

doi: 10.12029/gc20200625

阿地拉·艾来提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 靳万贵, 姑力巴努·艾尼, 艾尼瓦尔·买买提, 阿里木江·卡斯木. 2020. 新疆库尔勒市道路积尘重金属污染及健康风险评价[J]. 中国地质, 47(6): 1915–1925.

Adila HAYRAT, Mamattursun EZIZ, Gulbanu HINI, Jin Wangui, Anwar MOHAMMAD, Alimujiang KASIMU. 2020. Pollution and health risks assessment of heavy metals of road dust in Korla City, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 47(6):1915–1925(in Chinese with English abstract).

## 新疆库尔勒市道路积尘重金属污染及健康风险评价

阿地拉·艾来提<sup>1</sup>, 麦麦提吐尔逊·艾则孜<sup>1,2</sup>, 靳万贵<sup>1</sup>, 姑力巴努·艾尼<sup>1</sup>,  
艾尼瓦尔·买买提<sup>3</sup>, 阿里木江·卡斯木<sup>4</sup>

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆师范大学, 新疆 乌鲁木齐 830054; 3. 新疆大学化学与化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 4. 新疆师范大学丝绸之路经济带城市发展研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘要:**为探究绿洲城市道路积尘重金属污染风险, 在新疆库尔勒市采集 54 个代表性道路积尘样品, 分析其中 Hg、Cd、As、Pb、Cr 和 Cu 等 6 种元素含量, 基于 GIS 技术与地学统计法, 采用污染负荷指数法和 US EPA 健康风险评价模型, 对道路积尘中重金属污染及潜在健康风险进行评价。结果表明: 库尔勒市道路积尘中 Hg、Cd、As、Pb 和 Cu 等元素含量的平均值均小于土壤环境质量—建设用地土壤污染风险管控标准(GB 36600—2018)中的筛选值, 但 Cr 元素含量平均值为相应筛选值的 9.90 倍。污染评价结果表明, 研究区道路积尘中 Cr 呈现重度污染, Hg、Cd、As、Pb 和 Cu 呈无污染。道路积尘中重金属元素的污染负荷指数介于 0.0142~0.0522, 平均值为 0.0266, 处于无污染水平。从道路积尘重金属污染空间分布格局来看, 库尔勒市东北部和北部区域出现污染高值区。健康风险评估结果表明, 经手—口摄入途径是库尔勒市道路积尘重金属日均暴露量及健康风险的主要途径, 儿童受到的健康风险高于成人。库尔勒市道路积尘中 Hg、Cd、As、Pb、Cr 与 Cu 等元素的非致癌风险及致癌风险处于安全范围内, As 对非致癌风险的贡献最大, Cr 对致癌风险的贡献最大。

**关键词:**道路积尘; 重金属; 环境地质调查工程; 污染; 健康风险; 库尔勒市; 新疆

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)06-1915-11

## Pollution and health risks assessment of heavy metals of road dust in Korla City, Xinjiang

Adila HAYRAT<sup>1</sup>, Mamattursun EZIZ<sup>1,2</sup>, JIN Wangui<sup>1</sup>, Gulbanu HINI<sup>1</sup>, Anwar MOHAMMAD<sup>3</sup>,  
Alimujiang KASIMU<sup>4</sup>

(1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 4. Silk Road Economic

收稿日期: 2020-04-09; 改回日期: 2020-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41867067 与 41561073)资助。

作者简介: 阿地拉·艾来提, 女, 1994 年生, 硕士生, 主要从事城市土壤环境安全研究; E-mail: adila08@126.com。

通讯作者: 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 男, 1981 年生, 副教授, 博士, 主要从事绿洲土壤环境安全研究; E-mail: oasiseco@126.com。

**Abstract:** In order to evaluate the pollution risk of heavy metals in road dust of the oasis city, the authors collected a total of 54 typical road dust samples from Korla, Xinjiang, and analyzed the concentrations of Hg, Cd, As, Pb, Cr, and Cu elements. The pollution and potential health risk of heavy metals in road dust were analyzed on the basis of GIS technology and geostatistical analysis methods and by using the Pollution Load Index and the US EPA health risk assessment model. The obtained results indicate that the average concentrations of Hg, Cd, As, Pb, and Cu elements in the road dust of Korla City are less than the screening values of the Soil Environmental Quality – Control Standard for Soil Contamination of Development Land (GB 36600—2018), but the average concentration of Cr exceeds the corresponding screening value by factor of 9.90 times. The results of pollution assessment indicate that heavy metals in the collected dust samples are heavily polluted by Cr, without pollution by Hg, Cd, As, Pb, and Cu. The Pollution Load Index of heavy metals in road dust varies in the range of 0.0142~0.0522, with an average value of 0.0266, at the no pollution level. The spatial distribution patterns of the six heavy metals in road dust indicate that the high concentrations are distributed mainly in the northeastern and northern areas of Korla City. The results of health risk assessment indicate that the hand-mouth ingest intake is the dominant pathway of the average daily exposure and health risks of road dusts in Korla, and the health risk of heavy metals in road dust for children are higher than that for adults. The non-carcinogenic and carcinogenic risk of metals such as Hg, Cd, As, Pb, Cr, and Cu in road dust in Korla is within the safe range. As contributes most to non-carcinogenic risk, whereas Cr contributes most to carcinogenic risk of road dust in Korla City.

**Key words:** road dust; heavy metals; environmental geological survey project; pollution; health risks; Korla City; Xinjiang

**About the first author:** Adila HAYRAT, female, born in 1994, master candidate, mainly engages in the study of urban soil environmental safety; E-mail: adila08@126.com.

**About the corresponding author:** Mamattursun EZIZ, male, born in 1981, associate professor, doctor, engages in research on oasis soil environmental safety; E-mail: oasiseco@126.com.

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41867076 and No. 41561073).

## 1 引 言

城市道路积尘(urban road dust)作为城市环境污染载体,对城市环境污染物的迁移转化与扩散具有重要作用(Bourliva et al., 2017; 沈墨海等, 2018)。城市道路积尘中的重金属元素不仅通过城市居民日常生活过程中的直接接触途径进入体内造成健康危害,而且还通过机动车、行人及风、地表径流和降水等人为和自然因素影响下,通过跳跃、悬浮、扩散或迁移的形式在城市土壤—大气—水环境间循环转化,从而能间接地影响城市生态环境和人体健康(李仔栓等, 2018; 邬光海等, 2020)。城市道路积尘重金属污染的健康风险评估把城市环境污染与人体健康连接起来,描述道路积尘重金属污染对人类产生健康危害的风险,为辨析城市环境中主要污染物以及城市环境风险管理提供科学依据(Sayaka et al., 2002; 王岩等, 2016)。20世纪70年代以来,相关学者开始重视城市道路积尘污染风险(Day et al., 1975),从而城市道路积尘污染风险评估

