

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20141203002

赵晓丽, 赵天慧, 李会仙, 等. 中国环境基准研究重点方向探讨[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(1): 18-30

Zhao X L, Zhao T H, Li H X, et al. Investigation on important directions of China Environmental Quality Criteria [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(1): 18-30 (in Chinese)

中国环境基准研究重点方向探讨

赵晓丽¹, 赵天慧¹, 李会仙¹, 霍守亮¹, 徐建¹, 冯承莲¹, 许宜平², 段小丽¹,
王铁宇³, 侯红¹, 孟伟¹, 吴丰昌^{1,*}

1. 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 北京 100012
2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室 北京 100085
3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室 北京 100085

收稿日期: 2014-12-3 录用日期: 2014-12-08

摘要: 环境基准是环境标准的科学依据, 在国家环境质量评价和风险管理体系中处于基础地位。它主要是依据特定对象在环境介质中的暴露数据, 以及与环境要素的剂量效应关系数据, 通过科学判断得出的, 涉及环境化学、毒理学、生态学、流行病学、生物学和风险评估等前沿学科领域。国家环境基准研究是一个长期的系统工程, 本文基于环境基准研究的学科特点和国际前沿, 结合国家科技需求和相关领域的研究现状, 综合分析并提出了未来中国环境基准研究的重点研究方向: 1) 环境基准的理论与方法学; 2) 环境基准基础数据库; 3) 基准目标污染物的筛选甄别和优先排序技术; 4) 水体营养物基准; 5) 生物测试与毒性评价技术; 6) 人体暴露评价理论与相关技术; 7) 环境基准的审核和校对; 8) 环境基准与标准转化理论及其对环境管理支撑技术。本文从环境基准学科发展的角度, 阐述了与环境基准研究紧密相关的 8 个重点研究方面的国内外研究进展、关键科学问题以及未来重点研究内容。同时指出, 这些重要的研究方向是环境基准研究的根本, 未来环境基准的长期战略发展必将是在各个重要方向长足发展的基础之上, 环境基准研究也必将带动这些方向的共同蓬勃发展, 为环境地球化学、毒理学、生态学等学科领域发展注入活力。

关键词: 环境基准; 理论方法学; 污染物筛选甄别; 生态功能分区; 毒性技术; 暴露评价; 风险评估

文章编号: 1673-5897(2015)1-18-13 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Investigation on Important Directions of China Environmental Quality Criteria

Zhao Xiaoli¹, Zhao Tianhui¹, Li Huixian¹, Huo Shouliang¹, Xu Jian¹, Feng Chenglian¹, Xu Yiping²,
Duan Xiaoli¹, Wang Tiejyu³, Hou Hong¹, Meng Wei¹, Wu Fengchang^{1,*}

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

基金项目: 国家自然科学基金项目(41222026; 21007063); 环境保护公益性行业科研专项(201009032)

作者简介: 赵晓丽(1981-), 女, 副研究员, 研究方向为水环境基准、磁性纳米材料环境行为研究, E-mail: zhaoxiaoli_zxl@126.com;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: wufengchang@vip.skleg.cn

ences, Beijing 100085, China

Received 3 December 2014 accepted 8 December 2014

Abstract: Environmental quality criteria (EQC) are the scientific basis to formulate environmental quality standards, which are the foundation of the national environmental quality assessment and risk management. It involves in the frontier discipline field of environmental chemistry, toxicology, ecology, epidemiology, biology and risk assessment. National EQC are a long-term systematic project. In the present study, key research directions of the future EQC research of China were comprehensively analyzed and pointed out based on the subject characteristics and international frontiers of EQC research combined with the research status of the national science and technology demand and the related areas. The future research direction of Chinese EQC include: 1) theory and methodology of EQC; 2) basic database of EQC; 3) screening of target pollutants and priority ordering techniques; 4) water nutrient criteria; 5) bioassay and toxicity evaluation technology; 6) human exposure assessment theory and related technologies; 7) proofreading of EQC; 8) mechanism for transformation of EQC into environmental standards and the environmental management supporting technology. In the present investigation, the research progresses, scientific questions and future key research contents of 8 research direction closely related to EQC were expounded from the point of the development of EQC. The article pointed out that these important research directions were the fundament of EQC, and the long-term strategic development of the future EQC is bound to be built on the basis of considerable development of various important research directions. EQC will lead to the common flourish development of these directions, injecting vigor into the development of environmental geochemistry, toxicology, ecology and other fields.

Keywords: environmental quality criteria; theory and methodology of environmental quality criteria; screening of target pollutants techniques; eco-functional regionalization; toxicity test technology; exposure assessment; risk assessment

环境基准是指污染物对生态系统和人群健康不产生不良或有害效应的最大限值^[1-2]。环境基准研究属于自然科学研究范畴,它强调“以人(生物)为本及人与自然和谐共处的理念,是科学理论上人与自然“希望维持的标准”。环境基准按照环境介质的不同可分为水环境基准、土壤环境基准和大气环境基准;按照作用对象(或保护对象)的不同可分为健康基准(对人体健康的影响)、生态基准(对生物及使用功能)、物理基准(对能见度、气候等的影响)和感官基准(防止不愉快的异味)等^[3-4]。

环境基准的核心是剂量效应关系。环境基准的推导过程是利用污染物在环境中的含量分布水平、对生态环境和人体健康的效应,在大量毒性数据的基础上,利用风险评估的方法获得基准值。例如,健康基准根据致癌增量和选定的致癌风险水平(如 10^{-6})、在剂量-效应评价的基础上进行综合风险评价获得的限值。同样保护生态系统安全及使用功能的基准是为了保护生态系统中的生物多样性及自然环境介质的使用功能,通过开展毒性效应分析,对生态

安全(保护水体 95% 以上水平的物种数量免受污染物的毒害)进行风险评估的基础上获得的浓度限值^[5-7]。

环境基准具有 3 个显著的特点:科学性、基础性和战略性^[4]。科学性:环境基准是在大量的污染物含量和毒性数据的基础上,通过科学判断得出的阈值,是保护人体健康和环境安全的科学依据;环境基准是国际新兴的前沿交叉学科,是多学科最新研究成果的综合集成^[8]。基础性:环境基准在国家环境治理评价和风险管理体系中处于基础地位,科学合理的环境基准体系是实现有效环境监管和环境保护的基础,与环境监测与监控、应急事故处置、污染控制技术、风险管理政策和法律法规等紧密相关。战略性:环境基准是国家环境保护的“家底”,对保障国家环境安全和人体健康具有重要的战略意义,为国家的经济社会可持续发展和生态文明建设提供了科技支撑。

