

闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 2009 我国淡水水生生物镉基准研究 [J]. 环境科学学报, 29(11): 2393-2406

Yan Z G, Meng W, Liu Z T, et al. 2009. Biological criteria for freshwater Cd in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(11): 2393-2406

我国淡水水生生物镉基准研究

闫振广, 孟伟*, 刘征涛, 余若祯, 张亚辉

中国环境科学研究院, 北京 100012

收稿日期: 2009-02-09 修回日期: 2009-05-11 录用日期: 2009-08-11

摘要: 研究了 Cd 对我国淡水水生生物的毒性效应, 包括 43 种生物的急性毒性数据和 14 种生物的慢性毒性数据. 同时, 参照美国环境保护署 (USEPA) 颁布的水质基准计算方法, 按照基准最大浓度 (CMC) 和基准连续浓度 (CCC) 计算了我国淡水水生生物的 Cd 基准. 结果表明, 我国淡水生物 Cd 基准的 CMC 值和 CCC 值分别为 $2.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 和 $0.23 \mu\text{g L}^{-1}$, 与美国淡水生物 Cd 的基准值有一定差别, 研究结果为我国的 Cd 水质标准研究提供了参考依据.

关键词: Cd 水生生物; 水质基准; 硬度斜率; CMC; CCC

文章编号: 0253-2468(2009)11-2393-14 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Biological criteria for freshwater Cd in China

YAN Zhenguang MENG Wei*, LIU Zhengtao, YU Ruozhen, ZHANG Yahui

Chinese Research Academy of Environmental Sciences Beijing 100012

Received 9 February 2009; received in revised form 11 May 2009; accepted 11 August 2009

Abstract Toxicity effects of Cd on resident freshwater species in China were studied. Acceptable data including the acute effects of Cd on 43 species and chronic effects on 14 species are available. According to the guidelines for deriving water quality criteria issued by the United States Environmental Protection Agency (USEPA), the freshwater biological criteria for Cd in China, which includes the Criterion Maximum Concentration (CMC) and the Criterion Continuous Concentration (CCC) was derived. The results showed that the CMC and CCC of freshwater for Cd in China were $2.1 \mu\text{g L}^{-1}$ and $0.23 \mu\text{g L}^{-1}$, respectively. They differ from the biological criteria for Cd in freshwater in the United States to some degree. This research provides important information for the study of water quality standards for Cd in China.

Keywords Cd; aquatic organism; water quality criterion; hardness slope; CMC; CCC

1 引言 (Introduction)

水质基准是制定水质标准的科学依据, 在水环境保护方面发挥着非常重要的作用. 水质基准主要包括毒理学基准和生态学基准两类, 其中, 毒理学基准根据保护对象的不同又分为水生生物基准和人体健康基准, 二者分别是根据毒物对水生生物和人体的毒性风险为依据确定的.

美国从 20 世纪 60 年代就开始了毒理学基准的研究, 并将其用于水质标准的制定. 美国环境保护署 (USEPA) 于 1985 年颁布了最新的用于保护水生生物及其用途的数值型水质基准推导技术指南 (以下简称“指南”), “指南”规定了水质基准的推导和

计算方法, 最终的基准结果为基准最大浓度 (Criterion Maximum Concentration, CMC) (急性) 和基准连续浓度 (Criterion Continuous Concentration, CCC) (慢性) 2 个数值基准. 水质基准最后的表述为“除非有重要的本地物种特别敏感, 如果某化学物质的 4 d 平均浓度超过 CCC 的频率不多于平均每 3 年 1 次, 并且 1 h 平均浓度超过 CMC 的频率不多于平均每 3 年 1 次, 淡水 (或海水) 水生生物及其用途不会受到不可接受的影响”.

Cd 是水体重金属污染的主要元素之一, 在水中一般以 Cd^{2+} 形式存在, 具有较大的生物毒性, 因此, 对于 Cd^{2+} 毒性作用的研究一直得到人们的重视 (Thompson *et al.*, 2008; 王桂燕等, 2007a, 2007b)

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2008ZX07526-003)

Supported by the National Municipal Science and Technology Project of Water Pollution Control and Abatement of China (No. 2008ZX07526-003)

作者简介: 闫振广 (1972-), 男, 博士, E-mail: yanzhenguang@cras.org.cn * 通讯作者 (责任作者), E-mail: mengwe@cras.org.cn

Biography: YAN Zhenguang (1972-), male, Ph.D., E-mail: yanzhenguang@cras.org.cn * **Corresponding author**, E-mail: mengwe@cras.org.cn

杨再福等, 2003; 郑先云等, 2008). 研究发现, 包括水体硬度 (Hansen *et al.*, 2002)、pH 值 (Markich *et al.*, 2003) 等在内的水质因子都可以影响 Cd^{2+} 的生物毒性, 其中, 水体硬度对 Cd^{2+} 毒性的影响最具广泛性 (USEPA, 2001). 因此, USEPA 将水体硬度作为研究 Cd 水质基准时必须考虑的因素之一 (USEPA, 2001).

我国水质基准研究相对滞后 (孟伟等, 2006). 目前颁布的包括 Cd 在内的众多污染物的水质标准主要是参照国外的水质标准而制定的 (张彤等, 1996), 没有开展针对我国生物物种的系统的基准研究 (周启星等, 2007), 已进行的少量研究 (张彤等, 1997) 所利用的毒性数据也是有限的. 因此, 现行的水质标准对于我国的水生生物存在着“过保护”或“欠保护”的可能 (周启星等, 1997). 基于此, 本文对我国水生生物物种 (包括我国本地种及引进物种等) 的 Cd 毒性数据进行了研究, 获得的淡水水生生物 Cd 基准可为我国 Cd 水质标准的制定提供参考.

2 材料和方法 (Materials and methods)

参照美国的水生生物基准推导和计算方法 (USEPA, 2001; 1985). 本研究的大致过程可分为: ①收集数据; ②分析水质因子 (硬度) 对 Cd^{2+} 毒性的影响, 求出硬度斜率; ③通过计算分析, 获得最终急性值 (Final Acute Value, FAV) 和最终慢性值 (Final Chronic Value, FCV), 并确定 CMC 和 CCC. 数据分析软件为 OriginPro 7.5.

2.1 试验生物的选择

USEPA 规定的试验生物以北美的节肢动物和鱼类为主, 在选择的 8 种试验生物中, 二者共占 5~

7 种. 据文献 (SEPA, 1998) 调查, 我国的生物物种以节肢动物为主, 鱼类和软体动物也占较大比重. 鱼类与人类生活关系密切, 经济价值很高, 应给予优先考虑. 因此, 本文基本采用 USEPA 规定的物种选择原则, 同时考虑到我国的鱼类以鲤科为主, 特别注意收集了鲤科鱼类的 Cd 毒性数据.

2.2 数据选择原则

本文中 Cd^{2+} 的毒性数据主要来源于美国镉基准技术文件 (USEPA, 2001)、USEPA 的毒性数据库 (<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>) 和中国知网 (<http://www.cnki.com/>). 数据收集截止到 2008 年 12 月. 将不符合水质基准计算要求的试验数据剔除, 其中包括非中国物种的试验数据, 没有说明试验用水硬度的试验数据, 用去离子水作为试验用水的试验数据和实验设计不科学或者不符合要求的试验数据.

3 数据收集 (Data collection)

3.1 Cd^{2+} 对淡水动物的急性毒性

3.1.1 Cd^{2+} 对淡水无脊椎动物的急性毒性 Cd^{2+} 对淡水无脊椎动物的急性毒性数据包括 18 个属 22 种生物 (表 1, 水体硬度以 CaCO_3 浓度表示, 下同). 其中, 大型蚤是国际标准毒理学试验动物, 因此, 其数据最丰富. 试验方法分为静态法、更新法和流水式 3 种试验方法, 试验用水的硬度跨度为 11~290 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 毒性数据符合计算急性硬度斜率要求的物种包括大型蚤、蚤状蚤、灰水螅和绿水螅 (表 1, 以*表示). 另外, 由于试验生物的发育阶段或年龄等的不同, 数据可能有较大差异, 导致出现部分相对不敏感数据在计算种平均急性值 (Species Mean Acute Value, SMAV) 时被弃用 (见表 1 注释).

