

DOI: 10.20103/j.stxb.202207121989

姜蓉, 李勖之, 王美娥, 陈卫平. 土壤污染生态毒性效应评价研究进展. 生态学报, 2023, 43(21): 9061-9070.

Jiang R, Li X Z, Wang M E, Chen W P. Advances in ecotoxicological effect assessment of contaminants in soil. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 9061-9070.

土壤污染生态毒性效应评价研究进展

姜 蓉¹, 李勖之³, 王美娥^{1,2,*}, 陈卫平^{1,2}

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 生态环境部南京环境科学研究所, 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042

摘要: 随着社会经济的高度发展, 人类活动加剧, 我国土壤污染问题突出, 不仅威胁人体健康, 同时也严重威胁动植物及微生物的安全, 生态安全问题不容忽视。但是我国土壤污染风险管控目前主要关注人体健康, 对生态系统的关注较少, 缺乏土壤污染生态风险评估技术指南及基于生态风险的土壤环境质量基准及标准。准确评价土壤污染生态毒性效应, 是制定土壤环境质量标准、实现生态风险评估及预警与管控的重要基础。针对土壤污染生态毒性效应评价问题, 分别对土壤污染生态毒性效应特征、评价方法、评价终点、暴露-效应关系构建、生态毒性效应外推, 以及群落水平与复合污染生态毒性效应评价等方面的关键问题展开了讨论, 指出目前土壤污染生态毒性效应评价主要是基于单物种的急性毒性测试, 利用个体和亚个体水平的指示物作为评价终点, 缺乏针对群落及生态系统高水平评价终点的生态毒性效应评价方法, 定量评价污染物尤其是复合污染物对土壤生物群落及生态系统的影响, 是土壤污染生态毒性效应评价的关键问题和难点问题。建议今后重点开展以下 3 方面的工作 1) 群落及生态系统水平评价终点的筛选; 2) 土壤污染生态毒性效应环境影响因子识别及影响机制研究; 3) 土壤复合污染联合毒性效应定量评价及其不确定性研究。以期为准评价实际污染场地土壤污染的真实生态毒性效应及生态风险, 制定土壤污染生态风险评估等环境保护标准和技术规范提供理论基础和科技支撑。

关键词: 复合污染; 生态毒性效应评价; 生态风险; 评价终点; 联合毒性效应

Advances in ecotoxicological effect assessment of contaminants in soil

JIANG Rong¹, LI Xuzhi³, WANG Meie^{1,2,*}, CHEN Weiping^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

Abstract: With the development of society and economy as well as intensively increase of anthropogenic activities, soil ecosystems are susceptible to various pollutants. Soil contamination has become a serious problem in China, which threatens not only human health but also imposes serious threat on the safety of plants, animals and microorganisms. The relevant ecological risks and ecological security problem cannot be ignored. However, risk management and control for soil pollution concentrates narrowly on human health at present and there is less attention to ecosystem safety in our country. For example, there is still lack of specific technique guideline for ecological risk assessment of pollutant in soil and no soil environment quality standard based on ecological risk. Accurate assessment of ecotoxicological effect caused by soil pollution is an important basis for benchmarking soil environmental quality. Meanwhile, it is also significant foundation for assessing

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42107293); 博士后面上资助项目(2020M680700)

收稿日期: 2022-07-12; **网络出版日期:** 2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mewang@rcees.ac.cn

ecological risk, realizing ecological risk early warning as well as conducting ecological risk management and control. In this paper, we discussed key problems in ecotoxicological effect assessment of soil pollution, focusing on characteristics of ecotoxicological effect, assessment approaches, assessment endpoints, construction of exposure-effect relationships, extrapolation of ecotoxicological effect, ecotoxicological effect assessment at community level, and ecotoxicological effect assessment of combined pollutants in soil. On such basis, key perspectives concerning ecotoxicological effect assessment of pollutant in soil were addressed. Currently, ecotoxicological effect assessment mainly focuses on acute toxicity of pollutants to single species, using indicators at individual and sub-individual level as assessment endpoints. There is still lack of applicable approaches which could quantitatively assess ecotoxicological effect of pollutant in soil at community or ecosystem level. Quantitative assessment of ecotoxicological effect of pollutant in soil, especially combined pollutants, on soil biota at community or ecosystem level is the key and difficult scientific problem. Future studies should focus on three aspects: 1) screening of applicable and sensitive assessment endpoints at community or ecosystem level, 2) identification of environmental factors affecting the ecotoxicological effect caused by pollutants in soil and elucidating the associated impact mechanism, and 3) establishment of quantitative approaches assessing joint toxicity of combined pollutants in soil and elucidating uncertainties. The aim of this review was to provide theoretical base for accurate assessment of real ecotoxicological effect and ecological risk of pollutants in contaminated sites, as well as provide scientific and technological support for establishment of guideline or technology specification for soil environment protection, such as ecological risk assessment.

Key Words: combined pollution in soil; ecotoxicological effect assessment; ecological risk assessment; assessment endpoints; joint toxicity

据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》报道,重污染物企业用地、工业废弃地、工业园区、采矿区等场地的超标点位基本都在 30%以上,污染场地的风险管理的压力在不断增大。我国现有的土壤环境质量标准(农用地,GB15618—2018;建设用地,GB36600—2018)^[1-2]中,仅农用地土壤污染风险管控标准中的部分指标考虑了污染物对农作物生长和土壤生态的影响,而建设用地土壤污染风险管控标准主要依据人体健康风险而制定,尚未考虑土壤污染物的生态风险^[3]。近年来,大量学者基于实验室毒性测试的生态毒性数据利用物种敏感分布曲线模型推导了土壤中 Cu、Zn、Pb 等多种重金属的生态阈值^[4-6]。但是我国污染场地土壤污染物种类众多^[7],基于生态风险的土壤环境质量标准的缺乏,导致许多污染场地及周边区域的生态系统受损严重,无法得到有效保护。有效评价土壤污染生态毒性效应,基于浓度阈值推导生态安全阈值是制定土壤环境标准,是进行生态风险评估及管控的重要基础和科学依据,也是整个土壤环境保护和管理体系的根本^[8-9]。

