

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018061701

范刘丹, 王明仕, 宋党育, 等. 部分中国城市公园重金属生态风险及健康风险评价[J]. 环境化学, 2019, 38(4): 793-804.

FAN Liudan, WANG Mingshi, SONG Dangyu, et al. Ecological risk assessment and health risk assessment of heavy metals in some China urban parks[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(4): 793-804.

部分中国城市公园重金属生态风险及健康风险评价*

范刘丹¹ 王明仕^{1,2**} 宋党育¹ 申进朝²

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作, 454003; 2. 河南省环境监测技术重点实验室, 郑州, 450004)

摘要 城市公园土壤环境质量会对城市环境质量和人体身心健康造成潜在影响. 研究中国城市公园土壤重金属的含量并对其进行生态风险评价和健康风险评价, 有利于了解城市环境质量, 控制重金属对人体的危害. 本研究在收集的全国 25 个省 38 个地区公园土壤重金属数据的基础上, 应用美国 EPA 人体暴露风险评价方法对全国公园土壤重金属进行健康风险评价, 采用地积累指数法分析其污染程度. 结果表明, 公园土壤重金属 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 等 9 种重金属的平均含量分别为 66.02、39.47、498.65、24.97、48.11、148.32、12.82、0.67、0.26 mg·kg⁻¹, 除了 Mn 和 Ni 外均高于中国土壤背景值, 存在不同程度的积累. 健康风险评价表明, 3 种途径中儿童和成人的日均暴露剂量排序均为 Mn>Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>As>Hg>Cd; 儿童和成人的致癌排序均为 As>Cr>Ni>Cd. 土壤重金属的致癌风险指数除了 As 元素外均小于致癌风险值范围. 总体而言, 公园土壤与城市土壤重金属的含量大致相当, 人们在游园时应注意其潜在的健康风险.

关键词 中国, 公园, 重金属, 生态风险评价, 健康风险评价.

Ecological risk assessment and health risk assessment of heavy metals in some China urban parks

FAN Liudan¹ WANG Mingshi^{1,2**} SONG Dangyu¹ SHEN Jinchao²

(1. Institute of Resource and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454003, China;

2. Henan Key Laboratory for environmental monitoring technology, Zhengzhou, 450004, China)

Abstract: Quality of soil environment in urban parks has a potential impact on the urban environment quality and human health. Studies on soil heavy metals content in China parks and conducting the ecological risk assessment and health risk assessment are beneficial to understand urban environmental quality and control the harm of heavy metals to human body. The research was carried out by US EPA Health Risk Assessment Model and the geo-accumulation index method based on 9 heavy metal concentration in soil samples from 38 parks in 25 Provinces in China. The results showed that the average contents of Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, As, Cd and Hg in the soil were 66.02, 39.47, 498.65, 24.97, 48.11, 148.32, 12.82, 0.67 and 0.26 mg·kg⁻¹, respectively. Their concentration except Mn and Ni, which were higher than the soil background value of China, and had different degrees of accumulation. The health risk assessment results showed that the average daily exposure dose ranking of children and adults in the three pathways was Mn>Zn>Pb>Cu>Cr>

2018 年 6 月 17 日收稿 (Received: June 17, 2018).

* 河南省高等学校重点科研项目 (16A170001) 和河南省高校基本科研业务费专项 (NSFRF1631) 资助.

Supported by Foundation of He'nan Educational Committee (16A170001) and the Fundamental Research Funds for the Universities of Henan Province (NSFRF1631).

** 通讯联系人 Tel: 13462448199, E-mail: mingshiwang@hpu.edu.cn

Corresponding author, Tel: 13462448199, E-mail: mingshiwang@hpu.edu.cn

Ni>As>Hg>Cd; and the carcinogenic risk sequence of children and adults was As>Cr>Ni>Cd. The carcinogenic risk index of heavy metals in soil, except As, is lower than the carcinogenic risk range. Generally speaking, the content of heavy metals in park soil and urban soil is roughly the same, people should pay attention to the potential health risks when they visit in the park.

Keywords: China, park, heavy metal, ecological risk assessment, health risk assessment.

随着工业发展和城市化进程的加剧,通过交通运输、工业排放、市政建设和大气沉降等造成城市土壤重金属的污染越来越严重^[1].重金属不能被微生物降解,因而在土壤中日益积累,并通过食物链进入人体,危害人体健康^[2],其中毒症状可短期也可在 10—20 年后表现出来^[3],呈现出隐蔽性强、作用区域广、危害人口多等特点.城市公园作为居民休闲、娱乐的主要场所,与人们的日常生活、身体健康密切相关^[4].对儿童来说,公园是他们的主要娱乐和活动场所之一.如果公园土壤存在着重金属的污染问题,当儿童长期在这样的环境中活动,将导致重金属的暴露风险增加.

现有研究表明,城市公园土壤中的重金属可直接通过呼吸吸入、手口摄入和皮肤接触等主要途径进入人体内,进而导致对人体尤其是对儿童的身心健康造成危害.此外,土壤中的重金属还可通过污染水环境、大气环境和食物来间接影响城市环境的质量^[5].因此,评价中国公园重金属健康风险具有重要的科学和现实意义.

本研究汇总了从 2002 年到 2016 年中国 25 个省 38 个地区有关公园土壤重金属的数据,并对其地进行地积累指数评价,并使用 EPA 推荐的健康风险评价模型,讨论全国范围内公园土壤重金属对儿童和成人的健康风险,为我国城市环境的治理和评价提供依据.

1 数据来源与研究方法 (Data sources and research methods)

1.1 数据来源

本研究通过查找的文献资料,收集到国内公园重金属的研究数据,中国部分公园土壤重金属含量见表 1.

表 1 中国部分城市公园土壤重金属含量

Table 1 Heavy metal concentrations of soil in some urban parks of China													
省份 Provinces	地区 Area	采样时间 Sampling time	样品量 No. of samples	Cr/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Mn/ (mg·kg ⁻¹)	Ni/ (mg·kg ⁻¹)	Pb/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	As/ (mg·kg ⁻¹)	Cd/ (mg·kg ⁻¹)	Hg/ (mg·kg ⁻¹)	数据来源 References
陕西	西安		365	79.94	36.73	683.06	26.56	49.84	92.72	11.55	0.26		[6-13]
上海	上海	2006.秋	125	82.68	38.00	682.65	42.45	48.19	150.99		0.45		[14-19]
青海	西宁市	2009.1			60.90			31.35	281.14		1.49		[20]
北京	北京	2012.5	185	42.89	57.52		19.42	53.82	79.13		0.45		[21-28]
甘肃	白银市	2014.7—2014.9	25	43.64	30.19		15.29	60.71	154.24	6.26	0.28	0.11	[29]
山东	青岛市	2010	8		47.13			41.38	192.08		1.13		[30]
	淄博市			67.20	51.80		27.20	60.40	116.00	10.90	0.45	0.13	[31]
天津	天津	2007.1	17	51.04	36.57		30.15	31.62	116.56		0.25		[32]
江苏	南京	2002.11 月初— 2009.春	134	62.67	41.47	572.39	30.48	59.82	133.85		0.99		[33-36]
	徐州		27	77.61	25.81			30.66	76.31		2.91		[37]
	苏州	2016.11	31	77.92				35.99		14.45	0.06	0.52	[38]
安徽	某城市		35	43.64	30.19		15.29	60.71	154.24	6.26	0.28	0.11	[39]
广东	广州	2008.4—2014.5	123	52.58	33.21	448.04	16.19	78.77	134.53	13.64	0.37	1.03	[40-47]
	东莞市		5	50.81	50.66			18.10					[48]
	深圳市	2004	25		21.27			42.57	66.87		0.72		[49]

