

郑东新区不同利用类型土壤重金属污染评价

高军侠, 姜灵彦, 党宏斌, 李庆召, 刘 蕾

(郑州航空工业管理学院 环境工程实验室, 河南 郑州 450015)

摘要: 为了解郑东新区土壤重金属污染状况, 对不同类型土壤[道路绿化带(RGS)、景观绿地(LGS)、国道旁农地(ALS)、高校休闲地(FLS)]重金属 Pb、Cu、Cr、Zn、Cd 的含量进行检测, 并采用单因子污染指数法、改进的内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法进行重金属污染综合评价。结果表明, 在不同土地利用类型之间, 重金属 Pb、Cr、Zn、Cd、Cu 含量变化较大, 其中 Cu 含量差异达到显著水平。该区域除 RGS 土壤中 Zn 含量处于污染水平外, 其他土壤利用类型各重金属单因子平均污染指数均小于 1, 处于未污染水平; 但 RGS 土壤中 Pb、Cr、Zn 含量和 LGS 土壤中 Pb 含量有部分样点超出标准限值。用改进的内梅罗综合污染指数法评价重金属污染程度, 其大小顺序为 RGS>LGS>FLS>ALS, 其中 RGS 土壤处于轻污染水平, LGS 处于警戒线水平, 而 ALS 和 FLS 处于安全水平, 研究区整体上处于警戒线水平。对于综合生态风险程度而言, 不同土地利用类型大小顺序同改进的内梅罗综合污染指数法评价结果, RGS 土壤处于中等生态风险水平, 而 LGS、ALS 和 FLS 则处于低生态风险水平, 该区域总体也处于低生态风险水平; 但重金属 Pb、Cd 在 RGS 和 LGS 土壤中存在中等生态风险。

关键词: 郑东新区; 城市土壤; 不同利用类型土壤; 重金属污染; 单因子污染指数法; 内梅罗综合污染指数法; 潜在生态危害指数法

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2014)05-0076-06

Heavy Metal Pollution in Different Land Use Types of Soil in Zhengdong New District

GAO Jun-xia, JIANG Ling-yan, DANG Hong-bin, LI Qing-zhao, LIU Lei

(Laboratory of Environmental Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In order to understand the degree of heavy metal pollution in soil in Zhengdong New District, the content of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn and Cd) in soil collected from road green belt (RGS), landscape green land (LGS), agricultural land (ALS) and fallow land (FLS) were detected, and the heavy metal pollution in soil were assessed with single factor pollution index method, the revised Nemerow integrated factor pollution index method and potential ecological risk index method. The results showed that the content of Pb, Cr, Zn, Cd and Cu changed largely in the different land use types of soil, especially Cu, the content of which changed significantly. Except the Zn pollution occurred in RGS soil, the single factor pollution indexes of the other heavy metals in all land use types of soil were less than 1, indicating that the above soil samples were clean; however, the content of Pb, Cr and Zn in RGS soil and Pb in LGS soil partly exceeded the standard limited value.

收稿日期: 2013-12-17

基金项目: 河南省科技攻关计划项目 (112102310581, 132300410328)

作者简介: 高军侠 (1975-), 女, 陕西渭南人, 副教授, 博士, 主要从事水土污染监测与修复研究。E-mail: gaojunxia75@sohu.com

The polluted extent order by heavy metal was $RGS > LGS > FLS > ALS$ according to the revised Nemerow integrated factor pollution index; the pollution grade of heavy metal reached light pollution level in RGS soil, alert level in LGS soil, and safety level in FLS and ALS soil; as a whole, the pollution grade of heavy metal reached alert level in Zhengdong New District. The polluted extent order by heavy metal according to the potential ecological risk index was consistent with that of the revised Nemerow integrated factor pollution index; the pollution grade of heavy metal reached middle ecological risk level in RGS soil, low ecological risk level in LGS, ALS and FLS; as a whole, the pollution grade of heavy metal reached low ecological risk level in Zhengdong New District, though pollution grade of Pb and Cd reached middle ecological risk level in RGS and LGS.

