

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.05.010

王涵植, 温汉辉, 蔡立梅, 等. 广东省揭阳市土壤铬的空间结构及分布特征研究. 土壤, 2020, 52(5): 941–947.

广东省揭阳市土壤铬的空间结构及分布特征研究^①

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

(1 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100; 2 长江大学资源与环境学院, 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, 广州 510640)

摘要: 开展对广东省揭阳市土壤 Cr 的调查研究, 系统采集了表层(0~20 cm)土壤样 1 330 个和深层(>150 cm)土壤样 331 个, 测定表层和深层土壤 Cr 含量, 并据此研究该地区 Cr 的空间结构及分布特征。利用富集因子法分析了 Cr 的污染状况, 结合 Geoda、GS+ 等软件分析了 Cr 的结构特征、Moran 指数与空间集聚效应, 采用 GIS 空间分析技术和方差分析对 Cr 的空间含量分布以及影响因素进行了研究。结果表明, 揭阳市土壤 Cr 不存在明显的污染状况, 表层土壤平均 Cr 含量为 22.39 mg/kg, 低于揭阳市土壤背景值 27.88 mg/kg, 远低于广东省土壤背景值 50.50 mg/kg。富集因子表明研究区土壤 Cr 富集程度多为无富集和轻微富集, 分别占到 75.11% 和 23.46%; Moran 指数值为 0.52, 表明研究区有正相关集聚, “热点”主要分布在榕城区及揭东区的东南部、揭西县的中南部、惠来县的北部以及西南部, “冰点”主要分布在揭西县的西南部以及惠来县南边沿海地区, 这与 Cr 含量的空间分布特征基本一致。土壤 Cr 主要受到成土母质的影响, 成土母质为粉砂岩和页岩中的 Cr 含量较高, 沙性母质中的 Cr 含量较低; 不同土壤类型中水稻土 Cr 含量较高, 风沙土含量较低; 不同土地利用方式下的 Cr 含量差异不明显, Cr 含量并未受到人为活动的明显影响。

关键词: 土壤铬; 空间结构; 分布特征; 影响因素; 揭阳市

中图分类号: X825 **文献标志码:** A

Spatial Structure and Distribution of Soil Chromium in Jieyang City, Guangdong Province

WANG Hanzhi^{1,2}, WEN Hanhui³, CAI Limei^{1,2,4*}, LUO Jie^{1,2}, MU Guizhen^{1,2}, WANG Qiushuang^{1,2}, JIANG Huihao^{1,2}, WANG Shuo^{1,2}

(1 Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Ministry of Education, Wuhan 430100, China; 2 College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3 Non-ferrous Metals Geological Bureau 940 Team, Guangdong Province, Qingyuan, Guangdong 511500, China; 4 Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A systematic investigation of soil chromium (Cr) in Jieyang City of Guangdong Province was carried out, 1 330 surface soil samples and 331 deep soil samples were collected, the content, spatial structure and distribution Cr were measured and analyzed, Cr pollution status was analyzed using enrichment factor method, structural characteristics, Moran index and spatial agglomeration effect of Cr were analyzed by software such as Geoda and GS+, and spatial distribution and influence factors of Cr were analyzed by GIS and variance analysis. The results showed that there was no obvious soil Cr pollution in the studied area, the average Cr content of surface soil was 22.39 mg/kg, which was lower than the background value of 27.88 mg/kg in Jieyang City, and much lower than the background value of 50.50 mg/kg in Guangdong Province. Cr accumulation in the studied area was mostly non-accumulation and slight accumulation, accounting for 75.11% and 23.46%, respectively. Moran index was 0.52, indicating that the studied area had positive correlation aggregations. The “hot spots” were mainly distributed in the southeastern part of Rongcheng and Jiedong districts, the south-central part of Jiexi County, the north and southwest of Huilai County; the “ice spots” were mainly distributed in the southwest of Jiexi County and the coastal area south of Huilai County, which were basically consistent with the spatial distribution of Cr content. Soil Cr was mainly affected by the parent material, higher Cr in siltstone and

①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)、有机地球化学国家重点实验室开放基金项目(OGL-201408)和长江大学大学生创新创业训练项目(2016006,2017223)资助。

* 通讯作者(cimktz88@yangtzeu.edu.cn)

作者简介: 王涵植(1995—), 男, 湖北鄂州人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学。E-mail: cjdwxhz@163.com

shale but lower in sandy parent material. Cr content in paddy soil was higher than other soil types, and lower in sandy soil, but no obvious difference between different land use types, and human activities affected Cr content insignificantly.