续表1

省份 Provinces	地区 Area	采样时间 Sampling time	样品量 No. of samples	Cr/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Mn/ (mg·kg ⁻¹)	Ni/ (mg·kg ⁻¹)	Pb/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	As/ (mg·kg ⁻¹)	Cd/ (mg·kg ⁻¹)	Hg/ (mg·kg ⁻¹)	数据来源 References
河南	新乡		6	91.35				63.22	115.63		0.57		[50]
	开封	2006.2—2006.3	2	23.74	24.89		15.45	16.88	259.64	16.27	0.40	0.15	[51]
广西壮族 自治区	南宁	2008.9—2008.10	8	20.18	12.42	214.39	15.31	41.42	104.45				[52]
	重庆	2011.1—2012	39	41.36	29.29			27.12	82.24	6.16	0.17	0.15	[3, 53]
山西	太原市		48	223.00				190.20		24.10	0.23		[54]
吉林	长春	2003.春季	7		52.70	514.07	78.57	66.27	135.55				[55]
浙江	永康	2013 末	18	127.68	17.85	486.62	22.85	30.29	80.02	10.87			[56]
	杭州				46.10			84.30	202.50		1.20		[57]
宁夏回族 自治区	银川市		10	72.93	30.24	520.05		21.15	53.68		0.16		[58]
贵州	贵阳	2006.春—2009.6	75	64.43	49.54		37.76	50.61	147.76	13.06	0.51	0.13	[59-62]
内蒙古	包头市		20		36.91			28.28	296.90		0.18		[63]
	呼和浩特	2011.7—2011.9	8	44.83	18.61	518.22	15.46	5.53	60.91	7.88			[64-65]
湖北	武汉	2008.12—2009.8		75.67	12.89			17.62		2.46	0.10	0.01	[66]
新疆	乌鲁木齐	2006.9		94.70	33.40		39.50	35.90	111.80	11.60	0.55		[67]
福建	漳州	2011—2011.8	24	30.03	192.75		10.43	73.26	566.00	31.14	0.89		[68-69]
	厦门	2011—2014.7	47	44.10	52.15	347.00	8.40	89.10	195.30		0.53		[70-72]
	福州	2015.5	20	21.74	16.76		9.62	44.15	106.65				[73]
湖南	长沙		50	102.00	34.07			66.60	199.67	28.40	4.66	0.31	[74]
	株洲	2008.4	5	66.37	52.43		30.36	48.82	129.15	4.80	0.55	0.08	[75]
黑龙江	哈尔滨		24	48.43	32.02			31.13	92.80		0.15	0.33	[76-77]
河北	保定市	2007	12	61.51	17.90		26.55	10.21			0.25		[78-79]
	衡水市			60.00	30.80		21.40	56.00	57.00		0.14		[80]
	石家庄	2013.6			26.10		19.60	26.10		10.92	0.07		[81]

注:同一省份的相同市区因参考文献数据较多,仅用平均值来表示每个城市公园土壤重金属的含量。

1.2 生态风险评价研究方法

地积累指数不仅考虑了自然地质过程造成的背景值的影响,而且也充分注意了人为活动对重金属污染的影响,本研究采用地积累指数法评价现有公园土壤重金属研究区域的重金属污染程度。

地积累指数的计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{k \times B_n} \right]$$

(1)

式中, C_n 是指元素 n 在沉积物中的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 实测值), B_n 是指沉积岩(普通页岩)中该元素的地球化学背景值,考虑成岩作用可能会引起背景值的变动, k 表示修正系数,本论文中 $k = 1.5$ ^[82]。

地积累指数分级标准见表 2。

表 2 地积累指数分级标准
Table 2 Criteria for index of geo-accumulation

项目 Items	污染级别 Pollution levels	污染程度 Pollution degree
$I_{geo} < 0$	0	无
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	无—中
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	中
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中—强
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	强
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	强—极强
$I_{geo} \geq 5$	6	极强

1.3 健康风险评价研究方法

1.3.1 暴露模型

根据灰尘污染物和土壤污染物在环境中的迁移转化方式,其中重金属主要通过以下几种途径进入人体:经手-口途径直接摄入、呼吸系统吸入和皮肤直接接触^[83-84].健康风险包括致癌风险和非致癌风险.本研究所关注的具有慢性非致癌健康风险的土壤重金属元素有 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 等 9 种,其中具有致癌风险的元素有 As、Cd、Cr 和 Ni 等 4 种^[84].在土壤重金属中,3 种暴露途径致癌(成人)和非致癌(成人和儿童)重金属的日均暴露量计算公式如下:

经手-口摄入途径的日平均暴露量:

$$ADD_{ing} = C \times \frac{IngR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

(2)

经呼吸吸入途径的日平均暴露量:

$$ADD_{inh} = C \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

(3)

经皮肤接触的日平均暴露量:

$$ADD_{derm} = C \times \frac{SA \times SL \times ABS \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

(4)

儿童致癌重金属不同暴露途径的终生日平均暴露量分别按下式计算^[84-85]:

$$LADD_{ing} = \frac{C \times CF \times EF}{AT} \times \left(\frac{IngR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{IngR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right)$$

(5)

$$LADD_{inh} = \frac{C \times EF}{AT \times PEF} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right)$$

(6)

$$LADD_{derm} = \frac{C \times CF \times EF \times SL \times ABS}{AT} \times \left(\frac{SA_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{SA_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right)$$

(7)

1.3.2 暴露参数

对于公园土壤中暴露剂量计算公式中的各种参数见表 3^[29, 84-87].

表 3 公园土壤重金属健康风险评价参数

Table 3 Health risk assessment parameters of heavy metals in park soil

参数 Parameter	物理意义 Physical significance	单位 Units	取值 Data
C	公园土壤重金属暴露水平	mg·kg ⁻¹	95%UCL
IngR	手—口摄食灰尘频率	mg·d ⁻¹	200(儿童),100(成人)
InhR	呼吸频率	m ³ ·d ⁻¹	7.5(儿童),15(成人)
EF	暴露频率	day·a ⁻¹	365
ED	暴露时间	a	6(儿童),24(成人)
CF	转换系数	m ³ ·kg ⁻¹	0.000001
SA	皮肤暴露的表面积	cm ²	1600(儿童),4350(成人)
SL	皮肤黏着度	mg·cm ⁻² ·d ⁻¹	0.2(儿童),0.2(成人)
ABS	皮肤吸收因子	无量纲	0.001
PEF	颗粒物排放因子	m ³ ·kg ⁻¹	1360000000
BW	人体平均体重	kg	15(儿童),53.1(成人)
AT 非致癌	平均暴露时间	d	2190(儿童)8760(成人)
AT 致癌	平均暴露时间	d	25550(儿童)25550(成人)

由非致癌物带来的非致癌风险,一般采用危害商(HQ)来度量,即暴露量(ADD)与非致癌物参考剂量(RfD)的比值,表达式为:

HQ=ADD/RfD

(8)

式中,ADD 为暴露量,RfD 为污染物的参考剂量.

