广东省土壤镍背景值时空变化特征与影响因素

罗小玲, 梁耀杰, 王中伟, 谢志宜, 陈多宏, 刘军

引用本文:
罗小玲, 梁耀杰, 王中伟, 等. 广东省土壤镍背景值时空变化特征与影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3108-3121.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0694

罗小玲, 梁耀杰, 王中伟, 等. 广东省土壤镍背景值时空变化特征与影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3108-3121.
LUO X L, LIANG Y J, WANG Z W, et al. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of soil nickel background value in Guangdong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3108-3121.

开放科学 OSID

广东省土壤镍背景值时空变化特征与影响因素

罗小玲, 梁耀杰, 王中伟, 谢志宜*, 陈多宏, 刘军

(广东省生态环境监测中心, 广州 510308)

摘 要: 为阐明广东省土壤镍背景值的变化趋势及其影响因素,本研究基于2018年和2022年在背景值区域开展的定点监测,分析了土壤镍含量的变化特征;采用地理加权回归分析法,探究了自然因素、人为因素和理化性质对背景值区域土壤镍含量的影响。结果表明:广东省背景值区域A层土壤镍含量总体偏低,空间上呈"中部低、四周高"的分布格局,高值区位于粤西雷州半岛,次高区位于粤北山区和珠三角沿海局部地区。在原始数据尺度下,2022年全省背景值区域A层土壤镍含量中位值、算术均值分别为13.0、17.6 mg·kg^{-1},较2018年分别下降了1.0、0.4 mg·kg^{-1},几何均值为12.6 mg·kg^{-1},较2018年上升了1.5 mg·kg^{-1};对数转换后均值下降幅度约为11%,表明背景区域土壤镍含量总体呈下降趋势。研究表明,在各类可变影响因素中,理化性质(尤以阳离子交换量)对土壤镍含量的影响较大,人为和自然因素干扰有限。

关键词: 广东;土壤;背景值;镍;时空变化

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2025)12-3108-14 doi:10.11654/jaes.2025-0694

Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of soil nickel background value in Guangdong Province

LUO Xiaoling, LIANG Yaojie, WANG Zhongwei, XIE Zhiyi*, CHEN Duohong, LIU Jun

(Guangdong Ecological Environment Monitoring Center, Guangzhou 510308, China)

Abstract: In order to clarify the variation trend of soil nickel background value and its influencing factors in Guangdong Province, this study analyzed the variation characteristics of soil nickel content based on the fixed-point monitoring in the background value area in 2018 and 2022. Geographically weighted regression analysis was used to explore the effects of natural factors, human factors and physical and chemical properties on soil nickel content in the background value area.The results showed that the soil nickel content in the A layer of the background value area in Guangdong Province was generally low, and the spatial distribution pattern was 'low in the middle and high around'. The high value area was located in the Leizhou Peninsula in western Guangdong, and the second high area was located in the mountainous area of northern Guangdong and the coastal area of the Pearl River Delta. At the original data scale, the median, arithmetic mean and geometric mean of soil nickel content in layer A of the province's background value area in 2022 were 13.0, 17.6 mg·kg^{-1} and 12.6 mg·kg^{-1}, respectively, which decreased by 1.0, 0.4 mg·kg^{-1} and increased by 1.5 mg·kg^{-1} compared with 2018. After logarithmic transformation, the mean value decreased by about 11%, indicating that the soil nickel content in the background area generally showed a downward trend. In summary, among the various variable influencing factors, physical and chemical properties(especially cation exchange capacity) have a greater impact on soil nickel content, and human and natural factors have limited interference.

Keywords: Guangdong; soil; background value; nickel; temporal and spatial changes

收稿日期: 2025-07-19 **录用日期:** 2025-10-26

作者简介: 罗小玲(1982—),女,高级工程师,硕士,研究方向为土壤环境监测与评价。E-mail:78086941@qq.com

***通信作者:** 谢志宜 E-mail:86261961@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFE0202000)

Project supported: National Key Research and Development Program of China(2024YFE0202000)

镍是人体必需的微量元素,但过量摄入会引发健康问题[1-3]。土壤中的镍元素可通过食物链传递、呼吸、饮水等多种途径威胁人体健康,确立土壤镍背景值并监控其变化趋势,对判别土壤镍是否累积以及指导镍污染风险防控具有重要意义。

土壤元素背景值是指在不受或很少受人类活动影响和现代工业污染与破坏的情况下,土壤固有的化学组成和结构特征[4]。研究表明,母质母岩[5-11]是影响土壤元素含量高低的主要因素,另外土壤重金属含量的分布模式还受成矿带影响[12]。我国的镍矿资源主要存在于岩浆型镍铜硫化物矿、风化壳型镍矿和海相沉积型镍-钼-钒矿中[13],广东省不在我国主要成镍带上,镍矿的成矿密度和强度均处于全国较低水平[14]。“七五”期间,国家环境保护局在全国范围内开展的土壤环境背景值调查结果表明,全国背景点A层土壤镍含量算术均值为26.9 mg·kg^{-1},几何均值为23.4 mg·kg^{-1};广东省背景点A层土壤镍含量算术均值为14.4 mg·kg^{-1},几何均值为9.6 mg·kg^{-1}[4],低于全国平均水平;但粤西雷州半岛受成土母质影响,尤其徐闻县、雷州市南部等地的玄武岩区土壤表现为多元素的高背景区,以高强度的铁族元素富集为特征[15],土壤镍含量同国内外其他区域相比相对较高[16]。人类活动加剧了土壤中镍的累积,例如次煤、石油产品的燃烧,镍矿石及含镍金属矿石的冶炼废气,以及镍矿开采产生的粉尘等[17-18],含镍废水的排放,如冶金电镀、玻璃、造纸、纺织、化肥、炼油等类型工业企业排放的含镍废水[19-20],均会造成土壤镍累积。此外,气候条件和成土过程[11],理化性质中的pH[21-25]、有机质[26-30]、阳离子交换量[26,31]、土壤质地[11,26]等因素还会通过影响镍元素在土壤中的淋溶迁移、赋存形态或吸附解吸过程,进而影响其在土壤中的再分布。

随着我国土壤污染防治逐步由末端治理转向源头防控,2020年以来广东省深圳市、韶关市和东莞市陆续出台土壤环境背景值地方标准,分别按照不同土壤类型或母质类型给出各元素背景值[32-34],以期为土壤污染风险评估提供依据。然而在城镇化和工业化高速发展的进程中,土壤的固有化学组成因受到不同程度的人类活动干扰而持续变化。上述标准建立时间较晚,因此在应对污染成因复杂或需要追溯历史成因的情况时具有一定的局限性。近年来,针对广东省背景值区域土壤镍含量变化趋势的研究相对欠缺,本研究旨在通过对广东省背景值区域土壤镍含量现状及其自1990年以来的变化趋势进行分析,阐明其长时间序列的变化特征,并通过地理加权回归分析探究其影响因素,为土壤污染识别、溯源和地方标准的制定及应用提供数据支撑,为土壤环境管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

