

不同环境介质中污染物生态风险评估方法的国内研究进展

沈洪艳^{1,2}, 胡小敏^{1,2}

(1.河北科技大学环境科学与工程学院,河北石家庄 050018;2.河北省药用分子化学重点实验室,河北石家庄 050018)

摘要: 污染物生态风险评估是近年来国内外一直关注的热点,已有国内外学者提出了多种生态风险评估的方法与模型,通过建立不同的指标对环境介质中污染物的生态风险进行评价,以期预测其不利的生态影响,也可以对过去某种因素导致的生态变化的可能性进行评估。回顾了生态风险评估的发展历程,归纳了水、沉积物和土壤中污染物的生态风险评估模型与方法,总结了风险熵法(RQ)、AQUATOX模型、物种敏感度分布曲线法(SSD)、地积累指数法(Igeo)、Hakanson潜在生态风险指数法确定的生态风险等级,根据不同环境介质中的污染物类型及浓度选择适当的方法进行生态风险评估。今后应对不同环境介质中多种污染物共存时的生态风险评估给予更多关注,并丰富生态风险评估的方法体系,为确定更为恰当的不同类型污染物的生态风险评估方法提供参考。

关键词: 环境生态学;环境介质;生态风险;评价方法;研究进展

中图分类号:X826 文献标志码:A

Research progress on ecological risk assessment methods of pollutants in different environmental media at domestic

SHEN Hongyan^{1,2}, HU Xiaomin^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Key Laboratory of Hebei Province for Medical Molecular Chemistry, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: Ecological risk assessment of pollutants has been a focus of attention at home and abroad in recent years. Domestic and foreign scholars have put forward various methods and models for ecological risk assessment. The purpose is to evaluate the ecological risk of pollutants in environmental media by establishing different indicators, hoping to predict their adverse ecological impacts, as well as assess the potential for ecological changes caused by a certain factor in the past. This paper reviews the development of ecological risk assessment, summarizes the ecological risk assessment models and methods about pollutants in

收稿日期:2017-06-04;修回日期:2017-12-11;责任编辑:王海云

基金项目:国家自然科学基金(41373096);国家环保公益课题(201509041-05);河北省自然科学基金(B2014208068);河北省药用分子化学重点实验室开放基金;河北省环保厅公益课题;河北省重点学科建设基金

第一作者简介:沈洪艳(1971—),女,天津人,教授,博士,主要从事污染物环境行为及效应、环境规划与评价等方面的研究。

E-mail:shy0405@sina.com

沈洪艳,胡小敏.不同环境介质中污染物生态风险评估方法的国内研究进展[J].河北科技大学学报,2018,39(2):176-182.

SHEN Hongyan, HU Xiaomin. Research progress on ecological risk assessment methods of pollutants in different environmental media at domestic[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(2): 176-182.

water, sediment and soil, summarizes the Risk Quotient (RQ), AQUATOX model, Species Sensitivity Distribution (SSD), Index of Geoaccumulation (Igeo), Hakanson potential ecological risk index to determine the level of ecological risk. According to the types and concentrations of pollutants in different environmental media, the appropriate method should be selected for ecological risk assessment. In the future, more research should be conducted on the ecological risk assessment method for the coexistence of multiple pollutants under different environmental media, riching ecological risk assessment method system, and providing a more appropriate assessment method for the ecological risk of various pollutants.

Keywords: environmental ecology; environmental media; ecological risk; evaluation method; research progress

生态风险评估是伴随着环境管理目标和环境观念的转变而逐渐兴起并得到发展的一个新兴的研究领域^[1]。一般来说,生态风险评估是指对人为活动或不利事件对生态环境产生危害,或对生物个体、种群及生态系统产生不利影响的可能性的分析过程^[2]。

