

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897-20140913001

王素芬, 宁建凤, 崔理华, 等. 外源洛克沙肿对水生生态系统砷蓄积及底泥微生物生长的影响[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(3): 177-183

Wang S F, Ning J F, Cui L H, et al. Impacts of exogenous roxarsone on arsenic accumulation and growth of sediment microorganisms in aquatic microcosms [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(3): 177-183 (in Chinese)

外源洛克沙肿对水生生态系统砷蓄积及底泥微生物生长的影响

王素芬^{1,2}, 宁建凤^{1,3}, 崔理华^{1,*}, 许巧玲¹, 李国婉¹

1. 华南农业大学资源与环境学院, 广州 510642

2. 河南科技学院资源与环境学院, 新乡 453003

3. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广州 510640

收稿日期: 2014-09-13 录用日期: 2015-03-01

摘要: 为探明洛克沙肿(ROX)对水生生态系统的毒性效应, 采用模拟水生生态系统, 研究了外源添加不同浓度洛克沙肿(0、10、20、40、80 和 160 mg·L⁻¹)对水生生态系统砷含量及底泥微生物生长的影响。结果表明, 水体及底泥砷含量随外源 ROX 用量增加而增加, 但随暴露时间延长水体砷含量降低的同时底泥砷含量逐渐增加。金鱼藻和鲫鱼体内均出现明显砷蓄积现象, 且 160 mg·L⁻¹ ROX 处理的水生生态系统鲫鱼毒害效应明显, 暴露 1 d 的死亡率为 100%。金鱼藻对砷具有较强的富集能力, 暴露 32 d 后砷富集量达 398.1~1 538.91 mg·kg⁻¹。不同浓度 ROX 对底泥真菌、细菌和反硝化细菌生长均具有不同程度的抑制效应, 而对放线菌和氨化细菌生长具有一定的促进作用, 且低浓度 ROX (10 mg·L⁻¹)对放线菌生长的促进作用明显。总体上, 外源 ROX 进入水生生态系统导致水体砷污染的同时在生物及非生物媒介中再次迁移、分配和蓄积, 进而对鲫鱼及部分底泥微生物生长产生毒害。

关键词: 洛克沙肿; 水生生态系统; 生物富集; 微生物

文章编号: 1673-5897(2015)3-177-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Impacts of Exogenous Roxarsone on Arsenic Accumulation and Growth of Sediment Microorganisms in Aquatic Microcosms

Wang Sufen^{1,2}, Ning Jianfeng^{1,3}, Cui Lihua^{1,*}, Xu Qiaoling¹, Li Guowan¹

1. College of Resource and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. School of Resources and Environment, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China

3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China

Received 13 September 2014 accepted 1 March 2015

Abstract: To investigate the toxic effects of roxarsone (ROX) on the aquatic ecosystems, the simulated aquatic microcosms were employed to study the effects of exogenous ROX on arsenic accumulation and growth of microorganisms in sediments. Six ROX concentrations including 0, 10, 20, 40, 80 and 160 mg·L⁻¹ were used in this study. Results showed that arsenic content in water column and sediment increased with the amount of ROX application.

基金项目: 国家自然科学基金项目(30130140, 41271245); 广东省科技厅农业科技创新团队项目(2012A020100003); 广东省教育厅广东高校污水生态处理与水体修复工程技术研究中心项目(2012gczx A1004)

作者简介: 王素芬(1977-), 女, 讲师, 从事固体废物利用与废水处理工程研究, E-mail: hbwsf0912@163.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: lhcu@scau.edu.cn

However, as the ROX exposure time elapsed, the arsenic content decreased in the water column but increased in the sediment. In addition, arsenic accumulation in the sharksuckers and hornwort bodies were observed. When the aquatic ecosystem was treated with the ROX concentration of $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the sharksuckers showed a significant ROX toxicity with a death rate of 100% within one day. It was observed that hornwort had higher capacity of arsenic accumulation with a concentration range from $398.1\text{--}1\,538.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ As after 32 d exposure. Different concentrations of ROX can inhibit the growth of fungus, bacteria and denitrifying bacteria, whereas the growth of actinomyces and ammonification bacteria in sediment were promoted as exposed to the ROX environment. Furthermore, the growth of actinomyces in sediment was promoted significantly at $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ROX. In summary, exogenous ROX polluted water environment and re-transported and re-accumulated in different biotic and abiotic organisms, which resulted in toxicity of sharksucker and some microorganisms in the sediment.