健康风险的大小用危害商的值来度量,即当 $HQ < 1$ 时,认为风险较小或可忽略不计;当 $HQ > 1$ 时,则认为存在非致癌风险.对于多污染物多暴露途径情形,非致癌总风险即为各重金属危害商 HQ 之和^[85].
对于致癌物质用暴露剂量(ADD)乘以相应的致癌斜率因子(SF),即可得到致癌风险.

$$(Risk)_i = ADD \times SF$$

(9)

若致癌风险值为 $10^{-6}—10^{-4}$,则认为该物质不具备致癌风险,各种致癌重金属的致癌风险之和即为总致癌风险^[88].不同暴露途径的 RfD 和 SF 见表 4^[84, 86].

表 4 土壤重金属不同暴露途径的 RfD 和 SF
Table 4 RfD and SF of different exposure pathways of soil heavy metals

元素 Element	RfD/(mg·(kg·d) ⁻¹)			SF/(kg·d·mg ⁻¹)		
	手口途径 Ingestion	皮肤接触 Dermal	呼吸吸入 Inhalation	呼吸吸入 Inhalation	皮肤接触 Dermal	手口途径 Ingestion
Cr	3.00×10 ⁻³	6.00×10 ⁻⁵	2.86×10 ⁻⁵	4.20×10 ¹		
Cu	4.00×10 ⁻²	1.20×10 ⁻²	4.00×10 ⁻²			
Mn	4.60×10 ⁻²	1.84×10 ⁻³	1.43×10 ⁻⁵			
Ni	2.00×10 ⁻²	5.40×10 ⁻³	2.06×10 ⁻²	8.40×10 ⁻¹		
Pb	3.50×10 ⁻³	5.25×10 ⁻⁴	3.50×10 ⁻³			
Zn	3.00×10 ⁻¹	6.00×10 ⁻²	3.00×10 ⁻¹			
As	3.00×10 ⁻⁴	1.23×10 ⁻⁴	3.00×10 ⁻⁴	1.51×10 ¹	3.66	1.50
Cd	1.00×10 ⁻³	1.00×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻³	6.30		
Hg	3.00×10 ⁻⁴	2.10×10 ⁻⁵	8.57×10 ⁻⁵			

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 公园土壤重金属的含量分析

研究表明,全国文献报道的公园土壤中 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 的含量范围为 20.18—223.00、12.42—192.75、214.39—683.06、8.40—78.57、5.53—190.20、53.68—566.00、2.46—31.14、0.06—4.66、0.01—1.03 mg·kg⁻¹,其中 Cr、Cu、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 元素的平均含量均高于中国土壤背景值,分别是中国土壤背景值的 1.08、1.75、1.85、2.00、1.14、6.69、3.65 倍.特别需要注意的是 Cd 和 Hg 元素高出中国土壤背景值的 6.69 倍和 3.65 倍,Cd 在超低剂量的情况下就会对人体造成危害.

表 5 公园土壤重金属含量数据统计
Table 5 Park soil heavy metal concentrations statistics

元素 Element	范围 Range/ (mg·kg ⁻¹)	平均值 Mean/ (mg·kg ⁻¹)	中值 Median/ (mg·kg ⁻¹)	标准偏差 SD	偏度系数 Skewness	峰度系数 Kurtosis	中国土壤背景值 Background values in China/ (mg·kg ⁻¹)
Cr	20.18—223.00	66.02	61.51	38.00	2.47	9.16	61.00
Cu	12.42—192.75	39.47	33.40	29.76	4.18	21.52	22.60
Mn	214.39—683.06	498.65	516.15	141.77	-0.67	0.74	583.00
Ni	8.40—78.57	24.97	21.40	15.06	2.16	6.60	26.90
Pb	5.53—190.20	48.11	43.36	31.35	2.56	10.68	26.00
Zn	53.68—566.00	148.32	122.85	98.72	2.70	9.79	74.20
As	2.46—31.14	12.82	11.23	7.90	1.18	0.90	11.20
Cd	0.06—4.66	0.67	0.42	0.92	3.30	12.26	0.10
Hg	0.01—1.03	0.26	0.14	0.28	2.25	5.49	0.07

2.2 公园土壤重金属地积累指数评价结果

土壤重金属浓度地积累指数见表 6.其中地积累指数的最小值以重金属含量最小地区的背景值为 B_n 加以计算、地积累指数的最大值以最大值所在省份的重金属土壤背景值为 B_n 加以计算,地积累指数

的平均含量使用中国土壤背景值计算.土壤重金属元素中各元素的污染水平排序为 Cd>Hg>Zn>Pb>Cu, 其中 Cd 平均含量的污染级别为 3 级,Hg 的污染级别为 2 级,Cu、Pb 和 Zn 的污染级别为 1 级,Cr、Mn、Ni 和 As 的污染级别为 0 级.各级污染程度见表 2 地积累指数标准.

表 6 公园土壤重金属浓度地积累指数

Table 6 Geo-accumulation index of heavy metal concentrations in park soils					
元素 Element	最小含量 I_{geo} $Min_{I_{geo}}$	最大含量 I_{geo} $Max_{I_{geo}}$	平均含量 I_{geo} $Mean_{I_{geo}}$	污染级别 Pollution levels	污染程度 Pollution degree
Cr	-2.15	1.36	-0.47	0	无
Cu	-1.23	2.83	0.22	1	无—中
Mn	-0.17	-0.16	-0.81	0	无
Ni	-1.67	1.29	-0.69	0	无
Pb	-2.02	3.16	0.30	1	无—中
Zn	-0.87	2.29	0.41	1	无—中
As	-2.58	1.06	-0.39	0	无
Cd	-1.70	7.02	2.16	3	中—强
Hg	-0.16	4.05	1.28	2	中

2.3 暴露剂量分析

根据土壤重金属浓度(95%UCL)、暴露剂量的计算公式(2)—(7)和表 3 暴露参数,计算出不同途径的暴露剂量及致癌暴露剂量于表 7.

表 7 公园土壤重金属儿童与成人不同途径暴露剂量

Table 7 Children and adults exposure doses of park soil heavy metals in different ways							
元素 Element	浓度 $C/$ ($mg \cdot kg^{-1}$)	手-口途径		呼吸吸入		皮肤接触	
		Ingestion/($mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$)		Inhalation/($mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$)		Dermal/($mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$)	
		儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult
Cr	79.96	1.43×10^{-4}	5.16×10^{-5}	8.21×10^{-9}	5.69×10^{-9}	5.95×10^{-7}	4.49×10^{-7}
Cu	49.69	6.63×10^{-4}	9.36×10^{-5}	1.83×10^{-8}	1.03×10^{-8}	1.06×10^{-6}	8.14×10^{-7}
Mn	600.06	8.00×10^{-3}	1.13×10^{-3}	2.21×10^{-7}	1.25×10^{-7}	1.28×10^{-5}	9.83×10^{-6}
Ni	31.48	5.63×10^{-5}	2.03×10^{-5}	3.23×10^{-9}	2.24×10^{-9}	2.34×10^{-7}	1.77×10^{-7}
Pb	58.41	7.79×10^{-4}	1.10×10^{-4}	2.15×10^{-8}	1.21×10^{-8}	1.25×10^{-6}	9.57×10^{-7}
Zn	183.92	2.45×10^{-3}	3.46×10^{-4}	6.76×10^{-8}	3.82×10^{-8}	3.92×10^{-6}	3.01×10^{-6}
As	16.75	3.00×10^{-5}	1.08×10^{-5}	1.72×10^{-9}	1.19×10^{-9}	1.25×10^{-7}	9.41×10^{-8}
Cd	1.00	1.79×10^{-6}	6.45×10^{-7}	1.03×10^{-10}	7.11×10^{-11}	7.44×10^{-9}	5.61×10^{-9}
Hg	0.43	5.78×10^{-6}	8.16×10^{-7}	1.59×10^{-10}	9.00×10^{-11}	9.25×10^{-9}	7.10×10^{-9}