Key words: Zhengdong New District; urban soil; different land use types of soil; heavy metals pollution; single factor pollution index method; Nemerow integrated factor pollution index method; potential ecological risk index method

城市土壤由于受到人为活动的影响,与自然土壤有着较大的不同,但作为土壤本身所具备的自有功能,城市土壤在植被生长、城市绿化、净化环境、保持城市生态良性循环等方面发挥着巨大的作用^[1-3]。因此,城市土壤的质量已逐渐得到重视。然而,随着城市化进程的加快,城市土壤化学性质发生了重大变化^[4-5]。如烟尘、汽车尾气、污水、污泥和固体废弃物等的恣意排放,导致大量不同种类的重金属沉积于土壤表层,使得城市土壤重金属污染日益严重^[6-9]。也正因此城市土壤重金属污染成为最能反映城市环境污染状况的有效指标之一^[10-11]。

随着城市规模的扩大,原有的土地使用性质发生了改变,城市土壤重金属空间分布格局也将发生变化。有研究表明,人类活动较密集的城市中心区土壤重金属含量相对较高,一般高于郊区和农田^[12-13]。目前,关于近郊及铁路旁土壤重金属污染方面的研究较多^[14-22],而对不同利用类型城市土壤进行全面污染评价的研究较少。为此,本研究选择郑州市城市化发展最快的区域——郑东新区为研究对象,对其不同利用类型土壤的重金属污染程度及潜在生态危害程度进行评价,为进一步制定城市土壤污染健康风险评价提供决策依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

郑东新区位于黄河冲积平原区,地势自西北向东南缓缓倾斜,自然土壤属黄潮土。研究区农业生产历史悠久,早期为旱作农田、稻田或藕池,目前地表自然植被已荡然无存,土地利用类型也早已由以农业用地为主变为商业用地、住宅用地、农用地、交通用地等多种形式,大量的城建工程对表层土壤的影响最为突出,一些地块建筑垃圾与自然土壤混合堆积成土。

1.2 样品采集和处理

分别选取郑东新区金水路绿化带(RGS)、熊儿河庙张以西两岸景观绿地(GLS)、国道附近的农地(ALS)和高校园区的休闲地(FLS)5种土地利用类型,各类型土地选择8个样点,每样点采用蛇行取样法采集混合样本,选取0~20 cm深的表层土壤,除去动植物残体、石砾等杂物,并将大块样品碾碎混和均匀后,用四分法选取1 kg土样,进行风干、研磨、过0.15 mm筛,然后分装备用。

1.3 调查项目及分析方法

1.3.1 重金属含量 按照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)的要求,选取对土壤质量和人类健康危害较大的重金属Pb、Cu、Cr、Zn、Cd,采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解,利用TAS-990型火焰原子吸收分光光度计测定含量。

1.3.2 pH值 用PHS-3C数显酸度计测定土壤pH值。

1.4 重金属污染评价

采用单因子污染指数法、改进的内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法来全面判断和分析土壤重金属污染状况。

1.4.1 单因子污染指数法 单因子污染指数法是目前国内外普遍采用的污染评价方法之一^[23-24],其计算见公式(1)。

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤中污染物的污染指数, C_i 为污染物 i 的实测值(mg/kg), S_i 为污染物的评价标准(mg/kg)。 $P_i \leq 1$ 表示土壤未污染, $1 < P_i \leq 2$ 表示土壤轻污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示土壤中污染, $P_i > 3$ 表示土壤重污染。 P_i 值越大,则说明土壤污染越严重。

