

应用物种敏感性分布评价中国湖泊水体中重金属污染的生态风险*

刘 昔^{1,2}, 王 智^{1**}, 王学雷¹, 杨 超¹, 宋辛辛^{1,2}, 吕晓蓉^{1,2}, 李 珍^{2,3}

(1: 中国科学院测量与地球物理研究所环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 武汉 430061)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430061)

摘 要: 为总体了解我国主要湖泊水体重金属污染现状与生态风险, 本文通过历史数据收集, 利用物种敏感性分布(SSD)模型与主成分分析法, 分析了我国 18 个湖泊或水域中 6 种重金属(Zn、Cd、Cr、Cu、Hg 和 Pb)的分布情况以及其对湖泊淡水生物的潜在生态风险(PAF)和联合生态风险(msPAF)。结果表明: 在 18 湖泊中, 6 种重金属在湖泊水体中的浓度由高至低依次为 Zn(均值为 17.06 $\mu\text{g/L}$, 范围为 4.03~29.33 $\mu\text{g/L}$)、Pb(均值为 9.33 $\mu\text{g/L}$, 范围为 0.04~33.7 $\mu\text{g/L}$)、Cr(均值为 5.56 $\mu\text{g/L}$, 范围为 0.65~40.0 $\mu\text{g/L}$)、Cu(均值为 3.71 $\mu\text{g/L}$, 范围为 0.02~10.2 $\mu\text{g/L}$)、Cd(均值为 1.17 $\mu\text{g/L}$, 范围为 0.01~13.6 $\mu\text{g/L}$)和 Hg(均值为 0.19 $\mu\text{g/L}$, 范围为 0.03~1.04 $\mu\text{g/L}$); 18 个湖泊中重金属的分布情况由 3 个主成分反映, F1(Cu、Zn、Hg)、F2(Pb、Cd)和 F3(Cr、Cu)的贡献率分别为 28.50%、24.17% 和 18.40%, 其分布情况受经济和地域差异影响较小; SSD 模型显示, 不同重金属对全部淡水生物的 HC5 值不同, 从小到大依次为 Cu>Cr>Hg>Cd>Pb>Zn, 淡水生物对重金属 Cu 的敏感性最高, 对重金属 Zn 的敏感性最低; 将选取的 18 个湖泊按 msPAF 排序, 由高到低依次为呼伦湖(67.0%)>鲁湖(56.7%)>洱海(52.7%)>金银湖(52.3%)>太湖(40.5%)>墨水湖(39.3%)>涸湖(30.2%)>鄱阳湖(26.8%)>洪泽湖(23.1%)>高宝邵伯湖(22.4%)>巢湖(20.7%)>乌梁素海(19.7%)>东湖(19.1%)>梁子湖(4.0%)>汤逊湖(2.0%)>洞庭湖(1%)>洪湖(0)= 骆马湖(0)。研究结果对于了解我国淡水湖泊水质现状和环境安全风险具有重要意义, 为湖泊的进一步保护与管理提供了一定的科学依据。

关键词: 湖泊; 重金属; 淡水生物; 生态风险; 物种敏感性分布

Ecological risks assessment of selected heavy metals in the waters of Chinese lakes based on species sensitivity distributions

LIU Xi^{1,2}, WANG Zhi^{1**}, WANG Xuelei¹, YANG Chao¹, SONG Xinxin^{1,2}, LV Xiaorong^{1,2} & LI Zhen^{2,3}

(1: Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation of Hubei Province, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430061, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430061, P.R.China)

Abstract: In order to learn about the status of heavy metals and ecological risks in Chinese lakes, species sensitivity distributions (SSD) method was applied to assess the ecological risk of six kinds of heavy metal (Zn, Cd, Cr, Cu, Hg and Pb) to freshwater organisms, while principal component analysis was applied to analyze the distributions and source of heavy metal. The evaluation indexes are including the potential affected fractions (PAF) and multi-substance PAF (msPAF), which rank the ecological risk levels. The results showed that among the 18 lakes, the average concentrations of Zn, Pb, Cd, Cu, Cr and Hg were 17.06 $\mu\text{g/L}$ (range is 4.03~29.33 $\mu\text{g/L}$), 9.33 $\mu\text{g/L}$ (range is 0.04~33.7 $\mu\text{g/L}$), 5.56 $\mu\text{g/L}$ (range is 0.65~40.0 $\mu\text{g/L}$), 3.71 $\mu\text{g/L}$ (range is 0.02~10.2 $\mu\text{g/L}$), 1.17 $\mu\text{g/L}$ (range is 0.01~13.6 $\mu\text{g/L}$) and 0.19 $\mu\text{g/L}$ (range is 0.03~1.04 $\mu\text{g/L}$), respectively. The distribution of heavy metal in 18 lakes was reflected by three principal components with the contribution rates of F1 (Cu, Zn

* 国家自然科学基金项目(41601545,41571202)和中国科学院青年创新促进会项目(2018369)联合资助。2017-12-06 收稿;2018-02-27 收修改稿。刘昔(1994~),男,博士研究生;E-mail:liuxi162@mails.ucas.edu.cn.

** 通信作者; E-mail:zwang@whigg.ac.cn.

and Hg), F2 (Pb and Cd) and F3 (Cr, Cu) were 28.50%, 24.17% and 18.40%, respectively, which was less affected by economic and geographical differences. Different kinds of heavy metal have different HC5 values for all freshwater organisms with Cu for the lowest HC5 value (the order is $Cu < Cr < Hg < Cd < Pb < Zn$), indicating freshwater organisms have the highest sensitivity to Cu. In the selected 18 lakes, the order of msPAF of heavy metal in each lake was: Lake Hulun (67.0%) > Lake Luhu (56.7%) > Lake Erhai (52.7%) > Lake Jinyin (52.3%) > Lake Taihu (40.5%) > Lake Moshui (39.3%) > Lake Gehu (30.2%) > Lake Poyang (26.8%) > Lake Hongze (23.1%) > Lake Gaobao (22.4%) > Lake Chaohu (20.7%) > Lake Wuliangsu (19.7%) > Lake Donghu (19.1%) > Lake Liangzi (4.0%) > Lake Tangxun (2.0%) > Lake Dongting (1.0%) > Lake Honghu (0) = Lake Luoma (0). Based on the above work, the ecological risks of heavy metal pollution in lakes were evaluated, which provided a scientific theoretical basis for lake risk management and protection.

Keywords: Lakes; heavy metals; freshwater organisms; ecological risks; species sensitivity distributions

湖泊是重要的地表水资源,与人类生活、生产联系紧密.然而,近几十年来,随着工农业的迅猛发展,湖泊受到有机物、重金属以及营养盐等污染日趋严重,其污染控制与研究已成为全球环境工作者关注的重点之一^[1].在这些污染物中,重金属具有难降解、易积累、毒性大的特点^[2].湖泊中的重金属不仅能对水生生物产生直接的毒害作用,而且还能通过生产生活用水、食物链等给人类健康带来潜在的威胁,因此,有关重金属污染的监测、评估与防治被各国学者高度关注^[3-4].

