

doi: 10.12029/gc20231229001

郑立龙, 张德程, 郝连成, 代友旭, 张健康, 李先锋, 任开文, 刘建, 孔凡全, 王勇峰. 2025. 广东雷州东部土壤重金属分布特征、来源分析及健康风险评估[J]. 中国地质, 52(1): 300-314.

Zheng Lilong, Zhang Decheng, Hao Liancheng, Dai Youxu, Zhang Jiankang, Li Xianfeng, Ren Kaiwen, Liu Jian, Kong Fanquan, Wang Yongfeng. 2025. Spatial distribution characteristic, source analysis and health risk assessment of the soil heavy metals in the eastern of Leizhou, Guangdong Province[J]. Geology in China, 52(1): 300-314(in Chinese with English abstract).

## 广东雷州东部土壤重金属分布特征、来源分析及健康风险评估

郑立龙<sup>1,2</sup>, 张德程<sup>1,2</sup>, 郝连成<sup>1,2,3</sup>, 代友旭<sup>1,2,3</sup>, 张健康<sup>1,2</sup>, 李先锋<sup>1,2</sup>, 任开文<sup>1,2</sup>,  
刘建<sup>1,2</sup>, 孔凡全<sup>4</sup>, 王勇峰<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东烟台 264000; 2. 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 山东烟台 264000; 3. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 10083; 4. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海南海口 571127)

**摘要:**【研究目的】以雷州市东部为研究区, 研究土壤重金属含量及空间分布特征, 剖析重金属来源, 评价重金属污染程度及人体的健康风险评估。【研究方法】采集 381 个点位的表层土壤样, 分析测试土壤重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn, 应用 GIS 软件分析重金属元素空间分布特征, 运用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数开展土壤重金属污染程度评价, 采用蒙特卡洛健康风险模型评估人体健康风险。【研究结果】(1)As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 在土壤中的平均值依次为  $5.85 \times 10^{-6}$ 、 $0.079 \times 10^{-6}$ 、 $64.03 \times 10^{-6}$ 、 $14.11 \times 10^{-6}$ 、 $0.07 \times 10^{-6}$ 、 $21.23 \times 10^{-6}$ 、 $35.38 \times 10^{-6}$ 、 $76.45 \times 10^{-6}$ , 其中 Cd、Cr、Ni 和 Zn 超过广东省土壤背景值, 表明这四种元素在土壤中呈相对富集。(2)单因子污染指数和内梅罗综合污染指数显示研究区土壤质量总体较好, 以清洁状态和尚清洁状态为主, 仅有个别点位存在轻度污染。(3)重金属除了地质背景来源, 还与交通源、农业源和工业源有关。(4)健康风险评估表明, 土壤重金属对成人和儿童的非致癌健康风险可以忽略, 但对成人和儿童存在可耐受致癌健康风险, 最主要的致癌因素为重金属元素 As; 敏感性分析表明非致癌风险中皮肤黏着系数(SL)是影响非致癌风险的首要因素, 致癌风险中 SL 和 As 分别是影响成人和儿童致癌的首要因素; 致癌途径主要是通过皮肤暴露和手-口暴露途径进入人体。【结论】雷州市东部土壤重金属污染程度较低, 整体呈轻微生态风险, 但 Hg 和 Cd 应引起足够的重视; As 是影响人体健康的主要致癌因素, 应加强对 As 的污染防控。

**关键词:** 土壤重金属; 污染评价; 健康风险评估; 相关性分析; 因子分析; 环境地质调查工程; 雷州

**创新点:** 采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法研究了雷州市水稻主产区的土壤重金属污染情况, 分析了重金属来源, 并采用蒙特卡洛法健康风险评估模型人体的健康风险评估。

中图分类号: X53; X820 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0300-15

## Spatial distribution characteristic, source analysis and health risk assessment of the soil heavy metals in the eastern of Leizhou, Guangdong Province

收稿日期: 2023-12-29; 改回日期: 2024-06-03

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20208011、DD20243125)联合资助。

作者简介: 郑立龙, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 从事环境地质调查与评价工作; E-mail: zhenglilong1020@126.com。

通信作者: 王勇峰, 男, 1980 年生, 硕士生, 高级工程师, 主要从事自然资源调查与管理工作; E-mail: 76861559@qq.com。

ZHENG Lilong<sup>1,2</sup>, ZHANG Decheng<sup>1,2</sup>, HAO Liancheng<sup>1,2,3</sup>, DAI Youxu<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jiankang<sup>1,2</sup>,  
LI Xianfeng<sup>1,2</sup>, REN Kaiwen<sup>1,2</sup>, LIU Jian<sup>1,2</sup>, KONG Fanquan<sup>4</sup>, WANG Yongfeng<sup>1,2</sup>

(1. *Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264004, Shandong, China*; 2. *Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land–Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, Shandong, China*; 3. *School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 4. *Haikou Marine Geological Survey Center, Haikou 571127, Hainan, China*)

**Abstract:** This paper is the result of environmental geological survey engineering.

**[Objective]** Taking the eastern part of Leizhou as research area, this paper studies the concentration and spatial distribution characteristics of heavy metals in soil, analyzes the sources of heavy metals, evaluates the degree of heavy metal pollution, and assess the health risks to human health. **[Methods]** A total of 381 soil samples are collected to measure the concentration of heavy metal elements such as As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn. GIS technique is used to analyze the spatial distribution characteristics of soil heavy metals; the single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index methods are used to evaluate the degree of soil heavy metals pollution, and Monte Carlo health risk model is used to assess human health risks. **[Results]** (1) The average concentration values of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn in the soil are  $5.85 \times 10^{-6}$ ,  $0.079 \times 10^{-6}$ ,  $64.03 \times 10^{-6}$ ,  $14.11 \times 10^{-6}$ ,  $0.07 \times 10^{-6}$ ,  $21.23 \times 10^{-6}$ ,  $35.38 \times 10^{-6}$ ,  $76.45 \times 10^{-6}$ , respectively. Among them, the average concentration values of Cd, Cr, Ni and Zn in the surface soils exceed the background values of soils in Guangdong Province, which indicates that these four heavy metal elements in the soil are relatively enriched. (2) The single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index show that the soil is "clean" in the study area, with only a few points being polluted slightly. (3) In addition to geological background sources, heavy metals in surface soil also come from sources such as transportation, agriculture, and industry. (4) The health risk assessment of heavy metals shows that the non-carcinogenic health risks of children and adults could be ignored, but there are tolerable carcinogenic risks for both children and adults. The major carcinogenic factor is As. Sensitivity analysis indicates that the SL (Skin adhesion coefficient) is the primary factor affecting non-carcinogenic health risk, while the SL and As are the primary factors affecting carcinogenic health risk in adults and children, respectively. The main exposure routes of carcinogenicity are skin exposure and hand-oral exposure. **[Conclusions]** The pollution of soil heavy metals in the eastern of Leizhou is relatively low, and the ecological risk is low on the whole. However, Hg and Cd should be given sufficient attention. As is the main carcinogenic factor affecting human health, and pollution prevention and control of As should be strengthened.

**Key words:** soil heavy metals; pollution assessment; health risk assessment; correlation analysis; factor analysis; environmental geological survey engineering; Leizhou.

**Highlights:** The single factor pollution index, Nemerow comprehensive pollution index were used to study the soil heavy metal pollution in the main rice producing area of Leizhou and analyze the sources of heavy metals. We use the Monte Carlo health risk assessment model to assess the human health risk.

**About the first author:** ZHENG Lilong, male, born in 1988, master, engineer, mainly engaged in environmental geology investigation and evaluation; E-mail: [zhenglilong1020@126.com](mailto:zhenglilong1020@126.com).

**About the corresponding author:** WANG Yongfeng, male, born in 1980, master candidate, senior engineer, mainly engaged in natural resource investigation and management; E-mail: [76861559@qq.com](mailto:76861559@qq.com).

**Fund support:** Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20208011, No.DD20243125).

## 1 引 言

土壤作为自然资源要素之一,是农业发展的物质基础(曾庆庆等, 2021)。随着城镇化的快速发展以及农业科技的进步, Hg、Pb、Zn 等重金属污染物通过不同的方式进入到土壤中。不同于其他污染

物,重金属具有残留周期长、易积累、易迁移、毒性大和不可逆等特性(余涛等, 2021),一旦进入土壤中,将会通过水体、农作物等各种方式循环进入人体,进而影响人体健康(宋伟等, 2013; 薛强等, 2014; 张建等, 2017; 安永龙等, 2023; Chen et al., 2023; 涂春霖等, 2023; Li et al., 2024)。因此,查明粮食主产

区的土壤重金属含量及空间分布特征,开展土壤重金属污染评价和人体健康风险评估,对改善土壤质量和保护人体健康具有重要意义。

雷州市东部的东西洋田素有雷州半岛“天然粮仓”之称,有着“东洋熟、雷州足”的美誉,同时也是广东省最大的水稻主产区之一。目前,关于雷州市土壤重金属的研究相对薄弱,现有报道均侧重于对湛江市或整个雷州半岛土壤重金属研究(郑小林等, 2004; 关卉等, 2006; 杨国义等, 2007; 罗松英等, 2019; 叶宇婷等, 2019; 陈碧珊等, 2022a, b, c; 孙志佳等, 2022),在研究区范围上不足以覆盖到本区或者范围覆盖本区但采样密度低、样品数量少而不足以代表本区,且研究内容多以重金属污染评价为主,鲜有对人体健康风险的评估。据此,本文以雷州市东部为研究区,通过调查分析土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 元素含量,应用 GIS 软件分析土壤重金属空间分布特征,运用单因子污染指

