

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2020.01.08

广东揭阳土壤镉含量的空间分布特征及影响因素

王娟恒^{1,2}, 温汉辉³, 蔡立梅^{1,2,4}, 罗杰¹, 王硕^{1,2},
王秋爽^{1,2}, 穆桂珍¹, 蒋慧豪^{1,2}

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100;
3. 广东省有色金属地质局 940 队, 广东 清远 511500;
4. 中国科学院 广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 以广东省揭阳市土壤为研究对象, 采集了 1 330 个表层土壤(0~20 cm)样品和 331 个深层土壤(150~200 cm)样品, 通过 GIS 空间分析技术、半变异函数拟合和方差分析等方法对研究区土壤镉含量的富集特征、空间分布、结构特征以及影响因素进行了系统分析。结果表明, 研究区表层土壤镉含量的均值为 0.09 mg/kg, 高于该区土壤背景值, 但低于 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》的标准值。通过富集因子法研究表明, 研究区表层土壤镉主要为轻微污染和中度污染。从结构特征来看, 研究区表层土壤镉含量呈中等空间相关性。揭阳市表层土壤镉含量高值区主要分布在人类活动密集的东部和南部地区。土地利用类型、成土母质和土壤类型是影响表层土壤镉含量的重要因素, 在不同土地利用方式下, 建筑用地土壤镉含量最高; 不同成土母质中, 第四纪沉积物土壤镉含量显著高于其他母质; 不同土壤类型中, 水稻土的镉含量相对较高。

关键词: 土壤镉; 空间分布; 影响因素; 揭阳; 广东

中图分类号: P595; X142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2020)01-0088-09

Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Cadmium Content in Jieyang of Guangdong Province

WANG Juanheng^{1,2}, WEN Hanhui³, CAI Limei^{1,2,4}, LUO Jie¹, WANG Shuo^{1,2},
WANG Qiushuang^{1,2}, MU Guizhen¹, JIANG Huihao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources(Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430100, China;
2. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. No. 940 Branch of Geology Bureau for Nonferrous Metals of Guangdong Province, Qingyuan, Guangdong 511500, China; 4. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: In this paper, 1,330 topsoil (0–20 cm) samples and 331 deep soil (150–200 cm) samples were collected from Jieyang, Guangdong, China. The enrichment characteristics, spatial distribution, structural

收稿日期: 2019-03-21; **改回日期:** 2019-09-02; **责任编辑:** 楼亚儿。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41203061); 教育部油气资源勘探技术重点实验室开放基金项目(K2018-19); 湖北省自然科学基金项目(2015CFB603); 湖北省教育厅科学技术研究重点项目(D20161301); 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室开放基金项目(OGL-201408); 长江大学大学生创新创业训练项目(2016006, 2017223)。

作者简介: 王娟恒, 女, 硕士研究生, 1993 年出生, 地质工程专业, 主要从事环境地球化学研究。
Email: ml7863251960@163.com。

通信作者: 蔡立梅, 男, 副教授, 1980 年出生, 地球化学专业, 主要从事环境地球化学研究。
Email: clmktz88@yangtzeu.edu.cn。

引用格式: 王娟恒, 温汉辉, 蔡立梅, 等. 广东揭阳土壤镉含量的空间分布特征及影响因素[J]. 现代地质, 2020, 34(1): 88–96.

WANG Juanheng, WEN Hanhui, CAI Limei, et al. Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Cadmium Content in Jieyang of Guangdong Province [J]. Geoscience, 2020, 34(1): 88–96.

characteristics and influencing factors of soil cadmium content in the study area were systematically analyzed by the methods of enrichment factor, GIS spatial analysis, semi-variogram fitting and analysis of variance. The results showed that the average cadmium content in the topsoil was 0.09 mg/kg, which was higher than the soil background value of the area, but lower than "Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Farmland Soils (Trial) (GB 15618-2018)". According to the enrichment factor method, the cadmium content in topsoil of the study area was mainly slightly and moderately polluted. From the structural characteristics, the cadmium content in the topsoil of the study area was moderately spatially correlated. The high value areas of cadmium in topsoil of Jieyang City were mainly distributed in the eastern and southern areas where human activities were intensive. Land use types, soil parent materials and soil types were important factors affecting cadmium content in surface soil. Under different land use types, the cadmium content in construction land was the highest; In different parent materials, the cadmium content in the Quaternary sediments was significantly higher than other parent materials; In different soil types, the cadmium content in paddy soil was relatively high.

Key words: soil cadmium; spatial distribution; influencing factor; Jieyang city; Guangdong

0 引言

镉(Cd)是一种人体非必需的金属元素,自然界中镉常伴生在铅、锌等金属矿石中,这些矿石的开采、冶炼和加工均会引起伴生的镉进入土壤环境中^[1-3]。镉具有化学活性强、移动性大和毒性持久等特征,易通过植物进入生物体内,取代骨中钙,使骨骼严重软化,骨头寸断,还会引起胃脏功能失调,干扰生物体内锌蛋白酶活性,导致高血压发病率上升^[4-5]。20世纪60年代,日本富山县神通川流域的居民因长期食用“镉米”,导致200多人死亡,这种病被称为“骨痛病”^[6]。此次事件属于“国际八大公害”事件之一,并使镉污染成为一个世界性问题引起广泛关注^[7-9]。研究表明,我国土壤镉污染也非常严重,镉超标率达7.0%^[10]。我国许多学者不断致力于识别、解析和评估土壤镉的影响因素、来源及其生态效应。孙慧等^[11]对广东省土壤镉含量的影响因素进行分析,结果表明影响土壤镉含量和分布的主要因素有土壤类型、成土母质和土壤理化性质。郑袁明等^[12]根据不同土地利用类型对北京市土壤镉含量的特征进行探讨,结果表明不同土地利用方式对土壤镉含量和空间分布特征也有重要影响。近年来,由于“工业强市”战略实施、广东省产业结构调整 and 珠江三角洲地区产业转移等原因,揭阳地区社会经济发展迅速,在快速工业化和城镇化的同时,也给当地环境造成了一定污染^[13]。但到目前为止,针对该地区土壤镉污染特征、空间分布及影响因素的系统研究鲜见报道。鉴于此,本研

