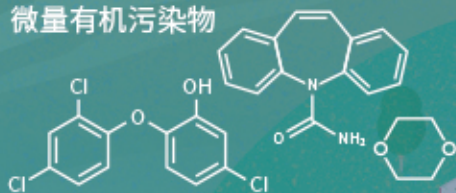


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 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

下游城市河湖

污水达标排放

■ 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} 载带金属浓度、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, 杨复沐, 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)
基于光化学指标法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氮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系夏秋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, 蔡延江 (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, 李诗萌, 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, 周曙仡, 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, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞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)

罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响

张凌玉¹, 刘建超^{1*}, 冷阳², 陆光华¹

(1. 河海大学环境学院, 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 长江水利委员会河湖保护与建设运行安全中心, 武汉 430010)

摘要: 罗红霉素 (ROX) 在水环境中广泛赋存, 并产生一定的生态毒理效应. 为了进一步认知 ROX 对水生生物的负面影响, 以大型溞为模式生物研究了 ROX 在生殖、生长及抗氧化系统方面的急性毒理效应. 结果发现 ROX 对大型溞的急性毒性等级为Ⅲ级 (48h-LC₅₀ 为 60.26 mg·L⁻¹, 96h-LC₅₀ 为 39.81 mg·L⁻¹). 0.5 μg·L⁻¹ 和 50 μg·L⁻¹ 的 ROX 均显著增加了大型溞的产卵胎次, 提高了大型溞的产卵总量和每胎产卵量. 暴露初期 ROX 改变了大型溞的性成熟时间, 大型溞通过调节产卵胎数和单胎产卵数量, 弥补 ROX 造成的环境胁迫. 50 μg·L⁻¹ ROX 显著提升了大型溞的内禀增长率. ROX 暴露组中大型溞均出现了体长变短、心率失调和游泳活性抑制现象. 50 μg·L⁻¹ ROX 对 POD (过氧化物酶)、CAT (过氧化氢酶) 和 GSH-Px (谷胱甘肽) 的抑制率接近 50%, 对 MDA (丙二醛) 的诱导甚至超过 100%, 造成机体内活性氧蓄积, 损伤细胞膜. 大型溞通过上调 *per06* 表达, 增强体内免疫应答, 但 *gst* 和 *gst-theta* 表达受到抑制下调, 解毒作用减弱, ROX 抑制了大型溞 *jhe*、*ecra*、*ecrb*、*rxr*、*vg1*、*vg2* 和 *vit-2* 基因表达, 致使保幼激素和甲状腺激素分泌紊乱和卵黄蛋白合成受阻, 影响其生长发育和种群稳定. 本结果为水环境中 ROX 对水生生物的生殖和生长及在蛋白水平和基因水平的响应提供了借鉴.

关键词: 罗红霉素 (ROX); 大型溞; 抗氧化系统; 生长发育; 生态毒理

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-3074-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012026

Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of *Daphnia magna*

ZHANG Ling-yu¹, LIU Jian-chao^{1*}, LENG Yang², LU Guang-hua¹

(1. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Safety Center for River and Lake Protection, Construction and Operation of Yangtze River Water Resources Commissions, Wuhan 430010, China)

Abstract: Roxithromycin (ROX) is widespread in the water environment and has been reported to have ecotoxicological effects on aquatic organisms. To improve our understanding of these effects, we selected *Daphnia magna* as a test organism to study acute and chronic ROX toxicity on reproduction, growth, and antioxidant systems. The acute ROX toxicity was low, with 48 h-LC₅₀ and 96h-LC₅₀ ROX values of 60.26 mg·L⁻¹ and 39.81 mg·L⁻¹, respectively. Furthermore, ROX concentrations of 0.5 μg·L⁻¹ and 50 μg·L⁻¹ significantly increased the frequency of egg laying, total number of eggs, and number of eggs per fetus. In the early exposure stages, ROX altered the sexual maturation time of *Daphnia magna*, affecting the frequency of egg laying and the number of eggs per fetus to cope with environmental stress. The intrinsic growth rate was also significantly increased by 50 μg·L⁻¹ ROX. In both treatment groups, *Daphnia magna* had a shorter body length, abnormal heart rate, and inhibited swimming activity. Moreover, 50 μg·L⁻¹ ROX inhibited the activities of POD, CAT, and GSH-Px by approximately 50% and induced MDA by more than 100%, resulting in the accumulation of reactive oxygen species in the body, which could potentially damage the cell membrane. In the 50 μg·L⁻¹ ROX treatment, *per06* was up-regulated, enhancing the immune response of *Daphnia magna*. In contrast, *gst* and *gst-theta* were down-regulated, suggesting that ROX could weaken the detoxification effect of *Daphnia magna*. *jhe*, *ecra*, *ecrb*, *rxr*, *vg1*, *vg2*, and *vit-2* were also down-regulated. ROX affected the secretion of juvenile and thyroid hormones, inhibiting the synthesis of vitellogenin. Finally, ROX also affected the growth and disturbed the population stability of *Daphnia magna*. This study provides a reference for the effects of ROX on the reproduction and growth of aquatic organisms and their responses at protein and gene levels.

Key words: roxithromycin (ROX); *Daphnia magna*; anti-oxidation system; growth; ecological toxicology

罗红霉素 (roxithromycin, ROX) 作为一种大环内酯类抗生素, 被广泛运用于治疗呼吸道、泌尿和软组织感染^[1]. 在中国每年使用量超过了 150 t, ROX 结构稳定, 且污水处理厂工艺去除效果有限^[2~4]. 在我国太湖流域地表水中 ROX 检出浓度达到 20.1 ng·L⁻¹^[5], 沉积物中含量 (以 dw 计) 为 42.8 ng·g⁻¹^[5], 饮用水源地中达到 3.5 ng·L⁻¹^[6]. 据抗生素的累积动力学模型预测, 中国大沽河沉积物中

ROX 的含量在 2100 年会达到 13 000 ng·g⁻¹^[7]. Wang 等^[8] 调查了 1999~2019 年污水处理厂尾水中抗生素的含量, 发现 ROX 的平均值为 134 ng·L⁻¹.

收稿日期: 2020-12-03; 修订日期: 2021-01-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (B200202106); 国家自然科学基金项目 (51879228); 国家自然科学基金重点项目 (52039003)

作者简介: 张凌玉 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染生态化学, E-mail: zly5327pzm@163.com

* 通信作者, E-mail: jianchao-liu@hhu.edu.cn

医院废水中 ROX 达到了 $2\,189\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [9]。水环境中, ROX 广泛存在, 能够刺激藻类的生长 [10], 影响大型溞的存活率 [11]。ROX 及其代谢物能在鱼体内累积 [5], 导致鱼类生化功能紊乱 [12], 对水生态系统造成风险, 进一步危害人类健康 [13]。目前关于 ROX 对浮游动物的生长发育、生殖及生态行为方面的影响研究相对较少, 需进一步开展相关研究提高 ROX 对水生生物毒理效应认知。

本研究以标准模式生物大型溞作为受试生物 [14], 以 ROX 急性毒性实验结果中 96h-LC₅₀ 的 1% 和 0.1% 为暴露浓度, 分析 ROX 对大型溞生长发育 (体长、心率、胸肢跳动频率等)、生殖 (产卵率等) 和游泳等生态行为学指标, 测试大型溞抗氧化和代谢系统酶活性变化及相关基因的表达, 以期 ROX 的生态毒理效应提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 受试生物