由表 7 可以看出,9 种公园土壤重金属均涉及 3 种暴露途径,3 种暴露途径的非致癌日均暴露剂量在土壤重金属中的排序为手-口途径摄入大于皮肤接触大于呼吸吸入灰尘量,这与国内外健康风险研究的结果显然是一致的.说明重金属摄入体内的主要途径是通过手-口途径摄入的.同时,从表中也可以得出:公园土壤非致癌重金属元素在 3 种途径中,儿童的暴露剂量都大于成人,3 种途径中儿童和成人的日均暴露剂量排序均为 Mn>Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>As>Hg>Cd.

2.4 健康风险评价

根据表 7 的暴露剂量和相应计算公式计算出中国部分城市公园土壤中重金属污染的致癌风险指数和非致癌风险指数分别见表 8.由表 8 中的数据分析可知,9 种重金属在 3 种暴露途径中,非致癌风险排序为手-口途径摄入>皮肤接触>呼吸吸入,说明手-口途径是儿童和成人摄入土壤重金属的主要途径.9 种重金属的非致癌风险指数均是儿童大于成人,儿童非致癌风险排序为 Pb>Mn>As>Cr>Hg>Cu>Zn>Ni>Cd;成人非致癌风险排序为 Mn>As>Pb>Cr>Hg>Cu>Cd>Zn>Ni.Cu、Pb、Zn 的非致癌风险指数儿童是成人的将近 7 倍,说明在同样的环境下,儿童更容易受到重金属的危害,大人需悉心照看,同时大人也应加强防范意识,在照顾孩子的同时也需要留意自己.

表 8 公园土壤重金属风险指数
Table 8 Risk index of heavy metals in park soil

元素 Element	手-口途径 Ingestion		呼吸吸入 Inhalation		皮肤接触 Dermal		致癌风险指数 CR		非致癌风险指数 HR	
	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult
Cr	4.77×10 ⁻²	1.72×10 ⁻²	2.87×10 ⁻⁴	1.99×10 ⁻⁴	9.92×10 ⁻³	7.49×10 ⁻³	3.45×10 ⁻⁷	2.39×10 ⁻⁷	5.79×10 ⁻²	2.49×10 ⁻²
Cu	1.66×10 ⁻²	2.34×10 ⁻³	4.57×10 ⁻⁷	2.58×10 ⁻⁷	8.83×10 ⁻⁵	6.78×10 ⁻⁵			1.67×10 ⁻²	2.41×10 ⁻³
Mn	1.74×10 ⁻¹	2.46×10 ⁻²	1.54×10 ⁻²	8.72×10 ⁻³	6.96×10 ⁻³	5.34×10 ⁻³			1.96×10 ⁻¹	3.86×10 ⁻²
Ni	2.82×10 ⁻³	1.02×10 ⁻³	1.57×10 ⁻⁷	1.09×10 ⁻⁷	4.34×10 ⁻⁵	3.27×10 ⁻⁵	2.72×10 ⁻⁹	1.88×10 ⁻⁹	2.86×10 ⁻³	1.05×10 ⁻³
Pb	2.23×10 ⁻¹	3.14×10 ⁻²	6.14×10 ⁻⁶	3.47×10 ⁻⁶	2.37×10 ⁻³	1.82×10 ⁻³			2.25×10 ⁻¹	3.33×10 ⁻²
Zn	8.17×10 ⁻³	1.15×10 ⁻³	2.25×10 ⁻⁷	1.27×10 ⁻⁷	6.54×10 ⁻⁵	5.02×10 ⁻⁵			8.24×10 ⁻³	1.20×10 ⁻³
As	9.98×10 ⁻²	3.60×10 ⁻²	5.73×10 ⁻⁶	3.98×10 ⁻⁶	1.01×10 ⁻³	7.65×10 ⁻⁴	4.54×10 ⁻⁵	1.66×10 ⁻⁵	1.01×10 ⁻¹	3.68×10 ⁻²
Cd	1.79×10 ⁻³	6.45×10 ⁻⁴	1.03×10 ⁻⁷	7.11×10 ⁻⁸	7.44×10 ⁻⁴	5.61×10 ⁻⁴	6.47×10 ⁻¹⁰	4.48×10 ⁻¹⁰	2.53×10 ⁻³	1.21×10 ⁻³
Hg	1.93×10 ⁻²	2.72×10 ⁻³	1.86×10 ⁻⁶	1.05×10 ⁻⁶	4.40×10 ⁻⁴	3.38×10 ⁻⁴			1.97×10 ⁻²	3.06×10 ⁻³
风险指数							4.58×10 ⁻⁵	1.68×10 ⁻⁵	6.30×10 ⁻¹	1.43×10 ⁻¹

在手-口途径中儿童的非致癌风险排序为 1>Pb>Mn>As>Cr>Hg>Cu>Zn>Ni>Cd,成人非致癌风险排序为 1>As>Pb>Mn>Cr>Hg>Cu>Zn>Ni>Cd;在呼吸吸入途径中儿童非致癌风险排序为 1>Mn>Cr>Pb>As>Hg>Cu>Zn>Ni>Cd,成人非致癌风险排序 1>Mn>Cr>As>Pb>Hg>Cu>Zn>Ni>Cd;在皮肤接触途径中儿童和成人的非致癌风险排序均为 1>Cr>Mn>Pb>As>Cd>Hg>Cu>Zn>Ni.土壤重金属中儿童和成人的致癌排序均为 As>Cr>Ni>Cd.土壤重金属的致癌风险指数除了 As 元素外均小于致癌风险值范围 10⁻⁶—10⁻⁴,说明 As 是最主要的致癌风险因子.同时 Cr 的致癌风险指数相对于接触其它土壤重金属元素来说偏高,应加强注意.

2.5 与国内城市土壤重金属含量对比

为了更好的了解本研究中公园土壤重金属的污染现状,搜集了国内相关土壤重金属污染现状的文献.从表 9 中可以看出,中国公园土壤重金属的含量与国内城市土壤重金属含量大致相当,个别研究中的 Cu 污染严重,主要是因为土地利用方式的不同和人为活动的影响,导致重金属的含量明显相对富集.本研究中有地方公园里个别元素的含量超高,如漳州的芝山公园,在建国之前公园周边有大型的垃圾场,公园内土壤以垃圾填埋为主,使个别重金属含量过高,这就对平均含量的数值造成了一定的影响.这一现象应该引起我们的注意,说明公园的选址非常重要,在修建公园前应提前了解当地的土壤污染状况,在垃圾填埋场附近修建的公园,公园土壤本身重金属会有不同程度的积累,应该在修建前先做一定的处理,降低土壤重金属的浓度.如果不做相应的土壤治理措施,就会存在各种安全隐患,直接对长期在公园游玩的大人和小孩的身心健康造成危害.公园的选址应该倾向于植被多、空气佳、无污染的地方,应尽量避免建立在污染严重的地方.