究以揭阳市多目标区域地球化学调查结果为基础,对揭阳市土壤镉含量的富集特征、空间分布、结构特征和影响因素进行研究,结果可为该地区土壤污染防治提供科学依据,也可为其他快速工业化、城市化地区土壤资源的持续利用和科学管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

揭阳市(115°36'~116°37'E, 22°53'~23°46'N)位于广东省东南部,潮汕平原西部。该市区域面积为5240 km²,现辖榕城区、揭东区、惠来县和揭西县,代管普宁市(县级)。该市属于亚热带季风气候,年平均气温21.4℃,平均降水量1723 mm,光照充足,降水丰沛,终年霜雪天气少。地势自西向东倾斜,低山高丘与谷地平原交错相间,分布不均,西北部和西南部多丘陵、山地,中部、南部和东南部是广阔肥沃的榕江冲积平原和滨海沉积平原。主要的河流有枫江、榕江和练江。区域内主要土地利用方式可分为林地及未利用地、农用地与建筑用地(图1a),分别占25.49%、26.32%和48.19%,耕种的作物以水稻为主;成土母质由花岗岩、凝灰岩、页岩、粉砂岩与第四纪沉积物组成,分别占53.61%、8.95%、0.75%、10.08%和26.61%(图1b);土壤类型以赤红壤和水稻土为主,北部丘陵和南部沿海地带分别有黄壤及风沙土分布(图1c)^[14]。揭阳市有较好的农村经济基础,是广东省重要的农业大市,亚热带作物丰富,有“竹笋之乡”、“青梅

之乡”、“青榄之乡”、“蕉柑之乡”和“荔枝之乡”的美称。近年来，揭阳市的重化工业也获得了长足的发展，形成了五金电镀、纺织服装、化工塑料和食品制药等支柱型产业。

1.2 样品采集与处理

本次研究采集了揭阳市表层土壤和深层土壤样品(图2)。表层土壤样品以1 km×1 km的方格

为采样单元采集方格中心土样,采样深度为0~20 cm,共采集了1 330个土壤样品,深层土壤样品以2 km×2 km的方格为采样单元采集方格中心土样,采样深度为150~200 cm,共采集了331个土壤样品。在水体中,采样点布置在距离水体最近的土地上;在农业区,采样点布置在农田、菜地、林地、草地以及山地丘陵等土层较厚地带,避开

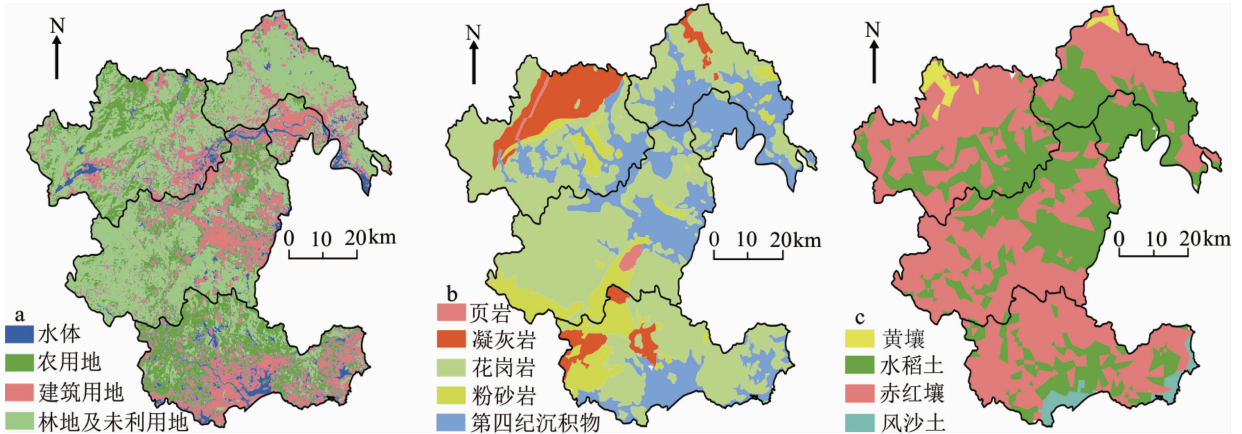


图1 研究区基本概况(a. 土地利用类型; b. 成土母质类型; c. 土壤类型)

Fig. 1 General situation of the study area (a. land using types; b. parent material types; c. soil types)

