

赵 颖,王 飞,乔鹏明. 污灌区农田土壤-作物体系重金属复合污染及健康风险评价[J]. 江苏农业科学,2020,48(23):270-274.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.23.053

污灌区农田土壤-作物体系重金属复合污染及健康风险评价

赵 颖¹,王 飞²,乔鹏明¹

(1. 山西省环境科学研究院,山西太原 030027; 2. 山西大学体育科学研究所,山西太原 030006)

摘要:对山西太原小店污灌区土壤和主要农作物产品取样调查,分别测定分析了土壤和农作物中砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)等重金属的含量。同时,通过综合污染指数评价了农田土壤的污染状况,并利用危险商(HQ)法评价了食用当地农作物产品对成人和儿童造成的重金属健康风险。结果表明,农田土壤重金属污染属于警戒或轻度污染。参照 GB 2762—2017《粮食卫生标准》,农作物中重金属的综合污染指数由大到小为马铃薯>西葫芦>茄子>黄瓜>西红柿>生菜>春玉米>糯玉米,农作物整体上属于安全等级;从健康风险指数来看,食用根茎类蔬菜对成人具有潜在健康风险;对儿童而言,除谷物外,其他 4 类作物均对儿童具有潜在健康风险,且重金属通过本地农作物产品摄入对成人造成的健康风险略高于儿童。

关键词:污染农田;土壤;农产品;重金属;健康风险

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)23-0270-05

近年来,我国土壤环境质量不断下降,主要是因为工业“三废”以及城市生活垃圾等的不恰当的处置与排放^[1-2]。农田土壤是农产品的主要产地,也是污染物的主要载体。研究人员目前主要对污灌区土壤重金属污染与积累状况及农作物重金属累积量的相关性等方面进行了探讨,这些研究对于揭示污灌对土壤和农作物重金属分布特征、运移规律、累积效应及其生态环境影响具有重要的促进作用^[3-8]。已有研究多集中在南方农田周围的老工业区,对于北方半干旱地区污灌区对土壤农作物系统重金属积累及其对人体健康风险评价的报道尚少。

山西省太原市小店区位于太原市东南部,由于水资源短缺,该区主要采用污水进行农业灌溉,已有 30 多年历史;虽然缓解了用水紧张,但也使得该区的土壤受到污水中有毒有害物质不同程度的污

染,影响了作物的质量,甚至危及人体健康。本研究对山西省太原市小店污灌区农田土壤重金属含量进行测定,以山西省土壤背景值作为对照,分别运用单因子指数法和内梅罗综合指数法对土壤、作物中重金属的污染水平进行评价,对土壤有效态重金属和作物中全量重金属的相关关系进行分析,同时对作物的健康风险进行评价,以期了解小店污灌区重金属的污染水平,同时了解重金属通过土壤-作物体系对人类的健康风险。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和样品采集

研究区位于山西省太原市小店区(图 1),该研究区主要使用汾河一坝东干渠、北张退水渠和太榆退水渠的污水灌溉,灌溉污水主要包括经杨家堡污水处理厂处理过的工业废水、沿途汇入的城镇生活污水、部分未经处理的工业废水(如禽畜养殖场、食品加工厂),有超过 20 年的污灌历史。该区域属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温约 9.5℃,年平均降水量 442 mm,研究区主要土壤类型为褐土,土壤整体偏弱碱性。

在研究区 3 条污灌渠附近于 2016 年 7 月采集土壤样品,采用网格布点法按照污水渠流向共布设 35 个采样点位(图 1)。土壤:用木铲采集 0~20 cm

收稿日期:2020-04-02

基金项目:国家自然科学基金(编号:41601202);山西省重点研发项目(编号:201803D221002-4,201903D321069);山西省自然科学基金(编号:201801D121261)。

作者简介:赵 颖(1982—),女,山西太原人,博士,高级工程师,主要从事污染土壤修复与治理相关研究。E-mail:56787292@qq.com。

通信作者:王 飞,博士,副教授,主要从事区域生态与可持续发展相关研究。E-mail:nemo@sxu.edu.cn。

表层土壤,每个采样点采用对角线法采集 1 个混合样,经四分法取出 500 g 土样带回实验室自然风干,研磨过 200 目尼龙筛,装磨口玻璃瓶待测。蔬菜和谷物:蔬菜或谷物成熟后,在所布设的土样点位附近采集 5 株植物样品,带回实验室清洗烘干后研磨过 20 目尼龙筛,保存待测。合计 35 个土壤样品和 35 个蔬菜样品。