目前,世界上很多国家、组织或者实验室都开展了有关生态风险评估的研究,不管是水生生态系统还是陆地生态系统,都已有相应的生态风险评估方法。其中,针对水生生态系统的风险评估较多;赵晨等^[3]对漫湾大坝上下游沉积物中的重金属进行了生态风险评估;乔敏敏等^[4]探讨了北京市密云水库的入库河流沉积物中重金属的潜在危害;ZHANG 等^[5]对滦河河口表层沉积物中的多环芳烃进行了风险评估。而对于陆地生态系统的评价只是集中在几种典型的有毒有害物质方面,如对农药、重金属的研究等^[6],HOUBRAKEN 等^[7]采用 RQ 方法对农药残留进行了生态风险评估。本文综述了国内生态风险评估的研究进展和应用案例,并着重对在不同环境介质中的污染物生态风险评估的方法与模型进行了归纳。

1 生态风险评估发展概述

美国环保局于 1992 年颁布了生态风险评估框架^[8],1998 年又发布了《生态风险评估指南》,其中不仅叙述了生态风险评估的一般原理、方法和程序,而且大大扩展了生态风险评估的研究方向,包括气候变化、生物多样性丧失、多种化学品对生物影响的风险评估等^[2]。

英国环境部在 1995 年要求所有环境风险评估和风险管理行为必须遵循国家可持续发展战略,其创新点在于应用了“预防为主”的原则。它强调如果存在重大环境风险,即使目前的科学证据并不充分,也必须采取行动预防和减缓潜在的危害行为^[8]。

荷兰风险管理框架于 1989 年提出,其创新之处在于应用阈值来判断特定的风险水平是否能被接受,利用不同生命组建水平的风险指标(如死亡率或其他临界响应值),通过数值明确表达最大可接受或可忽略的风险水平^[8]。

加拿大在 1996 年颁布了《生态风险评估框架》(以下简称《框架》),并于 2010—2012 年发布了一系列指导文件,对上述《框架》进行了补充,同时也有具体的技术指导文件^[9]。

生态风险评估在中国尚处于发展阶段,在方法和技术上还不成熟。目前,中国开展的生态风险评估研究一般以区域和污染物为研究对象,通过建立相应的指标来评价生态风险^[2]。

在评价程序和方法方面,原国家环境保护总局于 2003 年颁布了《新化学物质环境管理办法》,并同时发布了《新化学物质危害评估导则》^[2]。导则中,关于化学品的危害评估包括人体健康危害评估和生态环境危害评估两部分内容,其中生态环境危害评估基本按照理化特性评价、生态毒理学评估、环境暴露评估、生态环境危害表征的程序进行。

2 生态风险评估方法与模型

2.1 水环境生态风险评估方法与模型

2.1.1 风险熵法(熵值法)

风险熵(risk quotient, RQ)主要是指环境中污染物的测量浓度(MEC)与预测的无效应浓度(PNEC)之间的比值,被用来评估目标生物的生态风险。PNEC 值的估算是根据毒理学的相关浓度(LC₅₀或 EC₅₀)与安全系数(f)的比值。风险熵的计算公式为

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC} = \frac{MEC}{\frac{E(L)C_{50}}{f}} \quad (1)$$

根据风险熵值,将生态风险水平划分为4个标准^[10],见表1。

张璐璐等^[11]运用熵值法计算了中国典型水环境中邻苯二甲酸酯类物质对于藻类、水蚤和鱼类种群的生态风险熵值,并据此将邻苯二甲酸酯类的生态风险划分为4个水平。许凯^[12]采用熵值法,对贵阳市主城区水域及饮用水源地水体中邻苯二甲酸酯类的生态风险进行了回顾性评价,以斑马鱼胚胎和藻类作为生态风险评价的目标受体,结果表明:邻苯二甲酸二甲酯和邻苯二甲酸二乙酯均无生态风险,其中仅有2次属于潜在低生态风险;主要污染物质邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二异丁酯与邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯虽然均未产生直接的生态风险,但绝大部分采样点属于潜在低生态风险。

2.1.2 AQUATOX 模型

AQUATOX 模型是由美国环境保护署开发的一种综合的水生态系统模型,可以预测化学物质的环境行为并评估其生态风险,例如水生态系统中营养物质和有机物质的生态风险。该模型不仅可以预测直接毒性效应,即由化学物质对单一物种的急性和慢性毒性数据(LC_{50} 或 EC_{50})计算水生态系统生物量的变化,还可以预测由食物网引起的间接生态效应,例如碎屑量的增加将导致碎屑在营养循环中作用的增强以及分解过程中溶解氧的消耗。模型中各个种群的生理参数主要来源于 AQUATOX 模型数据库或文献资料^[13-15]。

