

毛红云,孜比布拉·司马义,杨胜天,等. 农田土壤重金属的污染特征研究[J]. 江苏农业科学,2020,48(9):292-297.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.09.055

农田土壤重金属的污染特征研究

毛红云,孜比布拉·司马义,杨胜天,田 甜,魏漪梦

(新疆大学资源与环境科学学院/新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模普通高校重点实验室/

新疆大学绿洲生态教育部重点实验室,新疆乌鲁木齐 830046)

摘要:选取镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、砷(As)、汞(Hg)5种重金属分析我国16个地区农田土壤重金属现状,以国家土壤背景值及GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》为参比,运用单因子污染指数和内梅罗污染指数作为农田土壤质量评价指标。结果表明:北方研究区5种重金属含量的变异系数从大到小依次为 $Hg > Cd > Pb > As > Cr$,其中Hg的变异系数最高;南方研究区5种重金属含量的变异系数从大到小依次为 $Cd > As > Pb > Hg > Cr$,其中Cd的变异系数最高。内梅罗指数法评价结果表明,研究区的土壤重金属污染由大到小依次为 $Cd > As > Cr > Hg > Pb$,且南方污染比北方严重。目前的重金属污染修复技术多是针对单一重金属或者少数几种一起修复,多种重金属联合修复技术需要进一步的研究。

关键词:农田土壤;重金属污染;修复技术

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)09-0292-06

近年来,频发的农田土壤重金属污染事件,不仅影响农产品的质量,更损害民众身体健康,影响社会稳定^[1]。作为人类生存的基础之一,土壤是组成生态环境的重要部分。人为和自然因素向环境中排放的重金属共同影响了土壤生态系统。有数据显示,我国受重金属污染的耕地面积占全国总耕地面积的 $1/6$ ^[2]。

工业活动中矿产资源开发、化学药品的研发及生产、金属冶炼与加工等过程中产生含重金属的“三废”以堆砌、沉降等形式进入土壤,造成土壤重金属污染,进而通过食物链威胁人体健康。“血铅事件”和“镉米风波”警示了全世界^[3],也为我国重金属污染防治敲响警钟,使食品安全和人体健康风险问题被人们广泛关注。减轻污染、降低危害和污染修复也成为生态环境界经久不衰的话题。《重金属污染综合防治“十二五”规划》将镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、砷(As)、汞(Hg)等生物毒性强且污染严重的重金属元素列为第一类重点防控对象^[4]。2013年全国两会提案聚焦农业,指出我国重金属污染耕地面积超过16%。“十三五”规划纲要将土壤

收稿日期:2019-05-06

基金项目:国家自然科学基金(编号:U1603241)。

作者简介:毛红云(1993—),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事土壤生态环境研究。E-mail:847770285@qq.com。

通信作者:孜比布拉·司马义,博士,教授,主要从事资源利用与城乡规划研究。E-mail:zibibulla3283@sina.cn。

Annual Review of Biochemistry,1978,47(1):533-606.

[15] Andersen S M, Hertz P B, Holst T, et al. Mineralisation studies of ^{14}C - labelled metsulfuron - methyl, tribenuron - methyl, chlorsulfuron and thifensulfuron - methyl in one Danish soil and groundwater sediment profile[J]. Chemosphere,2001,45(6/7):775-782.

[16] Klose S, Ajwa H A. Enzyme activities in agricultural soils fumigated with methyl bromide alternatives[J]. Soil Biology & Biochemistry,2004,36(10):1625-1635.

[17] Muhamad H B, Ai T Y, Sahid I B. Determination of the herbicide fluroxypyr in oil matrices[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B,2008,43(2):134-140.

[18] 白 翎,王 玫,宫静宏. 毛细管气相色谱法测定农产品中氟草

烟残留量[J]. 色谱,2003,21(3):288-290.

[19] 仇宏伟,胡继业,周革非. 磺酰脲类除草剂在土壤及植物中行为综述[J]. 莱阳农学院学报,2000,17(2):132-138.

[20] 杜慧玲,吴济南,王丽玲,等. 苯磺隆对土壤酶活性的影响[J]. 核农学报,2010,24(3):585-588.

