

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氮氨异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响

李睿达^{1,2}, 张凯^{1,2}, 苏丹^{1,2}, 逯非¹, 万五星^{1,3}, 王效科¹, 郑华^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河北师范大学生命科学学院, 石家庄 050016)

摘要: 施氮或氮沉降对土壤温室气体通量影响已有比较深入的研究, 但施氮对不同有机碳水平的土壤温室气体通量影响及其差异的研究较少。本研究以我国南方广泛种植的桉树人工林为对象, 采用野外控制实验和室内分析, 比较研究 4 种施氮处理 (对照 C: $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低氮 L: $84.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 中氮 M: $166.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 高氮 H: $333.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 对土壤有机碳水平存在显著性差异的 2 块桉树林样地土壤-大气界面温室气体 (CO_2 、 N_2O 和 CH_4) 通量的影响。结果表明: ①施氮对 CO_2 和 N_2O 排放通量有明显“激发效应”, 氮肥施用一个月后各个施氮处理土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量出现最大值, 随着时间推移至生长季后期 CO_2 和 N_2O 排放通量逐渐降低, 差异逐渐缩小。施氮对 CH_4 吸收通量的影响不显著 ($P > 0.05$)。②施氮强度和土壤有机碳水平均显著促进了 CO_2 和 N_2O 排放 ($P < 0.001$), 但对 CH_4 吸收没有显著影响 ($P > 0.05$)。高土壤有机碳水平样地 CO_2 和 N_2O 排放通量显著高于低水平土壤有机碳样地 ($P < 0.01$)。③施氮和土壤有机碳水平对 CO_2 和 N_2O 排放通量的影响存在显著的交互作用 ($P < 0.05$)。与低土壤有机碳水平样地比较, 高土壤有机碳水平样地 CO_2 和 N_2O 排放通量对施氮更为敏感: 低氮水平就能显著促进 CO_2 和 N_2O 的排放。上述结果表明: 施氮对桉树林温室气体排放通量的影响既与施氮强度有关, 也与土壤有机碳水平密切相关。估算不同施氮水平下的温室气体通量变化时, 由土壤有机碳不同带来的温室气体通量差异不可忽视。

关键词: 桉树人工林; 施肥梯度; 土壤有机碳; 温室气体; 交互作用

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3903-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.10.037

Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in *Eucalyptus* Plantations with Different Soil Organic Carbon Content

LI Rui-da^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, SU Dan^{1,2}, LU Fei¹, WAN Wu-xing^{1,3}, WANG Xiao-ke¹, ZHENG Hua¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Life Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China)

Abstract: The effects of nitrogen fertilization or nitrogen deposition on soil greenhouse gases fluxes has been well studied, while little has been piloted about the effects of nitrogen application on soil greenhouse gas fluxes and its discrepancy with different soil organic carbon content. In our study, we conducted field control experiment in a young *Eucalyptus* plantation in Southeast China. We compared the effects of 4 levels of nitrogen fertilization (Control: $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; Low N: $84.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; Medium N: $166.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; High N: $333.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) on soil GHGs fluxes from 2 sites (LC and HC) with significantly different soil organic carbon (SOC) content ($P < 0.05$). The results showed: ① Fertilization had significant priming effect on CO_2 and N_2O emission fluxes. One month after fertilization, both CO_2 and N_2O had the flux peak and decreased gradually, and the difference among the treatments disappeared at the end of the growing season. However, fertilization had no significant effect on CH_4 oxidation between the 2 sites. ② Fertilization and SOC were two crucial factors that had significant effects on CO_2 and N_2O emission. Fertilization had a significant positive effect on CO_2 and N_2O emission fluxes ($P < 0.001$). CH_4 oxidation rates decreased with the increasing N addition, but there was no statistical difference ($P > 0.05$). The CO_2 and N_2O emission fluxes were significantly higher in HC than those in LC ($P < 0.01$). ③ Fertilization and SOC had great interactive effect on CO_2 and N_2O emission ($P < 0.05$). Compared with fluxes in LC, the fluxes in HC were much more sensitive to N input; low N could remarkably stimulate the CO_2 and N_2O emission. In conclusion, the effects of nitrogen fertilization on soil GHGs fluxes were not only in connection with the intensify of nitrogen, but also closely tied to the SOC content. When we assess the effects of nitrogen on soil GHGs fluxes, the difference induced by SOC should not be ignored.

Key words: *Eucalyptus* plantation; nitrogen gradient; soil organic carbon; greenhouse gases; interaction effect

收稿日期: 2014-02-20; 修订日期: 2014-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31170425); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-EW-QN406); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05060102)

作者简介: 李睿达 (1988 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为森林生态学和碳氮循环, E-mail: liruida11@mails.ucas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

施肥在维持人工林的速生丰产的同时也影响人工林的生物化学循环并对全球温室效应产生反馈^[1]. 外源氮素的添加改变了土壤养分循环^[2]和微生物活性^[3],进而极大改变温室气体的产生和消耗^[4~6]. 因此,氮素的添加对森林生态系统温室气体的影响研究备受关注^[7~9]. 然而氮添加对温室气体的影响难以获得一致的结论^[8].

