

## 海口市农用地土壤重金属生态风险评价及源解析

吴 姬, 伍成成, 王 婧

海南省生态环境监测中心, 海南海口 571126

**摘要:** 为探究海口市土壤重金属污染水平和污染来源, 以海口市农用地为研究对象, 采集测定土壤表层样品镉 (Cd)、汞 (Hg)、砷 (As)、铅 (Pb)、铬 (Cr)、铜 (Cu)、镍 (Ni)、锌 (Zn) 等 8 种重金属含量, 结合地统计学分析方法阐明重金属空间分布特征, 采用单因子污染指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法进行土壤污染评价, 利用相关性分析和主成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型定量解析重金属来源。结果表明, Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 等 6 种重金属超过农用地风险筛选值, 比例从高到低为 Cr、Ni (31.6%)>Cu (21.1%)>Cd (5.3%)>Pb、Zn (2.6%)。Cu、Zn、Ni、Cr 的含量空间分布特征基本一致, 与基性火山岩分布较为相似。土壤重金属地累积指数评价结果表明, 土壤 Cd 富集程度最高, 土壤受 Cd 影响较大, Cr 次之, 其他重金属影响较小。土壤重金属污染潜在生态风险等级以轻微和中度风险等级为主, As、Pb、Cr、Zn 为轻微生态风险, 潜在生态危害较小; Cd、Hg、Ni 强度生态风险以上点位占比分别为 52.6%、15.8%、5.3%, 土壤重金属的潜在生态风险主要由 Cd 和 Hg 引起。8 种重金属元素被识别为 3 种来源, Cu、Ni、Cr、Zn 主要来源为自然源, 主要受基性火山岩成土母岩土壤背景值高影响, Pb、Cd、As、Hg 主要来自工业交通源, As 同时受到农业源影响。海口市土壤重金属来源相对单一, 应加强土壤中 Cd、Cr、Hg 的污染控制, 尤其是 Cd 的污染管控。

**关键词:** 重金属; 污染特征; PCA/APCS 受体模型; 潜在生态风险; 源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A

## Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soil of Haikou City

WU Ji, WU Chengcheng, WANG Jing

Hainan Ecological Environmental Monitoring Center, Haikou, Hainan 571126, China

**Abstract:** In order to explore the pollution level and source of soil heavy metals in Haikou City, taking the agricultural land in Haikou City as the research object, the content of eight kinds of heavy metals such as Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni and Zn in soil surface samples were collected and determined, and the spatial distribution characteristics of heavy metals were clarified combined with geostatistical analysis method. The single factor pollution index method, geo-accumulation index method and potential ecological risk index method were used to evaluate soil pollution. The source of heavy metals was quantitatively analyzed by the correlation analysis and principal component analysis / absolute principal component fraction (PCA/APCS) receptor model. Six heavy metals such as Cd, Pb, Cr, Cu, Ni and Zn exceeded the risk screening value of agricultural land, and the proportion of exceeding the standard points from high to low was Cr, Ni (31.6%)>Cu (21.1%)>Cd (5.3%)>Pb and Zn (2.6%). The spatial distribution characteristics of Cu, Zn, Ni and Cr contents were basically the same, which were similar to the distribution of basic volcanic rocks in the study area. The evaluation results of heavy metal geo-accumulation index showed that the concentration of Cd in the soil was the highest, and the soil was greatly affected by Cd, followed by Cr, and other heavy metals were less affected. The potential ecological risk levels of soil heavy metal pollution were mainly mild and moderate risk levels, while As, Pb, Cr and Zn were slight ecological risks, and the potential ecological harm was small. The above points of Cd, Hg and Ni intensity

收稿日期 2022-09-01; 修回日期 2022-11-01

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 421QN0970)。

作者简介 吴 姬 (1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 土壤环境质量监测评价及污染物源解析, E-mail: 22958724@qq.com。

ecological risk accounted for 52.6%, 15.8% and 5.3% respectively. The potential ecological risk of soil heavy metals in the study area was mainly caused by Cd and Hg. Eight kinds of heavy metal elements were identified as three sources. Cu, Ni, Cr and Zn were mainly from natural sources, which were mainly affected by the high soil background value of basic volcanic parent rock, Pb, Cd, As and Hg were mainly from industrial sources and traffic sources. As was also affected by agricultural sources. The source of heavy metals in Haikou soil was relatively single. As a result, it is necessary to strengthen the pollution control of Cd, Cr and Hg in the soil, with the focus on the pollution control of Cd.

**Keywords:** heavy metals; pollution features; PCA/APCS receptor model; potential ecological risk index; source analysis

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.05.021

随着工农业生产和城镇化建设的快速发展,土壤生态系统污染问题日渐突出<sup>[1]</sup>。针对农用地土壤重金属污染的生态风险评价<sup>[2-7]</sup>和来源解析<sup>[8-10]</sup>已成为研究的热点。海南是我国重要的粮食、蔬菜、水果供给功能区<sup>[11]</sup>,近年不少学者对海南岛土壤重金属污染状况和污染来源做了相关研究,李福燕等<sup>[12]</sup>通过因子分析法分析了海南岛农田土壤重金属主要来源,实现了对潜在污染源的定性识别;徐诗琴等<sup>[13]</sup>采用受体模型和地统计学分析了海南岛农用地土壤重金属分布特征,并对污染来源进行定量解析。海口作为海南省会城市,经济发展相对快速,集中布局国家高新技术产业开发区、综合保税区等国家级、省级工业园和自由贸易港重点园区。同时,海口市作为热带农作物种植的重要基地,2021年粮食总产量 105 400 t,蔬菜总产量 540 000 t,水果产量 242 500 t,热带作物种植面积 21 200 hm<sup>2</sup>,高标准农田建设 1933.33 hm<sup>2</sup>,扩建常年蔬菜基地 475.33 hm<sup>2</sup>,保有面积达到 3385.33 hm<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。海口市农用地土壤环境质量关系农产品质量以及群众健康,对其开展重金属空间分布特征、生态风险评价及污染来源解析具有重要意义。因此,本研究选取海口市农用地土壤为研究对象,分析农用地土壤镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)等 8 种重金属含量,采用地理信息系统(geographic information system, GIS)中的地统计学方法分析探究土壤重金属污染水平和分布特征,运用多种评价方法评估土壤质量和土壤生态风险,基于主成分分析/绝对主成分分数(PCA/APCS)受体模型开展土壤重金属来源解析,以期海口市农用地土壤重金属污染防治与管控、土壤环境质量和生态健康评价等提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 研究区概况 研究区为海南省省会海口