成为国内外研究的热点问题之一。相关学者采用不同的污染评价方法和健康风险评估模型分别对塞萨洛尼基(Bourliva et al., 2017)、东京(Sayaka et al., 2002)、吉隆坡(Ramlan et al., 1989)、卢布林(Wojciech et al., 2018)和马德里(Miguel et al., 1997)等国外城市道路积尘重金属污染风险方面进行了大量研究。中国学者也对北京(向丽等, 2010)、上海(张菊等, 2006)、南京(倪刘建等, 2007)、武汉(Chu et al., 2015)、天津(Bei et al., 2016)、西安(王丽等, 2017)和广州(Bi et al., 2013)等城市相继进行了道路积尘重金属污染风险方面的研究,并取得了大量研究成果。Yang et al. (2017)总结分析了中国37个主要城市的道路积尘重金属污染水平与污染来源,发现人为因素是导致城市道路积尘重金属污染的主要因子。Zhang et al. (2019)也总结分析了中国58个主要城市道路积尘中10种重金属元素污染的潜在健康风险,发现大部分城市道路积尘中分析的10种重金属元素平均含量已超过相应的背景值,道路灰尘中重金属元素对儿童有

一定的致癌和非致癌风险,Cr是最主要健康风险因子。国内学者相关研究大多数主要集中于我国城市化、工业化程度较高的东部、中部城市。也有学者研究了新疆乌鲁木齐市道路积尘重金属污染风险。Gulbanu et al.(2019)对新疆乌鲁木齐市道路灰尘中9种重金属元素污染的健康风险进行研究,发现As和Cr是产生非致癌风险的主要元素,Cr是产生致癌风险的主要元素。Wei et al.(2010)也分析乌鲁木齐市道路积尘重金属污染的生态风险,发现Cd是造成生态风险的主要元素。但关于新疆其他城市道路积尘中重金属污染风险方面目前缺乏相关研究。

本文以受沙尘天气影响明显的,南疆工业化程度与经济发展水平最高的典型绿洲城市——库尔勒市为研究区,以道路积尘重金属污染及其健康风险评价为主要目标,分析与讨论道路积尘中6种元素的含量,采用污染负荷指数和美国EPA健康风险评价模型,结合地统计法,对研究区道路积尘中重金属元素含量、污染特征、空间分布格局以及潜在人体健康风险进行评价,以此来探讨绿洲城市化和工业化背景下,绿洲城市道路积尘重金属污染风险,以期为了保护库尔勒市生态环境以及居民健康提供科学依据。

## 2 研究区概况

库尔勒市位于新疆中部,塔克拉玛干沙漠东边缘,霍拉山南部,孔雀河冲积扇平原上,是中国最大州——巴州的首府,南疆最大的城市,也是南疆交通枢纽和重要的经济中心,总人口约55万。

研究区(85°06'~86°16'E、41°37'~42°48'N)总面积为108.8 km<sup>2</sup>(图1)。气候为温带大陆性干旱气候,沙尘暴天气多,年平均降水量和蒸发量分别为50 mm和2800 mm左右,年平均气温约11.4℃。库尔勒市北高南低,西高东低,海拔高程介于890~950 m(陈浮等,2001)。在良好的水热条件下,库尔勒市具有以香梨为主的特色农产品资源优势,被称为“梨城”。库尔勒市矿产资源很丰富,有煤、铁、红柱石、锰等矿藏50多种,红柱石储量为全国之首。

## 3 材料与方法

### 3.1 样品采集与测试

2018年9月无降水期在库尔勒市采集了54个

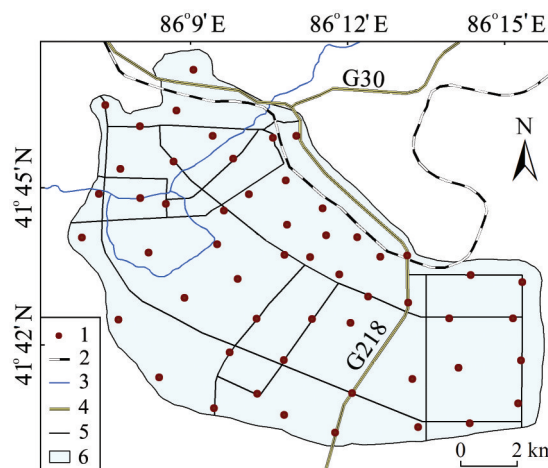


图1 库尔勒市位置及采样点分布示意图

1—采样点;2—南疆铁路;3—孔雀河;4—国道;5—城市道路;  
6—研究区

Fig. 1 The location of Korla City and sampling points

1—Sampling points; 2—Southern Xinjiang Railway; 3—Konqi River; 4—National highway; 5—Urban roads; 6—Study area

道路积尘样品。采样过程中根据研究区实际情况进行样点布置,采用100 m×100 m内布设8~10个子样点,用毛刷和塑料簸箕等非金属类工具取样,除掉样品中小石子等杂物,装入聚乙烯密封袋。积尘样品自然风干,用玛瑙研钵研磨,通过100目尼龙筛后备用。所有积尘样品委托新疆维吾尔自治区分析测试研究院测定了As、Cd、Cr、Cu、Hg与Pb等6种元素的含量。元素含量测定过程中按国家土壤标准参比物质(GSS-12)和重复样进行质量控制,As、Cd、Cr、Cu、Hg与Pb等元素测试回收率分别为93.66%、105.75%、104.93%、96.08%、97.47%与104.29%,均在允许范围内。元素含量检测执行标准如表1。

### 3.2 污染评价方法

道路积尘重金属污染水平采用污染负荷指数(PLI)(Tomlinson et al., 1980)进行评价,其计算公式为:

$$CF_i = c_i / c_0 \quad (1)$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \cdots \times CF_n} \quad (2)$$

式中, $CF_i$ 、 $c_i$ 和 $c_0$ 分别表示元素i的单项污染指数、实测浓度和参考值(麦提吐尔逊·艾则孜等,2017), $n$ 为元素个数。按照污染分级标准, $CF \leq 0.7$ 或 $PLI \leq 1$ 为无污染, $0.7 < CF \leq 1$ 为轻微污染, $1 < CF \leq$

表1 重金属含量检测执行标准

Table 1 Execution standard for heavy metal content detection

| 元素 | 检测设备                     | 检出限/(mg/kg) | 检测依据               | 参考文献                 |
|----|--------------------------|-------------|--------------------|----------------------|
| Hg | BAF - 2000 原子荧光光度计       | 0.002       | GB/T22105.1 - 2008 | (国家质量监督检验检疫总局, 2008) |
| Cd | SOLAAR M6 原子吸收光谱仪        | 0.01        | GB/T 17141 - 1997  | (国家环境保护局, 1997)      |
| As | BAF - 2000 原子荧光光度计       | 0.01        | GB/T22105.2 - 2008 | (国家质量监督检验检疫总局, 2008) |
| Pb | ICE3500 原子吸收光谱仪          | 0.10        | GB/T 17141 - 1997  | (国家环境保护局, 1997)      |
| Cr | ICP - 5000 电感耦合等离子体发射光谱仪 | 0.40        | HJ 350 - 2007      | (国家环境保护局, 2007)      |
| Cu | ICP - 5000 电感耦合等离子体发射光谱仪 | 0.10        | HJ 350 - 2007      | (国家环境保护局, 2007)      |

2或 $1 < PLI \leq 2$ 为轻度污染,  $2 < CF \leq 3$ 或 $2 < PLI \leq 3$ 为中度污染,  $CF \geq 3$ 或 $PLI \geq 3$ 为重度污染(Tomlinson et al., 1980; 刘青枰等, 2018)。

