

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20210618002

苑舒琪, 吴玉锋, 赵智博, 等. 电子废弃物拆解污染区土壤生态健康风险研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(3): 167-179

Yuan S Q, Wu Y F, Zhao Z B, et al. Research progress on soil ecological and health risks of e-waste dismantling polluted area [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(3): 167-179 (in Chinese)

## 电子废弃物拆解污染区土壤生态健康风险研究进展

苑舒琪<sup>1,2</sup>, 吴玉锋<sup>1,2</sup>, 赵智博<sup>1,2,\*</sup>, 李潇<sup>1,2</sup>, 虞璐<sup>1,2</sup>, 李晓<sup>1,2</sup>

1. 北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124

2. 北京工业大学循环经济研究院, 北京 100124

收稿日期: 2021-06-18 录用日期: 2021-08-19

**摘要:** 电子废弃物中含有诸多具有回收再利用价值的资源,但在粗放的拆解回收过程中,其中的重金属和有机污染物等有毒有害物质向环境介质中释放,使拆解场地周边土壤受到严重的复合污染,给当地生态环境和人体健康带来潜在风险。本文系统分析了电子废弃物拆解区污染物在土壤中的迁移行为特征和风险;归纳了用于研究土壤污染生态风险的指数法、模型法、外推法和生态毒理法和用于研究土壤污染健康风险的人体外部量化评估和人体内暴露评估等评估方法;同时探讨了这些评估方法在电子废弃物拆解区土壤污染生态健康风险研究的前沿进展。最后本文还指出了目前电子废弃物拆解区土壤污染风险评价需要改进之处,如评价方法应考虑到污染物在土壤中的存在形态、生态风险评价模型需将污染物对生态系统基本构成单元的影响纳入进去、健康风险量化评估基础数据和内暴露评估生物标志物法都需开展精细化的研究,提出了应对电子废弃物拆解引发的生态健康风险的措施,以期引起关于电子废弃物拆解场地土壤生态健康风险的深入思考。

**关键词:** 电子废弃物;土壤复合污染;生态风险;健康风险;迁移行为

**文章编号:** 1673-5897(2022)3-167-13 **中图分类号:** X171.5 **文献标识码:** A

## Research Progress on Soil Ecological and Health Risks of E-waste Dismantling Polluted Area

Yuan Shuqi<sup>1,2</sup>, Wu Yufeng<sup>1,2</sup>, Zhao Zhibo<sup>1,2,\*</sup>, Li Xiao<sup>1,2</sup>, Yu Lu<sup>1,2</sup>, Li Xiao<sup>1,2</sup>

1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

2. Institute of Circular Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Received** 18 June 2021 **accepted** 19 August 2021

**Abstract:** E-waste contains many recyclable resources. However, heavy metals and organic pollutants were released into the environment during the e-waste dismantling and recycling processes, which resulted in severe soil pollution and brought huge risk to the environment and human health around the e-waste dismantling area. In this review, we discussed the migration behavior and risk of soil pollutants in the e-waste dismantling area. Ecological risk assessment of soil pollution including index methods, model-based methods, extrapolation methods and ecotoxicology methods were summarized. In parallel, human health risk assessment consisting of extracorporeal quantita-

**基金项目:** 国家重点研发计划课题(废旧电器拆解场地周边污染区微生物降解-植物萃取-生态重建组合式修复工程技术研发, 2019YFC1803703);国家自然科学基金青年科学基金项目“电子废弃物拆解污染农田土壤生物修复的多尺度系统调控机制研究”(52100207)

**第一作者:** 苑舒琪(1997—),女,硕士研究生,研究方向为土壤污染生态健康风险, E-mail: yuanshuqi@emails.bjut.edu.cn

**\* 通讯作者(**Corresponding author**),** E-mail: zhaozhibo@bjut.edu.cn

tive assessment methods and internal exposure assessment methods were overviewed. Meanwhile, frontiers of these methods in studying the ecological and health risks of the e-waste dismantling area were reviewed. Finally, we pointed out some shortcomings persisted in ecological and health risks assessments of soil pollution. We highlighted pollutants existing forms in soil were not considered in the current risk assessment. We proposed the impact of pollutants on the basic components of ecosystem should be included in the current ecological risk assessment model. The basic data of health risk quantitative assessment and biomarker method of internal exposure assessment need to be refined. Furthermore, we put forward approaches to deal with ecological and human health risks triggered by e-waste dismantling. We hope this review can inspire in-depth understanding of the ecological and human health risks of e-waste dismantling area soil.

**Keywords:** e-waste; soil combined pollution; ecological risk; health risk; migration behavior

电子废弃物又称电子垃圾(electronic and electrical waste, e-waste)是指一切废弃的电气和电子设备及其组件,如电视机、计算机、移动电话、电池、电路板、电容器和变压器等<sup>[1]</sup>。随着全球信息化时代进程的推进和电子信息等高科技产业的发展,电子电器产品不断更新换代,电子废弃物产量及存量也不断增加,成为全球增长最快的废弃物之一。联合国《2020 年全球电子废弃物监测》报告显示,2019 年全球电子垃圾年产量为 5 360 万 t,中国作为最大产生国,年产量超过 1 000 万 t。如不进行有效的处置,中国电子废弃物年产量在 2030 年将增至 2 720 万 t,在 2050 年有可能超过 5 000 万 t<sup>[2]</sup>。电子废弃物中可循环再利用的部分多达 80% ~ 90%<sup>[3]</sup>,且具有巨大的经济效益。在丰富的“原材料”、资源需求以及经济利益的刺激下,电子垃圾拆解产业繁荣发展。尤其是中国,由于劳动力低廉和相关管理制度不健全,消纳了世界约 70% 的电子废弃物,形成了广东省汕头市贵屿镇、清远市龙塘镇以及浙江省台州市路桥区在内的多处拆解聚集地<sup>[4]</sup>。

电子废弃物中含有多种污染物,包括多溴联苯(PBBs)、多溴联苯醚(PBDEs)、多氯联苯(PCBs)、多氯二苯并二噁英(PCDD)、二苯并呋喃(PCDF)和多环芳烃(PAHs)等有机污染物以及镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、汞(Hg)和镍(Ni)等多种重金属等<sup>[5]</sup>,这些污染物较难被生物降解和去除,因而它们在环境中可以存在较长时间。许多非正规无序电子拆解厂的原始粗放拆解行为,如露天焚烧、酸碱浸泡、切屑熔化和手工拆卸零件等<sup>[6]</sup>,导致了这些有毒有害物质向水体、大气、土壤和沉积物等环境介质释放,给生态环境安全和人类身体健康带来了风险隐患。电子废弃物拆解产生的重金属和有机污染物等复合污染物会危害周边生态环境,造成生态系统功能减

弱与生物多样性降低等负面影响。土壤具有稳定性和污染隐蔽性,与植物、大气、地表水和地下水之间存在多种交互作用,是污染物在生态系统中的汇源地,需要重点关注和研究。电子废弃物拆解产生的污染物还会危害当地人群的身体及心理健康,造成甲状腺激素水平失衡<sup>[7]</sup>、基因损伤<sup>[8]</sup>、生殖发育异常<sup>[9]</sup>和学习认知能力下降<sup>[10]</sup>等症状。

本文系统综述了电子废弃物拆解区污染物在土壤中的迁移行为、对周边生态环境和人体健康的风险及其研究方法,并对未来研究电子废弃物拆解区土壤污染生态健康风险及其防控措施作出了展望,以期电子废弃物拆解区土壤污染的研究提供借鉴。