Keywords: roxarsone; aquatic microcosms; bioaccumulation; microorganisms

洛克沙肿(Roxarsone, ROX),即 3-硝基-4-羟基苯胂酸($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6\text{AsN}$),是一种有机胂制剂,因其具有抑菌、促生长及提高饲料转化率等功效而被广泛用于畜禽养殖业生产^[1]。美国食品和药物管理局(FDA)最早于 1964 年允许用于鸡的饲料,在 1983 年被批准作为猪、鸡的促生长剂。我国农业部于 1996 年批准了该药的使用。诸多研究^[2-4]表明,ROX 进入动物体内后仅有少量被肠道吸收,而 80%~90%以原药形态经粪便和尿液排出体外。据报道,美国畜禽养殖业每年洛克沙肿用量为 20~50 t^[5]。在我国,2004 年有机胂饲料添加剂的使用总量为 $2 \times 10^7 \text{ kg}$ 左右,若按含砷 30% 计算,则进入养殖场周围环境的砷大约为 $6 \times 10^6 \text{ kg}$ ^[6]。曾婧^[7]对 7 省区共 43 个养殖场周边土壤环境质量调查结果显示,土壤砷含量为 $12.7\text{--}56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。进入环境中的洛克沙肿,在生物化学作用下转化为芳香类有机胂及不同形态无机胂,而无机胂的毒性效应要明显高于有机胂^[8-10]。

畜禽养殖业中砷制剂引起的环境污染问题,已引起国内外的高度关注。目前,国内外针对 ROX 的研究主要集中于其土壤环境行为及生态毒理学效应方面^[1,11]。王志强等^[12]针对鲫鱼的研究显示,鲫鱼暴露于 $0.5\text{--}2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 洛克沙肿 72 h 可引起鲫鱼肾细胞明显的 DNA 损伤,并呈现一定剂量-效应关系。张雨梅等^[13-14]、陈冬梅^[15]系统研究报道了洛克沙肿在土壤中的降解、转化及其对土壤酶活性及微生物活性等的影响,评价了 ROX 的环境污染风险。目前,国内外鲜有针对水生生态系统中 ROX 在不同介质中的分配特征及其对底泥微生物活性影响研究和报道。

本文采用水生微宇宙模拟水生生态系统的试验方法,研究添加外源 ROX 条件下,水生生态系统底泥

砷含量及微生物活性变化特征,明确砷在鲫鱼、金鱼藻及水体和底泥各媒介中的蓄积及其毒性效应,以期为水生态系统 ROX 污染风险评价提供理论依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 供试材料

供试洛克沙肿含 As 28.5% (广州市惠华动物保健品公司)。供试底泥采自华南农业大学校园池塘,采用多点采样法,每个样点采集底泥 1 kg。风干后将多个样点的底泥样品混合、粉碎、过 2 mm 筛,备用。底泥基本理化性质为: pH, 4.69; 总砷, $1.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 有机质, $42.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 全氮 $2.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 全磷, $0.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验在华南农业大学玻璃温室内进行。采用玻璃水族箱模拟水生生态系统,水族箱容积为 65 L ($0.6 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$)。试验开始前,于水族箱底部均匀铺上约 5 cm 厚的底泥(重量 7 kg),然后缓慢加入 50 L 自来水,待水体稳定 7 d 后,加入适量的 KNO_3 、 NaH_2PO_4 和 NaHCO_3 ,使水体全氮和全磷浓度分别为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到中富营养水平。模拟水生生态系统在自然光照条件下稳定 30 d 后,向每个水族箱放入 40 g 金鱼藻及 20 尾个体均一的鲫鱼(每尾 $60 \pm 2 \text{ g}$),再次平衡 7 d 后,加入不同用量的 ROX,使水生生态系统初始 ROX 浓度分别达到 10、20、40、80 和 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以不加 ROX 的处理为对照。试验共设 6 个处理,每处理三个水族箱,即三次重复。试验期间,水温 $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,每隔 3 天用自来水补充蒸发失水。分别于 ROX 加入水体后的 0、2、4、8、16 和 32 d 动态采集底泥样品;于 0、2、4、8、16 和 21 d 采集鲫鱼样品,前 5 次采样中每次采集 3 尾鲫鱼用于分析,第 6 次采集全部剩余 5 条鲫鱼;于第 32 天采集所有金