### 3.3 潜在人体健康风险评价模型

#### 3.3.1 模型与参数选择

手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触为道路积尘中重金属元素造成健康风险的暴露途径(鲍丽然等, 2020)。采用美国EPA健康风险评价模型(US EPA, 1997), 计算分析了库尔勒市道路积尘中6种元素通过3种暴露途径对儿童和成人的日平均暴露量。计算公式如下:

$$CDI_{\text{ingest}} = \frac{C_{\text{soil}} \times IngR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

$$CDI_{\text{ingest}} = \frac{C_{\text{soil}} \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (4)$$

$$CDI_{\text{dermal}} = \frac{C_i \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (5)$$

$$CDI_{\text{total}} = CDI_{\text{ingest}} + CDI_{\text{inhale}} + CDI_{\text{dermal}} \quad (6)$$

式中,  $CDI_{\text{ingest}}$ 、 $CDI_{\text{inhale}}$ 和 $CDI_{\text{dermal}}$ 与分别代表手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触途径日平均暴露量,  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ;  $CDI_{\text{total}}$ 为总日均暴露量。各暴露参数意义和数值见表2。

#### 3.3.2 人体的健康风险表征

道路积尘中重金属造成的健康风险包括致癌风险和非致癌风险型(Bei et al., 2016)。由于Hg、Cd、As、Pb、Cr和Cu等元素对人体健康都有非致癌风险, 根据各元素不同暴露途径的参考剂量( $RfD$ ), 采用非致癌风险商( $HQ$ )和非致癌风险指数( $HI$ )计算分析了这些元素的非致癌风险。 $HQ$ 与 $HI$ 的计算公式如下:

$$HQ = \frac{CDI}{RfD} \quad (7)$$

$$HI = \sum HQ = HQ_{\text{ingest}} + HQ_{\text{inhale}} + HQ_{\text{dermal}} \quad (8)$$

当非致癌风险指数小于1时, 表示可以忽略积尘中重金属的非致癌风险; 当非致癌风险指数大于1时, 表示存在非致癌健康风险(US EPA, 2001)。

由于As、Cd与Cr等元素为致癌元素(IARC, 2014), 根据这3种元素的致癌风险斜率系数( $SF$ ), 采用致癌风险商( $CR$ )与致癌风险指数( $TCR$ )计算分析了这3种元素的非致癌风险。 $CR$ 与 $TCR$ 的计算公式如下:

$$CR = CDI \times SF \quad (9)$$

$$TCR = \sum CR = CR_{\text{ingest}} + CR_{\text{inhale}} + CR_{\text{dermal}} \quad (10)$$

$TCR \leq 10^{-6}$ , 表示可以忽略致癌风险,  $TCR = 10^{-4}$ 为最大可接受风险水平(Praveena et al., 2018)。根据相关研究成果(Zheng et al., 2009; Zheng et al., 2015)确定的 $RfD$ 和 $SF$ 见表3。

## 4 结果与分析

### 4.1 库尔勒市道路积尘重金属含量特征

库尔勒市道路积尘中重金属元素含量统计分

表2 日平均暴露量评估暴露参数

Table 2 The exposure parameters used to estimate CDI

| 参数                                            | 意义        | 成人                 | 儿童                 | 参考文献               |
|-----------------------------------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $IngR/(\text{mg}/\text{d})$                   | 经手-口摄入频率  | 100                | 200                | (US EPA, 2002)     |
| $InhR/(\text{m}^3/\text{d})$                  | 呼吸频率      | 16.2               | 7.5                | (Han et al., 2017) |
| $CF/(\text{mg}/\text{d})$                     | 转换系数      | $1 \times 10^{-6}$ | $1 \times 10^{-6}$ | (US EPA, 1989)     |
| $EF/(\text{d}/\text{a})$                      | 暴露频率      | 350                | 350                | (Li et al., 2015)  |
| $ED/\text{a}$                                 | 暴露期       | 24                 | 6                  | (US EPA, 2002)     |
| $SA/\text{cm}^2$                              | 暴露皮肤表面积   | 16000              | 7600               | (段小丽, 2016)        |
| $AF/(\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d}))$ | 皮肤黏附系数    | 0.07               | 0.20               | (US EPA, 2002)     |
| $ABS$ 无量纲                                     | 皮肤吸收因子    | 0.001              | 0.001              | (US EPA, 2002)     |
| $PEF/(\text{m}^3/\text{kg})$                  | 积尘排放因子    | $1.36 \times 10^9$ | $1.36 \times 10^9$ | (US EPA, 2002)     |
| $BW/\text{kg}$                                | 体重        | 62.4               | 20.08              | (段小丽, 2016)        |
| $AT_{nc}/\text{d}$                            | 非致癌平均暴露时间 | $ED \times 365$    | $ED \times 365$    | (MEP, 2014)        |
| $AT_{cd}/\text{d}$                            | 致癌平均暴露时间  | $70 \times 365$    | $70 \times 365$    | (MEP, 2014)        |

表3 重金属不同暴露途径的参考剂量( $RfD$ )和斜率因子( $SF$ )Table 3 Reference dose ( $RfD$ ) and slope factor ( $SF$ ) for different exposure routes of heavy metals

| 元素 | $SF/(kg \cdot d/mg)$ |        |       | $RfD/(mg/(kg \cdot d))$ |           |          |
|----|----------------------|--------|-------|-------------------------|-----------|----------|
|    | 手-口<br>摄入            | 呼吸吸入   | 皮肤接触  | 手-口<br>摄入               | 呼吸吸入      | 皮肤接触     |
| As | 1.50                 | 0.0043 | 1.50  | 0.0003                  | 0.000123  | 0.0003   |
| Cd | n. a.                | 6.30   | n. a. | 0.001                   | 0.001     | 0.00001  |
| Cr | 0.5                  | 42.0   | n. a. | 0.003                   | 0.0000286 | 0.00006  |
| Cu | n. a.                | n. a.  | n. a. | 0.040                   | 0.0402    | 0.012    |
| Pb | n. a.                | n. a.  | n. a. | 0.0035                  | 0.00352   | 0.000525 |
| Hg | n. a.                | n. a.  | n. a. | 0.0003                  | 0.0003    | 0.000024 |

注:n. a.表示无数据;本研究采用 $Cr^{6+}$ 的 $RfD$ 。

析结果表明(表4),Hg、Cd、As、Pb、Cr和Cu等元素含量变幅分别为0.010~0.539 mg/kg、0.042~4.20 mg/kg、5.41~19.50 mg/kg、8.62~142.0 mg/kg、30.20~164.0 mg/kg和13.10~155.0 mg/kg。这6种元素含量平均值分别为0.063 mg/kg、0.224 mg/kg、10.65 mg/kg、37.93 mg/kg、56.44 mg/kg和34.33 mg/kg。与新疆土壤背景值相比较,库尔勒市道路积尘中As含量平均值略低于新疆土壤背景值,但其含量最大值等于背景值的1.74倍;Hg、Cd、Pb、Cr和Cu等元素含量的平均值分别等于背景值的3.71、1.87、1.96、1.14和1.29倍。Hg、Cd、Pb、Cr和Cu含量最大值分别达到0.539 mg/kg、4.20 mg/kg、142.0 mg/kg、164.0 mg/kg和155.0 mg/kg,分别为新疆土壤背景值的31.71、35.0、7.32、3.33和5.81倍,表明部分样点Hg、Cd、Pb、Cr和Cu等元素富集明显。与土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准(GB 36600-2018)相比较,库尔勒市道路积尘中Hg、Cd、As、Pb和Cu等元素含量的平均值和最大值均小于土壤环境质量标准值中的筛选值。Cr含量平均值则等于筛选值的9.90倍,表明Cr元素富集明显。

