

胡永兴,宿虎,张斌,等.土壤重金属污染及其评价方法概述[J].江苏农业科学,2020,48(17):33-39.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.17.006

# 土壤重金属污染及其评价方法概述

胡永兴<sup>1,2</sup>,宿虎<sup>1</sup>,张斌<sup>1</sup>,张兵兵<sup>1</sup>,张元<sup>1</sup>,欧扬剑<sup>1</sup>

(1. 甘肃省地质调查院,甘肃兰州 730030; 2. 兰州大学,甘肃兰州 730030)

**摘要:**土壤是生态系统的基本要素之一,重金属是土壤环境中一类具有潜在危害的污染物,重金属长期累积将改变农用地土壤的功能。我国土壤污染情况日益严重,为了保证农畜产品安全和人类健康,开展土壤污染状况调查及治理刻不容缓。在分析大量的相关文献和前人工作的基础上,简要总结了我国部分地区土壤重金属污染的来源、危害及污染现状,并简要分析总结了目前常用的 5 种土壤重金属污染评价方法(单项污染指数法、综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法、主成分分析法)的特点,以期对土壤污染调查和治理提供一定参考。

**关键词:**土壤;重金属污染;单项污染指数法;综合污染指数;地累积指数法;潜在生态风险指数法;主成分分析法

**中图分类号:** X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)17-0033-07

土壤是生态系统的基本要素之一,与国家粮食、生态安全、居民的身体健康直接相关,是推进经济社会可持续发展的重要保障<sup>[1]</sup>。重金属是土壤环境中一类具有潜在危害的污染物,重金属长期累积将改变农用地土壤的功能,影响农作物的质量,并经过食物链危及人类健康<sup>[2-4]</sup>。我国在经济发展、工业化和城市化建设过程中,逐步实现了农业现代化并发展了乡镇企业,但也带来了严重的环境问题<sup>[5]</sup>。在我国,环境污染出现了城市向农村扩散和转移的趋势<sup>[6]</sup>。因此,为了保证农畜产品的安全和人类健康,开展农用地土壤污染状况详查刻不容缓。

工矿企业和乡镇企业分布较密集的地区,选矿、冶炼等活动产生的尾矿、废水中重金属含量往往较高,进入土壤后将影响区域生态环境和人类健康<sup>[7-8]</sup>。如甘肃省兰州市五区三县蔬菜基地土壤重金属污染,从单因子污染指数看,兰州市蔬菜基地表层土壤主要是砷(As)污染,其中城关区土壤 As 含量达到中度污染水平,七里河区和皋兰县土壤 As 含量为轻度污染水平,表层土壤中重金属铬(Cr)、锌(Zn)、铜(Cu)、铅(Pb)的单因子污染指数均小于 1,未被污染;以 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》为评价体系,兰州市永登县农田土壤单因子污染情况表现为 As > Cu > Pb > Zn,污染水平为安全级<sup>[9-10]</sup>。

收稿日期:2019-11-06

基金项目:甘肃省科技重大专项(编号:18ZD2GF019)。

作者简介:胡永兴(1987—),男,宁夏固原人,硕士,工程师,主要从事基础地质调查、能源矿产勘查、土壤重金属污染调查及研究等工作。E-mail:306762203@qq.com。

## 1 土壤重金属污染概述

土壤重金属污染是指人类活动将重金属引入到土壤中,使土壤重金属含量明显高于背景值并超

[109] 吴丹,李琰,胡宝庆,等.嗜水气单胞菌感染后褶纹冠蚌抗氧化因子的变化[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2011,37(5):531-536.

[110] Reyes-Becerril M, Tovar-Ramírez D, Ascencio-Valle F, et al. Effects of dietary supplementation with probiotic live yeast *Debaryomyces hansenii* on the immune and antioxidant systems of leopard grouper *Mycteroperca rosacea* infected with *Aeromonas hydrophila* [J]. Aquaculture Research, 2011, 42(11): 1676-1686.

[111] 郑侠飞.微生物制剂和碳源对水产养殖环境的影响及作用机制[D].杭州:浙江大学,2017.

[112] 薛明洋.草鱼肠道微生物拮抗嗜水气单胞菌研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.

[113] Ringø E, Gatesoupe F J. Lactic acid bacteria in fish: a review [J]. Aquaculture, 1998, 160(3): 177-203.

