

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.08.2016031401

朱岩, 覃璐玫, 张亚辉, 等. 浑河沈阳河段重金属镉的水质基准阈值探讨[J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1578-1583
ZHU Yan, QIN Lumei, ZHANG Yahui, et al. Development of aquatic criteria for cadmium for Shenyang reach of Hunhe in China[J].
Environmental Chemistry, 2016, 35(8): 1578-1583

浑河沈阳河段重金属镉的水质基准阈值探讨*

朱 岩^{1,2} 覃璐玫³ 张亚辉^{2**} 曹 莹² 郑 磊^{1,4}
王伟莉² 闫振广² 曾鸿鹄¹ 刘征涛²

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林, 541004;
2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护化学品生态效应与
风险评估重点实验室, 北京, 100012; 3. 广西建设职业技术学院, 南宁, 530000;
4. 北京师范大学水科学研究院, 北京, 100875)

摘 要 研究镉对浑河沈阳河段的水质基准, 采用当地水源和实验室自来水及当地物种蛇鮈、麦穗鱼和多刺裸腹鲟进行毒性试验, 利用“水效应比值法(WER)”和辽河流域常规基准值推导该河段镉的基准最大浓度(CMC)和基准连续浓度(CCC). 结果表明, 在原水中镉对蛇鮈和麦穗鱼的 96 h 半数死亡浓度(96 h-LC₅₀)和镉对多刺裸腹鲟的 48 h 半数效应浓度(48 h-EC₅₀)分别为 1.98 mg·L⁻¹、1.13 mg·L⁻¹、0.17 mg·L⁻¹, 在实验室配制水中分别为 2.19 mg·L⁻¹、1.16 mg·L⁻¹、0.60 mg·L⁻¹; 镉对蛇鮈、麦穗鱼和多刺裸腹鲟的 WER 分别为 0.9041、0.9741、0.2833, 其几何平均值为 0.6295. 该河段镉的 CMC 为 1.86 μg·L⁻¹, CCC 为 0.025 μg·L⁻¹. 浑河沈阳河段镉的急慢性基准值均小于流域及国家的急慢性基准值.

关键词 水质基准, 镉, 浑河沈阳河段.

Development of aquatic criteria for cadmium for Shenyang
reach of Hunhe in China *

ZHU Yan^{1,2} QIN Lumei³ ZHANG Yahui^{2**} CAO Ying² ZHENG Lei^{1,4} WANG Weili²
YAN Zhengguang² ZENG Honghu¹ LIU Zhengtao²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, 541004, China;
2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environment Protection Key Laboratory of Ecological
Effects and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, China;
3. Guangxi Polytechnic of Construction, Nanning, 530000, China;
4. School of Water Science Research, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China)

Abstract: Using the local river water, lab tap water and the local species such as *Saurogobio dabryi*, *Pseudorasbora parva* and *Moina macrocopa*, toxicity test were performed to develop to study aquatic criteria for cadmium for Shenyang reach of Hunhe. And the criteria maximum concentration of cadmium was calculated by “water-effect ratio procedure (WER)” and the convention criteria of

2016 年 3 月 14 日收稿(Received: March 14, 2016).

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-003), 科技基础性工作专项(2014FY120606) 和国家自然科学基金(51268008, 21407139)资助.

Supported by the National Water Pollution Control and Treatment Science and Technology Major Project of China(Grant no.2012ZX07501-003), the Ministry of Science and Technology Basic Work Special Projects(2014FY120606) and the National Natural Science Foundation of China(51268008, 21407139).

