

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20190904001

丁婷婷, 杜士林, 王宏亮, 等. 沙颍河流域硝基苯水质基准推导及生态风险评估[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(4): 256-267

Ding T T, Du S L, Wang H L, et al. Derivation of water quality criteria for nitrobenzene in Shaying River Basin and ecological risk assessment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(4): 256-267 (in Chinese)

沙颍河流域硝基苯水质基准推导及生态风险评估

丁婷婷¹, 杜士林^{1,2}, 王宏亮¹, 张亚辉^{1,*}, 王一喆¹, 何连生¹

1. 中国环境科学研究院, 环境分析测试技术中心, 北京 100012

2. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004

收稿日期: 2019-09-04

录用日期: 2019-11-01

摘要: 沙颍河流域是淮河流域上游污染问题突出、污染贡献大的流域之一。针对沙颍河流域缺乏对硝基苯水生生物水质基准深入研究的问题, 选择了硝基苯开展沙颍河流域本土生物毒性试验, 推导了沙颍河流域硝基苯的水质基准, 并对沙颍河流域硝基苯实际暴露浓度进行了生态风险评估。结果表明, 硝基苯对秀丽白虾、霍甫水丝蚓、黄颡鱼和河蚬 96 h 半数致死浓度(96 h-LC₅₀)分别为 45.436、178.299、17.397 和 119.069 mg·L⁻¹; 秀丽白虾和黄颡鱼 28 d 无可观测效应浓度(NOEC)分别为 2.858 mg·L⁻¹ 和 3.429 mg·L⁻¹; 28 d 最低可见效应浓度(LOEC)分别为 5.144 mg·L⁻¹ 和 6.173 mg·L⁻¹; 黄颡鱼 28 d 的 20% 效应浓度(EC₂₀)为 4.538 mg·L⁻¹。采用物种敏感度排序法(SSR)获得沙颍河流域硝基苯急性基准值(CMC)和慢性基准值(CCC)分别为 0.007 mg·L⁻¹ 和 0.002 mg·L⁻¹。使用层级风险评估方法(商值法、安全阈值法和联合概率曲线法)对沙颍河流域地表水的硝基苯进行了风险评估, 3 种方法风险评估结果一致, 沙颍河水体中硝基苯对沙颍河水生生物基本没有风险。研究结果为构建沙颍河硝基苯的水质基准以及管理提供参考。

关键词: 硝基苯; 沙颍河流域; 水质基准; 生态风险评估

文章编号: 1673-5897(2020)4-256-12 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Derivation of Water Quality Criteria for Nitrobenzene in Shaying River Basin and Ecological Risk Assessment

Ding Tingting¹, Du Shilin^{1,2}, Wang Hongliang¹, Zhang Yahui^{1,*}, Wang Yizhe¹, He Liansheng¹

1. Environmental Analysis and Testing Laboratory, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Received 4 September 2019

accepted 1 November 2019

Abstract: The Shaying River Basin is one of the basins with prominent pollution problems and significant pollution contribution in the upper reaches of the Huaihe River Basin. In view of the lack of deep research on the water quality criterion of nitrobenzene on aquatic organisms in Shaying River Basin, nitrobenzene was selected as the research objects to implement local biological toxicity test, and the water quality criterion (WQC) for Shaying River Basin was derived in this study. In addition, environmental risk assessment (ERA) was conducted in Shaying River Basin based on the derived WQC of nitrobenzene. The results showed that the 96 h-LC₅₀ of nitrobenzene on *Exo-*

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07602-003)

第一作者: 丁婷婷(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态毒理学, E-mail: 1373639545@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: zhangyahui@craes.org.cn

palaemon modestus, *Pelteobagrus fulvidraco*, *Limnodrilus hoffmeisteri*, and *Corbicula fluminea* were 45.436, 178.299, 17.397 and 119.069 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The 28 d-NOEC (no observed effect concentration) and 28 d-LOEC (lowest observed effect concentration) of nitrobenzene on *Exopalaemon modestus* and *Pelteobagrus fulvidraco* were 2.858 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 3.429 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 5.144 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 6.173 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. And 28 d-EC₂₀ (20% effect concentration) of nitrobenzene on *Pelteobagrus fulvidraco* was 4.538 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The criterion maximum concentration (CMC) of 0.007 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and criterion continuous concentration (CCC) of 0.002 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ were derived using the species sensitivity ranking (SSR) method. Meanwhile, tiered ERA (hazardous quotient method, safety threshold method, and joint probability curve method) showed that three levels of ERA methods in the tiered framework were consistent with each other, and the nitrobenzene in the Shaying River has almost no risk to aquatic organisms. The results provide reference for establishing the WQC for nitrobenzene and accurately assessing the nitrobenzene risk in Shaying River Basin.

Keywords: nitrobenzene; Shaying River Basin; water quality criterion; risk assessment

沙颍河是淮河流域最大的一条支流,西起河南省伏牛山,跨豫、皖两省,流经郑州、平顶山、漯河、周口和阜阳市,东至安徽省颍上县沫河口入淮河。全长约 620 km,流域面积 39 880 km^2 ,接近淮河流域总面积的 1/7。沙颍河子流域是淮河流域上游污染问题突出、污染贡献大的流域之一,同时也是一个多闸坝、高污染和人口密集的典型流域^[1]。硝基苯具有强烈的致癌性、致突变性和化学稳定性,且难以被微生物降解,已经成为国际公认的重点环境污染物之一^[2]。2001 年硝基苯被欧盟“巴塞尔公约”列入环境优先控制有毒有机污染物名单。硝基苯是化学工业大量使用的化工原料和反应中间体,并广泛用于染料和农药的生产^[3],因此有很多途径进入到环境当中。在中国各大水体中均有硝基苯的检出,如长江^[4-5]、黄河^[6]、松花江和辽河^[7]。高继军^[8]对我国地表水 10 个流域水系(包括淮河流域)的有机物污染进行研究,报道了硝基苯在我国地表水中的检出率为 83.2%,污染具有普遍性。沙颍河流域重污染行业中化工、制药和印染等占有很大比例,硝基苯作为主要污染物之一不容忽视。然而目前针对沙颍河流域中硝基苯含量的报道几乎没有,因此,在沙颍河流域开展硝基苯的研究具有重要意义。