[114] Mohapatra S, Chakraborty T, Prusty A K, et al. Dietary multispecies probiotic supplementation enhances the immunohematological responses and reduces mortality by *Aeromonas hydrophila* in *Labeo rohita* fingerlings [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2014, 45(5): 532-544.

[115] Pinto M G V, Franz C M A P, Schillinger U, et al. *Lactobacillus* spp. with *in vitro* probiotic properties from human faeces and traditional fermented products [J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 109(3): 205-214.

[116] 冯凡,蒋启欢,曾凯,等.益生菌作用机制及筛选方法研究进展[J].现代农业科技,2011(22):52-54.

过一定负荷容量,造成现存或潜在的土壤质量退化、生态与环境恶化的现象<sup>[11]</sup>。在环境污染研究中,根据元素的化学性质和毒害特性,土壤重金属污染一般以镉(Cd)、砷、铅、铬、镍(Ni)、汞(Hg)、铜、锌等生物毒性显著的重金属元素为主<sup>[12]</sup>。

### 1.1 土壤重金属污染的来源

土壤重金属来源广泛,可分为自然源和人为源。自然源主要受成土母质和成土过程的影响。人为源是引起土壤重金属污染的主要原因,主要包括污水灌溉、农药和化肥的大量使用、大气沉降、交通运输、废弃物的堆积等 5 个方面。

**1.1.1 污水灌溉** 污水灌溉是指利用生活、工业废水等进行灌溉而引起的土壤重金属富集。由于我国水资源短缺且分布不均,污水灌溉较为普遍,尤其是在我国北方地区<sup>[13]</sup>。污水灌溉可以显著提高土壤的肥力,有效缓解农业用水紧张,解决城市污水排放等问题。但同时,污水灌溉也会导致各种重金属在土壤中富集,在土壤-农作物体系中迁移转化,最终通过食物链被人体富集,危害人类身体健康。20 世纪初,日本富山市神通川流域出现过痛痛病,这是由于污水灌溉造成了土壤镉污染,使稻米中可食用部分的镉含量过高导致的。我国从 20 世纪 60 年代至今,污水灌溉的面积迅速增加,其中以北方旱作地区最为普遍,其污水灌溉的面积约占全国污水灌溉面积的 90% 以上<sup>[14]</sup>。通过收集北京市灌溉农业区的土壤和植物样本评估了污水灌溉对土壤中重金属的累积趋势,结果发现,镉、铅、铬、锌、铜等 5 种重金属在污水灌溉过程中在土壤中的累积含量有所增加<sup>[15]</sup>。研究发现,长期灌溉使农田土壤中镉、铅、汞等 7 种重金属出现了不同程度的累积,并且污水灌溉年限越长和灌渠距离越小,农田土壤重金属的环境风险越高<sup>[16]</sup>。

**1.1.2 农药、化肥的使用** 施用农药和化肥是现代农业的主要增产手段,施肥可以提高土壤肥力,促进农作物的生长。但是不合理地使用含有过量重金属的农药、化肥会导致土壤重金属污染。一般来说,在含重金属的不同类型化肥中,重金属含量表现为磷肥>复合肥>钾肥>氮肥,其中以重金属镉和砷为主<sup>[17]</sup>。由于矿物类型和加工流程的不同导致我国磷肥中重金属镉的含量差别较大<sup>[18]</sup>。国外学者研究了新西兰 50 年内同一地点的 58 个土壤样品,发现施用磷肥后,土壤中镉含量从原来的 0.39 mg/kg 上升至 0.85 mg/kg<sup>[19]</sup>。吴为等通过研

究江苏省南通市耕地土壤重金属污染情况,发现该地土壤中重金属含量为轻度富集水平,其中镉的生态风险等级最大,这主要是由于化肥和农药造成的非点源污染<sup>[20]</sup>。

**1.1.3 大气沉降** 汽车尾气和工业废气会产生大量含重金属的气体 and 粉尘,通过大气沉降进入土壤,这种途径主要以工厂周围和道路两侧为主,并受多种因素的影响。例如,我国北方冬季供暖排放到大气中的重金属含量明显高于南方,以重工业为支柱产业的地区的大气沉降的重金属质量浓度明显高于其平均水平<sup>[21]</sup>。研究发现,宁连一级公路淮阴段两侧土壤的铅含量呈由公路向两侧递减的趋势;通过研究宁夏工业园区周边土壤重金属的时空特征发现,镉、铅、铜、锌、铬等 5 种重金属的含量与园区内的工业燃煤烟尘的排放量密切相关<sup>[22-23]</sup>。

