₄ 吸收速率与土壤温度、土壤含水量的关系。一般显著水平设定为 $\alpha=0.05$, 极显著水平设定为 $\alpha=0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤温度、土壤含水量动态变化

所有 N 处理土壤含水量和土壤温度均呈现明显的动态变化, 但变化趋势相反; 土壤含水量较高时土壤温度一般较低, 反之亦然 (图 1)。CK、LN、HN 平均土壤含水量分别为 14.03%、14.45%、13.29%, 平均土壤温度分别为 15.75 $^{\circ}\text{C}$ 、15.59 $^{\circ}\text{C}$ 、15.72 $^{\circ}\text{C}$, 3 种 N 处理的土壤含水量和土壤温度间均无显著差异 (最小显著性差异检验, $P>0.05$)。

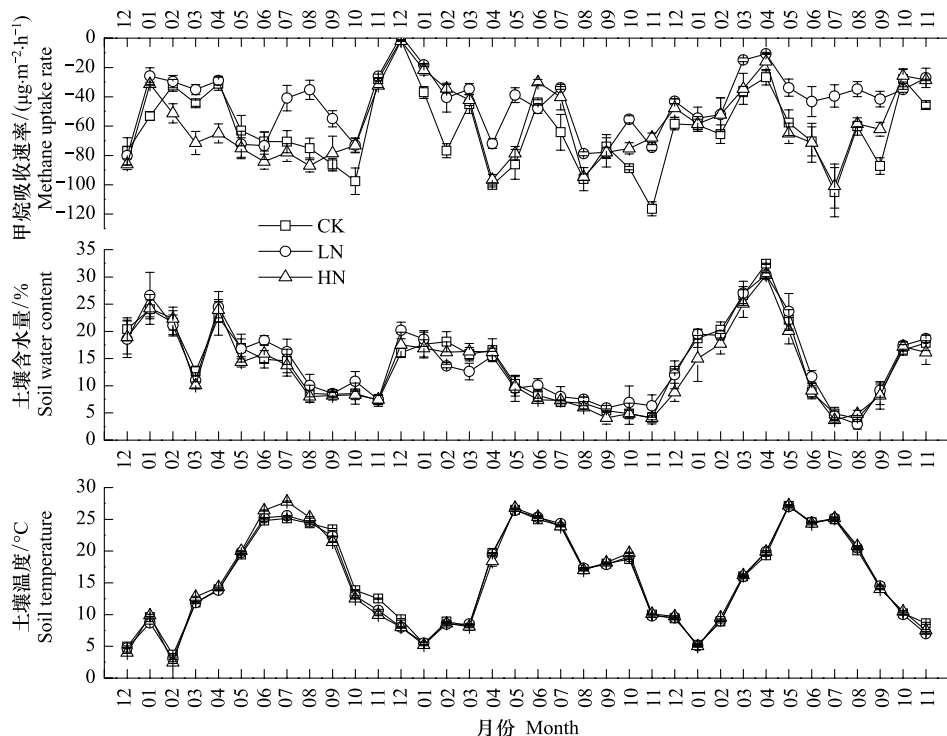


图 1 土壤 CH₄ 吸收速率、土壤含水量 (0—12 cm) 和土壤温度 (0—5 cm) 的月动态

Fig. 1 Monthly dynamics of soil CH₄ uptake rates, soil water content (0—12 cm) and soil temperature (0—5 cm) (mean±SE)

CK: 对照; LN: 低氮; HN: 高氮处理

2.2 土壤 CH₄吸收速率的动态及对 N 沉降的响应

观测期间,CK、LN、HN 土壤 CH₄吸收速率的季节变化趋势相似,夏秋季土壤 CH₄吸收速率均较高(图 1)。中亚热带天然林土壤(CK)的土壤 CH₄吸收速率为 $(-5.50 \pm 0.58) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;LN 处理 $(-3.84 \pm 0.41) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 显著降低了土壤 CH₄吸收速率($P < 0.05$),HN 处理 $(-5.10 \pm 0.49) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 对土壤 CH₄吸收速率没有显著影响($P > 0.05$)(表 1)。随着模拟 N 沉降的逐年进行,LN

对土壤 CH₄吸收速率的抑制作用在第 3 年达到极显著水平($P < 0.01$);HN 在第 1 年、第 2 年对土壤 CH₄吸收速率影响不显著($P > 0.05$),第 3 年表现为显著抑制作用($P < 0.05$),第 3 年 HN 土壤 CH₄吸收速率极显著高于 LN($P < 0.01$)(表 1)。

CK 和 HN 土壤 CH₄吸收速率与土壤含水量、土壤温度相关性均达显著水平以上($P < 0.05$)(图 2,图 4),LN 土壤 CH₄吸收速率仅与土壤含水量显著相关($P < 0.05$)(图 3)。

表 1 不同时期不同氮沉降水平土壤累积 CH₄吸收速率/(kg·hm⁻²·a⁻¹)
Table 1 The cumulative CH₄ uptake rates of different N treatments in different periods