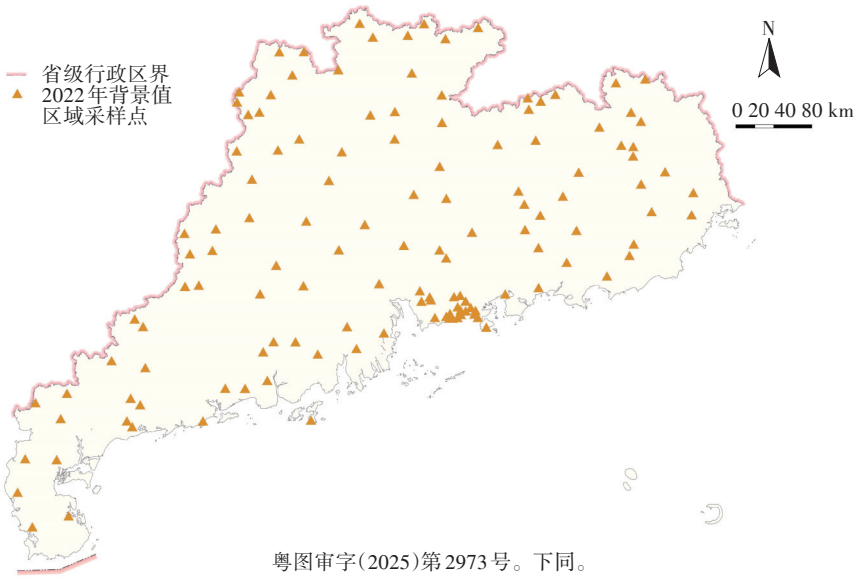
广东省地处中国大陆最南部,陆地范围在20°09′~25°31′N,109°45′~117°20′E之间,地跨中亚热带、南亚热带及北热带,土壤水平地带性明显,由北向南呈现红壤、赤红壤和砖红壤分布。全省以花岗岩分布最广泛,其在自然植被覆盖条件下发育成赤红壤、红壤和黄壤;砂页岩也是全省分布较广、面积较大的母岩,在全省各市县均有分布;玄武岩则主要分布在粤西地区雷州半岛南部,其所形成的土壤主要有砖红壤、赤红壤等,经人工耕作后为赤土地和赤红地。此外,局部地区分布的石英岩、片岩、河流及三角洲沉积物、滨海沉积物等对土壤的形成也有重要影响[35]。广东是“七山一水二分田”的林业大省,截至2020年末,森林覆盖率58.66%[36],随着社会经济的高速发展,耕地集中连片度不高,“碎片化”程度日益加剧。

1.2 土壤监测点位设置

监测点位主要设置在“七五”土壤背景值调查采样区。“七五”土壤背景值调查中,广东省约以每30 km×30 km设置一个点位,采样单元以土类为主,深圳作为开放性城市采样单元划分到亚类或土属[4]。为保持监测点位的延续性,以评估社会经济发展、城市扩张、人类活动等因素对背景值区域土壤中元素含量的影响,2018年和2022年在原“七五”土壤背景值调查采样区中,选择仍相对较少受到人类活动干扰的131个采样区进行布点和采样监测,点位分布见图1,点位数量分类见表1,四大区域点位数量见表2。

1.3 土壤样品采集与分析

2018年和2022年分别在131个点位采集A层土壤样品开展监测(按照成土过程将自然土壤剖面划分为A、B、C层,不同区域土壤剖面各层发育的深度不完全一致,其中A层即表层,腐殖质淋溶层,特点为根系多,颜色暗,发育团粒状、碎块状等)。每个点位以20 m×20 m为采样区,在双对角线上布设5个采样点,在每个采样点采集等量样品混匀成一份混合样。土壤样品集中制备,风干后研磨过2 mm筛,二次编码后以每批次不大于20个的数量分批打包,随批次插入精密度和正确度密码质控样后发放至实验室。相关



粤图审字(2025)第2973号。下同。

图1 点位分布图

Figure 1 Distribution map of sampling sites

表1 全省点位数量分类统计

Table 1 Classification statistics of the number of points in the province

母质类型 Type of parent material	点位数 Number of points/个	土壤类型 Soil type	点位数 Number of points/个	土地利用类型 Land use type	点位数 Number of points/个	区域 Area	点位数 Number of points/个
花岗岩风化物	41	赤红壤	50	林地	102	粤东	8
砂页岩风化物	30	水稻土	32	耕地	26	粤西	20
变质岩风化物	14	红壤	27	园地	3	粤北	52
石灰岩风化物	12	砖红壤	7			珠三角	51
河流冲积物海相沉积物	8	黄壤	6				
花岗岩麻岩风化物	6	粗骨土	2				
酸性火山喷出岩风化物	6	紫色土	2				
紫色砂页岩风化物	4	其他	5				
浅海沉积物	3						
其他	7						
合计	131		131		131		131

注:土地利用类型按2018年采样时类型统计,2022年部分林地转化为耕地、园地或未利用地。下同。

Note: The land use type is counted according to the type of sampling in 2018. In 2022, some forest land will be converted into cultivated land, garden land or unused land. The same below.

表2 四大区域主要类型监测点位数量统计

Table 2 Statistics on the number of main types of monitoring points in the four major regions

分类 Classification		粤东 Eastern Guangdong	粤西 Western Guangdong	粤北 Northern Guangdong	珠三角 Zhujiang triangle district	合计 Total
母质类型	花岗岩风化物	4	3	11	23	41
	砂页岩风化物	0	3	12	15	30
土壤类型	赤红壤	1	5	15	29	50
	水稻土	5	7	8	12	32
	红壤	0	0	23	4	27
土地利用类型	林地	5	8	52	37	102
	耕地	2	10	0	14	26

注:本表仅列出数量大于或接近30个的点位类型在四大区域的分布。

Note: This table only lists the distribution of point types greater than or close to 30 in the four major regions.

实验室于2018年分别采用《森林土壤pH值的测定》(LY/T 1239—1999)及《土壤检测 第2部分 土壤pH的测定》(NY/T 1121.2—2006)测定土壤pH,依据《土壤检测 第六部分 土壤有机质的测定》(NY/T 1121.6—2006)测定有机质含量,通过《森林土壤阳离子交换量的测定》(LY/T 1243—1999)测定阳离子交换量,并依据《土壤质量 镍的测定 火焰原子吸收分光光度法》(GB/T 17139—1997)测定镍含量;2022年则分别采用《土壤pH的测定 电位法》(HJ 962—2018)测定土壤pH、《土壤检测 第六部分 土壤有机质的测定》(NY/T 1121.6—2006)测定有机质含量、《森林土壤阳离子交换量的测定》(LY/T 1243—1999)测定阳离子交换量、《土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》(HJ 491—2019)测定镍含量。分析环节内、外部质控数据不合格批次整批复测,质控数据最终合格率为100%。

1.4 土壤镍背景值历史数据采集

查阅《中国土壤元素背景值》[4]获取"七五"时期全国及广东省A层土壤镍含量统计量,以1990年作为"七五"时期数据的代表年份;查阅《广东省土壤无机元素背景值的变化趋势研究》[37]获取2012年广东省背景点A层土壤镍含量历史数据。

1.5 影响因素相关数据采集

查阅《广东统计年鉴2022》[38],获取广东省各地级市单位面积人口密度(人·km^{-2})、城镇人口占常住人口比例(%)、工业企业单位数(no.)、单位GDP能耗增长速度(%)、单位工业增加值能耗增长速度(%)、涉镍排放行业工业总产值(10^9元)、建筑业企业房屋建筑施工面积(万m^2)、城市公共交通车辆运营数(标准车辆单位)、城市人均公园绿地面积(m^2)、客运量(万人)、货运量(万t)、货物周转量(亿t·km^{-1});采样时通过手持定位设备实测海拔高度(m),查阅相关地市2022年统计年鉴[39-57],获取市域尺度年降雨量(mm)、年平均气温(℃)、年日照时数(h)数据。

1.6 统计分析

1.6.1 统计工具

本文应用Excel、SPSS Statistics 27进行数据处理和统计分析,应用Excel、Origin 2021、ArcGis 10.8进行图表绘制。

1.6.2 统计方法

1.6.2.1 异常值剔除法

参照《中国土壤元素背景值》,在画频数分布图和进行顺序统计量统计时,不剔除任何异常值,在计算算术均值和几何均值时,剔除$M/D\sim MD$(M为几何均值,D为几何标准差)以外的异常值。

1.6.2.2 差异显著性检验

采用成对样本t检验法检验不同时期全部点位的土壤镍含量差异显著性,采用非参数Wilcoxon检验法检验不同时期相同母质类型(或相同土壤类型)成对点位的土壤镍含量差异显著性,采用非参数Mann-Whitney U检验法检验不同时期、相同土地利用类型不成对点位的土壤镍含量差异显著性。

1.6.2.3 地理加权回归分析

采用地理加权回归分析法(GWR)进行影响因素分析,模型形式为:

$$Y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{k=1}^{m}\beta_k(u_i,v_i)x_{ik}+\varepsilon_i$$

式中:Y_i为第i个空间位置上的因变量观测值;(u_i,v_i)为第i个位置的空间坐标;$\beta_0(u_i,v_i)$为在位置(u_i,v_i)处的局部截距,随位置变化;$\beta_k(u_i,v_i)$为在位置(u_i,v_i)处第k个自变量的局部回归系数,随位置变化;x_{ik}为第i个位置的第k个自变量观测值;ε_i为第i个位置的随机误差项。