鱼藻样品,测定各项指标。

1.3 分析测定指标及方法

水样、底泥、金鱼藻和鲫鱼样品中总砷含量均采用二乙基二硫代氨基甲酸银比色法^[16](最低检出浓度 0.007 mg·L⁻¹,测定上限浓度 0.05 mg·L⁻¹)进行测定。鲫鱼以整个鱼体为样品测定总砷含量。底泥细菌、放线菌、真菌、氨化细菌及反硝化细菌数量测定均采用《污染控制微生物学实验》^[17]中相关方法。其中,细菌总数测定采用平板倾注混合法(牛肉膏蛋白胨琼脂培养基),放线菌总数测定采用平板计数法(高氏一号培养基),真菌总数测定采用平板计数法(查氏培养基),氨化细菌总数测定采用酒石酸钾钠硝酸盐培养基 MPN 法测定,反硝化细菌总数测定采用 MPN 法(酒石酸钾钠硝酸盐培养基)。

1.4 数据分析

采用 excel 2010 和 SAS10.1 软件对数据进行方差分析。

2 结果与分析(Results and analysis)

2.1 水体和底泥砷含量动态变化

外源 ROX 进入水生态系统后水体砷变化动态如表 1 所示。对照处理未检出砷,ROX 处理的水体砷含量随 ROX 用量增加而显著增加。其中,160 mg·L⁻¹ ROX 处理的水体砷含量达到 80.2~116.5

mg·L⁻¹。随培养时间延长,水体砷含量总体呈降低变化。第 32 天,各 ROX 处理的砷浓度较相应 0 d 的降幅为 31.2%~62.4%。水体中砷浓度的降低除挥发损失外,可能与其向其他介质中转移、分配有关。

底泥总砷含量随 ROX 用量增加而显著增加(表 1)。其中,160 mg·L⁻¹ ROX 处理的底泥总砷含量是对照处理的 40.1~110.0 倍。随暴露时间延长,不同用量 ROX 处理的底泥总砷含量呈增加趋势。20~160 mg·L⁻¹ ROX 处理下,试验末期(第 32 天)砷含量较初始含量(第 1 天)增幅为 7.9%~94.0%。对照和 10 mg·L⁻¹ ROX 处理的底泥砷含量变化较小。底泥砷含量变化结果表明,添加的外源 ROX 从水体向底泥进行转移和分配。

2.2 鲫鱼和金鱼藻砷含量动态变化

对照处理鲫鱼体内未检出砷(图 1 A),不同浓度 ROX 处理的水体中鲫鱼体内均出现明显的砷蓄积现象。试验初始(0 d),10~80 mg·L⁻¹ ROX 处理的鲫鱼体内砷含量在 0.37~0.97 mg·kg⁻¹,而 160 mg·L⁻¹ ROX 处理下鲫鱼砷含量高达 11.36 mg·L⁻¹,且此处理的鲫鱼均于试验第 1 天全部死亡。随暴露时间延长,10~80 mg·L⁻¹ ROX 处理的水生态系统中鲫鱼体内砷含量明显增加,并在试验第 21 天,鲫鱼均出现不同程度的毒性反应,部分处理出现死鱼现象。基于各处理间分析比较需要,于 21 d 对所有处理鲫