氮处理 N treatment	整个观测期 The whole period	第 1 年 The first year	第 2 年 The second year	第 3 年 The third year
对照 Control (CK)	-5.50 ± 0.58 A	-5.33 ± 0.50 A	-6.06 ± 0.46 A	-5.12 ± 0.58 A
低氮 Low N (LN)	-3.84 ± 0.41 B	-4.20 ± 0.50 A	-4.16 ± 0.27 A	-3.14 ± 0.47 C
高氮 High N (HN)	-5.10 ± 0.49 A	-5.94 ± 0.48 A	-4.83 ± 0.36 A	-4.53 ± 0.63 B

同列不同大写字母表示不同 N 处理土壤 CH₄吸收速率差异显著 ($P < 0.05$)

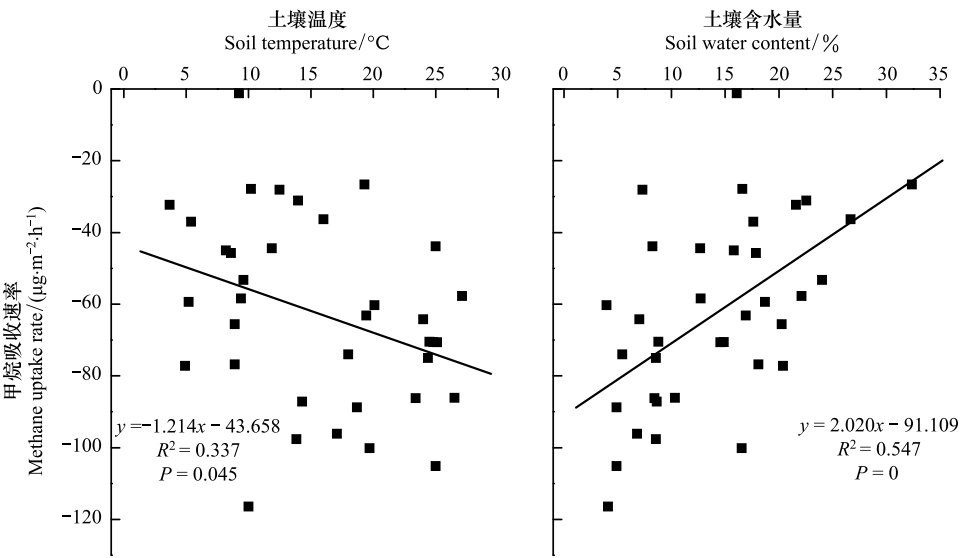


图 2 CK 土壤 CH₄吸收速率与土壤温度、含水量的相关性

Fig.2 Relationships between CH₄ uptake rates and soil temperature, soil water content in CK

2.3 N 沉降对土壤其他理化性质的影响

模拟 N 沉降进行 3 年后土壤理化性质发生了明显变化(表 2)。其中,与 CK 土壤相比,LN、HN 处理均极显著降低了土壤 pH ($P < 0.01$),且 LN 处理土壤 pH 值极显著低于 HN ($P < 0.01$);同时,LN 处理极显著提高了土壤的 C/N 比($P < 0.01$),而 HN 处理则相反。LN 和 HN 处理土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、可溶性总氮(TDN)、可溶性有机碳(DOC)、凋落物量、地下 0—10 cm 细根生物量与 CK 的差异性均不显著($P >$

0.05)。

3 讨论与结论

3.1 不同 N 处理土壤 CH₄吸收速率动态

本研究中亚热带天然林土壤(CK)平均 CH₄吸收速率与莫江明等^[15]在华南丘陵区针阔混交林 $(-5.26 \pm 0.88) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的结果相近,高于 Zhang 等^[10]在中国亚热带成熟林 $(-3.60 \pm 0.16) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和 Zhang 等^[17]等在常绿阔叶林