**1.1.4 交通运输** 随着交通工具的普及,高速公路、城市主干道和铁路等运输线周边的土壤是重金属污染的主要地区。一般而言,距离路面 2~50 m 的土壤污染最严重,其中铜、锌、铅、铬和镉是土壤中的主要污染物。研究发现,汽车尾气中含有大量重金属,其中以铅的含量最高,而在距离公路 35~150 m 的范围内,土壤中重金属的含量相对较高,重金属污染程度随公路垂直距离的增加呈下降的趋势,污染程度随土壤深度的增加而下降<sup>[24-25]</sup>。王桢通过富集因子研究日本 6 条铁路线的土壤重金属含量分布,发现每条铁路沿线的土壤均存在重金属污染,且污染程度随着采样点与铁路距离的增加而减小,较为严重的重金属污染多数发生在距离铁路 20 m 的范围内<sup>[26]</sup>。

**1.1.5 废弃物的堆积** 废弃物包括化工、皮革、电镀行业产生的固体废弃物和生活垃圾,污染物大多以废弃物为中心向四周开始扩散,污染范围大。如在安徽省南部山区农用地土壤重金属来源中,工矿污染源的贡献率达 39.6%<sup>[27]</sup>。

### 1.2 土壤重金属污染的危害

土壤重金属污染具有隐蔽性、滞后性、长期性、不可逆性、复合性等特点<sup>[28]</sup>,其危害主要包括以下 2 个方面。

**1.2.1 造成农作物减产、品质下降** 土壤重金属污染会通过直接或间接的方式危害农作物的生长,最后导致农作物产量减少、品质下降,甚至死亡。据统计,我国耕地面积的 1/5 遭受不同程度重金属污染,每年因此导致的粮食减产超过  $1 \times 10^7$  t,还有约

1.2 × 10<sup>7</sup> t 的粮食被重金属污染,合计经济损失约达 200 亿元<sup>[29]</sup>。

1.2.2 危害人体健康 土壤尤其是表层土壤中的重金属极易进入人体,直接危害人体健康<sup>[30]</sup>。有研究表明,镉长期在人体内蓄积,达到一定程度时会损害肾小管,引起钙、磷代谢障碍,从而导致骨质脱钙,还可能会致癌、致畸、致突变<sup>[31]</sup>。砷在人体中累积到一定程度后,会使人体内的红血球溶解,从而破坏人体正常的生理功能,同时还具有遗传性、致癌性、致畸性<sup>[32]</sup>。铅会导致人体的免疫力和生殖功能下降,当血铅含量达到 600 ~ 800 μg/g 时,人体会出现头疼、头晕、腹痛等一系列的症状,其对儿童身体健康、智力发育的影响较为明显<sup>[33]</sup>。汞进入人体后会被血液吸收,并迅速扩散到肝、肺、肾等器官中,影响能量的生成、蛋白质和核酸的合成、细胞正常生长及其功能,严重时会导致神经系统和肾脏损伤,致人死亡<sup>[34]</sup>。镍对人体有着明显的发育毒性和生殖毒性,会对胎儿发育造成不良影响,同时还会影响人体的造血功能<sup>[35]</sup>。

铬是人体必需的微量元素,在糖代谢、脂代谢中起着极其重要的作用<sup>[36]</sup>。铬对人体主要是慢性危害,长期食用含铬的食物后,皮肤和呼吸道系统会出现不同程度的病变,同时伴随着溃疡和炎症等一系列症状。铜也是人体必需的微量元素,但过量的铜会引起肝硬化、呕吐、腹泻、知觉神经障碍等症状。锌也是人体必需的微量元素,研究表明,过量的锌会使身体出现胃肠不适、恶心腹痛等一系列不良的反应<sup>[37]</sup>。

### 1.3 土壤重金属污染现状

2005—2013 年,我国开展了首次全国土壤污染状况调查工作。调查结果显示,我国土壤环境状况不容乐观,土壤重金属含量总超标率达到 16.1%,耕地、草地、林地的点位超标率分别为 19.4%、10.4%、10.0%,镉、铅、砷、汞、锌、镍、铬、铜等 8 种无机物的超标点数占全部超标点位的 82.8%。从污染分布来看,西南、中南地区土壤重金属含量超标范围大,镉、砷、铅、汞等 4 种重金属含量呈从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的趋势。

近年来,许多研究者对农用地土壤重金属的污染状况和分布特征进行研究与分析发现,玉米地和水稻土中铬、铅、铜、锌等的含量明显高于荒地,表明人类活动对当地土壤的重金属含量的增加有一定的贡献。通过研究陕西省长武县人工苹果林地