[21] 江改青. 小麦和土壤中苯磺隆与氯氟吡氧乙酸残留分析方法及消解动态研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2009:7-8.

[22] 郎印海,蒋 新,赵其国,等. 磺酰脲除草剂在土壤中的环境行为研究进展[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1187-1190.

[23] 杨春璐,孙铁珩,和文祥,等. 农药对土壤脲酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(7):1354-1356.

[24] 杜 迅,王亚南,何蔚荭,等. 麦田除草剂苯磺隆耐受菌株的筛选和初步鉴定[J]. 环境与健康杂志,2013,30(12):1103-1105.

修复写入,并且使土壤修复治理等新型技术装备研发和产业化发展加速。2019 年施行的《中华人民共和国土壤污染防治法》规定,污染土壤损害国家利益、社会公共利益的,有关组织可以向人民法院提起诉讼。可见我国对土壤环境的重视,同时也表明农田土壤环境是不容忽视的。

我国对农田土壤重金属污染的研究大多是针对一些城市、矿区及工业区进行重金属含量分布特征、风险评价及提出相关修复技术等,但针对全国农田重金属污染特征及修复技术方面的研究却很少。为此,本研究以期整体把握我国农田重金属的污染状况,为我国农田重金属污染治理和农田生态系统的健康发展规划提供参考依据。

1 研究背景

1.1 农田重金属的来源

1.1.1 开矿及尾矿处理 采矿业的发展致使重金属的流动性增强,随着开采过程产生的“三废”以及自然因素促使其进入土壤。例如,在 Hg 超标最严重的广西壮族自治区柳州市融水县元宝山矿区下游泗滩河沿岸的水田和旱田的土壤中其含量超过 GB 15618—2008《土壤环境质量标准》的二级标准,而其他位点的土壤中 5 种重金属含量均低于二级标准^[5]。又如,渭北旱原工矿区农田土壤重金属呈现不同程度的富集^[6]。

1.1.2 污水灌溉 城市污水中含有破坏水质环境与污染土壤的重金属,由于被土壤固定,使土壤中重金属的含量超过环境背景值。从 20 世纪 60 年代至今,我国污灌面积迅速扩大,其中扩大速度最快的是北方污灌区,而南方地区污灌面积仅占 6%;污灌导致农田重金属 Cd、Cr、Pb、As、Hg 等含量增加^[7]。在我国北方,水污染日益严重,天然缺水、农业用水不规范导致污灌现象频发。而城市生活污水处理率低、管理不规范、环保意识欠缺,致使重金属污染的水被应用于农业。

1.1.3 大气沉降 大气中的重金属大多来自人为活动,只有一部分来自地球化学作用。工业与交通运输业的发展,产生了含有重金属的气体和粉尘,最终沉降并累积在土壤表层。其累积程度与所在地区的工业、交通、人口密度及气象条件有紧密的联系,距污染源越近,重金属含量就越高,且大气流动使重金属的污染范围更广。

1.1.4 化肥及农药的使用 农药、化肥与现代农业

发展有着紧密的联系,它们是农作物增收的保证,这是因为化肥使农作物的生长发育期缩短,而农药则可以防治病虫害。对化肥不合理的使用会污染土壤,虽然化肥与农药本身所含的重金属含量极低,但通过累积会使重金属污染物在农田土壤中传递、转化并富集。磷肥中含有痕量的镉,长期使用会造成镉的富集,造成农田土壤镉污染。在农药的使用过程中,只有部分被有效利用,而其他均进入土壤或释放至大气中,而农药的长期使用也是农田重金属累积的原因。

1.2 土壤重金属的迁移转化

土壤-植物系统是物质能量循环的枢纽,与人类联系紧密。土壤重金属与土壤组分及外源物质相互作用,使重金属发生各种迁移与转化,其过程复杂多样,一般包括离子吸附和交换、溶解-沉淀、络合作用、氧化还原作用等。重金属在液相中的含量始终在动态变化。另外,植物难吸收螯合态的重金属,而且螯合剂与根系之间的竞争作用对植物有一定的保护。重金属在土壤中的迁移转化主要通过土壤胶体的解吸、吸附。受氧化-还原、溶解、吸附等反应的相互作用,铬和砷随价态的变化由固相转为液相,重金属在土壤剖面形成了有一定的形态且规律的分布^[8]。

