

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.01.2016051705

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 Yangguang, GAO Fudai. Spatial distribution and health risk assessment of heavy metals in provincial capital cities, China[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 62-71.

## 我国省会城市土壤重金属含量分布与健康风险评价\*

谷阳光<sup>1\*\*</sup> 高富代<sup>2</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东省渔业生态环境重点实验室, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广州, 510300; 2. 甘肃省静宁县阳坡中学, 静宁, 743411)

**摘要** 收集了我国31个省会城市城区表层土壤重金属数据, 探讨了我国省会城市土壤重金属含量分布特征和健康风险. 结果表明, 我国省会城市重金属Cd、Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、Hg和As平均含量分别为0.43、44.75、66.85、32.48、39.59、116.15、0.21、12.44 mg·kg<sup>-1</sup>. 土壤重金属具有4种分布类型, 大部分重金属(Cd、Pb、Ni、Cu和Zn)含量较高城市分布在西南和南方沿海及东北长春等区域. 健康风险评价表明, 所有省会城市土壤重金属对儿童和成年人的非致癌风险是可以忽略的; 除南宁外经口摄入As对儿童为不可接受风险外(>10<sup>-4</sup>), 其余经口摄入致癌风险对儿童和成年人均介于可以接受范围内(10<sup>-6</sup>—10<sup>-4</sup>).

**关键词** 城市土壤, 重金属, 分布特征, 健康风险.

## Spatial distribution and health risk assessment of heavy metals in provincial capital cities, China

GU Yangguang<sup>1\*\*</sup> GAO Fudai<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province of China; Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou, 510300, China; 2. Yangpo Middle School of Jingning County, Jingning, 743411, China)

**Abstract:** Heavy metal concentrations in the urban soils of 31 provincial capital cities in China were collected based on the published papers to explore patterns of spatial distribution and evaluate human health risks. The results demonstrated that the average metal concentrations were 0.43 (Cd), 44.75 (Pb), 66.85 (Cr), 32.48 (Ni), 39.59 (Cu), 116.15 (Zn), 0.21 (Hg), 12.44 (As) mg·kg<sup>-1</sup>. Four patterns of spatial distribution were found, and the cities with relatively high concentrations of metals (Cd, Pb, Ni, Cu, and Zn) were distributed in the southwestern and southern coastal regions as well as Changchun region in northeastern China. Hazard Quotient value for each metal and Hazard Index values for all the metals indicated no significant risk of non-carcinogenic effects to children and adults in urban soils of 31 provincial capital cities in China. The probabilities of As posing carcinogenic risks to children were not acceptable in Nanning (>10<sup>-4</sup>), but were acceptable (10<sup>-6</sup>—10<sup>-4</sup>) to children and adults in the other cities.

**Keywords:** urban soil, heavy metals, spatial distribution, health risk.

2016年5月17日收稿(Received: May 17, 2016)

\* 广东省自然科学基金(2014A030310220)资助.

Supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (2014A030310220).

\*\* 通讯联系人, Tel: +86 20 89102080, Email: hydrobio@163.com

Corresponding author, Tel: +86 20 89102080, Email: hydrobio@163.com

近几十年来,我国城市化和工业的快速发展等频繁人类活动致使城市土壤遭受到强烈干扰,已造成土壤重金属污染<sup>[1-4]</sup>。土壤既是城市污染物的“汇”,也是城市生态系统的“源”<sup>[3, 5-6]</sup>。城市土壤直接紧密地接触密集的城市人群,与人们的生命健康息息相关<sup>[7-9]</sup>。在发达欧美等国家,城市土壤重金属的研究起步较早,已先后开展了城市土壤的特性、分类、恢复和健康风险评价等方面的研究<sup>[5,7,10]</sup>。我国省会城市是各省人类活动最密集区域,其土壤重金属也不同程度受到重金属污染<sup>[7,10-11]</sup>。尽管近十几年以来较广泛的开展了城市土壤中重金属含量分布、污染水平和污染评价等相关的研究工作<sup>[5,7]</sup>,但缺乏从一个全国尺度上对省会城市土壤重金属含量分布特征和健康风险评价相关研究。

本文通过对各省会城市土壤重金属文献分析的基础上,阐明我国省会城市土壤重金属含量分布特征,揭示各省会城市居民对土壤重金属暴露风险,以期在城市生态系统的健康发展提供科学决策依据。

## 1 材料方法 (Materials and methods)

### 1.1 数据收集和整理

城市环境重金属污染物主要有 Cd、Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、Hg 和 As,是潜在环境毒害性最强的重金属元素<sup>[3,12-14]</sup>。据此,从 2004—2016 年国内外公开发表的文献中,收集了我国 31 省(市)省会城市城区 0—20 cm 表层土壤上述 8 种重金属总量数据,省会城市分布见图 1。北京市 Hg 和 As 土壤样品采样时间为 2005 年 4 月—2013 年 12 月(240 份样品)<sup>[11]</sup>,其余重金属土壤样品采样时间为 2008 年 4—5 月(127 份样品)<sup>[15]</sup>;长春市 Ni 土壤样品采集时间未给出(39 份样品)<sup>[16]</sup>,其余重金属土壤样品采样时间为 2005 年(352 份样品)<sup>[17]</sup>;长沙市 Hg 土壤样品采样时间未给出(110 份样品)<sup>[18]</sup>,其余重金属土壤样品采样时间也未给出(295 份样品)<sup>[19]</sup>;成都市土壤样品采样时间为 2005 年(352 份样品)<sup>[20]</sup>;重庆市土壤样品采样时间未给出(48 份样品)<sup>[21]</sup>;福州市土壤样品采样时间未给出(179 份样品)<sup>[22]</sup>;广州市 Cr 土壤样品采样时间未给出(78 份样品)<sup>[23]</sup>,Hg 土壤样品采样时间未给出(425 份样品)<sup>[24]</sup>,As 土壤样品采样时间未给出(426 份样品)<sup>[25]</sup>,其余重金属土壤样品采样时间和样品数量均未给出<sup>[26]</sup>;贵阳市 Cr 和 Hg 土壤样品采集时间为 2002 年(133 份样品)<sup>[27]</sup>,其余重金属土壤样品采样时间未给出(50 份样品)<sup>[28]</sup>;哈尔滨市 Cd、Pb、Cu 和 Zn 土壤样品采样时间为 2008 年 10 月(样品数量未给出)<sup>[29]</sup>,其余重金属土壤样品采集时间为 2005 年 10 月(64 份样品)<sup>[10]</sup>;杭州市土壤样品采样时间和样品数量均为给出<sup>[30]</sup>;合肥市 Cr 土壤重金属样品采样时间为 2002 年(36 份样品)<sup>[10]</sup>,其余重金属土壤样品采样时间为 2005 年(151 份样品)<sup>[31]</sup>。