数和内梅罗综合污染指数开展重金属污染程度评价,结合相关性分析和因子分析探讨重金属来源,采用蒙特卡洛人体健康风险评估法来评估重金属对人体的健康风险,以期为雷州市水稻主产区的土壤重金属污染防治和保护人体健康等提供科学依据。

## 2 研究区概况

雷州市坐落在雷州半岛中部,行政区划隶属于湛江市。研究区地处雷州市东部(110°04'30"E ~ 110°12'30"E, 20°49'30"N ~ 20°57'30"N),地势平缓,以海积平原为主,整体表现为西高东低,南渡河自西向东流经遂溪县、雷州市后注入雷州湾(图 1)。研究区位于北回归线以南、纬度较低,多年平均气温约 22°,雨量充沛,多年平均降雨量在 1500 mm 左右,是以东北季风和西南季风为主的亚热带季风气候;区内主要发育第四系沉积物,土壤类型以水稻

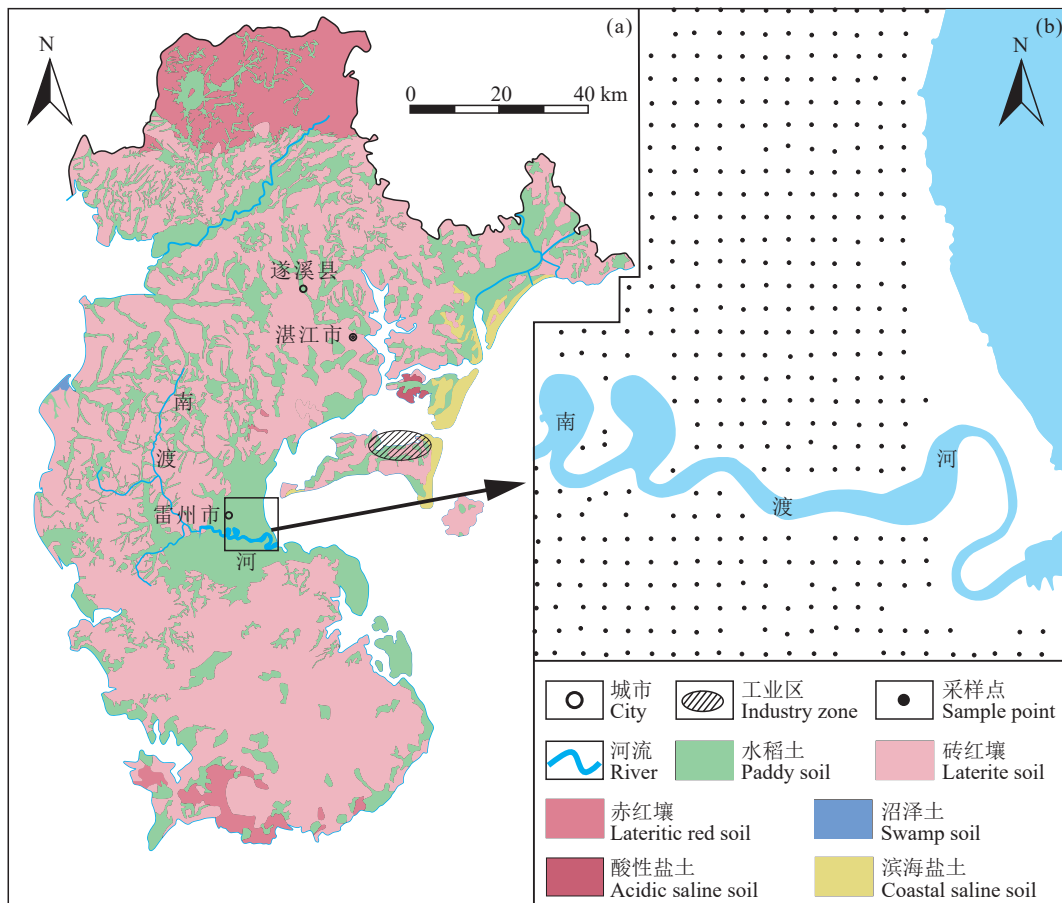


图 1 雷州市土壤类型分布图(a)及土壤采样点位图(b)

Fig.1 Distribution map of soil types in Leizhou City (a) and the distribution of soil sampling points (b)

土为主,西北部以砖红壤为主,滨海地带多为盐渍沼泽土。

### 3 资料来源与分析方法

#### 3.1 资料来源

本文资料来源于烟台海岸带地质调查中心实施的雷州半岛东部海岸带综合地质项目,2021年4—5月在研究区内进行的土壤采样工作。采样点位基本呈等间距均匀分布,网格密度为500 m×500 m,共布置381个点位(图1)。使用佳明GPS手持机定位,用竹铲采集0~20 cm厚的表层土壤样,每个点位的土壤样品为采集混合构成,样品重量不低于2.0 kg,装入干净布袋,做好标记保存。野外使用托普云农土壤测试仪对土壤pH进行现场测试(仪器测试范围0~14,精度0.1),统计结果表明土壤整体呈弱酸性,pH波动范围5.5~6.5。

#### 3.2 土壤样品前处理与分析测试

##### 3.2.1 土壤样品处理

###### (1) 风干处理

野外样品采集后置于整洁的通风场地上自然风干,适时翻转并用木棒敲碎以防止黏结成块,同时剔除土壤以外的杂物。风干后的土壤样品,首先用木棒碾压并将植物残体、石块等其他非土物质剔除干净;其次将压碎的土壤过2 mm孔径筛,未过筛的土粒需重新碾压过筛直至全部样品通过2 mm孔径的尼龙筛为止;最后将过筛后的土壤样品混匀,分主副样,主样(重量不低于500 g)用纸袋盛装送实验室分析测试,副样(重量不低于300 g)装入干净的塑料瓶中保存。

###### (2) 质量控制

实验室样品加工前应在低于40℃的恒温干燥箱内充分烘干,采用无污染的球磨机进行加工粉碎使其通过孔径0.074 mm(200目)的尼龙筛,为保证质量要求,每一批样品中随机抽取一定数量的样品(3%~5%),从中分出5 g过筛检查,不合格者全部返工重新加工。

###### (3) 空白

每批次分析至少插入2个空白样品,与试样同时分析,空白样品分析测试结果不得高于方法检出限。若空白样品分析测试结果低于方法检出限,则可忽略不计;若空白样品分析测试结果高于方法检

出限,则查找原因并采取纠正预防措施,并重新对本批次试样进行分析测试。

###### (4) 准确度控制

每一批次样品,其数量在100件以内随机插入4个标准物质(GSS)作为质控样,当标准物质的检测结果小于标准物质的标准值时,则本批次样品分析测试结果合格,否则本批次样品重新分析。

###### (5) 精密度控制

每100件分析样品(含标准物质)按照5%的比例随机进行重复性密码分析,计算基本分析值与重复性分析值的相对偏差(RD),要求相对偏差(RD)必须符合检测标准要求,否则本批次样品重新分析测试。

##### 3.2.2 样品测试方法与仪器

所有的样品分析测试依据《岩石矿物分析》(DZG 20.01—2011)中规定的方法进行:元素As依据氢化物发生-原子荧光光谱法,元素Hg依据冷蒸气-原子荧光光谱法,元素Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn依据电感耦合等离子体质谱法。采用的仪器有AFS-9800原子荧光光谱仪、XGY1011A原子荧光光谱仪、iCAP-Q电感耦合等离子体质谱仪。元素As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn的检出限(单位μg/g)依次为1、0.03、5、1、0.0005、2、2、4。

#### 3.3 土壤重金属污染评价方法

##### 3.3.1 单因子污染指数法及Nemerow综合污染指数法

单因子污染指数法(Nemerow, 1974)即为土壤重金属元素实测含量值与参照标准值的比值,计算式为:

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

其中: $P_i$ 为重金属元素*i*的污染指数, $C_i$ 为重金属元素*i*的实测含量值, $S_i$ 为土壤重金属元素*i*的参考标准值,本文以《土壤环境质量标准》(GB15618—2018)中污染风险筛选值为参考标准值。单因子污染指数等级划分方案见表1。

内梅罗综合污染指数法(Nemerow, 1974)能够综合反映出某个采样点位的污染程度,兼顾到单因子污染指数的最大值与平均值,其公式为:

$$N_i = \sqrt{\frac{(P_{i\max})^2 + (P_{i\text{adv}})^2}{2}} \quad (2)$$

其中: $N_i$ 为重金属元素*i*的综合污染指数, $P_{i\max}$

为重金属元素  $i$  的单因子污染指数最大值,  $P_{iadv}$  为重金属元素  $i$  的单因子污染指数平均值。内梅罗综合污染指数等级划分方案见表 1。

### 3.3.2 蒙特卡洛法健康风险评估

健康风险评估主要是通过计算暴露量和敏感性来评估土壤重金属元素的非致癌和致癌风险。手-口摄入、呼吸摄入以及皮肤接触是重金属元素进入人体的三种主要途径, 基于 U.S.EPA 推荐的健康风险评估模型对雷州市东西洋田附近居民人体健康风险进行致癌和非致癌健康风险评估(李军等, 2024), 其公式为:

$$ADD_{ing} = (C_i \times IngR \times EF \times ED \times 10^{-6}) / (BW \times AT) \quad (3)$$

$$ADD_{inh} = (C_i \times InhR \times EF \times ED) / (PEF \times BW \times AT) \quad (4)$$

$$ADD_{drem} = (C_i \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times 10^{-6}) / (BW \times AT) \quad (5)$$

