ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

# ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 38 卷 第 12 期
2017 年 12 月 15 日

# 目 次(卷终)

京津冀区域 $PM_{2.5}$ 污染相互输送特征 …… 王燕丽, 薛文博,雷宇,王金南,武卫玲(4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据"源""汇"景观的大气霾效应 …… 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆(4905)
基于多源数据的 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布预测与制图 …… 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 $PM_{2.5}$ 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 … 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉(4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 …… 张程,于兴娜,安俊琳,朱彬,林梦凡(4932)
菏泽市 $PM_{2.5}$ 碳组分季节变化特征 …… 刘泽珺,吴建会,张裕芬,梁丹妮,马咸,刘保双, 冯银厂,张勤勋(4943)
辽宁典型城市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 …… 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝(4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 …… 姚青, 刘子锐, 韩素芹,蔡子颖,刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思(4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 $PM_{2.5}$ 理化特征分析 …… 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 …… 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜(4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 …… 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远(4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 …… 董小芳, 杨华玮,张峦, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 …… 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷(5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 …… 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷(5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 …… 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静(5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 …… 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 职音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 …… 李艳利, 孙伟, 杨梓睿(5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应:以太湖乌溪港为例 …… 连慧姝, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影(5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 …… 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇(5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 …… 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思(5063)
北京市地下水中典型抗生素分布特征与潜在风险 …… 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅(5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 …… 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广(5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 …… 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪(5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 …… 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平(5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 …… 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励(5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 …… 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖(5116)
MIL-88A@ MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 …… 王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华(5124)
常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 …… 徐婷, 金艳青, 李勇(5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 …… 成雪君,王学江, 王浩,张志昊,赵建夫(5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 …… 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊(5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 …… 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良(5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 …… 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王骁静(5162)
游离氨(FA)对氨氧化过程氨逃逸影响试验 …… 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹(5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 …… 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾竞宇(5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 …… 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良(5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 …… 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽(5192)
活性污泥中硝化螺菌(*Nitrospira*)的富集及其动力学参数 …… 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博(5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 …… 张宁博, 李祥, 黄勇(5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 …… 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅(5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 …… 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军(5222)
长期暴露下纳米 $TiO_2$ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 …… 李慧婷, 崔福义(5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 …… 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟(5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 …… 张田, 许浩,茹淑华,苏德纯(5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 …… 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强(5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 …… 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振鸿, 薛罡, 高品(5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 …… 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞(5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 …… 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成(5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 …… 周雅, 毕春娟, 周枭潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一(5292)
基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 …… 高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒(5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发 …… 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊,邓泓(5308)
麦田 $O_3$ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 …… 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清(5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 …… 侯朋福, 薛利祥, 俞映倞, 薛利红, 范立慧, 杨林章(5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 $N_2O$ 排放的影响 …… 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼(5333)
成都平原不同类型沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和 $N_2O$ 排放通量特征及其影响因素 …… 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏(5344)
河流 $CO_2$ 与 $CH_4$ 排放研究进展 …… 王晓锋,袁兴中,陈槐,何奕忻,罗珍,刘恋,何宗苡(5352)
《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 …… (5367)
《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

# 成都平原不同类型沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量特征及其影响因素

冯香荣[1], 邓欧平[1], 邓良基[1*], 吴铭[1,2], 姚昆[1], 杨泽鹏[1]
(1. 四川农业大学资源学院, 成都 610030; 2. 四川省农科院土壤肥料研究所, 成都 610066)

**摘要**: 为研究不同类型沟渠 $CH_4$、$CO_2$ 和$N_2O$排放通量特征及其影响因素, 于 2014 年 3 月~2015 年 2 月, 以每月一次的频率, 采用静态浮箱法对成都平原的农业沟渠、农业生活复合沟渠、生活沟渠的 $CH_4$、$CO_2$ 和$N_2O$排放通量进行监测. 结果表明:①受人为活动的影响, 研究区域中 3 种类型的沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量较大, 变化范围分别为 -2.26~1 504.40 mg·(m²·h)⁻¹、0.69~40.00 mg·(m²·h)⁻¹、-2.27~70.35 μg·(m²·h)⁻¹, 且均表现出夏季高, 冬季低的特征. ②农业生活复合沟渠 $CO_2$ 排放通量显著高于农业沟渠和生活沟渠($P<0.05$), 生活沟渠 $CH_4$ 和$N_2O$排放通量显著高于农业生活复合沟渠和农业沟渠($P<0.05$). ③水温和降雨量是影响 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量的主要环境因子, 溶解氧(dissolved oxgen, DO)和全氮(total nitrogen, TN)是影响 $CO_2$ 和$N_2O$排放通量的主要水质参数; 铵态氮(ammonium nitrogen, $NH_4^+$-N)与 DO 是影响 $CH_4$ 排放通量的主要水质参数.

**关键词**:成都平原; 不同类型沟渠; 水-气界面通量; 静态漂浮箱法; 影响因素
**中图分类号**: X142 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)12-5344-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201705018

# Flux Characteristics of $CO_2$, $CH_4$, and $N_2O$ and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain

FENG Xiang-rong[1], DENG Ou-ping[1], DENG Liang-ji[1*], WU Ming[1,2], YAO Kun[1], YANG Ze-peng[1]
(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 610030, China; 2. Soil and Fertilizer Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

**Abstract**: In order to study the flux characteristics of $CH_4$, $CO_2$ and $N_2O$ in different ditches and their influencing factors, three types of ditches (an agricultural ditch, agricultural-living compound ditch, and living ditch) were monitored once a month from March 2014 to February 2015 using static floating chambers in the Chengdu Plain. The results showed that: ①Affected by human activities, $CO_2$, $CH_4$, and $N_2O$ fluxes were high in ditches and ranged from -2.26-1 504.40 mg·(m²·h)⁻¹, 0.69-40.00 mg·(m²·h)⁻¹, and -2.27-70.35 μg·(m²·h)⁻¹, respectively. All are higher in summer compared to autumn and spring, and are lowest in winter. ②The flux of $CO_2$ in agricultural-living compound ditches was significantly higher than that in agricultural ditches and living ditches ($P<0.05$), and the fluxes of $CH_4$ and $N_2O$ in living ditches were significantly higher than those in agricultural ditches and agricultural-living compound ditches ($P<0.05$). ③ Water temperature and rainfall were the main environmental factors affecting $CO_2$, $CH_4$, and $N_2O$ fluxes, and DO (dissolved oxygen) and TN (total nitrogen) were the main environmental factors affecting $CO_2$ and $N_2O$ fluxes. $NH_4^+$-N (ammonium nitrogen) and DO were the main water quality parameters affecting the $CH_4$ flux.