表 9 中国城市土壤重金属含量
Table 9 Heavy metal content in China's urban soil

城市个数 No. of cities	As/ (mg·kg ⁻¹)	Cd/ (mg·kg ⁻¹)	Cr/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Hg/ (mg·kg ⁻¹)	Ni/ (mg·kg ⁻¹)	Pb/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	Mn/ (mg·kg ⁻¹)	参考文献 References
43	13.39	0.68	63.04	38.17	0.31	26.18	47.34	137.72		[89-90]
23	13.87	1.06	62.43	102.29	0.35	27.27	85.62	117.43	559.75	[91]
31	12.44	0.43	66.85	39.59	0.21	32.48	44.75	116.15		[92]
38	12.82	0.67	66.02	39.47	0.26	24.97	48.11	148.32	498.65	本研究

本研究收集了文献报道中我国部分城市公园中土壤重金属含量,可以作为我国公园土壤重金属研究的参考.需要注意的是,部分公园土壤重金属的数据仅仅是其中某个功能区的土壤样品,不同文献的采样时间、采样方法、样品点的数量以及样品的分析和评价方法的不同,导致有一定的差异.文中各种土壤重金属的风险水平仅能反映研究区域的大致风险情况,部分地区的数据相对缺乏,有待继续收集研究数据并加以完善.我国尚未出台相应的暴露参数、RfD 和 SF 的标准值,不同研究中采用的数值存在差

异,导致计算出的各种途径的暴露剂量及风险指数也会有所差异.如本研究中的 As 元素比其他致癌元素多了手-口和皮肤接触两个途径的致癌斜率因子,导致致癌风险在致癌风险值范围内,所以对这种差异不做原因的分析,不过还是要引起人们的重视.

3 结论 (Conclusion)

(1) 中国城市公园中 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 等 9 种土壤重金属的平均含量依次为 66.02、39.47、498.65、24.97、48.11、148.32、12.82、0.67、0.26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 Cr、Cu、Pb、Zn、As、Cd 和 Hg 等 7 种元素的平均含量高于中国土壤背景值, 分别是中国土壤背景值的 1.08、1.75、1.85、2.00、1.14、6.69、3.65 倍.

(2) 土壤重金属非致癌日均暴露剂量排序为手-口途径>皮肤接触>呼吸吸入. 3 种途径中儿童和成人的日均暴露剂量排序均为 Mn>Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>As>Hg>Cd. 儿童和成人的致癌排序均为 As>Cr>Ni>Cd.

(3) 土壤重金属的致癌风险指数除了 As 元素外均小于致癌风险值范围 10^{-6} — 10^{-4} .

参考文献 (References)

- [1] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 539-546.
ZHANG G L, ZHU Y G, FU B J. Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environmental impacts[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(3): 539-546(in Chinese).
- [2] 陈杰, 陈晶中, 檀满枝. 城市化对周边土壤资源与环境的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(2): 72-76.
CHEN J, CHEN J Z, TAN M Z. Impact of urbanization on soil resource and environment of surrounding area[J]. China Population, Resources And Environment, 2002, 12(2): 72-76(in Chinese).
- [3] 邢艳帅, 乔冬梅, 朱桂芬, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(17): 208-214.
XING Y S, QIAO D M, ZHU G F, et al. Research progress of heavy pollution in soil and phytoremediation technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(17): 208-214(in Chinese).
- [4] 郑袁明, 余轲, 吴泓涛, 等. 北京城市公园土壤铅含量及其污染评价[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 418-424.
ZHENG Y M, YU K, WU H T, et al. Lead concentrations of soils in Beijing urban parks and their pollution assessment[J]. Geographical Research, 2002, 21(4): 418-424(in Chinese).
- [5] 刘玉燕, 刘敏, 刘浩峰. 城市土壤重金属污染特征分析[J]. 土壤通报, 2006, 31(1): 184-188.
LIU Y Y, LIU M, LIU H F. Analysis on characteristics of heavy metal pollution in urban soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 31(1): 184-188(in Chinese).
- [6] 黄静, 卢新卫, 翟雨翔. 西安市公园土壤重金属元素含量水平及风险评价[J]. 地质科技情报, 2009, 28(4): 127-130.
HUANG J, LU X W, ZHAI Y X. Heavy metals content and ecological risk assessment of soil in Xi'an urban parks[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(4): 127-130(in Chinese).
- [7] 孙先锋, 吕小明, 孙鹏. 西安市长乐公园土壤重金属含量的测定及污染评价[J]. 西安工程大学学报, 2008, 22(3): 339-342.
SUN X F, LV X M, SUN P. Measurement and evaluation on content of heavy metal pollution of soil in Xi'an Changle park[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2008, 22(3): 339-342(in Chinese).
- [8] 贾锐鱼, 朱万勇, 李楠, 等. 西安市公园土壤及灰尘中重金属污染与生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 316-320.
JIA R Y, ZHU W Y, LI N, et al. Heavy metal contents and ecological risk assessment of soil and dust in urban parks of Xi'an City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 316-320(in Chinese).
- [9] 徐甜甜, 孙先锋, 沈旭丰, 等. 西安市革命公园土壤重金属含量及污染评价[J]. 西安工程大学学报, 2011, 25(4): 523-526.
XU T T, SUN X F, SHEN X F, et al. Concentration determination and contamination evaluation for heavy metals in the soil of Geming park in Xi'an[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2011, 25(4): 523-526(in Chinese).
- [10] 孙先锋, 徐甜甜, 董亚朋, 等. 西安市兴庆宫公园土壤中重金属含量研究及污染评价[J]. 城市环境与城市生态, 2012, 25(1): 28-30.
SUN X F, XU T T, DONG Y P, et al. Concentration determination and contamination evaluation for heavy metals in soil of Xingqing park in Xi'an[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2012, 25(1): 28-30(in Chinese).
- [11] 徐甜甜. 西安市城市公园土壤重金属污染状况研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2012.
XU T T. The research of heavy metals pollution in the soil of Xi'an city park[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2012(in Chinese).
- [12] 康丹. 西安城市公园不同粒径土壤中重金属污染研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010.
KANG D. A study on heavy metal pollution in soil of different particle sizes in Xi'an city park[D]. Shaanxi Normal University, 2010(in Chinese).
- [13] 孙先锋, 徐甜甜, 王敏, 等. 西安市城墙内公园土壤重金属含量水平及污染评价[J]. 城市环境与城市生态, 2011, 24(3): 1-4.
SUN X F, XU T T, WANG M, et al. Concentration determination and contamination evaluation for heavy metals in soil of three parks inside