从变异系数( $CV$ )来看,根据分级标准(Pan et al, 2017),研究区道路积尘中Hg与Cd的 $CV$ 值分别为1.43与2.52,均表现为极高变异( $CV > 1.0$ ),Pb与Cu

表4 库尔勒市道路积尘重金属元素含量(mg/kg)统计( $n=54$ )Table 4 Statistic of heavy metals concentrations of road dusts in Korla ( $n=54$ )

| 元素                       | Hg    | Cd    | As    | Pb    | Cr    | Cu    |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 最小值                      | 0.010 | 0.042 | 5.41  | 8.62  | 30.20 | 13.10 |
| 最大值                      | 0.539 | 4.20  | 19.50 | 142.0 | 164.0 | 155.0 |
| 平均值                      | 0.063 | 0.224 | 10.65 | 37.93 | 56.44 | 34.33 |
| 标准值                      | 0.09  | 0.56  | 2.31  | 21.91 | 17.29 | 21.06 |
| 变异系数( $CV$ )             | 1.43  | 2.52  | 0.22  | 0.58  | 0.31  | 0.61  |
| 新疆土壤背景值                  | 0.017 | 0.120 | 11.20 | 19.40 | 49.30 | 26.70 |
| 土壤环境质量—<br>GB 36600-2018 | 38    | 65    | 60    | 800   | 5.7   | 18000 |

的 $CV$ 值分别为0.58与0.61,均表现为高变异( $0.5 < CV \leq 1.0$ ),表明库尔勒市道路积尘中Hg、Cd、Pb与Cu等元素含量空间分布差异较大。As与Cr的 $CV$ 值分别为0.22与0.31,表现为中等变异( $0.2 < CV \leq 0.5$ ),表明As与Cr含量空间分布差异较小。

#### 4.2 道路积尘重金属污染特征

以土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准(GB 36600-2018)中的筛选值为参考值,计算得到的库尔勒市道路积尘重金属污染水平评价结果如表5。

从表5可见,库尔勒市道路积尘中6种元素的单项污染指数( $CF$ )平均值从大到小依次为:Cr (9.9012)、As (0.1774)、Pb (0.0474)、Cd (0.0034)、Cu (0.0019)与Hg (0.0017)。根据污染分级标准,道路积尘中Cr处于重度污染水平,As、Cd、Pb、Cr和Cu等元素均处于无污染水平。从不同污染级别样品数占样品总数的比例来看,所有样点As、Cd、Cu、Hg与Pb等元素均呈现无污染水平,所有样点Cr元素均呈现重度污染水平。研究区道路积尘中重金属元素的污染负荷指数( $PLI$ )介于0.0142~0.0522,平均值为0.0266,处于无污染水平。所有样点重金属元素的 $PLI$ 值均呈现无污染。以上分析可以看出,研究区道路积尘中Cr元素污染水平较高,值得引起关注。

基于GIS技术与地学统计法,利用GS+9.0软件

表5 库尔勒市道路积尘重金属污染水平( $n=54$ )Table 5 Pollution level of heavy metals of road dust in Korla ( $n=54$ )

| 元素   | $CF$   |        |        |        |         |        | $PLI$  |
|------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
|      | Hg     | Cd     | As     | Pb     | Cr      | Cu     |        |
| 最小值  | 0.0003 | 0.0006 | 0.0902 | 0.0108 | 5.2982  | 0.0007 | 0.0142 |
| 最大值  | 0.0142 | 0.0646 | 0.3250 | 0.1775 | 28.7720 | 0.0086 | 0.0522 |
| 平均值  | 0.0017 | 0.0034 | 0.1774 | 0.0474 | 9.9012  | 0.0019 | 0.0266 |
| 污染级别 | 无污染    | 无污染    | 无污染    | 无污染    | 重度污染    | 无污染    | 无污染    |

确定道路积尘中6种重金属元素CF值的最佳半方差函数理论模型,利用ArcGIS 10.3绘制了6种重金属元素的CF值空间分布格局图(图2)。

从图2可以看出,库尔勒市道路积尘中Hg、Cd、As、Pb、Cr和Cu等6种元素空间变异格局差异较大。Cr是库尔勒道路积尘中污染程度最高的元素,整个研究区表现为重度污染。Cr元素污染高值区分布于研究区东北部,东部与南部污染相对较低。研究区道路积尘As元素污染指数较高的区域主要

分布于研究区东部和北部,研究区西部污染较低。道路积尘中Cd、Cu和Pb元素污染指数空间分布格局较相似,这3种元素污染指数较高的区域主要分布于研究区东北部和北部区域。Hg元素污染指数较高的区域主要分布于研究区西北部,整体上从研究区西北部往东南部呈现较少趋势。

