

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

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

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ) 吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究

李平^{1,2}, 郎漫^{1,2*}, 徐向华², 李煜姗², 朱淑娴²

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 以东北黑土区荒地土壤(H)、开垦2 a(L)、30 a(S)和100 a(Y)土壤为对象, 在25℃和60% WHC水分条件下, 通过7 d的室内培养试验, 研究了不同开垦年限黑土温室气体N₂O、CO₂和CH₄的排放规律。结果表明, 黑土开垦后理化性质发生了显著改变, 进而影响了温室气体的排放。N₂O排放量随开垦年限的增加而增加, 开垦30 a和100 a土壤的N₂O排放量显著高于荒地土壤。净硝化量和N₂O排放量与土壤水溶性有机氮和粉粒含量呈显著正相关关系, 与土壤pH和砂粒含量呈显著负相关关系。CO₂排放量随开垦年限的增加而逐渐降低, 开垦30 a和100 a土壤与荒地土壤差异显著。土壤有机碳和水溶性有机碳含量与CO₂累积排放量呈显著正相关关系。好氧条件下, 荒地土壤和开垦土壤在培养前4 d表现为对CH₄的微量排放, 然后表现为对CH₄的微量吸收, 开垦土壤的CH₄排放量随开垦年限的增加而增加。不同开垦年限黑土可能因土壤pH、有机碳、水溶性有机碳含量以及土壤机械组成的差异而产生CO₂和CH₄排放的差异。

关键词: 开垦年限; 黑土; N₂O; CO₂; CH₄

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4321-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.039

Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years

LI Ping^{1,2}, LANG Man^{1,2}, XU Xiang-hua², LI Yu-shan², ZHU Shu-xian²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Regularity of greenhouse gas emissions from black soil with different reclamation years in northern China was investigated by an incubation experiment. Soil samples cultivated for 2 years, 30 years, 100 years and uncultivated were collected and incubated at 25℃ and a soil moisture of 60% of the water hold capacity (WHC) for 7 days. The results indicated that the physical and chemical properties of black soil changed significantly after reclamation, which had significant influence on the greenhouse gas emissions. N₂O emission was stimulated after soil was reclaimed, the longer time of reclamation, the higher N₂O emitted from soil, and the N₂O emissions from soil cultivated for 30 and 100 years were significantly higher than that from uncultivated soil. There were significant positive correlations between N₂O emission and the content of water organic nitrogen and silt in soil, whereas significant negative correlations were found between pH, sand content and N₂O emission. CO₂ emission decreased after the soil was cultivated, and CO₂ emission from soil cultivated for 30 and 100 years were significantly lower than that of uncultivated soil. There were significant positive correlations between organic carbon, water organic carbon and CO₂ emission. All of the soils behaved as weak sources of CH₄ emission during the first 4 days of incubation, and then behaved as weak sink of atmospheric CH₄, the CH₄ cumulative emission increased with reclamation years. The difference of CO₂ and CH₄ emissions from black soil with different reclamation years may be attributed to the difference of soil pH, organic carbon, soluble organic carbon and the contents of sand and silt.

Key words: reclamation year; black soil; N₂O; CO₂; CH₄

氧化亚氮(N₂O)、二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)是3种重要的温室气体。近几十年来, 大气中的温室气体在逐年增加。据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)估计, 大气中N₂O、CO₂和CH₄的年平均增长速度分别达到0.3%、0.5%和0.8%^[1]。土壤是温室气体重要排放源^[2], 土壤中N₂O的排放主要是在微生物的参与下, 通过硝化作用和反硝化作用完成的^[3]。土壤有机碳经土壤微生物的矿化作用向大气中排放CO₂^[4]。在极端厌氧条件下, 甲烷菌分解土壤中的有机质, 产生CH₄^[5]。土壤N₂O、CO₂和CH₄的排放受土壤pH值、质地、有

机碳、可溶性氮等理化性质的影响^[6~8]。此外, 土壤开垦时间长短对土壤理化性质有重要影响, 进而影响温室气体的排放过程和排放量^[9]。

东北黑土是世界3大片黑土之一, 其总土地面积为101.85万km²^[10]。黑土质地肥沃, 生产力较

收稿日期: 2014-04-26; 修订日期: 2014-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301345, 41101284); 江苏省高校自然科学研究计划项目(12KJB210004); 江苏省农业气象重点实验室开放基金项目(KYQ1209); 江苏省政府留学奖学金项目; 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划项目(201310300095X)

作者简介: 李平(1982~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为土壤氮循环及其环境效应, E-mail: pli@nuist.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: mlang@nuist.edu.cn

