

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素

汤洁, 方天儒, 侯克怡, 赵仁竹, 梁爽

(吉林大学环境与资源学院, 长春 130012)

摘要: 以吉林省前郭盐碱水田区为研究对象, 采用野外采样和小区试验相结合的方法, 监测水稻生长期土壤温室气体 (CH_4 和 N_2O) 排放、土壤 pH 和土壤有机碳 (SOC) 变化, 分析水田温室气体排放规律及其影响因素。结果表明, 水田 N_2O 排放季节变化特征明显并呈现 3 个峰值, 肥料的施入提供了更多的反应底物, 对水田 N_2O 的排放量影响显著。在淹水条件下, N_2O 的主要来源于反硝化过程, 而排水后, 硝化作用则占据了主导地位。 CH_4 排放呈现单峰, 在水稻生长旺盛的分蘖期, 稻田较深水层以还原环境为主, 为产生 CH_4 的微生物提供了适宜的条件, 进而导致 CH_4 排放呈高峰值; 土壤 pH 对 N_2O 和 CH_4 排放的影响不明显, 但土壤 SOC 含量与 CH_4 的排放规律呈现显著正相关。

关键词: 盐碱水田; CH_4 ; N_2O ; 土壤 pH; SOC

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4727-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.041

Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years

TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, ZHAO Ren-zhu, LIANG Shuang

(College of Environment and Resource, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: With the method of combining field sampling and plot test, we took saline-alkali paddy field of Qianguo county, Jilin province as an investigation object. According to the nature of soil in the area, we monitored CH_4 and N_2O which released from soil during rice growth period and tested the soil pH and soil organic carbon to analyze the law and reasons of greenhouse gas emission in the paddy fields. The results showed that N_2O emission from paddy fields presented three peaks with distinct seasonal patterns. Application of fertilizer provided additional reactive substrate, which affected N_2O emission significantly. Under flooding conditions, the main source of N_2O is a denitrification process, while after drainage, nitrification was the predominance. CH_4 emission showed a single peak at rice tillering stage when rice grew vigorously. That deoxidation condition dominated in the deep water layer in the paddy fields provided suitable conditions for CH_4 producing microorganisms, which result in the emergence of CH_4 emission peak. The pH doesn't have an obvious influence on CH_4 and N_2O , while SOC content in soil and pattern of CH_4 emission showed a significantly positive correlation.

Key words: saline-alkali paddy field; CH_4 ; N_2O ; soil pH; SOC

全球气候变化及其引发的环境问题已经成为全世界关注的焦点。由人类活动所引起的大气温室气体浓度急剧增加已成为全球变化的最主要因素^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 第五次评估报告认为, 2003 ~ 2012 年平均温度比 1850 ~ 1900 年平均温度上升了 0.78℃^[2]。我国作为世界上一个重要的农业大国, 农业生产排放的 CH_4 和 N_2O 对全球温室效应贡献程度正在引起人们的普遍关注^[3], 通过对农田土壤中温室气体排放规律的研究, 分析其影响因素, 有助于掌握温室气体排放规律机制, 针对性地提出减排措施。

近年来, 稻田土壤温室气体排放规律及影响因素获得了极大关注, 学者以中国东北的三江平原湿地、西南山地丘陵区的冬水田为研究区, 开展了土壤理化性质、田间管理措施对稻田温室气体排放的影响研究, 取得了大量的研究成果^[4-6]。以往关于水田土壤温

室气候排放的研究, 极少涉及盐碱土区, 缺少对影响因素的量化分析。本文进行多位点采集, 针对水田开发的时空变化引起的温室气体排放量随开发年限的变化展开研究。吉林西部位于近百年来气候变暖显著的东北地区, 在经历了多次沙漠化和盐碱荒漠化的正逆演变过程, 形成了大面积的盐碱土沉积, 为世界三大盐碱地集中分布区之一。研究区水稻种植历史悠久, 大规模的水田开发始于 20 世纪的 50、60 年代, 经过 50 a 的开发, 现已形成了前郭尔罗斯水田灌区, 是东北地区重要的粮食农业生产基地^[7]。2000 年以来, 为了应对日趋严重的土壤盐碱化, 该区引嫩江水改造盐碱土种植水稻。本文以吉林前郭盐碱水田区

收稿日期: 2014-03-25; 修订日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871088, 51179073); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20090061110057)

作者简介: 汤洁 (1957 ~), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生态环境理论与技术, E-mail: tangjie@jlu.edu.cn

为研究对象,通过野外调查和小区试验,系统监测土壤理化性质和温室气体的排放量,分析水田温室气体排放规律及影响因素,以期为进一步评估水田开发对全球变暖的影响提供科学依据.