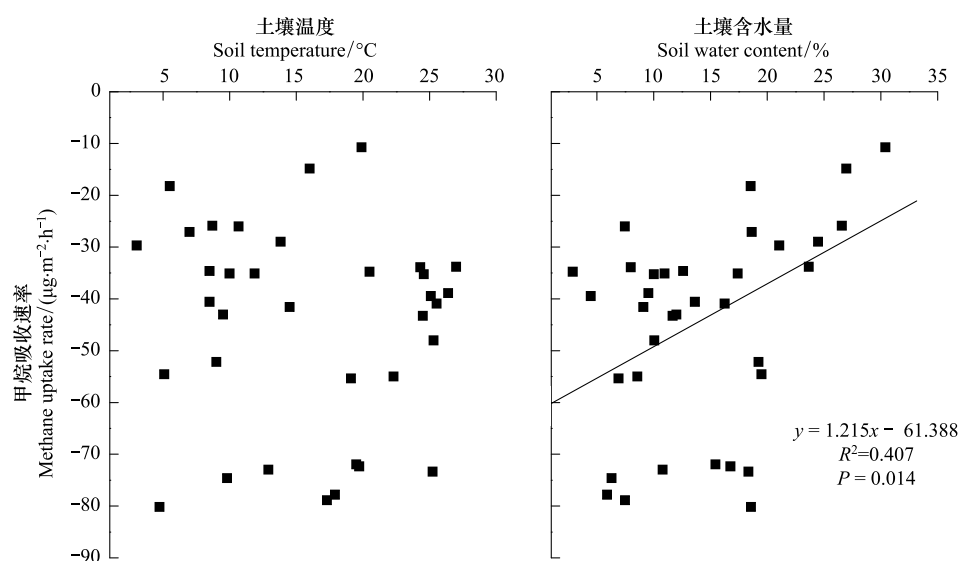
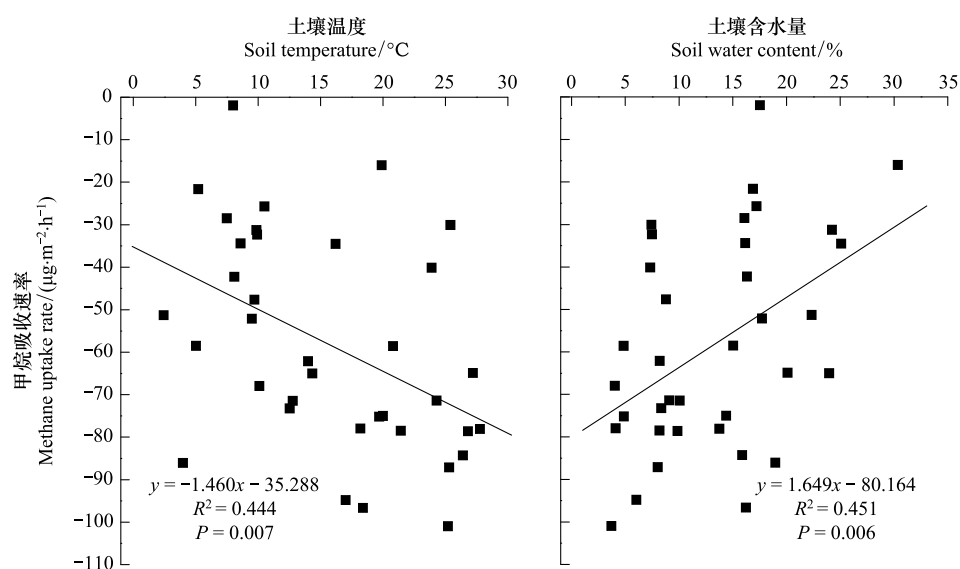
图3 LN 土壤 CH₄ 吸收速率与土壤温度、含水量的相关性Fig.3 Relationships between CH₄ uptake rates and soil temperature, soil water content in LN图4 HN 土壤 CH₄ 吸收速率与土壤温度、含水量的相关性Fig.4 Relationships between CH₄ uptake rates and soil temperature, soil water content in HN

表2 土壤(0—10 cm)特性、细根和凋落物量

Table 2 Soil properties (0—10 cm depth), fine root and litter mass in forest

项目 Item	对照 Control	低氮 Low N	高氮 High N
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg/kg)	17.82 (4.74)	19.07 (5.06)	20.37 (9.48)
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg/kg)	14.54 (1.40)	16.49 (2.75)	20.91 (8.16)
可溶性全氮 Total dissolved N (TDN)/(mg/kg)	16.65 (3.84)	17.59 (5.88)	22.28 (11.70)
可溶性总 C Dissolved organic carbon (DOC)/(mg/kg)	68.52 (19.85)	49.05 (22.02)	43.09 (11.28)
pH	4.31 (0.04) a	4.02 (0.06) e	4.13 (0.01) c
细根 Fine root/(g/m ²)	127.39 (10.68)	109.46 (17.35)	98.13 (30.69)
凋落物 Litter mass/(g·m ⁻² ·a ⁻¹)	283 (18.53)	163.33 (3.53)	233.16 (9.53)
土壤碳氮比 C/N ratio	13.37 (0.12) c	14.29 (0.08) a	12.79 (0.40) e

在 N 沉降第 3 年后采集 0—10cm 土壤样品; 括号中数值代表标准误差, 细根指地下 0—10cm 直径小于 2mm 根系; 同行不同小写字母表示不同 N 处理土壤性质差异极显著 ($P < 0.01$)

((-2.73 ± 0.10) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)的结果。CK 土壤 CH_4 吸收速率季节变化明显,吸收峰值期主要出现在夏秋季,与 Zhang 等^[10] 以及 Iqbal 等^[18] 的研究结果相似。LN、HN 土壤 CH_4 吸收速率动态趋势与 CK 相似,N 沉降没有改变中亚热带天然林土壤 CH_4 吸收速率的季节变化趋势;胡正华等^[16] 在北亚热带森林的研究也发现,N 沉降没有引起土壤 CH_4 吸收速率季节动态的变化。