高,整个东北黑土区每年生产约 350 亿 kg 商品粮,是我国重要的粮食生产基地,同时也是甜菜、亚麻、向日葵等经济作物的主产区和畜牧业基地.据报道,在黑龙江省很多地区还有不少未开垦利用的荒地,生产潜力还很大^[11]. 目前,有关黑土开垦后土壤肥力状况的动态变化研究已有很多^[12,13],但有关不同开垦年限的黑土温室气体排放规律的研究还未见诸报道. 因此,本研究以东北黑土区不同开垦年限的土壤为对象,分析不同开垦年限黑土 N₂O、CO₂ 和 CH₄ 的排放规律及其影响因素和机制,以期在黑土区垦殖利用的生态效应评估提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自黑龙江省哈尔滨市阿城区蜚克图

镇光明村,该地区属北温带大陆季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,年平均温度 1.5℃,年平均降水量 530 mm,年有效积温 2 450℃,年日照时数 2 600~2 800 h,无霜期 125 d,土壤属于中厚层黑土. 耕作土壤主要种植玉米,常年施用二铵和尿素,不施有机肥. 荒地黑土主要生长小叶樟、落豆秧、地榆等草甸植物,俗称“五花草塘”. 于春季翻耕前分别采集未开垦的荒地(H)、开垦 2 a(L)、30 a(S)和 100 a(Y)黑土的 0~20 cm 耕层土壤,每个采样地块各设 3 次空间重复,将 3 个空间重复所采土样混匀作为试验用土. 采样的同时,详细调查和比较各样点的环境条件 and 生产管理水平和,选择地形条件较为相似,生产管理水平和基本一致的田块为采样点,以尽量减少地貌条件和其他因素的干扰. 土样于室温下风干,过 2 mm 筛低温储存备用. 土壤理化性质如表 1 所示.

表 1 供试土壤的基本理化性质¹⁾

Table 1 Physico-chemical properties of the test soils

土壤	pH	最大持水量 /%	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	有机碳 /%	全氮 /%	碳氮比	水溶性有机碳 /mg·kg ⁻¹	水溶性有机氮 /mg·kg ⁻¹	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%
H	6.02 (0.04)	63.2 (1.29)	3.08 (0.11)	1.49 (0.07)	2.00 (0.03)	0.205 (0.02)	9.76 (0.14)	269.0 (9.72)	5.25 (0.53)	15.4 (1.02)	69.2 (3.41)	15.4 (0.04)
L	5.68 (0.02)	60.0 (1.01)	7.59 (0.07)	4.66 (0.17)	1.82 (0.06)	0.196 (0.01)	9.29 (0.23)	255.0 (3.68)	6.77 (0.21)	14.7 (0.89)	71.6 (1.51)	15.7 (0.98)
S	5.26 (0.02)	61.6 (1.31)	7.11 (0.13)	13.43 (0.39)	1.79 (0.05)	0.186 (0.02)	9.62 (0.12)	242.2 (21.3)	11.21 (1.12)	12.2 (0.65)	72.7 (3.58)	15.1 (0.73)
Y	4.93 (0.08)	61.0 (1.84)	9.05 (0.14)	11.60 (0.73)	1.60 (0.04)	0.164 (0.03)	9.76 (0.08)	233.3 (10.7)	9.42 (0.49)	12.5 (0.14)	72.0 (0.98)	15.5 (0.45)

1) H: 荒地土壤; L: 开垦 2 a 土壤; S: 开垦 30 a 土壤; Y: 开垦 100 a 土壤; 括号内数值为标准差

1.2 试验设计

每个土壤样品各称取相当于 30 g 烘干土重的风干土样于 30 个 250 mL 三角瓶中,加水至 40% WHC,25℃ 下预培养 7 d 以便激活土壤微生物. 预培养结束后,向三角瓶中加入 NH₄NO₃ 溶液,使得氮浓度达到 60 mg·kg⁻¹,同时调节水分至 60% WHC. 用锡箔盖住瓶口,并在锡箔上扎 4~5 个孔以利于通气,然后将三角瓶置于恒温培养箱中在 25℃ 下黑暗培养. 每隔 2 d 对样品补水以补充因蒸发而引起的水分损失.

分别在添加氮溶液后的 0、1、2、4、7 d 随机取出 3 个土壤样品作为重复. 按液土比 2.5:1 向三角瓶中加入 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液,振荡、过滤,收集滤液于塑料瓶中,并于 4℃ 下低温保存用于测定 NH₄⁺、NO₃⁻ 浓度. 每次取样前将三角瓶除去锡箔通气 30 min,然后用带取气孔的橡胶塞密闭瓶子,采集培养瓶上部空间气体样本 20 mL,注入 18 mL 真空瓶中,

作为初始气体浓度. 密闭 24 h 后,再次采集气体,测定 N₂O、CO₂ 和 CH₄ 浓度.