以受人为干扰较强的白洋淀为研究区,张璐璐等^[16]运用 AQUATOX 模型评价了多溴联苯醚(PBDEs)的水生态系统风险。结果表明,该模型能够有效地评估 PBDEs 的直接毒性效应和间接生态效应。魏星瑶等^[17]以殷村港为例,借助 AQUATOX 水生态模型进行建模,分析了营养盐、温度、流速等因子对殷村港富营养化水平的影响。NIU 等^[18]针对天津的景观湖,用 AQUATOX 模型评价、预测了湖中不同物种的营养物变化。结果表明,该模型对最佳温度、最大光合速率和呼吸率高度敏感。

2.1.3 物种敏感度分布曲线法

物种敏感度分布曲线法(species sensitivity distribution, SSD)是最初由美国科学家 STEPHAN 和荷兰科学家 KOOIJMAN 于 20 世纪 70 年代末提出的一种生态风险评价方法,当可获得的毒性数据较多时,SSD 能用来计算 PNEC^[19]。SSD 假定在生态系统中不同物种可接受的效应水平跟随一个概率函数,称为种群敏感度分布,并假定有限的生物种是从整个生态系统中随机取样的,因此可认为评估有限物种的可接受效应水平适合整个生态系统。SSD 的斜率和置信区间揭示了风险估计的确定性,一般用作最大环境许可浓度阈值(HC_x ,通常 x 取值 5), HC_5 表示该浓度下受到影响的物种不超过总物种数的 5%,或达到 95%物种保护水平时的浓度^[20]。虽然选择保护水平是任意的,但它反映了统计考虑(HC_x 浓度太低,风险预测不可靠)和环境保护需求(HC_x 值应尽可能地小)的折中。

张晓惠等^[21]应用物种敏感度分布曲线法(SSD)分别计算 DDT、艾氏剂、狄试剂、异狄氏剂等共 8 类持久性有机污染物在淡水环境中为保护 95%的淡水生物时的浓度阈值(HC_5)。结果表明,8 类污染物质的 SSD 拟合曲线 R^2 均大于 0.96,能够反映不同物种毒理数据点的累积概率分布。陈瑾等^[22]通过采集淡水生物毒性数据构建了 SSD 方程,在 95%物种保护的基础上评估微囊藻毒素、氨氮和亚硝态氮对淡水生物的生态风险浓度阈值(HC_5)和复合生态风险,以及不同暴露浓度下的潜在影响比例。结果表明,微囊藻毒素对淡水生物的 HC_5 质量浓度为 19.22 $\mu\text{g/L}$,其水生态风险高于氨氮($\rho(HC_5) = 6\ 583.94\ \mu\text{g/L}$)和亚硝态氮($\rho(HC_5) = 334.33\ \mu\text{g/L}$)。应用生态风险评价中的物种敏感性分布(SSD)方法,刘亚莉等^[23]研究了敌敌畏对不同类别生物的 5%危害浓度阈值(HC_5),整理收集了中国重要水体中敌敌畏的环境浓度,计算了对淡水生物的潜在影响比例。结果表明不同模型的选择会影响 HC_5 的结果,且 Burr III 模型拟合结果较好, HC_5 质量浓度为 0.37 $\mu\text{g/L}$;在敌敌畏低浓度范围内,无脊椎动物的敏感性明显高于脊椎动物,甲壳类动物与昆虫和蜘蛛类相似,敏感度较高,鱼类则较低。杨建军等^[24]采用 SSD 方法,对渭河陕西西段的环境内分泌干扰物

表 1 生态风险水平的划分

Tab.1 Division of ecological risk levels

RQ	生态风险程度
$RQ < 1.00$	无显著风险
$1.00 \leq RQ < 10.0$	较小的潜在负效应
$10.0 \leq RQ < 100$	显著的潜在负效应
$RQ \geq 100$	预期的潜在负效应

