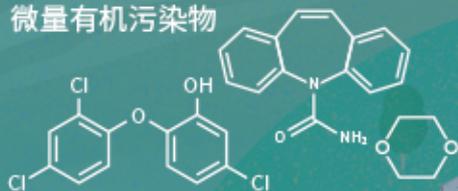


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市河湖

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期

Vol.42 No.6

目次

综述与专论

城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
 城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
 污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

北京大气 PM_{2.5} 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
 京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
 天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
 南京市大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
 西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
 气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
 基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
 基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
 基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
 基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
 中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
 北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
 工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
 基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
 基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
 不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
 太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)
 低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
 覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
 圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
 两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
 CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
 pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
 海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
 超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
 典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
 印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
 短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
 厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
 市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仝, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
 宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
 温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
 小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
 农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
 调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
 S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
 连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
 嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
 冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)
 罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
 中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
 《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响

凌欣, 徐慧平, 陆光华*

(淮海大学环境学院, 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 为了掌握药物及个人护理用品 (pharmaceuticals and personal care products, PPCPs) 对高海拔河流氮转化过程的影响, 采用沉积物泥浆实验方法, 研究了磺胺甲噁唑 (sulfamethoxazole, SMX) 和甲氧基肉桂酸乙基己酯 (2-ethylhexyl-4-methoxycinnamate, EHMC) 在不同浓度下 (0.01、0.1、1.0、10 和 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响. 所有处理组均显著降低了硝化速率, SMX 和 EHMC 共暴露诱导了最大抑制率, 达到 66%. 所有 SMX 和 EHMC 处理组均显著抑制了氨单加氧酶 (ammonia monooxygenase, AMO) 活性和 *amoA* 基因丰度, SMX 单独及其与 EHMC 联合诱导了比 EHMC 更强的抑制效应. SMX 单独或与 EHMC 联合暴露显著抑制了沉积物中的羟胺氧化酶 (hydroxylamine oxidase, HAO) 活性及 *hao* 基因丰度, 共暴露的抑制效应更强, 而单独 EHMC 处理增加了 HAO 活性和 *hao* 基因丰度. 结果表明, PPCPs 影响了高海拔河流沉积物中硝化菌群的活性, 抑制了硝化过程, 联合暴露进一步增加了水生生态系统中氮负荷压力.

关键词: 磺胺甲噁唑; 甲氧基肉桂酸乙基己酯; 雅鲁藏布江; 沉积物; 硝化作用

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2868-07 DOI: 10.13227/j.hjcx.202011199

Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River

LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua*

(Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To understand the effects of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) on nitrogen transformation in high-altitude rivers, we investigated the influence of the single and combined exposure of sulfamethoxazole (SMX) and 2-ethylhexyl-4-methoxycinnamate (EHMC) at different concentrations (0.01, 0.1, 1.0, 10, and 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) on nitrification in the sediments of the Yarlung Zangbo River in sediment slurry experiments. All treatments significantly reduced nitrification rates, and the maximum inhibition rates induced by SMX and EHMC (alone and in combination) were 47%, 50%, and 66%, respectively. SMX significantly inhibited ammonia monooxygenase (AMO) activity in a concentration-dependent manner, with the inhibition rates ranging from 51% to 78%. The inhibitory effect of SMX combined with EHMC on AMO activity was similar to or stronger than that of SMX alone, and the inhibition rates ranged from 55% to 84%. All EHMC exposures also significantly inhibited AMO activity, but the inhibition rates decreased with an increase in EHMC concentrations. The *amoA* gene abundance was significantly reduced in all the treatments, and SMX alone and in combination with EHMC induced stronger inhibitory effects than EHMC alone. SMX alone and in combination with EHMC significantly inhibited HAO activity, showing a similar concentration-effect relationship, but their combined exposure produced a stronger effect. SMX alone and in combination with EHMC also significantly decreased *hao* gene abundance in the sediments, and the maximum inhibition rates were 76% and 68%, respectively. Although exposure to higher concentrations of EHMC increased *hao* gene abundance and HAO activity, the notable decrease in nitrification rates in the sediments suggested that oxidation of ammonia to hydroxylamine catalyzed by AMO was the rate-limiting step in the nitrification process. The results also showed that PPCPs influence the activities of nitrifying communities in the sediments of high-altitude rivers and inhibit nitrification, and their coexistence further increases the pressure of nitrogen loading in aquatic ecosystems.

Key words: sulfamethoxazole; 2-ethylhexyl-4-methoxycinnamate; Yarlung Zangbo River; sediment; nitrification

氮素是水体初级生产力的关键限制性营养元素,也是我国地表水的主要污染物之一. 河流系统作为氮素滞留的主要区域,其结构与功能受到人类活动的影响和控制,导致活性氮的可利用性增加,进而对水质、生物多样性和人类健康产生负面影响^[1]. 进入河流的有机氮或者无机氮,除了被生物体直接利用外,还会通过一系列生物地球化学过程在沉积物中转化和贮存,从而使沉积物成为重要的氮“汇”. 国内有关氮转化研究多集中在长江流域、黄河流域及主要的富营养化湖泊,而对地处青藏高原的河流研究十分匮乏^[2].