表 1 水体和底泥总砷含量动态变化
Table 1 Changes of total arsenic content in water and sediment

介质 Medium	ROX 浓度/(mg·L ⁻¹) ROX concentration/ (mg·L ⁻¹)	采样时间/d Sampling time/d					
		0	2	4	8	16	32
水体 Water body	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	10	7.01±0.90 e	6.52±0.22 e	5.14±0.49 e	3.70±0.09 e	2.04±1.26 d	2.64±0.4
	20	13.19±0.96 d	12.46±0.32 d	11.07±0.21 d	9.45±0.22 d	5.18±1.11 d	5.36±0.13
	40	31.02±1.57 c	29.73±2.49 c	23.89±1.53 c	17.98±1.87 c	11.02±1.08 c	12.86±1.19
	80	54.20±1.55 b	52.45±1.97 b	48.57±1.72 b	41.98±2.75 b	33.57±2.54 b	34.59±4.37
	160	116.53±0.95 a	113.78±4.26 a	98.15±3.54 a	92.55±1.48 a	86.17±2.37 a	80.15±3.43
底泥 Sediments	0	1.41±0.52 f	1.38±0.47 f	1.39±1.17 f	1.37±0.32 f	1.25±0.25 f	0.94±0.37 e
	10	10.36±0.49 e	11.02±1.03 e	11.99±1.49 e	12.37±1.57 e	12.31±1.76 e	9.55±1.35 d
	20	22.15±1.96 d	23.25±2.59 d	24.58±2.48 d	26.97±2.26 d	25.31±1.71 d	23.89±2.83 c
	40	29.88±2.57 c	33.22±1.49 c	36.18±3.25 c	45.98±2.51 c	66.64±2.05 c	56.94±2.97 b
	80	39.56±2.09 b	50.82±3.71 b	55.21±2.71 b	62.25±2.98 b	69.78±4.82 b	97.51±4.90 a
	160	56.58±2.14 a	65.89±3.11 a	74.59±2.37a	87.58±4.44 a	97.51±3.9 a	103.38±5.57 a

注:ND 表示未检出。同列数字后不同小写字母代表差异显著性达 5% 水平,下同。
Note: ND represents no detection. Small letters in the same column represent significant difference among treatments ($P<0.05$). The same is as below.

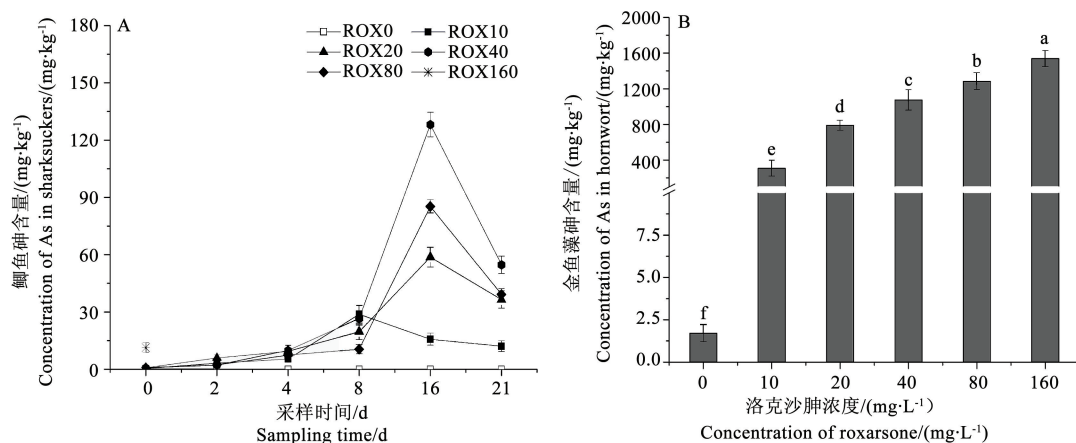


图 1 鲫鱼(A)和金鱼藻(B)总砷含量变化

Fig. 1 Changes of total arsenic content in sharksuckers (A) and hornwort (B)

鱼全部进行收集与分析。试验结果说明,水生生态系统添加的外源 ROX 从水体向鲫鱼体内发生了转移和分配,并最终导致鲫鱼出现砷中毒现象。

基于水生生态系统生态平衡及鲫鱼生长需要,仅于试验末期进行金鱼藻采集与砷累积量的分析,结果如图 1 B 所示。对照处理的金鱼藻累积的砷含量较低,为 $1.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。外加不同浓度 ROX 显著增加金鱼藻砷累积量,且随 ROX 添加量增加而显著升高。其中, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ROX 处理下金鱼藻砷含量为 $398.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ROX 处理的金鱼藻砷含量高达 $1538.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理的 900 倍。整个试验期间,不同浓度的 ROX 处理下,金鱼藻未表现出明显的毒性症状,说明金鱼藻具有较强的砷耐受能力。

2.3 ROX 对底泥微生物的影响

试验期间水生生态系统底泥真菌数量变化如图 2 A。各处理底泥真菌数量随暴露时间延长总体呈下降趋势。第 32 天,各处理底泥真菌数量在 $0.02 \times 10^4 \sim 0.27 \times 10^4$ 间,相比试验初期降幅在 83.7%~99.7% 之间,说明在厌氧环境下,底泥中真菌的生长受到显著抑制。与对照相比,ROX 处理的底泥真菌含量随 ROX 浓度增加而明显降低,说明 ROX 对底泥真菌生长具有抑制作用,且存在浓度和时间效应。