1.3 分析方法

土壤 pH 用电位法(液土比为 2.5:1)测定;土壤有机碳和全氮用碳氮元素分析仪(NA Series 2, CE Instruments, Italy)测定;土壤质地采用激光粒度分析仪(Beckman Coulter, Los Angeles, USA)测定;水溶性有机碳(WOC)和水溶性有机氮(WON)的测定参照文献[14]中的方法,土壤用水浸提后过 0.45 μm 滤膜,然后用有机碳氮分析仪(Shimadzu Corp, Kyoto, Japan)测定;土壤最大持水量(WHC)的测定参照文献[15]中的方法,称取适量过 2 mm 筛的土样置于用棉球塞住的漏斗中,加去离子水浸泡 2 h 后加盖,除去棉塞,让水分自由下渗,放置过夜后测定土壤重量含水量作为土壤最大持水量;KCl 溶液提取后的滤液用 MgO-定氮合金蒸馏法测定 NH₄⁺、NO₃⁻ 浓度;N₂O、CO₂ 和 CH₄ 浓度用气相色谱仪

(Shimadzu GC-14B)测定.

1.4 数据处理与统计分析

N_2O 、 CO_2 和 CH_4 排放速率按照下列公式计算:

$$F = \rho \times \frac{dc}{dt} \times V \times \frac{273}{(273 + T) \times W}$$

式中, F 为气体排放速率, 单位为 $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ (以 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 计)、 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ (以 CO_2-C 计) 或者 $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ (以 CH_4-C 计); ρ 为标准状态下 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 、 CO_2-C 和 CH_4-C 的密度; $\frac{dc}{dt}$ 为单位时间内培养瓶内气体浓度增加量, 单位为 $\times 10^{-6} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $\times 10^{-9} \cdot \text{h}^{-1}$; V 是培养瓶中气体的有效空间体积 (m^3); W 为培养瓶内的烘干土重 (kg); T 为培养温度 ($^{\circ}\text{C}$).

气体累积排放量通过相邻两次气体平均排放速率与排放时间的乘积累加计算得出, 硝化过程中的 N_2O 排放比率为培养一段时间后的 N_2O 累积排放量

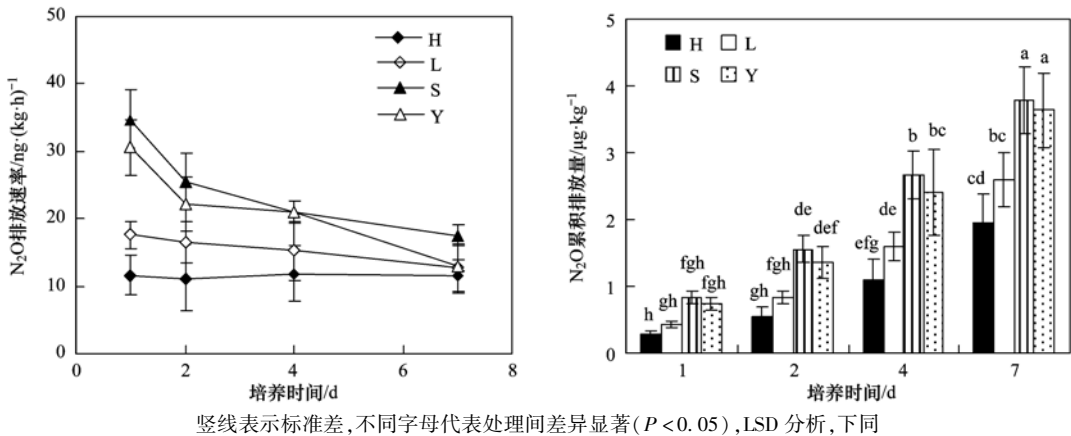
与净硝化量之比.

文中给出的数据均为 3 次重复的平均值. 采用 SPSS 13.0 软件对数据进行单因素方差分析和相关分析, 用 Duncun (SSR) 方法分析处理间平均数在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平的差异显著性, 用 Excel 软件做图.

2 结果与分析

2.1 N_2O 排放速率及其累积排放量

荒地土壤的 N_2O 排放速率在整个培养期间没有明显变化, 而开垦土壤的 N_2O 排放速率在培养后的第 1 d 达到峰值并随培养时间的延长逐渐下降 (图 1). 从图 1 可以看出, 黑土开垦后显著促进了 N_2O 的排放, 整个培养期间 3 种不同开垦年限的土壤 N_2O 排放速率均大于荒地土壤, 开垦年限越长, N_2O 排放速率越大. 这种差异在培养的前 4 d 尤为显著 ($P < 0.05$), 但在培养结束, 3 种开垦土壤的 N_2O 排放速率与荒地土没有显著差异 ($P > 0.05$).