** 通讯联系人, Tel: 010-84915814, E-mail: zhangyahui@craes.org.cn

Corresponding author, Tel: 010-84915814, E-mail: zhangyahui@craes.org.cn

Liao River basin. The criteria continuous concentration (CCC) of cadmium for the reach was derived by the evaluation factor method. The results showed that 96 h-LC₅₀ to *Saurogobio dabryi*, *Pseudorasbora parva* and *Moina macrocopa* 48 h-EC₅₀ to were 1.98 mg·L⁻¹, 1.13 mg·L⁻¹, 0.17 mg·L⁻¹ in the river water, while they were 2.19 mg·L⁻¹, 1.16 mg·L⁻¹, 0.60 mg·L⁻¹ in tap water. The WER of cadmium for the three species were 0.9041, 0.9741, 0.2833, and the geometric mean was 0.6295. CMC and CCC of cadmium for the reach were 1.86 μg·L⁻¹ and 0.025 μg·L⁻¹. The acute criteria and chronic criteria of the reach were lower than the the basins and national acute criteria and chronic criteria.

Keywords: water quality criteria, cadmium, Shenyang reach of Hunhe.

水质基准是环保部门制定水质标准的科学依据和理论基础,在水环境保护和管理方面发挥重要的作用^[1].根据受保护对象不同,水质基准主要分为保护水生生物水质基准和保护人体健康水质基准.美国于 20 世纪中叶开始进行水质基准研究,现如今已形成较全面的水质基准体系.根据水质基准显著的区域性特征^[2],美国环保署(US EPA)^[3]建立了包括国家基准(National Criteria)、州特异性基准(State-Specific Criteria)和区域特异性基准(Site-Specific Criteria)的“三级水质基准体系”.国家基准由 US EPA 发布,各州可直接采用国家基准作为本州基准,也可根据本州情况采用重新计算法(Recalculation Procedure)对国家基准进行修订^[4],经 US EPA 认可后作为本州基准,区域基准采用水效应比值法(Water-Effect Ratio Procedure, WER)对州基准进行修订后产生.US EPA 的双值基准^[5]认为如果某种化学物质的 4 d 平均浓度超过基准连续浓度(CCC)的频率不多于平均每 3 年 1 次,并且 1 h 平均浓度超过基准最大浓度(CMC)的频率不多于平均每 3 年 1 次,那么水生生物及其用途不会受到危害.这里的“1 h”和“4 d”分别代表污染物对水生生物的急性毒性和慢性毒性试验结果,“3 年”指的是大部分生态系统自我修复所需要的时间.双值基准由于考虑了水环境中实际污染物浓度的波动以及生物体对污染物的耐受性、适应性和生态修复力等要素而被认为更具有科学性.

我国借鉴 US EPA 制定水质基准的理论方法,提出了适合我国水质基准的水效应比技术,它是制定区域基准常用方法^[6],该法主要关注水质差异,为制定区域特异性标准提供技术支撑.水效应比值法是利用当地水生生物在本地原水和实验室配制水中进行毒性试验,然后将原水中的毒性终点值除以实验室配制水的毒性终点值,进而得到 WER,最后将流域水质基准与 WER 的乘积得到区域水质基准,该方法用来说明水化学因素对金属毒性的影响.镉是水体重金属主要污染物之一,对镉对水生生物的毒性研究受到广泛关注^[7-11].影响镉毒性效应的因素很多,包括硬度^[12]、pH^[13]和其他水质因子^[14].因此,研究镉水质基准时需将各个水质因子的影响考虑在内.

目前我国水质基准的研究多集中于国家水质基准及流域水质基准的探讨^[15-17],关于水质基准体系的构建以及实证研究鲜有报导.本研究采用 WER 进行流域-区域水质基准的验证实验.在已经推算出的我国 4 个典型流域镉水质基准^[18]的基础上选取浑河沈阳河段这一区域作为试点,测试其 WER 值,开展该区域镉水质双值基准阈值的探讨,并将结果与国家及流域镉水质基准值进行比较,为构建我国三级水质基准体系提供更多数据参考.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 仪器与试剂

试验所用仪器和设备包括:ICP-MS (7500Series,美国安捷伦公司);多功能水质参数仪(HQ40d,美国哈希公司);硬度计(16900,美国哈希公司);电子天平(AE240,瑞士梅特勒公司);智能光照培养箱(PGX-450B,宁波海曙赛福实验仪器厂);自制恒温水浴设备.氯化镉(CdCl₂·21/2H₂O,分析纯 99.0%,天津市光复科技发展有限公司).