底泥细菌含量动态变化如图 2 B 所示。对照和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ROX 处理的底泥细菌数量在培养的第 2 天出现显著增加,说明短时间内底泥细菌对厌氧环境及低浓度 ROX 具有积极响应。随着暴露时间延长,不同 ROX 处理下底泥细菌数量明显降低,培养末期细菌数量较起始阶段降低 88.6%~97.7%。总

体上,长时间暴露后,ROX 对底泥细菌生长具有较强的抑制作用。

底泥放线菌分析结果(图 2 C)显示,培养期间,低浓度 ROX($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理的底泥放线菌数量为 $44.97 \times 10^4 \sim 988.77 \times 10^4$,明显高于对照处理($8.16 \times 10^4 \sim 202.95 \times 10^4$),说明适宜的 ROX 浓度对放线菌的生长具有一定的促进作用。其他 ROX 处理的底泥放线菌数量在培养第 4 d 均大幅降低,培养第 8 天,放线菌数量又出现明显增加,之后至培养结束总体呈降低变化。这一现象说明,随 ROX 浓度升高,其对底泥放线菌生长的促进效应具有阶段性。

底泥中两种氮转化微生物分析结果如图 2 D 和 E 所示。ROX 处理的底泥反硝化细菌数量(图 2D)随暴露时间延长总体呈降低趋势,培养第 32 天反硝化细菌数量在 $0.28 \times 10^4 \sim 22.1 \times 10^4$ 间,较初始阶段降低 64.2%~98.3%,而不加 ROX 的对照处理在培养末期底泥反硝化细菌数量显著增加 1 168 倍。试验结果说明,反硝化细菌作为一种兼厌氧性微生物,在底泥这种厌氧环境下,其生长被促进,而添加外源 ROX 显著抑制了反硝化细菌的生长。

底泥氨化细菌的分析结果(图 2 E)显示,试验起始,高量 ROX(80 和 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理的底泥氨化细菌数量明显较高,均达到 600×10^4 ,高于其他处理 9 倍之多。其他浓度的 ROX 处理下,底泥氨化细菌数量在培养的第 8 天均出现明显增加,其中 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ROX 处理的底泥氨化细菌达 517.5×10^4 ,之后明显降低。试验结果说明,底泥氨化细菌受 ROX 浓度影响较大,高浓度 ROX 在试验初期可显著促进氨化细菌生长,而 $10 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ROX 对氨化细菌生长的