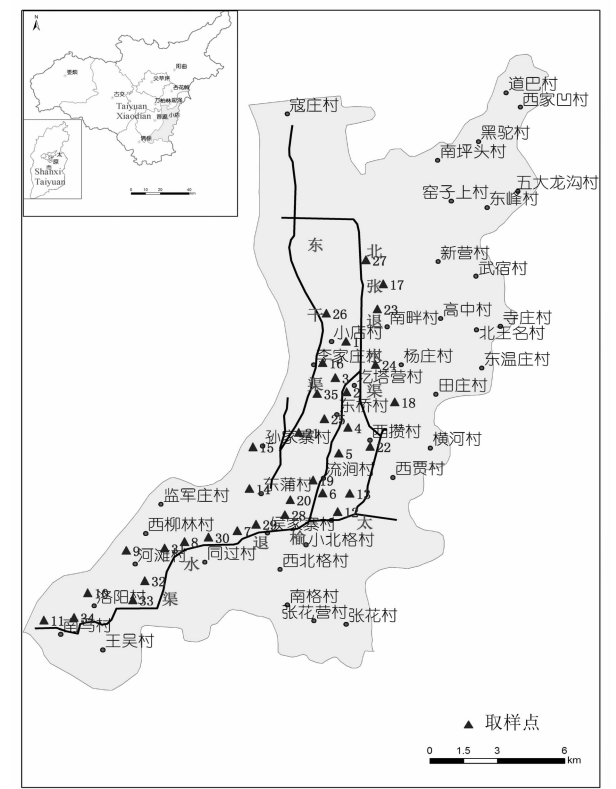


图1 小店灌区土壤采样点分布

1.2 样品分析

将 $\text{HNO}_3 - \text{HCl}$ 混合液(体积比 1 : 1)于沸水浴中消煮 2 h 后用于总砷(As)、总汞(Hg)含量的测定。用石墨炉-原子吸收光谱法测定总镉(Cd)、总铅(Pb)含量^[9];用火焰-原子吸收光谱法测定总铬(Cr)、总铜(Cu)、总锌(Zn)含量^[10];用原子荧光法测定 As 和 Hg 的含量^[11]。

1.3 重金属污染评价

污染评价参考值以 GB 15618—2008《土壤环境质量标准(修订)》中二级限量值作为标准(表 4),采用内梅罗综合污染指数法评估污染状况。

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{mean}}^2 + \left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{max}}^2}{2}}$$

式中: C_i 是土壤重金属 i 的实测值; S_i 是重金属 i 的

评价标准值; $\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{mean}}$ 和 $\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{max}}$ 分别为平均单因子污染指数和最大污染指数。 $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合指数,评价等级划分标准: $P_{\text{综}} \leq 0.7$,安全; $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$,警戒; $1 < P_{\text{综}} \leq 2$,轻度污染; $2 < P_{\text{综}} \leq 3$,中度污染; $P_{\text{综}} > 3$,重度污染。

1.4 农产品健康风险评价

单一重金属潜在的非致癌风险评价参数为风险系数(HQ)^[12],该方法假定污染物吸收剂量等于摄入量,以人体摄入污染物剂量与参考剂量的比值作为评价标准。计算公式如下:

$$HQ = CDI/RfD_0$$
$$CDI = \frac{CF \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

式中: CDI 为慢性日均暴露量,表示单位体质量单位时间的污染物摄入量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; RfD_0 表示重金属经口毒性参考剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; CF 表示重金属均值, mg/kg ; IR 表示每人每日农产品摄入量, kg/d ; EF 表示暴露频率; ED 表示平均暴露的持续时间,年; BW 表示平均体质量, kg ; AT 表示平均暴露时间, d ;各参数取值见表 1^[12-16]。