环境基准的研究是一个综合的交叉学科,属于自然科学的研究范畴,它是在环境化学、毒理学、生

态学、流行病学、生物学和风险评估等多个前沿学科领域发展到一定程度的基础上,为了适应环境保护和管理的需要而产生的新兴领域。因此,环境基准的长足发展必须建立在这些学科多个研究方向发展的基础之上,总结起来主要有以下几个方面:1) 环境基准的理论与方法学是科学确定基准的根本途径,不同保护对象和环境介质的理论和方法学具有明显的差异性,正是理论方法学的突破带来了环境基准研究中质的飞跃;2) 构建环境基准基础数据库,形成以毒理学数据为核心的系列基础数据库和网络共享平台;3) 发展基准目标污染物的筛选甄别和优先排序技术,筛选毒性强、难降解、残留时间长、在环境中分布广的污染物,形成优控污染物清单;4) 针对我国水体富营养化突出的问题,优先开展营养物基准的研究;5) 发展生物测试与毒性评价技术,获取适宜可靠的生物毒性数据,提高环境基准的准确度;6) 围绕保护人体健康基准研究,发展人体暴露评价技术;7) 为提高环境基准的可靠性和实用性,发展环境基准的审核和验证技术;8) 促进环境基准与环境标准的衔接,在环境管理中发挥更大的作用,开展环境基准与标准转化研究。

总体来说,我国的环境基准研究还处于起步阶段,迫切需要围绕与环境基准研究紧密相关的研究方向上的放矢地开展研究工作,在借鉴发达国家环境基准先进经验和研究成果的基础上,立足于我国国情和区域特征(污染特征、生物物种特征、暴露参数等),逐步构建符合我国的区域特征和实际国情的国家环境基准体系,为环境保护和社会经济可持续发展提供科技支撑。

1 我国环境基准研究的重要发展方向

1.1 环境基准的理论与方法学

环境基准理论与方法学是科学确定基准的根本途径。同一污染物在不同环境介质中对不同的保护对象具有不同的环境基准值,所依据的方法学和基础数据也不相同。从美国和欧盟水标准的修订历史中不难发现理论和方法学的改进是促进基准修订中质的飞跃的根本动力,如1985年基准制定方法学的突破,奠定了美国水质基准的框架体系^[8]。国家环境基准的框架体系也是以环境介质为主线进行的,主要分为水环境基准、土壤环境基准和空气环境基准。本文就按照环境介质,对环境基准制定的理论方法学做一介绍。

水环境基准: 水环境基准根据保护对象不同主

要可分为保护水生生物及其使用功能基准和保护人体健康基准。国际上主流的保护水生生物基准方法均是基于生态风险评估技术,如美国采用生态风险方法评估污染物的潜在危害^[8];欧盟、加拿大、荷兰、丹麦、南非、澳大利亚和新西兰等国家和组织则把风险评估技术直接融入水质基准方法学中^[9-11]。推导基准主流的计算方法主要有评估因子法和统计外推法,其中统计外推法以物种敏感度分布曲线法(SSD曲线法)为目前国际主流方法^[12-14]。保护人体健康基准针对污染物类别的不同,根据污染物的毒理学效应,如急性毒性、慢性毒性以及生物累积性等,可具体分为致癌和非致癌效应基准,是基于毒性外推和人体流行病学的研究而得出的结论。保护人体健康基准值的推导主要综合了毒理学、暴露评价以及生物累积3方面的内容。开展毒性效应分析要开展污染物的急性、亚急性和慢性毒性、发育、生殖以及神经毒性方面的毒性实验,以及污染物的致癌、致畸、致突变资料,主要是基于污染物的剂量-效应关系展开的,通过剂量效应关系的无观察有害作用水平(NOEL)以及最低观察有害作用水平(LOAEL)等相关参数可以推导基准剂量,并最终通过多参数模型计算人体健康基准值^[7]。

近年来,我国的科研工作者在水质基准理论方法学开展了较多的研究^[15-16],分析了我国生物区系特征并提出水质基准推导的种选择和数据要求^[17-18],结合我国环境特征推导了多种污染物质的水质基准,结合我国环境特征推导了双酚A、硝基苯、氯酚等多种污染物质的水基准^[12,19-21]。在模型预测方面,取得了一些在国际上有一定影响力的成果,主要包括:使用生物配体模型(biotic ligand mode, BLM)推导重金属基准,温度、溶解性有机质、硬度等水环境条件对重金属类污染物毒性作用影响较大^[22-25]。美国国家环境保护局(US EPA)在2007年新修订的铜的水质基准中,已经开始使用BLM来推导铜的水质基准,考虑了各种水质参数以及不同形态铜的生物有效性对水生生物毒性的影响^[22];组织残留基准是一种简单的使用组织浓度描述毒性反应的方法,避开了一些环境影响因素,基于组织残留基准的方法,直接将生物累积量与毒性反应联系起来,降低了由于物种和环境因素差异导致的不确定性。美国和加拿大都提出了组织残留基准的概念,推荐用于保护以水生生物为食的野生生物组织中的污染物最大残留浓度^[12,17-27],并已经开展了部分污

染物的保护野生生物组织残留基准的研究,包括有机磷杀虫剂、甲基汞、多氯联苯(PCB)、滴滴涕(DDT)、多溴联苯醚(PBDE)等^[28-33];采用模型预测的方式,对部分污染物的毒性进行预测,考虑到动物保护组织对动物尤其是濒危物种和稀有动物的保护要求,弥补部分污染物毒性数据的缺失,US EPA 发展了一种采用种间关系预测(interspecies correlation estimates, ICE)模型的方法对基准展开研究,使用数据库中现有的毒性数据,对其进行整合和汇编,建立相应的数据库,对未知物种或数据量较少物种的毒性数据进行预测,从而避免了对实验动物的伤害^[34-37];此外,定量结构活性相关模型(QSAR)对重金属的毒性预测已经取得了很好的结果^[38-40]。

土壤环境基准:针对不同的保护对象,土壤环境基准分为保护人体健康的土壤基准、保护生态受体的土壤基准、保护地下水的土壤基准和保护初级农产品土壤基准^[41-43]。采用基于风险方法制订的区域性和场地性土壤污染危害临界基准,是制订区域土壤污染筛选值和场地污染危害临界值的主要依据。按照不同的土壤基准类型,在保护人体健康土壤基准方面,各国均采用人体健康风险评估的方法制定保护人体健康的土壤基准,主要包括文献数据的收集和评价、数据的选择、土壤生态基准的计算及基准值的验证等。但由于各国每种用地方式下的默认暴露场景、考虑的暴露途径、暴露和污染物迁移模型及各类参数不同,导致各国土壤基准值出现几个数量级上的差异。在保护生态土壤基准方面,各国制定土壤生态基准的步骤基本也基本类似,差异体现在考虑的生态受体类型、文献数据的筛选原则、测试的终点(无可见效应浓度 NOEC 或最低可见效应浓度 LOEC)、生态毒性数据库、保护的级别、数据外推使用的具体方法(SSD 曲线、评价系数、平衡分配法、QSAR 法、证据权重法等)等。由于生态系统本身的复杂性以及各国对生态保护的认知程度及赋予的重要性不同,与人体健康风险评估技术相比,各国生态风险评估技术发展相对滞后且参差不齐。美国于 1998 年发布了基于生态风险评估制定土壤生态基准的技术导则^[44]。目前欧盟国家中只有德国、芬兰和荷兰制定了本国的生态风险评估技术导则^[44-48]。

大气环境基准:按作用对象的不同可分为人体健康基准(对人群健康的影响)、生态基准(对动植物及生态系统的影响)和物理基准(对材料、能见度、气候等的影响)。人体健康基准主要依赖于流