3.2 土壤 CH_4 吸收速率与土壤含水量、土壤温度的关系

本研究 CK、LN、HN 土壤 CH_4 吸收速率与土壤含水量呈成负相关,表明土壤含水量的变化是控制土壤 CH_4 吸收速率动态的重要因素,与 Fender 等^[19] 的研究结果相一致。研究表明,土壤吸收 CH_4 归因于生物学调控的氧化作用,即 CH_4 氧化菌以 CH_4 作为生存和生长的唯一碳源和能源^[20]。因此,土壤 CH_4 吸收速率通常与土壤含水量呈负相关关系,因为较低的土壤含水量有利于大气中的 O_2 和 CH_4 扩散进土壤并被 CH_4 氧化菌所利用^[21]。但是如果土壤含水量过低, CH_4 氧化菌容易出现生理缺水,也会降低 CH_4 的吸收速率^[22]。因此,存在土壤吸收 CH_4 的最佳含水量。一般认为 20%—70% 土壤含水量是土壤吸收 CH_4 的最佳含水量^[23]。土壤 CH_4 吸收速率最佳含水量因不同土壤类型而不同^[22],当土壤粉砂含量占 90% 以上时,土壤最佳含量仅为 9%^[24]。本研究 CK、LN、HN 土壤 CH_4 吸收速率达到最大值时土壤含水量分别为 4.10%、18.57% 和 3.70%,土壤 CH_4 吸收速率最大值时土壤含水量较低,可能与试验地土壤中的粉砂含量 (86.13%^[25]) 较高有关。

Zhang 等^[9] 认为在亚热带地区土壤温度的变化对森林土壤 CH_4 吸收速率影响不显著,因为该地区土壤温度主要处于土壤吸收 CH_4 最佳温度 (22—38 $^{\circ}\text{C}$)^[26] 的范围内;相反地,温带和高原地区土壤 CH_4 吸收速率对土壤温度变化的响应则敏感得多^[27-28]。本研究中,CK、LN 和 HN 处理土壤 CH_4 吸收速率对土壤温度响应迥异,土壤温度对 CK 和 HN 土壤 CH_4 吸收速率均有显著影响 ($P < 0.05$),对 LN 土壤 CH_4 吸收速率影响则不显著 ($P > 0.05$)。Jassal 等^[29] 研究发现,次生云杉林对照和施 N 处理土壤 CH_4 吸收速率对土壤温度响应均极小,与森林土壤保持着良好的通气条件有关。但本研究 LN、HN 处理并无引

起土壤含水量和土壤温度显著变化,因此关于本研究不同 N 沉降处理土壤 CH_4 吸收速率对土壤温度不同的响应的原因有待进一步探究。

3.3 土壤 CH_4 吸收速率对 N 沉降的响应

本研究 CK、LN 和 HN 3 种 N 处理森林土壤均表现为大气 CH_4 汇。我国亚热带地区不同类型森林土壤 CH_4 吸收速率对不同水平 N 沉降响应不同 (表 3);北亚热带地区各 N 水平对森林土壤 CH_4 吸收没有显著影响^[16] ($P > 0.05$);南亚热带地区低 N (50 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、中 N (100 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 对成熟林、人工干扰林和恢复林土壤 CH_4 吸收速率影响均不显著 ($P > 0.05$),高 N (150 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 显著降低了成熟林土壤 CH_4 吸收速率^[10] ($P < 0.05$);南亚热带地区低 N、中 N 显著提高了马尾松林土壤 CH_4 吸收速率 ($P < 0.05$),低 N 则显著提高了季风常绿阔叶林土壤 CH_4 吸收速率 ($P < 0.05$),N 沉降对针阔混交林土壤 CH_4 吸收速率影响不显著 ($P > 0.05$)^[15];此外,Zhang 等^[9] 还发现 N 沉降显著抑制固 N 树种人工林土壤 CH_4 吸收速率 ($P < 0.05$),对非固 N 树种林地土壤 CH_4 吸收速率则无显著影响 ($P > 0.05$)。据此,在亚热带地区 N 沉降对森林土壤 CH_4 吸收速率是抑制作用还是促进作用,抑或是无影响,与森林类型、气候条件、土壤类型、N 沉降水平及时间长短有着密切的联系,N 沉降引起的土壤理化性质的变化调控着土壤 CH_4 吸收速率对 N 沉降的响应^[9]。

研究表明,N 沉降通过增加土壤中的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量对土壤 CH_4 吸收的产生抑制作用^[10,30],并且 N 沉降水平越高,土壤 CH_4 吸收速率越低^[9-10,31]。本研究 LN、HN 处理没有引起土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量的显著变化,但 LN 显著抑制了土壤吸收 CH_4 ,HN 对土壤 CH_4 吸收影响不显著;HN 处理初期还表现为促进作用,这样的现象多出现在北方温带贫 N 森林中^[27, 32],因为贫 N 森林土壤施加 N 肥后可以缓解 CH_4 氧化菌的 N 限制。Acton 等^[11] 研究了不同 N 添加量对土壤 CH_4 吸收速率的影响,结果发现对照和最高 N (相当于 400 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理下土壤 CH_4 吸收速率均显著高于其他较低水平 N 处理的土壤 CH_4 吸收速率 ($P < 0.05$);Li 等^[28] 则发现,较高 N 水平沉降 (30—150 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 提高了高山草地生长季土壤 CH_4 吸收速率,最低 N 水平 (10 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 则表现为抑制作用;葛瑞娟等^[30] 也发现,

