

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙展朝, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙均兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 童瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子

汤梦瑶^{1,2}, 胡晓康^{1,3}, 王洪伟^{1,2}, 王云仓⁴, 常素云⁴, 王松庆⁴, 钟继承^{1*}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241000; 4. 天津市水利科学研究院, 天津 300061)

摘要: 河流是大气温室气体重要的排放源. 为了探讨天津市典型景观滨海河流N₂O释放空间特征及影响因素, 以天津市6条不同土地利用类型的滨海河流为研究对象, 通过顶空-气相色谱法测定了N₂O浓度、饱和度和扩散通量. 结果表明, 天津市不同景观河流N₂O浓度都处于过饱和状态, 表现为大气N₂O的源; N₂O浓度、饱和度和扩散通量均值为(23.85 ± 15.20) nmol·L⁻¹、(309.71 ± 197.38)%和(27.04 ± 16.46) μmol·(m²·d)⁻¹, 范围分别为12.70 ~ 115.69 nmol·L⁻¹、164% ~ 1502%和9.17 ~ 244.79 μmol·(m²·d)⁻¹. 天津市不同土地利用类型河流N₂O浓度和扩散通量具有较大的空间异质性, 表现为: 排污河 > 城市河流 > 郊区河流 > 农业河流. 天津滨海河流N₂O浓度主要受到盐度、氮磷营养元素和碳源的影响. NO₃⁻-N和TP对N₂O扩散通量差异的贡献较大. 天津河流N₂O产生和释放与氮循环过程密切相关, 不同形态氮对河流N₂O扩散通量贡献存在差异. 盐度梯度对城市河流和排污河N₂O释放产生相反的影响. 天津河流排污河的N₂O扩散通量显著高于其他类型河流, 未来由于城镇化的发展以及城市土地的扩张, 更多的管理措施应聚焦于排污河的废水处理厂下游、城市河流的入海口和郊区河流的居民聚集区等热点区域, 从而减少温室气体的释放.

关键词: 海河流域; 滨海河流; 氧化亚氮; 浓度; 扩散通量

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1481-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106144

Diffusive Fluxes and Controls of N₂O from Coastal Rivers in Tianjin City

TANG Meng-yao^{1,2}, HU Xiao-kang^{1,3}, WANG Hong-wei^{1,2}, WANG Yun-cang⁴, CHANG Su-yun⁴, WANG Song-qing⁴, ZHONG Ji-cheng^{1*}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 4. Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Rivers are an important emission source of greenhouse gases. To explore the spatial characteristics and influencing factors of N₂O emission from the coastal rivers in Tianjin City, six rivers into the Bohai Sea from different land-use types were selected, and the N₂O concentrations, saturation, and diffusive fluxes were measured using the headspace-gas chromatography method. The N₂O concentration was in supersaturation, and the rivers were the source of atmospheric N₂O. The average concentration, saturation, and diffusive fluxes of N₂O were (23.85 ± 15.20) nmol·L⁻¹, (309.71 ± 197.38)%, and (27.04 ± 16.46) μmol·(m²·d)⁻¹, with the ranges of 12.70-115.69 nmol·L⁻¹, 164%-1502%, and 9.17-244.79 μmol·(m²·d)⁻¹, respectively. The N₂O concentrations and diffusive fluxes of the rivers presented great spatial heterogeneity, with the sewage river (Huangdipai River) > urban river (Haihe River main stream, Jiyun River) > suburban river (Duliujian River, Yongding Xinhe River) > agricultural river (Chaobai Xinhe River). The N₂O concentration and diffusion fluxes were significantly correlated with salinity, nutrients, and carbon sources. NO₃⁻-N and TP contributed greatly to the diffusive flux differences. N₂O production and emission greatly related to the nitrogen cycle process in the Tianjin River, and different forms of nitrogen variously contributed to N₂O diffusive fluxes. The salinity gradient had the opposite effect on the N₂O emission in urban rivers and drainage rivers. The N₂O diffusive fluxes of the sewage river in Tianjin were significantly higher than that of other river types. In the future, due to the development of urbanization and the expansion of urban land, more management measures should focus on the hotspots such as the downstream of wastewater treatment plants of sewage rivers, the estuaries of urban rivers, and the residential gathering areas of suburban rivers to reduce N₂O emission.

Key words: Haihe River basin; coastal rivers; nitrous oxide; concentration; diffusive fluxes

N₂O是大气中重要的温室气体,其全球变暖潜能是CO₂的300倍^[1,2],且与氧原子反应产生NO破坏臭氧层^[3].目前全球φ(N₂O)高达(332.0 ± 0.1) × 10⁻⁹^[4],淡水生态系统释放的N₂O占总排放的25%~30%^[5].其中,河流生态系统由于较强的流动性以及碳氮磷负荷积累,成为了N₂O重要的自然排放源.河流容易受到人类活动的影响,造成N₂O溶存及释放存在更大的时空异质性,这为从区域及全球尺度评估河流生态系统N₂O扩散通量及其贡献带来了很大的困难及挑战.

有研究表明全球河网每年至少有4.86 × 10¹⁰

mol溶解无机氮(DIN)通过微生物作用转化为N₂O释放到大气中^[6],微生物在上覆水和沉积物中都可能通过硝化和反硝化作用生成N₂O.除了微生物作用^[5],N₂O浓度和扩散通量的空间异质性还受到水文条件^[7]、植被类型^[8]、营养盐浓度^[6,9,10]和水质状况等因素的共同调控.Zhang等^[11]的研究发现巢

收稿日期: 2021-06-18; 修订日期: 2021-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371457, 41771122); 天津水务局河流专项(HYGP-2019-C-130, TJGC-2019-C-060)

作者简介: 汤梦瑶(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向湖泊河流温室气体N₂O产生释放, E-mail: tangmengyao19@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: jczhong@niglas.ac.cn

湖流域河网水柱中 N_2O 浓度主要受 DO 调控,城市河流的 N_2O 扩散通量分别是森林河流、农业径流和混合河流的 22、13 和 11 倍. Yu 等^[12]对上海河网的研究表明, NH_4^+-N 和 DO 是 N_2O 产生的关键因子,相对流经农村的河流,城市和郊区河流的 N_2O 饱和度和扩散通量更高. 而我国其他城市河流如北京城市内河^[13]、铁岭市不同氮负荷河流^[14]和新乡市卫河^[15]水体中 N_2O 浓度和扩散通量受环境因子调控存在很大的空间差异,所以在估算河流生态系统 N_2O 的扩散通量时,有必要考虑流经不同土地利用类型的河流,研究这些不同类型河间及同一河流不同河段 N_2O 的浓度和扩散通量的空间异质性,有助于精确估计区域与全球尺度的河流 N_2O 扩散通量.

天津作为北方大型港口城市,城镇化率超过 80%,许多自然河流演变为城市、郊区、农业和排污河流等,人为活动干扰强度的差异导致河流水环境特征存在显著差异. 另外滨海河流受海水的影响存在明显的盐度梯度. 这些因素使得天津河流生态系统水质表现出较大的空间异质性,从而影响 N_2O 的生成与释放. 现有河网的 N_2O 生成和释放研究主要聚焦于热带、亚热带城市和流域^[10,16-18],而温带气候区河流尤其是滨海河流的 N_2O 生成和释放的研究尚鲜见报道,不同类型河流 N_2O 释放特征及控制因子比较尚未完善.

本文以海河流域天津境内 6 条不同土地利用类型滨海河流为研究对象,利用顶空-气相色谱法和扩散模型法观测和研究河流的 N_2O 的浓度、饱和度和扩散通量,辨别不同土地利用类型河流 N_2O 溶存和释放差异性,探讨温带气候区滨海河流 N_2O 生成、赋存和迁移特征及主要驱动因子,以期为区域及全球河流 N_2O 扩散通量的估算提供实测数据,加深人们对于河流生态系统 N_2O 释放特征及控制因素的认识.