1.3 土壤重金属的污染特征

重金属在农田土壤中随价态的变化而呈现出毒性、隐蔽、滞后性、不可逆、难恢复和长期性的特点。例如,在土壤中 Cr^{3+} 不易通过细胞膜,所以其生物致毒性远小于 Cr^{6+} ;土壤中各形态汞的毒性大小依次为甲基汞 $> \text{Hg}^{2+} > \text{Hg}^+$ 单质汞。一般较低含量的重金属就会显现极强毒性,但重金属的络合作用会极大地降低其毒性,其在土壤中存在的形态会改变生物有效性和迁移性。离子在迁移转化过程中涉及物理变化(扩散、混合、沉积等)和化学变化(氧化还原、水解、络合、甲基化^[9]等)。重金属累积不仅破坏生态系统,更会通过食物链危害人体健康。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

以秦淮线为分界线,选取我国南北部分地区,主要有北京、黑龙江、辽宁、新疆、天津、陕西、河南、湖南、湖北、山东、江苏、海南、广东、广西等省(区、市)。其中,北方大多属于干旱半干旱区,人们往往聚居在水资源丰富的区域,工厂企业分布相对密集,

导致水资源人均占有量少、污染严重、污水灌溉区面积大且灌溉历史较久。而我国南方降水量大,水资源相对丰富,人们聚居相对密集,气候湿热,工农业相对更发达。

2.2 数据来源

本研究所用数据来自中国知网、新疆大学数据库 2012—2017 年间的关于农田土壤重金属污染的 12 篇文献及 2017 年试验数据^[10-20],以各区域农田重金属含量的均值为基准值,包括黑龙江、辽宁、新

疆、北京、天津、陕西、江苏、海南、广东、广西、河南、湖北、湖南、山东等省(区、市)农田土壤中具有代表性的 Cd、Cr、Pb、As、Hg 的相关数据。

2.3 评价方法及数据处理

通过选取《中国土壤元素背景值》^[21]及 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[22]作为参比(表 1),采用单因子和多因子综合 2 种评价方法对土壤重金属现状进行评估。

表 1 国家土壤环境质量标准中 5 种重金属含量限值

项目	重金属含量限值(mg/kg)			
	pH 值≤5.5	5.5≤pH 值≤6.5	6.5≤pH 值≤7.5	pH 值>7.5
Cd	0.3	0.30	0.30	0.60
Cr	150.0	150.00	200.00	250.00
Pb	70.0	90.00	120.00	170.00
As	40.0	40.00	30.00	25.00
Hg	0.5	0.50	0.50	1.00

(1)单因子指数。以土壤单项污染物污染程度(由实测值与评价标准相比的值)来表示,即:

$$P_i = C_i / S_i。$$
 (1)

式中: P_i 、 C_i 、 S_i 分别表示污染物的污染分指数、实测浓度、评价标准(国家二级标准)。

(2)多因子综合指数。因重金属污染土壤中的重金属种类多样性,所以选择综合指数法进行污染综合评价。根据本研究的实际情况,采用内梅罗指数法计算综合指数,具体分级见表 2。计算公式如下:

$$P_N = \sqrt{(P_{\max} + P_{\text{ave}}) / 2}。$$
 (2)

式中: P_N 、 P_{\max} 、 P_{ave} 分别表示污染综合指数、污染物中最大的污染分指数、各污染分指数的算术平均值。

表 2 土壤综合污染指数分级

污染指数	分级	污染等级	污染水平
$P_N \leq 0.7$	1	安全	清洁
$0.7 < P_N \leq 1$	2	警戒级	尚清洁
$1 < P_N \leq 2$	3	轻污染	土壤已受到污染
$2 < P_N \leq 3$	4	中污染	土壤已受到中度污染
$P_N > 3$	5	重污染	土壤已受到严重污染

3 结果与分析

3.1 区域农田重金属含量特征分析

如表 3 所示,以全国土壤背景值为基准,本研究所选我国北方地区中 Cd 含量超标的有 6 个,Cr 含量超标的有 8 个,Pb 含量超标的有 2 个,As 含量超标的有 4 个,Hg 含量超标的有 6 个。说明重金属在

