

海口市城乡环境梯度带土壤重金属富集特征

吴 姬, 王 婧, 符式锦

海南省生态环境监测中心, 海南海口 571126

摘 要: 为开展海口市城乡环境梯度带不同区域土壤重金属富集特征, 采集海口市城市中心区、城乡交错区、农村区、自然区等 4 个不同区域的农用地土壤剖面样品, 测定 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 等 8 种重金属含量, 通过剖面土壤重金属的垂直分布迁移特征、重金属与理化指标相关性、重金属富集系数等分析海口市土壤重金属富集特点。结果表明: 表层土壤 Cd、Pb、Zn 含量平均值均大于深层土壤, 重金属存在不同程度的累积效应。土壤 pH 与 Cd 含量呈显著正相关, 土壤 pH 对 Cd 重金属富集程度影响较大。土壤有机质 (SOM) 与 Hg、Cr、Cu、Zn、Ni 含量呈正相关, 表层、中层相关性强于底层, 表层土壤 SOM 对重金属富集有明显影响。各重金属富集系数大于 1.2 的点位比例从高到低为 Cd (70.0%)、Hg (41.7%)、As (36.7%)、Pb (28.3%)、Zn (21.7%)、Cu (18.3%)、Ni (18.3%)、Cr (15.0%)。海口市农用地土壤重金属富集程度表现出一定的距离梯度变化特征, 即随着距离城市中心区距离的增加, 8 项土壤重金属富集程度呈逐渐下降的趋势。自然区仅 Cd 呈现富集现象, 其他 7 项重金属未发现富集点位。Cd、Hg、As 土壤重金属富集系数涉及范围大, Cd 城市中心区富集系数大于 8 的点位数量远超城乡交错区和农村区, Hg 富集系数大于 2 的点位仅位于城市中心区和城乡交错区。Cd 富集系数大于 1.2 的点位比例远超其他 7 个重金属项目, 城乡环境梯度的覆盖度最大, 区域性富集特点明显, 且有 30% 点位富集系数大于 4, 土壤富集程度较强, 应引起关注。

关键词: 城乡环境梯度带; 土壤; 重金属; 富集

中图分类号: X53 文献标志码: A

Characteristics of Heavy Metal Enrichment in Soil of Urban and Rural Environmental Gradient Zone in Haikou, Hainan, China

WU Ji, WANG Jing, FU Shijin

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

Abstract: In order to investigate the enrichment characteristics of heavy metals in soil of different urban-rural environmental gradient zones in Haikou, agricultural surface soil samples were collected from four different urban-rural environmental gradient zones in Haikou, including the urban center, urban-rural transitional zone, rural area, and natural area. The concentration of eight heavy metals were measured, including Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn. The enrichment characteristics of heavy metals in soil of Haikou were analyzed through the vertical distribution and migration characteristics of heavy metals, the correlation between heavy metals and physicochemical indicators, and the enrichment coefficient of heavy metals. The results showed that the average content of Cd, Pb, and Zn in surface soil was higher than that in deep soil, and heavy metals had varying degrees of cumulative effects. There was a significant positive correlation between soil pH and Cd content, and soil pH had a significant impact on the degree of Cd heavy metal enrichment. Soil organic matter (SOM) was positively correlated with the content of Hg, Cr, Cu, Zn, and Ni. The correlation between layer A and layer B was stronger than that of layer C. Surface soil SOM had a significant impact on heavy metal enrichment. The proportion of sites with heavy metal enrichment coefficients greater than 1.2 ranged from high to low was Cd (70.0%), Hg (41.7%), As (36.7%), Pb (28.3%), Zn (21.7%), Cu (18.3%), Ni (18.3%), and Cr (15.0%). The enrichment degree of heavy metals in agricultural land soil in Haikou showed a certain distance gradient variation feature, with the increase of distance from the urban center, the enrichment degree of eight

收稿日期 2024-07-25; 修回日期 2024-08-15

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源解析; E-mail: 22958724@qq.com。

soil heavy metals showed a gradually decreasing trend. Only Cd showed enrichment in the natural area, and no enrichment points were found for the other 7 heavy metals. The enrichment coefficients of Cd, Hg, and As soil heavy metals involved a wide range. The points with enrichment coefficients greater than 8 for Cd in urban central areas far exceeded that in urban-rural and rural areas. The points with enrichment coefficients greater than 2 for Hg were only located in urban central areas and urban-rural transitional areas. The proportion of points with Cd enrichment coefficients greater than 1.2 far exceeded the other seven heavy metal projects. The coverage of Cd enrichment in urban and rural environmental gradients was the highest, and the regional enrichment characteristics were obvious. In addition, the enrichment coefficient of 30% Cd points was greater than 4, indicating a strong soil Cd enrichment degree, which should be paid attention to.

Keywords: urban and rural environmental gradient zone; soil; heavy metals; enrichment

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.02.024

土壤是人类生存的重要物质基础,随着城市化进程加快、工业生产、农业生产活动导致大量污染物进入土壤系统,重金属污染日益凸显^[1]。重金属易在土壤中富集,当土壤中重金属累积到一定程度时,会对土壤造成污染^[2]。近年来,国内学者围绕不同区域土壤重金属富集状况进行评价研究。张小敏等^[3]研究发现中国农田土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的含量均有不同程度的富集, Cd、Pb 的富集程度高于其他重金属项目。陈梓杰等^[4]提出重庆城口县农田土壤中 Cd、Zn、Cu、Cr、Ni 和 Pb 存在不同程度的富集,其中 Cd 的富集程度最高。李建国等^[5]指出江苏无锡市主城区土壤与建设用地距离越近,土壤自然特性对重金属富集影响越小,人类活动对重金属富集影响越大。

海口市是海南省省会城市,工业和农业发展趋势迅猛。海口工业主要包括采矿业、水电气供应业、汽车及运输设备制造业、食品及农副产品加工业、医药制造业、电气机械和器材制造业、印刷塑料及纸制品业、非金属矿物制品业等。采矿业、医药制造业和纸制品业属于土壤污染重点行业企业,工业企业排放污染物中涉及重金属,对周边环境土壤重金属可能产生潜在影响。2022 年全市工业总产值 820.38 亿元,工业增加值 276.7 亿元,增长 16.7%^[6]。海口市作为热带农作物种植的重要基地,种植业稳步发展,热带特色农业大幅增长,农业经济总体平稳,农业总产值 163.48 亿元,比 2021 年增长 6%^[6]。工业活动和农业生产等快速发展及其叠加影响下,海口市土壤重金属富集影响日益受到关注。但是,目前针对海口市不同区域或不同土层农用地土壤重金属富集及垂直分布迁移等研究不多。城乡环境梯度演化带是不同时期城市化进程的结果,记录自然、农耕、工业化时代人类活动逐渐加强的过程。因此,本研究采集海口市城乡环境梯度带不同区域农用地