- wall of Xi'an City[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2011,24(3):1-4(in Chinese).
- [14] 史贵涛,陈振楼,许世远,等. 上海城市公园土壤及灰尘中重金属污染特征[J]. *环境科学*, 2007,28(2):238-242.
SHI G T, CHEN Z L, XU S Y, et al. Characteristics of heavy metal pollution in soil and dust of urban parks in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2007,28(2):238-242(in Chinese).
- [15] SHI G, CHEN Z, XU S, et al. Characteristics of heavy metal pollution in soil and dust of urban parks in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2007,28(2):238-242.
- [16] 巫和昕,胡雪峰,张国莹,等. 上海市宝山区土壤重金属含量及其分异特征[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2004,10(4):400-405.
WU H X, HU X F, ZHANG G Y, et al. Contents and differential characteristics of heavy metals in soils found in Baoshan district, Shanghai[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2004,10(4):400-405(in Chinese).
- [17] 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 T F. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in Shanghai urban fringe area[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2012(in Chinese).
- [18] 马光军,梁晶,方海兰,等. 上海市不同土地利用方式绿地土壤中 Cu、Zn、Pb 和 Cr 的污染评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2009,22(5):34-37.
MA G J, LIANG J, FANG H L, et al. Pollution assessment of Cu, Zn, Pb and Cr in urban green-belt soil of different land use types in Shanghai[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2009,22(5):34-37(in Chinese).
- [19] 左倬,王金凤,由文辉. 上海城市不同绿地类型土壤重金属污染研究[J]. *生态科学*, 2008,27(1):12-16.
ZUO Z, WANG J F, YOU W H. A study on heavy metal pollution in different greenbelts types of Shanghai[J]. *Ecological Science*, 2008,27(1):12-16(in Chinese).
- [20] 刘育红. 西宁市不同功能区土壤重金属含量及形态研究[J]. *土壤通报*, 2012,43(5):1253-1256.
LIU Y H. Contents and chemical forms of heavy metals in soils from different functional zones of Xining City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012,43(5):1253-1256(in Chinese).
- [21] 庞静. 北京耐土壤重金属污染城市绿化植物的筛选与评价[D]. 北京:北京林业大学, 2008.
PANG J. Selection and valuation of city landscape plants tolerant to heavy metal contamination in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008(in Chinese).
- [22] 陈潇霖,杨丹,胡迪青,等. 北京土壤重金属分布及评价——以五环以内为例[J]. *环境科学与技术*, 2012,35(12J):78-81.
CEHN X L, YANG D, HU D Q, et al. Beijing city soil heavy metal distribution and evaluation: Take inner 5th Ring road area for an example[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012,35(12J):78-81(in Chinese).
- [23] 韩东昱,龚庆杰,岑况. 北京市公园土壤铜、铅含量及化学形态分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2006,29(3):31-32.
HAN D Y, GONG Q J, CEN K. Concentration and chemical speciation of copper and Lead in soils of urban parks in Beijing[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006,29(3):31-32(in Chinese).
- [24] 吴建芝,王艳春,田宇,等. 北京市公园和道路绿地土壤重金属含量特征比较研究[J]. *北京园林*, 2016,32(117):31-37.
WU J Z, WANG Y C, TIAN Y, et al. Comparative study of heavy metal content in Beijing parks and road green spaces[J]. *Beijing Landscape Architecture*, 2016,32(117):31-37(in Chinese).
- [25] 韩东昱,岑况,龚庆杰. 北京市公园道路粉尘 Cu、Pb、Zn 含量及其污染评价[J]. *环境科学研究*, 2004,17(2):10-13.
HAN D Y, CEN K, GONG Q J. Cu, Pb, Zn contents in road dusts in parks and their pollution assessment in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004,17(2):10-13(in Chinese).
- [26] 鲁绍伟,高琛,杨新兵,等. 北京市不同污染区主要绿化树种对土壤重金属的富集能力[J]. *东北林业大学学报*, 2014,42(5):22-26.
LU S W, GAO C, YANG X B, et al. Main greening tree species on soil heavy metal enrichment capability in different contaminated area of Beijing[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014,42(5):22-26(in Chinese).
- [27] 田媛,郭希娟,刘效兰. 北京市不同功能区土壤重金属污染探究[J]. *环境科学与技术*, 2010,33(12F):83-86.
TIAN Y, GUO X J, LIU X L. Exploration on the pollution of topsoil heavy metal in the different areas of Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010,33(12F):83-86(in Chinese).
- [28] CHEN T B, ZHENG Y M, LEI M, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2005,60(4):542-551.
- [29] 李有文,王晶,巨天珍,等. 白银市不同功能区土壤重金属污染特征及其健康风险评价[J]. *生态学杂志*, 2017,36(5):1408-1418.
LI Y W, WANG J, JU T Z, et al. Heavy metal pollution characteristics and human health risk assessment in soils from different functional areas of Baiyin, Gansu, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017,36(5):1408-1418(in Chinese).
- [30] 钱翌,刘峰延. 青岛城市公园灰尘重金属的形态分布及健康风险评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2011,24(4):20-23.
QIAN Y, LIU Z Y. Chemical speciation of heavy metals and health risk assessment in dust of Qingdao Urban Parks[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2011,24(4):20-23(in Chinese).
- [31] 张丽. 淄博城区土壤及街道灰尘重金属地球化学研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2006.
ZHANG L. Geochemical study of heavy metal pollution in the soils and road dusts of Zibo city[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2006(in Chinese).
- [32] 刘申,刘凤枝,李晓华,等. 天津公园土壤重金属污染评价及其空间分析[J]. *生态环境学报*, 2010,19(5):1097-1102.
LIU S, LIU F Z, LI X H, et al. Pollution assessment and spatial analysis on soil heavy metals of park in Tianjin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010,19(5):1097-1102(in Chinese).