1.2 样品采集与处理

试验中所用样品于 2014 年 7 月采自沈阳浑河大桥(N:41°45.055' E:123°26.586').按照《水和废水监测分析方法》^[19]中关于水样采集及运输的方法,选取不受严重人为污染的水体,先用尼龙网对取得的

原水进行初步过滤,去掉原水中枯枝败叶、大型生物等较大体积的试验干扰物体.然后采用提前净化好的 20 L 聚乙烯瓶(10%的硝酸浸泡后,自来水冲洗3次,去离子水冲洗3次,样品采集时用河水润洗3次),取样深度不超过 50 cm,现场测定水样的 pH、硬度和电导率.并尽快运回实验室 4 ℃ 冷藏保存.

1.3 受试生物的选择

水质基准阈值验证的受试水生生物需尽量选择当地敏感的、重要的或有代表性的物种,可事先经过调研或依据物种敏感度分布研究结果确定,US EPA 要求计算 WER 时,在受试生物类别上至少需一种无脊椎动物和一种脊椎动物的数据^[20].

经调查采用沈阳地区常见水生生物蛇鮈(鲤科,鮈亚科,蛇鮈属)、麦穗鱼(鲤形目,鲤科,麦穗鱼属)和多刺裸腹蚤(节肢动物门,甲壳纲,鳃足亚纲,裸腹蚤科)进行毒性试验.实验用生物购自沈阳市花鸟鱼虫市场,蛇鮈平均体长 2.0±1.0 cm,平均体重 0.26±0.05 g;麦穗鱼平均体长 3.0±0.8 cm,平均体重 0.31±0.07 g;试验前在实验室驯养 7 d,死亡率小于 5%则可用于试验,试验前 24 h 与试验期间不喂食.

1.4 毒性试验

本试验使用原水和当地生物的组合,并进行实验室用水的平行毒性试验.验证试验的测试方法参照我国颁布的标准毒性测试方法^[21]进行.预实验设置 5 个浓度组,不设置平行,每个浓度组放置 7 尾鱼;正式试验设置 7 个浓度组,每组 3 个平行,每个平行放置 7 尾鱼.试验浓度按几何级数配制,镉对蛇鮈毒性试验浓度设置为 0.152、0.304、0.609、1.217、2.435、4.870、9.739 mg·L⁻¹.镉对麦穗鱼毒性试验浓度设置为 0.359、0.542、0.791、1.217、1.826、2.739、4.870 mg·L⁻¹.试验溶液 1.5 L 于 2 L 玻璃烧杯中,置于自制恒温水浴槽内,水温 22±1 ℃,光暗比 14 h:10 h.分别在 24、48、72、96 h 统计生物死亡或存活数目.多刺裸腹蚤试验,蚤 7 只,溶液 50 mL 于 100 mL 玻璃烧杯中,镉对多刺裸腹蚤毒性试验浓度设置为 0.026、0.052、0.103、0.206、0.411、0.822、1.643 mg·L⁻¹.试验溶液 50 mL 于 100 mL 玻璃烧杯中,置于光照培养箱内,水温 22±1 ℃,光暗比 16 h:8 h.分别在 24 h、48 h 统计死亡数目.以上均采用半静态试验方法,每隔 24 h 换水.水中溶解氧(DO)保持 6 mg·L⁻¹以上.利用 SPSS 19.0 计算镉对两种鱼类的 96 h 半数死亡浓度(96 h-LC₅₀),大型蚤的 48 h 半数效应浓度(48 h-EC₅₀).

1.5 水效应比值法

采用 US EPA^[22]推荐方法,将受试生物在原水和实验室水中进行急性毒性暴露平行试验,得到原水和实验室水的 LC₅₀.WER 考虑了特定点(Site-Specific)水质特性(包括硬度、pH 和电导率等)对镉毒性的影响.流域水质基准为区域水质基准与区域 WER 的乘积,计算公式如下:

WER_R = LC₅₀(ss)_R / LC₅₀(lab)_R (1)

WQC_R = WQC_B × WER_R (2)

式中,WER_R为区域水效应比;LC₅₀(ss)_R为区域现场(site specific)实际水样测定的毒性结果;LC₅₀(lab)_R为实验室配制水测定的毒性结果;WQC_R和 WQC_B分别为区域和流域水质基准.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 水质参数的测定

测定试验原水和自来水的各水质参数(见表 1),符合 US EPA^[23]要求的实验室配制水的硬度在 40—220 mg·L⁻¹(以 CaCO₃计)的规定.由表 1 可知,实验室配制水的硬度和电导率均小于原水.