## 1 电子废弃物拆解区土壤污染物的迁移行为研究 (Migration behavior of soil pollutants in e-waste dismantling area)

污染物在土壤中的迁移将会对表层土壤、深层土壤乃至生态系统产生不同程度的生态健康风险。通过研究污染物在土壤中的分布和迁移行为有助于认识污染物对土壤的致污机理和潜在风险。因此,针对电子废弃物拆解区土壤污染物迁移行为及其影响因素的研究也成为近年该行业土壤污染风险研究的热点之一。

电子废弃物拆解产生的粉尘气体经大气沉降作用,拆解产生废水流经土壤时的下渗吸附作用以及拆解废渣在露天堆弃情况下在雨水冲刷、淋溶等作用下,使得电子废弃物中的重金属和有机污染物进入到土壤环境中<sup>[11-12]</sup>。对于受拆解活动影响的区域,污染物在土壤中呈现明显的表聚特征<sup>[13]</sup>,并随时间推移具有水平与垂向迁移风险。尤其是重金属,在土壤中经过吸附、解吸、淋溶、沉淀和螯合等作用,具有较强的迁移转化能力<sup>[14]</sup>。而有机污染物除自身

的吸附渗透外,还可以与重金属发生配位络合作用,增强其在环境中的迁移能力<sup>[15]</sup>。污染物在土壤中的迁移行为同时受到多种因素的影响,包括土地利用类型、耕作方式、气候因子、土壤理化性质及污染物自身化学性质等<sup>[16-17]</sup>。吴文成等<sup>[13]</sup>在研究电子垃圾拆解区土壤重金属分布特征时发现,与旱地相比,Cd和Cu在周期性翻耕和长期灌溉的水稻田中纵向迁移行为更为显著。Cheng等<sup>[18]</sup>在研究电子废弃物回收区土壤中PBDEs的垂直分布中指出,PBDEs在稻田土壤中的淋失趋势高于旱地土壤,频繁的淹水促进PBDEs垂直向深层土壤进行迁移。以上2项研究均揭示土地利用和耕作方式显著影响污染物在土壤中的迁移行为。Wang等<sup>[9]</sup>在研究电子废弃物拆解场地土壤污染分布时,发现PBDEs和四溴双酚A与土壤总有机碳(TOC)呈现显著的正相关性,表明TOC是影响这些有机污染物在土壤中迁移及空间分布的主要因素。可见,土壤理化性质也显著影响着电子废弃物拆解区污染物在土壤中的迁移。此外,张胜军等<sup>[20]</sup>在研究电子废弃物拆解场地周边污染区PBDEs在环境中的迁移行为时发现,1~6的低溴代PBDEs易通过孔隙水从高浓度污染区向低浓度污染区迁移,而高溴代PBDEs因低水溶性与低挥发性易吸附于土壤颗粒而较难迁移。何旭丹等<sup>[21]</sup>分析电子垃圾拆解区土壤中甲基硅氧烷分布特征和迁移规律时发现,线形甲基硅氧烷在土壤中的迁移能力弱于环形甲基硅氧烷,是由于其具有较弱的挥发性。因此,污染物自身化学性质也可能对其在土壤中的迁移行为产生一定影响。

研究拆解区土壤污染物的迁移转化行为还可以有力支撑拆解区土壤污染生态健康风险评价的研究。如果忽视污染物在土壤内部的赋存形态及迁移转化,就会使得污染物的理论风险与实际风险之间存在一定偏差。Rodríguez等<sup>[22]</sup>在研究西班牙某铅锌矿土壤重金属的生态风险时,发现虽然土壤中Pb的总量高于Zn,但Zn的生态风险却较大,这是由于Zn主要以弱酸可溶态分布,而Pb主要以可还原态分布。Buccolieri等<sup>[23]</sup>分析了意大利某农业土壤中多种重金属的形态分布特征,发现一些重金属的生物有效态浓度均低于检出限,对植物表现出的毒性也较低。因此,污染物的生物有效态是引起生态健康风险的主要因素,用污染物的生物有效态浓度代替其在环境中的总浓度,可以更精准地表征污染物的生态健康风险。将污染物迁移转化的研究与风险

评估的研究进行有机结合,可以提高评估的准确性。然而,污染物在土壤内部的生物地球化学行为错综复杂,目前还没有表征污染生物有效性的统一标准化方法。

## 2 电子废弃物拆解区土壤污染生态风险评估研究 (Ecological risk assessment of soil pollution in e-waste dismantling area)

电子废弃物拆解带来的危害不仅仅是污染物在土壤中累积,还会破坏周边生态环境,导致土壤中生物群落结构改变<sup>[24]</sup>,物种多样性减少<sup>[25]</sup>,各种微生物功能酶的活性降低<sup>[26-27]</sup>和碳氮循环受限<sup>[28]</sup>等生态风险。早期关于电子垃圾拆解场地环境污染的研究多集中在污染物的迁移转化以及由此带来的健康风险上,对其生态风险的关注较晚<sup>[29]</sup>。目前适用于电子废弃物拆解区土壤污染生态风险评估的方法主要有指数法、模型法、外推法和生态毒理法等<sup>[30-31]</sup>。

### 2.1 指数法

指数法通过对污染物实测浓度值、标准值和其他相关参数进行系列运算,得到污染物的风险指数,根据风险指数的评价分级标准来判断其风险大小。具体方法包括单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法和污染负荷指数法等。

内梅罗指数法可以同时分析多种污染物的综合影响与单一污染物的污染状况,该方法突出了高浓度污染物的极值数据,避免由于平均作用而忽略其影响,但其未考虑不同污染物的毒性差异,可能导致风险评估结果偏离实际风险<sup>[32-33]</sup>。Zhao等<sup>[34]</sup>调查了贵州市某电子垃圾回收区土壤不同深层中重金属含量,并利用内梅罗污染指数( $P_N$ )和潜在生态风险指数(RI)进行了生态风险评估,发现 $P_N$ 呈表土(0~20 cm)>深层土(100~150 cm)>中层土(50~100 cm)>浅层土(20~50 cm)的趋势,同时发现研究区土壤中的所有点位RI值都超过300,具有高生态风险,提出应立即对污染土壤进行修复的建议,以防止土壤中的重金属对周边生态系统产生进一步的危害。地累积指数考虑了岩石差异与成岩作用引起的污染背景值波动和人为活动的影响<sup>[35-36]</sup>。李定龙等<sup>[37]</sup>利用地累积指数法评估了台州某电子废弃物拆解场地土壤中重金属污染的生态风险,发现元素Cd和Hg污染严重,地累积指数分别为4.50和3.82,风险级别达到5级和4级。污染负荷指数法可以对研究区域内土壤污染综合状况进行评估,反映各污染物的

时空变化特征和对区域污染的贡献程度,但该方法未考虑不同污染源带来的背景差异<sup>[38]</sup>。潜在生态风险指数法从沉积学角度出发,综合考虑了污染物的环境化学特征、环境行为、生态敏感性与毒理学性质,采用具有可比的等价属性指数分级法进行评价<sup>[39]</sup>。Amphalop 等<sup>[40]</sup>在研究泰国电子垃圾拆解区土壤 As、Cd、Cu 和 Pb 污染的生态风险时,发现拆解区域 RI 值(180.6)是非拆解区(31.8)的 6 倍左右,表明电子废弃物的拆解行为加剧了研究区域内重金属对土壤环境的潜在生态风险。