森林土壤碳是全球碳循环中重要的组成部分^[10],其中,土壤有机碳是微生物生长的速效基质,其含量的高低间接影响 CO₂^[11]、N₂O^[12,13]和 CH₄^[14]的产生和排放. 如提供硝化和反硝化反应的底物^[15,16]; CH₄氧化细菌与土壤有机质存在密切相关^[17]. 虽已知土壤碳素和氮素在生态系统的物质循环过程中相互联系同时也相互影响,产生了动态和复杂的交互关系^[18];增加氮的可利用性会改变森林碳循环,碳的生物可利用性也是土壤氮循环的重要决定因子^[19,20]. 多数的研究表明,当森林或人工林生态系统接受的氮沉降量或施肥量超出该生态系统所能承受的临界值,则森林生态系统由氮限制转变为氮饱和^[21],但由于根际群落、微生物活性还受到碳可利用性限制^[22],因此以往单纯对施氮强度的研究不能反映土壤温室气体在不同土壤有机碳水平条件下对外源氮的响应特征.

桉树作为我国三大速生树种之一,在南方地区大面积种植. 桉树人工林为实现缩短轮伐时间,因而强烈依赖大量添加氮肥来提高木材的生产量,其造成的生态环境改变不可轻视. 本文选取土壤有机碳有显著差异的2块桉树人工林进行3种施肥水平处理,监测和比较研究桉树生长季土壤-大气界面 CO₂、N₂O 和 CH₄ 气体释放或吸收的动态变化,以期明确施氮强度、土壤有机碳差异及其二者的交互作用对温室气体排放或吸收通量的影响.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

本研究样地位于我国广西扶绥县国有东门林场(E107°15'~108°00',N22°17'~22°30'). 广西东门

林场是亚洲最大的桉树基因库,主要经营以桉树为主的商品用材林. 该地区属于北热带季风气候区,光热充足,雨热同季,夏湿冬干,年平均气温 21.2~22.3℃,1月均温 13.2℃,7月均温 27.9℃. 年降雨量 1 100~1 300 mm,主要集中在 6~8月,占全年降雨量的 51.03%. 研究区域土壤以砂页岩发育而成的赤红壤为主.

1.2 实验设计

在广西东门林场选取林龄 2 a 的桉树林样地 20 块,取样测定土壤养分状况,从 20 块样地中,选择土壤有机碳水平存在显著性差异的 2 块样地开展施肥梯度实验:低土壤有机碳样地(LC)和高有机碳样地(HC). 2 块样地平均坡度约为 10°. 林木行距 4 m,株距 2 m. 林下植被有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentos*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)、三叉苦(*Euodia lepta*)、飞机草(*Eupatorium odoratum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)等,植被覆盖度为 60%. 样地的土壤理化性质背景值见表 1.

结合当地施肥习惯和施肥强度,采用的施肥方式为穴施(距桉树树干基部 30~40 cm 处挖 10 cm 深的坑穴,放入肥料后,覆土),肥料种类为脲甲醛缓释氮肥(含氮量 38.5%,上海大洋生态有机肥有限公司),施氮时间为 2013 年 5 月 20 日. 在桉树林样地中设置 4 个施氮梯度:对照(C: 0 kg·hm⁻²)、低氮(L: 84.2 kg·hm⁻²)、中氮(M: 166.8 kg·hm⁻²)和高氮(H: 333.7 kg·hm⁻²),其中中氮处理为东门林场常规施氮水平. 每个施氮水平设置 3 个重复,每个样地包含 12 个 10 m×10 m 的样方,每个样方间隔 5 m.

1.3 气体取样与样品分析

气体取样时间为 2013 年 5~11 月. 根据气象条件,施肥前 1 周取样 1 次,测定温室气体通量的背景值,其后在桉树生长季平均每月取样一次. 土壤温室气体通量测定采用静态箱-气相色谱法. 采样箱为组合式,由基座和顶箱(透明亚克力)两部分组成. 基座(含水封槽):长×宽×高=41 cm×41 cm×5 cm;顶箱:长×宽×高=40 cm×40 cm×40 cm.

表 1 样地基本土壤理化性质背景值¹⁾

Table 1 Physical-chemical properties of soils and background value of GHGs fluxes

样地	pH	有机碳/g·kg ⁻¹	总氮/g·kg ⁻¹	碳氮比
低土壤有机碳样地	3.99±0.01 a	1.289±0.03 b	0.08 b	15.23±0.48 b
高土壤有机碳样地	3.91±0.02 a	1.480±0.06 a	0.09 a	16.32±0.51 a