竖线表示标准差, 不同字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$), LSD 分析, 下同

图 1 不同开垦年限土壤的 N_2O 排放速率及其累积排放量

Fig. 1 Changes of N_2O flux and cumulative emissions from soils reclaimed for different years during 7 days of incubation

N_2O 累积排放量随培养的进行逐渐增加 (图 1). 培养 7 d 后, 开垦 30 a 和 100 a 土壤的 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 累积排放量分别为 $3.79 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.63 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于荒地土壤和开垦 2 a 土壤的 $1.94 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.60 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 开垦年限对培养 7 d 后土壤净硝化量的影响与 N_2O 累积排放量的变化规律相同 (图 2), 两者呈显著正相关 ($r = 0.9638$, $P < 0.05$). 因

此, 4 个土壤的 N_2O 排放比率没有显著差异, 荒地土壤、开垦 2 a、30 a、100 a 土壤的 N_2O 排放比率分别为 0.171% 、 0.190% 、 0.179% 和 0.165% (图 2). 相关分析结果表明, 培养 7 d 后的 N_2O 累积排放量与土壤铵态氮、硝态氮、水溶性有机氮和粉粒含量都呈显著正相关, 与土壤 pH 和砂粒含量都呈显著负相关 (表 2).

表 2 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 累积排放量与土壤理化性质的相关关系 ($n = 12$)¹⁾

Table 2 Correlations between N_2O , CO_2 , CH_4 cumulative emissions and the physico-chemical properties of soils

气体	pH	持水量	铵态氮	硝态氮	有机碳	全氮	碳氮比	水溶性有机碳	水溶性有机氮	砂粒	粉粒	黏粒
N_2O	-0.797 **	-0.348	0.670 *	0.847 **	-0.700 **	-0.697 *	0.104	-0.809 **	0.832 **	-0.844 **	0.779 **	-0.379
CO_2	0.957 **	0.313	-0.756 **	-0.920 **	0.871 **	0.910 **	-0.310	0.948 **	-0.866 **	0.937 **	-0.767 **	0.346
CH_4	-0.894 **	-0.442	0.781 **	0.939 **	-0.799 **	-0.782 **	0.066	-0.910 **	0.921 **	-0.934 **	0.889 **	-0.377

1) ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$

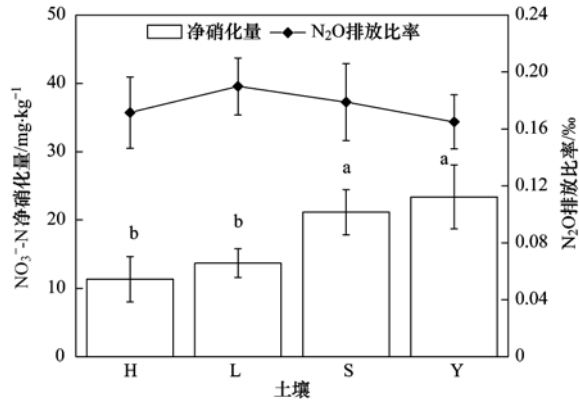


图2 不同开垦年限土壤的净硝化量及其 N_2O 排放比率
Fig. 2 Net nitrified nitrogen and N_2O emission ratio from soils reclaimed for different years during 7 days of incubation

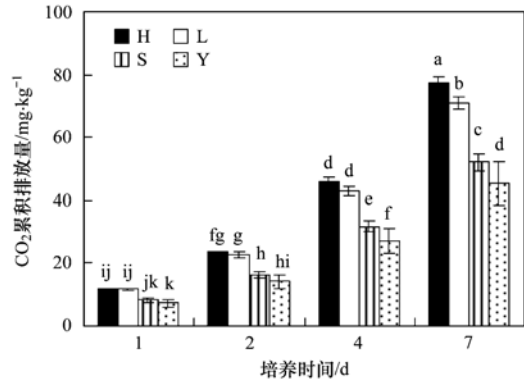
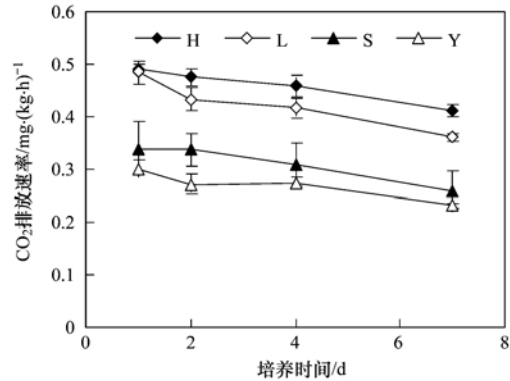


图3 不同开垦年限土壤的 CO_2 排放速率及其累积排放量

Fig. 3 Changes of CO_2 flux and cumulative emissions from soils reclaimed for different years during 7 days of incubation

CO_2 累积排放量与土壤 pH、有机碳、水溶性有机碳和砂粒含量呈极显著正相关,与粉粒含量呈极显著负相关(表 2).

2.3 CH_4 排放速率及其累积排放量

不同开垦年限土壤的 CH_4 排放速率如图 4 所

2.2 CO_2 排放速率及其累积排放量

无论是荒地土壤,还是开垦土壤, CO_2 排放速率都随培养的进行缓慢下降(图 3). 开垦年限对 CO_2 排放速率具有重要影响. 随着开垦年限的增加, CO_2 排放速率逐渐下降,开垦 2 a 土壤相比荒地土壤 CO_2 排放速率没有显著差异,但开垦 30 a 和 100 a 土壤 CO_2 排放速率均显著低于荒地土壤 ($P < 0.01$).