土壤分层垂直样品,分析土壤 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 等 8 种重金属垂直分布特征,并结合富集系数法研究海口市农用地土壤富集特点,以期海口市农用地土壤重金属富集状况评估、土壤重金属污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 研究区域概况 海口市位于海南岛北部,地形略呈长心形,地势平缓,地貌类型大致分为滨海平原、河流阶地、丘陵及熔岩台地三部分^[6]。基性火山岩、第四纪松散沉积物、中酸性侵入岩、变质岩、沉积岩等为区域主要成土母岩类型。砖红壤、水稻土、滨海沙土、滨海盐土、石质土等为区域主要土壤类型。

1.1.2 样品采集 本研究划定城乡环境梯度带 4 个(城市中心区、城乡交错区、农村区、自然区)。城市中心区、城乡交错区通过 2 km×2 km 网格法分别布设 15、19 个点位;农村区通过 4 km×4 km 网格法布设 20 个点位;自然区通过 0.5 km×0.5 km 网格法布设 6 个点位,共布设农用地点位 60 个(图 1)。其中,点位 1~15 为城市中心区点位,点位 16~34 为城乡交错区点位,点位 35~54 为农村区点位,点位 55~60 为自然区点位。60 个点位中,成土母岩为基性火山岩的点位 45 个,成土母岩为第四纪松散沉积物的点位 15 个。耕地点位 25 个,园地点位 28 个,林地点位 7 个。60 个土壤点位样品采集时,自下而上在底层(60~100 cm)、中层(20~60 cm)、表层(0~20 cm)逐层采集,土壤各层无机项目测试样品采样量不少于 1500 g。

1.2 方法

1.2.1 样品处理与测试 样品采集后进行自然风干、粗磨、细磨、分样等工作。pH 粗磨过筛孔径为 2 mm(10 目),有机质细磨过筛孔径为 0.25 mm

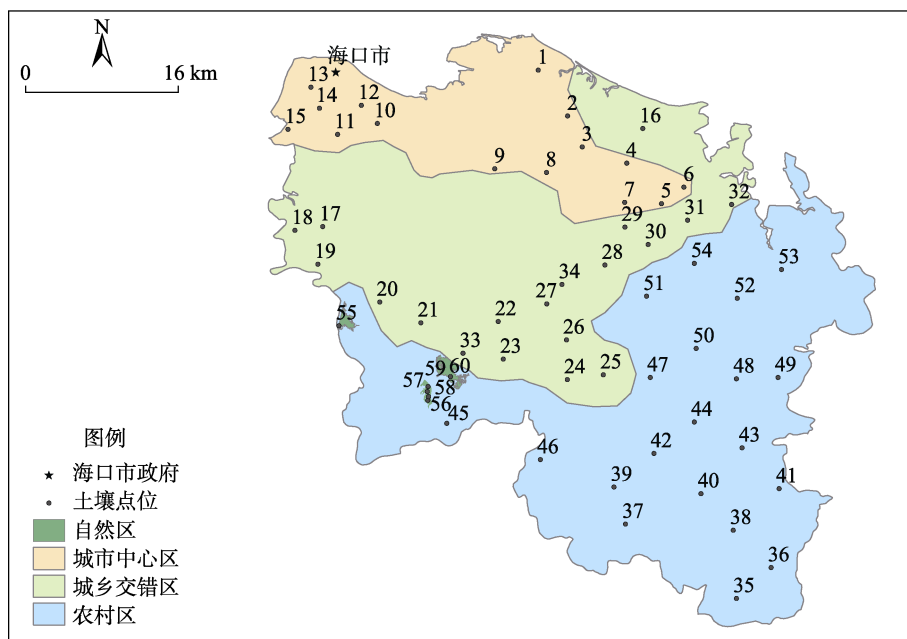


图1 土壤采样点位分布

Fig. 1 Distribution map of soil sampling sites

(60目), 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和Zr等6个项目细磨过筛孔径为0.075 mm(200目)。

土壤pH采用HJ 962—2018电位法的方法进行测定^[7],有机质采用NY/T 1121.6—2006土壤有机质的测定方法进行测定^[8],土壤Cd参照GB/T 17141—1997石墨炉原子吸收分光光度法进行测定^[9],Hg和As参照HJ 680—2013微波消解/原子荧光法进行测定^[10],Pb、Cr、Cu、Zn、Ni和Zr参照HJ 780—2015波长色散X射线荧光光谱法进行测定^[11]。

1.2.2 评价方法 本研究采用土壤富集系数(soil enrichment coefficient, SEC)评价土壤富集程度。由于ZrO₂的矿物具有高度抗风化性和难以迁移性,在土壤中含量较高,容易测定以及较少受到外来污染影响等特点,因此可根据ZrO₂含量判断土壤是否被其他元素污染^[12]。方法是以ZrO₂含量作为参比,计算其他元素的富集系数,公式为:

$$SEC=(C_p/C_i)/(C_s/C_n)$$

式中, C_p 为土壤中元素含量, C_i 为土壤中ZrO₂含量, C_s 为成土母质中元素含量, C_n 为成土母质中ZrO₂含量。

若富集系数大于1.2,一般判断该元素有外来污染。富集系数法要求每个土壤剖面的上层和底层成土母质同源,只适用于无机元素。本研究分别采用同一土壤剖面表层、底层元素含量,分别

作为土壤和成土母质中元素含量进行统计分析。

1.3 数据处理

本研究使用WPS 2019软件开展土壤理化指标和重金属浓度的统计分析,使用Origin 2021软件开展相关性分析,使用ArcGIS 10.8软件完成统计学分析和空间分布图的制作。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质与重金属含量分析

分析海口市农用地土壤剖面各土层土壤理化性质指标(表1)可知,土壤pH<5.5,呈强酸性,表层至底层土壤pH逐渐升高。土壤有机质(SOM)从表层到底层逐渐下降,各层土壤SOM含量均低于全国农田土壤SOM含量平均值24.65 g/kg^[13],说明海口市农用地土壤肥力不够高。海口市农用地土壤剖面各土层土壤重金属含量分析结果(表2)表明,表层、中层、底层3层土壤Cd、Hg、As、Pb、Zn含量均值低于GB15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中规定的农用地土壤重金属污染最严风险筛选值,Cr、Cu、Ni含量均值超过农用地土壤重金属污染最严风险筛选值。表层土壤重金属含量均值与2004—2005年开展的多目标区域地球化学调查项目中海口市表层土壤含量比较^[14],As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni含量均值分别是多目标区域地球化学调查项目重金属含量(2.6、15.5、