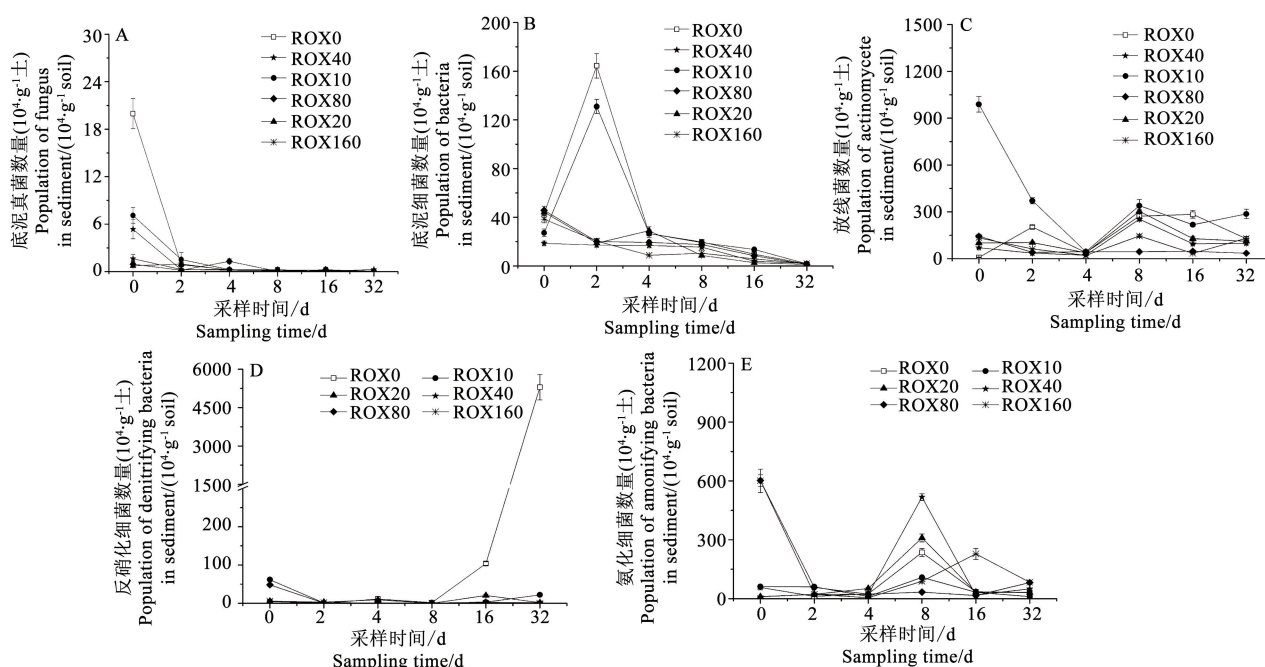


图2 底泥微生物(A, 真菌; B, 细菌; C, 放线菌; D, 反硝化细菌; E, 氨化细菌)数量变化

Fig. 2 Changes of population in fungus (A), bacteria (B) actinomycete (C), denitrifying bacteria (D) and ammonifiers bacteria (E) in the sediment

促进效应出现在第8天。

3 讨论 (Discussion)

3.1 水生态系统中砷的分配特征

研究显示,洛克沙肿作为一种环境污染物对水生态系统具有毒性效应^[12,18]。本文中,外源 ROX 进入水体明显增加水体砷含量,但随时间推移,水体砷浓度虽逐渐降低(表 1),并不能说明水生态系统砷污染及其毒性效应随之降低。针对水体生物及非生物介质砷含量的分析表明,底泥(表 1)、鲫鱼和金鱼藻(图 1)砷含量随 ROX 暴露时间及其浓度增加均呈明显增加趋势,说明水体砷向其他生物及非生物媒介中进行了转移和分配,并表现出明显的剂量-时间效应特征。ROX 的生态毒性可从高浓度 ROX(160 mg·L⁻¹)处理下鲫鱼的快速死亡现象得到验证。ROX 主要通过抑制鲫鱼肝脏、肾及鳃细胞的 Na⁺-K⁺-ATP 酶活性并导致肾 DNA 损伤等对鲫鱼产生毒性效应^[19]。薛培英^[20]研究表明,金鱼藻地上部具有较强的 As 富集能力,在 10 μmol·L⁻¹ As 溶液中暴露 4 d 后,砷富集量 > 1000 mg·kg⁻¹。本文中,金鱼藻在 10~160 mg·L⁻¹ ROX 溶液中暴露 32 d 后,As 累积量达到 398.1~1538.9 mg·kg⁻¹,但并无明显的毒害症状,说明金鱼藻对砷具有一定的耐性,可作为砷污

染水体净化植物。

水体底泥是外源 ROX 的重要蓄积库,ROX 进入底泥后主要以物理吸附为主^[13]。本试验中,水生态系统底泥砷含量随外源 ROX 浓度增加及培养时间延长逐步增加(表 1),说明底泥蓄积了一定量的砷。研究显示,ROX 在底泥土壤中的降解是微生物主导的生物降解过程^[21]。针对农田沟渠底泥中 ROX 及其代谢物的研究表明^[22],在底泥的厌氧环境下,细菌可促进 ROX 主要的无机代谢物之一—As(V)还原为另一种代谢物—As(III),并使 As(V)甲基化形成二甲基砷^[23]。通常,ROX 原形毒性较低,而转化为无机砷的 ROX 代谢产物毒性较强^[24]。本文中,水体底泥的厌氧环境导致其蓄积的 ROX 可能发生一系列的生物、化学转化和降解,生成毒性更强的无机砷,从而对水生生物如鲫鱼等造成毒害效应。

3.2 ROX 对底泥微生物的影响

ROX 作为一种有机砷制剂具有较强的杀菌性,对环境微生物生长、繁殖产生抑制效应^[25]。张帆等^[4]研究显示,洛克沙肿可导致土壤微生物群落结构多样性及其碳代谢能力改变,且暴露浓度越高其作用越强^[4,26]。土壤中 ROX 降解产物 As(V)与细菌 Shannon-Weiner 指数存在一定的负相关关系,而另一降解产物 As(III)与细菌 Shannon-Weiner 指数无明