CO_2 累积排放量随培养的进行逐渐增加(图 3),培养 7 d 后,开垦 30 a 和 100 a 土壤 CO_2 累积排放量分别为 $52.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $45.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著低于荒地土壤($77.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和开垦 2 a 土壤($71.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.05$). 统计分析表明,培养 7 d 后的

示,在培养的前 4 d,荒地土壤和开垦土壤都表现为对 CH_4 的微量排放,并随着培养的进行逐渐降低,但到了第 7 d,所有土壤都表现为对 CH_4 的微量吸收. 与荒地土壤相比,3 种不同开垦年限土壤的 CH_4 排放速率在各取样时间都有所增加,开垦时间越长,

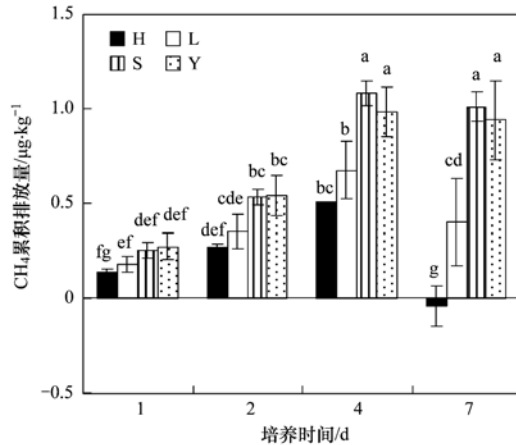
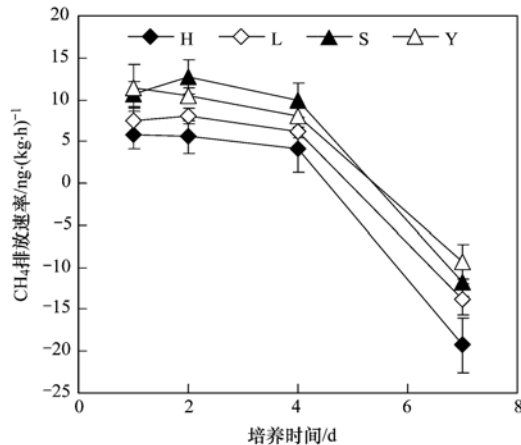


图4 不同开垦年限土壤的 CH_4 排放速率及其累积排放量

Fig. 4 Changes of CH_4 flux and cumulative emissions from soils reclaimed for different years during 7 days of incubation

排放速率越大. 各土壤 CH_4 累积排放量先随培养的进行逐渐增加,并在培养 4 d 后达到峰值,随后开始降低(图 4). 开垦 30 a 和 100 a 土壤的 CH_4 排放量没有显著差异,但均显著高于荒地土壤和开垦 2 a 土壤.

3 讨论

土壤中 N_2O 的排放主要是通过硝化作用和反硝化作用过程产生^[3]. 好氧条件下,土壤中主要发生硝化作用,反硝化作用很少发生^[16]. 本研究中土壤净硝化量与 N_2O 排放量呈显著正相关,说明在 60% 田间持水量条件下,硝化作用是土壤排放 N_2O 的主要途径. 硝化过程中排放的 N_2O 占硝化氮的比例很小,通常在 0.3‰~2‰ 之间^[17],本研究中土壤培养 7 d 后 N_2O 排放比率在 0.165‰~0.190‰ 之间,与之相近. 研究表明,土壤 pH 值是硝化作用的主要影响因素^[18],随着 pH 值增加,净硝化速率和 N_2O 排放量显著增加^[16,19]. 而本研究结果显示 N_2O 排放量与土壤 pH 呈显著负相关(表 2),这可能是由于黑土开垦后肥料氮的大量施用使得土壤 pH 值逐年下降(表 1),而硝化微生物长期生存在低 pH 条件下产生了适应性的结果^[19]. 此外,黑土开垦后机械扰动增强了土壤的通透性,促进了土壤有机质的分解和酶活性的提高,有利于硝化微生物的生长和繁殖^[20,21],在硝化底物供应充足的情况下仍具有很强的硝化活性. 硝化活性的增加促进了 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 的转化,导致土壤中的 NO_3^--N 含量随着开垦年限的增加而增加. 水溶性有机氮是硝化作用底物 NH_4^+ 的重要来源^[22],因此土壤水溶性有机氮含量越高, N_2O 排放量越高(表 2). 本研究中荒地土壤的水溶性有机氮含量为 $5.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而土壤开垦 2 a、30 a 和 100 a 后分别为 6.77、14.21 和 $9.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 1),均显著高于荒地土壤. 有研究指出,荒地耕种后,不仅全氮含量减少,各组分有机氮均减少^[20,21,23]. 本研究结果恰恰与其相反,这可能是由于研究区域长期实行大型机械化耕作,土壤的通气性能较好,使得土壤微生物活性增强,有机质大量分解产生的水溶性有机氮除部分被作物吸收外,剩下的逐渐累积在土壤中,导致土壤水溶性有机氮含量的增加^[24]. 水溶性有机氮是微生物最容易利用的氮源,很容易被微生物分解矿化为 NH_4^+ . 因此,虽然长时间的开垦利用降低了黑土有机碳和全氮含量,但矿质氮含量却显著增加(表 1). 造成不