表 1 试验水的水质参数
Table 1 The water quality parameter of test water

试验水 Test water	pH	硬度 Hardness/(mg·L ⁻¹ 以 CaCO ₃ 计)	电导率 Conductivity/(μs·cm ⁻¹)
实验室配制水 Tap water	7.84	100	150
原水 Local water	6.70	137	210

2.2 受试生物急性毒性试验

将浑河沈阳河段的原水与实验室配制水进行镉对蛇鮈、麦穗鱼和多刺裸腹蚤的 3 种水生生物急性

毒性暴露平行试验,并由公式(1)和公式(2)计算出镉对3种生物的 WER,试验结果(见表2).原水与实验室配制水中镉对麦穗鱼的毒性均大于镉对蛇鮈的毒性,镉对多刺裸腹蚤的毒性均大于镉对两种鱼类的毒性.

表 2 两种试验用水中镉对 3 种水生生物的急性毒性试验
Table 2 Acute toxicity of Cd to three organisms in two test water

物种 Species	原水 River water/(mg·L ⁻¹)		实验室配制水 Tap water/(mg·L ⁻¹)		WER
	96 h-LC ₅₀ 或 48 h-EC ₅₀	95%置信区间 95% confidence interval	96 h-LC ₅₀ 或 48 h-EC ₅₀	95%置信区间 95% confidence interval	
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	1.98	1.20—3.26	2.19	1.26—3.83	0.9041
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	1.13	0.76—1.68	1.16	0.64—2.13	0.9741
多刺裸腹蚤 <i>Moina macrocopa</i> Straus	0.17	0.10—0.28	0.60	0.37—0.98	0.2833

2.3 浑河沈阳河段镉水质基准的推算

由表2中毒性数据得到蛇鮈、麦穗鱼和多刺裸腹蚤等3种受试生物的 WER 值分别为 0.9041、0.9741、0.2833.由于在毒性试验中大多数水生生物对单一污染物的敏感性分布极有可能呈对数正态分布而不是正态分布,因此计算最终 WER 时采用几何平均值^[24]而不是算数平均值.求得最终 WER 值为 0.6295.浑河沈阳河段镉急性基准计算如下:

$$CMC_R = CMC_B \times 0.6295 \tag{3}$$

式中,CMC_R为浑河沈阳河段急性基准;CMC_B为水体硬度为 100 mg·L⁻¹时的辽河流域急性基准;经计算 CMC_R=1.86 μg·L⁻¹.

$$CCC_R = CCC_B \times 0.6295 \tag{4}$$

式中,CCC_R为浑河沈阳河段慢性基准;CCC_B为水体硬度为 100 mg·L⁻¹时的辽河流域慢性基准;经计算 CCC_R=0.025 μg·L⁻¹.

对于区域基准,本研究以浑河沈阳河段开展试点研究,验证 WER 技术的运用.US EPA^[20]规定计算 WER 值至少需要一种无脊椎动物和一种脊椎动物的数据,本研究使用沈阳当地蛇鮈、麦穗鱼和多刺裸腹蚤等3种水生生物作为受试生物,符合技术要求.并推导的浑河沈阳河段镉对3种生物 WER 的几何平均值为(0.6295)与文献[25]中 WER 值的分布区间(0—11)相比处于低值区间,说明浑河沈阳河段的水质较好.通过 WER 方法将辽河流域镉基准用于浑河沈阳河段镉区域基准的推算结果见表3.

