

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.02.015

株洲市云龙示范区土壤重金属 Pb、Cd 分布特征及污染评价

王志勇, 陈瑞强, 王永豪

(湖南工业大学 城市与环境学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 以株洲市云龙示范区为研究对象, 运用单因子指数法和潜在生态危害指数法对其土壤中 Pb、Cd 的污染状况进行了评价与分析, 并运用地累积指数法对评价结果进行了检验。研究表明: 所有样品中 Pb、Cd 的实测质量分数范围分别为 25.60~102.00, 0.03~0.49 mg·kg⁻¹; 16 个样品 Cd 的含量超过国家土壤环境质量二级标准, 超标率为 40%, 土壤重金属 Cd 轻度累积, 尤其在 0~20 cm 土壤层中累积较为严重; 综合潜在生态危害指数 RI 为 3.32~51.07, 表明该区域综合潜在生态风险处于轻微生态危险水平; 地累积指数检验结果表明各地块均存在不同程度的重金属 Pb、Cd 污染, 且污染程度与采样层深度成反比。因此, 相关部门应考虑减少农业生产活动对土壤的污染, 避免生活垃圾随意堆放形成二次污染等。

关键词: 土壤; 重金属; 污染评价; 生态危害指数; 云龙示范区

中图分类号: X825

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)02-0090-07

An Assessment of Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals Pb and Cd in the Soil of Yunlong Demonstration Area in Zhuzhou

WANG Zhiyong, CHEN Ruiqiang, WANG Yonghao

(College of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: With Yunlong Demonstration Area of Zhuzhou city as the research object, an evaluation and analysis have been made of the pollution situation of Pb and Cd in soil by adopting the single factor index method and potential ecological hazard index method, followed by a test of the results by using the cumulative index method. The results show that the measured mass fraction of Pb and Cd in all samples were between 25.60~102.00, 0.03~0.49 mg·kg⁻¹, respectively, with the content of Cd in 16 samples exceeding the national secondary standard of soil environmental quality. There is a slight accumulation of heavy metal Cd in the soil, especially within its depth of 0~20 cm. The integrated potential ecological hazard index is within the scope of 3.32~51.07, indicating that the integrated potential ecological risk in this region is at a slightly high level. The cumulative index test results show that there are different degrees of heavy metals Pb and Cd pollution in each region area, with the degree of pollution inversely proportional to the depth of the sampling layer. Therefore, the relevant departments should take into consideration the reduction of the soil pollution caused by agricultural activities, and the prohibition of random staking of the living garbage likely to

收稿日期: 2017-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11205054)

作者简介: 王志勇 (1978-), 男, 山东济宁人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事绿色建筑理论与技术, 建筑节能技术等方面的研究, E-mail: zywang668@126.com

陈瑞强 (1991-), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为低碳城乡规划与管理, E-mail: 1127965937@qq.com

trigger the secondary pollution.

Keywords: soil; heavy metal; pollution assessment; ecological hazard index; Yunlong Demonstration Area

0 引言

城市边缘区作为城市与乡村的过渡空间,兼具城市和乡村的土地利用性质,是城市化进程中最为活跃和复杂的区域。随着城乡社会经济的快速发展和城镇化的快速推进,城市边缘区正面临着更多、更复杂的环境压力,特别是土壤重金属污染问题日趋严重,对土壤环境的质量造成严重危害^[1-2]。同时,土壤中不断累积的重金属还会通过饮食、呼吸等途径进入人体,危害人体健康^[3-4]。因此,对城市边缘区的土壤重金属的污染特征以及风险评价进行研究具有重要的现实意义。