Key words: Soil Cr; Spatial structure; Distribution characteristics; Influencing factor; Jieyang City

土壤是 Cr 进入生物地球化学营养链的重要媒介, Cr 可以通过农作物吸收, 经食物链进入人体, 对人体造成直接或潜在危害^[1]。土壤中 Cr 含量异常引起农作物生长不良、生态变异和产量下降^[2], 在土壤环境中一般以三价和六价两种形态存在, 其危害程度因化合价的差异而明显不同, 后者有明显的致癌致畸作用, 同时 Cr 也是动物和人体所必需微量元素, 缺 Cr 会出现糖耐量受损, 甚至导致糖尿病、动脉粥样硬化和高血压等疾病^[3-4]。有研究表明, 土壤中 Cr 的浓度和空间变化主要受到成土母质的影响^[5-6], 但并不是唯一的因素, 冶炼厂和金属加工(例如电镀)以及农业活动中施用磷肥等人类活动会导致周围环境的 Cr 浓度增高^[7-8]。

地统计学在研究土壤中元素空间分布规律上得到了广泛的使用。如武婕等^[9]利用地统计学对山东省土壤有机质和微量元素进行空间分析时, 发现在微量元素中, 除 B 不受影响外, Fe、Mn、Cu 和 Zn 与土壤类型、耕层质地、坡度、土地利用类型和地貌类型密切相关; 何博等^[10]利用地统计学对典型城市化地区土壤 8 种重金属进行空间插值并探讨其生态风险分布, 发现重金属超标地区集中在研究区北部。局部 Moran's I 是一种在鉴定土壤重金属热点、空间自相关分析方面的有用工具, 对探索重金属的迁移过程以及影响因素有一定的帮助。揭阳是广东省发展速度最快的城市之一, 成为粤东地区新的经济发展极, 但经济发展的同时, 重化、五金、印染纺织等高污染企业所产生的“三废”经过沉降、风化和淋溶进入土壤^[11], 具有一定的环境风险, 因此, 对土壤中 Cr 含量的空间结构和分布特征的研究已成为当代土壤污染的研究热点之一。本文以揭阳市为研究区域, 利用地统计学方法以及空间自相关分析技术, 系统地研究该地区土壤 Cr 的结构特点和空间分布规律, 为揭示该地区土壤 Cr 的富集特征、空间分布特征及影响因素, 进一步评价该区土壤环境质量提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于广东省东南部, 陆地面积 5 240.5 km²。境内属亚热带季风性湿润气候, 光照充足, 降水充沛。年均气温 21.4 °C, 年平均降雨量 1 723 mm。研究区

成土母质主要由花岗岩、粉砂岩和第四纪沉积物组成, 且以花岗岩及第四纪沉积物为主。土壤类型以赤红壤和水稻土为主, 北部丘陵和南部沿海地区分布有少量黄壤和风沙土。土地利用方式可分为林地及未利用地、建筑用地和农耕地, 农作物以水稻为主, 是广东省重要的农业大市。

1.2 样品采集与分析

表层样品按照 1 km × 1 km 的网格单元进行布设采样, 采样深度为 0 ~ 20 cm, 1 个样品由主采样点周围 100 m 范围内 3 ~ 5 处多点采集组合。深层样品按照 2 km × 2 km 的网格单元进行布设采样, 低山丘陵土层较薄地区, 适当放稀, 但保证采样大格(4 km × 4 km)有样点分布, 采样深度为 150 ~ 200 cm, 人工填土地区加大采样深度或移动点位。共采集表层土壤组合样 1 330 个, 深层母质土壤组合样 331 个(图 1)。在农业地区, 采样点布设在农田、菜地等土层较厚地带, 在城镇地区, 采样位置选择在公园、林地等堆积历史较长的区域。避开有明显点状污染地段, 表层土壤采样点离主干公路、铁路 100 m 以外, 且采样时间避开施肥期。土壤样品自然风干, 除去杂物, 研磨后过 20 目尼龙筛, 装入样品袋后送样测试分析。