和农业耕地的土壤重金属含量分布特征发现,人工苹果林地表层土壤重金属含量高于农业耕地<sup>[38-39]</sup>。土壤重金属污染状况在不同季节表现出一定差异,铜在 4 种农用地土壤中的污染指数呈递减趋势;巢湖西部某村的农田土壤以 Hg、Cd 污染为主,平均含量分别超过其背景值的 23.00、15.25 倍<sup>[40-41]</sup>。

依据环保部门公布的数据,甘肃地区耕地土壤污染较轻,蔬菜地土壤污染较重,且半干旱区的土壤污染有增加的趋势<sup>[42]</sup>。在研究甘肃省榆中县农田土壤重金属的污染情况时,发现 Cd 含量超过了土壤环境质量 II 级标准限值,达到了重度污染水平<sup>[43]</sup>;甘肃省白银市区农田土壤受到了不同程度的重金属污染,以铜、砷、镉污染为主,其最高单因子指数分别达到 165、24、6.6<sup>[44]</sup>。

## 2 土壤重金属污染评价方法

土壤环境质量标准是开展土壤环境评价的基础,与土壤质量标准进行对照或计算评价指数是土壤重金属污染评价最基础的方法。从 1993 年起,国际标准化组织陆续颁发了一些土壤质量标准,美国、日本也制定了不少土壤环境质量标准;1995 年,我国颁布了 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》,确定了砷、镉、汞、铅、铬、铜、锌、镍等 8 种金属元素的土壤环境质量标准。在此基础上,21 世纪以来,我国相继发布了 HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》、GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》等行业标准,对土壤环境质量评价工作进行了较细致的规定。但由于土壤受外界干扰因素较多,很难采用统一的标准进行评价。因此,在国家标准的基础上,采用区域环境土壤背景值和土壤对照点含量等作为土壤环境质量标准也得到了广泛的应用<sup>[45]</sup>。

目前,土壤重金属污染风险评价的常用方法主要有单项污染指数法、综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法、主成分分析法等。

### 2.1 单项污染指数法

单项污染指数法是以土壤环境质量标准作为依据,对土壤中某一污染物的污染程度进行评价,是最基础、应用较广泛的评价方法<sup>[46]</sup>。通过单污染指数评价,可以确定出主要污染物及其危害程度。例如,国外学者通过单项污染指数法评价了荷兰土壤中 Cd 的污染状况<sup>[47]</sup>;国内学者利用单项污染指数法研究发现,呼和浩特市不同功能区土壤重金属

出现了不同程度的污染,并结合主成分分析法探究了研究区土壤重金属污染的成因和来源<sup>[48]</sup>。

单项污染指数法首先计算出土壤中重金属含量与评价标准值(筛选值)的比值,得到单项指数( $P_i$ ),按  $P_i$  大小划定土壤污染程度可分为 5 级:

$P_i \leq 1$ ,表示无污染; $1 < P_i \leq 2$ ,表示轻微污染; $2 < P_i \leq 3$ ,表示轻度污染; $3 < P_i \leq 5$ ,表示中度污染; $P_i > 5$ ,表示重度污染。评价标准值为风险筛选值(表 1)。

表 1 农用地土壤 8 种重金属污染风险筛选值

污染物	项目	风险筛选值 (mg/kg)			
		pH 值 $\leq 5.5$	$5.5 < \text{pH 值} \leq 6.5$	$6.5 < \text{pH 值} \leq 7.5$	pH 值 $> 7.5$
镉	水田	0.3	0.4	0.6	0.8
	其他	0.3	0.3	0.3	0.6
汞	水田	0.5	0.5	0.6	1.0
	其他	1.3	1.8	2.4	3.4
砷	水田	30.0	30.0	25.0	20.0
	其他	40.0	40.0	30.0	25.0
铅	水田	80.0	100.0	140.0	240.0
	其他	70.0	90.0	120.0	170.0
铬	水田	250.0	250.0	300.0	350.0
	其他	150.0	150.0	200.0	250.0
铜	果园	150.0	150.0	200.0	200.0
	其他	50.0	50.0	100.0	100.0
镍		60.0	70.0	100.0	190.0
锌		200.0	200.0	250.0	300.0