株洲市云龙示范区位于株洲市北部,是长株潭城市群“两型”社会建设改革试验五大示范区之一。云龙示范区具有优越的城市边缘区地理优势与交通区位条件,彰显出其巨大的城镇化发展潜力,而土壤环境质量的好坏以及土壤污染的防治已经成为影响该地区可持续发展的关键性问题。因此,本文在借鉴已有国内外科研工作者对土壤重金属污染风险评价的基础上,对株洲市云龙示范区土壤中的重金属 Pb、Cd 进行污染评价研究,以期为揭示该地区土壤重金属污染特征和污染治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据株洲市云龙示范区的土地利用类型,选取具有代表性的地块进行调查采样,4个采样地块分别位于云龙水上乐园周边(设为地块1)、五星村(设为地块2)、云峰湖社区(设为地块3)、方特欢乐世界周边(设为地块4)。其中,地块1布设3个采样点,地块2布设7个采样点,地块3布设6个采样点,地块4布设4个采样点,且各采样点均经过全球定位系统(global positioning system, GPS)准确定位。

由于研究区域的各地块地势较为平坦且面积较小,土壤分布较为均匀,故参照 HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》中的要求进行布点取样^[5]。本实验共布设20个采样点,得到40个土壤样品,并按地块和采集顺序进行编号。

1.2 样品处理与重金属测定

1) 样品处理。首先,将土壤样品摊成厚约2cm的薄层,并置于通风处自然均匀风干,且在风干过程中剔除石子、植物残体等杂物;然后,将风干的

样品用研钵磨细,并且过100目尼龙筛筛选;最后,采用王水-高氯酸消解法,将筛选的样品消解成溶液待测液。

2) 重金属测定方法。本研究中,样品中Pb元素含量的测定,采用 GB/T 17140—1997《土壤质量 铅、镉的测定 KI-MIBK 萃取火焰原子吸收分光光度法》中的方法;样品中Cd元素含量的测定,采用 GB/T 17141—1997《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》中的方法。

1.3 评价方法

常用于土壤中重金属污染物污染程度评价的方法主要有单因子指数法和潜在生态危害指数法。其中,单因子指数法能较好地反映土壤中某种污染因子的污染程度,确定单个土壤质量参数的污染状况;潜在生态危害指数法能综合反映出各污染因子的生态危害程度,并定量划分风险等级。因此,本研究综合采用单因子指数法和潜在生态危害指数法,对云龙示范区土壤中的重金属 Pb、Cd 进行污染评价。

1.3.1 单因子指数法

采用单因子指数法进行土壤污染评价的计算公式为

$$P_i = C_i / S_i$$

式中: P_i 为单因子污染指数;

C_i 为污染物实测浓度;

S_i 为土壤评价标准值;

i 为某种污染物。

株洲市云龙示范区的农田土壤呈偏酸性^[6],故采用 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中国家二级标准^[7]作为土壤评价的标准,即 $S_{Pb}=250$ mg/kg, $S_{Cd}=0.30$ mg/kg。土壤环境中的重金属质量等级参照农业部环境保护科研监测所制定的土壤重金属的分级标准。

1.3.2 潜在生态危害指数法

采用潜在生态危害指数法进行土壤污染评价的计算公式为

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_{\text{实测}}^i / C_n^i$$

式中: RI 为综合潜在生态危害指数,它反映的是多种污染物的综合潜在生态危害程度;

E_r^i 为单项潜在生态危害系数,它反映的是单项污染物的潜在危害程度;

T_r^i 为某种污染物的毒性响应系数,本研究根据

Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数, 并结合文献资料 [8], 选定 Pb 和 Cd 的毒性响应系数, 分别为 $T_r^{Pb}=5$, $T_r^{Cd}=30$;

C_f^i 为单因子污染系数;

$C_{实测}^i$ 为某污染物的实测值;

C_n^i 为参比值, 在此选用单因子指数法中确定的

Pb、Cd 土壤评价标准值。

2 污染状况分析与评价

2.1 土壤重金属 Pb、Cd 污染特征分析

土壤样品中 Pb、Cd 的实测含量如图 1 所示, 其统计特征值如表 1 所示。

表 1 云龙示范区土壤重金属 Pb、Cd 统计特征值

Table 1 Statistical features of heavy metals Pb and Cd in the soil of Yunlong Demonstration Area