表 3 中国亚热带典型森林土壤 CH₄ 吸收对增 N 的响应

Table 3 Responses of CH₄ uptake rates to simulated N deposition in typical forests in subtropical China

森林类型 Forest type	主要树种 Main tree species	纬度 Latitude N	平均 CH ₄ 吸收速率 The mean rates of CH ₄ uptake / (μg·m ⁻² ·h ⁻¹)				参考文献 References
			0/ (kg N· hm ⁻² ·a ⁻¹)	50/ (kg N· hm ⁻² ·a ⁻¹)	100/ (kg N· hm ⁻² ·a ⁻¹)	150/ (kg N· hm ⁻² ·a ⁻¹)	
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	白栎 <i>Quercus Fabri</i> , 化香 <i>Platycarya strobilacea</i> , 构树 <i>Broussonetia papyrifera</i> 等	32° 11'	-3.91 (3.06)	-4.26 (2.29)	-3.99 (1.72)	-3.73 (3.97)	[16]
天然林 Natural forest	细柄阿丁枫 <i>Altingia gracilipes</i> , 少叶黄杞 <i>Engelhardtia fenzelii</i> , 木荷 <i>Schima superba</i> 等	27° 03'	-62.78 (6.65) a	-43.82 (4.72) b	-58.23 (5.58) ab	—	本研究 This study
马尾松林 Pine forest	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	23° 10'	-10.00 (3.00) a	-30.00 (1.00) b	-30.00 (2.00) b	—	[15]
针阔混交林 Pine and broadleaf mixed forest	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> , 荷木 <i>Schima superba</i> , 红皮紫棱 <i>Craibiodendron kwangtungense</i> 等	23° 10'	-60.00 (10.00)	-90.00 (10.00)	-70 (10.00)	—	[15]
季风林常绿阔叶林 Monsoon evergreen broadleaf forest	锥栗 <i>Castanopsis chinensis</i> , 荷木 <i>Schima superba</i> , 厚壳桂 <i>Cryptocarya chinensis</i>	23° 10'	-40.00 (8.00) a	-70.00 (3.00) b	-50.00 (5.00) ab	-60.00 (2.00) b	[15]
恢复林 Rehabilitated forest	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> , 紫荆 <i>Cercis chinensis</i> , 红皮紫棱 <i>Craibiodendron kwangtungense</i> 等	23° 10'	-28.60 (2.20)	-27.10 (2.00)	-19.90 (2.00)	—	[10]
人工干扰林 Human disturbed forest	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	23° 10'	-17.80 (1.60)	-15.20 (1.90)	-16.10 (1.10)	—	[10]
成熟林 Mature forest	锥栗 <i>Castanopsis chinensis</i> , 荷木 <i>Schima superba</i> , 厚壳桂 <i>Cryptocarya chinensis</i> 等	23° 10'	-41.10 (1.80) a	-34.40 (1.80) ab	-29.40 (2.00) ab	-23.40 (2.00) b	[10]
相思人工林 <i>Acacia auriculiformis</i> Plantation	相思树 <i>Acacia auriculiformis</i>	22° 34'	-36.30 (3.20) a	-28.60 (2.30) b	-23.80 (2.80) b	—	[9]

盆栽小叶章生长季土壤较高 N 输入也促进了土壤 CH₄ 吸收,而最低 N 则抑制了 CH₄ 吸收,这些研究结果与本研究相似。此外,本研究中土壤无机 N 含量随着 N 沉降水平的增加呈现上升趋势(表 2),Zhang 等^[9]也发现施 N 后 1a 土壤无机 N 含量随着 N 水平的增加而增大,并且土壤 CH₄ 吸收速率与土壤无机 N 含量呈显著负相关 ($P<0.05$),其他研究也有类似发现^[34]。这表明了,N 沉降对森林土壤 CH₄ 吸收速率的影响可能会随着 N 沉降的持续而日渐显著,从而也表明了 N 沉降水平与土壤 CH₄ 吸收速率之间的关系不是一个简单的矿化 N 含量变化的功能问题,其中还有其他因素需要考虑。

研究认为,N 沉降能够显著降低森林土壤 pH,进而降低 CH₄ 氧化菌活性和抑制 CH₄ 吸收^[9-10, 35]。CH₄ 氧化菌的适宜 pH 为中性,最佳土壤 pH 在 5.0—6.5 之间^[21]。显然本研究试验地土壤 pH (4.31)