受试生物大型溞 (*Daphnia magna*) 由中国武汉水生生物研究所提供。本实验开始前, 大型溞在实验室驯化 14 d, 驯化条件包括培养介质: 曝气 24 h 的去离子水, 温度为 $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$, 光暗周期 16 h: 8 h, 光照强度为 1000 lx。每天定时喂食纯种斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*)。

1.2 实验试剂与仪器

本实验试剂包括罗红霉素 (ROX, CAS: 8024-83-1) 和乙醇 (色谱纯)。本实验仪器包括培养箱、酶标仪、电视显微镜、液相色谱-质谱联用仪、荧光定量 PCR 仪、固相萃取、氮吹仪、色谱柱、定量浓缩仪、冰箱、高速冷冻离心机、高压灭菌锅、水浴锅、Mini-Q 超纯水机、离心管和烧杯等。

1.3 急性毒性实验

在预实验的基础上设置 5、10、20、40、60、80 和 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 这 7 个浓度梯度, 同时设置清水空白对照组和溶剂对照组。在实验中, 往 250 mL 烧杯中加入 100 mL 目标浓度的暴露溶液, 每个烧杯加 5 只健康幼溞 (6~24 h), 每个浓度设置 4 个平行。本实验周期为 96 h, 在实验期间不进行喂食操作, 也不更换暴露溶液。在实验开始后 24、48 和 96 h, 分别观察和记录每个烧杯中幼溞死亡的个数。

1.4 长期暴露实验

根据急性毒性实验结果中 96h-LC₅₀ 的千分之一和十万分之一, 本实验设置了两个暴露浓度 $0.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [实测浓度 $(0.412 \pm 0.052)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$]、 $50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [实测浓度 $(43.1 \pm 7.4)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$] 以及清水空白对照组和溶剂对照组。在盛有 50 mL 暴露液的

100 mL 烧杯中随机放入 1 只健康幼溞 (6~24 h), 每个暴露组设置 20 个平行, 用于生殖、生长及行为学实验。另在盛有 800 mL 暴露溶液的 1 000 mL 烧杯中随机放置 150 只健康幼溞 (6~24 h), 每个暴露组设置 3 个平行, 用于抗氧化损伤实验和荧光定量 PCR 实验。本实验条件维持在 $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$, 16 h: 8 h (光: 暗), 每天喂食斜生栅藻, 喂藻密度为 $5 \times 10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。每两天换水一次, 换水时清洗烧杯 [11]。母溞暴露周期为 21 d, 暴露期间记录各项指标: ①母溞的产卵时间; ②产卵数量; ③ 21 d 时母溞的体长; ④ 21 d 时母溞 1 min 内胸肢、心脏跳动频率; ⑤ 21 d 时游泳速度。将暴露结束后的溞放置在 -80°C 冰箱保存。测定 SOD (超氧化物歧化酶)、CAT (过氧化氢酶)、GSH (谷胱甘肽)、GST (谷胱甘肽硫转移酶)、POD (过氧化物酶)、PPQ (多酚氧化酶)、TPX (硫氧还蛋白过氧化物酶) 和 MDA (丙二醛)。具体测定方法参照 Wang 等 [15] 和 Aksakal 等 [16] 的方法进行测定。用荧光定量 PCR 测定大型溞生殖、生长、胚胎发育、防御机制和氧化应激相关的基因表达情况。

1.4.1 种群增长指标测定

内禀增长率的计算方法参照文献 [17] 中的计算公式:

$$\sum e^{-r_m x} l_x m_x = 1$$

$$R_0 = \sum l_x m_x$$

$$T = \ln(R_0/r_m)$$

$$\lambda = e^{r_m}$$

式中, r_m 为大型溞内禀增长率 ($\text{ind}\cdot\text{d}^{-1}$, r_m 在粗略计算的基础上用逐步逼近法得出); x 为大型溞的日龄 (d); l_x 为第 x 天大型溞的存活率; m_x 为每只大型溞在第 x 天的产卵数 (ind); R_0 为净增殖率 (ind); T 为世代时间 (d); λ 为周限增长率 ($\text{ind}\cdot\text{d}^{-1}$)。

1.4.2 生长、行为指标测定

大型溞放在载玻片上, 加入适量的暴露溶液, 记录体长。然后用显微镜和录屏软件记录大型溞的胸肢和心脏跳动频率, 将大型溞放入 24 孔板中, 用 ZebraLab 软件测量出游泳轨迹, 计算出游泳速度。

1.4.3 生物标志物测定

从空白对照、溶剂对照、 $0.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的暴露组的每个平行样品中取出 50 只大型溞进行测定。用生理盐水冲洗后, 将冲洗后的大型溞用滤纸吸干表面水分, 加入到已经称重的离心管中, 用电子天平准确称取大型溞的重量, 按重量 (g): 体积 (mL) = 1:9 的比例, 加入 9 倍体积的生理盐水, 在

冰水浴条件下机械匀浆,以 $2\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min ,取出上清液进行测定.测定的生物标志物包括SOD(超氧化物歧化酶)、CAT(过氧化氢酶)、GSH(谷胱甘肽)、GST(谷胱甘肽硫转移酶)、POD(过氧化物酶)、PPO(多酚氧化酶)、TPX(硫氧还蛋白过氧化物酶)和MDA(丙二醛).具体测定方法参考文献[15,16]的方法进行.

1.4.4 荧光定量 PCR

从空白对照、溶剂对照、 $0.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的暴露组的每个平行样品中取出 50 只大型溞进行测定.将暴露 21 d 后的大型溞放入液氮中速冻 $3\sim5\text{ min}$,放入 -80°C 冰箱中保存.用大型溞基因组DNA提取试剂盒进行DNA提取,用 1.5% 琼脂糖凝胶电泳进行DNA检测,然后进行特异性PCR扩增.目的基因、引物设计和检测方法见文献[18,19],目的基因引物序列如表1所示,采用实时荧光定量PCR测定.使用QuantiTect Reverse Transcription Kit试剂盒进行逆转录.PCR扩增条件如下: $10\text{ }\mu\text{L}$ SYBR Green Mix、 $2\text{ }\mu\text{L}$ Primer Mix、 $3\text{ }\mu\text{L}$ Nuclease-free water 和 $3\text{ }\mu\text{L}$ cDNA.反应参数如下:在PCR中, $95^{\circ}\text{C}\ 3\text{ min}$,然后 30 个循环,每次 $94^{\circ}\text{C}\ 30\text{ s}$, $50^{\circ}\text{C}\ 30\text{ s}$, $72^{\circ}\text{C}\ 30\text{ s}$.熔解曲线验证了扩增特异性.每组重复 3 次,计算 3 次重复的平均值.所有结果用两个内参基因(如*actin*和*gapdh*)的mRNA水平和 C_q 值进行归一化.