市,海口市位于 19°31'32"~20°04'52"N, 110°07'22"~110°42'32"E。地处海南岛北部,东邻文昌市,南接定安县,西连澄迈县,北临琼州海峡。总面积为 3126.83 km<sup>2</sup>,其中陆地面积 2296.82 km<sup>2</sup>,海域面积 830 km<sup>2</sup>。属热带季风海洋性气候,2020 年年平均气温 25.4 ℃,年平均降雨量 1220.4 mm。地貌类型大致分为滨海平原、河流阶地、丘陵及熔岩台地 3 部分。成土母岩主要有基性火山岩、第四系、花岗岩、变质岩、沉积岩等类型。土壤类型主要为砖红壤、水稻土、滨海盐土、滨海沙土、石质土等。

1.1.2 样品采集 本研究共布设 38 个土壤环境质量点位,其中通过 6 km×6 km 网格法布设 20 个点位,在 3 个集中式饮用水源地保护区布设 13 个点位,在 1 个大型蔬菜基地布设 5 个点位,土壤采样点位分布见图 1。采集 38 个海口市农用地土壤表层样品。采样过程使用全球定位系统定位,采样深度为 0~20 cm,样品采集重量不少于 2 kg。样品采集后置于风干室,自然风干,适时压碎、翻动,拣出碎石、植物残体等。在土壤样品制备间内完成土壤样品粗磨、细磨、分样等工作。Cd、Hg、As 等 3 个项目细磨过筛孔径为 0.15 mm(100 目),Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 等 5 个项目细磨过筛孔径为 0.075 mm(200 目)。

### 1.2 方法

1.2.1 样品处理与测试 土壤重金属项目选择《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)中农用地土壤污染风险筛选值基本项目,包括 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn。土壤 Cd 参照《石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)进行测定,Hg 和 As 参照《微波消解原子荧光法》(HJ 680—2013)进行测定,Cu、Pb、Cr、Zn 和 Ni 参照《波长色散 X 射线荧光光谱法》(HJ 780—2015)进行测定。

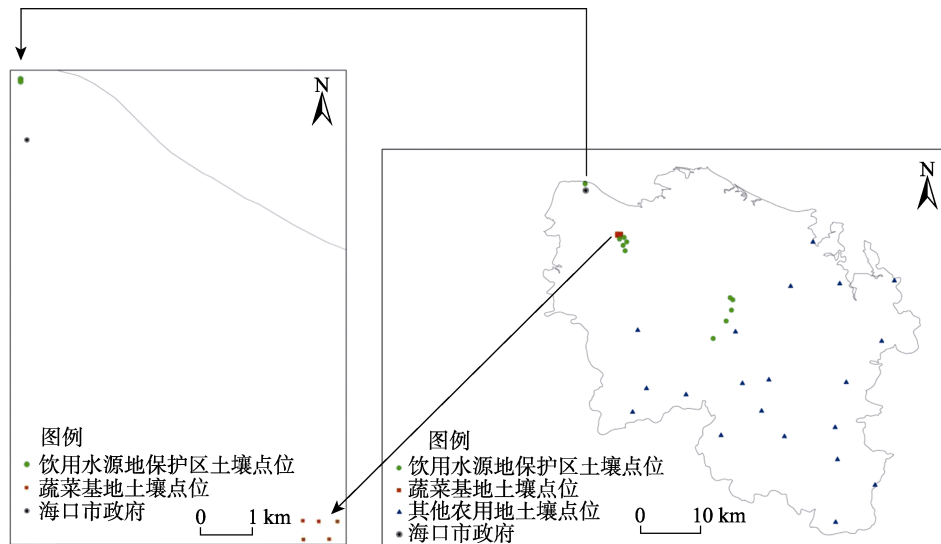


图 1 土壤采样点位分布

Fig. 1 Distribution map of soil sampling sites

1.2.2 评价方法 (1) 单因子污染指数法。单因子污染指数法<sup>[15]</sup>用于研究区土壤中单一重金属的污染程度评价,其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中,  $P_i$  为土壤中重金属  $i$  的单因子指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测含量,单位为 mg/kg;  $S_i$  为《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中重金属  $i$  的风险筛选值,本研究各重金属采用标准中最严格的含量限值(Cd 为 0.3 mg/kg, Hg 为 0.5 mg/kg, As 为 20 mg/kg, Pb 为 70 mg/kg, Cr 为 150 mg/kg, Cu 为 50 mg/kg, Ni 为 60 mg/kg, Zn 为 200 mg/kg)。按照单因子指数 ( $P_i$ ) 的大小将污染等级分为 5 级:  $P_i \leq 0.7$  为清洁,  $0.7 < P_i \leq 1.0$  为预警,  $1.0 < P_i \leq 2.0$  为轻度污染,  $2.0 < P_i \leq 3.0$  为中度污染,  $P_i > 3.0$  为重度污染。

(2) 地累积指数法。地累积指数法是一种定量评价重金属污染的分析方法<sup>[16]</sup>,该方法综合考虑自然地质背景、人类活动等影响,可直观反映外源重金属在土壤中的富集程度。其计算公式为:

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

式中,  $C_n$  为评价重金属的实测含量,单位为 mg/kg;  $B_n$  为对评价重金属的地球化学背景值,本研究选取《海南省土壤环境背景值》中表层土壤元素背景值<sup>[17]</sup>(Cd 为 0.04 mg/kg, Hg 为 0.048 mg/kg, As 为 7.5 mg/kg, Pb 为 28.4 mg/kg,