表 1 Cd^{2+} 对淡水无脊椎动物的急性毒性

Table 1 Acute toxicity of cadmium to freshwater invertebrates

物种	拉丁名	方法	硬度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	LC_{50} 或 EC_{50} / ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	文献
夹杂带丝蚓	<i>Lumbriculus variegatus</i>	S, M	290	780.0	Schubauer-Bergan <i>et al.</i> , 1993
霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	F, M	152	2400.0	Williams <i>et al.</i> , 1985
苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>	S, U	185	58020.0	Ghosal <i>et al.</i> , 2002
正颤蚓	<i>Tubifex tubifex</i>	S, M	128	3200.0	Reynoldson <i>et al.</i> , 1996
正颤蚓	<i>Tubifex tubifex</i>	S, M	128	1700.0	Reynoldson <i>et al.</i> , 1996
正颤蚓	<i>Tubifex tubifex</i>	S, U	250	1657.9	Redeker <i>et al.</i> , 2004
红裸须摇蚊	<i>Procladius akamusi</i>	S, U	260	18566759.0	Zheng <i>et al.</i> , 2008
近亲尖额蚤	<i>Alona affinis</i>	S, U	109	546.0	Ghosh <i>et al.</i> , 1990

续表 1

物种	拉丁名	方法	硬度 / (mg L ⁻¹)	LC ₅₀ 或 EC ₅₀ / (μg L ⁻¹)	文献
模糊网纹溞	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	S, U	90	54.0	Bitton <i>et al.</i> , 1996
模糊网纹溞	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	R, M	80	54.5	Diamond <i>et al.</i> , 1997
模糊网纹溞	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	S, U	90	55.9	Lee <i>et al.</i> , 1997
棘爪网纹溞	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	S, U	240	184.0	Elnabarawy <i>et al.</i> , 1986
棘爪网纹溞	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	S, U	120	110.0	Hall <i>et al.</i> , 1986
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, U	45	65.0	Biesinger <i>et al.</i> , 1972
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	R, M	105	30.0	Canton <i>et al.</i> , 1982
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	R, M	209	30.0	Canton <i>et al.</i> , 1982
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, U	120	20.0	Hall <i>et al.</i> , 1986
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, U	120	40.0	Hall <i>et al.</i> , 1986
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, U	240	178.0	Elnabarawy <i>et al.</i> , 1986
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	3.6(基因型 A)	Baird <i>et al.</i> , 1991
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	9.0(基因型 A-1)	Baird <i>et al.</i> , 1991
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	9.0(基因型 A-2)	Baird <i>et al.</i> , 1991
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	4.5(基因型 B)	Baird <i>et al.</i> , 1991
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	27.1(基因型 E)	Baird <i>et al.</i> , 1991
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	115.9(基因型 S-1)	Baird <i>et al.</i> , 1991
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	24.5(克隆 F)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1992
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	129.4(克隆 S-1)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1992
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	25.4(克隆 F)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	228.8(克隆 S-1)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	49.1(克隆 F)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	250.1(克隆 S-1)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	131.2(克隆 F)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	319.3(克隆 S-1)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	139.9(克隆 F)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	326.3(克隆 S-1)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	146.7(克隆 F)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	170	355.3(克隆 S-1)	Stuhbacher <i>et al.</i> , 1993
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, U	250	280.0	Crisinel <i>et al.</i> , 1994
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, U	170	9.5	Guilhemino <i>et al.</i> , 1996
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	46	112.0(克隆 S-1)	Barata <i>et al.</i> , 1998
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	90	106.0(克隆 S-1)	Barata <i>et al.</i> , 1998
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	179	233.0(克隆 S-1)	Barata <i>et al.</i> , 1998
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	46	30.1(克隆 A)	Barata <i>et al.</i> , 1998
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	90	23.4(克隆 A)	Barata <i>et al.</i> , 1998
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	179	23.6(克隆 A)	Barata <i>et al.</i> , 1998
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	51 [°]	9.9	USEPA, 200 [†]
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	104 [°]	33.0	USEPA, 200 [†]
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	105 [°]	34.0	USEPA, 200 [†]
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	197 [°]	63.0	USEPA, 200 [†]
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	S, M	209 [°]	49.0	USEPA, 200 [†]
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	F, M	130	58.0	Attar <i>et al.</i> , 1982
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	F, U	162	60.0	Barata <i>et al.</i> , 2002
蚤状溞	<i>Daphnia pulex</i>	S, U	57 [°]	47.0	Bertram <i>et al.</i> , 1979
蚤状溞	<i>Daphnia pulex</i>	S, U	240 [°]	319	Elnabarawy <i>et al.</i> , 1986
蚤状溞	<i>Daphnia pulex</i>	S, U	120 [°]	80.0	Hall <i>et al.</i> , 1986
蚤状溞	<i>Daphnia pulex</i>	S, U	120 [°]	100.0	Hall <i>et al.</i> , 1986

续表 1

物种	拉丁名	方法	硬度 / (mg L ⁻¹)	LC ₅₀ 或 EC ₅₀ / (μg L ⁻¹)	文献
蚤状溞	<i>Daphnia pulex</i>	S, M	53.5 [*]	<u>70.1</u>	Stackhouse <i>et al.</i> , 1988
蚤状溞	<i>Daphnia pulex</i>	S, U	85 [*]	<u>66.0</u>	Roux <i>et al.</i> , 1993
蚤状溞	<i>Daphnia pulex</i>	S, U	85 [*]	99.0	Roux <i>et al.</i> , 1993
蚤状溞	<i>Daphnia pulex</i>	S, U	85 [*]	70.0	Roux <i>et al.</i> , 1993
多刺裸腹溞	<i>Moina macrocopa</i>	S, U	82	<u>71.3</u>	Hatakeyama <i>et al.</i> , 1981a, 1981b
锯顶低额溞	<i>Sinoccephalus serrulatus</i>	S, M	11	<u>7.0</u>	Giesy, 1977
锯顶低额溞	<i>Sinoccephalus serrulatus</i>	S, M	43	<u>24.5</u>	Spehar <i>et al.</i> , 1984
端足类	<i>Crangonyx pseudograecilis</i>	R, U	50	<u>1700.0</u>	Martin <i>et al.</i> , 1986
端足类	<i>Gammarus pseudolimnacus</i>	S, M	43	<u>68.3</u>	Spehar <i>et al.</i> , 1984
灰水螅	<i>Hydra vulgaris</i>	S, U	20 [*]	<u>83.0</u>	Holdway <i>et al.</i> , 2001
灰水螅	<i>Hydra vulgaris</i>	S, U	209 [*]	520.0	Kantanut <i>et al.</i> , 2002
灰水螅	<i>Hydra vulgaris</i>	S, U	209 [*]	<u>160.0</u>	Kantanut <i>et al.</i> , 2002
寡水螅	<i>Hydra oligactis</i>	S, U	209	<u>320.0</u>	Kantanut <i>et al.</i> , 2002
绿水螅	<i>Hydra viridissima</i>	S, U	20 [*]	<u>3.0</u>	Holdway <i>et al.</i> , 2001
绿水螅	<i>Hydra viridissima</i>	S, U	209 [*]	<u>210.0</u>	Kantanut <i>et al.</i> , 2002
苔藓虫	<i>Pectinella magnifica</i>	S, U	205	<u>700.0</u>	Parde <i>et al.</i> , 1980
苔藓虫	<i>Lophopodella carteri</i>	S, U	205	<u>150.0</u>	Parde <i>et al.</i> , 1980
苔藓虫	<i>Plectambonites argenteus</i>	S, U	205	<u>1090.0</u>	Parde <i>et al.</i> , 1980
克氏原螯虾	<i>Procambarus clarkii</i>	S, M	30	<u>1040.0</u>	Naqvi <i>et al.</i> , 1993
克氏原螯虾	<i>Procambarus clarkii</i>	F, U	53	<u>2660.0</u>	Wigginton <i>et al.</i> , 2007
克氏原螯虾	<i>Procambarus clarkii</i>	F, U	42	<u>624.0</u>	Wigginton <i>et al.</i> , 2007
无褶螺	<i>Aplocheilichia hypnorum</i>	F, M	45	<u>93.0</u>	Holcombe <i>et al.</i> , 1984
无褶螺	<i>Aplocheilichia hypnorum</i>	F, M	44	<u>93.0</u>	Phlips <i>et al.</i> , 1985

注: 下划线且加黑为计算 SMAV 采用的数据, 同列的其他数据为相对不敏感数据而弃用; *: 计算急性硬度斜率时采用的数据; #: 原为 Chapman 等的未发表数据, 本文依据 USEPA 的 Cd 基准技术文件 (USEPA, 2001) 而采信; S: 静态法; R: 更新法; F: 流水式; M: 测量浓度; U: 未测量浓度; 表中数据都是以 Cd²⁺ 的浓度表示, 而非化学物质浓度, 下同。

3.1.2 Cd²⁺ 对淡水鱼类的急性毒性 Cd²⁺ 对淡水鱼类的急性毒性数据包括 16 个属 19 种鱼类 (表 2), 其中包括我国的本地种, 如鲤鱼和草鱼等, 也包括引进物种, 如虹鳟及太阳鱼等。其中, 虹鳟在欧美广泛分布, 在我国也有较大范围的养殖, 因此, 毒性数据比较丰富。试验用水的硬度跨度为 9 ~ 360 mg L⁻¹。毒性数据符合急性硬度斜率计算要求的物

种包括虹鳟、金鲫鱼、孔雀鱼、条纹石鲈和绿色太阳鱼 (表 2 以* 表示)。银鲑、虹鳟、溪红点鲑、金鲫鱼、鲤鱼、食蚊鱼和蓝鳃太阳鱼各有部分相对不敏感数据在计算属平均急性值 (Genus Mean Acute Value, GMAV) 时被弃用 (见表 2 注释)。另外, 虹鳟的“大于”或“小于”数据 (表 2 以# 表示) 也被弃用。

