

不同城市功能区绿地土壤重金属分布及其生态风险评价

陈为峰, 孙其远, 宋希亮, 董元杰

(山东农业大学 资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要:对山东中部某典型城市9个城市功能区64个绿地土壤样品中的Cu、Zn、Pb、Cd 4种重金属元素含量进行了测定,评价了土壤重金属污染特征及其生态风险。结果表明:各功能区绿地表层土壤Cu、Zn、Pb和Cd的平均含量均高于当地自然植被土壤背景值,已表现出富集状态,其中Cd平均含量超标严重;工业区、风景名胜区、商业区和居民区等绿地土壤污染程度居前;单因子污染评价表明,该市绿地土壤中Cu、Zn和Pb已处于潜在污染状态,而Cd已经处于重污染状态;综合污染评价研究表明,处于“中度污染”污染级别的绿地类型有工业绿地、商业区绿地、风景名胜区和居住区绿地,而且苗木生产区和道路绿地也接近“中度污染”级别;潜在生态危害评价表明,该市绿地土壤处于轻微生态风险,但Cd潜在生态危害指数已经处于中等生态风险;土壤中Cu-Zn、Cu-Cd、Pb-Cd显著相关,Cu-Pb、Zn-Cd极显著相关,重金属之间存在一定复合污染现象,表明这些重金属元素的来源可能相同。该市绿地土壤Cd污染的防治应该引起重视。

关键词:城市功能区; 绿地土壤; 重金属; 生态风险评价

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0148-06

Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Elements in Soils of Green Spaces at Different Urban Functional Areas

CHEN Weifeng, SUN Qi Yuan, SONG Xi Liang, DONG Yuan Jie

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: The contents of four heavy metal elements (Cu, Zn, Pb and Cd) in 64 soil samples of green spaces from 9 urban functional areas in a typical city of central Shandong Province were measured to analyze and evaluate both the pollution characteristics and ecological risk of soil heavy metals. The results showed that: (1) the average contents of Cu, Zn, Pb and Cd in soils of green spaces at each urban functional area were higher than the background values in local soils under natural vegetation; at the same time, those heavy metal elements exhibited an enrichment state and the average content of Cd exceeded the standard seriously; (2) the most polluted soils of green spaces were found in the industrial area, scenic area, business district and residence community, respectively; (3) based on the single factor pollution assessment, Cu, Zn and Pb in soils of the city green spaces were in a potential pollution state while Cd was in a heavy pollution state; (4) according to the research of comprehensive pollution evaluation, the green spaces at medium pollution level were industrial green space, business district green space, scenic area and residence community green space, respectively; in addition, the seedling production area and road green space were close to the medium pollution level; (5) the potential ecological hazard assessment showed that the soils in study city were in slight ecological risk, but the Cd potential ecological risk index had been in medium ecological risk; (6) the relationship between Cu and Zn, Cu and Cd, Pb and Cd were significant, and the correlations between Cu and Pb, Zn and Cd were extremely significant. The combined pollution phenomenon found in different heavy metal elements indicated that those heavy metal elements may have the same pollutant source. In the end, more attentions should be paid to the prevention of Cd pollution in soils of green spaces in the study city.

Keywords: urban functional areas; green space soil; heavy metal; ecological risk assessment

城市土壤是城市生态系统中的重要组分,是各城市种污染物的“源”与“库”,其质量退化是城市生态环境中的一个关键问题。相对于城市封闭型土壤,城市绿地是城市暴露土壤的主要存在形式,也是城市居民活动的重要场地。城市绿地土壤的重金属污染不仅导致土壤生态功能发生退化和丧失,影响城市绿化植物的生长和功能,而且城市人群长久暴露在重金属污染过的城市土壤下,会使身体出现各种病变^[1-2],影响居民健康。

几十年来,国内外学者对各地典型的城市土壤重金属污染问题进行了大量研究,已经成为国内外环境科学领域研究的热点^[3-5],但目前的研究成果主要关注于工业城市和大中型城市,对中小型城市关注较少。不同城市间土壤的重金属污染具有较大的空间异质性,内部不同功能区土壤重金属污染来源、污染程度也各有不同,使污染呈现出了不同的空间分布特征^[6]。从不同城市功能区的角度研究绿地土壤中各种重金属的含量和分布特征,开展污染评价,是各城市土壤污染管控必须的基础性研究工作之一。