**Key words**: Chengdu plain; different types of ditches; water-air interface fluxes; static floating chamber; influencing factors

$CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$作为大气中 3 种最主要的温室气体, 对全球变暖的总贡献率超过了 70%, 并每年分别以 0.5%、0.8% 和 0.3% 的速度增长[1]. 水生系统被认为是重要的温室气体排放源, 据估算, 全球内陆水生系统 $CO_2$ 的排放量已经与海洋生态系统和陆地生态系统的总排放量相当[2], 全球水生系统排放的 $CH_4$ 和$N_2O$对大气贡献率分别达到 50% 和 25%~30%[3,4]. 目前, 大量学者对河流[5~7]、水库[8,9]、滩涂[10]等水-气界面温室气体的时空动态变化[11]、影响因素[12]、生产与运输机制[13]等问题进行了研究. 但是, 对于受人类生活和农业耕作双重影响, 且兼具河流和湿地双重特征的沟渠生态系统温室气体排放的相关研究较少.

成都平原作为我国最悠久的农业自流灌溉区和主要的粮食生产基地之一, 农业发达, 沟渠纵横. 沟渠作为平原地区重要的生态廊道具有汇水、持水的作用, 同时是养分截留、转化和传输的关键场所[14], 是平原区温室气体排放总量估算不可或缺的

**收稿日期**: 2017-05-02; **修订日期**: 2017-06-15
**基金项目**: 四川省科技厅国际合作计划项目(2016HH0085)
**作者简介**: 冯香荣(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水土资源可持续利用, E-mail:963280940@qq.com
* 通信作者, E-mail:auh6@sicau.edu.cn

一部分. 目前，关于成都平原沟渠温室气体排放的研究还未见报道. 因此，本研究通过实地勘察，运用静态浮箱法对成都平原农业沟渠、农业生活复合沟渠、生活沟渠水-气界面的 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量进行了分析，揭示了成都平原不同类型沟渠生态系统温室气体的排放特征及其影响因素，以期为进一步估算沟渠对温室效应的贡献比例提供依据.

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区域概括

成都平原地形平坦，南北长约 200 km，东西宽近 90 km，面积约9 000 $km^2$，是中国西南三省最大的平原. 境内人口密度为1 143.39人·$km^{-2}$，河网密度达 1.22 km·$km^{-2}$. 成都平原年均降雨量1 200 ~ 1 600 mm，年均气温 16.1℃，属暖湿亚热带太平洋东南季风气候. 本研究在成都平原西部选择了相同等级的 3 种类型沟渠，分别为农业沟渠(30°33′35″N,103°38′38″E)位于四川农业大学现代化农业研发基地，主要用于农业排灌水，农田退水会带入大量化肥；农业生活复合沟渠(30°33′34″N,103°38′32″E，复合沟渠)位于农村居民点，既有农业废水也有生活污水排入；生活沟渠(30°33′43″N,103°40′33″E)位于城市居民区，主要用于生活排污，大量厕所污水和厨房污水排入，有机物含量丰富. 3 条沟渠等级相同，水文状况基本一致，夏季水深范围为 1 ~1.5 m，春、秋两季水深范围为0.5 ~1 m，冬季水深范围为 0.25 ~0.5 m. 沟渠底质均为水泥混凝土结构，受上游都江堰清明节放水的影响，4 月 ~9 月，沟渠底部几乎没有沉积物，10 月 ~3 月，沉积物厚度范围为 1 ~3 cm.

### 1.2　采样方案及气象数据来源

每条沟渠共 3 个采样点，安全起见，样点随机分布在沟渠有阶梯的地点，每个样点放置 3 个静态箱同时采样. 采样时间为 2014 年 3 月 ~2015 年 2 月，选每月中旬天气晴好之日采样 1 次. 样品包括水-气界面温室气体和表层上覆水. 在采集样品的同时测定水温和 pH. 风速采用对应区域中国天气网发布的每小时平均 10 m 高度的风速. 月降雨量采用对应区域气象局发布的 24 h 降雨量计算总和. 用 500 mL 聚乙烯瓶采集表层 10 cm 水样，4(C 保存，在 48 h 内分析完毕. 本试验采用隔热静态漂浮箱(0.5 m ×0.5 m ×0.5 m)采集水-气界面的温室气体样品. 采样前，箱体于通风处倒置，使箱内气体混合均匀，然后将箱体在水面放平，用配有三通阀的注射器分别于箱体下水后 0、7、14、21 min 采集 0.2 L 气样，装于 0.5 L 镀铝内膜气袋，气袋在使用前排净空气，并用高纯 $N_2$ 清洗，清洗完毕后用真空泵将气袋内的 $N_2$ 抽出.

### 1.3　样品分析

#### 1.3.1　上覆水样品分析

pH 和水温采用便携式 pH 计法，溶解氧(dissolved oxygen，DO)采用电化学探头法，铵态氮(ammonium nitrogen，$NH_4^+$-N)采用靛酚蓝比色法，硝态氮(nitrate nitrogen，$NO_3^-$-N)采用紫外分光光度法，全氮(total nitrogen，TN)采用碱性过硫酸钾消解法，全磷(total phosphorus，TP)采用钼酸铵分光光度法.

#### 1.3.2　气体样品分析

温室气体的浓度使用 Agilent7890 气相色谱仪测定. 分析 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$采用的是相互独立的进样与分离系统，其中 $CO_2$ 和 $CH_4$ 采用的是单阀单柱进样分离系统，共用一个 FID 检测器，检测器温度 200℃，$N_2O$采用的是双阀双柱自动进样，反吹、分离和切换系统，单独使用 ECD 检测器，检测器温度 330℃，柱箱温度 55℃，镍触媒转化器温度 375℃[15].