表 2 Cd²⁺ 对淡水鱼类的急性毒性

Table 2 Acute toxicity of cadmium to freshwater fishes

物种	拉丁名	方法	硬度 / (mg L ⁻¹)	LC ₅₀ 或 EC ₅₀ / (μg L ⁻¹)	文献
亚东鳟	<i>Salmo trutta</i>	S, M	44	<u>1.4</u>	Spehar <i>et al.</i> , 1984
银鲑	<i>Onorhynchus kisutch</i>	S, U	90	10.4	Loiz, 1978
银鲑	<i>Onorhynchus kisutch</i>	S, U	41	3.4	Buhl <i>et al.</i> , 1991
银鲑	<i>Onorhynchus kisutch</i>	F, M	22	17.5	Chapman, 1975
银鲑	<i>Onorhynchus kisutch</i>	F, M	22	<u>2.7</u>	Chapman, 1975
虹鳟	<i>Onorhynchus mykiss</i>	S, M	44 [*]	2.3	Spehar <i>et al.</i> , 1984
虹鳟	<i>Onorhynchus mykiss</i>	S, U	41 [#]	1.5	Buhl <i>et al.</i> , 1991

续表 2

物种	拉丁名	方法	硬度 / (mg L^{-1})	LC ₅₀ 或 EC ₅₀ / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	文献
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	23	27.0	Chapman, 1975; 1978
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	23 ^o	1.3	Chapman, 1975; 1978
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	23 ^o	1.0	Chapman, 1978
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	23 ^o	4.1	Chapman, 1975
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	23	> 2.9 [#]	Chapman, 1975
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	31 ^o	1.8	Davies, 1976
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	44 ^o	3.0	Phipps <i>et al.</i> , 1985
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	9	< 0.5 [#]	Cusimano <i>et al.</i> , 1986
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	31 ^o	0.7	Hansen, 1999
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	29 ^o	0.5	Hansen, 1999
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	32 ^o	0.5	Hansen, 1999
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	30 ^o	0.4	Hansen, 1999
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	30 ^o	1.3	Hansen, 1999
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	F, M	89 ^o	2.9	Hansen, 1999
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	S, U	140 ^o	30.0	Hollis <i>et al.</i> , 1999
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	S, U	34 ^o	4.6	Niyogi <i>et al.</i> , 2008
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	S, U	140 ^o	17.5	Szebedinszky <i>et al.</i> , 2001
溪红点鲑	<i>Salvelinus fontinalis</i>	F, M	47	5080.0	Holcombe <i>et al.</i> , 1983
溪红点鲑	<i>Salvelinus fontinalis</i>	S, M	42	< 1.5	Carroll <i>et al.</i> , 1979
金鲫鱼	<i>Carrasius auratus</i>	S, U	20 ^o	2340.0	Pickering <i>et al.</i> , 1966
金鲫鱼	<i>Carrasius auratus</i>	S, M	20 ^o	2130.0	McCarthy <i>et al.</i> , 1978
金鲫鱼	<i>Carrasius auratus</i>	S, M	140 ^o	46800.0	McCarthy <i>et al.</i> , 1978
金鲫鱼	<i>Carrasius auratus</i>	F, M	44 ^o	748.0	Phipps <i>et al.</i> , 1985
鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	S, U	100	4300.0	Suresh <i>et al.</i> , 1993
鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	S, U	100	17100.0	Suresh <i>et al.</i> , 1993
鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	S, U	185	220770.0	Ghosal <i>et al.</i> , 2002
草鱼	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>	R, U	210	2441.0	Wang <i>et al.</i> , 2007a
草鱼	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>	S, U	210	2405.0	Wang <i>et al.</i> , 2007b
叶唇鱼	<i>Ptychocheilus oregonensis</i>	F, M	25	1092.0	Andros <i>et al.</i> , 1980
叶唇鱼	<i>Ptychocheilus oregonensis</i>	F, M	25	1104.0	Andros <i>et al.</i> , 1980
斑点叉尾鲷	<i>Ictalurus punctatus</i>	F, M	44	4480.0	Phipps <i>et al.</i> , 1985
食蚊鱼	<i>Gambusia affinis</i>	F, M	11	900.0	Giesy, 1977
食蚊鱼	<i>Gambusia affinis</i>	F, M	11	2200.0	Giesy, 1977
孔雀鱼	<i>Poecilia reticulata</i>	S, U	20 ^o	1270.0	Pickering <i>et al.</i> , 1966
孔雀鱼	<i>Poecilia reticulata</i>	R, M	105 ^o	3800.0	Canton <i>et al.</i> , 1982
孔雀鱼	<i>Poecilia reticulata</i>	R, M	209 ^o	11100.0	Canton <i>et al.</i> , 1982
无鳞甲三刺鱼	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	S, U	115	6500.0	Pascoe <i>et al.</i> , 1977a
无鳞甲三刺鱼	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	R, M	107	23000.0	Pascoe <i>et al.</i> , 1977b
条纹石鲈	<i>Morone saxatilis</i>	S, U	40 ^o	4.0	Palawski <i>et al.</i> , 1985
条纹石鲈	<i>Morone saxatilis</i>	S, U	285 ^o	10.0	Palawski <i>et al.</i> , 1985
绿色太阳鱼	<i>Lepomis cyanellus</i>	S, U	20 ^o	2840.0	Pickering <i>et al.</i> , 1966
绿色太阳鱼	<i>Lepomis cyanellus</i>	S, U	360 ^o	66000.0	Pickering <i>et al.</i> , 1966
绿色太阳鱼	<i>Lepomis cyanellus</i>	S, M	86 ^o	11520.0	Carrier <i>et al.</i> , 1988
蓝鳃太阳鱼	<i>Lepomis macrochirus</i>	S, U	20	1940.0	Pickering <i>et al.</i> , 1966
蓝鳃太阳鱼	<i>Lepomis macrochirus</i>	S, M	18	2300.0	Bishop <i>et al.</i> , 1981
蓝鳃太阳鱼	<i>Lepomis macrochirus</i>	S, M	18	2300.0	Bishop <i>et al.</i> , 1981

续表 2

物种	拉丁名	方法	硬度 / (mg L^{-1})	LC ₅₀ 或 EC ₅₀ / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	文献
蓝鳃太阳鱼	<i>Lepomis macrochirus</i>	F, M	44	<u>6470.0</u>	Phillips <i>et al.</i> , 1985
莫桑比克吴郭鱼	<i>Oreochromis mossambica</i>	R, U	28	<u>6000.0</u>	Gakwad, 1989
尼罗罗非鱼	<i>Oreochromis niloticus</i>	S, U	50	<u>14800.0</u>	García-Santos <i>et al.</i> , 2006
青鳉	<i>Oryzias latipes</i>	R, U	83	<u>16.0</u>	Tilton <i>et al.</i> , 2003
露斯塔野鲮	<i>Labeo rohita</i>	S, U	175	<u>89500.0</u>	Dutta <i>et al.</i> , 2001

注: 下划线且加黑为计算 SMAV 采用的数据; #: 弃用的“大于”或“小于”数据; 同列的其他数据为相对不敏感数据被弃用; *: 计算急性硬度斜率采用的数据; S: 静态法; R: 更新法; F: 流水式; M: 测量浓度; U: 未测量浓度。

3.1.3 Cd²⁺ 对淡水两栖动物的急性毒性 Cd²⁺ 对 和泽蛙蝌蚪的研究符合计算要求 (表 3)。两栖类的急性毒性研究较少, 仅有对光滑爪蟾胚胎

表 3 Cd²⁺ 对淡水两栖动物的急性毒性

Table 3 Acute toxicity of cadmium on freshwater amphibians

物种	拉丁名	方法	硬度 / (mg L^{-1})	LC ₅₀ / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	文献
光滑爪蟾胚胎	<i>Xenopus laevis</i>	R, U	116	<u>3597.0</u>	Sunderman <i>et al.</i> , 1991
泽蛙蝌蚪	<i>Rana limnophari</i>	S, U	129	<u>1890.0</u>	Yang <i>et al.</i> , 2003

注: 下划线且加黑为计算 SMAV 所采用的数据; S: 静态法; R: 更新法; U: 未测量浓度。

3.2 Cd²⁺ 对淡水动物的慢性毒性

慢性毒性试验实施较为困难, 因此, 数据也较少。Cd²⁺ 对淡水动物的慢性毒性数据共包括 11 个属 14 种生物 (表 4), 分为生活史试验数据和早期生命阶段试验数据 2 类。试验用水的硬度跨度为 20~250 mg L^{-1} , 毒性数据符合慢性硬度斜率计算要求

的物种有大型溞和亚东鱧 (表 4 以* 表示)。大型溞和大西洋鲑各有 1 组相对不敏感数据在计算种平均慢性值 (Species Mean Acute Value, SMCV) 时被弃用 (见表 4 注释)。另外, 因为可以获得生活史试验数据, 亚东鱧和溪红点鲑的早期生命阶段试验数据也被弃用 (表 4 以# 表示)。