行病学和毒理学研究成果,目前空气基准都是在设定基本人体暴露假设值的基础上,通过采用健康风险评估程序进行估算的,包括动物毒性外推或人体流行病学研究,包括致癌和非致癌效应。美国科学院首次确定了健康风险评估的四阶段法:危害鉴别、剂量-效应评估、暴露评估和风险表征,在考虑多个参数后根据剂量-效应关系推导得出基准值。基准的推导方法,随着风险评价和健康风险评价研究的发展,也有所改变。在致癌风险评价中,量化致癌风险的低剂量外推法取代了线性多级模型。在非致癌风险评价中,倾向于使用更多的统计模型来推导基准值,而不是传统的基于无观察有害作用水平(NOAEL)的方法。在数据选择上,一般选择空气毒害物的动物毒性数据推导。效应方面,致癌和非致癌性终点不同,当使用致癌效应作为临界终点时,空气基准是以一组与特定增量生命期风险水平相关的浓度表示的。对于致癌物质,基准是指人体暴露特定污染物时可能增加 10^{-6} 个体终生致癌风险的空气浓度,而不考虑其他特定来源暴露引起的额外终生致癌风险,基准值一般用单位风险因子(unit risk factors, URF)或单位风险估计值(unit risk estimate, URE)表示。当以非致癌效应作为临界终点时,基准反映的是“非效应”水平评价。对于非致癌物,估算不对人体健康产生有害影响的大气浓度,基准值一般用参考浓度(reference concentration, RfC)表示。到目前为止,US EPA 仅仅对少数化学物质列出空气质量基准值 RfC,其他毒害物质基本上是采用参考剂量度(reference dose, RfD)值^[41]。欧共体从 1980 年起逐步颁布了一些空气污染物浓度的“限制值”和“建议值”指标。“限制值”为保护人体健康而不得超过的浓度值;“建议值”是作为长期的人体健康和环境保护指标,以及为各成员国所决定的某些特殊区域而规定的指标。加拿大、澳大利亚、芬兰以及日本等国已相继制定了部分大气污染物的环境基准值,世界卫生组织也对几种空气污染物提出了指导值^[46-52]。

基于目前我国环境基准的研究现状和存在的问题,未来我国环境基准理论与方法学研究的主要内容包括:①建立适合我国基本国情的、以生物有效性、有毒有害物质环境迁移特性、生态毒性与风险评估等为主要依据的环境基准制定理论与方法体系。②污染物特定受体和毒性终点的筛选。对于一些新型有毒有机污染物,尤其是对生物体有内分泌干扰效应的污染物(如雌激素类物质),其毒性终点的选

取应该跟污染物的毒性作用机制结合起来,充分考虑其繁殖、发育以及遗传等毒性作用。③将毒性预测模型纳入到基准研究中。采用生物配体模型(BLM)、种间关系预测模型(ICE)、定量结构活性相关模型(QSAR)等将在基准制定过程中发挥越来越重要的作用。

1.2 环境基准基础数据库及共享平台

基础数据是环境基准研究的基础和前提。我国目前尚未建立能够支撑我国环境基准研究的基础数据库和共享平台。世界各国都非常重视基础数据调查和整编工作,美国投入了大量的人力物力用于ECOTOX 毒性数据库的建设和定期的更新工作,该数据库收集和整理了目前国际上最新和最全面的不同类型污染物和不同生物物种的生物毒性数据,这些基础性数据不但奠定了美国在国际环境基准研究中的领先地位,同时也是众多国家进行环境基准研究乃至环境科学研究的重要数据来源。目前我们国家基准研究的开展很大程度上还依赖于国外发达国家和组织的毒性数据库。以水环境基准研究为例,基础数据的获取基本是选用国外的基础数据(如美国ECOTOX 毒性数据库(<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>)和国际农药行动联盟 PAN 农药数据库(<http://www.pesticideinfo.org>))。我国过去开展了大量的环境科学方面的相关研究,文献资料也相对丰富,但缺乏系统地收集和整理;数据编研过程缺乏相应的国家标准技术规范,同时由于数据的调查、整理、编辑和实地获取颇为耗时,国内相关工作极少,这些已成为制约我国环境基准发展的瓶颈。我国的环境基准基础数据库的研究尚处于起步阶段,关于水环境基准研究中物种调查、典型污染物的环境行为、毒性数据等数据资料是环境基准研究中的基础和关键,而这些资料的编辑和整理目前基本处于空白。

水环境基准基础数据的调查和整编主要包括以下研究内容:1) 重点流域生物区系基础数据。生物和人是环境基准的保护对象,因此基准的制订是以本国的生物区系特征为基础的,不同地区的生物区系不同,选取的代表性生物以及毒理特征有很大差别,污染物的毒性效应不同,所制订的基准值也会不同,根据特定地区的生物区系特点制订相应的基准才会对生态系统进行科学合理的保护^[52-54]。2) 典型水体基本物理、化学和生物数据。水体理化参数是水质基准研究的量化的指标,对水质基准制订有重要影响。建立水体基本物理、化学和生物基础

数据库是国际上在营养物基准及其他水质基准制订过程中首先开展的重点工作。美国环境保护局在整编这些数据的时候,系统考虑了数据的采样站点、指标的分析方法、实验室质量控制、时间周期、指标代表性以及提供数据的机构等,对数据进行系统归类和删减,最终建立起完善的水体基本物理、化学和生物基础数据库^[55-62]。3) 典型污染物含量分布、化学和环境行为数据。污染物含量水平是环境基准研究的重要内容,我国典型污染物的含量分布的基础数据一般都相对单一和分散。而关于几大类典型污染物,包括化学品、重金属、有机污染物和新型污染物在中国主要水体中的分布规律以及生物化学行为的调查和系统整理,目前国内还没有专门的数据库能够进行这方面数据的检索。4) 污染物水生生物毒理数据。污染物的毒性数据是环境基准研究的核心,我国目前环境基准研究在很大程度上参考了发达国家长期生态基准毒性研究数据,但这些数据不能完全反映中国水生生物保护的要求,必须开展相关研究工作。

1.3 环境基准目标污染物的筛选甄别和优先排序技术

我国环境基准研究起步较晚,相对于环境标准和管理表现出滞后性。由于化学污染物种类繁多,应优先筛选出一些毒性强、难降解、残留时间长、在环境中分布广的特征污染物优先进行控制。因此在借鉴别国的环境基准研究成果的同时,应结合我国的污染特征确定优控污染物清单。在重点考虑高环境暴露的常规污染物的同时应关注一些新兴污染物,如内分泌干扰物、持久性有机污染物和纳米污染物,以及可能引起重大区域污染事件的工业化学品等。我国环境基准目标物质风险筛查的总体思路是在风险评估和环境综合评估的基础上,筛查出风险相对较高的毒害物质作为环境介质中优先管理的目标(技术路线见图1)。

美国、加拿大、欧盟、荷兰、澳大利亚和日本等国家和组织先后开展了优先污染物筛选和排序研究,如美国优先污染物筛选和排序名单包括了129种水环境优先污染物,后来又补充了80种^[63-65]。根据优先污染物的理化性质和生物效应,如溶解性、降解性、挥发性、正辛醇-水分配系数、环境归趋等,将129种优先污染物分成十大类。根据优先污染物所具有的持久性和生物积累性,将优先污染物分为5级。根据分类分级数据,选定并推荐优先监测的采样对