将标准气体峰面积与浓度建立线性关系，由所采样品所测峰面积算出其浓度，再将箱内气体浓度随时间变化率代入下式计算温室气体排放通量[16]：

$$F = \rho V \frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t}\frac{1}{A} = \frac{Mp}{R(273+T)}\frac{V}{A}\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t} = H\frac{Mp}{R(273+T)}\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t} = 60H\frac{M\times 1.013}{8.314\times(273+T)}\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t} \quad (1)$$

式中，$F$ 为排放通量[mg·($m^2$·h)$^{-1}$]，$\rho$ 为密度(g·$L^{-1}$)，$V$ 为箱内体积(L)，d$c$/d$t$ 是箱内气体浓度随时间变化率[mol·(L·min)$^{-1}$]，$A$ 为采样箱横截面积，$M$ 为摩尔质量(g·$mol^{-1}$)，$P$ 为标准大气压(1.013 ×$10^5$ Pa)，$R$ 为普适气体常数[8.314 J·(mol·K)$^{-1}$]，$T$ 为箱内平均温度(℃)，$H$ 为水面至箱顶的高度(m).

### 1.4　数据分析

采用 Excel2007 绘制图表，SPSS22.0 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)分析数据之间的差异性，相关分析用 Pearson 相关系数衡量.

## 2　结果与分析

### 2.1　水质参数

农业沟渠、复合沟渠和生活沟渠 TP 年均质量

浓度均达不到地表水Ⅳ类( <0.3 mg·L$^{-1}$)标准. 农业沟渠、复合沟渠和生活沟渠 TN 年均质量浓度分别超过地表水Ⅴ类(2.0 mg·L$^{-1}$)标准的 2.0 倍、2.5 倍和 1.6 倍. $NH_4^+$-N是地表水氮素的主要构成形态, 生活沟渠$NH_4^+$-N年均质量浓度是地表水Ⅴ类(2.0 mg·L$^{-1}$)标准的 3 倍. 农业沟渠、复合沟渠和生活沟渠 DO 年均质量浓度均只能达到地表水Ⅳ类( >3 mg·L$^{-1}$)标准(表 1). N、P 超过临界值会导致水体出现由清水-浊水稳态转变、DO 含量降低等问题[17]. 地表水环境质量标准(GB 3838-2002)规定生活饮用水至少达到Ⅲ类标准, 农业用水至少达到Ⅴ类标准, 沟渠水质均达不到农用、饮用标准, 需要进一步治理才能作为农业用水和饮用水.

**表 1 沟渠水质情况**($n$ = 108)/mg·L$^{-1}$

Table 1 Water quality of ditches($n$ = 108)/mg·L$^{-1}$

| 沟渠类型 | TN | TP | $NO_3^-$-N | $NH_4^+$-N | DO |
|---|---|---|---|---|---|
| 农业 | 6.05 ± 1.83 | 0.31 ± 0.07 | 2.64 ± 1.14 | 1.94 ± 0.87 | 3.32 ± 1.92 |
| 复合 | 6.94 ± 2.64 | 0.34 ± 0.12 | 1.57 ± 0.67 | 1.63 ± 0.87 | 3.61 ± 1.09 |
| 生活 | 5.26 ± 1.39 | 0.39 ± 0.10 | 1.81 ± 0.63 | 5.97 ± 2.43 | 3.03 ± 1.55 |

## 2.2 沟渠平均水温和降雨量月变化

采样日水温和月均降雨量的变化范围分别为 8.33 ~ 23.65℃和 3.9 ~ 382.7 mm(图 1). 水温和降雨量在观测期间总体呈现先增高后降低的趋势, 并均在 7 月达到峰值, 分别为 23.65℃和 382.7 mm, 在 1 月均达到最低值, 分别为 8.33℃和 3.9 mm. 春季(3 ~ 5 月)、夏季(6 ~ 8 月)、秋季(9 ~ 11 月)、冬季(12 月 ~ 次年 2 月)平均水温分别为 12.75、22.45、14.28、8.96℃. 降雨量主要集中在夏季, 达 689.4 mm, 占年降雨量的 71.56%. 冬季降雨量为 14.3 mm, 仅为年降雨量的 1.48%. 春、秋季降雨量分别为 105.2 mm、154.5 mm, 水温和降雨量都表现为夏 > 秋 > 春 > 冬的特征.

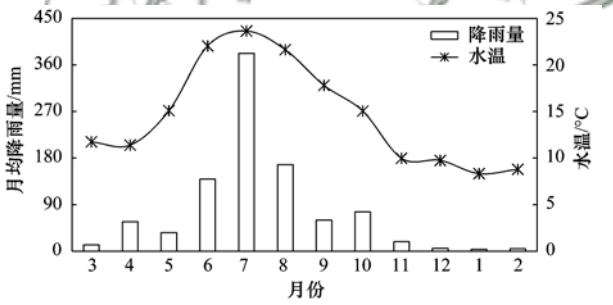



**图 1 采样日水温和月均降雨量变化特征**

Fig. 1 Water temperature in samples and daily and monthly variation of rainfall

## 2.3 不同类型沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$通量的时间变化

农业沟渠、复合沟渠和生活沟渠 $CO_2$ 月均排放通量范围分别为 91.11 ~ 1 126.21、 -1.23 ~ 1 287.31、-2.23 ~ 936.63 mg·(m$^2$·h)$^{-1}$(图 2). 3 条沟渠 $CO_2$ 排放通量均呈现先增加后降低的趋势. 农业沟渠 $CO_2$ 排放通量在 7 月达到峰值, 复合沟渠和生活沟渠均在 6 月达到峰值, 3 条沟渠均在 1 月达到最低值. 只有复合沟渠和生活沟渠在 1 月的数据为负值, 表现为 $CO_2$ 的汇, 其他时间则表现为 $CO_2$ 的源. 3 条沟渠 $CO_2$ 排放通量均表现为夏 > 秋 > 春 > 冬, 且 3 条沟渠夏季 $CO_2$ 累计排放通量占全年累计排放通量的 56.14%(表 2), 说明夏季是沟渠 $CO_2$ 排放的主要季节.