1) 数据为平均值±标准误, a, b 表示用 Tukey 检验在 0.05 显著水平下的差异性

箱盖装有空气搅拌小风扇、温度计和采气三通阀。采样时间为上午 09:00 ~ 11:00。采样时间为 30 min, 每隔 10 min 用 QC-1S 型气体采样仪(北京市劳保所科技发展有限责任公司)抽取箱内气体 300 mL 于 500 mL 气体采样袋(大连海德科技有限公司)中。样品采集后及时带回实验室采用安捷伦 7890A 型气相色谱仪(7890A GC System, USA)同时测定 CO₂、N₂O 和 CH₄ 气体浓度。为保证实验的平行性, 每次采集气体样品时, 均在同一点进行。采样前将地表凋落物清理干净。

采用下列公式计算气体通量(单位时间内单位面积土壤表面气体质量的变化):

$$F = \rho \times (V/A) \times (\Delta c/\Delta t) \times 273/(273 + T)$$

式中, F 为气体通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] [N_2O 和 CH_4 的气体通量单位为 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], ρ 为标准状态下的气体密度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), V 为静态箱的体积 (m^3), A 为静态箱横断面面积 (m^2), $\Delta c/\Delta t$ 为 Δt 时间内静态箱内气体浓度变化速率 [$\text{m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$], T 为空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)。每个处理下的样地设置 3 个重复, 测量所得的通量数据, 对 4 个气样浓度进行线性回归, 只有当回归系数 $R^2 > 0.80$ 时, 才视为有效数据。

每次采集温室气体时采用土壤温度水分测定仪(浙江托普仪器有限公司)同步测定静态箱附近 5 cm 深土壤温度(T_5)和 10 cm 深土壤含水量(W_{10})。

1.4 土壤样品测定

土壤理化性质测定参考土壤农化分析^[23]。土壤 pH 值参照 LY/T 1239-1999《森林土壤 pH 值的测定》, 土水比为 1:2.5 的方法测定。土壤有机碳测定参照 LY/T 1237-1999《森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算》, 土壤总氮使用元素分析仪测定(Vario EL III, Elementar, Germany)。

1.5 数据分析

所有数据分析和处理主要借助 SPSS 16.0 和 Sigma Plot 11.0 完成。采用混合线性模型(Linear Mixed Models)和 Tukey 多重比较法检验低、高有机碳水平样地条件下不同施氮处理之间各指标的显著性差异。采用指数函数回归建立土壤 CO₂ 通量与 T_5 之间的关系, 用线性回归建立土壤 N₂O 通量与 T_5 之间的关系、CH₄ 通量与 W_{10} 之间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同样地施肥后温室气体通量时间动态变化

施氮前, 各个处理间温室气体通量无显著性差异。施氮后, 各施氮处理尤其是高氮处理的土壤

CO₂ 排放通量出现最高值, 呈现出明显的“激发效应”。随着时间推移 CO₂ 排放通量逐渐降低且各处理间差异缩小, 但高土壤有机碳样地的 CO₂ 排放通量一直最高。低、高土壤有机碳水平样地 CO₂ 排放时间动态基本一致(图 1)。

施氮对 N₂O 排放的影响更为明显。各施氮处理的土壤 N₂O 排放通量在施氮后出现最高值, 也呈现明显“激发效应”。随着时间推移 N₂O 排放通量逐渐降低、各处理间差异缩小, 但高施氮处理 N₂O 的排放通量高于低施氮处理。低、高土壤有机碳水平样地 N₂O 排放时间动态基本一致(图 1)。

施氮对 CH₄ 吸收通量动态变化的影响规律不明显(图 1)。

2.2 土壤有机碳水平和施氮强度对土壤温室气体通量影响

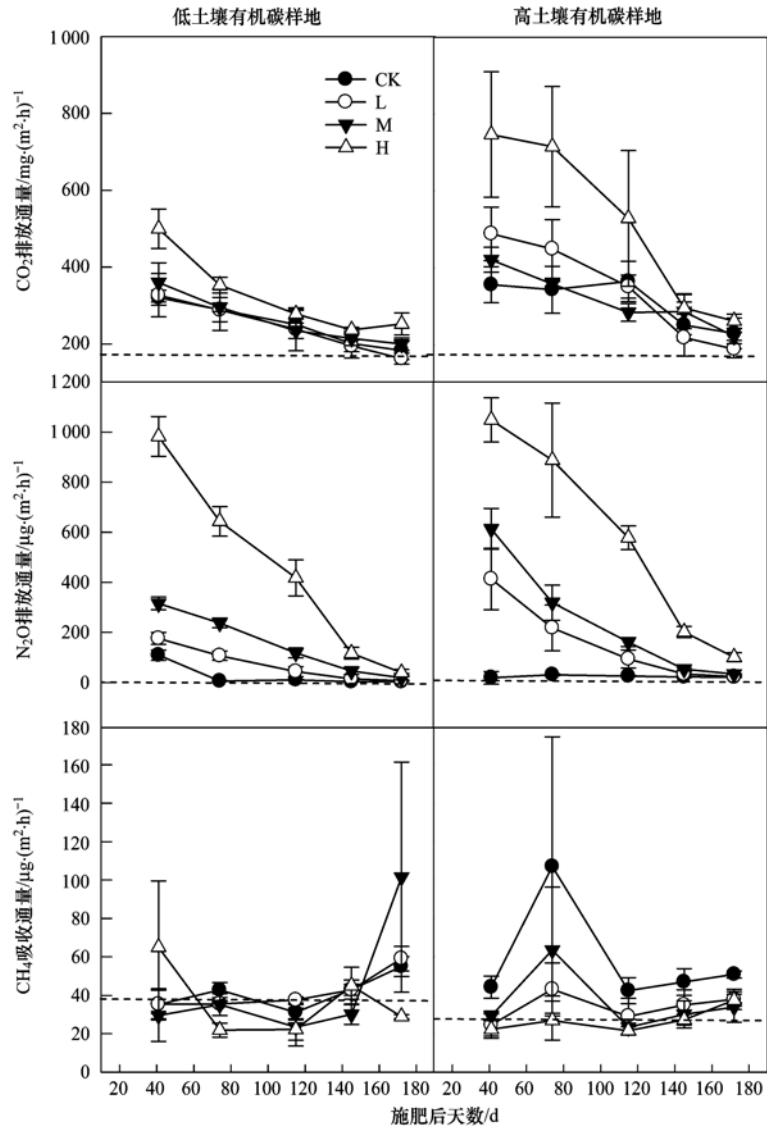
由表 2 可知, 不同土壤有机碳水平下, CO₂ 和 N₂O 排放通量均存在极显著性差异($P < 0.001$ 和 $P < 0.01$), 高有机碳样地的 CO₂ 和 N₂O 释放量显著高于低有机碳样地, CH₄ 吸收通量在 2 个样地间无显著性差异($P > 0.05$)。