(CK) 低于土壤 CH₄ 吸收的最佳土壤 pH 的范围。本研究 N 沉降显著降低了土壤 pH,与 Zhang 等^[9]的研究结果相似,但 LN 土壤 pH 低于 HN,而 CK、LN 和 HN 土壤 CH₄ 吸收速率高低与其土壤 pH 相一致;研究表明,N 沉降增加并不总是降低土壤 pH,如 Zhang 等^[10]发现 N 沉降后中成熟林中 N (100 kg N·hm⁻²·a⁻¹) 与高 N (150 kg N·hm⁻²·a⁻¹) 土壤 pH 相同,而 Fender 等^[19]则发现添加 N 土壤 pH 高于对照,因此 N 沉降对土壤 pH 的影响也许并不一定与 N 沉降水平相关,可能还有其他因素发挥作用,这有待进一步研究。不仅如此,本研究发现 LN 和 HN 处理土壤 C/N 比分别高于和低于 CK,Zhang 等^[9]也有相同的发现,可能与 N 处理引起土壤 pH 变化有关。Menyailo 等^[36]研究不同人工造林对土壤化学性质的影响时发现,土壤 pH 最低的森林土壤 C/N 比最高,土壤 pH 居中时土壤 C/N 比最低,土壤 pH 最高时土

壤土壤 C/N 比最居中,这一现象可能是由土壤中 N 转换的变化引起的。土壤 C/N 比的提高意味着土壤 C 的增加,因此 CH₄吸收的抑制也可能是 CH₄氧化菌由对 CH₄的喜好转向了另外的 C 的形式引起的^[19]。土壤 pH 的下降还会引起土壤 Al³⁺的积累,Al³⁺对 CH₄氧化菌具有毒害作用^[37],土壤 Al³⁺富集也会抑制土壤对大气的 CH₄吸收。另外,有研究认为土壤 pH 的变化还引起了微生物量和结构以及 CH₄氧化菌群落组成的变化^[9, 38],并会影响土壤 CH₄吸收速率的变化。但需要更多的研究为 N 沉降如何影响土壤 pH 的变化,以及由此引起的土壤 Al³⁺浓度、土壤 C/N 比和土壤 CH₄氧化菌群落的变化,从而导致土壤吸收 CH₄的变化提供更多证据。

研究中, LN、HN 在施肥前两年中对土壤 CH₄吸收速率影响均不显著,在第 3 年对土壤 CH₄吸收速率抑制作用均达到了显著水平 ($P < 0.05$)。Gulledge 等^[39]认为,施加 N 肥对土壤 CH₄吸收的抑制作用有时表现为延迟抑制。Chan 等^[40]在温带落叶林和 Gulledge 等^[41]在 Harvard 森林均发现多年(8—10a)连续施 N 肥土壤 CH₄吸收速率分别下降了 35%、51%。但 Veldkamp 等^[13]报道多年(4—12a)施 N 肥对热带森林土壤 CH₄吸收速率没有显著影响 ($P > 0.05$)。这些研究认为,施 N 肥初期和长期施 N 肥对温带或热带森林土壤 CH₄吸收速率影响不显著的原因是在贫 N 森林土壤中, N 沉降的增加首先被森林用于生长而不会改变土壤 N 状态。亚热带森林生态系统中,磷(P)而非 N 是土壤主要限制因素^[42]。据表 3 可知,模拟 N 沉降中人工林在 1a 内就表现为显著的抑制效应^[9] ($P < 0.05$),在无人工干扰或干扰较少的森林短期(如 1a) N 沉降对土壤 CH₄吸收速率的抑制作用并不显著 ($P > 0.05$)^[10, 15-16], N 沉降水平较高时才会在较短时期内显著抑制森林土壤 CH₄吸收 ($P < 0.05$)^[15]。Hartmann 等^[40]发现短期内施加 NH₄NO₃对土壤 CH₄吸收抑制效应相当小,仅数周便能恢复,其原因可能是酸性土壤硝化作用较弱,较深层土壤 CH₄吸收能补偿 N 沉降对表层土壤 CH₄吸收的抑制效应。因此,本研究中 LN、HN 处理前两年对亚热带天然土壤 CH₄吸收的抑制作用不显著可能与森林较低的土壤 pH 以及土壤所具有的补偿功能有关。

中亚热带天然林土壤 CH₄吸收速率对不同施 N

剂量的响应是不同的,但是 N 沉降对森林土壤 CH₄吸收的抑制作用呈现加剧的趋势, N 沉降对森林土壤 CH₄氧化菌具有长期的抑制作用^[19],森林土壤 CH₄汇将因此而发生长期的变化。但亟需通过更多实验来探究森林土壤 CH₄吸收对长期 N 沉降的响应是否可以由 CH₄氧化菌群落组成变化来解释,以及 CH₄氧化菌多样性是否影响土壤 CH₄吸收等关键科学问题。

3.4 主要结论

(1) LN、HN 与 CK 的土壤 CH₄吸收速率季节动态变化相似, N 沉降增加没有引起中亚热带天然林森林土壤 CH₄吸收速率季节动态的改变,土壤含水量是控制各 N 沉降处理土壤 CH₄吸收速率动态的主要因子。