表 3 国家、流域和区域镉水生生物基准值
Table 3 The aquatic organisms criteria of national, typical basins and site for Cd

镉的水质基准 Water quality criteria for Cadmium	急性基准值 CMC/(μg·L ⁻¹)	慢性基准值 CCC/(μg·L ⁻¹)	文献 References
国家基准	5.25	0.53	[26]
辽河流域基准	2.95	0.04	[18]
浑河沈阳河段基准	1.86	0.025	本研究
大伙房水库基准	2.72	0.05	[26]
国家基准	7.30	0.12	[27]
国家基准	0.4218	0.2428	[28]

由表3可知浑河沈阳河段镉的急慢性基准值<辽河流域镉的急慢性基准值<国家镉的急慢性基准值,这与闫振广等^[26]推导的“国家-辽河流域-大伙房水库”镉的急慢性基准值的大小顺序比较相似,大伙房水库镉的急性基准<辽河流域镉的急性基准<国家镉的急性基准,而大伙房水库镉的慢性基准接近辽河流域镉的慢性基准值,两者均小于国家镉的慢性基准.浑河沈阳河段急性基准 CMC(1.86 μg·L⁻¹)小于闫振广等^[26]推导的大伙房水库的 CMC(2.72 μg·L⁻¹),浑河沈阳河段慢性基准 CCC(0.025 μg·L⁻¹)小于闫振广等^[26]推导的大伙房水库 CCC(0.05 μg·L⁻¹),验证了由流域急性基准推导区域急性基准值的

可行性.由于镉的慢性毒性试验困难,闫振广等^[26]证明了急性 WER 的通用性,因此只利用急性毒性试验推算的 WER 值,结果存在一定的不确定性,后续需加强慢性毒性数据的积累,进一步降低区域镉慢性基准研究的不确定性.吴丰昌等^[27]采用毒性百分数排序法得出国家镉的急性基准 CMC($7.30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),国家镉的慢性基准 CCC($0.12 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),该研究未涉及水质参数硬度的影响.吴丰昌等^[28]通过在美国环保署 ECOTOX 数据库筛选镉对淡水水生生物的毒性数据,通过构建物种敏感度分布法求得国家镉的急性基准 CMC($0.4218 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、国家镉的慢性基准 CCC($0.2428 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),这可能是由于物种敏感度分布法主要关注物种间的差异.而闫振广等^[26]采用“重新计算法”剔除不合格的数据,通过回归分析计算硬度斜率,对国家镉基准和流域镉基准分别进行了修正,更关注了水质的差异.本文应用修正后的辽河流域镉基准通过 WER 法计算出区域镉基(准浑河沈阳河段),近一步增加了区域镉基准值的准确性.

我国水质基准系统研究开展较晚,水质标准的制定大多依照美国等发达国家的水质基准资料,缺乏本土水质基准阈值,采用国外数据不能科学反应我国水质基准的实际情况.由于水生生物具有明显的区域性,因此也要符合当地水域内具有代表性的水生生物.在推导水质基准时也会受到温度、溶解氧、pH 值、硬度、有机质、水体污染程度等因素的影响.借鉴其他国家的水质基准来确定我国的水质基准科学性不充分,容易对保护水生生物产生“过保护”和“欠保护”的现象.因此必须根据我国区域水环境差异、污染物特征以及生物种类差异等多方面因素建立适合我国国情的水质基准体系.

首先,由于物种分布差异对流域基准的推导产生巨大影响,因此受试生物的筛选是水质基准推导的重点之一,在推导区域水质基准中,尽量选择此区域内常见的且对污染物敏感的水生生物,同时也符合试验生物“易得性,季节性,敏感性”的特征.我国本土水生受试生物筛选出的鳊属(鳊鱼)、鲫属(鲫鱼)、蟾蜍属(黑眶蟾蜍)、蚤属(大型蚤、蚤状蚤、僧帽蚤和透明蚤)、低额蚤属(锯顶低额蚤)、钩虾属(蚤状钩虾)、沼虾属(日本沼虾)、颤蚓属(正颤蚓)和尾鳃蚓属(苏氏尾鳃蚓)对重金属较敏感,可作为基准研究受试生物^[29-32],因此在推导区域水质基准时,可考虑采用上述敏感物种进行毒性试验.