施肥显著增加了 CO₂ 和 N₂O 的排放通量(表 2, $P < 0.001$)。高氮处理 CO₂ 排放通量显著高于对照、低氮和中氮处理($P < 0.001$); N₂O 排放通量随着施氮量的增加而增加, 各施氮处理的 N₂O 排放通量显著高于对照, 且高氮处理的 N₂O 排放通量显著高于中氮和低氮处理($P < 0.001$)。CH₄ 的吸收通量随着施肥量的增加分别减少了 23.8%、19.8% 和 36.1%, 但差异不显著($P > 0.05$)。

土壤有机碳水平和施氮的交互作用对 CO₂、N₂O 的排放均存在显著影响($P < 0.05$)。在土壤低有机碳水平样地中, 施氮对 CO₂ 的排放通量无影响, 而在土壤高有机碳水平样地中, 高氮处理 CO₂ 的排放通量显著高于其他处理(表 2); N₂O 的排放通量对施氮的响应表现为土壤高有机碳水平样地比低有机碳水平样地更敏感。在土壤高有机碳水平样地中, 低氮处理的 N₂O 排放通量显著高于对照, 而在低土壤有机碳水平样地中氮处理的 N₂O 排放通量显著高于对照(表 2)。

2.3 土壤温室气体通量影响因素

施氮水平是影响 CO₂、N₂O 排放通量和 CH₄ 吸收通量的主要因素之一, CO₂ 和 N₂O 排放通量在低、高土壤有机碳样地中均随施氮水平的提高而存在增加的趋势, CH₄ 吸收通量在低、高土壤有机碳样地中却随施氮水平的提高而存在降低的趋势(图 2)。



数据为平均值 ± 标准误；虚线表示施氮前温室气体排放或吸收通量背景值

图 1 不同样地施肥后温室气体通量时间动态变化

Fig. 1 Temporal dynamics of GHGs fluxes between the two sites after fertilization

表 2 4 种施氮强度和 (或) 有机碳差异对温室气体通量的影响¹⁾

Table 2 Effects of SOC and/or nitrogen on GHGs fluxes

碳水平	氮水平	CO ₂ 排放通量 /mg·(m ² ·h) ⁻¹	N ₂ O 排放通量 /μg·(m ² ·h) ⁻¹	CH ₄ 吸收通量 /μg·(m ² ·h) ⁻¹
LC	CK	249.03 ± 18.03b	26.71 ± 11.61e	41.39 ± 2.95
LC	L	242.16 ± 23.02b	69.81 ± 18.09de	42.04 ± 3.02
LC	M	260.81 ± 18.96b	147.43 ± 31.08cd	43.91 ± 13.13
LC	H	323.94 ± 28.02b	440.08 ± 95.03b	36.59 ± 7.57
HC	CK	308.93 ± 26.74b	7.05 ± 4.62e	58.28 ± 13.30
HC	L	339.23 ± 37.07b	141.60 ± 47.8cd	33.89 ± 3.82
HC	M	314.31 ± 21.21b	222.43 ± 60.93c	35.99 ± 7.01
HC	H	509.67 ± 72.95a	554.27 ± 109.14a	27.07 ± 2.56
ANOVA	N	***	***	n. s.
	C	***	**	n. s.
	N × C	*	*	n. s.