近年,因指数类方法简便快捷,国内外研究学者广泛使用指数法对电子废弃物拆解区土壤污染进行生态风险评价研究,但该类方法原理简单,且未细化评价污染物对生态系统结构和功能中最基本构成单元的影响,仍不能精准全面地对实际风险作出判断。

## 2.2 模型法

模型法根据实验数据及相关参数,通过数学统计方法建立预测模型,在计算机软件辅助下对土壤生态风险作出评估<sup>[41]</sup>。常见的模型法有层次分析法、模糊数法、灰色聚类法、投影寻踪法和物元分析法等。

层次分析法将各类污染因素进行层级排列,以确定不同污染物对土壤污染风险的权重,对难以完全定量的复杂风险评估有很好的效果<sup>[42]</sup>。苏婷和董胜伟<sup>[42]</sup>以重金属含量平均值、毒性指标、变异系数和相关性 4 个因素建立层次分析结构,计算内梅罗综合指数法、单因子指数法和地积累指数法 3 种方法的综合权重,并以此评估土壤重金属 Cr、Pb、Cr、Hg 和 As 污染的生态风险,得到各采样区的层次分析综合指数值为 2.1353 ~ 3.4111,相比单一指数法更客观地反映了研究区土壤污染的生态风险。模糊数法基于模糊线性变换,通过隶属度函数运算确定单种污染元素所属污染等级,并经权重计算确定每种元素在总污染中所占比重,最后运用模糊矩阵复合运算,得出土壤污染等级<sup>[43-44]</sup>。该法克服了传统指数法在不确定性表达上的局限,是解决土壤污染级别模糊边界问题的有效方法<sup>[45-46]</sup>,但不能解决评价指标间存在共线性的问题<sup>[47]</sup>。苏全龙等<sup>[48]</sup>以地累积指数为污染指数,运用正态模糊数评估研究区土壤重金属污染程度时发现,As 和 Cd 的模糊地累积指数区间分别为 $[-0.66, -0.58]$ 和 $[0.32, 0.48]$ ,属清洁与轻度污染。灰色聚类法在模糊理论的基础上,将抽象的内容量化,针对土壤存在的灰色性进行评价<sup>[33]</sup>。

灰色聚类法区别于其他方法的优点是对样本量要求不严格,且不要求数据服从任何分布,但在计算权重时常采用超标浓度赋权法,对污染物生物毒性的关注不足<sup>[49]</sup>。范明毅等<sup>[50]</sup>通过改性灰色聚类法评估电厂周边土壤污染生态风险时发现,Hg 和 Cd 为主要贡献因子,且电厂西北和西面土壤污染最严重,标准聚类系数达 0.71 和 0.58。投影寻踪技术是一种在数据线性结构基础上寻找非线性的方法<sup>[51]</sup>,能很好地处理线性回归评估方法难以表示非线性的问题<sup>[52]</sup>。谢贤健和韩光中<sup>[52]</sup>应用投影寻踪模型为涉及多因素的城市土壤重金属污染评价指出了新思路。物元分析法在可拓数学工具的基础上,使用关联函数有效整合了各类因素信息<sup>[53]</sup>,经综合关联度计算获得定量评价结果,并根据最大关联隶属原则判定评价等级<sup>[54]</sup>。刘维明等<sup>[55]</sup>通过建立的物元模型对广西某蔗田土壤的重金属污染生态风险进行评价,指出研究区农田土壤污染程度低,与内梅罗综合污染指数法的评价结果基本一致,表明该评价模型具有较高的可靠性。

相比于传统的指数法评价,模型法综合了多个测度指标的评价信息,考虑了土壤系统的模糊性与灰色性,弥补了一般指数法在不确定性表达上的局限。但使用模型进行评价过程繁琐、运算复杂,不能较快地做出风险判断,且部分方法对权重的确定带有主观性,因此在实际风险评估中还需根据场地情况做出相应改进。此外,模型综合评价在土壤污染生态风险评估中的应用已十分广泛,但在电子垃圾拆解污染土壤的风险评估中的应用尚少,亟须进一步的研究与实践。

## 2.3 外推法

目前的技术水平和人力物力无法支撑污染物对全物种的生态毒理学暴露-剂量效应实验。为建立物种对不同剂量污染物的暴露反应数据集,需要将统计学外推手段引入到风险评估的研究中来<sup>[56]</sup>。外推法通过将污染物对不同物种的暴露-剂量效应独立数据外推,来实现污染物在生物群落甚至生态系统水平上的风险评价。其所使用的数据可以从各毒性数据库中获取或通过急、慢性毒性实验得出。

物种敏感性分布(species sensitivity distributions, SSD)法在外推评价中最具代表性,该法基于不同物种对同一污染物敏感性的差异,以各营养级多个代表性物种的毒理学数据及其累积概率为基础,选择拟合度最优的统计分布模型构建拟合曲线,来判断

土壤污染物浓度影响物种的比率<sup>[57]</sup>。SSD法充分考虑了生物多样性与生态系统完整性,可以进行区域生态风险的定性与定量分析<sup>[58]</sup>。SSD法在水生态风险评价中有着极广泛的应用,近年也有学者将其应用在土壤生态风险评价的研究中,但目前较少出现于电子废弃物拆解污染区土壤风险评价中。徐湘博等<sup>[59]</sup>利用SSD模型和联合概率曲线法评估了长株潭地区3县土壤中重金属Cd的生态风险,指出在半数致死效应浓度/半数最大效应浓度/半数抑制浓度( $LC_{50}/EC_{50}/IC_{50}$ )水平下和最大无效应浓度/最低有效应浓度( $NOEC/LOEC$ )水平下,3县均具有不容忽视的Cd污染生态风险。除SSD法外,其他外推模型还包括评估因子法、专家模型和机理模型等,将其运用到土壤生态风险评价中还需进一步的研究<sup>[60]</sup>。

## 2.4 生态毒理法

土壤中的污染物对动物、植物和微生物等生命有机体具有毒害作用。利用生物个体及以上水平上的存活、生长和繁殖等测试终点或亚个体(分子、细胞器、细胞、组织和器官等)水平上的活体或离体测试来评价污染物造成的生态风险<sup>[61]</sup>。

在生物个体、种群等水平上的生态毒性测试根据所选用生命体的类别而有不同的测试终点。在动物测试中,常选取分布广、数量多和对土壤变化敏感的土壤无脊椎动物<sup>[62]</sup>,其测试终点包括存活、生长、发育、繁殖和行为等。Zhang等<sup>[63]</sup>采用蚯蚓死亡率法及仓鼠卵巢细胞毒性法(离体)分析了污染土壤中重金属和PCBs对生物体的毒性,研究指出暴露于废弃拆解区土壤的蚯蚓死亡率达90%,污染浓度与仓鼠卵巢细胞死亡增加呈显著正相关,表明拆解导致的土壤复合污染具有较大的生态风险。植物毒性测试又可称为植物培养法,采用生命早期阶段的植物种子和幼苗进行测试,观察种子发芽、根部伸长、生长和繁殖的情况<sup>[64-67]</sup>。张俊会<sup>[68]</sup>在评估台州电子废弃物拆解区域土壤污染的生态风险时,采用了水稻发芽实验、蚕豆根尖细胞微核试验和水稻栽培试验,发现发芽率与污染物含量相关性不显著、发芽可能对污染不敏感;经污染土样浸出液处理的蚕豆根尖微核千分率普遍高于对照土样,说明污染对生物具有遗传毒性,有较大生态风险;种植于污染区土样的水稻株高普遍低于对照区,即拆解污染土壤对植物具有慢性毒性危害作用。对于土壤微生物,一般选取微生物群落水平上的生物量、活性和多样性等为测试终点<sup>[69]</sup>。张金莲等<sup>[70]</sup>采用分子生物学技术研