双酚A(BPA)的水质基准进行了研究,根据 BPA 毒性数据进行 SSD 曲线拟合。结果显示,BPA 的 HC_5 质量浓度为 806 $\mu\text{g/L}$ 。

2.2 沉积物和土壤中重金属的生态风险评价方法与模型

2.2.1 地积累指数法

地积累指数法(index of geoaccumulation, I_{geo})是德国海德堡大学学者 MÜLLER 等^[25]在 1969 年研究河底沉积物时提出的一种计算沉积物中重金属元素污染程度的方法,通过计算 I_{geo} 值评价某种特定化学污染物造成的环境风险程度^[26]。计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{k \times B_n} \right) \quad (2)$$

式中: I_{geo} 为地积累指数; C_n 为元素 n 在沉积物中的浓度; B_n 为元素 n 的环境背景值; k 为考虑各地岩石差异或成岩作用可能引起环境背景值的变动而选取的修正指数,通常用来表征岩石地质、沉积特征以及其他影响。

齐鹏等^[27]采用地积累指数法对永康市 122 个地表水表层沉积物中 Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb 和 Fe 共 10 种重金属的含量进行了分析,解析重金属的来源并评价其潜在的生态风险。张琪等^[28]对南通市 51 个沉积物样品中重金属 Cu, Pb, Cr, Hg, As, Cd 的浓度进行了测试,并用地积累指数法评价了河流沉积物的重金属污染。

2.2.2 Hakanson 潜在生态风险指数法

Hakanson 潜在生态风险指数法是瑞典科学家 HAKANSON 于 1980 年提出的一种生态风险评价方法。这是目前较为常用的评价沉积物中重金属污染程度的方法之一,该方法的重点之一是可以确定重金属的毒性系数,还考虑了沉积物中污染物的毒性及其在沉积物中普遍的迁移转化规律,通过污染物总量分析与区域背景值进行比较,消除了区域差异及异源污染的影响^[29]。计算公式为

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i, \quad (3)$$

$$C_d = \sum C_f^i, \quad (4)$$

综合潜在生态风险指数(RI 值)由单个污染物的潜在生态风险参数(E_r^i)之和组成,计算公式为

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i C_f^i, \quad (5)$$

式中: E_r^i 表示沉积物中单个污染物的潜在生态风险参数, T_r^i 为某一污染物质的毒性系数;反映了不同污染物的毒性水平和生物对不同污染物的敏感程度,揭示了单个污染物对人体和水生生态系统的危害; C_f^i 为某一污染物的污染参数,为全球工业化前沉积物中污染物含量 C_n^i 和表层沉积物中污染物含量实测值 C^i 的比值; C_d 为多种污染物的综合污染指数。 RI 的风险水平划分标准见表 2。

表 2 不同生态风险水平的划分

Tab.2 Different levels of ecological risk

E_r^i	RI	潜在生态风险的程度
$E_r^i < 10$	$RI < 30$	低生态风险
$10 \leq E_r^i < 20$	$30 \leq RI < 60$	中生态风险
$20 \leq E_r^i < 40$	$60 \leq RI < 120$	较高生态风险
$40 \leq E_r^i < 80$	$RI \geq 120$	高生态风险
$E_r^i \geq 80$		极高生态风险

利用 Hakanson 潜在生态风险指数法计算得到的结果不仅可以反映出单一重金属元素污染对环境造成的影响,而且能够反映出多种重金属并存时对环境造成的综合影响。

宋冬梅等^[30]应用 Hakanson 潜在生态风险指数法对北极亚北极海区的白令海、楚科奇海、加拿大海盆海区沉积物中 8 种重金属元素的潜在风险进行了评价,求得北极整体生态风险指数达到 43.01,处于轻微生态风险状态,Co 重金属元素的风险最大。李珊珊等^[31]采集濠阳河表层沉积物,分析了 6 种重金属 Cr, Cu,