231.4、56.0、98.0、109.2 mg/kg) 的 1.47 倍、1.70 倍、1.12 倍、1.15 倍、1.23 倍、1.30 倍。8 项重金属含量变化范围大, 各层变异系数(CV)集中于 34%~131%, 除中层的重金属 Pb 外, 其他 CV 均属于强变异, CV 均大于 36%^[15], 特别是表层、底层的 Cd、As 的 CV 值均超过 100%, 呈现明显的空间变异性, 受区域土壤背景或人为因素等空间差异影响大。

表 1 海口土壤剖面各土层土壤基本理化性质统计分析
Tab. 1 Statistical characteristics of soil physicochemical indicators in different soil layers of Haikou soil profile

指标 Index	表层 Surface/(mg·kg ⁻¹)					中层 Middle level/(mg·kg ⁻¹)					底层 Bottom/(mg·kg ⁻¹)				
	最小值 Mini- mum value	最大值 Maxi- mum value	平均值 Aver- age value	标准差 Standard deviation	CV/%	最小值 Mini- mum value	最大值 Maxi- mum value	平均值 Aver- age value	标准差 Standard deviation	CV/%	最小值 Mini- mum value	最大值 Maxi- mum value	平均值 Aver- age value	标准差 Standard devia- tion	CV/%
pH	4.2	7	5.2	0.6	12	4.4	7.3	5.4	0.8	15	4	7.5	5.5	0.9	17.2
SOM	2.9	64	23	12	51	1.4	47	15	9.3	64	0.1	40	11	8.4	75.6

表 2 海口土壤剖面各土层土壤重金属含量特征
Tab. 2 Statistical characteristics of soil heavy metal content in different soil layers of Haikou soil profile

指标 Index	表层 Surface/(mg·kg ⁻¹)					中层 Middle level/(mg·kg ⁻¹)					底层 Bottom/(mg·kg ⁻¹)					土壤污染风 险筛选值
	最小值 Mini- mum value	最大值 Maxi- mum value	平均值 Aver- age value	标准差 Stan- dard devia- tion	CV/%	最小值 Mini- mum value	最大值 Maxi- mum value	平均值 Aver- age value	标准差 Stan- dard devia- tion	CV/%	最小值 Mini- mum value	最大值 Maxi- mum value	平均值 Aver- age value	标准差 Standard deviation	CV/%	Risk screening values of soil con- tamination
Cd	0.01	0.48	0.07	0.07	110	0.01	0.14	0.04	0.03	83	0.01	0.25	0.04	0.05	131	0.3
Hg	0.01	0.19	0.07	0.04	52	0.01	0.41	0.07	0.05	84	0.01	0.13	0.06	0.03	50	0.5
As	0.04	21.20	3.82	3.93	103	0.01	22.60	3.70	3.90	106	0.04	24.90	3.85	4.43	115	20.0
Pb	9.90	82.90	26.40	12.60	47	11.40	55.30	24.40	8.21	34	9.70	69.40	24.80	10.50	42	70.0
Cr	17.10	587.00	258.60	151.80	59	22.20	590.00	253.00	150.00	59	20.90	930.00	260.00	159.00	61	150.0
Cu	4.00	151.00	64.40	37.90	59	4.10	144.00	62.50	38.10	61	4.00	141.00	66.60	40.90	61	50.0
Zn	13.40	544.00	120.70	73.50	61	23.40	191.00	110.00	45.40	41	25.40	208.00	111.00	45.10	41	200.0
Ni	2.90	343.00	141.80	94.20	66	7.20	345.00	143.00	94.90	66	6.70	380.00	154.00	103.00	67	60.0

2.2 土壤剖面重金属含量的垂直分布迁移特征

Cd、Hg 含量随土层深度的增加呈减小的趋势(图 2)。Pb、Zn、As、Cr、Cu 含量随土层深度的增加呈先减小后增大的趋势, Pb、Zn 含量深层土壤小于表层土壤, As、Cr、Cu 含量深层土壤大于表层土壤。Ni 含量随土层深度的增加而增加。8 个重金属中, 表层土壤中的 Cd、Pb、Zn 重金属含量平均值大于深层土壤, 表明重金属存在不同程度的累积效应。

2.3 土壤重金属元素含量相关性分析

土壤中重金属含量受多种因素影响, 与土壤 pH、粒径组成等土壤性质密切相关^[16]。分析土壤理化指标与重金属含量相关性(图 3)发现, 各层 pH 与 Cd 含量呈显著正相关, 但表层、中层、底层与 Cd 含量相关系数逐步减小, 说明表层 pH 变化对 Cd 含量影响最大, pH 与 Cu 含量呈显著

负相关, 中层 pH 与 Hg、As 含量呈显著负相关, 底层 pH 与 Hg、Cr 含量呈显著负相关。各层 SOM 与 Hg、Cr、Cu、Zn、Ni 含量呈正相关, 表层、中层相关系数为 0.6 左右, 大于底层相关系数; 中层、底层 SOM 与 Pb 含量呈显著负相关。各层 Hg、Cr、Cu、Zn、Ni 重金属含量之间呈正相关, 其中 Cr、Cu、Zn、Ni 重金属含量之间相关系数均大于 0.6, 属于强相关, 说明这 4 项重金属可能同源。表层 Pb 与 Cu、Ni 重金属含量之间呈负相关, 中层、底层 Pb 与 Cr、Cu、Zn、Ni 重金属含量之间呈负相关, 表明 Pb 与 Cu、Ni 等重金属具有异源性。

2.4 土壤重金属富集特征

分析海口市各采样点位土壤重金属富集系数分布(图 4)发现, Cd 富集系数范围为 0.1~19.3, Hg 富集系数范围为 0.1~17.6, As 富集系数范围为