同开垦年限黑土 N_2O 排放差异的另一个原因可能是长期的开垦利用改变了土壤的机械组成,黑土开垦时间越长,砂粒含量越少,粉粒含量越多(表 1),两者与 N_2O 排放量分别呈显著的负相关和正相关关系(表 1). 有研究指出,在好气培养条件下,粘粒和粉粒高的土壤很容易形成厌氧微区,促进反硝化作用的发生,从而导致 N_2O 的大量排放^[25]. 此外,硝化作用的快速发生会降低土壤中的氧气含量,而且较多的小颗粒会抑制氧气扩散^[26],因而容易形成厌氧微域促进反硝化作用的进行和 N_2O 的大量排放. 开垦 30 a 和 100 a 土壤粉粒含量高于荒地土和开垦 2 a 土壤,相应的 N_2O 排放量也显著增加.

在没有种植作物的情况下,土壤中的 CO_2 排放主要来自微生物呼吸. 土壤微生物呼吸的大小可表征微生物活性的强弱^[27]. 本研究是在室内培养条件下进行的,没有作物的影响,因此土壤中 CO_2 的排放可以代表微生物活性的大小. 荒地土壤和开垦土壤的 CO_2 排放速率在培养初始最高,然后逐渐下降,说明氮源的加入刺激了微生物的生长和活动,随着土壤有机碳的消耗,微生物可以利用的基质减少,活性逐渐减弱, CO_2 排放量也逐渐降低. 研究表明,土壤微生物呼吸的强弱主要受易分解有机碳含量的影响^[28],土壤中水溶性有机碳含量越高,微生物活性越强^[7]. 本研究也发现土壤 CO_2 累积排放量与水溶性有机碳含量呈极显著正相关(表 2). 黑土开垦后表层土壤有机碳含量明显下降,与荒地相比,开垦 2 a、30 a、100 a 土壤有机碳含量分别下降了 9.0%、10.5%、20.0%(表 1). 有机碳库中活性最大、对微生物影响最为显著的是水溶性有机碳,两者存在显著正相关关系^[29]. 因此,随着开垦年限的增加,土壤有机碳含量的下降导致水溶性有机碳的含量也随之降低,与之相应的 CO_2 排放量也显著降低. 从表 2 还可看出, CO_2 排放量与土壤 pH 呈显著正相关. 黑土开垦后,大量氮肥的使用导致土壤硝化作用增强,土壤 pH 逐年下降,而微生物适合在中到碱性的环境下生存,因此开垦年限越长,微生物活性越弱, CO_2 排放量越少. 微生物呼吸产生的 CO_2 从土壤释放到大气过程还与土壤机械组成有关,本研究显示 CO_2 排放量与砂粒含量呈显著正相关,与粉粒含量呈显著负相关(表 2),说明土壤的通气性越好,越有利于气体的扩散. 长时间的开垦利用破碎了土壤的原有结构,使得粉粒含量增多,砂粒含量减少,土壤的通气性能也降低,这可能是土壤 CO_2 排放量随着开垦年限的增加而降低的另一个原因.

土壤中 CH_4 产生和氧化是微生物活动的结果,在厌氧条件下,甲烷菌分解土壤中的有机质,产生 CH_4 ,在好气条件下, CH_4 又被氧化菌氧化^[30]. 本研究是在好氧条件下进行的,不利于甲烷的产生,但试验中用移液管向土壤中添加溶液时不可能做到完全均匀一致,一些土壤孔隙被水分饱和后形成局部的厌氧环境会促进甲烷的微弱排放. 另外,硝化作用的快速发生会导致土壤颗粒微区氧气含量降低,土壤黏粒抑制氧气扩散也会促进厌氧环境的形成^[31]. 一些其它的研究结果也发现,耕作土壤在好氧条件下会排放少量的甲烷^[30,32]. 黑土经过开垦后,不断的翻耕扰动过程改变了土壤的机械组成,进而影响土壤中氧气的扩散过程,促进厌氧微区的形成. 此外,硝化作用的快速发生消耗了土壤中的氧气,为 CH_4 的产生创造了有利的条件,使得开垦 30 a 和 100 a 土壤 CH_4 排放量显著高于荒地土壤和开垦 2 a 土壤. 土壤有机碳是产生甲烷的基质,有机碳含量越高,甲烷排放量越高^[32]. 本研究中土壤有机碳含量随开垦年限的延长而逐渐降低,但甲烷排放量却显著增加,两者呈显著负相关,这可能是因为 CH_4 在局部厌氧微区环境下的排放很少,其主要受土壤通气性的影响,有机碳不是主要限制因子. 由此可见,有关黑土开垦后 CH_4 排放的影响因素及影响机理还需进一步地研究. 培养 7 d 后土壤由微弱的 CH_4 排放源转化为微弱的 CH_4 吸收库,这可能是因为土壤硝化速率随培养的进行逐渐减慢,对氧气的消耗减少,改善了土壤通气环境所致. CH_4 在土壤中的氧化受各种因子的影响,其中铵态氮含量是一个重要因素. 很多研究表明,土壤铵态氮含量越高, CH_4 氧化速率就越低^[33,34],这是因为铵对 CH_4 氧化有竞争性抑制作用^[35]. 本研究中培养 7 d 后 CH_4 氧化速率随着开垦年限的增加逐渐减少,这可能是土壤铵态氮含量随开垦年限的增加而增加所致(表 1).