本文针对土壤污染生态毒性效应评价问题,分别对土壤污染生态毒性效应特征、评价方法、评价终点、暴露-效应关系构建、生态毒性效应外推,以及群落水平与复合污染土壤生态毒性效应评价等方面的关键问题进行了综述,以期为准确评价实际污染场地土壤污染的真实生态毒性效应及生态风险,制定土壤污染生态风险评估等相关环境保护标准和技术规范提供理论基础和科技支撑。

1 土壤污染生态毒性效应

土壤污染生态毒性效应(Ecotoxicological effect)是指污染物进入土壤中造成土壤污染和环境破坏,引起生态系统结构和功能的变化。目前,我国土壤环境状况总体不容乐观,土壤污染问题突出,污染趋于多元化和复杂化。土壤中主要污染物主要包括重金属,新烟碱类杀虫剂、唑类杀菌剂等农药,多氯联苯、二噁英类、多环芳烃及多溴联苯醚等持久性有机污染物^[10-11],微塑料^[12-13]、医药品和个人护理品^[14]、邻苯二甲酸酯类增塑剂^[15]以及纳米颗粒^[16]等新兴污染物。

土壤中种类繁多的污染物达到一定浓度时会损坏生物细胞膜造成细胞物理损伤,细胞会发生氧化应激反

应会造成细胞氧化损伤,抗氧化酶活性发生变化,也会导致 DNA 结构破坏、信号传递和基因转录受到干扰,进而影响细胞内的正常代谢及生理功能,对土壤微生物及动植物产生毒性效应^[11-16]。当土壤中污染物浓度水平较低时,仅在土壤生物分子和细胞水平表现出毒害效应,生物体可通过其体内自身的生理调节机制来减轻或消除这些不利影响。但是,当污染物浓度水平超出了生物体自身调节能力的水平时,就会对生物体产生显著的致毒效应^[15]。土壤中有毒污染物对植物的影响主要表现在对植物的种子萌发、幼苗生长、生物量和产量的不利影响;对土壤动物的影响主要表现在导致细胞坏死凋亡、组织器官损伤、生长发育抑制和繁殖能力降低,甚至造成死亡;对土壤微生物的影响主要表现在对微生物的生物量、群落的组成和结构以及土壤酶活性的改变,从而影响土壤正常的生态功能。

2 土壤污染生态毒性效应评价方法

生态毒性效应评价(Ecotoxicological effect assessment)是指对生态受体随不同程度风险源变化情况进行评价的过程^[17],是生态风险评估的重要内容。与侧重于具有易于识别和完整生命周期个体的人体健康风险评估不同,生态毒性效应评价侧重于整个土壤生态系统,包括许多完全不同的物种^[18]。生态毒性效应评价的内容是评价生态毒性数据的来源、需求和可获得性,分析污染物的暴露表征结果,研究暴露水平和生态毒性效应的定量关系,推导风险阈值^[19-20]。如图 1 所示,通常土壤污染生态毒性效应评价可以采用 3 种不同的方法在不同层级进行评价^[21-23]。

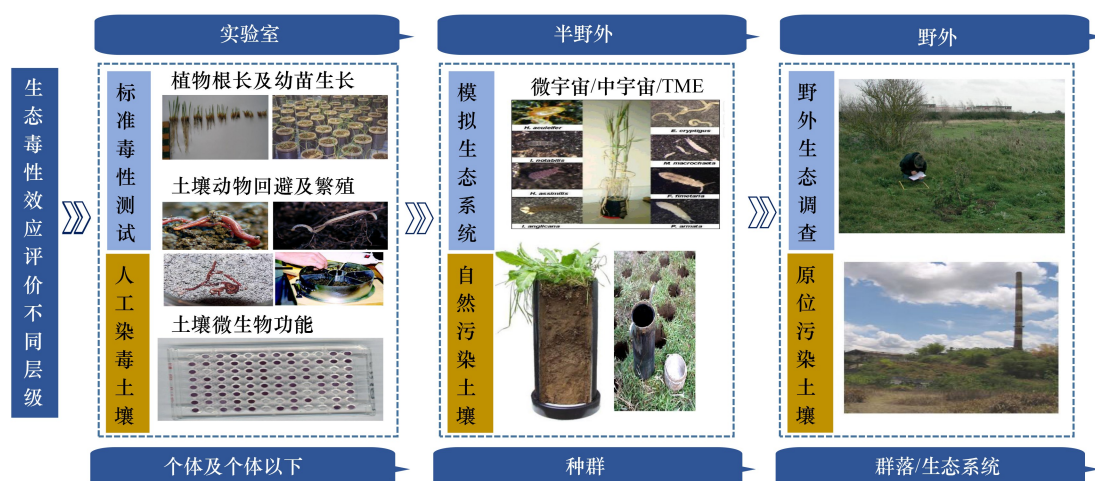


图 1 土壤污染生态毒性效应评价在不同层级的不同方法

Fig.1 Three different methods at different tiers for ecotoxic effect evaluation of soil pollution

TME;陆地模型生态系统

(1) 基于人工染毒土壤,选择典型土壤生物(如植物、蚯蚓、跳虫等)进行标准化的实验室生态毒性测试。目前,世界各国及国际组织,包括经济合作与发展组织(OECD)及国际标准化组织(ISO)等,已经建立了土壤生态毒性测试的标准方法体系,我国虽然起步研究时间相对较晚,但也发布了相关标准^[22]。化学品引起的直接毒性的解释比较直接和简单,毒性数据可以来源于已发表的文献或标准毒性数据库,如 USEPA-ECOTOX (<https://cfpub.epa.gov/ecotox>)、RIVM-e-toxBase (<http://www.e-toxbase.com>)及 ECHA-IUCLID (<https://iuclid6.echa.europa.eu>)等。标准化的生态毒性测试试验是在最佳控制环境条件下进行的单物种毒性测试,操作标准化、成本低且结果重现性强。但是,通常多为高浓度大剂量下的短期毒性,代表最坏的情况,忽略了污染物在土壤中的生物有效性问题以及不同生物体之间及生物体与环境因子之间的交互作用,导致很难将试验结果简单外推到野外实地条件。