注:重金属和类金属砷均按元素总量计;对于水旱轮作地,采用其中较严格的含量限值。

2.2 综合污染指数法

单项污染指数法的目标明确,易于计算,但只能对土壤重金属的单元素进行评价,不能反映土壤污染的综合状况。因此,在单因子评价基础上发展了多种综合污染指数法,内梅罗综合污染指数法就是其中一种。由于内梅罗综合污染指数法不仅考虑了污染物的最大值,还考虑了污染物的平均值,可以更加客观地评价土壤重金属的污染状况,是国内外普遍采用的综合评价方法之一<sup>[49-50]</sup>。

同时采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法 2 种方法进行评价也是很常见的,如对北京市重点功能区的土壤重金属污染状况进行评价,并针对不同功能区的污染状况提出相应的措施<sup>[51]</sup>。不同学者在利用内梅罗综合指数法对银川市不同城市功能区的表层土壤开展了风险评价,发现城市不同功能区受重金属污染的程度不同<sup>[52]</sup>;采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法分析了贵州省黎平县耕地土壤中 As、Pb、Cr、Cd、Hg 等 5 种重金属的污染程度,结果表明,在部分乡镇 Cd 存在较重的潜在生态风险,Hg 存在中度的潜在生态风险<sup>[53]</sup>。

2.3 地累积指数法

1969 年,德国科学家 Muller 首次提出了地累积指数法,这种方法被广泛地应用于研究沉积物或土壤中某一种重金属的污染程度<sup>[54]</sup>。地累积指数法在一定程度上反映了重金属元素的自然分布特征,并且可以评价人类活动对重金属污染的影响<sup>[55]</sup>。地累积指数( $I_{\text{geo}}$ )的计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n}。$$

式中: $C_n$  表示重金属元素的实测含量,mg/kg; $B_n$  表示重金属元素的地球化学背景值,mg/kg。

地累积指数分级标准如表 2 所示。

近年来采用地累积指数法对土壤重金属污染开展评价较多,如柴世伟等对广东省广州市 5 个郊区土壤重金属污染进行了评价;钟红梅等对四川省江油市响岩镇土壤重金属污染进行了评价和研究;王煜等以某一铁尾矿区为研究区,按一定的比例在尾矿砂中添加土壤、菌糠,利用内梅罗综合污染指数法对复垦土壤中的 7 种重金属元素进行评价,并分析了各复垦模式下土壤表层各重金属元素含量

表 2 地累积指数分级标准

地累积指数范围	污染等级	污染程度
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻微污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	轻度污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	偏重污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	重度污染
$I_{geo} > 5$	6	严重污染

的变化特征<sup>[56-58]</sup>。还有研究者将地累积指数法与其他评价方法结合用于评价土壤重金属污染风险,如利用地累积指数法和内梅罗指数法相结合的综合指数法评价山东省聊城市耕地中 8 种重金属的污染程度<sup>[59]</sup>。

#### 2.4 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是瑞典地球化学家 Hakanson 提出的评价沉积物中重金属潜在风险程度的方法,可以综合地反映重金属对土壤的污染情况,现已被广泛地应用于土壤重金属潜在生态风险评价<sup>[60]</sup>。例如,郭平等采用潜在生态危害指数法评价了长春市土壤重金属的污染情况;李如忠等对铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属的潜在风险进行评价,铅为重度污染等级,砷、镉、锌和铜为较重污染等级,镍和铬为中等污染等级;张烨等对麻江县蓝莓基地土壤重金属的潜在生态风险进行了评价<sup>[61-63]</sup>。

单一重金属的潜在生态风险系数( $E_i$ )的计算公式如下:

$$E_i = T_r^i C_i / S_i。$$

式中: $T_r^i$  表示第  $i$  种重金属的毒性系数,锌、镉、铅、铜、镍、砷、镉、汞的  $T_r$  分别为 1、2、5、5、5、10、30、40; $C_i$  表示污染物  $i$  的实测值,mg/kg; $S_i$  表示污染物  $i$  的评价标准,mg/kg。Hakanson 潜在生态风险指数(RI)的计算公式如下:

$$RI = \sum E_i。$$

式中: $E_i$  和  $RI$  的分级标准如表 3 所示。

表 3 Hakanson 潜在生态风险指数法的分级标准

危害程度	$E_i$ 取值范围	RI 取值范围
轻微	$E_i < 40$	$RI < 150$
中等	$40 \leq E_i < 80$	$150 \leq RI < 300$
强	$80 \leq E_i < 160$	$300 \leq RI < 600$
很强	$160 \leq E_i < 320$	$RI > 600$
极强	$E_i > 320$	