究了电子垃圾拆解区污染对土壤微生物多样性的影响,发现焚烧迹地土壤微生物多样性指数在研究区域中最小,反映了不当电子废弃物拆解污染对土壤的生态风险。

相较而言,个体及以上水平的生物测试方法体系简单,容易标准化,而亚个体水平的生物测试方法对污染物危害的表征更客观全面,能够更准确地把握污染物的生态风险。在个体及以上水平的生物测试中,各类生物的代表性及生态相关性各有不同,如何选择具有更好代表性及灵敏性的受试生物,需在实际评价中进一步作出判断。而在污染条件下的亚个体水平测试中,由于基因水平的响应比器官、个体水平的响应更灵敏<sup>[71]</sup>,因而分子诊断生物体受污染物的毒理效应成为生态风险研究的重要手段。尤其是基于基因损伤和功能基因的土壤污染诊断,是在分子水平上评价污染物毒性的良好方法。此外,生态毒理基因组学技术正逐渐运用于基因水平的污染诊断研究,该技术有助于全面了解污染物对于生物个体、种群和群落基因组及基因表达方面的影响,从基因水平上将污染暴露与其生物效应联系起来,是当前研究的新兴领域,有待在实验方法和数据处理等方面大力发展<sup>[72]</sup>。

## 3 电子废弃物拆解区土壤污染人体健康风险评价研究(Health risk assessment of soil pollution in e-waste dismantling area)

电子废弃物在拆解过程中产生的烟气、扬尘中含有大量重金属与有机污染物,扩散到大气中使得拆解区人群日常生活行为暴露于污染空气,污染物经由呼吸吸入、皮肤接触以及由口摄入等途径进入人体,引发健康风险。此外,这些污染物在土壤、水体中还可以通过日常食用的农产品、饮用水等途径进入人体,给人体带来健康风险。

### 3.1 量化评估健康风险研究

电子垃圾拆解污染的健康风险可以通过对人体外部暴露情况的分析进行量化推算,即建立场地污染与人体剂量效应的对应关系。土壤污染健康风险量化评估的基本框架基于1983年美国科学院提出的“四步法”,以危害识别、剂量-效应关系评估、暴露评估和风险表征4个步骤为主要程序<sup>[73]</sup>。各国在此基础上根据本国内各类场地实际情况对暴露途径、污染迁移模型、各介质扩散模型、敏感受体和生态毒理参数等技术细节进行重新制定,提出不同的健康风险评估模型。主要包括美国RBCA模型、CalTOX

模型、RAGs 模型、英国 CLEA 模型、荷兰 CSOIL 2000 模型、中国 HERA 模型和中国建设用地土壤污染风险评估技术导则模型(以下简称 RAG-C 模型)等<sup>[74]</sup>。

在电子废弃物拆解场地污染的健康风险研究中,国外学者 Singh 等<sup>[75]</sup>使用 RBCA 模型计算了电子废弃物回收区土壤重金属污染对成人与儿童造成的致癌与非致癌风险,并选取经口摄入、吸入土壤颗粒物和皮肤接触等 3 个途径作为暴露途径,发现污染对成人和儿童均构成较大致癌风险,而在非致癌风险方面只有更敏感的儿童群体受到较大影响。国内学者杨彦等<sup>[76]</sup>采用 RBCA 模型并修正部分暴露参数,对拆解区 PBBs 污染的健康风险进行了评估,结果指出拆解区内男、女性致癌风险分别为  $1.43 \times 10^{-2}$  和  $1.44 \times 10^{-2}$ ,非致癌风险分别为  $8.15 \times 10^{-4}$  和  $8.22 \times 10^{-4}$ ,均超过国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大终身可接受风险水平( $5 \times 10^{-5}$ )。

针对于拆解场地周边农用地类型的土壤,许多学者重点进行了作物健康风险评价,指出食用作物暴露风险在农用地中占据较大权重。李成<sup>[77]</sup>采用美国环境保护局(US EPA)推荐模型计算了人体食用蔬菜中 PCBs 的日平均摄入量,得到通过蔬菜摄入 PCBs 的暴露途径的致癌与非致癌风险都较大,其中叶菜类蔬菜致癌风险与危害商为所有蔬菜样品中的最高值。Tang 等<sup>[78]</sup>通过研究蔬菜中的重金属浓度、人均蔬菜日消费量以及体质量,估计了某电子拆解场地人群个体每日蔬菜中重金属摄入量,并计算了污染物通过食用蔬菜途径对人体造成的健康风险。研究指出,大多数蔬菜中的 Cd 和 Pb 含量均超过食品安全限值,Cd 和 Pb 的平均含量分别是最高允许水平的 4.7 倍和 2.6 倍。在所测试蔬菜中,绿叶蔬菜可食用部分的重金属含量显著高于根/块茎蔬菜的食用部分,原因可能是多叶蔬菜生长快、蒸腾速率高,有利于根对金属的吸收,从而使金属从根转移到地上组织。Yuan 等<sup>[79]</sup>测定了中国某电子垃圾拆解区土壤、稻谷、稻壳和蜗牛中的短链氯化石蜡的含量,发现当地成人日均通过大米摄入的短链氯化石蜡量超标,同时考虑到稻壳中污染物通过猪和鸡的饲料配方进入食物链以及蜗牛处于该区域食谱中,由此推测当地人群具有较高的饮食接触短链氯化石蜡的健康风险。

由于污染场地实际情况与理想模型存在差异、土壤介质具有空间异质性等原因,许多研究常在各评估模型基础上,采用参数修正和不确定性分析等

方式使评估结果更贴合污染场地的实际风险,或借此判断风险评价结果的置信度<sup>[80]</sup>。其中不确定性分析模型包括随机模拟模型和模糊理论模型<sup>[81]</sup>,较常使用的是随机模拟模型中的蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation)。对评估准确性的提高可以存在于评价程序的不同阶段,包括在污染空间分布拟合时对数据进行概率分布处理、空间插值后运用地统计学分析判断污染物分布的空间变异性、在各类参数输入步骤进行概率分布处理使输出结果也为概率分布函数以及在风险评价后期做不确定性分析反映各参数对风险结果的影响程度和贡献率等。

### 3.2 人体内暴露健康风险研究

人群长期暴露于电子废弃物拆解产生的污染物中,其身体健康、心理健康及神经发育等方面都会发生多种负面效应<sup>[82]</sup>,如甲状腺激素水平失衡<sup>[83]</sup>、肺功能氧化损伤<sup>[84]</sup>、内分泌紊乱<sup>[85]</sup>、口腔疾病<sup>[86]</sup>、感觉统合失调<sup>[87]</sup>、学习认知能力下降<sup>[88]</sup>、激发细胞毒性<sup>[89]</sup>、基因损伤<sup>[90-91]</sup>和生殖发育异常与疾病<sup>[92]</sup>等。尤其会引起孕期妇女及胎儿体内有毒有害物质的积累,并造成不良妊娠结局(包括流产、早产和死产以及头围、胎龄、体重指数(BMI)、阿氏(Apgar)评分和庞德拉尔指数(PI)等指标偏低等)<sup>[93-96]</sup>。