(2) LN 处理显著降低了土壤 CH₄吸收速率 ($P < 0.05$), HN 对土壤 CH₄吸收速率影响不显著 ($P > 0.05$),但随着模拟 N 沉降时间的持续 LN 和 HN 对土壤 CH₄吸收速率均呈现抑制作用加剧的趋势。

(3) 与 CK 相比, LN 和 HN 对土壤 pH、土壤 C/N 比均有极显著影响 ($P < 0.01$)。研究则表明这两个因素直接或间接地影响着森林土壤 CH₄吸收。

References:

- [1] Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 2008, 451(7176): 293-296.
- [2] Galloway J N, Townsend A R, J W Erisman F W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinell 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.
- [3] Reay D S, Dentener F, Smith P, Grace J, Feely R A. Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nature Geoscience*, 2008, 1(7): 430-437.
- [4] Lu C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D22): 1-10.
- [5] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [6] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working

- Group to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2001, 881: 9.
- [7] Parry M L. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007, 4.
- [8] Liu L L, Greaver T L. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO₂ sink may be largely offset by stimulated N₂O and CH₄ emission. *Ecology Letters*, 2009, 12 (10): 1103-1117.
- [9] Zhang W, Zhu X M, Liu L, Fu S L, Chen H, Huang J, Lu X K, Liu Z F, Mo J M. Large difference of inhibitive effect of nitrogen deposition on soil methane oxidation between plantations with N-fixing tree species and non-N-fixing tree species. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117: G00N16, doi: 10.1029/2012JG002094.
- [10] 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: Atmospheres*, 2008, 113(D11): 1-10.
- [11] Acton S D, Baggs E M. Interactions between N application rate, CH₄ oxidation and N₂O production in soil. *Biogeochemistry*, 2011, 103(1/3): 15-26.
- [12] Cheng S L, Fang H J, Yu G R, Xu M J, Zhang P L, Zheng J J, Gao W L, Wang Y S. The primary factors controlling methane uptake from forest soils and their responses to increased atmospheric nitrogen deposition: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4914-4923.
- [13] Veldkamp E, Koehler B, Corre M D. Strong indications of nitrogen limited methane uptake in tropical forest soils. In EGU General Assembly Conference Abstracts, 2012, 14: 13891.
- [14] 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.
- [15] Mo J M, Fang Y T, Xu G L, Li D J, Xue J H. The short-term responses of soil CO₂ emission and CH₄ uptake to simulated N deposition in nursery and forests of Dinghushan in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 682-690.
- [16] Hu Z H, Zhang H, Chen S T, Li Q, Li H M, Shen S H. Effects of simulated nitrogen deposition on N₂O and CH₄ fluxes of soil in forest belt. *China Environmental Science*, 2011, 31 (6): 892-897.
- [17] Zhang T, Zhu W X, Mo J M, Liu L, Dong S. Increased phosphorus availability mitigates the inhibition of nitrogen deposition on CH₄ uptake in an old-growth tropical forest, southern China. *Biogeochemistry*, 2011, 8(9): 2805-2813.
- [18] Iqbal J, Lin S, Hu R G, Feng M L. Temporal variability of soil-atmospheric CO₂ and CH₄ fluxes from different land uses in mid-subtropical China. *Atmospheric Environment*, 2009, 43 (37): 5865-5875.
- [19] Fender A C, Pfeiffer B, Gansert D, Leuschner C, Daniel R, Jungkunst H F. The inhibiting effect of nitrate fertilisation on methane uptake of a temperate forest soil is influenced by labile carbon. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(6): 621-631.
- [20] Wu J H. Research progresses of methanotrophs and methane monooxygenase. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2011, 24 (9): 285-291.
- [21] Kolb S. The quest for atmospheric methane oxidizers in forest soils, *Environ. Environmental microbiology reports*, 2009, 1 (5): 336-346.
- [22] Zhou Y F, Liao X L, Huang H, Fu Z Q, Zhang Y. Influence Factors of Oxidation Activity of Methanotrophs. *Journal of Microbiology*, 2008, 28(3): 77-80.
- [23] Ding W X, Cai Z C. Effects of temperature on atmospheric CH₄ oxidation in soils. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(3): 54-58.
- [24] Singh J S, Singh S, Raghubanshi A S, Singh S, Kashyap A K, Reddy V S. Effect of nitrogen, carbon and moisture on methane uptake by dry tropical forest soils. *Plant and Soil*, 1997, 196 (1): 115-121.
- [25] Liu X F, Yang Z J, Xie J S, Yi L M, Zhong X J, Yang Y S. Effects of Forest Conversion on CH₄ Oxidation Rates in Mid-Subtropics. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(1): 7-11.
- [26] Merino A, Perez-Batallon P, Macias F. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, (36): 917-925.
- [27] Maljanen M, Jokinen H, Saari A, Strömmer R, Martikainen P J. Methane and nitrous oxide fluxes, and carbon dioxide production in soil of boreal forest fertilized with wood ash and nitrogen. *Soil use and management*, 2006, 22(2): 151-157.
- [28] Li K H, Gong Y M, Song W, He G X, Hu Y K, Tian C Y, Liu X J. Responses of CH₄, CO₂ and N₂O fluxes to increasing nitrogen deposition in alpine grassland of the Tianshan Mountains. *Chemosphere*, 2012, 88(1): 140-143.
- [29] Jassal R S, Black T A, Roy R, Ethier G. Effect of nitrogen fertilization on soil CH₄ and N₂O fluxes, and soil and bole respiration. *Geoderma*, 2011, 162(1/2): 182-186.
- [30] Fang H J, Yu G R, Cheng S L, Zhu T H, Wang Y S, Yan J H, Wang M, Cao M, Zhou M. Effects of multiple environmental factors on CO₂ emission and CH₄ uptake from old-growth forest soils. *Biogeochemistry*, 2010, 7(1): 395-407.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Ge R J, Song C C, Hou C C, Yang G S, Li Y C. Effects of exogenous nitrogen on methane oxidation at different plant growth phase from *Deyeuxia angustifolia* marsh. *China Environmental Science*, 2010, 30(8): 1097-1102.
- [34] Kim Y S, Imori M, Watanabe M, Hatano R, Yi M J, Koike T. Simulated nitrogen inputs influence methane and nitrous oxide fluxes from a young larch plantation in northern Japan. *Atmospheric Environment*, 2012, 46:36-44.
- [35] Semenov V M, Kravchenko I K, Kuznetsova T V, Semenova N A, Bykova S A, Dulov L E, Gal'chenko V F, Pardini G, Gispert M, Boeckx P, Van-Cleemput O. Seasonal dynamics of atmospheric methane oxidation in gray forest soils. *Microbiology*, 2004, 73(3): 356-362.
- [36] Menyailo O V, Hungate B A, Zech W. Tree species mediated soil chemical changes in a Siberian artificial afforestation experiment. *Plant and Soil*. 2002, 242(2): 171-182.
- [37] Bradford M A, Ineson P, Wookey P A, Lappin-Scott H M. The effects of acid nitrogen and acid sulphur deposition on CH_4 oxidation in a forest soil: A laboratory study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12/13): 1695-1702.
- [38] Carrino-Kyker S R, Smemo K A, Burke D J. The effects of pH change and NO_3^- pulse on microbial community structure and function: a vernal pool microcosm study. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, 81(3): 660-672.
- [39] Gullledge J, Doyle A P, Schimel J P. Different NH_4^+ -inhibition patterns of soil methane consumption: A result of distinct CH_4 -oxidizer populations across sites? *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(1): 13-21.
- [40] Chan A S, Steudler P A, Bowden R D, Gullledge J, Cavanaugh C M. Consequences of nitrogen fertilization on soil methane consumption in a productive temperate deciduous forest. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(3): 182-189.
- [41] 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.
- [42] Chapin F S, Matson P P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York, USA: Springer-Verlag, 2011: 198-200.
- [43] Hartmann A A, Buchmann N, Niklaus P A. A study of soil methane sink regulation in two grasslands exposed to drought and N fertilization. *Plant and Soil*, 2011, 342(1/2): 265-275.