呼和浩特市 Cd 和 Hg 土壤样品采集时间为 2004 年(78 份样品)<sup>[10]</sup>,其余重金属土壤样品采样时间为 2011 年 7—9 月(78 份样品)<sup>[2]</sup>;济南市土壤样品采样时间未给出(438 份样品)<sup>[32]</sup>;昆明市土壤样品采样时间为 2007 年 3 月(样品数量未给出)<sup>[33]</sup>;兰州市土壤样品采样时间未给出(117 份样品)<sup>[34]</sup>;拉萨土壤样品采集时间为 2007 年(36 份样品)<sup>[10]</sup>;南昌市土壤样品采集时间为 2002 年(160 份样品)<sup>[10]</sup>;南京市土壤采样时间为 2001 年(91 份样品)<sup>[35]</sup>;南宁市 Hg 土壤样品采样时间为 2006 年(157 份样品)<sup>[10]</sup>,其余重金属土壤样品采集时间为 2002 年 10 月—2003 年 1 月(46 份样品)<sup>[36]</sup>;上海市土壤样品采集时间为未给出(273 份样品)<sup>[37]</sup>;沈阳市 Ni 土壤采样时间为 2011 年 9—10 月(样品数量未给出)<sup>[38]</sup>,其余重金属土壤样品采样时间未给出(93 份样品)<sup>[39]</sup>;石家庄市土壤样品采集时间未给出(220 份样品)<sup>[40]</sup>;太原市土壤样品采集时间为 2006 年 3—4 月(80 份样品)<sup>[41]</sup>;天津市土壤采集时间为 2008 年 6 月(70 份样品)<sup>[42]</sup>;乌鲁木齐土壤采样时间为 2007 年(56 份样品)<sup>[10]</sup>;武汉市 Ni、Hg 和 As 土壤样品采集时间为 2008 年 12 月—2009 年 8 月(样品数量未给出)<sup>[43]</sup>,其余重金属土壤样品采集时间为 2013 年 11 月(467 份样品)<sup>[44]</sup>;西安市土壤样品采集时间为 2012 年(50 份样品)<sup>[45]</sup>;西宁市土壤采集时间为 2007 年(28 份样品)<sup>[10]</sup>;银川市土壤采集时间未给出(80 份样品)<sup>[46]</sup>;郑州市土壤采集时间未给出(1014 份样品)<sup>[47]</sup>。

上述 31 省(市)会城市重金属数据主要是针对省(市)会城市城区居民居住区、城市绿地、商业区域、工业区、公路旁等土壤类型的表层土壤进行采样分析,能够代表各自省会城市城区表层土壤重金属污染状况。因上述文献提供的数据统计描述不尽相同,为便于数据统计分析,故收集的数据均为各城市

的平均值.

### 1.2 健康风险评估模型

儿童和成年人对土壤重金属暴露途径主要有经口摄取、呼吸吸入和皮肤接触等3种途径. 依据相关研究<sup>[48-49]</sup>, 上述3种暴露量可通过平均每日剂量(ADD)进行估算, 其计算公式如下(1)–(3).

$$\text{ADD}_{\text{摄取}} = \frac{C \times R_{\text{摄取}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$\text{ADD}_{\text{吸入}} = \frac{C \times R_{\text{吸入}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$\text{ADD}_{\text{皮肤}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{SL} \times \text{ABF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中,  $C$  为土壤中重金属浓度;  $R_{\text{摄取}}$  为每日摄取率;  $R_{\text{吸入}}$  为每日吸入率;  $\text{EF}$  为暴露频率;  $\text{ED}$  为暴露时长;  $\text{BW}$  为平均体重;  $\text{AT}$  为平均时间;  $\text{PEF}$  为颗粒物释放因子;  $\text{SA}$  为皮肤暴露面积;  $\text{SL}$  为皮肤粘附因子;  $\text{ABF}$  为皮肤吸附因子.

土壤重金属对人体主要有非致癌风险和致癌风险, 两种风险可分别通过(4)和(5)的公式进行计算:

$$\text{HI} = \sum \text{HQ}_i = \sum \frac{\text{ADI}_{ij}}{\text{RfD}_{ij}} \quad (4)$$

$$\text{CR} = \sum \text{ADI}_{ij} \times \text{SF}_{ij} \quad (5)$$

式中,  $\text{HI}$  为非致癌风险指数;  $i$  为某一个重金属;  $\text{HQ}_i$  为非致癌重金属  $i$  的单项健康风险指数;  $\text{ADD}_{ij}$  为非致癌重金属  $i$  第  $j$  种暴露途径的日均暴露量;  $\text{RfD}_{ij}$  为非致癌重金属  $i$  第  $j$  种暴露途径的参考剂量;  $\text{CR}$  为致癌风险;  $\text{SF}_{ij}$  为致癌重金属  $i$  第  $j$  种暴露途径的斜率系数. 当  $\text{HQ}$  或  $\text{HI} < 1$  时, 表示非致癌健康风险可以接受; 当其  $> 1$  时, 表示存在非致癌健康风险. 美国环保署 (US EPA) 推荐的  $\text{CR}$  的土壤治理标准为  $10^{-6}$ , 也有研究认为当其在  $10^{-6} - 10^{-4}$  之间时也是可以接受的<sup>[1, 9, 42]</sup>. 上述(1)–(5)公式中的参数值见表1和表2.