表 1 各项参数的参考值

参数	成人参考值	儿童参考值
$RfD_0 [\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$	$RfD_0 (\text{Zn}) = 3 \times 10^{-1}$	
	$RfD_0 (\text{Cu}) = 4 \times 10^{-2}$	
	$RfD_0 (\text{Cd}) = 1 \times 10^{-3}$	
	$RfD_0 (\text{Cr}) = 3 \times 10^{-3}$	
	$RfD_0 (\text{As}) = 5 \times 10^{-2}$	
	$RfD_0 (\text{Pb}) = 3.5 \times 10^{-3}$	
	$RfD_0 (\text{Hg}) = 3 \times 10^{-4}$	
$CF (\text{mg}/\text{kg})$	—	
$IR (\text{kg}/\text{d})$	0.245	0.187
$EF (\text{d}/\text{年})$	365	
$ED (\text{年})$	30	7
$BW (\text{kg})$	63.5	25.6
$AT (\text{d})$	$ED \times 365$	

根据相关文献报道^[17-19],本研究选择参数如下: IR 成人蔬菜摄入率 0.301 kg/d ,儿童蔬菜摄入率 0.231 kg/d ;成人玉米摄入率为 0.15 kg/d ,儿童玉米摄入率 0.1 kg/d ; ED 成人 30 年,儿童 7 年; BW 成人 63.5 kg ,儿童 25.6 kg ; $RfD_0 (\text{Zn}) = 3 \times 10^{-1} \text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, $RfD_0 (\text{Cu}) = 4 \times 10^{-2} \text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, $RfD_0 (\text{Cd}) = 1 \times 10^{-3} \text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, $RfD_0 (\text{Cr}) = 3 \times 10^{-3} \text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, $RfD_0 (\text{As}) = 5 \times 10^{-2} \text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, $RfD_0 (\text{Pb}) = 3.5 \times 10^{-3} \text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, $RfD_0 (\text{Hg}) = 3 \times 10^{-4} \text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

多种重金属潜在的非致癌风险评价参数为风险指数(HI),计算公式如下:

$$HI = \sum HQ = CDI_1/RfD_{01} + CDI_2/RfD_{02} + \cdots + CDI_i/RfD_{0i}$$

可见,风险指数等于风险系数之和,当 HI > 1 时,表明有潜在健康风险。

1.5 数据处理

数据处理采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行统计与相关性分析。

2 结果与分析

2.1 小店污灌区农田土壤重金属含量特征及污染评价

由表 2 可知,小店污灌区不同区域土壤中重金属含量分布差异较大,Cd、Pb、Cr、As、Hg、Cu、Zn 含量分别为 0.15 ~ 0.82、9.85 ~ 69.74、44.32 ~ 130.12、9.57 ~ 24.19、0.08 ~ 0.49、20.40 ~ 70.51、

55.00 ~ 252.72 mg/kg,其平均值由大到小依次为 Zn > Cr > Cu > Pb > As > Cd > Hg。研究区所有重金属含量均高于太原市土壤环境背景值,但均低于国家二级标准值。变异系数(CV)反映了总体样本中各采样点的平均变异程度,若 CV < 10%,则为弱变异性,若 10% ≤ CV < 100%,则为中等变异性,若 CV > 100%,则为强变异性^[20]。小店污灌区 7 种重金属含量的变异系数为 32.92% ~ 65.29%,属于中等变异性。

由表 3 可以看出,研究区土壤重金属的单因子污染指数平均值均小于 1,表示未污染;其中 As 和 Cd 的单因子污染指数最大,是污染的主要贡献因子。研究区重金属污染的综合指数为 0.63,土壤处于安全等级。但各采样点的综合污染指数差异较大,分布在污灌区中部的采样点综合污染指数较大,为 0.85 ~ 1.11,属于警戒或轻度污染等级,表明土壤作物开始受到污染。

表 2 小店污灌区表层土壤中重金属含量特征

重金属	最大值 (mg/kg)	最小值 (mg/kg)	均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)	太原市土壤 背景值(mg/kg)	二级标准 (mg/kg)
As	24.19	9.57	13.41	4.41	32.92	10.20	20.0
Hg	0.49	0.08	0.18	0.12	65.29	0.03	0.8
Cd	0.82	0.15	0.36	0.21	58.23	0.10	0.6
Cr	130.12	44.32	70.99	28.96	40.80	65.10	250.0
Pb	69.74	9.85	27.61	17.03	61.70	20.00	50.0
Cu	70.51	20.40	36.03	14.75	40.94	21.50	100.0
Zn	252.72	55.00	125.10	60.48	48.35	61.60	300.0