1) 数据为平均值 ± 标准误；a, b 表示用 Tukey 检验所有处理在 0.05 显著水平下的差异性；n. s. 无显著性差异，* $P < 0.05$ ，** $P < 0.01$ ，*** $P < 0.001$

土壤有机碳水平也是影响 CO_2 、 N_2O 排放通量和 CH_4 吸收通量的重要因素. 从图 2 一元线性回归方程的斜率可以看出: 在低、高土壤有机碳样地中 CO_2 和 N_2O 排放通量对施氮的响应不同, 高土壤有

机碳样地中 CO_2 和 N_2O 排放通对施氮的响应比低土壤有机碳样地更为敏感, 即: 单位施氮量下, 高有机碳样地土壤排放更多的 CO_2 和 N_2O , 而 CH_4 吸收通量则降低更多 (图 2).

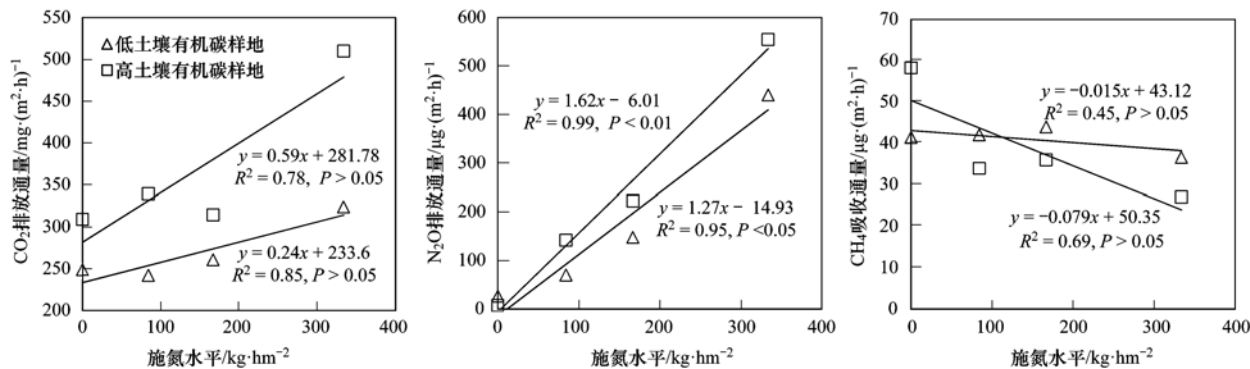


图 2 3 种温室气体通量与土壤有机碳水平、施氮水平的关系

Fig. 2 Relationships between GHGs fluxes and SOC and nitrogen levels

土壤温度和含水量也是影响 CO_2 、 N_2O 排放和 CH_4 吸收的重要环境因素. 土壤温度与 CO_2 排放通量呈现显著的指数函数关系 ($P < 0.01$), 与 N_2O 排

放通量呈现显著的线性正相关关系 ($P < 0.01$); 土壤含水量与 CH_4 吸收通量呈线性负相关关系 (图 3).

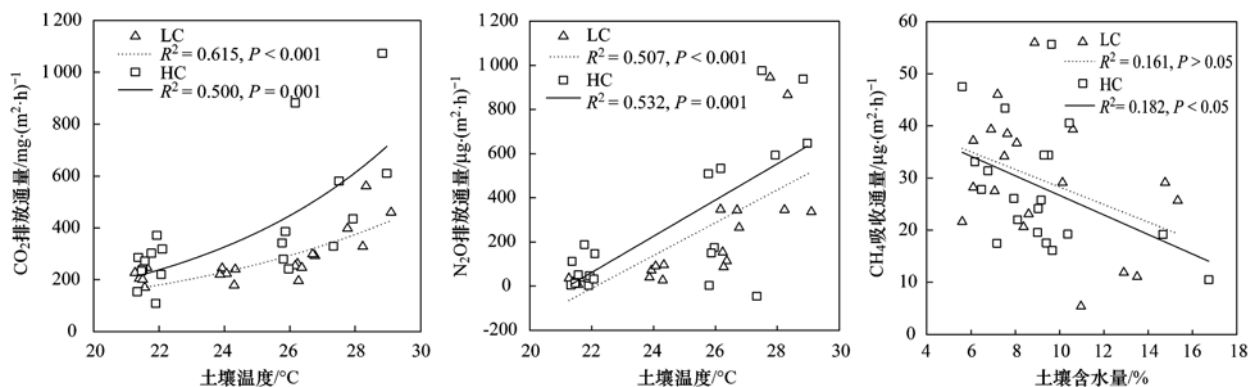


图 3 温室气体通量与土壤温度、土壤含水量的关系

Fig. 3 Relationships between soil-atmosphere GHGs fluxes and soil temperature at 5 cm depth and soil water content at 10 cm depth

由图 4 可知, 低、高土壤有机碳水平样地中 CO_2 与 N_2O 排放通量存在显著正相关关系 ($P < 0.001$), 2 种气体的相关系数分别为 0.436 和 0.544.