表1 健康风险评估模型暴露参数

Table 1 Exposure parameters for the health risk assessment models

参数 Parameters	单位 Units	数值 Data		参考文献 References
		儿童 Children	成年 Adults	
$R_{\text{吸入}}$	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	200	100	[50]
$\text{EF}$	$\text{d} \cdot \text{year}^{-1}$	350	350	[50]
$\text{ED}$	years	6	25	[50]
$\text{BW}$	kg	15.9	56.8	[50]
$\text{AT}$	d	26280 (非致癌); 9125 (致癌)		[50]
$R_{\text{摄取}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	7.5	14.5	[50]
$\text{PEF}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}$	$1.36 \times 10^9$	$1.36 \times 10^9$	[51]
$\text{SA}$	$\text{cm}^2$	2,800	5,700	[51]
$\text{SL}$	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.2	0.07	[50]
$\text{ABF}$	无	0.001 (非致癌); 0.01 (致癌)		[52]

### 1.3 健康风险评估不确定性分析方法

不确定性分析按照我国环保部《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)进行分析. 依据该导则, 本研究采用暴露风险贡献率来进行不确定性分析, 其计算公式如下:

单一污染物经不同暴露途径非致癌和致癌风险贡献率, 分别采用公式(6)和公式(7)计算:

$$\text{PHQ}_i = \frac{\text{HQ}_i}{\text{HI}_n} \times 100\% \quad (6)$$

$$PCR_i = \frac{CR_i}{CR_n} \times 100\% \quad (7)$$

式中,  $PHQ_i$  单一污染物经第  $i$  种暴露途径非致癌风险贡献率;  $HQ_i$  单一污染物经第  $i$  种暴露途径的危害商;  $HI_n$  土壤中单一污染物(第  $n$  种)经所有暴露途径的危害指数;  $PCR_i$  为单一污染物经第  $i$  种暴露途径致癌风险贡献率;  $CR_i$  为单一污染物经第  $i$  种暴露途径的致癌风险;  $CR_n$  土壤中单一污染物(第  $n$  种)经所有暴露途径的总致癌风险。

表 2 土壤重金属不同暴露途径的 RfD 和 SF

Table 2 Reference dose for non-carcinogenic metals and slope factors for carcinogenic metals

重金属 Metals	RfD/(mg·(kg·d) <sup>-1</sup> )			SF/(kg·d)·mg <sup>-1</sup> )			参考文献 References
	经口摄入 Ingestion	呼吸吸入 Inhalation	皮肤接触 Dermal	经口摄入 Ingestion	呼吸吸入 Inhalation	皮肤接触 Dermal	
Cd	1.00×10 <sup>-3</sup>	1.00×10 <sup>-5</sup>	1.00×10 <sup>-5</sup>	n.a	6.30	n.a	[1]
Pb	3.50×10 <sup>-3</sup>	3.52×10 <sup>-3</sup>	5.25×10 <sup>-4</sup>	n.a	n.a	n.a	[1]
Cr	3.00×10 <sup>-3</sup>	2.86×10 <sup>-5</sup>	6.00×10 <sup>-5</sup>	n.a	4.20×10 <sup>1</sup>	n.a	[1]
Ni	2.00×10 <sup>-2</sup>	2.06×10 <sup>-2</sup>	5.40×10 <sup>-3</sup>	n.a	8.40×10 <sup>-1</sup>	n.a	[1]
Cu	4.00×10 <sup>-2</sup>	4.02×10 <sup>-2</sup>	1.20×10 <sup>-2</sup>	n.a	n.a	n.a	[1]
Zn	3.00×10 <sup>-1</sup>	3.00×10 <sup>-1</sup>	6.00×10 <sup>-2</sup>	n.a	n.a	n.a	[1]
Hg	3.00×10 <sup>-4</sup>	8.57×10 <sup>-5</sup>	2.10×10 <sup>-5</sup>	n.a	n.a	n.a	[53]
As	3.00×10 <sup>-4</sup>	1.23×10 <sup>-4</sup>	1.23×10 <sup>-4</sup>	1.50	1.51×10 <sup>1</sup>	3.66	[53, 54]

n.a: 没有数据, not available.

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 重金属的含量

我国省会城市土壤中重金属 Cd、Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、Hg 和 As 的含量范围分别介于 0.09—3.22 mg·kg<sup>-1</sup>、11.63—116.76 mg·kg<sup>-1</sup>、20.94—109.94 mg·kg<sup>-1</sup>、15.90—73.50 mg·kg<sup>-1</sup>、17.64—111.25 mg·kg<sup>-1</sup>、45.60—301.40 mg·kg<sup>-1</sup>、0.02—0.67 mg·kg<sup>-1</sup> 和 3.82—23.20 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值分别为 0.43、44.75、66.85、32.48、39.59、116.15、0.21、12.44 mg·kg<sup>-1</sup>; 8 种重金属含量大小顺序为: Zn>Cr>Pb>Cu>Ni>As>Cd>Hg.

中国环境监测总站于 1990 年发布了我国土壤元素背景值<sup>[55]</sup>. 因收集的数据来源于 0—20 cm 的表层土壤, 故选取 A 层土壤重金属背景值作为我国城市土壤的背景值. 采用单样本 t 检验, 将研究的 31 个省会城市的 8 种重金属与其对应的元素背景值进行比较发现 Cd、Pb、Ni、Cu、Zn 和 Hg 的含量显著高于其背景值 ( $P<0.01$ ), 表明我国省会城市很可能已受到上述 6 种重金属的污染.

### 2.2 重金属的分布特征

Cd、Pb、Ni、Cu 和 Zn 等 5 种重金属含量较高区域主要分布在西南和南方沿海城市及东北长春等区域; Cr 含量较高区域主要分布在我国中部地区, 最高区域含量在昆明等城市; Hg 的含量较高区域出现在西南的贵阳、长江口的上海和珠江口的广州等城市; As 的最高区域出现在西部城市拉萨、西南城市南宁和昆明、东北沈阳和长春等城市和区域(图 1).

东北是我国重工业基地, 已有的研究表明东北主要城市已受到 Cd、Cu、Pb 和 Zn 等重金属的污染<sup>[17, 38, 56]</sup>. 西南地区是我国主要矿产分布区, 近几十年来矿产资源的开发, 可能是导致该区域的重金属含量也较高, 全国农田土壤调查也表明该区域重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Cr 含量最高<sup>[33, 57]</sup>. 东部沿海城市是特别是我国经济发达城市, 其城市重金属污染主要是自身和周边城市重金属污染、地表径流和大气沉降等因素而导致的<sup>[3, 4, 37, 58-59]</sup>. 较高 As 的含量出现在西部区域拉萨可能与其土壤高背景有关, 还有待进一步研究.