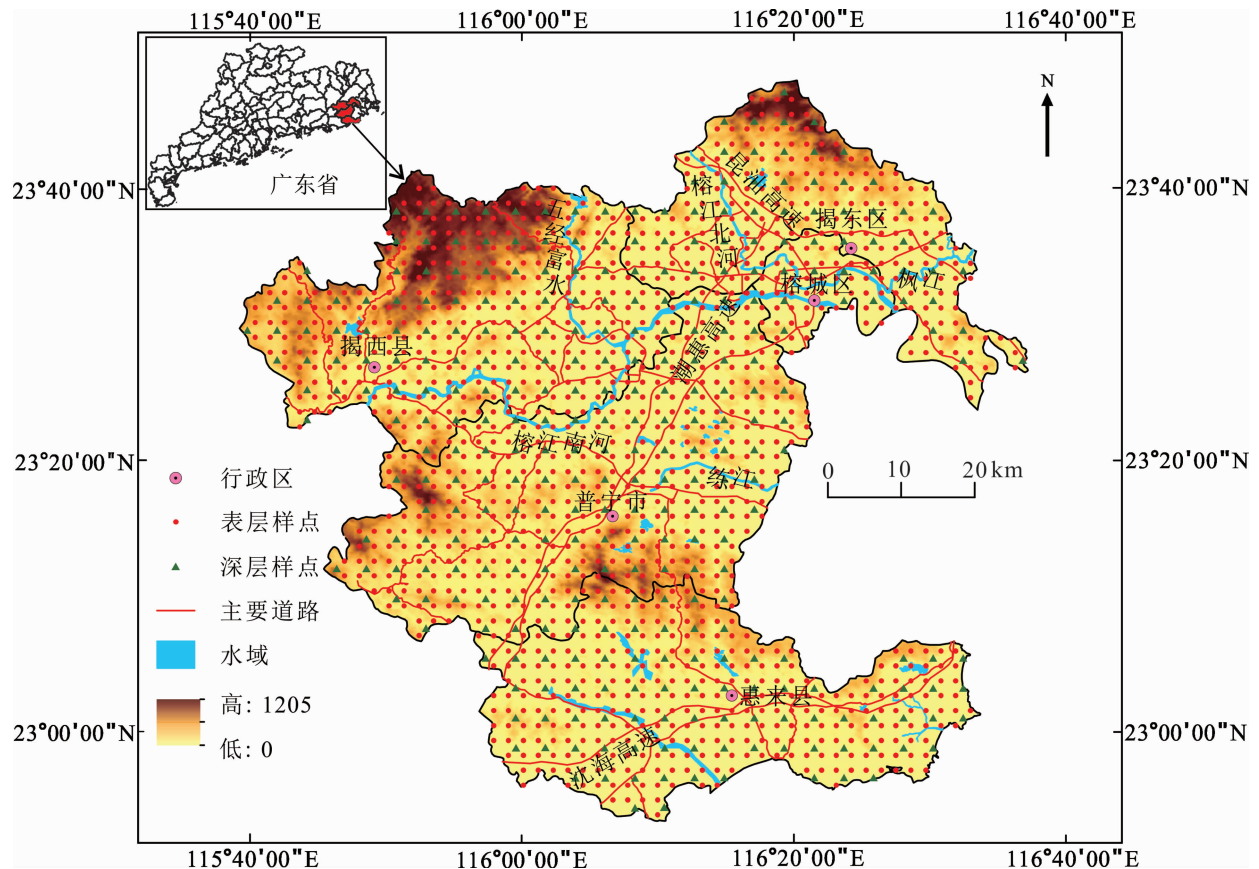


图2 研究区采样点分布图

Fig. 2 Map of the sampling sites in the study area

施肥期和田埂等; 在城镇地区, 采样点布置在堆积历史较长的公园和其他空旷地带, 避开明显点状污染地段、垃圾堆及新近堆积土。

土壤样品在实验室自然风干, 除去样品中的植物残留物和沙石, 用玛瑙研磨后过 20 目尼龙筛, 每个样品质量为 500 g, 装在塑料袋中, 送样测试。测试前先用美国环保署 (USEPA) 推荐的 $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消解法对土壤样品进行前期处理, 然后用石墨炉原子吸收光谱仪测定土壤镉含量^[15-16], 精密密度优于 2%, 准确度大于 99%。Ti 的含量经粉末压片 (称样量 4 g、硼酸镶边垫底), X 射线荧光光谱仪直接测定^[17], 精密密度优于 0.02%, 准确度大于 99%。分析过程中所用的试剂均为优级纯, 所用的水均为超纯水 (亚沸水)。上述实验过程中的重复率为 20%, 元素分析方法实际检出限、准确度、精密密度等各项质量指标达到或优于《多目标区域地球化学调查规范》(DD2005-01) 的要求^[18]。

1.3 数据处理

运用 SPSS 20.0 和 Microsoft Excel 对数据进行统计分析; 用 GS^+ 拟合出半变异函数模型, 并根据模型参数在 ArcGIS10.3 中绘制出空间分布图; 采用单因素方差分析法对不同成土母质、土壤类型和土地利用方式的土壤镉含量进行比较。

1.4 富集因子法

富集因子法是用来表示环境介质中元素富集程度、判断和评价元素来源的重要方法^[19]。为了减少采样制样过程中所产生的人为影响, 保证各指标间的可比性和等效性, 富集因子法以参比元素为参考标准, 对待测样品中的元素进行归一化、标准化处理^[20], 标准化元素通常选择化学性质稳定的元素, 如 Al、Ti、Fe、Sc 等^[21]。由于 Ti 在地壳中比较稳定且含量相对较高^[22], 故本文以 Ti 作为参比元素, 富集因子的计算公式如下^[23]:

$$EF = \frac{C_{\text{Cd}}/C_{\text{ref 表层}}}{B_{\text{Cd}}/B_{\text{ref 母质层}}}$$

式中: C_{Cd} 表示表层镉元素的测试含量; C_{ref} 表示表层参比元素的含量; B_{Cd} 表示母质层镉元素的含量; B_{ref} 表示母质层参比元素的含量。根据 EF 值的大小可以分为 6 个等级: $EF \leq 1$, 无污染; $1 < EF \leq 2$, 轻微污染; $2 < EF \leq 5$, 中度污染; $5 < EF \leq 20$, 显著污染; $20 < EF \leq 40$, 强烈污染; $EF > 40$, 极强污染。