重金属污染物通过水文循环过程进入水体系统,一般情况下不会因为自然退化过程而发生降解和迁移,一部分重金属污染物直接暴露在水体中,而另一部分可能在沉积物中长期积累起来,成为水体污染的内源,一旦湖泊水体环境条件发生变化时,沉积物中的重金属又会重新释放进入水体而造成二次污染^[5].目前,关于湖泊沉积物中重金属的生态风险研究较多^[6-11],评价方法主要包括地累积指数法^[12]、沉积物富集系数法^[13]、沉积物质量基准法^[14]、潜在生态风险指数法^[15]、污染负荷指数法^[16]和尼梅罗综合指数法^[17]等.然而,由于水体中重金属的含量远低于其在沉积物中的浓度^[18],有关的风险评价研究没有引起足够的重视.事实上,水体作为一个重要的载体,其与水生生物安全与人类健康有着密切而直接的关系,水体中重金属污染会严重威胁水环境和水生生物的健康^[19-21].因此,全面而又准确地评价我国湖泊水体中重金属污染现状,对于水环境健康与水生生物的保护均具有非常重要的现实意义.

目前,水体污染物生态风险评价主要有3种方法:商值法(hazard quotient, HQ)、概率生态风险法(probabilistic ecological risk assessment, PERA)和物种敏感性分布法(species sensitivity distribution, SSD).HQ法是一种常用方法,其对毒理数据的要求较少,操作难易程度低,但是其不确定性相对较高;PERA法的评价结果以概率的形式体现,评价结果比较接近实际情况,但其对数据及专业知识要求较高,操作难度较大^[22].SSD法是一种置信度较高的高级统计学外推方法,当给出特定效应或结果时,可以预测其发生的概率^[23].SSD法因其简明、生态意义明确等优点,近年来已经成为国际上风险评价的热点内容之一^[24].Xu等^[25]对SSD曲线的构建与应用作了详细的介绍与说明,并阐述了其在生态风险评价应用中的优势;吴丰昌等^[26-28]进行了大量关于重金属的淡水水生生物水质基准研究,比较了物种敏感性分布法同评价因子法、毒性百分数排序法的优缺点,分析了影响重金属的水生生物基准的关键因素,为重金属的生态风险评价研究提供了重要参考;杜建国等^[19,24,29]应用物种敏感性分布构建了8种重金属对海洋生物的SSD曲线,并基于已构建的曲线评价了九龙江口、中国近海和福建主要海湾水体中的重金属生态风险;孔祥臻等^[21]构建了6种常见重金属对淡水生物的SSD曲线,并且评价了3个典型水体中重金属的联合生态风险.目前,物种敏感性分布法虽然被广泛应用于生态风险评价中,但受限于数据量的制约,研究集中于单一湖泊或小尺度区域.本文在前人研究成果的基础上,尝试将物种敏感性分布法推广到大尺度,重视实际应用,弥补单一考虑浓度效应在生态风险评价中的不足,对多个湖泊的生态风险进行评价与比较分析.

本研究对我国18个湖泊中Zn、Cd、Cr、Cu、Hg和Pb 6种重金属的含量进行分析和总结,基于暴露浓度和毒性数据的累积概率分布曲线(SSD曲线),辨识潜在生态风险(potential affected fractions, PAF)较高的单体重金属,计算各湖泊水体中6种重金属的联合生态风险(multi-substance PAF, msPAF)并作分析与比较,评价我国湖泊水体中重金属污染的生态风险,旨在为中国水体重金属污染的风险管理和风险评价提供科学的理论依据.

1 方法

1.1 数据来源与介绍

针对中国淡水湖泊以及某些水域水体,本文收集并整理了近 15 年以来国内外公开发表的文献资料,包括 18 个湖泊 Zn、Cd、Cr、Cu、Hg 和 Pb 6 种重金属含量的数据. 数据的筛选遵循以下原则:文献中重金属的测定方法为美国环境保护局(EPA)推荐的标准方法或根据标准方法修订的方法;分析方法遵循质量保证和控制程序,使用空白、重复和标准物质对测量的精度进行控制. 重金属元素对淡水生物的毒理数据参考美国 EPA ECTOX 数据库(<http://www.epa.gov/ecotox/>).

在选取的 18 个淡水湖泊或水域中,包含了中国十大淡水湖泊中的 6 个,有鄱阳湖、洞庭湖、呼伦湖、太湖、洪泽湖、巢湖和洪湖;包含了中国典型的城市湖泊群,湖北省武汉市城市湖泊群(东湖、梁子湖、墨水湖、汤逊湖、金银湖和鲁湖),这些湖泊又可以划分为城市内湖泊、近郊湖泊和远郊湖泊等;包含了经济发达省份江苏省的主要湖泊,如溇湖、高宝邵伯湖和骆马湖等;同时,也包含了高原湖泊乌梁素海和一些受到较高关注的典型湖泊. 从某种程度上来说,本文选取的 18 个湖泊涵盖了我国典型淡水湖泊的各种类型,具有较强的代表性.

1.2 统计与评价方法

湖泊水体中重金属含量的差异性及相关性分析采用 SPSS 软件进行,重金属污染程度和潜在生态危害采用物种敏感性分布法进行评价. 利用美国 EPA ECTOX 数据库中重金属对淡水生物的急性毒理数据,本文选取未分组的(即全部物种)数据进行拟合,构建重金属对淡水生物的 SSD 曲线. 采用澳大利亚联邦科学和工业研究组织 CSIRO 提供的 BurrIIZO 计算软件构建 SSD 曲线,具体计算原理及公式见杜建国等^[24,29]和孔祥臻^[21]等的研究工作.

SSD 曲线的构建和应用主要步骤为^[30-31]:1)确定筛选标准(表 1)对毒理数据进行获取;2)物种分组和数据处理;3)SSD 曲线拟合;4)HCS 和 PAF 计算;5)多种污染物联合生态风险 msPAF 计算.

表 1 毒理数据筛选标准^[25]

Tab.1 Criteria for selecting toxicity data^[25]

数据类型	暴露终点	暴露时间	浓度单位	浓度类型	介质	实验地点
急性	LC ₅₀ 及 EC ₅₀	≤ 10 d	μg/L	总浓度或溶解性	淡水	实验室

1.3 物种分组与数据处理

SSD 对于毒理数据数量的最小要求没有统一的规定,有组织推荐最少数量为 5 个^[32],也有研究或政府指导文件推荐 8~10 个不等^[33]. 本文 Zn、Cd、Cr、Cu、Hg 和 Pb 6 种重金属的数据分别包含了 21、40、16、16、40 和 21 个数据. 对于同一个物种拥有多个毒理数据的情况,采用浓度的几何均值作为该物种的数据点^[34]. 为了整体分析不同重金属对所有淡水生物的影响,分析时仅考虑全部物种不细分的情况. 全部物种包括藻类、脊椎动物和无脊椎动物,脊椎动物中包含鱼类,无脊椎动物中包含甲壳类、软体动物、蠕虫以及其他无脊椎动物. 重金属获得数据量及包含物种数见表 2.