重金属 Cu,Zn,Pb,Cd 是城市土壤中来源广泛、普遍存在的主要污染物,本研究即以山东中部某著名旅游型中小城市为例,以城市不同功能区的绿地土壤为研究对象,利用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法以及潜在生态风险指数法对土壤中 4 种重金属铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)的污染状况及其生态风险进行分析和评价,以期为不同城市功能区绿地土壤环境质量控制和精准化治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究城市位于山东省中部,是鲁中山区的代表区域和中心城市之一,属温带大陆性半湿润季风气候区,年平均气低温为 12.9℃,多年平均降水量为 697 mm,土壤有棕壤土、褐土、砂姜黑土和山地草甸土 4 种类型。该市为中国优秀旅游城市,国家历史文化名城。2016 年,全市共接待境内外游客 6278.2 万人次。

1.2 样品采集与处理

根据所研究城市土地利用特征进行城市功能区划分,最终确定了公园绿地(G1)、苗木生产区(G2)、市政单位绿地(G3)、校园绿地(G4)、居住区绿地(G5)、工业绿地(G6)、风景名胜区(G7)、商业区绿地(G8)、道路绿地(G9)等 9 种绿地类型;植被类型涉及草坪类、灌木类、乔木类 3 种类型;同时也考虑了部分不同利用年限的土壤,总计设计 62 个采样点,另外设置 1 个城郊农田采样点、1 个自然植被土壤采样点作为对照。在各样点中,按随机布点法,采集表土(0—

20 cm)分析样品。每个土样的采集是分别在样点地上取 6 个点,并将它们进行混合,以混合样制成一个分析样。土壤样品经风干、研磨、过筛后用 HNO₃-HClO₄-HF 体系对样品进行全分解^[7],利用火焰原子吸收法测定 Cu,Zn,Cd 的含量^[8-9],利用石墨炉原子吸收法测定 Pb 的含量^[10]。

1.3 土壤重金属污染及生态风险评价方法

研究采用单因子指数法和尼梅罗综合指数法对研究区土壤环境质量状况进行评价,并用潜在生态危害指数法对研究区重金属的生态风险程度进行评价。

(1) 单因子指数法。单项污染评价可采用单项污染分级指数法^[11],即以地区土壤地球化学背景(自然土壤)为基础,借鉴国家土壤环境质量标准,确定污染分级标准。以测区背景上限为重金属元素累积起始值(X_a),国家土壤环境质量标准的 2 类标准作为污染起始值(X_c),土壤环境质量标准的 3 类标准作为重污染起始值(X_p)(表 1)。污染分级指数是指某一污染物影响下的环境污染指数,可以反映出各污染物的污染程度及潜在可能性。

表 1 污染分级标准			mg/kg
重金属	累积起始值		
元素	起始值(X_a)	污染起始值(X_c)	重污染起始值(X_p)
Cu	26.04	100	400
Zn	80.37	250	500
Cd	0.17	0.6	1
Pb	32.23	350	500

可根据下式计算出的单项污染分级指数,对单项污染程度进行分级。

$$P_i = \frac{C_i}{X_a} \quad C_i \leq X_a$$
$$P_i = 1 + \left(\frac{C_i - X_a}{X_c - X_a} \right) \quad X_a < C_i \leq X_c$$
$$P_i = 2 + \left(\frac{C_i - X_a}{X_c - X_a} \right) \quad X_c < C_i \leq X_p$$
$$P_i = 3 + \left(\frac{C_i - X_a}{X_c - X_a} \right) \quad C_i > X_p$$

式中: P_i 为污染分级指数; C_i 为土壤中污染物的实测浓度值; X_a 为累积起始值; X_c 为污染起始值; X_p 为重污染起始值。土壤单项污染指数评价标准见表 2。

表 2 土壤单项污染指数评价标准			
分级指数	质量等级	分级指数	质量等级
$P_i < 1$	清洁	$2 \leq P_i < 3$	轻污染
$1 \leq P_i < 2$	潜在污染	$P_i \geq 3$	重污染