显的相关性^[27]。本文中,不同 ROX 处理下底泥真菌、细菌和反硝化细菌数量随培养时间延长总体呈降低趋势(图 2),说明 ROX 及其降解产物对底泥微生物生长产生了不同程度的抑制作用。张雨梅等^[14]研究表明,施用 $80 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ROX 对土壤硝化和氨化作用均产生极显著抑制作用。土壤硝化作用的抑制,导致反硝化细菌的作用底物—硝态氮生成量降低,一定程度上影响反硝化细菌的繁殖,与本文研究结果类似。氨化细菌作为参与土壤氨化作用的主要生理菌群,其数量在培养的第 8 天出现明显增加变化(图 2),与目前已有研究结果有所差异。不同 ROX 处理的底泥放线菌数量出现与氨化细菌相似的变化(图 2)。已有研究表明,低浓度砷对土壤大多数微生物的生长具有刺激作用,一些异化的原核生物以还原的砷作为生长代谢的营养物质^[28]。本文中可观察到底泥放线菌在低浓度 ROX($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理下其生长受到促进,而培养第 8 天时放线菌和氨化细菌数量增加(图 2),究竟与哪一种 ROX 的代谢物作用有关,尚有待进一步的研究和探索。

试验结果表明,外源洛克沙肿进入水生生态系统后,从水体向底泥及生物体如鲫鱼和金鱼藻发生了迁移和分配,且表现出时间-剂量依赖效应。鲫鱼暴露在 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ROX 水体中 1 d 全部死亡,在 $10 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ROX 的水体暴露 21 d 也出现不同程度的死亡现象。金鱼藻具有较强的耐砷能力,在 $10 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ROX 水体暴露 32 d,其砷累积量达 $398.1 \sim 1538.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且表观上无明显的毒害症状,可作为砷污染水体净化植物。水生生态系统中底泥对水体中 ROX 的蓄积导致底泥真菌、细菌和反硝化细菌生长受到不同程度抑制,而 ROX 对底泥放线菌和氨化细菌的生长具有一定的促进作用。对 ROX 在水生生态系统毒性作用机理的全面了解,尚需开展进一步的研究和探索。

通讯作者简介:崔理华(1963-),男,教授,博士生导师,从事人工湿地污水生态处理系统研究。

参考文献(References):

- [1] Yao L X, Li G L, Dang Z, et al. Phytoavailability of roxarsone and its metabolites for turnip as affected by soil pH [J]. *Geoderma*, 2009, 154: 48—51
- [2] Morrison J L. Distribution of arsenic from poultry litter in broiler chickens, soil and crops [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1969, 17: 1288—1290
- [3] Moore P A, Daniel J T C, Gilmour J T, et al. Decreasing metal runoff from poultry litter with aluminum sulfate [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27: 92—99
- [4] 张帆, 白玲, 郭瑞子, 等. 洛克沙肿暴露胁迫对土壤微生物群落结构特征的影响 [J]. *生态毒理学报*, 2014, 9(3): 475—482
Zhang F, Bai L, Guo R Z, et al. Effects of roxarsone residue on the microbial community structure in soil [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, 9(3): 475—482 (in Chinese)
- [5] Christen K. The arsenic threat worsens [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(13): 268A—291A
- [6] 孙嘉兴. 洛克沙肿在土壤中的化学行为及其生物响应 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012: 12
Sun J X. Chemical behavior of roxarsone and its biological response in soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012: 12 (in Chinese)
- [7] 曾婧. 我国部分猪场砷污染调查及阿散酸在猪鸡饲后的排泄规律研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2010
Zeng J. Investigation of arsenic pollution in part of pig farms in China and the study of arsanilic acid excretion by pig and chicken after feeding [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [8] Bednar A J, Garbarino J R, Ferrer I, et al. Photodegradation of roxarsone in poultry litter leachates [J]. *The Science of Total Environment*, 2003, 302: 237—245
- [9] Garbarino A J, Bednar J R, Rutherford D W, et al. Environmental fate of roxarsone in poultry litter [J]. *I. Environmental Science and Technology*, 2003, 37: 1509—1514
- [10] Makris K C, Quazi S, Punamiya P, et al. Fate of arsenic in swine waste from concentrated animal feeding operations [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37: 1626—1633
- [11] Zhang Y, Ying J, Chen J, et al. Assessing the genotoxic potentials of roxarsone in V79 cells using the alkaline comet assay and micronucleus test [J]. *Mutation Research*, 2012, 741: 65—69
- [12] 王志强, 李浩, 张斌. 洛克沙肿对鲫鱼两种生态毒理学指标的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(7): 1374—1378
Wang Z Q, Li H, Zhang B. Effects of Roxarsone on $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{ATPase}$ Activity and DNA Damage in *Carassius auratus* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1374—1378 (in Chinese)
- [13] 张雨梅, 陈冬梅, 陈军, 等. 洛克沙肿在土壤中的吸附特性 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(6): 2075—2079
Zhang Y M, Chen D M, Chen J, et al. The sorption characteristics of roxarsone in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6): 2075—2079 (in Chinese)