2 结果与分析

2.1 镉含量的描述性统计

如图 3 所示, 揭阳市表层和深层土壤镉元素的数据均不符合正态分布, 经对数转换后符合正态分布, 故用几何均值表示揭阳市土壤镉含量的平均水平。揭阳市表层土壤镉含量的变幅为 0.01 ~ 1.90 mg/kg, 几何均值为 0.09 mg/kg, 低于《土壤环境质量标准农用地土壤污染管控风险标准》(GB 15618 — 2018) 中的 Cd 风险筛选值 (0.30 mg/kg)^[24], 但表层土壤镉含量的最大值 (1.90 mg/kg) 是其土壤环境质量标准风险筛选值的 6.3 倍, 暗示研究区局部地区的土壤可能受到强烈的外来干扰。深层土壤镉含量的范围为 0.01 ~ 1.70 mg/kg, 几何均值为 0.07 mg/kg, 将其作为揭阳市土壤镉含量的背景值。可以看出表层土壤镉的平均含量是该研究区土壤背景值的 1.29 倍, 说明镉元素在表层土壤中存在富集现象。

2.2 富集特征

本文以揭阳市土壤镉元素背景值 (深层土壤镉含量几何平均值) 作为参比值、Ti 作为参比元素, 对研究区表层土壤样品中镉元素的富集因子 (EF) 进行计算, 结果见表 1。研究区土壤镉富集系数的变幅为 0.09 ~ 17.93, 均值为 2.19, 变异系数为 92.12%, 属于中等变异程度^[25]。由表 1 可知, 研究区土壤受到不同程度的镉污染, 主要为轻微污染和中度污染, 分别占 32.98%、31.39%, 未污染占 28.88%, 少数地区存在显著污染, 占 6.75%, 无强烈污染和极强污染。由图 4 可知, 揭阳市显著污染的地区主要分布在榕城城区、月城镇和玉湖镇附近, 上述地区垃圾处理、填埋场、五金制造业以及纺织印染等高污染企业聚集, 它们排放的污染物质造成了土壤镉污染。结合图 2 可知, 在轻微污染和中度污染的地区交通干线分布密集, 其污染原因可能为汽车尾气排放及轮胎

表 1 揭阳市表层土壤镉污染状况

Table 1 Cd contamination status in topsoil of Jieyang city

等级	富集因子	污染程度	所占比例/ %
I	≤ 1	无污染	28.88
II	$> 1 \sim 2$	轻微污染	32.98
III	$> 2 \sim 5$	中度污染	31.39
IV	$> 5 \sim 20$	显著污染	6.75
V	$> 20 \sim 40$	强烈污染	0
VI	> 40	极强污染	0

