

樱桃河边沿菜地蔬菜食用健康安全风险分析

作 芳¹, 卢晓旭², 周泉潇¹, 彭双双¹

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241)

(2. 华东师范大学教师教育学院, 上海 200062)

[摘要] 以上海市闵行区紫龙路段樱桃河边沿菜地为研究对象, 采集表层土壤(0~20 cm)并测定 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Cd 6 种重金属元素含量, 依据上海市土壤重金属环境背景值、《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018), 对该菜地健康安全风险进行了评估。结果发现:(1)菜地土壤中 Cd、Pb、Zn 含量高出上海市土壤重金属环境背景值, 其中 Cd、Zn 的含量超过农用地土壤污染风险筛选值, Cd 含量还超过了土壤污染风险管控值;(2)地累积指数法分析发现, Cd 为强污染, Zn 为中等污染, Pb 为轻-中等污染;(3)潜在生态危害指数法评价显示, Cd 元素构成极强生态危害;综合潜在生态危害指数法评价显示, 菜地存在强生态危害, 产生强生态危害的主要重金属为 Cd, 其贡献率为 97.05%。可见, 食用樱桃河边沿菜地所种蔬菜存在健康安全风险, 建议闵行区相关职能部门加强宣传和管理, 居民也应主动放弃在此开发和种食蔬菜的行为。全国各地的城市管理者 and 市民应警惕城市土地用于农业生产而带来的健康安全风险。

[关键词] 重金属, 土壤污染, 樱桃河, 菜地, 潜在生态危害, 健康安全风险

[中图分类号] X53, K903 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2019)02-0122-07

Analysis of Potential Risks to Human Health of the Vegetables Planted at Bank Side of Yingtao River

Wu Fang¹, Lu Xiaoxu², Zhou Xiaoxiao¹, Peng Shuangshuang¹

(1. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

(2. College of Teacher Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The riparian land of Yingtao River beside Zilong road which is in Minhang District of Shanghai was developed by residents around to plant vegetables. Mixed soil samples were collected from these fields and the concentrations of Cu, Zn, Pb, Cr, Ni and Cd were measured. According to the values for soil background of heavy metals in Shanghai, and Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (GB 15618-2018), it was found that the contents of Cd, Pb and Zn in vegetable soil were higher than the values for soil background in Shanghai, while the contents of Cd and Zn exceeded the risk screening values for soil contamination of agricultural land and the content of Cd also exceeded the risk intervention values for soil contamination of agricultural land. With the method of Geo-accumulation Index (I_{geo}) based on the values for soil background of heavy metals in Shanghai, the results showed that the soil had been polluted by Cd, Zn and Pb. Classified by I_{geo} , Cd was strong level pollution, Zn was medium level pollution and Pb was light-medium level pollution. Evaluated by potential ecological risk index (E_r), Cd would pose extremely strong ecological hazard, and the others may pose slight ecological hazard. With a variety of heavy metal comprehensive ecological risk index (RI) to measure, vegetable fields had strong ecological hazards and the important hazards come from Cd which contributes 97.05% hazards. In conclusion, eating vegetables from riparian land of Yingtao River may pose health and safety risk. It is suggested that relevant departments of Minhang District should conduct propaganda and advice residents not to plant vegetables in the field, and the residents should also voluntarily abandon the practice of developing the riparian land of Yingtao River. Furthermore, managers and citizens all over the country should be alert to the health and safety risks brought by the use of urban land for agricultural production.

Key words: heavy metal, soil pollution, Yingtao River, vegetable field, potential ecological hazard, health and safety risk

收稿日期: 2018-11-05.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430635)、上海市地理教育教学研究基地项目(SHGE2015A04)、华东师范大学重点教学改革项目(40400-511232-90101)、华东师范大学研究生方法类课程建设项目(40600-511232-14203)。