式中  $ADD_{ing}$ 、 $ADD_{inh}$ 、 $ADD_{drem}$  分别为土壤重金属经手-口摄入、呼吸摄入和皮肤摄入的日均摄入量,  $C_i$  为土壤重金属元素  $i$  的实测含量值, 具体参数见表 2(马杰等, 2023)。

土壤中重金属的非致癌风险(HI)和致癌风险(TCR)的计算公式分别为:

$$HI = \Sigma HQ = \Sigma(ADD_{ij} / RfD_{ij}) \quad (6)$$

$$TCR = \Sigma CR = \Sigma(ADD_{ij} \times SF_{ij}) \quad (7)$$

式中, HI 和 HQ 分别为综合和单一非致癌风险指数, TCR 和 CR 分别为综合和单一致癌风险指数,  $ADD_{ij}$  为重金属元素  $i$  在不同途径  $j$  的非致癌和致癌日均暴露量,  $RfD_{ij}$  为重金属元素  $i$  在不同途径  $j$  的非致癌风险参考剂量(mg/(kg×d)),  $SF_{ij}$  为重金属元素  $i$  在不同途径  $j$  的致癌斜率因子。RfD 和 SF 的参考值见表 3(李剑锋和冯李霄, 2023; 马杰等, 2023)。当  $HI/HQ \leq 1$  时, 说明非致癌风险可以忽略, 反之则存在非致癌风险; 当  $TCR/CR \leq 1.00 \times 10^{-6}$  时, 说明致癌风险可以忽略, 当  $1.00 \times 10^{-6} < TCR/CR \leq 1.00 \times 10^{-4}$  时, 说明存在可耐受致癌风险, 当  $TCR/CR < 1.00 \times 10^{-4}$  时, 说明存在不可耐受致癌风险。

## 4 结果与分析

### 4.1 土壤重金属含量统计值

从表 4 可知, 雷州市东部土壤重金属含量平

表 1 单因子及内梅罗综合污染等级划分方案

Table 1 Pollution index grade of single and comprehensive Nemerow

等级	单因子污染指数	污染程度	综合污染指数	污染程度	污染水平
1	$P_i \leq 0.7$	无污染	$N_i \leq 0.7$	无污染	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	警戒级	$0.7 < N_i \leq 1.0$	警戒级	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻度污染	$1.0 < N_i \leq 2.0$	轻度污染	开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	中度污染	$2.0 < N_i \leq 3.0$	中度污染	受到中度污染
5	$P_i > 3.0$	重度污染	$N_i > 3.0$	重度污染	受到重度污染

表 2 不同暴露途径下蒙特卡洛土壤重金属健康风险模型参数值

Table 2 Parameter values of health risk assessment model under the different exposure pathways via Monte Carlo simulation

暴露参数	含义	单位	概率分布	取值	
				成人	儿童
IngR	土壤摄入量	mg/d	三角分布	30 (4、52)	103 (66、161)
InhR	呼吸摄入量	m <sup>3</sup> /d	点分布	19	8.6
EF	暴露频率	d/a	三角分布	345 (180、365)	
ED	暴露年限	a	点分布	24	6
BW	体重	kg	对数分布	57.03±1.18	16.68±1.48
AT	平均暴露时间	d	点分布	365×ED (非致癌) 365×76 (致癌)	
PEF	颗粒物释放因子	m <sup>3</sup> /kg	点分布	1.36×10 <sup>9</sup>	
SA	皮肤暴露面积	m <sup>2</sup>	点分布	0.54	0.23
SL	皮肤黏着系数	mg/(cm <sup>2</sup> ·d)	对数正态	0.49±0.54	0.65±1.2
ABS	皮肤吸收因子	无量纲	点分布	0.001 (非致癌) 0.01 (致癌)	

注: 三角分布: 最可能值(最小值、最大值); 对数分布: 平均值±标准差。

表 3 不同暴露途径下土壤重金属的斜率因子和参考剂量

元素	RfD/(mg/(kg·d))			SF/(mg/(kg·d))		
	手-口摄入	呼吸摄入	皮肤摄入	手-口摄入	呼吸摄入	皮肤摄入
As	$3.00 \times 10^{-4}$	$1.23 \times 10^{-4}$	$1.23 \times 10^{-4}$	1.50	$1.51 \times 10^1$	3.66
Cd	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-5}$	6.10	6.3	—
Cr	$3.00 \times 10^{-3}$	$2.86 \times 10^{-5}$	$6.00 \times 10^{-5}$	$8.50 \times 10^{-3}$	$4.20 \times 10^1$	—
Cu	$4.00 \times 10^{-2}$	$4.02 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-2}$	—	—	—
Hg	$3.00 \times 10^{-4}$	$8.57 \times 10^{-5}$	$2.10 \times 10^{-5}$	—	—	—
Ni	$2.00 \times 10^{-2}$	$2.06 \times 10^{-2}$	$5.40 \times 10^{-3}$	—	$8.40 \times 10^{-1}$	—
Pb	$3.50 \times 10^{-3}$	$3.52 \times 10^{-3}$	$5.25 \times 10^{-4}$	$8.50 \times 10^{-3}$	—	—
Zn	$3.00 \times 10^{-1}$	$6.00 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^{-1}$	—	—	—

注: “—”表示为无数据; RfD和SF参考值详见文献(马杰等, 2023; 李剑锋和冯李霄, 2023)。

表 4 土壤重金属含量测量结果 ( $10^{-6}$ )

元素	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数%	背景值	风险筛选值
As	11.60	1.11	5.85	1.58	27	8.9	30
Cd	0.282	0.015	0.079	0.036	45	0.06	0.4
Cr	122.00	13.90	64.03	14.75	23	50.5	250
Cu	78.40	5.08	14.11	4.79	34	17	50
Hg	0.351	0.003	0.07	0.05	68	0.08	0.5
Ni	73.00	4.21	21.23	7.05	33	14.4	70
Pb	63.30	5.47	35.58	9.04	25	36	100
Zn	284.00	12.60	76.45	27.20	36	47.3	200

注: 背景值为广东省土壤环境背景值, 风险筛选值为《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018) 水田重金属含量 ( $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ )。

均值(mg/kg)为  $\text{Zn}=76.45 > \text{Cr}=64.03 > \text{Pb}=35.58 > \text{Ni}=21.23 > \text{Cu}=14.11 > \text{As}=5.85 > \text{Cd}=0.079 > \text{Hg}=0.069$ , 研究区重金属元素平均值为广东省土壤背景值的 0.66~1.62 倍, 其中重金属元素 Cd、Cr、Ni、Zn 超过广东省土壤背景值, 分别为背景值的 1.32 倍、1.27 倍、1.47 倍、1.62 倍, 呈相对富集特征, Hg、Pb 略低于背景值。

变异系数可以用来衡量重金属元素在空间上的离散程度, 变异系数值越大, 意味着重金属元素在空间分布上越不均匀, 表明其受到的人类活动影响的可能性就越大, 研究区重金属元素变异系数为  $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr}$ , 介于 20%~70%, 属于中等变异, 表明这八种重金属元素有可能受到了人类活动的影响。

与《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018) 重金属元素风险筛选值相比, 研究区土壤中八种重金属元素的平均值均未超标, 仅个别点位的 Cu、Zn 含量超过风险筛选值。

#### 4.2 土壤重金属空间分布特征

运用 MapGIS67 软件克里格插值法对 381 个点位的土壤重金属含量进行空间插值处理, 绘制出

8 种重金属元素的空间分布图(图 2, 图 3)。

元素 As 在南渡河北岸和研究区北部边界附近有高值区分布; 元素 Cd 的高值区主要分布于南渡河南岸, 另研究区北部有一处高值区分布; 元素 Cr 空间分布较均匀, 仅在南渡河北岸有一处高值区; 元素 Cu 高值区主要分布在南渡河以南区域(图 2)。

元素 Hg 总体偏低, 仅在城区附近有一片高值区; 元素 Ni 的高值区主要分布于研究区的南部边缘; 元素 Pb 分布相对均匀, 高值区分布于南渡河下游南岸; 元素 Zn 的高值区主要沿着南渡河两岸分布(图 3)。

#### 4.3 土壤重金属污染评价

以《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018) 中的重金属风险筛选值为评价标准, 采用单因子污染指数和 Nemreow 综合污染指数对雷州市东部土壤环境质量进行评价, 分析结果(图 4)显示, 单因子污染指数在雷州市东部土壤重金属元素 Hg、As、Cr、Pb 均处于清洁状态; 重金属元素 Ni、Cu、Cd 大部分点位处于清洁状态、尚清洁, 仅有个别点位处于轻度污染状态; 重金属元素 Zn 污染程度略高, 污染