Cd, Pb, Zn, Ni 的污染特征,采用生态风险指数评价其环境风险。结果表明,沉积物中重金属的平均含量超过了河北省土壤元素背景值,沉积物中 Cd 污染达到极强生态危害,其次为 Cu, Pb 和 Zn,生态风险指数评价表明,滏阳河沉积物中重金属总体处于强生态风险水平。方晓波等^[32]采用生态风险指数对雷竹林土壤重金属的潜在生态风险进行了评价。结果表明,雷竹林土壤重金属 Hg, As, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni, Co, Mn 的平均含量超过浙江省土壤背景值,各重金属单因子的 *RI* 平均值评价结果显示,只有 Cd 污染达到中等生态风险,其他重金属均为轻微生态风险,而局部采样点的 Cd 和 Hg 单因子的潜在生态风险指数较高,存在很强的生态风险。厉炯慧等^[33]以海宁市电镀工业园区周边土壤为对象,研究土壤重金属的污染特征,并采用潜在生态风险指数法对土壤中重金属的潜在生态危害进行了评价。结果表明,海宁市电镀工业园区附近土壤中的平均重金属含量低于中国土壤环境质量的二级标准,对植物和环境不构成危害性影响。

2.2.3 物种敏感度分布曲线法

土壤的理化性质差异对重金属污染的毒性效应有很大影响^[34],因此,充分考虑生物有效性的影响对于完善土壤介质中重金属 SSD 模型的重大意义。为了消除这种影响,一些学者建立了生物毒害模型,对不同土壤对应毒性进行归一化预测^[35],并结合这些生物毒害模型,进一步构建土壤介质中的 SSD 模型^[36-37],所得到的 SSD 研究结果更为科学,更宜于推广使用。

王小庆等^[38]利用不同 SSD 拟合了基于中国土壤的 21 个物种的铜毒理学数据,建立了不同土壤条件下铜的物种敏感性分布曲线,结果不仅显示了不同土壤条件下的不同物种对铜毒害的敏感性分布规律,还为建立对应土壤性质的铜生态阈值提供了可靠的科学基础。采用逻辑斯蒂克分布(log-logistic distribution)模型和 SSD 分布方程,魏威等^[39]研究了在 2 种不同土壤中添加不同水平的外源 Zn 后,对 8 种植物毒性的剂量-效应关系及不同植物对外源 Zn 毒害的敏感性差异。结果表明,不同植物对 Zn 毒性的敏感性频次分布有明显差异,其中叶菜类植物对土壤中 Zn 的毒害较为敏感,而禾本科类植物对 Zn 具有较强的抗性,不同类型植物对土壤中 Zn 毒害的敏感性分布频次顺序与土壤性质无关。

3 结 语

目前,在现有的生态风险评价方法中,有的方法只能应用于某种环境介质中,如风险熵法、AQUATOX 模型,而有的方法可以应用于不同的环境介质,如物种敏感度分布曲线法既可以应用于水环境中,也可以应用于土壤中。

风险熵法可以确定某污染物是否有生态风险,并可以明确其生态风险的高低,适宜于水环境中低浓度污染物的生态风险评价,但其缺点是不能确定风险等级和危害的概率。该方法简单、实验费用低,能简要地解释风险,适应于单个化合物的毒理效应评估。

AQUATOX 模型在风险评价中不仅考虑了污染物的直接毒性效应,还考虑了污染物通过食物网传递引起的间接生态效应。目前该模型被广泛用于北美地区水体中有机氯农药、多环芳烃、多氯联苯及酚类化合物的生态风险评估。在中国,这一模型已经被用来评价松花江硝基苯污染事件的生态风险。

物种敏感度分布曲线法(SSD)目前已经被国际上多个国家和机构确立为制定环境基准的方法,并应用于生态环境风险评价中。但由于国际上没有权威研究证明 SSD 曲线属于某一特定的曲线分布,因此尚没有具体原则可以指导不同的研究者从国际上现有的多种拟合模型中,选择适宜的拟合方法。