水质基准(WQC)具体是指环境中污染物对水生生物不产生不良或有害影响的最大剂量或浓度,在水环境治理中起到至关重要的作用,然而我国的水质基准还有待进一步发展,加强完善水质基准体系,尤其加强流域的水质基准具有重大意义。目前中国用于保护地表水的硝基苯标准($0.017 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)是从美国现行的硝基苯人体健康标准中复制而来的^[9]。然而,美国和中国之间有许多物理、化学和生物因素的差异,

这可能会影响某种物质在水生生物中的毒性^[10-11],因此,中国现有的硝基苯标准可能对中国的水生生态系统过保护或者欠保护。目前我国对于硝基苯的水质基准已有不少研究^[12-14],但针对流域的硝基苯水质基准研究几乎没有。对于太湖、辽河等流域的污染物水质基准也有不少研究^[15-17],但都没有应用到环境暴露浓度的风险评估中,所以开展沙颍河流域硝基苯水质基准研究并开展实际暴露浓度的风险评估对于保护沙颍河流域水生生物以及流域管理具有重要意义。

本研究针对典型污染物硝基苯,开展沙颍河流域本土生物的水生生物毒性试验,推导沙颍河流域硝基苯的水环境基准值,并对沙颍河流域地表水中硝基苯的实际暴露浓度进行风险评估,为更好地治理沙颍河流域中硝基苯污染物提供依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 效应评估

1.1.1 数据来源

(1)沙颍河流域本土水生生物的搜集主要来自“十二五”重大水专项调研资料、淮河流域水生生物名录、图书《沙颍河常见水生生物图集》^[18]以及沙颍河流域水生生物相关文献^[19-22],这为后期毒性数据的筛选提供依据。

(2)搜集迄今已发表的硝基苯的急、慢性毒性数据,数据主要来自 US EPA 的 ECOTOX 数据库、中国知网等文献数据库。数据收集后,按照生态毒理数据筛查文献^[23]对数据进行筛选,剔除不合格的数据以及不属于沙颍河流域水生生物的数据。

1.1.2 室内毒性试验

1.1.2.1 实验药品

硝基苯(CAS:98-95-3, AR 99%, 上海麦克林有

限公司),由于硝基苯较难溶于水,试验前用二甲基亚砜(CAS:67-68-5,AR 99.99%,上海麦克林有限公司)助溶于超纯水中,配制成高浓度母液,再根据需要稀释成相应浓度,各实验中最高浓度组中助溶剂含量不超过 10‰。

1.1.2.2 受试生物与驯养条件

所选择的 4 种受试生物均为沙颍河流域本土物种,包括秀丽白虾(*Exopalaemon modestus*)、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)以及河蚬(*Corbicula fluminea*)。其中,秀丽白虾、霍甫水丝蚓均购自朝来春花鸟鱼虫市场,黄颡鱼购自广东省水产养殖场,河蚬购自河南省海鲜市场。驯养及试验用水均为曝气 48 h 的自来水,水质参数为:pH 8.08±0.18,温度(23±1)℃,溶解氧大于 6 mg·L⁻¹,总有机碳(0.43±0.13) mg·L⁻¹,电导率(353±1) μS·cm⁻¹,硬度 150 mg·L⁻¹(以 CaCO₃ 计)左右。所有生物在实验前驯养至少 7 d,死亡率在 5% 以内。

1.1.2.3 毒性试验

毒性试验按照《化学品测试方法:生物效应卷》^[24]执行,根据预实验确定正式试验浓度范围,正式试验设置 1 个空白对照组,1 个溶剂对照组,至少 5 个浓度组,每组 3 个平行。急慢性实验均采用半静态试验方法,每隔 2 天换一次溶液。其中,急性试验周期为 4 d,期间不喂食;慢性试验周期为 28 d,试验期间按照 0.1% 生物质量喂食霍甫水丝蚓,一天一次。试验期间测定溶液的温度、pH 以及溶解氧等水

质指标。对更换前后溶液中的硝基苯浓度进行监控,结果表明,硝基苯的浓度变化在 20% 以内,符合技术导则规定。硝基苯对沙颍河本土水生生物的急性、慢性毒性试验各项参数见表 1。

急性毒性试验数据使用 SPSS 18.0 软件中概率单位回归法计算半致死浓度 LC₅₀,慢性毒性试验数据通过 SPSS 18.0 软件中单因素方差分析(One-Way ANOVA)确定最低可见效应浓度(LOEC)(*P*<0.05)和无观测效应浓度(NOEC)^[25]以及最大可接受毒性浓度(MATC, LOEC 与 NOEC 的几何平均值),将 MATC 作为最终慢性结果。鱼类慢性试验以成长为毒性终点,数据参照《水生生物监测手册》^[26],使用概率单位法计算 20% 效应浓度(EC₂₀)。

1.1.2.4 水质基准值的推导

重新计算法为 US EPA 推荐方法^[27],是利用实验室的配制水和本地物种进行毒性试验,然后推算出保护本地物种的基准,主要关注物种差异,适用于制订流域基准。确定沙颍河流域水生生物的种类及毒性数据,采用物种敏感度排序法(Species Sensitivity Rank, SSR)计算硝基苯的急性基准值^[28]。将搜集筛选的硝基苯数据与本研究补充的毒性数据结合起来,计算每个物种的物种平均急性值(SMAV)和每个属的属平均急性值(GMAV),将 GMAV 从小到大进行排序,并且将其分配等级 *r*,最小的属平均急性值的等级为 1,最大的属平均急性值的等级为 *N*(*N*为属的个数),对每个属平均急性值的累积概率(*P*),按公式 *P*=*r*/(*N*+1)进行计算,选择累积概率最小的 4 个

表 1 4 种沙颍河本土淡水水生生物毒性试验浓度
Table 1 The exposure concentration for 4 native aquatic organisms in the Shaying River