- [33] 段雪梅, 蔡焕兴, 巢文军. 南京市表层土壤重金属污染特征及污染来源[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(10): 31-34.
DUAN X M, CAI H X, CAO W J. Study on the characteristics and the origin of heavy metal pollution in different functional regions of Nanjing[J]. Environmental Sciences and Management, 2010, 35(10): 31-34 (in Chinese).
- [34] 王辛芝. 南京市公园绿地土壤性质及其变化特征[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
WANG X Z. The character and distribution of the greenbelt soil of Nanjing parks[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2006 (in Chinese).
- [35] 王焕华. 南京市不同功能城区表土重金属污染特点与微生物活性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2004.
WANG H H. A study on the characteristics of heavy metal pollution and microbial activity in different functional urban areas of Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004 (in Chinese).
- [36] 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.
WU X M, LI L Q, PAN G X, et al. Soil Pollution of Cu, Zn, Pb and Cd in different city zones of Nanjing[J]. Environmental Science, 2003, 24(3): 105-111 (in Chinese).
- [37] 于法展, 齐芳燕, 李保杰, 等. 徐州市城区公园绿地土壤重金属污染及其评价[J]. 城市环境与城市生态, 2009, 22(3): 20-23.
YU F Z, QI F Y, LI B J, et al. Heavy metal pollution estimation and investigation of soils in Xuzhou urban greenbelt[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2009, 22(3): 20-23 (in Chinese).
- [38] WANG G, LIU H Q, GONG Y, et al. Risk assessment of metals in urban soils from a typical industrial city, Suzhou, Eastern China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(9): 1-17.
- [39] 冉延平. 城市表层土壤重金属污染多元统计分析和污染评价[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(9): 5454-5458.
RAN Y P. Multivariate statistical analysis of heavy metals contamination in urban topsoil and pollution assessment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(9): 5454-5458 (in Chinese).
- [40] CAI Q, MO C, LI H Q, et al. Heavy metal contamination of urban soils and dusts in Guangzhou, South China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(2): 1095-1106.
- [41] 李永杰, 张宽义. 广州市公园土壤重金属含量特征及潜在生态危害评价[J]. 中国园艺文摘, 2012(11): 43-45.
LI Y J, ZHANG K Y. Character of content and contamination evaluation for heavy metal in the soil of Guangzhou parks[J]. Chinese Horticulture Abstract, 2012(11): 43-45 (in Chinese).
- [42] 陈海珍, 龚春生, 李文立, 等. 广州市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(8): 700-703.
CEHN H Z, GONG C S, LI W L, et al. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Guangzhou[J]. Journal of Environment and Health, 2010, 27(8): 700-703 (in Chinese).
- [43] 管东生, 陈玉娟, 阮国标. 广州城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): 93-96.
GUAN D S, CHEN Y J, RUAN G B. Study on heavy metal concentration and the impact of human activity on them in urban and suburb soils of Guangzhou[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2001, 40(4): 93-96 (in Chinese).
- [44] GUAN D S, PEART M R. Heavy metal concentrations in plants and soils at roadside locations and parks of urban Guangzhou[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(3): 495-502.
- [45] 林雯, 李吉跃, 粟娟. 广州市城市林地土壤重金属污染研究[J]. 广东林业科技, 2012, 28(1): 25-29.
LIN W, LI J Y, LI J. Study on urban forest soil heavy metal pollutions in Guangzhou[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2012, 28(1): 25-29 (in Chinese).
- [46] GU Y G, GAO Y P, LIN Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou[J]. Applied Geochemistry, 2016, 67: 52-58.
- [47] GU Y G, LIN Q, GAO Y P. Metals in exposed-lawn soils from 18 urban parks and its human health implications in southern China's largest city, Guangzhou[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 115: 122-129.
- [48] 胡静妹. 东莞市寮步镇各功能区土壤重金属含量测定与分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(32): 32-34.
HU J Z. Each functional area of soil heavy metal content determination and analysis of Liaobu Twon in Dongguan city[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(32): 32-34 (in Chinese).
- [49] 史正军, 吴冲, 卢瑛. 深圳市主要公园及道路绿地土壤重金属含量状况比较研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 133-136.
SHI Z J, WU C, LU Y. Comparative study on soil heavy metal content of urban green ground near parks and roads in Shenzhen city[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(1): 133-136 (in Chinese).
- [50] 王学锋, 杨丽云, 王克亚, 等. 新乡市区公园土壤重金属含量及其污染评价[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(4): 78-80.
WANG X F, YANG L Y, WANG K Y, et al. Assessment of heavy metal content and pollution in Xinxiang urban park[J]. Environment Pollution & Control, 2009, 31(4): 78-80 (in Chinese).
- [51] 李灿. 开封城市土壤性质、重金属污染及变化分析[D]. 开封: 河南大学, 2007.
LI C. The urban soil properties, heavy metal pollution and its changes in Kaifeng City[D]. Kaifeng: Henan University, 2007 (in Chinese).
- [52] 莫莉萍, 林清, 谢晓聪, 等. 南宁市公园绿地土壤重金属含量与潜在生态风险评价[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2011, 28(S1): 1-4.
MO L P, LIN Q, XIE X C, et al. Soil heavy metal content and potential ecological risk assessment of green land in Nanning park[J]. Journal of Guangxi Teachers Education University: Natural Science Edition, 2011, 28(S1): 1-4 (in Chinese).
- [53] 武玲珍. 基于土壤重金属的城市土壤环境质量评价研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
WU Z Z. Study on city soil environment quality evaluation method with heavy metals[D]. Chongqing: Southwest University, 2013 (in Chinese).

- [54] 韩丽, 曾剑, 张京京. 太原市公园土壤重金属污染研究[J]. 科学之友, 2011(17):160-162.
HAN L, ZENG J, ZHANG J. Study on soil heavy metal pollution in Taiyuan park[J]. Friend of Science Amateurs, 2011(17):160-162 (in Chinese).
- [55] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, 25(1):108-112.
GUO P, XIE Z L, LI J, et al. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(1):108-112 (in Chinese).
- [56] 钱力. 永康市城市表层土壤重金属污染现状及来源分析[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
QIAN L. Situation analysis and source identification of heavy metals pollution in the urban topsoil of Yongkang City[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2015 (in Chinese).
- [57] LU S G, BAI S Q. Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China[J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 60(1):1-12.
- [58] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(2):710-716.
WANG Y Q, BAI Y R, WANG J Y. Distribution of urban soil heavy metal and pollution evaluation in different functional zones of Yinchuan City[J]. Environmental Science, 2016, 37(2):710-716 (in Chinese).
- [59] 张一修, 王济, 张浩. 贵阳城区土壤重金属的空间分布特征及污染评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2011, 29(4):20-25.
ZHANG Y X, WANG J, ZHANG H. The distributive character and pollution assessment of heavy metals in urban soil of Guiyang[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2011, 29(4):20-25 (in Chinese).
- [60] 武永锋, 刘丛强, 涂成龙. 贵阳市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(3):254-257.
WU Y F, LIU C Q, TU C L. The heavy metal pollution in urban soils of Guiyang City and their potential ecological hazard assessment[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(3):254-257 (in Chinese).
- [61] 张一修, 王济, 张浩. 贵阳市区地表灰尘重金属污染分析与评价[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1):169-174.
ZHANG Y X, WANG J, ZHANG H. Pollution analysis and evaluation of heavy metals in urban dust in Guiyang[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1):169-174 (in Chinese).
- [62] 李晓燕, 曹益金, 齐乐, 等. 城市功能对贵阳市城区土壤重金属分布的影响[J]. 地球与环境, 2010, 38(4):421-427.
LI X Y, CAO Y J, QI L, et al. Influences of different urban functions on the distribution of heavy metals in soils of Guiyang[J]. Earth And Environment, 2010, 38(4):421-427 (in Chinese).
- [63] 王贵, 丛艳静, 曹霞. 包头公园土壤重金属形态分布特征及环境意义[J]. 西北农业学报, 2007, 16(6):273-276.
WANG G, CONG Y J, CAO X. Speciation distribution characteristics and environmental significance for heavy metals in the topsoil of Baotou parks[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2007, 16(6):273-276 (in Chinese).
- [64] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2013, 34(4):1561-1567.
GUO W, SUN W H, ZHAO R X, et al. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot[J]. Environmental Science, 2013, 34(4):1561-1567 (in Chinese).
- [65] 孙文惠. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2012.
SUN W H. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2012 (in Chinese).
- [66] 黄敏, 杨海舟, 余萃, 等. 武汉市土壤重金属积累特征及其污染评价[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4):135-139.
HUANG M, YANG H Z, YU C, et al. Accumulation characteristics and pollution evaluation of heavy metals in soils of Wuhan City[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4):135-139 (in Chinese).
- [67] 王亚宇. 乌鲁木齐市土壤重金属空间分布及行道树对重金属的富集特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008.
WANG Y Y. Space distribution and accumulations in roadside trees of heavy metal in urban soil of Urumqi City[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2008 (in Chinese).
- [68] 贾丽敏, 陈秀玲, 吕敏. 漳州市不同绿地功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 城市环境与城市生态, 2013, 26(3):7-11.
JIA L M, CHEN X L, LV M. Heavy metal contamination of soils and its evaluation in different greenbelt regions of Zhangzhou City[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2013, 26(3):7-11 (in Chinese).
- [69] 吕敏. 漳州市城市绿地土壤重金属污染特征研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
LV M. Research on characteristics of soil heavy metals pollution in greenbelt of Zhangzhou City[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013 (in Chinese).
- [70] 罗小三, 俞慎, 王毅杰, 等. 城市公园土壤中重金属的生物可给性及人体健康风险评价[C]. 第六届全国环境化学大会, 中国上海, 2011.
LUO X S, YU S, WANG Y J, et al. Bioavailability and human health risk assessment of heavy metals in soil in urban parks[C]. The 6th National Conference on Environmental Chemistry, 6th NCEC, Shanghai, China, 2011 (in Chinese).
- [71] LUO X S, DING J, XU B, et al. Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils[J]. Science of the Total Environment, 2012, 424(4):88-96.
- [72] 李方舟, 章臻, 张昭天, 等. 厦门岛内不同功能区土壤与灰尘重金属污染的特征及评估[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(2):719-724.
LI F Z, ZHAN Z, ZHANG Z T, et al. Analysis and evaluation of the soil and dust contamination by heavy metals in different functional zones on Xiamen[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(2):719-724 (in Chinese).
- [73] 李婷婷, 方红, 罗世祺. 福州市不同绿地功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 亚热带资源与环境学报, 2017, 12(1):46-52.
LI T T, FANG H, LUO S Q. Heavy metal contamination of soils and its evaluation in different greenbelt regions of Fuzhou City[J]. Journal