通讯联系人: 卢晓旭, 博士, 副教授, 研究方向: 地理教育. E-mail: greenism@163.com

土壤是人类赖以生存的自然环境和农业生产的重要资源,粮食与食品问题与土壤息息相关^[1]. 随着农业、工业、交通和城市的发展,有害物质尤其是重金属在土壤中的积累有加剧的趋势^[2]. 研究显示,近年来,上海城市土壤重金属含量明显增加^[3],南京城区土壤重金属污染也很严重^[4-6],苏南地区^[7]和浙江等地城市^[8-9]同样存在土壤重金属污染现象. 谷阳光等^[10]从2004—2016年国内外公开发表的文献中收集了我国内地(大陆)31个省级行政区行政中心所在城市城区采样点0~20 cm表层土壤的重金属含量数据,数据分析表明以上城市土壤均不同程度受到重金属污染. 陈燕芳^[11]总结认为城市土壤重金属污染主要来源于交通、生活垃圾、工矿业、农业、燃煤等,普遍发现工业区和商业区重金属污染较为严重,公路两侧也是污染非常严重的地带. 崔邢涛等^[12]的研究也证实了城市土壤的重金属含量高值区与工业区域、交通分布相吻合. 从全球城市来看,城市土壤重金属污染问题也较为普遍^[13].

从土壤重金属污染的危害来看,积累在土壤中的重金属不能被生物降解,却能通过农作物生长过程富集,最终经食物链积聚于人体,对人的健康尤其是儿童健康造成危害^[14]. 有研究显示中国儿童血铅超过国家标准(100 $\mu\text{g/L}$)者达三成,大城市超标者达六成以上,且市区更高^[15]. 据美国学者研究,城市儿童血铅与城市土壤铅含量呈显著的指数关系^[16],说明城市土壤重金属污染已产生明显危害. 研究表明,重金属主要通过消化道吞食、呼吸道吸入和皮肤表面吸收等方式进入人体. 其中Pb的强亲组织性会损害人体器官. Cd可以破坏钙代谢,引起钙缺乏,导致骨质疏松、软骨症和骨折等症状. Zn、Cu、Ni、Cr等是人体必不可少的微量元素,但是当人体从外界环境中摄取过多时也同样会对人体健康产生损害^[17-19]. 李鹏^[20]的研究表明城市土壤中重金属对人体有潜在非致癌风险和致癌效应,儿童风险高于成人.

菜地是居民蔬菜的最终来源,食用存在重金属污染的土壤上出产的蔬菜对人体健康产生的风险尤其显著,研究菜地土壤重金属污染及生态危害对保障人体健康有重要意义. 郭朝晖^[21]以农村农业用地的土壤为研究对象,发现湘江中下游的农田土壤和蔬菜中存在重金属污染,并且存在潜在健康风险. 还有许多学者以城市农业用地的土壤为研究对象,其中郭广慧^[22]研究了宜宾市城市菜地土壤中的重金属及其对儿童的健康风险,宋波、陈同斌等^[23-25]分别研究了北京市菜地土壤和蔬菜中Cd、Pb、As的含量及其健康风险,丁爱芳^[26]研究了南京城郊菜地土壤和蔬菜中的重金属含量及其存在的健康风险,赵凌宇^[27]研究了云南省斗南蔬菜基地耕作层土壤的重金属污染特征,以上研究无论样本来自农村还是城市,均以农业用地中的菜地为研究对象. 本研究则是以非农用的城市建设用地中的零散菜地为研究对象,探寻违规开发菜地背后的土壤重金属污染及其健康风险,以期为城市管理者治理城市土地违规开发种植、保障城市居民防范健康风险提供参考.

1 研究区概况

位于上海市闵行区吴泾镇的樱桃河为黄浦江支流,地处城郊,河边居民多有农业生产的传统,樱桃河边沿土地常被开辟为蔬菜地,尤以紫龙路(总长仅1 km)河段为甚. 由于道路上汽车尾气可能给土地带来污染,加上该区域距离吴泾化工区仅几千米距离,土地是否符合蔬菜地的标准,食用其出产的蔬菜是否存在健康风险,则成为人们关心的问题. 该案例并不是个例,随着中国城市化的推进,近郊农村地区不断演变为城市新区,但是,新城内部仍有一些待开发建设的土地,它们可能已受到工业生产、交通运输和城市建设的影响和污染,但在这些土地上零星种植农作物的现象较为普遍,食用这些土地上的农产品是否安全是一个迫切需要研究的问题,对公众健康也有重要意义. 本研究以上海市闵行区紫龙路段樱桃河边沿菜地为例,其位置如图1,违规开发的菜地景观如图2,土壤采样点如图3.