药物及个人护理用品 (pharmaceuticals and personal care products, PPCPs) 是地表水环境中普遍存在的新型污染物,它们通过生活污水、工业废水、养殖废水、污水处理厂尾水以及固废渗滤液等源源不断排到自然水体中. 水环境中的 PPCPs 浓度水平一般为 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 级,而在一些频繁受到人类活动影响的湖泊或河流中赋存水平更高,达到 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 级^[3].

收稿日期: 2020-11-23; 修订日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51769034, 51879228); 江苏省第五期“333 高层次人才培养工程”科研项目

作者简介: 凌欣 (1996 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水环境保护与水生态安全, E-mail: linghu@hhu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: ghlu@hhu.edu.cn

其中一些 PPCPs 的水体浓度已高于现有的致毒终点阈值,对生态环境构成潜在风险^[4].

氮素和 PPCPs 在地表水中广泛共存,容易形成复合污染,而复合污染物的交互作用使得水生态安全问题变得更加复杂. 目前关于 PPCPs 对河流系统氮转化过程的影响研究还很少,特别是对生态相对脆弱的高原河流. 已有研究发现,甲砒霉素对河口沉积物的硝酸盐还原过程产生了抑制作用,导致亚硝酸盐积累并促进了 N_2O 的释放^[5]; 而多种抗生素共暴露对河流沉积物的反硝化速率产生了协同抑制作用^[6]. 随着西部水电开发的推进,雅鲁藏布江流域受到的人为干扰日益增多. 由于生活污水处理效率不高,同时传统污水处理工艺对新型有机污染物的处理效率不高,使得大量含氮化合物和 PPCPs 进入雅鲁藏布江. 已有研究表明,雅鲁藏布江及其主要支流溶解性总氮的范围为枯水期 $1.3 \sim 2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,丰水期为 $1.1 \sim 2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[7]; 31 种 PPCPs 被检出,浓度范围在 $75.6 \sim 234 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间; 混合风险熵评估结果表明,有机滤光剂对鱼类构成慢性毒性风险^[8].

硝化反应是水环境中氮转化的重要过程,是通过酶的催化作用将环境中的铵态氮氧化为硝态氮的

过程. 首先氨在氨单加氧酶 (ammonia monooxygenase, AMO) 的催化作用下氧化成为羟胺,然后羟胺在羟胺氧化还原酶(hydroxylamine oxidase, HAO)的催化作用下氧化还原为亚硝态氮,这两个阶段是硝化过程中必不可少的部分^[9]. AMO 主要有 3 个基因编码,分别为 *amoA*、*amoB* 和 *amoC*. 其中 *amoA* 编码携带了 AMO 酶活性位点的亚基,是典型的硝化功能基因^[10]. 本文选取在雅鲁藏布江广泛检出的两种 PPCPs,磺胺甲噁唑 (SMX) 和甲氧基肉桂酸乙基己酯 (EHMC),现场采集雅鲁藏布江沉积物和上覆水样品,研究共存 PPCPs 对硝化速率、AMO 和 HAO 活性及相关基因丰度的影响,以期为高海拔河流复合污染的生态风险评估提供科学依据.

1 材料与方 法

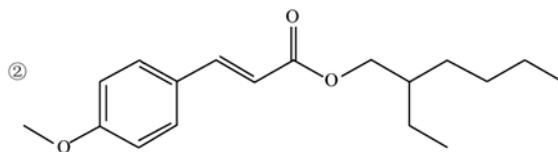
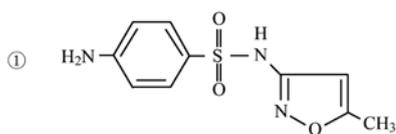
1.1 试剂

SMX (98%)、EHMC (98%)、LC-SAX (500 mg, 3 mL) 和 HLB ((200 mg, 6 mL) 固相萃取柱购自上海安谱科技实验股份有限公司. 甲醇、丙酮和乙腈购自德国 Merck 公司,色谱纯. 其他化学试剂购于国药集团化学试剂有限公司,分析纯. SMX 和 EHMC 的结构和理化性质列于表 1.

表 1 SMX 和 EHMC 的结构和理化性质

Table 1 Structure and physicochemical properties of SMX and EHMC

名称	缩写	CAS 号	结构式	相对分子质量/ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	溶解度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\lg K_{ow}$
磺胺甲噁唑	SMX	723-46-6	①	253	459	0.890
甲氧基肉桂酸乙基己酯	EHMC	5466-77-3	②	290	0.155	5.80



1.2 样品采集

于 2019 年 9 月在雅鲁藏布江林芝段 ($29^{\circ}32'30''\text{N}$, $94^{\circ}26'27''\text{E}$) 采集表层沉积物 ($0 \sim 5 \text{ cm}$) 和上覆水. 沉积物样品密封在无菌塑料袋中,上覆水样品置于聚乙烯瓶中,低温运回实验室. 采样点海拔为 2910 m ,水温为 16.2°C ,气压为 70.9 kPa .