Cr 为 76.4 mg/kg, Cu 为 19.3 mg/kg, Ni 为 30.8 mg/kg, Zn 为 60.0 mg/kg);  $k$  为修正系数,一般取值为 1.5。按照地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 的大小将污级分为无污染、轻度污染、偏中度污染、中度污染、偏重度污染、重度污染、极重污染等 7 级,对应的地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 分别为  $I_{geo} \leq 0$ 、 $0 < I_{geo} \leq 1$ 、 $1 < I_{geo} \leq 2$ 、 $2 < I_{geo} \leq 3$ 、 $3 < I_{geo} \leq 4$ 、 $4 < I_{geo} \leq 5$ 、 $I_{geo} > 5$ 。

(3) 潜在生态风险指数法。潜在生态风险指数法<sup>[18]</sup>用于评价土壤重金属潜在生态风险,该方法综合考虑了重金属性质、环境行为特点、浓度水平、生物毒性、生态效应等因素,其计算公式如下:

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{B_n^i}$$

$$E_f^i = T_f^i \times C_f^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_f^i$$

式中,  $C_f^i$  为单个重金属污染系数;  $C_s^i$  为重金属  $i$  的含量,单位为 mg/kg;  $B_n^i$  为重金属  $i$  的背景值,本研究取海南省土壤环境背景值<sup>[16]</sup>(Cd 为 0.04 mg/kg, Hg 为 0.048 mg/kg, As 为 7.5 mg/kg, Pb 为 28.4 mg/kg, Cr 为 76.4 mg/kg, Cu 为 19.3 mg/kg, Ni 为 30.8 mg/kg, Zn 为 60.0 mg/kg);  $E_f^i$  为重金属  $i$  的单因子潜在生态风险系数;  $T_f^i$  为重金属  $i$  的毒性响应系数(Cd 为 4, Hg 为 40,

As 为 10, Pb 为 10, Cr 为 2, Cu 为 10, Ni 为 10, Zn 为 1) [19];  $RI$  为土壤多种重金属的综合潜在生态风险指数。重金属单因子潜在生态风险系数和综合潜在生态风险指数分级标准采用范俊楠等 [19] 使用的生态风险指数分级标准。

(4) 土壤重金属源解析方法。主成分分析/绝对主成分分析 (PCA/APCS) 受体模型主要用于定量确定源对重金属的平均贡献量和每个采样点的贡献量。该模型通过开展主成分分析 (PCA), 引入零样本计算因子 (APCS), 进行多元线性回归, 最终得到不同源的贡献率。主要步骤 [9] 为:

① 获取归一化因子分数。重金属元素含量标准化, 从 PCA 得到归一化的因子分数:

$$Z_{ij} = \frac{C_{ij} - \bar{C}_i}{\sigma_i}$$

式中,  $Z_{ij}$  为标准化后的浓度值 (无量纲),  $C_{ij}$  为重金属元素含量实测值;  $C_{ij}$  和  $\sigma_i$  分别为元素  $i$  的平均含量和标准偏差。

② 计算 0 浓度样本的因子分数。通过对重金属元素引入 1 个浓度为 0 的人为样本 ( $Z_0$ ):

$$Z_0 = \frac{0 - \bar{C}_i}{\sigma_i} = -\frac{\bar{C}_i}{\sigma_i}$$

③ 计算重金属元素 APCS。通过每个样本的因子分数减去 0 浓度样本的因子分数可得到重金属元素的 APCS。

④ 多元线性回归分析。用重金属含量数据对 APCS 做多元线性回归 (以重金属含量为因变量, APCS 为自变量) 得到的回归系数可将 APCS 转化为每个污染源对每个样本的贡献, 对  $C_i$  的源贡献量可由 1 个多元线性回归得到:

$$C_i = b_{0i} + \sum_{p=1}^n (APCS_p \times b_{pi})$$

其中,  $b_{0i}$  为对金属元素  $i$  做多元线性回归所得的常数项;  $b_{pi}$  是源  $p$  对重金属元素  $i$  的回归系数;  $APCS_p$  为调整后的因子  $p$  的分数;  $APCS_p \times b_{pi}$  表示源  $p$  对  $C_i$  的质量浓度贡献; 所有样本的  $APCS_p \times b_{pi}$  平均值表示源平均绝对贡献量。

### 1.3 数据处理

土壤重金属浓度的统计分析、相关性分析、主成分分析和多元线性回归采用 SPSS 25.0 及 Excel 2010 软件, 地统计学分析和空间分布图的制作使用 ArcGIS 10.8 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属含量及空间分布特征

海口市农用地土壤重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 含量统计结果见表 1。土壤 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 等 8 种重金属平均值分别为 0.10、0.071、3.83、30.4、197、39.4、84.7、75.1 mg/kg, 除 As 外, 其余 7 种重金属含量均超过海南省土壤背景值, 表明研究区内土壤重金属背景含量高或具有一定程度的积累。8 项重金属含量变化范围大, 其变异系数均超过了 50%, 呈现明显的空间异质性, 其中 Cd 和 Ni 的变异系数超过了 100%。

表 1 海口土壤重金属含量特征统计  
Tab. 1 Statistical characteristics of soil heavy metal content in Haikou

统计项目 Statistical items	镉 Cd	汞 Hg	砷 As	铅 Pb	铬 Cr	铜 Cu	锌 Zn	镍 Ni
最小值 (mg·kg <sup>-1</sup> )	未检出	0.013	0.16	14.7	28.9	6.4	11.6	5.5
中位值 (mg·kg <sup>-1</sup> )	0.08	0.071	2.32	24.1	107.0	22.9	68.5	33.0
最大值 (mg·kg <sup>-1</sup> )	0.64	0.176	14.40	109.0	709.0	147.0	231	267.0
平均值 (mg·kg <sup>-1</sup> )	0.10	0.071	3.83	30.4	197.0	39.4	84.7	75.1
标准差 (mg·kg <sup>-1</sup> )	0.12	0.037	3.74	17.9	191.0	35.8	53.8	80.3
变异系数/%	119.02	52.28	97.68	58.91	97.22	90.88	63.52	106.89