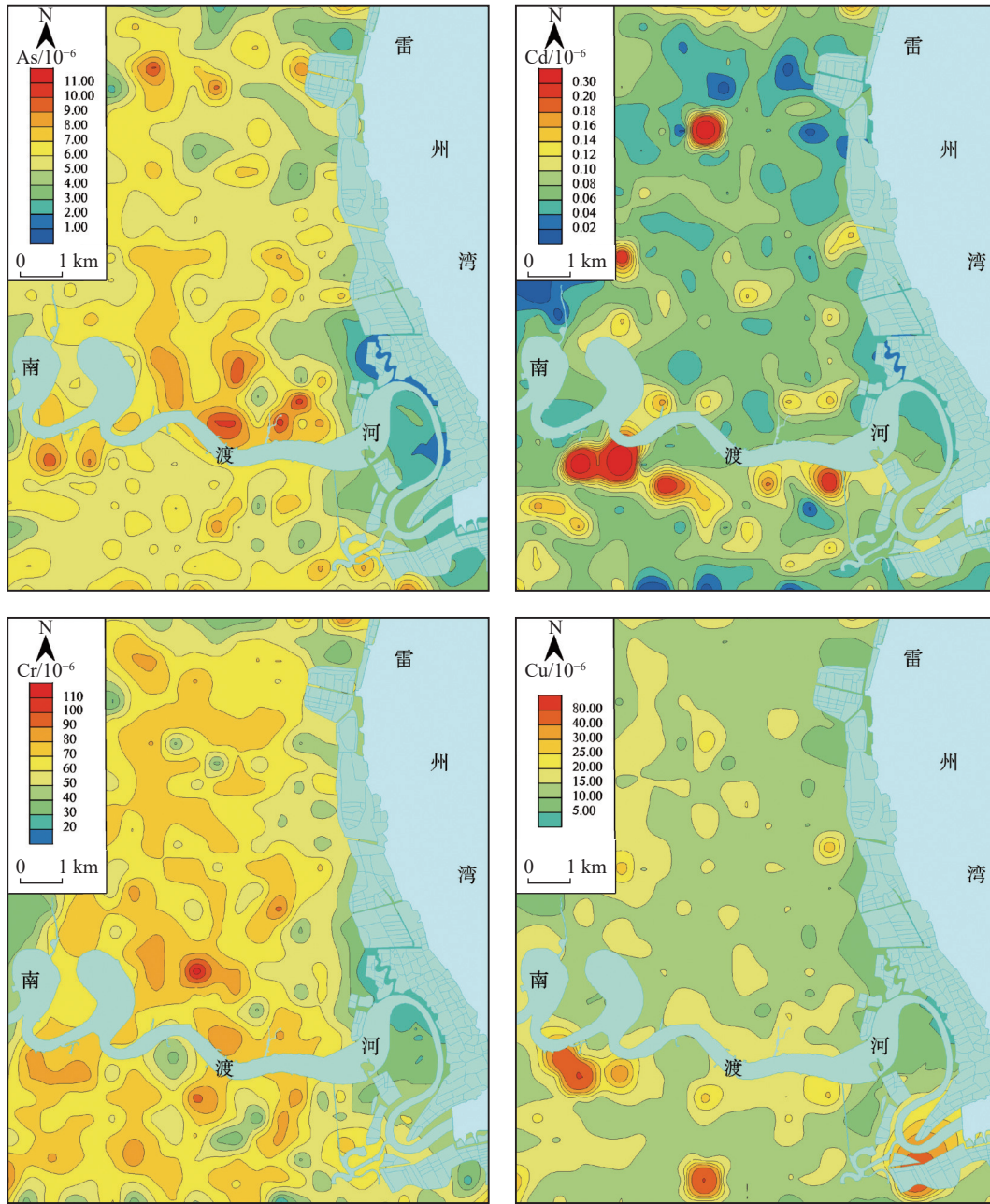


图2 土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu 空间分布特征图  
 Fig.2 Spatial distribution characteristics of heavy metal (As, Cd, Cr, Cu) in the soil

点位数达 4 个, 个别点位已处于轻度污染状态。Nemrow 综合污染指数显示雷州市东部土壤环境总体较好, 清洁和尚清洁状态的点位数达 379 个, 仅有 2 个点位存在轻度污染。

#### 4.4 土壤重金属来源分析

相关性分析常被用来分析元素间是否具有同源性(崔邢涛等, 2016), 本文采用 Pearson 相关分析法对重金属元素间的相关性进行分析。在此之前,

首先对土壤重金属数据进行正态分布检验, 只有满足正态分布的数据方可应用 SPSS19 软件进行相关性分析。土壤中 8 种重金属元素含量数据的相关性分析结果见表 5。

土壤重金属元素 As-Cr-Cu-Ni-Pb、Hg-Cu、Zn-Cd-Cr-Cu-Ni-Pb 之间的相关系数均大于 0.4, 其中 Cr-Cu-Ni-Zn、Pb-Cr-Ni-Zn 之间的相关系数均大于 0.6, 且在 0.01 水平(双侧)上显著相关

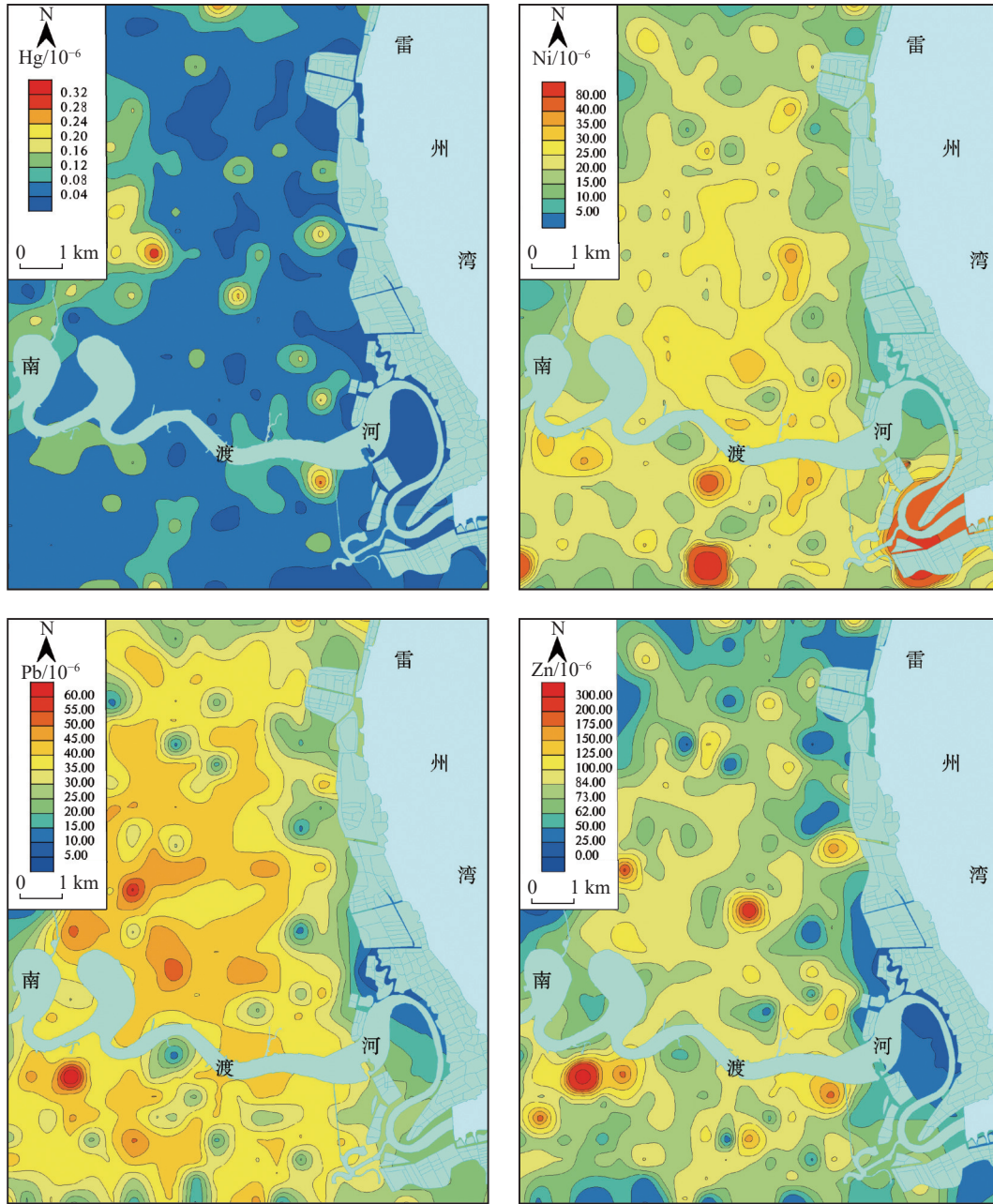


图 3 土壤重金属 Hg, Ni, Pb, Zn 空间分布特征图

Fig.3 Spatial distribution characteristics of heavy metal (Hg, Ni, Pb, Zn) in the soil

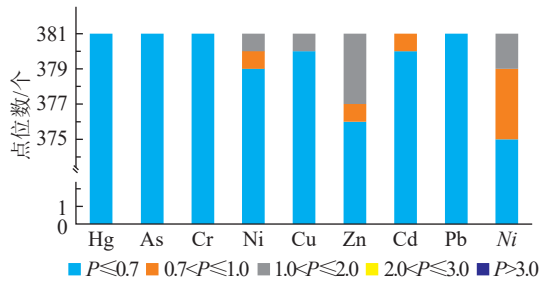
(表 5), 表明这些重金属元素间可能具有同源性, 并且可能存在复合来源。

为进一步明确土壤重金属污染来源类别, 采用因子分析法对相关性分析结果进行进一步验证。通过对土壤重金属含量进行 KMO 检验, 得出的统计量为 0.802, Bartlett 球形检验度相伴概率小于 0.001, 表明可以采用因子分析法分析土壤重金属含量。采用方差最大旋转因子法, 抽取 3 个特征值