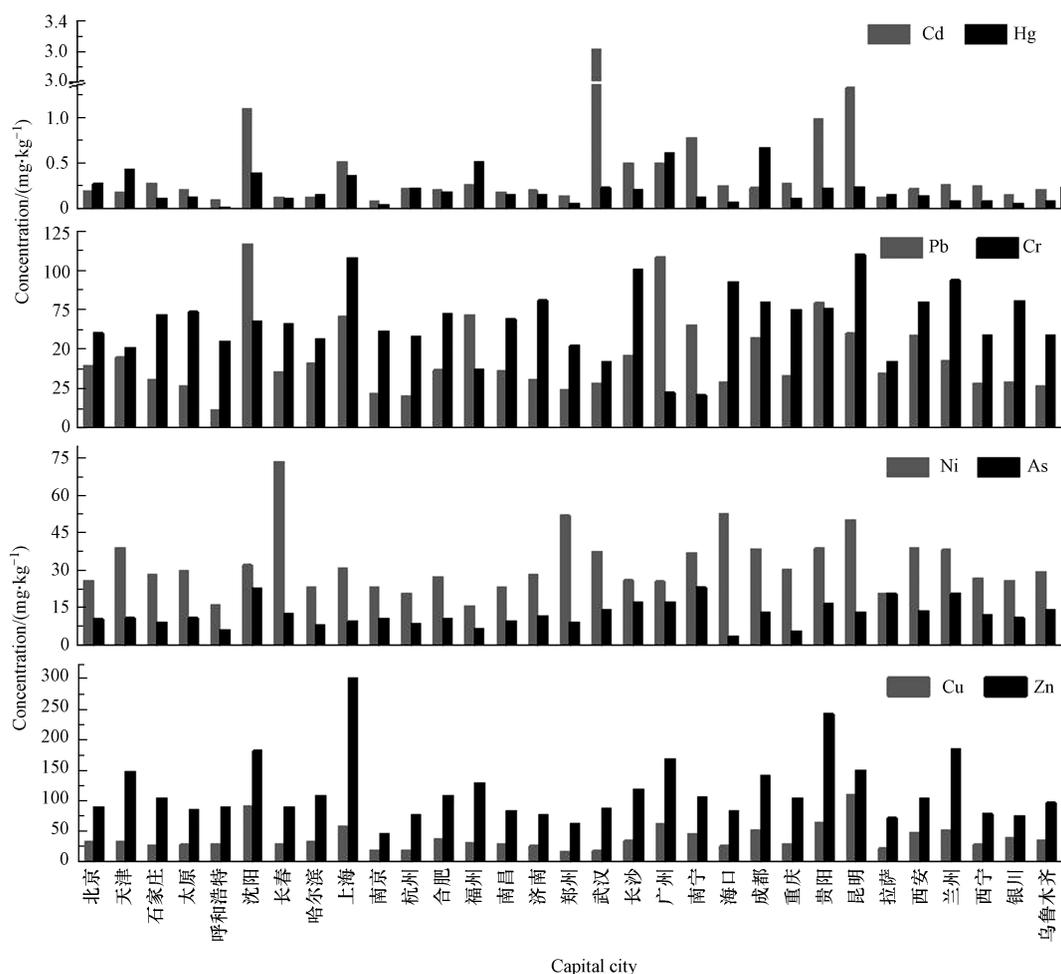


图 1 我国省会城市土壤重金属分布

Fig.1 Heavy metal distributions in urban soils of Chinese provincial cities

### 2.3 健康风险评价

8 种重金属对儿童和成年人的非致癌暴露风险 HQ 的平均值、中位值、最小值和最大值见表 3.8 种重金属对儿童的暴露风险 HQ 均大于其对成年人单个重金属 HQ 在儿童和成年人大小顺序均为:  $Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Cd > Hg$ . HQ 值在各省会城市和两类人群中均小于 1, 表明单个重金属对两类人群的风险可以忽略. 8 种重金属对儿童和成年人的综合非致癌风险 HI 值分别介于  $1.84 \times 10^{-4}$ — $5.85 \times 10^{-4}$  和  $1.07 \times 10^{-4}$ — $3.42 \times 10^{-4}$  之间. 在 31 个省会城市中, 儿童的 HI 值均大于成年 HI 值, 较高 HI 值出现在沈阳、上海、贵阳和昆明, 但各省会城市 HI 均小于 1 (见图 2), 也表明 8 种重金属的非致癌风险也是可以接受的.

致癌重金属对儿童和成年人的致癌暴露风险 CR 的平均值、中位值、最小值和最大值见表 4. 4 种致癌重金属儿童和成年呼吸吸入致癌风险大小顺序均为:  $Cr > As > Ni > Cd$ , 它们 CR 值均显著小于  $10^{-6}$ . 省会城市除南宁市经口摄入 As 对儿童为不可接受风险外, 其余经口摄入致癌风险对儿童和成年人均介于可以接受范围内 ( $10^{-6}$ — $10^{-4}$ ) (图 3); 除海口市皮肤接触 As 对成年人小于  $10^{-6}$ , 其余皮肤接触致癌风险对儿童和成年人也均介于可以接受范围内 ( $10^{-6}$ — $10^{-4}$ ) (图 3). 尽管绝大部分城市致癌风险处于有关专家推荐的可接受范围<sup>[9, 11, 54, 60]</sup>, 但根据 US EPA 推荐的标准  $10^{-6}$ , 我国大部分城市土壤 As 污染都应该引起重视, 尤其是南宁市. 目前只有 As 的摄入和皮肤接触致癌斜率, 因此本研究中只考虑 As 的摄入和皮肤接触致癌风险, 没有考虑其余 3 种致癌重金属摄入和皮肤接触风险. 据此, 省会城市土壤重金属致癌风险可能比实际评估具有更大的致癌风险.