1 材料与方法

1.1 研究区域

海河流域作为华北最大的水系,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量为 540 mm^[19]. 海河流域整体为轻度污染,其中海河干流及其流经天津的主要支流污染较严重. 天津水域面积占比 26.43%,河长 1 657.5 km,共有 12 条河流经天津地区进入渤海湾. 城镇化迅速推进导致河流污染严重,水质不断下降. 鉴于河流典型景观差异以及已有研究,本研究选取 6 条滨海河流为研究对象(图 1). 根据当前研究河流所在流域土地利用情况和前人研究中分类方法^[20,21],海河与蓟运河城市用地相对较高

(城市用地 > 20%,耕地 < 60%),作为城市河流;潮白新河土地利用以耕地为主(耕地 > 60%),作为农业河流;永定新河和独流减河是城市-农村过渡区域(城市用地 < 20%,耕地 < 60%),作为郊区河流;荒地排河是大港排污河道,作为排污河流. 根据均匀布点原则并兼顾河流景观类型和长度等环境条件沿入海流向分别设置 30、12、10、8、7 和 11 个采样点. 城市河流和排污河作为 N_2O 释放的热点区域,采样点位适当加密. 海河干流全长约 73.5 km,自西向东横穿天津市;蓟运河自北向南在滨海新区入海,滨海新区作为国家综合改革创新区工业发达且人口较集中. 永定新河和独流减河分别位于城市农村过渡区的南北两侧,汇水来源包括污水厂出水、畜禽水产养殖废水和农业径流等. 潮白新河沿岸分布农田村庄其在下流与永定新河和蓟运河相汇入海. 荒地排河排水来源包括石化油建工企业污水以及城镇生活污水.

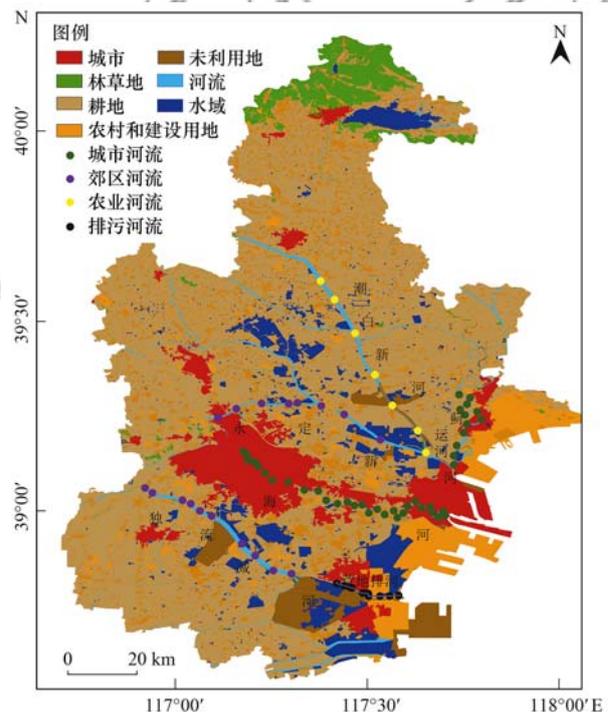


图 1 天津滨海河流采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in the coastal rivers in Tianjin City

1.2 样品采集和分析

本研究于 2020 年 5 月 15 ~ 21 日对 6 条河流进行样品采集,采样期间均为晴天,风力轻微,每条河流样品采集均于 10:00 ~ 15:00 进行,尽量避免采样时间带来的误差. 每个采样点利用尼斯金采水器采集水面以下 0.5 m 表层水样,用引流管缓慢注入 20 mL 血清瓶中直至溢出,加入 0.2 mL 饱和氯化汞溶液抑制微生物活性^[22],保证瓶口不留气泡后旋紧瓶盖,每个采样点 3 次平行,样品低温避光密封保存用

于测定N₂O的浓度.同时采集表层水样冷藏保存测定水质常规指标,并用多参数水质测定仪(YSI,美国)和手持气象站(Kestrel,美国)测定水温、pH、DO、氧化还原电位、盐度、电导率、风速和气温等参数.

水样理化指标分析根据文献[23],总氮总磷采用过硫酸钾氧化法,叶绿素 a(Chla)采用丙酮提取-分光光度法,高锰酸盐指数采用酸性滴定法.水样经0.45 μm 碳纤维滤膜过滤后,NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N和溶解性活性磷(SRP)分别采用紫外分光光度法、α-萘胺比色法、纳氏试剂比色法和钼蓝比色法.水样溶解性有机碳(DOC)采用总有机碳分析仪(Shimadzu TOC-5000A,日本)测定.

河流原位水样N₂O浓度测定采用顶空-气相色谱法.通过多通阀向血清瓶里注入10 mL高纯N₂置换出同体积的水样,室温下振荡1 min静置过夜使得N₂O气体在血清瓶中达到液相气相平衡.测定时,采用气密注射器抽取3 mL顶空气体注入气相色谱仪(AgilentGC 7890B,美国)中测定.气相色谱仪的载气、燃气和尾吹气分别为30 mL·min⁻¹高纯氮气、45 mL·min⁻¹氢气和20 mL·min⁻¹ Ar/CH₄(95%/5%)混合气,柱温和电子捕获检测器温度分别为55℃和300℃.在样品分析过程中随机插入标准气体进行质量控制.

1.3 数据计算

1.3.1 采样瓶平衡后顶空气体浓度

设顶空气体为理想气体,根据 Dalton 分压定律计算采样瓶顶空气体组分中N₂O的浓度 c_g (nmol·L⁻¹).

$$P_g = n_g \cdot (RT/V_g) = c_g \cdot R \cdot T \quad (1)$$

$$c_g = P_g / (R \cdot T) = f_g(p/R \cdot T) \quad (2)$$

式中, P_g 为顶空气体中N₂O分压值(Pa); n_g 为顶空气体中N₂O物质的量(mol); R 为理想气体常数; T 为瓶内的热力学温度(K); V_g 为顶空气体总体积(L); f_g 为N₂O的体积分数($\times 10^{-6}$),由气相色谱得出; p 为体系的总气压值(Pa).

1.3.2 采样瓶平衡后水样中N₂O浓度

N₂O浓度 c_w 如下式:

$$c_w = f_g \cdot Q \quad (3)$$

$$\ln Q = A_1 + A_2 \left(\frac{100}{T} \right) + A_3 \ln \left(\frac{T}{100} \right) + A_4 \left(\frac{T}{100} \right)^2 + S \left[B_1 + B_2 \frac{T}{100} + B_3 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中, Q 为N₂O溶解度换算系数[mol·(L·Pa)⁻¹]; f_g 和 T 含义同式(2); S 为水体盐度(‰); $A_1 \sim A_4$ 和 $B_1 \sim B_3$ 的值见文献[24].

1.3.3 原位水样中N₂O浓度和饱和度

N₂O浓度 c 和饱和度 R 如下:

$$c = (c_g \cdot V_g + c_w \cdot V_w) / V_w \quad (5)$$

$$c_{ep} = f_g \cdot Q \quad (6)$$

$$R = c / c_{ep} \times 100\% \quad (7)$$

式中, V_w 为顶空后溶液的总体积(L); f_g 为采样点空气中N₂O的体积分数($\times 10^{-6}$),由气相色谱得出; c_{ep} 为原位水样N₂O与大气N₂O达到平衡时浓度(nmol·L⁻¹).

1.3.4 水-气界面N₂O扩散通量

N₂O扩散通量 F 如下:

$$F = k(c - c_{ep}) \quad (8)$$

$$k = 0.251U^2(S_c/600)^{-0.5} \quad (9)$$

$$S_c = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (10)$$

式中, k 为气体交换系数(cm·h⁻¹); T 为现场水温(℃); U 为水面上方风速(m·s⁻¹); S_c 为河流N₂O施密特数,受现场温度 T 影响; $A \sim E$ 值详见文献[25].

1.4 统计方法

本实验采用 Spss 22.0 和 Excel 2019 处理和分析数据,采用 Origin 2019 和 Arcgis 10.2 绘图.对于不同土地利用类型的河流N₂O浓度和扩散通量差异显著性的比较,采用非参数方差分析.通过 Arcgis 10.2 中热点分析工具筛选研究区域N₂O释放强烈位置,确定N₂O扩散通量热点和冷点的空间分布.采用 Spearman 相关分析环境变量与N₂O浓度的关系,后续采用简单回归分析预测环境因子对河流N₂O扩散通量的影响.