本研究是在室内培养条件下进行的,所用土壤为风干土. 有研究报道土壤经过干燥和过筛后,释放了一些物理保护性有机物质^[36],为微生物提供了底物和能源,促进了矿化作用的进行^[37]. 此外,干土复水后土壤水势的显著改变诱导了死亡微生物的细胞分解^[38]和细胞内含物质的释放^[39]. 这些死亡微生物释放出来的氨基酸、甘油和含氮化合物等很快会被存活的微生物分解矿化,进而引发碳氮矿化的激发效应^[40]. 但是,干土复水后对土壤碳氮矿化的激发效应只发生在复水后的 16 h, 24 h 之后没有

显著影响^[41],对 N_2O 和 CO_2 排放的激发效应最长持续时间也就是复水后的 4 d 左右^[15]. 笔者在复水后的第 7 d 开始监测气体排放量,因此,由于复水产生的碳氮矿化差异对温室气体排放的影响应该可以忽略不计. 尽管如此,本研究的室内培养试验没有植物的参与,缺乏植物对土壤碳氮养分的竞争,所处的环境条件(如水分和温度)与田间实际条件仍有一定的差异. 因此,针对黑土开垦后温室气体排放的规律及其影响因素还需开展田间原位试验进行深入地研究.

4 结论

黑土开垦后,由于受到人为活动的影响,其理化性质与开垦前(荒地)大不相同,土壤排放温室气体的规律也不同. 随着垦殖年限的增加,土壤净硝化量和 N_2O 排放量显著增加, CO_2 排放量显著降低, CH_4 排放量显著增加. 值得注意的是,本研究是基于室内培养试验结果的分析,与田间实际环境条件有所差异,且培养时间较短. 因此,有关不同开垦年限黑土温室气体排放规律的研究还需开展相关田间原位监测试验加以验证.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing [EB/OL]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>, accessed 17 Jan 2008.
- [2] Chen G C, Tam N F, Ye Y. Summer fluxes of atmospheric greenhouse gases N_2O , CH_4 and CO_2 from mangrove soil in south China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(13): 2761-2767.
- [3] Lan T, Han Y, Roelcke M, *et al.* Sources of nitrous and nitric oxides in paddy soils: nitrification and denitrification [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(3): 581-592.
- [4] Fernández J M, Nieto M A, López-de-Sá E G, *et al.* Carbon dioxide emissions from semi-arid soils amended with biochar alone or combined with mineral and organic fertilizers [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **482-483**: 1-7.
- [5] Tate K R, Walcroft A S, Pratt C. Varying atmospheric methane concentrations affect soil methane oxidation rates and methanotroph populations in pasture, an adjacent pine forest, and a landfill [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **52**: 75-81.
- [6] Jiang C S, Wang Y S, Hao Q G, *et al.* Effect of land use change on CH_4 and N_2O emissions from freshwater marsh in northeast China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(21): 3305-3309.
- [7] Lang M, Cai Z C, Chang S X. Effects of land use type and incubation temperature on greenhouse gas emissions from Chinese and Canadian soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011,