1.4 HC5、PAF 和 msPAF 的计算

本文采用 BurrIII 型分布作为 SSD 的拟合曲线. BurrIII 型分布是一种灵活的分布函数,对物种敏感性数据拟合特性较好,在澳大利亚和新西兰的环境风险评价和环境质量标准制定中被推荐使用^[34]. BurrIII 型函数的参数方程为:

$$F(x) = \frac{1}{[1 + (b/x)^c]^k} \quad (1)$$

式中, b 、 c 、 k 为函数的 3 个参数.

在 SSD 拟合曲线上对应 5% 累积概率的污染物浓度为 HC5 值,HC5 值越小说明重金属的生态风险越高. 应用 BurrIII 分布计算 HC5 的公式为:

表 2 湖泊中 6 种重金属的数据(LC₅₀或 EC₅₀)(μg/L)
Tab.2 Toxicity data (LC₅₀ or EC₅₀) of the six kinds of heavy metal (μg/L)

类别	Zn	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb
鱼类(LC ₅₀)	631	302	22400	201	185	100
藻类、真菌(EC ₅₀)	49	58	301	13	22	22
甲壳类(LC ₅₀)	377	129	75	25	26	26
昆虫类(LC ₅₀)	4404	144	410	—	220	35
无脊椎动物(LC ₅₀)	123	226	50.5	75	30	67
软体动物(LC ₅₀)	—	46	—	179	22	40
蠕虫(LC ₅₀)	2550	149	872	—	45	14
两栖动物(LC ₅₀)	1072	170	29600	67	80	—
数据数量	21	40	16	16	40	21

$$HC(q) = \frac{b}{[(1/q)^{1/k} - 1]^{1/c}} \quad (2)$$

式中, $q=0.05$.

PAF 值表示环境浓度超过生物毒理终点值的物种比例,即给定的污染物浓度在 SSD 曲线上对应的累积概率,PAF 值越大说明重金属的生态风险越高.

$$PAF(x) = \frac{1}{[1 + (b/x)^c]^k} \quad (3)$$

式中, x 为环境浓度(μg/L).

HC5 和 PAF 表示的含义如图 1 所示^[35].

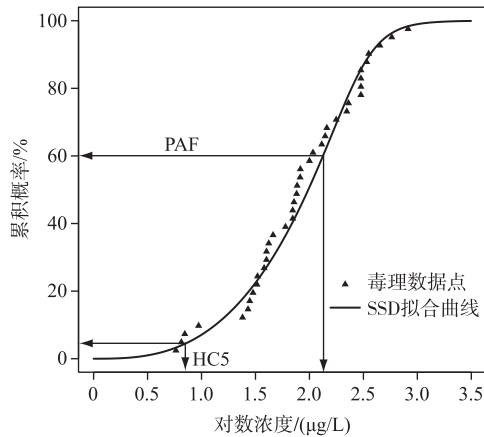


图 1 典型的 SSD 曲线图及应用

Fig.1 A typical SSD curve and its applications

$msPAF$ 值表示的是复合潜在影响比例,假设 PAF_1 、 PAF_2 、……、 PAF_n 为 n 种污染物各自产生的潜在影响比例,各污染物的毒理作为方式不同,则 $msPAF$ 的计算公式为:

$$msPAF = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - PAF_i) \quad (4)$$

SSD 曲线用于生态风险评价的优势之一是可以用来计算多种污染物的联合生态风险,用 $msPAF$ 复合潜在应用百分比表示. 在重金属复合污染中,重金属含量不同,复合效应亦不同^[36]. 对于不同毒理作用方式的污染物,则采用效应相加的方式进行计算^[21].

2 结果与讨论

2.1 污染现状

为充分了解我国湖泊水体重金属污染现状并预测其发展趋势,以我国典型性、代表性湖泊为重点,兼顾空间分布格局,区域发展水平等因素,选取了 18 个湖泊进行重点讨论,包括城市湖泊、远郊湖泊、近郊湖泊、自然保护区内湖泊及受社会广泛关注的热点湖泊等. 湖泊重金属污染现状见图 2.

在所探讨的 18 个湖泊中,6 种重金属在湖泊水体中的浓度由高至低依次为 Zn(均值 17.06 $\mu\text{g/L}$,范围 4.03~29.33 $\mu\text{g/L}$)、Pb(均值 9.33 $\mu\text{g/L}$,范围 0.04~33.7 $\mu\text{g/L}$)、Cr(均值 5.56 $\mu\text{g/L}$,范围 0.65~40.0 $\mu\text{g/L}$)、Cu(均值 3.71 $\mu\text{g/L}$,范围 0.02~10.2 $\mu\text{g/L}$)、Cd(均值 1.17 $\mu\text{g/L}$,范围 0.01~13.6 $\mu\text{g/L}$)、Hg(均值 0.19 $\mu\text{g/L}$,范围 0.03~1.04 $\mu\text{g/L}$),总体重金属污染最严重的为巢湖,最轻的为洪湖. 湖泊往往受到重金属的复合污染,受污染程度空间变异性大,没有明显的空间分布规律;18 个湖泊总重金属浓度均不超过 100 $\mu\text{g/L}$,单个重金属污染浓度均不超过 40 $\mu\text{g/L}$;湖泊中重金属 Cr、Cd 和 Hg 浓度普遍较低,Cr 浓度除了太湖和洱海外均在 5 $\mu\text{g/L}$ 以下,Cd 的浓度除武汉的金银湖外均在 2 $\mu\text{g/L}$ 以下,Hg 的浓度除了洪泽湖和乌梁素海外均在 0.4 $\mu\text{g/L}$ 以下,整体上来看仅个别湖泊异常偏高;湖泊中重金属 Pb、Cu 和 Zn 的暴露浓度相对较高. 相比于湖泊沉积物,虽然水体中重金属浓度相对较低,但仍需要持续关注其存在的潜在生态风险^[31].