大于 0.7 的主因子, 3 个主因子累积方差的贡献率为 79.250%(表 6), 表明提取出来的前 3 个主因子可以将这 8 种重金属数据的大部分信息反映出来。

第一主因子(F1)的方差贡献率为 44.891%, 主要包括 As、Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 这 6 种重金属元素, 其中 Cr 和 Ni 载荷最高, 分别为 0.877、0.864。一般认为, 土壤中的 Cr、Ni 主要来源于自然界, 主要受成土母质的影响(Borůvka et al., 2005)。相关性分



图4 不同等级污染指数点位数统计图( $n=381$ )Fig.4 Statistical graph of different level of pollution index ( $n=381$ )

析结果表明 Cr 和 Ni 分别与 Cu、Zn、Pb 这 3 种重金属元素间存在强相关性,且在空间分布上较均匀,表明这 5 种重金属元素具有相同或相似的来源。然而,重金属元素 Cr、Ni、Zn 分别是广东省土壤背景值的 1.27 倍、1.47 倍、1.62 倍(表 4),说明除了受到成土母质的影响,这 3 种重金属元素还有可能受到一定程度的人为影响。研究区内的东西洋田作为水稻主产区,长期以来使用大量的含 Zn 化肥以及含 Zn 水反复灌溉,在提高水稻增产增收的同时(赵明, 2019; 吴弦业等, 2022),也有可能

Zn 在土壤中常年累积致使 Zn 含量升高(Viard et al., 2004; 李春芳等, 2017)。同时也有研究成果表明,使用含有 Pb-Zn 的汽油可能导致交通线周边土壤中的 Pb、Zn 含量升高(Sun et al., 2013; 陈丹青等, 2016; 周怡等, 2020),从图 3 中亦可以看出在南渡河北岸有一个近北北东向的高值区,此处正为水稻主产区的交通要线。综合分析, F1 因子为自然源、农业源和交通源的共同作用下的污染源。

第二主因子(F2)的方差贡献率分别为 19.203%, 主要包括 Cd 和 Zn, 载荷分别为 0.908 和 0.535。重金属元素 Cd 含量平均值为广东省土壤背景值的 1.32 倍,且变异系数为 45%,表明该元素可能受到一定程度的人为影响。已有研究成果表明重金属元素 Cd 主要来源于农药以及化肥等农业生产活动(陈雅丽等, 2019; Hu et al., 2020),造成 Cd 含量分布不均的原因可能是由于农药及化肥使用量的不同,在土壤样品采集期间,偶尔可见大量的农药瓶罐丢弃在田间地头。因此推测 F2 因子为农业源。

第三主成分(F3)的方差贡献率分别为 15.156%, 主要包括 Hg, 载荷为 0.972。重金属元素 Hg 的含

表 5 土壤重金属含量相关性分析 ( $n=381$ )Table 5 Correlation analysis of soil heavy metals concentration ( $n=381$ )

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1							
Cd	0.000	1						
Cr	0.494**	0.219**	1					
Cu	0.401**	0.430**	0.606**	1				
Hg	-0.004	0.276**	0.082	0.401**	1			
Ni	0.480**	0.275**	0.800**	0.635**	0.008	1		
Pb	0.406**	0.202**	0.711**	0.486**	0.261**	0.648**	1	
Zn	0.354**	0.480**	0.630**	0.701**	0.281**	0.754**	0.645**	1

注: \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 6 土壤重金属含量因子分析

Table 6 Factor analysis of soil heavy metals concentration

重金属元素	旋转前因子			旋转后因子		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
As	0.565	-0.473	0.293	0.748	-0.265	0.018
Cd	0.454	0.613	-0.517	0.071	0.908	0.141
Cr	0.853	-0.275	-0.020	0.877	0.185	-0.009
Cu	0.821	0.229	0.058	0.640	0.425	0.376
Hg	0.309	0.720	0.595	0.039	0.148	0.972
Ni	0.872	-0.259	-0.194	0.864	0.323	-0.117
Pb	0.797	-0.111	0.192	0.783	0.116	0.240
Zn	0.876	0.145	-0.147	0.698	0.535	0.186
方差贡献	4.186	1.347	0.807	3.591	1.536	1.212
贡献率/%	52.319	16.843	10.088	44.891	19.203	15.156
累积贡献率/%	52.319	69.162	79.250	44.891	64.094	79.250

注: 旋转在 4 次迭代后收敛。

量平均值与广东省土壤背景值相近,且变异系数相对最大,达 68%,表明该元素的来源可能受到一定程度的人为影响,在某些地段出现不同程度的富集。部分研究成果表明,化石燃料燃烧、矿产冶炼的过程中会产生大量的 Hg 灰分,这些元素一般以大气干湿沉降和地表径流的途径进入土壤中,导致 Hg 在土壤中不断积累(李莘等, 2018; 安永龙等, 2023)。经调查,在研究区东北部的东海岛上,分布有数家大型石化和钢铁企业的临港型重化产业园,这些工业企业运输、冶炼以及排出的废气中含有的 Hg 可能会随着东北季风在此沉降。因此,推测 F3 因子为工业源。

综上所述,研究区的重金属来源主要为自然源、农业源、交通源和工业源。

#### 4.5 基于蒙特卡洛模拟的土壤重金属健康风险评估

采用 Oracle Crystal Ball 11.1.2.4 进行蒙特卡洛模拟,试验次数设定为 10000,置信度为 95%,对土壤重金属健康风险进行非致癌风险、致癌风险以及敏感度分析。

##### 4.5.1 土壤重金属非致癌健康风险评估

雷州市东部土壤重金属非致癌健康风险评估结果如表 7 和图 5 所示。8 种重金属的非致癌健康风险指数(HQ)的最大值均小于 1,其中成人平均值大小依次为: Cr>As>Pb>Ni>Cd>Hg>Cu>Zn,儿童平均值大小依次为: Cr>As>Pb>Ni>Cu>Hg>Zn>Cd,表明重金属元素 Cr 是引发研究区不同人群非致癌风险的首要危害元素。从表 7 中可以看出,儿童的非致癌健康风险指数高于成人的非致癌健康风险指数。从图 5 土壤非致癌风险概率分布(HI)可知,成人非致癌风险指数的 95% 分位值(HI=0.15)和儿童非致癌风险指数的 95% 分位值(HI=0.67)均小于 1,

未超出引发非致癌健康阈值 1,说明雷州市东部土壤重金属对成人和儿童的非致癌健康风险可以忽略。

##### 4.5.2 土壤重金属致癌健康风险评估

雷州市东部土壤重金属致癌健康风险评估结果(图 6)显示,5 种重金属致癌健康风险指数 CR 均值大小表现为: As>Cr>Cd>Pb>Ni,且儿童致癌风险均高于成人致癌风险。对成人和儿童而言,重金属元素 As 的均值和 95% 分位值均大于  $1.00 \times 10^{-6}$ ,且最大值小于  $1.00 \times 10^{-4}$ ,说明该元素对成人和儿童均存在可耐受致癌风险;重金属元素 Cr、Ni、Cd、Pb 的均值和最大值均小于  $1.00 \times 10^{-6}$ ,说明这四种元素的致癌风险可以忽略。综合致癌健康风险指数(TCR)表明,成人和儿童的 TCR 平均值分别为  $3.94 \times 10^{-6}$ 、 $5.5 \times 10^{-6}$ ,且成人致癌健康风险指数的 95% 分位值和儿童致癌健康风险指数的 95% 分位值分别为  $9.43 \times 10^{-6}$ 、 $9.8 \times 10^{-6}$ ,均大于  $1.00 \times 10^{-6}$ ,说明雷州市东部的土壤重金属对成人和儿童存在一定的可耐受致癌风险。

##### 4.5.3 敏感性分析

敏感度分析结果为正值,表示与健康风险结果呈正相关;敏感度分析结果为负值,表示与健康风险结果呈负相关(方晴等, 2021)。雷州市东部土壤重金属非致癌和致癌敏感性分析结果如图 7 所示。

就非致癌敏感性而言,皮肤黏着系数 SL 对成人和儿童的敏感性最大,分别解释了 78.3% 和 32% 的敏感性,除此之外,对成人非致癌敏感性还有较大影响的因素有 Cr、Ingr、EF,分别解释出了 6.3%~7.5% 的敏感性,其他因素对成人非致癌敏感性的影响不足 1%,近乎可以忽略不计(图 7a);对儿童非致癌敏感性还有较大影响的因素有 Ingr、EF、Cr、As、Pb,分别解释出了 2.4%~22.5% 的敏感性,