表 4 Cd²⁺ 对淡水动物的慢性毒性

Table 4 Chronic toxicity of cadmium to freshwater animals

物种	拉丁名	方法	硬度 / (mg L^{-1})	慢性限值 / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	慢性值 / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	文献
正颤蚓	<i>Tubifex tubifex</i>	LC	250	<u>1124.00~2810.00</u>	1777.2	Redeker <i>et al.</i> , 2004
网纹水溞	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	LC	20	<u>10.00~19.00</u>	13.8	Jøp <i>et al.</i> , 1995
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	LC	53*	<u>0.08~0.29</u>	0.2	USEPA, 200f [®]
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	LC	103*	<u>0.16~0.28</u>	0.2	USEPA, 200f [®]
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	LC	209*	<u>0.21~0.91</u>	0.4	USEPA, 200f [®]
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	LC	150	5.00~10.00	/	Bodar <i>et al.</i> , 1988
大型溞	<i>Daphnia magna</i>	LC	130	<u>< 1.86~1.86</u>	1.9	Borgmann <i>et al.</i> , 1989
灰水螅	<i>Hydra vulgaris</i>	LC	20	<u>< 13.00~13.00</u>	13.0	Hokkay <i>et al.</i> , 2001
绿水螅	<i>Hydra viridissima</i>	LC	20	<u>0.40~0.80</u>	0.6	Hokkay <i>et al.</i> , 2001
淡水无褶螺	<i>Apelva hypnorum</i>	LC	45.3	<u>4.41~7.63</u>	5.8	Holcombe <i>et al.</i> , 1984
淡水无褶螺	<i>Apelva hypnorum</i>	LC	45.3	<u>2.50~4.79</u>	3.5	Holcombe <i>et al.</i> , 1984
溪红点鲑	<i>Salvelinus fontinalis</i>	ELS	3	71.00~3.00 [#]	/	Sauter <i>et al.</i> , 1976
溪红点鲑	<i>Salvelinus fontinalis</i>	ELS	44	1.10~3.80 [#]	/	Eaton <i>et al.</i> , 1978
溪红点鲑	<i>Salvelinus fontinalis</i>	LC	44	<u>1.70~3.40</u>	2.4	Benoit <i>et al.</i> , 1976

续表 4

物种	拉丁名	方法	硬度 / (mg L^{-1})	慢性限值 / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	慢性值 / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	文献
银鲑	<i>Oncorhynchus kisutch</i>	ELS	44	<u>1.30~3.40</u>	2.1	Eaton <i>et al.</i> , 1978
银鲑	<i>Oncorhynchus kisutch</i>	ELS	44	<u>4.10~12.50</u>	7.2	Eaton <i>et al.</i> , 1978
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	LC	250	<u>3.39~5.48</u>	4.3	Brown <i>et al.</i> , 1994
亚东鱒	<i>Salmo trutta</i>	ELS	44 [*]	3.80~11.70 [#]	/	Eaton <i>et al.</i> , 1978
亚东鱒	<i>Salmo trutta</i>	LC	250 [*]	<u>9.34~29.10</u>	16.5	Brown <i>et al.</i> , 1994
大西洋鲑	<i>Salmo salar</i>	ELS	23.5	90.00~270.00	/	Rombough <i>et al.</i> , 1982
大西洋鲑	<i>Salmo salar</i>	ELS	23.5	<u>2.50~8.20</u>	4.5	Rombough <i>et al.</i> , 1982
白斑狗鱼	<i>Esox lucius</i>	ELS	44	<u>4.20~12.90</u>	7.4	Eaton <i>et al.</i> , 1978
蓝鳃太阳鱼	<i>Lepomis macrochirus</i>	LC	207	<u>31.00~80.00</u>	49.8	Eaton 1974
奥利亚罗非鱼	<i>Oreochromis aurea</i>	LC	145	<u>> 52.00</u>	52.0	Papou tsog bu <i>et al.</i> , 1988

注: 下划线且加黑为计算 SMCV 采用的数据; #: 有 LC 数据存在时, 被弃用的 ELS 数据; 同列的其他数据为相对不敏感数据被弃用; @: 原为 Chapman 等的未发表数据, 本文依据 USEPA 的 Cd 基准技术文件 (USEPA, 2001) 而采信; *: 计算慢性硬度斜率采用的数据; LC: 生活史试验; ELS 早期生命阶段试验。

4 数据分析与统计 (Data analysis and statistics)

4.1 水体硬度对 Cd²⁺ 毒性的影响

对各物种试验数据的硬度和毒性值进行回归分析, 结果如图 1 (急性) 和图 2 (慢性) 所示。由图 1

和图 2 可知, Cd²⁺ 对所有物种的急性和慢性毒性都随着水体硬度的增大而降低, 说明水体硬度 (H) 对 Cd²⁺ 毒性的影响较大, 而且对各物种影响效应的趋势也相同。

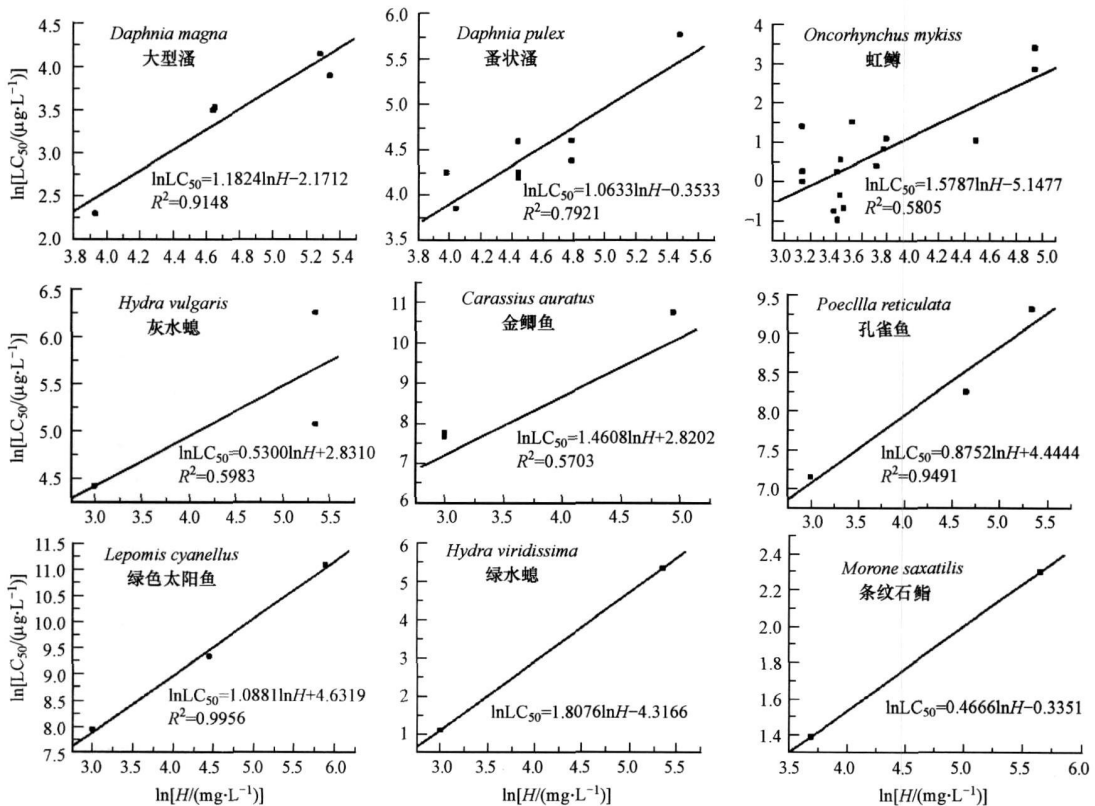


图 1 水体硬度对 Cd²⁺ 急性毒性的影响

Fig. 1 Effects of water hardness on acute toxicity of cadmium

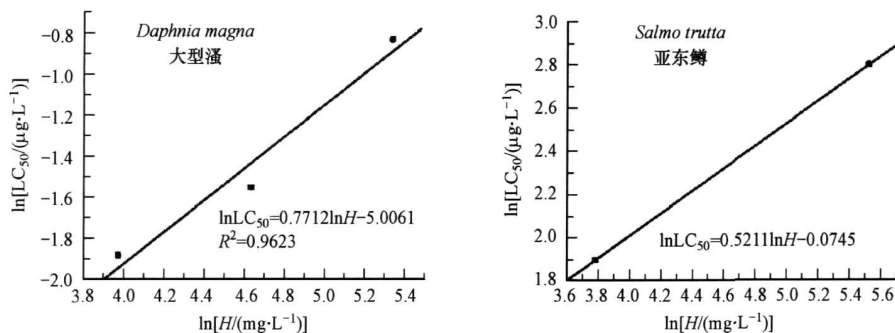


图 2 水体硬度对 Cd²⁺ 慢性毒性的影响

Fig 2 Effects of water hardness on the chronic toxicity of cadmium

4.2 硬度斜率的计算

利用表 1、表 2 和表 4 中符合计算硬度斜率条件的数据 (以 * 表示) 进行回归分析, 结果如图 3 所示, 急性毒性效应包含 4 种无脊椎动物和 5 种鱼类的 46 组数据 (n = 46), 回归方程为 $\ln LC_{50} =$

$1.1530 \times \ln H$, ($p < 0.01$); 慢性毒性效应包含 1 种无脊椎动物 (大型溞) 和 1 种鱼类 (亚东鲮) 的 5 组数据 ($n = 5$), 回归方程为 $\ln EC_{50} = 0.6172 \times \ln H$, ($p < 0.01$). 计算得出 Cd 的急性和慢性硬度斜率分别为 1.1530 (图 3a) 和 0.6172 (图 3b).