该区域有一定的累积。根据区域土壤 pH 值范围,选取合适的国家标准,以此为参比,只有沈阳 Cd 含量明显超标,达到 0.880 mg/kg,其 Hg 含量略超标,为 0.520 mg/kg。

土壤重金属的变异系数反映人类活动的影响。北方地区的数据中,Cd 和 Hg 含量的变异系数均大于 65%,说明二者受人类活动影响较大。而 Cr、Pb、As 含量的变异系数低于 39%,可见它们在不同地区受人类活动影响相对较小。

以全国土壤背景值为参比,所选我国南方地区中 Cd 含量超标的有 7 个,Cr 含量超标的有 4 个,Pb 含量超标的有 4 个,As 含量超标的有 3 个,Hg 含量超标的有 6 个,说明该地区的重金属有一定的累积。以 GB1518—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》为参比,江苏典型区、南宁、株洲的 Cd 含量明显超标,株洲的 Pb 含量明显超标,广州的 As 含量超标。南方部分地区的农田土壤重金属含量变异系数从小到大依次为 Cr、Hg、Pb、As、Cd,除 Cr 之外,Pb、As、Cd、Hg 含量的变异系数均大于 65%。说明在南方的研究区内,Pb、As、Cd、Hg 在不同地区受人类活动影响较大。

综上所述,在北方和南方,Cd 和 Hg 含量的变异系数均较大;此外,南方 Pb 和 As 含量的变异系数也较大。说明在我国北方与南方的地区均受人类活动影响较大,但从整体来看南方的土壤重金属变异性比北方大,这可能与南方的气候和地域有关。

表 3 区域农田重金属含量特征

地区	项目	含量 (mg/kg)				
		Cd	Cr	Pb	As	Hg
北方	乌鲁木齐	0.494	86.916	13.022	8.786	0.096
	北京 ^[11]	0.074	68.100	25.400	9.700	0.069
	新泰 ^[17]	0.162	63.971	17.473	8.023	0.050
	三江平原 ^[13]	0.180	69.830	18.260	16.870	0.072
	陕北煤矿区 ^[15]	0.498	73.600	32.770	13.670	0.136
	黄淮平原 ^[20]	0.170	79.000	25.300	11.800	0.040
	天津 ^[11]	0.090	84.200	21.000	9.600	0.084
	沈阳 ^[11]	0.880	96.200	34.640	11.960	0.520
	平均值	0.319	77.727	23.483	11.301	0.133
	标准差	0.282	10.892	7.528	2.924	0.159
	变异系数 (%)	88.489	14.013	32.057	25.874	119.190
南方	广州 ^[11]	0.190	38.430	34.640	83.500	0.070
	宁波 ^[10]	0.260	42.110	24.530	2.880	0.150
	海南岛 ^[12]	0.090	53.960	21.060	2.800	0.056
	江苏典型区 ^[14]	1.520	72.990	40.580	16.130	0.030
	黄浦江中下游 ^[16]	0.163	86.300	24.900	7.540	0.144
	南宁 ^[11]	1.440	149.570	37.380	16.350	0.194
	株洲 ^[18]	5.610	86.180	233.560	4.540	0.380
	襄阳 ^[19]	0.155	60.100	23.800	9.960	0.093
	平均值	1.179	73.705	55.056	17.963	0.140
	标准差	1.765	33.331	67.801	25.277	0.104
	变异系数 (%)	149.700	45.200	122.100	140.700	74.300
全国土壤背景值		0.097	61.000	26.000	11.200	0.065

3.2 土壤重金属污染评价

由表 4 可以看出,以我国土壤环境质量标准为评价标准,在所研究的北方部分地区,单因子污染指数大于 1 的有沈阳农田土壤中的 Cd、Hg,且 Cd 元素污染指数大于 1 的地区仅为沈阳;北方研究区 Cd 元素的平均单项污染指数为 0.840,达到警戒线,但土壤还未受污染。其余重金属的平均单项污染指数均小于 0.5,未达到污染程度。从北方研究区内梅罗综合污染指数来看,沈阳>乌鲁木齐>陕北煤矿区>黄淮平原>三江平原>新泰>天津>北京,且沈阳的内梅罗综合污染指数为 2.190,说明土壤已处于中度污染水平。