1.3 实验方法

1.3.1 沉积物预培养

为消除沉积物中 SMX 和 EHMC 本底值的影响,在实验开始之前,对沉积物样品进行预培养. 将采回的沉积物样品转移到玻璃容器 ($30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) 中,用多通道蠕动泵保持上覆水的流动,流速设置为 $1 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,在人工气候箱 (15°C) 中进行预培养. 期间每 7 d 取沉积物样品,检测 SMX 和 EHMC 的浓度,直到低于检出限.

1.3.2 磺胺甲噁唑和甲氧基肉桂酸乙基己酯定量分析

冷冻干燥后的沉积物样品采用加速溶剂萃取仪 (Dionex ASE 350, Sunnyvale, 美国) 萃取,经 Oasis HLB 柱净化,采用 Waters AcquityTM UPLC-MS/MS (Waters, Milford, MA, USA) 高效液相色谱-三重四极杆质谱系统测定 SMX 和 EHMC 的浓度^[11]. SMX 和 EHMC 的检测限分别为 0.2 和 $0.3 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$. 培养 28 d 后,SMX 和 EHMC 的浓度均低于检测限,结束预培养. 将沉积物样品充分混合,用于后续硝化反应实验.

1.3.3 硝化速率测定

取完成预培养的沉积物样品 (600 g) 与超纯水 (4.5 L) 混合,充分搅拌混匀得到泥浆样品. 先将泥浆预培养 24 h,去除本底 NH_4^+-N . 然后,将 100 mL 泥

浆样品装入 250 mL 锥形瓶中. 向锥形瓶中加入 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 (最终浓度分别为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). 为研究 PPCPs 组成和浓度对硝化过程的影响, 设置 3 个处理组 (SMX、EHMC、SMX + EHMC) 和 5 个浓度组 (单一及联合处理组中 SMX 和 EHMC 的浓度均为 0.01、0.1、1、10 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 另外设置空白对照组. 所有处理和对照设置 3 组平行. 所有样品在 15°C 下避光振荡 ($200 \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 培养 12 h 后, 测定 NH_4^+-N 的浓度. 单位时间内单位质量的沉积物消耗的 NH_4^+-N 量为硝化速率, 即:

$$N = (k_1 - k_0) / W$$

式中, N 为潜在硝化反应速率 [$\text{nmol}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$]; k_1 和 k_0 分别为样品中 NH_4^+-N 的初始浓度和终止浓度 ($\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$); W 为沉积物的质量 (g).

1.3.4 酶活性测定

粗酶液的提取: 从培养结束后的锥形瓶中取泥浆 25 mL, 于 4°C 、 $4000 \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 3 min, 倒掉上清液, 沉淀用缓冲液定容到 25 mL, 重复一次. 采用超声波破碎机在 4°C 、20 kHz 破碎细胞 2 min. 然后破碎液在 4°C 、 $12000 \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下, 冷

冻离心 30 min, 取离心后的上清液, 即为粗酶液.

AMO 活性测定: 在 10 mL 反应体系中, 加入 600 μL 粗酶液和 1.8 mL $0.01 \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷酸盐溶液和 1.6 mL $2 \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (NH_4)₂SO₄. 在恒温 (15°C) 振荡 30 min, 然后离心. 通过测定反应前后体系中 NH_4^+-N 浓度, 得到 AMO 的活性.

HAO 活性测定: 取 4 mL 反应液 ($50 \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl, $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$, $4 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA, $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH) 和 0.4 mL 粗酶液混合均匀, 在 25°C 水浴中反应 5 min, 加入 1 mL 盐酸溶液 ($2 \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 终止反应, 在 400 nm 处测定吸光度.

1.3.5 硝化反应相关基因测定

从培养结束后的锥形瓶中取泥浆 10 mL, $4000 \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心得到沉积物, 冷冻干燥后用土壤 DNA 快速提取试剂盒提取总 DNA (MP Biomedicals, Cleveland, OH, USA). 采用实时定量聚合酶链反应 (qRT-PCR) 系统测定 *amoA* 和 *hao* 基因的表达情况, 两个基因的引物名称、序列及扩增条件列于表 2. 使用 ABI 7500 序列检测系统 (Applied Biosystems, Carlsbad, CA, USA) 测定 *amoA* 和 *hao* 的基因拷贝数.

表 2 *amoA* 和 *hao* 基因引物名称、引物序列和扩增条件

Table 2 Primers, thermal profiles, and parameters for qRT-PCR quantification of <i>amoA</i> and <i>hao</i>				
目的基因	引物名称	引物序列 (5'-3')	扩增条件	文献
<i>amoA</i>	<i>amoA-1F</i>	GGGCTTTCTACTGCTGGT	95 $^\circ\text{C}$ 、3 min, 一个循环; 94 $^\circ\text{C}$ 、30 s, 65 $^\circ\text{C}$ 、30 s, 72 $^\circ\text{C}$ 、10 s, 40 个循环	[12]
	<i>amoA-2R</i>	CCCCTCKGSAAGCCTTCTTC		
<i>hao</i>	<i>hao-F</i>	GTMGGHTGYATYGACTGYCAC	95 $^\circ\text{C}$ 、3 min, 一个循环; 94 $^\circ\text{C}$ 、30 s, 71 $^\circ\text{C}$ 、30s, 72 $^\circ\text{C}$ 、10 s, 40 个循环	[13]
	<i>hao-R</i>	GRCGRITGCTBKTYTGDC		