1.4.2 改进的内梅罗综合污染指数法 为全面反映各污染物对土壤的不同作用,突出高浓度污染物对

环境质量的影响,利用传统的内梅罗综合污染指数法^[23-24]对重金属污染做出评价,其计算见公式(2)。

$$P_{\text{int}} = \sqrt{\frac{1}{2}(P_{\text{imax}}^2 + \bar{P}^2)} \quad (2)$$

式中: P_{int} 为内梅罗综合污染指数, P_{imax} 为某样点单因子污染指数的最大值, \bar{P} 为某样点单因子污染指数的平均值。

由于不同重金属对土壤环境、生态环境的影响不同,因此采用加权计算法来求平均值更为合理^[25],改进公式见(3)。

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

对于权重 w 的确立,Swaine 按照重金属对环境的影响程度,将环境研究中人们都比较关注的微量元素分成了 3 类,因一类、二类、三类微量元素对环境的重要性逐渐下降,分别赋值为 3、2、1 作为权重^[26]。本研究涉及的 Pb、Cd 为一类,权重取 3,而 Cu、Cr、Zn 为二类,权重取 2。求得的 P_{int} 根据内梅罗综合污染分级标准(表 1)进行评判。

表 1 内梅罗综合污染指数法评价标准

污染指数	污染等级	等级描述
$P_{\text{int}} \leq 0.7$	I	安全
$0.7 < P_{\text{int}} \leq 1$	II	警戒线
$1 < P_{\text{int}} \leq 2$	III	轻污染
$2 < P_{\text{int}} \leq 3$	IV	中污染
$P_{\text{int}} > 3$	V	重污染

1.4.3 潜在生态危害指数法 瑞典著名地球化学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数(Potential Ecological Risk Index, RI)法,是目前最为常用的评价重金属污染程度的方法之一,定量描述重金属在沉积物中的潜在危害程度^[27-28],其计算过程如下:

(1)单个元素的污染系数(C_r^i)由 $C_r^i = C_{\text{实测}}^i / C_n^i$ 确定,其中 C_r^i 为污染系数, $C_{\text{实测}}^i$ 为表层沉积物重金属元素的实测含量, C_n^i 为该元素的评价标准,Hakanson 提出以现代工业化前沉积物中金属的最高背景值作为参比值。本研究采用土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中的 1 级标准,即 Pb、Cu、Cr、Zn、Cd 的评价标准值为 35、35、90、100、0.20 mg/kg。

(2)各重金属的毒性响应系数 T_r^i 采用 Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数为评价依据,Zn、Cr、Cu、Ni、Pb、As、Cd、Hg 的毒性响应系数分别为 1、2、5、5、5、10、30、40。

(3)某一重金属的潜在生态危害系数 $E_r^i = T_r^i \times C_r^i$ 。

(4)某一点沉积物多种重金属综合潜在生态危害指数计算公式为 $RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$ 。

重金属污染潜在生态危害分级标准,见表 2。

表 2 重金属污染潜在生态危害分级标准

单因子潜在生态危害系数	单因子污染物生态风险程度	综合潜在生态危害指数	污染物生态风险程度
$E_r^i < 40$	低	$RI < 150$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	重
$160 \leq E_r^i < 320$	重	$RI \geq 600$	严重
$E_r^i \geq 320$	严重		

2 结果与分析

2.1 郑东新区不同利用类型土壤重金属含量

由表 3 可知,RGS 土壤重金属含量表现为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Cd}$,其中前三者含量明显高于后两者。与其他类型土壤相比,总体上 RGS 土壤重金属含量最大,但空间变异最小。LGS 土壤重金属含量表现为 $\text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Cd}$,与 RGS 相比,Pb 含量较为接近,而 Zn、Cr 含量明显减小;除 Pb 的空间变异较小外,其余重金属的空间分布变动都较 RGS 大。与 RGS、LGS 相比,ALS、FLS 土壤重金属含量总体上明显减小,而且前两者的空间变异程度明显高于后两者;ALS、FLS 土壤中仅 Zn 含量超过了 100 mg/kg,其中 ALS 土壤重金属含量大小为 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$,而 FLS 土壤重金属含量大小为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Cd}$ 。进一步的显著性检验表明:不同土地利用类型之间,重金属 Cu 含量具有显著差异($P < 0.05$),而 Pb、Zn、Cr、Cd 含量差异不显著。总体上,郑东新区土壤重金属 Pb、Cu、Cr、Zn、Cd 的平均含量为 192.76、47.216、117.38、211.95、0.35 mg/kg。