#### 4.3 非致癌风险评估

利用公式(3)~(6)计算重金属日平均非致癌暴露量的基础上,利用公式(7)和(8)计算得到了库尔勒市

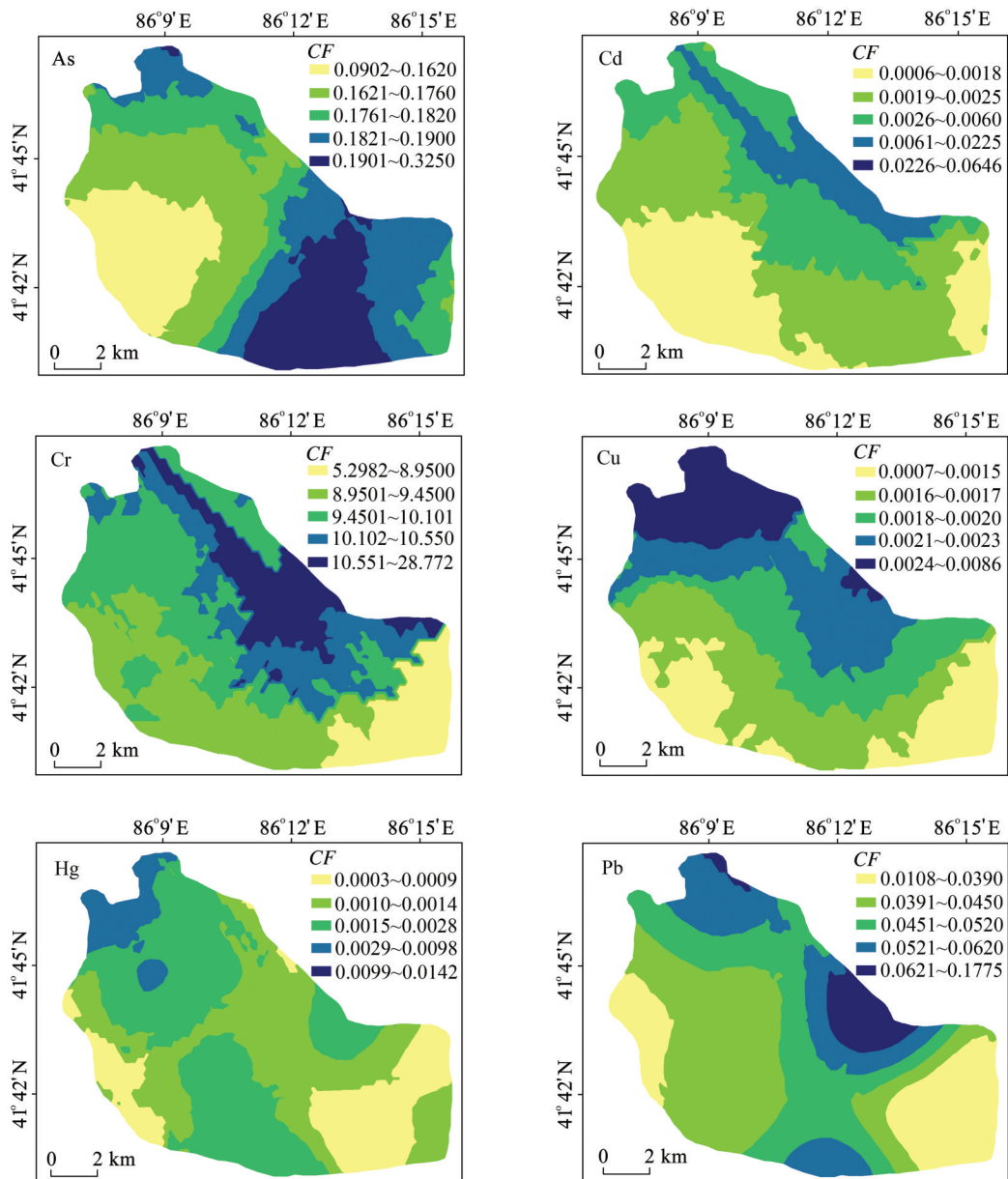


图2 库尔勒市道路积尘重金属元素CF值空间分布格局  
Fig.2 Spatial distribution of CF of heavy metals of road dust in Korla

道路积尘中Hg、Cd、As、Pb、Cr和Cu等元素的非致癌风险商和非致癌风险指数(表6)。结果表明,库尔勒市道路积尘中6种元素3种暴露途径总非致癌风险商( $HQ_{total}$ )从大到小依次为As、Cr、Pb、Cu、Cd与Hg。道路积尘重金属元素手-口摄入途径非致癌风险指数最大,呼吸摄入途径非致癌风险指数最小。总的来看,库尔勒市道路积尘中重金属通过3种暴露途径的 $HQ$ 与 $HI$ 均小于1,即可以忽略道路积尘重金属污染产生的非致癌风险。儿童的 $HI$ (0.71)大于成人的 $HI$ (0.12),表明道路积尘重金属污染对儿童产生的非致癌健康风险大于成人。研究区道路积尘中Hg、Cd、As、Pb、Cr和Cu对成人的 $HQ_{total}$ 分别占 $HI$ 的0.31%、0.61%、46.0%、14.92%、37.92%和1.14%;Hg、Cd、As、Pb、Cr和Cu对儿童的 $HQ_{total}$ 分别占 $HI$ 的0.31%、0.53%、48.17%、15.35%、34.93%和1.18%。可以看出,库尔勒市道路积尘中As元素产生的非致癌健康风险较大。研究区道路积尘中重金属 $HQ$ 与 $HI$ 平均值虽然处于安全水平,但其 $HI$ 最大值(1.25)已达到了较高的水平,值得引起重视。

#### 4.4 致癌风险评估

在日平均非致癌暴露量的基础上,利用公式(9)和(10)计算得到了库尔勒市道路积尘中Cd、As和Cr等元素的致癌风险商和致癌风险指数(表7)。

从表7可见,库尔勒市道路积尘中3种元素3种暴露途径总致癌风险商( $CR_{total}$ )从大到小依次为Cr、As与Cd。研究区道路积尘重金属元素手-口摄入

途径致癌风险指数最大,呼吸摄入途径致癌风险指数最小,这与非致癌风险暴露途径的情况一致。总的来看,库尔勒市道路积尘中Cr、As与Cd等元素在3种暴露途径的 $CR$ 与 $TCR$ 均小于 $10^{-4}$ ,即表现为可接受风险水平。儿童的 $TCR$ ( $3.63 \times 10^{-5}$ )大于成人( $2.35 \times 10^{-5}$ ),表明道路积尘重金属污染对儿童产生的致癌健康风险大于成人,这与非致癌风险情况一致。研究区道路积尘中Cr与As对成人的 $CR_{total}$ 分别占 $TCR$ 的63.83%和36.21%;Cr与As对儿童的 $CR_{total}$ 分别占 $TCR$ 的63.91%和36.36%。可以看出,库尔勒市道路积尘中Cr产生的致癌健康风险最大。

#### 4.5 健康风险空间分布格局

基于地统计学理论,利用ArcGIS10.3软件,绘制了库尔勒市道路积尘重金属导致的非致癌风险指数( $HI$ )与致癌风险指数( $TCR$ )的空间分布格局图(图3)。从图3可见,库尔勒市道路积尘中重金属分别对成人和儿童的 $HI$ 与 $TCR$ 的空间分布格局基本一致,均表现为较明显的区域分异性特征。大体上,成人和儿童的 $HI$ 与 $TCR$ 的高值区主要分布于库尔勒市东北部, $HI$ 与 $TCR$ 均从研究区东北部向其它区域呈现减小趋势,这与污染分析结果相对应。

## 5 讨 论

城市道路积尘重金属元素影响城市生态环境安全以及居民身体健康。本研究检测的库尔勒市

表6 重金属非致癌风险指数

Table 6 The non-carcinogenic risk indexes of heavy metals

| 元素 | $HQ_{ingest}$         |                       | $HQ_{inhal}$          |                       | $HQ_{dermal}$         |                       | $HQ_{total}$          |                       | $HI$ |      |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|------|
|    | 成人                    | 儿童                    | 成人                    | 儿童                    | 成人                    | 儿童                    | 成人                    | 儿童                    | 成人   | 儿童   |
| Hg | $3.23 \times 10^{-4}$ | $2.01 \times 10^{-3}$ | $3.85 \times 10^{-8}$ | $5.53 \times 10^{-8}$ | $4.52 \times 10^{-5}$ | $1.91 \times 10^{-4}$ | $3.68 \times 10^{-4}$ | $2.20 \times 10^{-3}$ | 0.12 | 0.71 |
| Cd | $3.44 \times 10^{-4}$ | $2.14 \times 10^{-3}$ | $4.09 \times 10^{-8}$ | $5.89 \times 10^{-8}$ | $3.85 \times 10^{-4}$ | $1.62 \times 10^{-3}$ | $7.29 \times 10^{-4}$ | $3.76 \times 10^{-3}$ |      |      |
| As | $5.45 \times 10^{-2}$ | $3.39 \times 10^{-1}$ | $1.58 \times 10^{-5}$ | $2.28 \times 10^{-5}$ | $6.11 \times 10^{-4}$ | $2.58 \times 10^{-3}$ | $5.52 \times 10^{-2}$ | $3.42 \times 10^{-1}$ |      |      |
| Pb | $1.67 \times 10^{-2}$ | $1.04 \times 10^{-1}$ | $1.97 \times 10^{-6}$ | $2.84 \times 10^{-6}$ | $1.24 \times 10^{-3}$ | $5.24 \times 10^{-3}$ | $1.79 \times 10^{-2}$ | $1.09 \times 10^{-1}$ |      |      |
| Cr | $2.89 \times 10^{-2}$ | $1.80 \times 10^{-1}$ | $3.61 \times 10^{-4}$ | $5.20 \times 10^{-4}$ | $1.62 \times 10^{-2}$ | $6.83 \times 10^{-2}$ | $4.55 \times 10^{-2}$ | $2.48 \times 10^{-1}$ |      |      |
| Cu | $1.32 \times 10^{-3}$ | $8.20 \times 10^{-3}$ | $1.56 \times 10^{-7}$ | $2.25 \times 10^{-7}$ | $4.92 \times 10^{-5}$ | $2.08 \times 10^{-4}$ | $1.37 \times 10^{-3}$ | $8.40 \times 10^{-3}$ |      |      |