图1 研究区域在上海市的位置

Fig.1 The location of study areas in Shanghai



图2 紫龙路段樱桃河边沿菜地外景

Fig.2 Vegetable fields landscape at bank side of Yingtao River along the Zilong Road



图 3 紫龙路段樱桃河边沿零散菜地分布图及样本采集点

Fig. 3 Distribution and sampling sites of vegetable fields at bank side of Yingtao River along the Zilong Road

2 材料与方法

2.1 土壤重金属测定元素选定及其质量标准

土壤重金属含量标准采用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》(GB 15618—2018)^[28]中的农用地土壤污染风险筛选值标准(污染物含量等于或低于该值,对农产品质量安全风险低,超过该值,对农产品质量安全可能存在风险)、农用地土壤污染风险管控值标准(污染物含量超过该值,对农产品质量安全风险高)(见表 1)以及上海市土壤重金属环境背景值(见表 2)^[29-30]。《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》中列出的土壤污染风险筛选的重金属元素有 8 项,分别为 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn,经验显示,Hg、As 在上海及周边地区的污染可能性和危害程度较小,相关研究多测定 Cd、Cu、Pb、Cr、Zn 等的含量^[31-33],本研究选择测定其中的 Cd、Cu、Pb、Cr、Zn、Ni 6 项重金属元素的含量。

表 1 《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》中的土壤重金属标准值

Table 1 The standard values of soil heavy metals of soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land

对应土壤 pH	标准类别	Cd	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni
6.5~7.5	土壤污染风险筛选值/(mg/kg)	0.30	100	120	200	250	100
	土壤污染风险管控值/(mg/kg)	3.0	—	700	1 000	—	—

注:土壤污染风险筛选值标准中的 Cd、Pb、Cr 分“水田”和“其他”两种标准,Cu 分“果园”和“其他”标准。樱桃河边沿菜地非水田和非果园,因此表中所列的土壤污染风险筛选值是“其他”类土壤标准。

表 2 上海市土壤重金属环境背景值

Table 2 Heavy metals' environmental background data of soil in Shanghai

重金属	Cd	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni
背景值/(mg/kg)	0.17	28.59	25.47	75.00	86.10	31.90

2.2 样本采集与测定方法

采样方法参照国家环保局的《环境监测评价方法》的相关要求执行。在紫龙路段樱桃河边沿菜地随机选择 5 个采样点(如图 3),分别在每个采样点用铲子取 0~10 cm 表层土样,放入自封袋内,贴上标签。将 5 个采样点土壤样本混合,放在烘箱内烘干,剔除样本中植物根茎、有机残物以及其他杂物,用研钵研磨,过 120 目尼龙筛,用于测量重金属元素的含量。部分过 40 目筛,以 1:2.5 的土水比例,依据国家农业行业标准《土壤 pH 的测定》(NY-T 1377—2007),采用电位法,使用 S40 型测量仪(梅特勒-托利多公司)测量土壤 pH。取过 120 目筛的样本,采用酸溶法 HNO₃-HClO₄-HF 加热消解后,使用 AANALYST800 型原子吸收光谱仪(Perkin Elmer 公司),其中 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Ni 的测定采用火焰法,Cd 的测定采用石墨炉法。在重金

属元素的分析测定中采用国家标准土壤样本 (GSS-6) 作为质控标样. 确保每种元素的相对偏差小于 10%. 实验所用的试剂均为优级纯试剂,水为超纯水.

2.3 土壤污染评价方法

采用地累积指数法^[34] (Geo-accumulation index) 对土壤样本进行重金属污染评价. 地累积指数 I_{geo} 的计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_i}{1.5B_i} \right],$$

式中, C_i 为土壤样本中重金属元素 i 的浓度; B_i 为元素 i 的环境背景值. 土壤重金属元素的地累积指数 I_{geo} 分级如表 3.