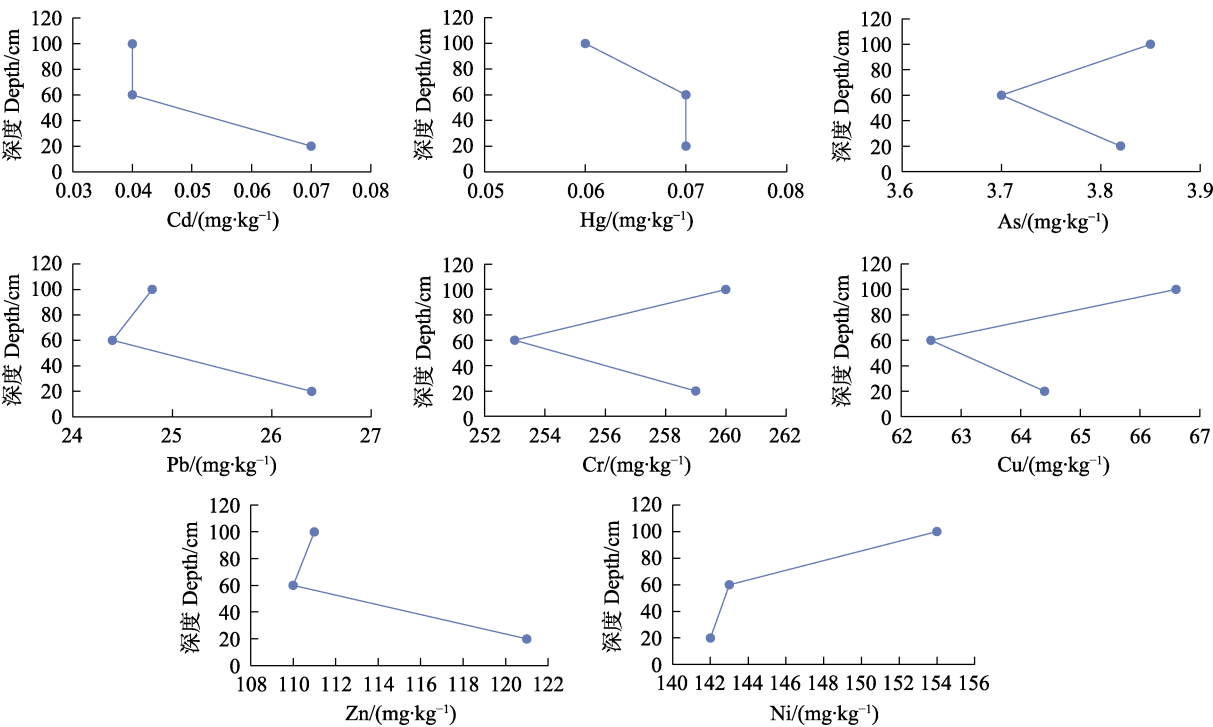
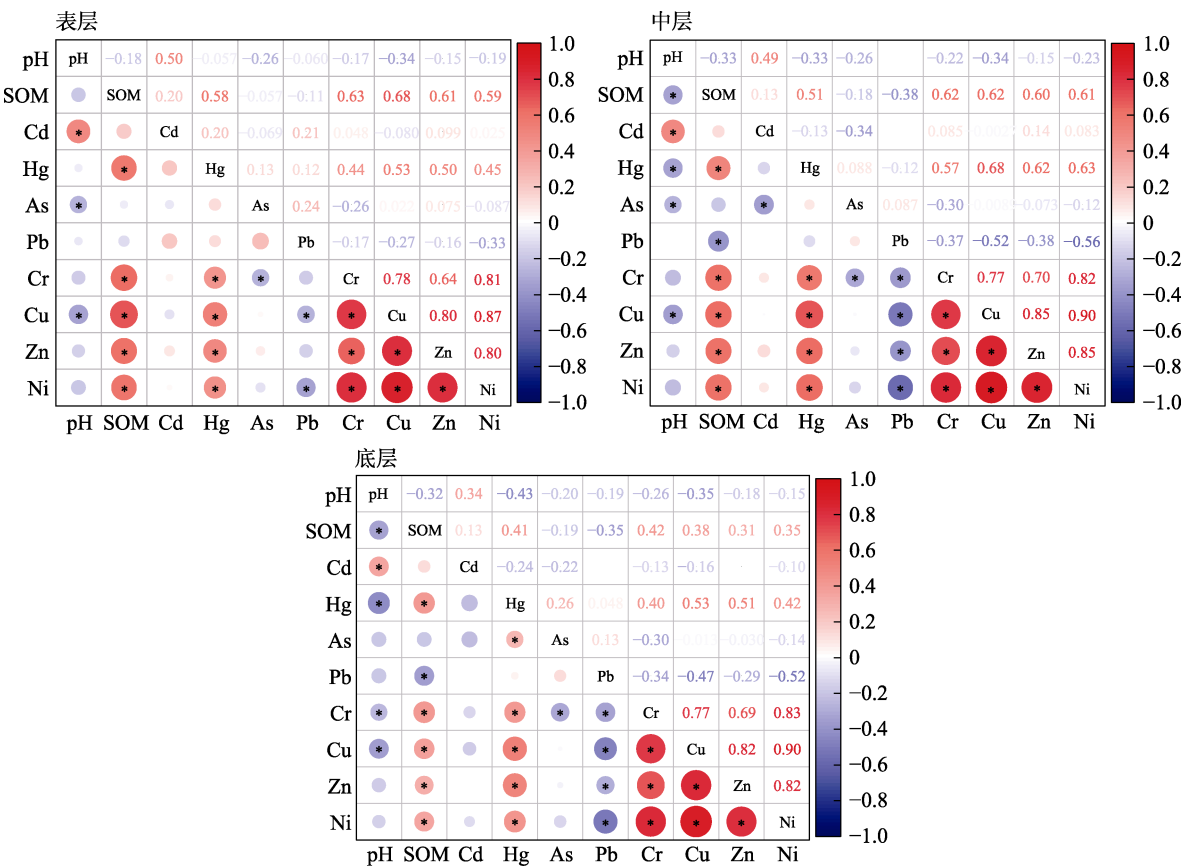


图 2 海口市土壤剖面重金属垂直迁移分布特征

Fig. 2 Vertical migration and distribution characteristics of heavy metals in soil profiles of Haikou



*表示显著相关 ($P<0.05$)。
* indicates significant correlation ($P<0.05$).

图 3 海口市土壤重金属与土壤理化指标之间的相关关系

Fig. 3 Correlation between soil hHeavy metals and soil physicochemical indicators in Haikou