2 结果与分析

2.1 滨海河流表层水样基本理化性质

6条河流的主要水质参数的均值和空间分布如表1和图2所示.温度和溶解氧(DO)范围分别是17.4~24.0℃和2.59~22.65 mg·L⁻¹,pH在7.75~9.65变化,水体呈弱碱性.盐度在荒地排河最高,城市河流氧化还原电位远高于其他类型河流.海河的Chla最小,其他河流间的Chla差异不大.如图2所示, $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_2^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{SRP})$ 范围分别是5.57~16.64、0.07~6.87、0.3~4.06、0.05~0.89、0.047~0.62和0.004~0.31 mg·L⁻¹,营养负荷表现为:排污河>城市河流>郊区河流>农业河流.6条河流 $\rho(\text{TN})$ 均大于2 mg·L⁻¹;蓟运河、潮白新河和永定新河的无机氮形态以NO₃⁻-N为主,海河和荒地排河的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N均较高,独流减河的无机氮较低.除荒地排河的5条

河流 $\rho(\text{TP})$ 均小于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,荒地排河的SRP是其他河流的7.7~11.5倍.荒地排河高锰酸盐指数最

高,其值是所有其他河流的1.44~1.77倍,氮磷污染也十分严重.另外,6条河流的DOC均较高.

表1 滨海河流表层水基本理化指标

Table 1 Basic physical and chemical parameters of surface water in the coastal rivers

项目	城市河流		郊区河流		农业河流 (潮白新河)	排污河 (荒地排河)
	海河	蓟运河	独流减河	永定新河		
温度/ $^{\circ}\text{C}$	19.0 ± 0.8	19.8 ± 0.9	21.8 ± 1.0	18.66 ± 0.6	18.8 ± 1.0	21.2 ± 0.6
盐度/ ‰	5.33 ± 4.51	1.02 ± 0.35	1.34 ± 0.57	0.75 ± 0.24	0.68 ± 0.15	6.85 ± 8.74
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	9.5 ± 2.5	11.8 ± 3.2	15.1 ± 4.03	10.86 ± 3.10	11.7 ± 2.0	14.1 ± 5.8
Eh/mV	181.3 ± 39.8	133.6 ± 21.8	33.7 ± 11.1	37.95 ± 12.01	28.5 ± 7.2	26.2 ± 23.1
pH	9.34 ± 0.24	9.47 ± 0.16	9.09 ± 0.16	8.77 ± 0.31	8.88 ± 0.27	8.76 ± 0.56
$\rho(\text{Chla})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	6.3 ± 5.6	20.0 ± 13.0	20.7 ± 17.8	17.5 ± 11.2	16.6 ± 15.2	17.4 ± 12.4

2.2 滨海河流 N_2O 的浓度、饱和度及扩散通量

本研究所有采样点水样的 N_2O 浓度均高于大气平衡浓度.图3(a)和图4(a)所示,6条河流 N_2O 的浓度和饱和度范围分别为 $12.70 \sim 115.69 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $165\% \sim 1503\%$,均值分别为 $(23.64 \pm 16.46) \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(307 \pm 214)\%$. $c(\text{N}_2\text{O})$ 均值表现为:荒地排河 $[(44.12 \pm 36.57) \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}] >$ 海河 $[(22.92 \pm 7.10) \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}] >$ 蓟运河 $[(18.99 \pm 4.52) \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}] >$ 独流减河 $[(18.55 \pm 5.31) \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}] >$ 潮白新河 $[(17.38 \pm 2.03) \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}] >$ 永定新河 $[(17.02 \pm 1.47) \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}]$. $c(\text{N}_2\text{O})$ 空间分布表现为:排污河 $>$ 城市河流 $>$ 郊区河流 $>$ 农业河流.排污河流、城市河流、郊区河流和农业河流的 N_2O 饱和度均值分别为 $(573 \pm 453)\%$ 、 $(283 \pm 84)\%$ 、 $(232 \pm 51)\%$ 和 $(225 \pm 24)\%$.根据方差分析,排污河 N_2O 浓度和饱和度显著高于城市、郊区和农业河流($P < 0.01$).

图3(b)和图4(b)所示,6条河流 N_2O 扩散通量范围为 $9.17 \sim 244.79 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,均值为 $(27.04 \pm 38.17) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,均表现为大气 N_2O 的源.不同采样点间 N_2O 扩散通量甚至呈现两个数

量级的差异,滨海河流 N_2O 扩散通量空间差异显著($P < 0.05$).排污河、城市河流、郊区河流和农业河流的 N_2O 扩散通量均值分别为 (84.17 ± 79.26) 、 (19.14 ± 6.32) 、 (16.72 ± 5.87) 和 $(11.20 \pm 2.09) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.城市河流中海河的 N_2O 扩散通量范围为 $10.59 \sim 33.57 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,蓟运河的 N_2O 扩散通量范围为 $9.91 \sim 26.63 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$;郊区河流中独流减河的 N_2O 扩散通量范围为 $9.93 \sim 31.67 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,波动幅度大于 N_2O 扩散通量范围为 $15.39 \sim 24.67 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 的永定新河;荒地排河 N_2O 扩散通量空间变异最大,范围为 $23.98 \sim 244.79 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$;潮白新河最小, N_2O 扩散通量范围为 $9.17 \sim 15.70 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.其中海河上游 N_2O 扩散通量显著小于下游($P < 0.01$),与之相反,荒地排河上游显著大于下游($P < 0.01$),其他河流各河段差异不显著.

2.3 滨海河流 N_2O 浓度与环境因子之间的关系

本研究滨海河流的 N_2O 浓度和环境因子的相关分析结果如表2所示,总体上看,滨海河流 N_2O 浓度主要受到盐度、氮磷营养元素和碳源的影响.4种类型河流 N_2O 浓度均与TN显著相关.城市河流 N_2O

表2 滨海河流 N_2O 浓度和环境因子的相关分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between N_2O concentration and environmental factors of the coastal rivers

	海河	蓟运河	城市河流	独流减河	永定新河	郊区河流	农业河流	排污河流	滨海河流
温度	-0.390 *	-0.452	-0.624 **	0.037	0.048	-0.01	-0.2	-0.61 *	-0.161
盐度	0.511 **	0.497	0.738 **	-0.394	0.119	-0.29	0.46	-0.84 **	0.623 **
DO	0.196	-0.343	0.054	0.370	-0.766 *	-0.06	-0.29	-0.42	-0.011
pH	0.277	0.123	0.256	0.249	-0.359	-0.15	-0.33	-0.62 *	0.151
TN	0.531 **	0.671 *	0.567 **	0.394	0.738 *	0.509 *	0.88 **	-0.63 *	0.596 **
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.628 **	-0.224	0.779 **	0.115	0.095	0.01	0.54	-0.84 **	0.688 **
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.646 **	0.559	0.767 **	0.358	0.857 **	0.44	0.50	0.29	0.607 **
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	0.525 **	0.538	0.41 **	0.564	0.095	0.44	0.46	-0.16	0.458 **
TP	0.235	0.368	0.167	-0.624	0.587	-0.25	-0.07	0.44	0.243 **
SRP	-0.087	0.007	-0.232	-0.503	0.405	-0.10	-0.07	0.44	0.105
DOC	0.115	0.552	-0.024	-0.733 *	0.262	-0.490 *	0.25	-0.12	0.086
高锰酸盐指数	0.349	0.112	0.595 **	-0.297	0.452	-0.16	0.234	0.327	0.498 **
Chla	0.630 **	0.207	0.378 *	0.394	-0.214	0.18	0.46	0.11	0.214