表 3 I_{geo} 污染指数分级标准
Table 3 Standard classification of Geo-accumulation index

I_{geo} 值域	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	≥ 5
污染分级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	轻-中	中	中-强	强	强-极严重	极严重

2.4 潜在生态危害评价法

土壤样本综合生态风险评价采用潜在生态危害指数法^[35]. 潜在生态危害指数的计算公式如下:

$$\begin{aligned} C_f^i &= C_i/B_i, \\ E_r^i &= T_r^i \times C_f^i, \\ RI &= \sum_{i=1}^n E_r^i, \end{aligned}$$

式中, C_f^i 为元素 i 的污染参数; C_i 表示元素 i 的浓度; B_i 表示元素 i 的环境背景值; E_r^i 为元素 i 的潜在生态危害指数; T_r^i 为元素 i 的毒性响应系数; RI 为多元素综合潜在生态危害指数. 潜在生态危害指数分级标准如表 4.

本研究中 5 种土壤重金属的毒性响应系数来自陈静生^[36]对美国国家环保局 (EPA) 提出的重金属毒性响应系数的修正, 分别是 Cd:30, Cu:5, Pb:5, Cr:2, Zn:1. 另外, Ni 的毒性响应系数为 5, 来自徐争启^[37]的研究成果.

表 4 E_r 和 RI 的分级标准

Table 4 Standard classification of E_r and RI

E_r	RI	危害程度
≤ 40	≤ 150	轻微生态危害
40~79	150~299	中等生态危害
80~159	300~600	强生态危害
160~320	≥ 600	很强生态危害
≥ 320		极强生态危害

3 结果与分析

3.1 土壤重金属含量测定结果和超标分析

用上述方法测定了紫龙路段樱桃河边沿菜地土壤样本的 pH 水平和其中 Cd、Cu、Pb、Cr、Zn、Ni 6 项重金属元素的含量, 样本 pH 为 7.31, 数据如表 5. 依据上海市土壤重金属环境背景值, Cd 的含量是背景值的 18.46 倍, Pb 的含量是背景值的 1.88 倍, Zn 的含量是背景值的 3.63 倍, 其他元素均低于背景值. 依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》中 pH 为 6.5~7.5 的农用地土壤污染风险筛选值中的其他 (旱地) 标准, 其中 Cd 的限值为 0.3, 实际测值为 3.14, 测值是限值的 10.46 倍; Zn 的限值为 250, 实际测值为 312.86, 测值是限值的 1.25 倍. 其他元素测值均低于标准中的限值. Cd、Zn 超过风险筛选值反映了农产品质量安全可能存在风险, 原则上应当采取安全利用措施. 再依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》中 pH 为 6.5~7.5 的农用地土壤污染风险管控值标准, Cd 的限值为 3.0, 而样本的实际测值为 3.14, 已超过风险管控值, 食用该土壤上出产的农产品风险高, 原则上应采取严格管控措施. 结果表明, 樱桃河边沿菜地土壤中重金属 Cd、Zn、Pb 超过上海市土壤重金属环境背景值, Cd、Zn 还超过国家土壤污染风险筛选值, 其中 Cd 更是超过了国家土壤污染风险管控值. 结果评价如表 5.

表 5 土壤样本重金属含量

Table 5 Heavy metal concentrations in soil samples

	pH	Cd	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni
样本测值	7.31	3.14	7.49	48.00	28.34	312.86	11.03
上海市环境背景值/(mg/kg)		0.17	28.59	25.47	75.00	86.10	31.90
结果评价		超背景值	未超背景值	超背景值	未超背景值	超背景值	未超背景值
2018 风险筛选值/(mg/kg)	6.5~7.5	0.3	100	120	200	250	100
结果评价		超筛选值	未超筛选值	未超筛选值	未超筛选值	超筛选值	未超筛选值
2018 风险管控值/(mg/kg)	6.5~7.5	3.0	—	700	1 000	—	—
结果评价		超管控值	—	未超管控值	未超管控值	—	—

3.2 污染等级评价

运用地累积指数法,以上海市土壤环境背景值为评价标准,对土壤样本所代表的菜地土壤进行重金属污染评价,结果如表 6 所示.