表 3 郑东新区不同利用类型土壤重金属含量

土地利用类型	重金属	mg/kg			
		范围值	平均值	标准差	变异系数
RGS	Pb	230.5~436.6	345.8	66.23	0.19
	Cu	34.8~70.5	57.1	11.90	0.21
	Cr	167.3~256.8	205.7	33.52	0.16
	Zn	298.7~602.8	463.7	97.16	0.21
	Cd	0.35~0.75	0.56	0.13	0.23
LSG	Pb	262.3~407.2	330.0	44.81	0.14
	Cu	19.8~67.2	38.9	14.62	0.38
	Cr	46.5~156.7	98.2	33.25	0.34
	Zn	77.6~238.4	149.0	55.01	0.37
	Cd	0.25~0.64	0.47	0.13	0.27

续表 3 郑东新区不同利用类型土壤
重金属含量

土地利 用类型	重金属	mg/kg			
		范围值	平均值	标准差	变异 系数
ALS	Pb	18.9~93.4	52.6	22.57	0.43
	Cu	23.9~63.5	39.2	12.45	0.32
	Cr	36.4~123.6	82.0	26.70	0.33
	Zn	62.3~189.8	119.5	42.55	0.36
	Cd	0.07~0.24	0.17	0.08	0.49
FLS	Pb	18.9~73.4	42.7	17.48	0.41
	Cu	29.9~103.5	53.4	23.73	0.44
	Cr	58.4~123.6	83.5	21.34	0.26
	Zn	67.3~179.7	115.6	37.69	0.33
	Cd	0.12~0.43	0.22	0.10	0.46

2.2 郑东新区不同利用类型土壤重金属污染评价
结果

2.2.1 单因子污染指数法 经测定 RGS、LGS、
ALS、FLS 土壤 pH 值分别为 8.10、7.85、8.24、
8.06,因此计算过程中 S_i 采用土壤环境质量标准

(GB 15618—1995)中的 2 级标准($pH>7.5$,耕作方
式为旱田),即 Pb、Cu、Cr、Zn、Cd 的评价标准值分
别为 350、100、250、300、1.0 mg/kg。

由表 4 可知,郑东新区 Pb、Cu、Cr、Zn、Cd 的 P 值
分别为 0.551、0.472、0.470、0.707、0.353,其中 Cd 的 P
值最小,Zn 的 P 值最大,土壤质量整体处于未污染水
平。Zn、Cr 的 P 值大小顺序均为 $RGS>FLS>LGS>$
 ALS ,Pb、Cd 的 P 值大小顺序均为 $RGS>LGS>FLS>$
 ALS ,Cu 的 P 值大小顺序为 $RGS>FLS>ALS>LGS$ 。
对于不同土地利用类型而言,RGS 土壤重金属 P 值表
现为 $Zn>Pb>Cr>Cu>Cd$,而且 Zn 的 P 值介于 1~
2,表明土壤受到轻污染,其余重金属 P 值则处于标准
限值范围内;LGS 土壤重金属 P 值表现为 $Pb>Zn>$
 $Cd>Cr>Cu$,与 RGS 一样,Pb 的 P 值接近标准限值,
作为难以降解的污染物,要适当加强 Pb 的动态监测;
ALS 土壤中各种重金属的 P 值均最小,均小于 0.5,处
于比较安全的水平;FLS 土壤重金属 P 值虽未超过
1.0,但 Zn、Pb 的 P 值都超过 0.5,而 Cu、Cr 也已接近
0.5,各种重金属 P 值介于 ALS 和 LGS 之间。