表1 目的基因及引物序列

Table 1 Target gene and primer sequences	
目的基因	引物序列
<i>vg1</i>	CCGTCGCTGAAGTCATCTTG
	ACAGTCTCGGAGCCAATCAA
<i>vg2</i>	CCGTCGCTGAAGTCATCTTG
	CGGAGAAGGAGCGCTGT
<i>vit-2</i>	CATTTGAGACATGGGCAGAC
	GCACAGTCATTACGAGAACC
<i>jhe</i>	TCTACAACAACCGCACGTT
	AATCGCATCTCAGGTGTGG
<i>ecra</i>	GCGAGGTGATGATGTTGCG
	CGAAGCGGAAGAGCGAATC
<i>ecrb</i>	TCGCCAATAATCTGCCCTAC
	GTTCCGAAAAGATGACGATGG
<i>rxr</i>	TTGGCAACTTGGTGAGAGAA
	AAATTGTGAAATAGAGGAGATTGTC
<i>nos2</i>	AAGCGTTGTTCTGTTGCCTAA
	GCAGATGAAATGAAGATTGGATT
<i>gst</i>	GGGAGTCTTTTACCACCGTTTC
	TCGCCAGCAGCATACTTGTT
<i>gst-theta</i>	GTTTGCCACTTTTCAGAAATAGATAA
	GACCAACAGGAGAATAATGTCTT
<i>per06</i>	CTTCTCTTCAGGATCAATCATTC
	CTCGCATGGAGTTGATAGC

2 结果与讨论

2.1 半致死效应

ROX对大型溞急性毒性的剂量-效应曲线如图1所示($5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 暴露时未出现死亡,图1中不包含这两个浓度).在实验过程中,空白对照组和溶剂对照组均未出现明显死亡(死亡率 $<5\%$).大型溞暴露于 $20\sim100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 5个浓度组时,均出现大型溞死亡现象,且随着暴露浓度的增加,死亡率不断提高,通过线性回归计算,ROX对大型溞的48h-LC₅₀为 $60.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,96h-LC₅₀为 $39.81\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

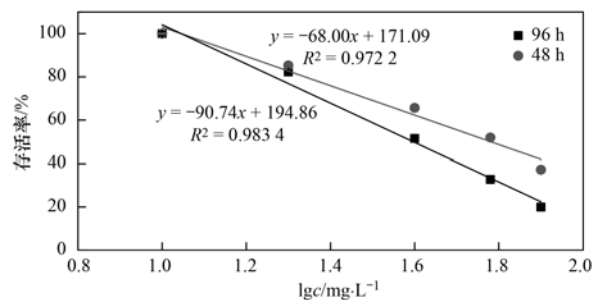


图1 暴露48 h和96 h后ROX对大型溞的致死效应

Fig. 1 Toxic effect of ROX on *Daphnia magna* after 48 h and 96 h

根据化学品分类和标签规范第28部分:对水生环境的危害(GB 30000.28-2013)的毒性等级划分^[20],ROX对大型溞的急性毒性等级为Ⅲ级($10\sim100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).ROX对鳊鱼的96 h半致死浓度(96h-LC₅₀)为 $51.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[21],对大型溞的48 h半致死浓度(48h-LC₅₀)在 $74.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[22].但ROX对绿藻产生较高的生态毒性,96h-LC₅₀为 $4.663\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[21],水环境中ROX对初级生产者的毒理效应明显高于消费者.

2.2 对大型溞生殖的影响

ROX对大型溞生殖指标的影响如表2所示.空白对照组和溶剂对照组的数据无明显差异,以下数据分析以溶剂暴露为参照组,高低两个ROX暴露组对大型溞的生殖能力产生一定的影响,低浓度组轻微延长了大型溞性成熟时间,提升了首胎产卵个数,而高浓度组与此相反,高浓度组明显缩短了大型溞性成熟时间,首胎产卵个数明显减少.从 21 d 暴露来看,高低两个浓度组ROX都增加了大型溞的产卵胎次、产卵总量和平均每胎产卵量,高浓度组表现更为突出.从暴露过程来看,暴露初期低浓度ROX能够刺激大型溞的生殖能力,而高浓度ROX对大型溞生殖能力产生一定的抑制作用,但随着暴露时间的延长,大型溞在环境胁迫下产生生态补偿,导致产卵量显著提升.研究表明,大型溞在低浓度污染下,为了维持自身种群正常的繁衍能力,能够通过调节

表 2 ROX 对大型溞生殖指标的影响¹⁾

Table 2 Influence of ROX on the reproductive index of <i>Daphnia magna</i>			
项目	对照组	ROX-0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	ROX-50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
第一胎产卵时间/d	12.47 $\pm$ 2.21	12.85 $\pm$ 1.35	11.95 $\pm$ 2.25 *
第一胎产卵个数/ind	8.65 $\pm$ 4.18	10.25 $\pm$ 5.20 *	7.63 $\pm$ 2.85 *
产卵胎数	3.24 $\pm$ 1.20	3.80 $\pm$ 0.95	4.16 $\pm$ 1.83 *
产卵总数/ind	27.20 $\pm$ 20.69	32.55 $\pm$ 17.30	43.45 $\pm$ 25.18 *
平均每胎产卵数/ind	9.04 $\pm$ 3.53	9.01 $\pm$ 3.45	10.02 $\pm$ 3.88 *

1) *表示 $P < 0.05$

性成熟时间和单胎产卵数量,弥补环境压力造成的环境胁迫^[23].

2.3 对大型溞种群增长的影响

从 ROX 对大型溞种群增长指标的影响来看(表 3),高浓度组的净生殖率、周限增长率和内禀增长率均显著升高.内禀增长率是表征污染物对大型溞种群生育力、寿命和发育速率毒性影响的综合指标^[24].在高低两个 ROX 暴露浓度下,大型溞种群生殖能力都得到提升,高浓度组提升了 57%. Tessier 等^[25]的研究发现大型溞种群增长率较大时,生存所需的最低食物水平相对较高,而自然环境中食物有限,过度增殖反而容易引起大型溞因饥饿而死亡^[25].根据衰老的进化理论,维持身体机能所需的代谢成本和生殖所需的代谢成本保持着平衡,过度

表 3 ROX 对大型溞种群增长指标的影响¹⁾

Table 3 Influence of ROX on the population growth index of <i>Daphnia magna</i>			
项目	对照组	ROX-0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	ROX-50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
净生殖率/ind	38.92	55.26	72.24 *
周限增长率/ind $\cdot\text{d}^{-1}$	1.19	1.23	1.34 *
内禀增长率/ind $\cdot\text{d}^{-1}$	0.17	0.21	0.29 *

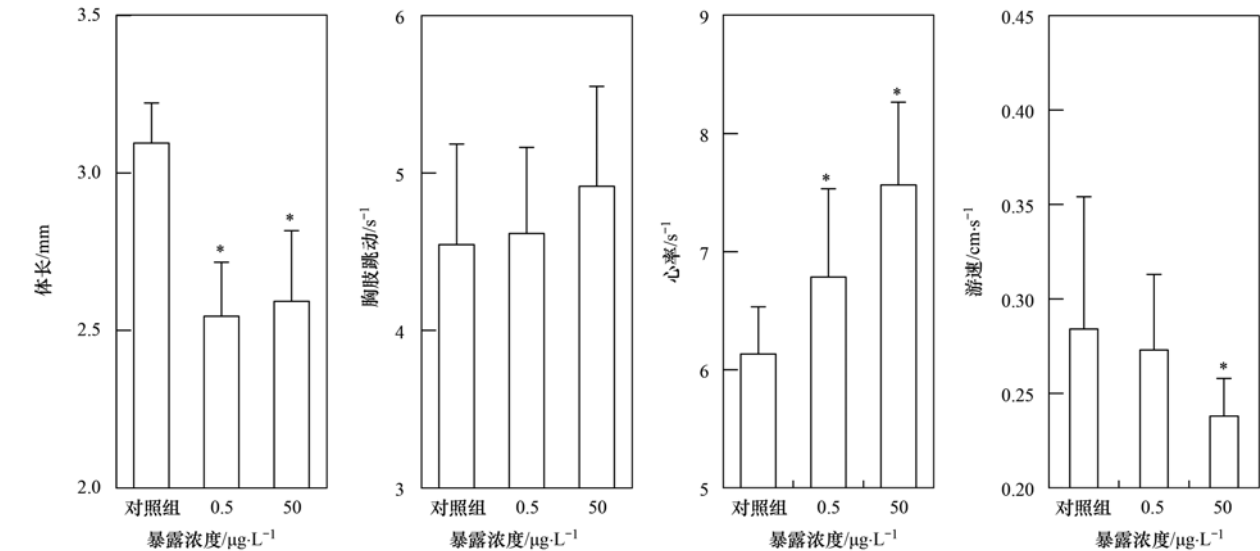
1) *表示 $P < 0.05$

生殖会消耗促进身体代谢的资源,最终缩短寿命^[26].大型溞生殖率的上升,意味着寿命可能会缩减,生存所需的最低食物水平也会提升,最终导致种群生殖和寿命受到影响^[25,26].