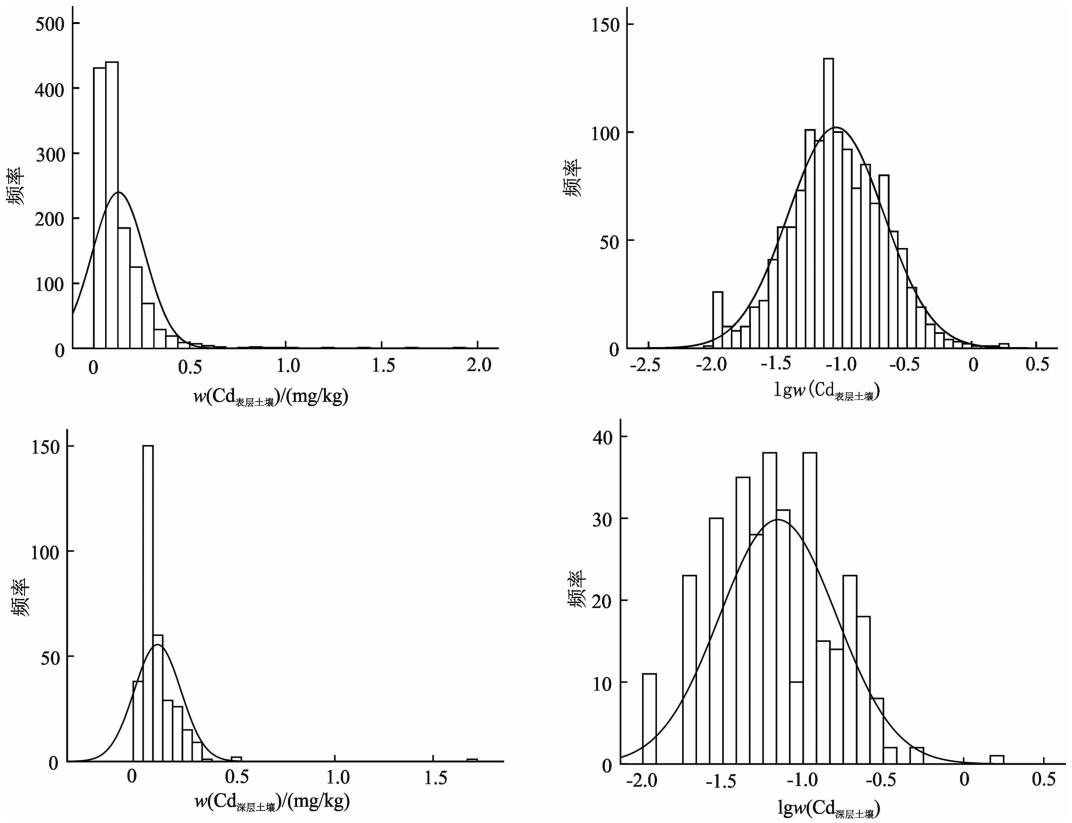


图3 土壤镉含量频率分布图

Fig. 3 Frequency distribution map of soil Cd content

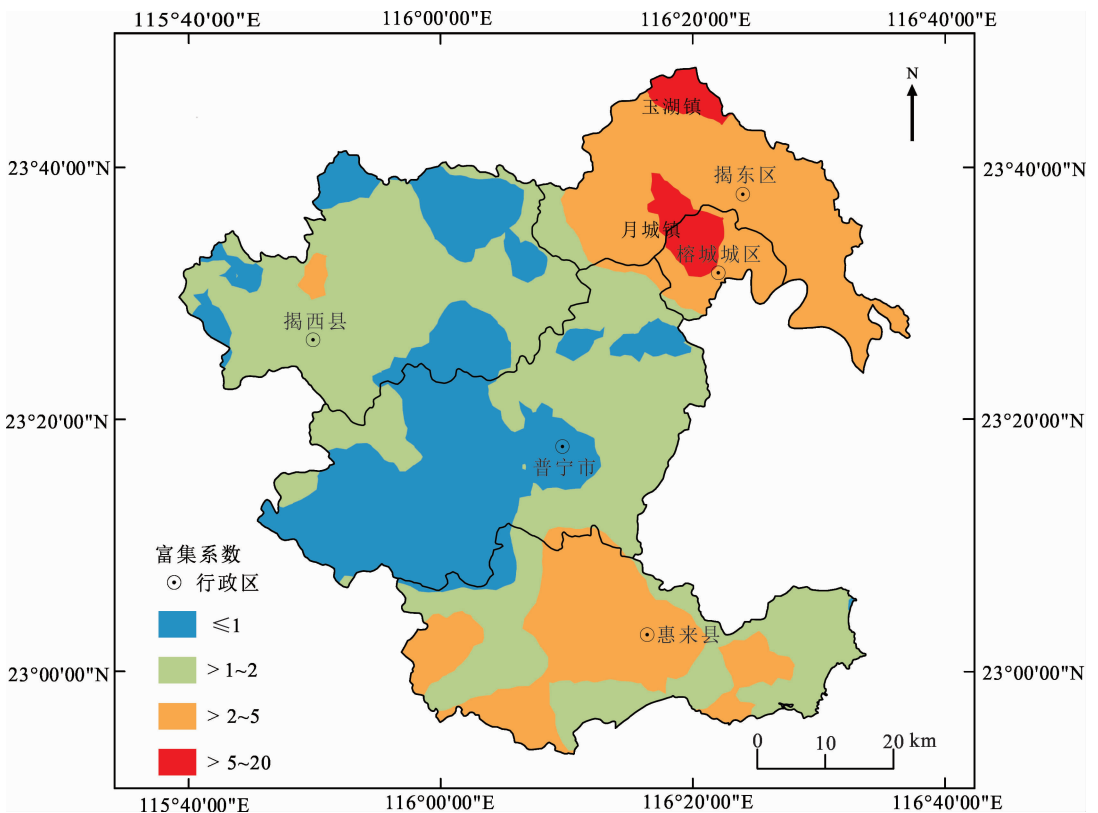


图4 富集系数空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of enrichment factors

磨损产生大量含镉有害气体和粉尘，经沉降作用进入土壤，造成道路附近土壤大面积污染^[26]；其次轻微污染和中度污染的地区工农业发达，人类活动集中连片，排放的含镉污染物进入土壤，造成片状污染。

2.3 镉含量的结构特征

半变异函数，亦称空间变差函数，是描述区域化变量随机性和结构性的基本手段，也是描述样本点变异值与样本点间距离的函数^[27]。数据的非正态分布会使变异函数产生比例效应，比例效应使实验变异函数产生畸变，改变甚至掩盖其固有的结构特征^[28]。揭阳市表层土壤镉含量数据经对数转换后符合正态分布，故消除了比例效应。研究计算了揭阳市表层土壤中镉含量的实验半变异函数，并根据其数据特点进行理论模型拟合，模型拟合理论参见文献^[29]，拟合参数见表2，理论变异函数用“指数模型”进行拟合效果最佳。从拟合结果(图5)可以看出，理论变异函数对于实验变异函数的拟合效果很好，决定系数 R^2 为0.98， R^2 的F检验达到显著。块金值(C_0)与基台值($C_0 + C$)之比表示随机因素引起的空间变异占系统总变异的比，该比例 $< 25\%$ 、 $25\% \sim 75\%$ 和 $> 75\%$ 依次表示空间自相关性强烈、中等和很弱^[30]。本研究区表层土壤Cd含量的块金值为0.01，基台值为0.02，块基比为50%，说明揭阳市土壤镉含量具有中等空间相关性，表明土壤中镉含量受地形、成土母质和土壤类型等结构性因

表2 土壤镉元素的半变异函数理论模型及相关参数

Table 2 Variogram fitting models of Cd in soil and related parameters

指标	模型	块金值	基台值	块基比/%	决定系数	残差
对应值	指数模型	0.01	0.02	50.00	0.98	2.67×10^{-6}

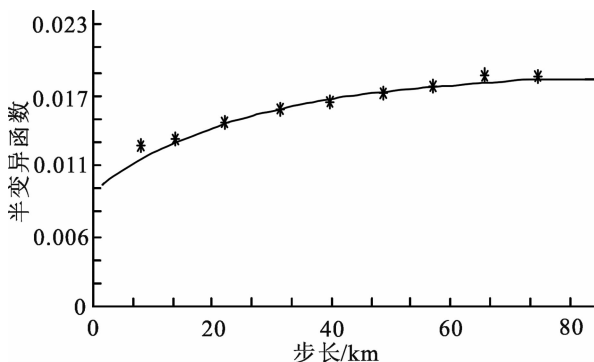


图5 土壤镉含量的半变异函数

Fig. 5 Semi-variation of Cd content in soil

素控制之外，也受到人类活动等随机因子的干扰。变程给出了随机变量在空间上自相关性的尺度，在变程范围内，土壤性质是空间非独立的^[31]。研究区土壤镉含量的实验半变异函数拟合所得的变程约为68.70 km，说明土壤中镉含量的空间相关性可达68.70 km左右，故揭阳市土壤中镉含量的空间相关性尺度较大。