3 讨论

在桉树人工林生长季内, CO_2 和 N_2O 排放通量呈现明显的季节动态变化, 并在施肥后 1 个月内达到峰值, 随后逐渐降低 (图 1). 其可能的原因有以下 3 个方面: ① 水热条件. 温室气体的季节动态主要受土壤水热条件的驱动, 虽然土壤含水量对土壤呼吸的影响容易被土壤温度效应所掩盖^[24], 但其变化趋势与土壤温度的变化相吻合^[25]. 本研究中,

CO_2 和 N_2O 排放通量与土壤温度存在显著正相关 (图 3), 因此 CO_2 和 N_2O 排放通量在生长季前期出现的激发效应可能与 6~8 月间较高的土壤温度有关. 充沛的降雨也在一定程度上有利于植物根系迅速生长并促进土壤微生物活动, 激发 CO_2 和 N_2O 大量产生. 这也进一步证明土壤水热条件是影响土壤表面 CO_2 ^[26] 和 N_2O ^[27] 通量的主要环境因子. ② 氮素供给. 土壤中有效氮水平增加一方面有利于有机质的分解^[28], 而有机质的矿化分解产生 CO_2 ; 另一方面为硝化和反硝化反应提供可利用氮素, 尤其在热带地区, 土壤的反硝化作用作为主导作用强烈刺激 N_2O 排放^[18]. 本研究中, 施氮后土壤 CO_2 和 N_2O 排放明显的增加, 与以往报道施氮对温室气体通量

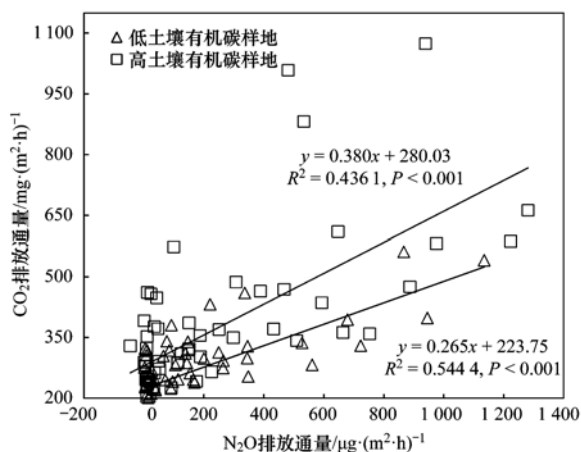


图4 CO₂ 排放通量与 N₂O 排放通量的相关关系

Fig. 4 Correlations between CO₂ emission flux and N₂O emission fluxes

短期影响的结果相似^[29,30]。③尿素矿化。Basiliko 等^[1]研究发现尿素施入土壤在短期内会迅速矿化并释放大量 CO₂,本次研究使用的脲甲醛缓释肥的速效成分即为尿素,因此在施氮后初期出现 CO₂ 排放通量峰值可能受尿素矿化的影响。

当氮添加强烈促进植物光合作用、增加林木生产量或刺激幼林冠层生长时,施氮与土壤呼吸存在正相关^[8]。本研究中,土壤呼吸随着施氮强度的增加而显著增加(图2),因此氮添加可能促进了桉树幼林的生产量、根系或(和)微生物活性,进而促进了土壤呼吸。这进一步证实当施氮促进林木生长时,土壤呼吸随着施氮量的增加而增加^[31,32]。本研究还发现 N₂O 排放通量与施氮量呈现良好的线性关系(图2),与 Nadelhoffer 等^[33]的研究结果一致,可能是由于增加氮素可利用性促进了微生物的硝化和反硝化过程。CH₄ 主要受土壤温度、含水量、氧化还原电位和 pH 等环境因子的影响^[17],因而表现出极大的空间差异性^[34],因此在本次研究的处理间没有表现出显著的差异。然而施氮在一定程度上削弱了土壤对空气中 CH₄ 的氧化能力(图2),这与以往在湿地松人工林^[5]、欧洲赤松林^[35]和加拿大西部人工林^[1]中的结果一致。

土壤有机碳是影响温室气体排放的重要因素。丰富的易分解的糖类和蛋白质等有机质为微生物提供充足养分,导致微生物活动剧烈进而更多地参与有机质矿化分解作用中,在此过程中释放大量 CO₂^[26]。因此,本研究中高有机碳样地释放的 CO₂ 显著高于低有机碳样地可能与土壤有机碳可利用性有关。N₂O 排放也受到土壤有机碳水平影响。由于易

分解有机碳含量越丰富会增加微生物对氧气的消耗^[30],有利于缺氧条件下微生物群落的形成^[36,37],同时为硝化和反硝化反应的提供更多的底物^[15,16],本研究中发现 N₂O 排放随着土壤有机碳含量增加而增加可能受到上述因素的影响,从田间试验的角度佐证了 Jäger 等^[30]在室内培养实验的结果:增加土壤有机碳含量会增加 N₂O 排放通量。此外,研究表明土壤有机碳显著促进 CO₂、N₂O 排放通量(表2),且2种温室气体本身存在极显著正相关(图4),所以两者的通量应该随着有机碳含量的增高而存在增高的趋势。这与耿远波等^[38]在内蒙古锡林河流域温带草原的实验结果一致。