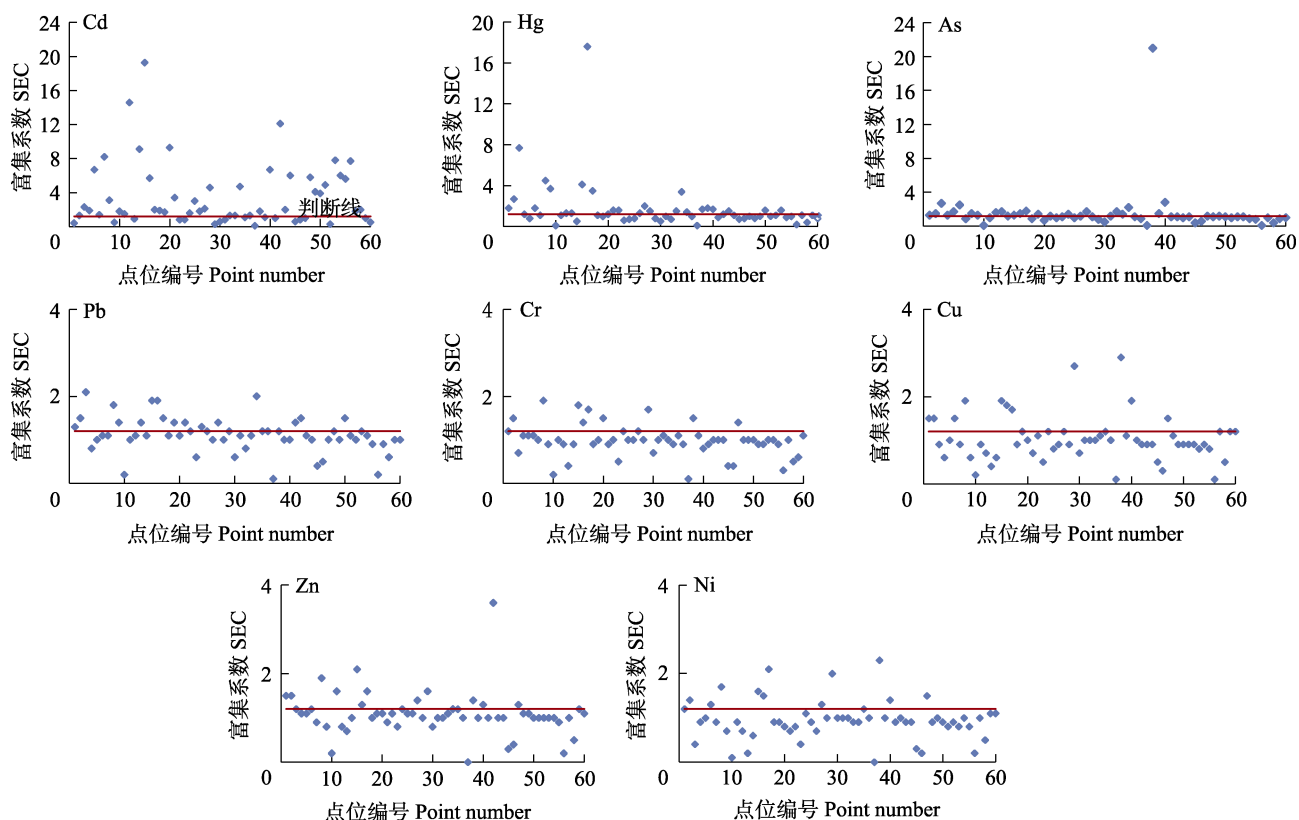


图 4 海口市各采样点位土壤重金属富集系数分布

Fig. 4 Soil heavy metal enrichment coefficients at various sampling points in Haikou

0.1~21.0, Pb 富集系数范围为 0.1~2.1, Cr 富集系数范围为 0.1~1.9, Cu 富集系数范围为 0.1~2.9, Zn 富集系数范围为 0.04~3.60, Ni 富集系数范围为 0.04~2.30。Cd、Hg、As 富集系数范围大, 个别点位富集程度较高, 可能受到较多外来人为活动影响。

各重金属富集系数大于 1.2 的点位数量占比从高到低为 Cd>Hg>As>Pb>Zn>Cu>Ni>Cr(图 5), 比例分别为 70.0%、41.7%、36.7%、28.3%、21.7%、18.3%、18.3%、15.0%。Cd 富集系数大于 1.2 的点位分布最广, 分布于城市中心区、城乡交错区、农村区、自然区等 4 个城乡环境梯度带(图 6), 4 个梯度带富集系数大于 1.2 的点位数量分别为 12 个、13 个、12 个、4 个, 占该区域布设点位数量比例分别为 80.0%、68.4%、60.0%、66.7%, 富集系数大于 4 的点位在 4 个城乡环境梯度带均有分布, 涉及三门坡镇、大致坡镇、三江镇、红旗镇、龙泉镇、永兴镇、演丰镇、长流镇、西秀镇等乡镇, 说明 Cd 呈现区域性富集现象。城市中心区富集系数大于 8 的点位数量远超城乡交错区和农村区, 位于三门坡、永兴镇、演丰镇、西秀镇、长流镇等乡镇。Cd 富集系数大于 1.2 的点位比例远

超其他 7 个重金属项目, 城乡环境梯度的覆盖度最大, 共有 18 个点位富集系数大于 4, 土壤富集程度较强, 应引起关注。

Hg、As、Pb、Zn、Cu、Ni、Cr 共 7 个重金属富集系数大于 1.2 的点位分布在城市中心区、城乡交错区、农村区, 自然区无富集系数大于 1.2 的点位, 说明自然区受人为活动、工业生产干扰少, 因而自然区点位未出现富集现象。

Hg 富集系数大于 1.2 的点位在城市中心区、城乡交错区、农村区分布的数量相当, 分别为 10、8、8 个, 占该区域布设点位数量比例分别为 66.7%、42.1%、40.0%, Hg 富集系数大于 2 的点位仅位于城市中心区和城乡交错区, 数量分别为 5、3 个点位, 占比分别为 33.3%、15.8%, 位于龙泉镇、石山镇、演丰镇、灵山镇、府城镇、城西镇、西秀镇等乡镇。城市中心区、城乡交错区、农村区 As 富集系数大于 1.2 的点位数量分别为 11、8、4 个, 占该区域布设点位数量比例分别为 73.3%、42.1%、20.0%, 富集程度逐渐减弱。As 富集系数大于 2 的点位共 5 个, 主要位于大坡镇、三门坡镇、龙泉镇、演丰镇、灵山镇等乡镇。Hg、As 富集系数大于 1.2 的点位比例呈现城市中心区

明显高于城乡交错区和农村区的特点。

城市中心区、城乡交错区、农村区 Pb 富集系数大于 1.2 的点位数量分别为 7、8、4 个，占该区域布设点位数量比例分别为 46.7%、42.1%、20.0%。

Cr、Cu、Ni、Zn 富集系数大于 1.2 的点位相对一致，主要分布在大坡镇、红旗镇、龙泉镇、云龙镇、西秀镇、府城镇、演丰镇、灵山镇等乡镇。城市中心区、城乡交错区、农村区 Cr 富集系数大于 1.2 的点位数量占该区域布设点位数量比例分别为 26.7%、26.3%、10.0%，Cu 富集系数大于 1.2 的点位占比分别为 33.3%、21.1%、15.0%，Ni 富集系数大于 1.2 的点位占比分别为 33.3%、21.1%、20.0%，Zn 富集系数大于 1.2 的点位占比分别为 40.0%、21.1%、20.0%。总体上，城市中