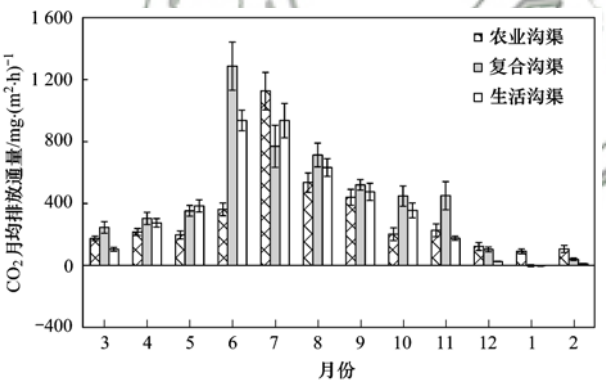



**图 2 2014 年 3 月 ~ 2015 年 2 月沟渠 $CO_2$ 通量月变化特征**

Fig. 2 Monthly variation of $CO_2$ flux from March 2014 to February 2015

农业沟渠、复合沟渠和生活沟渠的 $CH_4$ 月均排放通量范围分别为 2.63 ~ 19.06、0.69 ~ 23.94、3.73 ~ 40.00 mg·(m$^2$·h)$^{-1}$(图 3). 3 条沟渠 $CH_4$

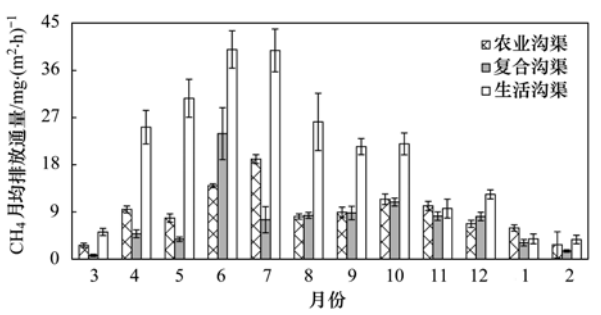



**图 3 2014 年 3 月 ~ 2015 年 2 月沟渠 $CH_4$ 通量月变化特征**

Fig. 3 Monthly variation of $CH_4$ flux from March 2014 to February 2015

的排放通量均呈现先增加后降低的趋势. 农业沟渠 $CH_4$ 排放通量在 7 月达到峰值，在 3 月出现最小值. 复合沟渠在6 月达到峰值，在3 月出现最小值. 生活沟渠在 6 月达到峰值，在 2 月出现最小值. 在整个观测期间均没有负值出现，说明沟渠是 $CH_4$ 的净排放源. 农业沟渠 $CH_4$ 排放通量均值表现为夏 > 秋 > 春 > 冬，复合沟渠表现为夏 > 秋 > 冬 > 春，生活沟渠表现为夏 > 春 > 秋 > 冬(表 2).

**表 2　不同类型沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$季均通量**[1)]

Table 2　Seasonal fluxes of $CO_2$, $CH_4$ and $N_2O$ in different types of ditches

| 沟渠类型 | 春季 | | | 夏季 | | | 秋季 | | | 冬季 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $CO_2$ | $CH_4$ | $N_2O$ | $CO_2$ | $CH_4$ | $N_2O$ | $CO_2$ | $CH_4$ | $N_2O$ | $CO_2$ | $CH_4$ | $N_2O$ |
| 农业 | 195.51 | 6.64 | 2.34 | 674.19 | 13.50 | 28.77 | 288.99 | 10.15 | 7.18 | 106.33 | 5.12 | 2.59 |
| 复合 | 300.19 | 3.09 | 3.09 | 923.34 | 13.26 | 13.26 | 472.97 | 9.28 | 9.27 | 46.99 | 4.26 | 4.26 |
| 生活 | 254.22 | 20.34 | 11.19 | 834.93 | 35.33 | 65.72 | 334.98 | 17.70 | 9.70 | 11.42 | 6.63 | 2.94 |

1) $CO_2$ 和 $CH_4$ 通量单位为$mg\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$，$N_2O$通量单位为 $\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$

农业沟渠、复合沟渠和生活沟渠$N_2O$月均排放通量范围分别为 1.01 ~ 35.45、0.71 ~ 27.61、−2.27 ~ 70.35 $\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$(图 4). 农业沟渠$N_2O$排放通量在 7 月达到峰值，在 3 月达到最小值. 复合沟渠和生活沟渠均在 6 月达到峰值，分别在 3 月和 11 月达到最小值. 只有生活沟渠在 11 月为负值，表现为$N_2O$的汇，其他月份为$N_2O$的源. 农业沟渠和复合沟渠$N_2O$排放通量均值均表现为夏 > 秋 > 冬 > 春，生活沟渠表现为夏 > 春 > 秋 > 冬，且 3 条沟渠夏季$N_2O$累计排放通量占全年累计排放通量的 67.21%(表 2)，表明夏季是沟渠$N_2O$排放的主要季节.

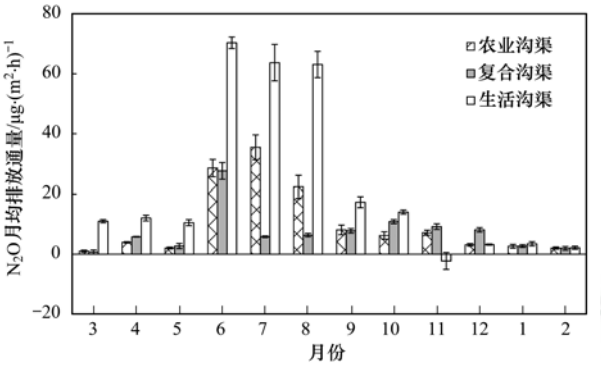
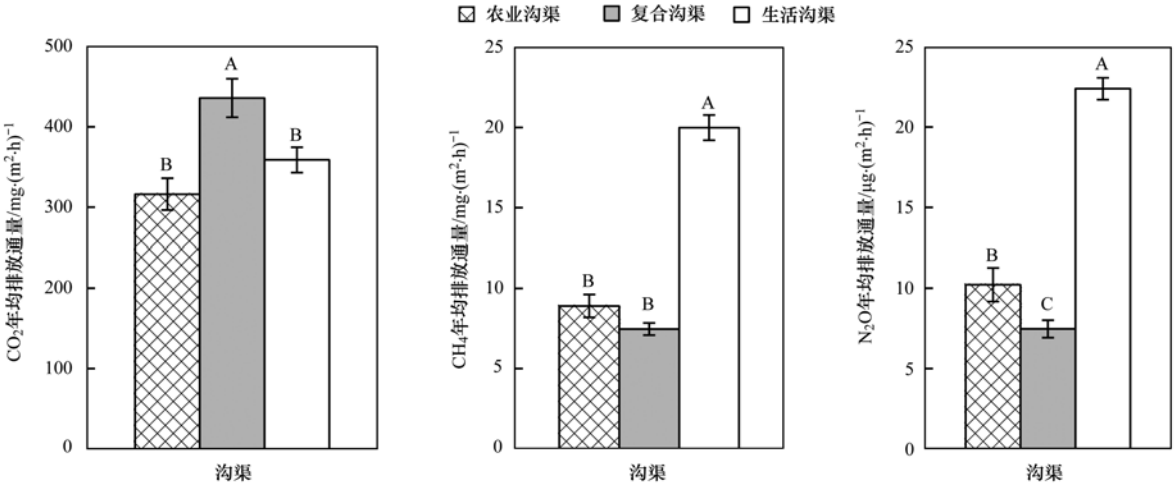