表 3 污灌区土壤重金属的污染评价

项目	重金属	范围值	平均值	变异系数 (%)
单项污染指数	As	0.48 ~ 1.21	0.67	32.92
	Hg	0.11 ~ 0.61	0.23	65.29
	Cd	0.25 ~ 1.37	0.60	58.23
	Cr	0.18 ~ 0.52	0.28	40.80
	Pb	0.20 ~ 1.39	0.55	61.70
	Cu	0.20 ~ 0.71	0.36	40.94
	Zn	0.18 ~ 0.84	0.42	48.35
综合污染指数		0.39 ~ 1.11	0.63	32.92

2.2 小店污灌区作物重金属含量特征与污染评价

不同种类农作物重金属含量如表 4 所示,蔬菜重金属含量评价采用 GB 2762—2017《粮食卫生标准》(表 5);结果显示,除根茎类作物的 Cd 以外,其余作物中重金属含量均未超过规定的限值标准。由于没有 Cu 和 Zn 的作物含量限值标准,所以未对

其含量是否超标进行评价。作物中其余 5 种重金属的含量差异大,总体上从高到低排序为 Cr > As > Pb > Cd > Hg,这是由于作物对不同类别重金属的吸附物特性有关。As、Cr、Pb 在 8 种作物中的含量均接近,说明 As、Cr、Pb 在这些作物中的吸附能力相近,而 Hg 在所有作物中的含量均较低,且远低于其他几种重金属的含量,说明这些作物在对 5 种重金属的吸附能力中对 Hg 的吸收富集能力最弱。Cd 在根茎类和瓜菜类中的含量较高,在根茎类中超过卫生标准限值,在瓜菜类中也接近于卫生标准限值。

由表 6 可知,从单因子污染指数来看,As、Hg 和 Cr 的单因子污染指数均小于 1,表明该研究区这五大类作物未受到 As、Hg、Cr 的污染;Pb 单因子污染指数的平均值为 0.935,在 5 种重金属中单因子污染指数最高,其中瓜菜类的西葫芦、黄瓜的 Pb 污染指数均大于 1,表明瓜菜类受到 Pb 污染;根茎类 Cd

表 4 污灌区作物中重金属的含量

mg/kg

作物种类	作物名称	As 含量	Hg 含量	Cd 含量	Cr 含量	Pb 含量	Cu 含量	Zn 含量
根茎类	马铃薯	0.162 ± 0.117	0.004 ± 0.003	0.125 ± 0.031	0.273 ± 0.141	0.065 ± 0.091	0.275 ± 0.025	5.634 ± 0.081
茄果类	西红柿	0.091 ± 0.054	0.002 ± 0.001	0.012 ± 0.021	0.110 ± 0.015	0.092 ± 0.012	1.303 ± 0.008	4.109 ± 0.184
	茄子	0.143 ± 0.067	0.004 ± 0.002	0.065 ± 0.023	0.215 ± 0.078	0.095 ± 0.034	0.287 ± 0.001	2.805 ± 0.272
瓜菜类	西葫芦	0.163 ± 0.022	0.004 ± 0.001	0.040 ± 0.006	0.291 ± 0.061	0.092 ± 0.051	1.160 ± 0.037	2.160 ± 0.045
	黄瓜	0.132 ± 0.033	0.003 ± 0.001	0.036 ± 0.007	0.241 ± 0.026	0.097 ± 0.004	1.174 ± 0.078	2.163 ± 0.081
叶菜类	生菜	0.114 ± 0.072	0.003 ± 0.001	0.055 ± 0.011	0.196 ± 0.080	0.172 ± 0.083	1.707 ± 0.054	6.537 ± 0.588
谷物	春玉米	0.102 ± 0.045	0.014 ± 0.024	0.015 ± 0.007	0.178 ± 0.066	0.140 ± 0.052	1.007 ± 0.039	1.534 ± 0.056
	糯玉米	0.098 ± 0.030	0.004 ± 0.002	0.009 ± 0.003	0.171 ± 0.032	0.111 ± 0.042	0.762 ± 0.051	1.267 ± 0.050
	平均值	0.126	0.005	0.045	0.209	0.108	0.959	3.276