在南方部分地区,Cd 的单项污染指数的均值是 3.929,属重度污染,而其他地区均小于 0.500,还未达到污染程度。南方研究区内的重金属污染指数平均值均大于北方。而南方研究区的重金属综合污染指数从大到小依次排列是株洲、江苏典型区、南宁、广州、宁波、黄浦江中下游、襄阳、海南岛。江苏典型区、南宁、株洲的综合污染指数分别为 3.687、3.520、13.547,土壤已受到重度污染。

从整个研究区看,各个地区按照污染程度大小依次排列:株洲、江苏典型区、南宁、沈阳、广州、乌鲁木齐、宁波、陕北煤矿区、黄淮平原、三江平原、黄

浦江中下游重金属、襄阳、新泰、天津、北京、海南岛。南方地区农田综合污染指数大于北方,北方的农田重金属综合污染指数为 0.725,而南方的是 3.015,这说明南方地区农田污染程度比北方大得多。

4 讨论

综上所述,我国北方部分地区农田中 Cd、Pb、As、Hg 含量的均值均小于南方,只有 Cr 含量均值是北方大于南方。我国南方部分地区及城市重金属 Cd、Cr、Pb、As 含量的变异系数大于北方,南方仅 Hg 含量的变异系数小于北方,说明 Cd、Cr、Pb、As 4 种重金属在我国南方随地区的变化比在北方大,而 Hg 在我国因地域差异引发的差异并不大。北方研究区的综合污染指数从大到小依次为沈阳、乌鲁木齐、陕北煤矿区、黄淮平原、三江平原、新泰、天津、北京,而南方研究区从大到小依次排列是株洲、江苏典型区、南宁、广州、宁波、黄浦江中下游、襄阳、海南岛。南方研究区的综合污染指数的均值远大于北方,说明南方的污染比北方严重。以我国土壤背景值和土壤环境质量标准为参比,可知我国南方部分地区及城市农田重金属含量大部分超过我国土壤背景值。而南方水稻田重金属 Cd 污染情况突出,其污染面积

表 4 农田重金属污染指数

地区	项目	单项污染指数					综合污染指数
		Cd	Cr	Pb	As	Hg	
北方	乌鲁木齐	0.823	0.348	0.037	0.351	0.096	0.760
	北京	0.123	0.272	0.073	0.388	0.069	0.304
	新泰	0.540	0.320	0.058	0.267	0.100	0.423
	三江平原	0.600	0.349	0.061	0.562	0.144	0.489
	陕北煤矿区	0.830	0.294	0.094	0.547	0.136	0.646
	黄淮平原	0.567	0.395	0.084	0.393	0.080	0.643
	天津	0.300	0.421	0.070	0.320	0.168	0.348
	沈阳	2.933	0.481	0.115	0.399	1.040	2.190
	平均值	0.840	0.360	0.074	0.403	0.229	0.725
南方	广州	0.633	0.256	0.139	2.088	0.233	1.551
	宁波	0.867	0.211	0.082	0.096	0.300	0.651
	海南岛	0.300	0.360	0.086	0.070	0.187	0.291
	江苏典型区	5.067	0.365	0.135	0.538	0.060	3.687
	黄浦江中下游	0.543	0.432	0.083	0.251	0.288	0.445
	南宁	4.800	0.748	0.125	0.545	0.388	3.520
	株洲	18.700	0.431	0.779	0.151	0.760	13.547
	襄阳	0.517	0.401	0.095	0.249	0.310	0.428
	平均值	3.929	0.401	0.191	0.499	0.316	3.015

占总耕地面积的 40%^[23],而在污染严重的株洲、江苏典型区、南宁、沈阳,大都工业体系完善、污染物排放量多。农业环境监测站调查结果显示,污水灌溉区污染面积达 381.2 万 hm²^[24-25]。