其次,利用 WER 法计算区域水质基准,将不同层面上(硬度、pH 等)的水质基准得以区分,能更好地保护区域内水生生物.为构建我国“国家—流域—区域”三级水质基准体系以及我国流域管理提供科学有效的技术支持.

3 结论 (Conclusion)

以浑河沈阳河段为试验点位,推算出蛇鮈、麦穗鱼和多刺裸腹蚤等 3 种受试生物 WER 的几何平均值为 0.6295.由辽河流域常规基准值推算出浑河沈阳河段镉的基准最大浓度 CMC 为 $1.86 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,采用评估因子法推导镉的基准连续浓度 CCC 为 $0.025 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

参考文献 (References)

- [1] 孟伟,吴丰昌.水质基准的理论与方法学导论[M].北京:科学出版社,2010.
MENG W, WU F C. Theory and methods of water quality criteria [M]. Beijing: Science Press, 2010(in Chinese).
- [2] THURSTON R V. A review of the EPA Red Book: Quality Criteria for Water [M]. American Fisheries Society, 1979.
- [3] US EPA. National recommended water quality criteria [R]. Washington DC: US EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, 2009.
- [4] US EPA. Recalculation of state toxic criteria [R]. Washington DC: US EPA, Office of Water Regulations and Standards, 1982.
- [5] US EPA. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses [R]. PB 85-227049, 1985.
- [6] TEXAS WATER COMMISSION. Texas surface water quality standards [S]. 1991.
- [7] GODT J, SCHEIDIG F, GROSSE-SIESTRUP C, et al. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health [J]. J Occup Med Toxicol, 2006, 1(22): 1-6.
- [8] MEBANE C A. Cadmium risks to freshwater life: Derivation and validation of low-effect criteria values using laboratory and field studies [M]. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2006.
- [9] 杜丽娜,余若祯,王海燕,等.重金属镉污染及其毒性研究进展[J].环境与健康,2013,30(2): 167-174.
DU L N, YU R Z, WANG H Y, et al. Pollution and toxicity of cadmium: A review of recent studies [J]. Journal of Environment and Health, 2013, 30(2): 167-174(in Chinese).
- [10] 翟少伟,刘淑兰,贾景涛.饲料镉对罗非鱼的急性毒性及其安全限量的研究[J].饲料研究,2012,(12): 62-63.
ZHAI S W, LIU S L, JIA J T. Acute toxicity and safety limits for cadmium in feed tilapia [J]. Feed Research, 2012, (12): 62-63(in