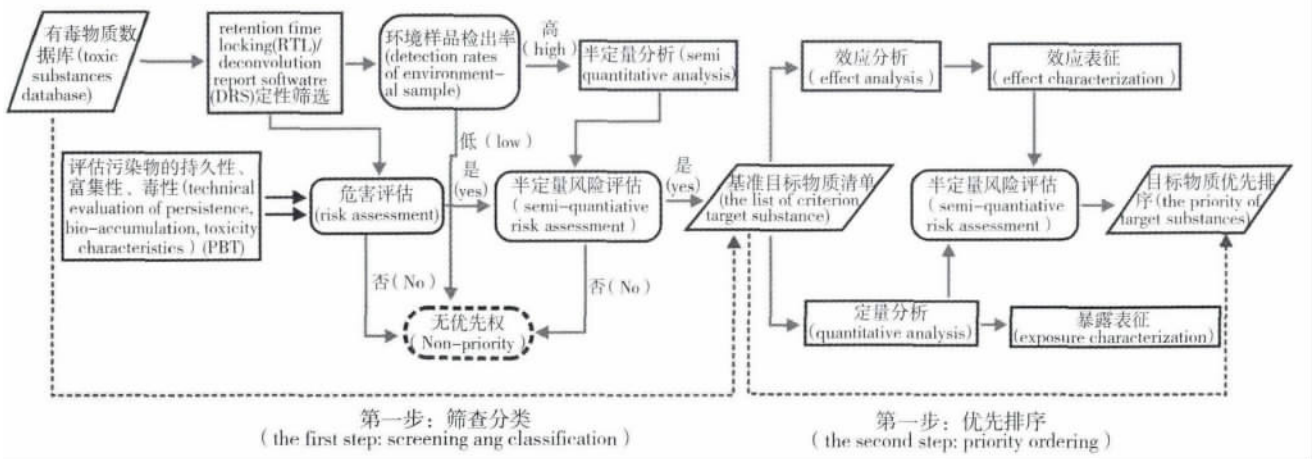


图 1 基准目标物质风险筛查与优先排序的总体思路^[41]

Fig. 1 General thought of screening of target pollutants and priority ordering^[41]

象。欧盟采取了 CHIAT(The Chemical Hazard Identification and Assessment Tool) 方案筛选水框架指令优先污染物,据此在 1999 年提出了欧盟水环境优先污染物推荐名单。2011 年的第 2455/2001/EC 号决议在此基础上提出了第一批水环境优先有害物质名单。荷兰采用经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)提出的污染物筛选程序,依据环境浓度和无效应浓度,定量排序和确定优先污染物,并为此开发了 USES 的软件。中国环境优先污染物筛选与排序名单主要是针对水环境,与美国和欧盟相比,尚不成系统,而且指标的选取停留在已列入国家标准的污染物,难以满足当前新的环境问题(如地域性不同而不同,时代性不同而不同,社会经济发达程度与环境承载力相关关系的不同而不同)的需要。由于我国现实情况与美国和其他国家差异较大,而且优先监测污染指标甄选程序的应用范围相对较小,因此需对相关工作程序进行适当修正与简化。

污染物的环境与健康危害性评估和风险性评估是污染物筛选的核心。不同的优先筛选方案采用的评估方法也是不同的。内容上看,大致可以分为危害性评估和风险性评估两大类。前者是考虑化学品固有的环境危害性和健康危害性,但是不考虑其在环境中的水平和暴露情况,因此只是部分反映污染物的潜在风险。而风险性评估则是在危害性评估的基础上进一步考虑污染物在环境中的存在方式、水平和转化等,有时还结合特定的暴露途径,分析污染物的健康风险和生态风险。优先污染物的筛选原则包括:1)

具有较大的生产量(或排放量)较为广泛地存在于环境中;2) 毒性效应大的化学物质;3) 在水中难于降解,有生物体积累性和水生生物毒性的污染物;4) 国内已经具备一定基础条件,且可以监测的污染物;5) 采取分期分批建立优先控制污染物名单的原则。

结合基准目标污染物筛选的研究现状和存在的问题,下一步的研究主要从以下几个方面展开:1) 基于化学品毒性的污染物优先筛选排序;2) 基于生产量、进口量、使用量的潜在环境化学优先污染物筛选排序;3) 基于污染源排放监测的环境化学优先污染物筛选排序;4) 基于严重污染地点监测数据的环境化学优先污染物筛选排序;5) 基于综合数据和部分排序理论(partial order theory, POT)及随机线性外推法(random linear extension, RLE)的 POT/RLE 方法的环境化学优先污染物筛选排序。

1.4 营养物基准研究

我国目前水体富营养化比较突出,对氮磷等营养物基准比较关注,营养物基准的研究对我国湖泊河流保护尤为重要。与一般污染物不同,氮、磷等营养物质对水生生物的毒理作用相对较小,其危害主要在于促进藻类的生长而暴发水华,从而导致水生生物的死亡和水生态系统的破坏。因此,防止水体富营养化的营养物基准主要是基于生态学原理和方法来制定的,而不依赖生物毒理学方法。富营养化的发生不仅与水质条件相关,同时也与水体的地理和气象条件以及自身的水力条件相关,因此也不采用一个通用的营养物基准来反映不同区域的水体富营养化条件。需要根据不同区域的特点和不同类型的水体,制定具有针对性的营养物基准。因此,制定

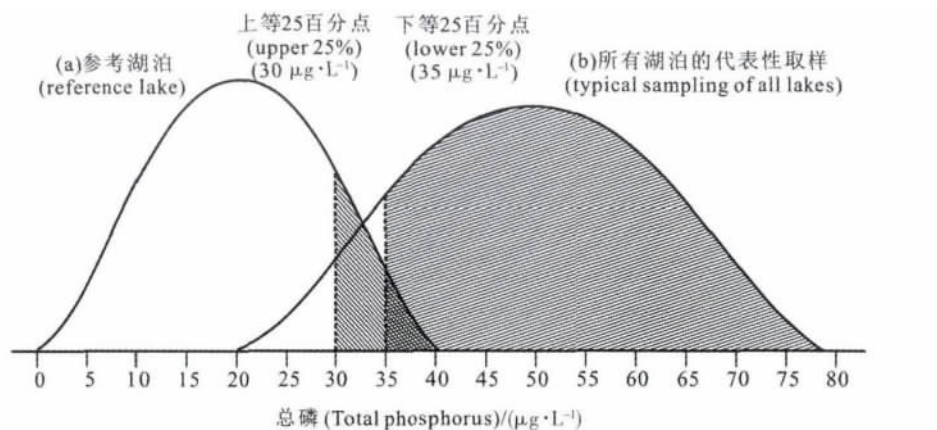


图2 利用统计学方法确定营养物基准的示意图^[41]

Fig. 2 The schematic diagram of formulating water nutrient criteria using statistical method^[41]

营养物基准的首要工作就是确定营养物基准的适用区域单元,而研究表明水生态区是一种非常有效的空间单元。在同一生态区内,由于具有相似的气候、地形、土地利用等特征,水体生产力和营养状况与总磷、总氮、叶绿素 a、透明度等指标具有较好的相关性,这为营养物基准的制定奠定了基础。