表 6 樱桃河边沿菜地土壤污染地累积指数及评价结论

Table 6 Geo-accumulation indexes and the evaluation of heavy metal pollution in vegetable fields at bank side of Yingtao River

	Cd	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni
样本测值 C_i	3.14	7.49	48.00	28.34	312.86	11.03
背景值 B_i	0.17	28.59	25.47	75.00	86.10	31.90
地累积指数 I_{geo}	3.62	-2.52	0.33	-1.99	1.28	-2.12
污染程度	强	无	轻-中等	无	中等	无

以上海市土壤环境背景值为标准,计算 I_{geo} 污染指数. 结果是土壤样本中重金属元素 Pb、Zn、Cd 的 I_{geo} 均大于 0,按照 I_{geo} 污染指数分级标准(表 3),表明这 3 种元素构成污染,其中 Pb 属轻-中等污染,Zn 属中等污染,Cd 属强污染,污染程度 $Cd>Zn>Pb$;其余 3 种重金属元素 Cu、Cr、Ni 的 I_{geo} 均小于 0,属于无污染范畴. 这 6 种重金属元素中,Pb 的含量小于标准中的土壤污染风险筛选值,但超过了上海市土壤环境背景值,说明上海市樱桃河边沿菜地土壤中重金属 Pb 的含量受人为影响而在土壤中有所积累,仍属轻-中等污染. Zn 超过国家土壤污染风险筛选值,污染程度中等,Cd 不仅超过国家土壤污染风险筛选值,还超过了土壤污染风险管控值,污染程度较强,要严格管控农作物生产.

3.3 潜在生态危害评价

潜在生态危害指数法评价土壤样本的结果如表 7. 从表 7 可以看出,重金属元素 Cu、Pb、Cr、Zn、Ni 的 E_r 均在 0~10 之间,均小于 40,对照表 4 可知,属于轻微生态危害;Cd 的 E_r 为 553.94,大于 320,存在极强生态危害. 多种重金属元素综合潜在生态危害指数 RI 为 570.79,在 300~600 之间,说明樱桃河边沿菜地整体至少存在强生态危害. 在 RI 中,Cd 的贡献率高达 97.05%,说明樱桃河边沿菜地产生强生态危害的主要重金属为 Cd.

表 7 各重金属元素 E_r 、多种重金属元素 RI 及评价结论

Table 7 E_r , RI and the evaluation of potential ecological risk

	Cd	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni
样本测值 C	3.14	7.49	48.00	28.34	312.86	11.03
背景值 B	0.17	28.59	25.47	75.00	86.10	31.90
污染参数 C_f	18.47	0.26	1.89	0.38	3.63	0.35
毒性响应系数 T_r	30	5	5	2	1	5
元素潜在生态危害指数 E_r	553.94	1.31	9.42	0.76	3.63	1.73
E_r 生态危害评价	极强	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
综合潜在生态危害指数 RI	570.79(基于以上 6 种重金属元素)					
RI 生态危害评价	强生态危害					

3.4 原因分析

我国工业化和城镇化在给社会带来高速发展的同时,也向城市环境输送了大量的重金属元素,造成了土壤的重金属污染. 研究显示,工业生产、城市交通、废弃物堆放、污染土壤外迁、污泥污水农用、农药化肥施用等是土壤重金属富集的主要途径^[38-42]. 紫龙路段樱桃河边沿菜地土壤重金属污染产生的原因可能与吴泾化工区生产排放的污染物沉降有关.

紫龙路段樱桃河边沿菜地北距吴泾化工区仅 3 km 距离,化工区的排放物会被偏北风带来并沉降于土壤中. 由于该菜地处于黄浦江拐弯处的内侧,交通环境因河流而相对封闭,附近车辆较少,尤其是没有大型车辆和过境车辆,交通运输导致污染的可能性较小. 调查显示,由于该菜地是河边的固有土地,虽然近年来被居民开辟为蔬菜地,但土层并非从其他污染区转移而来,也没有大量施用化肥、有机肥和使用农药的历史,也无工业废弃物堆放、生活垃圾倾倒以及污泥覆盖的情况,因此,菜地重金属污染最主要的来源可能是化工区的污染物漂移与沉降. 谢小进^[43]和庄腾飞^[32]的研究发现 Pb、Zn、Cd 富集与工业有关,庄腾飞^[32]、张倩冬^[30]的研究直接证实了吴泾化工区附近土壤样本中的 Pb、Zn 含量远高于其他地区. 这进一步证实了本文的分析结论. 而樱桃河水是否存在重金属污染以及是否造成边沿菜地土壤重金属超标,则有待进一步研究.