表 3 单个重金属非致癌风险 HQ 值统计描述

Table 3 Descriptive statistics of Hazard Quotient (HQ) value for each metal

暴露人群 Exposed population	统计结果 Basic statistics	HQ							
		Cd	Pb	Cr	Ni	Cu	Zn	Hg	As
儿童	平均值	$4.35 \times 10^{-7}$	$4.51 \times 10^{-5}$	$6.74 \times 10^{-5}$	$3.27 \times 10^{-5}$	$3.99 \times 10^{-5}$	$1.17 \times 10^{-4}$	$2.09 \times 10^{-7}$	$1.25 \times 10^{-5}$
	标准差	$6.05 \times 10^{-7}$	$2.47 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-5}$	$2.13 \times 10^{-5}$	$5.46 \times 10^{-5}$	$1.66 \times 10^{-7}$	$4.89 \times 10^{-6}$
	中位值	$2.27 \times 10^{-7}$	$3.68 \times 10^{-5}$	$6.84 \times 10^{-5}$	$2.98 \times 10^{-5}$	$3.33 \times 10^{-5}$	$1.05 \times 10^{-4}$	$1.52 \times 10^{-7}$	$1.12 \times 10^{-5}$
	最小值	$9.07 \times 10^{-8}$	$1.17 \times 10^{-5}$	$2.11 \times 10^{-5}$	$1.60 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-5}$	$4.60 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-8}$	$3.85 \times 10^{-6}$
	最大值	$3.25 \times 10^{-6}$	$1.18 \times 10^{-4}$	$1.11 \times 10^{-4}$	$7.41 \times 10^{-5}$	$1.12 \times 10^{-4}$	$3.04 \times 10^{-4}$	$6.74 \times 10^{-7}$	$2.34 \times 10^{-5}$
成年	平均值	$2.54 \times 10^{-7}$	$2.63 \times 10^{-5}$	$3.93 \times 10^{-5}$	$1.91 \times 10^{-5}$	$2.33 \times 10^{-5}$	$6.83 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-7}$	$7.32 \times 10^{-6}$
	标准差	$3.54 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-5}$	$1.28 \times 10^{-5}$	$7.12 \times 10^{-6}$	$1.24 \times 10^{-5}$	$3.18 \times 10^{-5}$	$9.70 \times 10^{-8}$	$2.86 \times 10^{-6}$
	中位值	$1.32 \times 10^{-7}$	$2.15 \times 10^{-5}$	$4.00 \times 10^{-5}$	$1.74 \times 10^{-5}$	$1.94 \times 10^{-5}$	$6.11 \times 10^{-5}$	$8.89 \times 10^{-8}$	$6.53 \times 10^{-6}$
	最小值	$5.30 \times 10^{-8}$	$6.84 \times 10^{-6}$	$1.23 \times 10^{-5}$	$9.36 \times 10^{-6}$	$1.04 \times 10^{-5}$	$2.68 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-8}$	$2.25 \times 10^{-6}$
	最大值	$1.90 \times 10^{-6}$	$6.87 \times 10^{-5}$	$6.47 \times 10^{-5}$	$4.33 \times 10^{-5}$	$6.55 \times 10^{-5}$	$1.77 \times 10^{-4}$	$3.94 \times 10^{-7}$	$1.37 \times 10^{-5}$

表 4 重金属致癌风险 CR 值统计描述

Table 4 Descriptive statistics of carcinogenic risk (CR) for each metal

暴露人群 Exposed population	统计结果 Basic statistics	Cd <sub>吸入</sub>	Cr <sub>吸入</sub>	Ni <sub>吸入</sub>	As <sub>吸入</sub>	As <sub>摄入</sub>	As <sub>皮肤</sub>
儿童	平均值	$2.17 \times 10^{-16}$	$2.24 \times 10^{-13}$	$2.18 \times 10^{-15}$	$1.50 \times 10^{-14}$	$5.40 \times 10^{-5}$	$3.69 \times 10^{-6}$
	标准差	$3.02 \times 10^{-16}$	$7.30 \times 10^{-14}$	$8.10 \times 10^{-16}$	$5.84 \times 10^{-15}$	$2.11 \times 10^{-5}$	$1.44 \times 10^{-6}$
	中位值	$1.13 \times 10^{-16}$	$2.28 \times 10^{-13}$	$1.98 \times 10^{-15}$	$1.34 \times 10^{-14}$	$4.82 \times 10^{-5}$	$3.29 \times 10^{-6}$
	最小值	$4.53 \times 10^{-17}$	$7.02 \times 10^{-14}$	$1.07 \times 10^{-15}$	$4.60 \times 10^{-15}$	$1.66 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-6}$
	最大值	$1.62 \times 10^{-15}$	$3.69 \times 10^{-13}$	$4.93 \times 10^{-15}$	$2.80 \times 10^{-14}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$6.88 \times 10^{-6}$
成年	平均值	$4.90 \times 10^{-16}$	$5.05 \times 10^{-13}$	$4.91 \times 10^{-15}$	$3.38 \times 10^{-14}$	$3.15 \times 10^{-5}$	$3.07 \times 10^{-6}$
	标准差	$6.81 \times 10^{-16}$	$1.65 \times 10^{-13}$	$1.83 \times 10^{-15}$	$1.32 \times 10^{-14}$	$1.23 \times 10^{-5}$	$1.20 \times 10^{-6}$
	中位值	$2.55 \times 10^{-16}$	$5.13 \times 10^{-13}$	$4.48 \times 10^{-15}$	$3.02 \times 10^{-14}$	$2.81 \times 10^{-5}$	$2.74 \times 10^{-6}$
	最小值	$1.02 \times 10^{-16}$	$1.58 \times 10^{-13}$	$2.40 \times 10^{-15}$	$1.04 \times 10^{-14}$	$9.67 \times 10^{-6}$	$9.42 \times 10^{-7}$
	最大值	$3.65 \times 10^{-15}$	$8.31 \times 10^{-13}$	$1.11 \times 10^{-14}$	$6.31 \times 10^{-14}$	$5.87 \times 10^{-5}$	$5.72 \times 10^{-6}$