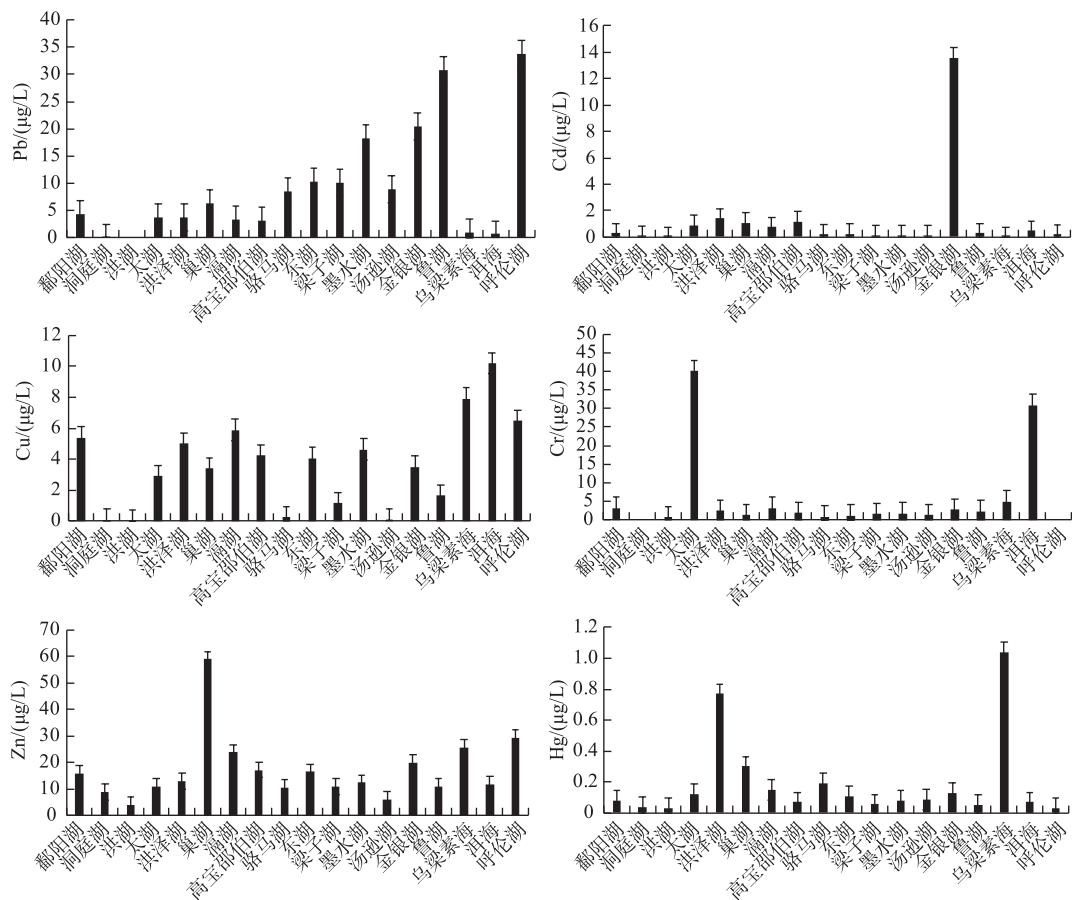


图 2 湖泊水体重金属污染现状

Fig.2 Concentration of heavy metal in waters of lakes

2.2 湖泊重金属分布情况

为了更直观地反映中国淡水湖泊中重金属的分布情况,运用 SPSS 软件计算中国 18 个淡水湖泊中 6 种重金属浓度的 Pearson 相关矩阵(表 3),同时以湖泊中重金属浓度为变量,采用最大方差法对其进行正交旋转后得到主成分分析结果(表 4),主成分各因子的组成及其在各变量上的载荷见图 3。

表 3 湖泊中重金属间的 Pearson 相关系数矩阵
Tab.3 Pearson correlation coefficients of heavy metal in lakes

元素	Pb	Cr	Cu	Zn	Cd	Hg
Pb	1.000					
Cr	-0.262	1.000				
Cu	-0.035	0.345	1.000			
Zn	0.109	-0.152	0.325	1.000		
Cd	0.238	-0.029	0.018	0.109	1.000	
Hg	-0.287	-0.051	0.359	0.262	-0.022	1.000

特征值大于 1 的主成分有 F1、F2 和 F3,这 3 个因子的累计方差贡献率为 71.07%,反映了 18 个淡水湖泊中 6 种重金属元素全部分布情况的 71.07%。因此,对排在前三的主成分因子进行分析已经能包含全部数据的大部分信息。F1 因子和 F2 因子的方差贡献率分别为 28.50% 和 24.17%,远高于主成分分析结果中的其他因子,因而这两个因子对于湖泊中重金属元素的组成和分布具有决定性意义(表 4)。由图 3 可知,Cu、Zn 和 Hg 在 F1 因子上具有相对高的正载荷,Pb 和 Cd 在 F2 因子上具有相对高的正载荷,而 Cr 和 Cu 在 F3 因子上具有相对高的正载荷,根据主成分分析原理可知,具有较高正载荷的重金属元素即为该因子的主要组成成分,支配着湖泊中重金属的来源。6 种重金属元素两两之间的相关性系数绝对值在 0.018~0.359 之间,彼此间的相关性显著水平较弱(表 3)。

本研究中的 18 个淡水湖泊中的重金属分布情况由 3 个主成分反映,第 1 主成分 F1 的贡献率为 28.50%,主要包括 Cu、Zn 和 Hg;第 2 主成分 F2 的贡献率为 24.17%,主要包括 Pb 和 Cd;第 3 主成分 F3 的贡献率为 18.40%,主要包括 Cr 和 Cu(表 4 和图 3)。在没有人污染的情况下,水体中

的重金属浓度取决于水与土壤、岩石的相互作用,其值一般很低,不会对人体健康造成危害^[37],不同湖泊水体中重金属污染的情况不同,但在数据量充足的情况下能较为准确地反映全国湖泊重金属污染的分布规律。采用纯粹的数理统计学方法,既可以宏观掌握我国湖泊水体中重金属的主要来源和分布,又能与毒理效应评价结果进行比对,提高评价结果的可信度。本研究中的 18 个湖泊分布于全国不同经济水平区和不同地域,研究发现,经济和地域差异对湖泊水体中重金属的分布情况影响较小,其主要原因可能是我国湖泊基本上不直接分布于矿产资源区,重金属元素不是沿湖地区排入湖泊的最主要污染物。

表 4 主成分分析结果
Tab.4 The main calculated results of PCA

成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	1.710	28.50	28.50
2	1.450	24.17	52.67
3	1.104	18.40	71.07
4	0.818	13.64	84.71
5	0.580	9.67	94.38
6	0.337	5.62	100.00

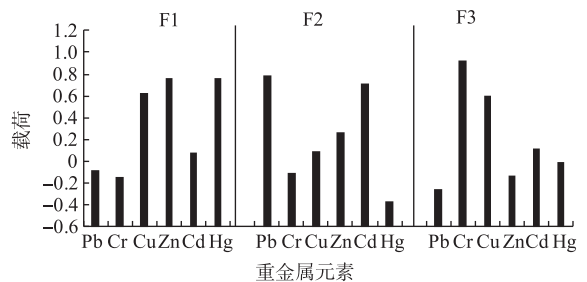


图 3 主成分因子在各变量上的载荷分布

Fig.3 The loading distribution of principal components on all variables

2.3 风险评价

2.3.1 SSD 拟合结果 使用 BurrIII 软件计算得到 SSD 曲线, 曲线均选用 BurrIII 分布拟合, 结果见图 4. 为了整体分析不同重金属对所有淡水生物的影响, 本文选取未分组的(即全部物种)数据进行拟合, 分析时仅考虑全部物种不细分的情况. 每种重金属的 SSD 曲线至少包含 5 个物种和 15 个数据, 用以代表全部物种的情况.