**图 4　2014 年 3 月 ~ 2015 年 2 月沟渠$N_2O$通量月变化特征**

Fig. 4　Monthly variation of $N_2O$ flux from March 2014 to February 2015

**2.4**　不同类型沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$年均通量

农业沟渠、复合沟渠和生活沟渠 $CO_2$ 年均排放通量分别为 343.74、480.86、424.61 $mg\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$，复合沟渠 $CO_2$ 排放通量显著高于生活沟渠和农业沟渠($P<0.05$，图 5). 农业沟渠、复合沟渠和生活沟渠 $CH_4$ 年均排放通量分别为 9.18、8.66、20.27 $mg\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$(图 5)，表现为生活沟渠 > 农业沟渠 > 复合沟渠. 农业沟渠、复合沟渠和生活沟渠$N_2O$年均排放通量分别为 10.22、7.47、22.39 $\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$(图 5)，表现为生活沟渠 > 农业沟渠 > 复合沟渠. 生活沟渠 $CH_4$ 和$N_2O$累计排放通量分别占 3 条沟渠累计排放通量的 54.97% 和 55.86%，说




不同大写字母表示不同沟渠间差异显著($P<0.05$)；相同大写字母表示不同沟渠间差异不显著

**图 5　不同类型沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$的年均通量**

Fig. 5　Annual fluxes of $CO_2$, $CH_4$ and $N_2O$ in different types of ditches

明生活沟渠是重要的 $CH_4$ 和$N_2O$排放源.

## 3 讨论

### 3.1 沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放时空变化特征

复合沟渠中的微生物受到生活污水和农业化肥的双重刺激, 造成 $CO_2$ 成倍产生, $CO_2$ 在水体中为过饱和状态并在水-气界面大量排放, 导致复合沟渠 $CO_2$ 年均排放通量显著高于农业沟渠和生活沟渠($P<0.05$, 图 5). 生活沟渠含大量有机污染物, 表现为典型的城市污水污染特征, 而有机污染的水体更能促进水生系统$N_2O$的排放[18], 所以生活沟渠$N_2O$年均排放通量显著高于农业沟渠和复合沟渠($P<0.05$, 图 5). $CH_4$ 主要由乙酸厌氧发酵产生, 上覆水中的 DO 会将大部分的 $CH_4$ 氧化成 $CO_2$, 生活沟渠 DO 质量浓度为最低, 复合沟渠 DO 质量浓度最高, 所以生活沟渠 $CH_4$ 年均排放通量显著高于农业沟渠和复合沟渠($P<0.05$, 图 5). 有研究显示相对于处于自然生态系统的河流, 受人为干扰的河流 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放通量可能会增加 1 个数量级[19,20], 本研究中, $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$的年均排放通量分别为 416.40 $mg\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$、12.70 $mg\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$、13.36 $\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$, 其中 $CH_4$ 和$N_2O$的排放通量高于自然生态系统的湖泊和水库[18,21], 因此, 人类活动强度是造成不同水体温室气体排放通量差异的主要原因.

3 种类型沟渠 $CO_2$、$CH_4$、$N_2O$的排放通量均呈现出夏季最高, 冬季最低, 春秋季相当特征(图 2 ~ 4). 夏季平均水温 22.5℃, 适宜微生物活动, 产生的 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$相对更多, 而冬季人类活动量小, 减弱了对沟渠系统的干扰, 同时冬季较低的水温不利于气体向水-气界面运输, 导致温室气体长时间储存在上覆水中[22]. 这与对小兴安岭森林沼泽带[23]、上海苏州河[6]、黄河口[24]、沿海盐沼湿地[25]等地的研究结果一致. 但不同于水库 $CO_2$ 排放通量在春季达到最大值[26], 春季沟渠水位变化并不明显, 而春季农业需水量大, 水库放水导致消落带水位变化剧烈, 增强消落带中微生物活动排放 $CO_2$. 也不同于芦苇湿地$N_2O$排放通量在冬季最高[27], 是因为沟渠为水泥混凝土结构, 不能生长植物, 而湿地的芦苇在冬季枯萎, 为$N_2O$的产生提供充足的底物与能量. 本研究中复合沟渠和生活沟渠在 1 月的 $CO_2$ 排放通量为负值, 生活沟渠在 11 月的$N_2O$排放通量为负值, 是由于冬季气压升高, 导致温室气体在大气中的分压升高, 促使温室气体向水体扩散[21]. 河流、潮滩等地方$N_2O$和 $CH_4$ 在春冬季也出现了弱吸收现象[10,28]. 因此, 不同类型的水生系统, 其水-气界面温室气体排放的时空变化特征不尽相同.

### 3.2 沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放的影响因素

#### 3.2.1 环境因子对 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量的影响

温暖的水体能促进沉积物中有机物矿化产 $CO_2$ 和 $CH_4$[29,30], $CO_2$ 和 $CH_4$ 排放通量分别与水温呈显著正相关($P<0.05$, 表 3). $N_2O$排放通量与水温的相关系数高于 $CO_2$ 和 $CH_4$, 是因为水温升高, 能够同时增强硝化细菌和反硝化细菌的活性, 从而成倍地产生$N_2O$[22,31]. 降雨能够带入大量含碳、氮的悬浮物质作为微生物活动的底物, 还能减少 $CH_4$ 在向水-气界面运输过程中的氧化消耗, 同时水体厌氧的环境有助于反硝化作用产生$N_2O$[32], 除此之外, 降雨对气体在水中的运输速率有促进作用[33], 能够加快温室气体的扩散, 所以 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量与降雨量均极显著正相关($P<0.01$, 表 3). $CO_2$、$CH_4$ 排放通量与风速呈正相关, $N_2O$通量与风速呈负相关, 但均达不到显著水平(表 3). 可能有两个原因, 一是本研究区位于平原地区, 风速较小且变化不大(0.9 ~ 1.2 $m\cdot s^{-1}$), 当风速小于某一临界值时, 对水-气界面的气体交换量基本无影响[34], 二是本研究采用静态箱法, 箱体极大削弱了风速对水-气界面气体交换通量的影响.