根据区域重金属污染差异选取不同的修复方法。而现行的修复重金属污染的方法有生物修复、物理和物理化学修复、化学修复等,农业上常用污染修复治理的方法有很多,如工程修复法、排土客地法、清洗法、电泳法和生物修复法等,但最常用、应用最广的还是化学法和生态修复法^[26]。湖南省采取冬种轮作模式,进行试点研究发现,该模式能够降低 As、Cd 等含量,能够减少重金属污染,其中冬种紫云英—双季稻模式,能够有效降低 Hg 与 As 等的含量,同时能够提升水稻产量与质量^[27];向土壤中添加螯合剂或其他调节剂来增加土壤中的有效态重金属含量,可增强植物对重金属的吸收和积累^[28]。最常用的乙二胺四乙酸(EDTA)能够显著提高植物体对 Pb、Cd 的吸收富集浓度。Cao 等将 292 mg EDTA 添加到 Pb 含量为 200 mg/kg 的土壤后,所种植的豌豆对 Pb 的积累量比对照增加 67%^[29]。因此对修复技术的进一步研究,找出更加经济、有效的修复方法成为亟待解决的问题。

5 结论

通过对数据进行整理分析,初步掌握研究区土

壤重金属的分布特征,结果表明,北方研究区 Hg 的变异系数最高,5 种重金属的变异系数排序依次为 Hg > Cd > Pb > As > Cr。南方研究区这 5 种重金属中 Cd 的变异系数最高,排序依次为 Cd > As > Pb > Hg > Cr。说明研究区农田土壤中这 5 种重金属在南方和北方研究区受地区影响的程度不同,但都有了很大程度的富集。以全国土壤背景值为参比,本研究所选我国北方地区各种重金属都有超标的情况,这说明该地区的重金属有一定的累积。以国家土壤质量风险管控筛选值为参比,仅沈阳 Cd 含量明显超标、Hg 含量略超标。本研究所选我国南方地区各种重金属含量也均有超标的情况,这说明研究区的重金属有一定的累积。

研究数据表明,以国家土壤环境质量标准为参比,北方研究区 Cd 的平均单项污染指数为 0.839 5,达到警戒的污染程度。北方研究区重金属单项污染指数从大到小依次为 Cd > As > Cr > Hg > Pb。南方研究区 Cd 的单项污染指数平均值是 3.929,属于重度污染,在南方研究区,重金属单项污染指数从大到小依次为 Cd > As > Cr > Hg > Pb。北方的农田重金属综合污染指数为 0.725,而南方的是 3.015,可见南方研究区的综合污染指数均值远大于北方的,说明南方研究区污染比北方研究区严重得多。

通过阅读文献可知,现有的重金属污染的修复

方法有生物修复、物理和物理化学修复、化学修复等,但尚缺乏联合修复的研究。

参考文献:

- [1] 赵玉林,王 晓,武倩倩. 我国土壤重金属污染现状与治理方法[J]. 中国资源综合利用,2014,32(3):60-62.
- [2] 黄若君. 我国食品安全现状及存在问题分析[J]. 沿海企业与科技,2013(5):13-16.
- [3] 李有文,王 晶,巨天珍,等. 白银区不同功能区土壤重金属污染特征及其健康风险评价[J]. 生态学杂志,2017,36(5):1408-1418.
- [4] 章 骅,何晶晶,吕 凡,等. 重金属在环境中的化学形态分析研究进展[J]. 环境化学,2011(1):130-137.
- [5] 易 敏,容学军,邓冬梅. 广西元宝山矿区周边农田土壤重金属富集特征及污染评价[J]. 广西科技大学学报,2015,26(2):93-98,105.
- [6] 庞 妍,同延安,梁连友,等. 矿区农田土壤重金属分布特征与污染风险研究[J]. 农业机械学报,2014,45(11):165-171.
- [7] 王 静,王 鑫,吴宇峰,等. 农田土壤重金属污染及污染修复技术研究进展[J]. 绿色科技,2011(3):85-88.
- [8] 张彩峰. 南京市不同功能区土壤重金属污染状况及吸附特征[D]. 南京:南京林业大学,2004:6.
- [9] 周雯婧,贺 惠. 我国农田土壤重金属污染来源及特点[J]. 科教文汇,2013(240):102-103.
- [10] 周金波,汪 峰,楼一鼎,等. 宁波市农田土壤重金属污染状况调查[J]. 浙江农业科学,2016,57(8):1301-1303.
- [11] 方银娥,陈宗良. 农田土壤重金属污染及修复技术[J]. 广东化工,2013,40(17):159-164.
- [12] 李福燕,李许明,杨 帆,等. 海南岛农田土壤重金属污染的评价及其来源分析[J]. 海南大学学报,2013,31(3):24-30.
- [13] 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.
- [14] 陈京都,戴其根,许学宏,等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J]. 生态学报,2012,32(11):189-198.