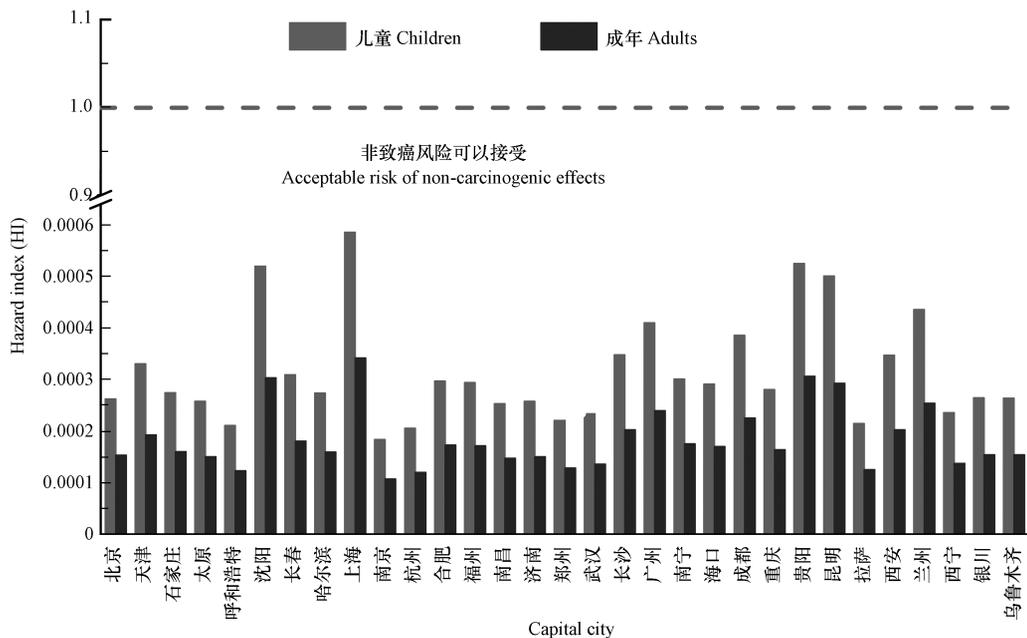


图 2 31 个省会城市土壤重金属 HI 值

Fig.2 Hazard index (HI) of non-carcinogenic effects in soils in 31 provincial cities of China

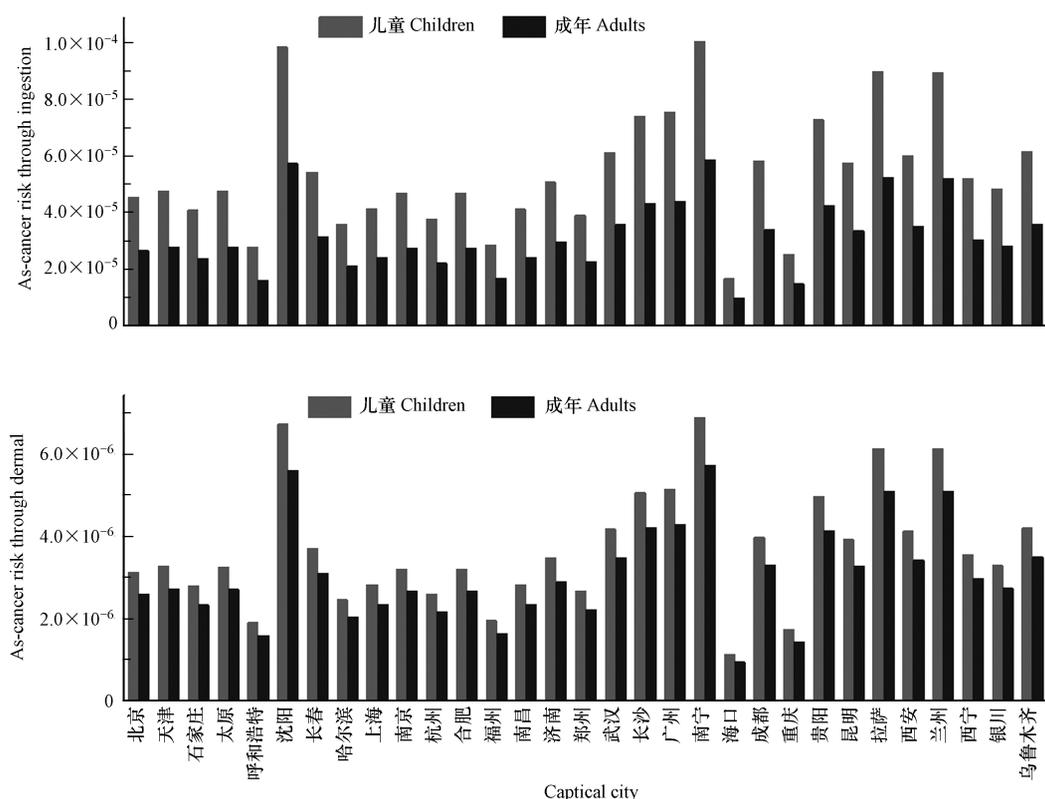


图3 31个省会城市土壤As经口摄入和皮肤接触致癌风险

Fig.3 Carcinogenic risks of As ingestion and dermal contact in soils in 31 provincial cities of China

#### 2.4 健康风险评价不确定性分析

在非致癌风险贡献率方面,Cd呼吸吸入暴露风险贡献率介于 $2.15 \times 10^{-9}$ — $7.62 \times 10^{-9}$ ,经口摄入贡献率介于 $71.48 \times 10^{-10}$ — $78.12 \times 10^{-10}$ ,皮肤接触贡献率介于 $21.88 \times 10^{-2}$ — $28.52 \times 10^{-2}$ .其余7种重金属呼吸吸入暴露风险贡献率介于 $2.65 \times 10^{-11}$ (Ni)— $7.54 \times 10^{-9}$ (Cr),经口摄入暴露风险贡献率介于 $88.37 \times 10^{-2}$ (Cr)— $99.04 \times 10^{-2}$ (As),皮肤接触贡献率介于 $0.68 \times 10^{-2}$ (As)— $12.28 \times 10^{-2}$ (Cr).

本研究中的致癌重金属Cd、Cr、Ni、As中,因Cd、Cr、Ni只能计算呼吸途径的致癌风险,故风险贡献率不予计算.As呼吸吸入暴露风险贡献率介于 $2.60 \times 10^{-10}$ — $9.78 \times 10^{-10}$ ,平均值为 $6.19 \times 10^{-10}$ ;As经口摄入暴露风险贡献率介于 $91.13 \times 10^{-2}$ — $93.60 \times 10^{-2}$ ,平均值为 $92.37 \times 10^{-2}$ ;As皮肤接触暴露风险贡献率介于 $6.40 \times 10^{-2}$ — $8.87 \times 10^{-2}$ ,平均值为 $7.63 \times 10^{-2}$ .

### 3 结论(Conclusion)

(1)我国省会城市土壤中8种重金属含量的大小顺序为 $Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Cd > Hg$ ;Cd、Pb、Ni、Cu、Zn和Hg的含量显著高于其背景值( $P < 0.01$ ),表明我国省会城市很可能已受到上述6种重金属的污染.

(2)Cd、Pb、Ni、Cu和Zn等5种重金属含量较高区域主要分布在西南和南方沿海城市及东北长春等区域;Cr含量较高区域主要分布在我国中部地区,Hg的含量较高区域出现在西南的贵阳、长江口的上海和珠江口的广州等城市;As的最高区域出现在西部城市拉萨、西南城市昆明和东北长春等城市和区域.