采用ArcGis 10.8进行模型拟合,投影坐标系为WGS 1984 Albers(地理坐标系为GCS WGS 1984),显著性水平设为$P<0.05$。通过比较拟合优度评估模型改进效果,使用局部R^2和局部回归系数检验空间异质性。

2 结果与分析

2.1 空间分布

从图2可见,广东省背景值区域A层土壤镍含量总体偏低,空间上呈"中部低、四周高"的分布格局,局部高背景区域位于粤西雷州半岛,次高区域位于粤北山区和珠三角沿海局部地区。2022年大部分点位镍含量均低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险筛选值[不同pH区间镍元素风险筛选值分别为60 mg·kg^{-1}(pH≤5.5)、70 mg·kg^{-1}(5.5<pH≤6.5)、100 mg·kg^{-1}(6.5<pH≤7.5)、190 mg·kg^{-1}(pH>7.5)];仅雷州半岛南部有2个点位含量大于60 mg·kg^{-1},超过风险筛选值,这与雷州半岛南部地区成土母质主要为玄武岩风化物,铁族元素高强度富集,镍背景含量较高有关[15-16];此外,粤北山区也有部分点位含量超过30 mg·kg^{-1}。

2.2 含量特征

2022年监测结果表明,广东省背景值区域A层

土壤镍含量总体呈偏态分布，经对数转换后呈近似正态（图3）。2022年广东省背景值区域A层土壤镍含量中位值、算术均值、几何均值分别为13.0、17.6、12.6 mg·kg^{-1}（表3）。

2.3 变化趋势

2.3.1 全省变化趋势

2.3.1.1 时间变化

为满足正态性要求，对2018年和2022年广东省背景值区域A层土壤镍含量进行对数转换，并运用成对样本t检验法检验差异显著性。结果表明，两期数据差异显著（对数转换均值为−0.118，95%置信区间为−0.229~−0.007，P=0.038）。由表3可见，在原始数据尺度上，2022年镍含量中位值较2018年下降1.0 mg·kg^{-1}，算术均值下降0.4 mg·kg^{-1}，几何均值升高1.5 mg·kg^{-1}，而对数尺度均值下降约11%，表明自2018年以来A层土壤镍含量尽管某些集中趋势指标呈现上升，但是从整体分布来看，仍然表现出显著的降低效应。与历史数据相比，自1990年以来，A层土壤镍含量呈现先升后降的变化特征，但由于历史数据来源于专著和文献，仅能获取描述性统计量，无法进行差异显著性检验，因此本文仅对长期变化趋势进行特征描述，不作统计推断。

2.3.1.2 空间变化

图4为2018—2022年各点位A层土壤镍含量变化量的空间分布。分析表明，多数点位含量变化绝对量小于20 mg·kg^{-1}，粤东、粤北和雷州半岛出现个别点位含量波动超过20 mg·kg^{-1}的情况，镍含量波动较大点位的空间分布与图2中高值点位的空间分布重叠。

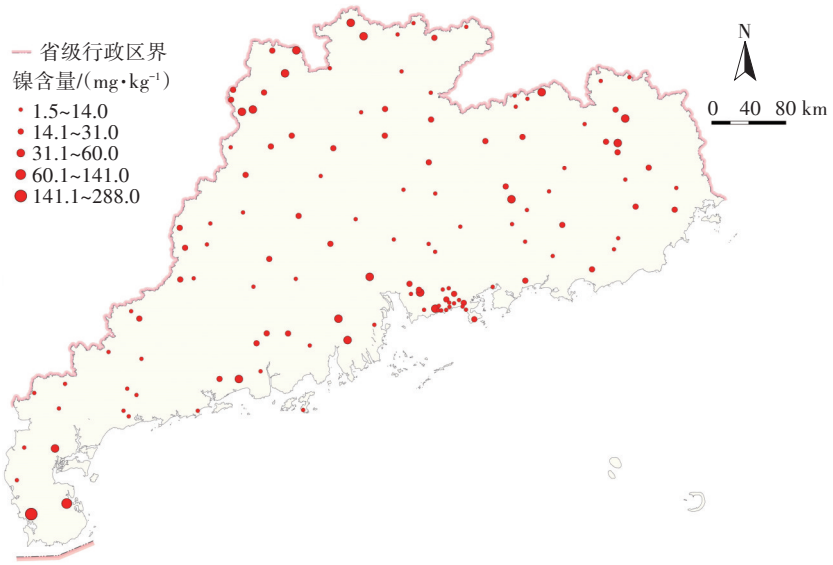


图2 2022年广东省土壤环境背景值区域A层土壤镍含量分布

Figure 2 Distribution map of nickel content in A-layer soil of soil environmental background area in Guangdong Province in 2022

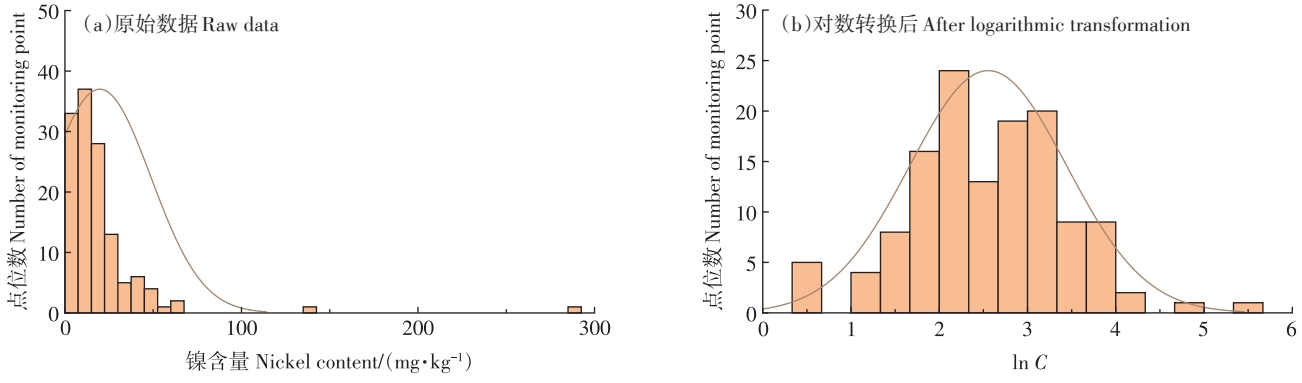


图3 2022年广东省背景值区域A层土壤镍含量数据分布形态

Figure 3 Distribution pattern of nickel content data in A-layer soil of Guangdong Province background value area in 2022

表3 1990年以来广东省背景值区域A层土壤镍含量中位值及均值变化情况

Table 3 Changes in the median and mean values of nickel content in A-layer soil in the background value area of Guangdong Province since 1990

年份 Year	样本量(异常值数量) Sample size(number of outliers)	最小值 Minimum value/(mg·kg^{-1})	中位值 Median/(mg·kg^{-1})	最大值 Maximum value/(mg·kg^{-1})	算术 Arith		几何 Geometric		显著性 Significance (*P*)
					均值 Mean value/(mg·kg^{-1})	标准差 Standard deviation	均值 Mean value/(mg·kg^{-1})	标准差 Standard deviation	
1990	167(6)	0.1	8.8	200.7	14.4	16.94	9.6	2.37	—
2012	146(—)	未检出	14.4	224.0	22.2	28.14	12.0	5.31	—
2018	131(1)	5L	14.0	319.0	18.0	21.31	11.1	2.72	0.038*
2022	131(1)	3L	13.0	288.0	17.6	17.06	12.6	2.34	

注:1990年数据来源于参考文献[4];2012年数据来源于参考文献[37],异常值剔除情况不详;2018年和2022年数据来源于本研究,最小值均为未检出,2018年检出限为5 mg·kg^{-1}(5L),2022年检出限为3 mg·kg^{-1}(3L)。当*P*<0.05时为显著,标记为*,*P*<0.01时为极显著,标记为**。下同。

Note: 1990 data from reference[4]; The data of 2012 are from the reference[37], and the elimination of outliers is unknown; The data of 2018 and 2022 were derived from this study, and the minimum values were not detected, the detection limit was 5 mg·kg^{-1}(5L) in 2018 and 3 mg·kg^{-1}(3L) in 2022. When *P*<0.05, it was significant, marked as *, and when *P*<0.01, it was extremely significant, marked as **. The same below.