1.4 数据处理与分析

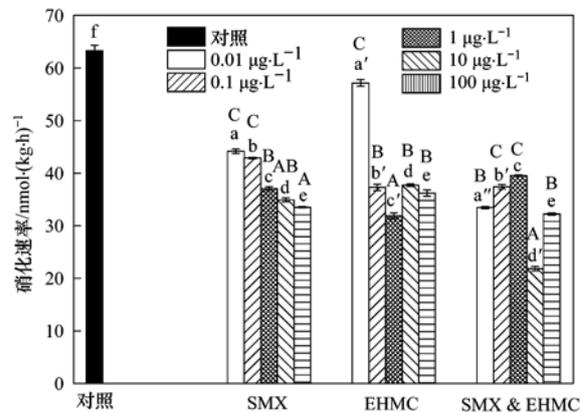
使用统计软件 (SPSS, version-20.0) 进行数据统计分析. 采用单因素方差分析 (ANOVA) 检验不同处理与对照组间的差异以及同一处理组不同浓度间的差异. 绘图采用 OriginPro 2017 完成.

2 结果与分析

采集的雅鲁藏布江林芝段水样中 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 NO_2^- 的浓度为 0.280、0.360 和 $0.004 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 沉积物中含量分别为 3.27、3.88 和 $0.140 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 沉积物中总氮含量为 $487 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.1 磺胺甲噁唑和甲氧基肉桂酸乙基己酯对硝化速率的影响

不同浓度的 SMX 和 EHMC 处理条件下沉积物的硝化速率变化如图 1 所示. 与对照组相比, 所有处理组沉积物的硝化速率均显著降低. SMX 的浓度越高, 对硝化作用的抑制作用越强, 不同浓度的抑制率范围为 30%~47%, 呈现出一定的浓度效应关系. 不



均值 \pm 标准差, $n=3$, 不同大写字母表示同一处理组中不同浓度之间的显著性差异, 不同形式小写字母表述相同浓度下不同处理及对照组之间的显著性差异 ($P < 0.05$), 下同

图 1 SMX 和 EHMC 对硝化速率的影响

Fig. 1 Effects of SMX and EHMC on nitrification rates

同浓度 EHMC 的抑制率范围为 9.7%~50%, 其中 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 EHMC 对硝化速率的抑制作用最强; 更高浓度下 ($10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 抑制效应有所

减轻,与 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组没有显著差异. SMX 和 EHMC 联合暴露对硝化作用的抑制率为 38% ~ 66%,但是浓度-效应关系不明显. $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 联合暴露组的抑制率显著高于单独暴露,其他浓度联合暴露组的抑制率与 SMX 或 EHMC 单独暴露组一致.

2.2 磺胺甲噁唑和甲氧基肉桂酸乙基己酯对 AMO 和 HAO 活性的影响

SMX 和 EHMC 对 AMO 和 HAO 活性的影响如图 2 所示. 所有 SMX 和 EHMC 处理组均显著抑制了 AMO 活性. 随着 SMX 浓度的升高, AMO 活性逐渐

降低,抑制率在 51% ~ 78% 之间,呈现明显的浓度-效应关系. 在 SMX 和 EHMC 联合处理组中, AMO 活性抑制率为 55% ~ 84%,但是浓度依赖性不明显. 而随着 EHMC 的浓度增加,对 AMO 活性的抑制率呈现降低趋势.

SMX 单独及与 EHMC 联合处理均显著抑制了 HAO 活性,并呈现出类似的浓度-效应关系,最大抑制率分别为 57% 和 87%,联合暴露诱导了更强的抑制效应. 但是,与对照组相比,低浓度 EHMC 没有明显改变 HAO 活性,当 EHMC 浓度大于 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, HAO 活性增加了 21% ~ 40%.