(上接第 286 页)

- [23] 方 晰,唐志娟,田大伦,等. 长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险[J]. 生态学报,2012,32(23):7595-7606.
- [24] Häkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control - a sediment ecological approach[J]. Water Research, 1980, 14: 975-1001.
- [25] 徐争启,倪师军,虞先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):112-115.
- [26] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. Chemosphere, 2000, 41:133-138.
- [27] Nouri J, Mahvi A H, Jahed G R, et al. Regional distribution pattern of groundwater heavy metals resulting from agricultural activities[J]. Environmental Geology, 2007, 55(6):1337-1343.

- [15] 朱玉高. 陕北煤矿区农田土壤重金属污染现状及修复研究[J]. 洁净煤技术,2014,93(5):105-108.
- [16] 谢小进,康建成,闫国东,等. 黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析[J]. 中国环境科学,2010,30(8):1110-1117.
- [17] 李梦红,黄现民,郑家文,等. 新泰市农田重金属污染现状及评价[J]. 安徽农业科学,2009,37(31):15605-15608,15623.
- [18] 陈丽莎,陈志良,肖举强,等. 株洲市农业土壤重金属污染现状调查与评价[C]//中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷). 北京:中国环境科学出版社,2011:1760-1764.
- [19] 赵 翔. 襄阳市农田土壤重金属污染调查及评价[J]. 绿色科技,2014(2):207-209.
- [20] 周玲莉,薛南冬,杨 兵,等. 黄淮平原农田土壤中重金属的分布和来源[J]. 环境化学,2013,32(9):114-121.
- [21] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [22] 生态环境部,国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准:GB 15618—2018[S]. 北京:中国标准出版社,1995.
- [23] 徐 奕,梁学峰,彭 亮,等. 农田土壤重金属污染黏土矿物钝化修复研究进展[J]. 山东农业科学,2017,49(2):156-162,167.
- [24] 王公卿. 重金属镉对小麦的影响[J]. 河南农业,2017(4):22.
- [25] 王涌泉,李 晔,胡 进,等. 复合型调控剂修复镉污染农田土壤的研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(5):129-134.
- [26] 李 薇. 农田镉污染的危害及其修复治理方法[J]. 粮油加工,2015(9):62-64.
- [27] 周成铭. 研究农田土壤重金属污染状况及修复技术[J]. 环境与保护,2017(14):216-217.
- [28] 熊 璇,唐 浩,黄沈发,等. 重金属污染土壤植物修复强化技术研究进展[J]. 环境科学与技术,2012,35(6):185-193.
- [29] Cao A, Carucci A, Lai T, et al. Effect of biodegradable chelating agents on heavy metals phytoextraction with *Mirabilis jalapa* and on its associated bacteria[J]. European Journal of Soil Biology, 2007, 43(4):200-206.

- [28] Tyler G, Balsberg Pålsson A M, Bengtsson G, et al. Heavy - metal ecology of terrestrial plants, microorganisms and invertebrates[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1989, 47(3/4):189-215.
- [29] McLaughlin M J, Singh B R. Cadmium in soils and plants[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999:110-113.
- [30] Lu R K, Shi Z Y, Xiong L M. Cadmium contents of rock phosphates and phosphate fertilizers of China and their effects on ecological environment[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(2):150-156.
- [31] 何振立. 污染及有益元素的土壤化学平衡[M]. 北京:中国环境科学出版社,1998:129-130.
- [32] 万美英,刘宝玲,蒋志伟. 兴凯湖地区农业面源污染负荷分析[J]. 科技创新与应用,2013,20:5-11.
- [33] Galley F A, Lloyd O L. Grass and surface soils as monitors of atmospheric metal pollution in central Scotland[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1985, 24(1):1-18.