2.3.2 不同类型变化趋势

2.3.2.1 主要成土母质类型

按照不同成土母质类型统计A层土壤镍含量变化情况。结果表明(表4),与2018年相比,2022年点位数量接近或大于30个的母质类型中,A层镍含量变化均不显著。

2.3.2.2 主要土壤类型

按照不同土壤类型统计A层土壤镍含量变化情况。结果表明(表5),与2018年相比,2022年点位数量接近或大于30个的土壤类型中,只有赤红壤的A层镍含量显著升高,中位值升高了2.5 mg·kg^{-1},算术均值升高了2.1 mg·kg^{-1},几何均值升高了2.0 mg·kg^{-1};其余类型变化均未达显著性水平。表6是基于表2中四大区域点位分布情况统计的主要土壤类型点位占比,结果表明赤红壤点位分布在珠三角地区的占比显著高于其他土壤类型,珠三角地区的社会经济发展程度和城市化扩张速度明显高于粤东、西、北地区,赤红壤类型点位可能受到了较其他类型更频繁的人类活动干扰。

2.3.2.3 主要土地利用类型

按照不同土地利用类型统计A层土壤镍含量变化情况。结果表明(表7),与2018年相比,2022年主要土地利用类型耕地和林地的A层土壤镍含量变化均不显著。

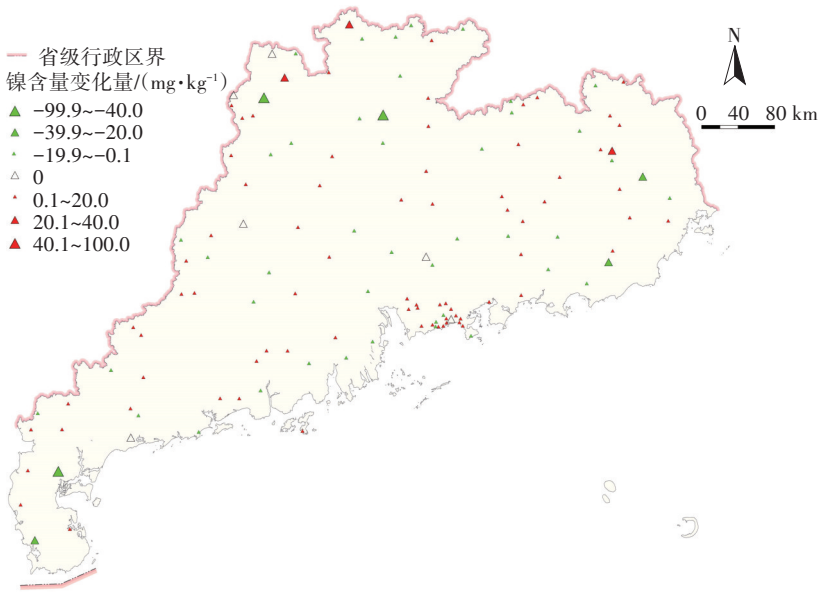


图4 背景值区域监测点位A层土壤镍含量变化量空间分布

Figure 4 Spatial distribution of soil nickel content variation in layer A of background value area monitoring point

表4 不同成土母质类型A层土壤镍含量变化及差异显著性

Table 4 Changes and significance of nickel content in A-layer soil of different parent material types

成土母质类型 Types of soil parent material	点位数 Number of sampling sites/个	年份 Year	最小值 Minimum value/ (mg·kg⁻¹)	中位值 Median/ (mg·kg⁻¹)	最大值 Maximum value/ (mg·kg⁻¹)	算术均值 Arithmetic mean/ (mg·kg⁻¹)	几何均值 Geometric means/ (mg·kg⁻¹)	显著性 Significance (P)
花岗岩风化物	41	2018	5L	8.0	42	10.8	7.7	0.428
		2022	3L	8.0	47	11.2	8.2	
砂页岩风化物	30	2018	5L	14.5	71	16.2	11.8	0.110
		2022	4	14.0	46	17.0	14.3	

表5 不同土壤类型A层土壤镍含量变化及差异显著性

Table 5 Changes and significance of nickel content in A-layer soil of different soil types

土壤类型 Soil type	点位数 Number of sampling sites/个	年份 Year	最小值 Minimum value/ (mg·kg⁻¹)	中位值 Median/ (mg·kg⁻¹)	最大值 Maximum value/ (mg·kg⁻¹)	算术均值 Arithmetic mean/ (mg·kg⁻¹)	几何均值 Geometric means/ (mg·kg⁻¹)	显著性 Significance (P)
赤红壤	50	2018	5L	8.0	34	12.4	8.8	0.007**
		2022	3L	10.5	47	14.5	10.8	
水稻土	32	2018	5L	14.0	71	18.3	12.2	0.903
		2022	3L	11.5	49	15.8	11.1	
红壤	27	2018	5L	20.0	101	22.8	15.3	0.080
		2022	3	18.0	54	20.5	16.1	

表6 不同土壤类型点位在四大区域的分布占比(%)

Table 6 Distribution proportion of different soil types in the four regions(%)

土壤类型 Soil type	珠三角 Zhujiang triangle district	粤东 Eastern Guangdong	粤西 Western Guangdong	粤北 Northern Guangdong	合计 Total
赤红壤	58.0	2.0	10.0	30.0	100
水稻土	37.5	15.6	21.9	25.0	100
红壤	14.8	0	0	85.2	100

2.4 影响因素分析

为探讨广东省背景值区域土壤镍含量变化的原因,对自然因素、人为因素和土壤理化性质与A层土壤镍含量进行地理加权回归分析。

2.4.1 单因素影响力分析

(1)自然因素

相关研究已证明母质母岩对土壤重金属的背景含量具有决定作用[5-11],且该因素为先天因素,因此本研究重点针对在市域尺度具备长期观察数据的降雨量、海拔、日照时长、气温等可变因素进行分析。采用地理加权回归分析法分别对2018年和2022年A层土壤镍含量与相同时期市域尺度年降雨量、海拔、年日照时数、年平均气温进行单因素模型拟合。结果表明(表8),年平均气温分布数据因与镍含量数据波动情况完全不匹配,无法进行模型拟合;其余因素的局部R^2均低于0.2,模型在各个区域的拟合度均不高;局部回归系数绝对值均小于0.02,各因素的局部单一影响力较弱。

(2)人为因素

背景值区域采样点位虽然位于人为干扰相对较小的区域,但由于采样区最早于"七五"时期选定,随着社会经济的高速发展和城市的急剧扩张,很多早期远离人类活动的点位,近年来都或多或少受到较以往

表7 不同土地利用类型A层土壤镍含量变化及差异显著性

Table 7 Changes and significance of nickel content in A-layer soil of different land use types

土地利用类型 Land use type	点位数 Number of sampling sites/个	年份 Year	最小值 Minimum value/ (mg·kg⁻¹)	中位值 Median/ (mg·kg⁻¹)	最大值 Maximum value/ (mg·kg⁻¹)	算术均值 Arithmetic mean/ (mg·kg⁻¹)	几何均值 Geometric means/ (mg·kg⁻¹)	显著性 Significance (P)
耕地	26	2018	5L	15.5	319	38.0	16.8	0.825
	23	2022	5	15.0	288	29.7	15.9	
林地	102	2018	5L	13.5	101	16.2	10.6	0.286
	88	2022	3L	12.0	54	16.3	12.6	

表8 不同时期市域尺度自然因素地理加权回归单因素模型分析结果

Table 8 Results of single factor model analysis of geographically weighted regression of natural factors at city scale in different periods

年份 Year	局部R^2 Local R^2	局部回归系数 Local regression coefficient	参评因素 Identification factor
2018	0.002 93~0.002 94	−0.001 76~−0.001 76	①年降雨量
	0.000 97~0.000 99	−0.002 44~−0.002 41	②海拔
	0.028 90~0.029 10	0.011 57~0.011 62	③年日照时数
	—	—	④年平均气温
2022	0.186 80~0.187 00	0.010 73~0.010 74	①年降雨量
	0.000 46~0.000 49	0.001 60~0.001 66	②海拔
	0.014 90~0.015 10	−0.004 46~−0.004 44	③年日照时数
	—	—	④年平均气温