2.4 土壤镉含量的空间分布特征

揭阳市土壤镉含量数据经对数转换后符合正态分布，运用GS+软件对土壤镉含量的变异函数进行拟合得到相关参数，并根据拟合参数对其进行普通克里金插值，得到土壤镉含量的空间分布图(图6)。由图6可知，表层土壤和深层土壤镉含量的空间分布特征大体一致，总体上呈自东北向西部地区递减的趋势，表明表层土壤镉含量一定程度上受到成土母质控制，但表层土壤镉含量显著高于深层土壤，说明研究区表层土壤镉含量可能也有人为活动输入。经分析，研究区表层土壤镉含量高值区主要分布在人类活动密集的东北和南部地区，如榕城城区、揭东城区、惠来县城区及葵潭镇附近。这些地区均集中了大量的五金制造业，此外，榕城区电镀企业密集，电镀过程中镉常被用作稳定剂，其残余部分经废水排入土壤^[32]。揭东区拥有发达的纺织印染业和制衣业，镉作为染料成分随废水排出易污染土壤^[33]。表层土壤镉含量低值区主要分布在研究区中西部地区，如普宁市的高埔镇、梅林镇、云落镇以及洪阳镇附近，这些区域社会经济开发较晚，母质层镉含量也较低(图6)。

2.5 土壤镉含量的影响因素

2.5.1 土地利用类型的影响

方差分析结果表明(表3)，土壤镉含量在不同土地利用类型中存在显著性差异($p < 0.05$)，且表层土壤和深层土壤镉平均含量在不同土地利用类型中表现一致，具体表现为建筑用地 $>$ 林地及未利用地 $>$ 农用地。农用地表层土壤镉含量的均值与该研究区土壤背景值(0.07 mg/kg)持平，略高于农用地深层土壤镉的平均含量(0.06 mg/kg)，表明农用地土壤镉含量低可能主要受成土母质影响。林地及未利用地表层土壤镉含量的均值高于该研究区土壤背景值，主要是因为林地及未利用地土壤成土母质镉含量(均值0.09 mg/kg)较高。建筑用地表层土壤镉含量均值高于研究区土壤背景值，而影响建筑用地中土壤镉含量的因素比较

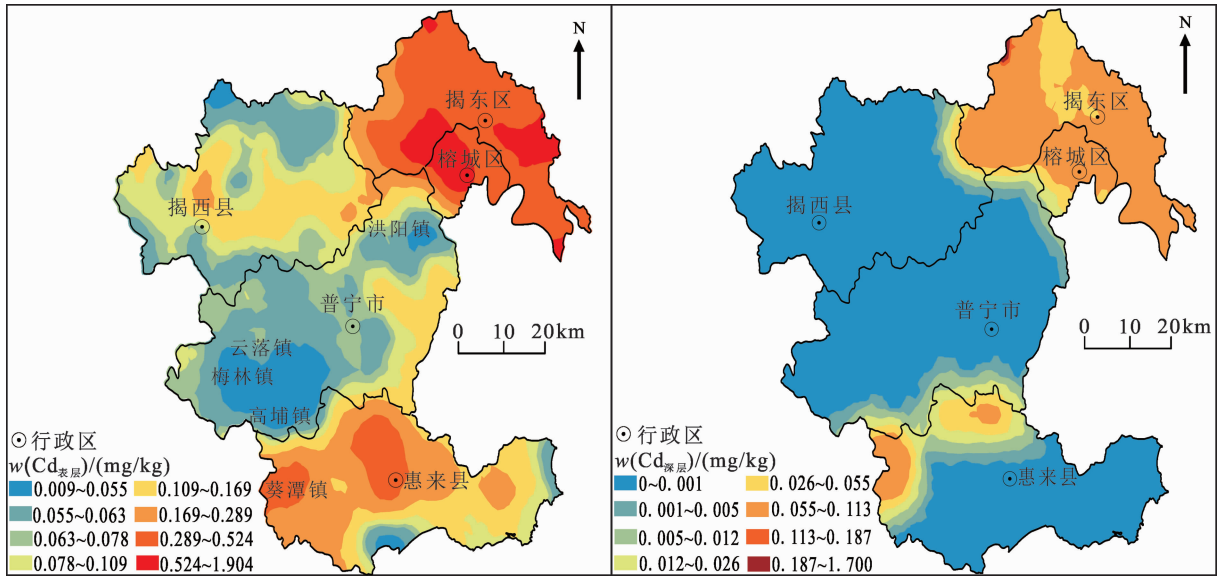


图6 研究区土壤镉含量空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution map of Cd contents in soil in the study area

表3 不同土地利用方式、母质类型及土壤类型下土壤镉含量

Table 3 Concentration of Cd in different land using types, parent materials and soil types