表 7 土壤重金属非致癌健康风险评估

Table 7 Non-carcinogenic health risk indices of soil heavy metals

重金属元素	HQ <sub>max</sub>		HQ <sub>min</sub>		HQ <sub>adv</sub>	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	$2.34 \times 10^{-2}$	$2.34 \times 10^{-1}$	$2.24 \times 10^{-3}$	$2.24 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-1}$
Cd	$1.38 \times 10^{-3}$	$4.05 \times 10^{-3}$	$7.36 \times 10^{-5}$	$2.15 \times 10^{-4}$	$3.87 \times 10^{-4}$	$1.13 \times 10^{-3}$
Cr	$1.10 \times 10^{-1}$	$4.11 \times 10^{-1}$	$1.26 \times 10^{-2}$	$4.68 \times 10^{-2}$	$5.79 \times 10^{-2}$	$2.16 \times 10^{-1}$
Cu	$1.26 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$8.17 \times 10^{-5}$	$7.77 \times 10^{-4}$	$2.27 \times 10^{-4}$	$2.16 \times 10^{-3}$
Hg	$1.32 \times 10^{-3}$	$8.25 \times 10^{-3}$	$1.24 \times 10^{-5}$	$7.75 \times 10^{-5}$	$2.58 \times 10^{-4}$	$1.62 \times 10^{-3}$
Ni	$2.41 \times 10^{-3}$	$2.25 \times 10^{-2}$	$1.39 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-3}$	$7.00 \times 10^{-4}$	$6.53 \times 10^{-3}$
Pb	$1.43 \times 10^{-2}$	$1.16 \times 10^{-1}$	$1.23 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-2}$	$8.03 \times 10^{-3}$	$6.51 \times 10^{-2}$
Zn	$5.13 \times 10^{-4}$	$5.61 \times 10^{-3}$	$2.28 \times 10^{-5}$	$2.49 \times 10^{-4}$	$1.38 \times 10^{-4}$	$1.51 \times 10^{-3}$

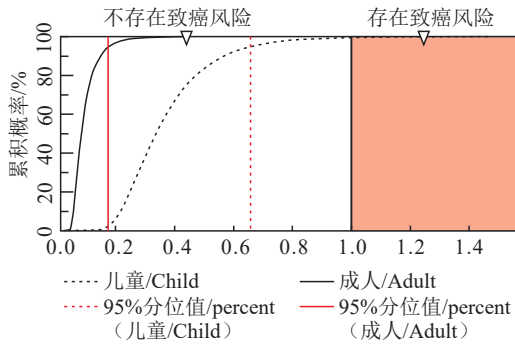


图5 土壤重金属非致癌风险概率分布(HI)  
Fig.5 Probability distribution for non-carcinogenic risk (HI)

以上因素的非致癌敏感性儿童均高于成人, 重金属元素 Ni、Cd、Hg、Zn 和 Cu 这 5 种因素对儿童健康非致癌敏感性最低, 近乎不存在影响(图 7b)。

就致癌敏感性而言, 对成人影响最大的因素为 SL, 解释出了 66.5% 的敏感性, 其次为 As、IngR 和 EF, 分别解释出了 5.6%~20.5% 的敏感性, Cd、Ni、Cr、Pb 和 BW 对成人致癌敏感性的影响可以近乎忽略(图 7c); 对儿童影响最大的因素主要为 As, 解释出了 42% 的敏感性, 其次为 SL、IngR 和 EF, 分别解释出了 14.4%~22.4% 的敏感性, Cd、Cr、Pb、Ni 对儿童的致癌敏感性的影响可以近乎忽略(图 7d)。BW 也解释出了一定程度的敏感性, 且在非致癌风险和致癌风险中均为负值, 表现为负相关。

### 5 讨论

总体来看, 研究区的土壤环境污染程度较低。从 8 种重金属元素的含量平均值来看, 重金属元素

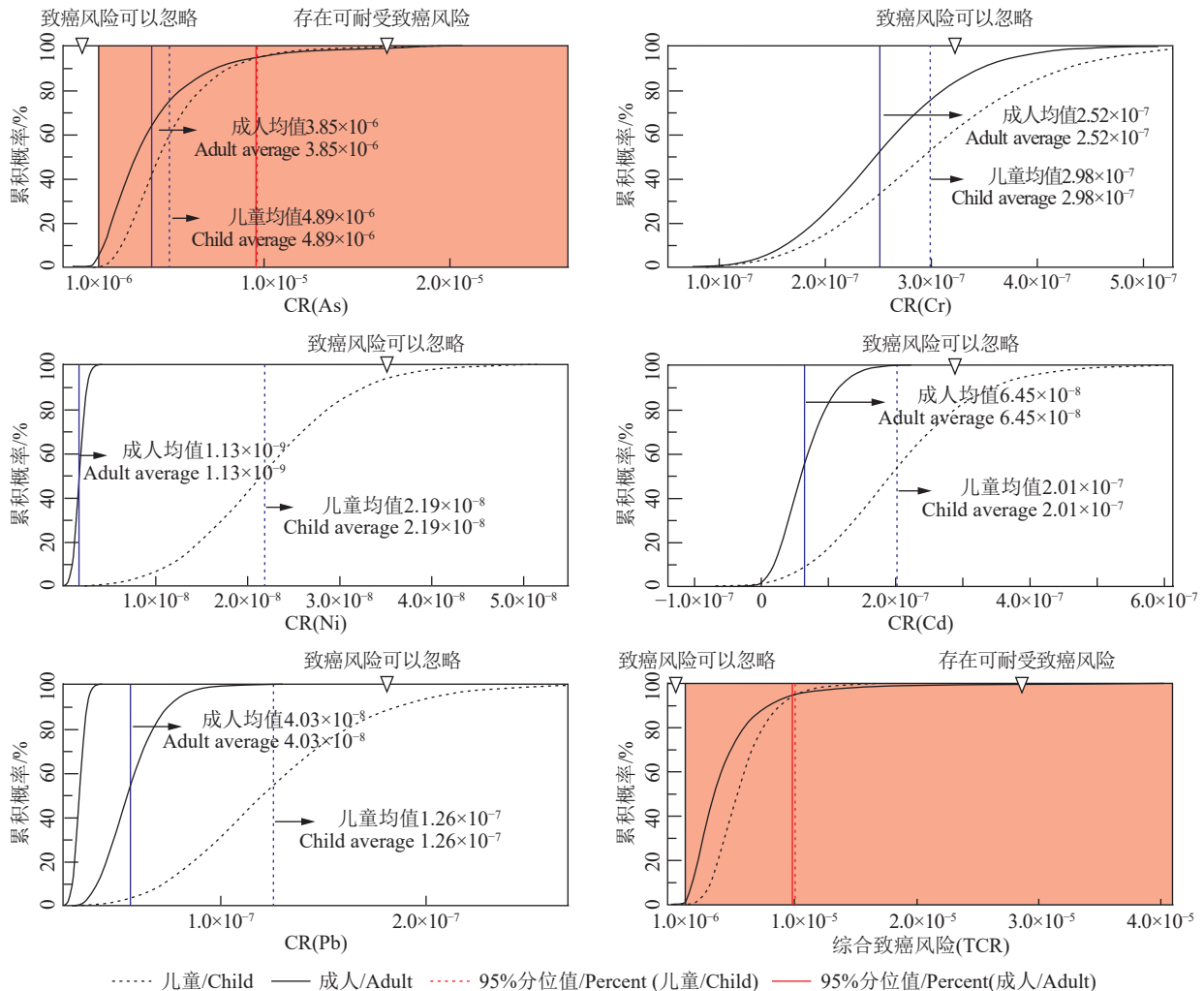


图6 土壤重金属致癌风险概率分布  
Fig.6 Probability distribution for carcinogenic risk of soil heavy metals

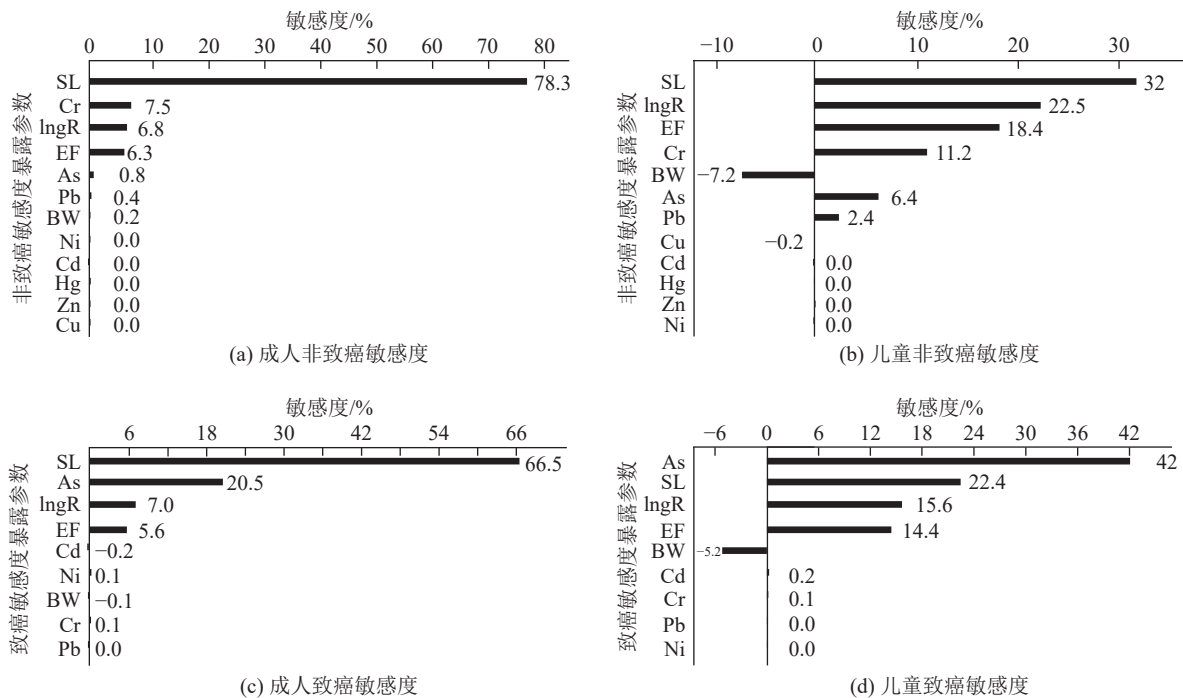


图 7 土壤重金属非致癌和致癌风险敏感度分析

Fig.7 Sensitivity analysis of health risks for non-carcinogenic and carcinogenic of soil heavy metals