采样地块	元素	采样深度 /cm	特征值/(mg·kg ⁻¹)					变异系数/%
			平均值	最小值	最大值	标准差	方差	
地块 1	Pb	0~20	63.33	49.50	73.10	10.050	101.100	15.87
		20~40	37.73	29.10	46.90	7.280	52.950	19.29
	Cd	0~20	0.41	0.35	0.45	0.045	0.002	10.98
		20~40	0.18	0.09	0.27	0.073	0.005	40.56
地块 2	Pb	0~20	92.87	67.90	102.00	11.840	140.140	12.75
		20~40	56.49	29.20	95.90	22.540	507.840	39.90
	Cd	0~20	0.34	0.26	0.44	0.073	0.005	21.47
		20~40	0.17	0.09	0.35	0.091	0.008	53.53
地块 3	Pb	0~20	49.67	32.30	98.30	23.720	562.740	47.76
		20~40	33.28	25.60	44.00	6.060	36.700	18.21
	Cd	0~20	0.30	0.09	0.49	0.122	0.015	40.67
		20~40	0.21	0.03	0.36	0.103	0.011	49.05
地块 4	Pb	0~20	38.13	29.40	47.30	8.130	66.020	21.32
		20~40	32.63	28.40	35.80	3.180	10.120	9.75
	Cd	0~20	0.36	0.35	0.36	0.007	0.000	1.94
		20~40	0.25	0.19	0.28	0.036	0.001	14.40
全部区域	Pb	0~20	64.53	29.40	102.00	27.080	733.310	41.96
		20~40	41.94	25.60	95.90	17.760	315.270	42.35
	Cd	0~20	0.34	0.09	0.49	0.088	0.008	25.88
		20~40	0.20	0.03	0.36	0.090	0.008	45.00

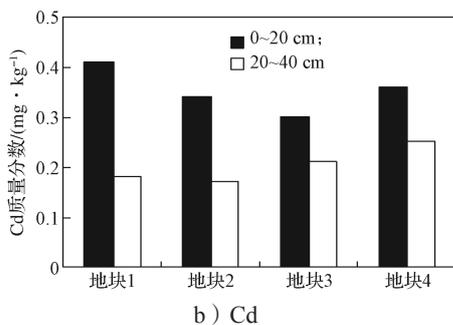
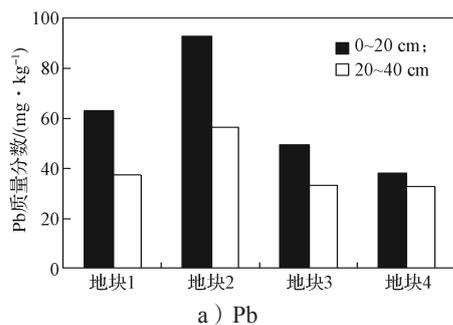


图 1 云龙示范区不同采样层土壤重金属 Pb、Cd 质量分数
Fig. 1 Contents of heavy metals Pb and Cd in different sampling layers of Yunlong Demonstration Area

由表 1 和图 1 可知, 研究区域内所有土壤样品中 Pb、Cd 的实测质量分数分别为 25.60~102.00 mg/kg 和 0.03~0.49 mg/kg。可见, 各采样层土壤样品中重金属 Pb 的平均含量均远低于国家土壤环境质量的二级标准, 20~40 cm 采样层土壤中重金属 Cd 的质量分数平均值也未超过二级标准限值。但是 0~20 cm 采样层土壤中, 地块 3 重金属 Cd 的质量分数平均值已经达到二级标准限值, 其余 3 个地块重金属 Cd 的平均值均高于二级标准限值, 4 个地块中重金属 Cd 的平均质量分数分别为 0.41, 0.34, 0.30, 0.36 mg/kg; 且地块 1 在 0~20 cm 采样层土壤样品中重金属 Cd 的平均含量最高, 表明其 Cd 污染最为严重; 16 个样品土壤中 Cd 的含量均超过国家土壤环境质量二级标准, 超标率为 40%。测试结果表明, 土壤中重金属 Pb、Cd 的含量与采样层深度成反比。