2.4 对大型溞生长发育和生态行为的影响

大型溞心率、胸肢跳动频率和体长与大型溞摄食、呼吸、代谢和内分泌系统等健康状况密切相关.从图 2 可以看出,两个暴露组均显著抑制了大型溞的体长生长,提高了大型溞心脏跳动频次,高浓度组诱导率超过了 45%.从图 3 可以看出,两个暴露组均对游速产生抑制作用,高浓度组抑制率更高.对大型溞胸肢跳动频率略有诱导作用,但诱导不显著.

ROX 对大型溞心率的影响鲜有报道,心率是反映污染物对大型溞血液循环系统影响程度的敏感生理指标^[27],心率紊乱说明器官可能受到损伤,导致大型溞呼吸能力下降^[28],且健康状况易受水体病原体侵扰^[29].胸肢是大型溞的摄食器官,它完成摄食动作受心脏能量供给、神经系统调控的双重作用.心率过快一定程度上增加了胸肢跳动的能量供应,能量的过度输出,易引起生长抑制、发育迟缓.大型溞体长的变化也是环境胁迫下生物体的一种防御机

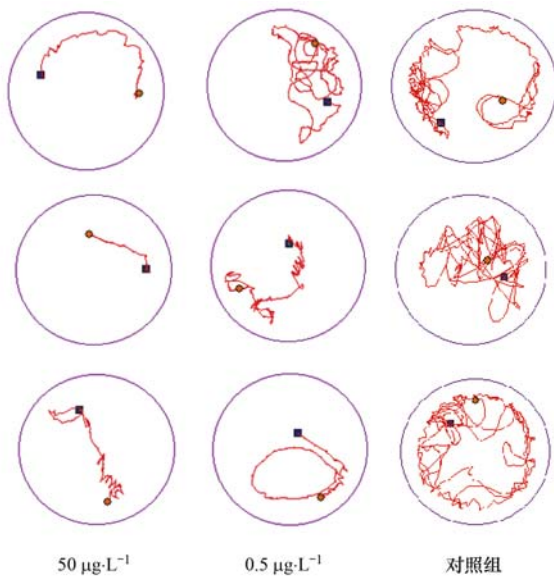


* 表示显著性检验, $P < 0.05$

图 2 21 d 暴露后 ROX 对大型溞的体长、胸肢跳动频率、心率和游速的影响

Fig. 2 Effect of ROX on body length, thoracic limb activity, heart rate, and swimming speed of *Daphnia magna* after exposure for 21 d

制,但污染物影响下执行的错误防御策略可能会诱导死亡,即使体长的改变很小,在实际生态环境中,也可能影响大型蚤的种群稳定^[30].有研究报道 $400 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫氰酸红霉素 (ET) 使得大型蚤的体长减短^[31], $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 四环素显著缩短了大型蚤的体长^[32].随着暴露浓度增加,大型蚤游泳能力不断受到抑制,最高浓度组呈现显著抑制效应,从大型蚤的游泳轨迹可以看出高低浓度组 ROX 显著降低了大型蚤的泳道密度,ROX 对大型蚤游泳活性产生的抑制作用可能是 ROX 和运动神经中控制第二触角肌肉的钠离子通道相互作用的结果^[29].



每列 3 个重复,正方形代表起点,圆形代表终点

图 3 21 d 暴露后大型蚤的游泳轨迹

Fig. 3 Swimming track map of *Daphnia magna* after exposure for 21 d

2.5 对大型蚤抗氧化系统的影响

大型蚤在应对非生物胁迫时有两类抗氧化防御体系,一类是酶促防御系统,包括 POD、SOD、CAT 和 GST 等;另一类是非酶促防御系统,包括 GSH 和抗坏血酸等.为进一步研究 ROX 对大型蚤抗氧化系统的影响,检测了大型蚤抗氧化系统中 TPX、PPO、SOD、POD、CAT、GST、GSH-Px 活性和 MDA 含量.

从图 4 可以看出,高低两个暴露组 ROX 都显著增加了 MDA 的含量,高浓度组对 MDA 的诱导率甚至超过了 100%;显著抑制了 CAT、GST、POD 和 PPO 的活性,高浓度组对 POD 和 CAT 活性的抑制接近 50%,抑制作用随浓度增加显著增强.低浓度组 ROX 对 SOD、TPX 和 GSH-Px 的活性无明显改变,高浓度组产生显著抑制作用,对 GSH-Px 活性的抑制超过 45%.