物种 Species	拉丁名 Latin name	体长/cm Body length/cm	平均体重/g Average weight/g	急性浓度 /(mg·L ⁻¹)	慢性浓度 /(mg·L ⁻¹)
				Acute concentration /(mg·L ⁻¹)	Chronic concentration /(mg·L ⁻¹)
秀丽白虾	<i>Exopalaemon modestus</i>	1.50±0.12	0.12	0, 30, 39, 50.7, 91, 85.683	1.588, 2.858, 5.144, 9.259, 16.667, 30.000
黄颡鱼	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	2.50±0.15	0.10	0, 10, 15, 22.5, 33.75, 50.625, 75.93	1.058, 1.905, 3.429, 6.173, 11.111, 20.000
霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	3.20±0.04	—	0, 100, 140, 180, 220, 260, 300	—
河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>	1.5±0.2 (壳长 Shell length); 1.0±0.2 (壳高 Shell height)	—	0, 80, 100, 120, 140, 160	—

注:—表示未测量或试验未设置。
Note: —means unmeasured or no experiments set up.

Fig. 1 Distribution of water sampling sites in the Shaying River Basin

硝基苯和替代物硝基苯-D5 均采用线性校准曲线进行校准,其中硝基苯的线性校准曲线相关系数 $r^2=0.9982$,硝基苯-D5 的线性校准曲线相关系数 $r^2=0.9966$ 。测定过程中,设置空白和平行,空白未检测出硝基苯,平行偏差 $<5\%$ 。替代物加标回收率为 $90.1\% \sim 103.2\%$,空白加标回收率为 $73.2\% \sim 91.3\%$ 。

1.3 生态风险评估方法

采用层级风险评估方法(商值法、安全阈值法和联合概率曲线法)^[30-31]对沙颍河流域丰水期、枯水期和平水期地表水的硝基苯进行生态风险评估。

1.3.1 商值法

商值法(Hazardous Quotient, HQ)是污染物对生物的毒性浓度和污染物在环境中的暴露数据进行整合分析的过程。本文 HQ 值是将污染物的环境暴露浓度(EC)除以该物质慢性基准值(CCC),其结果按照一定的等级分类,来表征风险大小^[31]。其中, $HQ < 0.1$, 无生态风险; $0.1 \leq HQ < 1.0$, 生态风险较低; $1.0 \leq HQ < 10$, 中等生态风险; $HQ > 10$, 生态风险较高。因为使用 HQ 法进行风险评估时,未考虑水体中其他因素对水生生物安全的影响。所以 HQ 法只能用于生态风险初步评估。

1.3.2 安全阈值法

安全阈值法(Margin of Safety, MOS_{10})是通过使用生物毒性数据累积概率分布 10% 处的临界值(SSD_{10})与污染物环境暴露浓度累积概率分布 90% 处的临界值(ECD_{90})的比值,来分析目标污染物的生态风险程度。总体来说,安全阈值法同时使用了污染物毒性效应分布曲线与污染物环境暴露浓度曲线,是在商值法基础上的延伸。一般 MOS_{10} 取值为 1 界定风险程度; $MOS_{10} < 1$ 表明毒性数据和暴露浓度的分布具有高重合度并且可能导致对水生生物的高风险; $MOS_{10} > 1$ 表明对水生生物几乎没有环境风险^[31]。

1.3.3 联合概率曲线法

联合概率曲线法(Joint Probability Curve, JPC)是基于安全阈值法开发的联合概率曲线, JPC 通过 Matlab 拟合获得关系曲线,曲线越靠近 X 轴,说明目标污染物对水生生物的生态风险越小^[30]。与前 2 种方法相比,它能更好地描述环境风险。

2 结果与讨论 (Results and discussions)

2.1 沙颍河本土生物毒性试验结果

在急性、慢性毒性试验过程中,空白对照组和助溶剂对照组的水生生物均未出现死亡。急性实验结

果如表 2 所示,硝基苯对 4 种沙颍河本土生物的毒性大小为:黄颡鱼($LC_{50}=17.397 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)>秀丽白虾($LC_{50}=45.436 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)>河蚬($LC_{50}=119.069 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)>霍甫水丝蚓($LC_{50}=178.299 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),黄颡鱼为最敏感生物,霍甫水丝蚓为最不敏感生物。有研究报道,硝基苯对于黄颡鱼的 96 h- LC_{50} 为 $81.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[6],高于本研究,可能因为所选的黄颡鱼规格大小不同,导致其对污染物敏感性不同。杨扬等^[32]的研究结果中,硝基苯对霍甫水丝蚓 96 h- LC_{50} 为 $285.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,表现为低等毒性,与本文中霍甫水丝蚓为不敏感生物结果一致。

由表 3 可知,硝基苯对黄颡鱼的慢性试验中,秀丽白虾和黄颡鱼 28 d-NOEC 分别为 $2.858 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.429 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 28 d-LOEC 分别为 $5.144 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.173 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;黄颡鱼以生长为毒性终点的 28 d- EC_{20} 为 $4.538 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。黄颡鱼以生长为毒性终点与以死亡为毒性终点的敏感度相当。硝基苯慢性毒性研究表明,硝基苯能抑制生物发育^[33],导致生物体重减轻。Zheng 等^[30]基于 6 个不同的毒性终点研究了莠去津对水生生物的毒性效应,发现繁殖是最敏感的毒性终点,其次分别为基因、行为、生化和生长,致死为最不敏感的毒性终点。这与本文结果不同,可能因为莠去津具有强烈内分泌干扰物效应,直接影响生物的繁殖,而硝基苯主要抑制生物发育,不同污染物对水生生物的毒性机理不同。

2.2 沙颍河流域硝基苯水生生物基准阈值推导

搜集筛选了硝基苯对沙颍河流域本土水生动物急性毒性数据共 19 个,慢性毒性数据共 7 个,对淡水植物的毒性数据 7 个。将搜集筛选的硝基苯数据与本研究的试验数据结合起来进行排序,结果见表 4。