健康风险量化评估通过外部数据推算人体健康风险,难以精准反映污染在体内的实际情况。对内暴露水平的检测分析在一定程度上能够反映污染物对人体健康影响的实质,可用于评估个体或人群对某一特定物质的接触,揭示外接触与内剂量的联系,是一种有效分析健康风险的途径<sup>[97]</sup>。

目前电子垃圾拆解污染内暴露方面的研究多选用生物标志物来反映环境中污染物对人体的影响,即将由生物标志物测得的内暴露浓度与人体各类数据指标联系起来,进行相关关系分析或对照处理分析,以评估电子废弃物污染对人体健康的风险<sup>[15]</sup>。常采用的标志物包括血液、血清、血浆、头发和尿液等,对于孕妇和胎儿的相关污染暴露研究还可采集脐血、乳汁、胎盘和胎便等以供测试。在暴露受体的选择上,倾向于关注人类生命周期中较为敏感的人群,如婴儿、儿童、孕妇和老年群体等。Li 等<sup>[98]</sup>通过检测电子废弃物拆解污染地区新生儿脐带血铬水平(UCBCL)和淋巴细胞 DNA 损伤并分析其相关关系,得到新生儿 UCBCL 与 DNA 损伤具有相关性,揭示了铬污染对场地周边新生儿的健康造成了损害。Liu 等<sup>[99]</sup>采用逐步多元回归法评价电子废弃物拆解

地区儿童血液中 Pb 和 Cd 水平与认知和语言得分之间的关系,并进行中介分析,结果表明接触 Pb 会降低儿童的认知和语言能力。Wu 等<sup>[100]</sup>发现,贵屿电子废弃物回收地区孕妇血清中全氟辛酸(PFOA)与胎龄呈负相关,且正常分娩和不良分娩结果的产妇体内 PFOA 浓度存在显著差异,揭示了产前接触 PFOA、新生儿体格发育迟缓和不良分娩结局之间的相关性。

针对不同类型的污染研究,各标志物的灵敏度与有效度是存在差异的。如赵高峰<sup>[101]</sup>研究指出胎便是一种比脐血更能反映胎儿污染负荷的生物标志物,并通过胎便评估分析了胎儿出生前的 PCBs 暴露情况,得出电子垃圾拆解区胎儿在母体内受到高水平 PCBs 暴露会对其发育产生负面影响。因此,在选择生物标志物时,需进行周密、系统的考虑,确保所选生物标志物所含污染物或其代谢物易检出,尽可能完全地反映实际污染状况及其健康风险。

人体暴露于电子垃圾拆解区域土壤、大气、粉尘和水体等污染介质均存在健康风险。目前对于人体内暴露评估的研究通常将多种污染源全部纳入考虑范围,很难明确哪一部分来自于土壤污染,缺少单独分析土壤污染在人体内的暴露数据和健康风险。因此,目前较少有学者通过内暴露研究来量化或评价电子废弃物拆解土壤污染的健康风险大小。此外,由于研究样本规模较小且受测个体工作类型、所处环境、饮食结构和医疗保健等存在差异,生物标记物测试结果通常具有一定偏差,这导致了内暴露评估结果存在不确定性<sup>[102]</sup>。

#### 4 结论与展望(Conclusion and prospect)

近些年来,国内外科研人员通过大量实验研究揭示了电子废弃物拆解区土壤污染状况,以及给周边生态环境及当地人群健康带来的多方面风险。由于现有技术方法存在缺陷,各类风险的评估仍有不足之处。为了避免评估结果不准确,从而影响污染土壤的精准修复或造成过度修复,未来亟待在如下几个方面进行更系统深入的研究。

(1)将污染物迁移转化行为的研究与风险评估研究进行有机结合。如在评估污染物的生态健康风险时以污染物的生物有效性浓度代替其在环境中的总量等。探索以标准化的方式将污染物在土壤中的生物化学行为应用到其风险评价中,以准确表征污染物致毒形态总量的变化,提高评估的准确性。

(2)当前土壤污染的各类生态风险评估方式均

有不足。未来应深入开展污染物对生态系统结构和功能中最基本构成单元的影响研究<sup>[103]</sup>,建立更有效评估污染土壤中总体无机、有机污染物的综合生态风险评估模型,并对不确定性分析部分进行完善。

(3)目前健康风险评估模型在使用中存在多种不确定性。对于污染空间分布的拟合,可将传统的场地采样方式与现场快速检测技术联合使用,以提高数据的空间代表性<sup>[80,104]</sup>。此外,未来可以引入概率风险评估,用场地实际参数替换模型中使用的均值或经验值等标准参数,使评估结果更加贴合实际风险,支撑精准修复。

(4)近年在土壤污染人体健康风险的体内暴露评估研究中,使用的生物标志物法存在较多不确定性和局限性。未来还需通过选择更具有代表性的抽样方式、尽可能扩大样本统计量、寻找更合理、更高灵敏度的生物标志物以及形成专门的参考标准数据等方式,进一步提高评估的准确性。

电子废弃物拆解所带来的生态健康风险是不容忽视的,政府、企业和个人应从多层次进行防控。首先,建立电子废弃物回收处置的常态化管理制度、行业标准体系,开发先进的工艺和设备进行集中拆解,从源头控制电子废弃物拆解产生的污染;其次,对拆解场地及周边区域进行土壤、大气、水体包括底泥在内的区域多介质联合修复,全方位恢复电子废弃物拆解场地周边生态环境质量;再次,增强拆解区当地人群在清洁生产、环境保护、监督污染和食品安全等方面的观念意识,个人在日常工作和生活中也需采取相应的健康防护措施。

通讯作者简介:赵智博(1989—),男,博士,助理研究员,主要研究方向为土壤污染生态修复。

#### 参考文献(References):

- [1] United Nations Environmental Programme (UNEP). E-waste volume I: Inventory assessment manual [R]. Osaka: United Nations Environmental Programme, 2007
- [2] Zeng X L, Ali S H, Tian J P, et al. Mapping anthropogenic mineral generation in China and its implications for a circular economy [J]. Nature Communications, 2020, 11 (1): 1544
- [3] 赵高峰. 电子垃圾中多氯联苯的环境转移和潜在的健康风险[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 3  
Zhao G F. Studies on environmental transfer and potential health risk of polychlorinated biphenyls from electrical and electronic waste [D]. Beijing: Graduate School of