(2) 尼梅罗综合指数法。尼梅罗综合指数采用下式计算:

$$P_N = \sqrt{\frac{[(P_{i均}) + (P_{i最大})^2]}{2}}$$

式中： $P_{均}$ 和 $P_{最大}$ 分别是参加评价的单项污染指数的算术平均值和单项污染指数中的最大值。土壤综合污染指数评价标准见表 3。

表 3 土壤内梅罗污染指数评价标准

等级	内梅罗污染指数 P_N	污染等级
I	$P_N \leq 0.7$	清洁(安全)
II	$0.7 < P_N \leq 1.0$	尚清洁(警戒限)
III	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
V	$P_N > 3.0$	重污染

尼梅罗综合污染指数的计算式中含有评价参数中最大的单项污染分布指数,突出了污染指数最大的重金属元素对土壤环境质量的影响和作用。

(3) 潜在生态危害指数法。用瑞典学者 Hakanson 建立的潜在生态危害指数法^[12] (Risk index, RI) 结合生物毒理、环境化学及生态学等方面的内容,以定量的方法区分重金属元素的潜在生态危害程

表 5 E_r^i 和 RI 分级标准

污染指数	污染程度				
	轻微生态风险	中等生态风险	强生态风险	很强生态风险	极强生态风险
E_r^i	$E_r^i < 40$	$40 \leq E_r^i < 80$	$80 \leq E_r^i < 160$	$160 \leq E_r^i < 320$	$E_r^i \geq 320$
RI	$RI < 150$	$150 \leq RI < 300$	$300 \leq RI < 600$	$RI \geq 600$	—

Hakanson 提出从“元素丰度原则”和“元素稀释度”的角度讨论此问题,即某一重金属的潜在毒性与其丰度成反比,或者说与其稀少度成正比。某一重金属的潜在生物毒性也与“元素的释放度”(在水中含量与在沉积物中含量的比值)有关,易于释放者对生物的潜在毒性较大,Hakanson 提出的重金属毒性水平顺序为: $Hg > Cd > As > Pb = Cu > Cr > Zn$, 对毒性响应系数作范围处理后定值为: $Hg = 40, Cd = 30, As = 10, Pb = Cu = 5, Ni = Cr = 2, Zn = 1$ ^[13-14]。

2 结果与分析

2.1 城市绿地土壤重金属分布特征

城市绿地表层土壤中重金属 Cu, Zn, Cd 和 Pb 的平均含量分别是 54.65 mg/kg, 138.69 mg/kg, 1.35 mg/kg, 87.39 mg/kg, 均高于城郊农田土壤和自然植被土壤的含量,表现出富集的特征(图 1—4)。其中,土壤 Zn, Pb, Cu 平均含量均低于国家土壤环境质量 II 级标准, Cd 平均含量超标严重。

Cu 以公园绿地含量最高,其次是居民区绿地>风景名胜区>苗木生产区>商业区绿地>道路绿地>城郊农田土壤>校园绿地>市政单位绿地>工业绿地>自然植被土壤; Zn 的含量依次是商业区绿地>苗木生

度。在本研究中以《中国土壤环境质量标准》(GB15618—1995) II 类标准作为评价标准。潜在生态危害指数 RI 计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i}$$

式中: E_r^i 为单一重金属的潜在生态危害系数; T_r^i 为单一重金属毒性相应系数; C_f^i 为单一重金属的污染系数; C_s^i 为表层沉积物(土壤)重金属的实测值; C_n^i 为土壤重金属浓度的参比值, 本文采用中国土壤环境质量 II 级标准(表 4)。

表 4 城市绿地土壤重金属污染评价参考标准(pH>7.5)

参考标准	Cu	Zn	Cd	Pd
自然背景值	22.6	74.2	0.097	26
一级标准值	35	100	0.20	35
二级标准值	100	250	0.60	350

Hakanson 对 E_r^i 和 RI 的范围进行了划定并确定了详细的污染等级, 具体分级见表 5。

产区>风景名胜区>居住区绿地>工业绿地>道路绿地>校园绿地>公园绿地>市政单位绿地>城郊农田土壤>自然植被土壤; Pb 的含量依次是风景名胜区>公园绿地>工业绿地>商业区绿地>居住区绿地>道路绿地>市政单位绿地>苗木生产区>校园绿地>城郊农田土壤>自然植被土壤; Cd 的含量依次是工业绿地>商业区绿地>居住区绿地>风景名胜区>苗木生产区>道路绿地>公园绿地>校园绿地>市政单位绿地>城郊农田土壤>自然植被土壤。