地积累指数法(Iego)不但考虑了人为污染因素和环境地球化学作用对背景值的影响,还考虑了自然成岩作用可能引起的背景值变动,弥补了其他评价方法的不足。Hakanson 潜在生态风险指数法不仅考虑了重金属含量,还将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,进而对潜在的生态危害进行评价。Iego 主要考虑了重金属的富集程度,而 Hakanson 潜在生态风险指数法在此基础上还考虑了不同重金属的生物毒性的影响。相比之下,Hakanson 潜在生态风险指数法的评价结果更加全面和准确。

近年来,中国在污染物生态风险评价技术与方法方面取得了一些研究进展,但是相关的技术方法还不成熟,今后应加强对新型污染物的生态风险评价方法以及不同环境介质中多种污染物共存时导致的生态风险的研究,丰富生态风险评价方法体系,为环境监测与管理提供技术支持。

参考文献/References:

- [1] 阳文锐,王如松,黄锦楼,等.生态风险评价及研究进展[J].应用生态学报,2007,18(8):1869-1876.
YANG Wenrui, WANG Rusong, HUANG Jinlou, et al. Ecological risk assessment and its research progress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007,18(8): 1869-1876.
- [2] 王德宝,胡莹.生态风险评价程序概述[J].中国资源综合利用,2009,27(12):33-35.
WANG Debao, HU Ying. An overview of ecological risk assessment procedures[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2009,27(12):33-35.
- [3] 赵晨,董世魁,刘世梁,等.漫湾大坝上下游沉积物重金属与营养元素分布特征及环境风险评价[J].环境科学学报,2014,34(9):2417-2425.
ZHAO Chen, DONG Shikui, LIU Shiliang, et al. Distribution and environmental risk assessment of heavy metals and nutrients in sediments of upstream and downstream of Manwan Dam[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014,34(9):2417-2425.
- [4] 乔敏敏,季宏兵,朱先芳,等.密云水库入库河流沉积物中重金属形态分析及风险评价[J].环境科学学报,2013,33(12):3324-3333.
QIAO Minmin, JI Hongbing, ZHU Xianfang, et al. Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of inflow rivers of Miyun Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013,33(12):3324-3333.
- [5] ZHANG Daolai, LIU Jinqing, JIANG Xuejun, et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of PAHs in surface sediments from the Luan River Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 102(1):223-229.
- [6] 刘斌,冀巍,丁长春.生态风险评价研究综述[J].科技创新与应用,2013(12):110.
- [7] HOUBRAKEN M, HABIMANA V, SENA EVE D, et al. Multi-residue determination and ecological risk assessment of pesticides in the lakes of Rwanda[J]. Science of the Total Environment, 2017, 576:888-894.
- [8] 王晓峰.生态风险评价及研究进展[J].环境研究与监测,2012,25(1):61-63.
- [9] 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[J].城市环境与城市生态,2015,28(1):17-21.
ZHU Yanjing, ZHANG Yan, GAO Si, et al. Progress of ecological risk assessment methodology and choice of assessment models[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2015,28(1):17-21.
- [10] WENTSEL R S, LAPOINT T W, SIMINI M, et al. Tri-service Procedural Guidelines for Ecological Risk Assessment[R]. Aberdeen: US Army Edgewood Research, Development and Engineering Center, Aberdeen Proving Ground, MD, 1996.
- [11] 张璐璐,刘静玲,何建宗,等.中国典型城市水环境中邻苯二甲酸酯类污染水平与生态风险评价[J].生态毒理学报,2016,11(2):421-435.