- Chinese).
- [11] 陈国柱, 方展强. 铜, 锌, 镉对唐鱼胚胎及初孵仔鱼的急性毒性及安全浓度评价[J]. 生物学杂志, 2011, 28(2):28-31.
CHEN G Z, FANG Z Q. Safety assessment and acute toxicity of copper, zinc and cadmium to the embryo and larval fish of *Tanichthys albonubes* [J]. Journal Biology, 2011, 28(2): 28-31 (in Chinese).
- [12] VAN ARDT W, BOOYSEN J. Water hardness and the effects of Cd on oxygen consumption, plasma chlorides and bioaccumulation in *Tilapia sparrmanii* [J]. Water SA, 2004, 30(1): 57-64.
- [13] SIDDIQI H A. Effects of pH on the uptake pattern of metals copper, cadmium and Cu; Cd [J]. J. Chem. Soc. Pak, 2008, 30(3): 353.
- [14] 孙振兴, 孙鹏. 两种水温条件下镉对菲律宾蛤仔的急性毒性[J]. 海洋通报, 2010, 29(3):316-319.
SUN Z X, SUN P. Acute toxicity of cadmium to clam (*Ruditapes philippinarum*) under two different water temperatures [J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(3): 316-319 (in Chinese).
- [15] 王业耀, 张铃松, 孟凡生, 等. 水生生物水质基准研究进展及建立我国氨氮水质基准的探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 108-113.
WANG Y Y, ZHANG L S, MENG F S, et al. Research progress on water quality criteria for aquatic life and establishment of water quality criteria of *Ammonia nitrogen* in China [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2012, 10(5): 108-113 (in Chinese).
- [16] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 辽河流域氨氮水质基准与应急标准探讨[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11):1829-1835.
YAN Z G, MENG W, LIU Z T, et al. Development of aquatic life criteria and lash-up standard for ammonia in Liao River basin [J]. China Environmental Science, 2011, 31(11): 1829-1835 (in Chinese).
- [17] 石小荣, 李梅, 崔益斌, 等. 以太湖流域为例探讨我国淡水生物氨氮基准[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6):1406-1414.
SHI X R, LI M, CUI Y B, et al. Development of aquatic water quality criteria for ammonia in freshwater ecosystem of China based on Lake Tai basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(6): 1406-1414 (in Chinese).
- [18] 刘征涛, 孟伟. 水环境质量基准方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012, 339-340.
LIU Z T, MENG W. The technology and application of water quality criteria [M]. Beijing: Science Press, 2012, 339-340 (in Chinese).
- [19] 魏复盛, 齐文启. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002, 38-47.
WEI F S, QI W Q. Water and wastewater monitoring and analysis methods (fourth edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002, 38-47 (in Chinese).
- [20] JOP K M, ASKEW A M, FOSTER R B. Development of a water effect ratio for copper, cadmium, and lead for the Great Works river in Maine using *Ceriodaphnia dubia* and *Salvelinus fontinalis* [J]. Bulletin Environmental Contamination and Toxicology, 1995, (54): 29-35.
- [21] 殷浩文, 蔡磊明. 化学品测试方法(生物系统效应卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
YIN H W, CAI L M. The guidelines for the testing of chemicals (effects on biotic systems) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2013 (in Chinese).
- [22] SPEHAR R, CARLSON A R. Derivation of site - specific water quality criteria for cadmium and the St. Louis River Basin, Duluth, Minnesota [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1984, 3(4): 651-665.
- [23] STEPHAN C E, PELTIER W H, HANSEN D J, et al. Interm guidance on determination and use of water-effect ratios for metals [R]. Washington DC: US EPA, Office of Water, 1994.
- [24] US EPA. Streamlined water-effect ratio procedure for discharges of copper [R]. 2001.
- [25] VERBRUGGEN E M J. Guidance for the derivation of environmental risk limits within the framework of 'International and national environmental quality standards for substances in the Netherlands' (INS) [R]. Bilthoven, the Netherlands, National Institute for Public Health and the Environment, 2007.
- [26] 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).
- [27] 吴丰昌, 孟伟, 曹宇静, 等. 镉的淡水水生生物水质基准研究[J]. 环境科学研究, 2011, 24(2): 172-184.
WU F C, MENG W, CAO Y J, et al. Derivation of aquatic life water quality criteria for cadmium in freshwater in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(2): 172-184 (in Chinese).
- [28] 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, 2012, 42(5): 665-672.
- [29] 王晓楠, 郑欣, 闫振广, 等. 水质基准鱼类受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4):341-348.
WANG X N, ZHENG X, YAN Z G, et al. Screening of native fishes for deriving aquatic life criteria [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(4): 341-348 (in Chinese).
- [30] 蔡靳, 闫振广, 何丽, 等. 水质基准两栖类受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4):349-355.
CAI L, YAN Z G, HE L, et al. Screening of native amphibians for deriving aquatic life criteria [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(4): 349-355 (in Chinese).
- [31] 郑欣, 闫振广, 王晓楠, 等. 水质基准甲壳类受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4):356-364.
ZHENG X, YAN Z G, WANG X N, et al. Screening of native crustaceans for deriving aquatic life criteria [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(4): 356-364 (in Chinese).
- [32] 王伟莉, 闫振广, 刘征涛, 等. 水质基准本土环节动物与水生昆虫受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4):365-372.
WANG W L, YAN Z G, LIU Z T, et al. Screening of native annelids and aquatic insects for deriving aquatic life criteria [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(4): 365-372 (in Chinese).