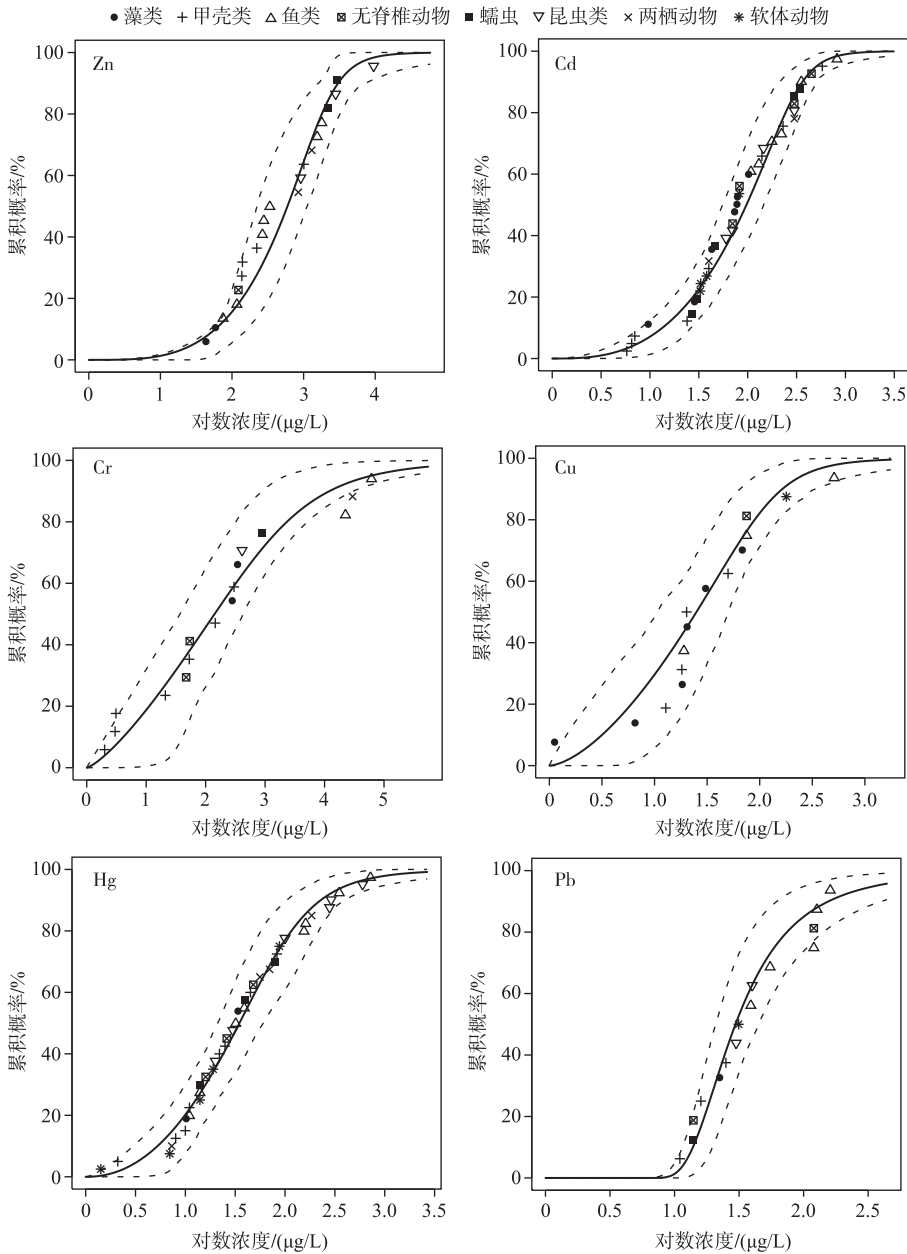


图 4 不同重金属对全部物种生物的 SSD 曲线

Fig.4 SSD curves for different kinds of heavy metal to all species

2.3.2 HC5 值及其比较与分析 由表 5 可以看出, 不同重金属对全部淡水生物的 HC5 值不同, 从小到大依次

为 $Cu < Cr < Hg < Cd < Pb < Zn$, 根据 HC5 值的含义, 6 种重金属对淡水生物的生态风险依次降低. 在相同暴露浓度下, 重金属 Cu 影响的全部物种比例最大, 即对淡水生物的生态风险最大; 重金属 Zn 影响的全部物种比例最小, 即生态风险最小. HC5 值也反映了淡水生物对重金属浓度的敏感性差异, HC5 值越小说明淡水生物对该重金属浓度的变化越敏感, 越容易受到影响. Cd、Cr、Cu 和 Hg 4 种重金属的 HC5 值均小于 $10 \mu\text{g/L}$, 其浓度变化对淡水湖泊生态系统影响较大; 而 Pb 和 Zn 则对淡水湖泊生态系统的影响相对较小.

表 5 6 种重金属对全部物种的 HC5 值 ($\mu\text{g/L}$)
Tab.5 HC5 values of six kinds of heavy metal to all species ($\mu\text{g/L}$)

重金属	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
全部生物 (HC5)	7.76	2.29	2.09	3.31	12.59	31.62

2.3.3 风险评估 基于本文建立的重金属 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 的 SSD 曲线, 18 个湖泊水体中 6 种重金属的 PAF 和 msPAF 如表 6 所示. 18 个湖泊中, 有 13 个湖泊中重金属 Pb 的 PAF 为 0%, 仅东湖、梁子湖、墨水湖、金银湖、鲁湖和呼伦湖 6 个湖泊中重金属 Pb 的 PAF 分别为 2%、1%、24%、30%、52% 和 56%, 这些存在 Pb 污染生态风险的湖泊主要为城市湖泊, 集中在武汉和东部经济发达地区, 可能原因是城市工业发达, 含铅汽油使用量大, 作为城市纳污水体导致 Pb 的生态风险提高; 重金属 Cr 的 PAF 均在 5% 以下, 部分湖泊中重金属 Cr 的 PAF 为 0, 生态风险较小; 重金属 Cu 的 PAF 在多个湖泊中都超过了 10%, 存在潜在的生态风险, 值得关注; 重金属 Zn 在湖泊中浓度虽然较大, 但物种敏感性较低, PAF 均不超过 5%, 生态风险较小; 重金属 Cd 在湖泊中的浓度极低, 仅有金银湖一个湖泊中 Cd 的 PAF 为 16%, 总体上来说, Cd 对淡水湖泊不存在生态风险; 重金属 Hg 在湖泊水体中浓度极低, PAF 值均为 0, 对湖泊水体不存在生态风险.