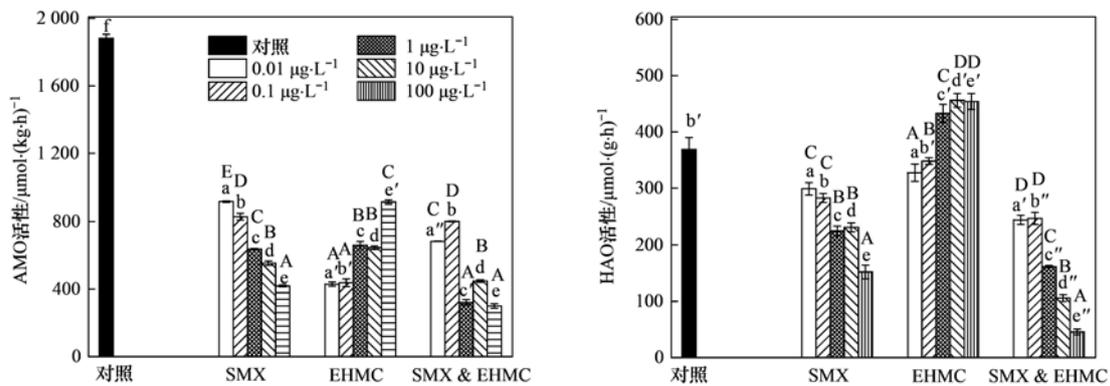


图 2 SMX 和 EHMC 对 AMO 和 HAO 活性的影响

Fig. 2 Effects of SMX and EHMC on AMO and HAO activities

2.3 磺胺甲噁唑和甲氧基肉桂酸乙基己酯对 *amoA* 和 *hao* 基因丰度的影响

所有 SMX 和 EHMC 处理组均显著降低了 *amoA* 基因丰度(图 3). 不同浓度的 SMX 对 *amoA* 基因丰度的抑制率范围为 28% ~ 47%. 尽管 *amoA* 基因丰度随 SMX 浓度升高呈现降低的趋势,但是浓度-效

应关系并不明显. EHMC 处理对 *amoA* 基因丰度的抑制范围为 9.2% ~ 29%,两个低浓度组 EHMC 对 *amoA* 基因的抑制率与 SMX 接近,但是高浓度组显著低于 SMX. SMX 和 EHMC 混合暴露对 *amoA* 基因丰度的抑制率范围为 26% ~ 41%,除了最高浓度组,其他浓度组间并无显著差异.

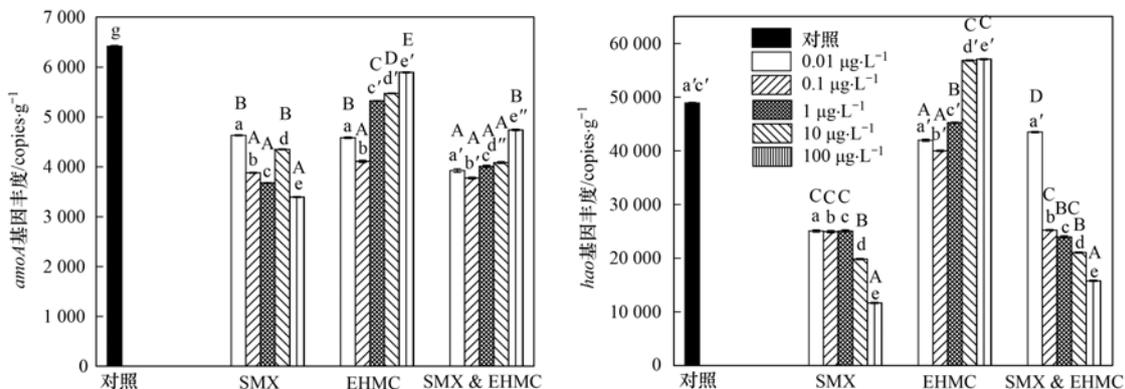


图 3 SMX 和 EHMC 对 *amoA* 和 *hao* 基因丰度的影响

Fig. 3 Effects of SMX and EHMC on the abundance of *amoA* and *hao* genes

不同浓度的 SMX 单独及其与 EHMC 联合处理均显著降低了 *hao* 基因丰度(图 3). SMX 对 *hao* 基因丰度的抑制率在 48% ~ 76% 之间,3 个低浓度 ($0.01 \sim 1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 之间的抑制效应没有显著差异,当浓度高于 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, *hao* 基因丰度随浓度升高

显著降低. 在 SMX 和 EHMC 联合暴露组, *hao* 基因丰度随暴露浓度升高逐渐降低,最大抑制率达到 68%,呈现明显的浓度-效应关系,但是最低浓度暴露下 *hao* 基因丰度与对照组没有显著差异. 除了最低浓度组,混合暴露对 *hao* 基因的抑制效应与 SMX

单独暴露相似.但在 EHMC 单独处理组中,0.01 和 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下 *hao* 基因丰度与对照组没有明显差异,而两个高浓度 EHMC 使 *hao* 基因丰度增加了 16% 左右.这一结果与 EHMC 诱导的 HAO 活性增加基本一致.

3 讨论

长期施用氮肥使土壤中 *amoA* 基因的多样性降低,*amoA* 和 *hao* 基因的菌群组成发生显著变化^[14].Ming 等^[15]在对辽河口沉积物的研究中发现,沉积物粒径是影响氨氧化古菌和氨氧化细菌群落结构的主要因子,而 *amoA* 基因丰度与粉粒含量呈显著正相关.Zhou 等^[16]在对青藏高原不同类型湿地的研究中发现,气候因素在塑造氨氧化微生物群落组成方面起着主导作用;氨氧化古菌的群落组成受年平均气温和年平均降水量的影响,而年平均气温、电导率、植物丰富度、pH 和总氮含量影响了氨氧化细菌的群落组成.此外,河口地区细菌 *amoA* 基因丰度与盐度密切相关,而且氨氧化古菌比氨氧化细菌的潜在硝化速率要低^[17].