在 9 种不同的城市功能区绿地类型中, Cu, Zn, Cd 和 Pb 的污染程度总体居前的是工业区、风景名胜区、商业区绿地和居民区绿地。

2.2 城市绿地土壤重金属环境质量评价

2.2.1 绿地土壤重金属单因子指数评价 不同功能区城市绿地土壤重金属污染单项污染指数及质量评价见表 6。由表 6 可以看出, 绿地土壤中 Cu, Zn 和 Pb 含量虽然不高, 但已经处于潜在污染状态, 而 Cd 已经处于重污染状态。

2.2.2 绿地土壤重金属综合评价 应用尼梅罗综合污染评价结果见表 7。该市绿地土壤总体基本处于“轻度污染”和“中度污染”的污染级别, 其中处于“中度污染”的污染级别的绿地土壤类型有工业绿地、商业区绿地、风景名胜区和居住区绿地, 而且苗木生产

区和道路绿地土壤也接近“中度污染”级别;各绿地类型的污染程度由重到轻依次为工业绿地>商业区绿地>风景名胜区>居住区绿地>苗木生产区>道路绿地>公园绿地>校园绿地>市政单位绿地>城郊农田土壤>自然植被土壤。

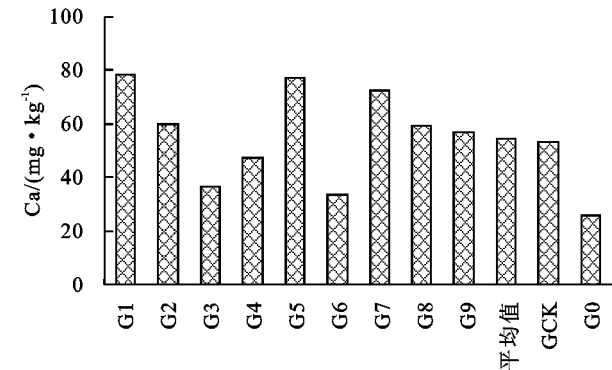


图 1 城市不同功能区绿地表层土壤 Cu 特征

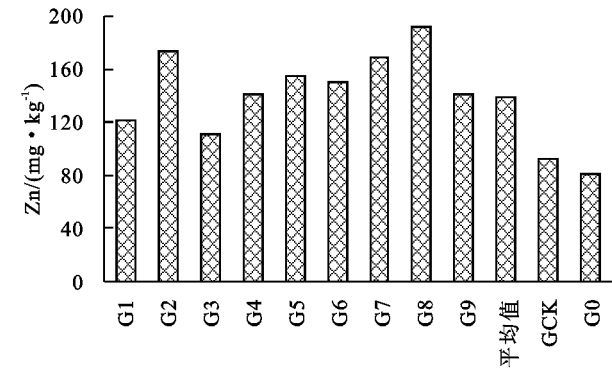


图 2 城市不同功能区绿地表层土壤 Zn 特征

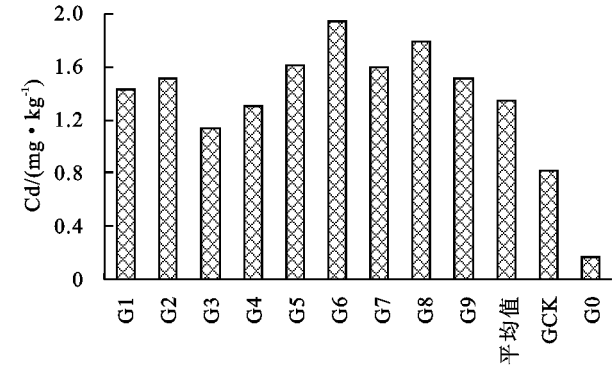


图 3 城市不同功能区绿地表层土壤 Cd 特征

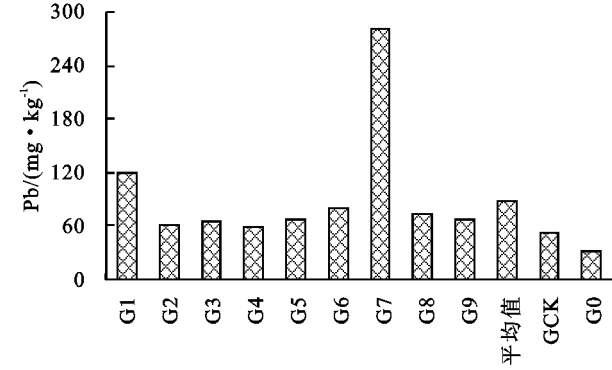


图 4 城市不同功能区绿地表层土壤 Pb 特征

2.3 城市绿地土壤重金属潜在生态风险评价

土壤重金属评价潜在生态风险评价选用“中国土壤环境标准值”中Ⅱ级标准值作为土壤污染物参比值,即是否能对人体健康构成威胁,采用 Hakanson 潜在生态危害指数法对不同功能区绿地土壤重金属作出潜在生态风险评价。