利用反距离权重法插值得到研究区农用地土壤重金属空间分布图 (图 2), 可以看出 Cu、Zn、Ni、Cr 的含量空间分布特征基本一致, 高值区呈连片面状分布特征, 除西面有小块高值区外, 4 种元素含量均呈现从北向南增高的趋势, 主要包括云龙镇、旧州镇、红旗镇、三门坡镇、甲子镇、大坡镇等区域, 与研究区基性火山岩分布较为相似, 受基性火山岩成土母质的影响较大。Cd、Pb 土壤含量呈现中心高、周边低的特点, 高含量值主要分布在中间区域, 包括云龙镇、旧州镇、演丰镇等。Hg 和 As 土壤含量除中心片状区域 (主要为云龙镇、旧州镇区域) 为高值区外, 分别在海口市东南方向 (三门坡镇) 和西北方向 (主要为石山镇、永兴镇、海秀镇) 出现小范围高值区。

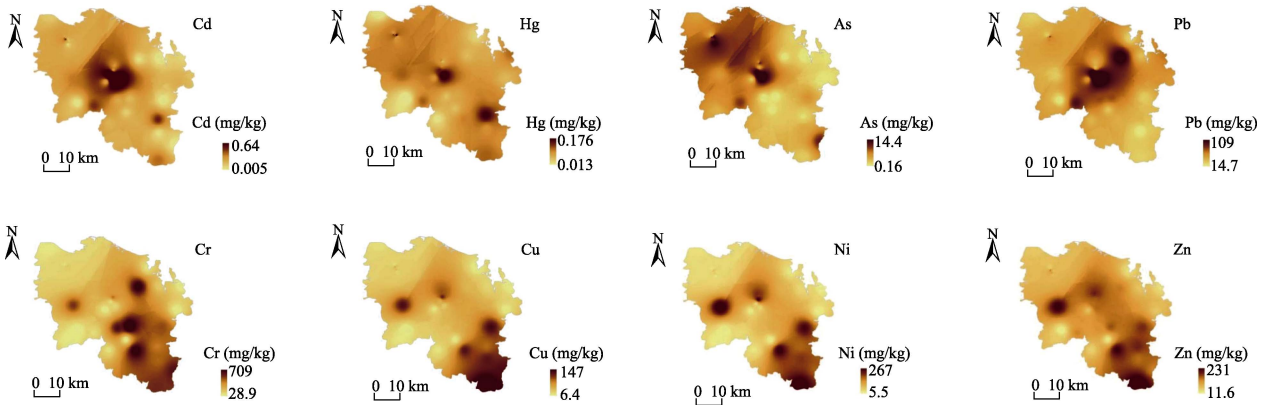


图 2 海口土壤重金属含量空间分布  
Fig. 2 Spatial distribution of soil heavy metals in Haikou

2.2 土壤重金属污染评价分析

2.2.1 单因子污染指数评价结果 8 项重金属含量与《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018) 风险筛选值比较, 超过风险筛选值点位比例从高到低为 Cr (31.6%)、Ni(31.6%)、Cu(21.1%)、Cd(5.3%)、Pb(2.6%)、Zn(2.6%), Hg 和 As 等 2 项重金属没有超过风险筛选值点位(图 3)。根据单因子污染指数, Cr、Ni 点位中度、重度污染占比超过 20%, 且点位重合度高, 呈污染同发特征, 可能同源。Cu 和 Cd 中度污染占比分别为 5.3%、2.6%。Pb 污染面小且污染程度较轻, 2.6% 点位为轻度污染。Hg 和 As 等 2 项重金属点位为清洁水平。

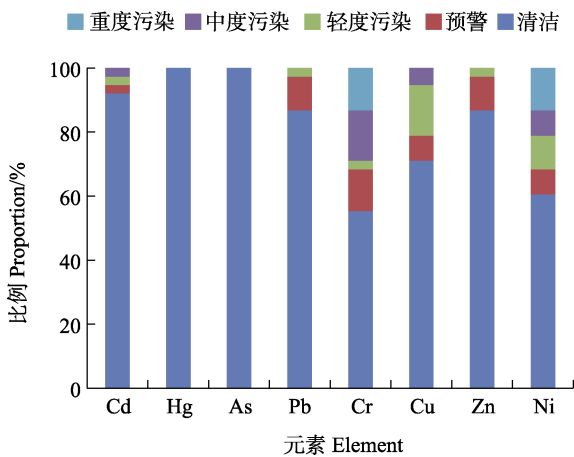


图 3 土壤重金属单因子污染指数  
Fig. 3 Single factor pollution index of soil heavy metals

2.2.2 地累积指数法评价结果 地累积指数结果表明  $I_{Cd}$ 、 $I_{Hg}$ 、 $I_{As}$ 、 $I_{Pb}$ 、 $I_{Cr}$ 、 $I_{Cu}$ 、 $I_{Zn}$ 、 $I_{Ni}$  值的范围分别为 -2.58~3.42、-2.47~1.29、-6.14~0.36、-1.54~1.36、-1.99~2.63、-2.18~2.34、-2.96~1.36、

-3.07~2.53 (图 4)。参照地累积指数分级判断, As 无污染点位比例达 94.7%, 5.3% 点位为轻度污染; Pb 无污染、轻度污染、偏中度污染的点位比例分别为 86.9%、10.5% 和 2.6%; Hg、Zn 分别有 5.3% 和 7.9% 比例为偏中度污染, 无污染和轻度污染比例相当, 无污染分别为 52.6% 和 55.3%、轻度污染分别为 42.1% 和 36.8%; Cr、Cu、Ni 均有点位达到中度污染, 比例分别为 13.1%、2.6%、13.1%, 无污染比例相当, 分别为 52.6%、55.3%、57.9%, 轻度污染和偏中度污染比例合计分别为 34.3%、42.1%、29.0%。8 种重金属中, 仅 Cd 存在偏重度污染点位, 比例为 2.6%, 无污染、轻度污染、偏中度污染、中度污染点位比例分别为 36.8%、39.5%、15.8%、5.3%。按地累积指数均值综合评价从大到小排序  $Cd(0.19) > Cr(0.12) > Cu(-0.09) > Ni(-0.14) > Hg(-0.25) > Zn(-0.41) > Pb(-0.65) > As(-2.34)$ , 其中 Cd、Cr 处于轻度污染水平, 其他 6 个重金属处于无污染水平。地累积指数结果表明, 海口市土壤 Cd 富集程度最高, 土壤受 Cd 影响较大, Cr 次之, 其他重金属影响较小。