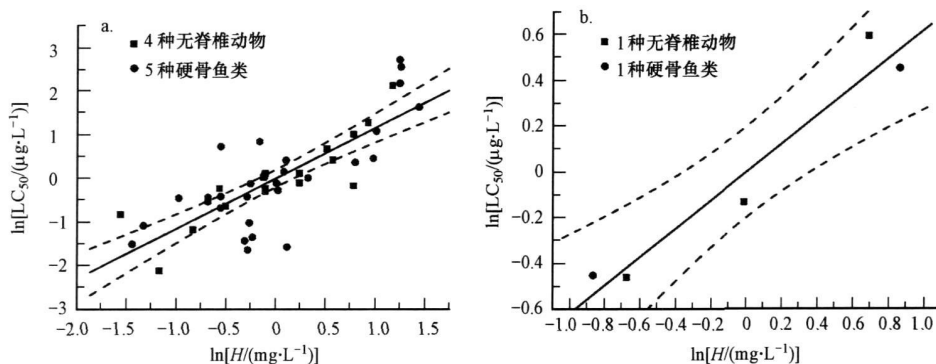


图 3 水体硬度对 Cd²⁺ 毒性效应影响的回归分析 (a 急性毒性效应, b 慢性毒性效应. 实线表示回归曲线, 虚线以内表示 95% 置信区间)

Fig 3 Regression analysis of influences of water hardness on toxicity of cadmium (a acute toxicity effect, b chronic toxicity effect. The solid line is regression curve, and the area between the dashed lines represents 95% confidence interval)

4.3 FAV 和 FCV 的计算

计算方法和公式依据文献 (USEPA, 1985; 2001). 利用急性硬度斜率 1.1530 和慢性硬度斜率 0.6172 将急性毒性值和慢性毒性值分别调整至水体硬度为 50 mg L^{-1} , 计算 SMAV、GMAV、SMCV 和属平均慢性值 (Genus Mean Chronic Value GMCV), 用来计算基准的 GMAV 值和 GMCV 值分别列于表 5 和表 6

利用表 5 中 GMAV 计算得到硬度为 50 mg L^{-1} 时, $FAV = 2.002 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$. 因为虹鲮的 SMAV 为 $1.973 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ (见表 5), 为充分保护在我国较为广泛养殖的虹鲮, 调整 $FAV = 1.973 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$.

表 5 Cd²⁺ 对淡水动物的 GMAV

Table 5 Ranked GMAVs of freshwater animals for cadmium

R	GMAV / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	SMAV / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	物种	拉丁名
4	3.705	6.958	银鲑	<i>Oncorhynchus kisutch</i>
		1.973	虹鲮	<i>Oncorhynchus mykiss</i>
3	2.637	2.637	条纹石鲈	<i>Morone saxatilis</i>
2	1.834	1.834	溪红点鲑	<i>Salvelinus fontinalis</i>
1	1.644	1.644	亚东鲮	<i>Salmo trutta</i>

注: R 为序号, 下同.

利用表 6 中 GMCV 计算得到硬度为 50 mg L^{-1} 时, $FCV = 0.1651 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$.

表 6 Cd²⁺对淡水动物的 GMCV

Table 6 Ranked GMCV s of freshwater animals for cadm im

R	GMCV / (μg L ⁻¹)	SMCV / (μg L ⁻¹)	物种	拉丁名
4	4 762	4. 762	淡水无褶螺	<i>Ap lexa hypnorum</i>
3	2 643	2. 643	溪点红鲢	<i>Sa belinus fontinalis</i>
2	2 589	4. 198	银鲑	<i>On orhynchus kisuth</i>
		1. 596	虹鳟	<i>On orhynchus mykiss</i>
1	0 247	0. 247	大型蚤	<i>Daphn iu magna</i>

5 Cd的淡水水生生物基准 (Biological criteria for freshwater Cd)

5.1 CMC 和 CCC 的计算

$$CMC_{可溶性镉} = (1. 136672 - 0. 041838 \times hH) \times e^{1. 153 \times hH - 4. 524} \quad (1)$$

式中, H 为水体硬度 ($mg L^{-1}$), 下同. 如: 水体硬度为 $100 mg L^{-1}$ 时, $CMC_{可溶性镉} = 2. 1 \mu g L^{-1}$.

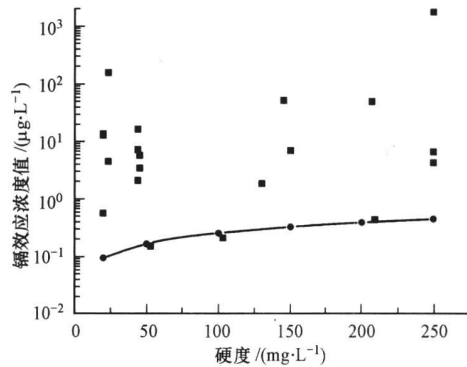
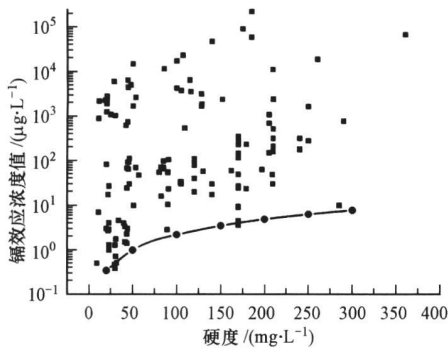


图 4 CMC(左)和 CCC(右)对我国水生生物物种的保护 (■代表我国水生生物的 Cd的急性(左)或慢性(右)毒性数据, 曲线为以水体硬度为自变量的 Cd基准函数曲线)

Fig 4 Protection levels of derived CMC and CCC for aquatic organisms in China (The square indicates the acute (left) or chronic (right) toxicological data for cadm im on aquatic organisms in China) (The curve represents the function of cadm im criteria taking water hardness as an independent variable)

5.3 CMC 与 CCC 的表述

本文计算的我国淡水水生生物 Cd基准最终表述为: 水体硬度为 $100 mg L^{-1}$ 时, 除非有重要的本地物种特别敏感, 如果 Cd的 4 d平均浓度超过 $0. 23 \mu g L^{-1}$ 的频率不多于平均每 3年 1次, 并且 1 h平均浓度超过 $2. 1 \mu g L^{-1}$ 的频率不多于平均每 3年 1次, 我国的淡水水生生物及其用途不会受到不可接受的影响. (当水体硬度改变时, 需参考文中公式重新计算 Cd的水质基准值.)

5.4 中国(本文计算)和美国的淡水水生生物 Cd基准对比

由表 7可知, 本文和美国的淡水水生生物 Cd

$$FCV_{可溶性镉} = (1. 101672 - 0. 041838 \times hH) \times e^{0. 6172 \times hH - 4. 2154} \quad (2)$$

如: 水体硬度为 $100 mg \cdot L^{-1}$ 时, $FCV_{可溶性镉} = 0. 23 \mu g L^{-1}$

水生植物对 Cd²⁺ 普遍不敏感(数据未展示), 已知对 Cd²⁺ 最敏感的植物是美丽星杆藻 (*Asterionella formosa*), 毒性效应值为 $2 \mu g L^{-1}$ (Conway 1978), 远高于 Cd²⁺ 对水生动物最低的慢性毒性效应值 $0. 135 \mu g L^{-1}$ (表 4). 因此, 本文不再计算最终植物毒性值 (Final Plant Value, FPV). 依据文献 (USEPA, 1985)确定 $CCC = FCV_{可溶性镉}$.

5.2 CMC 和 CCC 对水生生物的保护

由图 4可知, 在 $20 \sim 250 mg \cdot L^{-1}$ 的水体硬度 (以 $CaCO_3$ 计) 范围内, 本文计算的 CMC和 CCC都可以对我国水生生物物种提供充分而恰当的保护.

基准计算都使用了充足的 Cd毒性数据, 符合推导水质基准的数据要求. 计算得出的急性和慢性硬度斜率有一定差异; 最终选择用来计算 CMC的 4个属(急性)完全相同, 选择用来计算 CCC的 4个属(慢性)有 2个不同; 另外, 即使相同的物种, 由于收集数据的时间段不同(本文 Cd毒性数据截止至 2008年 12月, 美国现行的 Cd基准其毒性数据截止至 1999年 6月 (USEPA, 2001), 所计算得出的毒性值也有差异, 以上因素共同造成了中国和美国淡水水生生物 Cd基准数值的不同.