此外, 据表 1 数据显示, Pb、Cd 的变异系数随着地块和土层深度的不同产生的变化波动较大, 表明研究区域内土壤中的重金属 Pb、Cd 的分布不均匀。

各采样地块 0~20 cm 土壤层中重金属 Cd 的含量相较于 20~40 cm 土壤层中的存在显著差异, 表明造成云龙示范区土壤重金属 Cd 累积的主要原因是外部因素。查阅相关资料与现场调研发现: 云龙示范区研究区域内几乎不存在有色冶炼、火力发电、重化工等可能造成土壤重金属污染的工业企业。因此, 该地区土壤重金属来源可排除本区域内工业污染。此外, 云龙示范区设立于 2009 年, 当前开发建设工作还在持续推进中, 域内车流量较少, 因此, 该地区土壤重金属来源也基本可以排除交通污染。但是, 云龙示范区是传统的农耕地区, 在长期农作活动(如大量施用化肥、有机肥、农药等)的影响下, 土壤的性质会发生显著变化, 任顺荣等人^[9-10]的研究也证明了农作活动会对土壤中重金属含量造成影响, 而这可能是导致该地区土壤中 Cd 含量超标的另一个原因。此外, 云龙示范区位于株洲市北部, 南邻石峰区和荷塘区, 其中石峰区清水塘老工业区是以重化工企业为主的传统重工业基地, 而云龙示范区气候特点是夏季风向多正南风, 冬季则以西北风为主, 源自于工业生产排放的污染物可能通过大气沉降和雨淋等途径进入云龙示范区表层土壤, 郑娜等人^[11-13]的研究成果都证明了大气沉降对区域土壤重金属含量有很大影响, 因此, 这可能是导致该地区土壤中 Cd 含量超标的另一个原因。再者, 经现场调研和勘察, 采样地块未发现生活垃圾处理点, 但在五星村和云峰湖社区采集的样品中发现少量生活垃圾, 而包丹丹等人^[14-16]的研究均证明生活垃圾对土壤重金属污染有较大的影响, 因此推断生活垃圾也可能对云龙示范区土壤中重金属的含量有一定影响。

2.2 土壤重金属 Pb、Cd 单因子评价

将所得各地块 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤样品中 Pb、Cd 的单因子污染指数绘制成线形图, 如图 2 所示, 其中采样点 1~3 属于地块 1, 4~10 属于地块 2, 11~16 属于地块 3, 17~20 属于地块 4, 后同。

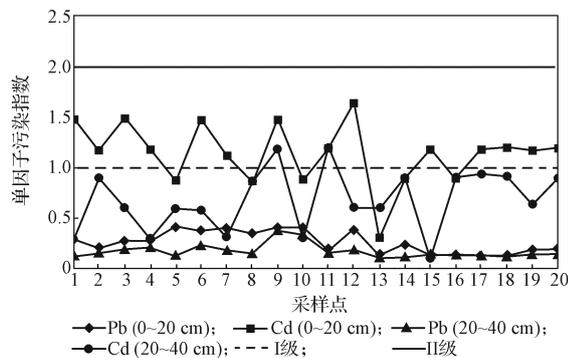


图2 不同采样层土壤重金属 Pb、Cd 单因子污染指数
Fig. 2 Single factor pollution index of heavy metals Pb and Cd at different sampling soil layers

由图 2 可以看出, 云龙示范区所研究区域内的土壤重金属 Pb 的累积程度较低, 均处于 I 级水平以下, 属于背景状况, 基本上不会形成污染; 而该区域内土壤重金属 Cd 已经存在轻度累积的情况。其中, 0~20 cm 土壤层中重金属 Cd 累积较为严重, 除 6 个采样点的单因子污染指数小于 1、处于 I 级水平外, 有 14 个(占总数的 70%) 采样点的单因子污染指数均大于 1 且不超过 2, 处于 II 级水平, 属于轻度积累; 20~40 cm 土壤层中的重金属 Cd 累积程度相对较低, 除 2 个采样点单因子污染指数大于 1、处于 II 级水平, 属于轻度积累外, 其余采样点单因子污染指数均小于 1, 处于 I 级水平, 属于背景状况。以上分析表明, 云龙示范区研究区域内土壤不存在重金属 Pb 污染, 但土壤中重金属 Cd 已存在一定程度的累积。土壤重金属 Pb、Cd 的单因子污染指数与采样层深度成反比, 以各元素单因子污染指数的平均值为评价标准, 两种重金属元素的污染程度为 $P_{Cd} > P_{Pb}$ 。