分析过程严格按照《多目标区域地球化学调查规范》(DD2005-1)的要求进行, 土壤 Cr 含量采用 X 射线荧光光谱仪(S4 PIONEER), 经粉末压片(称样 4 g、硼酸镶边垫底)直接测定, 采用离子选择性电极法(ISE)测定土壤 pH, 有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定。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)。试验过程中每 50 个样品加入 1 个空白样、4 个土壤标准样品(GSS-1)和两个重复样进行质量控制, 以确保精度和准确性。

1.3 富集因子法

富集因子法是评价人类活动对土壤元素富集影响的重要参数^[13], 其中参比元素应选用在地壳中稳定存在且含量相对较高的元素^[14-16], 本文采用 Ti 作为参比元素。富集因子的计算公式为:

$$EF = \frac{(C_{Cr} / C_{ref})_{\text{实测}}}{(B_{Cr} / B_{ref})_{\text{背景}}} \quad (1)$$

式中: C_{Cr} 表示 Cr 的实测浓度(mg/kg); C_{ref} 表示参比元素的实测浓度(mg/kg); B_{Cr} 表示 Cr 的背景浓度(mg/kg); B_{ref} 表示参比元素的背景浓度(mg/kg)。在

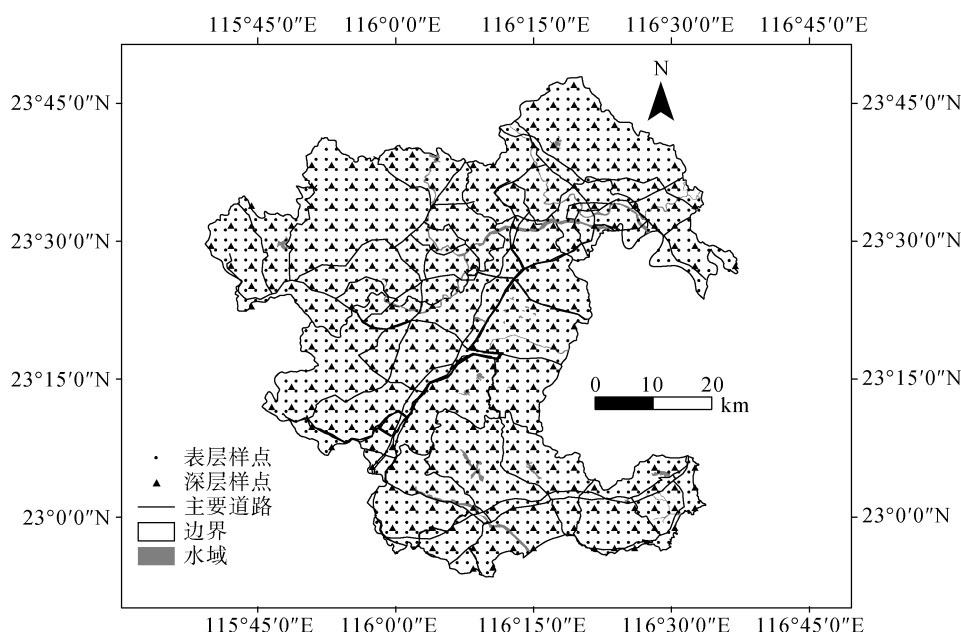


图 1 研究区采样点分布图
Fig.1 Sampling sites in studied area

此运用 Sutherland^[17]提出的分类方法将污染元素按不同等级划分： $EF \leq 1$ ，无富集； $1 < EF \leq 2$ ，轻微富集； $2 < EF \leq 5$ ，中度富集； $5 < EF \leq 20$ ，显著富集； $20 < EF \leq 40$ ，强烈富集； $EF > 40$ ，极强富集。

1.4 局部莫兰指数法

局部 Moran's I 是一种常用的检验变量局部空间相关性的重要参数，Moran's I 可用如下公式进行计算：

$$I_i = \frac{z_i - \bar{z}}{\sigma^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n [w_{ij}(z_j - \bar{z})] \quad (2)$$