Cr、Ni、Zn、Cd 的含量平均值均高于广东省土壤背景值,但未超过《土壤环境质量标准》中的风险筛选值,表明这 4 种重金属元素在土壤中的富集较轻;单因子污染指数及 Nemreow 综合污染指数则表明研究区土壤环境总体呈清洁和尚清洁状态,仅部分点位存在一定程度的 Zn、Ni、Cu 的污染,其中以 Zn 的污染点位较多,这可能与研究区长期种植水稻使用大量含 Zn 化肥及使用含 Zn 水反复灌溉有关。

通过蒙特卡洛法模拟雷州市东部土壤重金属对人体健康的致癌评估可知,最主要的致癌重金属元素为 As,这与前人的研究成果相一致(陈瑜佳等, 2022; 马杰等, 2023; 李军等, 2024),可能与该元素在模型中致癌斜率因子 SF 数值较大有关。长期暴露在 As 环境中可能导致人体内脏如肺部、肾部、肝部等产生癌变,已被多个权威医学机构公认为一类致癌物(李艳红, 2007; 吴婧等, 2015)。从致癌敏感性分析来看,8 种重金属中 As 的致癌敏感性最高,且儿童对 As 的敏感度要高于成人,应加强对 As 的污染防控;从致癌途径来看,重金属元素主要是通过皮肤接触和手-口摄入途径进入人体,这可能与研究区所处的亚热带季风气候环境以及生活

习惯较为密切,因此在可能存在污染区域的户外活动时降低皮肤暴露面积,并且活动后应勤洗手,养成良好的卫生习惯。此外, BW 在儿童非致癌敏感性和致癌敏感性中远高于成人,说明体重的增长有益于儿童降低健康风险(王静等, 2023)。从综合致癌风险敏感性来看,儿童致癌风险高于成人致癌风险,这与前人研究成果相一致(马杰等, 2023),这可能与儿童在此阶段的生活与活动行为等有关。

不同的评价方法,有着不同的权重指标,因此会得到不同的评价结果。本文仅以单因子污染指数和 Nemreow 综合污染指数法作为污染评价依据,未采用其他污染评价方法,得出的结论可能会有所不同;同时,在健康风险评估中引入设定的各类参数,如皮肤暴露面积 SA、皮肤吸收因子 ABS 等,以及致癌斜率因子 SF 的部分缺失,可能与实际情况不吻合,导致健康风险评估存在的不确定性,从而得出的结论与实际情况有所偏差。

## 6 结 论

通过对土壤重金属元素空间分布特征分析,应用污染指数法对研究区土壤进行污染评价并分析

重金属来源,运用蒙特卡洛法模拟重金属对人体健康风险评估,获得以下结论:

(1)雷州市东部土壤重金属元素 Cd、Cr、Ni、Zn 含量的平均值均超过广东省土壤背景值,但未超过《土壤环境质量标准》中的风险筛选值,表明这 4 种重金属元素在土壤中的富集较轻。

(2)单因子污染指数和 Nemreow 综合污染指数表明研究区内的土壤质量总体较好,以清洁状态和尚清洁状态为主,仅有个别点位存在轻度污染。

(3)相关性分析和因子分析表明,土壤重金属来源主要为自然源、农业源、交通源和工业源。

(4)健康风险评估表明,土壤重金属对成人和儿童的非致癌健康风险可以忽略,但对成人和儿童的有一定程度的致癌健康风险,最主要的致癌因素为重金属 As,且儿童在非致癌和致癌健康风险方面要高于成人;敏感性分析结果表明非致癌风险中皮肤黏着系数 SL 是影响非致癌风险的首要因素,致癌风险中 SL 和 As 分别是影响成人和儿童致癌的首要因素;致癌途径主要是通过皮肤接触和手-口摄入途径进入人体。

**致谢:**衷心感谢审稿专家和编辑老师在论文评审中所付出的时间和精力,以及提出的宝贵修改意见,使本文获益匪浅。

## References

- An Yonglong, Yin Xiulan, Li Wenjuan, Jin Aifang, Lu Qingyuan. 2023. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in a planting area in Wanquan District, Zhangjiakou City[J]. *Environmental Science*, 44(6): 3544–3561 (in Chinese with English abstract).
- Borůvka L, Vacek O, Jehlička J. 2005. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. *Geoderma*, 128(3/4): 289–300.
- Chen Bishan, Cai Yueyan, Ye Linhai, Chen Jieru, Zhou Shurou, Ying Xiaoqin. 2022a. Characteristics of heavy metal content and ecological risk assessment of vegetable soil in Zhanjiang City[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 49(4): 46–53 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bishan, Yang Manting, Mo Huaping, Ye Jian, Xu Chaodie, Li Min, Song Xiuli. 2022b. Soil-rice system characteristics and migration regularity of heavy metal content in Leizhou Peninsula[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 53(1): 68–77 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bishan, Zheng Kanghui, Wang Jing, Ye Linhai, Song Junxia. 2022c. Content characteristics and health risk analysis of mercury

- in soil-crop system in Leizhou Peninsula[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 31(3): 572–582 (in Chinese with English abstract).
- Chen Danqing, Xie Zhiyi, Zhang Yajing, Luo Xiaoling, Guo Qingrong, Yang Jianjun, Liang Yaojie. 2016. Source apportionment of soil heavy metals in Guangzhou based on the PCA/APCS model and geostatistics[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(6): 1014–1022 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yali, Weng Liping, Ma Jie, Wu Xiaojuan, Li Yongtao. 2019. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 38(10): 2219–2238 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yujia, Qu Xingchen, Zhang Bin, Li Xiantao, Zhu Guoping, Zha Tonggang. 2022. Ecological and health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of Xianghe County[J]. *Environmental Science*, 43(12): 5728–5741 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z Y, Zhao Y Y, Chen D L, Huang H T, Yu Z, Wu Y J. 2023. Ecological risk assessment and early warning of heavy metal cumulation in the soils near the Luanchuan molybdenum polymetallic mine concentration area, Henan Province, central China[J]. *China Geology*, 6(1): 15–26.
- Cui Xingtao, Luan Wenlou, Song Zefeng, Ma Yuntao. 2016. A study of the spatial distribution and source of heavy metals in urban soil in Shijiazhuang City[J]. *Geology in China*, 43(2): 683–690 (in Chinese with English abstract).
- Fang Qing, Xian Ping, Meng Zhengcheng. 2021. Environmental health risk assessment model of agricultural land based on Monte Carlo simulation and its application[J]. *Environmental Engineering*, 39(2): 147–152 (in Chinese with English abstract).
- Guan Hui, Wan Hongfu, Wang Xianmin, Yang Guoyi, Zhu Yongan. 2006. Distribution and pollution assessment of heavy metals in soil samples of Leizhou Peninsula[J]. *Environmental Pollution & Control*, 28(10): 757–760, 771 (in Chinese with English abstract).
- Hu B F, Shao S, Ni H, Fu Z Y, Hu L S, Zhou Y, Min X X, She S F, Chen S C, Huang M X, Zhou L Q, Li Y, Zhou S. 2020. Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level[J]. *Environmental Pollution*, 266(3): 114961.
- Li Chunfang, Wang Fei, Cao Wentao, Pan Jian, Lü Jianshu, Wu Quanyuan. 2017. Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. *Environmental Science*, 38(3): 1018–1027 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianfeng, Feng Lixiao. 2023. Health risk assessment of heavy metal pollution in soil of a tin mining area in Hunan Province[J]. *Geology in China*, 50(3): 897–910 (in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Li Xu, Li Kaiming, Jiao Liang, Tai Xisheng, Zang Fei, Cao Suzhen. 2024. Characteristics and identification priority source of heavy metals pollution in farmland soils in the Yellow River Basin[J]. *Environmental Science*, 45(3): 1724–1738 (in Chinese with English abstract).