**表 3 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$通量与环境因子的皮尔逊相关系数**[1)]

Table 3 Correlation coefficient of environmental factors with the fluxes of $CO_2$, $CH_4$, and $N_2O$

| 项目 | 水温 | 降雨量 | 风速 |
|---|---|---|---|
| $CO_2$ | 0.784 ** | 0.965 ** | 0.280 |
| $CH_4$ | 0.680 * | 0.764 ** | 0.159 |
| $N_2O$ | 0.926 ** | 0.824 ** | −0.034 |

1) * 表示 $P<0.05$, * * 表示 $P<0.01$

#### 3.2.2 水质参数对 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量的影响

本研究期间 pH 值变化范围不大(7.11 ~ 7.86, $n=108$), $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量与 pH 的相关性均未达到显著水平(表 4). $CO_2$ 与 DO 呈极显著负相关($P<0.01$, 表 4), 这与很多研究结果不同, 可能是因为沟渠较之于其他类型的水体具有独特的水动力条件和物理特征, 具体的原因有待进一步研究. 沉积物厌氧层产生的 $CH_4$ 进入上覆水后, 90% 会被氧化消耗[35], 因此 DO 成为沟渠 $CH_4$ 排放通

量的主控因子. $N_2O$主要由反硝化作用产生，沟渠水体 DO 较低(均值 3.32 mg·$L^{-1}$)，反硝化作用占主导地位[36]. 本研究中$N_2O$排放通量与 DO 呈极显著负相关($P<0.01$，表 4)，这与对金川河的研究相反[8]，是因为$N_2O$也能通过硝化作用产生，金川河水体 DO 较多，硝化作用占主导地位. 可见，DO 的浓度决定了$N_2O$的主要产生途径. 有研究指出，水体$NH_4^+$-N存在临界值，低于临界值时，$CH_4$ 排放通量与$NH_4^+$-N质量浓度呈显著正相关($P<0.05$，表4)，超过临界值后会抑制甲烷菌的活性[37,38]，所以 $CH_4$ 排放通量与$NH_4^+$-N质量浓度也可能显著负相关[26]. 外源有机氮输入可以减小微生物呼吸过程对电子供体的竞争，从而促进 $CO_2$ 产生[39]，沟渠水体高氮负荷的特征可增加$N_2O$的产生量[40]，所以本研究中 $CO_2$、$N_2O$排放通量与 TN 质量浓度均极显著正相关($P<0.01$，表 4). 本研究中，$CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量与 TP 和 $NO_3$-N 质量浓度均未达到显著相关水平(表 4).

**表 4　$CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$通量与水质参数的皮尔逊相关系数**1)

Table 4　Correlation coefficient of Water quality parameters with the fluxes of $CO_2$, $CH_4$, and $N_2O$

| 项目 | pH | DO | $NH_4^+$-N | $NO_3^-$-N | TN | TP |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $CO_2$ | -0.149 | -0.767** | 0.525 | -0.426 | 0.735** | -0.081 |
| $CH_4$ | 0.029 | -0.594* | 0.592* | -0.314 | 0.563 | -0.003 |
| $N_2O$ | -0.075 | -0.887** | 0.225 | -0.531 | 0.773** | -0.022 |

1) * 表示 $P<0.05$，* * 表示 $P<0.01$

## 4　结论

(1)研究区沟渠的水质大部分为劣五类水，本文选取的 3 条沟渠的水质均达不到农用、饮用标准，沟渠高氮负荷，低溶氧量的水体环境能促进温室气体的大量排放.

(2)沟渠温室气体排放时空变化明显，3 条沟渠 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$月均排放通量的变化范围分别为 -2.26 ~ 1 504.40 mg·($m^2$·h)$^{-1}$、0.69 ~ 40.00 mg·($m^2$·h)$^{-1}$、-2.27 ~ 70.35 μg·($m^2$·h)$^{-1}$，其与降雨量、水温均表现出夏高冬低的特征；不同类型沟渠，温室气体排放规律不同，复合沟渠 $CO_2$ 排放通量显著高于农业沟渠和生活沟渠($P<0.05$)，生活沟渠 $CH_4$ 和$N_2O$ 排放通量显著高于农业生活复合沟渠和农业沟渠($P<0.05$).

(3)影响 $CO_2$、$CH_4$ 和$N_2O$排放通量的主要环境因子相同，为水温和降雨量；而水质参数不同，具体表现为 DO 和 TN 是影响 $CO_2$ 和$N_2O$排放通量的主要水质参数，DO 和$NH_4^+$-N是影响 $CH_4$ 排放通量的主要水质参数.

**参考文献：**


[1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, *et al*. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [A]. In: Solomon S, Qin D, Manning M, *et al* (Eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] Borges A V, Darchambeau F, Teodoru C R, *et al*. Globally significant greenhouse-gas emissions from African inland waters [J]. Nature Geoscience, 2015, **8**(8): 637-642.

[3] Khalil M A K, Rasmussen R A. Sources, sinks, and seasonal cycles of atmospheric methane [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1983, **88**(C9): 5131-5144.

[4] Liu X L, Bai L, Wang Z L, *et al*. Nitrous oxide emissions from river network with variable nitrogen loading in Tianjin, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **157**: 153-161.

[5] 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 Riverin autumn and their influencing factors[J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1270-1276.

[6] 常思琦，王东启，俞琳，等. 上海城市河流温室气体排放特征及其影响因素[J]. 环境科学研究，2015，**28**(9)：1375-1381.
Chang S Q, Wang D Q, Yu L, *et al*. Greenhouse gas emission characteristics from urban rivers in Shanghai [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(9): 1375-1381.

[7] 吴瑶洁，李海英，陈文重，等. 夏季温榆河温室气体释放特征与影响因素研究[J]. 环境科学与技术，2016，**39**(5)：8-16.
Wu Y J, Li H Y, Chen W Z, *et al*. Effects and emission characteristics of greenhouse gases from Wenyu River in summer [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(5): 8-16.

[8] 韩洋，郑有飞，吴荣军，等. 南京典型水体春季温室气体排放特征研究[J]. 中国环境科学，2013，**33**(8)：1360-1371.
Han Y, Zheng Y F, Wu R J, *et al*. Greenhouse gases emission characteristics of Nanjing typical waters in spring [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(8): 1360-1371.

[9] 程炳红，郝庆菊，江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展[J]. 湿地科学，2012，**10**(1)：121-128.
Cheng B H, Hao Q J, Jiang C S. Research progress on the emission of greenhouse gases from reservoir and itsinfluence

factors[J]. Wetland Science, 2012, **10**(1): 121-128.

[10] 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹. 苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2383-2392.
Xu X W H, Zou X Q, Liu J R. Temporal and spatial dynamics of greenhouse gas emissions and its controlling factors in a coastal saline wetland in North Jiangsu[J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2383-2392.

[11] Marty D, Michotey V, Bonin P. Dynamics of two greenhouse gases, methane and nitrous oxide, along the Rhone River Plume (Gulf of Lions, Northwestern Mediterranean Sea)[A]. In: Ceccaldi HJ, Dekeyser I, Girault M, *et al* (Eds.). Global Change: Mankind-Marine Environment Interactions[M]. Netherlands: Springer, 2010. 377-383.

[12] Liu X L, Liu C Q, Li S L, *et al*. Spatiotemporal variations of nitrous oxide ($N_2O$) emissions from two reservoirs in SW China [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(31): 5458-5468.

[13] DelSontro T, McGinnis D F, Sobek S, *et al*. Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: contribution from bubbling sediments[J]. Environmental Science &Technology, 2010, **44**(7): 2419-2425.

[14] 郗敏, 孔范龙, 吕宪国, 等. 三江平原沟渠系统水体和底泥的养分特征及效应[J]. 地理科学, 2014, **34**(3): 358-364.
Xi M, Kong F L, Lv X G, *et al*. Nutrient variation in water and sediments of ditch wetlands andtheir effects on environment in Sanjiang Plain, China[J]. ScientiaGeographicaSinica, 2014, **34**(3): 358-364.

[15] Xia Y Q, Li Y F, Ti C P, *et al*. Is indirect $N_2O$ emission a significant contributor to the agricultural greenhouse gas budget? A case study of a rice paddy-dominated agricultural watershed in eastern China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **77**: 943-950.

[16] Mäkinen K, Khan S. Policy considerations for greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs[J]. Water Alternatives, 2010, **3**(2): 91-105.

[17] 董静, 高云霓, 李根保. 淡水湖泊浮游藻类对富营养化和气候变暖的响应[J]. 水生生物学报, 2016, **40**(3): 615-623.
Dong J, Gao Y N, Li G B. A review: responses of phytoplankton communities to eutrophication and climate warming in freshwater lakes[J]. ActaHydrobiologicaSinica, 2016, **40**(3): 615-623.

[18] 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 等. 南京河流夏季水-气界面$N_2O$排放通量[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 348-355.
Han Y, Zheng Y F, Wu R J, *et al*. Nitrous oxide flux at the water-air interface of the rivers in Nanjing during summer[J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 348-355.

[19] Baulch H M, Schiff S L, Maranger R, *et al*. Nitrogen enrichment and the emission of nitrous oxide from streams[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2011, **25**(4): GB4013.

[20] Beaulieu J J, Shuster W D, Rebholz J A. Nitrous oxide emissions from a large, impounded river: the Ohio River[J]. Environmental Science &Technology, 2010, **44**(19): 7527-7533.

[21] 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 等. 不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4032-4042.
Li J H, Pu J B, Sun P A, *et al*. Summer greenhouse gases exchange flux across water-air interface in three water reservoirs located in different geologic setting in Guangxi, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4032-4042.

[22] Myrstener M, Jonsson A, Bergström A K. The effects of temperature and resource availability on denitrification and relative $N_2O$ production in boreal lake sediments[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **47**: 82-90.

[23] 牟长城, 刘霞, 孙晓新, 等. 小兴安岭阔叶林沼泽土壤$CO_2$、$CH_4$和$N_2O$排放规律及其影响因子[J]. 生态学报, 2010, **30**(17): 4598-4608.
Mu C C, Liu X, Sun X X, *et al*. Emissions of $CO_2$, $CH_4$ and $N_2O$ from broad-leaned forested swamp soils in Xiaoxing'an Mountains[J]. ActaEcologicaSinica, 2010, **30**(17): 4598-4608.

[24] Zhang L H, Song L P, Zhang L W, *et al*. Seasonal dynamics in nitrous oxide emissions under different types of vegetation in saline-alkaline soils of the Yellow River Delta, China and implications for eco-restoring coastal wetland[J]. Ecological Engineering, 2013, **61**: 82-89.

[25] Xiang J, Liu D Y, Ding W X, *et al*. Invasion chronosequence of *Spartinaalterniflora* on methane emission and organic carbon sequestration in a coastal salt marsh[J]. Atmospheric Environment, 2015, **112**: 72-80.

[26] 李红丽, 杨萌, 张明祥, 等. 玉渡山水库生长季温室气体排放特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(2): 406-412.
Li H L, Yang M, Zhang M X, *et al*. Characteristics and environmental determinants of greenhouse gas emissions from Yudushan Reservoir during growth season[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(2): 406-412.

[27] 谢文霞, 赵全升, 张莠, 等. 胶州湾河口湿地秋冬季$N_2O$气体排放通量特征[J]. 地理科学, 2011, **31**(4): 464-469.
Xie W X, Zhao Q S, Zhang F, *et al*. Characteristics of $N_2O$ flux in estuary wetland of Jiaozhou Bay in autumn and winter[J]. ScientiaGeographicaSinica, 2011, **31**(4): 464-469.

[28] Rosamond M S, Thuss S J, Schiff S L. Dependence of riverine nitrous oxide emissions on dissolved oxygen levels[J]. Nature Geoscience, 2012, **5**(10): 715-718.

[29] Keating JrM P, Ochs C A, Balachandran D, *et al*. Spatial variation related to hydrologic patterns and vegetation in greenhouse gas fluxes from the Mississippi Delta agricultural region[J]. Applied Soil Ecology, 2016, **98**: 278-281.

[30] Gudasz C, Bastviken D, Steger K, *et al*. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments[J]. Nature, 2010, **466**(7305): 478-481.

[31] 李平, 郎漫. 硝化和反硝化过程对林地和草地土壤$N_2O$排放的贡献[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(22): 4726-4732.
Li P, Lang M. Contribution of nitrification and denitrification to the nitrousoxide emission from forest and grassland soils[J]. ScientiaAgriculturaSinica, 2013, **46**(22): 4726-4732.

[32] Jia Z M, Liu T, Xia X H, *et al*. Effect of particle size and composition of suspended sediment on denitrification in river water[J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 934-940.

[33] Bastviken D, Cole J J, Pace M L, *et al*. Fates of methane from different lake habitats: connecting whole - lake budgets and $CH_4$ emissions[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2008, **113**(G2): G02024.

[34] Cole J J, Caraco N F, Kling G W, *et al*. Carbon dioxide

supersaturation in the surface waters of lakes[J]. Science, 1994, **265**(5178): 1568-1570.

[35] Dan J G, Kumai T, Sugimoto A, *et al*. Biotic and abiotic methane releases from Lake Biwa sediment slurry [J]. Limnology, 2004, **5**(3): 149-154.

[36] 马培, 李新艳, 王华新, 等. 河流反硝化过程及其在河流氮循环与氮去除中的作用[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(4): 623-633.
Ma P, Li X Y, W H X, *et al*. Denitrification and it's role in cycling and removal of nitrogen in river[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(4):623-633.

[37] 李哲, 白镭, 郭劲松, 等. 三峡水库两条支流水-气界面 $CO_2$、$CH_4$ 通量比较初探[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1008-1016.
Li Z, Bai L, Guo J S, *et al*. Comparative study on water-air $CO_2$, $CH_4$ flux in two tributaries in theThree Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 1008-1016.

[38] 张丽华, 宋长春, 王德宣, 等. 外源氮对沼泽湿地 $CH_4$ 和 $N_2O$通量的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(4): 1442-1449.
Zhang L H, Song C C, Wang D X, *et al*. Effects of exogenous nitrogen input on the $CH_4$ and $N_2O$ fluxes in freshwatermarshes [J]. ActaEcologicaSinica, 2007, **27**(4): 1442-1449.

[39] Schrier-Uijl A P, Veraart A J, Leffelaar P A, *et al*. Release of $CO_2$ and $CH_4$ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands[J]. Biogeochemistry, 2011, **102**(1-3): 265-279.

[40] 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.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 12

Dec. 15, 2017


## CONTENTS


Regional Transport Matrix Study of $PM_{2.5}$ in Jingjinji Region, 2015 ····· WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, *et al.* (4897)

Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks ····· XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, *et al.* (4905)

Space-Time Estimations and Mapping of $PM_{2.5}$ Fine Particulates Based on Multi-source Data ····· XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, *et al.* (4913)

Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of $PM_{2.5}$ in East China ····· YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, *et al.* (4924)

Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing ····· ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, *et al.* (4932)

Seasonal Variation of Carbon Fractions in $PM_{2.5}$ in Heze ····· LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, *et al.* (4943)

Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ in Selected Cities in Liaoning Province ····· ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, *et al.* (4951)

Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin ····· YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, *et al.* (4958)

Physico-chemical Characteristic Analysis of $PM_{2.5}$ in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming ····· WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, *et al.* (4968)

Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 ····· DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, *et al.* (4976)

Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus ····· LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, *et al.* (4983)

Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2H$) and Oxygen ($\delta^{18}O$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai ····· DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, *et al.* (4991)

Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China ····· CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, *et al.* (5004)

Spatial and Temporal Variability of $CO_2$ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir ····· YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, *et al.* (5012)

Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area ····· ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, *et al.* (5020)

Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir ····· CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, *et al.* (5032)

Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas: A Case in the Taizi River Basin ····· LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)

Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall: A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin ····· LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, *et al.* (5047)

Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain ····· MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, *et al.* (5056)

Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model ····· XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)

Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing ····· CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, *et al.* (5074)

Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen ····· LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, *et al.* (5081)

Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems ····· LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, *et al.* (5090)

Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter ····· LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, *et al.* (5097)

Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent ····· LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, *et al.* (5106)

Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water ····· GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, *et al.* (5116)

MIL-88A@ MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate ····· WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, *et al.* (5124)

Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature ····· XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)

Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolital ····· CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, *et al.* (5139)

Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes ····· MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, *et al.* (5146)

Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater ····· LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, *et al.* (5154)

Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater ····· ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (5162)

Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process ····· SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, *et al.* (5169)

Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an ····· KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, *et al.* (5174)

Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX ····· WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, *et al.* (5184)

Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF Systemand Evolution Properties of Microorganisms ····· YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, *et al.* (5192)

Enrichment of *Nitrospira* in Activated Sludge and Kinetic Characterization ····· YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, *et al.* (5201)

Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate ····· ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)

Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor ····· ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, *et al.* (5215)

Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitritation in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR ····· SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, *et al.* (5222)

Long-term Impacts of $TiO_2$ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor ····· LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)

Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta ····· ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, *et al.* (5237)

Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers ····· ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, *et al.* (5247)

Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir ····· HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, *et al.* (5256)

Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai ····· GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, *et al.* (5262)

Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City ····· SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, *et al.* (5272)

Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area ····· YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, *et al.* (5282)

Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai ····· ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, *et al.* (5292)

Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants ····· GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, *et al.* (5299)

Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice ····· SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, *et al.* (5308)

Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield ····· ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, *et al.* (5315)

Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields ····· HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, *et al.* (5326)

Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil $N_2O$ Emission in the North China Plain ····· SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, *et al.* (5333)

Flux Characteristics of $CO_2$, $CH_4$, and $N_2O$ and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain ··· FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, *et al.* (5344)

Review of $CO_2$ and $CH_4$ Emissions from Rivers ····· WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, *et al.* (5352)