表7 重金属致癌风险指数

Table 7 The carcinogenic risk indexes of heavy metals

| 元素 | $CR_{ingest}$         |                       | $CR_{inhal}$           |                        | $CR_{dermal}$         |                       | $CR_{total}$           |                        | $TCR$                 |                       |
|----|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
|    | 成人                    | 儿童                    | 成人                     | 儿童                     | 成人                    | 儿童                    | 成人                     | 儿童                     | 成人                    | 儿童                    |
| Cd | /                     | /                     | $8.84 \times 10^{-11}$ | $3.18 \times 10^{-11}$ | /                     | /                     | $8.84 \times 10^{-11}$ | $3.18 \times 10^{-11}$ | $2.35 \times 10^{-5}$ | $3.63 \times 10^{-5}$ |
| As | $8.41 \times 10^{-6}$ | $1.31 \times 10^{-5}$ | $2.87 \times 10^{-12}$ | $1.03 \times 10^{-12}$ | $9.42 \times 10^{-8}$ | $9.94 \times 10^{-8}$ | $8.51 \times 10^{-6}$  | $1.32 \times 10^{-5}$  |                       |                       |
| Cr | $1.49 \times 10^{-5}$ | $2.31 \times 10^{-5}$ | $1.49 \times 10^{-7}$  | $5.35 \times 10^{-8}$  | /                     | /                     | $1.50 \times 10^{-5}$  | $2.32 \times 10^{-5}$  |                       |                       |

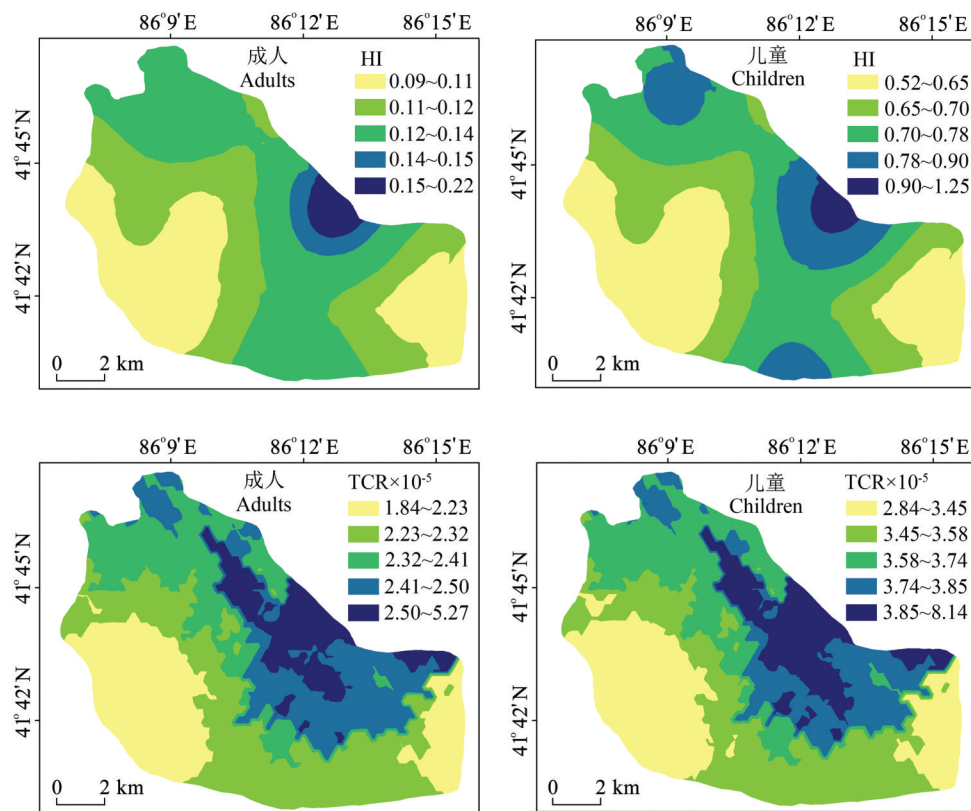


图3 HI与TCR空间分布格局  
Fig.3 The spatial distribution of HI and TCR

道路积尘中Hg、Cd、Pb、Cr和Cu等元素平均含量超出新疆土壤背景值,表明这些元素有一定的富集。其中,Hg与Cd等2种元素平均含量分别为新疆土壤背景值的31.71、35.0倍,表明这2种元素在研究区道路积尘中富集很明显。Hg是主要的城市人为源元素,城市工业、交通以及燃煤等是其主要来源(Zhang et al., 2006)。库尔勒市是南疆最大城市,工业化程度相对较高。作为南疆交通枢纽,交通较密集。Hg元素的高值分布区内分布着库尔勒货运站、巴州汽车总站、G30国道以及南疆铁路,说明交通状况对库尔勒市区道路积尘中的重金属含量有影响。同时,库尔勒市作为典型的燃煤城市,以火力发电为主,原煤消费量较大,市区煤耗量约 $343 \times 10^4$  t(张欣等,2016)。可以看出,工业、交通来源以及煤炭燃烧后的大气沉降中的Hg可能是库尔勒市中心周边大部分区域道路积尘中Hg的重要来源。先前的相关研究(Wang et al., 2005; Harrison et al., 2003; 蒙永辉等,2019)表明,交通源是Cd的重要来源之一。Cd元素在市区的东北部形成高值区,这里分布

着库尔勒市火车站、G218国道以及南疆铁路等。截止2016年,库尔勒市机动车保有量超过 $20 \times 10^4$ 辆(张欣等,2016)。这些污染源可能会对库尔勒市区道路积尘中的重金属含量造成一定的影响。值得注意的是,库尔勒市道路积尘中Cr元素含量平均值超出土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准(GB 36600-2018)中相应筛选值的9.90倍,Cr元素污染水平也很高。这与土壤环境质量中Cr元素筛选值最低有关。

城市道路积尘中重金属污染的人体健康风险评估是城市土壤环境中有毒化学物质及其各种暴露途径分析的有效方法(王岩等,2016)。特殊环境背景下,城市道路积尘中重金属元素受人类生活、工业生产、交通排放、土壤地球化学等污染来源的影响,通过手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接等途径,从而能间接地影响人体健康。本研究采用美国EPA健康风险评价模型,评价了库尔勒市道路积尘中重金属元素的致癌风险和非致癌风险型。结果表明,库尔勒市道路积尘重金属污染的非致癌风险与致

癌风险均处于可接受风险水平,但库尔勒市东北部的HI与TCR值较高,这些区域是南疆铁路线以及G30、G218国道沿线地区,交通污染排放量大。同时,沙尘作为影响库尔勒市的主要天气过程之一,浮尘、扬沙和沙尘暴等天气现象一定程度上影响城区道路积尘重金属含量与污染水平。

## 6 结 论

(1)库尔勒市道路积尘中Hg、Cd、As、Pb、Cr和Cu等元素含量平均值分别为0.063、0.224、10.65、37.93、56.44和34.33 mg/kg。其中,Hg、Cd、Pb、Cr和Cu含量平均值分别等于新疆土壤背景值的3.71、1.87、1.96、1.14和1.29倍。库尔勒市道路积尘中Hg、Cd、As、Pb和Cu等元素平均含量均小于土壤环境质量标准值中的筛选值,Cr含量平均值则等于筛选值的9.90倍。