表 5 农作物重金属限量值

mg/kg

蔬菜类型	As 含量	Hg 含量	Cd 含量	Cr 含量	Pb 含量
根茎类	0.5	0.01	0.1	0.5	0.1
茄果类	0.5	0.01	0.1	0.5	0.1
瓜菜类	0.5	0.01	0.05	0.5	0.1
叶菜类	0.5	0.01	0.2	0.5	0.3
谷物	0.5	0.02	0.1	1.0	0.2

表 6 作物重金属污染指数

作物种类	作物名称	单因子污染指数					综合污染指数
		As	Hg	Cd	Cr	Pb	
根茎类	马铃薯	0.32	0.40	1.62	0.55	0.33	1.71
茄果类	西红柿	0.18	0.20	0.12	0.22	0.92	0.70
	茄子	0.29	0.35	0.65	0.43	0.95	1.19
瓜菜类	西葫芦	0.38	0.43	0.80	0.58	1.94	1.49
	黄瓜	0.26	0.25	0.72	0.48	1.52	1.17
叶菜类	生菜	0.23	0.30	0.27	0.39	0.57	0.61
谷物	春玉米	0.20	0.72	0.15	0.18	0.70	0.58
	糯玉米	0.20	0.22	0.09	0.17	0.55	0.43
	平均值	0.258	0.359	0.559	0.375	0.935	0.985

等级。当地居民应当多食用和种植叶菜类和谷物,减少根茎类和瓜菜类的使用和种植,以降低其使用引起的健康风险。茄果类蔬菜的种植应根据不同蔬菜种类对重金属的吸附特性,视情况而定。

2.3 小店污灌区农作物健康风险评估

由表 7 可知,研究区中 Cd 和 Cr 对成人和儿童的风险系数在 7 种重金属中是最高的,说明在研究区 Cd 和 Cr 对人类的健康风险最大。从风险指数来看,对成人而言,根茎类的具有潜在健康风险;对儿童而言,除了谷物外,其他 4 类作物均对儿童具有潜在健康风险,这与周雅等的研究结果^[21]一致。这主要是由于儿童的身体仍在生长发育,各个器官尤其是排毒器官的功能仍不完善,其对重金属等有毒有害物质更为敏感^[22]。食用相同的蔬菜和谷物,儿童

污染指数大于 1,表明根茎类受到 Cd 污染。

从内梅罗综合污染指数看,五大类 8 种作物尚未受到重金属的严重污染,其综合污染指数由高到低依次为马铃薯、西葫芦、茄子、黄瓜、西红柿、生菜、春玉米、糯玉米。马铃薯、茄子、黄瓜、西葫芦的指数均大于 1 小于 2,说明其重金属污染已经在轻度污染水平,而茄果类的西红柿、叶菜类和谷物的综合污染指数均≤0.7,其重金属污染等级属于安全

的健康风险高于成人。

4 结论

研究区的重金属含量均高于太原市土壤环境背景值;但低于我国土壤环境质量二级标准。农田土壤 As 和 Cd 的单因子污染指数最大,是污染的主要贡献因子。分布在污灌区中部的采样点综合污染指数较大,属于警戒或轻度污染等级。

农作物中重金属的单因子污染指数均值均小于 1,其均值排序由大到小顺序为 Cr > Pb > As > Cd > Hg。农作物中重金属的综合污染指数排序为马铃薯 > 西葫芦 > 茄子 > 黄瓜 > 西红柿 > 生菜 > 春玉米 > 糯玉米,基本上属于安全等级。其中根茎类和瓜菜类重金属污染等级属于轻度污染水平,而

表 7 食用农作物产品的重金属健康风险系数和指数

人群	作物种类	HQ							HI
		As	Hg	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn	
成人	根茎类	0.015	0.051	0.484	0.351	0.072	0.027	0.072	1.072
	茄果类	0.009	0.035	0.147	0.209	0.103	0.077	0.044	0.624
	瓜菜类	0.011	0.043	0.146	0.342	0.104	0.113	0.028	0.787
	叶菜类	0.011	0.039	0.210	0.252	0.189	0.165	0.084	0.949
	谷物	0.008	0.074	0.028	0.138	0.085	0.052	0.011	0.395
儿童	根茎类	0.016	0.097	0.916	0.664	0.136	0.050	0.137	2.017
	茄果类	0.017	0.067	0.278	0.395	0.195	0.145	0.084	1.182
	瓜菜类	0.022	0.082	0.277	0.647	0.197	0.213	0.053	1.490
	叶菜类	0.021	0.073	0.398	0.477	0.358	0.312	0.159	1.798
	谷物	0.015	0.122	0.047	0.227	0.140	0.161	0.018	0.730