整理数据得出,沙颍河流域生物硝基苯急性毒性数据共 11 个属,由表 4 得到 GMAV 最小的 4 个生物依次为日本沼虾($0.039 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、青鳉($1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、鲤鱼($1.907 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和黄颡鱼($17.397 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。采用 SSR 法计算得到 FAV,结果如表 5 所示。

计算得到 FAV 为 $0.014 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CMC 为 $0.007 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。黄颡鱼、大型蚤和秀丽白虾的急慢性比 (ACR) 分别为 3.836、5.132 和 11.851,通过这 3 种水生生物 ACR 的几何平均值算出 FACR 为 6.156。FCV 为 FAV/FACR, CCC 为 FCV 和植物毒性终值两者中的最小值(FPV, $3.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),得出 CCC 为 $0.002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。此外,采用物种敏感度分布法(SSD 曲线用

Log-logistic 函数进行拟合)得出硝基苯的急性、慢性基准值分别为 $0.208\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.034\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。SSD 法求得的沙颍河流域硝基苯基准值高于 SSR 法, 主要因为 SSD 法更多地依赖整体毒性数据对基准的影响, 不能考虑到敏感生物的毒性数据。所以 SSD 法与 SSR 法推导的硝基苯基准值有一定差异, 甚至不是一个数量级, 本文采用 SSR 法的计算结果。

Yan 等^[34]用 SSR 法推导出国家层面的硝基苯

急性基准值($0.018\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高出沙颍河流域的基准值 2 倍多。闫振广等^[35]在研究中报道了四大流域的镉急性基准值, 其全部小于国家镉的基准值, 这与本文结果相似。首先, 水生生物的区域分布具有很强的地域性, 这不仅体现在国内外物种差异中, 在中国不同流域水环境中分布的水生生物也会存在较大差异, 因而不同流域的基准值也会不同^[36-37]。由于物种分布差异对流域的基准推导有直接影响, 因此受

表 2 硝基苯对 4 种本土水生生物的急性毒性试验结果

Table 2 Acute toxicity test results of nitrobenzene on 4 native aquatic organisms

物种 Species	暴露时间/h Exposure time/h	回归方程 Regression equation	χ^2	P	$LC_{50}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	95% 置信区间 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
						95% Confidence interval $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	48	$y=13.843x-23.402$	1.867	0.600	49.044	45.072 ~ 53.669
	72	$y=9.906x-16.577$	3.836	0.280	47.148	42.718 ~ 52.282
	96	$y=8.316x-13.783$	5.068	0.167	45.436	40.658 ~ 50.794
	24	$y=7.099x-16.663$	2.624	0.623	222.494	206.762 ~ 240.552
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	48	$y=7.366x-16.959$	3.367	0.498	200.565	186.268 ~ 215.486
	72	$y=7.088x-16.128$	6.397	0.172	188.529	174.439 ~ 202.896
	96	$y=7.467x-16.810$	4.795	0.309	178.299	164.951 ~ 191.461
	24	$y=4.200x-6.512$	1.203	0.878	35.514	27.837 ~ 107.656
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	48	$y=7.620x-10.059$	6.806	0.146	20.899	17.894 ~ 25.801
	72	$y=7.318x-9.330$	9.181	0.057	18.828	14.898 ~ 23.673
	96	$y=6.977x-8.654$	5.371	0.251	17.397	15.822 ~ 18.896
	24	$y=16.818x-35.827$	6.933	0.074	134.982	109.855 ~ 180.380
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	48	$y=15.135x-31.996$	5.123	0.163	130.052	123.390 ~ 137.319
	72	$y=13.922x-29.162$	3.287	0.350	124.357	117.508 ~ 131.457
	96	$y=16.242x-33.714$	0.921	0.820	119.069	112.796 ~ 125.211

注: 利用 SPSS 18.0 软件中概率单位回归法计算半致死浓度(LC_{50}), Pearson 模型拟合优度检验的显著水平为 $P>0.05$, 表明模型拟合良好。
Note: The semi-lethal concentration (LC_{50}) was calculated by probability unit regression by using SPSS 18.0; the significant level of Pearson model goodness of fit test was $P>0.05$, indicating that the model fits well.

表 3 硝基苯对 2 种本土水生生物的慢性毒性试验结果

Table 3 Chronic toxicity test results of nitrobenzene on 2 native aquatic organisms

物种 Species	毒性终点 Endpoints	无观测效应浓度 (NOEC)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最低可见效应浓度 (LOEC)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	20% 效应浓度 (EC_{20})/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最大可接受毒性浓度 (MATC)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
		No observed effect concentration (NOEC)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Lowest observed effect concentration (LOEC)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	20% effect concentration (EC_{20})/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Maximum acceptable toxicant concentration (MATC)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	死亡 Mortality	2.858	5.144	—	3.834
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	死亡 Mortality	3.429	6.173	—	4.601
	生长 Growth	—	—	4.538	—

注: —表示未测量。
Note: —means unmeasured.

表 4 本土水生生物分布与硝基苯急性毒性数据
Table 4 The distribution of native aquatic organisms and acute toxicity data of nitrobenzene

急/慢性毒性比 (ACR) Acute-to-chronic toxicity ratio (ACR)	属平均慢性值 (GMCV)/(mg·L ⁻¹) Genus mean chronic value (GMCV) /(mg·L ⁻¹)	属平均急性值 (GMAV)/(mg·L ⁻¹) Genus mean acute value (GMAV) /(mg·L ⁻¹)	种平均急性值 (SMAV)/(mg·L ⁻¹) Species mean acute value (SMAV) /(mg·L ⁻¹)	物种 Species	拉丁名 Latin name	排序 Rank
3.836 5.132 11.851	4.535 5.902 3.834	0.039	0.039	日本沼虾	<i>Macrobrachium nipponense</i>	1
		1.8	1.8	青鳉	<i>Oryzias latipes</i>	2
		1.907	1.907	鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	3
		17.397	17.397	黄颡鱼	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	4
		34.722	30.292	大型蚤	<i>Daphnia magna</i>	5
			39.8	隆线蚤	<i>Daphnia carinala</i>	
		45.436	45.436	秀丽白虾	<i>Exopalaemon modestus</i>	6
		64.5	64.5	静水椎实螺	<i>Lymnaea stagnalis</i>	7
		103	103	中华圆田螺	<i>Cipangopaludina cahayensis</i>	8
		119.069	119.069	河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>	9
		119.1	119.1	鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>	10
		143.89	143.89	霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	11