18 个湖泊重金属的 msPAF 从大到小依次为: 呼伦湖 (67.0%) > 鲁湖 (56.7%) > 洱海 (52.7%) > 金银湖 (52.3%) > 太湖 (40.5%) > 墨水湖 (39.3%) > 涪湖 (30.2%) > 鄱阳湖 (26.8%) > 洪泽湖 (23.1%) > 高宝邵伯湖 (22.4%) > 巢湖 (20.7%) > 乌梁素海 (19.7%) > 东湖 (19.1%) > 梁子湖 (4.0%) > 汤逊湖 (2.0%) > 洞庭湖 (1.0%) > 洪湖 (0) = 骆马湖 (0) (表 6).

本文讨论的 18 个湖泊中, msPAF > 40% 的湖泊有呼伦湖、鲁湖、洱海、金银湖、太湖等, 受到重金属污染的生态风险程度为重度, 需要高度重视并开展切实有效的保护措施; msPAF 为 20% ~ 40% 的湖泊有墨水湖、鄱阳湖、巢湖、涪湖等, 生态风险程度为中度, 需要持续关注避免进一步恶化并采取一定的措施进行治理; msPAF < 20% 的湖泊有乌梁素海、东湖、洪泽湖、高宝邵伯湖、梁子湖、汤逊湖、洞庭湖等, 生态风险程度为轻度, 需要在保持的基础上提高水质; 根据 SSD 曲线预测, 没有生态风险的湖泊有洪湖和骆马湖.

2.3.4 不确定性分析 不确定性是在进行生态风险评价中不可避免的问题, 这种不确定性主要来源于暴露浓度分析、生态效应分析和风险程度表征过程.

1) 暴露分析: 暴露分析中的不确定性主要来源于样品采集误差及分析测试误差, 采样时间的不统一和不同实验室分析技术的差异, 也使得生态风险评价具有一定的不确定性. 本文中各个湖泊的重金属浓度数据均来自于国内外公开发表的文献, 在进行暴露分析时会受到不同实验室样品分析和不同学者研究侧重点差异化的影响, 但重金属浓度的测定方法较为成熟, 正常情况下不同实验室的测定结果在合理误差范围内, 故在本研究中暴露分析中的不确定性固然存在, 但对评价结果的影响是可接受的.

2) 效应分析: 本文采用的物种敏感度分布模型是带来效应分析不确实性的原因之一, 尽管 SSD 方法已被广泛应用于生态风险评价中, 但仍具有争议^[49-50], 从实验室有限的测试物种的毒性数据外推到自然界的毒性效应必然会带来一定的不确定性. 不过, 有文献证实^[32], 单物种测试能够可靠地预测生态系统水平的危害效应. 本文在使用美国 EPA ECTOX 数据库构建 SSD 曲线时, 参考了大量文献并优化了毒理数据筛选条件 (表 1), 尽可能保证实验测试条件贴近自然状态, 至于自然环境中水体环境因子如 pH、有机质等也会影响水体重金属的可利用态问题, 这可能是今后生态毒理学家需要关注的问题, 不过总体来说这并不影响本研究的总体评价结果.

3) 风险表征: 重金属对湖泊淡水生物的生态风险是通过污染物暴露浓度和累积概率分布曲线来共同表征的, 两者的不确定性自然就传递到了风险表征的过程中. 本文基于澳大利亚联邦科学和工业研究组织

CSIRO 提供的 BurrIII 计算软件构建累计概率分布曲线,采用 BurrIII 型分布进行拟合,该软件及拟合方法在国内外生态风险评价研究中得到广泛应用.

因此,本研究结果是基于现有数据条件下的模拟,各个环节中可能出现的误差均是可以解释和接受的,对比前人所做的研究^[19,21,24,29],采用该方法得出的评价结果是可靠的,但仍需要进一步考虑暴露浓度与效应分析的影响因素,同时更深入了解生物在生态系统中生态位和功能,以期得到更为准确、真实的生态风险评价结果.

表 6 潜在影响比例 (PAF) 及复合潜在影响比 (msPAF) 预测值

Tab.6 Predicted PAF and msPAF values of heavy metal

湖泊	指标	Pb	Cr	Cu	Zn	Cd	Hg	msPAF/%
鄱阳湖 ^[38]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	4.4	3.13	5.4	15.9	0.3	0	26.8
	PAF/%	0	8	18	3	0	0	
洞庭湖 ^[39]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	0.04	0	0.07	8.86	0.05	0.04	1.0
	PAF/%	0	0	0	1	0	0	
巢湖 ^[40]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	6.3	1.3	3.4	59	1.1	0.3	20.7
	PAF/%	0	1	11	10	0	0	
洪湖 ^[39,41]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	0	0.65	0.02	4.03	0.01	0.03	0
	PAF/%	0	0	0	0	0	0	
太湖 ^[41-44]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	3.84	40	2.9	11	0.9	0.12	40.5
	PAF/%	0	34	9	1	0	0	
洪泽湖 ^[42]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	3.7	2.4	4.99	13	1.44	0.77	23.1
	PAF/%	0	5	17	2	0	0	
溧湖 ^[42]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	3.46	3.2	5.89	23.8	0.75	0.15	30.2
	PAF/%	0	8	20	4	0	0	
高宝邵伯湖 ^[42]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	3.27	1.9	4.26	17.2	1.19	0.07	22.4
	PAF/%	0	4	14	3	0	0	
骆马湖 ^[42]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	8.54	0.8	0.23	10.6	0.23	0.190	0
	PAF/%	0	0	0	0	0	0	
东湖 ^[45]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	10.3	1.19	4.07	16.5	0.239	0.107	19.1
	PAF/%	2	1	14	3	0	0	
梁子湖 ^[45]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	10.1	1.59	1.14	10.9	0.09	0.05	4.0
	PAF/%	1	2	0	1	0	0	
墨水湖 ^[45]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	18.3	1.71	4.62	12.4	0.12	0.08	39.3
	PAF/%	24	3	16	2	0	0	
汤逊湖 ^[45]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	8.9	1.28	0.08	6.2	0.07	0.09	2.0
	PAF/%	0	1	0	1	0	0	
金银湖 ^[45]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	20.4	2.69	3.51	19.9	13.6	0.13	52.3
	PAF/%	30	6	11	3	16	0	
鲁湖 ^[45]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	30.8	2.34	1.64	11.1	0.29	0.05	56.7
	PAF/%	52	5	3	2	0	0	
乌梁素海 ^[46]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	1.06	4.91	7.91	25.76	0.02	1.04	19.7
	PAF/%	0	12	25	4	0	0	
洱海 ^[47]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	0.7	30.9	10.2	11.7	0.5	0	52.7
	PAF/%	0	31	30	2	0	0	
呼伦湖 ^[48]	平均浓度/($\mu\text{g/L}$)	33.74	0	6.46	29.33	0.19	0	67.0
	PAF/%	56	0	21	5	0	0	