表 4 郑东新区不同利用类型土壤重金属单因子污染指数

重金属	RGS		LGS		ALS		FLS		总体平均值
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	
Pb	0.659~1.247	0.988	0.749~1.163	0.942	0.054~0.267	0.150	0.054~0.210	0.122	0.551
Cu	0.348~0.705	0.571	0.198~0.672	0.389	0.239~0.635	0.392	0.299~1.035	0.534	0.472
Cr	0.669~1.027	0.823	0.186~0.627	0.393	0.146~0.494	0.328	0.234~0.494	0.334	0.470
Zn	0.996~2.009	1.546	0.296~0.795	0.497	0.208~0.632	0.398	0.224~0.599	0.385	0.707
Cd	0.354~0.747	0.560	0.247~0.642	0.468	0.070~0.330	0.165	0.120~0.430	0.216	0.353

2.2.2 改进的内梅罗综合污染指数法 由表 5 可
知,根据改进的内梅罗综合污染指数评价标准,
RGS 土壤 P_{int} 介于 1~2,处于Ⅲ级轻污染水平,表
示土壤污染物含量已超过其背景值,生长的植物
开始受污染;监测样点 P_{int} 超过 1.0 的比例达
87.5%。LGS 土壤 P_{int} 介于 0.7~1,处于Ⅱ级警
戒线水平;监测样点 P_{int} 介于 0.647~0.930,超过
0.7 的比例为 87.5%。ALS 和 FLS 土壤 P_{int} 最低,

处于安全水平,但 FLS 有 1 样点 P_{int} 已超过 0.7,
说明存在零星样点土壤重金属含量增高、土壤质
量降低的现象。由于研究区土壤平均 P_{int} 已达到
0.724,故土壤处于Ⅱ级警戒线水平,表示土壤尚
清洁,但应注意防范重金属污染。不同利用类型
土壤重金属污染程度表现为 $RGS>LGS>FLS>$
 ALS ,而且前 2 种与后 2 种土壤在污染等级上有着
明显的不同。

表 5 郑东新区不同利用类型土壤重金属改进的内梅罗综合污染指数

土地利 用类型	样点								平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	
RGS	1.276	1.432	1.172	1.554	1.197	1.134	0.903	1.430	1.262
LGS	0.738	0.788	0.869	0.759	0.930	0.782	0.723	0.647	0.779
ALS	0.400	0.357	0.486	0.286	0.380	0.384	0.377	0.495	0.396
FLS	0.466	0.312	0.770	0.357	0.386	0.388	0.482	0.496	0.457
平均值									0.724

2.2.3 潜在生态危害指数法 由表 6 可知,根据单一元素的潜在生态危害系数,对于 Pb、Cd 来说,RGS 和 LGS 土壤存在中等风险, E_r 值超过 40 的样点比例介于 87.5%~100%;而 ALS 和 FLS 土壤存在的生态风险较低,Pb 在这 2 种类型土壤中的 E_r 值均未超过 40,Cd 的 E_r 值超过 40 的样点比例仅为 0~12.5%。对于 Cu、Cr、Zn 而言,所有样点和平均 E_r 值都远低于 40,其中最大值只有 14.8,最小值仅为 1.3,

证明该类元素都具有较低的危害性和生态风险。研究区各元素的生态风险程度表现为 $Cd > Pb > Cu > Zn > Cr$ 。对于所有重金属带来的综合生态风险程度而言,整体处于低风险水平,具体表现为:LGS、ALS、FLS 土壤均处于低生态风险水平,RGS 土壤处于中等生态风险水平,其风险大小为 $RGS > LGS > FLS > ALS$,而且前 2 种土地利用类型与后 2 种土地利用类型 RI 值之间存在较大的差距。

表 6 郑东新区不同利用类型土壤重金属潜在生态危害指数

土地利用类型	E_r^{Pb}		E_r^{Cu}		E_r^{Cr}		E_r^{Zn}		E_r^{Cd}		RI	
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
RGS	32.9~62.4	49.4	5.0~10.1	8.2	3.7~5.7	4.6	6.0~12.1	9.3	53.1~112.1	84.0	127.7~172.8	155.4
LGS	37.5~58.2	47.1	2.8~9.6	5.6	1.0~3.5	2.2	1.6~4.8	3.0	37.1~96.3	70.3	96.6~137.7	128.2
ALS	2.7~9.2	7.5	3.4~9.1	5.6	0.8~2.7	1.8	1.3~3.8	2.4	10.5~49.5	24.8	24.5~61.2	42.1
FLS	2.7~10.5	6.1	4.3~14.8	7.6	1.3~2.7	1.9	1.3~3.6	2.3	18.0~64.5	32.4	32.4~76.4	50.3
平均值		27.5		6.7		2.6		4.2		52.9		94.0

3 结论与讨论

本研究结果表明,在同一区域,道路绿化带土壤由于交通污染、汽车轮胎及尾气排放过程中含有的 Pb、Zn、Cu 等多种重金属元素已经进入周围的土壤环境,造成土壤重金属污染比其他类型土壤严重。近 5 a 来,郑东新区由于入住人口增多、政府企业入驻数量猛增,主干道路上的车流量已经发生了巨大变化,这也是造成本次研究过程中绿化带土壤重金属含量增加的最主要原因之一。根据单因子污染指数法评价结果,Zn 含量增加最为明显,其次为 Pb,这进一步论证了汽车轮胎添加剂中的 Zn 是城市绿化带土壤中 Zn 的重要来源^[29]。在构建和维护绿化带、景观绿地的过程中,建筑垃圾、生活废弃物以及污泥堆肥等的人为添加,成为诸多重金属污染的来源,也是此类土壤重金属含量迅速增加的主要原因^[30]。在采样调查过程中,发现未经处理的城市垃圾随意堆放以及污水灌溉等是农地和休闲地重金属污染的主要途径。从重金属污染程度来看,绿化带、景观绿地土壤远高于农地,此结果与其他城市的一些研究结果相同^[7,31]。

改进的内梅罗综合污染指数法不仅兼顾了单因子污染指数平均值和最高值,突出污染较重的重金属污染物的作用,而且考虑了污染物对环境质量的影响,使得结果更具有说服力。结合改进的内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法的评价结果发现,城市不同利用类型土壤的重金属污染和生态

风险潜力大小均为 $RGS > LGS > FLS > ALS$,说明这 2 种方法在判断污染程度、潜在风险水平上具有一定的联动性,但二者给出的结果又具有互补性,即处于轻污染的土壤,也具有中等程度的潜在生态风险;而处于安全和警戒线水平的土壤,相应具有较低的潜在生态风险。与单因子污染指数法比较,利用潜在生态危害指数法获得的单一金属的潜在生态危害系数还存在一定的差异,如 Cd,以土壤环境质量标准为依据,反映污染程度和超标倍数的单因子污染指数值是检测元素中最小的,但考虑了金属毒性这一要素后的潜在生态危害系数值却是这几个元素中最大的,这一现象表明虽然 Cd 经检测处于未污染水平,但却不容忽视它对生物的影响。由于在制定环境质量标准时不仅仅只参照金属毒性这一因素,因此金属的毒性越大,用单因子污染指数法和潜在生态危害指数法评价的结果可能差距越大,建议今后用单因子污染指数法评价后,可用潜在生态危害指数法进一步评价其对生态的潜在影响和危害。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张甘霖,赵玉国,杨金玲,等.城市土壤环境问题及其研究进展[J].土壤学报,2007,44(5):925-933.
- [3] Bitukova L, Shogenova A, Birke M. Urban geochemistry: A study of element distributions in the soils of Tallinn(Estonia)[J]. Environmental Geochemistry and

- Healy,2000,22:173-193.
- [4] Cal-Prieto M J, Carlosena A, Andrade J M, *et al.* Antimony as tracer of the anthropogenic influence on soils and estuarine sediments[J]. *Water and Soil Pollution*, 2001,129:248-333.
- [5] 汪嘉利,李章平,杨志敏,等.重庆市主城区土壤重金属的污染特征[J]. *重庆师范大学学报:自然科学版*, 2012,29(5):331-335.
- [6] 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.
- [7] 吴新民,潘根兴.城市不同功能区土壤重金属分布初探[J]. *土壤学报*, 2005,42(3):513-517.
- [8] 王美青,章明奎.杭州市城郊土壤重金属含量与形态的研究[J]. *环境科学学报*, 2002,22(5):603-608.
- [9] 黄世宏,刘盛萍,郑尼娜.汽车尾气对206国道周边土壤铅含量的影响[J]. *现代农业科技*, 2011(15):271,277.
- [10] Miguel D, Jmene Z D, Llamas J F, *et al.* The overlooked contribution of compost application to the trace element load in the urban soil of Madrid (Spain) [J]. *Science of The Total Enevisionment*, 1998,215:113-122.
- [11] Li X, Poon C, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong [J]. *Applied Geochemistry*, 2001,16:1361-1368.
- [12] 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]. *环境监测管理与技术*, 2006,18(6):9-12,24.
- [13] 张金屯, Pouyat R. “城-郊-乡”生态样带森林土壤重金属变化格局[J]. *中国环境科学*, 1997,17(5):410-415.
- [14] Wilcke W, Muller S, Kanchanakool N, *et al.* Urban soil contamination in Bangkok: Heavy metal and aluminium partitioning in topsoils [J]. *Geoderma*, 1998,86:211-228.
- [15] 高军侠,党宏斌,郑敏,等.郑州市郊农田土壤重金属污染评价[J]. *中国农学通报*, 2013,29(21):116-120.
- [16] Wang H H, Li L Q, Wu X M, *et al.* Distribution of Cu and Pb in particle size fractions of urban soils from different city zones of Nanjing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006,18(3):482-487.
- [17] 吴家跃,拜锦美,徐金晶,等.高邮市蔬菜产地土壤重金属现状调查与评价[J]. *现代农业科技*, 2011(4):266-267.
- [18] 黄绍文,韩宝文,和爱玲,等.城郊公路边菜田土壤和韭菜中重金属的空间变异特征[J]. *华北农学报*, 2007,22(增刊):152-157.
- [19] 薄润香,樊文华,王宏燕.太原市5个无公害蔬菜基地温室土壤重金属含量的研究[J]. *山西农业科学*, 2008,36(9):43-46.
- [20] 卢树昌,高悦.天津市郊区果园土壤重金属铜积累状况调查分析[J]. *天津农业科学*, 2009,15(1):41-44.
- [21] 李文军,谷蕾,马建华.连霍高速郑商段路旁土壤重金属积累初探[J]. *气象与环境科学*, 2008,31(3):38-42.
- [22] 徐欣,马建华.陇海铁路圃田段路旁土壤重金属潜在生态风险评价[J]. *气象与环境科学*, 2009,32(1):29-32.
- [23] 王春光,张思冲,辛蕊,等.哈尔滨市东郊菜地土壤重金属环境质量评价[J]. *中国农学通报*, 2010,26(2):262-266.
- [24] 李海华,张杰,申灿杰.郑州市近郊土壤和蔬菜中重金属污染状况调查与评价[J]. *河南农业科学*, 2007(1):90-92.
- [25] 周广柱,杨锋杰,程建光,等.土壤环境质量综合评价方法探讨[J]. *山东科技大学学报:自然科学版*, 2005,24(4):113-115,118.
- [26] Swaine D J. Why trace elements are important [J]. *Fuel Processing Technology*, 2000,65/66:21-33.
- [27] 赵沁娜,徐启新,杨凯.潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 2005(1):111-116.
- [28] 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.
- [29] 刘廷良,高松武次郎,左濂裕之.日本城市土壤的重金属污染研究[J]. *环境科学研究*, 1996,9(2):47-51.
- [30] 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.
- [31] 管东生,陈玉娟,阮国标.广州市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2001,40(4):93-97.