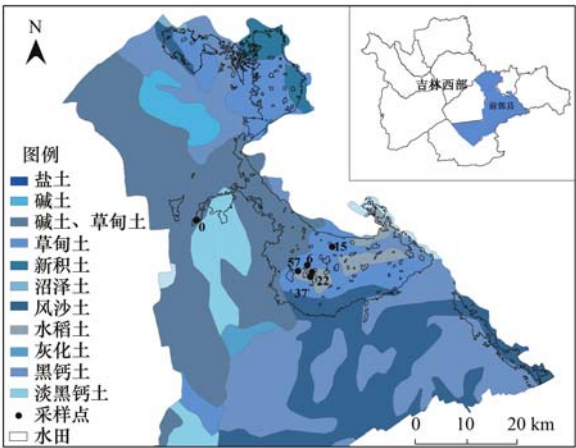
1 材料与方法

1.1 土壤采样点位及测试

吉林省前郭尔罗斯蒙古族自治县(简称前郭),北靠嫩江,东临第二松花江,地理坐标为东经123°38′~125°17′,北纬44°17′~45°28′. 该区为典型的半湿润半干旱季风气候,春季多风干燥;夏季高温多雨;秋季日照充足;冬季低温漫长. 该区属于生态脆弱带,根据第二次土壤普查资料,该区主要的土壤类型为淡黑钙土、草甸土、风沙土、黑钙土、碱土和栗钙土等,占据研究区总面积的90%以上.

本试验选取的研究对象为连续开发时间较长的前郭县水田,土壤类型分别为草甸土、淡黑钙土和水稻土,采样点分布见图1. 因水田开发年限不同,土壤理化性质亦发生变化,进而影响温室气体的排放. 为此,依据实地调研和遥感影像解译结果确定水田开发年限,2012年5月赴前郭采集了开发年限分别为0(指未开发的盐碱土壤)、6、15、22、37、和57a水田的0~30cm表层土壤样品. 采集土样

过程中,在各采样点选取1块5 m×5 m样地,去除地表植被,装入标记好的采样布袋中带回实验室. 一部分土壤用于土壤理化性质分析,土壤样品自然风干后,做研磨过筛处理,采用常规方法测定土壤有机质和pH,其中土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法(表1),土壤pH采用电位测定法. 每个土样设置3个平行样品.



图中编号为开发年限,单位:a
图1 前郭土壤类型及采样点分布示意
Fig. 1 Soil types and sampling point distribution location diagram in Qianguo

表1 吉林西部第二次土壤普查数据

Table 1 Second soil census data of the western part of Jilin province

开发年限 /a	土壤类型	有机质 ¹⁾ /%	黏粒含量 /%	pH	容重
0	盐碱土	1.96~2.97	0.23~0.28	7.60~8.30	1.10~1.30
15	淡黑钙土	1.76~2.30	0.20~0.25	8.10~8.40	1.30~1.50
22、37、57	水稻土	1.07~2.11	0.20~0.30	7.90~8.70	1.03~1.30

1) SOC含量由有机质含量除以1.724求得

1.2 气体样品采集和分析

小区试验地点选在吉林大学校园内的一片平坦空地,长春年平均气温4.8℃,最高温度39.5℃,日照2688h;年平均降水量522~615mm,与研究区的气象条件相近,适宜水稻种植与生长. 在小区内挖取100 cm×100 cm×60 cm的坑,在土坑底部铺设塑料布后,将从采样点带回的水田土壤填进坑内灌水,2012年5月26日开始种植水稻,底槽内共9株,6块样地采取与前郭当地相同的水肥管理模式进行处置. 水分管理上,水稻返青期水深保持在3~4cm,分蘖初期1cm左右,分蘖后期及拔节孕穗期3cm左右,抽穗开花期则采取干湿交替,且以湿为主. 播种前施用基肥,返青分蘖肥在插秧后的第3天施

入;孕穗肥与7月初和7月末分两次施入. 于水稻生长期利用静态箱-气相色谱法进行土壤温室气体的采集测试,箱体大小为50 cm×50 cm×50 cm,采样工作固定在09:00~11:00,观测频率为每周两次,计算通量的两次间隔采样在40 min内进行. 采集气体时有3个重复试验. 样品采集好后用带有三通阀的50 mL注射器注入真空气体采样袋中. 带回实验室后用气相色谱仪分析CH₄、N₂O的浓度[最终以mg·(m²·h)⁻¹计]. 本试验收集水田生长期土壤CH₄、N₂O气体排放数据共186个.