1) **表示河流 N_2O 浓度与环境因子在0.01水平上显著相关,*表示河流 N_2O 浓度与环境因子在0.05水平上显著相关

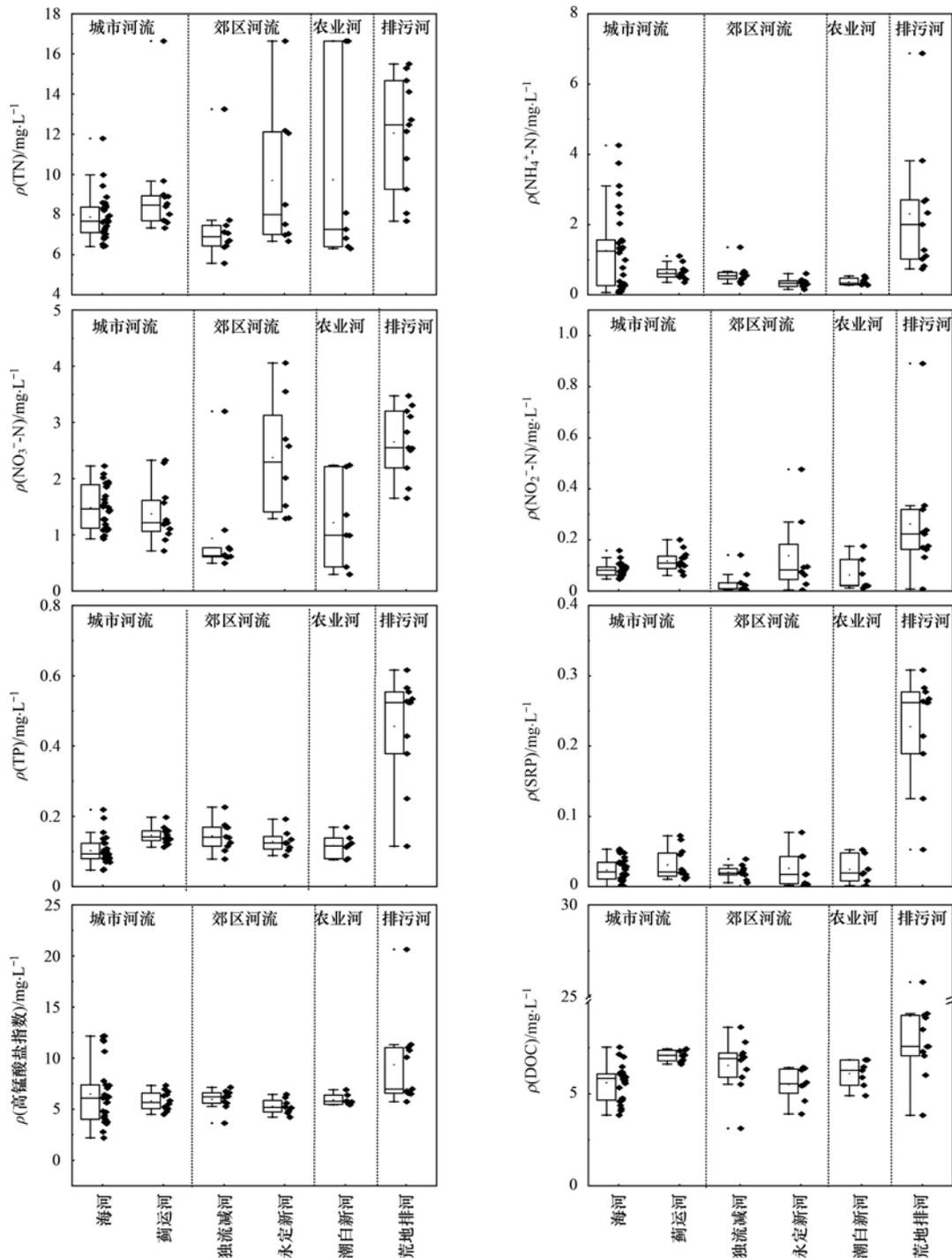


图2 滨海河流表层水样营养盐和高锰酸盐指数的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of nutrients and permanganate index of surface water in the coastal rivers

浓度也与盐度、氮素、高锰酸盐指数和 Chla 正相关,与温度负相关;郊区河流 N_2O 浓度与 DOC 负相关;农业河流 N_2O 浓度与其他因子相关性不显著;排污河 N_2O 浓度的影响因素不同于其他类型的河流,与温度、盐度、pH 和氮负荷显著负相关。

3 讨论

3.1 滨海河流 N_2O 释放热点

为了确定天津不同土地利用类型河流 N_2O 释放

最重要区域,本研究引入了 Arcgis 10.2 中的热点分析^[26].图 5 是河流 N_2O 浓度和扩散通量的不同置信水平下热点和冷点的空间分布.荒地排河的大部分点位均被确定为 N_2O 产生和释放的热点,且置信水平高于 95%,这与 2.2 节中方差分析结果一致.总体来说,天津滨海河流 N_2O 产生和释放未显示冷点,表明滨海河流是大气中 N_2O 的重要源. N_2O 浓度和扩散通量的热点分布特征相似,排污河是 N_2O 产生和释放热点,城市、郊区和农业河流热点分布不显著。

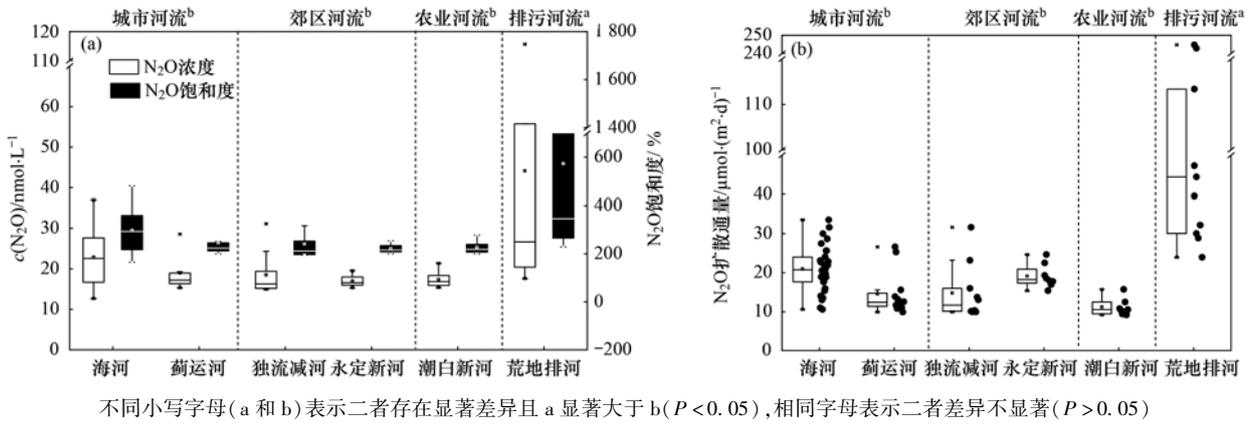


图 3 滨海河流 N_2O 的浓度、饱和度和扩散通量

Fig. 3 N_2O concentration, saturation, and diffusive fluxes from the coastal rivers