4 结论与建议

(1) 紫龙路段樱桃河边沿地带零散菜地存在重金属超标及污染现象. 依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》,上海市紫龙路段樱桃河边沿地带零散菜地土壤中重金属元素 Cd、Zn 的含量超过土壤污染风险筛选值标准,其中 Cd 的含量不仅是风险筛选值的 10.46 倍,还超过了土壤污染风险管控值. Zn 的含量是风险筛选值的 1.25 倍. Cu、Pb、Cr、Ni 的含量未超土壤污染风险筛选值,但 Pb 超过上海市土壤环境背景值,说明 Pb 的含量和 Cd、Zn 一样受人为影响而在土壤中有所积累. 以上海市土壤环境背景值为标准,运用地累积指数法对土壤污染评价显示,该地段土壤已受到 Cd、Zn、Pb 元素的不同程度污染,其中 Cd 元素为强污染, Zn 为中等污染, Pb 为轻-中等污染. 土壤污染程度为 $Cd > Zn > Pb > Cr = Ni = Cu$.

(2) 紫龙路段樱桃河边沿地带零散菜地土壤具有强生态危害. 考虑各元素相应毒性系数的差异,潜在生态危害指数法评价结果显示, Cd 元素构成极强生态危害,其余元素为轻微生态危害. 各元素的土壤生态危害等级为 $Cd > Pb = Zn = Ni = Cu = Cr$. 用多种重金属综合潜在生态危害指数衡量,菜地存在强生态危害,产生强生态危害的主要重金属为 Cd,其贡献率高达 97.05%. Zn、Pb 存在污染,但潜在生态危害相对轻微.

(3) 食用紫龙路段樱桃河边沿地带零散菜地上所种的蔬菜存在健康安全风险. 通过对土壤污染及其潜在生态危害现状的分析,可得出结论:居民食用樱桃河边沿菜地上所种植的蔬菜存在健康安全风险,长期食用风险会更大. 据此提出 3 条建议:①闵行区相关职能部门应加强宣传和管理. 通过知识宣传建议居民不要食用河边菜地上的蔬菜,并劝阻居民私自将樱桃河边沿土地开发为菜地. 同时加强和落实河边景观规划. ②当地居民应认识到城市建设用地与农村农业用地存在的质量差异,不要忽视樱桃河边沿菜地种植蔬菜存在较大的健康安全风险,应到周边菜市场购买安全有保障的放心蔬菜. ③利用零星城市用地种植农作物的现象普遍存在,本研究案例为这种行为提供了健康安全风险警示,城市管理者 and 土地利用者应警惕将城市土地用于农业生产可能带来的健康安全风险.

[参考文献]

- [1] 赵庆龄,路文如. 土壤重金属污染研究回顾与展望:基于 web of science 数据库的文献计量分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6): 105-111.
- [2] 李静,谢正苗,徐建明,等. 杭州市郊蔬菜地土壤重金属环境质量评价[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 277-280.
- [3] 尹骏,柳云龙. 上海市城郊土壤重金属空间分布及其污染评价[J]. 现代农业科技, 2010(10): 251-253, 255.
- [4] 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.
- [5] 吴新民,李恋卿,潘根兴,等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 105-111.
- [6] 张俊叶,刘晓东,庞少东,等. 物元可拓法用于南京城市绿地土壤重金属污染评价[J]. 环境科学研究, 2018, 31(9): 1572-1579.
- [7] 钱新锋,沈国清. 苏南河网地区河岸带土壤重金属污染生态风险评价[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2012, 35(4): 78-83.
- [8] 郑晴之,王楚栋,王诗涵,等. 典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价:以临安市为例[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2875-2883.
- [9] 李锋,刘思源,李艳,等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 934-944.
- [10] 谷阳光,高富代. 我国省会城市土壤重金属含量分布与健康风险评价[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 62-71.