表 5 沙颍河流域硝基苯基准值的计算结果
Table 5 The results of water quality criteria of nitrobenzene in Shaying River Basin

Rank	GMAV/(mg·L ⁻¹)	ln(GMAV)/(mg·L ⁻¹)	[ln(GMAV)] ² /(mg·L ⁻¹)	Cumulative probability (P)	Sqrt (P)
1	0.039	-3.244	10.525	0.083	0.289
2	1.800	0.588	0.345	0.167	0.408
3	1.907	0.646	0.417	0.250	0.500
4	17.397	2.856	8.158	0.333	0.577
Sum	-	0.845	19.445	0.833	1.774
S ² =415.935, S=20.394, L=-8.835, A=-4.275, FAV=0.014 mg·L ⁻¹					

注:-表示未计算;S、L 和 A 为计算中采用的符号,没有特殊含义;FAV 表示最终急性值。
Note: -means unmeasured; S, L and A represent the symbols used in calculations which have no special meaning; FAV represents final acute value.

试生物的筛选是水质基准推导的重点之一。本文筛选的水生生物均为沙颍河流域内的本土水生生物,补充沙颍河流域本土生物毒性数据时所选取的生物均为沙颍河流域的优势物种。在沙颍河流域中,鲫鱼(*Carassius auratus*)为重要经济鱼种,黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)和长吻鮠(*Leiocassis longirostris*)均为重点保护物种,乌鳢(*Channa argus*)、萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)和大型蚤(*Daphnia magna*)均为国际通用物种,霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、河蚬(*Corbicula fluminea*)和秀丽白虾(*Exopalaemon modestus*)均为沙颍河流域的优势物种^[8],可作为基准研究的受试生物。因此,在推导沙颍河流域水质基准

时,可考虑采用上述物种进行毒性试验。其次,有文献报道氨氮、镉等水质基准受到温度、pH 和硬度等水质参数的影响^[36,38],但目前还未有文献报道水质因子对硝基苯基准的影响。此外,推导水质基准的方法不同也会影响基准数值的大小^[39],而污染物的毒性终点也是基准研究中需要考虑的因素^[10,30]。
与中国地表水环境质量标准值(0.017 mg·L⁻¹)^[40]对比,现行的硝基苯标准对沙颍河流域水生生态系统不管是短期还是长期都欠保护。“欠保护”就不能对水生生物起到保护作用,直接危害到水生态系统的安全,因此,我国《地表水环境质量标准》中硝基苯的标准阈值应当考虑到特定流域的特征,如水生生物种类差异,以使得基于流域水环境推

导得出的基准值可以为大多数生物提供适当保护。

2.3 沙颍河流域硝基苯的生态风险评估

2.3.1 商值法生态风险评估

对沙颍河流域 40 个点位进行硝基苯浓度检测,总体含量较低,但检出率较高,平水期、丰水期和枯水期的检出率分别为 80%、100% 和 97.5%。硝基苯各时期含量统计结果如表 6 所示,沙颍河流域地表水中各时期硝基苯平均浓度顺序为枯水期>平水期>丰水期,主要原因是夏季雨水多,流域内径流量大,导致河流中硝基苯的浓度降低;反之,冬季雨水少,流域内径流量小,导致河流中硝基苯的浓度增高。计算了不同采样点间硝基苯浓度的变异系数以分析其浓度的沿程变化情况。结果显示,平水期和丰水期硝基苯浓度含量变异系数均超过 100%,说明各采样点硝基苯含量存在较大差异。

采用商值法对沙颍河流域硝基苯进行生态风险评估,以沙颍河硝基苯的实际暴露浓度除以沙颍河流域硝基苯的慢性基准值(0.002 mg·L⁻¹)。沙颍河流域地表水平水期、枯水期和丰水期硝基苯的 HQ 值空间分布如图 2 所示。在 3 个时期中,沙颍河流

域硝基苯处于较低风险甚至无风险水平,表明沙颍河流域硝基苯对水生生物基本没有风险。

2.3.2 安全阈值法生态风险评估

采用 Log-logistic 函数进行曲线拟合,函数方程为 $y=1/\{1+\exp[(A-x)/b^2]\}$,用软件 Origin8.0 绘制的硝基苯环境暴露浓度累积分布曲线和急性毒性数据分布曲线见图 3,拟合曲线的具体参数见表 7,拟合效果较好,可以使用安全阈值法进行生态风险评估。

运用安全阈值法评估沙颍河流域水体中硝基苯的生态风险,根据图 3 可以得到,硝基苯丰水期、枯水期和平水期环境暴露浓度累积分布曲线上 90% 处的浓度(EXD₉₀)分别为 59.024、259.507 和 69.407 ng·L⁻¹,硝基苯物种敏感度分布曲线上 10% 处的浓度(SSD₁₀)为 6.474 mg·L⁻¹,计算出丰水期、枯水期和平水期安全阈值(MOS₁₀)分别为 10.97×10⁴、2.49×10⁴ 和 9.34×10⁴,结果都远远大于 1。由于慢性毒性数据不足,这里使用急性毒性数据进行 SSD 曲线拟合,后续慢性毒性数据有待补充。但从图 3 中可以明显看出,沙颍河流域丰水期、枯水期和平水期的硝基苯暴露浓度均低于硝基苯的慢性基准值,从而可

表 6 沙颍河流域地表水硝基苯含量统计
Table 6 Statistics of nitrobenzene content in surface water of Shaying River Basin

水文期 Hydrographic period	硝基苯含量/(ng·L ⁻¹) Nitrobenzene content/(ng·L ⁻¹)				变异系数 Coefficient of variation	检出率/% The detection rate/%
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	标准差 Standard deviation		
丰水期 High-flow period	327.09	0.29	35.55	55.46	1.56	100
枯水期 Low-flow period	387.63	ND	164.03	79.20	0.48	97.5
平水期 Mean-flow period	223.95	ND	52.76	56.28	1.07	80

注:ND 表示未检出。
Note: ND means not detected.