叶菜类和谷物重金属污染等级属于安全等级。

单个重金属健康风险评价结果显示,7 种重金属的健康风险指数(HQ)均小于 1。但多种重金属潜在的非致癌风险评价参数结果显示,食用根茎类的蔬菜对成人具有潜在健康风险;对儿童而言,除了谷物外,其他 4 类作物均对儿童具有潜在健康风险,且重金属通过本地蔬菜和谷物产品摄入对成人造成的健康风险略高于儿童。

参考文献:

[1] 庞妍,同延安,梁连友,等. 污灌农田土壤-作物体系重金属污染评价[J]. 农业机械学报,2015,46(1):148-154.

[2] Yang Y,Zhang F S,Li H F,et al. Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils[J]. Journal of Environmental Management,2009,90(2):1117-1122.

[3] 韩文辉,党晋华,赵颖. 污灌区重金属和多环芳烃复合污染及其对农田土壤微生物数量的影响[J]. 生态环境学报,2016,25(9):1562-1568

[4] Wang L X,Guo Z H. Heavy metal pollution of soils and vegetables in the midstream and downstream of the Xiangjiang River, Hunan Province[J]. Journal of Geographical Sciences,2008,18(3):353-362.

[5] 薛占军. 河北省主要污灌土壤质量及其污染风险评价研究[D]. 保定:河北农业大学,2012:20-21.

[6] 蔡立梅,黄兰椿,周永章,等. 东莞市农业土壤和蔬菜砷含量及其健康风险分析[J]. 环境科学与技术,2010,33(1):197-200.

[7] Sharma R K,Agrawal M,Marshall F. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2007,66(2):258-266.

[8] 谢华,刘晓海,陈同斌,等. 大型古老锡矿影响区土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险[J]. 环境科学,2008,29(12):3503-3507.

[9] 国家环境保护总局. 土壤质量铅、镉的测定-石墨炉原子吸收分光光度法:GB/T 17141-1997[S]. 北京:中国环境科学出版

社,1997.

[10] 国家环境保护总局. 土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法:GB/T 17138-1997[S]. 北京:中国环境科学出版社,1997.

[11] 环境保护部. 土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法:HJ 680-2013[S]. 北京:中国环境科学出版社,2013.

[12] 冯宇佳. 保定城郊菜田重金属分布特征及其预警系统初步研究[D]. 保定:河北农业大学,2017:28-30.

[13] World Health Organization. Evaluation of certain food additives and contaminants[M]. Geneva:World Health Organization,2007.

[14] 朱宇恩,赵烨,李强,等. 北京城郊污灌土壤-小麦(*Triticum aestivum*)体系重金属潜在健康风险评价[J]. 农业环境科学学报,2011,30(2):263-270.

[15] Chang C Y,Yu H Y,Chen J J,et al. Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, South China[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2014,186(3):1547-1560.

[16] Song B,Lei M,Chen T B,et al. Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Sciences,2009,21(12):1702-1709

[17] 环境保护部. 污染场地风险评估技术导则:HJ 25.3-2014[S]. 北京:中国环境科学出版社,2014.

[18] 王波,刘晓青,冯昌伟. 芜湖市部分市售蔬菜重金属含量及其健康风险研究[J]. 中国农学通报,2011,27(31):143-146

[19] 杨刚,沈飞,钟贵江,等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报,2011,31(9):2014-2021

[20] 王绍强,朱松丽,周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究,2001,20(2):161-167.

[21] 周雅,毕春娟,周泉潇,等. 上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险[J]. 环境科学,2017,38(12):5292-5298.

[22] 王北洪,马智宏,冯晓元,等. 北京市蔬菜重金属含量及健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报,2015,6(7):2736-2745.