(2) 基于野外收集的历史污染土壤进行异地生物毒性测试,通常是多物种生物毒性测试系统(soil-multi-

species, SMS)。这种在实验室内或室外条件下的半野外模拟试验,试图在模拟部分陆地生态系统中的生态过程和物种相互作用,例如基于陆地模型生态系统(Terrestrial Model Ecosystems, TME)的土壤微宇宙试验^[24]及中宇宙试验(Mesocosm experiment)^[25-26]等。这种半野外的模拟试验是将实验室试验的优点与实地研究的优点结合起来,同时避免它们的缺点^[27],可以在一定程度模拟真实的生态系统,通常被认为比基于实验室标准毒性测试获得的毒性数据更真实。但是,自然土壤变异性强及稳定性低会导致实验结果难以再现,成本较高导致实验重复通常较少,并且由于测试时间有限使得难以检测低浓度污染物的生态毒性效应。

(3)在野外条件下监测分析污染地域的生物响应,得到原位条件下土壤污染的生态毒性效应^[28]。该方法主要基于野外实地调查,在不同的空间和时间尺度下,监测和分析土壤污染对土壤生物群落及生态系统的毒性效应^[29-30]。这种方法通常更具现实性和生态意义,并且可以通过直接评价受关注的受体和整合特定地点的暴露条件来消除许多不确定性^[19]。但是,在野外实际生态环境中土壤污染暴露-效应关系复杂,难以构建定量关系,也存在着耗时长、成本高及操作困难等问题。

3 土壤污染生态毒性效应评价终点

对于土壤污染生态毒性效应评价,除了评价方法,更重要的是评价终点的选择,选择的原则主要包括:与生态系统密切相关,对潜在风险敏感,以及与环境管理目标契合^[20]。生态毒性效应评价终点一般分为个体、种群、群落和生态系统三个水平^[19]。传统的评价终点常常选用模式生物个体及个体以下水平的评价终点,例如无脊椎动物的繁殖率、产卵率以及植物的种子发芽、根伸长抑制和生物量等。

目前,燕麦、普通小麦、玉蜀黍等常见的经济作物是各国际组织普遍推荐的受试植物,而我国土壤受试植物主要以小麦、水稻、萝卜、小白菜等禾本科和十字花科的农作物为主^[31]。有学者认为水溶性污染物如重金属通常对植物种子发芽率和根伸长指标产生显著影响,而疏水性有机污染物的影响不显著^[32-33]。土壤动物的毒性测试通常包括大型土壤动物如蚯蚓,中型土壤动物如跳虫、线虫和捕食性螨虫,以及微型土壤动物如线虫等模式物种^[34-36]。土壤动物的急性毒性实验、慢性毒性实验和回避实验可以从不同的评价终点反映污染物质的毒性效应。Crouau 和 Moia^[37]比较了多种重金属和五氯酚对跳虫的繁殖和生长的毒性效应,研究发现繁殖是比生长更敏感的评价终点。也有研究表明土壤动物对于重金属、萘及菲等污染物的回避行为相比急性毒性更敏感,高于或至少等同于亚急性毒性试验中的生殖毒性效应^[38-40]。随着分子生物技术和日益成熟,宏基因组测序及基因芯片等分子生物技术,可以提供大量微生物群落信息,使我们全面了解土壤微生物生态过程。近年来已有大量研究从功能基因、功能种群及群落等不同水平和维度研究重金属^[41]、农药^[42]及抗生素^[43]等污染物对土壤微生物群落的影响。

由于忽略了生态系统中不同物种及种群之间的相互作用,对物种敏感性差异考虑不足,基于单物种及种群的毒性效应,不能全面地反映土壤污染的真实生态毒性效应(图2)。Sechi 等^[26]和 Zhu 等^[44]通过构建简单的食物网和食物链测试方法,研究了 α -氯氰菊酯和重金属 Cd 的生态毒性效应,结果表明多物种试验系统可以显示污染物的直接和间接影响,能够检测单一物种试验中不存在的种群动态和物种相互作用,与单一物种测试结果存在明显差异。Jiang 等^[45]以湖南某废弃矿冶区为例,基于植物群落生态调查数据,评价了其周边多金属污染土壤对植物群落的生态效应,结果表明基于植物群落组成及功能性状评价终点推导的毒性阈值浓度比基于作物和蔬菜种子萌发和幼苗生长毒性实验数据推导得出的毒性阈值更具场地特异性和包容性。美国环境保护署^[46]和欧洲食品安全管理局^[47]颁布的生态安全基准制定技术指南以及土壤生态风险评估指南中都指出应该将保护目标由生物个体水平和种群水平转向更高层次的群落和生态系统水平,但目前仍然非常缺乏针对群落及生态系统高水平评价终点的生态毒性效应评价方法。

4 土壤污染暴露-效应关系

暴露-效应关系(exposure-effect relationship)是指不同暴露剂量的污染物与其引起的生态毒性效应发生率

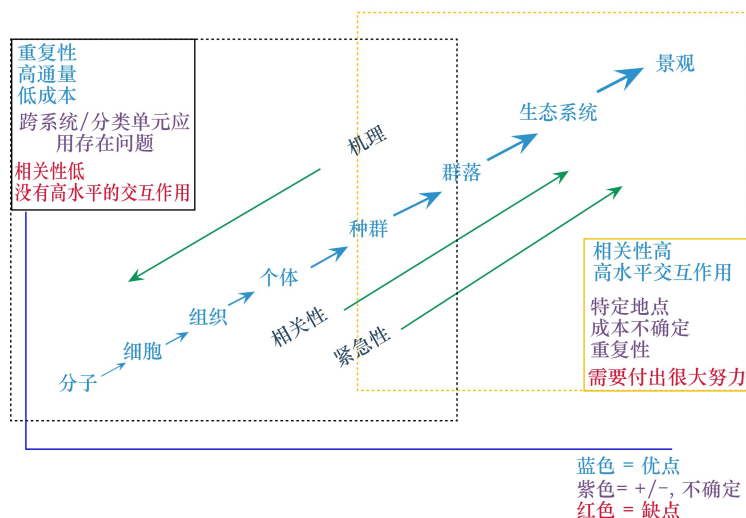


图2 具有不同生态学意义的不同生物水平下的评价终点 (摘自 Rohrer 等^[29])

Fig.2 The endpoints in different biological level with different ecological relevance (adopted from Rohrer et al.^[29])