更多的人为因素影响。采用地理加权回归分析法分别对2018年和2022年A层土壤镍含量与相同时期市域尺度社会经济各项指标数据进行单因素模型拟合。结果表明(表9),人为因素的局部R^2均低于0.2,模型在各个区域的拟合度均不高;局部回归系数绝对值均小于0.02,各因素的局部单一影响力较弱。

(3)理化性质

采用地理加权回归分析法分别对2018年和2022年A层土壤镍含量与相同时期pH、有机质含量、阳离子交换量等理化性质市域尺度数据进行单因素模型拟合。结果表明(表10),理化性质数据与镍含量数据的拟合结果相对较好,除2022年pH局部R^2小于0.2,其余因素两个时期的局部R^2都介于0.2~0.5之间,说明理化性质与土壤镍含量间存在相关性;局部回归系数中,pH的系数值最大,说明其单一影响力相对最大,两期数据又以2018年的影响力更大,模型拟合情况也优于2022年;其次为阳离子交换量,局部R^2和局部回归系数都高于有机质含量。

由于市域尺度数据为市域平均水平的聚合数据,其固有的均质性抑制了空间异质性,致使局部特征被平滑化,最终表现为局部R^2与回归系数在空间上趋同,缺乏显著差异。为识别不同理化性质对土壤镍含量影响的空间差异,进一步采用点位数据进行地理加权回归分析。从表11、图5~图7分析可知,不同因素的影响力存在时空差异。其中有机质含量影响力的时空差异不显著;pH在2018年与粤西雷州半岛的A层土壤镍含量呈负相关,与吴殿廷等[58]关于pH<7的

表10 不同时期市域尺度理化性质地理加权回归单因素模型分析结果

Table 10 Results of geographically weighted regression single factor model analysis of physical and chemical properties at different periods of city scale

时间 Year	局部R^2 Local R^2	局部回归系数 Local regression coefficient	参评因素 Identification factor
2018年	0.391 6~0.391 9	14.741 0~14.745 0	①pH
	0.334 4~0.334 6	1.880 6~1.881 2	②阳离子交换量
	0.286 7~0.287 5	0.529 0~0.530 0	③有机质含量
2022年	0.117 0~0.117 5	6.060 0~6.077 0	①pH
	0.442 2~0.442 3	2.003 9~2.004 4	②阳离子交换量
	0.308 0~0.308 1	0.473 5~0.473 6	③有机质含量

表11 不同时期点位尺度理化性质地理加权回归单因素模型分析结果

Table 11 Results of geographically weighted regression single factor model analysis of physical and chemical properties at point scale in different periods

时间 Year	局部R^2 Local R^2	局部回归系数 Local regression coefficient	参评因素 Identification factor
2018年	<0.001~0.216	−126.72~7.01	①pH
	<0.001~0.788	−0.71~44.31	②阳离子交换量
	<0.001~0.277	−0.54~4.27	③有机质含量
2022年	<0.001~0.515	−28.26~16.21	①pH
	<0.001~0.852	−0.12~20.63	②阳离子交换量
	<0.001~0.187	−0.56~6.07	③有机质含量

表9 不同时期市域尺度人为因素地理加权回归单因素模型分析结果

Table 9 Results of geographically weighted regression single factor model analysis of human factors at city scale in different periods

年份 Year	局部R^2 Local R^2	局部回归系数 Local regression coefficient	参评因素 Identification factor
2018	0.000 07~0.101 00	−0.164 4~0.104 0	①单位面积人口密度;②城镇人口占常住人口比例;③工业企业单位数;④单位GDP能耗增长速度;⑤单位工业增加值能耗增长速度;⑥涉镍排放行业工业总产值:a.石油和天然气开采业,b.石油、煤炭及其他燃料加工业,c.有色金属矿采选业,d.有色金属冶炼和压延加工业,e.金属制品业,f.造纸和纸制品业;⑦建筑业企业房屋建筑施工面积;⑧城市公共交通车辆运营数;⑨城市人均公园绿地面积;⑩客运量;⑪货运量;⑫旅客周转量;⑬货物周转量
2022	0.000 06~0.078 90	−0.653 7~0.068 0	

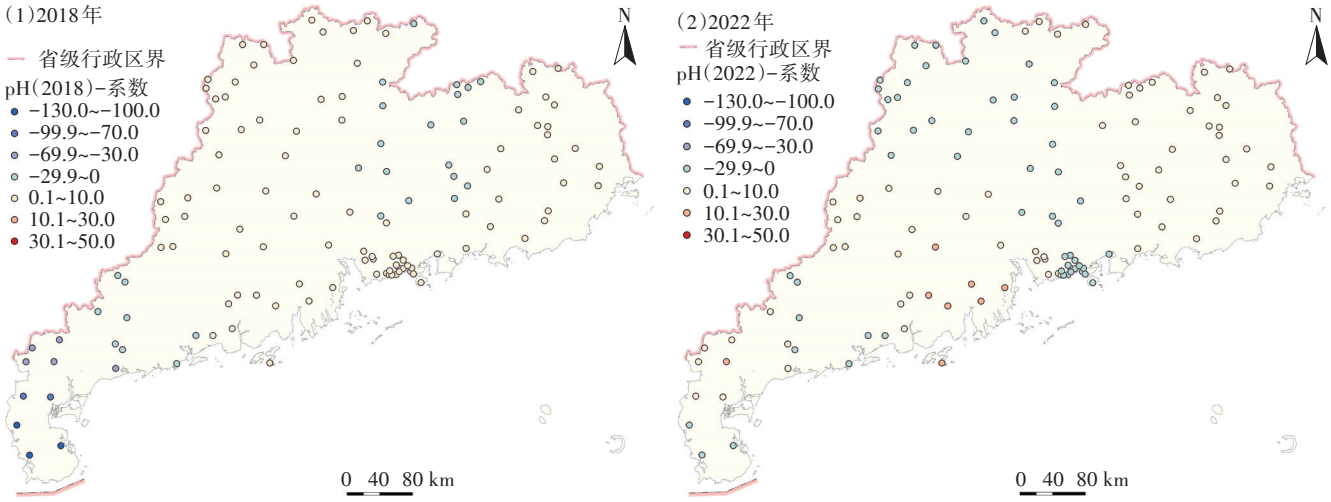


图5 pH局部回归系数空间分布

Figure 5 Spatial distribution of pH local regression coefficient

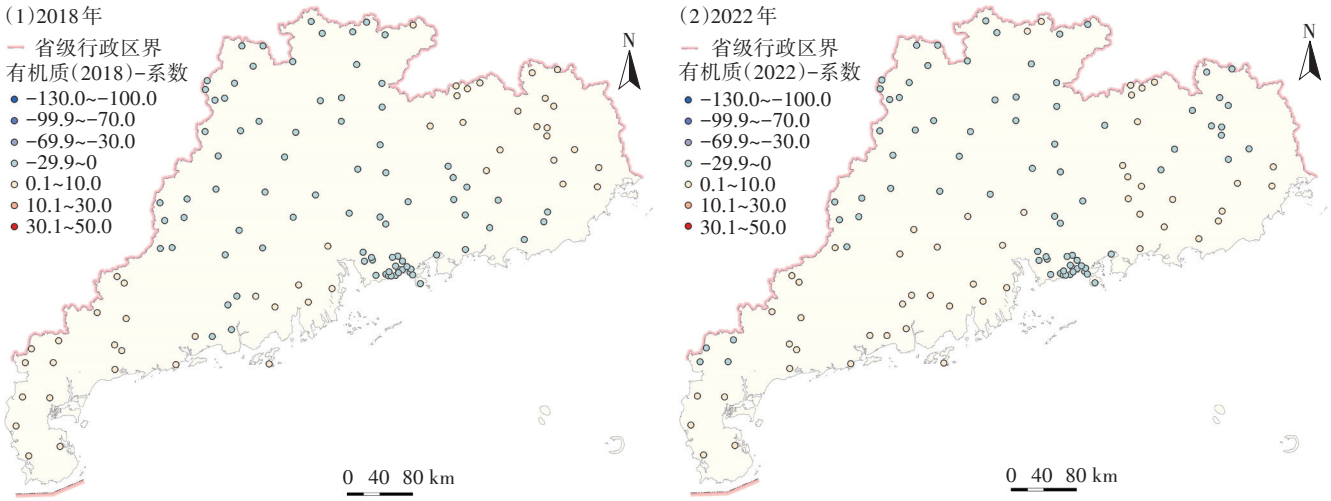


图6 有机质含量局部回归系数空间分布

Figure 6 Spatial distribution of local regression coefficient of organic matter content