1.3 气体排放通量计算

气体排放通量的定义为单位时间、单位面积观测箱内排放的被测气体质量的变化,可用下列公式表示:

$$F = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} = \frac{\rho \cdot V \cdot \Delta c}{A \cdot \Delta c} = \rho \cdot h \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad (1)$$

式中, F 为被测气体通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; A 为观测箱所包围的土壤面积, m^2 ; $\Delta m / \Delta t$ 为观测箱内被测气体质量随时间的变化, $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$; V 为观测箱的容积, m^3 ; ρ 为箱内气体浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; h 为采样箱高度, cm ; $\Delta c / \Delta t$ 为被测气体在观测时间内浓度随时间的变化, $\text{mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$.

下文中将要出现的平均排放通量和季节累积量的计算公式分别为:

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n} \quad (2)$$

$$F_s = \bar{F}_s \times D_s \times 24 \quad (3)$$

式中, $\bar{F}$ 为气体平均排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; F_i 为采集日气体排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; n 为气体采集天数, d ; F_s 为气体季节累积量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; $\bar{F}_s$ 为气体季节排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; D_s 为季节总天数, d .

2 结果与分析

2.1 水稻不同生长期 CH_4 排放规律

H_2/CO_2 还原和乙酸 (CH_3COOH) 发酵是稻田 CH_4 产生的主要途径. Conrad^[8] 研究表明, 理论上, 由乙酸产生的 CH_4 [$\text{CH}_4(\text{Ac})$] 占总 CH_4 产生量的 67%, 而由 H_2/CO_2 还原产生的 CH_4 [$\text{CH}_4(\text{CO}_2/\text{H}_2)$] 占总 CH_4 产生量的 33%. 研究区土壤以盐碱土为主, 重碳酸盐含量高, 在水稻生长的分蘖后期及孕穗期水层较深, 形成还原条件, 使重碳酸盐释放 CO_2 , 形成 H_2/CO_2 产甲烷前体. 另外逐年累积的根系腐败物均为甲烷的产生提供了基质, 为微生物提供了适宜的生存条件, 进而造成 CH_4 排放峰值的出现.

从图 2 中可以看出, 在整个观测期内, CH_4 呈现出明显的单峰排放规律, 且峰值均集中在 7 月的水稻分蘖盛期和 8 月的孕穗期, 返青和分蘖初期的排放通量很低, 继而在抽穗期出现回落的趋势, 成熟期趋于稳定.

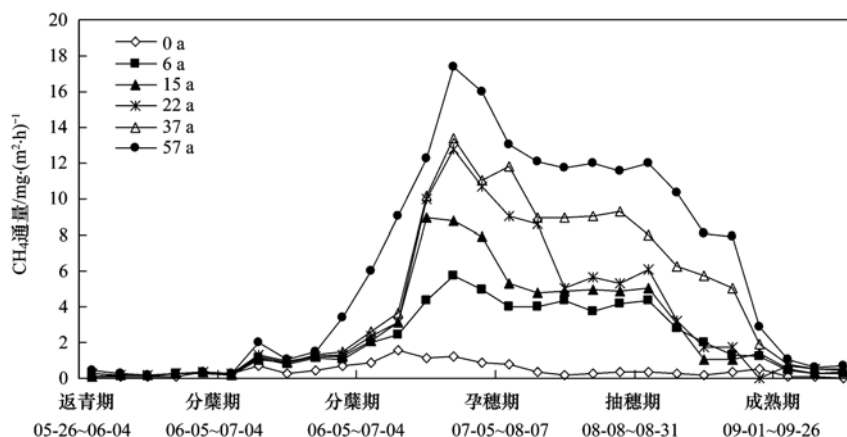


图 2 生长期 CH_4 排放规律

Fig. 2 CH_4 emission law during rice growth period

图 3 看出不同开发年限的水田 CH_4 平均排放通量季节变化特征较为一致, 水稻种植的初期和成熟期 CH_4 的排放量很小, 孕穗期和抽穗期 CH_4 平均排放通量较高, 变化均保持较好的同步性. 图 4 中随着开发年限的增加, 水田 CH_4 累积排放量也呈现明显升高的趋势, 每个开发年份在水稻不同生育期的累积排放量波动基本一致. 未开发的水田 CH_4 排放量与其他几个开发年限相差很大, 总体维持在一个比较低的水平.

2.2 水稻不同生长期 N_2O 排放规律

土壤中 N_2O 的产生主要是在微生物的参与下, 通过硝化和反硝化作用共同完成的^[9].

研究中发现已开发的水田 N_2O 的排放趋势相似. 从图 5 中可以看出在水稻的生长期间水田 N_2O 的排放趋势基本出现 3 次峰值, 具有明显的季节变化, 成熟期 N_2O 的排放回落到较低水平. 相对于未开发的水田, 57 a 的土壤具有较低的氧化亚氮排放水平, 开发 57 a 的水田的峰值在生长前期呈滞后性, 在后期呈超前性. 可能由于尚未种植过水稻的盐碱土壤的通透性差, 不能有效地利用化学肥料, 因此, 返青肥后 N_2O 排放峰值提前出现.

图 6 中未开发的水田在不同的生育期 N_2O 均保持较高的平均排放通量, 其他几个开发年限的水田在相应的生育期 N_2O 排放平均通量相差不明显, 从

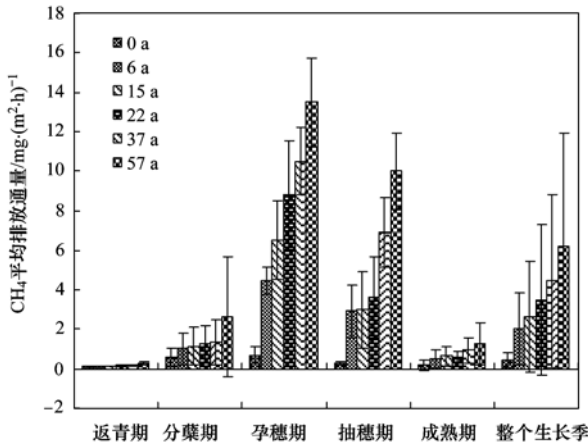


图3 不同开发年限不同生育期 CH₄ 平均排放通量

Fig. 3 Average emission flux of CH₄ during the growth stage for different development periods

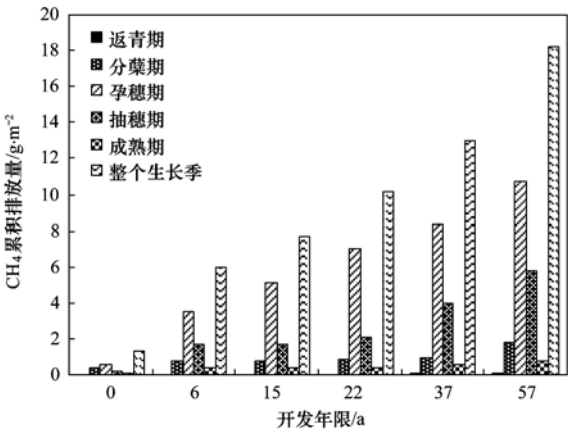


图4 不同开发年限不同生育期 CH₄ 累积排放量

Fig. 4 Accumulated emission flux of CH₄ during the growth stage for different development periods

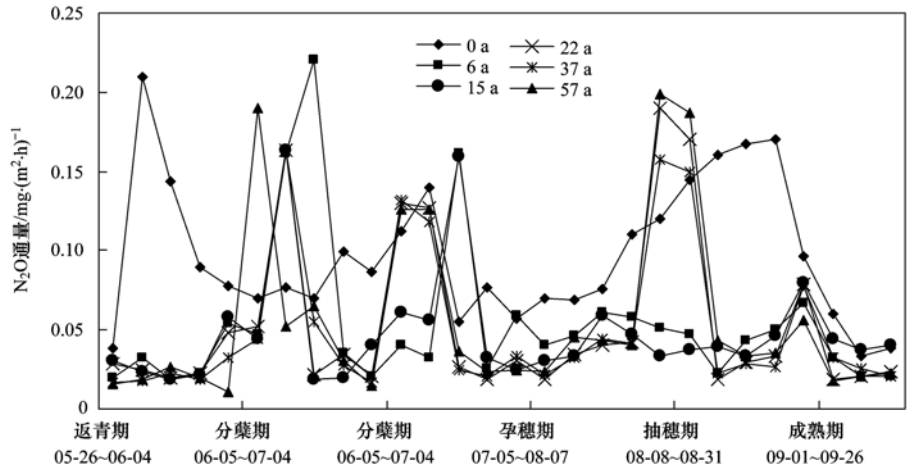


图5 生长期N₂O排放规律

Fig. 5 N₂O emission law during the rice growth period

各生育期角度来看,分蘖期和抽穗期的N₂O的平均排放通量稍有升高.图7可以明显看出已开发的水田N₂O的累积排放量相似,而未开发的水田N₂O的累积排放量在水稻生长各时期均处于最高.

3 讨论

3.1 水稻生长期 CH₄ 和N₂O排放差异分析

图8为开发年限为57a的水田土壤温室气体排放曲线,该阶段水田土壤性质已经成熟稳定,因此选取它作分析.对稻田CH₄和N₂O排放结果的对比表明,在返青期和水稻成熟后的落干期,稻田几乎不排放CH₄,但排放少量的N₂O;在水稻生长旺盛的分蘖期,CH₄的大量产生和排放,而排放少量的N₂O.主要是在观测期内水分和施肥管理^[10~13]对稻田CH₄和N₂O两者之间的排放季节变化产生了影响.

CH₄ 排放峰值的出现主要是由于该时段气温高,土壤中微生物活性较高,水稻根系分泌物为产CH₄菌提供了充沛的碳源和能源;另外,稻田较深的水层为土壤提供了良好的厌氧条件,加上水稻植株通气组织已相当发达,有利于CH₄的大量产生和排放.

N₂O的排放量较小,一般峰值出现在施肥后和降雨后.第一峰值通常出现在返青分蘖肥施后,施用时直接撒于水层下的土壤表面,而非翻施于表层或中层土壤中^[14],微生物对肥料的利用率低,因此有较高的N₂O排放.第二次峰值出现于水稻分蘖期的旺盛阶段,由于孕穗肥的施入,N₂O排放量都有了大幅的上升.从图8中曲线峰值出现的时间看,由于氮肥为微生物提供了更多的反应底物,每次施肥后N₂O排放都会出现峰值,因此,肥料的施入对水

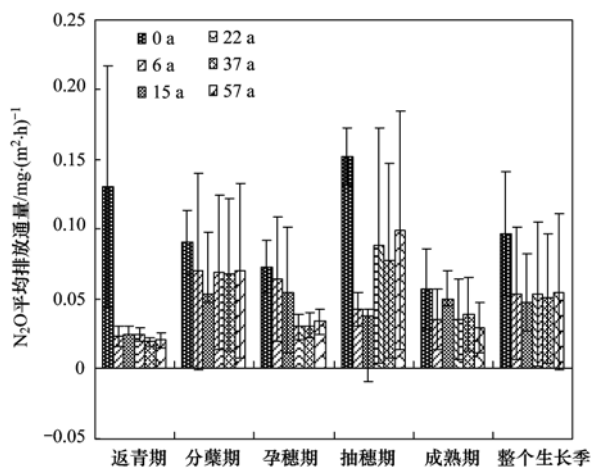
图6 不同开发年限不同生育期 N_2O 平均排放通量

Fig. 6 Average emission flux of N_2O during the growth stage for different development periods

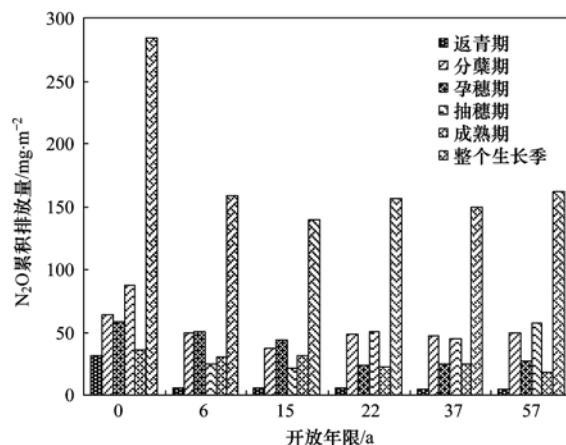
图7 不同开发年限不同生育期 N_2O 累积排放量

Fig. 7 Accumulated emission flux of N_2O during the growth stage for different development periods

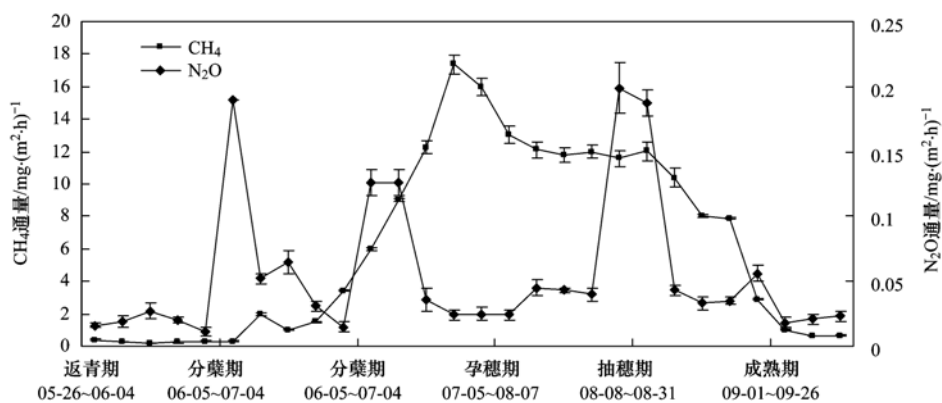
图8 生长期 CH_4 和 N_2O 排放规律对比

Fig. 8 Comparison of N_2O and CH_4 emission law during the rice growth period

田 N_2O 的排放量影响显著. 第三次峰值出现在抽穗期,这主要是由于8月中旬降水量少,温度相对较高的缘故. 水分条件在一定程度上影响着水田 N_2O 的排放,在淹水条件下, N_2O 的主要来源集中在反硝化的过程,而排水之后,硝化作用重新占了主导地位^[15],因此在排水后出现了一次较小的波动. 这一现象与江苏昆山的试验田水分管理对 N_2O 排放的影响研究结果一致^[16]. 但有日本学者研究认为在成熟期排水后收获水稻,翻耕土层会形成 N_2O 排放的峰值^[17].

从微生物的角度来看,参与 CH_4 产生的微生物主要包括发酵细菌、产氢产乙酸细菌和产甲烷菌3类功能群. 分蘖前期,发酵细菌的代谢活动为反硝化作用提供可利用的C源,在硝化、反硝化细菌的共同作用下,稻田大量排放 N_2O . 由于此阶段没有形成良好的土壤Eh等环境条件,不利于产氢产乙酸细菌和

产甲烷细菌的生长繁殖,稻田不发生 CH_4 排放.

在稻田淹水后,产生 CH_4 的微生物菌群数量大幅度上升导致 CH_4 大量排放,在此期间硝化、反硝化细菌数量并不减少,但淹水造成的厌氧环境可以抑制硝化细菌及甲烷氧化菌的活性^[18],反硝化作用则由于Eh降至0 mV以下,代谢产物主要以 N_2 为主. 因此, N_2O 的排放较少.

3.2 影响因子

研究表明,影响水田温室气体排放的因素有很多,如土壤质地、土壤水分、土壤温度、氧化还原电位(Eh)等直接影响土壤微生物种类、数量及其生理生化过程,进而影响温室气体排放^[19~22]. 前郭水田多为盐碱地改造为水田,为碱性土壤;采样点的土壤开发年限跨度较大,且由于水田土壤具有一定的固碳作用,这与温室气体排放二者之间的平衡关系也值得探讨,因此,本研究选取了pH和SOC两

个因素进行分析.

3.2.1 土壤 pH

土壤 pH 值是酸化累积的过程作为重要的影响因子和土壤 Eh 共同控制着 CH_4 形成的微生物过程^[23]. 然而, 土壤 pH 对 N_2O 净排放的影响十分复杂. 它不仅影响反硝化速率, 而且也影响气态产物的分配比例^[24]. 对于硝化作用来说, 在 pH 值为 3.4 ~ 8.6 范围内, N_2O 的释放量与土壤的 pH 值呈正相关关系^[25].

从图 9 中明显看出, 未开发的水田土壤 pH 值超过了 9, 此时 CH_4 峰值排放通量不足 $1 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 目前已有研究表明, 当土壤 pH 值超

过 8.75 时, 土壤排放 CH_4 的能力几乎消失^[26]. CH_4 排放的多少在很大程度上取决于甲烷产生菌的活性, 在厌氧条件下, 甲烷菌可以分解土壤中的有机质, 产生甲烷, 而 CH_4 菌的最适 pH 值在 6.9 ~ 7.5 之间, 超出该范围, 微生物的活性就会显著降低, 使得温室气体的排放大幅度减少^[27]. 前郭水田较高的 pH 和盐碱含量抑制甲烷产生菌的生长和发育, 最终对 CH_4 的排放产生影响. 随着水田的开发, 大量引水灌溉压碱, 使土壤 pH 值逐渐降低, 并保持在 8 左右. 土壤中逐渐有充足的产甲烷基质, 形成更适宜产甲烷菌的生长环境, 因此, 相对未开发的盐碱土而言, 其他开发年限的 CH_4 排放量较高.

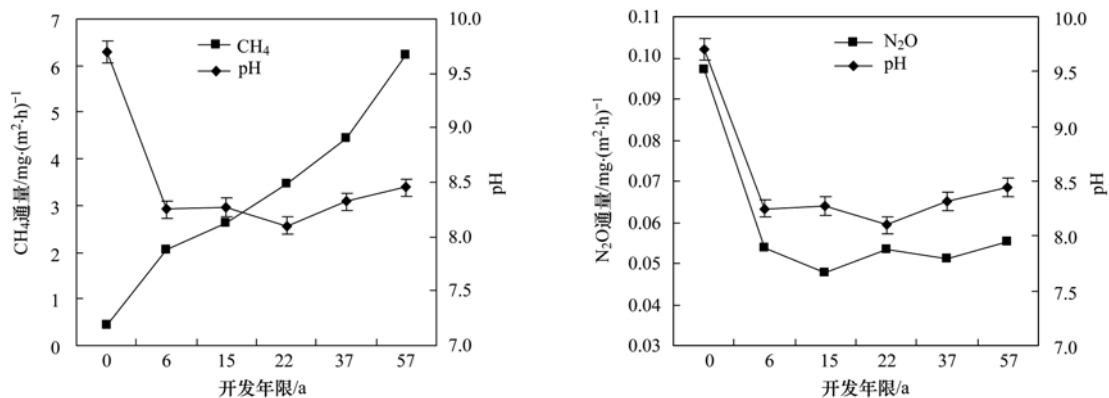


图 9 不同开发年限 CH_4 和 N_2O 排放与 pH 变化

Fig. 9 pH impacts on N_2O and CH_4 emission in different developed soils

未开发的水田 N_2O 的排放呈现最高值. 从图 5 中曲线波动来看, 土壤的 N_2O 排放量和土壤 pH 值变化规律相近似. 若仅考虑单因子 pH 的影响, 开发年限最长的水田土壤 (57a) 其 N_2O 的排放量理论上应该最大, 这与实测的结果存在一定的差别, 造成上述现象的原因, 可能是因为尚未种植过水稻的土壤与其他开发年限的土壤相比通透性较差, 肥料难以进入土壤深层, 在降低利用率的同时为土壤表层微生物进行硝化和反硝化作用提供了便利条件, 有利于土壤中产生的 N_2O 向大气扩散.

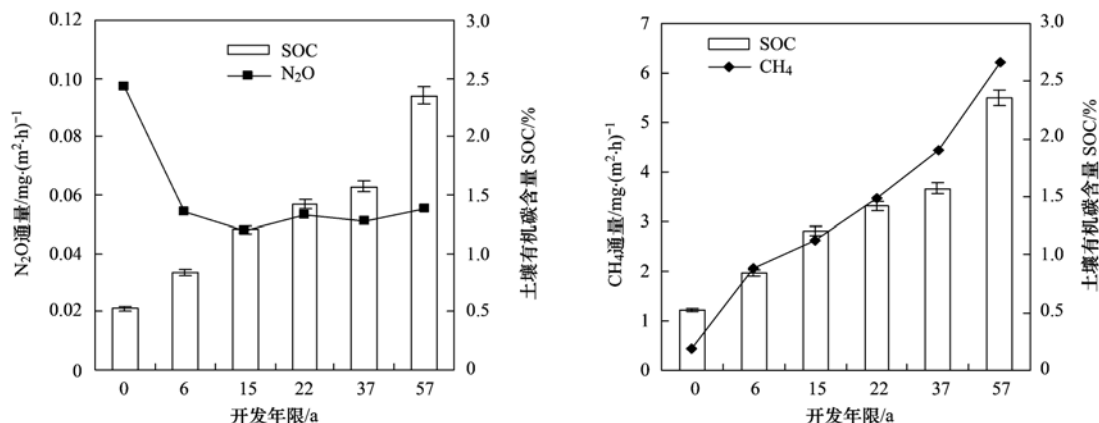
3.2.2 土壤有机质

土壤有机质是土壤呼吸的主要碳源, 对土壤温室气体排放有重要的影响. 土壤活性有机碳是微生物生长的速效基质, 其含量高直接低影响土壤微生物的活性, 从而影响温室气体的排放^[28].

从图 10 中可以看出, 对于 SOC 含量而言, 随着开发年限增加, 土壤有机碳逐渐积累, 含量呈上升

趋势, 对于 N_2O 而言, 土壤所能提供的反应底物较少, 较高的盐碱成分可能阻碍了微生物对土壤有机质中的矿化物质的利用, 而土壤中进行硝化和反硝化作用的底物绝大部分来自于水稻生长期间所施入的氮肥, 因此, 水田土壤 N_2O 的排放并没有因为 SOC 含量的不同而产生规律性变化. 试验表明, 反硝化作用与 SOC 含量相关, 有机质含量高可提高反硝化作用, 而有机物质的 C/N 比也会影响产物中 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 比^[29, 30].

CH_4 的排放量和 SOC 含量的变化趋势保持较好的一致性, 即 CH_4 的排放量随着 SOC 的增加而增加. 这主要是因为水田灌水后, 由于水层阻碍了空气和水田土壤直接的正常气体交换, 造成了土壤的缺氧环境, 此时, 有机碳厌氧快速分解生成多种还原性物质, 加速稻田氧化还原电位 (Eh) 的下降, 当 Eh 值较低时不仅提高了甲烷产生菌的活性, 而且有助于作物通气组织的形成, 为甲烷的产生与排放提供了适宜的环境条件.

图 10 不同开发年限 CH₄ 和 N₂O 排放与土壤 SOC 变化Fig. 10 SOC impacts on N₂O and CH₄ emission in different developed soils

4 结论

(1) 前郭水田水稻生长期 CH₄ 呈现出明显的单峰排放规律, 峰值出现在 7 月的水稻分蘖盛期和 8 月的孕穗期。该阶段深水层形成还原条件, 较高的重碳酸盐含量形成更多的 H₂/CO₂ 产甲烷前体以及充沛的基质环境, 形成 CH₄ 排放峰值。

(2) 水稻的生长期间水田 N₂O 的排放趋势基本出现 3 次峰值, 土壤中进行硝化和反硝化作用的底物绝大部分来自于水稻生长期间所施入的氮肥。

(3) CH₄ 的排放量随着开发年限的增加呈上升趋势, 与土壤 SOC 呈正相关; 未开发的水田 N₂O 的排放量相比于其他开发年限的水田在水稻生长各时期均处于最高, 但土壤 pH 和 SOC 均与 N₂O 排放的相关性不明显。

参考文献:

- [1] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. 中国农业气象, 2002, **23** (4): 47-51.
- [2] Thomas S, Qin D H, Gian-Kasper P, *et al.* IPCC. Climate change 2013: The Physical Science Basis [R]. Stockholm: Cambridge University Press, 2013. 3-7.
- [3] 张庆国, 李鹏飞, 徐丽, 等. 皖中沿江平原水稻田 CH₄ 和 N₂O 排放估算及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2012, **43** (2): 212-218.
- [4] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2012, **33** (6): 1979-1986.
- [5] 马秀梅, 朱波, 杜泽林, 等. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24** (6): 1199-1202.
- [6] 王毅勇, 陈卫卫, 赵志春, 等. 三江平原寒地稻田 CH₄、N₂O 排放特征及排放量估算[J]. 农业工程学报, 2008, **24** (10): 170-176.
- [7] 徐小明, 汤洁, 李昭阳, 等. 吉林西部水田时空变化与固碳效应研究[J]. 第四纪研究, 2011, **31** (2): 370-377.
- [8] Conrad R. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1999, **28** (3): 193-202.
- [9] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al.* IPCC, Climate Change 2001 [R]: The Scientific Basis. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2001. 38-41.
- [10] 李虎, 王立刚, 邱建军. 农田土壤 N₂O 排放和减排措施的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (5): 1-5.
- [11] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, **22** (8): 1432-1437.
- [12] 杜睿, 周宇光, 王庚辰, 等. 土壤水分对温带典型草地 N₂O 排放过程的影响[J]. 自然科学进展, 2003, **13** (9): 939-945.
- [13] 傅志强, 朱华武, 陈灿, 等. 双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放特征及品种筛选研究[J]. 环境科学, 2012, **33** (7): 2475-2481.
- [14] 陈卫卫, 张友民, 王毅勇, 等. 三江平原稻田 N₂O 通量特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26** (1): 364-368.
- [15] 尹娟, 费良军, 田军仓, 等. 水稻田中氮损失研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, **21** (6): 189-191.
- [16] Yang S H, Peng S Z, Xu J Z, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from paddy field as affected by water-saving irrigation [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2012, **53-54**: 30-37.
- [17] Tsuruta H, Kanda K, Hirose T. Nitrous oxide emission from a rice paddy field in Japan [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, **49** (1-3): 51 - 58.
- [18] 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰, 等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放关系及其微生物学机理和一些影响因子[J]. 应用生态学报, 1997, **8** (3): 270-274.
- [19] Khalil M A K, Shearer M J. Decreasing emissions of methane from rice agriculture[J]. International Congress Series, 2006, **1293**: 33-41.
- [20] 秦小光, 蔡炳贵, 吴金水, 等. 土壤温室气体昼夜变化及其环境影响因素研究[J]. 第四纪研究, 2005, **25** (3): 376-

- 388.
- [21] Smith K A, Ball T, Conen F, *et al.* Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes [J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, **54**(4): 779-791.
- [22] 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 等. 不同土地利用方式下冬季 N_2O 排放及其影响因素[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2968-2974.
- [23] 齐玉春, 董云社, 章申. 农业微环境对土壤温室气体排放的影响[J]. *生态农业研究*, 2000, **8**(1): 45-48.
- [24] Knowels R. Denitrification[J]. *Microbiological Reviews*, 1982, **46**(1): 43-70.
- [25] Haynes R J. Mineral nitrogen in the plant-soil system[J]. *Soil Science*, 1987, **144**(4): 302-303.
- [26] 许炳雄, 卢巨祥, 傅桂芬, 等. 广州地区稻田 CH_4 排放通量研究[J]. *环境科学研究*, 1997, **104**(4): 10-14.
- [27] 李海防, 夏汉平, 熊燕梅, 等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. *生态环境*, 2007, **16**(6): 1781-1788.
- [28] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(11): 1412-1417.
- [29] Guo J P, Zhou C D. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, **142** (2-4): 270-277.
- [30] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 792-800.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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