式中： z_i 是变量在 i 点的值； \bar{z} 表示 n 个 z 值的均值； z_j 表示变量 z 在其他所有样点的值($j \neq i$)； σ^2 是变量 z 的方差； w_{ij} 表示权重，定义为样点 i 与样点 j 之间距离的倒数^[1]。本文以距离尺度设计权重，通过 Geoda 软件绘制局部 Moran 散点图，加权计算得到 Moran's I = 0.52。Moran's I 的取值范围在 $[-1, 1]$ 之间，若为正，则存在正相关，即存在空间集聚性样点，空间集聚性包括高-高值和低-低值集聚，在土壤重金属分析中，高-高值称为“区域性热点”，低-低值称为“区域性冰点”；若为负，则存在负相关；若为 0，则空间单元服从随机分布^[20]。

1.5 数据处理

描述性统计、Box-Cox 转换、Pearson 相关分析和回归分析等借助 SPSS 20.0、Minitab 软件进行统计分析；半变异函数图、局部 Moran's I、含量分布图用 GS+、Geoda、ArcGIS 10.2 软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 Cr 含量的统计性描述

揭阳市表层土壤 Cr 含量的描述性统计结果如表 1 所示。Cr 含量变化范围 1.40 ~ 301.90 mg/kg，由于表层土壤 Cr 含量符合对数正态分布，可用几何均值表示其平均值，为 22.40 mg/kg。揭阳市面积仅占广东省面积 2.92%，用广东省土壤背景值来衡量揭阳土壤 Cr 含量情况或许存在偏差，故利用深层土壤有效数据计算揭阳市土壤背景值。深层土壤 Cr 含量呈偏度分布，经 Box-Cox 转换，Kolmogorov-Smirnov 检验数据后符合正态分布($K-S$ 值=0.20 > 0.05)，其最优化转换系数 $\lambda = 0.30$ 。深层 Cr 含量平均值由 Box-Cox 的逆运算计算得出，最终算出深层 Cr 均值为 27.88 mg/kg，此值可作为研究区土壤 Cr 背景值。由此看出，表层土壤 Cr 含量 22.40 mg/kg 较低于揭阳市土壤背景值 27.88 mg/kg，远低于广东省土壤背景值 50.50 mg/kg。由此可推断揭阳市土壤不存在明显的 Cr 污染问题。Cr 的变异系数为 88.7%，属于中等程度变异^[12]，说明 Cr 含量可能受到一些外源因素的影响。

表 1 研究区土壤 Cr 含量统计描述(mg/kg)

Table 1 Statistical description of soil Cr content in studied area						
最小值	中值	最大值	几何均值	标准差	变异系数(%)	背景值
1.40	22.40	301.90	22.40	19.86	88.7	27.88

2.2 富集程度分析

以揭阳市土壤 Cr 元素背景值为参比值，以 Ti

为参比元素,对所有表层土壤样品的 Cr 元素富集因子(EF)进行计算,结果见表 2。揭阳市表层土壤 Cr 富集因子均值为 0.81,整体来看处于无污染水平。按照提出的分类方法分类,研究区土壤 Cr 积累程度多为无富集和轻微富集,分别占到 75.11% 和 23.46%,中度富集占 1.20%,极少数地区存在显著富集(0.23%),无强烈富集和极强富集。

表 2 Cr 元素所占富集程度百分比
Table 2 Percentage of accumulation degree of Cr

EF	富集程度	Cr 元素在各富集程度所占比例(%)
≤1	无富集	75.11
1~2	轻微富集	23.46
2~5	中度富集	1.20
5~20	显著富集	0.23
20~40	强烈富集	0
>40	极强富集	0

2.3 Cr 含量的空间结构特征分析

数据的非正态分布会造成实验半变异函数畸变,增大估计误差,半变异函数的波动甚至会掩盖其固有的结构,因此需转换数据消除比例效应^[18]。本研究中,表层土壤 Cr 含量经对数转换后满足正态分布,从而消除了比例效应。

根据异性半变异函数的计算划分角度组,容限为 $\pm 22.5^\circ$ 。研究计算了揭阳市土壤中 Cr 的实验半变异函数,并根据其特点进行了理论模型的拟合,模型拟合参数见表 3。

表 3 土壤 Cr 理论半变异函数模型拟合参数
Table 3 Variogram fitting model of Cr in soil and related parameters

模型类型	块金值 (C_0)	基台值(C_0+C_1)	C_0/C_0+C_1	步长(km)	R^2
指数模型	0.018	0.070	0.257	225.5	0.904