有关抗生素类对硝化过程的影响已有报道.Xing 等^[18]的研究发现磺胺甲噁唑对硝化过程有明显的抑制效应,抗生素(四环素和磺胺甲噁唑)和重金属(Zn^{2+} 和 Cu^{2+})共暴露对硝化微生物活性产生了协同作用.张敏等^[19]研究了氯霉素、恩诺沙星和磺胺噻唑对淡水池塘沉积物氨氧化微生物生长和硝化作用的影响,结果表明,3 种抗生素均在不同程度上抑制了硝化作用,而且磺胺噻唑($\leq 500 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对氨氧化细菌的生长有显著抑制作用.阿奇霉素、诺氟沙星、甲氧苄啶和 SMX 等抗生素混合物对脱氮生物反应器中细菌种群和生物量结构有很大影响,由于氨氧化菌亚硝基单胞菌(*Nitrosomonas*)和念珠菌(*Candidatus Brocadiales*)的数量减少,导致脱氮效果不佳^[20].在 $350 \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 环丙沙星暴露条件下,部分硝化反应器微生物群落结构发生了显著变化,氨氧化细菌种群显著减少, NH_4^+-N 去除效率降低^[21].SMX 是最主要的人用和兽用抗生素之一,在地表水环境中的最高检出浓度达到 $1.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[22]. $2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SMX 暴露 60 d 改变了好氧颗粒污泥和悬浮活性污泥中的细菌群落组成^[23].在本研究中, $0.01 \sim 100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SMX 单独及共暴露通过下调 *amoA* 和 *hao* 基因表达,抑制了 AMO 和 HAO 的活性,从而导致雅鲁藏布江沉积物的硝化速率显著降低.

关于个人护理品对硝化过程的影响研究较少,但是它们对细菌具有较强的毒性^[24].研究发现,三

氯生和三氯卡班单独及联合处理可能通过抑制氨氧化菌(氨氧化古菌和氨氧化细菌)或者亚硝化细菌的活性,使土壤自养硝化速率显著降低^[25].当三氯生在砂土中的浓度超过 $5 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,会抑制土壤的净硝化活性^[26].EHMC 属于个人护理品中的防晒剂成分,存在两种异构体,即反-EHMC 和顺-EHMC,二者的比例为 99:1.反-EHMC 分子吸收紫外光后能迅速发生互变异构,生成顺-EHMC,两种异构体的生物毒性不同^[27].本研究中虽然 EHMC 增加了 *hao* 基因丰度及 HAO 活性,但硝化速率仍然显著降低,证明由 AMO 催化的氨氧化为羟胺的过程是限制硝化速率的关键步骤^[28].

在组合的硝化/厌氧氨氧化中试装置中,当硝化过程受到抑制时,磺胺甲噁唑的去除率显著降低^[29].当活性污泥系统中的硝化过程受到抑制时,布洛芬、萘普生和酮洛芬的去除率也显著降低^[30].本研究测定了 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SMX 和 EHMC 在水-沉积物-微生物系统的浓度变化,12 h 后水中 SMX 和 EHMC 的去除率分别为 27% 和 6.4%,降解率仅为 7.3% 和 2.7%.SMX 和 EHMC 属于难生物降解的污染物,沉积物中的微生物降解和转化 PPCPs 时需要消耗营养物质和电子,可能与氨氧化过程产生竞争效应,从而导致了硝化过程和 PPCPs 降解的双向抑制作用.笔者之前的研究发现,SMX 和 EHMC 单独和联合暴露显著抑制了雅鲁藏布江沉积物中的反硝化速率和厌氧氨氧化速率,促进了反硝化过程中 N_2O 的释放^[31].以上结果表明,高海拔河流中广泛检出的 PPCPs 干扰了氮转化过程,使高原河流中的氮素去除效率降低,氮污染负荷加重,同时也可能加速 PPCPs 在沉积物中累积,从而加剧复合污染的生态风险.

4 结论

(1) SMX 单独暴露显著降低了雅鲁藏布江沉积物中硝化反应相关功能基因 *amoA* 和 *hao* 丰度,显著抑制了 AMO 和 HAO 活性,进而导致沉积物中的硝化速率显著降低.

(2) EHMC 单独暴露显著降低了 *amoA* 基因丰度,并显著抑制 AMO 活性,尽管 *hao* 基因丰度和 HAO 活性增加,沉积物中的硝化速率仍然显著降低,表明由 AMO 催化的氨氧化为羟胺的过程是硝化反应的限速步骤.