美国在 1998 年确定了区域性营养物基准的国家战略,营养物基准分为湖泊、河流、河口海湾和湿地 4 种类型^[59-62]。以湖泊水库为例,首先是确定生态区内的参考湖泊的条件,对生态区内的参考湖泊进行现场调查,然后对参考湖泊的营养物水平进行统计分析,将上第 25 个百分点的对应的值作为基准推荐值。在实际情况中,如果参考湖泊数量不足,可以对所有湖泊进行统计分析,此时是将下第 25% 百分点分布作为营养状态基准值(图 2)。

结合我国在营养物基准方面的研究现状,未来营养物基准的重点研究内容主要包括:①我国水生态系统区域差异性研究;②基于区域差异的水体营养物生态分区技术研究;③我国不同区域参照水体综合评估技术方法研究;④水体营养物基准参照状态与基准值建立技术方法研究。

1.5 生物测试与毒性评价技术

水环境基准的核心是剂量效应关系。毒性数据的质量在很大程度上决定了水环境基准值的可靠性。获取适宜可靠的生物毒性数据的主要途径是开展生物测试实验及流行病学调查。目前世界各国都投入了大量的人力物力开展毒性测试实验,生物毒性测试和毒性评价技术也成为了国际的研究热点。目前污染物的毒性评价中一直采用急性和慢性生物毒性(生长抑制、重要生理指标改变以及死亡等)作

为测试终点,对其他生物学效应缺乏研究,因此毒性评价结果显示“安全”的污染物在一定程度上同样对水环境中生物存在生态风险^[66-70]。不同类型的污染物,其毒性效应机理存在显著差异。对于一些常规污染物,往往会对生物产生生长抑制、运动抑制、致死效应,毒性终点很容易判断;而对于一些新型的污染物,由于其毒性效应机理比较复杂,毒性效应终点很难判断,如一些内分泌干扰物,能够通过干扰生物体内激素的合成、分泌、转运等环节,进而影响机体的内环境稳定、生殖、发育及行为。同时,由于国家和地区不同生物种的差别相对较大,因此不同的国家和地区选择本地生物种作为实验生物种,将会有效地保护本地种安全。另外,国际上采用的通用实验生物种涵盖的相对不全面,一些食物链中物种缺乏,对污染物的毒性评价结果将在一定程度上存在生态风险,因此,不仅需要发展本地生物种,同时也需要增加食物链中具有重要地位的物种。

传统的毒理学研究对象主要针对生物个体,缺乏从种群、群落以及生态系统等宏观尺度水平上研究污染物的生物效应机制,而环境基准的保护目标是整个生态系统,因此从研究污染物对单物种的毒理效应,上升到污染物对种群、群落乃至整个生态系统的毒理效应,是环境基准发展的必然要求。此外,传统的环境污染物毒性评价一般使用脊椎动物、哺乳动物或藻类等动植物进行急性和慢性毒性实验来研究污染物的毒性效应,这些方法一般耗时较长,而且得出的实验结果往往不够精确,不能说明污染物的作用机制和原理。随着对毒性机制认识的不断深入,一些现代技术方法如细胞彗星实验、微核实验、基因探针、分子生物标记物等将逐渐被采用,通过快

速检测污染物与生物靶分子 DNA、RNA 以及细胞和器官的变异特征指标来研究污染物的毒性效应将是研究毒理效应的必然手段。另外,考虑到动物保护组织对物种的保护要求,为了尽量避免受试物种受到迫害,用模型进行毒性数值预测的手段也逐渐被人们接受。模型预测的方式也将是基准研究的重要手段之一。

根据水质基准的保护目标,为获得科学可靠、适宜我国生态特征的水质基准,生物测试和毒性评价技术主要研究内容包括:①分阶段开展代表性实验生物的实验室培育、繁殖和模式化技术,建立以我国本土生物为核心的活体毒性(毒理)评估方法和测试指标体系。构建污染物的生物活体测试技术,发展和构建受试生物和相关生物标记物,筛选本地生物种,同时也增加食物链中具有重要地位的物种。筛选典型和新型污染物的早期诊断指标(如生物标志物),建立相应指标的监测分析方法,构建多水平(基因、分子、细胞、组织、个体、种群和群落等水平)、多指标(死亡率、生长发育、生殖等终点)和多效应(不同的靶标器官和毒理效应)的毒性指标体系。

1.6 人体暴露评价理论与相关技术研究

对于既定污染物的健康风险评价,由于其毒性是确定的,风险的大小主要取决于人体暴露污染物的剂量的多少。暴露评价(exposure assessment)是描述和评价人体暴露环境污染物的剂量、途径、方式等的过程。暴露评价是环境健康风险评价的关键技术环节,也是基准制定主要技术手段。暴露评价是遵照一定的技术规程,在对暴露浓度准确测量、暴露行为方式准确评价的基础上,应用一定的模型对暴露剂量进行定量的过程^[71-75]。暴露评价一直是环境健康风险评价和环境流行病学研究的重要组成部分,关于暴露测量、暴露模型、暴露参数等方面的研究也一直是国际上的热点。暴露评价包括4个关键技术环节,即暴露测量、暴露参数、暴露模型和技术规范。围绕这4个关键环节,人体暴露评价的主要研究内容包括:①准确定量人体暴露污染物的剂量,改进暴露的测量方法,发展个体暴露剂量评价方法;②评价人体对多途径多介质暴露污染物的剂量,研发生物标志物;③通过合理的暴露模型来估算和预测污染物的人体暴露剂量,为健康风险评价奠定基础;④暴露参数的准确定量是暴露剂量评价准确性的关键参数,也是暴露评价的关键技术基础;⑤建立暴露评价的技术规范。

当前人体暴露评价研究的难点和焦点主要集中于化合物的多途径暴露、多种化合物的联合暴露、历史暴露的定量估计和暴露评价的有效验证等方面。人体暴露评价未来的发展方面主要包括4个方面:①暴露定量的准确性。进一步研究基于个体的暴露测量技术、个体有效性暴露生物标志物评价技术和新方法(如时间-活动模式等),开发对多途径和多种化合物联合暴露的评价模型和方法以及暴露验证方法,不断提高暴露评价定量的准确性;②暴露评价时间范围的延伸。应用暴露再现评估方法、先进的模拟方法和新型的数理统计模型和方法等,实现对历史暴露的定量估计和对未来暴露的有效预测;③暴露评价空间范围的拓展。应用地理信息系统(GIS)和空间分析方法等方法,扩大暴露评价的地域尺度,实现基于群体的定量暴露评价,以为宏观决策服务;④暴露评价应用领域的拓宽。人体暴露评价除在环境健康风险评价和流行病学研究外,将逐渐在有毒有害化学品的安全性评价、突发性环境污染事故和自然灾害应急过程中发挥更为重要的作用。

1.7 环境基准的审核和验证研究

为了保证环境基准的准确性和科学性,必须对推导得到的基准值进行审核和验证。目前不同国家关于不同环境基准的推导方法和理论不完全相同,因而在最终的审核和校对方面也存在差异。下面以水质基准为例,介绍一下以美国为代表的国家在水环境基准审核与校正方面的情况:

水环境质量基准的审核内容主要包括:①监测时间的选择:通常选择1h作为急性浓度的监测时间,选择96h作为慢性浓度的监测时间;②超标浓度频率的确定:除了非常敏感的地方物种,不论在淡水或者海水中,如果某种物质的96h平均浓度超过基准连续浓度的次数平均每3年不多于1次,并且其1h平均浓度超过基准最大浓度的次数平均每3年不多于1次,那么就认为水生生物及其使用功能没有受到污染物不可接受的影响;③对所有数据及基准推导步骤的审核:优先选择那些对于敏感物种毒性数据拟合较好的模型所获得的基准值,这样才能尽可能地降低方法学本身的不确定性,以充分保护水生态系统中的敏感物种,最终达到保护整个生态系统结构和功能的目的。

水环境质量基准的验证内容主要包括:各模型间基准值及与物种毒性数据的比较:应将不同环境介质中通过不同拟合模型所推导的基准值分别与该

模型所采用物种的种平均急性或慢性值一一进行比较,判断各模型得出基准值的准确度和科学性。不同推导方法基准值的比较:应该根据污染物自身的物理化学特性、毒性作用机制、生物有效性等方面的信息,综合比较选择最优的方法来制定基准。环境基准与敏感物种毒性数据的比较:应优先选择敏感性物种或易感人群,设定这些敏感性生物或人群能够承受的污染物水平,也就同时保护了其他较不敏感物种的安全。环境基准与本地物种毒性数据的比较:应充分考虑到对本地特有物种或特定人群的保护。环境基准与暴露浓度或背景浓度的比较:通过对所获得基准值与环境介质中该污染物的暴露或背景浓度进行比较,可以判断所获得环境基准值对生物或人体的保护水平以及预测污染物对他们的潜在风险。若所获得的环境基准值低于大部分环境介质中污染物的浓度背景值,则应重新进行计算和审核。环境基准与污染物检测限值的比较:若无法保证获得的环境基准值大于污染物在环境介质中的检测限值,环境基准就失去实际的指导意义。基准审核和校对考虑的其他因素:一些环境参数如硬度、pH值、有机质含量、温度、碱度等对毒性值的影响应该加以考虑。

1.8 环境基准与标准转化技术

我国政府也越来越意识到依据符合我国环境特征的环境基准制订更加科学、合理、有效的环境标准的重要意义^[76-77]。美国、加拿大、澳大利亚等发达国家环境基准研究工作开展较早,在环境基准向环境标准转化机制和程序也较为成熟。图3为美国环境标准的制定模式,美国国家环保局(US EPA)负责组织制订并发布环境基准,州或保留部落环保部门

可结合当地条件修订或补充国家环境基准,以此为依据制订环境标准并负责监督实施,公众和地方组织通过听证参与此过程,同时,环境标准必须提交国家环保局进行审核,得到批准后方可实施^[7]。虽然不同国家体制和环境保护工作组织形式的差异,但是国外环境基准向环境标准转化具有一些共性特征:国家环境保护部门负责组织制订并发布环境基准信息;地方政府是制订和实施环境标准的主体;环境质量标准是环境基准与环境标准结合的桥梁;公众参与是环境标准制订的重要环节(图4)。

我国环境标准体系由环境质量标准、污染物排放标准、环境基础标准、监测分析方法标准和其他环境标准组成,分为国家环境标准和地方环境标准。在2014年4月修订2015年1月1日起实施的《中华人民共和国环境保护法》中,明确提出“国家鼓励开展环境基准研究”,这为环境基准向环境标准转化提供了法律依据。我国国土范围辽阔,国内自然条件、经济条件和技术条件区域差异较为显著,自然条件对环境基准的研究和确定有重要影响,经济和技术条件则是环境标准制订过程中的主要影响因素。发达国家在解决类似问题时较普遍采用的方法是环境标准颁布实施指南,指引包括标准的适用条件、豁免条件及豁免标准的替代方案等。结合我国实际情况,可在基于环境基准制订环境标准工作开展的同时,着手制订我国环境标准实施指引,以增强环境标准的适用性和可行性,论证建立地方和区域标准的条件,将建立较完善的地方-区域-国家多层次环境标准体系作为环境基准向环境标准转化研究工作的长期目标。

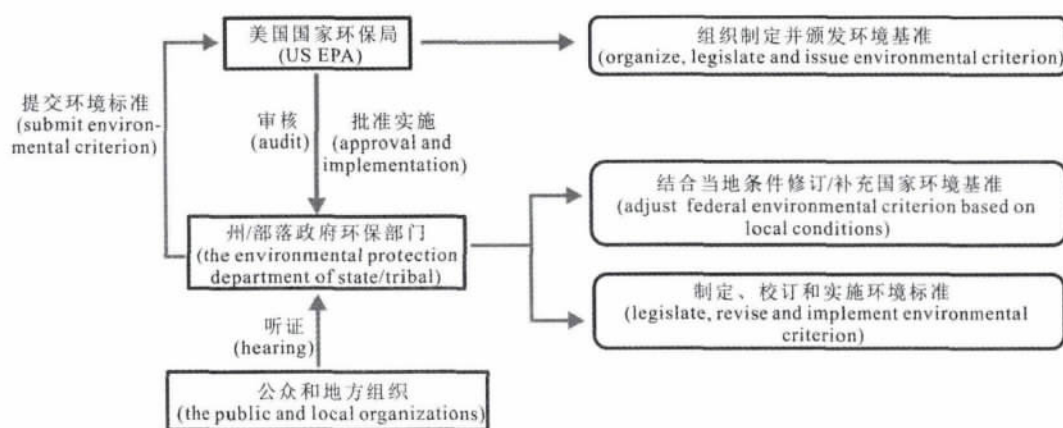


图3 美国环境标准制订模式^[77]

Fig. 3 Transformation process from environmental quality criteria to environmental standard in the US^[77]



图4 环境基准制订环境标准的一般步骤^[41]

Fig. 4 General step from environmental quality criteria to environmental standard^[41]

2 结语

环境基准是环境标准制定的科学依据,目前,我国已经启动了《地表水环境质量标准》(GB3838—2006)的修订工作,围绕标准主要指标科学确定基准是当前环境基准研究工作的重点。环境基准是大量基础性工作和基础数据的综合集成,在国家环境质量评价和风险管理中处于基础性地位。我国近几十年来在环境科学、毒理学、生物学和风险评估等方面取得的大量科研成果,为环境基准的长足发展奠定了基础。环境基准反映了环境化学、毒理学、生态学、流行病学、生物学和风险评估等前沿学科领域的最新科研成果,它的研究也不是一成不变,将随着诸多相关研究方向和学科的进步而不断更新。中国的环境基准研究任重而道远,与环境基准紧密相关的重要的研究方向既是建立科学的环境基准体系的切入口,也是未来环境基准研究的发展方向。环境基准的长期战略发展必将是建立在各个重要方向长足发展的基础之上,同时,环境基准研究也必带动这些方向共同蓬勃发展,为环境化学、毒理学、生态学等学科领域发展注入活力,对于我国的环境保护科研和管理工作具有深远的意义。

通讯作者简介:吴丰昌(1964—),男,研究员,博士生导师,环境基准与风险评估国家重点实验室主任。主要研究方向为环境基准与风险评估,天然有机质环境生物地球化学行为等。

参考文献(References):