表 7 硝基苯曲线拟合参数
Table 7 The curve fitting parameters of nitrobenzene

分布曲线 Distribution curves	A, B	r ²	均方根 RMSE	残差平方和 SSE	K-S 检验(P)
毒性数据分布曲线 Toxicity data distribution	1.6372, 0.3755	0.8891	0.119	0.184	0.576
丰水期暴露浓度累积分布曲线 Exposure distribution in high-flow period	1.3039, 0.2126	0.9832	0.066	0.172	0.261
枯水期暴露浓度累积分布曲线 Exposure distribution in low-flow period	2.1674, 0.1123	0.9894	0.047	0.084	0.893
平水期暴露浓度累积分布曲线 Exposure distribution in mean-flow period	1.5929, 0.1131	0.9526	0.125	0.503	0.070

注:A 和 B 表示曲线参数,r 表示相关系数。
Note: A and B stand for the curve parameter; r stands for correlation coefficient; RMSE stands for root mean square error; SSE stands for sum-square error.

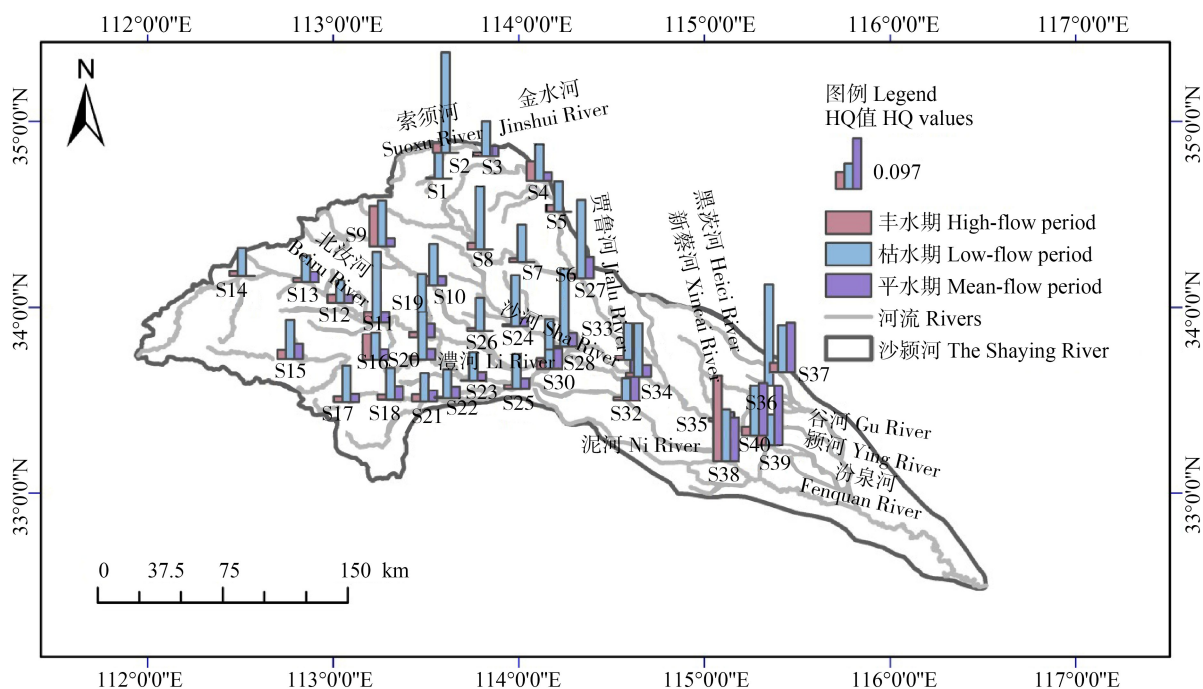


图2 沙颍河流域水体硝基苯危害商值(HQ)的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of hazardous quotient (HQ) values of nitrobenzene in the Shaying River Basin

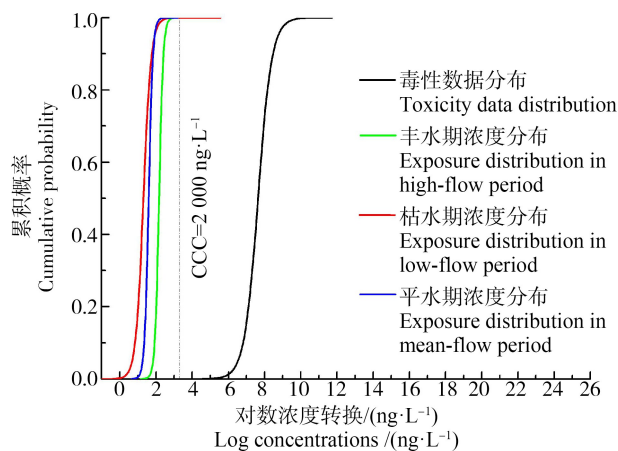


图3 沙颍河流域硝基苯暴露浓度数据和生物急性毒性数据分布

Fig. 3 Distribution of exposure concentration in Shaying River Basin and acute toxicity data of nitrobenzene