- Chinese Academy of Sciences, 2006: 3 (in Chinese)
- [4] Orlins S, Guan D. China's toxic informal e-waste recycling: Local approaches to a global environmental problem [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 71-80
- [5] Robinson B H. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 408(2): 183-191
- [6] He K L, Sun Z H, Hu Y A, et al. Comparison of soil heavy metal pollution caused by e-waste recycling activities and traditional industrial operations [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(10): 9387-9398
- [7] Zhang J Q, Jiang Y S, Zhou J, et al. Elevated body burdens of PBDEs, dioxins, and PCBs on thyroid hormone homeostasis at an electronic waste recycling site in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(10): 3956-3962
- [8] Ni W Q, Huang Y, Wang X L, et al. Associations of neonatal lead, cadmium, chromium and nickel co-exposure with DNA oxidative damage in an electronic waste recycling town [J]. *The Science of the Total Environment*, 2014, 472: 354-362
- [9] Wang Y, Sun X H, Fang L Y, et al. Genomic instability in adult men involved in processing electronic waste in Northern China [J]. *Environment International*, 2018, 117: 69-81
- [10] Liu L, Zhang B, Lin K, et al. Thyroid disruption and reduced mental development in children from an informal e-waste recycling area: A mediation analysis [J]. *Chemosphere*, 2018, 193: 498-505
- [11] 张昱, 胡君利, 白建峰, 等. 电子废弃物拆解区周边农田土壤重金属污染评价及成因解析[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(7): 1228-1234
- Zhang Y, Hu J L, Bai J F, et al. Contamination assessment and genesis analysis of heavy metals in farmland soils around a waste electrical and electronic equipments disassembling area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7): 1228-1234 (in Chinese)
- [12] 罗敏. 清远龙塘镇—石角镇电子垃圾拆解区土壤重金属污染调查与评价[D]. 广州: 广州大学, 2018: 4
- Luo M. Investigation and evaluation of heavy metal pollution in soil of e-waste dismantling area in longtang town, Shijiao town, Qingyuan County [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018: 4 (in Chinese)
- [13] 吴文成, 宋清梅, 刘谓承, 等. 电子废物拆解区典型用地土壤重金属分布特征[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(7): 2632-2638
- Wu W C, Song Q M, Liu X C, et al. Distribution pattern of heavy metals in soils with respect to typical land uses in electronic waste recycling region [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(7): 2632-2638 (in Chinese)
- [14] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素的迁移转化规律及其影响因素[J]. *矿产综合利用*, 2017(6): 5-9
- Han Z X, Wan D J, Hu J P, et al. Migration and transformation of heavy metals in soil and its influencing factors [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2017(6): 5-9 (in Chinese)
- [15] McLaren R G, Williams J G, Swift R S. The adsorption of copper by soil samples from Scotland at low equilibrium solution concentrations [J]. *Geoderma*, 1983, 31(2): 97-106
- [16] Islam S, Ahmed K, Habibullah-Al-Mamun, et al. Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 94-102
- [17] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(1): 63-74
- Wang M, Li S T, Ma Y B, et al. Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1): 63-74 (in Chinese)
- [18] Cheng Z N, Wang Y, Wang S R, et al. The influence of land use on the concentration and vertical distribution of PBDEs in soils of an e-waste recycling region of South China [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 191: 126-131
- [19] Wang J X, Liu L L, Wang J F, et al. Distribution of metals and brominated flame retardants (BFRs) in sediments, soils and plants from an informal e-waste dismantling site, South China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(2): 1020-1033
- [20] 张胜军, 周欣, 李沐霏, 等. 电子垃圾拆解区周边农田土壤中多溴联苯醚污染特征及其环境迁移行为研究[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(7): 819-823
- Zhang S J, Zhou X, Li M F, et al. Pollution characteristics and environmental transport behavior of PBDEs in agriculture soil around an electronic waste dismantling venue [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, 40(7): 819-823 (in Chinese)
- [21] 何旭丹, 徐琳, 张春晖, 等. 台州电子垃圾拆解地土壤中甲基硅氧烷的污染特征[J]. *环境化学*, 2016, 35(11): 2287-2294
- He X D, Xu L, Zhang C H, et al. Pollution characteristics of methyl siloxanes in soil from an electronic waste (e-waste) dismantling area in Taizhou, China [J]. *Environ-*

- mental Chemistry, 2016, 35(11): 2287-2294 (in Chinese)
- [22] Rodríguez L, Ruiz E, Alonso-Azcárate J, et al. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb-Zn mine in Spain [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2): 1106-1116
- [23] Buccolieri A, Buccolieri G, Dell'Atti A, et al. Monitoring of total and bioavailable heavy metals concentration in agricultural soils [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 168(1-4): 547-560
- [24] Hong C, Si Y X, Xing Y, et al. Illumina MiSeq sequencing investigation on the contrasting soil bacterial community structures in different iron mining areas [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(14): 10788-10799
- [25] Kwon M J, Yang J S, Lee S, et al. Geochemical characteristics and microbial community composition in toxic metal-rich sediments contaminated with Au-Ag mine tailings [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 296: 147-157
- [26] Renella G, Ortigoza A L R, Landi L, et al. Additive effects of copper and zinc on cadmium toxicity on phosphatase activities and ATP content of soil as estimated by the ecological dose (ED50) [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1203-1210
- [27] Wang Y P, Shi J Y, Wang H, et al. The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity, and community composition near a copper smelter [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 67(1): 75-81
- [28] Hagmann D F, Goodey N M, Mathieu C, et al. Effect of metal contamination on microbial enzymatic activity in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 91: 291-297
- [29] 尹芳华, 杨洁, 杨彦. 电子废弃物拆解旧场地土壤重金属污染特征及生态风险评价初探[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(5): 2218-2221
- Yin F H, Yang J, Yang Y. Typical characteristics of soil heavy metal pollution of a land where deserted electronic equipment was taken apart and assessment of its ecological risk [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(5): 2218-2221 (in Chinese)
- [30] 林晓峰, 蔡兆亮, 胡恭任. 土壤重金属污染生态风险评价方法研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(8): 749-751
- Lin X F, Cai Z L, Hu G R. Research progress on ecological risk assessment methods for heavy metal contamination in soil [J]. Journal of Environment and Health, 2010, 27(8): 749-751 (in Chinese)
- [31] 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 S X, Gan Z T, Li M J, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(17): 310-315 (in Chinese)
- [32] 裴廷权, 王里奥, 包亮, 等. 三峡库区小江流域土壤重金属的分布特征与评价分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 206-211
- Pei T Q, Wang L, Bao L, et al. Distribution characteristics and evaluation of soil heavy metals in water-level-fluctuating zone in Xiaojiang River [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(1): 206-211 (in Chinese)
- [33] 宋恒飞, 吴克宁, 刘霏珈. 土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(15): 11-14
- [34] Zhao W T, Ding L, Gu X W, et al. Levels and ecological risk assessment of metals in soils from a typical e-waste recycling region in southeast China [J]. Ecotoxicology, 2015, 24(9): 1947-1960
- [35] 韦绪好, 孙庆业, 程建华, 等. 焦岗湖流域农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2304-2311
- Wei X H, Sun Q Y, Cheng J H, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils in Jiaogang Lake Basin, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(12): 2304-2311 (in Chinese)
- [36] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价攀枝花地区土壤重金属污染[J]. 重庆环境科学, 2002(4): 25-27, 31
- Teng Y G, Tuo X G, Ni S J, et al. Applying the index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in soil in Panzhihua region [J]. Chongqing Environmental Science, 2002(4): 25-27, 31 (in Chinese)
- [37] 李定龙, 杨洁, 杨彦, 等. 电子废弃物拆解场地土壤重金属健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(6): 547-549
- [38] 刘育辰, 王莉淋, 伍钧, 等. 四川城市生活垃圾重金属污染状况及来源分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 6010-6018
- Liu Y C, Wang L L, Wu J, et al. Pollution and source analysis of heavy metals in municipal solid waste in Sichuan [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(12): 6010-6018 (in Chinese)
- [39] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001
- [40] Amphalop N, Suwantarant N, Prueksasit T, et al. Ecological risk assessment of arsenic, cadmium, copper, and lead contamination in soil in e-waste separating household are-