之间的关系。暴露-效应定量关系模型的构建是实现定量评价土壤污染生态毒性效应并进一步推导生态阈值,建立环境基准及质量标准的关键技术^[48]。最常用的是利用暴露-效应关系曲线描述暴露-效应关系,即以表示效应的百分率或比值为纵坐标,以污染物浓度为横坐标,绘制散点图,并用曲线进行描述,曲线类型一般包括直线型、S 形曲线型、抛物线型、“倒 U”型及 J 型等^[49—50]。

单调的 S 形曲线是最常见的,常用于描述 S 形曲线的非线性函数有 log-logit 函数和简化的 Hill 函数等,其中 log-logistic 函数在实际中应用相对最为广泛^[50],能较好地拟合重金属及抗生素等污染物与植物幼苗根伸长^[5]、株高^[51]和生物量^[52],土壤微生物对污染胁迫耐受性^[53],以及原生生物数量^[54]等指标之间的暴露-效应关系。Bérard 等^[55]和 Yang 等^[56]研究发现重金属 Cd 与土壤微生物诱导呼吸强度之间以及零价 Fe 纳米材料与秀丽隐杆线虫的繁殖率之间的暴露-效应关系均符合 Hill 模型。土壤微生物酶活性及酶功能稳定性与多种重金属之间的剂量-效应关系通常可以用全抑制或者部分抑制模型进行拟合^[57—58]。同时,对于土壤生物,非单调非线性的暴露-效应曲线也常有报道,最常见的是低剂量刺激与高剂量抑制现象,即 Hormesis 现象,例如大量研究报道了重金属对植物生长^[59—60]及土壤酶活性^[61—62]具有低剂量刺激(hormesis)作用,该曲线类型一般为 J 形曲线。

在实际环境中,土壤污染物的暴露-效应关系通常非常复杂,受多种因素影响,尤其是土壤理化性质。近年来,有大量研究以我国多种不同性质土壤为研究对象,系统研究了 Cu、Zn、Ni、Cr 等多种重金属对不同植物(大麦、小白菜和西红柿等)、土壤动物(跳虫、蚯蚓等)及土壤微生物(硝化活性等)的毒性效应并建立了毒性阈值的预测模型,研究发现土壤 pH、CEC 及有机质等理化性质是影响重金属毒性阈值的主要环境因子^[63—66]。

5 土壤污染生态毒性效应外推

Posthuma 等^[67]指出不能将对生态系统的毒性影响评估为对所涉及的所有单独物种的影响的总和,也不能将在实验室受控条件及最佳环境状态下暴露的一个或几个物种的观察结果简单外推到野外的实际生态系统中。Karpouzaz 等^[68]和 Karas 等^[69]在烟嘧磺隆、毒死蜱、异丙隆及戊唑醇等农药对土壤微生物群落的毒性效应的研究中发现,实验室控制实验中草药氏阴性菌/阳性菌和真菌的丰度、土壤 C/P 循环的酶活性以及功能种群的丰度在低浓度农药胁迫下就表现出明显的抑制效应且存在显著的暴露-效应关系,但在野外条件下并没有发现显著的暴露-效应关系。

如图 3 所示,目前风险评估人员经常使用外推模型,基于实验室毒性测试数据,将物种个体水平生态毒性效应外推到野外生态系统水平毒性效应,获得土壤污染生态阈值,例如评估因子法(AF)及物种敏感曲线分布法(SSD)等^[70-72]。与 SSD 法相比,AF 法简单、易操作,但评估因子的选取过于经验化,不确定性高。SSD 法假设随机挑选的物种能够代表整个生态系统的群落结构,并认为污染物引起生物不适的毒性数据遵循某种数学分布^[73],通过物种的毒理数据来构建 SSD 曲线,并选用模型拟合,结果更为科学合理,在实际应用中也更为广泛^[74]。SSD 拟合方法主要包括参数方法和非参数方法,有多种拟合模型,参数拟合方法的模型主要有 Log-normal, Log-logistic 和 BurrII 等,非参数拟合方法主要是 Bootstrapping 等^[75]。但是,SSD 法对毒性数据库的要求较高,当前陆地生态系统生物的毒性数据库严重不足,因此其在野外实际中的应用受到很大限制。

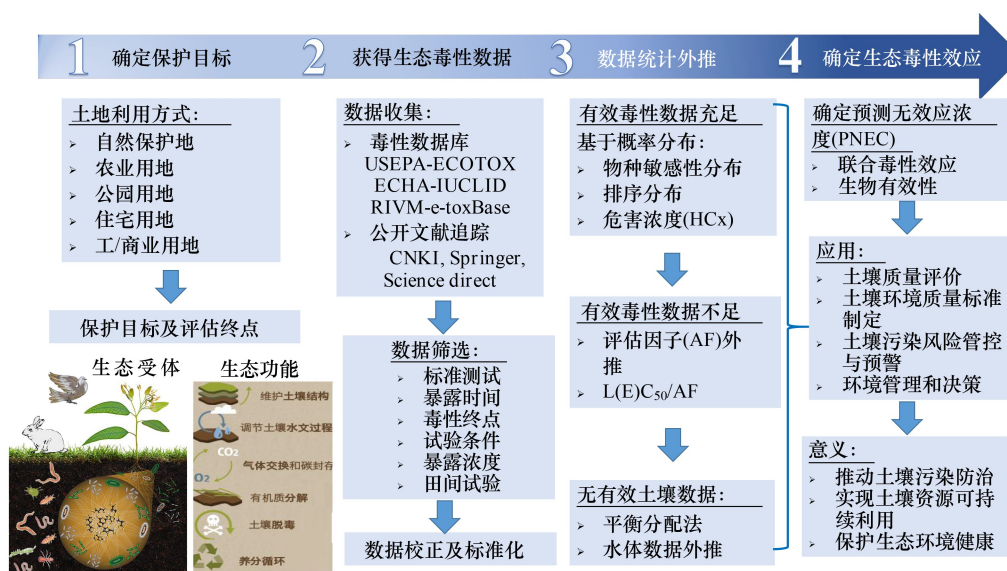


图 3 土壤污染生态毒性效应统计外推方法

Fig.3 The extrapolation method of soil ecotoxicity from laboratory toxicity test data to field effects