以推断沙颍河流域中硝基苯对沙颍河水生生物基本无潜在的生态风险,这与商值法的结果一致。

2.3.3 联合概率曲线法

联合概率曲线法显示线下面积为零,表明沙颍河流域硝基苯无生态风险,这与商值法和安全阈值法评估的结果一样。

生态风险评价的目的是定性和定量评估污染物对水生生物的生态风险。目前已经开发了不同的评

估方法来评估污染物的环境风险。在这些方法中,商值法(HQ)是最常用的,因为它比较简单,然而,HQ法进行风险评估时,未考虑水体中其他因素对水生生物安全的影响,所以HQ法只能用于生态风险初步评估;安全阈值法(MOS₁₀)同时使用了污染物毒性效应分布曲线与污染物环境暴露浓度曲线,是在商值法基础上的延伸;联合概率曲线(JPC)由环境暴露浓度与毒性效应浓度通过Matlab编程拟合成一条曲线,与前2种方法相比,它能更好地描述环境风险。本文层级风险评估结果一致,即沙颍河水体中硝基苯对沙颍河水生生物基本没有风险,评估结果为沙颍河流域硝基苯的管理提供参考。

综上所述,本研究结果表明:

(1) 硝基苯对秀丽白虾、霍甫水丝蚓、黄颡鱼和河蚬的96 h-LC₅₀分别为45.436、178.299、17.397和119.069 mg·L⁻¹;秀丽白虾和黄颡鱼28 d-NOEC分别为2.858 mg·L⁻¹和3.429 mg·L⁻¹;28 d-LOEC分别为5.144 mg·L⁻¹和6.173 mg·L⁻¹;黄颡鱼28 d-EC₂₀为4.538 mg·L⁻¹。

(2) 采用SSR法得出沙颍河流域硝基苯CMC和CCC分别为0.007 mg·L⁻¹和0.002 mg·L⁻¹,结果低于我国现行的《地表水环境质量标准》,因此,现行的硝基苯标准阈值应当考虑到特定的流域特征,如水生生物种类差异。

(3) 使用层级风险评估方法(商值法、安全阈值法和联合概率曲线法)对沙颍河流域地表水的硝基苯进行风险评估。3种方法风险评估结果一致,沙颍河水体中硝基苯对沙颍河水生生物基本没有风险。

通讯作者简介:张亚辉(1979—),女,博士后,副研究员,主要研究方向为环境生态风险评估。

参考文献(References):

- [1] 左其亨, 罗增良, 石永强, 等. 沙颍河流域主要参数与自然地理特征[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 66-72
Zuo Q T, Luo Z L, Shi Y Q, et al. Main parameters and physiographic characteristics of Shayinghe River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(12): 66-72 (in Chinese)
- [2] 廖敏会. 催化臭氧氧化处理高浓度硝基苯类废水研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 1
Liao M H. Study on degradation of high concentration nitrobenzenes' wastewater with catalytic ozonation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 1 (in Chinese)
- [3] 赵纯, 张帅, 周宇, 等. 阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 212-219
Zhao C, Zhang S, Zhou Y, et al. Cathode electric field enhanced removal of nitrobenzene from aqueous solution based on activated carbon fibers (ACF)-ozone technique [J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 212-219 (in Chinese)
- [4] 田怀军, 舒为群, 张学奎, 等. 长江、嘉陵江(重庆段)源水有机污染物的研究[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(2): 118-123
Tian H J, Shu W Q, Zhang X K, et al. Organic pollutants in source water in Jialing River and Yangtze River (Chongqing Section) [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003, 12(2): 118-123 (in Chinese)
- [5] 韩方岸, 胡云, 吉文亮, 等. 长江江苏段主要城区水源有机污染物分布研究[J]. 实用预防医学, 2009, 16(1): 3-8
Han F A, Hu Y, Ji W L, et al. Study on distribution of organic pollutants of Yangtze River water in main cities of Jiangsu [J]. Practical Preventive Medicine, 2009, 16(1): 3-8 (in Chinese)
- [6] 王兴荣, 蒋煜峰, 王拯, 等. 黄河兰州段底泥对硝基苯的吸附行为[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1523-1529
Wang X R, Jiang Y F, Wang Z, et al. Adsorption behavior of nitrobenzene onto sediment in Lanzhou Section of the Yellow River [J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1523-1529 (in Chinese)
- [7] 何孟常, 林春野, 杨志峰, 等. 松辽流域重要水系典型有毒有机物污染特征[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 21-80
He M C, Lin C Y, Yang Z F, et al. Pollution Characteristics of Typical Toxic Organic Pollutants in the Main Water-system of Song-Liao Watershed [M]. Beijing: Science Press, 2015: 21-80 (in Chinese)
- [8] 高继军. 中国地表水中典型有毒有机物污染状况及分布规律研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007: 40-48
Gao J J. The research on the contamination distribution status of typical organic pollutants in the Chinese surface water [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2007: 40-48 (in Chinese)
- [9] US EPA. National recommended water quality criteria [R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, 2009
- [10] Zheng L, Liu Z T, Yan Z G, et al. Deriving water quality criteria for trivalent and pentavalent arsenic [J]. Science of the Total Environment, 2017, 587-588: 68-74
- [11] Wu J Y, Yan Z G, Liu Z T, et al. Development of water quality criteria for phenanthrene and comparison of the sensitivity between native and non-native species [J]. Environmental Pollution, 2015, 196: 141-146
- [12] 吴丰昌, 冯承莲, 张瑞卿, 等. 我国典型污染物水质基准研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5): 665-672
Wu F C, Feng C L, Zhang R Q, et al. Derivation of water quality criteria for representative water-body pollutants in China [J]. Science China: Earth Science, 2012, 42(5): 665-672 (in Chinese)
- [13] 张瑞卿. 中国硝基苯和汞的保护水生生物水质基准研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010: 27-37
Zhang R Q. The study on water quality criteria of nitrobenzene and mercury for protecting aquatic life in China [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010: 27-37 (in Chinese)
- [14] 吴丰昌, 孟伟, 张瑞卿, 等. 保护淡水水生生物硝基苯水质基准研究[J]. 环境科学研究, 2011, 24(1): 1-10
Wu F C, Meng W, Zhang R Q, et al. Aquatic life water quality criteria for nitrobenzene in freshwater [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(1): 1-10 (in Chinese)
- [15] 王菲, 廖静, 茅丹俊, 等. 中国典型河湖水体铅的水生生物安全基准与生态风险评价[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(3): 434-445
Wang F, Liao J, Mao D J, et al. Aquatic quality criteria and ecological risk assessment for lead in typical waters