温室气体源和汇的能力受到碳氮交互作用的显著影响(表2):土壤有机质含量越高,温室气体通量对外源氮的响应越敏感。其原因可能是不同强度的氮肥施加在不同的自然梯度有机碳水平样地,碳和氮都有成为限制因子的可能。当土壤有机碳含量丰富,在外源氮的添加后,氮限制减弱,土壤微生物活性和生物量、细根生物量增加^[39],因此土壤呼吸速率显著增加;反之,当土壤有机碳含量偏低,微生物可利用的碳源有限,即使在高强度施氮水平下,土壤呼吸强度仍然受到限制^[40]。本研究中,在低、高土壤有机碳样地中土壤呼吸对施氮的敏感性不同:在相同施氮处理下高有机碳样地 CO₂ 通量的增幅大于低有机碳样地,尤其在高有机碳样地高氮处理下的 CO₂ 通量显著高于其余处理(表2)。通过本次野外控制实验证明了陈法霖等^[41]的研究结果:土壤中不同的底物(如不同的碳氮比)会影响碳循环速率。此外,N₂O 通量变化差异也可能受到碳、氮可利用性的限制,故而表现出在施氮量越多、有机碳含量越高则其排放通量越高的规律(表2)。有机碳为硝化、反硝化细菌提供碳源和能源,同时也为反硝化过程提供电子受体^[42]。Lal^[43]认为在氮素和有机碳供给充足,N₂O 的释放量将异常高。人工湿地系统进水端较高充足的碳、氮源促进了硝化和反硝化过程,使得出水端 N₂O 通量高于出水端^[44]。上述研究结果与本研究结果相似(图2)。尚会来等^[45]采用序批式活性污泥法(SBR)反应器的研究表明:在碳源严重不足时,N₂O 产生量极低,而 C/N 比过大时,N₂O 产量急剧增大。因此,本研究中发现高有机碳样地低氮处理下释放的 N₂O 与对照有显著差异,而低有机碳样地的低氮处理和对照处理间没有显著响应的现象可能基于上述几点原因。

研究表明,施氮强度与土壤有机碳水平是影响

人工林生态系统土壤-大气界面温室气体通量的重要因素。因此,在估测人工林温室气体通量时,不仅关注施氮强度,更需要考虑土壤有机碳差异造成土壤温室气体通量的差异。

4 结论

(1)在桉树生长季,土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量呈现相似且显著的季节动态变化规律。在施氮后初期,出现了生长季过程中的排放峰值。至生长季末期,与施氮前的排放通量无显著性差异。

(2)施氮强度与土壤有机碳水平是影响人工林生态系统土壤-大气界面温室气体通量的重要因素。土壤有机质含量越高,温室气体通量对外源氮的响应越敏感。

(3)在估测人工林温室气体通量时,不仅关注施氮强度对土壤温室气体通量的影响,更需要考虑土壤有机碳差异造成土壤温室气体通量的差异。

致谢:中国科学院生态环境研究中心冯兆忠研究员在研究中给予了悉心指导,张千千、陈法霖、杨苗等在采样和实验方面提供帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Basiliko N, Khan A, Prescott C E, *et al.* Soil greenhouse gas and nutrient dynamics in fertilized western Canadian plantation forests [J]. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 2009, **39** (6): 1220-1235.
- [2] Moscatelli M C, Lagomarsino A, De Angelis P, *et al.* Short-and medium-term contrasting effects of nitrogen fertilization on C and N cycling in a poplar plantation soil [J]. Forest Ecology and Management, 2008, **255**(3-4): 447-454.
- [3] Gasche R, Papen H. A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany 2. NO and NO_2 fluxes [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, **104** (D15): 18505-18520.
- [4] Kim Y S, Imori M, Watanabe M, *et al.* Simulated nitrogen inputs influence methane and nitrous oxide fluxes from a young larch plantation in northern Japan [J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 36-44.
- [5] Castro M S, Peterjohn W T, Melillo J M, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on the fluxes of N_2O , CH_4 , and CO_2 from soils in a Florida slash pine plantation [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1994, **24**(1): 9-13.
- [6] Livesley S J, Kiese R, Miehe P, *et al.* Soil- atmosphere exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture, and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations [J]. Global Change Biology, 2009, **15**(2): 425-440.
- [7] 张炜, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响 [J]. 生态学报, 2008, **28** (5): 2309-2319.
- [8] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, *et al.* Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition [J]. Nature Geoscience, 2010, **3**(5): 315-322.
- [9] 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 等. 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 [J]. 生态学报, 2012, **32** (15): 4914-4923.
- [10] 康惠宁, 马钦彦, 袁嘉祖. 中国森林 C 汇功能基本估计 [J]. 应用生态学报, 1996, **7**(3): 230-234.
- [11] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: implications for climate change [J]. Biogeochemistry. 2000, **48**(1): 1-6.
- [12] Qiu J J, Li C S, Wang L G, *et al.* Modeling impacts of carbon sequestration on net greenhouse gas emissions from agricultural soils in China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, **23** (1), doi: 10.1029/2008GB003180.
- [13] 孙波, 郑宪清, 胡锋, 等. 水热条件与土壤性质对农田土壤硝化作用的影响 [J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 206-213.
- [14] Conrad R, Klose M. Effect of potassium phosphate fertilization on production and emission of methane and its ^{13}C -stable isotope composition in rice microcosms [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(11): 2099-2108.
- [15] Chang C, Janzen H H, Nakonechny E M, *et al.* Nitrous oxide emission through plants [J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, **62**(1): 35-38.
- [16] Velthof G L, Kuikman P J, Oenema O. Nitrous oxide emission from animal manures applied to soil under controlled conditions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, **37**(4): 221-230.
- [17] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响 [J]. 生态学报, 2002, **22**(10): 1672-1678.
- [18] Liu L L, Greaver T L. A global perspective on belowground carbon dynamics under nitrogen enrichment [J]. Ecology Letters, 2010, **13**(7): 819-828.
- [19] Townsend A R, Braswell B H, Holland E A, *et al.* Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen [J]. Ecological Applications, 1996, **6**(3): 806-814.
- [20] Wallenstein M D, McNulty S, Fernandez I J, *et al.* Nitrogen fertilization decreases forest soil fungal and bacterial biomass in three long-term experiments [J]. Forest Ecology and Management, 2006, **222**(1-3): 459-468.
- [21] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, *et al.* Nitrogen saturation in northern forest ecosystems [J]. Bioscience, 1989, **39** (6): 378-386.
- [22] 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 [J]. Biogeochemistry, 2006, **79**(3): 315-337.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 98.