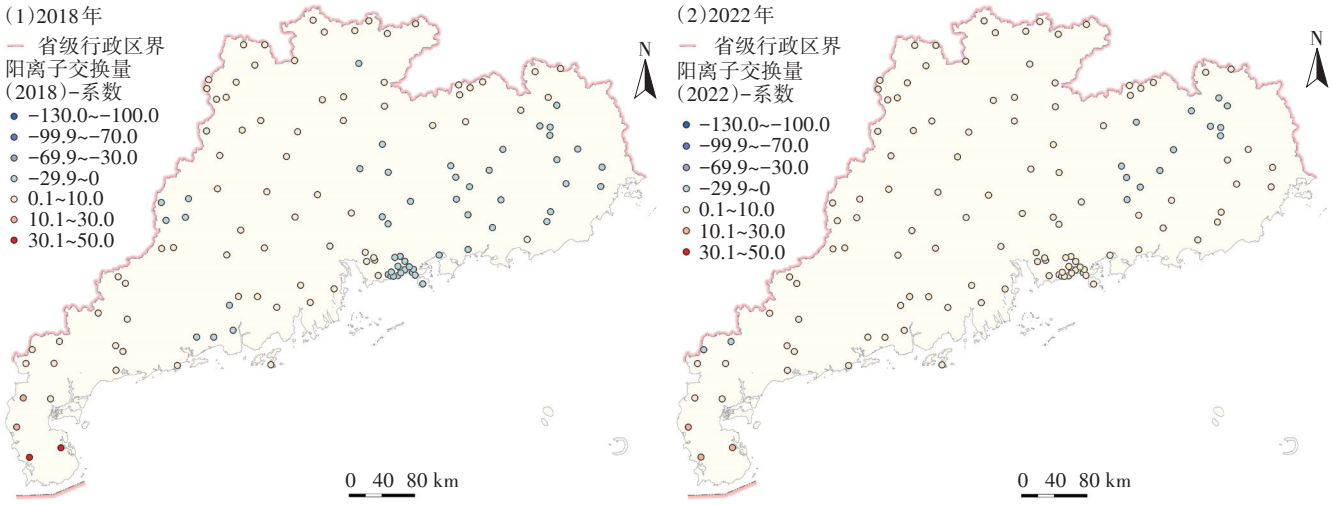


图7 阳离子交换量局部回归系数空间分布

Figure 7 Spatial distribution of local regression coefficient of cation exchange capacity

地区土壤镍含量与pH呈负相关的研究结论一致,其余地区间差异不显著,但2022年pH在珠江入海口以西地区与A层土壤镍含量呈正相关,与上述结果矛盾,这些地区土壤镍含量可能受到了其他因素的叠加影响;阳离子交换量与土壤镍含量总体呈正相关,2018年在粤西雷州半岛地区回归系数最大,2022年该地区回归系数呈下降趋势,但仍高于其他地区,其他地区间差异不明显。

2.4.2 多因素综合影响力分析

为研究自然因素、人为因素及土壤理化性质对A层土壤镍含量的综合影响,运用多变量地理加权回归进行建模分析。在模型调试过程中,严格考虑了不同协变量间的多重共线性问题,并通过对市域尺度影响因素的逐步筛选与组合,以实现模型的最优拟合。如表12所示,基于2018年数据所得最优模型为11因素模型,局部R^2介于0.838 5~0.838 7之间;基于2022年数据所得最优模型为12因素模型,局部R^2介于0.863 2~0.863 5之间,拟合效果较好。上述2个最优模型中,被纳入的共同因素包括自然因素中的海拔高度,人为因素中的单位面积人口密度,工业企业单位数,单位GDP能耗增长速度,单位工业增加值能耗增长速度,石油、煤炭及其他燃料加工业总产值和建筑业企业房屋建筑施工面积,理化性质中的阳离子交换量和有机质含量;被纳入的特征因素中,2018年为有色金属冶炼和压延加工业总产值和各市旅客周转量,2022年为石油和天然气开采业、有色金属矿采选业和金属制品业总产值。

局部回归系数会随时间而变化,体现了参评各因素在不同时空的影响力大小,但总体上的绝对值排序始终为理化性质>人为因素>自然因素,说明3类因素中影响力最大的是理化性质,其次是人为因素,自然因素的影响力最弱。理化性质中,pH因受共线性因素影响无法准确识别影响力大小,其余因素的影响力排序为阳离子交换量>有机质含量;人为因素中,单位面积人口密度、建筑业企业房屋建筑施工面积等因素与背景值区域在空间上具有一定间隔,影响力较弱,工业企业单位数、单位工业增加值能耗增长速度等因素因未细分行业类别,其回归系数在不同时期常呈现出反向变化,影响力不具有靶向效果,只有涉镍排放行业工业总产值与土壤镍含量间具有靶向影响效应,在入选最优模型的涉镍排放行业中,有色金属冶炼和压延加工业的回归系数相对较大,需引起重视。

3 讨论

3.1 点位尺度镍含量的正常波动不影响区域尺度土壤镍背景值总体趋势判定

本研究通过对广东省土壤镍背景值历史采样区开展持续采样监测,积累了长期动态数据,为揭示区域土壤镍背景值的演变趋势提供了依据。但受土壤空间异质性影响,点位监测数据存在一定的波动。在点位尺度上,即使在原位重复采样,监测结果也不可避免在一定范围内波动,这种波动是随机、正态的,并且其波动幅度在高含量地区的表现尤为显著,导致少数点位的绝对变化量较大,但其相对偏差仍处于合理范围。例如,在表3中对2018年和2022年两期数据按照规则剔除的异常高值点,是位于湛江雷州半岛的同一个点位,两次测定值变化量达到31 $mg\cdot kg^{-1}$,但相对偏差仅约5%,在《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)规定的镍元素实验室内平行双样相对偏差允许范围内。空间分析显示,图2中的镍含量高值点位与图4中的镍含量变化幅度较大点位在空间分布上高度重合,均位于雷州半岛及粤北北部山区的矿产资源集中区,这些地区受地质背景影响土壤镍含量相对较高,两次监测所得的镍含量变化量相对较大,但由于自身相对偏差较小,因此并不影响总体趋势的判定。从统计量变化情况

表12 不同时期市域尺度多因素地理加权回归综合模型分析结果

Table 12 Results of multi-factor geographically weighted regression comprehensive model analysis of city scale in different periods

年份 Year	最优模型类型	局部R^2 Local R^2	局部回归系数 Local regression coefficient	参评因素 Identification factor
2018	11因素模型	0.838 5~0.838 7	−0.012 18~−0.012 13	自然因素:②
			−0.020~0.697	人为因素:①、③、④、⑤、⑥-b、⑥-d、⑦、⑫
			0.200~2.100	理化性质:②、③
2022	12因素模型	0.863 2~0.863 5	0.006 38~0.006 49	自然因素:②
			−0.879~0.268	人为因素:①、③、④、⑤、⑥-a、⑥-b、⑥-c、⑥-e、⑦
			0.504~0.961	理化性质:②、③

看，2022年监测数据较2018年在原始数据尺度上中位值下降1.0 mg·kg^{-1}，算术均值下降0.4 mg·kg^{-1}，几何均值虽升高1.5 mg·kg^{-1}，但在对数尺度上均值下降了11%，表明在消除极端值影响后土壤镍含量总体呈下降趋势。算术均值降幅小于中位值，反映出少数深度下降点位对算术均值的影响较为明显，进一步印证了总体态势以降低为主。