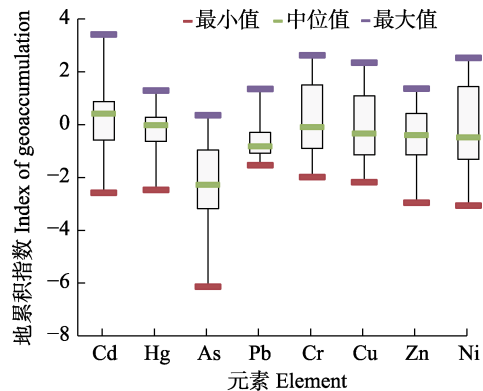


图 4 土壤重金属地累积指数  
Fig. 4 Geo-accumulation index of soil heavy metals

2.2.3 潜在生态风险指数法评价结果 研究区土壤重金属的潜在生态风险评价结果见图 5，单项生态风险由强到弱依次为 Cd、Hg、Ni、Cu、As、Pb、Cr、Zn。农用地土壤 As、Pb、Cr、Zn 均为轻微生态风险，潜在生态危害较小。重金属 Cd 在该研究区的潜在生态危害较大，各风险程度所占比例分别为轻微生态风险 28.9%、中度生态风险 18.4%、强度生态风险 36.8%、很强生态风险 10.5%、极强生态风险 5.3%。其次 Hg 的生态风险指数也较高，28.9% 点位处于轻微生态风险，55.3% 点位达到中度生态风险，15.8% 点位达到很强生态风险。Ni 强度生态风险点位比例为 5.3%。由此可见，研究区土壤重金属的潜在生态风险主要由 Cd 和 Hg 引起。

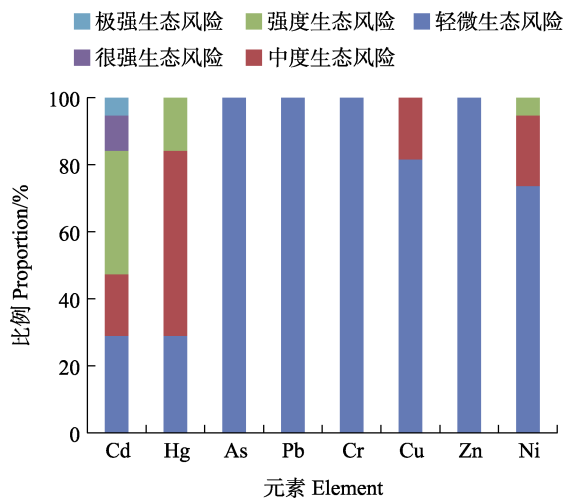


图 5 土壤污染潜在生态风险指数  
Fig. 5 Potential ecological risk index of soil pollution

综合考虑 8 项重金属的生态风险，研究区综合生态风险指数为 32.21~870.91，轻微生态风险、中度生态风险、强度生态风险、很强生态风险、

极强生态风险的比例分别为 39.5%、31.6%、26.3%、2.6%、0%。研究区大部分处于轻微和中度生态风险水平，强度生态风险、很强生态风险区域主要集中在研究区中部、南部小片区域和东南部小片区域，包括龙泉镇、龙塘镇、云龙镇，及龙桥镇、红旗镇、旧州镇、遵谭镇、三门坡镇、蓬莱镇小部分区域等（图 6）。

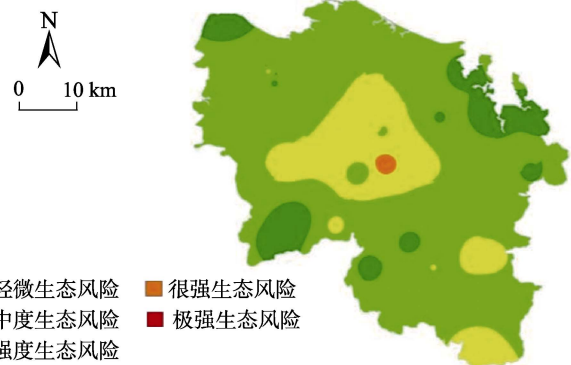


图 6 土壤潜在生态风险指数法污染评价空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of soil pollution assessment by potential ecological risk index method

### 2.3 土壤重金属元素源解析

2.3.1 土壤重金属元素相关性分析 利用 SPSS 软件相关模型，对研究区各重金属元素进行相关性分析（表 2），结果表明，Cu 与 Cr、Ni、Zn 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.696、0.959、0.880 均大于 0.6，属于强相关，表明 Cu、Cr、Ni、Zn 可能存在共同的污染源。Cd 与 Hg、Pb、As 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.671、0.716、0.500，表明 Cd 与 Hg、Pb、As 可能存在共同污染源。Cd 与 Cu、Cr、Ni，As 与 Cu、Cr、Ni、Zn 相关系数小，表明 Cd、As 可能与 Cu、Cr、Ni、Zn 具有异源性。

表 2 土壤重金属元素间的相关性分析  
Tab. 2 Correlation analysis of soil heavy metal elements

元素 Element	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni
Cd	1	0.671**	0.500**	0.063	0.716**	-0.099	0.361*	0.019
Hg		1	0.481**	0.316*	0.581**	0.148	0.490**	0.265
As			1	0.033	0.570**	-0.173	0.154	-0.050
Cu				1	-0.108	0.696**	0.880**	0.959**
Pb					1	0.091	0.223	-0.140
Cr						1	0.718**	0.727**
Zn							1	0.867**
Ni								1

注：\*表示显著相关 ( $P < 0.05$ )，\*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

Note: \* indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ), \*\* indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