- [11] 陈燕芳. 我国城市土壤重金属污染及其治理研究进展综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(增刊1): 536-539.
- [12] 崔邢涛, 栾文楼, 宋泽峰, 等. 石家庄城市土壤重金属空间分布特征及源解析[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 683-690.
- [13] 李小平, 高瑜, 张蒙, 等. 城市土壤重金属空间分布、污染与来源[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(6): 138-146.
- [14] LANPHEAR B P, ROSHMANN K J. Pathways of lead exposure in urban children[J]. Environmental research, 1997, 74(1): 67-73.
- [15] 钟堃, 张金良. 中国儿童血铅来源及相关影响因素[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(7): 651-654.
- [16] JONES R L, HOMA D M, MEYER P A, et al. Trends in blood lead levels and blood lead testing among US children aged 1 to 5 years, 1988—2004[J]. Pediatrics, 2009, 123(3): 376-385.
- [17] 张浩, 王济, 曾希柏, 等. 城市土壤重金属污染及其生态环境效应[J]. 环境监测管理和技术, 2010, 22(2): 11-18.
- [18] 和莉莉, 李冬梅, 吴钢. 我国城市土壤重金属污染研究现状和展望[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1210-1216.
- [19] 钱翌, 张玮, 褚衍洋. 青岛市表面土壤 Cu 的形态分布及潜在生态危害评价[J]. 城市环境与城市生态, 2010, 23(1): 14-16.
- [20] 李鹏, 张波, 王玮, 等. 中国主要城市土壤重金属污染状况及风险评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(11): 88-90.
- [21] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 3-11.
- [22] 郭广慧, 宋波. 城市土壤重金属含量及其对儿童健康风险的初步评价: 以四川省宜宾市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(8): 946-952.
- [23] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1343-1353.
- [24] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J]. 中国农业科学, 2006, 39(8): 1589-1597.
- [25] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 297-310.
- [26] 丁爱芳, 潘根兴. 南京城郊零散菜地土壤与蔬菜重金属含量及健康风险分析[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 409-411.
- [27] 赵凌宇, 杨浩, 王延华, 等. 云南斗南蔬菜地重金属分布及潜在生态风险评价[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2015, 38(3): 91-98.
- [28] 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, 2018.
- [29] 戴峰, 李晓斐. 上海地区 13 种金属土壤背景值初探[J]. 上海环境科学, 2009, 28(6): 271-274.
- [30] 张倩冬, 程思思, 王捷, 等. 上海市闵行区不同土地功能区土壤重金属含量测试与分析[J]. 地理教学, 2012(4): 61-64.
- [31] 王初, 陈振楼, 王京, 等. 上海市崇明岛公路两侧土壤重金属污染研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1): 105-108.
- [32] 庄腾飞, 柳云龙, 章立佳, 等. 上海城郊土壤重金属含量的空间变异与分布特征: 以上海市闵行区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(增刊1): 99-104.
- [33] 陈亚华, 黄少华, 刘胜环, 等. 南京地区农田土壤和蔬菜重金属污染状况研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 356-360.
- [34] FÖRSTNER U, AHLF W, CALMANO W, et al. Sediment criteria development. Contributions from environmental geochemistry to water quality management[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990: 311-338.
- [35] HAKANSON L. An ecology risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Res, 1980, 14(8): 975-1001.
- [36] 陈静生, 王忠, 刘玉机. 水体金属污染潜在危害: 应用沉积学方法评价[J]. 环境科技, 1989, 9(1): 16-25.
- [37] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 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.
- [38] HSIANGTE K, LONGGEN Y, 梁奎. 上海宝山—吴淞地区土壤及农作物中的重金属含量[J]. 资源开发与保护, 1992, 8(3): 237-241.
- [39] 沈根祥, 谢争, 钱晓雍, 等. 上海市蔬菜农田土壤重金属污染物累积调查分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊1): 37-40.
- [40] 孟飞, 刘敏, 史同广. 上海农田土壤重金属的环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 428-433.
- [41] 张彦, 张惠文, 苏振成, 等. 污水灌溉对土壤重金属含量、酶活性和微生物类群分布的影响[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(6): 44-50.
- [42] 张直, 曹英兰, 蔡超, 等. 基于 GIS 的菜园土壤重金属空间分布及其风险评价[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(1): 129-133.
- [43] 谢小进. 上海地区土壤重金属空间分布特征及其成因分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2010.