3.2 可变因素中理化性质对镍含量影响相对最大，但空间差异性被屏蔽

本研究发现，阳离子交换量、有机质含量与A层土壤镍含量呈正相关，且回归系数在各类可变因素中相对较大，说明土壤理化性质对镍的吸附与固定具有重要影响，这与其他学者研究结论一致。土壤胶体表面带负电荷，阳离子交换量越高，可交换性吸附位点越多，越易吸附重金属阳离子[59-60]；有机质可通过表面络合、离子交换和地表沉淀来增加土壤对重金属的吸附能力[61-64]。然而，在本研究采用地理加权回归分析的过程中，各驱动因素的局部作用特征未能充分体现，其原因主要包括以下几方面：首先，在区域尺度上，粤西雷州半岛显著的地质高背景强化了影响因素在该区域的作用效果，以理化性质因素为例，在进行单因素模型拟合时，即使以点位数据进行拟合，仅pH和阳离子交换量在该区域表现出较强解释力，其余因素的作用在高背景区极端效应下未能显著体现，导致空间差异性识别不足。其次，本研究所使用的自然与人为因素数据均引自统计年鉴，仅能获取市域尺度的统计均值，未能与点位尺度的镍含量精确匹配。以市域平均水平进行加权回归分析，虽可辨析不同因素间的整体影响力差异，但难以捕捉同一因素对镍含量影响的空间差异性。此外，理化性质中的pH，是单因素地理加权回归分析结果中影响力相对最大的因素，但在多因素综合建模过程中因共线性问题未能被纳入最优模型，这与单因素分析时发现的2022年珠三角入海口以西地区pH与土壤镍含量呈正相关的反常情况相印证，表明这些局部地区可能受到较其他地区更强的自然或人为干扰，pH的作用被削弱。但在单因素地理加权回归分析模型中，由于未能控制共线性干扰，所获得的局部R^2及回归系数可能存在一定程度的假阳性或假阴性风险。

3.3 土壤中的镍元素存在由表层向深层迁移的可能

本研究发现广东省背景值区域A层土壤镍含量自2018年以来总体呈下降趋势，其原因可能是镍元素由表层向深层迁移。研究表明，土壤中的镍元素会随水分向下迁移[17,65]，在酸性条件下较易淋失，导致表层含量降低[58]。广东省地处华南地区，水热条件较好，生物作用强烈，可能促进了镍元素在垂直剖面向下迁移的进程。后续可对深层土壤镍含量开展持续监测，进一步研究其在垂直方向的变化规律。

4 结论

（1）广东省背景值区域A层土壤镍含量总体处于较低水平，空间分布呈“中部低、四周高”的格局。高背景区主要集中于粤西雷州半岛，次高区分布于粤北山区及珠三角沿海局部地带。

（2）2022年广东省背景值区域A层土壤镍含量在原始数据尺度下，中位数、算术均值分别为13.0、17.6 mg·kg^{-1}，相较于2018年分别下降1.0、0.4 mg·kg^{-1}，几何均值为12.6 mg·kg^{-1}，相较于2018年上升1.5 mg·kg^{-1}；对数转换后均值下降幅度约为11%。

（3）不同成土母质与土地利用类型对A层土壤镍含量的影响不显著，而在主要土壤类型中，仅赤红壤A层镍含量呈显著上升（P<0.05）。

（4）在各类可变影响因子中，对A层土壤镍含量变化的影响力排序为理化性质>人为因素>自然因素。剔除共线性因子后，阳离子交换量为理化性质中影响最为显著的因子。当前阶段，人为活动尚未显著扰动背景值区域土壤镍含量，自然因子的整体贡献相对有限。

参考文献：

[1] NATASHA N, SHAHID M, KHALID S, et al. Influence of biochar on trace element uptake, toxicity and detoxification in plants and associated health risks: a critical review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(16): 2803-2843.

[2] YANG J J, MA Z J. Research progress on the effects of nickel on hormone secretion in the endocrine axis and on target organs[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 213: 112034.

[3] ZAMBELLI B, UVERSKY V N, CIURLI S. Nickel impact on human health: an intrinsic disorder perspective[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics*, 2016, 1864(12): 1714-1731.

[4] 国家环境保护局主持, 中国环境监测总站主编. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. Hosted by the State Environmental Protection Administration, edited by the China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.

[5] LIU D S, WANG X Q, NIE L S, et al. Nickel distribution in soils and its relationship with lithology, mineralization and geochemical landscape across the mainland of China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2025, 178: 106476.

[6] GLOAGUEN T V, PASSE J J. Importance of lithology in defining natural background concentrations of Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in sedimentary soils, northeastern Brazil[J]. *Chemosphere*, 2017, 186:31-42.

[7] DOS SANTOS L M R, GLOAGUEN T V, DE SOUZA FADIGAS F, et al. Metal accumulation in soils derived from volcano-sedimentary rocks, Rio Itapicuru Greenstone Belt, northeastern Brazil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602:1762-1774.

[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. CAI L M, MA J, ZHOU Y Z, et al. Spatial structure and distribution of Ni contents in agricultural soils in a typical area of the Pearl River Delta, China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(4):100-104.

[9] 杨国义, 罗薇, 张天彬, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中镍的含量分布特征[J]. 生态环境, 2007, 16(3):818-821. YANG G Y, LUO W, ZHANG T B, et al. The distribution of Ni contents in agricultural soils in the Pearl River Delta, China[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):818-821.

[10] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市近郊区土壤镍的空间结构及分布特征[J]. 地理学报, 2003, 58(3):470-476. ZHENG Y M, CHEN T B, CHEN H, et al. The spatial structure and distribution of Ni contents in soils of suburbs of Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3):470-476.

[11] 廖金凤. 海南省土壤中的镍[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1998, 37(增刊2):20-23. LIAO J F. Content of nickel in soils of Hainan Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1998, 37(Suppl 2):20-23.

[12] GALÁN E, FERNÁNDEZ-CALIANI J C, GONZÁLEZ I, et al. Influence of geological setting on geochemical baselines of trace elements in soils. Application to soils of south-west Spain[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, 98(3):89-106.

[13] 娄德波, 王登红, 肖克炎, 等. 中国镍矿预测类型及主要战略接续区[J]. 中国地质, 2014, 41(3):715-727. LOU D B, WANG D H, XIAO K Y, et al. Prediction types and main successive strategic resource base areas of Ni ore deposits in China[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3):715-727.

[14] 王岩, 王登红, 孙涛, 等. 中国镍矿成矿规律的量化研究与找矿方向探讨[J]. 地质学报, 2020, 94(1):217-240. WANG Y, WANG D H, SUN T, et al. A quantitative study of metallogenic regularity of nickel deposits in China and their prospecting outlook[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(1):217-240.

[15] 朱鑫, 汪实, 李婷婷. 雷州半岛土壤地球化学背景值研究[J]. 华南地质, 2021, 37(1):103-112. ZHU X, WANG S, LI T T. Study on geochemical background value of soils in the Leizhou Penisula[J]. *South China Geology*, 2021, 37(1):103-112.

[16] 关卉, 万洪富, 王冼民, 等. 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, 2006, 28(10):757-760. GUAN H, WAN H F, WANG X M, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in soil samples of Leizhou Peninsula[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2006, 28(10):757-760.

[17] 雷停, 孙传敏. 重金属镍的土壤污染及迁移转化[J]. 地球科学进展, 2012, 27(增刊1):359-361. LEI T, SUN C M. Soil pollution, migration and transformation of heavy metal nickel[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(Suppl 1):359-361.

[18] TIAN H Z, LU L, CHENG K, et al. Anthropogenic atmospheric nickel emissions and its distribution characteristics in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417/418:148-157.

[19] 丛艳国, 魏立华. 土壤环境重金属污染物来源的现状分析[J]. 2002(1):18-20. CONG Y G, WEI L H. Analysis of the sources of heavy metal pollutants in soil environment[J]. *Modernizing Agriculture*, 2002(1):18-20.

[20] 廖金凤. 电镀废水中铜锌铬镍对农业环境的影响[J]. 农村生态环境, 1999, 15(4):52-55. LIAO J F. Effect of Cu, Zn, Cr and Ni in electroplating wastewater on agricultural environment[J]. *Rural Eco-Environment*, 1999, 15(4):52-55.