- 11(1): 15-24.
- [8] Senbayram M, Chen R, Budai A, *et al.* N_2O emission and $\text{N}_2\text{O}/(\text{N}_2\text{O} + \text{N}_2)$ product ratio of denitrification as controlled by available carbon substrates and nitrate concentration [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, **147**: 4-12.
- [9] Aguerre M J, Wattiaux M A, Powell J M. Emissions of ammonia, nitrous oxide, methane, and carbon dioxide during storage of dairy cow manure as affected by dietary forage-to-concentrate ratio and crust formation [J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, **95**(12): 7409-7416.
- [10] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状 [J]. *水土保持研究*, 2006, **13**(3): 50-54.
- [11] 关松荫, 孟昭鹏. 不同垦殖年限黑土农化性状与酶活性的变化 [J]. *土壤通报*, 1986, (4): 157-159.
- [12] 宇万太, 沈善敏, 张璐, 等. 黑土开垦后水稳性团聚体与土壤养分的关系 [J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(12): 2287-2291.
- [13] 宋秀丽, 谷思玉, 郭爱玲, 等. 九三农场不同开垦年限农田黑土养分分析 [J]. *东北农业大学学报*, 2010, **41**(2): 66-69.
- [14] Burford J R, Bremner J M. Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, **7**(6): 389-394.
- [15] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(6): 777-787.
- [16] Lang M, Cai Z C, Mary B, *et al.* Land-use type and temperature affect gross nitrogen transformation rates in Chinese and Canadian soils [J]. *Plant and Soil*, 2010, **334**(1-2): 377-389.
- [17] Jiang Q Q, Bakken L R. Nitrous oxide production and methane oxidation by different ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**: 2679-2684.
- [18] Baggs E M, Smales C L, Bateman E J. Changing pH shifts the microbial source as well as the magnitude of N_2O emission from soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, **46**(8): 793-805.
- [19] Xue D, Gao Y M, Yao H Y, *et al.* Nitrification potentials of Chinese tea orchard soils and their adjacent wasteland and forest soils [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(9): 1225-1229.
- [20] 丁瑞兴, 刘树桐. 黑土开垦后肥力演变的研究 [J]. *土壤学报*, 1980, **17**(1): 20-32.
- [21] 汪景宽, 王铁宇, 张旭东, 等. 黑土土壤质量演变初探 I——不同开垦年限黑土主要质量指标演变规律 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2002, **33**(1): 43-47.
- [22] Katipoglu-Yazan T, Cokgor E U, Insel G, *et al.* Is ammonification the rate limiting step for nitrification kinetics? [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 117-125.
- [23] Porter L K, Stewart B A, Haas H J. Effects of long-time cropping on hydrolyzable organic nitrogen fractions in some great plains soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1964, **28**(3): 368-370.
- [24] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, *et al.* Soil properties following cultivation and non-grazing of a semi-arid sandy grassland in northern China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, **75**(1): 27-36.
- [25] Freney J R, Denmead O T, Simpson J R. Nitrous oxide emission from soils at low moisture contents [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1979, **11**(2): 167-173.
- [26] Smith K A. A model of the extent of anaerobic zones in aggregated soils, and its potential application to estimates of denitrification [J]. *Journal of Soils and Science*, 1980, **31**(2): 263-277.
- [27] Kim D G, Mu S G, Kang S, *et al.* Factors controlling soil CO_2 effluxes and the effects of rewetting on effluxes in adjacent deciduous, coniferous, and mixed forests in Korea [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(4): 576-585.
- [28] Li H B, Han X Z, Qiao Y F, *et al.* Carbon dioxide emission from black soil as influenced by land-use change and long-term fertilization [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, **40**(7-8): 1350-1368.
- [29] Shi Y, Chen X, Shen S M. Light fraction carbon and water-stable aggregates in black soils [J]. *Pedosphere*, 2007, **17**(1): 97-100.
- [30] Kammann C, Hepp S, Lenhart K, *et al.* Stimulation of methane consumption by endogenous CH_4 production in aerobic grassland soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(3): 622-629.
- [31] Laudone G M, Matthews G P, Bird N R A, *et al.* A model to predict the effects of soil structure on denitrification and N_2O emission [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **409**(1-2): 283-290.
- [32] Megonigal J P, Guenther A B. Methane emissions from upland forest soils and vegetation [J]. *Tree Physiology*, 2008, **28**(4): 491-498.
- [33] Jassal R S, Black T A, Roy R, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on soil CH_4 and N_2O fluxes, and soil and bole respiration [J]. *Geoderma*, 2011, **162**(1-2): 182-186.
- [34] Dong H B, Yao Z S, Zheng X H, *et al.* Effect of ammonium-based, non-sulfate fertilizers on CH_4 emissions from a paddy field with a typical Chinese water management regime [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(5): 1095-1101.
- [35] Zhang Y, Zhang H H, Jia B, *et al.* Landfill CH_4 oxidation by mineralized refuse: Effects of NH_4^+ -N incubation, water content and temperature [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **426**(1): 406-413.
- [36] Lundquist E J, Jackson L E, Scow K M. Wet-dry cycles affect DOC in two California agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(7): 1031-1038.
- [37] Apple T. Non-biomass soil organic N: the substrate for N mineralization flushes following soil drying-rewetting and for organic N rendered CaCl_2 -extractable upon soil drying [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(10-11): 1445-1456.
- [38] Harrison-Kirk T, Beare M H, Meenken E D, *et al.* Soil organic

- matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **57**: 43-55.
- [39] Halverson L F, Jones T M, Firestone M K. Denitrification hysteresis during wetting and drying cycles in soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **52**: 1626-1629.
- [40] Kieft T L, Soroker E, Firestone M K. Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soil is wetted [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**(2): 119-126.
- [41] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(2): 339-347.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryIAc Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 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