- of China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(3): 434-445 (in Chinese)
- [16] 梁峰. 我国典型流域重金属的风险评价及六价铬水质基准的推导[D]. 南京: 南京大学, 2011: 73-76
- Liang F. The ecological risk assessment of heavy metals and the derivation of water quality criteria of hexavalent chromium for typical basins in China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011: 73-76 (in Chinese)
- [17] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国典型流域镉水质基准研究[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(10): 1221-1228
- Yan Z G, Meng W, Liu Z T, et al. Development of aquatic criteria for cadmium for typical basins in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(10): 1221-1228 (in Chinese)
- [18] 姜永生. 沙颍河常见水生生物图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 105-318
- [19] 胡俊, 舒卫先, 韦翠珍, 等. 基于浮游植物群落的纵向连通性初步研究[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(1): 79-86
- Hu J, Shu W X, Wei C Z, et al. Study on longitudinal connectivity based on community structure of phytoplankton [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(1): 79-86 (in Chinese)
- [20] 舒卫先, 胡菊香, 陈胜, 等. 流域治理后生态恢复期的沙颍河干流底栖动物群落结构分析[J]. *水生态学杂志*, 2014, 35(4): 35-42
- Shu W X, Hu J X, Chen S, et al. Zoobenthos community of the main stream of Shaying River at ecological restoration stage after watershed management [J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, 35(4): 35-42 (in Chinese)
- [21] 刘盼盼, 王龙, 王培, 等. 沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价[J]. *水生生物学报*, 2018, 42(2): 373-381
- Liu P P, Wang L, Wang P, et al. The characteristics zooplankton community and water quality the Shangying River Basin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, 42(2): 373-381 (in Chinese)
- [22] 舒卫先, 韦翠珍. 沙颍河鱼类种类组成和特征分析[J]. *治淮*, 2015(1): 27-28
- [23] 刘娜, 金小伟, 王业耀, 等. 生态毒理数据筛查与评价准则研究[J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(3): 1-10
- Liu N, Jin X W, Wang Y Y, et al. Review of criteria for screening and evaluating ecotoxicity data [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(3): 1-10 (in Chinese)
- [24] 殷浩文, 蔡磊明, 赵华清, 等. 化学品测试方法: 生物系统效应卷[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013: 30-36
- Yin H W, Cai L M, Zhao H Q, et al. The Guidelines for the Testing of Chemicals: Effects on Biotic Systems [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013: 30-36 (in Chinese)
- [25] 朱岩. 两种典型有机磷农药的水生生物基准研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2017: 7
- Zhu Y. A research of aquatic life water quality criteria for two organophosphorus pesticides [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2017: 7 (in Chinese)
- [26] 王德铭, 王明霞, 罗森源. 水生生物监测手册[M]. 南京: 东南大学出版社, 1993: 47-51
- [27] US EPA. Recalculation of state toxic criteria [R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, Office of Water Regulations and Standards, 1982
- [28] Stephan C E, Mount D I, Hansen D J, et al. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 1985
- [29] Feng C L, Wu F C, Dyer S D, et al. Derivation of freshwater quality criteria for zinc using interspecies correlation estimation models to protect aquatic life in China [J]. *Chemosphere*, 2013, 90(3): 1177-1183
- [30] Zheng L, Zhang Y Z, Yan Z G, et al. Derivation of predicted no-effect concentration and ecological risk for atrazine better based on reproductive fitness [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 142: 464-470
- [31] Zheng L, Liu Z T, Zhang Y, et al. pH-dependent ecological risk assessment of pentachlorophenol in Taihu Lake and Liaohe River [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 135: 216-224
- [32] 杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 等. 3种典型有机污染物对2种水生生物的急性毒性及安全评价[J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 3074-3079
- Yang Y, Li Y J, Cui Y B, et al. Acute toxicity and safety assessment of three typical organic pollutants to two aquatic organisms [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 3074-3079 (in Chinese)
- [33] 赵志刚. 硝基苯等污染物对4种中国土著水生生物的毒性研究[D]. 南京: 南京大学, 2011: 30-31
- Zhao Z G. Toxicity studies of several pollutants on four indigenous aquatic organisms of China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011: 30-31 (in Chinese)
- [34] Yan Z G, Wu J Y, Wang X N, et al. Development of Water Quality Criteria for Toxic Organic Pollutants [M]// *Toxic Pollutants in China*. Springer Netherlands, 2015: 1-55
- [35] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国典型流域镉水质基准研究[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(10): 1221-1228
- Yan Z G, Meng W, Liu Z T, et al. Development of aquatic criteria for cadmium for typical basins in China [J]. *Re-*

- search of Environmental Sciences, 2010, 23 (10): 1221-1228 (in Chinese)
- [36] 郝明辉. 清溪河流域氨氮水生生物基准研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018: 58-75
- Hao M H. Preliminary aquatic life criteria development of ammonia in Qingyi River Basin [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018: 58-75 (in Chinese)
- [37] 王一喆, 闫振广, 张亚辉, 等. 七大流域氨氮水生生物水质基准与生态风险评估初探[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 77-83
- Wang Y Z, Yan Z G, Zhang Y H, et al. Preliminary aquatic life criteria development and ecological risk assessment of ammonia in seven major basins in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 77-83 (in Chinese)
- [38] 丁婷婷. 沙颍河流域典型污染物的水生生物基准推导及生态风险评估[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2019: 10-32
- Ding T T. Study on water quality criterion and ecological risk assessment of typical contaminants in Shaying River Basin [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2019: 10-32 (in Chinese)
- [39] 雷炳莉, 金小伟, 黄圣彪, 等. 太湖流域3种氯酚类化合物水质基准的探讨[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(1): 40-49
- Lei B L, Jin X W, Huang S B, et al. Discussion of quality criteria for three chlorophenols in Taihu Lake [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, 4(1): 40-49 (in Chinese)
- [40] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准(GB3838—2002)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water (GB3838—2002) [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese) ◆