- a, Buriram Province, Thailand [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27 (35): 44396-44411
- [41] 郭笑笑, 刘从强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(5): 889-896  
Guo X X, Liu C Q, Zhu Z Z, et al. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 889-896 (in Chinese)
- [42] 苏婷, 董胜伟. 层次分析综合指数法的土壤重金属污染评价模型[J]. *唐山师范学院学报*, 2014, 36(5): 7-10  
Su T, Dong S W. Mathematical model of comprehensive weighted factors based on analytic hierarchy process for evaluation soil heavy metal pollution [J]. *Journal of Tangshan Teachers College*, 2014, 36(5): 7-10 (in Chinese)
- [43] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 污染场地土壤重金属污染评价方法研究进展[C]// 中国环境科学学会. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 昆明: 2013 中国环境科学学会学术年会, 2013: 1204-1209
- [44] 朱青, 周生路, 孙兆金, 等. 两种模糊数学模型在土壤重金属综合污染评价中的应用与比较[J]. *环境保护科学*, 2004, 30(3): 53-57  
Zhu Q, Zhou S L, Sun Z J, et al. Application and comparison of two fuzzy mathematical models used in the evaluation of soil heavy metals' comprehensive pollution [J]. *Environmental Protection Science*, 2004, 30(3): 53-57 (in Chinese)
- [45] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8: 338-353
- [46] 段志斌, 王济, 宣斌, 等. 改进模糊数学法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(1): 131-137  
Duan Z B, Wang J, Xuan B, et al. Application of fuzzy mathematical model in pollution evaluation of soil heavy metals [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2018, 45(1): 131-137 (in Chinese)
- [47] 张锐. 耕地生态风险评价与调控研究——以江苏省宜兴市为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 66  
Zhang R. Study on the evaluation and regulation of cultivated land ecological risk—Taking Yixing City in Jiangsu Province as an example [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015: 66 (in Chinese)
- [48] 苏全龙, 周生路, 易昊旻, 等. 几种区域土壤重金属污染评价方法的比较研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(4): 1309-1316  
Su Q L, Zhou S L, Yi H M, et al. A comparative study of different assessment methods of regional heavy metal pollution [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36 (4): 1309-1316 (in Chinese)
- [49] 秦顺超, 张焕祯, 郭伟, 等. 土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. *环境工程*, 2018, 36: 726-735  
Qin S C, Zhang H Z, Guo W, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36: 726-735 (in Chinese)
- [50] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8): 2425-2436  
Fan M Y, Yang H, Huang X F, et al. Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(8): 2425-2436 (in Chinese)
- [51] 王洪礼, 冯详立. 基于投影寻踪回归理论的 UPR 消费量预测研究[J]. *生产力研究*, 2006(12): 109-110
- [52] 谢贤健, 韩光中. 基于普通克里格和投影寻踪模型的城市土壤重金属污染评价[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(9): 1584-1590  
Xie X J, Han G Z. Evaluation of soil heavy metal pollution in Neijiang City based on ordinary kriging and projection pursuit model [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(9): 1584-1590 (in Chinese)
- [53] 张小虎, 雷国平, 袁磊, 等. 黑龙江省土地生态安全评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(1): 88-93  
Zhang X H, Lei G P, Yuan L, et al. Evaluation on ecological security of land based on entropy weight and matter-element model: A case study of Heilongjiang Province [J]. *China Population Resources and Environment*, 2009, 19(1): 88-93 (in Chinese)
- [54] 王晓飞, 魏萌萌, 温中海, 等. 物元分析法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. *中国环境监测*, 2016, 32(3): 69-73  
Wang X F, Wei M M, Wen Z H, et al. Application of matter element analysis method in the evaluation of soil heavy metal pollution [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(3): 69-73 (in Chinese)
- [55] 刘维明, 王晓飞, 魏萌萌, 等. 基于物元分析法的农田土壤重金属污染评价[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(2): 249-253  
Liu W M, Wang X F, Wei M M, et al. Assessment on soil heavy metals contamination by matter-element model [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(2): 249-253 (in Chinese)
- [56] Öberg T, Bergbäck B. A review of probabilistic risk assessment of contaminated land [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2005, 5(4): 213-224
- [57] 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[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(5): 647-654
- Liu L, Yan X P, Wang Y, et al. Assessing ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to freshwater organisms by species sensitivity distributions [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, 4(5): 647-654 (in Chinese)
- [58] 文晨, 杨虹, 卢学强, 等. 基于物种敏感性分布法的生态风险评价研究进展[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 353-357
- Wen C, Yang H, Lu X Q, et al. Research advances in the ecological risk assessment based on the species sensitivity distributions [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(1): 353-357 (in Chinese)
- [59] 徐湘博, 马中, 王瑛莹, 等. 湖南长株潭中度污染区土壤镍概率生态风险评价[J]. 环境保护科学, 2017, 43(4): 115-121
- Xu X B, Ma Z, Wang Y Y, et al. Probabilistic ecological risk assessment of cadmium in the soils of Changsha-Zhuzhou Xiangtan area of Hunan Province [J]. Environmental Protection Science, 2017, 43(4): 115-121 (in Chinese)
- [60] 王立婷, 刘仁志. 土壤污染风险评价研究进展[J]. 中国环境管理, 2020, 12(2): 62-68
- Wang L T, Liu R Z. Research progress on soil pollution risk assessment [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(2): 62-68 (in Chinese)
- [61] 张倩倩, 乔敏, 池海峰. 土壤生态毒性测试方法综述[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(4): 76-97
- Zhang Q Q, Qiao M, Chi H F. Overview of soil ecotoxicity tests [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(4): 76-97 (in Chinese)
- [62] Santorufu L, van Gestel C A, Rocco A, et al. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality [J]. Environmental Pollution, 2012, 161: 57-63
- [63] Zhang Q, Ye J J, Chen J Y, et al. Risk assessment of polychlorinated biphenyls and heavy metals in soils of an abandoned e-waste site in China [J]. Environmental Pollution, 2014, 185: 258-265
- [64] International Organization for Standardization (ISO). ISO 11269-1 Soil Quality-Determination of the effects of pollutants on soil flora-Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth [S]. Geneva: ISO, 2012
- [65] International Organization for Standardization (ISO). ISO 11269-2 Soil Quality-Determination of the effects of pollutants on soil flora-Part 2: Effects of chemicals on the emergence and growth of higher plants [S]. Geneva: ISO, 2005
- [66] International Organization for Standardization (ISO). ISO 17126 Soil Quality-Determination of the effects of pollutants on soil flora-Screening test for emergence of lettuce seedlings (*Lactuca sativa* L.) [S]. Geneva: ISO, 2005
- [67] International Organization for Standardization (ISO). ISO 22030 Soil Quality-Biological methods-Chronic toxicity in higher plants [S]. Geneva: ISO, 2005
- [68] 张俊会. 电子废物拆解区水稻田的重金属污染、生态毒性及其微生物修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 30-35
- Zhang J H. Metal contamination evaluation, eco-toxicity and microbial remediation of paddy soil located in e-waste recycling area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009: 30-35 (in Chinese)
- [69] Office of Environmental Health Hazard Assessment (OE-HHA). Soil toxicity and bioassessment test methods for ecological risk assessment [R]. Sacramento, CA, USA: California Environmental Protection Agency, 2008
- [70] 张金莲, 丁疆峰, 林浩忠, 等. 电子垃圾拆解区农田土壤微生物群落结构研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(4): 96-102, 181
- Zhang J L, Ding J F, Lin H Z, et al. Microbial communities of farmland soils nearby e-waste dismantling site [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(4): 96-102, 181 (in Chinese)
- [71] Spurgeon D J, Ricketts H, Svendsen C, et al. Hierarchical responses of soil invertebrates (earthworms) to toxic metal stress [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(14): 5327-5334
- [72] van Gestel C A. Soil ecotoxicology: State of the art and future directions [J]. ZooKeys, 2012(176): 275-296
- [73] National Research Council. Risk assessment in the Federal Government: Managing the process-committee on the institutional means for assessment of risks to public health, Commission on Life Sciences, National Research Council [R]. Washington DC: National Academy Press, 1983
- [74] 李宏伟. 污染场地风险评价的模型修正研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 23-35
- Li H W. Study and application of model modification for risk assessment of contaminated sites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 23-35 (in Chinese)
- [75] Singh M, Thind P S, John S. Health risk assessment of the workers exposed to the heavy metals in e-waste recycling sites of Chandigarh and Ludhiana, Punjab, India [J]. Chemosphere, 2018, 203: 426-433
- [76] 杨彦, 温馨, 彭明国, 等. 电子垃圾拆解区多溴联苯污染特征及健康风险[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4781-4789