2.3.2 主成分分析 (PCA) 重金属含量原始数据标准化后进行 KMO 检验及 Bartlett 球形检验, 结果显示 KMO 值为 0.692,  $P$  值为 0, 适合进行主成分分析 ( $KMO > 0.5$ ,  $P < 0.05$ )。不同元素含量相关性强, PCA 效果好。基于 PCA 原理对因子载荷矩阵进行方差最大化旋转, 提取得到 3 个主成分因子, 其累计方差贡献率达到 87.0% (表 3), 能解释大部分重金属来源。主成分分析结果显示, 因子 1 上载荷较大的重金属有 Cu、Ni、Zn、Cr, 解释方差变量 43.4%; 因子 2 上载荷较大的重金属有 Cd、Hg、Pb、As, 解释方差变量 32.0%; 因子 3 上载荷较大的重金属有 As, 解释方差变量 11.6%。3 个主成分的重金属载荷如图 7 所示。

表 3 土壤重金属元素因子载荷  
Tab. 3 Factors matrix of soil heavy metals

项目 Element	成分因子 Principal components		
	1	2	3
Cd	0.051	0.858	0.236
Hg	0.315	0.726	0.302
As	-0.016	0.543	0.690
Cu	0.980	-0.050	0.085
Pb	-0.124	0.948	-0.081
Cr	0.767	0.075	-0.541
Zn	0.921	0.302	-0.024
Ni	0.978	-0.083	0.001
总计	3.470	2.564	0.929
方差百分比/%	43.4	32.0	11.6
累积百分比/%	43.4	75.4	87.0

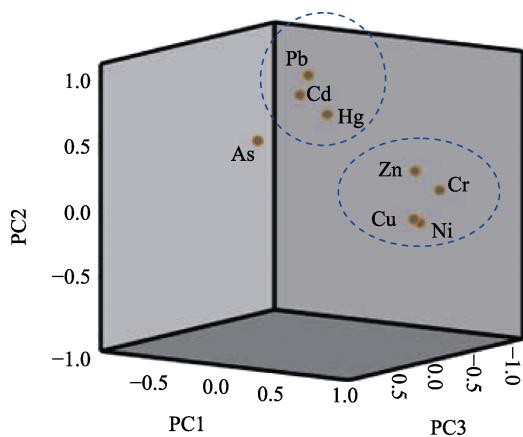


图 7 土壤重金属总量主成分载荷图

Fig. 7 Loading diagram of principal component of total heavy metals in soil

2.3.3 PCA/APCS 受体模型源解析 PCA 仅能实现对污染源的定性识别, 为分析不同源的贡献率,

利用 PCA/APCS 受体模型进一步开展定量源解析, 得到各元素的多元线性回归方程。方程的  $R^2$  代表回归关系中因变量的全部变动能被自变量解释的比例,  $R^2$  越高代表模型越好。结果显示, Hg、As、Cd、Cr、Pb、Zn、Ni、Cu 等 8 个元素回归方程的  $R^2$  分别为 0.710、0.786、0.794、0.884、0.917、0.938、0.964、0.970, 回归模型能解释 70%~90% 的变异, 拟合效果较好。

根据回归方程计算得到各元素不同源平均贡献率, 结果见图 8。自然源是 Cu、Ni、Cr、Zn 的主要来源, 贡献率分别为 89.3%、85.5%、84.6%、65.8%, 其中 Zn 还受到工业交通源影响。Pb、Cd、As、Hg 主要来自工业交通源, 贡献率分别为 78.1%、61.8%、60.2%、57.8%, 其中 As 还受到农业源影响, 贡献率为 31.4%。PCA/APCS 受体模型来源解析结果与 PCA 分析结论基本一致。

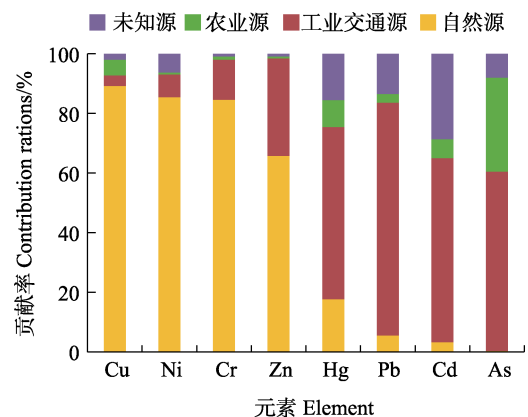


图 8 不同源贡献率

Fig. 8 Contribution ratios from different sources

### 3 讨论

本研究采用单因子污染指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法等 3 种方法对海口市农用地土壤重金属进行评价。结果表明, 8 项重金属含量变异系数均超过了 50%, 其中 Cd 和 Ni 的变异系数超过了 100%, 属于强变异<sup>[20]</sup>, 说明空间异质性大。Hg 和 As 2 种重金属没有超过风险筛选值点位, 其他 6 种重金属超过农用地风险筛选值点位比例从高到低为 Cr (31.6%)、Ni (31.6%)、Cu (21.1%)、Cd (5.3%)、Pb (2.6%)、Zn (2.6%)。研究区 8 种重金属地累积指数综合评价为 Cd、Cr 轻度污染, 其他 6 个重金属无污染, 结果表明海口市土壤 Cd 富集程度最高, 土壤受 Cd 影响较大, Cr 次之, 其他重金属影响较

小。研究区大部分处于轻微和中度生态风险水平，强度生态风险、很强生态风险区域主要集中在研究区中部、南部小片区域和东南部小片区域。农用地土壤重金属潜在生态风险由大到小依次为 Cd>Hg>Ni>Cu>As、Pb、Cr、Zn。其中，As、Pb、Cr、Zn 均为轻微生态风险，潜在生态危害较小。Cd、Hg 强度生态风险以上点位占比分别为 52.6%、15.8%，研究区土壤重金属的潜在生态风险主要由 Cd 和 Hg 引起。Hg 和 Cd 超过风险筛选值程度不高，但潜在生态风险等级很高，主要原因是潜在生态风险指数法在体现区域背景值差异基础上，综合考虑了污染物毒性，而 Hg 和 Cd 的毒性系数较大，导致在轻微富集情况下容易造成较高潜在生态风险等级。3 种评价方法反映了不同重金属对土壤环境的影响，考虑超标重金属污染物造成的污染危害，也考虑土壤重金属可能产生的生态环境潜在危害风险。研究区应加强土壤中 Cd、Cr、Hg 的污染控制，尤其是 Cd 的污染管控。