USEPA 美国环保局;ECHA 欧洲化学品管理局;RIVM 荷兰国家公共卫生及环境研究院;CNKI 中国知网;L(E)C₅₀ 半致死或半抑制效应浓度

6 群落以上水平土壤污染生态毒性效应评价

在更高的群落及生态系统水平,评估土壤污染生态毒性效应对于实际污染场地生态风险评估,特别是对于更高层级的更精细化的生态风险评估至关重要^[76]。基于群落及生态系统水平生态毒性效应评价,最直接的方法就是在实际污染场地进行野外调查研究^[77-78]。但是这种方法受限于在相同区域类似性质的无污染土壤的可获得性,在没有对照土壤的条件下,可以通过选定不同污染梯度的土壤,可以通过选定不同污染梯度的土壤,例如距离点源不同污染距离的采样点,形成浓度梯度,然后测定相关终点响应,形成零污染浓度缺失的暴露-效应曲线关系^[79]。形成浓度梯度,然后测定相关终点响应,形成零污染浓度缺失的暴露-效应曲线关系。

在实际野外环境中,土壤性质复杂且异质性较高,土壤污染生态毒性效应往往是环境因子和污染物共同作用的结果,而且污染物对土壤生物群落的毒性效应还经常会被气候、地形和土壤因素等环境因子的影响所掩盖。因此,评估野外现场观测到的不利生态毒性效应是否可归因于土壤中测量的污染物至关重要^[80-81]。Hill 的因果标准,包括关联强度、关联一致性、特异性、合理性、连贯性、生态梯度等,已被证明有助于为生态应用建立可能的因果关系^[80]。同时,污染物分布的空间和时间变异性进一步加剧了统计意义上的毒性阈值的不确定性^[22]。合理利用分段回归、分位数回归、logit 回归等多元统计方法,可以校正环境混杂因素的影响,准确定量评价污染物生态毒性效应^[20,77-78,82]。

目前,基于野外土壤生物群落的生态调查数据,利用物种多样性、丰度、生物量、群落结构等指标,可以评

价污染物对生物群落的生态毒性效应^[83]。有机物分解在土壤养分循环中起着关键作用,有机质分解是评价土壤生态系统功能的重要指标,分解袋测试(Litter Bag)^[84]和诱饵板测试(Bait-lamina)^[85]等标准方法可以通过测量有机物质质量损失及土壤无脊椎动物的摄食活动,直接评价污染胁迫对土壤微生物和动物群落功能的影响。但是,这些测试方法通常需要数月 to 数年的时间,相对费时费力且不灵敏,并且不能揭示对土壤动物或微生物群落结构的潜在影响^[26]。基于性状的生态毒性效应评价方法不受生物地理分布差异的限制,在揭示生物的响应和适应生态学机制的同时,可以更好地建立污染胁迫与生态系统过程和功能之间的联系,实现在群落和生态系统功能水平评估生态毒性效应^[86-87]。目前该方法在水体中应用广泛,例如基于浮游植物和无脊椎动物群落功能性状评估抗生素^[88]、农药^[89]及重金属^[90]等污染物的生态毒性效应,但在土壤中的应用还相当有限。

7 土壤复合污染联合毒性效应评价

除了以上所提到的缺少生态系统水平评价终点的难点以外,实际污染场地土壤是多种污染物共存的复合污染系统。由于复合污染具有场地特异性(Site specific),即,不同土壤性质、不同污染物种类以及不同浓度比例等都能够影响复合污染联合效应,导致联合生态毒性效应的定量评价更为复杂。

复合污染联合毒性效应的评价通常包括基于化合物的“自下而上”(Bottom-up)方法及基于基质的“自上而下”(Top-down)方法两种方式^[91]。“自下而上”方法又称“基于化合物”方法,主要是基于单污染物毒性数据,采用浓度加和模型(CA)和效应加和模型(IA)等经典的联合毒性效应模型来分析和预测联合毒性效应,是当前复合污染生态毒性效应评价中应用较为广泛的方法^[92]。基于化合物的“自下而上”方法具有前瞻性,可以降低生物测试的需求,提高评价的效率,但在实际应用中的关键技术问题在于基于污染场地土壤的具体情况模型校正。

“自上而下”方法,又称“基于效应”方法,是将复合污染物作为一个整体,基于基质进行直接生物毒性测试,进行回顾性生态毒性效应分析,通过复合污染物的暴露-效应关系的构建,实现复合污染生态毒性效应的定量评价,具有更强的场地特异性^[93]。该方法直接测试复合污染物的整体效应,而不评价所有污染物的单独效应,因此很难识别联合效应来源于哪种污染物^[94]。但将该方法结合多元分析方法,对调查样点和污染物种类进行分组,可以降低复合污染物的复杂性,更好的识别复合污染联合毒性驱动因子^[7]。

8 结论与展望

综上所述,传统的土壤污染生态毒性效应研究大多以实验室模拟实验研究为主,针对单物种个体的急性毒性测试,评价终点主要集中在个体及个体水平以下,很难真正揭示土壤污染的真实生态毒性效应。虽然可以利用评估因子(AF)及物种敏感曲线(SSD)等方法,可以实现由物种个体到生态系统水平的外推,但外推法一方面对数据库质量要求高,另一方面也存在很大的不确定性,在实际应用中仍有一定的局限性。

基于以上土壤污染生态毒性效应评价研究的发展现状,为了进一步提高当前土壤污染生态毒性效应评价结果的准确性,揭示土壤污染的真实生态毒性效应,今后需要在以下几个方面开展工作:1)群落及生态系统水平评价终点的筛选。基于实际污染场地数据,揭示土壤生物群落结构及功能在污染胁迫下的演变特征及适应机制,筛选群落及生态系统水平评价终点,构建评价终点指标体系,是建立高层次的生态毒性效应评价方法的重要前提。2)土壤污染生态毒性效应环境影响因子识别及影响机制研究。在实际环境中,土壤环境因子是影响土壤污染生态毒性效应的混杂因子,因此识别土壤污染生态毒性效应的环境影响因子,揭示其影响机制,是建立实际污染土壤复杂生态环境条件下的暴露-效应关系的关键。3)土壤复合污染联合毒性效应定量评价及其不确定性研究。实际污染场地土壤是多种污染物共存的复合污染系统,定量评价复合污染联合效应,阐明其不确定性及不确定性引起的机理,是实现土壤生态毒性效应准确评价的关键问题,也是未来的研究要点。

参考文献 (References):