类型	表层土壤			深层土壤		
	样品数	镉含量/(mg/kg)	变幅/(mg/kg)	样品数	镉含量/(mg/kg)	变幅/(mg/kg)
农用地	339	0.07 c	0.01 ~ 0.36	71	0.06 c	0.01 ~ 0.51
建筑用地	350	0.10 a	0.01 ~ 1.90	93	0.08 a	0.01 ~ 0.51
林地及未利用地	641	0.09 b	0.01 ~ 1.39	167	0.09 b	0.01 ~ 1.70
第四纪沉积物	354	0.13 b	0.01 ~ 1.39	86	0.09 a	0.01 ~ 1.70
粉砂岩	134	0.08 a	0.01 ~ 0.46	36	0.07 b	0.01 ~ 0.29
页岩	10	0.09 a	0.04 ~ 0.36	4	0.06 b	0.02 ~ 0.22
凝灰岩	119	0.09 a	0.01 ~ 0.55	34	0.06 b	0.01 ~ 0.31
花岗岩	713	0.08 a	0.01 ~ 1.90	171	0.05 b	0.01 ~ 0.51
风沙土	26	0.04 b	0.01 ~ 0.15	8	0.03 b	0.01 ~ 0.07
赤红壤	813	0.08 b	0.01 ~ 0.99	199	0.06 b	0.01 ~ 0.51
水稻土	471	0.11 a	0.01 ~ 1.90	121	0.12 a	0.01 ~ 1.70
黄壤	20	0.08 b	0.01 ~ 0.36	3	0.03 b	0.01 ~ 0.22

注：在 $p < 0.05$ 条件下，将平均值从大到小排列，均值最大的标为 a，其余均值与最大的均值相比，不存在显著性差异则均标为 a，若存在显著差异，则将其标为 b，其余依次类推标注不同的字母。

复杂，其中工矿区发达的五金制造业、电镀业和纺织印染业产生的废水、废气和生产生活垃圾的堆放与填埋，以及较高的成土母质镉含量，可能是导致研究区建筑用地土壤中镉含量较高的主要因素。

2.5.2 成土母质的影响

方差分析可知(表3)，第四纪沉积物与其他母质间表层及深层土壤镉含量均存在显著性差异($p < 0.05$)，各母质中表层土壤镉平均含量由高到低依次为：第四纪沉积物 > 凝灰岩 = 页岩 > 粉砂

岩 = 花岗岩，各母质中深层土壤镉平均含量由高到低依次为：第四纪沉积物 > 粉砂岩 > 凝灰岩 = 页岩 > 花岗岩，不同母质的表层土壤与深层土壤镉含量状况基本吻合，表明表层土壤镉含量主要受成土母质的控制。第四纪沉积物发育的表层土壤镉含量最高(均值 0.13 mg/kg)，除了由于成土母质镉含量最高之外，还受人为活动的影响，通过分析发现，研究区第四纪沉积物主要分布在地势低平、水源充足的平原地区，如榕城城区、惠来城区和揭东城区，人类活动集中。所以揭阳市

第四纪沉积物表层土壤镉含量高可能是成土母质和人为活动叠加的结果。

2.5.3 土壤类型的影响

对不同土壤类型镉含量进行方差分析(表3), 结果表明研究区水稻土与其他土壤类型呈显著性差异($p < 0.05$)。表层土壤与深层土壤镉含量特征在不同土壤类型中表现基本一致, 具体表现为: 表层土壤: 水稻土 > 赤红壤 = 黄壤 > 风沙土; 深层土壤: 水稻土 > 赤红壤 > 黄壤 = 风沙土。表层土壤中水稻土镉的平均含量最高, 为 0.11 mg/kg, 而水稻土深层土壤镉的平均含量为 0.12 mg/kg, 深层土壤镉平均含量高于表层, 这说明揭阳市表层水稻土镉含量可能主要受成土母质控制。表层土壤中黄壤和赤红壤的镉含量次之, 这可能与黄壤和赤红壤是由花岗岩和泥质砂岩发育而成, 有机质含量高且质地黏重有关, 有利于镉吸附于土壤, 故土壤镉含量较高。风沙土发育于风成沙性母质的土壤, 土壤矿质部分几乎全由细沙颗粒组成, 其黏粒和有机质含量较低, 不利于土壤中镉的吸附, 故风沙土中镉含量最低。

3 结论

揭阳市表层土壤镉含量的变幅为 0.01 ~ 1.90 mg/kg, 均值为 0.09 mg/kg, 低于《土壤环境质量标准农用地土壤污染管控风险标准 GB 15618—2018》的筛选值, 但高于研究区土壤背景值。富集因子计算结果表明, 研究区以轻微污染和中度污染为主, 少数地区存在显著污染, 无强烈污染和极强污染。由半变异函数可知, 揭阳市表层土壤镉含量呈中等空间相关性。研究区土壤镉含量高值区主要分布在东北和南部地区, 低值区主要分布在中西部地区。表层土壤镉含量与土地利用类型、成土母质和土壤类型密切相关, 具体表现为, 土地利用类型中土壤表层镉含量的均值从高到低依次为: 建筑用地 > 未利用地 > 农业用地; 成土母质中, 第四纪沉积物土壤表层镉含量最高, 其余依次为凝灰岩、砂岩、页岩和花岗岩; 各土壤类型中, 水稻土表层镉含量显著高于赤红壤、黄壤和风沙土。

参考文献:

[1] BI X Y, FENG X B, YANG Y G, et al. Quantitative assessment of cadmium emission from zinc smelting and its influences on the surface soils and mosses in Hezhang County, southwestern China

[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(12): 4228–4233.

[2] 金立新, 侯青叶, 包雨函, 等. 德阳镉污染农田区生态安全性及居民健康风险评估[J]. *现代地质*, 2008, 22(6): 984–989.