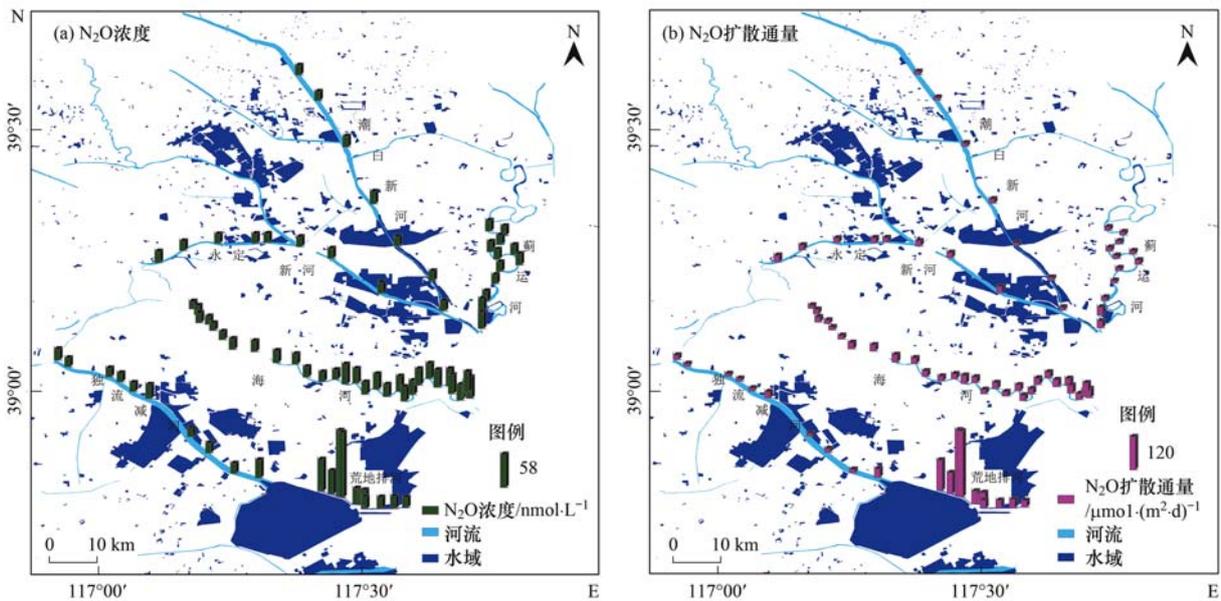


图 4 滨海河流 N_2O 的浓度和扩散通量的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of N_2O concentration and diffusive fluxes in the coastal rivers

天津滨海河流不同河段 N_2O 扩散通量空间分布存在较大的空间异质性. 城市河流[图 6(a)~6(b)]上游显著低于下游 N_2O 扩散通量,下游较高的盐度和氮负荷通过影响微生物的生长和代谢活动促进 N_2O 的产生^[27],与释放热点海河入海口 H_{29} 、 H_{30} 和蓟运河 J_{11} 点位靠近入海口的结果相一致. 农业河流[图 6(c)]和郊区河流[图 6(d)~6(e)]除个别异常点,整体波动幅度不大. 永定新河 Y_1 及独流减河 D_1 和 D_{10} 点位扩散通量较高主要是由于采样点上游或周围分布着工业园区和村镇,污染负荷的增加促进 N_2O 释放. 永定新河 Y_8 周围分布大规模的鱼塘,水产养殖产生的有机污染影响 N_2O 的产生^[28];另外独流减河 D_6 扩散通量的升高可能与河道分流引起活性氮积累相关^[29]. 排污河 N_2O 扩散通量随入海流向呈降低趋势[图 6(f)],上游分布大量的石化公司、油建公司、发电厂和轻纺园,下游污染企业

分布较少导致的污染负荷降低. 值得注意的是,排污河 P_3 和 P_4 位于污水处理厂下游,是 N_2O 的释放热点.

3.2 滨海河流 N_2O 扩散通量的控制因素分析

简单线性回归显示天津滨海河流关键环境因子对河流 N_2O 扩散通量的预测关系(图 7). NO_3^- -N和TP对本研究河流 N_2O 扩散通量差异的贡献较大,分别为38.7%和32.6%[图 7(a)和7(b)]. NO_3^- -N是河流 N_2O 产生的关键预测因子被广泛接受;Beaulieu等^[6]的研究指出,在美国河网中通过氮同位素示踪发现河水中 NO_3^- 升高时,反硝化产生的 N_2O 随之增加;长江和杭埠河的 N_2O 产量和水质 NO_3^- -N也存在显著的线型关系^[30]. 本研究城市、郊区和排污河 NO_3^- -N和 N_2O 扩散通量具有显著正相关性,这预示反硝化过程在 N_2O 产生及释放过程发挥重要作用. 另外还有研究表明 N_2O 产生受到浮游植物生物量的

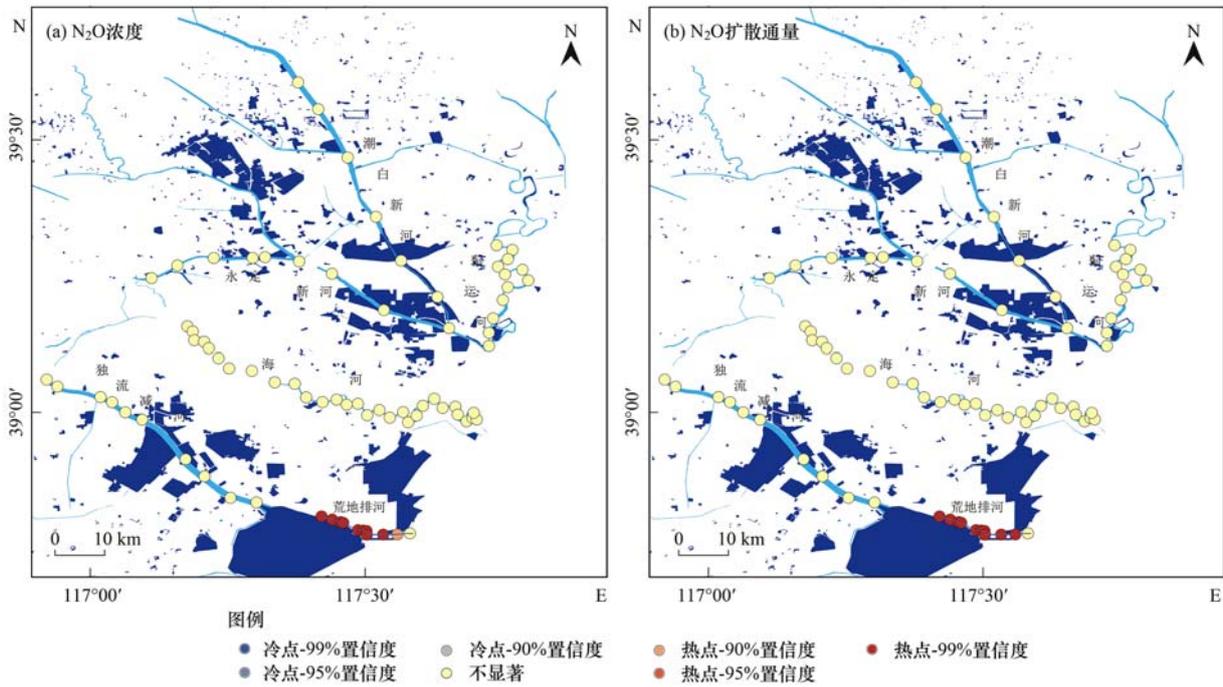
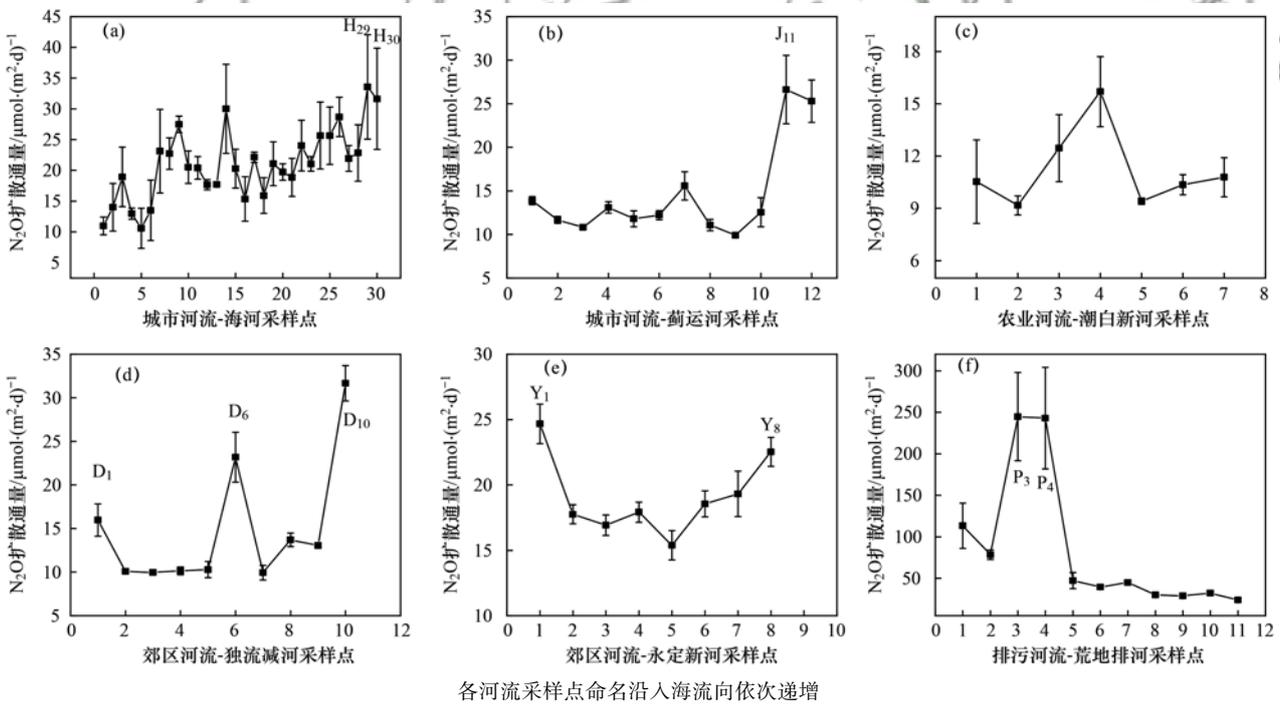