正常生理状态下,大型蚤体内的活性氧产生和清除处于动态平衡,ROX 的存在刺激大型蚤体内的

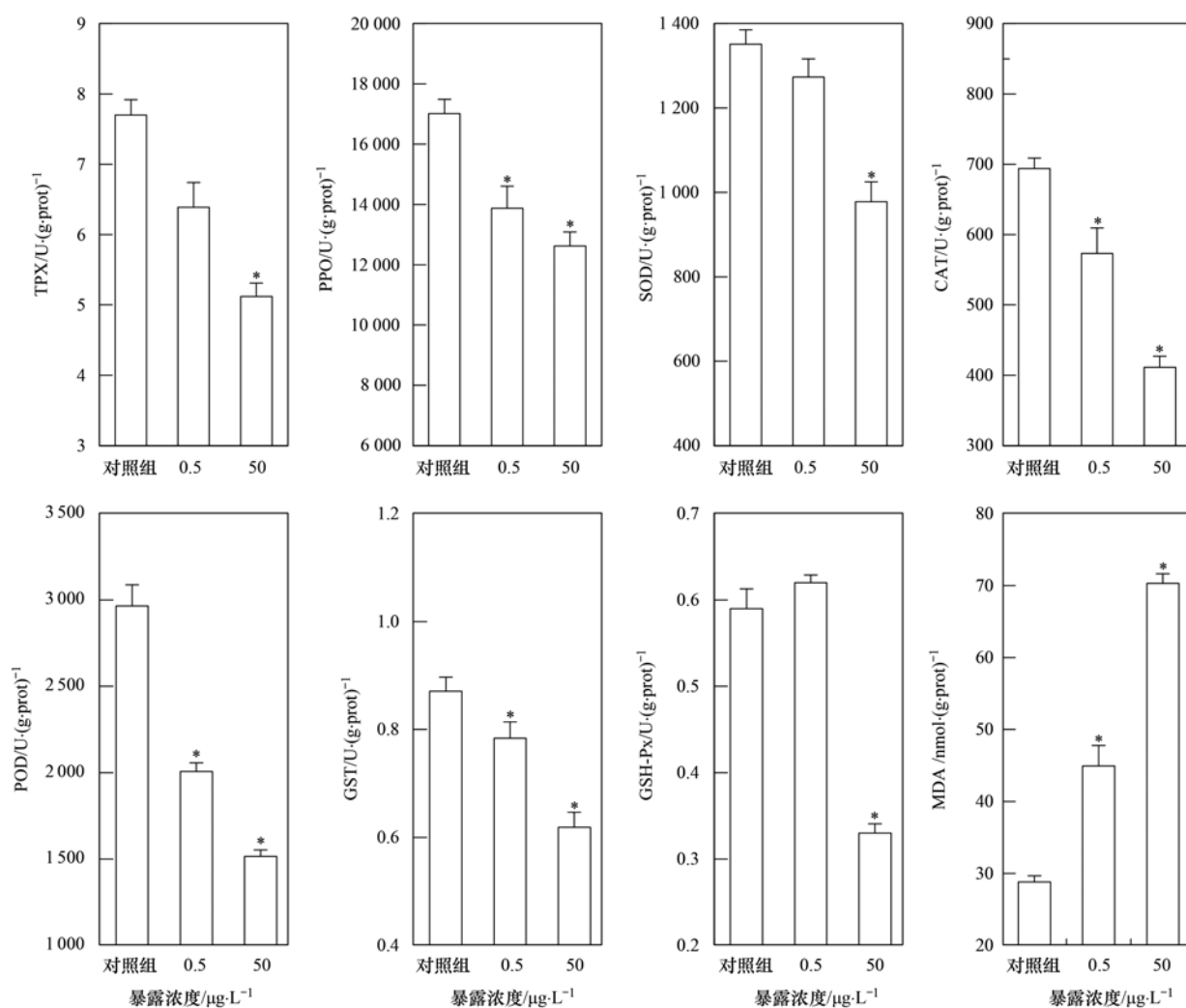
氧化还原状态趋向氧化^[16].活性氧族分子 (ROS) 是影响生物体内氧化还原稳态的主要因子,包括过氧化氢 (H_2O_2)、羟自由基 ($\cdot\text{OH}$)、和超氧自由基 ($\cdot\text{O}_2^-$) 等. TPX 和 PPO 作为抗氧化酶,能够在生物中发挥抗逆性功能,阻止活性氧产生,维持体内正常的氧化还原平衡^[33],TPX 可通过分解烷基过氧化物和过氧化氢减少羟自由基的产生从而实现抗氧化活性.实验结果表明 ROX 胁迫产生的 ROS 消耗了 PPO 和 TPX,且 ROX 浓度越高,导致大型蚤体内 PPO 和 TPX 活性水平越低,TPX 和 PPO 在大型蚤对 ROS 的防御系统中发挥着重要作用. TPX 活性失常能够通过氧化还原反应、信号传导、细胞凋亡等途径影响生物体正常生理功能.

在抗氧化系统中,细胞内的抗氧化酶 SOD、CAT、GSH-Px、POD 和 GST 相互协同,共同完成抗氧化作用. SOD 能够歧化超氧化物自由基形成 H_2O_2 和 O_2 ^[34]. CAT 和 POD 是一种 H_2O_2 去除剂,催化 H_2O_2 分解^[16,35]. GST 催化 GSH 与底物结合,在氧化应激因子的解毒中发挥重要作用^[16].本研究中检测的所有酶促系统酶活性显著降低,而脂质过氧化产物 MDA 含量显著提升. MDA 是表征生物体内 ROS 水平的重要指标,代表了机体的膜脂质过氧化水平^[16].氧自由基剧增和抗氧化体系的还原能力减弱是大型蚤产生氧化应激的主要原因,过量的活性氧会对不饱和脂肪酸氧化或者过氧化,生成脂质过氧化产物 MDA^[36,37].生物膜中不饱和脂肪酸减少,膜的流动性降低,通透性发生改变,进一步造成营养物质吸收效率降低,维生素、氨基酸和无机盐等营养失衡,最终造成生长抑制、生殖能力降低和免疫力低下等^[38].

有研究发现暴露于 $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ROX 中大型蚤的 SOD 和 CAT 活性下降^[39].高浓度 ROX 暴露后,大型蚤体内产生了过量的活性氧,导致 SOD、CAT、POD、GST 和 GSH-Px 活性被显著抑制,无法抵抗氧化胁迫,这时 ROS 产生的速率大于抗氧化酶清除的速率,导致 ROS 积累过多对机体产生损害,会抑制抗氧化酶的生成^[39].Wang 等^[15]的研究发现暴露于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 布洛芬 6 h 和 48 h 后 MDA 含量显著增加^[15],说明有一定程度的脂质过氧化损伤.抗氧化剂在中断脂质过氧化和过氧化物的转化中起着非常重要的作用^[15,40],但由于 ROX 浓度的增加,破坏了抗氧化剂清除和活性氧的产生之间的平衡,因此过多的活性氧积累,引起细胞膜损伤^[15,41].

2.6 对大型蚤基因转录的影响

在环境污染物的作用下,生物体在基因水平、蛋白水平、细胞水平和组织水平等方面均会有响



* 表示显著性检验, $P < 0.05$, 下同

图 4 21 d 暴露后 ROX 对大型溞 TPX、PPO、SOD、CAT、POD、GST、GSH-Px 活性和 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effect of ROX on TPX, PPO, SOD, CAT, POD, GST, GSH-Px activity, and MDA content of *Daphnia magna* after exposure for 21 d

应^[42]. 基因表达水平检测是表征环境污染物毒性作用的有效手段. 本文研究了 ROX 在大型溞抗氧化酶 GST、过氧化物酶 POD 相关以及和防御机制有关的基因表达水平的毒性作用. 现有研究发现抗生素类污染物会影响水生生物体生成途径, 导致其分泌紊乱^[43]. 为此, 本研究还检测了甲状腺激素和保幼激素相关基因表达.

2.6.1 对 *vg1*、*vg2* 和 *vit-2* 转录的影响

卵黄蛋白 (vitellogenin) 常被用作水生生物物种的内分泌干扰生物标志物, 是胚胎发育的能量储备^[44]和主要内源性营养^[45], 雌激素控制卵黄蛋白的产生, 因此卵黄蛋白的产生及其编码基因 (*vg1* 和 *vg2*) 的表达常被用作雌性激素暴露的生物标记物^[46]. 卵黄蛋白 *vg1* 有助于卵黄的形成, 卵黄蛋白 *vg2* 除了有助于卵黄的形成之外, 还可以促进其他的生理功能^[47]. *vit-2* 是卵黄蛋白原的编码基因之一, 卵黄蛋白原是卵黄蛋白的前体^[19]. DePina 等^[26]的研究发现秀丽隐杆线虫在正常生长的情况下, *vit-2* 的相对

表达量会随着寿命的增长而减少. 本实验发现两个浓度组 *vg1* 和 *vg2* 表达下调 (图 5), 高浓度组 *vit-2* 表达下调了 440%. 虽然随着生殖的进行, 对照组 *vit*、*vg1* 和 *vg2* 相对表达量也会减少, 但仍处于上调, ROX 暴露组 21 d 时大型溞 *vg1*、*vg2* 和 *vit-2* 的相对表达量减为负值 (下调), 说明 ROX 在大型溞成年早期 *vg1*、*vg2* 和 *vit-2* 的转录水平可能相对偏高, 以满足生殖需求^[26], 暴露后期 21 d 时, 因 ROX 负面效应, *vg1*、*vg2* 和 *vit-2* 的表达下调^[26], 生殖力下降. 在成年早期, 过量的 *vit* 转录可以确保充分的卵黄蛋白合成能力, 以达到最大的生殖率^[26].