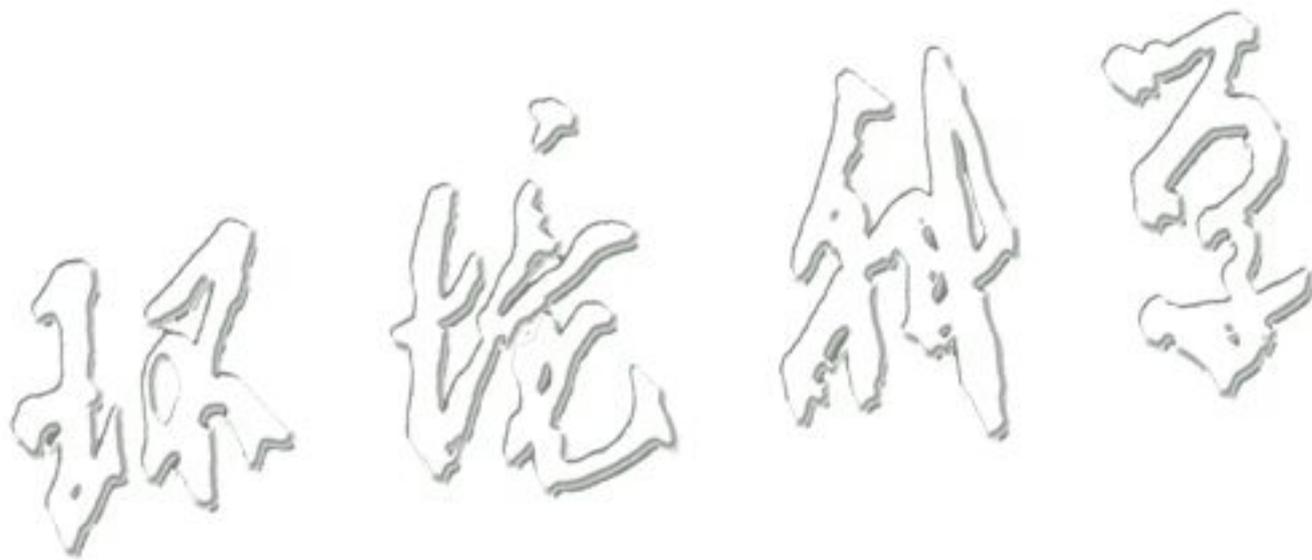
(3) SMX 与 EHMC 联合暴露对硝化过程的影响与 SMX 单独暴露类似,但是对 AMO 和 HAO 活性的抑制效应更强,因此导致硝化速率更低. PPCPs 干扰了高海拔河流的氮转化过程,加剧了复合污染的生态

态风险.

参考文献:

- [1] Finlay J C, Small G E, Sterner R W. Human Influences on nitrogen removal in lakes[J]. *Science*, 2013, **342**(6155): 247-250.
- [2] 王超. “西南水电高坝大库梯级开发的生态保护与恢复”研究构想[J]. *工程科学与技术*, 2017, **49**(1): 19-26.
Wang C. Research conception of ecological protection and restoration of high dams and large reservoirs construction and hydropower cascade development in southwestern China [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, **49**(1): 19-26.
- [3] Rodríguez A S, Sanz M R, Rodríguez J R B. Occurrence of eight UV filters in beaches of Gran Canaria (Canary Islands). An approach to environmental risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2015, **131**: 85-90.
- [4] Hanna N, Sun P, Sun Q, *et al.* Presence of antibiotic residues in various environmental compartments of Shandong province in eastern China; its potential for resistance development and ecological and human risk[J]. *Environment International*, 2018, **114**: 131-142.
- [5] Yin G Y, Hou L J, Liu M, *et al.* Effects of multiple antibiotics exposure on denitrification process in the Yangtze Estuary sediments[J]. *Chemosphere*, 2017, **171**: 118-125.
- [6] Yin G Y, Hou L J, Liu M, *et al.* Effects of thiamphenicol on nitrate reduction and N₂O release in estuarine and coastal sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 265-272.
- [7] 孙文青, 陆光华, 薛晨旺. 雅鲁藏布江中下游含氮化合物的分布特征及来源解析[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(14): 63-68.
Sun W Q, Lu G H, Xue C W. Distribution characteristics and source analysis of nitrogenous compounds in the Middle and Lower Reaches of the Yarlung Zangbo River of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(14): 63-68.
- [8] Liu J C, Lu G H, Yang H H, *et al.* Ecological impact assessment of 110 micropollutants in the Yarlung Tsangpo River on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110291.
- [9] 刘志培, 刘双江. 硝化作用微生物的分子生物学研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2004, **10**(4): 521-525.
Liu Z P, Liu S J. Advances in the molecular biology of nitrifying microorganisms [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, **10**(4): 521-525.
- [10] Li C Y, Hu H, Feng J Y, *et al.* Diversity and abundance of ammonia-oxidizing bacteria (AOB) revealed by PCR amplification of *amoA* gene in a polyacrylamide transportation system of an oilfield [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, **115**: 110-118.
- [11] Yang H H, Lu G H, Yan Z H, *et al.* Occurrence, spatial-temporal distribution and ecological risks of pharmaceuticals and personal care products response to water diversion across the rivers in Nanjing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113132.
- [12] Levy-Booth D J, Prescott C E, Grayston S J. Microbial functional genes involved in nitrogen fixation, nitrification and denitrification in forest ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **75**: 11-25.
- [13] 陈春兰, 陈哲, 朱亦君, 等. 水稻土细菌硝化作用基因 (*amoA* 和 *hao*) 多样性组成与长期稻草还田的关系研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1624-1632.
Chen C L, Chen Z, Zhu Y J, *et al.* Effects of rice straw on the diversity of nitrifying genes (*amoA* and *hao*) in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(6): 1624-1632.
- [14] 陈春兰, 吴敏娜, 魏文学. 长期施用氮肥对土壤细菌硝化基因多样性及组成的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1489-1496.
Chen C L, Wu M N, Wei W X. Effect of long-term application of nitrogen fertilizer on the diversity of nitrifying genes (*amoA* and *hao*) in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1489-1496.
- [15] Ming H X, Zhang H Z, Chen Q R, *et al.* Abundance and community structure of ammonium monooxygenase (*amoA*) genes in the wet season of Liaohe estuary sediments [J]. *Continental Shelf Research*, 2020, **209**, doi: 10.1016/j.csr.2020.104253.
- [16] Zhou W, Jiang X L, Ouyang J, *et al.* Environmental factors, more than spatial distance, explain community structure of soil ammonia-oxidizers in wetlands on the Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Microorganisms*, 2020, **8**(6), doi: 10.3390/microorganisms8060933.
- [17] Zheng L, Liu T T, Yuan D D, *et al.* Abundance, diversity, and distribution patterns along with the salinity of four nitrogen transformation-related microbes in the Yangtze Estuary [J]. *Annals of Microbiology*, 2020, **70**(1), doi: 10.1186/s13213-020-01561-0.
- [18] Xing B S, Jin R G. Inhibitory effects of heavy metals and antibiotics on nitrifying bacterial activities in mature partial nitrification[J]. *Chemosphere*, 2018, **200**: 437-445.
- [19] 张敏, 廖明军, 李大鹏, 等. 三种抗生素对池塘底泥氨氧化微生物生长及硝化作用的影响[J]. *渔业现代化*, 2013, **40**(3): 25-30, 36.
Zhang M, Liao M J, Li D P, *et al.* Effects of three kinds of antibiotic on the nitrification and the growth of ammonia-oxidizing microorganism in freshwater aquaculture pond sediment [J]. *Fishery Modernization*, 2013, **40**(3): 25-30, 36.
- [20] Rodriguez-Sanchez A, Margareto A, Robledo-Mahon T, *et al.* Performance and bacterial community structure of a granular autotrophic nitrogen removal bioreactor amended with high antibiotic concentrations [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **325**: 257-269.
- [21] Gonzalez-Martinez A, Rodriguez-Sanchez A, Martinez-Toledo M V, *et al.* Effect of ciprofloxacin antibiotic on the partial-nitrification process and bacterial community structure of a submerged biofilter [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **476-477**: 276-287.
- [22] Charuaud L, Jarde E, Jaffrezic A, *et al.* Veterinary pharmaceutical residues from natural water to tap water: sales, occurrence and fate[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **361**: 169-186.
- [23] Kang A J, Brown A K, Wong C S, *et al.* Variation in bacterial community structure of aerobic granular and suspended activated sludge in the presence of the antibiotic sulfamethoxazole [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **261**: 322-328.
- [24] Zhang Q Y, Ma X Y, Dzakupas M, *et al.* Evaluation of ecotoxicological effects of benzophenone UV filters; luminescent bacteria toxicity, genotoxicity and hormonal activity [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **142**: 338-347.
- [25] 陈顺涛, 朱同彬, 陈建秋, 等. 三氯生和三氯卡班对水稻土好氧氮转化及 N₂O 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(4): 873-882.