[21] 黄爽, 张仁铎, 张家应, 等. 土壤理化性质对吸附重金属镉的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1):19-22. HUANG S, ZHANG R D, ZHANG J Y, et al. Effects of physical and chemical characteristics of soils on the adsorption of Cd[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(1):19-22.

[22] 余涛, 杨忠芳, 钟坚, 等. 土壤中重金属元素Pb、Cd地球化学行为影响因素研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5):67-73. YU T, YANG Z F, ZHONG J, et al. Factors affecting the geochemical behavior of heavy metal elements Pb and Cd in soil[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5):67-73.

[23] 谢忠雷, 杨佰玲, 包国章, 等. 茶园土壤不同形态镍的含量及其影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(4):599-604. XIE Z L, YANG B L, BAO G Z, et al. Fractionation and its affecting factors of nickel in tea garden soils[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(4):599-604.

[24] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 1999, 19(1):81-86. LIAO M, HUANG C Y, XIE Z M. Effect of pH on transport and transformation of cadmium in soil-water system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(1):81-86.

[25] 涂从. 土壤中活性镍变化的动力学及其应用[J]. 土壤学报, 1998, 35(1):49-54. TU C. Kinetics of active Ni changes in soils and its application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1):49-54.

[26] 王胜利, 武文飞, 南忠仁, 等. 绿洲区土壤镍的吸附解吸特性[J]. 干旱区研究, 2010, 27(6):825-831. WANG S L, WU W F, NAN Z R, et al. Study on sorption and desorption of nickel in soil samples collected from oases[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(6):825-831.

[27] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1):105-108. WANG K F, PENG N, WANG K R, et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1):105-108.

[28] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4):96-99. REN S R, SHAO Y C, GAO B Y, et al. Effects of long-term located fertilization on heavy-metal content of soil[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19

(4):96-99.

[29] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 广州郊区农业土壤重金属含量与土壤性质的关系[J]. 农村生态环境, 2004, 20(2):55-58. CHAI S W, WEN Y M, ZHANG Y N, et al. Relationship between heavy metals and property of agricultural soil in Guangzhou suburb[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(2):55-58.

[30] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. 土壤学报, 2001, 38(2):212-218. ZHANG Y L, SHEN Q R, JIANG Y. Effects of organic manure on the amelioration of Cd polluted soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2):212-218. .

[31] 古一帆, 何明, 李进玲, 等. 上海奉贤区土壤理化性质与重金属含量的关系[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2009, 27(6):601-605. GU Y F, HE M, LI J L, et al. Correlation between contents of heavy metals and physical-chemical properties of agricultural soils in Fengxian, Shanghai[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2009, 27(6):601-605.

[32] 深圳市市场监督管理局. 深圳市地方标准土壤环境背景值: DB4403/T 68—2020[M/OL]. 2022. https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed? id=A95D862B087E6D0AE05397BE0A0A. Shenzhen Market Supervision Administration Bureau. Shenzhen local standards soil background value: DB4403/T 68—2020D1D0[M/OL]. 2020. https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=A95D862B087E-6D0AE05397BE0A0A.

[33] 韶关市市场监督管理局. 韶关市地方标准土壤环境背景值: DB4402/T 08—2021[M/OL]. 2021. https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed? id=BD1625E750B08DEBE05397BE0A0AF637. Shaoguan Market Supervision and Administration Bureau. Shaoguan local standards soil background value: DB4402/T 08—2021[M/OL]. 2021. https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=BD162-5E750B08DEBE05397BE0A0AF637.

[34] 广东省标准化协会. 东莞市土壤环境背景值: T/GDBX 100—2025[M/OL]. 2025. https://www.spc.org.cn/online/447907a8f5a9df9d44-af4a6654645c21. html. Guangdong Standardization Association. Background value of soil environment in Dongguan City: T/GDBX 100—2025[M/OL]. 2025. https://www.spc.org.cn/online/447907a8f5-a9df9d44af4a6654645c21. html.

[35] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M]. 北京:科学出版社, 1993. Guangdong Provincial Soil Survey Office. Guangdong soil[M]. Beijing: Science Press, 1993.

[36] 广东省林业局. 2020年广东省林业统计分析报告[R]. 2020. https://lyj.gd.gov.cn/government/release/content/post_3350630.html. Guangdong Provincial Forestry Bureau. 2020 Guangdong provincial forestry statistical analysis report[R]. 2020. https://lyj. gd. gov. cn/government/release/content/post_3350630.html.

[37] 张山岭, 杨国义, 罗薇, 等. 广东省土壤无机元素背景值的变化趋势研究[J]. 土壤, 2012, 44(6):1009-1014. ZHANG S L, YANG G Y, LUO W, et al. Changes of background values of inorganic elements in soils of Guangdong Province[J]. *Soils*, 2012, 44(6):1009-1014.

[38] 广东省统计局. 广东统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://stats. gd. gov. cn/gdtjnj/content/post_4035145. html. Guangdong Provincial Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook[M/OL]. 2022. https://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/content/post_4035145.html.

[39] 广州市统计局. 广州统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://tjj.gz.gov.cn/datav/admin/home/www_nj/. Guangzhou Municipal Bureau of Statistics. Guangzhou statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://tjj.gz.gov.cn/datav/admin/home/www_nj/.

[40] 深圳市统计局. 深圳统计年鉴2022[M/OL]. 2023. https://tjj.sz.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/tjsj/tjnj/content/post_10390917.html. Shenzhen Municipal Bureau of Statistics. Shenzhen statistical yearbook 2022[M/OL]. 2023. https://tjj.sz.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/tjsj/tjnj/content/post_10390917.html.

[41] 珠海市统计局. 珠海市统计年鉴2022[M/OL]. 2023. https://tjj.zhuhai.gov.cn/tjsj/tjnj/content/post_3449170.html. Zhuhai Municipal Bureau of Statistics. Zhuhai statistical yearbook 2022[M/OL]. 2023. https://tjj.zhuhai.gov.cn/tjsj/tjnj/content/post_3449170.html.

[42] 佛山市统计局. 佛山市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.foshan.gov.cn/gzjg/stjj/tjnj_1110962/content/post_6571113.html. Foshan Municipal Bureau of Statistics. Foshan statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.foshan.gov.cn/gzjg/stjj/tjnj_1110962/content/post_6571113.html.

[43] 韶关市统计局. 韶关市统计年鉴2022[M/OL]. 2023. https://www.sg.gov.cn/sgtjj/gkmlpt/content/2/2356/post_2356520.html#6604. Shaoguan Municipal Bureau of Statistics. Shaoguan statistical yearbook 2022[M/OL]. 2023. https://www.sg.gov.cn/sgtjj/gkmlpt/content/2/2356/post_2356520.html#6604.

[44] 河源市统计局. 河源市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. http://www.heyuan.gov.cn/zjhy/hygk/hynj/index_2.html. Heyuan Municipal Bureau of Statistics. Heyuan statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. http://www.heyuan.gov.cn/zjhy/hygk/hynj/index_2.html.

[45] 梅州市统计局. 梅州市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.meizhou.gov.cn/attachment/0/143/143003/2425125.pdf. Meizhou Municipal Bureau of Statistics. Meizhou statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.meizhou.gov.cn/attachment/0/143/143003/2425125.pdf.

[46] 惠州市统计局. 惠州市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.huizhou.gov.cn/bmpd/hzstjj/tjnj/content/post_4852024.html. Huizhou Municipal Bureau of Statistics. Huizhou statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.huizhou.gov.cn/bmpd/hzstjj/tjnj/content/post_4852024.html.

[47] 汕尾市统计局. 汕尾市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.shanwei.gov.cn/attachment/0/41/41105/875123.pdf. Shanwei Municipal Bureau of Statistics. Shanwei statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.shanwei.gov.cn/attachment/0/41/41105/875123.pdf.

[48] 中山市统计局. 中山市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://stats.zs.gov.cn/gkmlpt/content/2/2184/post_2184419.html#405. Zhongshan Municipal Bureau of Statistics. Zhongshan statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://stats.zs.gov.cn/gkmlpt/content/2/2184/post_2184419.html#405.

[49] 江门市统计局. 江门市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.jiangmen.gov.cn/bmpd/jmstjj/tjsj/tjnj/content/post_2742922.html. