

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ..... 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ..... 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ..... 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 ..... 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 ..... 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 ..... 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 ..... 吴雪萍 (1926)

中国城市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>时空分布特征和影响因素分析 ..... 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>时空变化特征及影响因素 ..... 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染特征及成因分析 ..... 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM<sub>2.5</sub>化学组成特征和空间差异 ..... 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM<sub>2.5</sub>来源 ..... 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM<sub>2.5</sub>改善的溢出效益 ..... 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM<sub>2.5</sub>载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ..... 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ..... 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 ..... 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ..... 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 ..... 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ..... 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 ..... 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ..... 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ..... 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ..... 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ..... 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ..... 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橦橦 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ..... 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ..... 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 ..... 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ..... 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ..... 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ..... 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ..... 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ..... 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ..... 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ..... 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ..... 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ..... 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ..... 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ..... 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ..... 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ..... 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N<sub>2</sub>O排放影响:基于Meta分析 ..... 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ..... 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ..... 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ..... 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ..... 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 ..... 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ..... 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ..... 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ..... 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ..... 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ..... 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ..... 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ..... 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ..... 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ..... 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

# 高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征

张欣悦<sup>1,2</sup>, 肖启涛<sup>2\*</sup>, 谢晖<sup>2</sup>, 刘臻婧<sup>3</sup>, 邱银国<sup>2</sup>, 罗菊花<sup>2</sup>, 徐向华<sup>1\*</sup>, 段洪涛<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室, 南京 210008; 3. 湖南省气候中心, 长沙 410118)

**摘要:** 农业流域水体氮循环过程与农业活动有着十分紧密联系, 会随着农业活动的持续进行而成为大气 N<sub>2</sub>O 的重要排放源. 小型池塘具有灌溉、蓄水和纳污等多种功能, 是农业种植区和农村景观的重要组成部分. 以巢湖北岸典型农业流域烔炀河流域为研究对象, 选取 3 种不同类型(村塘、农塘和水塘), 共计 6 个池塘, 于 2020 年 9 月至 2021 年 9 月连续采样观测, 探究了农业流域不同景观池塘 N<sub>2</sub>O 排放特征及其影响因素. 结果表明, 用于生活污水承纳的村塘 N<sub>2</sub>O 排放最高, 其次为用于农业灌溉的农塘, 其 N<sub>2</sub>O 排放通量分别为流域自然水塘排放量 [(1.33±2.50) μmol·(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>] 的 8 倍和 4 倍. 连续观测表明不同景观池塘 N<sub>2</sub>O 排放表现出明显的时间变化特征, 但其 N<sub>2</sub>O 排放时间变化的调控因子有所不同. 其中, 村塘与农塘 N<sub>2</sub>O 排放主要受氮负荷和降雨影响, 而远离村庄农田的水塘 N<sub>2</sub>O 排放变化主要受水温驱动. 烔炀河流域池塘是大气 N<sub>2</sub>O 显著排放源, 年均 N<sub>2</sub>O 排放通量为 (5.73±10.61) μmol·(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>, 农业氮负荷输入是其 N<sub>2</sub>O 高排放的主要原因, 明晰池塘用途和类型对估算农业流域小型水体 N<sub>2</sub>O 排放十分重要.

**关键词:** 农业活动; 池塘水体; N<sub>2</sub>O 排放; 时空变化; 影响因素

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2385-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202304223

## Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity

ZHANG Xin-yue<sup>1,2</sup>, XIAO Qi-tao<sup>2\*</sup>, XIE Hui<sup>2</sup>, LIU Zhen-jing<sup>3</sup>, QIU Yin-guo<sup>2</sup>, LUO Ju-hua<sup>2</sup>, XU Xiang-hua<sup>1\*</sup>, DUAN Hong-tao<sup>2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Hunan Climate Center, Changsha 410118, China)

**Abstract:** The nitrogen cycle of water bodies in agricultural watersheds is closely related to the farmland ecosystem, which will become a significant emission source of atmospheric N<sub>2</sub>O with increasing agricultural activity. Ponds are an important component of agricultural catchment due to their functions as water storage, domestic sewage receiving, and irrigation. In this study, Tongyang River Catchment, a typical agricultural catchment on the northern part of Chaohu Lake, was selected as the research object. Three different types of landscape ponds (sewage pond, irrigation pond, and storage pond) with a total number of six ponds were selected to investigate the N<sub>2</sub>O emissions based on continuous field sampling from September 2020 to September 2021. The results showed that the highest N<sub>2</sub>O emission flux occurred in sewage ponds, followed by the irrigation pond, and the N<sub>2</sub>O emissions fluxes in the sewage pond and irrigation pond were eight times and four times higher than that in storage ponds [(1.33±2.50) μmol·(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>], respectively. Continuous observation showed that N<sub>2</sub>O emissions in different landscape ponds showed obvious temporal variation, but the factors influencing the N<sub>2</sub>O emissions varied among ponds. The N<sub>2</sub>O emissions from sewage ponds and irrigation pond were mainly affected by nitrogen load and precipitation, whereas N<sub>2</sub>O emissions from ponds away from villages and farms were mainly affected by water temperature. In summary, the ponds acted as significant emission sources of atmospheric N<sub>2</sub>O emissions, with an annual mean N<sub>2</sub>O emissions flux of (5.73 ± 10.61) μmol·(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>. Large exogenous nitrogen load input from the catchment contributed to significant N<sub>2</sub>O emissions. Clarifying the use and type of ponds is important for estimating N<sub>2</sub>O emissions from small-scale water bodies in agricultural watersheds.

**Key words:** agricultural activity; pond water; N<sub>2</sub>O emissions; spatial-temporal variability; influencing factors

氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)是重要的温室气体之一, 过去几十年农业种植活动等导致全球 N<sub>2</sub>O 排放加速增长<sup>[1]</sup>. 农业种植及化肥施用带来了严重的氮素富集问题, 促进氮素转换并显著提高 N<sub>2</sub>O 的产生和排放<sup>[2-4]</sup>. 大量施用的氮肥可通过淋溶径流流失, 最终被输送到水域生态系统中, 水域生态系统氮素富集已成为大气 N<sub>2</sub>O 潜在的排放热点<sup>[5-7]</sup>. 有研究发现, 忽略农业流域水体 N<sub>2</sub>O 排放将导致农业生态系统 N<sub>2</sub>O 收支估算存在极大不确定性<sup>[8,9]</sup>. 因此, 为准确估算 N<sub>2</sub>O 排放, 受农业种植活动影响的流域水体需重点关注.

池塘水体是我国农村景观的重要组成部分, 因其具有蓄水、纳污和灌溉等多种功能, 广泛应用于我国东部和南部农作物种植密集地区<sup>[10]</sup>. 农业流域池塘水体由于受强烈的农业施肥活动以及生活污水排放等影响, 一般会比自然水体获得更多的营养盐负荷<sup>[11]</sup>. 同时, 农业流域池塘具有深度浅且面积小

收稿日期: 2023-04-25; 修订日期: 2023-06-26

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BK20220018); 国家自然科学基金项目(42271114); 中国科学院青年创新促进会会员项目(2023329)

作者简介: 张欣悦(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为内陆水体温室气体排放. E-mail: Z1078496525@163.com

\* 通信作者, E-mail: qtxiao@niglas.ac.cn; xuxianghua@nuist.edu.cn

其特征, 其氮素生物地球化学循环过程异常活跃, 因此其  $N_2O$  排放潜力十分值得关注<sup>[12,13]</sup>. 但是, 近年来探究水体  $N_2O$  排放主要集中于江河湖库等大型开放性水体<sup>[14~17]</sup>, 对于农业流域池塘却鲜见报道. 此外, 农业流域池塘可承纳生活污水、用于农业灌溉、排水以及蓄水等多种功能, 但不同用途和功能的池塘水体  $N_2O$  排放及其驱动因子是否存在差异尚不明瞭.

巢湖流域是安徽省重要的农业区, 地处长江北岸丘陵地带, 主要农业类型为种植业, 且面源污染严重, 受农业活动影响显著. 同时, 数量多且分布广泛的小型池塘也是巢湖农业流域极具特色的人文景观. 烱烱河流域是巢湖北岸的农村小流域, 其农业生产方式及地形地貌在巢湖流域中极具代表性. 有研究表明, 烱烱河流域土地开发程度低, 农业种植面积超过流域总面积的 50%, 农业化肥使用量位居全国前列, 且化肥流失也较为严重, 流域面源污染主要由农业施肥和生活污水等组成<sup>[18]</sup>. 因此, 本研究选取烱烱河流域内 3 种不同类型池塘(村塘、农塘和水塘)进行为期 1 a 的逐月调查, 并基于此调查探究典型农业流域内不同类型的池塘  $N_2O$  排放及其关键影响因素, 明确不同农业景观池塘  $N_2O$  排

放的机制, 以期为完善水域生态系统温室气体通量排放清单提供数据支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域以及采样池塘分布

烱烱河是巢湖北岸一条直接入湖的河流, 流经 6 个自然村, 总长度约为 10 km<sup>[19]</sup>. 烱烱河流域是巢湖北岸的农村小流域, 流域总面积约为 89.3 km<sup>2</sup>, 属于典型亚热带气候, 光照充足, 雨量丰沛, 年平均气温 16°C, 年均降水量 1 120 mm. 该流域内土地利用类型包括耕地、林地和建设用地等, 流域内由于人类生活生产的影响, 使得农业面源污染日益加剧.

本研究在烱烱河流域选取 3 种不同类型池塘(村塘、农塘和水塘), 每种类型选取 2 个池塘共计 6 个采样池塘(塘 1、塘 2、塘 3、塘 4、塘 5 和塘 6, 图 1), 所选水体水域面积在 0.004~0.032 km<sup>2</sup>, 平均水深范围为 0.35~1.2 m, 属于典型的小型景观水体. 村塘毗邻村庄住宅, 周边人口密集, 接纳大量生活污水排放; 农塘位于农业种植区内, 周边种植大量农作物, 主要受农业生产活动影响; 水塘主要功能为蓄水, 采样点位远离村庄农田, 受人类活动影响相对较小.

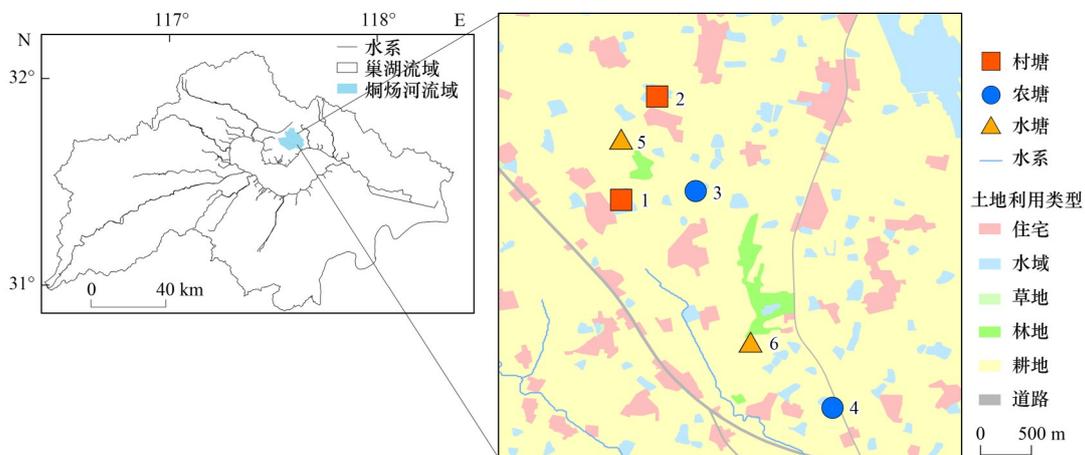


图 1 烱烱河流域地理位置及采样点分布示意

Fig. 1 Geographical location of the Tongyang River Catchment and sampling sites

### 1.2 野外样品采集与现场参数测定

在 2020 年 9 月至 2021 年 9 月对流域内 6 个采样池塘进行为期 1 a 的采样, 采样频次为每月一次, 时间在每月下旬. 在野外采样期间, 用多参数水质监测仪原位测量每个采样站点表层水温、溶解氧(DO)浓度和 pH 值等. 气温和降雨量数据来源于烱烱河流域当地自动气象观测站.

每次野外采样时, 采集表层水样用于水体溶存  $N_2O$  浓度分析<sup>[20, 21]</sup>. 采样流程如下: 将采样针筒在采集水样前用待采水样清洗 2~3 次, 然后用针筒抽取

远离岸边的表层 20 cm 处水样(注意避免气泡产生), 最后将 15 mL 水样通过细小针头注入预置 2 g 氯化钾、预先抽真空并注入高纯氮气(摩尔分数  $\geq 99.999\%$ )的 30 mL 棕色玻璃样品瓶内. 为保证气密性, 在实验室内将每个棕色样品瓶用丁基胶塞密封瓶口, 并用铝盖压接, 在野外水样采集完成后用密封胶密封针孔. 采样结束后, 将装有水样且密闭良好的棕色瓶立即倒置放入冷藏箱中保存. 在每个采样点使用 5 L 有机玻璃采样器采集水面以下 20 cm 水样, 装入用待采水样清洗过的 1 L 棕色瓶中, 用于

营养盐浓度和叶绿素 a 等分析, 所有水样均冷藏保存并运送回实验室待测。

### 1.3 实验室样品处理与分析

现场采于棕色玻璃样品瓶的水样运回实验室后, 利用顶空-气相色谱法测定水体中  $N_2O$  的溶存浓度。分析流程如下: 将棕色样品瓶的水样剧烈振荡 3~5 min 后静置 20~30 min, 使气体在样品瓶气相(顶空部分)和液相(水体)中达到平衡状态, 然后用带有三通阀的针筒抽取 5 mL 静置后的样品瓶顶空部分气体, 通过气相色谱仪分析气样  $N_2O$  浓度。另外, 在进行  $N_2O$  气样分析时, 抽取已知浓度的标准  $N_2O$  气体, 用于气相色谱仪检验和校正。最终, 基于气相色谱仪测定的  $N_2O$  浓度, 通过顶空平衡法计算出水体  $N_2O$  的原始溶存浓度<sup>[22]</sup>。

使用 1 L 棕色样品瓶采集用于测定水体理化指标的水样, 在采样结束后立即对其进行处理和分折。原水样均采用中国国家标准方法测定总氮(TN)和总磷(TP), 分别为 GB/T11894-1989 和 GB/T11893-1989, 经 0.45  $\mu\text{m}$  孔径的滤膜过滤后的水样用于测定铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )和亚硝态氮( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度采用纳氏试剂光度法,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度的测定通过流动分析仪分析得到。Chl-a 浓度测定采用 GF/C 滤膜对水样进行过滤, 然后用丙酮溶液萃取后用分光光度计测定, 经 GF/F 玻璃纤维膜过滤后的水样用总有机碳分析仪测定溶解性有机碳(DOC), 溶解性无机氮(DIN)为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度的总和。

### 1.4 数据计算与处理

基于顶空-气相色谱法获取的水体  $N_2O$  原始溶解浓度( $c_w$ ,  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 采用水-气界面气体扩散模型法计算水体  $N_2O$  排放通量 [ $F_n$ ,  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ], 具体计算如下<sup>[23,24]</sup>:

$$F_n = k \times (c_w - c_{eq}) \quad (1)$$

式中,  $c_{eq}$  为在特定温度和压力下与大气保持平衡的水中的  $N_2O$  浓度, 通过在野外采样时, 用针筒抽取水面上方空气, 装入铝箔采样袋中密封保存, 用气相色谱仪分析其气袋中大气样品  $N_2O$  浓度和温度计算得到<sup>[24]</sup>;  $k$  为水-气界面  $N_2O$  气体的传输系数 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 其具体计算如下<sup>[23]</sup>:

$$k = 0.24 \times (2.07 + 0.215U^{1.7}) \times \left(\frac{Sc}{600}\right)^{-n} \quad (2)$$

式中, 0.24 为单位转换系数;  $U$  为 10 m 高度处的风速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 通过当地气象观测站获取,  $U^{1.7}$  为 10 m 高度处风速的 1.7 次方<sup>[23]</sup>;  $n$  为与风速相关的系数。  $U < 3.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $n = 2/3$ ;  $U > 3.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $n = 0.5$ 。  $Sc$  为无量纲  $N_2O$  气体的施密特数, 与水温 ( $T$ ,  $^\circ\text{C}$ ) 相关, 其具

体计算如下:

$$Sc = 2055.6 - 137.11T + 4.3173T^2 - 0.054350T^3 \quad (3)$$

基于以上计算得到炯烱河流域不同池塘水-气界面  $N_2O$  交换通量 ( $F_n$ ),  $F_n > 0$  表明水体向大气排放  $N_2O$ , 反之则吸收大气  $N_2O$ 。同时, 本研究对不同池塘(塘 1、塘 2、塘 3、塘 4、塘 5、塘 6)、不同类型(村塘、农塘、水塘)和不同季节(春季: 3~5 月; 夏季: 6~8 月; 秋季: 9~11 月; 冬季: 12 月至次年 2 月)于 2020 年 9 月到 2021 年 9 月连续采样观测和计算出的数据进行处理分析。采用 Pearson correlations 方法确定  $N_2O$  通量与环境变量之间的相关性, 使用单因素方差分析 LSD (least-significant difference) 方法检验数据差异性是否显著, 其中  $P < 0.05$  为显著性水平,  $P < 0.01$  为极显著水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境变量特征

炯烱河流域年气温与降雨量呈现出明显的季节变化特征[图 2(a)]。其中, 春、夏、秋和冬四季平均气温分别为 19.4、30.3、21.6 和 9.7 $^\circ\text{C}$ , 最高气温出现在 8 月, 为 33.2 $^\circ\text{C}$ 。流域内降雨同样具有季节变化特征[图 2(a)], 其中最高降雨量出现在 7 月, 月降雨量为 264.4 mm, 最低降雨量出现在 1 月, 仅为 31.3 mm。3 种不同池塘营养盐浓度均呈现出季节变化特征, 以  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 为例,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度呈现双峰型变化, 最高值出现在 6 月和 11 月, 最低值出现在 3 月[图 2(b)], 而从 TN 浓度变化来看, 村塘和农塘 TN 季节变化并不显著 ( $P > 0.05$ ), 仅水塘 TN 呈现出显著 ( $P < 0.05$ ) 的季节变化特征, 最高值出现在 11 月, 最低值出现在 9 月[图 2(c)]。

不同池塘水体的生化参数也不尽相同(表 1)。3 种类型水塘的年均水温[村塘: (22.20 $\pm$ 9.15) $^\circ\text{C}$ ; 农塘: (22.65 $\pm$ 9.66) $^\circ\text{C}$ ; 水塘: (22.59 $\pm$ 9.43) $^\circ\text{C}$ ]均无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 且 3 种类型池塘间 DO、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  也无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。但是, 村塘的 TN 和 TP 均显著 ( $P < 0.01$ ) 高于农塘和水塘, Chl-a 作为表征富营养化程度的重要指标, 村塘的  $\rho(\text{Chl-a})$  [(32.96 $\pm$ 35.00)  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ] 显著 ( $P < 0.01$ ) 高于农塘 [(11.75 $\pm$ 9.02)  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ] 和水塘 [(4.19 $\pm$ 2.19)  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]。

### 2.2 $N_2O$ 排放时间变化

图 3 表示不同类型景观池塘  $N_2O$  排放通量时间变化特征。从中可知, 村塘和农塘整体呈现双峰型变化特征, 两个峰值分别出现在 5 月和 11 月, 村塘和农塘最高值均出现在 2020 年 5 月[村塘: 36.11  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ; 农塘: 19.86  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ], 村塘最低值出现在 2020 年 10 月, 且表现为大气  $N_2O$  的吸

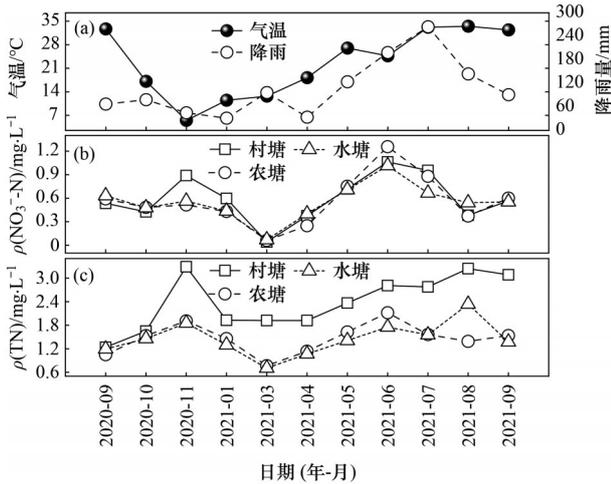


图2 观测期间流域降雨量、气温以及3种类型池塘NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和TN浓度的逐月变化

Fig. 2 Monthly variations in rainfall, temperature, and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and TN in the three types of ponds during the sampling period

收汇 [ $-1.53 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ], 农塘最低值出现在2021年1月, 也为大气N<sub>2</sub>O的汇 [ $-7.26 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ]. 与村塘和农塘不同, 水塘排放通量的变化幅度较小, 最高值出现在2020年7月 [ $5.32 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ], 最低值出现在2021年1月 [ $-6.29 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ]. 值得注意的是, 2020年的5、6和7月这3个月份, 3种不同类型池塘N<sub>2</sub>O排放通量呈现显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 即: 村塘 > 农塘 > 水塘.

表1 观测期间不同类型池塘基本生化参数特征<sup>1)</sup>

Table 1 Biochemical parameters in the different ponds during the observation period

类型	站点	水温/°C	$\rho(\text{DO})$ /mg·L <sup>-1</sup>	$\rho(\text{Chl-a})$ /μg·L <sup>-1</sup>	$\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ /mg·L <sup>-1</sup>	$\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ /mg·L <sup>-1</sup>	$\rho(\text{NO}_2^- \text{-N})$ /mg·L <sup>-1</sup>	$\rho(\text{DIN})$ /mg·L <sup>-1</sup>	$\rho(\text{TN})$ /mg·L <sup>-1</sup>	$\rho(\text{TP})$ /mg·L <sup>-1</sup>
村塘	塘1	22.43±9.99	8.99±3.84	50.16±43.15	0.62±0.27	0.67±0.43	0.05±0.05	1.34±0.55	2.87±1.02	0.33±0.24
	塘2	21.97±8.70	9.24±2.20	15.77±7.75	0.57±0.34	0.34±0.16	0.04±0.02	0.95±0.43	1.80±0.55	0.11±0.05
	平均值	22.20±9.15	9.12±3.05	32.96±35.00	0.60±0.30	0.51±0.36	0.04±0.04	1.15±0.52	2.34±0.97	0.22±0.20
农塘	塘3	22.39±10.62	9.29±2.13	17.28±9.31	0.55±0.32	0.39±0.16	0.07±0.07	1.01±0.44	1.47±0.44	0.11±0.08
	塘4	22.90±9.51	7.64±2.62	6.22±4.10	0.57±0.32	0.33±0.14	0.02±0.01	0.92±0.45	1.45±0.33	0.08±0.03
	平均值	22.65±9.66	8.46±2.39	11.75±9.02	0.56±0.32	0.36±0.15	0.04±0.05	0.96±0.44	1.46±0.38	0.10±0.06
水塘	塘5	22.38±9.33	8.70±1.99	4.01±1.99	0.57±0.30	0.41±0.15	0.04±0.05	1.02±0.40	1.45±0.36	0.08±0.04
	塘6	22.81±9.97	9.82±2.68	4.37±2.53	0.53±0.19	0.39±0.15	0.07±0.13	0.99±0.31	1.50±0.52	0.08±0.07
	平均值	22.59±9.43	9.26±2.37	4.19±2.19	0.55±0.24	0.40±0.14	0.06±0.01	1.01±0.35	1.47±0.43	0.08±0.06

1) 数据为均值±标准偏差

## 2.4 N<sub>2</sub>O排放影响因子

水温是影响水-气界面排放通量的重要影响因子, 图5为3种不同类型景观池塘N<sub>2</sub>O排放通量与水温的相关性分析. 结果表明, 受人类生产活动影响较为剧烈的村塘和农塘, 其N<sub>2</sub>O排放通量与水温无显著相关性(村塘:  $R^2 = 0.11$ ,  $P > 0.05$ ; 农塘:  $R^2 = 0.21$ ,  $P > 0.05$ ). 而远离村庄农田且受人类活动影响相对较小的水塘, 其N<sub>2</sub>O与水温呈现显著正相关性 ( $R^2 = 0.64$ ,  $P < 0.01$ ), 温度解释了水塘64%的N<sub>2</sub>O排

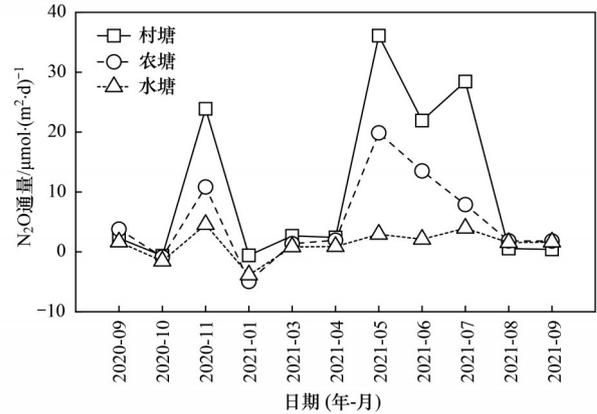


图3 3种类型池塘N<sub>2</sub>O通量的逐月变化

Fig. 3 Monthly variation in N<sub>2</sub>O flux in three types of ponds

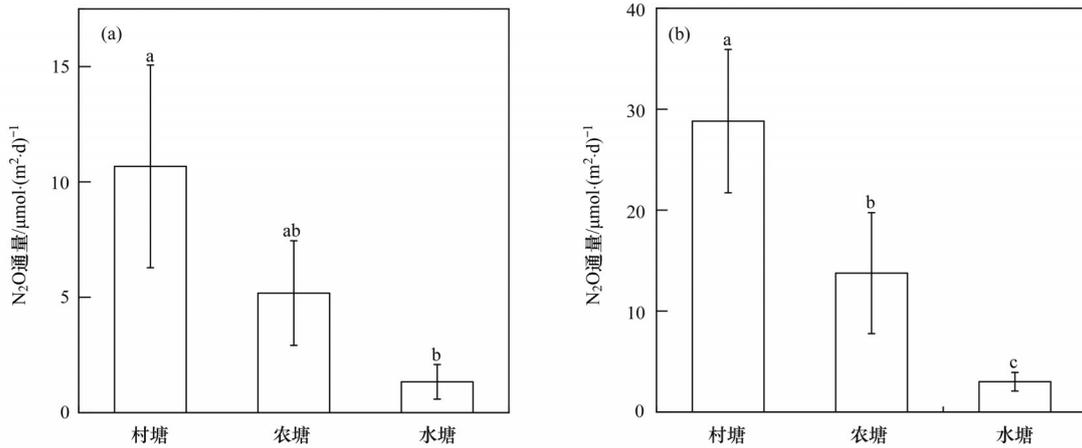
## 2.3 N<sub>2</sub>O排放空间变化

图4(a)表示N<sub>2</sub>O排放通量在不同池塘的变化. 从总体来看, 村塘、农塘和水塘的N<sub>2</sub>O排放通量年均值分别为 ( $10.67 \pm 13.89$ )、( $5.18 \pm 7.16$ )和 ( $1.33 \pm 2.37$ )  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , 均表现为大气N<sub>2</sub>O的排放源, 但仅村塘与水塘差异显著 ( $P < 0.05$ ). 此外, 由于各塘之间的排放量差异主要集中在5、6和7月, 因此由图4(b)可知, 村塘N<sub>2</sub>O排放通量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于农塘和水塘, 农塘N<sub>2</sub>O排放通量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于水塘. 总体来看, 村塘N<sub>2</sub>O排放通量最高, 其次是农塘, 水塘排放通量最低.

放通量变化.

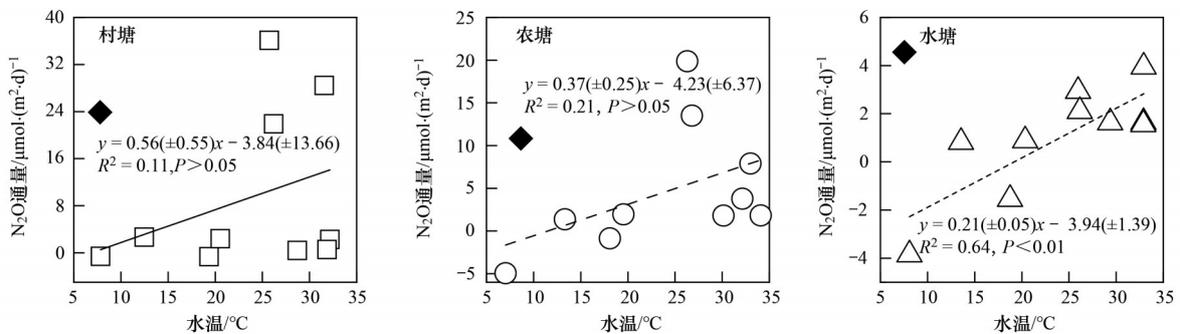
图6为3种不同类型景观池塘N<sub>2</sub>O排放通量与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的相关性分析. 结果表明, 仅村塘和农塘N<sub>2</sub>O排放通量与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N呈现显著正相关关系(村塘:  $R^2 = 0.52$ ,  $P < 0.05$ ; 农塘:  $R^2 = 0.39$ ,  $P < 0.05$ ), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N解释了其52%和39%的N<sub>2</sub>O排放通量变化, 而受人为影响因素较小的水塘, 其N<sub>2</sub>O与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N无显著相关性 ( $R^2 = 0.15$ ,  $P > 0.05$ ).

降雨是径流的重要补给, 也是农业流域氮素输



(a)不同池塘N<sub>2</sub>O通量年均值,(b)不同池塘在2021年5~7月的N<sub>2</sub>O通量;误差线表示标准误;不同小写字母表示具有显著性( $P < 0.05$ )差异  
图4 观测期间不同类型池塘的N<sub>2</sub>O通量

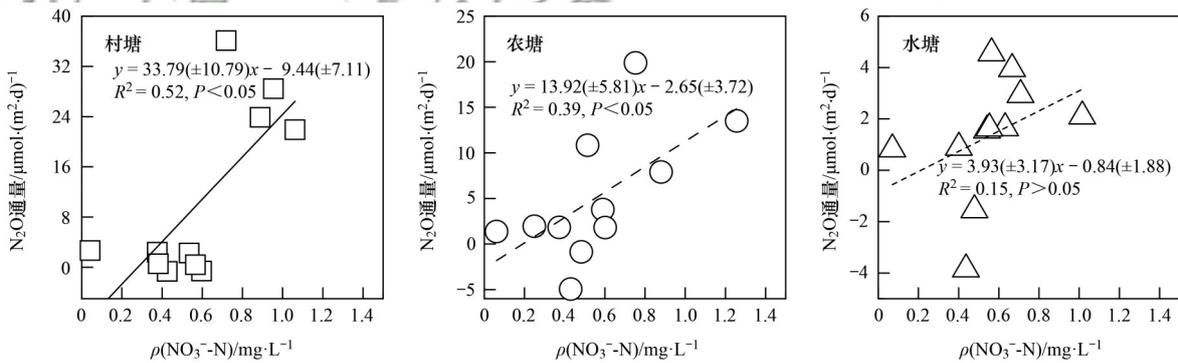
Fig. 4 N<sub>2</sub>O fluxes in different types of ponds during the observation period



黑色菱形表示在发生连续性降水后所采集的样品,不参与分析;拟合方程括号中数据为标准偏差

图5 水温与村塘、农塘和水塘N<sub>2</sub>O排放通量的相关性

Fig. 5 Correlation between water temperature and N<sub>2</sub>O flux sewage pond, irrigation pond, and storage pond



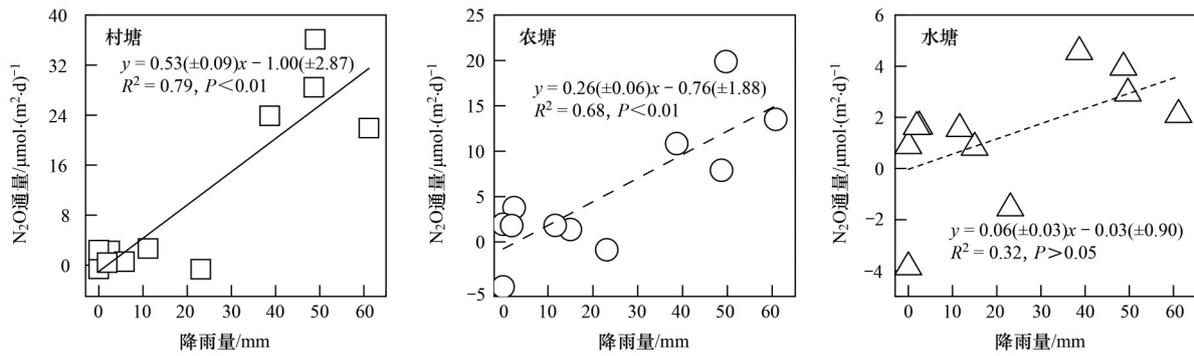
拟合方程括号中数据为标准偏差

图6 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N与村塘、农塘和水塘N<sub>2</sub>O排放通量的相关性

Fig. 6 Correlation between NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and N<sub>2</sub>O flux sewage pond, irrigation pond, and storage pond

出的关键驱动力.图7为3种不同类型景观池塘N<sub>2</sub>O排放通量与降雨量的时间相关性.结果表明,农塘和村塘N<sub>2</sub>O排放通量与降雨量呈现显著的正相关关系,分别解释79%( $R^2 = 0.79, P < 0.01$ )和68%( $R^2 = 0.68, P < 0.01$ )的N<sub>2</sub>O排放通量变化.值得注意的是,水塘N<sub>2</sub>O排放通量与降雨量无显著相关性( $R^2 = 0.32, P > 0.05$ ).营养盐、Chl-a和DO等是重要的环境因子,

由表2可知,总体来看村塘的主要控制因子是NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,农塘的主要控制因子为DIN与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,水塘的主要控制因子为水温.此外,同一类型的不同水塘控制因子也有所不同,其中塘3和塘4均为农塘,但塘3的主要控制因子为Chl-a,塘4的主要控制因子为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N;3种不同类型景观池塘的N<sub>2</sub>O排放通量与pH、DO、TN和TP均无显著相关性.



降雨量为采样前5 d累计降雨量;拟合方程括号中数据为标准偏差

图7 降雨量与村塘、农塘和水塘 $N_2O$ 排放通量的相关性

Fig. 7 Correlation between rainfall and  $N_2O$  flux sewage pond, irrigation pond, and storage pond

表2  $N_2O$ 扩散通量与水体理化指标的相关性<sup>1)</sup>

Table 2 Correlations between  $N_2O$  diffusion flux and physical-chemical factors

类型	站点	水温/ $^{\circ}C$	pH	$\rho(DO)$ / $mg \cdot L^{-1}$	$\rho(Chl-a)$ / $\mu g \cdot L^{-1}$	$\rho(NO_3^- - N)$ / $mg \cdot L^{-1}$	$\rho(NH_4^+ - N)$ / $mg \cdot L^{-1}$	$\rho(NO_2^- - N)$ / $mg \cdot L^{-1}$	$\rho(DIN)$ / $mg \cdot L^{-1}$	$\rho(TN)$ / $mg \cdot L^{-1}$	$\rho(TP)$ / $mg \cdot L^{-1}$
村塘	塘1	0.34	-0.24	-0.59	-0.48	0.62*	0.13	-0.63	0.38	0.25	0.24
	塘2	0.36	0.32	0.20	0.55	0.76**	0.71	-0.21	0.61*	0.58	-0.09
	平均值	0.34	0.03	-0.38	-0.38	0.72*	0.24	-0.21	0.57	0.39	0.10
农塘	塘3	0.47	0.01	-0.12	0.65*	0.41	0.28	0.3	0.35	0.51	-0.21
	塘4	0.46	-0.34	-0.43	0.10	0.70*	0.40	-0.33	0.61*	0.39	0.20
	平均值	0.46	0.16	-0.43	0.35	0.62*	0.30	-0.16	0.53	0.54	-0.02
水塘	塘5	0.66*	0.24	-0.13	0.65*	0.43	0.56	0.74	0.49	0.33	0.11
	塘6	0.80**	0.17	-0.13	0.15	0.17	-0.20	0.22	0.03	0.27	0.18
	平均值	0.64*	0.37	-0.16	0.28	0.38	0.21	0.23	0.35	0.31	0.07

1)\*\*表示相关性在0.01水平上显著,\*表示相关性在0.05水平上显著

### 3 讨论

#### 3.1 不同景观池塘 $N_2O$ 排放强度对比分析

本研究结果表明农业流域池塘水体是大气 $N_2O$ 的排放源,但不同景观和用途池塘的 $N_2O$ 排放差异显著.其中,村塘是纳污型池塘,其年 $N_2O$ 排放通量 $[234.81 \mu mol \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}]$ 约为自然水塘 $[29.32 \mu mol \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}]$ 的8倍(图3).观测数据也表明,村塘的营养盐负荷(主要是TP和TN)与Chl-a浓度要显著高于其他类型池塘(表1),考虑到水体 $N_2O$ 主要是来自氮素的硝化和反硝化作用,因此,高氮负荷可能是村塘 $N_2O$ 高排放的主要原因<sup>[12,25,26]</sup>.同时,高营养盐负荷也可增加村塘浮游植物的生物量,使其具备高Chl-a浓度(表1),进而为 $N_2O$ 的产生和排放提供有机质<sup>[14,27]</sup>.

受流域内农业活动影响,农塘 $N_2O$ 排放通量也较高.观测数据表明,农塘年 $N_2O$ 排放通量为 $113.98 \mu mol \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ ,仅次于村塘,是水塘的将近4倍,也具有较高的 $N_2O$ 排放通量.农塘位于农作物种植区附近,高强度的农业施肥可显著增加水体氮负荷及 $N_2O$ 的产生<sup>[28,29]</sup>.以 $NO_3^- - N$ 为例,本研究中农塘 $NO_3^- - N$ 浓度要显著高于以林地为主要土地利用类型

等流域水体的 $NO_3^- - N$ 浓度,但与其他高强度农作物种植区水体 $NO_3^- - N$ 浓度相当<sup>[30,31]</sup>.据研究统计,巢湖流域的种植业施肥强度居全国前列,也是农业流域氮肥流失严重的区域<sup>[18,32]</sup>,高强度农业氮负荷输入可能会导致 $N_2O$ 的大量排放.此外,农塘是具有灌溉功能的池塘,在农业生产活动的影响下,农药、化肥以及畜禽粪便等通过农田输入池塘中,使得塘内有机质增加,氮转化更为迅速<sup>[33,34]</sup>.水塘在本研究中 $N_2O$ 的排放通量最低,但鉴于水塘氮负荷与村塘和农塘差异并不显著,且水塘氮负荷与 $N_2O$ 排放通量并无显著相关性(表2),因此池塘水体 $N_2O$ 的排放可能受其他因素调控.

#### 3.2 流域池塘 $N_2O$ 排放的影响因素

理解和掌握池塘水体 $N_2O$ 排放变化的驱动因子是准确估算 $N_2O$ 收支和预测其未来变化的基础.水温是重要的水体理化指标,是影响水体 $N_2O$ 产生和排放的重要因素<sup>[35,36]</sup>.本研究发现水温对不同类型池塘的 $N_2O$ 排放影响不尽相同(图5).在受人为活动干扰强度较低的自然水塘中,水温解释其64%的 $N_2O$ 排放,是 $N_2O$ 排放变化的关键驱动因素<sup>[21,37,38]</sup>;但在受人类生产活动影响较为剧烈的村塘和农塘,水温不是 $N_2O$ 排放通量时间变化的驱动因子.本研究结果表

明, 在高强度人为活动干扰的水体中, 水温不是  $\text{N}_2\text{O}$  排放变化的唯一调控因子, 不同类型的池塘可能因外源负荷的输入不同, 呈现出对温度变化的不同响应, 这与前人的研究结果相一致<sup>[20,21,26]</sup>。

有研究显示, 外源负荷输入等因素会干扰温度等对水体  $\text{N}_2\text{O}$  的排放产生影响<sup>[39-41]</sup>。村塘和农塘受人类生产活动影响强烈, 大量的农业氮素输入使得水体中氮负荷增加, 从而促进水体  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[17,21,30,42]</sup>, 同时, 高强度的外源负荷输入可能“稀释”掉水温对村塘和农塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放的直接影响作用<sup>[21,43]</sup>。长期营养盐添加试验也表明, 外源氮负荷输入对水体  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响要高于水温的影响<sup>[44]</sup>。淡水水体中  $\text{N}_2\text{O}$  的主要来源包括反硝化作用、硝化作用和硝化-反硝化等多种过程<sup>[15]</sup>, 且水体氮负荷等可很好地指示  $\text{N}_2\text{O}$  排放的变化<sup>[12]</sup>。本研究中村塘和农塘  $\text{N}_2\text{O}$  的排放对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  较为敏感, 表明该农业流域内景观池塘  $\text{N}_2\text{O}$  可能主要来自于反硝化作用影响。之前相关研究也表明, 在高强度人为活动干扰区域, 其水体  $\text{N}_2\text{O}$  排放随着外源氮负荷的增加而增加<sup>[21,34,45]</sup>。值得注意的是, 水塘的氮素指标 ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  等) 与村塘和农塘差异并不显著, 可能是由于该流域为农业小流域, 受土壤淋溶和地表径流等作用的影响以及水系之间的连通性, 致使水塘虽位于林地但也受流域内农业活动影响, 进而水塘氮负荷与其他塘差异并不显著。

降雨是农业流域氮素等面源污染输出的关键驱动力, 相关研究也表明水体  $\text{N}_2\text{O}$  排放对降雨量的变化较为敏感<sup>[15, 46]</sup>。降雨一般能够补给水量, 稀释水体  $\text{N}_2\text{O}$  浓度, 进而降低  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量<sup>[15]</sup>, 甚至促使水体从  $\text{N}_2\text{O}$  排放源转变为  $\text{N}_2\text{O}$  吸收汇<sup>[47]</sup>。与之不同的是, 本研究发现降雨量与村塘和农塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放量呈显著正相关关系, 降雨量分别解释其 79% 和 68% 的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量变化(图 7)。降雨可促使农田氮素(主要是  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) 通过径流和淋溶迁移从农田进入周边的水体中<sup>[48]</sup>, 也可能会刺激土壤产生  $\text{N}_2\text{O}$  输入进池塘<sup>[3]</sup>, 因此, 降雨会更加促进农业流域水体  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[49]</sup>。统计分析也发现, 降雨与池塘  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度呈显著正相关关系(村塘:  $R^2 = 0.57$ ,  $P < 0.01$ ; 农塘:  $R^2 = 0.54$ ,  $P = 0.01$ ), 进一步表明降雨可将农业流域氮素带入池塘水体, 增加  $\text{N}_2\text{O}$  的产生和排放潜力。同时, 在夏季强降雨期间[图 2(a)], 池塘水体出现较高的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量(图 3), 这可能是由于夏季是作物的关键生长季节, 在夏季强降雨的作用下大量的农业肥料等外源负荷迁移到该流域水体中, 促进了  $\text{N}_2\text{O}$  的产生<sup>[28,29]</sup>。值得注意的是, 水塘  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量虽然相对偏低, 但在连续性降雨期间水塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放

通量出现峰值(图 2 和图 3), 这也表明降雨可能是农业流域水体  $\text{N}_2\text{O}$  排放关键驱动因素<sup>[50,51]</sup>。

### 3.3 农业流域池塘水体 $\text{N}_2\text{O}$ 通量综合评估

本研究表明炯场河农业流域小型池塘是大气  $\text{N}_2\text{O}$  的排放源, 年均  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量为  $(5.73 \pm 10.61) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$  [图 4(a)], 显著高于全球湖泊均值  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量<sup>[52]</sup>, 也是营养盐富集湖泊水体排放通量的近两倍<sup>[21]</sup>。目前已有研究表明藻型湖泊是大气  $\text{N}_2\text{O}$  的显著排放源<sup>[14,27]</sup>, 值得注意的是, 本研究中小型池塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放量比该流域富营养化藻型湖泊(巢湖)敞水区  $\text{N}_2\text{O}$  排放量高近一个数量级<sup>[25]</sup>。考虑到农业流域小型池塘数量多且分布广<sup>[53]</sup>, 其对水体等  $\text{N}_2\text{O}$  收支估算可能具有重要贡献, 在未来研究需要引起重视。

本研究结果表明不同用途和类型的池塘  $\text{N}_2\text{O}$  扩散通量具有明显差距。其中, 村塘和农塘是大气  $\text{N}_2\text{O}$  热点排放源, 其  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量分别是自然水塘排放量的 8 倍和 4 倍。因此, 在农业流域小型水体  $\text{N}_2\text{O}$  收支估算中明确池塘用途和类型十分重要<sup>[12,54]</sup>。此外, 连续逐月观测发现, 不同类型池塘  $\text{N}_2\text{O}$  通量变化幅度显著, 这可能是因为农业流域池塘水体  $\text{N}_2\text{O}$  的排放是一个动态复杂的过程, 会受到多种因素的综合调控。因此, 为明晰农业流域池塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放量及其未来趋势变化, 需要考虑多因子的综合调控作用。

## 4 结论

(1) 基于为期 1a 的连续野外调查表明, 农业流域小型池塘是大气  $\text{N}_2\text{O}$  的排放源, 年均  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量为  $(5.73 \pm 10.61) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , 在水域生态系统  $\text{N}_2\text{O}$  收支估算中可能不容忽视。

(2) 多塘采样表明, 不同类型池塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量差异显著, 其中, 村塘和农塘是  $\text{N}_2\text{O}$  的热点排放源, 其  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量分别是自然水塘排放通量 [ $(1.33 \pm 2.50) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ] 的 8 倍和 4 倍。同时, 水体氮负荷可作为池塘热点排放的指示因子。

(3) 农业流域池塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放的驱动因子在不同类型池塘不尽相同, 在受人为活动影响强烈的村塘和农塘,  $\text{N}_2\text{O}$  排放与营养盐负荷和降雨量呈显著正相关; 但在受人为活动影响较低的自然水塘,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与水温呈显著正相关。

### 参考文献:

- [1] Tian H Q, Xu R T, Canadell J G, *et al.* A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks[J]. *Nature*, 2020, **586**(7828): 248-256.
- [2] Wagner-Riddle C, Congreves K A, Abalos D, *et al.* Globally important nitrous oxide emissions from croplands induced by freeze-thaw cycles[J]. *Nature Geoscience*, 2017, **10**(4): 279-283.

- [ 3 ] Zhang H L, Deng Q, Schadt C W, *et al.* Precipitation and nitrogen application stimulate soil nitrous oxide emission [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2021, **120**(3): 363-378.
- [ 4 ] Deng L, Huang C B, Kim D G, *et al.* Soil GHG fluxes are altered by N deposition: New data indicate lower N stimulation of the N<sub>2</sub>O flux and greater stimulation of the calculated C pools [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(4): 2613-2629.
- [ 5 ] Soued C, Del Giorgio P A, Maranger R. Nitrous oxide sinks and emissions in boreal aquatic networks in Québec [J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(2): 116-120.
- [ 6 ] Qin X B, Li Y, Goldberg S, *et al.* Assessment of indirect N<sub>2</sub>O emission factors from agricultural river networks based on long-term study at high temporal resolution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(18): 10781-10791.
- [ 7 ] Webb J R, Clough T J, Quayle W C. A review of indirect N<sub>2</sub>O emission factors from artificial agricultural waters [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, **16**(4), doi: 10.1088/1748-9326/abed00.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Turner P A, Griffis T J, Lee X, *et al.* Indirect nitrous oxide emissions from streams within the US Corn Belt scale with stream order [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, **112**(32): 9839-9843.
- [ 10 ] 李玉凤, 刘红玉, 臧鹏飞, 等. 农村多水塘系统水环境过程研究进展 [J]. *生态学报*, 2016, **36**(9): 2482-2489.
- Li Y F, Liu H Y, Gao P F, *et al.* Agricultural multi-pond systems and their hydrological processes: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(9): 2482-2489.
- [ 11 ] Ollivier Q R, Maher D T, Pitfield C, *et al.* Punching above their weight: Large release of greenhouse gases from small agricultural dams [J]. *Global Change Biology*, 2019, **25**(2): 721-732.
- [ 12 ] 庞吉丽, 王瑞峰, 刘婷婷, 等. 城市小型景观水体容存 N<sub>2</sub>O 浓度及排放通量特征 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(22): 8991-9007.
- Pang J L, Wang X F, Liu T T, *et al.* Spatiotemporal variations and influencing factors of N<sub>2</sub>O concentration and flux from urban small landscape waters [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(22): 8991-9007.
- [ 13 ] Yang P, Huang J F, Tan L S, *et al.* Large variations in indirect N<sub>2</sub>O emission factors (EF<sub>5</sub>) from coastal aquaculture systems in China from plot to regional scales [J]. *Water Research*, 2021, **200**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117208.
- [ 14 ] 刘婷婷, 王瑞峰, 袁兴中, 等. 湖、库水体 N<sub>2</sub>O 排放研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(2): 319-335.
- Liu T T, Wang X F, Yuan X Z, *et al.* Review on N<sub>2</sub>O emission from lakes and reservoirs [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(2): 319-335.
- [ 15 ] 夏星辉, 杨腾, 杨萌, 等. 中国江河氧化亚氮的排放及其影响因素 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(8): 2679-2689.
- Xia X H, Yang T, Yang M, *et al.* A review of nitrous oxide efflux and associated controls in China's streams and rivers [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(8): 2679-2689.
- [ 16 ] 吕鑫, 刘小龙, 李军, 等. 河流拦截背景下水库氧化亚氮 (N<sub>2</sub>O) 排放的研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(3): 613-623.
- Lv X, Liu X L, Li J, *et al.* Advances in studies on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission in the reservoirs under the background of river impoundment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 613-623.
- [ 17 ] Xiao Q T, Hu Z H, Fu C S, *et al.* Surface nitrous oxide concentrations and fluxes from water bodies of the agricultural watershed in Eastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **251**: 185-192.
- [ 18 ] 高田田, 谢晖, 万能胜, 等. 巢湖典型农村流域面源氮磷污染模拟及来源解析 [J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(11): 2428-2438.
- Gao T T, Xie H, Wan N S, *et al.* Simulation and source analysis of nonpoint source nitrogen and phosphorus pollution export in a typical agricultural catchment draining to Chaohu Lake, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(11): 2428-2438.
- [ 19 ] 黄维, 王为东. 巢湖炯场河水水质空间分布特征及其改善策略 [J]. *安徽农业大学学报*, 2015, **42**(3): 429-438.
- Huang W, Wang W D. Spatial distribution characteristics of water quality and strategies for quality improvement in Tongyang River of Chaohu Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2015, **42**(3): 429-438.
- [ 20 ] Audet J, Bastviken D, Bundschuh M, *et al.* Forest streams are important sources for nitrous oxide emissions [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(2): 629-641.
- [ 21 ] Xiao Q T, Xu X F, Zhang M, *et al.* Coregulation of nitrous oxide emissions by nitrogen and temperature in China's third largest freshwater lake (Lake Taihu) [J]. *Limnology and Oceanography*, 2019, **64**(3): 1070-1086.
- [ 22 ] 肖启涛, 胡正华, Deng J, 等. 杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 356-364.
- Xiao Q T, Hu Z H, Deng J, *et al.* Effects of antiseptic on the analysis of greenhouse gases concentrations in lake water [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 356-364.
- [ 23 ] Cole J J, Caraco N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub> [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(4): 647-656.
- [ 24 ] 肖启涛. 太湖水—气界面温室气体 (CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O) 通量研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- Xiao Q T. Study on greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) fluxes of water-air interface in Lake Taihu [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014.
- [ 25 ] Miao Y Q, Huang J, Duan H T, *et al.* Spatial and seasonal variability of nitrous oxide in a large freshwater lake in the lower reaches of the Yangtze River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137716.
- [ 26 ] 刘臻婧, 肖启涛, 胡正华, 等. 引江济太对太湖贡湖湾氧化亚氮通量的影响 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(12): 5229-5236.
- Liu Z J, Xiao Q T, Hu Z H, *et al.* Effects of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu on N<sub>2</sub>O flux in Gonghu Bay, Lake Taihu [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(12): 5229-5236.
- [ 27 ] 廖远珊, 肖启涛, 刘臻婧, 等. 藻型湖区氧化亚氮排放特征及其影响因素 [J]. *湖泊科学*, 2023, **35**(2): 483-492.
- Liao Y S, Xiao Q T, Liu Z J, *et al.* Nitrous oxide emission and its influencing factors at the cyanobacteria-dominated lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(2): 483-492.
- [ 28 ] Guo L, Ma K M. Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus in water and sediment of a multi-level ditch system in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, **21**(4): 437-445.
- [ 29 ] Fu C S, Lee X, Griffis T J, *et al.* A modeling study of direct and indirect N<sub>2</sub>O emissions from a representative catchment in the U.S. corn belt [J]. *Water Resources Research*, 2018, **54**(5): 3632-

- 3653.
- [30] Hu M P, Chen D J, Dahlgren R A. Modeling nitrous oxide emission from rivers: a global assessment [J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(11): 3566-3582.
- [31] Xiao Q T, Hu Z H, Hu C, *et al.* A highly agricultural river network in Jurong Reservoir watershed as significant CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **769**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144558.
- [32] 张鹏. 基于农业面源污染控制下的巢湖流域农业种植结构优化研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.  
Zhang P. Agriculture structure optimization study of Chaohu Lake Basin based on agricultural non-point source pollution control[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015.
- [33] 杨平, 全川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展[J]. *生态学报*, 2015, **35**(20): 6868-6880.  
Yang P, Tong C. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6868-6880.
- [34] 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 等. 稻田灌溉河流 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 6014-6024.  
Wu S, Yang W T, Sheng Y Y, *et al.* Characteristics and influencing factors of the dissolved methane and nitrous oxide concentrations and emissions from a rice paddy drainage River in China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 6014-6024.
- [35] Hinshaw S E, Dahlgren R A. Dissolved nitrous oxide concentrations and fluxes from the Eutrophic San Joaquin River, California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(3): 1313-1322.
- [36] Shrestha N K, Wang J Y. Current and future hot-spots and hot-moments of nitrous oxide emission in a cold climate river basin [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 648-660.
- [37] Griffis T J, Chen Z C, Baker J M, *et al.* Nitrous oxide emissions are enhanced in a warmer and wetter world [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, **114**(45): 12081-12085.
- [38] Velthuis M, Veraart A J. Temperature sensitivity of freshwater denitrification and N<sub>2</sub>O emission—A meta-analysis [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, **36**(6), doi: 10.1029/2022GB007339.
- [39] 兰晶. 养殖水体温室气体的溶存与排放及其影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.  
Lan J. Greenhouse gases concentration, emission and influence factors in farming waters [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [40] Paudel S R, Choi O, Khanal S K, *et al.* Effects of temperature on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission from intensive aquaculture system [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **518-519**: 16-23.
- [41] Hu Z, Zhang J, Xie H J, *et al.* Effect of anoxic/aerobic phase fraction on N<sub>2</sub>O emission in a sequencing batch reactor under low temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(9): 5486-5491.
- [42] Yang P, Wang D Q, Lai D Y F, *et al.* Spatial variations of N<sub>2</sub>O fluxes across the water-air interface of mariculture ponds in a subtropical estuary in southeast China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, **125**(9), doi: 10.1029/2019jg005605.
- [43] 袁淑方, 王为东. 太湖流域源头溪流氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)释放特征[J]. *生态学报*, 2012, **32**(20): 6279-6288.  
Yuan S F, Wang W D. Characteristics of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(20): 6279-6288.
- [44] Davidson T A, Audet J, Svenning J C, *et al.* Eutrophication effects on greenhouse gas fluxes from shallow-lake mesocosms override those of climate warming [J]. *Global Change Biology*, 2015, **21**(12): 4449-4463.
- [45] 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.
- [46] Cooper R J, Wexler S K, Adams C A, *et al.* Hydrogeological controls on regional-scale indirect nitrous oxide emission factors for rivers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(18): 10440-10448.
- [47] Aho K S, Fair J H, Hosen J D, *et al.* An intense precipitation event causes a temperate forested drainage network to shift from N<sub>2</sub>O source to sink [J]. *Limnology and Oceanography*, 2022, **67**(S1): S242-S257.
- [48] Tian L L, Akiyama H, Zhu B, *et al.* Indirect N<sub>2</sub>O emissions with seasonal variations from an agricultural drainage ditch mainly receiving interflow water [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 480-491.
- [49] 田琳琳, 王正, 胡磊, 等. 长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)浓度特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1939-1949.  
Tian L L, Wang Z, Hu L, *et al.* Characteristics of the dissolved nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) concentrations and influencing factors in a representative agricultural headwater stream in the upper reach of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1939-1949.
- [50] Liu L L, Greaver T L. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO<sub>2</sub> sink may be largely offset by stimulated N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission [J]. *Ecology Letters*, 2009, **12**(10): 1103-1117.
- [51] Jørgensen C J, Elberling B. Effects of flooding-induced N<sub>2</sub>O production, consumption and emission dynamics on the annual N<sub>2</sub>O emission budget in wetland soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **53**: 9-17.
- [52] 谢燕红, 张弥, 肖薇, 等. 湖泊和水库氧化亚氮通量分析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(9): 3481-3493.  
Xie Y H, Zhang M, Xiao W, *et al.* Analysis of nitrous oxide flux from lakes and reservoirs [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3481-3493.
- [53] Lv M Q, Wu S J, Ma M H, *et al.* Small water bodies in China: Spatial distribution and influencing factors [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(8): 1431-1448.
- [54] Reading M J, Tait D R, Maher D T, *et al.* Land use drives nitrous oxide dynamics in estuaries on regional and global scales [J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, **65**(8): 1903-1920.

## CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China .....	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency .....	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition .....	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing .....	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University .....	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing .....	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China .....	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Chinese Cities .....	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021 .....	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period .....	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter .....	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei .....	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa .....	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries .....	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes .....	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment .....	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River .....	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang .....	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China .....	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes .....	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin .....	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin .....	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City .....	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network .....	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed .....	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus .....	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects .....	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation .....	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism .....	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar .....	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin .....	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake .....	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River .....	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers .....	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process .....	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area .....	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost .....	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field .....	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics .....	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N <sub>2</sub> O Emission: A Meta-analysis .....	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model .....	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction .....	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning .....	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity .....	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall .....	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity .....	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil .....	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain .....	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites .....	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou .....	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China .....	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing .....	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines .....	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil .....	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems .....	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)