R^2 检验达到显著($P < 0.01$),证明理论变异函数对于实验变异函数的拟合效果较好。研究区土壤 Cr 含量具有很好的空间结构性,表现出明显的块金效应,块金值 C_0 为 0.018,在基台值中所占的比例约为 25.7%,这部分变异通常被解释为随机效应。Cambardella 等^[19]认为 C_0/C_0+C_1 值可以反映区域化变量的空间相关程度,比值小于 0.25 代表空间相关性很强,大于 0.75 代表空间相关性较弱,因此研究区土壤 Cr 含量具有较强的空间相关性。Cr 的半变异函数随着步长的增加而上升,逐渐达到了基台值,变程为 225.0 km(图 2),相关性范围基本覆盖整个研究区域。

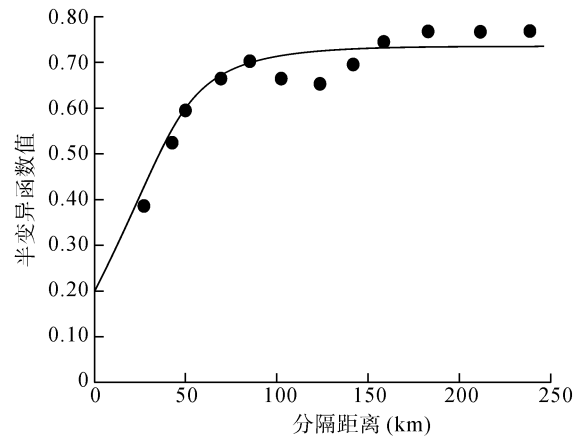


图 2 研究区土壤 Cr 含量的半变异函数
Fig. 2 Semi-variogram of soil Cr content in studied area

Moran 指数值为 0.52 (图 3A),表明研究区有正相关集聚。Moran 点图表明研究区表层土壤 Cr 的集聚类型共有 4 种,每个象限代表着一种集聚类型,第一象限的样点为高-高集聚,即表示这些样点的 Cr 含量相对较高,且周围均为较高值,该象限的样点通常被叫做“热点”;第三象限为低-低集聚,即该象限的样点 Cr 含量相对较低,且周围均为较低值,该象限的样点通常被叫做“冰点”。这两个象限的共同点均为呈现正向的空间相关性。Lisa 聚类图(图 3B)中显示了“冰点”与“热点”的分布特征,研究区“热点”主要分布在榕城区及揭东区的东南部、揭西县的中南部、惠来县的北部以及西南部;“冰点”主要分布在揭西县的西南部以及惠来县南边沿海地区。

2.4 Cr 的空间分布特征分析

为了解揭阳市土壤 Cr 的空间分布特征,利用 ArcGIS 软件进行普通 Kriging 插值得到 Cr 的含量分布图(图 4)。由图 4 可知,Cr 含量的空间分布主要受到成土母质和地形的控制。表层土壤 Cr 高值集中在榕城区和惠来县的北部以及西南部;土壤 Cr 低值在揭西县的西南部以及惠来县南面沿海等地区。榕城区主要位于榕江流域的中段,河流分布密集,成土母质主要为粉砂岩与榕江河流沉积物,Cr 易随榕江河流沉积物等进行迁移至此,揭阳市地势自西向东倾斜,西北部多山地丘陵,地势较高,南部为大面积的沿海沙滩地,不利于 Cr 的富集,Cr 含量相对偏低,这与前面 Lisa 聚类图表现一致。近些年研究表明,在重金属污染的土壤中,Cr 的空间结构和分布主要受成土母质的控制,如张慧等^[21]通过对松嫩平原的肇源县表层土壤重金属 Cr 空间分布格局的研究发现,该地区土壤中的 Cr 主要受成土母质的控制;吕建树和何华春^[22]对江苏沿海带土壤重金属分布研究发现,