2.3 土壤重金属 Pb、Cd 潜在生态危害指数法评价

所得云龙示范区研究区域内各采样地块的单项潜在生态危害系数 E_i^i 和综合潜在生态危害指数 RI 如表 2 所示, 将各采样点综合潜在生态危害指数 RI 绘制成线形图, 如图 3 所示。

表 2 云龙示范区土壤重金属 Pb、Cd 潜在生态风险

Table 2 Potential ecological risk of heavy metals Pb and Cd at the soil layers of Yunlong Demonstration Area

采样地块	采样深度 /cm	单项潜在生态危害系数 E_i^i		综合潜在生态危害指数 RI
		Pb	Cd	
地块 1	0~20	1.27	41.40	42.67
	20~40	0.75	17.81	18.56
地块 2	0~20	1.86	33.71	35.57
	20~40	1.13	17.35	18.48
地块 3	0~20	1.00	30.40	31.40
	20~40	0.67	21.33	22.00
地块 4	0~20	0.76	35.50	36.26
	20~40	0.65	25.20	25.85

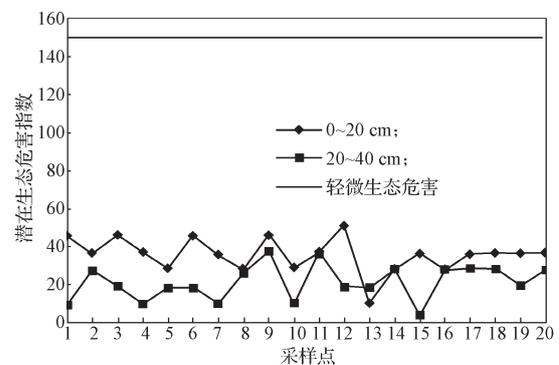


图3 不同采样层土壤重金属 Pb、Cd 综合潜在生态危害指数
Fig. 3 Potential ecological risk index of heavy metals Pb、Cd at different sampling soil layers

由表2和图3可以得知,土壤样品中重金属Pb的单项潜在生态危害系数远小于40,污染水平处于轻微生态危险水平,说明云龙示范区土壤中重金属Pb的潜在生态危害很小。而土壤样品中重金属Cd的单项潜在生态危害系数处于17.35~41.40之间。其中,地块1在0~20 cm土壤层中重金属Cd的单项潜在生态危害系数为41.40,属于中等生态危险水平,其余各采样地块土壤重金属Cd的单项潜在生态危害系数均小于40,污染水平处于轻微生态危险水平。各采样地块在0~20 cm土壤层中重金属Pb、Cd的单项潜在生态危害系数均小于20~40 cm土壤层中重金属Pb、Cd的单项潜在生态危害系数,土壤重金属Pb、Cd的单项潜在生态危害系数与采样层深度成反比。以各元素单项潜在生态危害系数的平均值为评价标准,两种重金属元素潜在生态危害程度为 $E_r^{Cd} > E_r^{Pb}$,此结果与单因素评价的结果一致。