- [1] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 中华人民共和国国家标准: 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 GB15618—2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [2] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 中华人民共和国国家标准: 土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准 GB 36600—2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [3] 李勛之, 姜璐, 孙丽, 郑丽萍, 王国庆, 龙涛, 林玉锁. 不同国家土壤生态筛选值比较与启示. 环境化学, 2022, 41(3): 1001-1010.
- [4] Wang X Q, Wei D P, Ma Y B, McLaughlin M J. Derivation of soil ecological criteria for copper in Chinese soils. PLoS One, 2015, 10(7): e0133941.
- [5] Qin L Y, Sun X Y, Yu L, Wang J, Modabberi S, Wang M, Chen S B. Ecological risk threshold for Pb in Chinese soils. Journal of Hazardous Materials, 2023, 444: 130418.
- [6] 黄兴华, 李勛之, 王国庆, 姜锦林, 龙涛, 王小治. 保护陆生生态的土壤铜环境基准研究. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4720-4730.
- [7] 王美娥, 丁寿康, 郭观林, 李勛之, 姜璐, 张媛, 谢天. 污染场地土壤生态风险评估研究进展. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3946-3958.
- [8] 周启星, 安婧, 何康信. 我国土壤环境基准研究与展望. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 1-6.
- [9] 骆永明, 涂晨, 宋静, 滕应, 吴龙华, 章海波, 刘五星. 土壤污染毒性、基准与风险管理. 北京: 科学出版社, 2016.
- [10] 王春辉, 吴绍华, 周生路, 虞燕娜. 典型土壤持久性有机污染物空间分布特征及环境行为研究进展. 环境化学, 2014, 33(11): 1828-1840.
- [11] 程金金, 宋静, 吕明超, 王兴祥. 多氯联苯对我国土壤微生物的生态毒理效应. 生态毒理学报, 2014, 9(2): 273-283.
- [12] 任欣伟, 唐景春, 于宸, 何娟. 土壤微塑料污染及生态效应研究进展. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1045-1058.
- [13] 杨光蓉, 陈历睿, 林敦梅. 土壤微塑料污染现状、来源、环境命运及生态效应. 中国环境科学, 2021, 41(1): 353-365.
- [14] 韦巧珍, 林子雨. PPCPs 的环境暴露、毒性效应及风险评估研究进展. 环境科学与技术, 2020, 43(4): 16-24.
- [15] 宋雪英, 崔小维, 李嘉康, 郭畔, 魏建兵. 邻苯二甲酸酯类塑化剂的土壤生态毒理学研究进展. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1885-1890.
- [16] 张萌, 罗雅琪, 段天欣, 李威, 程虎, 李萍萍, 韩建刚. 土壤中纳米颗粒的生物效应研究进展. 环境化学, 2022, 41(11): 3613-3628.
- [17] USEPA (US Environmental Protection Agency). Guidelines for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-95/002F. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, Office of Research and Development. 1998.
- [18] Faber J H, van Wensem J. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils. The Science of the Total Environment, 2012, 415: 3-8.
- [19] USEPA (US Environmental Protection Agency). Office of Solid Waste and Emergency Response. Ecological risk assessment guidance for Superfund: process for designing and conducting ecological risk assessments. US Environmental Protection Agency, Environmental Response Team, 1997.
- [20] Suter G W. Ecological Risk Assessment. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
- [21] Nogueira Cardoso E J B, Lopes Alves P R. Soil ecotoxicology. Ecotoxicology. Croatia: InTech, 2012.
- [22] 贺纪正, 陆雅海, 傅伯杰. 土壤生物学前沿. 北京: 科学出版社, 2015.
- [23] 李勛之. 城市土壤重金属与环草隆复合污染对蚯蚓的生态效应研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [24] Knacker T, van Gestel C A M, Jones S E, Soares A M V M, Schallnaß H J, Förster B, Edwards C A. Ring-testing and field-validation of a terrestrial model ecosystem (TME)-an instrument for testing potentially harmful substances: conceptual approach and study design. Ecotoxicology, 2004, 13(1): 9-27.
- [25] Zhu D, Ke X, Wu L H, Li Z, Christie P, Luo Y M. Ecotoxicity of cadmium in a soil collembolan-predatory mite food chain: can we use the ¹⁵N labeled litter addition method to assess soil functional change? Environmental Pollution, 2016, 219: 37-46.
- [26] Sechi V, D'Annibale A, Maraldo K, Johansen A, Bossi R, Jensen J, Krogh P H. Species composition of a soil invertebrate multi-species test system determines the level of ecotoxicity. Environmental Pollution, 2014, 184: 586-596.
- [27] Schaeffer A. Semi-field methods for the environmental risk assessment of pesticides in soil. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.
- [28] Jensen J, Mesman M, Bierkens J, Loibner A, Rutgers M, Bogolte T, Celis R, Dirven-van Breemen EM, Erlacher E, Ehlers C, Hartnik T, Sorokin N, ter Laak T. Ecological risk assessment of contaminated land: Decision support for site specific investigations. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM, 2006.
- [29] Rohr J R, Salice C J, Nisbet R M. The pros and cons of ecological risk assessment based on data from different levels of biological organization. Critical Reviews in Toxicology, 2016, 46(9): 756-784.
- [30] Committee E S. Guidance to develop specific protection goals options for environmental risk assessment at EFSA, in relation to biodiversity and ecosystem services. EFSA Journal, 2016, 14(6): e04499.
- [31] 罗晶晶, 吴凡, 张加文, 刘征涛, 张聪, 王晓南. 我国土壤受试植物筛选与毒性预测. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3295-3305.
- [32] Chung M K, Hu R, Wong M H, Cheung K C. Comparative toxicity of hydrophobic contaminants to microalgae and higher plants. Ecotoxicology, 2007, 16(5): 393-402.
- [33] Sverdrup L E, Hagen S B, Krogh P H, van Gestel C A M. Benzo(a)pyrene shows low toxicity to three species of terrestrial plants, two soil

- invertebrates, and soil-nitrifying bacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 66(3): 362-368.
- [34] 邓欢, 郭光霞, 乔敏. 多环芳烃污染土壤毒性评价指标的研究进展. *生态毒理学报*, 2009, 4(1): 1-13.
- [35] Santos M G, Ferreira M L, Cachada A, Duarte A C, Sousa J P. Pesticide application to agricultural fields: effects on the reproduction and avoidance behaviour of *Folsomia candida* and *Eisenia andrei*. *Ecotoxicology*, 2012, 21(8): 2113-2122.
- [36] Lock K, Janssen C R. Ecotoxicity of nickel to *Eisenia fetida*, *Enchytraeus albidus* and *Folsomia candida*. *Chemosphere*, 2002, 46(2): 197-200.
- [37] Crouau Y, Moïa C. The relative sensitivity of growth and reproduction in the springtail, *Folsomia candida*, exposed to xenobiotics in the laboratory: an indicator of soil toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 64(2): 115-121.
- [38] 何巧力, 颜增光, 汪群慧, 李发生. 利用蚯蚓回避试验方法评价农药污染土壤的生态风险. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 538-543.
- [39] van Gestel C A M. Soil ecotoxicology: state of the art and future directions. *ZooKeys*, 2012(176): 275-296.
- [40] Owojori O J, Waszak K, Roembke J. Avoidance and reproduction tests with the predatory mite *Hypoaspis aculeifer*: effects of different chemical substances. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, 33(1): 230-237.
- [41] Jiang B, Adebayo A, Jia J L, Xing Y, Deng S Q, Guo L M, Liang Y T, Zhang D Y. Impacts of heavy metals and soil properties at a Nigerian e-waste site on soil microbial community. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 362: 187-195.
- [42] Storek V, Nikolaki S, Perruchon C, Chabanis C, Sacchi A, Pertile G, Baguelin C, Karas P A, Spor A, Devers-Lamrani M, Papadopoulou E S, Sibour O, Malandain C, Trevisan M, Ferrari F, Karpouzias D G, Tsiamis G, Martin-Laurent F. Lab to field assessment of the ecotoxicological impact of chlorpyrifos, isoproturon, or tebuconazole on the diversity and composition of the soil bacterial community. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1412.
- [43] Brandt K K, Amézquita A, Backhaus T, Boxall A, Coors A, Heberer T, Lawrence J R, Lazorchak J, Schönfeld J, Snape J R, Zhu Y G, Topp E. Ecotoxicological assessment of antibiotics: a call for improved consideration of microorganisms. *Environment International*, 2015, 85: 189-205.
- [44] Zhu D, Ke X, Wu L H, Li Z, Christie P, Luo Y M. Ecotoxicity of cadmium in a soil collembolan-predatory mite food chain: can we use the 15N labeled litter addition method to assess soil functional change? *Environmental Pollution*, 2016, 219: 37-46.
- [45] Jiang R, Wang M E, Xie T, Chen W P. Site-specific ecological effect assessment at community level for polymetallic contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 445: 130531.
- [46] USEPA (US Environmental Protection Agency). Generic Ecological Assessment Endpoints (GEAEs) For Ecological Risk Assessment: Second Edition With Generic Ecosystem Services Endpoints Added. Washington DC: USEPA, Risk Assessment Forum. 2016.
- [47] Committee E S. Recovery in environmental risk assessments at EFSA. *EFSA Journal*, 2016, 14(2): 4313.
- [48] Glenn W. Suter II. 生态风险评价. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [49] 郭雪雁, 马义兵, 李波. 陆地生态系统中低剂量毒物刺激作用及拟合模型研究进展. *生态学报*, 2009, 29(8): 4408-4419.
- [50] 刘树深. 化学混合物毒性评估与预测方法. 北京: 科学出版社, 2017.
- [51] 朱侠, 李连祯, 涂晨, 骆永明. 不同性质农田土壤中铜的可提取性与生物有效性及毒性. *土壤*, 2020, 52(5): 911-919.
- [52] 郭瞻宇, 张子杨, 蒋亚辉, Altaf Hussain Lahori, 张增强, 李荣华. 不同品种芥菜对镉胁迫的敏感性分布及抗氧化特征. *农业环境科学学报*, 2018, 37(12): 2660-2668.
- [53] Vanesa S M, Avelino N D, Esperanza Á R, Montserrat D R, Manuel A E, David F C. Tolerance of soil bacterial community to tetracycline antibiotics induced by As, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, and Pb pollution. *SOIL*, 2022, 8(1): 437-449.
- [54] Johansen J L, Rønn R, Ekelund F. Toxicity of cadmium and zinc to small soil protists. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 1510-1517.
- [55] Bérard A, Mazzia C, Sappin-Didier V, Capowicz L, Capowicz Y. Use of the MicroResp™ method to assess Pollution-Induced Community Tolerance in the context of metal soil contamination. *Ecological Indicators*, 2014, 40: 27-33.
- [56] Yang Y F, Cheng Y H, Liao C M. In situ remediation-released zero-valent iron nanoparticles impair soil ecosystems health: a *C. elegans* biomarker-based risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 317: 210-220.
- [57] Moreno J L, Garcia C, Landi L, Falchini L, Pietramellara G, Nannipieri P. The ecological dose value (ED50) for assessing Cd toxicity on ATP content and dehydrogenase and urease activities of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(4/5): 483-489.
- [58] Lessard I, Sauvé S, Deschênes L. Enzymatic functional stability of Zn-contaminated field-collected soils: an ecotoxicological perspective. *Science of the Total Environment*, 2014, 484: 1-9.
- [59] Eze M O, George S C, Hose G C. Dose-response analysis of diesel fuel phytotoxicity on selected plant species. *Chemosphere*, 2021, 263: 128382.
- [60] 张晓晴, 韦东普, 李波, 马义兵, 黄占斌. 土壤中水溶性铜对西红柿的毒害影响因素及预测模型. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 214-222.
- [61] 范弟武, 徐莎, 周曼丽, 张倩楠, 朱咏莉, 韩建刚. Cd²⁺和Cr³⁺对崇明东滩湿地土壤碱性磷酸酶的低剂量兴奋效应. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(2): 320-325.
- [62] 印杰, 范弟武, 徐莎, 韩建刚, 朱咏莉, 薛建辉. 崇明东滩湿地土壤中Cr³⁺、Pb²⁺和Cd²⁺对硝酸还原酶的Hormesis效应. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(2): 21-26.
- [63] 刘海龙, 王玉军, 宣亮, 周东美, 宋吟玲. 土壤基本理化性质对外源镉蚯蚓慢性毒性的影响. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 225-233.
- [64] 王巍然, 林祥龙, 赵龙, 张家乐, 樊文华, 侯红. 我国20种典型土壤中锌对白符跳虫的毒性阈值及其预测模型. *农业环境科学学报*, 2021, 40(4): 766-773.
- [65] Li B, Zhang H T, Ma Y B, McLaughlin M J. Influences of soil properties and leaching on nickel toxicity to barley root elongation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74(3): 459-466.

- [66] Wan Y N, Jiang B, Wei D P, Ma Y B. Ecological criteria for zinc in Chinese soil as affected by soil properties. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 194: 110418.
- [67] Posthuma L, Eijsackers H J P, Koelmans A A, Vijver M G. Ecological effects of diffuse mixed pollution are site-specific and require higher-tier risk assessment to improve site management decisions: a discussion paper. *Science of the Total Environment*, 2008, 406(3): 503-517.
- [68] Karpouzias D G, Kandeler E, Bru D, Friedel I, Auer Y, Kramer S, Vasileiadis S, Petric I, Udikovic-Kolic N, Djuric S, Martin-Laurent F. A tiered assessment approach based on standardized methods to estimate the impact of nicosulfuron on the abundance and function of the soil microbial community. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 282-291.
- [69] Karas P A, Baguelin C, Pertile G, Papadopoulou E S, Nikolaki S, Storck V, Ferrari F, Trevisan M, Ferrarini A, Fornasier F, Vasileiadis S, Tsiamis G, Martin-Laurent F, Karpouzias D G. Assessment of the impact of three pesticides on microbial dynamics and functions in a lab-to-field experimental approach. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 636-646.
- [70] Newman M C, Ownby D R, Mézin L C A, Powell D C, Christensen T R L, Lerberg S B, Anderson B A. Applying species-sensitivity distributions in ecological risk assessment: assumptions of distribution type and sufficient numbers of species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, 19(2): 508-515.
- [71] Sorgog K, Kamo M. Quantifying the precision of ecological risk: conventional assessment factor method vs. species sensitivity distribution method. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 183: 109494.
- [72] 王小庆, 韦东普, 黄占斌, 马义兵. 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. *环境科学学报*, 2013, 33(6): 1787-1794.
- [73] Posthuma L, Suter G W, Traas T P. *Species Sensitivity Distributions in Ecotoxicology*. Boca Raton, Fla: Lewis Publishers, 2002.
- [74] 曾庆楠, 安毅, 秦莉, 林大松. 物种敏感性分布法在建立土壤生态阈值方面的研究进展. *安全与环境学报*, 2018, 18(3): 1220-1224.
- [75] 乔宇, 闫振飞, 冯承莲, 刘娜, 廖伟, 洪亚军, 刘大庆, 白英臣. 几种典型模型在物种敏感度分布中的应用和差异分析. *环境工程*, 2021, 39(10): 85-92, 109.
- [76] Hope B K. An examination of ecological risk assessment and management practices. *Environment International*, 2006, 32(8): 983-995.
- [77] Cormier S M. A method for deriving water-quality benchmarks using field data. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2013, 32(2): 255-262.
- [78] CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), 2020. Ecological risk assessment guidance document. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- [79] van Straalen N M, van Gestel C A M. A stress ecology framework for comprehensive risk assessment of diffuse pollution. *Science of the Total Environment*, 2008, 406(3): 479-483.
- [80] UKEA (UK Environment Agency). Guidance on the Attribution of Cause and Effect in Ecological Risk Assessment. Science report SC070009/SR2e. Environment Agency, Bristol. 2008.
- [81] Van S N M. Peer reviewed: ecotoxicology becomes stress ecology. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(17): 324A-330A.
- [82] Hoondert R P J, Hilbers J P, Hendriks A J, Huijbregts M A J. Deriving field-based ecological risks for bird species. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(6): 3716-3726.
- [83] 张倩倩, 乔敏, 池海峰. 土壤生态毒性测试方法综述. *生态毒理学报*, 2017, 12(4): 76-97.
- [84] Lecerf A, Cébron A, Gilbert F, Danger M, Roussel H, Maunoury-Danger F. Using plant litter decomposition as an indicator of ecosystem response to soil contamination. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107554.
- [85] Vorobeichik E L, Bergman I E. Bait-lamina test for assessment of polluted soils: rough vs. Precise scales. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107277.
- [86] 何念鹏, 刘聪聪, 张佳慧, 徐丽, 于贵瑞. 植物性状研究的机遇与挑战: 从器官到群落. *生态学报*, 2018, 38(19): 6787-6796.
- [87] Van den Brink P J, Alexander A C, Desrosiers M, Goedkoop W, Goethals P L, Liess M, Dyer S D. Traits-based approaches in bioassessment and ecological risk assessment: strengths, weaknesses, opportunities and threats. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2011, 7(2): 198-208.
- [88] Pomati F, Nizzetto L. Assessing triclosan-induced ecological and trans-generational effects in natural phytoplankton communities: a trait-based field method. *Ecotoxicology*, 2013, 22(5): 779-794.
- [89] Liess M, Beketov M. Traits and stress: keys to identify community effects of low levels of toxicants in test systems. *Ecotoxicology*, 2011, 20(6): 1328-1340.
- [90] Hug Peter D, Sardy S, Diaz Rodriguez J, Castella E, Slaveykova V I. Modeling whole body trace metal concentrations in aquatic invertebrate communities: a trait-based approach. *Environmental Pollution*, 2018, 233: 419-428.
- [91] Beyer J, Petersen K, Song Y, Ruus A, Grung M, Bakke T, Tollefsen K E. Environmental risk assessment of combined effects in aquatic ecotoxicology: a discussion paper. *Marine Environmental Research*, 2014, 96: 81-91.
- [92] Backhaus T, Faust M. Predictive environmental risk assessment of chemical mixtures: a conceptual framework. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(5): 2564-2573.
- [93] Heys K A, Shore R F, Pereira M G, Jones K C, Martin F L. Risk assessment of environmental mixture effects. *RSC Advances*, 2016, 6(53): 47844-47857.
- [94] Niu L L, Carmona E, König M, Krauss M, Muz M, Xu C, Zou D L, Escher B I. Mixture risk drivers in freshwater sediments and their bioavailability determined using passive equilibrium sampling. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(20): 13197-13206.