(2)道路积尘重金属污染评价结果表明,道路积尘中Cr处于重度污染,其他5种元素处于无污染水平。污染负荷指数(PLI)介于0.0142~0.0522,平均值为0.0266,表现为无污染。研究区道路积尘重金属污染分布规律来看,受城市工业、交通以及燃煤等人为因素的影响,研究区道路积尘中Hg、Cd、Pb、Cu和PLI污染高值区主要分布于研究区东北部和北部。

(3)健康风险评估结果表明,库尔勒市道路积尘重金属污染的非致癌风险与致癌风险均处于可接受风险水平,儿童受到更大的健康危害,研究区道路积尘重金属健康风险以手-口摄入途径为主。As对非致癌风险的贡献率大于46%,是库尔勒市道路积尘中主要的非致癌风险因子。Cr对致癌风险的贡献率大于63%,是主要的致癌风险因子。受人为源污染与自然因素的影响,研究区道路积尘重金属污染的潜在健康风险高值区主要分布于西北部。

## References

Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil in northwest Xiushan, Chongqing [J]. *Geology in China*, 47(6):1625–1636(in Chinese with English abstract).

Bei Beihu, Bai Qiaoliu, Jun Zhou, Jin Tingguo, Zong Binsun, Wei Qingmeng, Xin Guo, Jia Haoduan. 2016. Health risk assessment on heavy metals in urban street dust of Tianjin based on trapezoidal

fuzzy numbers [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 22(3): 678–692.

Bi Xiangyang, Liang Siyuan, Li Xiongdong. 2013. Trace metals in soil, dust, and tree leaves of the urban environment, Guangzhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(2): 222–230(in Chinese ).

Bourliva Anna, Christophoridis Christophoros, Papadopoulou Lambrini, Giouri Katerina, Papadopoulos Argyrios, Mitsika Elena, Fytianos Konstantinos. 2017. Characterization, heavy metal content and health risk assessment of urban road dusts from the historic center of the city of Thessaloniki, Greece [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 39(3): 611–634.

Chen Fu, Pu Lijie, Peng Buzhuo, Bao Haosheng. 2001. The effect of land use changes on soil conditions in Korla City, Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(11): 1290–1295 (in Chinese with English abstract).

Day J P, Hart M, Robinson M S. 1975. Lead in urban street dust [J]. *Nature*, 253(5490): 343–345.

Duan Xiaoli. 2016. Outline of Chinese Population Exposure Parameters (Adult's volume) [M]. Beijing: Environmental Science Press (in Chinese).

Duan Xiaoli. 2016. Outline of Chinese Population Exposure Parameters (Children's volume) [M]. Beijing: Environmental Science Press (in Chinese).

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2008. GB/T 22105.1–2008: Soil Quality—analysis of Total Mercury, Arsenic and Lead Contents, Part 1[S] (in Chinese).

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2008. GB/T 22105.2–2008: Soil Quality—analysis of Total Mercury, Arsenic and Lead Contents, Part 2 (in Chinese).

Gulbanu Hini, Mamattursun Eziz, Wang Weiwei, Anwar Ili, Li Xinguo. 2019. Spatial distribution, contamination levels, sources, and potential health risk assessment of trace elements in street dusts of Urumqi city, NW China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*. <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1651629>.

Han Xiufeng, Lu Xinwei, Qing Geletu, Wu Yongfu. 2017. Health risks and contamination levels of heavy metals in dusts from parks and squares of an industrial city in semi-arid area of China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(8): 886–897.

Roy M Harrison, Rob Tilling, María S Callén Romero, Stuart Harrad, Kym Jarvis. 2003. A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment [J]. *Atmospheric Environment*, 37(17): 2391–2402.

HJ 25.3—2014: Technical Guidelines for Risk Assessment of Contaminated Sites [S] (in Chinese).

IARC (International Agency for Research on Cancer). 2014. Agents Classified by the IARC Monographs, 1–109.

- Li Fei, Huang Jinhui, Zeng Guangming, Huang Xionglong, Liu Wenchu, Wu Haioeng, Yuan Yujie, He Xiaoxiao, Lai Mingyong. 2015. Spatial distribution and health risk assessment of toxic metals associated with receter population density in street dust: A case study of Xian Dao District, Middle China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(9): 6732–6742.
- Li Zishuan, Chen Long, Zhao Yuanyi. 2018. Environmental geochemical characteristics and significance of heavy metals in Daicun Village, Leping City, Jiangxi Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(1): 62–70 (in Chinese with English abstract)
- Liu Qingping, Deng Shiqiang, Zhao Yuanyi, Li Xiaosai. 2018. Sources analysis and element geochemical characteristics of regional soil heavy metals from the Ga' erqin Ore Deposit, Tibet [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(4):481–490 (in Chinese with English abstract).
- Mamattursun Eziz, Ajigul Mamut, Anwar Mohammad, Ma Guofei. 2017. Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Boston Lake Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(9):1680–1694 (in Chinese with English abstract).
- Meng Yonghui, Wang Jining, Xia Qing, Liu Peibo, Li Yuyan. 2019. Accumulation characteristics and health risk assessment of metals around a plastic park [J]. *Environmental Monitoring in China*, 35(5): 69–78 (in Chinese with English abstract).
- Eduardo de Miguel, Juan F. Llamas, Enrique Chacón, Torunn Berg, Steinar Larssen, Oddvar Røyset, Marit Vadset. 1997. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: Unleaded petrol and urban lead [J]. *Atmospheric Environment*, 31(17): 2733–2740.
- National Environmental Protection Agency. 1997. GB/T 17141–1997: Soil Quality—determination of Lead, Cadmium [S] (in Chinese).
- National Environmental Protection Agency. 2007. HJ 350–2007: Standard of Soil Quality Assessment for Exhibition Sites [S] (in Chinese).
- Ni Liujian, Zhang Ganlin, Ruan Xinling, Zhao Wenjun, Yang Jinling, Zhou Lixiang. 2007. The flux and pollution character of dust fall in different functional zones of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 27(1): 2–6 (in Chinese with English abstract).
- Pan Huiyun, Lu Xinwei, Lei Kai. 2017. Comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution [J]. *Science of the Total Environment*, 609: 1361–1369.
- Praveena S M, Aris A Z. 2018. Status, source identification, and health risks of potentially toxic element concentrations in road dust in a medium-sized city in a developing country [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(2):749–762.
- Ramlan M N, Badri M A. 1989. Heavy metals in tropical city street dust and roadside soils: a case of Kuala Lumpur, Malaysia [J]. *Environmental Technology*, 10(4): 435–444.
- Sayaka S, Izumi W, Katsuji K. 2002. Heavy metal accumulation in the street dust, roadside soil and roadside tree leaves near by main streets in Tokyo, Japan [J]. *Journal of Environmental Chemistry*, 2(4): 829–837.
- Shen Mohai, Sun Lifang, Zhang Yajie, Wang Shuting, Wu Peipei, Yang Yongyu, Cao Zhiguo. 2018. Pollution characteristics of heavy metals in road dust in several cities of Henan Province [J]. *Environmental Science & Technology*, 41(S2): 117–123 (in Chinese with English abstract).
- Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, Jeffrey D W. 1980. Problems in the assessment of heavy metals levels in estuaries and the formation of pollution index [J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33(1/4): 566–575.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency). 1989. Risk Assessment Guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual Part A, vol.1 (EPA/540/1–89/002)[R]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency).1997. Exposure factors handbook EPA/600/P–95/00[R]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, 104–126.
- US EPA. 2001. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites[R]. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC ([OSWER9355.4–24]).
- US EPA. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites[R]. 2002. The U.S. Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D C.
- Wang Li, Wang Lijun, Shi Xingmin, Zhang Wenjuan, Lu Xinwei. 2017. Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in surface dusts from urban areas of Xi'an City [J]. *Environmental Science & Technology*, 40(7): 180–187 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xilong, Sato Tsutomu, Xing Baoshan, Tamamura Shuji, Tao Shu. 2004. Source identification, size distribution and indicator screening of airborne trace metals in Kanazawa, Japan [J]. *Journal of Aerosol Science*, 36(2): 197–210.
- Wang Yan, Wang Nan, Wang Suhua, Zhang Shuming, Zhen Zhihua, Zhou Jiewei, Zhou Yu. 2016. The evaluation of heavy metals pollution and potential ecological risk of farmland in Caofeidian, Hebei [J]. *Environmental Monitoring in China*, 32(4): 58–62 (in Chinese with English abstract).
- Wei Binggan, Jiang Fengqing, Li Xuemei, Mu Shuyong. 2010. Heavy metal induced ecological risk in the city of Urumqi, NW China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 160(1/4):33–45.
- Wojciech Zglobicki, Małgorzata Telecka, Sebastian Skupiński, Aneta Pasierbińska, Marcin Koziel. 2018. Assessment of heavy metal contamination levels of street dust in the city of Lublin, E Poland [J]. *Environmental Earth Sciences*, 77(23): 774–784.