表 6 土壤重金属单项污染指数及质量等级

项目	元素			
	Cu	Zn	Cd	Pb
单项污染指数	1.39	1.79	3.88	1.37
质量等级诊断	潜在污染	潜在污染	重污染	潜在污染

表 7 城市绿地土壤重金属内梅罗污染指数综合评价

功能区	内梅罗污染指数 P_N	污染等级
公园	1.83	轻度污染
苗木生产区	1.93	轻度污染
市政单位	1.44	轻度污染
校园	1.66	轻度污染
居住区	2.04	中度污染
工业区	2.43	中度污染
风景名胜区	2.08	中度污染
商业区	2.26	中度污染
道路	1.90	轻度污染
平均值	1.72	轻度污染
郊区农田	1.06	轻度污染
自然土壤	0.26	清洁(安全)

2.3.1 表层土壤重金属潜在生态风险评价 由表 8 可知该市 9 大不同功能区绿地土壤重金属的潜在生态危害指数(RI)均未超过 150,整个城市绿地土壤重金属潜在生态危害指数(RI)为 82.15,潜在生态危害指数 RI 主要来自于 Cd 的潜在生态危害系数(E_i^p)的贡献,说明该城市城市绿地表层土壤的重金属危害程度总体处于轻微生态风险,但 Cd 潜在生态危害可能较大。在这 9 大功能区中 RI 值处于前 5 位的是:工业区>商业区>风景名胜区>居住区>,市政单位最低,且不论是哪种功能区绿地这 4 种重金属 Cd 的危害程度贡献最大,都超过了 40。

城市绿地表层土壤中 4 种重金属元素单一重金属的潜在生态危害系数(E_i^p)值显示 $Cd>Cu>Pb>Zn$,他们的值分别是 77.03,2.9,1.62,0.60。其中 $80>Cd>40$,Cu,Pb,Zn 的潜在生态危害系数(E_i^p)都没有超过 40,Cu 在这些功能区中最大潜在生态危害系数(E_i^p)是 3.91,Zn 的最大潜在生态危害系数(E_i^p)是 0.77,Cd 的最大潜在生态危害系数(E_i^p)是 97.61,Pb 的最大潜在生态危害系数(E_i^p)是 4.69,说明该市绿地表层土壤中 Cd 污染程度达到中等生态风险,已对人类健康构成威胁,因此要加强对 Cd 污染的重

视,而其余 3 种重金属处于轻微生态风险的污染程度。9 大功能区的单一重金属的潜在生态危害系数(E_i^p)和潜在生态危害指数(RI)都比郊区农田和自然土壤大,郊区农田的 Cd 潜在生态危害系数(E_i^p)的值是 40.90,在 40~80 的范围内,但是自然土壤的 4 种重金属都没有超过 40,也进一步说明了该市的绿地土壤 Cd 污染比较严重。

表 8 不同功能区绿地表层土壤重金属的 E_i^p 和 RI 值

功能区	E_i^p				RI
	Cu	Zn	Cd	Pb	
公园	3.91	0.49	71.42	2.00	77.82
苗木生产区	3.01	0.69	76.06	1.01	80.77
市政单位	1.83	0.44	57.15	1.08	60.50
校园	2.36	0.56	65.74	0.98	69.64
居住区	3.87	0.62	80.51	1.13	86.13
工业区	1.67	0.6	97.61	1.34	101.2
风景名胜区	3.62	0.68	79.96	4.69	88.95
商业区	2.97	0.77	89.53	1.24	94.51
道路	2.84	0.56	75.31	1.13	79.84
平均值	2.90	0.60	77.03	1.62	82.15
郊区农田	2.68	0.37	40.90	0.87	44.82
自然土壤	1.30	0.32	8.31	0.54	10.47