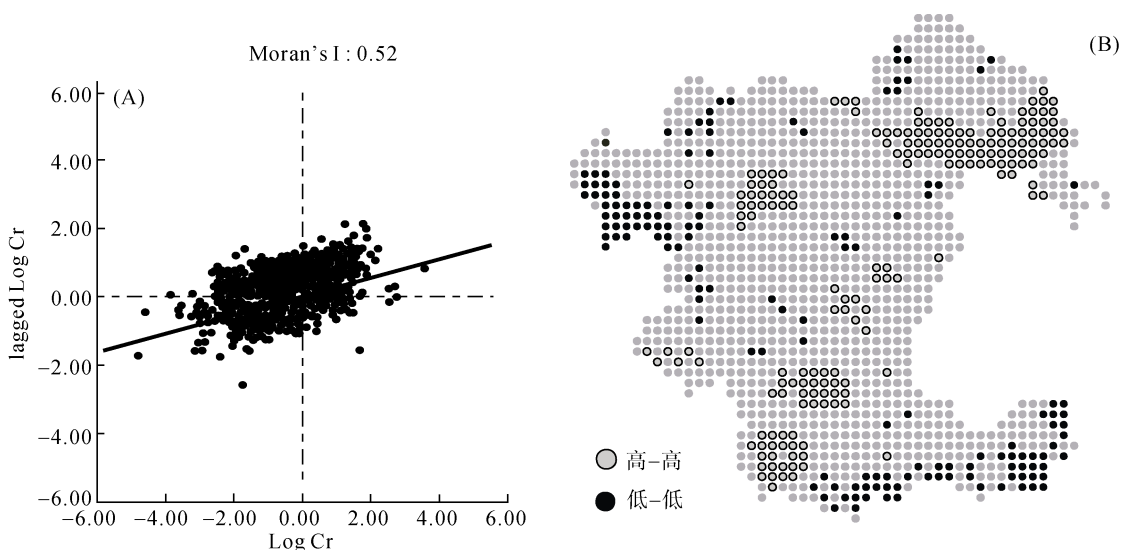


图 3 研究区土壤 Cr 的 Moran 点图(A)和 Lisa 聚类图(B)
 Fig. 3 Moran's scatter plot(A) and Lisa cluster(B) map of soil Cr in studied area

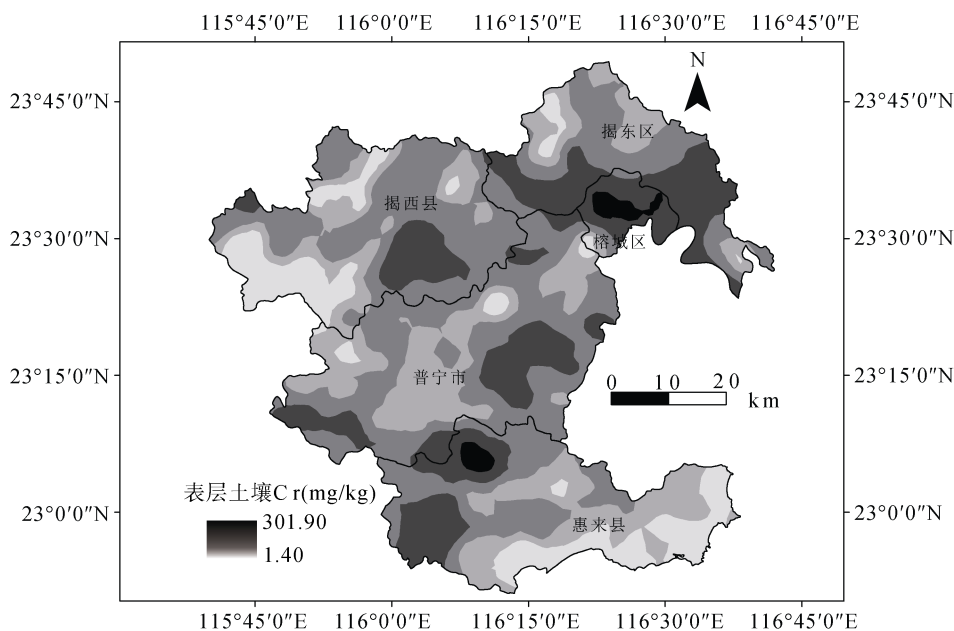


图 4 表层土壤 Cr 含量空间分布
 Fig.4 Spatial distribution of Cr content in surface soil

该地区土壤中的 Cr 为自然来源元素，受到成土母质的控制。本研究结果都与此相符。

2.5 表层土壤 Cr 水平空间分布的影响因素

表层土壤重金属水平空间分布主要受自然因素、人为干扰等因素的影响。其中在自然因素中成土母质起主导作用，而土壤类型是成土过程作用的结果，对重金属的分布可能有一定的影响，同时人类活动范围导致土地性质的改变对局部重金属分布也会产生一定的作用。