心区 Cr、Cu、Ni、Zn 富集系数大于 1.2 的点位占比略高于城乡交错区、农村区。

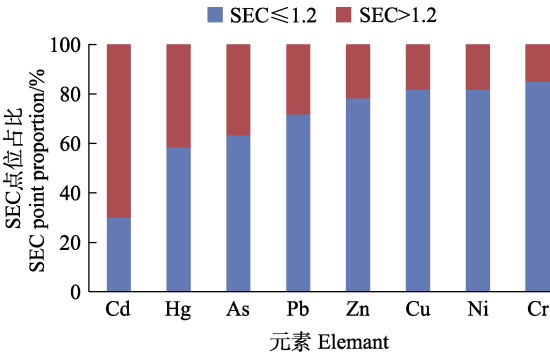


图 5 海口市土壤重金属不同富集系数点位占比
Fig. 5 Proportion of different enrichment coefficient points for heavy metals in soil of Haikou city

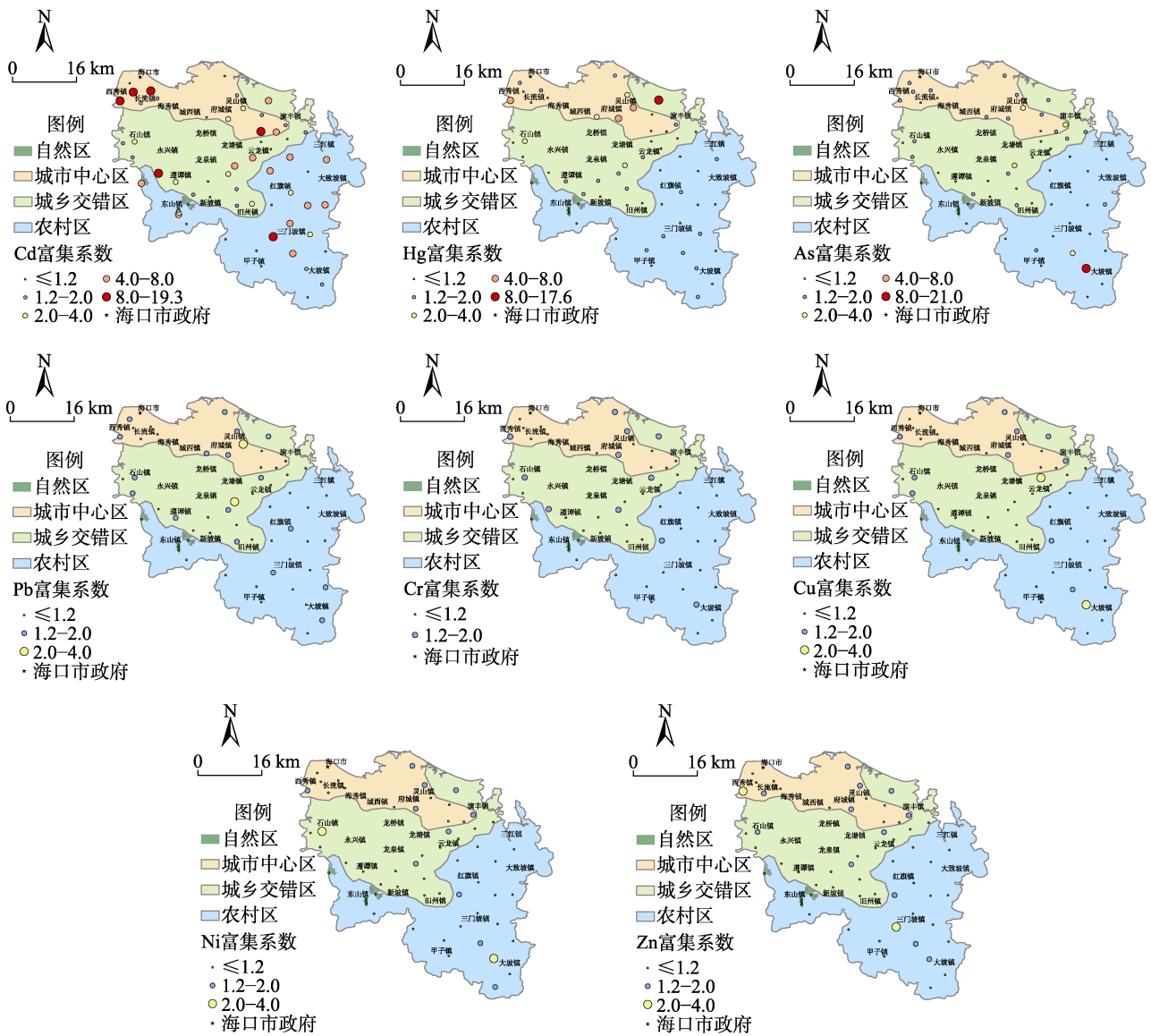


图 6 海口市土壤重金属富集系数空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of soil heavy metal enrichment coefficients in Haikou

3 讨论

海口市农用地土壤表层、中层、底层 3 层土壤 Cd、Hg、As、Pb、Zn 的含量均值低于 GB 15618—2018 中土壤污染最严风险筛选值, Cr、Cu、Ni 的含量均值超过农用地土壤污染最严风险筛选值, 是海口市主要土壤重金属污染因子。除中层的 Pb, 其他变异系数都属于强变异, 表层和中层的 Cd、As 呈现明显的空间变异性, 受区域土壤背景或人为因素等空间差异影响大。

海口农用地土壤剖面的垂直分布特征表现为 Cd、Hg 含量随土层深度的增加而减小, Cd 含量的变化趋势与窦韦强等^[17]的研究结果一致。Hg 含量的下降趋势主要反映了土壤长期发育过程中来自土壤底层的低浓度汞的混合和随径流的汞损失^[18]。Cd、Pb、Zn 含量平均值表层土壤大于深层土壤, 表明重金属存在不同程度的累积效应。

本研究土壤 pH 与 Cd 含量呈显著正相关, 说明土壤 pH 对 Cd 重金属富集程度影响较大。SOM 与 Hg、Cr、Cu、Zn、Ni 含量呈正相关, 表层、中层相关性强于底层, 表层土壤 SOM 对重金属富集有明显影响, 是重金属富集的主要因素。已有研究表明, 土壤有机质 (SOM) 含量的增加有助于土壤重金属的富集^[5]。土壤 Hg 浓度在很大程度上受有机质含量的影响, 土壤总 Hg 浓度与有机质之间存在显著正相关^[19]。Cr、Cu、Zn、Ni 共 4 项重金属含量强相关, 与郭跃品等^[20]、傅杨荣^[21]、李佳桐等^[22]的研究结果一致, Pb 与 Cu、Ni 重金属具有异源性。

各重金属富集系数大于 1.2 的点位数量占比从高到低为 Cd (70.0%)、Hg (41.7%)、As (36.7%)、Pb (28.3%)、Zn (21.7%)、Cu (18.3%)、Ni (18.3%)、Cr (15.0%)。分析海口市不同城乡环境梯度带分布情况发现, Cd 富集系数大于 1.2 的点位分布最广, 分布于城市中心区、城乡交错区、农村区、自然区 4 个城乡环境梯度带, Hg、As、Pb、Zn、Cu、Ni、Cr 共 7 个重金属富集系数大于 1.2 的点位在自然区没有分布, 位于城市中心区、城乡交错区、农村区等 3 个梯度带, 自然区人为活动少, 无工业企业生产干扰, 未呈现土壤重金属富集现象。

不同重金属富集系数分布结果表明, Cd、Hg、As 土壤重金属富集系数范围大, 个别点位富集程度较高, 可能受到较多外来人为活动影响。Cd 城市中心区富集系数大于 8 的点位数量远超城乡交错区和农村区。Hg 富集系数大于 2 的点位仅位于

城市中心区和城乡交错区。As 随着与城市中心区的距离增加, 在城市中心区、城乡交错区、农村区 3 个梯度带上富集程度明显逐渐减弱。

Cd 富集系数大于 1.2 的点位比例远超其他 7 个重金属, 城乡环境梯度的覆盖度最大, 区域性富集特点明显, 且有 18 个点位富集系数大于 4, 土壤富集程度较强, 应引起关注。Hg、As 富集系数大于 1.2 的点位比例呈现城市中心区明显高于城乡交错区和农村区的特点, Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 呈现城市中心区占比略高于城乡交错区、农村区的特点。海口市土壤重金属富集程度表现出一定的距离梯度变化特征, 即随着距离城市中心区距离的增加, 8 项土壤重金属富集程度呈逐渐下降的趋势, 自然区除 Cd 外, 其他 7 项重金属未发现富集点位。

本研究土壤重金属垂直迁移结果表明, Cd、Pb、Zn 含量平均值表层土壤大于深层土壤, 表明重金属存在不同程度的累积效应。不同环境梯度带土壤重金属富集结果显示, Cd、Hg、As、Pb 系数大于 1.2 的点位比例高于其他 4 项重金属。不少研究表明 Cr、Cu、Ni、Zn 主要来源于自然源, 受基性火山岩成土母质影响^[20-22], Cd、Hg、As、Pb 是主要受工业企业生产、交通出行、农业生产影响的重金属元素。研究表明, 大气中 Cd 的干湿沉降、农药化肥施用、塑料薄膜使用、污水灌溉、污泥施用、含重金属废弃物堆积、金属矿山废水排放等是造成 Cd 污染的主要途径^[23]。Cd 被土壤中的粘土矿物和有机物吸附或固定后, 富集于土壤表层, 或被植物吸收而转入土壤, 造成土壤镉浓度上升^[23]。汞污染主要来源于燃煤、水泥制造^[24]、有色金属冶炼^[25]、交通污染^[26]、垃圾场废旧电池、废旧荧光灯、废旧医疗器械和电子设备等堆放填埋^[27]。大气中的汞通过干湿沉降进入地表土壤, 被有机质吸附, 富集于土壤表层^[28]。As 作为农业活动标识元素, 化肥农药施用量多、利用率低也是造成 As 和 Cd 在土壤中的大量富集的重要原因^[29]。Pb 主要来源于含铅肥料和污泥施用、汽油添加剂使用、铅矿开采冶炼、含铅化合物工业企业污染物排放、铅蓄电池堆放等^[30]。Pb 常作为交通运输源的标志污染元素, 全致琦等^[31]研究证实, Cd 和 Pb 为交通源重金属。城市中心区、城乡交错区、农村区属于受自然和人为因素双重影响区域, 海口市的城市中心区布局了药谷工业园、海口综合保税区、海马工业园等园区,

涉及30个土壤重点行业企业,100多条城市一级道路及7条高速公路、省道、国道等主要交通干道,城市交错区布局了云龙产业园、美安科技新城、海口桂林洋经济开发区等园区,涉及1个土壤重点行业企业及7条高速公路、省道、国道等主要交通干道,农村区无工业园和土壤重点行业企业,涉及7条高速公路、省道、国道等主要交通干道。城市中心区工业生产、交通出行、居民生活等人为影响大于城市交错区、农村区、自然区。研究表明,海口市农用地土壤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^[32]。基于土壤Cd、Hg、As、Pb主要污染来源,发现海口市重金属富集特点与人类活动关系较大,而城市中心区高强度的人类活动是土壤重金属富集梯度变化的主导性因子。因此,在推进城市发展和工业、农业生产的同时,需要加强城市土壤环境管理,重点关注城市中心区土壤重金属富集变化,保障农产品安全生产,降低人体健康潜在风险。

参考文献

- [1] 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军.中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2020,41(6):2822-2833.
CHEN W X, LI Q, WANG Z, SUN Z J. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2822-2833. (in Chinese)
- [2] 陈同斌,李艳霞,金燕,刘树庆.城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响[J].生态学报,2002,22(5):643-648.
CHEN T B, LI Y X, JIN Y, LIU S Q. The effects of compound fertilizer made from municipal sewage sludge compost on NPK and heavy metals uptake of wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 643-648. (in Chinese)
- [3] 张小敏,张秀英,钟太洋,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)
- [4] 陈梓杰,肖唐付,刘意章,邢丹,杨军,朱正杰,宁增平.典型黑色岩系地质高背景区农田土壤-玉米系统重金属富集特征[J].生态学杂志,2021,40(8):2315-2323.
CHEN Z J, XIAO T F, LIU Y Z, XING D, YANG J, ZHU Z J, NING Z P. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and maize in a typical black shale area with high geochemical background[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2315-2323. (in Chinese)
- [5] 李建国,濮励杰,廖启林,朱明,刘丽丽,张丽芳,王琪琪,戴小清.无锡市土壤重金属富集的梯度效应与来源差异[J].地理科学,2014,34(4):497-504.
LI J G, PU L J, LIAO Q L, ZHU M, LIU L L, ZHANG L F, WANG Q Q, DAI X Q. The sources and gradient effect of soil heavy metal concentrations in Wuxi city[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(4): 497-504. (in Chinese)
- [6] 海口市地方史志办公室.海口年鉴[M].海口:南海出版公司,2022.
Office of Local Chronicles Compilation of Haikou City. Haikou yearbook[M]. Haikou: Nanhai Publishing Company, 2022. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国生态环境部.土壤pH的测定 电位法: HJ 962—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil-determination of pH-potentiometry: HJ 962—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第6部分 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing Part6 method for determination of soil organic matter: NY/T 1121.6—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国国家环境保护局.土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法: GB/T 17141—1997[S].北京:中国标准出版社,1997.
State environmental protection administration of the People's Republic of China. Soil quality-determination of lead, cadmium-graphite furnace atomic absorption spectrophotometry: GB/T 17141—1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国环境保护部.土壤和沉积物汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法: HJ 680—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil and sedimen-determination of mercury, arsenic, selenium, bismuth, antimony-microwave dissolution/atomic fluorescence spectrometry: HJ 680—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国环境保护部.土壤和沉积物 无机元素的测定 波长色散X射线荧光光谱法: HJ 780—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil and sedimen-determination of inorganic elements by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry: HJ 780—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)