图 5 滨海河流N₂O的浓度和扩散通量的热点分析

Fig. 5 Hot spot analysis of N₂O concentration and diffusive flux in the coastal river



各河流采样点命名沿入海流向依次递增

图 6 滨海河流的N₂O释放热点

Fig. 6 N₂O release hotspots of the coastal rivers

影响^[31],磷作为初级生产力的限制因子,解释了天津滨海河流N₂O扩散通量和磷元素的正相关关系,重庆黑水滩河也发现类似关系^[16].磷负荷可能会缓解氮循环细菌的缺磷状态^[32]以及影响微生物活动导致水环境缺氧,促进N₂O的产生.

河流N₂O的产生和释放与氮循环密切相关,除了NO₃⁻-N调控的反硝化作用,硝化作用和耦合的硝

化-反硝化作用也是产生N₂O重要过程.简单线性回归表明TN、NH₄⁺-N和NO₂⁻-N对天津入海河流N₂O扩散通量差异的贡献分别为14.1%、15.0%和14.2% [图7(c)~7(e)].活性氮输入对N₂O释放的驱动是复杂的,不同形态的氮对河流N₂O扩散通量的贡献存在差异.NH₄⁺-N作为硝化过程的底物,与天津N₂O扩散通量显著正相关.值得注意的是,排污河N₂O扩

散通量和 NH_4^+ -N显著负相关,其 NH_4^+ -N远高于其他类型河流,不同于一般污染河流中硝化细菌适宜条件, NH_4^+ -N对排污河 N_2O 影响较为复杂,程芳等^[33]的研究也发现三峡库区及下游 NH_4^+ -N的降低促进 N_2O 产生和释放。 NO_2^- -N一方面在氨氧化过程中与羟胺反应可产生 N_2O ;另一方面通过硝化细菌被一氧化氮还原酶(NIR)还原成NO后产生 N_2O ^[34],解释了天津滨海河流尤其是城市、郊区河流 NO_2^- -N与 N_2O 扩散通量正相关.高锰酸盐指数对 N_2O 扩散通量的方差贡献率分别为12.5% [图7(f)],高锰酸盐指数反映了水体有机物污染和累积程度,反硝化过程伴随着碳源的氧化,为硝酸盐还原酶、亚硝酸还原酶、一氧化氮还原酶、氧化亚氮还原酶提供电子^[35],碳源增加会影响电子受体竞争电子的能力,解释了高锰酸盐指数和天津河流 N_2O 浓度的显著正相关(表2).

水体的物理环境也是河流 N_2O 产生的重要因素^[31,36].较高的盐度和电导率代表水柱中充足的电子受体和供体,影响氮素的迁移转化^[37].盐度解释了9.9%的天津滨海河流 N_2O 扩散通量差异,并且对城市河流和排污河产生相反的影响.王岚等^[38]的研究发现长江入海口的 N_2O 浓度在盐度为20‰时达到最大值.本研究的城市河流盐度范围为0.178‰~11.84‰,随着盐度的增大水体中 N_2O 不断积累.但有研究表明高盐度抑制微生物活性^[17]和降低微生

物多样性^[39],与排污河 N_2O 浓度和盐度负相关的结果一致(表2),较高的盐度可能通过影响微生物活动减少沉积物和水柱中 N_2O 的产生.本研究中温度、pH和DO等因子与 N_2O 浓度不存在显著的相关性(表2),当河流的物理环境相对稳定,相关环境因子很难成为重要的控制因素.

3.3 天津滨海河流 N_2O 扩散通量与国内外河流的比较

天津滨海河流 N_2O 扩散通量呈现显著的空间差异,表现为:排污河>城市河流>郊区河流>农业河流.Liu等^[40]的研究也发现天津城市河流显著高于农村河流 N_2O 扩散通量.重庆^[32]和上海河网^[12]的城市、郊区和农村河流的 N_2O 扩散通量也存在显著差异.由于人口增加以及污水的排放,充足的养分供应以及适宜的理化环境导致城市河网 N_2O 产生和持续释放,城镇化及土地利用的变化增加了 N_2O 产生的不确定性和复杂性.排污河接受再生水和未处理的暖污水后,直接输入的 N_2O ^[41]、氮负荷的剧增以及污水所带来的热能^[20]导致其成为 N_2O 释放的热点区域.Zhang等^[11,20]的研究在巢湖流域河网发现,城市河流产生的 N_2O 显著高于农业、林业和混合类型河流;长江九江流域也具有相似的空间特征^[30].Beaulieu等^[6]的研究在美国72条河流中发现 N_2O 产量呈现出城市河流>农业河流>原生河流的特征.在不同的空间尺度上,河流 N_2O 扩散通量的空间差