- Li Ping, Huang Yong, Lin Yun, Yuan Guoli. 2018. Distribution, source identification and risk assessment of heavy metals in topsoil of Huairou district in Beijing[J]. *Geoscience*, 32(1): 86–94 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanhong. 2007. Review on the mechanism of carcinogenesis of arsenic[J]. *Chinese Journal of Control of Endemic Diseases*, 22(4): 364–267 (in Chinese with English abstract).
- Li X W, Ding D, Xie W Y, Zhang Y, Kong L Y, Li M, Li M, Deng S P. 2024. Risk assessment and source analysis of heavy metals in soil around an asbestos mine in an arid plateau region, China[J]. *Scientific Reports*, 14: 7552.
- Luo Songying, Ke Siyin, Wang Jiaqi, Chen Dongping, Liu Nuolin. 2019. Spatial distribution and source analysis of heavy metals content in vegetable field soils in suburb of Zhanjiang[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 50(8): 1709–1717 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jie, She Zelei, Wang Shenglan, Deng Li, Liu Ping, Sun Jing. 2023. Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around the gangue heap of coal mine based on Monte Carlo simulation[J]. *Environmental Science*, 44(10): 5666–5678 (in Chinese with English abstract).
- Nemerow N L. 1974. *Scientific Stream Pollution Analysis*[M]. New York: McGraw–Hill Book Company.
- Song Wei, Chen Baiming, Liu Lin. 2013. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 20(2): 293–298 (in Chinese with English abstract).
- Sun C Y, Liu J S, Wang Y, Sun L Q, Yu H W. 2013. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China[J]. *Chemosphere*, 92(5): 517–523.
- Sun Zhijia, Li Baofei, Chen Yuhai, Yuan Qingzheng, Yan Xingguo, Zhao Mingjie. 2022. Assessment of agricultural land on soil heavy metals pollution and ecological risk in the northeast of Zhanjiang City[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 45(1): 61–68 (in Chinese with English abstract).
- Tu Chunlin, Yang Kun, He Chengzhong, Zhang Liankai, Li Bo, Wei Zong, Jiang Xin, Yang Minghua. 2023. Sources and risk assessment of heavy metals in sediments of small watersheds in typical coal mining areas of Eastern Yunnan[J]. *Geology in China*, 50(1): 206–221 (in Chinese with English abstract).
- Viard B, Pihan F, Promeyrat S, Pihan J–C. 2004. Integrated assessment of heavy metal (Pb, Zn, Cd) highway pollution: Bioaccumulation in soil, Gramineae and land snails[J]. *Chemosphere*, 55(10): 1349–1359.
- Wang Jing, Wei Hen, Pan Bo. 2023. Accumulation characteristics and probabilistic risk assessment of Cd in agricultural soils across China[J]. *Environment Science*, 44(7): 4006–4016 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jing, Dong Xinmin, Zheng Yanfang, Zhang Jiren. 2015. Recent research progress in molecular mechanisms of cadmium induced carcinogenesis[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 10(6): 54–61 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xianye, Hua Huigong, Shen Hongyi. 2022. Discussion on the application effect of different dosages of zinc fertilizer on rice in Hepu County[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, (5): 122–124 (in Chinese).
- Xue Qiang, Zhao Yuanyi, Zhang Jiawen, Guo Ke, Liu Jianping, Lu Lu. 2014. The risk threshold value method of soil heavy metals based on crop safety[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(8): 1132–1139 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guoyi, Zhang Tianbin, Wan Hongfu, Luo Wei, Gao Yuanxue. 2007. Spatial distribution and sources of heavy metal pollution of agricultural soils in the typical areas of Guangdong Province, China[J]. *Soil*, 39(3): 387–392 (in Chinese with English abstract).
- Ye Yuting, Luo Caibao, Yang Kunmei, Liu Xianlan, Niu Dongfeng. 2019. Soil heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in Leizhou Peninsula[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 25(14): 95–98 (in Chinese).
- Yu Tao, Jiang Tianyu, Liu Xu, Ma Xudong, Yang Zhongfang, Hou Qingye, Xia Xueqi, Li Fengyan. 2021. Research progress in current status of soil heavy metal pollution and analysis technology[J]. *Geology in China*, 48(2): 460–476 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingqing, Fu Tianling, Zou Hongqin, Teng Lang, Wu Kang, Xie Ting, He Tengbing. 2021. Spatial distribution characteristics and sources of heavy metals in soil in a pepper growing area of county in Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 40(1): 102–113 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ming. 2019. Study on the application of zinc fertilizer on rice[J]. *Modern Agriculture Research*, (12): 58–59 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jian, Yang Ruidong, Chen Rong, Peng Yishu. 2017. Bioconcentration of heavy metals in soil–capsicum annum L. system in Karst areas of Guizhou Province[J]. *Food Science*, 38(21): 175–181 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xiaolin, Tang Chunliang, Zheng Hualiu. 2004. Analysis of heavy metal content and pollution evaluation in soil of vegetable garden in the suburbs of Zhanjiang City[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, (1): 33–35 (in Chinese).
- Zhou Yi, Hu Wenyong, Huang Biao, Ji Rongping, Liu Benle, Liu Peng, Wang Xinkai. 2020. Current status and research progress of heavy metal pollution in soils surrounding highways of China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 36(5): 112–120 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原. 2023. 张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析[J]. *环境科学*, 44(6): 3544–3561.
- 陈碧珊, 蔡月炎, 叶林海, 陈洁茹, 周舒柔, 英晓芹. 2022a. 湛江市蔬菜地土壤重金属含量特征及生态风险评估[J]. *广东农业科学*, 49(4): 46–53.
- 陈碧珊, 杨漫婷, 莫华萍, 叶健, 徐超蝶, 李敏, 宋秀丽. 2022b. 雷州半

- 岛土壤-水稻系统重金属含量特征及其迁移规律[J]. 南方农业学报, 53(1): 68-77.
- 陈碧珊, 郑康慧, 王璟, 叶林海, 宋军霞. 2022c. 雷州半岛土壤-农作物汞元素含量特征与健康风险分析[J]. 生态环境学报, 31(3): 572-582.
- 陈丹青, 谢志宜, 张雅静, 罗小玲, 郭庆荣, 杨剑军, 梁耀杰. 2016. 基于 PCA/APCS 和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J]. 生态环境学报, 25(6): 1014-1022.
- 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 武晓娟, 李永涛. 2019. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 38(10): 2219-2238.
- 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚. 2022. 香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估[J]. 环境科学, 43(12): 5728-5741.
- 崔邢涛, 梁文楼, 宋泽峰, 马云超. 2016. 石家庄城市土壤重金属空间分布特征及源解析[J]. 中国地质, 43(2): 683-690.
- 方晴, 洗萍, 蒙政成. 2021. 基于蒙特卡罗模拟的农用地土壤健康风险评估[J]. 环境工程, 39(2): 147-152.
- 关卉, 万洪富, 王洗民, 杨国义, 朱永安. 2006. 雷州半岛土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. 环境污染与防治, 28(10): 757-760, 771.
- 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源. 2017. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. 环境科学, 38(3): 1018-1027.
- 李剑锋, 冯李霄. 2023. 湖南某锡矿区土壤重金属污染及健康风险评估[J]. 中国地质, 50(3): 897-910.
- 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍. 2024. 黄河流域农田土壤重金属污染特征及其有限控制源分析[J]. 环境科学, 45(3): 1724-1738.
- 李苹, 黄勇, 林赞, 华培学, 袁国礼. 2018. 北京市怀柔区土壤重金属的分布特征、来源分析及风险评估[J]. 现代地质, 32(1): 86-94.
- 李艳红. 2007. 砷的致癌性研究进展[J]. 中国地方病防治杂志, 22(4): 264-267.
- 罗松英, 柯思茵, 王嘉琦, 陈东平, 刘诺林. 2019. 湛江市郊蔬菜地土壤重金属空间分布特征及来源分析[J]. 南方农业学报, 50(8): 1709-1717.
- 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 刘萍, 孙静. 2023. 基于蒙特卡罗模拟的煤矸山周边农用地土壤重金属健康风险评估[J]. 环境科学, 44(10): 5666-5678.
- 宋伟, 陈百明, 刘琳. 2013. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 20(2): 293-298.
- 孙志佳, 李保飞, 陈玉海, 袁庆政, 闫兴国, 赵明杰. 2022. 湛江东北部农用地土壤重金属污染及生态风险评估[J]. 河北农业大学学报, 45(1): 61-68.
- 涂春霖, 杨坤, 和成忠, 张连凯, 李博, 魏总, 姜昕, 杨明花. 2023. 滇东典型煤矿区小流域沉积物重金属来源及风险评估[J]. 中国地质, 50(1): 206-221.
- 王静, 魏恒, 潘波. 2023. 中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评估[J]. 环境科学, 44(7): 4006-4016.
- 吴婧, 董欣敏, 郑燕芳, 张积仁. 2015. 镉致癌的分子机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 10(6): 54-61.
- 吴弦业, 花会功, 沈泓毅. 2022. 锌肥不同用量在合浦县水稻上的应用效果探讨[J]. 农业科技通讯, (5): 122-124.
- 薛强, 赵元艺, 张佳文, 郭科, 柳建平, 路璐. 2014. 基于农作物使用安全的土壤重金属风险阈值[J]. 地质通报, 33(8): 1132-1139.
- 杨国义, 张天彬, 万洪富, 罗薇, 高原雪. 2007. 广东省典型区域农业土壤中重金属污染空间差异及原因分析[J]. 土壤, 39(3): 387-392.
- 叶宇婷, 罗财宝, 杨坤美, 刘显兰, 牛东风. 2019. 雷州半岛土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J]. 安徽农学通报, 25(14): 95-98.
- 余涛, 蒋天宇, 刘旭, 马旭东, 杨忠芳, 侯青叶, 夏学齐, 李凤嫣. 2021. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. 中国地质, 48(2): 460-476.
- 曾庆庆, 付天岭, 邹洪秦, 滕浪, 吴康, 谢挺, 何腾兵. 2021. 贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. 农业环境科学, 40(1): 102-113.
- 赵明. 2019. 锌肥在水稻上的应用研究[J]. 现代农业研究, (12): 58-59.
- 张建, 杨瑞东, 陈蓉, 彭益书. 2017. 贵州喀纳斯地区土壤-辣椒体系重金属元素的生物迁移积累特征[J]. 食品科学, 38(21): 175-181.
- 郑小林, 唐纯良, 郑华柳. 2004. 湛江市郊区菜园土壤重金属含量分析及其污染评价[J]. 农业环境与发展, (1): 33-35.
- 周怡, 胡文友, 黄标, 纪荣平, 刘本乐, 刘鹏, 王信凯. 2020. 我国高速公路周边土壤重金属污染现状及研究进展[J]. 中国环境监测, 36(5): 112-120.