- lic of China. Soil and sediment-determination of inorganic element-wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry: HJ 780—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 区域性土壤环境背景含量统计技术导则(试行): HJ 1185—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines on the statistics of regional environmental background concentration of soil: HJ 1185—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [13] 郭新蕾. 典型产地土壤环境因子影响稻米富集镉效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- GUO X L. Study on effects of soil environmental factors on the cadmium enrichment in rice from typical producing areas[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2019. (in Chinese)
- [14] 何玉生, 张固成, 薛桂澄, 郭跃品. 海南岛土壤地球化学手册[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.
- HE Y S, ZHANG G C, XUE G C, GUO Y P. Handbook of soil geochemistry in Hainan Island[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2021. (in Chinese)
- [15] 范俊楠, 贺小敏, 陆泗进, 李爱民, 宋国强. 湖北省重点行业企业周边土壤重金属污染现状及潜在生态危害评价[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(5): 74-80.
- FAN J N, HE X M, LU S J, LI A M, SONG G Q. Status of heavy metal pollution and potential ecological hazard asses in surrounding soil of enterprises in Hubei province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(5): 74-80. (in Chinese)
- [16] 王腾云, 周国华, 孙彬彬, 贺灵, 曾道明, 陈亚东, 叶荣. 福建沿海地区土壤稻谷重金属含量关系与影响因素研究[J]. 岩矿测试, 2016, 35(3): 295-301.
- WANG T Y, ZHOU G H, SUN B B, HE L, ZENG D M, CHEN Y D, YE R. The relationship between heavy metal contents of soil and rice in coastal areas, Fujian province, including influencing factors[J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(3): 295-301. (in Chinese)
- [17] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明. 农田土壤重金属垂直分布迁移特征及生态风险评价[J]. 环境工程, 2021, 39(2): 166-172.
- DOU W Q, AN Y, QIN L, LIN D S, DONG M M. Characteristics of vertical distribution and migration of heavy metalis in farmland soils and ecological risk assessment[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(2): 166-172. (in Chinese)
- [18] 刘楠涛. 基于汞同位素解析青藏高原表层土壤汞分布、来源及主控因素[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- LIU N T. Quantifying mercury distribution and source contribution in surface soil of Qinghai-Tibetan Plateau using mercury isotopes[D]. Chongqing: Southwest University, 2023. (in Chinese)
- [19] OBRIST D, JOHNSON D W, LINDBERG S E, LUO Y, HARARUK O, BRACHO R, BATTLES J J, DAIL D B, EDMONDS R L, MONSON R K, OLLINGER S V, PALLARDY S G, PREGITZER K S, TODD D E. Mercury distribution across 14 U.S. forests. Part I: spatial patterns of concentrations in biomass, litter, and soils[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(9): 3974-3981.
- [20] 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)
- [21] 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)
- [22] 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估[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)
- [23] 刘育红. 土壤镉污染的产生及治理方法[J]. 青海大学学报, 2006, 24(2): 75-79.
- LIU Y H. Produce and elimination of Cd pollution in soil[J]. Journal of Qinghai University, 2006, 24(2): 75-79. (in Chinese)
- [24] 蒋璇, 熊晶, 吴亦潇, 张维昊. 湖北省农田土壤重金属来源解析与质量评价[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(12): 211-217.
- JIANG X, XIONG J, WU Y X, ZHANG W H. Source apportionment and pollution characteristics of heavy metal in agricultural soil in Hubei province[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(12): 211-217. (in Chinese)
- [25] 李林, 周启星. 我国典型城市大气汞污染对人体健康的影响[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(5): 832-842.
- LI L, ZHOU Q X. Atmospheric mercury pollution in typical cities of China and its influences on human health[J]. Asian

- Journal of Ecotoxicology, 2014, 9(5): 832-842. (in Chinese)
- [26] 康玲芬, 李锋瑞, 张爱胜, 谈建安, 杨发旺, 黑文龙, 刘江斌. 交通污染对城市土壤和植物的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 556-562.
- KANG L F, LI F R, ZHANG A S, TAN J A, YANG F W, HEI W L, LIU J B. Effects of traffic pollution on urban soils and plants[J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 556-562. (in Chinese)
- [27] 李政, 滕柯延, 吴晗. 城市垃圾填埋场中汞污染的来源与趋势[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(增刊 1): 311-317.
- LI Z, TENG K Y, WU H. Mercury pollution from municipal landfills: resources and fate[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(Suppl. 1): 311-317. (in Chinese)
- [28] 王立辉, 邹正禹, 张翔宇, 赵盛开, 潘利祥. 土壤中汞的来源及土壤汞污染修复技术概述[J]. 现代化工, 2015, 35(5): 43-47.
- WANG L H, ZOU Z Y, ZHANG X Y, ZHAO S K, PAN L X. Review of sources of mercury in soil and remediation techniques for mercury contaminated soil[J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(5): 43-47. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 王思远, 杨树俊, 张贺, 孙东年, 刘耕苑. 土壤中铅污染来源及其危害综述[J]. 农业与技术, 2022, 42(9): 78-81.
- WANG S Y, YANG S J, ZHANG H, SUN D N, LIU G Y. A review of the sources and hazards of lead pollution in soil[J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(9): 78-81. (in Chinese)
- [31] 仝致琦, 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 310th national highway[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(12): 3030-3038. (in Chinese)
- [32] 吴姬, 伍成成, 王婧. 海口市农用地土壤重金属生态风险评估及源解析[J]. 热带作物学报, 2023, 44(5): 1062-1071.
- WU J, WU C C, WANG J. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in agricultural soil of Haikou city[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(5): 1062-1071. (in Chinese)