ZHANG Lulu, LIU Jingling, HE Jianzong, et al. The occurrence and ecological risk assessment of phthalate esters (PAEs) in urban aquatic environments of China[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016,11(2):421-435.
- [12] 许凯.贵阳市主城区水域及饮用水源地 PAEs 监测及生态风险评价[D].贵阳:贵州师范大学,2015.
XU Kai. Pollution Monitor and Ecological Security Assessment of PAEs in the River Basins of Main Districts and Drinking Water of Guiyang City[D].Guiyang: Guizhou Normal University, 2015.
- [13] United States Environmental Protection Agency Office of Water. AQUATOX for Windows: A Modular Fate and Effects Model for Aquatic Ecosystems - Release 1-Volume 1: Users Manual[M].Washington DC : USEPA, 2004.
- [14] United States Environmental Protection Agency Office of Water. AQUATOX for Windows: A Modular Fate and Effects Model for Aquatic Ecosystems-Release 1-Volume 2: Technical Documentation[M].Washington DC : USEPA, 2004.
- [15] United States Environmental Protection Agency Office of Water. AQUATOX for Windows: A Modular Fate and Effects Model for Aquatic Ecosystems Release 1 - Volume 3: Model Varification Reports Addendum [M].Washington DC : USEPA, 2004.
- [16] 张璐璐,刘静玲,张少伟,等.基于 AQUATOX 模型的白洋淀湖区多溴联苯醚(PB-DEs)的生态效应阈值与生态风险评价研究[J].生态毒理学报,2014,9(6):1156-1172.
ZHANG Lulu, LIU Jingling, ZHANG Shaowei, et al. AQUATOX model for ecological threshold and ecosystem risk assessment of polybrominated diphenyl ethers (PB-DEs) in Baiyangdian lake ecosystems[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014,9(6):1156-1172.
- [17] 魏星瑶,王超,王沛芳.基于 AQUATOX 模型的入湖河道富营养化模拟研究[J].水电能源科学,2016,34(3):44-48.
WEI Xingyao, WANG Chao, WANG Peifang. AQUATOX model for study of eutrophication of tributaries[J]. Water Resources and Power, 2016,34(3):44-48.
- [18] NIU Zhiguang, GOU Qianqian, WANG Xiujun, et al. Simulation of a water ecosystem in a landscape lake in Tianjin with AQUATOX: Sensitivity, calibration, validation and ecosystem prognosis[J]. Ecological Modelling, 2016, 335: 54-63.
- [19] ALDENBERG T, SLOB W. Confidence limits for hazardous concentrations based on logistically distributed NOEC toxicity data[J].Ecotoxicology and Environmental Safety, 1993, 25: 48-63.
- [20] WHEELER J R, GRIST E P M, LEUNG K M Y, et al. Species sensitivity distributions: Data and model choice[J].Marine Pollution Bulletin, 2002, 45:192-202.
- [21] 张晓惠,袁雪竹,陈红,等.基于 SSD 法的持久性污染物水生态风险阈值研究[J].生态科学,2016,35(3):85-91.
ZHANG Xiaohui, YUAN Xuezhu, CHEN Hong, et al. The aquatic ecological risk thresholds of persistent organic pollutants based on species sensitivity distribution[J]. Ecological Science, 2016, 35(3): 85-91.
- [22] 陈瑾,刘奕梅,张建英.基于物种敏感性分布的微囊藻毒素与氮污染水体生态风险评估[J].应用生态学报,2014,25(4):1171-1180.