[1] United States Environmental Protection Agency (US

EPA). Ambient Water Quality Criteria (series) [R]. Washington DC: US EPA, 1980

[2] Feng C L, Wu F C, Zhao X L, et al. Water quality criteria research and progress [J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55(6): 882–891

[3] 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: 1–4

Meng W, Wu F C. Introduction of Water Quality Criteria Theory and Methodology [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1–4 (in Chinese)

[4] 吴丰昌,孟伟,宋永会,等. 中国湖泊水环境基准的研究进展[J]. 环境科学学报, 2008, 28(12): 2385–2393

Wu F C, Meng W, Song Y H, et al. Research progress in lake water quality criteria in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(12): 2385–2393 (in Chinese)

[5] United States Environmental Protection Agency (US EPA). National Recommended Water Quality Criteria [R]. Washington DC: Office of Water Regulations and Standards, 1986

[6] United States Environmental Protection Agency (US EPA). National Recommended Water Quality Criteria [R]. Washington DC: Office of Water, Office of Science and Technology, 2013

[7] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Methodology for deriving ambient water quality criteria for the protection of human health [R]. Washington DC: Office of Water, Office of Science and Technology, 2000

[8] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses [R]. Washington DC: US EPA, 1985

[9] OECD. Guidance document for aquatic effect assessment [R]. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development (Hrsg.), 1995

[10] ECB. Technical guidance document on risk assessment – Part II [R]. Italy, Ispra: Institute for Health and Consumer Protection, 2003

[11] RIVM. Guidance document on deriving environmental risk limits in The Netherlands [R]. Bilthoven, The Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment, 2001

[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] 金小伟,雷炳莉,许宜平,等. 水生态基准方法学概述及建立我国水生态基准的探讨[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(5): 609–616
Jin X W, Lei B L, Xu Y P, et al. Methodologies for deriving water quality criteria to protect aquatic life (ALC) and proposal for development of ALC in China: A Review [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, 4(5): 609–616 (in Chinese)
- [14] Jin X W, Zha J, Xu Y P, et al. Derivation of aquatic predicted no-effect concentration (PNEC) for 2, 4-dichlorophenol: Comparing native species data with non-native species data [J]. *Chemosphere*, 2011, 84: 1506–1511
- [15] Wu F C, Meng W, Zhao X L, et al. China embarking on development of its own national water quality criteria system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44: 7992–7993
- [16] 冯承莲, 吴丰昌, 赵晓丽, 等. 水质基准研究与进展 [J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5): 646–656
Feng C L, Wu F C, Zhao X L, et al. Water quality criteria research and progress [J]. *Science China: Earth Science*, 2012, 42(5): 646–656 (in Chinese)
- [17] 苏海磊, 吴丰昌, 李会仙. 我国水生生物水质基准推导的物种选择初步研究 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(5): 506–511
Su H L, Wu F C, Li H X, et al. Species selection for deriving water quality criteria for protection of aquatic organisms in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(5): 506–511 (in Chinese)
- [18] Wang X N, Liu Z T, Yan Z G, et al. Development of aquatic life criteria for triclosan and comparison of the sensitivity between native and non-native species [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 260: 1017–1022
- [19] Yang S W, Yan Z G, Xu F F, et al. Development of freshwater aquatic life criteria for tetrabromobisphenol A in China [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 169: 59–63
- [20] Yan Z G, Zhang Z S, Wang H, et al. Development of aquatic life criteria for nitrobenzene in China [J]. *Environment Pollution*, 2012, 162(3): 86–90
- [21] Xing L, Liu H, Giesy J P, et al. pH-dependent aquatic criteria for 2, 4-dichlorophenol, 2, 4, 6-trichlorophenol and pentachlorophenol [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 441: 125–131
- [22] US EPA. Aquatic Life Ambient Freshwater Quality Criteria – Copper [R]. Washington DC: Office of Water Regulations and Standards Criteria Division, 2007
- [23] Feng C L, Wu F C, Zheng B H, et al. Biotic ligand models for metals – A practical application in the revision of water quality standards in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 10877–10878
- [24] Chen H, Zheng B H, Wu F C, et al. Dissolved organic carbon – A practical consideration in application of biotic ligand models in Chinese waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(23): 9835–9836
- [25] 吴丰昌, 孟伟, 曹宇静, 等. 镉的淡水水生生物水质基准研究 [J]. 环境科学学报, 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]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 24(2): 172–184 (in Chinese)
- [26] US EPA. Great Lakes Water Quality Initiative Criteria Documents for the Protection of Wildlife. Technical report, EPA/820/B-95/008. [R]. Washington DC: Office of Water, Office of Science and Technology, 1995
- [27] CCME. Canadian Tissue Residue Guidelines for the Protection of Wildlife Consumers of Aquatic Biota [R]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2000
- [28] Zhang R Q, Guo J Y, Wu F C, et al. Toxicity reference values for polybrominated diphenyl ethers: Risk assessment for predatory birds and mammals from two Chinese lakes [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, 229: 111–137
- [29] Zhang R Q, Wu F C, Li H X, et al. Toxicity reference values and tissue residue criteria for protecting avian wildlife exposed to methylmercury in China [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 223: 53–80
- [30] Steevens J A, Reiss M R, Pawlisz A V. A methodology for deriving tissue residue benchmarks for aquatic biota: A case study for fish exposed to 2, 3, 7, 8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin and equivalents [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2005, 1(2): 142–151
- [31] Beckvar N, Dillon T M, Read L B. Approaches for linking whole-body fish tissue residues of mercury or DDT to biological effects thresholds [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, 24(8): 2094–2105
- [32] Su H L, Wu F C, Zhang R Q, et al. Toxicity reference values for protecting aquatic birds in China from the effects of polychlorinated biphenyls [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, 230: 59–82
- [33] Su H L, Mu Y S, Feng C L, et al. Tissue residue guideline of \sum DDT for protection of aquatic birds in Chi-