从综合潜在生态危害指数 RI 看,研究区域综合潜在生态危害指数 RI 在3.32~51.07之间,属于轻微生态危害水平,但是在可接受范围内。各采样地块在0~20 cm土壤层中的重金属Pb、Cd的综合潜在生态危害指数 RI 大多小于20~40 cm土壤层中重金属Pb、Cd的综合潜在生态危害指数 RI ,可见土壤重金属Pb、Cd的综合潜在生态危害指数 RI 与采样层深度成反比。以各采样地块综合潜在生态危害指数为评价标准,该区域0~20 cm土壤层中的重金属Pb、Cd的污染程度由大到小排序依次为云龙水上乐园周边(地块1)、方特欢乐世界周边(地块4)、五星村(地块2)、云峰湖社区(地块3);研究区域内20~40 cm土壤层中的重金属Pb、Cd的污染程度由大到小排序依次为方特欢乐世界周边(地块4)、云峰湖社区(地块3)、云龙水上乐园周边(地块1)、五星村(地块2)。

3 评价结果检验

采用地累积指数法对以上评价结果进行检验,其计算公式为

$$I_{geo} = \lg[C_i/kB_i]$$

式中: B_i 为元素 i 在某区域土壤中的地球化学背景值;

k 是考虑引起地球化学背景值变动的岩石因素而取的系数。

本研究中,地球化学背景值取湖南省A层土壤重金属地球化学背景值的中位值,即 $B_{Pb}=26.3$, $B_{Cd}=0.081$,取 k 值为1.5。地累积指数分级标准参照Forner提出的地累积指数 I_{geo} 与重金属污染程度对应

关系^[17]。将各地块0~20、20~40 cm土壤层中Pb、Cd的地累积指数绘制成线形图,如图4所示。

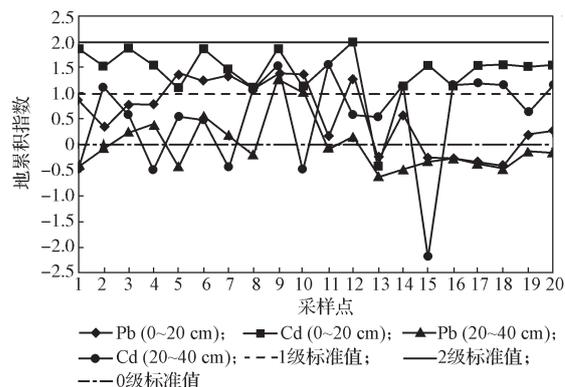


图4 不同采样层土壤重金属Pb、Cd的地累积指数
Fig. 4 Accumulation index of heavy metals Pb and Cd at different sampling soil layers

由图4可知,Pb的地累积指数为-0.62~1.37。其中,0~20 cm采样层中有5个样品属于清洁水平,8个样品属于轻度污染水平,7个样品属于偏中度污染水平;20~40 cm采样层中有13个样品属于清洁水平,5个样品属于轻度污染水平,2个样品属于偏中度污染水平;偏中度污染水平样品大多分布在五星村。Cd的地累积指数为-2.18~2.01,其中0~20 cm采样层中除1个样品属于清洁水平、1个样品属于中度污染水平外,其余样品均属于偏中度污染水平;20~40 cm采样层中,有5个样品属于清洁水平,6个样品属于轻度污染水平,9个样品属于偏中度污染水平。由以上分析可以看出,各个地块均存在不同程度的重金属Pb、Cd污染,且污染程度与采样层深度成反比,以各元素地累积污染指数的平均值为评价标准,两种重金属元素的污染程度为 $B_{Cd} > B_{Pb}$ 。此评价结果与单因子指数法关于Cd的污染评价结果基本一致,但关于研究区域是否受到Pb污染则有不同结论,这可能与土壤环境质量二级标准的选取有关。

4 结论及建议

4.1 结论

1)从土壤重金属质量分数实测值来看,选定的研究区域内所有样品Pb的实测质量分数范围为25.60~102.00 $mg \cdot kg^{-1}$,Cd的为0.03~0.49 $mg \cdot kg^{-1}$,可见样品土壤重金属Pb的质量分数平均值远低于国家土壤环境质量二级标准,20~40 cm土壤层中重金属Cd的质量分数平均值也未超过二级标准限值。但0~20 cm土壤层中,地块3重金属Cd的质量分数平均值已经达到二级标准限值,其余3个地块重金属Cd的质量分数平均值均高于二级标准限值;16个样品Cd

质量分数平均值超过国家土壤环境质量二级标准, 超标率为 40%。

2) 从单因子评价结果来看, 云龙示范区研究区域土壤重金属 Pb 的累积程度较低, 均处于 I 级水平, 属于背景状况。而该区域内土壤中重金属 Cd 已经存在轻度累积情况, 其中, 0~20 cm 土壤层中重金属 Cd 基本处于 II 级水平, 属于轻度积累; 20~40 cm 土壤层中重金属 Cd 基本处于 I 级水平, 属于背景状况; 两种重金属元素的污染程度为 $P_{Cd} > P_{Pb}$ 。

3) 从潜在生态危害指数评价结果来看, 研究区域的综合潜在生态危害指数 RI 在 3.32~51.07 之间, 土壤重金属 Pb、Cd 的污染水平基本处于轻微生态危害水平, 但在可接受范围内, 且两种重金属潜在生态危害程度为 $E_r^{Cd} > E_r^{Pb}$, 危害程度与采样层的深度成反比。

4) 从检验结果来看, 地累积指数法与单因子指数法关于 Cd 的污染评价结果基本一致, 但关于研究区是否受到 Pb 污染则有不同结论, 这可能与土壤环境质量二级标准的选取有关。

综上所述, 云龙示范区研究区域内可能受到不同程度的 Pb 污染; 区域内的土壤重金属 Cd 存在轻度累积的情况, 尤其是在 0~20 cm 土壤层中 Cd 累积偏大, 但还在可接受范围之内; 土壤重金属 Cd 的潜在生态危害程度大于 Pb, 且危害程度与采样层深度成反比。

4.2 建议

造成云龙示范区土壤中重金属 Cd 污染的原因, 可能是长期的农作活动(化肥、有机肥、农药的施用等)产生的污染, 南部石峰区清水塘老工业区等产生的污染物通过大气沉降、雨淋形成的污染以及区域内生活垃圾污染等。

清水塘老工业区搬迁改造已进入第二阶段, 旧址环境污染治理、土地整理开发已启动。根据规划, 清水塘老工业区将打造成为集科技创新、工业文旅休闲、口岸开放经济等为一体的生态科技新城。所以, 针对云龙示范区土壤重金属污染的具体情况以及清水塘老工业区搬迁改造工程, 今后云龙示范区土壤环境污染防治的重点内容应放在农作活动污染和生活垃圾污染上, 且应以重金属 Cd 的污染防治为主。

一方面, 相关部门应考虑制定更加完善的农业生产排污规范, 引导农民合理使用化肥、有机肥、农药等, 减少农业生产活动对土壤的污染; 另一方面, 倡导生活垃圾分类处理、集中处理, 设置垃圾回收点, 杜绝生活垃圾随意堆放, 避免形成二次污染; 再者, 应加大环保宣传力度, 普及重金属污染的常识性问题

和危害, 提高居民的污染防治意识。

参考文献:

- [1] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖, 等. 城市边缘带土壤重金属空间变异及其污染评价[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 39-45.
ZHENG Hailong, CHEN Jie, DENG Wenjing, et al. Spatial Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in the Steel Industry Areas of Nanjing Periurban Zone[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 39-45.
- [2] 黄辉, 檀满枝, 周峰, 等. 南通市城市边缘带土壤重金属污染现状及评价[J]. 土壤, 2007, 39(2): 286-290.
HUANG Hui, TAN Manzhi, ZHOU Feng, et al. Status and Assessment of Heavy Metal Pollution of Soils in the Peri-Urban Nantong[J]. Soils, 2007, 39(2): 286-290.
- [3] 王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015(2): 225-233.
WANG Fei, HUANG Yizong, WANG Xiaoling, et al. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surrounding Soils of Tungsten Ores: Comparison of Different Evaluation Methods[J]. Environmental Chemistry, 2015(2): 225-233.
- [4] 庄腾飞. 上海市城市边缘区土壤重金属多尺度空间分布特征及污染评价[D]. 上海: 上海师范大学, 2012.
ZHUANG Tengfei. Multi-Scale Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Soil of Shanghai Urban Fringe[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2012.
- [5] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166—2004[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 2-10.
State Environmental Protection Administration. The Technical Specification for Soil Environmental Monitoring: HJ/T 166—2004[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005: 2-10.
- [6] 李晓勇, 陈肖胤. 株洲市农田土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(3): 545-549.
LI Xiaoyong, CHEN Xiaoyin. Characteristics of Heavy Metals Pollution and Health Risk Assessment in Farmland Soil of Zhuzhou[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(3): 545-549.
- [7] 国家环境保护总局. 土壤环境质量标准: GB 15618—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 2.
State Environmental Protection Administration. Soil Environmental Quality Standard: GB 15618—1995[S]. Beijing: China Standard Press, 1997: 2.
- [8] 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.
- XU Zhengqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al. Calculation of Heavy Metals' Toxicity Coefficient in the Evaluation of Potential Ecological Risk Index[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 31(2): 112-115.
- [9] 任顺荣, 邵玉翠, 王正祥. 利用畜禽废弃物生产的商品有机肥重金属含量分析 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊1): 216-218.
- REN Shunrong, SHAO Yucui, WANG Zhengxiang. Analyze on Heavy Metals Content of Merchandise Compost Produced by Animal Wastes[J]. Journal of Agro-Environmental Sciences, 2005, 24(S1): 216-218.
- [10] 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(2): 507-515.
- DAI Bin, LÜ Jianshu, ZHAN Jincheng, et al. Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-Based City of Shandong Province, Eastern China[J]. Environmental Science, 2015(2): 507-515.
- [11] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征 [J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1349-1354.
- ZHENG Na, WANG Qichao, ZHENG Dongmei. Transfer Characteristics of Mercury, Lead, Cadmium, Zinc and Cuprum from Soil to Vegetable Around Zinc Smelting Plant[J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1349-1354.
- [12] 张乃明. 大气沉降对土壤重金属累积的影响 [J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 91-93.
- ZHANG Naiming. Effects of Air Settlement on Heavy Metal Accumulation in Soil[J]. Soil and Environment Sciences, 2001, 10(2): 91-93.
- [13] 李山泉, 杨金玲, 阮心玲, 等. 南京市大气沉降中重金属特征及对土壤环境的影响 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 22-29.
- LI Shanquan, YANG Jinling, RUAN Xinling, et al. Atmospheric Deposition of Heavy Metals and Their Impacts on Soil Environment in Typical Urban Areas of Nanjing[J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 22-29.
- [14] 包丹丹, 李恋卿, 潘根兴, 等. 垃圾堆放场周边土壤重金属含量的分析及污染评价 [J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 185-189.
- BAO Dandan, LI Lianqing, PAN Genxing, et al. Analysis and Pollution Evaluation of Farmland Heavy Metal Content Around the Dump[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 185-189.
- [15] 田帅, 冯万忠, 高彩云. 城市边缘区土壤重金属污染及其生态环境效应研究进展 [J]. 宁夏农林科技, 2013, 54(3): 52-55.
- TIAN Shuai, FENG Wanzhong, GAO Caiyun. Research Progress of Heavy Metal Pollution and Its Eco-Environmental Effect in the Urban Fringe Area[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2013, 54(3): 52-55.
- [16] 银燕春, 王莉淋, 肖鸿, 等. 成都市区、城郊和农村生活垃圾重金属污染特性及来源 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 392-400.
- YIN Yanchun, WANG Lilin, XIAO Hong, et al. Characteristics and Sources of Heavy Metal Pollution in Urban, Suburban and Rural Domestic Waste of Chengdu, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(1): 392-400.
- [17] 李晓勇. 农田土壤重金属污染评价方法研究: 以株洲市白马乡为例 [J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 390-393.
- LI Xiaoyong. Methods for Assessment of Heavy Metal Pollution in Cropland Soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(2): 390-393.

(责任编辑: 廖友媛)