- [24] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响 [J]. 植物生态学报, 2003, **27**(2): 202-209.
- [25] 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO₂ 通量的影响 [J]. 植物生态学报, 2006, **30**(2): 286-294.
- [26] 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, **14**(8): 1234-1238.
- [27] 祁金花, 黄懿梅, 张宏, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤释放 N₂O 潜力的影响因素 [J]. 生态学报, 2011, **31**(13): 3778-3787.
- [28] 胡启武, 欧阳华, 刘贤德. 祁连山北坡垂直带土壤碳氮分布特征 [J]. 山地学报, 2006, **24**(6): 654-661.
- [29] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 等. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收对模拟 N 沉降的短期响应 [J]. 生态学报, 2005, **25**(4): 682-690.
- [30] Jäger N, Duffner A, Ludwig B, *et al.* Effect of fertilization history on short-term emission of CO₂ and N₂O after the application of different N fertilizers-a laboratory study [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, **59**(2): 161-171.
- [31] Bowden R D, Davidson E, Savage K, *et al.* Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest [J]. Forest Ecology and Management, 2004, **196**(1): 43-56.
- [32] Jassal R S, Black T A, Roy R, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on soil CH₄ and N₂O fluxes, and soil and bole respiration [J]. Geoderma, 2011, **162**(1-2): 182-186.
- [33] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gundersen P, *et al.* Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests [J]. Nature, 1999, **398**(6723): 145-148.
- [34] Chen C, Xu Z, Hughes J. Effects of nitrogen fertilization on soil nitrogen pools and microbial properties in a hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantation in southeast Queensland, Australia [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **36**(4): 276-283.
- [35] Butterbach-Bahl K, Breuer L, Gasche R, *et al.* Exchange of trace gases between soils and the atmosphere in Scots pine forest ecosystems of the northeastern German lowlands; 1. Fluxes of N₂O, NO/NO₂ and CH₄ at forest sites with different N-deposition [J]. Forest Ecology and Management, 2002, **167**(1): 123-134.
- [36] Parkin T B. Soil microsites as a source of denitrification variability [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, **51**(5): 1194-1199.
- [37] Flessa H, Beese F. Effects of sugarbeet residues on soil redox potential and nitrous oxide emission [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, **59**(4): 1044-1051.
- [38] 耿远波, 章申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性 [J]. 地理学报, 2001, **56**(1): 44-53.
- [39] Li Y Q, Xu M, Zou X M. Effects of nutrient additions on ecosystem carbon cycle in a Puerto Rican tropical wet forest [J]. Global Change Biology, 2006, **12**(2): 284-293.
- [40] Brooks P D, McKnight D, Elder K. Carbon limitation of soil respiration under winter snowpacks; potential feedbacks between growing season and winter carbon fluxes [J]. Global Change Biology, 2005, **11**(2): 231-238.
- [41] 陈法霖, 郑华, 阳柏苏, 等. 外来种湿地松凋落物对土壤微生物群落结构和功能的影响 [J]. 生态学报, 2011, **31**(12): 3543-3550.
- [42] Beauchamp E G, Trevors J T, Paul J W. Carbon sources for bacterial denitrification[A]. In: Advances in soil science[M]. New York: Springer, 1989, **10**: 113-142.
- [43] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [44] 吴娟, 张建, 贾文林, 等. 人工湿地污水处理系统中氧化亚氮的释放规律研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3146-3151.
- [45] 尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. 不同电子受体反硝化过程中 C/N 对 N₂O 产量的影响 [J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 2007-2012.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行