#### 2.5 主成分分析法

主成分分析法是指在 1 组变量中找出其方差与

协方差矩阵的特征量,通过将多个变量转化成少数几个综合变量的统计分析方法,新的变量包含了原来变量的信息,且互不相关<sup>[64]</sup>。主成分分析法可以对高维的变量系统进行最佳简化和综合,从而客观地确定各个指标的权数,并避免主观随意性,因此已经被应用于土地资源开发、环境脆弱性和环境退化等研究领域<sup>[65-66]</sup>。与综合指数法、模糊综合评判法、神经网络、灰色聚类法等环境质量的定量评价方法相比,主成分分析方法具有减少原始数据信息的损失、简化数据结构以及避免主观随意性的优点,在土壤环境污染物评价的研究中得到了应用<sup>[67]</sup>。土壤中的重金属主要来源于成土母质和人类活动,因此可以通过主成分分析法有效地判别土壤中重金属元素的污染来源<sup>[68-70]</sup>。研究人员采用主成分分析法对山东省莱芜市钢城区土壤重金属的来源进行了研究,发现镉、铅、锌等主要来源于工业“三废”交通的排放、农药化肥的使用,砷和汞均来源于钢铁冶炼和煤炭燃烧,而铜受自然和人为因素的共同影响<sup>[71]</sup>。也可通过主成分分析得出,铅、铜、铬等主要受自然因素的影响,锌、镉、镍、汞、砷等主要受人为因素的影响,主要是化肥、农药的大量施用以及燃煤尘<sup>[72]</sup>。主成分分析的缺陷在于无法明确表述主成分与原始变量的对应性。鉴于主成分分析现实含义的解释缺陷,统计学家引出了因子分析。因子分析在提取公因子时,在注重变量相关性的同时,也考虑相关关系的强弱,使得主成分不仅起到降维的作用,而且能够被很好地解释<sup>[73-74]</sup>。因此,重金属间的显著相关性越高,具有相同来源的可能性越大。王雄军等基于因子分析法,对比分析了 6 个主因子,研究山西省太原市土壤重金属污染的主要来源,研究结果对太原市重金属污染治理和进一步的城市规划提供了一定的依据<sup>[75]</sup>。

### 3 结论

通过对大量文献分析研究,总结了土壤重金属污染的来源、危害及现状。对目前土壤重金属污染评价的主要方法,如单项污染指数法、综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法、主成分分析方法等分别进行了概述,并对前人的研究成果做了总结,认为各种方法在不同工作程度的地区均得到了有效应用,但是,土壤重金属污染的研究是一项复杂的工程,在具体分析时须要结合实际情况进行选择合适单一的或者组合的方法进行评价,