2.3.2 表层土壤重金属潜在污染总体评价 根据不同功能区绿地土壤重金属 Cu,Zn,Cd 和 Pb 含量平均数可对城市绿地表层土壤各重金属的潜在生态危害系数(E_i^p)以及潜在生态危害指数(RI)进行计算,结果表明,城市绿地土壤虽然整体上处于轻微生态风险,但 Cd 污染属于中等生态风险(表 9)。

表 9 城市绿地表层土壤重金属的 E_i^p 和 RI 值

E_i^p				RI
Cu	Zn	Cd	Pb	
2.73	0.55	67.50	1.46	72.24

2.4 城市绿地土壤重金属相关性分析

对调查的城市绿地土壤中各重金属污染元素进行相关分析(表 10),结果显示绿地表层土壤中 Cu-Zn,Cu-Cd,Pb-Cd 显著相关,Cu-Pb,Zn-Cd 极显著相关,表明这些重金属元素的形成复合污染,金属之间可能有相似的污染途径和来源。

表 10 城市绿地表层土壤重金属元素含量之间的相关系数

	Cu	Zn	Cd	Pb
Cu	1			
Zn	0.227*	1		
Cd	0.205*	0.279**	1	
Pb	0.383**	0.103*	0.234*	1

注: ** 表示显著性水平为 0.01(极显著); * 表示显著性水平为 0.05(显著)。

3 讨论

研究表明,不同功能区绿地土壤 Cu,Zn,Cd 和

Pb 的污染程度均位于前 5 名的是工业区、风景名胜区、商业区绿地和居民区绿地。由于工业排放,导致工业区土壤重金属综合污染较为严重,居各类功能区土壤重金属污染之首,与他人研究基本一致^[15-16],但风景名胜区绿地土壤的 Pb 含量和商业区绿地 Zn 含量分别位于污染程度的首位,与其他城市表现不同,分析原因为该市是国家级重点旅游城市,旅游景点有几千年历史,且每年游客众多,随身携带各种污染物长期对绿地土壤造成污染;商业区绿地作为城市最繁华的地段,众多的消费者及城市游客在消费的同时,同样给绿地土壤带来了多种污染物;居民区绿地则主要与居民日常生活废弃物含 Zn,Cu 等污染较多有关;其次还应重视苗木生产区的重金属污染现象,可能与长期施入大量有机肥有关。城市绿地土壤 Pb 污染还可能与交通量、汽油铅含量、道路使用年数、道路宽度、风速风向、沉降量以及大气湿度等因素有关。但不同功能区土壤中铅的含量高值并未出现在道路绿地土壤中,这表明车辆和其他污染源排放的含铅气体颗粒物可能会随风漂浮一定距离后才沉降。

研究结果表明,土壤重金属 Cd 的含量普遍超标,达到了危害人体健康的程度,应该加强对 Cd 污染的治理。有研究认为,Cd 污染严重的原因在于城市周边工业区电镀厂的大气飘层,以及机动车用油燃烧和含有 Cd 的轮胎与道路摩擦产生的粉尘^[17],本研究城市城区集中,机动车密度较大,其 Cd 来源应该主要是后者。目前我国没有公园、住宅区等城市土壤环境质量标准,采用国家土壤环境质量标准作为与人们密切接触的城市土壤评价标准是否合适,有待进一步探讨。

内梅罗综合污染指数可以全面反映各重金属对土壤的不同作用,兼顾单元素污染指数平均值和最大值,突出了污染指数最大的污染物对环境质量和作用。综合污染评价研究表明,处于“中度污染”的污染级别的绿地类型有工业绿地、商业区绿地、风景名胜区和居住区绿地,而且苗木生产区和道路绿地也接近“中度污染”级别。因此应重视对工业绿地、商业区绿地、风景名胜区和居住区绿地的污染治理和生物修复,同时注重苗木生产区和道路绿地的防治工作,综合治理,防范于未然。

潜在生态危害区域的形成主要与工业生产和人类活动有关。潜在生态危害评价表明,该市绿地土壤重金属潜在生态危害指数(RI)值虽然都没有超过 150,处于轻微生态风险,但已向中等生态风险接近。潜在生态危害指数 RI 主要来自于 Cd 的 E_i^p 的贡献,

