

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 陈耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖骁, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
喹啉降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蚱及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素

田琳琳^{1,2,3}, 朱波^{1,2*}, 汪涛^{1,2}, 赵原^{1,2,3}, 董宏伟^{1,2}, 任光前^{1,2}, 胡磊^{1,2,3}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 农田周边的排水沟渠不仅是农田养分迁移的重要通道, 也是氮转化非常活跃的场所和潜在的氧化亚氮(N_2O)排放源. 本研究以川中丘陵区农田源头沟渠为对象, 在 6~9 月的玉米季(雨季), 采用静态箱-气相色谱法对其 N_2O 排放开展原位观测. 结果表明, 在整个观测期有自然植被覆盖的沟渠生态系统(V) N_2O 累积排放量(以 N 计)为 $0.43 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而无自然植被覆盖的对照处理(NV, 代表沟渠中的沉积物-水界面系统)则为 $0.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 该沟渠生态系统的 N_2O 平均排放通量 [$14.7 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 已达到本地区玉米农田直接排放的水平, 表明玉米季中农田源头沟渠是不容忽视的 N_2O 源. 川中丘陵区雨季丰富的降雨径流携带大量农田硝态氮进入沟渠, 促进 N_2O 产生和排放, 此外, 植物的存在可大幅度提高农田沟渠的 N_2O 间接排放系数(V: 0.05% vs. NV: 0.01%). 由于本研究的 N_2O 间接排放系数远低于 2006 年 IPCC 建议的缺省值(0.25%), 如果仅采用 IPCC 缺省值来估算本地区沟渠生态系统的 N_2O 排放, 可能导致较大误差. 未来研究中应对原位观测多予以重视, 为进一步修正其缺省值提供理论依据.

关键词: 沟渠生态系统; N_2O ; N_2O 间接排放系数; 降雨; 硝态氮; 氮循环

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-2074-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611163

Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin

TIAN Lin-lin^{1,2,3}, ZHU Bo^{1,2*}, WANG Tao^{1,2}, ZHAO Yuan^{1,2,3}, DONG Hong-wei^{1,2}, REN Guang-qian^{1,2}, HU Lei^{1,2,3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Agricultural headwater ditches, the important locations for retaining and transforming nitrogen derived from the adjacent farmlands, have been regarded as the potential source of nitrous oxide (N_2O) emission. In this study, N_2O emissions from a typical agricultural ditch in the Hilly Area of Central Sichuan Basin, were observed by closed static chamber-GC technique during the maize season (rainy season), from June to the end of September. During the study period, cumulative N_2O emissions in the sediment-water interface without vegetation (NV) and the ditch ecosystem with natural vegetation (V) were 0.07 and 0.43 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Meanwhile, the mean N_2O flux from the agricultural headwater ditch ecosystem [$14.7 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] was comparable to the magnitude of direct N_2O flux from the maize cropland in this region. Nitrate concentration in the overlying water could be the main factor governing N_2O emission from the ditch, especially in the rainy season. The existence of vegetation increased the indirect N_2O emission factor (V: 0.05% vs. NV: 0.01%). The indirect N_2O emission factor from this field investigation was much lower than the default value proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006) for assessing indirect agricultural N_2O emissions. More attention should be paid to *in situ* measurements to reduce uncertainty of N_2O estimation calculated by only applying the default value for emission factor from the IPCC.

Key words: ditch ecosystem; N_2O ; indirect N_2O emission factor; rain; nitrate; nitrogen cycling

农田源头沟渠是连接农田与河流湖泊等水生态系统的重要水文通道, 可汇集和传输大量径流、泥沙以及其携带的可溶性碳氮等营养物质^[1,2]. 与此同时, 农业源头沟渠还具有较高的表面-体积比、高的生物活性以及有利于微生物反硝化脱氮的沉积物

收稿日期: 2016-11-21; 修订日期: 2016-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271321); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2012CB417101)

作者简介: 田琳琳(1987~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为农业面源污染, E-mail: tianlin025@163.com

* 通信作者, E-mail: bzhu@imde.ac.cn

环境^[3~5],从而使其成为氮素等污染物截留、生物消减和氮素转化等生物地球化学作用活跃的重要场所^[6,7]。随着农田生态系统中氮肥的长期持续施用及相当部分的氮素损失(淋溶、地表径流),越来越多的活性氮被源源不断地迁移至水生态系统中^[8~11]。有研究发现,农田肥料氮迁移至沟渠等水体中的氮素会有相当一部分经过硝化和反硝化等作用转化为氧化亚氮(N_2O)而释放到大气中^[12~14],这部分 N_2O 则被称之为农业肥料氮的 N_2O 间接排放^[15,16]。经估算,该间接排放约占整个农业 N_2O 排放总量的 25%^[10,15]。Beaulieu 等^[17]指出,由河网中溶解性无机氮转化而排放的 N_2O 可占全球人为排放的 10%。作为可破坏臭氧层的强效温室气体^[18], N_2O 在大气中的含量自工业革命以来持续增加,2011 年已达到 324×10^{-9} ^[19]。对于陆、水生态系统过渡地带的农业沟渠系统,其活跃的氮转化和 N_2O 的排放对全球变化的影响不容忽视^[12~14]。然而,与农田土壤 N_2O 直接排放相比, N_2O 间接排放的研究则相对不足^[15,16]。此外,IPCC 建议的肥料氮的 N_2O 间接排放系数的精度也有待商榷^[12,16],这关系到农业 N_2O 源的全球估算^[10],应尽可能开展更多的原位监测研究从而对其进行修正^[13,16]。同时,农田排水沟渠中的可溶性氮素浓度具有较强的时空变异性,进而影响 N_2O 的排放^[5,6],这进一步说明了原位监测的必要性。

四川盆地中部紫色土丘陵区(川中丘陵区)是我国西南地区 and 长江上游最重要的农区^[20]。有研究表明,该区域每年农田通过径流、淋洗和泥沙等途径损失的氮素约高达 $44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[21],同时,该地区 85% 的壤中流硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)浓度高于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[22,23],部分地下水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度也长期高于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[11],已造成不容忽视的小流域农业非点源 N 污染^[24]。该区域地表水已呈现明显以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主的富营养化特征^[20],小流域中氮素迁移的尺度效应可能导致非点源氮污染的异地效应^[22~24],从而加剧长江三峡上游及其水体污染^[20,21]。Hasegawa 等^[14]认为,含有高浓度 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和活性碳的农业小河流中可发生强烈的反硝化作用,从而导致较高的 N_2O 排放。川中丘陵区农田排水沟渠纵横交错、广泛存在、常年积水,但一般以小流域为主,汇水面积不大、水深较浅。该地区农田中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失迁移主要集中在雨季(主要为玉米季)^[23],常规施肥下玉米季农田(施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)中基于作

物产量的氮素损失量约占其轮作全年[小麦-玉米轮作,施氮量为 $280 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]的 94%^[25],且玉米季农田中氮损失主要以径流损失为主^[25,26]。同时,降雨也引起土壤中可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)随壤中流、土壤侵蚀等迁移出农田^[27,28]。因此,农田源头沟渠这一排污通道^[29]在雨季玉米种植期间内可接收大量周边农田排出的含有活性碳氮的水,进而可能导致其成为 N_2O 排放的一个重要来源。然而,目前的一些研究主要集中在降雨对沟渠中污染物的负荷^[29,30]及沟渠中氮磷的吸附、截留、生物去除等^[31,32],有关农田沟渠 N_2O 间接排放的研究还鲜有涉及。本文以玉米季纳污和泄洪都比较集中的川中丘陵区农田源头沟渠为研究对象,开展 N_2O 排放的原位监测,明确其排放通量及影响因素,以期为川中丘陵区温室气体减排和农业非点源氮污染的控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域介绍

研究点位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站($105^\circ 27' \text{E}$, $31^\circ 16' \text{N}$),该站位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡,地处涪江支流弥江、湍江的分水岭地带。属中亚热带湿润季风气候,年均气温 17.3°C ,极端最高气温 40°C ,极端最低气温 -5.1°C ,大于 10°C 的积温 6500°C ,无霜期 295 d;气候湿润,年降雨量在 $800 \sim 1200 \text{ mm}$ 之间,多年平均降雨量 826 mm (1981~2009 年),但降雨季节分配不均(春季 6%、夏季 66%、秋季 19%、冬季 9%)^[11]。土壤为典型石灰性紫色土,坡度为 $3^\circ \sim 15^\circ$,平均土层厚度约 60 cm ^[33]。该区域土地利用分布与地形密切相关,水旱田、旱地、林地主要分布于流域低洼处、丘陵中部和上部。农田主要轮作方式是玉米-小麦和水稻-油菜,其中在 6~9 月(本地雨季)种植玉米和水稻,10 月底至次年 5 月种植小麦和油菜。林地植被以桉木和柏木为主。

1.2 实验设计

该研究所选取的沟渠上游有紫色土坡耕地及水田存在,全年中大部分时期都处于滞水状态,是典型的农业源头沟渠,主要用于排放农田用水和洪水。沟渠植被是自然状态下生长的水花生[*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.]、水草[*Fimbristylis milliacea* (L.) Vahl.]、三叶草(*Trifolium repens* L.)及部分杂草等,无人工种植植物。

采用静态暗箱-气相色谱法测定 N_2O 和 CO_2 排放通量,野外采气装置示意图详见图 1. 采样箱材质为不锈钢薄板,由顶箱、中箱和底座组成. 顶箱为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $\times$ 钢板厚度) 的 5 面体,其内部装有温度传感器探头(JM624 型便携式测温计,上海自动化仪表公司),顶部设有一根带有橡胶塞帽的气压平衡管($\Phi 3.59\text{ mm} \times 62.2\text{ mm}$),侧面设有气体样品采集的接口. 中箱的尺寸和材质与顶箱一致,只是形状为去掉上下面的正立方体,用以在特定情况下(如植株较高时增加气室体积)连接底座和顶箱. 顶箱和中

箱的箱体外侧都包有塑料泡沫保温层,以控制和减少采样期间箱内温度变化幅度. 底座(长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $\times$ 钢板厚度为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$) 上端设有宽和深均为 30 mm 的凹槽以便于采集气体时安装顶箱于槽内且可以注入少量水用以密封气室,底座下端均匀钻有小孔($\Phi 2\text{ cm}$),有助于箱内上覆水、底泥与植物系统与箱外径流、泥沙及动物和微生物等的侧向交换,确保箱体内外环境一致,底端夯入沟渠底泥中 $5 \sim 10\text{ cm}$,确保上覆水可以淹没底座上的小孔而避免采气时漏气,在整个观测期间底座保持水平固定在观测点.

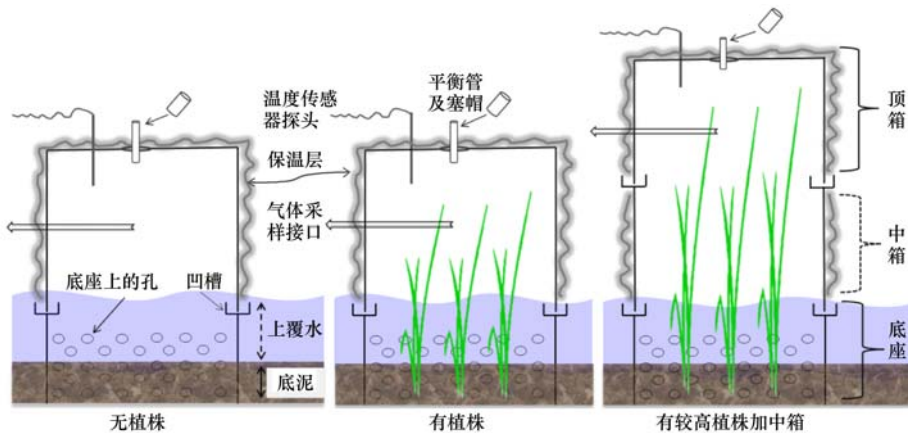


图 1 野外气体采集装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of field gas collection device

在所观测的农田沟渠区域内,设置 4 对静态箱底座(作为 4 个重复),每对静态箱间隔约 50 m . 4 对底座均设置有植株(V,代表自然植被覆盖的沟渠生态系统)和无植株处理(NV,无自然植被覆盖,在观测期间,随时人工拔掉箱内植被及根系,确保采样期间箱内无任何植物,代表沟渠中的沉积物-水界面系统),两者间隔约 50 cm ,采样时同步观测,对比研究农田沟渠的 N_2O 排放.

1.3 样品采集与分析

气体样品采集自 2014 年 6 月 2 日开始至 2014 年 9 月底结束(与本地的玉米种植同期),各监测点采样频率为每周 1~2 次. 定期于 09:00~11:00 采集气体,各样点每次采集 5 个气体样品,采气时间间隔为 7 min . 气样采集时,先将采样顶箱放置于底座上,确保底座凹槽内充有少量的水从而避免底座-顶箱密封平面处漏气. 打开平衡管的橡胶塞,确保闭合的采样箱内外压力平衡,用医用注射器(成都市新津事丰医疗器械有限公司)从顶箱侧面的气样采集接口处缓慢匀速抽取 50 mL 气体,并记录时间,迅速关闭平衡管和注射器上的三通阀(扬州市五洋医

疗器械有限公司),待 7 min 后再采集下一针筒气体. 气体采集后立即带回实验室测定浓度,所有气样均在 24 h 内完成 N_2O 和 CO_2 浓度分析. 其浓度测定使用 Agilent 7890A 气相色谱仪(GC,美国安捷伦公司),检测器为电子捕获检测器(ECD),分离柱内填充料为 $80 \sim 100$ 目 Porapak Q,高纯 N_2 (99.99%) 做载气,流量为 $30\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,检测器温度为 330°C ,分离柱温度为 55°C .

于 2014 年 7 月采集 $0 \sim 40\text{ cm}$ 深的底泥土壤样品(每个监测点底泥样采集 3 次重复并充分混匀),参考土壤农业化学分析方法^[34]测试基本理化性质(表 1),有机质测定用重铬酸钾容量法;全氮测定采用凯氏定氮法;pH 用电位法测定;土壤机械组成采用吸管法测定. 铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮则用 $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 K_2SO_4 溶液浸提(水土比例 5:1),在恒温振荡器(ZWY-1102C,上海智诚分析仪器制造有限公司)中于 25°C 、 $300\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下振荡 90 min ,静置后用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤,其滤液经 AA3 流动分析仪(Auto Analyzer3HR,德国 SEAL 公司)测定.

每次采集气体时同步采集沟渠内底座处上覆水

表 1 监测点沟渠底泥(0~40 cm)的物理化学性质

Table 1 Chemical and physical properties of sediments(0-40 cm) at the study site

底泥深度 /cm	pH	有机碳 /g·kg ⁻¹	总氮 /g·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%
0~20	7.77	13.4	1.64	21.9	0.30	41.3	36.5	22.2
20~40	8.06	9.80	1.27	34.0	0.31	46.5	35.1	18.4

样品 500 mL 装于洁净的塑料瓶中,并迅速带回实验室于 24 h 内完成分析,如不能当天测定,则先保存于 4℃ 以下冰箱中并加入 1 mL 浓硫酸以酸化保存并及时测定. 上覆水水样分析的浓度指标有:DOC、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N,水样原液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后用流动分析仪测定其浓度.

1.4 环境因子测定

在采集气体的同时,同步测定温度、底泥湿度、上覆水水深等环境因子. 在采集完第一针和第四针时,使用便携式测温度计(JM624,上海自动化仪表公司)测定并记录箱内空气温度、底泥-上覆水界面(0~5 cm)温度(下文中和图 2、表 2 中都用 SWIT 表示). 底泥土壤含水的体积分数(%)用便携式水分测定仪(MP-406,杭州托普仪器有限公司)测定. 上覆水的水深(cm)采用不锈钢尺测量,并测量水位

到采气底座-顶箱密封平面的基线高(cm,水位低于密封平面则基线为正,反之为负). 降水量、大气压等气象资料则由中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站内的气象站获得(离本试验点 100 m 左右). 如图 2,观测期内日平均气温是 24.8℃(18.7~30.6℃),6~9 月间各月的月均气温分别为 24.1、27.6、25.3 和 22.0℃. SWIT 的均值为 22.6℃,范围是 19.7~25.5℃. 期间累积降雨量为 523 mm,占 2014 全年的 72.3%,其中 6~9 月间每月累积降雨量分别为 97.3、14.3、132.3 和 279.1 mm,7 月出现了较为严重的严重干旱,降雨量较少.

1.5 数据计算与分析

1.5.1 气体排放通量

单位面积的 N₂O 和 CO₂ 排放通量则采用其浓度随时间的线性变化来计算^[35,36],计算公式如下:

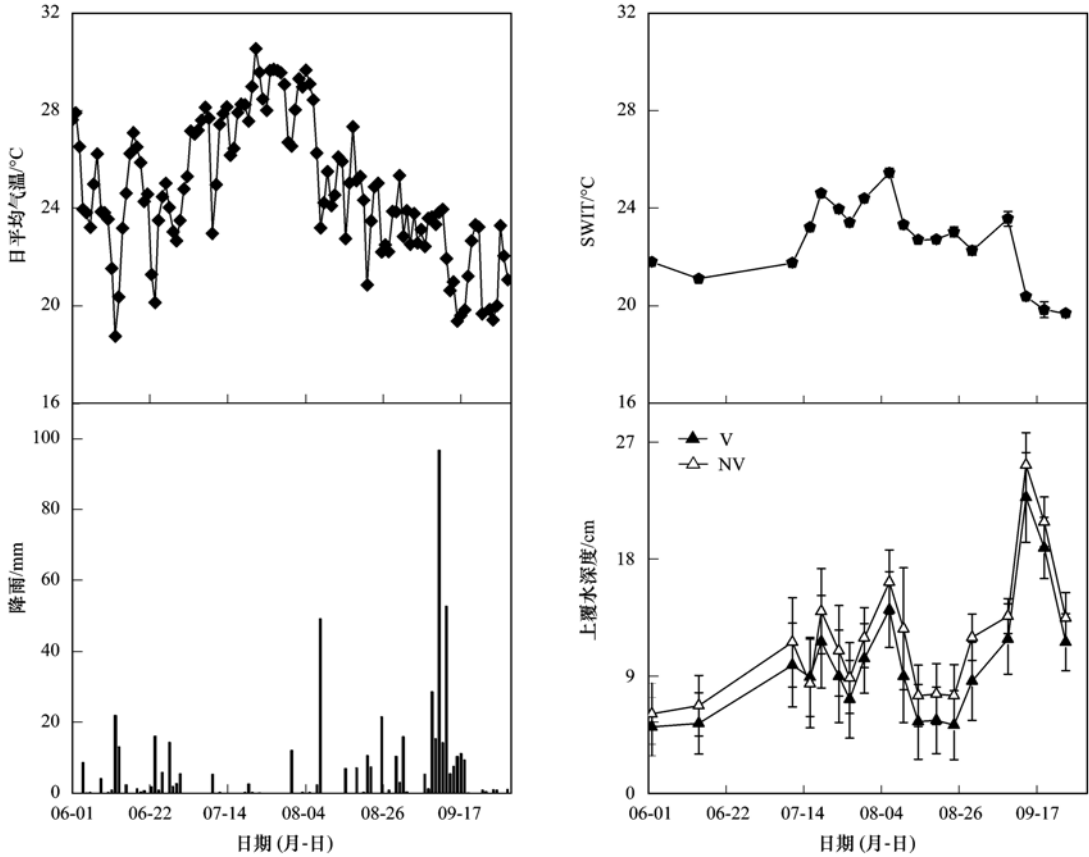


图 2 沟渠环境因子

Fig. 2 Environmental variables in the ditches

表 2 沟渠 N₂O 通量和 CO₂ 通量、温度及上覆水指标的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation between ditch N₂O and CO₂ flux, temperature and overlaying water variables

处理	CO ₂ 通量 (n = 18)	温度 (n = 18)		上覆水水深 (n = 18)	NO ₃ ⁻ -N浓度 (n = 17)
		气温	SWIT		
NV	—	—	—	0.47 *	0.78 **
V	0.49 *	—	-0.49 *	0.72 **	0.90 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, — 表示无相关性

$$F = \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dc}{dt} \times H \times k$$

式中, F 为 N₂O (以 N 计,下同) 或 CO₂ (以 C 计,下同) 排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 或 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], M 为气体的摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), V_0 为标准状态下 (温度 273 K, 气压 1 013 hPa) 气体的摩尔体积 ($22.41 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$), T_0 和 P_0 分别为标准状态下的气温 (273 K) 和气压 (1 031 hPa), P 为采样点的气压 (hPa), T 为采样时箱内的平均气温 (K), H 为采样箱高度与基线高之和 (cm), dc/dt 为采样箱内 N₂O 浓度变化速率, k 为量纲转换系数. 根据观测期内 N₂O 和 CO₂ 的排放速率, 通过内插法^[36] 来计算其累积排放量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

1.5.2 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行实验数据处理与计算, 用 SPSS 18.0 软件 (SPSS, Inc., USA) 进行统计分析. V 和 NV 处理之间运用配对分析比较差异及显著性 ($P < 0.05$ 时有显著性), 相关分析采用 Pearson 相关系数分析法和简单线性回归分析; 运用 Origin 8.0 (Origin Lab Ltd.) 绘图. 文中所示误差如无特别说明, 都是指 4 次重复测量的标准误差.

2 结果与分析

2.1 上覆水中碳氮动态

观测期内持续有上覆水存在, 底泥土壤湿度处于饱和状态, 上覆水平均深度为 11.0 cm (范围是 5.1 ~ 25.3 cm), 在 8 月中旬至 9 月中旬, 水深持续增加, 这与该时期内持续强降雨导致农田产生径流水排入沟渠有关 (图 2). 如图 3 所示, DOC 的平均浓度为 $2.7 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (范围 $1.8 \sim 3.9 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 在实验期间呈增加-降低的波动变化趋势. NH_4^+ -N 的平均浓度为 $0.2 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (范围 $0.1 \sim 0.3 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 浓度变化趋势比较小, 整体趋于稳定. NO_3^- -N 的平均浓度为 $1.2 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (范围 $0.1 \sim 7.9 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 在 7 月至 8 月上旬变化趋势较小, 而在 8 月底至 9 月底期间则持续增加.

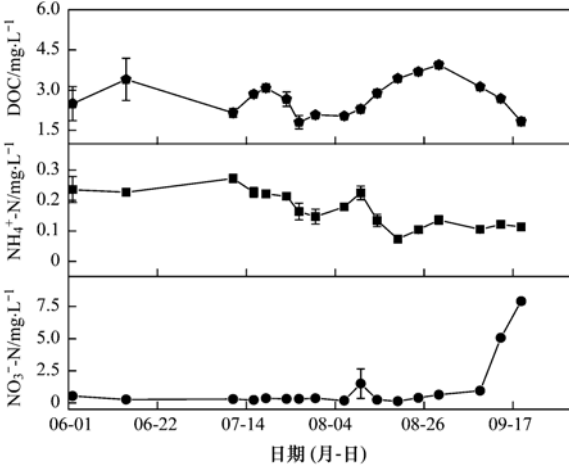


图 3 沟渠上覆水中 DOC、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度

Fig. 3 Concentrations of DOC, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N of the overlying water in ditch

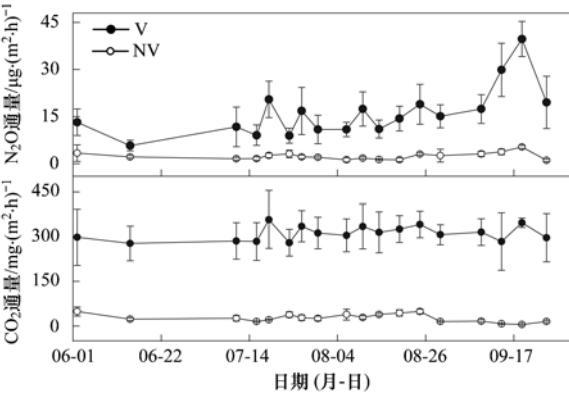


图 4 沟渠 N₂O 和 CO₂ 排放通量变化

Fig. 4 Dynamic emission fluxes of N₂O and CO₂ from ditch

2.2 N₂O 排放通量

观测期内 NV 处理的 N₂O 排放通量为 $1.1 \sim 5.4 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 最小值和最大值都出现在 9 月, 平均值为 $2.3 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 累积排放量为 $0.07 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 4). V 的 N₂O 排放通量为 $5.8 \sim 39.8 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 最小值出现在 6 月, 最大值出现在 9 月, 平均值为 $14.7 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 累积排放量为 $0.43 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 分析表明, V 和 NV 的 N₂O 排放通量具有显著性差异, V 明显高于 NV ($P < 0.05$); 但观测期内两者的累积排放量却无显著差异 ($P =$

0.08)。

2.3 N_2O 排放通量和其他相关指标的关系

相关分析发现(表2), V 处理的 N_2O 排放通量与 CO_2 排放通量($r = 0.49, P < 0.05$)、上覆水中 NO_3^- -N 浓度($r = 0.90, P < 0.01$)和上覆水水深($r = 0.72, P < 0.01$)均呈显著正相关, 但与 SWIT($r = -0.49, P < 0.05$)呈显著负相关。NV 处理的 N_2O

排放通量与上覆水中 NO_3^- -N 浓度($r = 0.78, P < 0.01$)和上覆水水深($r = 0.47, P < 0.05$)呈显著正相关。回归分析发现(图5), 上覆水水深与水中 NO_3^- -N 浓度呈线性正相关(V: $R^2 = 0.58, P < 0.01$; NV: $R^2 = 0.57, P < 0.01$), 水中 NO_3^- -N 浓度与 N_2O 排放通量亦呈线性正相关(V: $R^2 = 0.80, P < 0.001$; NV: $R^2 = 0.59, P < 0.01$)。

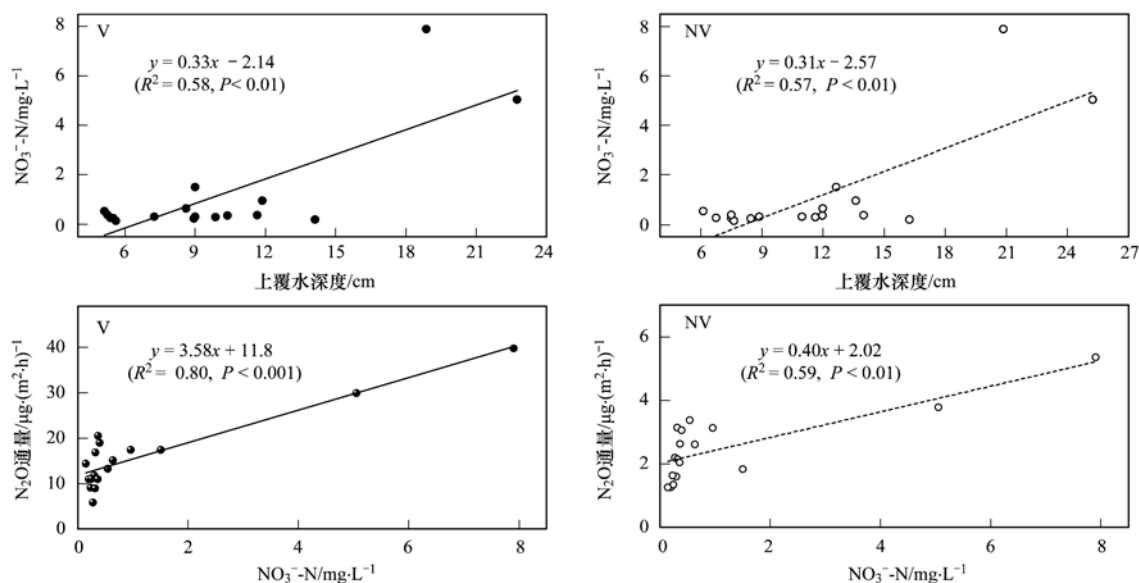


图5 N_2O 排放的相关因子回归分析

Fig. 5 Regression analysis between N_2O flux and environmental variables

3 讨论

3.1 与国内外其他研究对比

本研究的沟渠生态系统在玉米季的 N_2O 平均排放通量高于或接近于美国 Hudson River 和 Neuse River 流域溪流中的排放通量, 但低于美国、英国和日本监测的农业间接 N_2O 平均排放通量 [$35.2 \sim 7444 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$] (表3)。和国内的研究比较, 则高于江苏句容农业流域河流、低于太湖流域的河流和秋季香溪河的排放通量(表3)。与该紫色土区的农田生态系统对比则发现, 其高于不施肥水稻田的多年平均 N_2O 排放通量 [$6.6 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$] [37], 接近于同期内常规施肥下的紫色土坡地玉米田的平均排放通量 [25], 但低于同等施氮量情况下水稻田的平均排放通量(表3)。由此说明, 川中丘陵区农田源头沟渠系统在玉米季的 N_2O 排放通量可达到其区域玉米种植农田生态系统的直接排放的水平, 在玉米季中是重要的 N_2O 排放源, 亦不容忽视。

3.2 N_2O 排放的影响因素

本研究中发现 N_2O 排放通量与上覆水中

NO_3^- -N 浓度呈显著线性正相关(表2和图5), 表明上覆水中 NO_3^- -N 浓度是影响 N_2O 通量的重要因素, 这与 Beaulieu 等 [5] 和 Stow 等 [39] 得出的 N_2O 产生速率与溪水中 NO_3^- -N 浓度正相关相一致。再者, 通过在 72 条溪流中运用 ^{15}N 同位素示踪研究, Beaulieu 等 [17] 的研究发现, 反硝化作用产生的 N_2O 和水中的 NO_3^- -N 浓度亦显著正相关。 NO_3^- -N 是反硝化产生 N_2O 的底物, 而 DOC 则是反硝化微生物的能量来源 [5, 39]。在本研究中, 上覆水中的 DOC 浓度相对比较稳定, 且与 N_2O 通量无相关关系, 由此可见, 本沟渠上覆水中 DOC 并非是 N_2O 排放的限制因素。反硝化过程中, NO_3^- -N 是更优于 N_2O 的电子受体, 在活性碳源充足时, 水中 NO_3^- -N 浓度的升高会使得 N_2O 比 NO_3^- -N 更难以被还原而出现 N_2O 的积累并释放, 进而使 N_2O 放随着 NO_3^- -N 浓度的增加而增加 [17, 39]。再者, 相关分析发现上覆水中的 NO_3^- -N 浓度与采样前 72 h 内的降雨量显著呈正相关 ($r = 0.90, P < 0.05, n = 5$), N_2O 排放通量也与上覆水水深呈显著正相关(表2); 同时, 回归分析表明其上覆

表 3 与其他相关研究的 N₂O 通量比较¹⁾
Table 3 Comparison of N₂O fluxes with other relative studies

研究对象及地点	测定方法	N ₂ O 排放通量/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$		文献
		平均值	范围	
Hudson River, 美国纽约州	模型估算	6.4	2.3 ~ 22.2	[12, 38]
Neuse River Watershed 溪流, 美国北卡罗来纳州	漂浮式静态箱	12.9	-9.2 ~ 64.9	[39]
农业源头溪流, 美国密歇根	模型估算	35.2	-8.9 ~ 267	[12]
农业源头溪流, 美国密歇根州	培养实验	40	2.5 ~ 809	[5]
农业排水沟, 英国中洛锡安	封闭通道型采气箱	—	100 ~ 1 000	[13]
农业排水沟, 英格兰	模型估算	338	—	[16]
农业区小河, 日本	封闭式静态箱	7 444	240 ~ 56 580	[12, 14]
太湖地区河流, 中国	封闭式静态箱	122.5	3.3 ~ 582.3	[40]
句容农业流域河流, 中国	封闭式静态箱	2.97	0.29 ~ 8.4	[41]
太湖流域南苕溪, 中国	封闭式静态箱	30.4	-18.1 ~ 397.4	[42]
三峡水库香溪河, 中国	封闭式静态箱	—	18.4 ~ 133.7	[43]
川中丘陵区水稻田(施氮量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 中国	封闭式静态箱	53.3	-22.9 ~ 438.0	[37]
紫色土常规施肥的玉米地(与本观测同期), 中国	封闭式静态箱	18.0	0 ~ 94.0	[25]
川中丘陵区玉米季中农田源头沟渠, 中国	封闭式静态箱	14.7	5.78 ~ 39.8	本研究

1) —表示文献中无数据提到

水水深和 NO₃⁻-N 浓度亦显著线性正相关(图 5). Zhu 等^[11]和朱波等^[23]的研究表明, 降雨可促使紫色土坡耕地中的 NO₃⁻-N 随地表径流和壤中流迁移出农田, 进而汇集至毗邻的农田沟渠中使其上覆水中 NO₃⁻-N 浓度升高. 因而, 降雨会引起 N₂O 排放通量在短期的明显波动, 降雨以及随后的 NO₃⁻-N 浓度升高和 N₂O 排放通量峰值出现(图 2 ~ 5)更进一步表明降雨可通过增加农田沟渠中 NO₃⁻-N 浓度进而激发沟渠中 N₂O 排放的增加. 与本文结果较为一致的是, Liu 等^[44]和 Jørgensen 等^[45]也发现降雨可驱动 NO₃⁻-N 浓度的升高和更多 N₂O 的产生. 同时降雨也可引起 N₂O 排放通量时间上的差异, Beaulieu 等^[5]在美国密歇根和 Höll 等^[46]在德国南部的研究都发现, 溪流中 N₂O 排放的季节差异也和降雨的不均匀分布有关.

此外, 本研究还发现沟渠生态系统 N₂O 排放通量和 SWIT 呈负相关(表 2), 原因可能是在短期内 N₂O 通量的波动式升高是出现在气温稍低的雨后(图 2 和 4), 降雨对 N₂O 排放的驱动作用可能大于温度的影响, 郑循华等^[47]也发现在温度较为适宜(如 17 ~ 34℃)的情况下, 温度此时可能不是影响 N₂O 排放的关键因素.

3.3 植株对 N₂O 排放的影响

观测期内 V 处理的 CO₂ 排放通量和累积排放量 [278.3 ~ 358.2 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.88 \times 10^4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$] 均明显高于 NV 对照处理 [5.2 ~ 48.9 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.77 \times 10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$] ($P < 0.05$) (图 4), 且 CO₂ 排放通量与 N₂O 排放通量呈显著正

相关(表 2). 从全球范围来说, 在不同的生态系统中 N₂O 排放大都表现出与 CO₂ 排放正相关^[48], 与本原位观测的结果相一致. V 处理较高的 CO₂ 排放可能与植物发生光合作用提供更多的碳有关^[48, 49], 也意味着分解过程中较多的氧气消耗, 更利于厌氧微环境的形成而促使反硝化作用的发生. 但是本沟渠底泥中较低的 NO₃⁻-N 含量 ($0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表 1) 则可能会在某种从程度上限制反硝化作用的进行. 因为通常情况下, 在碳源充足而 NO₃⁻-N 含量低于一定阈值时(小于 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), N₂O 将会被进一步还原成 N₂^[50]. 同时, 植株的生长可能增加其自身与微生物对 NO₃⁻-N 利用的竞争, 并降低反硝化可利用的 NO₃⁻-N, 进而导致 N₂O 成为电子受体而被消耗, Jørgensen 等^[51]发现在根际区 (10 ~ 20 cm) N₂O 的消耗比根际下层 (40 ~ 50 cm) 更为强烈. 而另一方面, 水生植物可通过其发达的通气组织向根际区域传输 O₂, 同时在反方向上将 CO₂ 和 N₂O 传送到大气中^[52 ~ 54]. 有研究表明, 植物的气体传输作用可促进底泥中根际区的硝化作用(将 NH₄⁺-N 氧化成 NO₃⁻-N), 进而增加可利用的 NO₃⁻-N 并促进反硝化作用, 即植物驱动的同步硝化-反硝化作用^[50, 51, 54, 55]. 本实验中, 沟渠底泥中的 NH₄⁺-N 含量远高于 NO₃⁻-N (前者是后者的 73 ~ 113 倍, 表 1), 且在雨季内植物生长茂盛, 可能十分有利于同步硝化-反硝化作用的发生. 因此笔者认为, 该沟渠生态系统中植物的存在对其 N₂O 排放有着重要的促进作用(同步硝化-反硝化作用), 最终在排放通量上表现为 V 显著高于 NV.

然而,纵观整个观测期,V 和 NV 间 N_2O 累积排放量却无显著差异,原因可能是植物对活性氮的吸收利用降低了硝化-反硝化作用可利用的氮素,进而限制了 N_2O 的产生,这与植物对 N_2O 排放的部分促进作用相抵消,即植物对 N_2O 排放的“双重作用”^[56]。植株与环境的相互作用增加了沟渠生态系统中 N_2O 排放的复杂性,应予以重视。未来的监测可能还需要增加同位素示踪和微生物等方面的研究,希冀更加有效地对其影响机制进行探讨。

3.4 N_2O 间接排放系数

根据相关的农田排水沟、溪流与河流中 N_2O 间接排放系数 EF_{5r} 计算方法($N_2O-N/NO_3^- -N$)^[15,57,58] 得出该农田源头沟渠生态系统中为 0.05%,但 V 和 NV 间差异显著($P < 0.05$),植株的存在使其 EF_{5r} 提高了 4 倍以上(NV 对照为 0.01%)。比较发现,本研究的结果远低于早期报道的 EF_{5r} 缺省值(0.75%)^[10,15] 和 2006 年 IPCC 建议调低后的值(0.25%)^[57],也低于其他学者在美国 Kalamazoo River Basin 的源头溪流(1.01%)^[12] 和英国的农田排水沟(0.61%)^[16] 的监测结果。不过,本研究的 EF_{5r} 值十分接近于 Reay 等^[13] 在英国中洛锡安地区农田排水沟中的研究结果(0.02% ~ 0.03%) 和 Clough 等^[58] 在新西兰 LII River 中的监测结果(0.02% ~ 0.05%)。由此说明,采用 IPCC 建议的 N_2O 间接排放系数缺省值可能未必在川中丘陵区和其他所有地区都适用,应考虑区域间排放系数的差异性^[12,13,16,58],通过大量的原位观测进一步修正其排放系数的精度,进而有助于减小估算区域性 N_2O 间接排放的误差。

4 结论

(1)农田源头沟渠作为川中丘陵区玉米季主要的农田排污通道,在本观测期内,该生态系统具有明显的 N_2O 排放,其排放通量可达到本地区农田直接排放的水平,从而成为不容忽视的 N_2O 释放源。但本原位观测的 N_2O 间接排放系数值远低于 IPCC 所建议的缺省值,应加强原位观测从而减小用其估算 N_2O 间接排放量所带来的误差。

(2)川中丘陵区玉米季中大量降雨可将源于农田的活性碳氮物质转移、传输到毗邻的农业源沟渠中,水中 $NO_3^- -N$ 浓度的提高对其 N_2O 排放具有明显的促进作用,成为影响沟渠释放 N_2O 的主要因素。同时,植物的存在可提高农田源头沟渠生态系统的 N_2O 间接排放通量和系数,亦不容忽视。因此,应对

本地区的农业源沟渠予以更多的关注和研究,其 N_2O 排放的机制和季节(年度)排放差异等还有待深入探讨。

参考文献:

- [1] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, *et al.* Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams [J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 86-90.
- [2] Kröeger R, Holland M M, Moore M T, *et al.* Hydrological variability and agricultural drainage ditch inorganic nitrogen reduction capacity[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, **36**(6): 1646-1652.
- [3] Mulholland P J, Helton A M, Poole G C, *et al.* Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading[J]. *Nature*, 2008, **452**(7184): 202-205.
- [4] Seitzinger S, Harrison J A, Böhlke J K, *et al.* Denitrification across landscapes and watersheds: a synthesis[J]. *Ecological Applications*, 2006, **16**(6): 2064-2090.
- [5] Beaulieu J J, Arango C P, Tank J L. The effects of season and agriculture on nitrous oxide production in headwater streams[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(2): 637-646.
- [6] Royer T V, Tank J L, David M B. Transport and fate of nitrate in headwater agricultural streams in Illinois [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**(4): 1296-1304.
- [7] 姜翠玲, 崔广柏, 范晓秋, 等. 沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(2): 125-128.
Jiang C L, Cui G B, Fan X Q, *et al.* Purification capacity of ditch wetland to agricultural non-point pollutants [J]. *Environmental Sciences*, 2004, **25**(2): 125-128.
- [8] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [9] Seitzinger S P, Kroeze C, Styles R V. Global distribution of N_2O emissions from aquatic systems: natural emissions and anthropogenic effects[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**(3-4): 267-279.
- [10] Mosier A, Kroeze C, Nevison C, *et al.* Closing the global N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, **52**(2-3): 225-248.
- [11] Zhu B, Wang T, Kuang F H, *et al.* Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the Central Sichuan Basin, China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, **73**(4): 1419-1426.
- [12] Beaulieu J J, Arango C P, Hamilton S K, *et al.* The production and emission of nitrous oxide from headwater streams in the Midwestern United States[J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(4): 878-894.
- [13] Reay D S, Smith K A, Edwards A C. Nitrous oxide emission from agricultural drainage waters[J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(2): 195-203.
- [14] Hasegawa K, Hanaki K, Matsuo T, *et al.* Nitrous oxide from the agricultural water system contaminated with high nitrogen[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**(3-4): 335-345.
- [15] Nevison C. Review of the IPCC methodology for estimating nitrous oxide emissions associated with agricultural leaching and

- runoff[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**(3-4): 493-500.
- [16] Outram F N, Hiscock K M. Indirect nitrous oxide emissions from surface water bodies in a lowland arable catchment: a significant contribution to agricultural greenhouse gas budgets? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(15): 8156-8163.
- [17] Beaulieu J J, Tank J L, Hamilton S K, *et al.* Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(1): 214-219.
- [18] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N_2O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, **326**(5949): 123-125.
- [19] Ciais P, Sabine C, Bala G, *et al.* Carbon and other biogeochemical cycles[A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 510-514.
- [20] 朱波, 汪涛, 徐泰平, 等. 紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J]. *山地学报*, 2006, **24**(5): 601-606.
Zhu B, Wang T, Xu T P, *et al.* Non-point-source nitrogen movement and its environmental effects in a small watershed in hilly area of purple soil[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, **24**(5): 601-606.
- [21] 朱波, 彭奎, 谢红梅. 川中丘陵区典型小流域农田生态系统氮素收支探析[J]. *中国生态农业学报*, 2006, **14**(1): 108-111.
Zhu B, Peng K, Xie H M. Nitrogen balance of agro-ecosystem in a typical watershed in the hilly area of Central Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, **14**(1): 108-111.
- [22] Wang T, Zhu B. Nitrate loss via overland flow and interflow from a sloped farmland in the hilly area of purple soil, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **90**(3): 309-319.
- [23] 朱波, 汪涛, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(3): 525-533.
Zhu B, Wang T, Kuang F H, *et al.* Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(3): 525-533.
- [24] 杨小林, 朱波, 董玉龙, 等. 紫色土丘陵区小流域非点源氮迁移特征研究[J]. *水利学报*, 2013, **44**(3): 276-283.
Yang X L, Zhu B, Dong Y L, *et al.* Transport processes of diffuse nitrogen in typical catchments in the hilly area of purple soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(3): 276-283.
- [25] 胡廷旭. 施肥方式对紫色土活性氮污染物迁移的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. 67-68.
Hu T X. Effects of fertilization regimes on the movements of reactive nitrogen from purple soil[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. 67-68.
- [26] Zhou M H, Zhu B, Butterbach-Bahl K, *et al.* Nitrate leaching, direct and indirect nitrous oxide fluxes from sloping cropland in the purple soil area, southwestern China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **162**: 361-368.
- [27] 花可可, 朱波, 王小国. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(5): 81-88.
- Hua K K, Zhu B, Wang X G. Characteristics of dissolved organic carbon transport via overland flow and interflow on sloping cropland of purple soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(5): 81-88.
- [28] Hua K K, Zhu B, Wang X G, *et al.* Forms and fluxes of soil organic carbon transport via overland flow, interflow, and soil erosion[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, **80**(4): 1011-1019.
- [29] 于会彬, 席北斗, 郭旭晶, 等. 降水对农田排水沟渠中氮磷流失的影响[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(4): 409-414.
Yu H B, Xi B D, Guo X J, *et al.* Effect of rainfall runoff on nitrogen and phosphorus loss in farming drainage ditch[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(4): 409-414.
- [30] 罗专溪, 朱波, 唐家良, 等. 自然沟渠控制村镇降雨径流中氮磷污染的主要作用机制[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 561-568.
Luo Z X, Zhu B, Tang J L, *et al.* Primary mechanisms of nitrogen and phosphorus removal from stormwater runoff by a natural ditch in a rural township [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(3): 561-568.
- [31] 翟丽华, 刘鸿亮, 席北斗, 等. 农业源头沟渠沉积物氮磷吸附特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(4): 1359-1363.
Zhai L H, Liu H L, Xi B D, *et al.* Property of nitrogen and phosphate adsorption on sediments in headwater ditches [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2008, **27**(4): 1359-1363.
- [32] 赵原, 王彦, 汪涛, 等. 川中丘陵区高富集氮、磷沟渠植物的筛选[J]. *环境污染与防治*, 2015, **37**(10): 12-16.
Zhao Y, Wang Y, Wang T, *et al.* Screening for high nitrogen and phosphorus enrichment ditch plants in the hilly area of Central Sichuan Basin[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, **37**(10): 12-16.
- [33] 朱波, 周明华, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地氮素淋失通量的实测与模拟[J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(1): 102-109.
Zhu B, Zhou M H, Kuang F H, *et al.* Measurement and simulation of nitrogen leaching loss in hillslope cropland of purple soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(1): 102-109.
- [34] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [35] Zheng X H, Mei B L, Wang Y H, *et al.* Quantification of N_2O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology[J]. *Plant and Soil*, 2008, **311**(1-2): 211-234.
- [36] Zhou M H, Zhu B, Butterbach-Bahl K, *et al.* Nitrous oxide emissions and nitrate leaching from a rain-fed wheat-maize rotation in the Sichuan Basin, China[J]. *Plant and Soil*, 2013, **362**(1-2): 149-159.
- [37] Zhou M H, Zhu B, Brüggemann N, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from a subtropical rice-rapeseed rotation system in China: a 3-year field case study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **212**: 297-309.
- [38] Cole J J, Caraco N F. Emissions of nitrous oxide (N_2O) from a tidal, freshwater river, the Hudson River, New York [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(6): 991-996.

- [39] Stow C A, Walker J T, Cardoch L, *et al.* N₂O emissions from streams in the Neuse River Watershed, North Carolina [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39** (18): 6999-7004.
- [40] 熊正琴, 邢光熹, 沈光裕, 等. 太湖地区湖水与河水中溶解 N₂O 及其排放[J]. 环境科学, 2002, **23**(6): 26-30.
Xiong Z Q, Xing G X, Shen G Y, *et al.* Dissolved N₂O concentrations and N₂O emissions from aquatic systems of lake and river in Taihu Lake Region [J]. Environmental Science, 2002, **23**(6): 26-30.
- [41] 李飞跃, 汪建飞, 李孝良, 等. 江苏句容水库农业流域水塘和河流 N₂O 排放速率的研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31** (9): 2022-2027.
Li F Y, Wang J F, Li X L, *et al.* N₂O emission from pond and river in the agricultural watershed of Jurong reservoir, Jiangsu Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31** (9): 2022-2027.
- [42] 袁淑方, 王为东. 太湖流域源头溪流氧化亚氮(N₂O)释放特征[J]. 生态学报, 2012, **32**(20): 6279-6288.
Yuan S F, Wang W D. Characteristics of nitrous oxide (N₂O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(20): 6279-6288.
- [43] 黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 等. 香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, **34** (4): 1270-1276.
Huang W M, Zhu K X, Zhao W, *et al.* Diurnal changes in greenhouse gases at water-air interface of Xiangxi River in autumn and their influencing factors [J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1270-1276.
- [44] Liu L L, Greaver T L. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO₂ sink may be largely offset by stimulated N₂O and CH₄ emission [J]. Ecology Letters, 2009, **12**(10): 1103-1117.
- [45] Jørgensen C J, Elberling B. Effects of flooding-induced N₂O production, consumption and emission dynamics on the annual N₂O emission budget in wetland soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **53**: 9-17.
- [46] Höll B S, Jungkunst H F, Fiedler S, *et al.* Indirect nitrous oxide emission from a nitrogen saturated spruce forest and general accuracy of the IPCC methodology [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(32): 5959-5970.
- [47] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, **18**(5): 1-5.
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impacts of temperature on N₂O production and emission [J]. Environmental Science, 1997, **18**(5): 1-5.
- [48] Xu X F, Tian H Q, Hui D F. Convergence in the relationship of CO₂ and N₂O exchanges between soil and atmosphere within terrestrial ecosystems [J]. Global Change Biology, 2008, **14** (7): 1651-1660.
- [49] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. Principles of terrestrial ecosystem ecology (2nd ed.) [M]. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2011. 194-204.
- [50] Yuan J J, Ding W X, Liu D Y, *et al.* Exotic *Spartina alterniflora* invasion alters ecosystem-atmosphere exchange of CH₄ and N₂O and carbon sequestration in a coastal salt marsh in China [J]. Global Change Biology, 2015, **21**(4): 1567-1580.
- [51] Jørgensen C J, Struwe S, Elberling B. Temporal trends in N₂O flux dynamics in a Danish wetland-effects of plant-mediated gas transport of N₂O and O₂ following changes in water level and soil mineral-N availability [J]. Global Change Biology, 2012, **18** (1): 210-222.
- [52] Colmer T D. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots [J]. Plant, Cell & Environment, 2003, **26**(1): 17-36.
- [53] Rusch H, Rennenberg H. Black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) trees mediate methane and nitrous oxide emission from the soil to the atmosphere [J]. Plant and Soil, 1998, **201**(1): 1-7.
- [54] Reddy K R, Patrick W H Jr, Lindau C W. Nitrification-denitrification at the plant root-sediment interface in wetlands [J]. Limnology and Oceanography, 1989, **34**(6): 1004-1013.
- [55] Laursen A E, Seitzinger S P. Diurnal patterns of denitrification, oxygen consumption and nitrous oxide production in rivers measured at the whole-reach scale [J]. Freshwater Biology, 2004, **49**(11): 1448-1458.
- [56] 卢妍, 宋长春, 王毅勇, 等. 植物对沼泽湿地生态系统 N₂O 排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(4): 72-75, 94.
Lu Y, Song C C, Wang Y Y, *et al.* Influence of plants on N₂O emission from wetland ecosystem [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, **23**(4): 72-75, 94.
- [57] de Klein C, Novoa R S A, Ogle S, *et al.* N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application [A]. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme [R]. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006. 11.11-11.24.
- [58] Clough T J, Bertram J E, Sherlock R R, *et al.* Comparison of measured and EF5-r-derived N₂O fluxes from a spring-fed river [J]. Global Change Biology, 2006, **12**(2): 352-363.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suyi Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)