- na [J]. Human and Ecological Risk Assessment ,2014 , 20(6) : 1629 – 1642
- [34] Raimondo S , Jackson C R , Barron M G. Web-based interspecies correlation estimation (Web-ICE) for acute toxicity: User manual version 3. 2 [R]. Washington DC: US EPA , Office of Research and Development , National Health and Environmental Effects Research Laboratory , 2013
- [35] Feng C L , Wu F C , Mu Y S , et al. Interspecies correlation estimation? Applications in water quality criteria and ecological risk assessment [J]. Environmental Science & Technology , 2013 , 47: 11382 – 11383
- [36] Dyer S D , Versteeg D J , Belanger S E , et al. Interspecies correlation estimates predict protective environmental concentrations [J]. Environmental Science & Technology , 2006 , 40: 3102 – 3111
- [37] 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: 1177 – 1183
- [38] Mu Y S , Wu F C , Chen C , et al. Predicting criteria continuous concentrations of 34 metals or metalloids by use of quantitative ion character – activity relationships – species sensitivity distributions (QICAR – SSD) model [J]. Environmental Pollution , 2014 , 188: 50 – 55
- [39] Wu F C , Mu Y S , Chang H , et al. Predicting water quality criteria for protecting aquatic life from physicochemical properties of metals or metalloids [J]. Environmental Science & Technology , 2013 , 47(1) : 446 – 453
- [40] Wu F C , Fang Y X , Li Y , et al. Predicted no – effect concentration and risk assessment for 17 – [beta] – estradiol in waters of China [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology , 2014 , 228: 31 – 56
- [41] 吴丰昌 , 孟伟. 中国环境基准体系中长期路线图 [M]. 北京: 科学出版社 , 2014: 9 – 14
- [42] 徐猛 , 颜增光 , 贺萌萌 , 等. 不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 [J]. 环境科学 , 2013 , 34(5) : 1667 – 1678
- Xu M , Yan Z G , He M M , et al. Human health risk-based environmental criteria for soil: A comparative study between countries and implication for China [J]. Environmental Science , 2013 , 34(5) : 1667 – 1678 (in Chinese)
- [43] 周启星 , 安婧 , 何康信. 我国土壤环境基准研究与展望 [J]. 农业环境科学学报 , 2011 , 30(1) : 1 – 6
- Zhou Q X , An J , He K X. Research and prospect on soil – environmental criteria in China [J]. Journal of Agro – Environment Science , 2011 , 30(1) : 1 – 6
- [44] US EPA. Soil Screening Guidance: User's Guide [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response , 1996
- [45] US EPA. Guidance for Developing Ecological Soil Screening Levels [R]. Washington DC: US EPA , 2005
- [46] 陈魁 , 董海燕 , 郭胜华 , 等. 我国环境空气质量标准与国外标准的比较 [J]. 环境与可持续发展 , 2011(1) : 47 – 50
- [47] 李昕. 颗粒物环境空气质量基准 (译) [M]. 北京: 中国环境科学出版社 , 2008: 1 – 20
- [48] WHO. Air Quality Guidelines for Europe [R]. Geneva: World Health Organization , 1987
- [49] WHO. Air Quality Guidelines. Global update 2005 [R]. Geneva: World Health Organization , 2006
- [50] WHO. Air Quality Guidelines for Particulate Matter , Ozone , Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. Global update 2005. Summary of Risk Assessment [R]. Geneva: World Health Organization , 2006
- [51] Krzyzanowski M , Cohen A. Update of WHO air quality guidelines [J]. Air Quality , Atmosphere & Health , 2008 , 1(1) : 7 – 13
- [52] Goodyear C D , Edsall T A , Ormsby D , et al. Atlas of the spawning and nursery areas of Great Lakes fishes , vol. 2: Lake Superior [R]. Washington DC: Fish and Wildlife Service , 1982
- [53] Goodyear C D , Edsall T A , Ormsby D , et al. Atlas of the spawning and nursery areas of Great Lakes fishes , vol. 5: Lake Huron [R]. Washington DC: Fish and Wildlife Service , 1982
- [54] 孟伟 , 张远 , 郑丙辉. 水环境质量基准. 标准与流域水污染物总量控制 [J]. 环境科学研究 , 2006 , 19(3) : 1 – 6
- Meng W , Zhang Y , Zheng B H. The Quality criteria , standards of water environment and the water pollutant control strategy on watershed [J]. Research of Environmental Sciences , 2006 , 19(3) : 1 – 6 (in Chinese)
- [55] US EPA. National Strategy for the Development of Regional Nutrient Criteria (EPA-822-R-98-002) [R]. Washington DC: US EPA , 1998
- [56] US EPA. National Lakes Assessment: Technical Appendix , Data Analysis Approach [R]. Washington DC: US EPA , 2010
- [57] Carvalho L , Solimini A , Phillips G , et al. Chlorophyll reference conditions for European lake types used for intercalibration of ecological status [J]. Aquatic Ecology , 2008 , 42: 203 – 211
- [58] Poikane S , Alves M H , Argillier C. Defining chlorophyll – a reference conditions in European lakes [J]. Environmental Management , 2010 , 45: 1286 – 1298
- [59] US EPA. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual:

- Lakes and Reservoirs [R]. Washington DC: US EPA, 2000
- [60] US EPA. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Wetlands (EPA-822-R-07-004) [R]. Washington DC: US EPA, 2007
- [61] US EPA. National Strategy for the Development of Regional Nutrient Criteria (EPA-822-R-98-002) [R]. Washington DC: US EPA, 1998
- [62] US EPA. Nutrient criteria technical guidance manual: Rivers and streams (EPA-822-B-00-002) [R]. Washington DC: US EPA, 2001
- [63] 叶旌, 霍立彬, 章为静, 等. 美国饮用水化学候选污染物的筛选过程 [J]. 环境工程技术学报, 2009, 4(4): 346-352
Ye J, Huo L B, Zhang W J, et al. Screening procedure of drinking water contaminant candidate in US [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2009, 4(4): 346-352 (in Chinese)
- [64] NEPC (National Environment Protection Council). National Environment Protection (Assessment of Site Contamination) Measure Review [R]. Canberra: NEPC, 2005
- [65] US EPA. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment (EPA 2005/630/P-03/001F) [R]. Washington DC: US EPA, 2005
- [66] 马梅. 新的生物毒性测试方法及其在水生态毒理研究中的应用 [D]. 北京: 中国科学院研究所院, 2002: 9-11
Ma M. New biological toxicity test method and its application in water ecological toxicology research [D]. Beijing: The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2002: 9-11 (in Chinese)
- [67] US EPA. Policy for the development of water quality-based permit limitations for toxic pollutants [R]. Washington DC: US EPA, 1984
- [68] US EPA. Method guidance and recommendations for whole effluent toxicity (WET) testing [R]. Washington DC: Office of Water, US EPA 2000: 1-2
- [69] Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand. National water quality management strategy, Australian and New Zealand and guidelines for fresh and marine water quality [S]. Canberra: ANZECC and ARMCANZ, 2000: 68-99
- [70] 余若祯, 穆玉峰, 王海燕, 等. 排水综合评价中的生物毒性测试技术 [J]. 环境科学研究, 2014, 27(4): 390-397
Yu R Z, Mu Y F, Wang H Y, et al. Review on the aquatic organisms toxicity test in the whole effluent assessment [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(4): 390-397 (in Chinese)
- [71] 段小丽, 黄楠, 王贝贝, 等. 国内外环境健康风险评估中的暴露参数比较 [J]. 环境与健康, 2012, 29(2): 99-103
Duan X L, Huang N, Wang B B, et al. Development of exposure factors research methods in environmental health [J]. Environmental Health, 2012, 29(2): 99-103 (in Chinese)
- [72] US EPA. Exposure factors handbook (EPA/600/R-090/052F) [S]. Washington DC: US EPA, 2011
- [73] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (Part A) (EPA/540/1-89/002) [S]. Washington DC: US EPA, 1989
- [74] US EPA. Child-specific exposure factors handbook (EPA/600/R-06/096F) [S]. Washington DC: US EPA, 2008
- [75] US EPA. Sociodemographic data used for identifying potentially highly exposed populations (EPA/600/R-99/060) [S]. Washington DC: US EPA, 1999
- [76] 吴丰昌等. 水质基准理论与方法学及其案例研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-47
- [77] 毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙. 环境基准向环境标准转化的机制探讨 [J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4422-4427
Bi C C, Wang T Y, Lv Y L. Mechanism for transformation of environmental criteria into environmental standards in China [J]. Environment Science, 2012, 33(12): 4422-4427 (in Chinese) ◆