表 7 中国和美国 (USEPA, 2001)淡水水生生物 Cd基准对比

Table 7 Comparison of derived Chinese and American (USEPA, 2001) freshwater quality criteria for cadmium

国家	试验数据		计算基准的 4个属		硬度斜率		淡水水生生物基准 / ($\mu\text{g L}^{-1}$)	
	急性	慢性	急性	慢性	急性	慢性	CMC	CCC
中国	无脊椎动物 22种 鱼类 19种 两栖类 2种	无脊椎 6种 鱼类 8种	<i>Salmo</i> ; <i>Salvelinus</i> <i>Morone</i> ; <i>Oncorhynchus</i>	<i>Daphnia</i> ; <i>Oncorhynchus</i> <i>Aplexa</i> ; <i>Salvelinus</i>	1.1530	0.6172	2.1	0.23
美国	无脊椎动物 39种 鱼类 24种 两栖类 2种	无脊椎 7种 鱼类 14种	<i>Salmo</i> ; <i>Salvelinus</i> <i>Morone</i> ; <i>Oncorhynchus</i>	<i>Daphnia</i> ; <i>Oncorhynchus</i> <i>Hyalak</i> ; <i>Chironomus</i>	1.0166	0.7409	2.0	0.25

6 讨论 (Discussion)

据前人研究, Cd的毒性效应除受到水体硬度的影响以外, 还受到其他诸多水质因子的影响, 如 pH (Markich *et al.*, 2003)、温度 (Prato *et al.*, 2008)、盐度 (Lin *et al.*, 1993)等. 但是有关硬度的文献数据最多、最充分; 另外, 硬度高的水体, 其 pH 值、碱度和离子强度等一般也高, 因此, 硬度具有较好的代表性 (USEPA, 2001); 研究还发现, 硬度和碱度对 Cd的毒性具有相似的影响, 对二者进行合并分析与单独分析相比, 统计结果没有明显的变化, 因此, 只需选择其一对 Cd的毒性效应进行调整 (USEPA, 2001). 另外, 有些水质因子对 Cd毒性效应的影响不统一, 比如, 溶解性有机物可以降低 Cd对大型蚤的毒性, 但对于鱼类的 Cd毒性效应影响不大 (Giesy, 1977), 这样的水质因子就不能用来调整 Cd毒性效应值. 综上所述, 本文选择硬度作为调整 Cd毒性数据的水质因子是恰当的.

在选择计算硬度斜率的数据时, 要求试验用水的硬度跨度足够大, 才能准确体现硬度对毒性的影响. 比如, 多个处于窄硬度范围的试验数据反而没有少数处于宽硬度范围的试验数据具有更好的代表性. 因此, 本文采用了 USEPA 的 Cd基准技术文件 (USEPA, 2001)中选择硬度数据的 2个原则: ①试验用水的高硬度值高出低硬度值至少 100mg L^{-1} ; ②高硬度值至少等于低硬度值的 3倍. 另外, 大型蚤的急性毒性数据共有 39组 (表 1), 计算硬度斜率时, 本文和 USEPA 的 Cd基准技术文件都只选择了其中的 5组 (表 1, 以*表示), 原因是从整体上看, 大型蚤的急性数据差异太大, 而此 5组数据属于同一文献, 误差较小.

在整个水质基准的计算过程中, 数据的取舍非常重要, 直接关系到最后基准数值的准确与否. 一

些没有说明试验用水硬度的毒性数据无法根据硬度对毒性值进行调整而被舍弃; 使用去离子水进行的试验因计算出的毒性值大大降低, 也无法用于基准的计算; 在同样的硬度和试验条件下, 毒性数值明显偏高的数据可能使用了不敏感的试验生物 (比如曾经受到污染) 或者采用了不敏感的生命阶段, 其数据一般也被舍弃 (表 1、表 2和表 4); 同一项研究的结果有时也有差异 (表 1和表 2), 原因可能是试验生物的来源、基因型或发育阶段不同, 也可能是试验条件, 如温度、pH 值等有差别, 计算时一般选取相对敏感的数据; 有些与同类生物和同类试验相比, 差异超过 10倍的可疑数据 (Bodar *et al.*, 1988; Rambough *et al.*, 1982), 应该谨慎使用, 可以根据同属或相近的生物的毒性数据决定其取舍. 另外, 有的试验未对试验过程中的镉溶液浓度进行监测 (表 1~表 3 以 U 表示), 相对于进行了监测的数据 (表 1~表 3 以 M 表示) 而言, 可靠性略低. 在试验生物种类的选择上, 一方面剔除了一些非我国物种的数据, 如美国旗鱼 (*Jordanella floridae*)、斑马鱼 (*Brachydanio rerio*)、黑头软口鲶 (*Pimphales promelas*)、白鲑 (*Gila elegans*) 和美白鲤 (*Catostomus commersoni*) 等; 另一方面, 则包含了一些我国引进的物种, 如虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)、尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 和大西洋鲑 (*Salmo salar*) 等.

按照“指南” (USEPA, 1985) 推导水质基准时, 一般还需要计算最终残余值 (Final Residual Value, FRV), 最终 CCC 等于 FCV、FPV 和 FRV 中的最小值. 但研究 (Wren *et al.*, 1995) 发现, Cd 虽然可以在淡水生物体内蓄积, 但并不能随淡水生物的食物链富集, 美国最新的 Cd 水质基准文件 (USEPA, 2001) 没有考虑 FRV, 因此, 本文也没有进行 FRV 的计算.

美国的水质基准分为国家基准和州基准, 州基

准一般是根据国家基准结合自己地区的物种和水质因子状况而制定的. 本文采用的毒性数据整体上涵盖了我国的水生生物物种, 计算的 Cd 基准值可以在整体上对我国淡水水生生物提供恰当而充分的保护, 但我国幅员辽阔, 如果要针对某个地区或流域制定特定的水质基准, 还需根据具体情况对基准值进行调整. 另外, 各国的水质基准计算技术和数据要求都有所差别, 因此对同一污染物计算的基准值会有一定差异, 制定我国的水质标准时可进行广泛的参考.

7 结论 (Conclusions)

1) Cd 对我国淡水水生生物的急性和慢性硬度斜率分别为 1.1530 和 0.6172

2) 我国淡水生物 Cd 基准的 CMC 值和 CCC 值分别为 $2.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 和 $0.23 \mu\text{g L}^{-1}$.

责任作者简介: 孟伟 (1956—), 博士, 研究员. 现任中国环境科学研究院研究员/博导、院长, 国家“十一五”科技重大专项“水体污染控制与治理”的专家组组长.

参考文献 (References):

- Andros J D, Garton R R. 1980. Acute lethality of copper, cadmium, and zinc to northern squaw fish [J]. *Trans Am Fish Soc* 109: 235—238
- Attar E N, Maly E J. 1982. Acute toxicity of cadmium, zinc and cadmium-zinc mixtures to *Daphnia magna* [J]. *Arch Environ Contam Toxicol* 11: 291—296
- Baird D J, Barber I, Bradley M, et al. 1991. A comparative study of genotype sensitivity to acute toxic stress using clones of *Daphnia magna* Straus [J]. *Ecotox Environ Safe* 21: 257—265
- Barata C, Baird D J, Markich S J. 1998. Influence of genetic and environmental factors on the tolerance of *Daphnia magna* Straus to essential and non-essential metals [J]. *Aquat Toxicol* 42: 115—137
- Barata C, Markich S J, Baird D J, et al. 2002. The relative importance of water and food as cadmium sources to *Daphnia magna* Straus [J]. *Aquat Toxicol* 61: 143—154
- Benoit D A, Leonards E N, Christensen G M, et al. 1976. Toxic effects of cadmium on three generations of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) [J]. *Trans Am Fish Soc* 105: 550—560
- Bertram P E, Hart B A. 1979. Longevity and reproduction of *Daphnia pulex* (de Geer) exposed to cadmium-contaminated food or water [J]. *Environ Pollut* 19: 295—305
- Biesinger K E, Christensen G M. 1972. Effects of various metals on survival, growth, reproduction and metabolism of *Daphnia magna* [J]. *J Fish Res Board Can* 29: 1691—1700
- Bishop W E, McIntosh A W. 1981. Acute lethality and effects of sublethal cadmium exposure on ventilation frequency and cough rate of bluegill (*Lepomis macrochirus*) [J]. *Arch Environ Contam Toxicol* 10: 519—530
- Bitton G, Rhodes K, Koopman B. 1996. Ceriodaph: An acute toxicity test based on *Ceriodaphnia dubia* feeding behavior [J]. *Environ Toxicol Chem*, 15 (2): 123—125
- Bodar C W M, Leeuwen C J V, Voogt P A, et al. 1988. Effect of cadmium on the reproduction strategy of *Daphnia magna* [J]. *Aquat Toxicol* 12: 301—310
- Borgmann U, Ralph K M, Norwood W P. 1989. Toxicity test procedures for *Hyalella azteca*, and chronic toxicity of cadmium and pentachlorophenol to *H. azteca*, *Gammarus fasciatus* and *Daphnia magna* [J]. *Arch Environ Contam Toxicol* 18: 756—764
- Brown V, Shurben D, Miller W, et al. 1994. Cadmium toxicity to rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* Walbaum and brown trout *Salmo trutta* L. over extended exposure periods [J]. *Ecotox Environ Safe* 29: 38—46
- Buhl K J, Hamilton S J. 1991. Relative sensitivity of early life stages of arctic grayling, coho salmon, and rainbow trout to nine inorganics [J]. *Ecotox Environ Safe* 22: 184—197
- Canton J H, Slooff W. 1982. Toxicity and accumulation studies of cadmium (Cd^{2+}) with freshwater organisms of different trophic levels [J]. *Ecotox Environ Safe* 6: 113—128
- Carrier R, Beiting T L. 1988. Reduction in thermal tolerance of *Notropis lutrensis* and *Pimephales promelas* exposed to cadmium [J]. *Water Res* 22 (4): 511—515
- Carroll J J, Ellis S J, Oliver W S. 1979. Influences of hardness constituents on the acute toxicity of cadmium to brook trout (*Salvelinus fontinalis*) [J]. *Bull Environ Contam Toxicol* 22: 575—581
- Chapman G A. 1978. Toxicities of cadmium, copper and zinc to four juvenile stages of chinook salmon and steelhead [J]. *Trans Am Fish Soc* 107: 841—847
- Chapman G A. 1975. Toxicity of copper, cadmium and zinc to Pacific Northwest salmonids [R]. Interim Report Task 002 ROAP 10CAR. USEPA, Corvallis, Oregon, 1—27
- Conway H L. 1978. Sorption of arsenic and cadmium and their effects on growth, micronutrient utilization and photosynthetic pigment composition of *Asterionella Formosa* [J]. *J Fish Res Board Can* 35: 286—294
- Crisinel A, Delaunay L, Rossel D, et al. 1994. Cyst-based ecotoxicological tests using anostracans: comparison of two species of *Streptocephalus* [J]. *Environ Toxicol Water Qual* 9 (4): 317—326
- Cusimano R E, Brakke D E, Chapman G A. 1986. Effects of pH on the toxicities of cadmium, copper and zinc to steelhead trout (*Salmo gairdneri*) [J]. *Can J Fish Aquat Sci* 43: 1497—1503
- Davies P H. 1976. Use of dialysis tubing in defining the toxic fractions of heavy metals in natural water. In: Andrew R W, et al. (eds), *Toxicity to Biota of Metal Ions in Natural Water* [M]. Windsor, Ontario: International Joint Commission, 110—117
- Diamond J M, Koplisch D E, McMahon J I, et al. 1997. Evaluation of