- CHEN Jin, LIU Yimei, ZHANG Jianying. Aquatic ecological risk assessment of microcystins and nitrogen pollution based on species sensitivity distribution[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014,25(4):1171-1180.
- [23] 刘亚莉,谢玉为,张效伟,等.应用物种敏感性分布评价敌敌畏对淡水生物的生态风险[J].生态毒理学报,2016,11(2):531-538.
LIU Yali, XIE Yuwei, ZHANG Xiaowei, et al. Assessing ecological risks of dichlorvos to freshwater organisms by species sensitivity distribution[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016,11(2):531-538.
- [24] 杨建军,关卫省,路屏.渭河陕西段环境内分泌干扰物 BPA 水质基准研究[J].河北科技大学学报,2013,34(2):166-172.
YANG Jianjun, GUAN Weisheng, LU Ping. Study on quality criteria of environmental endocrine disruption chemicals BPA in Weihe River in Shaanxi Province[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2013,34(2):166-172.
- [25] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3):109-118.
- [26] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等.土壤重金属污染评价方法进展[J].中国农学通报,2010,26(17):310-315.
FAN Shuanxi, GAN Zhuoting, LI Meijuan, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010,26(17):310-315.
- [27] 齐鹏,余树全,张超,等.城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例[J].环境科学,2015,36(12):4486-4493.
QI Peng, YU Shuquan, ZHANG Chao, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in urban surface water sediments from Yongkang[J]. Environmental Science, 2015, 36(12):4486-4493.
- [28] 张琪,刘媛媛,陈敏,等.应用地积累指数法评价南通市内河沉积物中重金属污染[J].干旱环境监测,2012,26(1):28-31.
ZHANG Qi, LIU Yuanyuan, CHEN Min, et al. Evaluated on heavy metal pollution of inland river sediment in Nantong City by accumulation index method[J]. Journal of Arid Environmental Monitoring, 2012, 26(1):28-31.
- [29] 张璐璐,刘静玲,LASSOIE J P,等.白洋淀底栖动物群落特征与重金属潜在生态风险的相关性研究[J].农业环境科学学报,2013,32(3):612-621.
ZHANG Lulu, LIU Jingling, LASSOIE J P, et al. The correlational study between the community characteristics of benthic macroinvertebrates and the potential ecological risk of heavy metal in Baiyangdian[J]. Agro-Environment Science, 2013,32(3):612-621.
- [30] 宋冬梅,冯文强,刘焱光,等.白令海、楚科奇海、加拿大海盆沉积物重金属潜在生态风险评价[J].极地研究,2016,28(3):346-352.
SONG Dongmei, FENG Wenqiang, LIU Yanguang, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in the Bering Sea, the Chukchi Sea and the Canada Basin[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2016,28(3):346-352.
- [31] 李珊珊,单保庆,张洪,涇阳河系表层沉积物重金属污染特征及其风险评价[J].环境科学学报,2013,33(8):2277-2284.
LI Shanshan, SHAN Baoqing, ZHANG Hong. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Fuyang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,33(8):2277-2284.
- [32] 方晓波,史坚,廖欣峰,等.临安市雷竹林土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].应用生态学报,2015,26(6):1883-1891.
FANG Xiaobo, SHI Jian, LIAO Xinfeng, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil in *Phyllostachys praecox* stands of Lin'an[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(6):1883-1891.
- [33] 厉炯慧,翁珊,方婧,等.浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析[J].环境科学,2014,35(4):1509-1515.
LI Jionghui, WENG Shan, FANG Jing, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil around Haining electroplating industrial park[J]. Environmental Science,2014,35(4):1509-1515.
- [34] 张晓晴,韦东普,李波,等.土壤水溶态铜对小白菜的毒害效应及其预测模型[J].生态毒理学报,2014,9(4):729-736.
ZHANG Xiaoqing, WEI Dongpu, LI Bo, et al. The toxicity effect of soil soluble copper on bok choy and its prediction model[J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2014,9(4):729-736.
- [35] TIAN Dayong, CHANG Chenchao, WANG Chengzhi, et al. Review of species sensitivity distributions for heavy metals and organic contaminants[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015,10(3):38-49.
- [36] 王小庆.中国农业土壤中铜和镍的生态阈值研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2012.
WANG Xiaoqing. Ecological Thresholds for Copper and Nickel in Chinese Agricultural Soils[D]. Beijing:China University of Mining and Technology(Beijing), 2012.
- [37] WANG Xiaoqing, LI Jumei, WEI Dongpu, et al. Major soil factors affecting ecological threshold for copper and the predictable models [J]. China Environmental Science, 2014,34(2):445-451.
- [38] 王小庆,韦东普,黄占斌,等.物种敏感性分布法在土壤中铜生态阈值建立中的应用研究[J].环境科学学报,2013,33(6):1787-1794.
WANG Xiaoqing, WEI Dongpu, HUANG Zhanbin, et al. Application of species sensitivity distribution in deriving of ecological thresholds for copper in soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013,33(6):1787-1794.
- [39] 魏威,梁东丽,陈世宝.土壤中源锌对不同植物毒性的敏感性分布[J].生态学杂志,2012,31(3):538-543.
WEI Wei, LIANG Dongli, CHEN Shibao. Plant species sensitivity distribution to the phytotoxicity of soil exogenous zinc[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012,31(3):538-543.