2.6.2 对 *jhe*、*ecra*、*ecrb* 和 *rxr* 转录的影响

甲壳类动物的生殖发育与蜕皮有关, 主要受蜕皮激素 (20-hydroxyecdysone) 和保幼激素 (JH) 以及 *ecr* 核受体和 *usp* 的转录调控^[48]. 保幼激素可以调控大型溞卵黄蛋白的形成^[48], 主要参与生物的生殖、变态和发育过程^[49], *jhe* (juvenile hormone esterase) 是保幼激素的编码基因. 此外, *ecra*

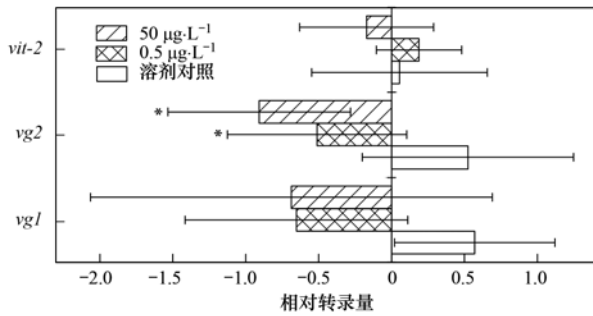


图5 21 d 暴露后 ROX 对大型溞 *vg1*、*vg2* 和 *vit-2* 基因相对转录量的影响

Fig. 5 Effect of ROX on relative gene transcription of *vg1*, *vg2*, and *vit-2* in *Daphnia magna* after exposure for 21 d

(*ecdysone receptor a*)、*ecrb* (*ecdysone receptor b*) 和 *rxr* 也是影响大型溞生长的基因^[18]. *ecrb* 参与调节大型溞的蜕皮过程^[50], 在苏拉威西秀体溞中 *ecra* 参与成虫期的蜕皮和生殖过程^[51]. *rxr* 是视黄醇类 x 受体 (RXR) 的编码基因, RXR 在甲状腺激素受体对下丘脑-垂体轴基因的调控中起协同调节作用^[52]. 从图 6 可以看出, 和对照组相比, 高浓度组 *jhe*、*ecra*、*ecrb* 和 *rxr* 表达下调, 表明大型溞的蜕皮受到抑制, 体内的保幼激素、甲状腺激素分泌也会受到影响. 在正常环境下, 大型溞每 3 d 进行一次单性生殖, 生殖周期与蜕皮周期同步^[53]. 蜕皮后, 母溞将新卵从卵巢排出到孵育囊^[53], 生殖周期结束时, 母溞会将幼崽从孵育囊中释放到周围的水中. 随后, 母溞再次蜕皮, 并重复这一循环^[53]. 甲壳类动物的蜕皮周期对它们的生理过程十分重要, 如生长、成年和生殖^[54]. 本实验表明在暴露初期大型溞的生殖力被显著提升, 导致生殖需求下降, 后期的生殖力大大减弱, 体长也显著小于对照组, 生长发育受到影响.

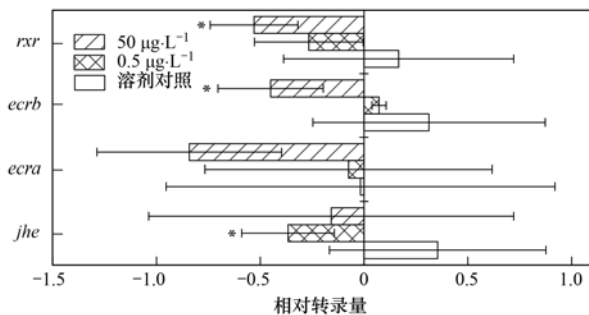


图6 21 d 暴露后 ROX 对大型溞 *jhe*、*ecra*、*ecrb* 和 *rxr* 基因相对转录量的影响

Fig. 6 Effect of ROX on relative gene transcription of *jhe*, *ecra*, *ecrb*, and *rxr* in *Daphnia magna* after exposure for 21 d

2.6.3 对 *nos2*、*gst*、*gst-theta* 和 *per06* 转录的影响

一氧化氮 (NO) 是一种重要的效应分子, 参与多种生物过程, 包括对寄生虫、病毒和细菌等病原体的免疫应答^[18,55]. 在有核细胞中的诱导型一氧化氮合酶 (iNOS) 会产生 NO 来抑制或杀死细胞内的病

原体^[55]. 药物通过刺激 iNOS 的编码基因 (*nos2*) 参与 iNOS 的上调, 加剧 NO 介导的 DNA 损伤^[56]. 从图 7 可以看出, 暴露于 ROX 后, 大型溞 *nos2* 表达上调, 意味着 iNOS 上调, NO 会不断生成, 发挥对病原体的免疫应答作用, 但是 NO 的持续生成会导致缺氧, 神经元死亡^[57].

GST 是水生生物中氧化应激的敏感性指标, 其与谷胱甘肽 (GSH) 结合, 参与细胞解毒^[58]. 高浓度组 ROX 暴露导致大型溞 *gst* 表达下调, *gst-theta* 下调了 249%, 而低浓度组变化不显著, 表明高浓度的 ROX 导致大型溞体内解毒作用减弱^[18], 这与高浓度组导致 GST 和 GSH-Px 活性被抑制的结果相对应. ROX 的污染胁迫超过一个限值后, 开始抑制抗氧化酶的生成^[39]. *per06* 是过氧化物酶 (POD) 的编码基因^[19], 对有毒物质所引起的氧化应激具有保护作用^[59], 可以清除磷脂氢过氧化物^[60], 在抗氧化防御中发挥重要作用^[60]. 高低浓度组 *per06* 表达均显著下调, 高浓度组甚至下调了 581%, 意味着大型溞体内积累过多 ROS 抑制了过氧化物酶的活性, 最终会降低生殖能力, 抑制生长发育, 导致免疫力低下.

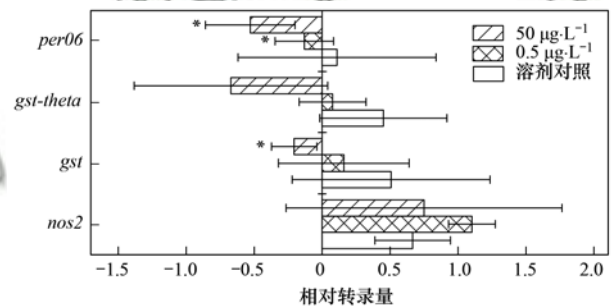


图7 21 d 暴露后 ROX 对大型溞 *nos2*、*gst*、*gst-theta* 和 *per06* 基因相对转录量的影响

Fig. 7 Effect of ROX on relative gene transcription of *nos2*, *gst*, *gst-theta* and *per06* in *Daphnia magna* after exposure for 21 d

3 结论

(1) ROX 对大型溞的急性毒性等级为 III 级, 48h-LC₅₀ 为 60.26 mg·L⁻¹, 96h-LC₅₀ 为 39.81 mg·L⁻¹.

(2) 在暴露初期 ROX 导致大型溞内禀增长率显著升高, 生殖能力显著升高, 暴露后期大型溞 *vg1*、*vg2* 和 *vit-2* 表达下调, 个体的生殖能力降低, 影响大型溞的寿命.

(3) ROX 引起保幼激素、甲状腺激素和蜕皮激素相关的基因 *jhe*、*ecra*、*ecrb* 和 *rxr* 表达下调, 大型溞体长变短, 心跳升高, 游速变慢, 生长发育受到影响.