这样才能对土壤重金属污染程度判断的更为准确,为后期土壤重金属污染防治起到重要的指导作用。

#### 参考文献:

- [1] 张小敏,张秀英,钟太洋,等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学,2014,35(2):692-703.
- [2] 陈凤,濮励杰,赵翠薇. 昆山市农用地土壤重金属污染现状及评价[J]. 淮阴工学院学报,2006,15(1):58-62.
- [3] Zhou M, Liao B, Shu W S, et al. Pollution assessment and potential sources of heavy metals in agricultural soils around four Pb/Zn mines of Shaoguan City, China[J]. Journal of Soil Contamination, 2015, 24(1):76-89.
- [4] Khan A, Khan S, Khan M A, et al. The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22(18):13772-13799.
- [5] 李树国. 快速工业化和城市化对农业生态环境质量的影响研究[D]. 淄博:山东理工大学,2012:1-38.
- [6] 邓秋静. 贵阳市郊县农业土壤重金属污染的现状与评价[D]. 贵阳:贵州大学,2005:1-63.
- [7] 郭全恩,马忠明. 甘肃省永登县农产品产地不同功能区污染状况调查评价[C]//2013 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京:中国环境科学出版社,2013:1-5.
- [8] 赵立芳,刘佳,张兆虎,等. 甘肃省尾矿库环境风险分析及防范措施[J]. 黄金科学技术,2018,26(5):656-661.
- [9] 乔国栋. 兰州市蔬菜基地土壤重金属污染及蔬菜体内重金属的累积效应研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2009:1-71.
- [10] 罗永清,陈银萍,陶玲,等. 兰州市农田土壤重金属污染评价与研究[J]. 甘肃农业大学学报,2011,46(1):98-104.
- [11] 王玉军,吴同亮,周东美,等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报,2017,36(12):2365-2378.
- [12] Hu Y N, Cheng H F, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review[J]. Environment International, 2016, 92/93:515-532.
- [13] 方玉东. 我国农田污水灌溉现状、危害及防治对策研究[J]. 农业资源与环境学报,2011,28(5):1-6.
- [14] 陈宝才,罗建中,关红安,等. 土壤重金属污染及其化学形态特征[J]. 广西轻工业,2009(1):94-95.
- [15] 吴琼,赵同科,邹国元,等. 北京东南郊农田土壤重金属含量与环境质量评价[J]. 中国土壤与肥料,2016(1):7-12.
- [16] 陈涛,常庆瑞,刘京,等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报,2012,31(11):2152-2159.
- [17] 戴佰林. 重金属污染水稻中镉的减量化控制技术研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2015:1-79.
- [18] 马榕. 重视磷肥中重金属镉的危害[J]. 磷肥与复肥,2002,17(6):5-6.
- [19] Taylor M D. Accumulation of cadmium derived from fertilisers in New Zealand soils[J]. Science of the Total Environment, 1997, 208(1/2):123-126.
- [20] 吴为,武攀峰,缪明,等. 滨江沿海地区耕地土壤重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 中国测试,2019,45(2):78-110.
- [21] 李亚娜. 我国农田土壤重金属污染现状分析[J]. 节能,2019(7):118-119.
- [22] 张辉,马东升. 城市生活垃圾向土壤释放重金属研究[J]. 环境化学,2001,20(1):43-47.
- [23] 樊新刚. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. 环境科学,2013,34(5):1887-1894.
- [24] Williams C H, David D J. The accumulation in soil of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the cadmium content of plants[J]. Soil Science, 1976, 121(2):86-93.
- [25] 李吉锋. 关中公路土壤重金属污染及潜在生态危害分析[J]. 土壤通报,2013,44(3):744-747.
- [26] 王桢. 铁路沿线土壤重金属污染特征与来源分析[D]. 成都:西南交通大学,2018:1-265.
- [27] 尹国庆,江宏,王强,等. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析[J]. 农业环境科学学报,2018,37(1):96-104.
- [28] 李秀悌,顾圣啸,郑文杰,等. 重金属污染土壤修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术,2013,36(12):203-208.
- [29] 高太忠,李景印. 土壤重金属污染研究与治理现状[J]. 土壤与环境,1999,8(2):137-140.
- [30] 周建军,周桔,冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊,2014,29(3):315-320.
- [31] 王中阳. 朝阳区耕地土壤重金属污染风险评价与来源解析研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2018:1-133.
- [32] 秦娜. 农业土壤重金属污染及防治[J]. 山西水土保持科技,2010(1):117-119.
- [33] 李广云,曹永富,赵书民,等. 土壤重金属危害及修复措施[J]. 山东林业科技,2011,41(6):96-101.
- [34] 史贵涛,陈振楼,李海雯,等. 城市土壤重金属污染研究现状与趋势[J]. 环境监测管理和技术,2006,18(6):9-13.
- [35] 哈群. 职业性接镍对机体的危害[J]. 工业卫生与职业病,2001,27(3):184-186.
- [36] 李静萍,杜亚利. 铬对人体的作用[J]. 甘肃科技,2003,19(12):118-119.
- [37] 赵翠燕,许钦坤. 动物锌中毒研究进展[J]. 安徽农业科学,2007,35(4):1042-1064.
- [38] 孙亚乔,钱会,段磊,等. 土地利用方式对土壤重金属含量的影响分析[J]. 安徽农业科学,2010,38(7):3613-3615.
- [39] 王丽娟,庞奖励,丁敏. 不同土地利用方式下土壤重金属特征及影响研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2010,38(4):88-93.
- [40] 钟来元,郭良珍. 不同利用方式农用地土壤重金属污染状况及其动态变化特征——以广东省徐闻县为例[J]. 生态环境学报,2011,20(12):1934-1939.
- [41] 肖武,隋涛,王鑫,等. 巢湖流域典型农田土壤重金属污染评价与地理探测分析[J]. 农业机械学报,2018,49(7):144-152.
- [42] 蒲瑞丰. 西北干旱和半干旱区重金属污染生态研究——以甘肃地区为例[D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2007:1-162.