- Yang Y, Wen X, Peng M G, et al. Characteristics and risk assessment of polybrominated biphenyls from electronic waste dismantling places [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(12): 4781-4789 (in Chinese)
- [77] 李成. 固废拆解污染区与修复区蔬菜多氯联苯污染及其健康风险评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 49-54
- Li C. Pollution and health risk assessment of PCBs in vegetables in e-waste recycling pollution area and remediated area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 49-54 (in Chinese)
- [78] Tang X J, Shen C F, Shi D Z, et al. Heavy metal and persistent organic compound contamination in soil from Wenling: An emerging e-waste recycling city in Taizhou area, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173 (1-3): 653-660
- [79] Yuan B, Fu J J, Wang Y W, et al. Short-chain chlorinated paraffins in soil, paddy seeds (*Oryza sativa*) and snails (*Ampullariidae*) in an e-waste dismantling area in China: Homologue group pattern, spatial distribution and risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220 (Pt A): 608-615
- [80] 姜林, 梁竞, 钟茂生, 等. 复杂污染场地的风险管理挑战及应对[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(2): 458-467
- Jiang L, Liang J, Zhong M S, et al. Challenges and response to risk management of complex contaminated sites [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34 (2): 458-467 (in Chinese)
- [81] 李志博, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 II · 污染土壤的健康风险评估[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 142-151
- Li Z B, Luo Y M, Song J, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards II. Health risk assessment of polluted soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 142-151 (in Chinese)
- [82] Zeng X, Xu X J, Boezen H M, et al. Children with health impairments by heavy metals in an e-waste recycling area [J]. *Chemosphere*, 2016, 148: 408-415
- [83] Foullon Aguilera M, Mejía Saucedo R, Calderón Hernández J, et al. Assessment of exposure to persistent organic pollutants and alteration on thyroid hormone levels in Mexican children from a community dedicated to e-electronic waste recycling [J]. *Toxicology Letters*, 2016, 259: S118
- [84] Zheng G N, Xu X J, Li B, et al. Association between lung function in school children and exposure to three transition metals from an e-waste recycling area [J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2013, 23(1): 67-72
- [85] Li Z G, Li X Q, Qian Y, et al. The sustaining effects of e-waste-related metal exposure on hypothalamus-pituitary-adrenal axis reactivity and oxidative stress [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139964
- [86] Hou R K, Huo X, Zhang S C, et al. Elevated levels of lead exposure and impact on the anti-inflammatory ability of oral sialic acids among preschool children in e-waste areas [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134380
- [87] Xu L, Huo X, Liu Y, et al. Hearing loss risk and DNA methylation signatures in preschool children following lead and cadmium exposure from an electronic waste recycling area [J]. *Chemosphere*, 2020, 246: 125829
- [88] Jusko T A, Henderson C R, Lanphear B P, et al. Blood lead concentrations < 10 microg/dL and child intelligence at 6 years of age [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2008, 116(2): 243-248
- [89] Chen L, Guo H, Yuan J, et al. Polymorphisms of GSTT1 and GSTM1 and increased micronucleus frequencies in peripheral blood lymphocytes in residents at an e-waste dismantling site in China [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2010, 45(4): 490-497
- [90] Yuan J, Chen L, Chen D H, et al. Elevated serum polybrominated diphenyl ethers and thyroid-stimulating hormone associated with lymphocytic micronuclei in Chinese workers from an e-waste dismantling site [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(6): 2195-2200
- [91] Zeng Z J, Huo X, Zhang Y, et al. Differential DNA methylation in newborns with maternal exposure to heavy metals from an e-waste recycling area [J]. *Environmental Research*, 2019, 171: 536-545
- [92] Xu X J, Zhang Y L, Yekeen T A, et al. Erratum to: Increase male genital diseases morbidity linked to informal electronic waste recycling in Guiyu, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21 (19): 11610
- [93] Wu K S, Xu X J, Liu J X, et al. Polybrominated diphenyl ethers in umbilical cord blood and relevant factors in neonates from Guiyu, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(2): 813-819
- [94] Wu K S, Xu X J, Liu J X, et al. *In utero* exposure to polychlorinated biphenyls and reduced neonatal physiological development from Guiyu, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74(8): 2141-2147
- [95] Huang X F, Xu X J, Dai Y F, et al. Association of prenatal exposure to PAHs with anti-Müllerian hormone (AMH) levels and birth outcomes of newborns [J]. *Sci-*

- ence of the Total Environment, 2020, 723: 138009
- [96] Asamoah A, Essumang D K, Muff J, et al. Assessment of PCBs and exposure risk to infants in breast milk of primiparae and multiparae mothers in an electronic waste hot spot and non-hot spot areas in Ghana [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 612: 1473-1479
- [97] 范瑞芳. 广州等城市中学生与电子垃圾拆解地——贵屿镇人群尿中多环芳烃羟基代谢物的初步研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007: 11-14  
Fan R F. Preliminary study of urinary PAHs metabolites for students in Pearl River Delta and occupational population in Guiyu-An electronic waste recycling site [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2007: 11-14 (in Chinese)
- [98] Li Y, Xu X J, Liu J X, et al. The hazard of chromium exposure to neonates in Guiyu of China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2008, 403(1-3): 99-104
- [99] Liu L, Zhang B, Lin K, et al. Thyroid disruption and reduced mental development in children from an informal e-waste recycling area: A mediation analysis [J]. *Chemosphere*, 2018, 193: 498-505
- [100] Wu K S, Xu X J, Peng L, et al. Association between maternal exposure to perfluorooctanoic acid (PFOA) from electronic waste recycling and neonatal health outcomes [J]. *Environment International*, 2012, 48: 1-8
- [101] 赵高峰. 电子垃圾中多氯联苯的环境转移和潜在的健康风险[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 39-68  
Zhao G F. Studies on environmental transfer and potential health risk of polychlorinated biphenyls from electrical and electronic waste [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2006: 39-68 (in Chinese)
- [102] Arain A L, Neitzel R L. A review of biomarkers used for assessing human exposure to metals from e-waste [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(10): 1802
- [103] 刘晨宇, 田爱民, 孙菲, 等. 生态风险评价方法与应用研究进展[J]. *科技管理研究*, 2020, 40(2): 79-83  
Liu C Y, Tian A M, Sun F, et al. Progress of ecological risk assessment methods and applications [J]. *Science and Technology Management Research*, 2020, 40(2): 79-83 (in Chinese)
- [104] United States Environmental Protection Agency. Field analytical and site characterization technologies summary of application [R]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1997 ◆