(4) ROX 下调大型溞 GST 和 POD 的编码基因 *gst*、*gst-theta* 和 *per06* 表达, 上调自由基编码基因

nos2 表达, 过多自由基积累导致 CAT、GST、POD、PPO、SOD、TPX 和 GSH-Px 等酶的活性抑制, MDA 的含量增加, 引起细胞膜损伤, 最终导致免疫力低下和生长抑制, 影响种群稳定。

参考文献:

- [1] Li W, Xu X J, Lyu B L, *et al.* Degradation of typical macrolide antibiotic roxithromycin by hydroxyl radical: kinetics, products, and toxicity assessment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(14): 14570-14582.
- [2] Dong H Y, Yuan X J, Wang W D, *et al.* Occurrence and removal of antibiotics in ecological and conventional wastewater treatment processes: a field study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **178**: 11-19.
- [3] Du J, Fan Y, Qian X. Occurrence and behavior of pharmaceuticals in sewage treatment plants in eastern China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, **9**(4): 725-730.
- [4] 周志洪, 赵建亮, 魏晓东, 等. 珠江广州段水体抗生素的复合污染特征及其生态风险[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(6): 1034-1041.
- Zhou Z H, Zhao J L, Wei X D, *et al.* Co-occurrence and ecological risk of antibiotics in surface water of Guangzhou section of Pearl River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(6): 1034-1041.
- [5] Xie Z X, Lu G H, Liu J C, *et al.* Occurrence, bioaccumulation, and trophic magnification of pharmaceutically active compounds in Taihu Lake, China[J]. *Chemosphere*, 2015, **138**: 140-147.
- [6] Lin T, Yu S L, Chen W. Occurrence, removal and risk assessment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP) around Taihu Lake in China[J]. *Chemosphere*, 2016, **152**: 1-9.
- [7] Hu X G, He K X, Zhou Q X. Occurrence, accumulation, attenuation and priority of typical antibiotics in sediments based on long-term field and modeling studies[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **225-226**: 91-98.
- [8] Wang J L, Chu L B, Wojnárovits L, *et al.* Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: an overview[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140997.
- [9] Chang X S, Meyer M T, Liu X Y, *et al.* Determination of antibiotics in sewage from hospitals, nursery and slaughter house, wastewater treatment plant and source water in Chongqing region of Three Gorge Reservoir in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1444-1450.
- [10] Yang L H, Ying G G, Su H C, *et al.* Growth-inhibiting effects of 12 antibacterial agents and their mixtures on the freshwater microalga *Pseudokirchneriella subcapitata* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(5): 1201-1208.
- [11] Zhang P, Yan Z H, Lu G H, *et al.* Single and combined effects of microplastics and roxithromycin on *Daphnia magna* [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(17): 17010-17020.
- [12] Liu J C, Lu G H, Wang Y H, *et al.* Bioconcentration, metabolism, and biomarker responses in freshwater fish *Carassius auratus* exposed to roxithromycin[J]. *Chemosphere*, 2014, **99**: 102-108.
- [13] Chen H, Liu S, Xu X R, *et al.* Antibiotics in typical marine aquaculture farms surrounding Hailing Island, south China: occurrence, bioaccumulation and human dietary exposure[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **90**(1-2): 181-187.
- [14] Lu G H, Li Z H, Liu J C. Effects of selected pharmaceuticals on growth, reproduction and feeding of *Daphnia magna* [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, **22**(9): 2583-2589.
- [15] Wang L, Peng Y, Nie X P, *et al.* Gene response of CYP360A, CYP314, and GST and whole-organism changes in *Daphnia magna* exposed to ibuprofen[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2016, **179**: 49-56.
- [16] Aksakal F I. Evaluation of boscalid toxicity on *Daphnia magna* by using antioxidant enzyme activities, the expression of genes related to antioxidant and detoxification systems, and life-history parameters[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2020, **237**, doi: 10.1016/j.cbpc.2020.108830.
- [17] 翁显龙, 左迪, 李嘉尧, 等. 温度及 pH 对隆线溞生长和生殖的影响[J]. *动物学杂志*, 2011, **46**(1): 1-6.
- Weng X L, Zuo D, Li J Y, *et al.* Effects of temperature and pH on the population dynamics parameters of *Daphnia carinata* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2011, **46**(1): 1-6.
- [18] Houde M, Douville M, Gagnon P, *et al.* Exposure of *Daphnia magna* to trichloroethylene (TCE) and vinyl chloride (VC): evaluation of gene transcription, cellular activity, and life-history parameters[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **116**: 10-18.
- [19] Vandegehuchte M B, Vandenbrouck T, De Coninck D, *et al.* Can metal stress induce transferable changes in gene transcription in *Daphnia magna*? [J]. *Aquatic Toxicology*, 2010, **97**(3): 188-195.
- [20] 郭婧颖, 刘建超, 李帅衡, 等. 双酚 AF 对大型溞生殖、生长等生态行为的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(10): 4394-4400.
- Guo J Y, Liu J C, Li S H, *et al.* Influences of bisphenol AF on the reproduction and growth of *Daphnia magna* [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(10): 4394-4400.
- [21] Ding H J, Wu Y X, Zhang W H, *et al.* Occurrence, distribution, and risk assessment of antibiotics in the surface water of Poyang Lake, the largest freshwater lake in China[J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 137-147.
- [22] Choi K, Kim Y, Jung J, *et al.* Occurrences and ecological risks of roxithromycin, trimethoprim, and chloramphenicol in the Han River, Korea [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(3): 711-719.
- [23] 张洪昌, 陈良燕, 刘树深, 等. BPA 与 3 种双酚类化合物的联合作用雌激素效应[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 260-265.
- Zhang H C, Chen L Y, Liu S S, *et al.* Jointed estrogenic activities of Bisphenol A and three of its analogs [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 260-265.
- [24] Xi Y L, Hagiwara A, Sakakura Y. Combined effects of food level and temperature on life table demography of *Moina macrocopa* Straus (Cladocera) [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2005, **90**(5-6): 546-554.
- [25] Tessier A J, Woodruff P. Trading off the ability to exploit rich versus poor food quality[J]. *Ecology Letters*, 2002, **5**(5): 685-692.
- [26] DePina A S, Iser W B, Park S S, *et al.* Regulation of *Caenorhabditis elegans* vitellogenesis by DAF-2/HIS through separable transcriptional and posttranscriptional mechanisms[J]. *BMC Physiology*, 2011, **11**, doi: 10.1186/1472-6793-11-11.