- [14] 张雨梅, 朱爱华, 陈冬梅, 等. 洛克沙肿残留对土壤微生物活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2007, (6): 312—315
Zhang Y M, Zhu A H, Chen D M, et al. Effects of roxarsone residue on microorganism activities of soil [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2007, (6): 312—315 (in Chinese)
- [15] 陈冬梅. 洛克沙肿残留对土壤的生态毒性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2007
Chen D M. Study of eco-toxicity of roxarsone residue in soil [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2007 (in Chinese)
- [16] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001
- [17] 马放. 污染控制微生物学实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002
- [18] 王付民, 张璐, 陈杖榴, 等. 有机砷添加剂对蛋白核小球藻及大型蚤的急性毒性研究[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(2): 103—106
Wang F M, Zhang L, Chen Z L, et al. Studies on acute toxicity of organoarsenics to *Chlorella pyrenoidosa* and *Deaphnia magna* [J]. Journal of South China Agricultural University, 2007, 28(2): 103—106 (in Chinese)
- [19] 李浩. 洛克沙肿对鲫鱼生态毒理学指标的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2008
Li H. Effect of roxarsone on eco-toxicology target of sharksucker [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008 (in Chinese)
- [20] 薛培英. 沉水植物对铜、砷的吸收和运输机制的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011
Xue P Y. Study of copper and arsenic absorption and transportation mechanisms in submerged plant [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011 (in Chinese)
- [21] 马一冬. 洛克沙肿在土壤中降解的初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2009
Ma Y D. Preliminary investigation of roxarsone degradation in soil [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009 (in Chinese)
- [22] 李银生, 曾振灵, 陈杖榴, 等. 洛克沙肿的作用、毒性及环境行为[J]. 上海畜牧兽医通讯, 2003, 1: 10—12
Li Y S, Zeng Z L, Chen Z L, et al. The function, toxicity and environmental behaviour of roxarsone [J]. Shanghai Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2003, 1: 10—12 (in Chinese)
- [23] Gao S, Bureau R G. Environmental factors affecting rates of arsine evolution from and mineralization of arsenicals in soil [J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26: 753—763
- [24] Liang T, Ke Z, Chen Q, et al. Degradation of roxarsone in a silt loam soil and its toxicity assessment [J]. Chemosphere, 2014, 112: 128—133
- [25] Jiang Z, Li P, Wang Y H, et al. Effects of roxarsone on the functional diversity of soil microbial community [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013(1): 32—35
- [26] 张草, 白玲, 郭瑞子, 等. 洛克沙肿暴露对土壤微生物碳代谢功能多样性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(5): 8—13
Zhang C, Bai L, Guo R Z, et al. Effect of roxarsone exposure on effects of roxarsone exposure to carbon-source metabolic capacity and functional diversity of soil microbial communities [J]. Journal of South China Agricultural University, 2014, 35(5): 8—13 (in Chinese)
- [27] 李夏, 霍志明, 黄连喜, 等. 土壤细菌群落多样性对鸡粪中洛克沙肿代谢物的响应[J]. 广东农业科学, 2014, (15): 56—60
Li X, Huo Z M, Huang L X, et al. Response of soil bacteria community diversity to the excretions of roxarsone in chicken manure [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, (15): 56—60 (in Chinese)
- [28] 蒋成爱, 吴启堂, 陈杖榴. 土壤中砷污染研究进展[J]. 土壤, 2004, 36 (3): 264—270
Jiang C A, Wu Q T, Chen Z L. Research progress on arsenic pollution in soil [J]. Soils, 2004, 36(3): 264—270 (in Chinese)