参考文献:

- [12] 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 徐敏杰, 张裴雷, 郑娇娇, 高文龙, 王永生. 森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展. *生态学报*, 2012, 32(15): 4914-4923.
- [15] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 李德军, 薛璟花. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收对模拟 N 沉降的短期响应. *生态学报*, 2005, 25(4): 682-690.
- [16] 胡正华, 张寒, 陈书涛, 李琪, 李涵茂, 申双和. 氮沉降对林带土壤 N_2O 和 CH_4 通量的影响. *中国环境科学*, 2011, 31(6): 892-897.
- [20] 吴军华. 甲烷氧化菌及甲烷单加氧化酶的研究进展. *中国酿造*, 2011, 24(9): 285-291.
- [22] 周叶锋, 廖晓兰, 黄璜, 傅志强, 张亚. 甲烷氧化细菌氧化活性影响因素的研究. *微生物学杂志*, 2008, 28(3): 77-80.
- [25] 刘小飞, 杨智杰, 谢锦升, 易黎明, 钟小剑, 杨玉盛. 中亚热带森林转换对地表 CH_4 氧化的影响. *林业科学*, 2012, 48(1): 7-11.
- [33] 葛瑞娟, 宋长春, 侯翠翠, 杨桂生, 李英臣. 氮输入对小叶章不同生长阶段土壤 CH_4 氧化的影响. *中国环境科学*, 2010, 30(8): 1097-1102.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

Autecology & Fundamentals

- Responses of CH₄ uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern
marginal zones of the Tarim Basin, China GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic
productivity classification ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*
plantations YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O₃ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation
of winter wheat SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes
in Poyang Lake YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera)
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ZHANG Lamei, LIU Xinping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

《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 祖元刚

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 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

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