3 参考文献

- [1] Xu Y, Wu Y, Han J *et al.* The current status of heavy metal in lake sediments from China: Pollution and ecological risk assessment. *Ecology & Evolution*, 2017, **7**(14): 5454-5466.
- [2] Zhang J, Chen X, Liu QC *et al.* Distribution and potential risk assessment of heavy metals in the main estuaries of lake Poyang's tributaries. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(1): 95-100. [张杰, 陈熙, 刘倩纯等. 鄱阳湖主要入湖口重金属的分布及潜在风险评价. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(1): 95-100.]
- [3] Jian MF, You H, Ni CY *et al.* Characteristics of heavy metals contaminant status and migration Raohe River of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2006, **18**(2): 127-133. DOI:10.18307/2006.0205. [简敏菲, 游海, 倪才英. 鄱阳湖饶河段重金属污染水平与迁移特性. 湖泊科学, 2006, **18**(2): 127-133.]
- [4] Jian MF, Gong XF, You H *et al.* Assessment of pollution of heavy metals in water sediments and aquatic plants in Poyang Lake basins. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, **13**(6): 589-593. [简敏菲, 弓晓峰, 游海等. 鄱阳湖水环境及其水生维管束植物重金属污染. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(6): 589-593.]
- [5] Liu HL, Yin CQ. Heavy metals pollution status and its stability assessment in surface sediments of urban lake-A case study of Moshui Lake in Wuhan. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, **2**(2): 214-219. [刘红磊, 尹澄清. 城市湖泊表层沉积物中的重金属污染现状及其稳定度分析——以武汉墨水湖为例. 生态毒理学报, 2007, **2**(2): 214-219.]
- [6] Guo J, Li LQ, Huang DZ *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment of Dongting Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(1): 44-51. [郭晶, 李利强, 黄代中等. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势. 环境科学研究, 2016, **29**(1): 44-51.]
- [7] Zheng H, Yang D, Xing XL *et al.* Historical records, distribution characteristics and sources of heavy metals from sediment core in Honghu Lake, China. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2139-2145. [郑煌, 杨丹, 邢新丽等. 洪湖沉积柱中重金属的历史分布特征及来源. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 2139-2145.]
- [8] Jian MF, Li LY, Yu HP *et al.* Heavy metals pollution on the water and sediments and its influence on the submerged macrophyte community in the wetland of Poyang Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(1): 96-105. [简敏菲, 李玲玉, 余厚平等. 鄱阳湖湿地水体与底泥重金属污染及其对沉水植物群落的影响. 生态环境学报, 2015, **24**(1): 96-105.]
- [9] Yu XJ, Huo SL, Zan FY *et al.* Distribution characteristics and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(2): 439-450. [余秀娟, 霍守亮, 管逢宇等. 巢湖表层沉积物中重金属的分布特征及其污染评价. 环境工程学报, 2013, **7**(2): 439-450.]
- [10] Wang D, Meng X, Zhang H *et al.* Pollution analysis and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Liangzi Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(6): 1901-1909. [王丹, 孟鑫, 张洪等. 梁子湖沉积物重金属污染现状分析及风险评价. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 1901-1909.]
- [11] Li XM, Zhou M. Distribution characteristics and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of East Lake, Wuhan. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(10): 161-169. [李晓明, 周密. 武汉东湖沉积物重金属分布特征及其污染评价. 环境科学与技术, 2016, **39**(10): 161-169.]
- [12] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, **108**(2): 108-118.
- [13] Herman C. Theuse of faces to represent points in k-dimensional space graphically. *Publications of the American Statistical Association*, 1973, **68**(342): 361-368.
- [14] Gao B, Li Q, Zhou HD *et al.* Review of heavy metals quality criteria for sediments in water body. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2013, **11**(2): 99-106. [高博, 李强, 周怀东等. 水体沉积物重金属质量基准研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, **11**(2): 99-106.]
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [16] Tomlinson DL, Wilson JG, Harris CR *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, **33**(1/2/3/4): 566-575.
- [17] Chen M, Cai QY, Xu H *et al.* Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediments. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, (6): 1069-1074. [陈明, 蔡青云, 徐慧等. 水体沉积物重金属污染风险评

- 价研究进展. 生态环境学报, 2015, (6): 1069-1074.]
- [18] Jia ZB, Huo WY, Zhao ZJ *et al.* Secondary phase enrichment fact or for evaluation of heavy metal pollution of sediment in the Chai River. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, **36**(6): 808-812. [贾振邦, 霍文毅, 赵智杰等. 应用次生相富集系数评价柴河沉积物重金属污染. 北京大学学报自然科学版, 2000, **36**(6): 808-812.]
- [19] Zhao JY, Du JG, Chen B *et al.* Assessing ecological risks of heavy metals to marine organisms in the Jiulongjiang Estuary by species sensitivity distribution. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(2): 400-407. [赵佳懿, 杜建国, 陈彬等. 应用物种敏感性分布评估九龙江口水体重金属生态风险. 生态学杂志, 2014, **33**(2): 400-407.]
- [20] Järup L. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 2003, **68**(1): 167.
- [21] Kong XZ, He W, Qin N *et al.* Assessing acute ecological risks of heavy metals to freshwater organisms by species sensitivity distributions. *China Environmental Science*, 2011, **31**(9): 1555-1562. [孔祥臻, 何伟, 秦宁等. 重金属对淡水生物生态风险的物种敏感性分布评估. 中国环境科学, 2011, **31**(9): 1555-1562.]
- [22] Zhu YJ, Zhang Y, Gao S *et al.* Progress of ecological risk assessment methodology and choice of assessment models. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2015, **28**(1): 17-21. [朱艳景, 张彦, 高思等. 生态风险评价方法学研究进展与评价模型选择. 城市环境与城市生态, 2015, **28**(1): 17-21.]
- [23] Kwok KWH, Bjorgesæter A, Leung KMY *et al.* Deriving site-specific sediment quality guidelines for Hong Kong marine environments using field-based species sensitivity distributions. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2008, **27**(1): 226-234.
- [24] Du JG, Zhao JY, Chen B *et al.* Assessing ecological risks of heavy metals to marine organisms by species sensitivity distributions. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, **8**(4): 561-570. [杜建国, 赵佳懿, 陈彬等. 应用物种敏感性分布评估重金属对海洋生物的生态风险. 生态毒理学报, 2013, **8**(4): 561-570.]
- [25] Xu FL, Li YL, Wang Y *et al.* Key issues for the development and application of the species sensitivity distribution (SSD) model for ecological risk assessment. *Ecological Indicators*, 2015, **54**(3): 227-237.
- [26] Wu FC, Meng W, Cao YJ *et al.* Derivation of aquatic life water quality criteria for cadmium in freshwater in China. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(2): 172-184. [吴丰昌, 孟伟, 曹宇静等. 镉的淡水水生生物水质基准研究. 环境科学研究, 2011, **24**(2): 172-184.]
- [27] Wu FC, Feng CL, Cao YJ *et al.* Toxicity characteristic of zinc to freshwater biota and its water quality criteria. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, **6**(4): 367-382. [吴丰昌, 冯承莲, 曹宇静等. 锌对淡水生物的毒性特征与水质基准的研究. 生态毒理学报, 2011, **6**(4): 367-382.]
- [28] Zhang RQ, Wu FC, Li HX *et al.* Deriving aquatic water quality criteria for inorganic mercury in China by species sensitivity distributions. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(2): 440-449. [张瑞卿, 吴丰昌, 李会仙等. 应用物种敏感度分布法研究中国无机汞的水生生物水质基准. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 440-449.]
- [29] Du JG, Zhao JY, Chen B *et al.* Assessing ecological risks of heavy metals to marine organisms in Chinese offshore and Fujian's main bays by species sensitivity distributions. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, **8**(4): 554-560. [杜建国, 赵佳懿, 陈彬等. 应用物种敏感性分布评估中国近海和福建主要海湾水体重金属生态风险. 生态毒理学报, 2013, **8**(4): 554-560.]
- [30] Wang Y, Wang JJ, Qin N *et al.* Assessing ecological risks of DDT and lindane to freshwater organisms by species sensitivity distributions. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(11): 2407-2414. [王印, 王军军, 秦宁等. 应用物种敏感性分布评估 DDT 和林丹对淡水生物的生态风险. 环境科学学报, 2009, **29**(11): 2407-2414.]
- [31] Liu L, Yan XP, Wang Y *et al.* Assessing ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to freshwater organisms by species sensitivity distributions. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, **4**(5): 647-654. [刘良, 颜小品, 王印等. 应用物种敏感性分布评估多环芳烃对淡水生物的生态风险. 生态毒理学报, 2009, **4**(5): 647-654.]
- [32] Hose GC, Pj VDB. Confirming the species-sensitivity distribution concept for endosulfan using laboratory, mesocosm, and field data. *Archives of Environmental Contamination & Toxicology*, 2004, **47**(4): 511.
- [33] Posthuma L, Suter GW, Traas TP eds. Species sensitivity distributions in ecotoxicology. Lewis Publishers, 2002.
- [34] Duboudin C, Ciffroy P, Magaud H. Acute-to-chronic species sensitivity distribution extrapolation. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2004, **23**(7): 1774.
- [35] Posthuma L, Traas TP, Suter GW. General introduction to species sensitivity distributions. In: Posthuma L, Suter GW, Traas TP eds. Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences, 2002, **141**(905): 510-523.