研究区农用地土壤重金属源解析通过重金属相关性分析、主成分分析及 PCA/APCS 受体模型分析实现，3 种分析方法结论相互支撑，特别是 PCA/APCS 受体模型分析实现了定量源解析。结果表明，研究区土壤污染来源主要为基性火山岩成土母岩风化引起的自然来源、工业企业生产及交通出行、农业生产中化肥农药施用等。Cu、Ni、Cr、Zn 主要来源为自然源，贡献率分别为 89.3%、85.5%、84.6%、65.8%；Pb、Cd、As、Hg 主要来自工业交通源，贡献率分别为 78.1%、61.8%、60.2%、57.8%；As 同时受到农业源影响。郭跃品等<sup>[21]</sup>对琼北火山岩农田土壤重金属来源研究表明 Cu、Ni、Cr 主要来源于成土母质，Cu、Ni、Cr 属母质所致高背景含量。傅杨荣<sup>[22]</sup>研究发现海南岛土壤元素地球化学基准值和背景值深刻继承了成土母岩母质的元素地球化学特征，如基性火山岩土壤富集铁族元素（Cr、Cu、Ni、Mn 等），第四系土壤富集二氧化硅（SiO<sub>2</sub>），碱性侵入岩土壤富集 Pb、Cd 等。本研究与郭跃品等<sup>[21]</sup>、傅杨荣<sup>[22]</sup>、李佳桐等<sup>[23]</sup>研究结果一致，Cu、Ni、Cr、Zn 主要与研究区基性火山岩成土母岩相关，海南琼北基性火山岩区农田土壤中 Cr、Ni、Cu 等重金属主要来源于成土母岩。Cd、Hg、Pb、As 等 4 种元素通常为工业企业生产或交通运输活动副产物<sup>[9, 13]</sup>。海口市为海南省省会城市，2021 年末常住人口 288.66 万，公路运输客运线 206 条<sup>[14]</sup>，交

通道路网密集，工业园区和工业企业数量较多，Pb、Hg、Cd、As 与区域工业企业污染物排放、交通尾气排放量大有关。本研究中 Pb、Cd、As、Hg 主要来自工业生产、交通运输等人为活动影响，仝致琦等<sup>[24]</sup>研究也证实 Cd 和 Pb 均为交通源重金属，主要源自汽车尾气排放、油料泄漏、橡胶轮胎磨损、机动车机件磨损、汽车散热器、沥青或水泥路面磨损等。同一种元素在不同的主成分均有较大的载荷时，可认为该元素具有 2 种主成分的来源<sup>[9]</sup>。As 在因子 1、2 的载荷分布分别为 0.543、0.690，载荷相当，故具有双重来源。由于 As 被广泛用作农药、杀虫剂、除草剂<sup>[25]</sup>，可能造成 As 在土壤中形成一定富集，As 常作为农业活动标识元素。本研究中 As 主要来源于农业源，与徐诗琴等<sup>[13]</sup>研究结果一致，农业生产可能造成土壤 As 的富集，同时农产品中 As 安全应当引起关注。

## 参考文献

- [1] 张小敏, 张秀英, 钟大洋, 江洪. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 692-703.  
ZHANG X M, ZHANG X Y, ZHONG T Y, JIANG H. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 692-703. (in Chinese)
- [2] 李文琦, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 解雪峰. 浙江省金华市农用地重金属污染及安全利用分区[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2022, 45(1): 88-96.  
LI W Q, WU T, JIANG G J, ZHANG J Z, XIE X F. On evaluation and safe utilization subregion of heavy metal polluted agricultural land in Jinhua[J]. Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences), 2022, 45(1): 88-96. (in Chinese)
- [3] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 赵海燕, 梁永红, 罗永霞, 王强, 赵林丽. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究: 以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 81-91.  
SONG J X, ZHU Q, JIANG X S, ZHAO H Y, LIANG Y H, LUO Y X, WANG Q, ZHAO L L. GIS-based heavy metals risk assessment of agricultural soils—a case study of Baguazhou, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1): 81-91. (in Chinese)
- [4] 陈迪云, 谢文彪, 宋刚, 罗定贵, 张鸿郭, 杨军华. 福建沿海农田土壤重金属污染与潜在生态风险研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 194-199.  
CHEN D Y, XIE W B, SONG G, LUO D G, ZHANG H G,