2.5.1 成土母质的影响 成土母质是表层土壤主要

的物质基础，其类型差异会直接影响表层重金属含量^[23]。本文利用 ANOVA 法统计不同成土母质下表层土壤 Cr 含量(表 4)，结果表明不同母质间土壤 Cr 含量存在显著性差异。各母质中表层 Cr 平均含量由高到低依次排序为：粉砂岩>第四纪沉积物>页岩>凝灰岩>花岗岩。粉砂岩、页岩通常是在水动力条件较安静、沉积速度缓慢环境下形成，分布于湖泊、河流三角洲等地带，揭阳市中部、南部和东南部都是广阔肥沃的榕江冲积平原和滨海沉积平原，有利于 Cr 元素的迁移及在河流沉积物形成的土壤中富集。

表 4 不同母质类型、土壤类型及土地利用方式下土壤 Cr 含量(mg/kg)
Table 4 Soil Cr concentrations under different parent materials, soil types and land use types

影响因素	类型	样点数	表层土壤	
			几何均值	Cr 含量 变幅
成土母质	花岗岩	713	21.68 c	1.60 ~ 157.80
	第四纪沉积物	354	33.37 b	1.40 ~ 301.90
	粉砂岩	134	44.15 a	8.30 ~ 98.10
	凝灰岩	119	23.22 bc	3.20 ~ 93.00
	页岩	10	29.24 bc	11.30 ~ 76.60
土壤类型	水稻土	471	31.74 a	2.60 ~ 301.90
	赤红壤	813	25.25 ab	1.60 ~ 157.80
	黄壤	20	21.78 b	8.20 ~ 55.10
	风沙土	26	9.52 c	1.40 ~ 25.90
土地利用方式	林地及未利用地	641	26.78 a	2.60 ~ 180.80
	建筑用地	350	27.85 a	1.40 ~ 301.90
	农耕地	339	26.78 a	3.20~150.20

注：表中小写字母不同表示同一影响因素不同类型间表层土壤 Cr 含量差异显著($P < 0.05$)。

2.5.2 土壤类型的影响 研究区土壤类型主要为赤红壤和水稻土,在北部丘陵和南部沿海区域分布有少量的黄壤和风沙土。用 ANOVA 法按土壤类型对表层土壤进行统计(表 4),结果表明黄壤和风沙土之间以及水稻土和黄壤之间 Cr 含量存在显著性差异。平均含量由高到低依次排序为:水稻土>赤红壤>黄壤>风沙土。水稻土为水成或半水成土,具水耕淀积层^[24],有利于含 Cr 物质的富集。六价铬受 pH 的影响很大, pH 碱性条件下能稳定存在,赤红壤的 pH 条件下六价 Cr 比例一般很低,绝大部分为三价 Cr,而三价 Cr 极易被土壤胶体吸附和形成沉淀,以高岭土、氧化铁和氧化铝为主的赤红壤吸附三价 Cr 的能力较强^[25],而以伊利石为主的黄壤吸附三价 Cr 的能力较弱。风沙土是发育于风成沙性母质的土壤,砂性母质的流动性较强,不利于 Cr 元素的富集。

2.5.3 土地利用方式的影响 人类通过改变土地利用方式,影响土壤性质和土壤生产力,从而影响土壤元素含量和土壤环境^[26]。本文依据研究区土地利用的特点,将土地利用类别分为农耕地、建筑用地和林地及未利用地 3 种方式。ANOVA 统计分析表明这 3 种土地利用方式下表层土壤 Cr 含量并没有显著性差异且平均含量都小于揭阳市土壤背景值(27.88 mg/kg)。因此可以推断研究区土壤 Cr 含量并未受到明显的人类活动影响。

3 结论

1)揭阳市表层土壤平均 Cr 含量为 22.39 mg/kg,

低于揭阳市土壤背景值 27.88 mg/kg,富集因子法分析表明研究区土壤 Cr 富集程度多为无富集和轻微富集,分别占到 75.11% 和 23.46%,整体来看无明显污染问题。