- of Subtropical Resources and Environment, 2017,12(1):46-52(in Chinese).
- [74] 夏浩东, 息朝庄, 戴塔根, 等. 长沙市公园土壤重金属调查与评价[J]. 广东微量元素科学, 2009,16(10):44-49.
XIA H D, XI C Z, DAI T G, et al. Investigation and evaluation on heavy metal in soil of Changsha Parks[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2009,16(10):44-49(in Chinese).
- [75] 陈丽莎, 陈志良, 肖举强, 等. 株洲市公园土壤重金属污染现状及评价[J]. 环境污染与防治, 2011,33(8):92-94.
CHEN L S, CHEN Z L, XIAO J Q, et al. Status and evaluation of soil heavy metal pollution in Zhuzhou City Park[J]. Environment Pollution & Control, 2011,33(8):92-94(in Chinese).
- [76] 卢德亮, 乔璐, 陈立新, 等. 哈尔滨市绿地土壤重金属污染特征及植物富集[J]. 林业科学, 2012,48(8):16-24.
LU D L, QIAO L, CHEN L X, et al. Soil pollution characteristics by heavy metals and the plant enrichment in green space of urban areas of Harbin[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012,48(8):16-24(in Chinese).
- [77] 陈立新, 赵淑苹, 段文标. 哈尔滨市不同绿地功能区土壤重金属污染及评价[J]. 林业科学, 2007,43(S1):65-71.
CHEN L X, ZHAO S P, DUAN W B. Heavy metal contamination of soils and its evaluation in different greenbelt region of Harbin[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007,43(S1):65-71(in Chinese).
- [78] 赵卓亚. 保定市绿地土壤重金属分布与评价研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
ZHAO Z Y. Study of distribution and assessment on heavy metals of greenland soil in Baoding City[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2009(in Chinese).
- [79] 赵卓亚, 王志刚, 毕拥国, 等. 保定市城市绿地土壤重金属分布及其风险评价[J]. 河北农业大学学报, 2009,32(2):16-20.
ZHAO Z Y, WANG Z G, BI Y G, et al. The distributions and risk assessment of heavy metals in the soils from different urban greenland region of Baoding City[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2009,32(2):16-20(in Chinese).
- [80] 张彩凤. 衡水市不同功能区土壤重金属含量调查[J]. 河北农机, 2017(9):54.
ZAHNG C F. Investigation of soil heavy metal content in different functional areas of Hengshui City[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2017(9):54(in Chinese).
- [81] 张志栋, 付亚星, 郭中领, 等. 石家庄市城区土壤剖面重金属含量分布特征[J]. 湖北农业科学, 2017,56(17):3234-3237.
ZAHNG Z D, FU Y X, GUO Z L, et al. Distribution characteristics of heavy metals in urban topsoil in Shijiazhuang City[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017,56(17):3234-3237(in Chinese).
- [82] 王明仕, 李晗, 王明娅, 等. 中国降尘重金属分布特征及生态风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2015,29(12):164-169.
WANG M S, LI H, WANG M Y, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment on dust heavy metals in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015,29(12):164-169(in Chinese).
- [83] ZHENG N, LIU J S, WANG Q C, et al. Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China[J]. Atmospheric Environment, 2010,44(27):3239-3245.
- [84] FERREIRA-BAPTISTA L, DE MIGUEL E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment[J]. Atmospheric Environment, 2005,39(25):4501-4512.
- [85] 常静, 刘敏, 李先华, 等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2009,29(5):548-554.
CAHNG J, LIU M, LI X H, et al. Primary research on health risk assessment of heavy metals in road dust of Shanghai[J]. China Environmental Science, 2009,29(5):548-554(in Chinese).
- [86] 谷蕾, 全致琦, 宋博, 等. 基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例[J]. 环境科学, 2012,33(10):3577-3584.
GU L, TONG Z Q, SONG B, et al. Health assessment of heavy metals in roadside soils at different operation time: A case study of Zhengzhou-Shangqiu section along the Lianyungang-Horgas highway[J]. Environmental Science, 2012,33(10):3577-3584(in Chinese).
- [87] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 等. RBCA 和 CLEA 模型在某重金属污染场地环境风险评价中的应用比较[J]. 环境科学研究, 2009,22(2):241-247.
SHI L Y, CAO Y Z, ZHANG J L, et al. Comparison of application of RBCA and CLEA model for health risk assessment of a heavy metal contaminated site[J]. Research of Environmental Sciences, 2009,22(2):241-247(in Chinese).
- [88] 李晗, 王明仕, 王明娅, 等. 中国降尘重金属健康风险评价[J]. 资源开发与市场, 2015,31(7):803-807.
LI H, WANG M S, WANG M Y, et al. Health risk assessment of heavy metals pollution of dust in China[J]. Resource Development & Market, 2015,31(7):803-807(in Chinese).
- [89] 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.
JI X F, ZHENG N, WANG Y, et al. Heavy metal contamination of urban soils in China: Recent advances and prospects[J]. Soils and Crops, 2016,5(1):42-47(in Chinese).
- [90] 王莹, 陈玉成, 李章平. 我国城市土壤重金属的污染格局分析[J]. 环境化学, 2012,31(6):763-770.
WANG Y, CHEN Y C, LI Z P. Contamination pattern of heavy metals in Chinese urban soils[J]. Environment Chemistry, 2012,31(6):763-770(in Chinese).
- [91] 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.
LI P, ZHANG B, WANG W, et al. Contamination and risk assessment of heavy metal in urban soils of China[J]. China Population, Resources And Environment, 2016,26(11):88-90(in Chinese).
- [92] 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.
GU Y G, GAO F D. Spatial distribution and health risk assessment of heavy metals in provincial capital cities, China[J]. Environment Chemistry, 2017,36(1):62-71(in Chinese).