- Chen S T, Zhu T B, Chen J Q, *et al.* Influence of triclosan and triclocarban on aerobic N transformation and N₂O release in paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56** (4): 873-882.
- [26] Waller N J, Kookana R S. Effect of triclosan on microbial activity in Australian soils [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2009, **28** (1): 65-70.
- [27] Rodil R, Moeder M, Altenburger R, *et al.* Photostability and phytotoxicity of selected sunscreen agents and their degradation mixtures in water [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, **395** (5): 1513-1524.
- [28] Kowalchuk G A, Stephen J R. Ammonia-oxidizing bacteria; a model for molecular microbial ecology [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2001, **55**: 485-529.
- [29] Kassotaki E, Pijuan M, Joss A, *et al.* Unraveling the potential of a combined nitrification-anammox biomass towards the biodegradation of pharmaceutically active compounds [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 722-731.
- [30] Ciftcioglu B, Demirkaya E, Salih E, *et al.* Insights into the acute effect of anti-inflammatory drugs on activated sludge systems with high solids retention time [J]. *Environmental Technology*, 2020, **41**, doi: 10.1080/09593330.2020.1761456.
- [31] Xu H P, Lu G H, Xue C W. Effects of sulfamethoxazole and 2-ethylhexyl-4-methoxycinnamate on the dissimilatory nitrate reduction processes and N₂O release in sediments in the Yarlung Zangbo River [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17** (6), doi: 10.3390/ijerph17061822.



CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i>	(2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i>	(2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i>	(2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i>	(2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i>	(2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i>	(2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i>	(2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i>	(2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i>	(2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i>	(2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i>	(2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i>	(2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i>	(2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan	(2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i>	(2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i>	(2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i>	(2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i>	(2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i>	(2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i>	(2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i>	(2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i>	(2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui	(2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng	(2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i>	(2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang	(2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i>	(2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i>	(2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua	(2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i>	(2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i>	(2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i>	(2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i>	(2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i>	(2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i>	(2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i>	(2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i>	(2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i>	(2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i>	(2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i>	(2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i>	(3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i>	(3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i>	(3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i>	(3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i>	(3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i>	(3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i>	(3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i>	(3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long	(3084)