- [27] Huang Q S, Fang C, Wu X L, *et al.* Perfluorooctane sulfonate impairs the cardiac development of a marine medaka (*Oryzias melastigma*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2011, **105** (1-2): 71-77.
- [28] Pan Y, Yan S W, Li R Z, *et al.* Lethal/sublethal responses of *Daphnia magna* to acute norfloxacin contamination and changes in phytoplankton-zooplankton interactions induced by this antibiotic [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**, doi: 10.1038/srep40385.
- [29] Bownik A, Ślaska B, Bochra J, *et al.* Procaine penicillin alters swimming behaviour and physiological parameters of *Daphnia magna* [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(18): 18662-18673.
- [30] Imhof H K, Rusek J, Thiel M, *et al.* Do microplastic particles affect *Daphnia magna* at the morphological, life history and molecular level? [J]. *PLoS One*, 2017, **12** (11), doi: 10.1371/journal.pone.0187590.
- [31] Meinertz J R, Schreier T M, Bernardy J A. Chronic toxicity of erythromycin thiocyanate to *Daphnia magna* in a flow-through, continuous exposure test system [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **87**(6): 621-625.
- [32] Kim H Y, Lee M J, Yu S H, *et al.* The individual and population effects of tetracycline on *Daphnia magna* in multigenerational exposure [J]. *Ecotoxicology*, 2012, **21** (4): 993-1002.
- [33] Hall A, Karplus P A, Poole L B. Typical 2-Cys peroxiredoxin-structures, mechanisms and functions [J]. *The FEBS Journal*, 2009, **276**(9): 2469-2477.
- [34] Zhang Q F, Li Y W, Liu Z H, *et al.* Exposure to mercuric chloride induces developmental damage, oxidative stress and immunotoxicity in zebrafish embryos-larvae [J]. *Aquatic Toxicology*, 2016, **181**: 76-85.
- [35] Jia W, Mao L, Zhang L, *et al.* Effects of two strobilurins (azoxystrobin and picoxystrobin) on embryonic development and enzyme activities in juveniles and adult fish livers of zebrafish (*Danio rerio*) [J]. *Chemosphere*, 2018, **207**: 573-580.
- [36] 李杜文, 华智杰, 张文香, 等. 金属蛋白酶对大菱鲆血清抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响 [J]. *海洋科学*, 2019, **43** (4): 52-60.
- Li D W, Hua Z J, Zhang W X, *et al.* Effects of metalloprotease on antioxidant system enzyme activities and malondialdehyde content in the serum of *Scophthalmus maximus* [J]. *Marine Sciences*, 2019, **43**(4): 52-60.
- [37] Viarengo A, Canesi L, Garcia Martinez P, *et al.* Pro-oxidant processes and antioxidant defence systems in the tissues of the Antarctic scallop (*Adamussium colbecki*) compared with the Mediterranean scallop (*Pecten jacobaeus*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 1995, **111**(1): 119-126.
- [38] 胡文琴, 王恬, 孟庆利. 动物中活性氧的产生及清除机制 [J]. *家畜生态*, 2004, **25**(3): 64-67.
- Hu W Q, Wang T, Meng Q L. Mechanisms of generating and scavenging reactive oxygen species in animals [J]. *Ecology of Domestic Animal*, 2004, **25**(3): 64-67.
- [39] 姜航, 丁剑楠, 黄叶菁, 等. 聚苯乙烯微塑料和罗红霉素对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 和大型溞 (*Daphnia magna*) 的联合效应研究 [J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(7): 1457-1465.
- Jiang H, Ding J N, Huang Y J, *et al.* Combined effects of polystyrene microplastics and roxithromycin on the green algae (*Scenedesmus obliquus*) and waterflea (*Daphnia magna*) [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28** (7): 1457-1465.
- [40] Sevanian A, Ursini F. Lipid peroxidation in membranes and low-density lipoproteins: similarities and differences [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2000, **29**(3-4): 306-311.
- [41] Parolini M, Binelli A, Provini A. Chronic effects induced by ibuprofen on the freshwater bivalve *Dreissena polymorpha* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**(6): 1586-1594.
- [42] 王丽, 张耘泽, 耿歌, 等. 高效氯氟菊酯急性暴露中斑马鱼相关酶活性和基因表达变化 [J]. *生态毒理学报*, 2016, **11** (4): 146-154.
- Wang L, Zhang Y Z, Geng G, *et al.* Variations of relevant enzyme activities and genes expressions in zebrafish under acute exposure to beta cypermethrin [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(4): 146-154.
- [43] Daghrir R, Drogui P. Tetracycline antibiotics in the environment: a review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2013, **11**(3): 209-227.
- [44] Subramoniam T. Mechanisms and control of vitellogenesis in crustaceans [J]. *Fisheries Science*, 2011, **77**(1): 1-21.
- [45] 季旭, 黄权. 鱼类卵黄蛋白和卵黄蛋白原的研究进展 [J]. *饲料工业*, 2016, **37**(4): 32-36.
- Ji X, Huang Q. Research progress of fish vitellin and vitellogenin [J]. *Feed Industry*, 2016, **37**(4): 32-36.
- [46] Jones P D, De Coen W M, Tremblay L, *et al.* Vitellogenin as a biomarker for environmental estrogens [J]. *Water Science & Technology*, 2000, **42**(7-8): 1-14.
- [47] Mahapatra S, Kabita S, Bhattacharya D, *et al.* Purification and development of ELISAs for two forms of vitellogenin in Indian walking catfish, *Clarias batrachus* (L.) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2017, **43**(2): 477-491.
- [48] Seyoum A, Pradhan A, Jass J, *et al.* Perfluorinated alkyl substances impede growth, reproduction, lipid metabolism and lifespan in *Daphnia magna* [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **737**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139682.
- [49] Nagaraju G P C. Reproductive regulators in decapod crustaceans: an overview [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2011, **214**: 3-16.
- [50] Kato Y, Kobayashi K, Oda S, *et al.* Cloning and characterization of the ecdysone receptor and ultraspiracle protein from the water flea *Daphnia magna* [J]. *Journal of Endocrinology*, 2007, **193**(1): 183-194.
- [51] In S, Yoon H W, Yoo J W, *et al.* Acute toxicity of bisphenol A and its structural analogues and transcriptional modulation of the ecdysone-mediated pathway in the brackish water flea *Diaphanosoma celebensis* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **179**: 310-317.
- [52] Laflamme L, Hamann G, Messier N, *et al.* RXR acts as a coregulator in the regulation of genes of the hypothalamo-pituitary axis by thyroid hormone receptors [J]. *Journal of Molecular Endocrinology*, 2002, **29**(1): 61-72.
- [53] Sumiya E, Ogino Y, Miyakawa H, *et al.* Roles of ecdysteroids for progression of reproductive cycle in the fresh water crustacean *Daphnia magna* [J]. *Frontiers in Zoology*, 2014, **11**, doi: 10.1186/s12983-014-0060-2.
- [54] Street S M, Eytcheson S A, LeBlanc G A. The role of nuclear receptor E75 in regulating the molt cycle of *Daphnia magna* and consequences of its disruption [J]. *PLoS One*, 2019, **14**(8), doi: 10.1371/journal.pone.0221642.

- [55] Carriero M M, Henrique-Silva F, Caetano A R, *et al.* Characterization and gene expression analysis of pacu (*Piaractus mesopotamicus*) inducible nitric oxide synthase (iNOS) following *Aeromonas dhakensis* infection[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2018, **74**: 94-100.
- [56] Cabrié A, Guittet O, Tomasini R, *et al.* Crosstalk between TAp73 and TGF- β in fibroblast regulates iNOS expression and Nrf2-dependent gene transcription[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2019, **134**: 617-629.
- [57] Mishra O P, Mishra R, Ashraf Q M, *et al.* Nitric oxide-mediated mechanism of neuronal nitric oxide synthase and inducible nitric oxide synthase expression during hypoxia in the cerebral cortex of newborn piglets[J]. Neuroscience, 2006, **140**(3): 857-863.
- [58] Hellou J, Ross N W, Moon T W. Glutathione, glutathione S-transferase, and glutathione conjugates, complementary markers of oxidative stress in aquatic biota[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, **19**(6): 2007-2023.
- [59] Xia X C, Yu R X, Li M B, *et al.* Molecular cloning and characterization of two genes encoding peroxiredoxins from freshwater bivalve *Anodonta woodiana*: Antioxidative effect and immune defense[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2018, **82**: 476-491.
- [60] Liu G, Feinstein S I, Wang Y, *et al.* Comparison of glutathione peroxidase 1 and peroxiredoxin 6 in protection against oxidative stress in the mouse lung [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2010, **49**(7): 1172-1181.

环境科学

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	WANG 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 Nantaoxi 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-juan, <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-yan, <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)