E_i 值普遍超过 40, 其中工业区、风景名胜区均超过 80, Cd 已处于中等生态风险, 其中工业区和商业区 Cd 的潜在生态危害指数属于强生态风险, 这与单因子评价结果一致。因此必须控制好 Cd 污染的来源, 重视对 Cd 污染开展治理。其他重金属含量虽然较低, 但也已经处于潜在污染风险级别。工业区受工业三废污染源影响比较严重, 土壤中重金属潜在危害最大, 而商业区交通密集, 车流量大, 人口密集, 受汽车尾气排放、汽车轮胎的老化磨损、管道、装饰材料等污染源的影响, 土壤中重金属也出现明显积累。

重金属之间的相关性研究可以用来推测不同重金属的污染来源^[18], 若重金属含量有显著的相关性, 说明有相同来源的可能性较大^[19], 否则来源可能不止一个。本研究表明重金属元素之间形成了一定程度的复合污染, 金属之间可能有相似的污染途径和来源。

4 结论

(1) 本文所研究城市绿地土壤表层重金属 Zn, Pb, Cu 平均含量均低于国家土壤环境质量 II 级标准, Cd 平均含量严重超标。各功能区绿地表层土壤重金属 Cu, Zn, Cd 和 Pb 已表现出富集状态, 其中工业区、风景名胜区、商业区和居民区等绿地土壤污染程度居前。

(2) 该市绿地土壤中 Cu, Zn 和 Pb 含量虽然不高, 但已经不属于清洁安全状态, 已处于潜在污染状态, 而 Cd 已经处于重污染状态。该市绿地土壤总体基本处于“轻度污染”和“中度污染”的污染级别, 其中处于“中度污染”的污染级别的绿地类型有工业绿地、商业区绿地、风景名胜区和居住区绿地, 而且苗木生产区和道路绿地也接近“中度污染”级别。该市绿地土壤重金属潜在生态危害指数(RI)值虽然都没有超过 150, 处于轻微生态风险, 但 Cd 潜在生态危害指数已经处于中等生态风险。土壤 Cd 的防治应该引起重视。

(3), 绿地表层土壤中 Cu-Zn, Cu-Cd, Pb-Cd 显著相关, Cu-Pb, Zn-Cd 极显著相关, 重金属之间存在一定复合污染现象, 表明这些重金属元素的来源可能相同。

参考文献:

- [1] Castelli M, Rossi B, Corsetti F, et al. Levels of cadmium and lead in blood: an application of validated methods in a group of patients with endocrine/metabolic disorders from the Rome area [J]. *Microchemical Journal*, 2005, 79(1): 349-355.
- [2] Edwards T M, Peterson M J. Environmental exposures

and gene regulation in disease etiology [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2007, 115(9): 1264-1270.

- [3] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 1241-1249.
- [4] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(2): 599-605.
- [5] Li X Y, Liu LY, Wang Y G et al. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city: (Shenyang) in Northeast China[J]. *Geoderma*, 2013, 192(1): 50-58.
- [6] 纪小凤, 郑娜, 王洋, 等. 中国城市土壤重金属污染研究现状及展望[J]. *土壤与作物*, 2016, 5(1): 42-47.
- [7] 张霖琳, 梁宵, 加那尔·别克密西里甫汗, 等. 在土壤及底泥重金属测定中不同前处理和分析方法的比较[J]. *环境化学*, 2013, 32(2): 302-306.
- [8] 国家环境保护总局. 土壤质量. 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: 中国标准出版社, 1997.
- [9] 中华人民共和国环境保护部. 土壤总铬的测定火焰原子吸收分光光度法: HJ 491—2009 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [10] 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: 中国标准出版社, 1997.
- [11] 刘刚, 金研铭, 胡昊. 长春市朝阳区绿地土壤重金属污染分析[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(12): 2421-2424.
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment ecological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [13] 崔邢涛, 栾文楼, 牛彦斌, 等. 唐山城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1379-1386.
- [14] 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.
- [15] 孟昭虹, 周嘉, 郑元福. 哈尔滨市城市土壤重金属生态风险评价[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(2): 152-155.
- [16] 阮丽, 阮忠强, 周金洁, 等. 中国城市土壤重金属污染研究进展[J]. *淮海工学院学报: 自然科学版*, 2015, 24(2): 44-48.
- [17] 陈立新. 城市土壤质量演变与有机改土培肥作用研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 36-39.
- [18] 王海东, 方凤满, 谢宏芳, 等. 芜湖市区土壤重金属污染评价及来源分析[J]. *城市环境与城市生态*, 2010, 23(4): 36-40.
- [19] 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.