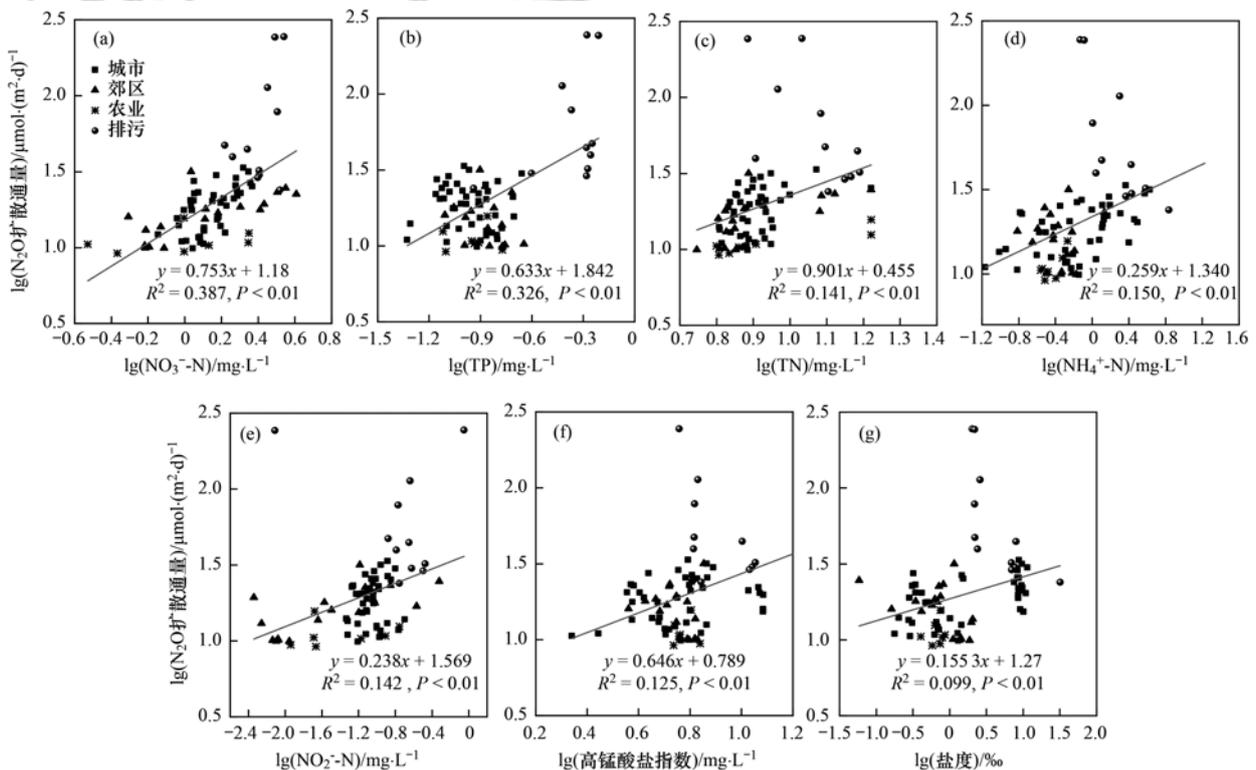


图7 滨海河流 N_2O 扩散通量与营养盐、高锰酸盐指数和盐度的回归

Fig. 7 Regression relationship between N_2O flux and nutrients, permanganate index, and salinity in the coastal rivers

异和景观格局分布基本一致^[42],人类活动对河流干扰程度越大N₂O扩散通量越高,流域内土地利用类型是影响河流水文特征、水质变化的重要因素^[43],同时也影响河流N₂O产生和释放^[20]。

如表3所示,本研究天津滨海河流的N₂O扩散通量与重庆^[32]和上海^[12]等国内亚热带城市,以及长江、九江、巢湖流域^[30]和热带不发达地区^[44]存在差异.这个结果主要与研究河流所处气候带、营养盐负荷和采样时间有关.季节变化、昼夜变化会对N₂O产生和释放产生影响.一般来说,在温度较高的季节以及昼间河流具有较高的扩散通量.例如,北京河流白天N₂O扩散通量均值大于夜间^[13],但影响并不显著;重庆河网^[32]、北京河流^[13]和巢湖流域^[11]均表现出春季扩散通量最高的特征.本研究没有考虑N₂O浓度和扩散通量的季节差异,只进行

了春季昼间采样,但土地利用可能是N₂O差异的重要影响因子^[45].本研究结果表明天津滨海河流N₂O释放存在显著的空间异质性,河流所占流域的土地利用类型对河流N₂O释放的影响较大.未来由于城镇化的过程及土地利用类型的变化,更多的管理措施应聚焦于排污河的污水处理厂下游、城市河流的入海口和郊区河流的居民聚集区等重点区域.对于排污河荒地排河,应尽量减少点源的排放,提高污水处理效率尤其是脱氮效率,减少氮负荷;对于城市河流海河及蓟运河,应尽量减少下游及入海口区域点源的排放并提高排放标准;对于郊区河流和农业河流,应尽量减少居民区面源的排放,居民区生产及生活污水应全部进入污水处理系统,提高居民区污水处理比例及效率.从而有效减少温室气体的释放.

表3 天津滨海河流N₂O扩散通量与国内外河流的比较¹⁾

Table 3 Comparison of N₂O fluxes between coastal rivers in Tianjin City and other rivers at home and abroad

河流名称	气候带	土地利用类型	N ₂ O扩散通量/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	采样季节	文献
天津河流	暖温带	城市	19.14 ± 6.32 (9.91 ~ 23.66)	春季	本研究
		郊区	16.72 ± 5.87 (9.93 ~ 31.67)		
		农业	11.20 ± 2.09 (9.17 ~ 15.70)		
		排污河	84.17 ± 79.26 (23.98 ~ 244.79)		
		城市	50.4	全年	[40]
		农村	-5.76 (-12.24 ~ 8.4)		
重庆梁滩河	亚热带	城市	320 ± 210	全年	[42]
重庆黑水滩河	亚热带	郊区	62.3 ± 51.34 (9.7 ~ 202.1)	全年	[16]
上海河网	亚热带	城市	(2.954 ~ 1184.09)	全年	[12]
		郊区	(0.909 ~ 861.82)		
		农村	(0.227 ~ 195.91)		
巢湖流域	亚热带	城市	475 ± 1052	全年	[11]
		林业	21 ± 36		
		农业	45 ± 144		
		混合	42 ± 182		
长江巢湖九江流域	亚热带	城市	288.55	秋季	[30]
		农业	9.82		
肯尼亚上游流域	热带	农业	26.38 ± 5.37	冬季	[44]
		林业	3.08 ± 0.753		
		畜牧业	3.791 ± 0.524		
Uppsala 流域	温带	农业	(58.91 ~ 95.45)	全年	[29]
北大平原水域	温带	农业	(-12 ~ 166)	夏季	[46]
北塘、大沽河	温带	排污河	44.65 ± 39.26	全年	[47]
Guadalete 河口	亚热带	排污河	(20.3 ~ 3645.7)	全年	[48]

1) 括号外表示N₂O扩散通量的均值或均值 ± 方差,括号内表示N₂O扩散通量范围

4 结论

(1) 天津滨海河流N₂O饱和度均处于过饱和状态,表现为大气N₂O的源.天津滨海河流N₂O浓度和扩散通量受流域内土地利用类型影响,空间差异表现为:排污河 > 城市河流 > 郊区河流 > 农业河流,排污河显著高于其他类型河流,流域内土地利用类型影响滨海河流N₂O的产生和释放.

(2) 水柱NO₃⁻-N和TP是天津滨海河流N₂O扩散通量的主要控制因子.天津河流N₂O的产生和释放与氮循环过程密切相关,不同形态的氮对河流N₂O扩散通量的贡献存在差异.盐度梯度对城市河流、排污河N₂O释放产生相反的影响.

(3) 排污河是N₂O产生和释放热点,城市、郊区和农业河流的释放热点分布较为分散,主要受河流点源及面源排放的影响.未来由于城镇化的发展以

及土地利用类型的变化,更多的管理措施应聚焦于排污河的废水处理厂下游、城市河流的入海口、郊区河流的居民聚集区等N₂O热点区域,从而减少温室气体排放.

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 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Montzka S A, Dlugokencky E J, Butler J H. Non-CO₂ greenhouse gases and climate change [J]. Nature, 2011, **476** (7358): 43-50.
- [3] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous Oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century [J]. Science, 2009, **326**(5949): 123-125.
- [4] WMO. WMO greenhouse gas bulletin: the state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2019 [M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2020.
- [5] Kumar A, Yang T, Sharma M P. Greenhouse gas measurement from Chinese freshwater bodies: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **233**: 368-378.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 等. 夏季太湖草/藻型湖区N₂O生成与迁移特征及其影响因素 [J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2306-2315.
- Zheng X L, Wen S L, Li X, *et al.* Characteristics of N₂O release and influencing factors in grass-type and algae type zones of Taihu lake during summer [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2306-2315.
- [9] 余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 等. 外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和N₂O排放影响 [J]. 环境科学, 2018, **39** (8): 3689-3695.
- She D L, Chen X Y, Gao X M, *et al.* Impact of exogenous nitrogen import on sediment denitrification and N₂O emissions in ditches under different land uses [J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3689-3695.
- [10] 陈朱虹, 陈能汪, 吴殷琪, 等. 河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 [J]. 环境科学, 2014, **35** (9): 3325-3335.
- Chen Z H, Chen N W, Wu Y Q, *et al.* Sediment-water flux and processes of nutrients and gaseous nitrogen release in a China river reservoir [J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3325-3335.
- [11] Zhang W S, Li H P, Xiao Q T, *et al.* Surface nitrous oxide (N₂O) concentrations and fluxes from different rivers draining contrasting landscapes: spatio-temporal variability, controls, and implications based on IPCC emission factor [J]. Environmental Pollution, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114457.
- [12] Yu Z J, Deng H G, Wang D Q, *et al.* Nitrous oxide emissions in the Shanghai river network: implications for the effects of urban sewage and IPCC methodology [J]. Global Change Biology, 2013, **19**(10): 2999-3010.
- [13] Wang G Q, Xia X H, Liu S D, *et al.* Distinctive patterns and controls of nitrous oxide concentrations and fluxes from urban inland waters [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(12): 8422-8431.
- [14] 王淼, 李亚峰, 雷坤, 等. 不同氮污染特征河流N₂O浓度、释放通量与排放系数 [J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5400-5409.
- Wang M, Li Y F, Lei K, *et al.* Concentration, flux, and emission factor of N₂O in rivers with different nitrogen pollution features [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5400-5409.
- [15] 侯翠翠, 张芳, 李英臣, 等. 卫河新乡市区段春季溶解CH₄与N₂O浓度特征 [J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1891-1899.
- Hou C C, Zhang F, Li Y C, *et al.* Characteristics of dissolved CH₄ and N₂O concentrations of Weihe River in Xinxiang section in spring [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1891-1899.
- [16] 龚小杰, 王晓锋, 袁兴中, 等. 城镇快速发展对河流温室气体溶解及扩散通量的影响——以重庆市黑水滩河流域场镇为例 [J]. 生态学报, 2019, **39**(22): 8425-8441.
- Gong X J, Wang X F, Yuan X Z, *et al.* Effects of field towns development on the dissolved and diffusion fluxes of greenhouse gases in Heishuitan River basin, Chongqing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(22): 8425-8441.
- [17] 孙玮玮, 王东启, 陈振楼, 等. 长江三角洲平原河网水体溶解CH₄和N₂O浓度及其排放通量 [J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2009, **39**(2): 165-175.
- [18] 赵强, 吕成文, 秦晓波, 等. 脱甲河水系N₂O关键产生过程及氮素来源探讨 [J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4497-4504.
- Zhao Q, Lv C W, Qin X B, *et al.* Key production process of nitrous oxide and nitrogen sources in Tuojia River [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4497-4504.
- [19] 赵安周, 张安兵, 冯莉莉, 等. 海河流域生态水分利用效率时空变化及其与气候因子的相关性分析 [J]. 生态学报, 2019, **39**(4): 1452-1462.
- Zhao A Z, Zhang A B, Feng L L, *et al.* Spatio-temporal characteristics of water-use efficiency and its relationship with climatic factors in the Haihe River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(4): 1452-1462.
- [20] Zhang W S, Li H P, Xiao Q T, *et al.* Surface nitrous oxide (N₂O) concentrations and fluxes from different rivers draining contrasting landscapes: Spatio-temporal variability, controls, and implications based on IPCC emission factor [J]. Environmental Pollution, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114457.
- [21] 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.
- [22] Butler J H, Elkins J W. An automated technique for the measurement of dissolved N₂O in natural waters [J]. Marine Chemistry, 1991, **34**(1-2): 47-61.
- [23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [24] Weiss R F, Price B A. Nitrous oxide solubility in water and seawater [J]. Marine Chemistry, 1980, **8**(4): 347-359.
- [25] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2014, **12**(6): 351-362.
- [26] Zhu D, Wu Y, Wu N, *et al.* Nitrous oxide emission from

- infralittoral zone and pelagic zone in a shallow lake: implications for whole lake flux estimation and lake restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **82**: 368-375.
- [27] Hershey N R, Nandan S B, Jayachandran P R, *et al.* Nitrous oxide flux from a tropical estuarine system (Cochin estuary, India)[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2019, **30**, doi: 10.1016/j.rsma.2019.100725.
- [28] Yang P, Lai D Y F, Huang J F, *et al.* Effect of drainage on CO₂, CH₄, and N₂O fluxes from aquaculture ponds during winter in a subtropical estuary of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **65**: 72-82.
- [29] Audet J, Wallin M B, Kyllmar K, *et al.* Nitrous oxide emissions from streams in a Swedish agricultural catchment [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **236**: 295-303.
- [30] Wang J N, Chen N W, Yan W J, *et al.* Effect of dissolved oxygen and nitrogen on emission of N₂O from rivers in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 347-356.
- [31] 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.
- [32] He Y X, Wang X F, Chen H, *et al.* Effect of watershed urbanization on N₂O emissions from the Chongqing metropolitan river network, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **171**: 70-81.
- [33] 程芳, 丁帅, 刘素美, 等. 三峡库区及其下游溶解氧化亚氮(N₂O)分布和释放[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4230-4237.
Cheng F, Ding S, Liu S M, *et al.* Distribution and emission of nitrous oxide (N₂O) in Three Gorges Reservoir and downstream river[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4230-4237.
- [34] 孙小溪, 蒋宏忱. 湖泊微生物硝化过程研究进展[J]. *微生物学报*, 2020, **60**(6): 1148-1161.
Sun X X, Jiang H C. Research progress in microbial nitrification in lakes[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2020, **60**(6): 1148-1161.
- [35] 周晨, 潘玉婷, 刘敏, 等. 反硝化过程中氧化亚氮释放机理研究进展[J]. *化工进展*, 2017, **36**(8): 3074-3084.
Zhou C, Pan Y T, Liu M, *et al.* Advance of mechanism on N₂O emissions from biological denitrification [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, **36**(8): 3074-3084.
- [36] Sierra A, Jiménez-López D, Ortega T, *et al.* Factors controlling the variability and emissions of greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O) in three estuaries of the Southern Iberian Atlantic Basin during July 2017[J]. *Marine Chemistry*, 2020, **226**, doi: 10.1016/j.marchem.2020.103867.
- [37] Quick A M, Reeder W J, Farrell T B, *et al.* Nitrous oxide from streams and rivers: a review of primary biogeochemical pathways and environmental variables[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, **191**: 224-262.
- [38] 王岚, 张桂玲, 孙明爽, 等. 春、夏季长江口及其邻近海域溶解N₂O的分布和海-气交换通量[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4502-4510.
Wang L, Zhang G L, Sun M S, *et al.* Distributions and air-sea fluxes of dissolved nitrous oxide in the Yangtze River Estuary and its adjacent marine area in spring and summer [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4502-4510.
- [39] Li Y X, Zhang L J, Xue L, *et al.* Spatial variation in aragonite saturation state and the influencing factors in Jiaozhou Bay, China [J]. *Water*, 2020, **12**(3), doi: 10.3390/w12030825.
- [40] 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.
- [41] 杨露娜, 唐常源, 李杏, 等. 深圳再生水补水河流溶解N₂O空间分布和产生机制[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(2): 438-445.
Yang L N, Tang C Y, Li X, *et al.* Spatial variation of dissolved N₂O and its underlying processes in river affected by treated wastewater effluent in Shenzhen [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(2): 438-445.
- [42] Zhang W S, Li H P, Xiao Q T, *et al.* Urban rivers are hotspots of riverine greenhouse gas (N₂O, CH₄, CO₂) emissions in the mixed-landscape Chaohu Lake Basin [J]. *Water Research*, 2021, **189**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116624.
- [43] 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 等. 快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2827-2839.
Liu T T, Wang X F, Yuan X Z, *et al.* Spatial-temporal characteristics and driving factors of greenhouse gas emissions from rivers in a rapidly urbanizing area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2827-2839.
- [44] Clément F, Ruiz J, Rodríguez M A, *et al.* Landscape diversity and forest edge density regulate stream water quality in agricultural catchments [J]. *Ecological Indicators*, 2017, **72**: 627-639.
- [45] Mwanake R M, Gettel G M, Aho K S, *et al.* Land use, not stream order, controls N₂O concentration and flux in the upper Mara River basin, Kenya [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, **124**(11): 3491-3506.
- [46] Webb J R, Hayes N M, Simpson G L, *et al.* Widespread nitrous oxide undersaturation in farm waterbodies creates an unexpected greenhouse gas sink [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(20): 9814-9819.
- [47] Hu B B, Wang D Q, Zhou J, *et al.* Greenhouse gases emission from the sewage draining rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 1454-1462.
- [48] Burgos M, Sierra A, Ortega T, *et al.* Anthropogenic effects on greenhouse gas (CH₄ and N₂O) emissions in the Guadalete River Estuary (SW Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **503-504**: 179-189.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)