(3)在31个省会城市中,儿童的HI值均大于成年HI值,各省会城市HI均小于1,也表明8种重金属的非致癌风险也是可以接受的;4种致癌重金属儿童和成年呼吸吸入致癌风险大小顺序均为:Cr>As>Ni>Cd,它们CR值均明显小于 $10^{-6}$ .省会城市除南宁经口摄入As对儿童为不可接受风险外,其余经口摄入致癌风险对儿童和成年人均介于可以接受范围内( $10^{-6}$ — $10^{-4}$ ),尽管绝大部分城市致癌风险处于

有关专家推荐的可接受范围( $10^{-6}$ — $10^{-4}$ ),但根据 US EPA 推荐的标准  $10^{-6}$ ,我国大部分城市土壤 As 污染都应该引起重视,尤其是南宁市。

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 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]. *环境化学*, 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 Chemistry*, 2013, 34(4): 1561-1567 (in Chinese).
- [ 3 ] LUO X S, YU S, ZHU Y G, et al. Trace metal contamination in urban soils of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 421-422:17-30.
- [ 4 ] CHEN H Y, TENG Y G, LU S J, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 512-513:143-153.
- [ 5 ] 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]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(6): 763-770 (in Chinese).
- [ 6 ] HAO L B, TIAN M, ZHAO X Y, et al. Spatial distribution and sources of trace elements in surface soils, Changchun, China; Insights from stochastic models and geostatistical analyses [J]. *Geoderma*, 2016, 273:54-63.
- [ 7 ] WEI B G, YANG L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. *Microchemical Journal*, 2010, 94(2): 99-107.
- [ 8 ] 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.  
HE L L, LI D M, WU G. Heavy metal contamination of urban soils in China; State and prospect [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1210-1216 (in Chinese).
- [ 9 ] GU Y G, GAO Y P, QIN L. 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, 67:52-68.
- [ 10 ] CHENG H X, LI M, ZHAO C D, et al. Overview of trace metals in the urban soil of 31 metropolises in China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139:31-52.
- [ 11 ] CHEN H Y, TENG Y G, LU S J, et al. Source apportionment and health risk assessment of trace metals in surface soils of Beijing metropolitan, China [J]. *Chemosphere*, 2016, 144:1002-1011.
- [ 12 ] 何玉生. 海口城市土壤重金属污染特征与生态风险评估 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(2): 421-428.  
HE Y S. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Haikou urban soils [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2): 421-428 (in Chinese).
- [ 13 ] 孟紫强. 环境毒理学 [M]. 中国环境科学出版社, 2000.  
MENG Z Q. *Environmental Toxicology*[M]. China Environmental Science Press, 2000(in Chinese).
- [ 14 ] GRANERO S, DOMINGO J L. Levels of metals in soils of Alcalá de Henares, Spain; Human health risks [J]. *Environment International*, 2002, 28(3): 159-164.
- [ 15 ] XIA X H, CHEN X, LIU R M, et al. Heavy metals in urban soils with various types of land use in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2-3): 2043-2050.
- [ 16 ] GUO P, XIE Z L, LI J, et al. Relationships between fractionations of Pb, Cd, Cu, Zn and Ni and Soil properties in urban soils of Changchun, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2005, 15(2): 179-185.
- [ 17 ] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市城区表层土壤重金属污染来源解析 [J]. *城市环境与城市生态*, 2009, 22(5): 29-33.  
YANG Z P, LU W X, LIU X R, et al. Sources identification of heavy metals in urban soil of Changchun base on principal component analysis [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2009, 22(5): 29-33 (in Chinese).
- [ 18 ] 周涛, 息朝庄, 戴塔根, 等. 湖南长沙城市土壤地质环境综合评价 [J]. *广东微量元素科学*, 2008, 15(6): 32-38.  
ZHOU T, XI Z Z, DAI T G, et al. Comprehensive assessment of urban geological environment in Changsha City [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2008, 15(6): 32-38 (in Chinese).
- [ 19 ] 龙永珍, 戴塔根, 邹海洋. 长沙、株洲、湘潭地区土壤重金属污染现状及评价 [J]. *地球与环境*, 2008, 36(3): 231-236.  
LONG Y Z, DAI T G, ZOU H Y. The status quo and evaluation of heavy metal pollution of soils in the Changsha, Zhuzhou and Xiangtan areas [J]. *Earth and Environment*, 2008, 36(3): 231-236 (in Chinese).
- [ 20 ] YANG Z P, LU W X, LONG Y Q, et al. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 108(1): 27-38.
- [ 21 ] 李章平, 陈玉成, 杨学春, 等. 重庆市主城区土壤重金属的潜在生态危害评价 [J]. *西南农业大学学报*, 2006, 28(2): 227-230.  
LI Z P, CHEN Y C, YANG X C, et al. Assessment of potential ecological hazard of heavy metals in urban soils in Chongqing City [J].

- Journal of Southwest Agriculture University (Natural Science), 2006, 28(2): 227-230(in Chinese).
- [22] 陈华英. 福州城市土壤中铜等 13 种元素的分布特征 [J]. 福建地质, 2008, 27(2): 211-218.  
CHEN H Y. The distributional characteristics of Cu and else 13 kinds of elements in city soil of Fuzhou [J]. Geology of Fujian, 2008, 27(2): 211-218(in Chinese).
- [23] CAI Q Y, MO C H, 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.
- [24] 尹伟, 卢瑛, 李军辉, 等. 广州城市土壤汞的分布特征及污染评价 [J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1185-1188.  
YIN W, LU Y, LI J H, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of mercury in urban soils of Guangzhou [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 1185-1188 (in Chinese).
- [25] 卢瑛, 尹伟, 张波, 等. 广州市土壤砷的含量及其污染评价 [J]. 安全与环境学报, 2010, 10(1): 110-113.  
LU Y, YIN W, ZHANG B, et al. Concentration of As in the urban soil in Guangzhou and its contamination assessment [J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(1): 110-113 (in Chinese).
- [26] LU Y, ZHU F, CHEN J, et al. Chemical fractionation of heavy metals in urban soils of Guangzhou, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 134(1): 429-439.
- [27] 王济. 贵阳市表层土壤重金属污染元素环境地球化学基线研究 [D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 2004.  
WANG J. Study of environmental geochemical baseline of pollutional heavy metals in surficial soil of Guiyang, Guizhou [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004(in Chinese).
- [28] LI X Y, CAO Y J, QI L, et al. The distribution characteristics of heavy metals in Guiyang urban soils [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2012, 31(2): 174-180.
- [29] 张久明, 迟凤琴, 宿庆瑞, 等. 哈尔滨市城市土壤重金属空间分布特征及相关分析 [J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(7): 56-61.  
ZHANG J M, CHI F Q, SU Q R, et al. Study on spatial variability of soil heavy metal in Harbin building area [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(7): 56-61 (in Chinese).
- [30] 余世清, 杨强. 杭州城市土壤重金属污染研究进展及展望 [J]. 环境科学与管理, 2011, 36(4): 44-49.  
YU S Q, YANG Q. Heavy metal contamination of urban soils in Hangzhou: Research and prospect [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(4): 44-49 (in Chinese).
- [31] 李增福, 朱继业, 王腊春. 合肥市城市土壤重金属元素含量及空间分布特征 [J]. 城市环境与城市生态, 2009, 22(3): 24-27.  
LI Z F, ZHU J Y, WANG L C. Heavy metal contents and their spatial distribution in urban soil of Hefei City [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2009, 22(3): 24-27 (in Chinese).
- [32] 代杰瑞, 祝德成, 庞绪贵, et al. 济南市土壤元素地球化学特征及环境质量 [J]. 中国地质, 2015, 42(1): 308-316.  
DAI R J, ZHU D C, PANG X G, et al. Geochemical characteristics and environmental quality of soil elements in Jinan City [J]. Geology in China, 2015, 42(1): 308-316 (in Chinese).
- [33] 缪瑞琪, 燕永锋, 白燕, 等. 昆明市土壤重金属污染评价 [J]. 地球与环境, 2015, 43(5): 536-539.  
MIU R Q, YAN Y F, BAI Y, et al. Assessment of heavy metal contamination of soil in Kunming city, China [J]. Earth and Environment, 2015, 43(5): 536-539 (in Chinese).
- [34] WANG B, XIA D S, YU Y, et al. Magnetic records of heavy metal pollution in urban topsoil in Lanzhou, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(3): 384-395.
- [35] 黄顺生, 吴新民, 颜朝阳, 等. 南京城市土壤重金属含量及空间分布特征 [J]. 城市环境与城市生态, 2007, 20(2): 1-4.  
HUANG S S, WU X M, YAN C Y, et al. Heavy metal concentrations and their spatial distribution in urban soils of Nanjing [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2007, 20(2): 1-4 (in Chinese).
- [36] 刘宝庆. 南宁市城区土壤重金属污染状况研究 [D]. 南宁:广西大学, 2004.  
LIU B Q. Present situation and evaluatin of heavy metal pollution in the soils of Nanning City [D]. Nanning: Guangxi University, 2004(in Chinese).
- [37] SHI G T, CHEN Z L, XU S Y, et al. Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China [J]. Environmental Pollution, 2008, 156(2): 251-260.
- [38] JIAO X D, TENG Y G, WU J, et al. Soil heavy metal pollution and risk assessment in Shenyang industrial district, Northeast China [J]. PLoS ONE, 2015, 10(5): e0127736.
- [39] LI X Y, LIU L J, WANG Y G, et al. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China [J]. Geoderma, 2013, 192:50-58.
- [40] 崔那涛, 栾文楼, 郭海全, 等. 石家庄城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价 [J]. 现代地质, 2011, 25(1): 169-175.  
CU X T, LUAN W L, GUO H Q, et al. Assessment of the heavymetal pollution and the potential ecological hazard in urban soil of Shijiazhuang City [J]. Geoscience, 2011, 25(1): 169-175 (in Chinese).
- [41] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1285-1293.  
LIU Y, YUE L L, LI J C. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6): 1285-1293 (in Chinese).

- [42] ZHAO L, XU Y F, HOU H, et al. Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469:654-662.
- [43] 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.
- [44] ZHANG C T, YANG Y, LI W D, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of trace metals in urban soils in Wuhan, central China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(9): 1-16.
- [45] 闫旭. 西安市大气、土壤、降水中重金属的污染特征研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.  
YAN X. Pollution characterization of heavy metals in air, soil and precipitation in Xi'an [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2013(in Chinese).
- [46] 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).
- [47] 余广学, 张金震, 王烨, 等. 郑州市土壤重金属污染状况和质量评价 [J]. *岩矿测试*, 2015, 34(3): 340-345.  
YU G X, ZHANG J Z, WANG Y, et al. Investigation and evaluation of heavy metal pollution in soil from Zhengzhou City [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2015, 34(3): 340-345 (in Chinese).
- [48] US EPA (US Environmental Protection Agency). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual [S]. // Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington. 1989.
- [49] US EPA (US Environmental Protection Agency). Soil Screening Guidance: Technical Background Document (EPA/540/R-95/128) [S]. // Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington. 1996.
- [50] 中华人民共和国环保部. 污染场地风险评估技术导则 (HJ 25.3-2014) [S]. 北京: 中国环境科学出版社. 2014.
- [51] US DOE(United States Department of Energy). The Risk Assessment Information System (RAIS) [M]. // U.S. Department of Energy's Oak Ridge Operations Office (ORO). 2011.
- [52] US DE (US Department of Energy). RAIS: Risk Assessment Information System [S]. // US Department of Energy, Office of Environmental Management. 2000.
- [53] FERREIRA-BAPTISTA L, MIGUEL E D. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(25): 4501-4512.
- [54] 陈星, 马建华, 李新宁, 等. 基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1068-1074.  
CHEN X, MA J H, LI X N, et al. Health risk assessment of soil heavy metals in residential communities built on brownfields [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 1068-1074 (in Chinese).
- [55] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 1990.  
China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China [M]. 1990(in Chinese).
- [56] SUN Y B, ZHOU Q X, XIE X K, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1-3): 455-462.
- [57] NIU L L, YANG F X, XU C, et al. Status of metal accumulation in farmland soils across China: From distribution to risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 176:55-62.
- [58] GU Y G, LI Q S, FANG J H, et al. Identification of heavy metal sources in the reclaimed farmland soils of the Pearl River Estuary in China using a multivariate geostatistical approach [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 105:7-12.
- [59] 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.  
XIE X J. Spatial distribution and sources of heavy metals in soils of Shanghai city [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2010(in Chinese).
- [60] FRYER M, COLLINS C D, FERRIER H, et al. Human exposure modelling for chemical risk assessment: A review of current approaches and research and policy implications [J]. *Environmental Science & Policy*, 2006, 9(3): 261-274.