2)用地统计学方法对揭阳市土壤中 Cr 进行空间分析, Cr 含量高值区分布在成土母质以粉砂岩为主的榕城区中部以及惠城区北部,低值分布在西北部山地丘陵以及东南部的沿海沙滩地带; Moran 指数表明研究区存在正相关集聚地区, Lisa 聚类图可以看出研究区“热点”主要分布在榕城区及揭东区的东南部、揭西县的中南部、惠来县的北部以及西南部,“冰点”主要分布在揭西县的西南部以及惠来县南边沿海地区,这与土壤 Cr 的空间分布特征基本一致。

3)方差统计分析了不同成土母质、土壤类型、土地利用方式下土壤 Cr 含量的影响差异。研究区土壤 Cr 主要受到成土母质的影响,粉砂岩和页岩中的 Cr 含量较高,同时受到榕江、练江等流域的河流动力影响而易于迁移;不同土壤类型中水稻土中 Cr 含量较高,风沙土中 Cr 含量较低,可能是因为水稻土具有水耕淀积层易于 Cr 的富集,而风沙土流动性较强, Cr 难以富集;不同土地利用方式下 Cr 含量差异不明显,表明 Cr 含量并未受到人为活动的明显影响。

参考文献:

- [1] 李勇,周永章,张澄博,等.基于局部 Moran's I 和 GIS 的珠江三角洲肝癌高发区蔬菜土壤中 Ni、Cr 的空间热点分析[J].环境科学,2010,31(6):1617-1623.

- [2] Salvador-Blanes S, Cornu S, Bourennane H, et al. Controls of the spatial variability of Cr concentration in topsoils of a central French landscape[J]. *Geoderma*, 2006, 132(1/2): 143–157.
- [3] Brahusi F, Dörfler U, Schroll R, et al. Stimulation of reductive dechlorination of hexachlorobenzene in soil by inducing the native microbial activity[J]. *Chemosphere*, 2004, 55(11): 1477–1484.
- [4] Pohl H R, McClure P R, Fay M, et al. Public health assessment of hexachlorobenzene[J]. *Chemosphere*, 2001, 43(4–7): 903–908.
- [5] Chen M, Ma L Q, Harris W G. Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(4): 1173–1181.
- [6] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3): 313–324.
- [7] Lindström M. Urban land use influences on heavy metal fluxes and surface sediment concentrations of small lakes[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 126(3/4): 363–383.
- [8] 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.
- [9] 武婕, 李玉环, 李增兵, 等. 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1596–1605.
- [10] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2869–2876.
- [11] Liu Y G, Zhang H Z, Zeng G M, et al. Heavy metal accumulation in plants on Mn mine tailings[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 131–136.
- [12] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. *水利学报*, 1985, 9(9): 10–21.
- [13] 李娟娟, 马金涛, 楚秀娟, 等. 应用地积累指数法和富集因子法对铜矿区土壤重金属污染的安全评价[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(12): 135–139.
- [14] Hasan A B, Kabir S, Selim Reza A H M, et al. Enrichment factor and geo-accumulation index of trace metals in sediments of the ship breaking area of Sitakund Upazilla (Bhatiary-Kumira), Chittagong, Bangladesh[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 125: 130–137.
- [15] 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.
- [16] Haris H, Aris A Z. The geoaccumulation index and enrichment factor of mercury in mangrove sediment of Port Klang, Selangor, Malaysia[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(11): 4119–4128.
- [17] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii[J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 611–627.
- [18] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——空间自相关与分形方法[J]. *地理学报*, 1998, 53(1): 87.
- [19] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501–1511.
- [20] 李秋萍, 李长建, 肖小勇, 等. 中国农业碳排放的空间效应研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(4): 30–35.
- [21] 张慧, 马鑫鹏, 史晓磊, 等. 区域土壤 Cd 和 Cr 空间分布的影响因素研究[J]. *土壤*, 2018, 50(5): 989–998.
- [22] 吕建树, 何华春. 江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2853–2864.
- [23] 张慧, 郑志志, 杨欢, 等. 基于多元统计和地统计的肇源县表层土壤重金属来源辨析[J]. *土壤*, 2017, 49(4): 819–827.
- [24] 赵其国. 水稻土的类型特征及其管理[J]. *土壤*, 1992, 24(4): 169–175.
- [25] 周琴, 姜军, 徐仁扣. Cu(II)、Pb(II)和 Cd(II)在红壤胶体和非胶体颗粒上吸附的比较[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 131–138.
- [26] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 土地利用对土壤性质影响的区域差异研究[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(8): 1697–1702.