[3] LIANG J, FENG C T, ZENG G M, et al. Atmospheric deposition of mercury and cadmium impacts on topsoil in a typical coal mine city, Lianyuan, China [J]. *Chemosphere*, 2017, 189(12): 198–205.

[4] 郭笃发. 环境中铅和镉的来源及其对人和动物的危害[J]. *环境科学进展*, 1994, 2(3): 71–76.

[5] 刘旭, 顾秋菡, 杨琼, 等. 广西象州与横县碳酸盐岩分布区土壤中 Cd 形态分布特征及影响因素[J]. *现代地质*, 2017, 31(2): 374–385.

[6] NISHIJO M, NAKAGAWA H, SUWAZONO Y, et al. Causes of death in patients with Itai-itai disease suffering from severe chronic cadmium poisoning: a nested case-control analysis of a follow-up study in Japan [J]. *BMJ Open*, 2017, 7(7): 1–7.

[7] YAMAGAMIA T, EZAKIB T, MORIGUCHI J. Low-level cadmium exposure in Toyama City and its surroundings in Toyama prefecture, Japan, with references to possible contribution of shellfish intake to increase urinary cadmium levels [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 362(1): 56–67.

[8] VEGA F A, MATIAS J M, ANDRADE M L, et al. Classification and regression trees (carts) for modelling the sorption and retention of heavy metals by soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(13): 615–624.

[9] MAMAT Z, YIMIT H, JI R Z A, et al. Source identification and hazardous risk delineation of heavy metal contamination in Yanqi basin, northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493(3): 1098–1111.

[10] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防控策略[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30(4): 477–483.

[11] 孙慧, 毕如田, 袁宇志, 等. 广东省土壤镉含量影响因子解析与评估[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(11): 4173–4183.

[12] 郑袁明, 罗金发, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征[J]. *地理研究*, 2005, 24(4): 542–548.

[13] 江东鹏, 张宝春. 粤东揭阳市环境污染控制对策研究[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(10): 43–45.

[14] 罗杰. 广东省韩江三角洲土壤污染源辨析及其环境承载力[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2016: 1–166.

[15] 胡秀芳. 湿法消解-石墨炉原子吸收光谱法在土壤镉测定中的应用[J]. *中国标准化*, 2018(S1): 181–184, 196.

[16] 姚朝英, 任兰. 石墨炉原子吸收法测定土壤中镉的测量不确定度评定[J]. *化学分析计量*, 2007, 16(1): 11–13.

[17] 田瑜. 粉末压片制样 X 射线荧光光谱法测定土壤中的几种重金属[J]. *安阳工学院学报*, 2018, 17(6): 24–27.

[18] 中国地质调查局. 多目标区域地球化学调查规范(DD2005-01)[EB/OL]. (2005-10-01)[2019-03-10]. <http://www.doc88.com/p-5495876006057.html>.

[19] 范晓婷, 蒋艳雪, 崔斌, 等. 富集因子法中参比元素的选取方法: 以元江底泥中重金属污染评价为例[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10): 3795–3803.

- [20] 胡恭任, 于瑞莲. 应用地积累指数法和富集因子法评价 324 国道塘头段两侧土壤的重金属污染 [J]. 中国矿业, 2008, 17(4): 47 - 51.
- [21] BERGAMASEHI L, RIZZIO E, VALCUVIA M G. Determination of trace elements and evaluation of their enrichment factors in Himalayan lichens [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 120(1): 137 - 144.
- [22] FANG G C, WU Y S, CHANG S Y, et al. Size distributions of ambient air particles and enrichment factor analyses of metallic elements at Taichung Harbor near the Taiwan Strait [J]. *Atmospheric Research*, 2006, 81(4): 320 - 333.
- [23] JIANG Y X, CHAO S H, LIU J W, et al. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China [J]. *Chemosphere*, 2017, 168(12): 1658 - 1668.
- [24] 鄯建荣. 两项土壤污染防治新标准发布 [J]. 湖南农业, 2018(10): 11.
- [25] ZHANG S W, SHEN C Y, CHEN X Y, et al. Spatial interpolation of soil texture using compositional Kriging and regression Kriging with consideration of the characteristics of compositional data and environment variables [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(9): 1673 - 1683.
- [26] 全致琦, 段海静, 阮心玲, 等. 路旁土壤公路源重金属含量空间分布数值模型的探讨 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 996 - 1002.
- [27] 靳诚, 陆玉麒. 基于县域单元的江苏省经济空间格局演化 [J]. 地理学报, 2009, 64(6): 713 - 724.
- [28] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 珠江三角洲典型区农业土壤镍的空间结构及分布特征 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(4): 100 - 104.
- [29] 舒彦军, 张立亭. 求解半变异函数的常用方法与新方法研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(5): 24 - 27.
- [30] 姚荣江, 杨劲松, 刘光明. 土壤盐分和含水量的空间变异性及其 CoKriging 估值: 以黄河三角洲地区典型地块为例 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 133 - 138.
- [31] 张庆利, 史学正, 黄标, 等. 南京城郊蔬菜基地土壤有效态铅、锌、铜和镉的空间分异及其驱动因子研究 [J]. 土壤, 2005, 37(1): 41 - 47.
- [32] 刘强, 林乃明, 沙春鹏, 等. 钢铁材料电镀镉的研究现状 [J]. 表面技术, 2017, 46(1): 146 - 157.
- [33] 刘丽萍, 乙小娟, 杨雪芬. 合成染料中金属元素的 ICP 测定结果分析 [J]. 预防医学情报杂志, 2001, 17(2): 96 - 97.