- Wu Guanghai, Wang Chensheng, Chen Honghan. 2020. Eco-environmental assessment and genesis analysis of heavy metal pollution in the soil around the abandoned tungsten-molybdenum mine area in Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 47(6): 1837-1851(in Chinese with English abstract)
- Xiang Li, Li Yingxia, Shi Jianghong, Liu Jingling. 2010. Investigation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in street dusts in urban Beijing [J]. *Environmental Science*, 31(1): 159-167 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ling, Zhu Guofeng, Pan Hanxiong, Shi Peiji, Li Jiafeng, Liu Yuanfeng, Tong Huali. 2017. Surface dust heavy metals in the major cities, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 76(22): 757-770.
- Zhang Chutian, Yang Yong, Li Weidong, Zhang Chuanrong, Zhang Ruoxi, Yang Mei, Liao Xiangsen, Liu Yingying. 2015. Spatial distribution and ecological risk assessment of trace metals in urban soils in Wuhan, central China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(9): 556-571.
- Zhang Jun, Chen Zhenlou, Xu Shiyuan, Yao Chunxia, Liu Wei, Deng Huangang. 2006. Lead pollution and its assessment in urban street dust of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 27(3): 3519-3523 (in Chinese with English abstract h).
- Zhang Xin, Ji Xiaoyan. 2016. Present presentation status and countermeasures of atmospheric pollution in Korla [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 30(2): 54-57 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xinmin, Luo Kunli, Sun Xinzhang, Tan Jianan, Lu Yilun. 2006. Mercury in the topsoil and dust of Beijing City [J]. *Science of the Total Environment*, 368(2-3): 713-722.
- Zhang Zhaoyong, Anwar Mamat, Zibibula Simayi. 2019. Pollution assessment and health risks evaluation of (metalloid) heavy metals in urban street dust of 58 cities in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1): 126-140.
- Zheng Na, Liu Jingshuang, Wang Qichao, Liang Zhongzhu. 2009. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China [J]. *Science of the Total Environment*, 408(4): 26-733.
- Zheng Xiaoxia, Zhao Wenji, Yan Xing, Shu Tongtong, Xiong Qiulin, Chen Fantao. 2015. Pollution characteristics and health risk assessment of airborne heavy metals collected from Beijing bus stations [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8): 9658-9671.
- 土壤性状的影响研究[J]. *生态学报*, 21(11): 1290-1295.
- 段小丽. 2016. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 环境科学出版社.
- 段小丽. 2016. 中国人群暴露参数手册(儿童卷)概要[M]. 北京: 环境科学出版社.
- 国家环境保护局. 1997. GB/T 17141-1997 土壤质量——铅、镉的测定[S].
- 国家环境保护局. 2007. HJ 350-2007 展览会用地土壤环境质量评价标准[S].
- HJ 25.3-2014. 污染场地风险评估技术导则[S].
- 倪刘建, 张甘霖, 阮心玲, 赵文君, 杨金玲, 周立祥. 2007. 南京市不同功能区大气降尘的沉降通量及污染特征[J]. *中国环境科学*, 27(1): 2-6.
- 李仔栓, 陈龙, 赵元艺. 2018. 江西乐平市戴村重金属环境地球化学特征及意义[J]. *地球学报*, 39(1): 62-70.
- 刘青枰, 邓时强, 赵元艺, 李小赛. 2018. 西藏孜尔勒矿区区域性土壤重金属元素地球化学特征及来源解析[J]. *地球学报*, 39(4): 481-490.
- 蒙永辉, 王集宁, 夏青, 刘培渊, 李翠艳. 2019. 典型铝塑厂周边土壤重金属分布特征与健康风险评价[J]. *中国环境监测*, 35(5): 69-78.
- 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 马国飞. 2017. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地理学报*, 72(9): 1680-1694.
- 沈墨海, 孙丽芳, 张亚洁, 王书亭, 吴培培, 杨永雨, 曹治国. 2018. 河南省若干城市道路灰尘的重金属污染特征[J]. *环境科学与技术*, 41(S2): 117-123.
- 王丽, 王利军, 史兴民, 张文娟, 卢新卫. 2017. 西安城区地表灰尘中重金属分布、来源及潜在生态风险[J]. *环境科学与技术*, 40(7): 180-187.
- 王岩, 王楠, 王素华, 张树明, 甄志华, 周洁玮, 周禹. 2016. 河北曹妃甸农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *中国环境监测*, 32(4): 58-62.
- 邬光海, 王晨昇, 陈鸿汉. 2020. 内蒙古赤峰市废弃钨钼矿区周围土壤重金属污染生态环境评价及成因分析[J]. *中国地质*: 47(6): 1837-1851.
- 向丽, 李迎霞, 史江红, 刘静玲. 2010. 北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析[J]. *环境科学*, 31(1): 159-167.
- 张菊, 陈振楼, 许世远, 姚春霞, 刘伟, 邓焕广. 2006. 上海城市街道灰尘重金属铅污染现状及评价[J]. *环境科学*, 27(3): 3519-3523.
- 张欣, 季晓燕. 2016. 库尔勒市空气污染现状与成因分析[J]. *干旱环境监测*, 30(2): 54-57.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2008. GB/T 22105.1-2008 土壤质量——总汞、总砷、总铅的测定[S]. 第1部分: 土壤总汞的测定.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2008. GB/T 22105.2-2008. 土壤质量——总汞、总砷、总铅的测定[S]. 第2部分: 土壤总砷的测定.

## 附中文参考文献

- 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 2020. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 47(6): 1625-1636.
- 陈浮, 濮励杰, 彭补拙, 包浩生. 2001. 新疆库尔勒市土地利用变化对