- [36] Charlesworth S, Everett M, Mccarthy R *et al.* A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area; Birmingham and Coventry, West Midlands, UK. *Environment International A Journal of Environmental Science Risk & Health*, 2003, **29**(5): 563.
- [37] Shi XY. The present study status of impact of heavy metal in water to human health and relative countermeasures. *Jiang Su Environmental Science & Technology*, 2005, **18**(3): 3-5. [史啸勇. 水体中重金属对人体健康影响的研究现状及对策. 环境科技, 2005, **18**(3): 3-5.]
- [38] Li M, Liu JQ. Characteristics and assessment of heavy metals pollution in Poyang Lake. *Journal of Nanchang University: Natural Science*, 2010, **34**(5): 486-489. [李鸣, 刘琪璟. 鄱阳湖水体和底泥重金属污染特征与评价. 南昌大学学报理科版, 2010, **34**(5): 486-489.]
- [39] Makokha VA, Qi Y, Shen Y *et al.* Concentrations, distribution, and ecological risk assessment of heavy metals in the East Dongting and Honghu Lake, China. *Exposure & Health*, 2016, **8**(1): 1-11.
- [40] Li GL, Liu GJ, Jiang MM *et al.* Partition characteristics and correlation of heavy metal between sediment and surface water from Chaohu Lake. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2011, **41**(1): 9-15. [李国莲, 刘桂建, 姜萌萌等. 巢湖表层沉积物与上覆水体中重金属分配特征及其相关性研究. 中国科学技术大学学报, 2011, **41**(1): 9-15.]
- [41] Xing W, Wu H, Hao B *et al.* Bioaccumulation of heavy metals by submerged macrophytes: Looking for hyperaccumulators in Eutrophic Lakes. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(9): 4695-4703.
- [42] Wang W, Fan XK, Huang CG *et al.* Monitoring and comparison analysis of heavy metals in the five great lakes in Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3): 494-501. DOI:10.18307/2016.0304. [王伟, 樊祥科, 黄春贵等. 江苏省五大湖泊水体重金属的监测与比较分析. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 494-501.]
- [43] Chen LL, Zhou BH, Xu BB *et al.* Cadmium and chromium concentrations and their ecological risks in the water body of Taihu Lake, East China. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(10): 2290-2296. [陈璐璐, 周北海, 徐冰冰等. 太湖水体典型重金属镉和铬含量及其生态风险. 生态学杂志, 2011, **30**(10): 2290-2296.]
- [44] Li YB, Feng L, Liu ZT *et al.* Ecological risk assessment of sediment heavy metals in main lakes of China. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(2): 206-211. [李玉斌, 冯流, 刘征涛等. 中国主要淡水湖泊沉积物中重金属生态风险研究. 环境科学与技术, 2012, **35**(2): 206-211.]
- [45] Qiao SY, Jiang JY, Xiang W *et al.* Heavy metals pollution in lakes of Wuhan City. *Water Resources Protection*, 2007, **23**(1): 45-48. [乔胜英, 蒋敬业, 向武等. 武汉市湖泊中重金属污染状况. 水资源保护, 2007, **23**(1): 45-48.]
- [46] Wang LM, Zhang S, Zhao SN *et al.* Spatial distribution characteristics of heavy metals in Ulansuhai Lake. *Journal of Environment and Health*, 2014, **31**(12): 1088-1089. [王利明, 张生, 赵胜男等. 乌梁素海水体重金属浓度及空间分布特征. 环境与健康杂志, 2014, **31**(12): 1088-1089.]
- [47] Liu ZT, Li CH, Zhang GY *et al.* Application of principal component analysis to the distributions of heavy metals in the water of lakes and reservoirs in Yunnan province. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(4): 459-466. [刘总堂, 李春海, 章钢娅. 运用主成分分析法研究云南湖库水体中重金属分布. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 459-466.]
- [48] Duda GL, He J, Lv CW *et al.* Distribution of heavy metals in water-sediment system of Hulun Lake, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(1): 118-123. [都达古拉, 何江, 吕昌伟等. 呼伦湖水-沉积物系统中重金属的含量特征. 农业环境科学学报, 2015, **34**(1): 118-123.]
- [49] Giddings JM, Anderson TA, Hall LW *et al.* Atrazine in North America Surface Waters: A probabilistic aquatic ecological risk assessment//Atrazine in North American Surface Waters: A probabilistic aquatic ecological risk assessment, 2005.
- [50] Duboudin C, Ciffroy P, Magaud H. Effects of data manipulation and statistical methods on species sensitivity distributions. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2004, **23**(2): 489.