- [43]张季惠,王黎虹,张建奎. 榆中县农用地土壤及其蔬菜中重金属含量的分析与评价[J]. 贵州农业科学,2013,41(7):119-123.
- [44]赵保卫,王 刚. 白银市郊区农田土壤重金属污染初步调查与评价[J]. 环境科学与技术,2010,33(11):79-81,105.
- [45]李福燕. 海南岛农用地重金属污染现状调查与评价研究[D]. 海口:海南大学,2010:1-82.
- [46]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.
- [47]Brus D J, de Gruijter J J, Römken P F A M. Probabilistic quality standards for heavy metals in soil derived from quality standards in crops[J]. Geoderma,2005,128(3):301-311.
- [48]郭 伟,孙文惠,赵仁鑫,等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学,2013,34(4):1561-1567.
- [49]李朝奎,王利东,李 吟,等. 土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. 矿产与地质,2011,25(2):172-176.
- [50]王永豪,李晓勇. 土壤重金属污染风险评价的研究进展[J]. 农村经济与科技,2017,28(1):23-24.
- [51]王海燕,叶 芳,王登芝,等. 北京市土壤重金属污染研究[J]. 城市环境与城市生态,2005,18(6):34-36.
- [52]王幼奇,白一茹,王建宇,等. 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. 环境科学,2016,37(2):710-716.
- [53]陈晓燕,刘桂华,范成五,等. 黔东南州黎平县耕地土壤重金属生态风险的评价[J]. 西南农业学报,2019,32(6):1412-1416.
- [54]Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Journal of Geology,1969,2(3):109-118.
- [55]李绍生. 地质累积指数法在义马矿区土壤重金属及氟污染评价中的应用[J]. 河南科学,2011,29(5):614-618.
- [56]柴世伟,温琰茂,张亚雷,等. 地积累指数法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版),2006,34(12):1657-1661.
- [57]钟红梅,周云锋,龙 琼,等. 应用地质累积指数评价四川省江油市响岩镇土壤重金属污染[J]. 中国西部科技,2009,8(15):29-30.
- [58]王 煜,吕春娟. 铁尾矿区不同复垦模式土壤环境质量评价[J]. 山西农业科学,2019,47(8):1405-1410.
- [59]刘衍君,汤庆新,白振华,等. 基于地质累积与内梅罗指数的耕地重金属污染研究[J]. 中国农学通报,2009,25(20):174-178.
- [60]庄玉婷,冯嘉仪,储双双,等. 粤西地区不同林分类型土壤重金属含量及生态风险评价[J]. 华南农业大学学报,2018,39(5):25-31.
- [61]郭 平,谢忠雷,李 军,等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学,2005,25(1):108-112.
- [62]李如忠,洪天求,贾志海,等. 基于盲数的水体沉积物潜在生态风险评价方法[J]. 生态环境学报,2007,16(5):1346-1352.
- [63]张文华,苟体忠,陈胜威. 麻江蓝莓主栽区蓝莓果实中硒含量特征研究[J]. 凯里学院学报,2017,35(3):92-93.
- [64]傅德印. 主成分分析中的统计检验问题[J]. 统计教育,2007(9):4-7.
- [65]王秀红,何书金,张懿锂,等. 基于因子分析的中国西部土地利用程度分区[J]. 地理研究,2001,20(6):731-738.
- [66]王世岩,杨永兴,杨 波. 三江平原典型湿地土壤温度变化及其影响因子分析[J]. 地理研究,2003,22(3):389-396.
- [67]黄淑芳. 主成分分析及 MAPINFO 在生态环境脆弱性评价中的应用[J]. 福建地理,2002,17(1):47-49.
- [68]卢 瑛,龚子同,张甘霖,等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. 应用生态学报,2004,15(1):123-126.
- [69]Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental Pollution,2001,114(3):313-324.
- [70]Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, et al. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju Country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach[J]. Journal of Soils & Sediments,2015,15(1):163-178.
- [71]戴 彬,吕建树,战金成,等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学,2015,36(2):507-515.
- [72]张继舟,吕 品,于志民,等. 三江平原农田土壤重金属含量的空间变异与来源分析[J]. 华北农学报,2014,29(增刊1):353-359.
- [73]Manta D S, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy[J]. The Science of the Total Environment,2002,300(1/2/3):229-243.
- [74]汤 波. 陕南铅锌尾矿区土壤重金属污染特征及来源分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(18):271-275.
- [75]王雄军,赖健清,鲁艳红,等. 基于因子分析法研究太原市土壤重金属污染的主要来源[J]. 生态环境,2008,17(2):671-576.