- the water-effect ratio procedure for metals in a riverine system [J]. *Environ Toxicol Chem*, 16 (3): 509–520
- Dutta T K, Kaviraj A. 2001 Acute toxicity of cadmium to fish *Labeo rohita* and copepod *Diaptomus forbesi* pre-exposed to CaO and $KMnO_4$ [J]. *Chemosphere* 42: 955–958
- Eaton J G, McKim J M, Holcombe G W. 1978 Metal toxicity to embryos and larvae of seven freshwater fish species-I cadmium [J]. *Bull Environ Contam Toxicol* 19: 95–103
- Eaton J G. 1974 Chronic cadmium toxicity to the bluegill (*Lepomis macrochirus* Rafinesque) [J]. *Trans Am Fish Soc*, 4: 729–735
- Ehabarawy M T, Welter A N, Robitseau R R. 1986 Relative sensitivity of three daphnid species to selected organic and inorganic chemicals [J]. *Environ Toxicol Chem*, 5: 393–398
- Gaikwad S A. 1989. Effects of mixture and three individual heavy metals on susceptibility of three freshwater fishes [J]. *Pollut Res* 8 (1): 33–35
- Garcia-Santos S, Fontinhas-Fernandes A, Wilson J M. 2006 Cadmium tolerance in the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) following acute exposure: Assessment of some ionoregulatory parameters [J]. *Environ Toxicol* 21: 33–46
- Ghosal T K, Kaviraj A. 2002 Combined effects of cadmium and composted manure to aquatic organisms [J]. *Chemosphere* 46: 1099–1105
- Ghosh T K, Kotangale J P, Krishnan oorthi K P. 1990 Toxicity of selective metals to freshwater algae, ciliated protozoa and planktonic crustaceans [J]. *Environ Ecol* 8 (1): 356–360
- Giesy J P J. 1977. Effects of naturally occurring aquatic organic fractions on cadmium toxicity to *Sinoccephalus serrulatus* (Daphniidae) and *Gambusia affinis* (Poeciliidae) [J]. *Water Res* 11: 1013–1020
- Guilhemino L, Lopes M C, Carvalho A P, et al. 1996 Inhibition of acetylcholinesterase activity as effect criterion in acute tests with juvenile *Daphnia magna* [J]. *Chemosphere* 32 (4): 727–738
- 国家环保总局. 1998 中国生物多样性国情报告 [M]. 北京: 环境科学出版社, 391–392
- SEPA. 1998 Report of Biodiversity in China [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 391–392 (in Chinese)
- Hall W S, Paulson R L, Hall L W J, et al. 1986. Acute toxicity of cadmium and sodium pentachlorophenate to daphnids and fish [J]. *Bull Environ Contam Toxicol* 37: 308–316
- Hansen J A, Welsh P G, Lipton J. 1999 Sensitivity of bull trout (*Salvelinus confluentus*) to cadmium and zinc in water characteristic of the Coeur d'Alene River Basin: acute toxicity report [R]. Prepared for USEPA, Region 10 by Status Consulting, Inc. Boulder, CO. 1–21
- Hansen J A, Welsh P G, Lipton J, et al. 2002. Relative sensitivity of bull trout (*Salvelinus confluentus*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to acute exposures of cadmium and zinc [J]. *Environ Toxicol Chem*, 21 (1): 67–75
- Hatakeyama S, Yasuno M. 1981a. The effects of cadmium-accumulated chlorella on the reproduction of *Moina macrocopa* (Cladocera) [J]. *Ecotox Environ Safe* 5: 341–350
- Hatakeyama S, Yasuno M. 1981b. Effects of cadmium on the periodicity of partition and brood size of *Moina macrocopa* (Cladocera) [J]. *Environ Pollut (Ser A)*, 26: 111–120
- Holcombe G W, Phipps G L, Fiandt J T. 1983. Toxicity of selected priority pollutants to various aquatic organisms [J]. *Ecotox Environ Safe* 7: 400–409
- Holcombe G W, Phipps G L, Marier J W. 1984. Methods for conducting snail (*Aplexa hypnorum*) embryo through adult exposures: Effects of cadmium and reduced pH levels [J]. *Arch Environ Contam Toxicol* 13: 627–634
- Holdway D A, Lok K, Seman M. 2001. The acute and chronic toxicity of cadmium and zinc to two hydra species [J]. *Environ Toxicol* 16: 557–565
- Hollis L, McGeer J C, McDonald D G, et al. 1999. Cadmium accumulation, gill Cd binding, acclimation, and physiological effects during long term sublethal Cd exposure in rainbow trout [J]. *Aquat Toxicol* 46: 101–109
- Jopik M, Askew A M, Foster R B. 1995. 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]. *Bull Environ Contam Toxicol* 54: 29–33
- Kamran W, Pascoe D. 2002. The toxicity of copper, cadmium and zinc to four different *Hydra* (Cnidaria: Hydrozoa) [J]. *Chemosphere* 47: 1059–1064
- Lee S I, Na E J, Cho Y O, et al. 1997. Short-term toxicity test based on algal uptake by *Ceriodaphnia dubia* [J]. *Water Environ Res* 69 (7): 1207–1210
- Lin H C, Dunson W A. 1993. The effect of salinity on the acute toxicity of cadmium to the tropical estuarine hemaphroditic fish, *Rivulus marmoratus*: A comparison of Cd, Cu, and Zn tolerance with *Fundulus heteroclitus* [J]. *Arch Environ Contam Toxicol* 25 (1): 41–47
- Loz H W, Williams R H, Fustich C A. 1978. Effects of several metals on smolting of coho salmon [R]. EPA-600/3-78-090. Washington DC: USEPA, 1–84
- Markich S J, Brown P L, Jeffrey R A, et al. 2003. The effects of pH and dissolved organic carbon on the toxicity of cadmium and copper to a freshwater bivalve: Further support for the extended free ion activity model [J]. *Arch Environ Contam Toxicol* 45(4): 479–491
- Martin T R, Holdich D M. 1986. The acute lethal toxicity of heavy metals to peracarid crustaceans (with particular reference to freshwater asellids and gammarids) [J]. *Water Res* 20 (9): 1137–1147
- McCarty L S, Henry J A C, Houston A H. 1978. Toxicity of cadmium to goldfish *Carassius auratus* in hard and soft water [J]. *J Fish Res Board Can* 35 (1): 35–42
- 孟伟, 张远, 郑丙辉. 2006. 水环境质量基准、标准与流域水污染物总量控制策略 [J]. *环境科学研究*, 19 (3): 1–6
- Meng W, Zhang Y, Zheng B H. 2006. The quality criteria, standards of water environment and the water pollutant control strategy on watershed [J]. *Res Environ Sci* 19 (3): 1–6 (in Chinese)
- Nagvi S M, Howell R D. 1993. Toxicity of cadmium and lead to juvenile

- red swamp crayfish, *Procambarus clarkii*, and effects on fecundity of adults [J]. Bull Environ Contam Toxicol 51: 303—308
- Niyogi S, Kent R, Wood C M. 2008 Effects of water chemistry variables on gill binding and acute toxicity of cadmium in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): A biotic ligand model (BLM) approach [J]. Comp Biochem Physiol Part C, 148: 305—314
- Palawski D, Hunn J B, Dwyer F J. 1985 Sensitivity of young striped bass to organic and inorganic contaminants in fresh and saline water [J]. Trans Am Fish Soc 114: 748—753
- Papoutsoglu S E, Abel P D. 1988 Sublethal toxicity and accumulation of cadmium in *Tilapia aurea* [J]. Bull Environ Contam Toxicol 41: 404—411
- Pardue W J, Wood T S. 1980 Baseline toxicity data for freshwater bryozoan exposed to copper, cadmium, chromium, and zinc [J]. J Tennessee Acad Sci 55: 27—31
- Pascoe D, Cran P. 1977a The effect of parasitism on the toxicity of cadmium to the three-spined stickleback *Gasterosteus aculeatus* L. [J]. J Fish Biol 10: 467—472
- Pascoe D, Matthey D L. 1977b Studies on the toxicity of cadmium to the three-spined stickleback *Gasterosteus aculeatus* L. [J]. J Fish Biol 11: 207—215
- Phipps G L, Holcombe G W. 1985 A method for aquatic multiple species toxicant testing: Acute toxicity of 10 chemicals to 5 vertebrates and 2 invertebrates [J]. Environ Pollut (Series A), 38: 141—157
- Pickering Q H, Henderson C. 1966 The acute toxicity of some heavy metals to different species of warm water fishes [J]. Air Water Pollut Int J 10: 453—463
- Prato E, Scardicchio C, Biandolino F. 2008 Effects of temperature on the acute toxicity of cadmium to *Corophium insidiosum* [J]. Environ Monit Assess 136 (1-3): 161—166
- Redeker E S, Blust R. 2004 Accumulation and toxicity of cadmium in the aquatic oligochaete *Tubifex tubifex*: A kinetic modeling approach [J]. Environ Sci Technol 38 (2): 537—543
- Reynoldson T B, Rodriguez P, Madrid M M. 1996 A comparison of reproduction, growth and acute toxicity in two populations of *Tubifex tubifex* (Muller 1774) from the North American great lakes and Northern Spain [J]. Hydrobiol 344: 199—206
- Rambough P J, Garside E T. 1982 Cadmium toxicity and accumulation in eggs and alevins of Atlantic salmon *Salmo salar* [J]. Can J Zool 60: 2006—2014
- Roux D J, Kempster P L, Truter E, et al. 1993 Effect of cadmium and copper on survival and reproduction of *Daphnia pulex* [J]. Water SA, 19 (4): 269—274
- Sauter S, Buxton K S, Macek K J, et al. 1976 Effects of exposure to heavy metals on selected freshwater fish: Toxicity of copper, cadmium, chromium and lead to eggs and fry of seven fish species [R]. EPA-600/3-76-105 Washington DC: USEPA. 1—74
- Schubauer-Berigan M K, Dierkes J R, Monson P D, et al. 1993. pH-dependent toxicity of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn to *Ceriodaphnia dubia*, *Pimphales promelas*, *Hyalella azteca* and *Lumbria helis variegates* [J]. Environ Toxicol Chem, 12: 1261—1266
- Spehar R L, Carlson A R. 1984. Derivation of site-specific water quality criteria for cadmium and the St. Louis River Basin, Duluth Minnesota [J]. Environ Toxicol Chem, 3: 651—665
- Stackhouse R A, Benson W H. 1988 The influence of humic acid on the toxicity and bioavailability of selected trace metals [J]. Aquat Toxicol 13: 99—108
- Stuhlbacher A, Bradley M C, Naylor C, et al. 1992 Induction of cadmium tolerance in two clones of *Daphnia magna* Straus [J]. Comp Biochem Physiol Part C, 101 (3): 571—577
- Stuhlbacher A, Bradley M C, Naylor C, et al. 1993 Variation in the development of cadmium resistance in *Daphnia magna* Straus: effect of temperature, nutrition, age and genotype [J]. Environ Pollut 80 (2): 153—158
- Sunderman F W J, Plowman M C, Hopfer S M. 1991 Embryotoxicity and teratogenicity of cadmium chloride in *Xenopus laevis*, assayed by the FETAX procedure [J]. Ann Clin Lab Sci 21 (6): 381—391
- Suresh A, Sivaram Krishna B, Radhakrishnaiah K. 1993. Effect of lethal and sublethal concentrations of cadmium on energetics in the gills of fry and fingerlings of *Cyprinus carpio* [J]. Bull Environ Contam Toxicol 51: 920—926
- Szebedinszky C, McGee J C, McDonald D G, et al. 2001. Effects of chronic Cd exposure via the diet or water on internal organ-specific distribution and subsequent gill Cd uptake kinetics in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Environ Toxicol Chem, 20 (3): 597—607
- Thompson J, Bannigan J. 2008 Cadmium: toxic effects on the reproductive system and the embryo [J]. Reprod Toxicol 25 (3): 304—315
- Tilton S C, Foran C M, Benson W H. 2003. Effects of cadmium on the reproductive axis of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) [J]. Comp Biochem Physiol Part C, 136: 265—276
- USEPA. 2001. 2001 update of ambient water quality criteria for cadmium [R]. EPA-822-R-01-001 Washington DC: USEPA. 1—35
- USEPA. 1985. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses [R]. PB 85-227049. Washington DC: USEPA. 1—98
- 王桂燕, 周启星, 胡筱敏, 等. 2007a 四氯乙烯和镉对草鱼的单一与联合毒性效应 [J]. 应用生态学报, 18 (5): 1120—1124
- Wang G Y, Zhou Q X, Hu X M, et al. 2007a Single and combined toxicity of perchlorethylene and cadmium to grass carp [J]. J App Eco 18 (5): 1120—1124 (in Chinese)
- 王桂燕, 胡筱敏, 周启星, 等. 2007b 镉对草鱼的急性毒性效应及SOD的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 28 (12): 1758—1761
- Wang G Y, Hu X M, Zhou Q X, et al. 2007b Acute toxicity for cadmium to grass carp and effects of cadmium on SOD [J]. J Northeast Univ (Natural Science), 28 (12): 1758—1761 (in Chinese)
- Wigginton A J, Birge W J. 2007. Toxicity of cadmium to six species in two genera of crayfish and the effect of cadmium on molting success [J]. Environ Toxicol Chem, 26 (3): 548—554
- Williams K A, Green D W J, Pascoe D. 1985. Studies on the acute

- toxicity of pollutants to freshwater macroinvertebrates: I. Cadmium [J]. *Arch Hydrobiol* 102 (4): 461-471
- Wren C D, Harris S, Hartup N. 1995. *Ecotoxicology of mercury and cadmium* / Hoffman D J, Ratner B A, Burton Jr G A, *et al.*, eds. *Handbook of Ecotoxicology* [M]. Boca Raton: Fl Lewis Publ, 392-423
- 杨再福, 陈立侨, 陈华友. 2003. 重金属铜、镉对蝌蚪毒性的研究 [J]. *中国生态农业学报*, 11 (1): 102-103
- Yang Z F, Chen L Q, Chen H Y. 2003. Study on joint toxicity of copper and cadmium to tadpole [J]. *Chin J Eco-Agric* 11 (1): 102-103 (in Chinese)
- 张彤, 金洪钧. 1996. 美国对水生态基准的研究 [J]. *上海环境科学*, 15 (3): 7-9
- Zhang T, Jin H J. 1996. Study on water ecological criteria in the USA. [J]. *Shanghai Environ Sci* 15 (3): 7-9 (in Chinese)
- 张彤, 金洪钧. 1997. 丙烯腈水生态基准研究 [J]. *环境科学学报*, 17 (1): 75-81
- Zhang T, Jin H J. 1997. Water quality criteria of acrylonitrile [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 17 (1): 75-81 (in Chinese)
- 郑先云, 龙文敏, 郭亚平, 等. 2008. Cd²⁺ 对红裸须摇蚊 *Prosilocenus akanusi* 的急性毒性研究 [J]. *农业环境科学学报*, 27 (1): 86-91
- Zheng X Y, Long W M, Guo Y P, *et al.* 2008. Acute toxicities of Cd²⁺ on *Prosilocenus akanusi* (Diptera: Chironomidae) [J]. *J Agro-Environ Sci* 27 (1): 86-91 (in Chinese)
- 周启星, 罗义, 祝凌燕. 2007. 环境基准值的科学研究与我国环境标准的修订 [J]. *农业环境科学学报*, 26 (1): 1-5
- Zhou Q X, Luo Y, Zhu L Y. 2007. Scientific research on environmental benchmark values and revision of national environmental standards in China [J]. *J Agro-Environ Sci* 26 (1): 1-5 (in Chinese)
- 周启星, 王如松. 1997. 乡村城镇化水污染的生态风险及背景警戒值的研究 [J]. *应用生态学报*, 8 (3): 309-313
- Zhou Q X, Wang R S. 1997. Ecological risk and background warning values of water pollution from rural urbanization [J]. *Chin J Appl Eco* 8 (3): 309-313 (in Chinese)