- YANG J H. Heavy metal pollution and potential ecological risk of paddy field soil in littoral area, Fujian Province[J]. *Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 194-199. (in Chinese)
- [5] 李瑞琴, 于安芬, 白滨, 王婧. 甘肃中部高原露地菜田土壤重金属污染及潜在生态风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 103-110.
- LI R Q, YU A F, BAI B, WANG J. Analysis on current situation and potential ecological risk and the characteristic of heavy metals pollution of soil in the central plateau of Gansu province[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2013, 32(1): 103-110. (in Chinese)
- [6] 谢涛, 罗艳, 龙智翔, 黄殿贵, 班雁华. 广西无公害农产品基地土壤重金属污染评价[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(27): 11003-11004.
- XIE T, LUO Y, LONG Z X, HUANG D G, BAN Y H. Assessment of heavy metal contamination of soils in pollution-free agricultural products bases in Guangxi[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(27): 11003-11004. (in Chinese)
- [7] 秦迪岚, 郭倩, 朱颖, 罗岳平, 毕军平, 黄懿, 胡树林, 林海兰. 特色农产品生产基地土壤镉生态风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(4): 200-204.
- QIN D L, GUO Q, ZHU Y, LUO Y P, BI J P, HUANG Y, HU S L, LIN H L. Ecological risk assessment of cadmium in soils of characteristic agricultural products bases[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(4): 200-204. (in Chinese)
- [8] 穆德苗, 陈艳秋, 胡涛, 林大松, 杨正兰, 孙约兵. 基于田块尺度的农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(6): 1271-1283.
- MU D M, CHEN Y Q, HU T, LIN D S, YANG Z L, SUN Y B. Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soil at the field scale[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1271-1283.
- [9] 陈丹青, 谢志宜, 张雅静, 罗小玲, 郭庆荣, 杨剑军, 梁耀杰. 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*, 2016, 25(6): 1014-1022.
- CHEN D Q, XIE Z Y, ZHANG Y J, LUO X L, GUO Q R, YANG J J, LIANG Y J. Source apportionment of soil heavy metals in Guangzhou based on the PCA/APCS model and geostatistics[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(6): 1014-1022. (in Chinese)
- [10] 左文萍, 黎清华, 张彦鹏, 陈帅. 火山岩风化区农田重金属污染及健康风险评价: 以海口江东新区为例[J/OL]. *地球科学*, 2022: 1-15 [2022-03-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220321.2019.006.html>.
- ZUO W P, LI Q H, ZHANG Y P, CHEN S. Assessment of heavy metal pollution and health risk in farmland in the volcanic weathering area: a case study in Jiangdong new district of Haikou[J/OL]. *Earth Science*, 2022: 1-15 [2022-03-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220321.2019.006.html>. (in Chinese)
- [11] 梁捷, 孙宏飞, 葛成军, 孟磊. 海南省主要农作物主产区土壤重金属含量分布及其健康风险评估[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(11): 2285-2293.
- LIANG J, SUN H F, GE C J, MENG L. Distribution of heavy metal contents in soils of main crop production areas in Hainan and the health risk assessment[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40(11): 2285-2293. (in Chinese)
- [12] 李福燕, 李许明, 杨帆, 漆智平. 海南岛农田土壤重金属污染的评价及其来源分析[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(3): 211-217.
- LI F Y, LI X M, YANG F, QI Z P. Pollution evaluation and preliminary analysis of pollution sources of heavy metals in agricultural soil of Hainan Island[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2013, 31(3): 211-217. (in Chinese)
- [13] 徐诗琴, 王海妹, 符式锦. 基于受体模型和地统计学的海南岛农用地土壤重金属分布特征及源解析[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(9): 1164-1169.
- XU S Q, WANG H M, FU S J. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in agricultural soil on Hainan Island based on receptor model and geostatistics[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(9): 1164-1169. (in Chinese)
- [14] 海口市地方史志办公室. 海口年鉴[M]. 海口: 南海出版公司, 2021: 18-19.
- Office of Local Chronicles Compilation of Haikou City. *Haikou yearbook*[M]. Haikou: Nanhai Publishing Company, 2021: 18-19.
- [15] 杨杉, 汪军, 李洪刚, 张晟, 张勇, 邹家素, 刘坤. 重庆市绿地土壤重金属污染特征及健康风险评估[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4): 966-972.
- YANG S, WANG J, LI H G, ZHANG S, ZHANG Y, ZOU J S, LIU K. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in green space of Chongqing City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(4): 966-972. (in Chinese)
- [16] MULLER G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, 2: 108-118.
- [17] 马铭留, 李泽岩, 周毛, 罗毓珍, 曾水泉, 陈文勇, 林生. 海南省土壤环境背景值[R]. 广州: 广东省环境监测中心站, 中山大学地理系, 海南省环境监测中心站, 1991: 14-15.
- MA M L, LI Z Y, ZHOU M, LUO Y Z, ZENG S Q, CHEN W Y, LIN S. Background value of soil environment in Hainan Province[R]. Guangzhou: Guangdong Environmental

- Monitoring Center Station, Department of Geography, Sun Yat sen University, Hainan Environmental Monitoring Center Station, 1991: 14-15. (in Chinese)
- [18] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sediment logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [19] 范俊楠, 郭丽, 张明杰, 安瑛达, 杨雪, 施敏芳, 贺小敏. 湖北省重点区域及周边表层土壤重金属污染现状及评价[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(1): 96-104.
- FAN J N, GUO L, ZHANG M J, AN K D, YANG X, SHI M F, HE X M. Present situation and evaluation of heavy metals pollution in surface soils of key areas and surrounding areas in Hubei[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(1): 96-104. (in Chinese)
- [20] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. *地理研究*, 2001, 20(2): 161-169.
- WANG S Q, ZHU S L, ZHOU C H. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(2): 161-169. (in Chinese)
- [21] 郭跃品, 傅杨荣, 何玉生, 马荣林, 张固成. 琼北火山岩区农田土壤重金属和硒含量评价及来源研究[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(1): 330-334.
- GUO Y P, FU Y R, HE Y S, MA R L, ZHANG G C. Evaluation and source analysis of the heavy metals and selenium in the farmland soils of volcanic area, north of Hainan Island[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(1): 330-334. (in Chinese)
- [22] 傅杨荣. 海南岛土壤地球化学与优质农业研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- FU Y R. Studies on soil geochemistry and high-quality agriculture in Hainan Island[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [23] 李佳桐, 李雪, 葛成军, 俞花美, 孙宏飞, 陈森. 琼北土壤重金属高背景值区人群健康风险评价[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(1): 189-196.
- LI J T, LI X, GE C J, YU H M, SUN H F, CHEN M. Health risk assessment of heavy metal in soils in the north of Hainan Province with high background value[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(1): 189-196. (in Chinese)
- [24] 全致琦, 谷蕾, 段海静, 马建华. 基于Kriging插值的路旁土壤重金属含量空间分布: 以310国道郑州-开封段为例[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(12): 3030-3038.
- TONG Z Q, GU L, DUAN H J, MA J H. Spatial distribution of heavy metals in roadside soils based on Kriging interpolation: a case study of Zhengzhou-Kaifeng section along the 310<sup>th</sup> national highway[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(12): 3030-3038. (in Chinese)
- [25] 肖明, 杨文君, 孙小凤, 吕新. 土壤As动态影响下枸杞质量评价及环境风险预测[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(3): 273-278.
- XIAO M, YANG W J, SUN X F, LYU X. Wolfberry quality assessment and environmental risks prediction by the effects of arsenic dynamic in soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(3): 273-278. (in Chinese)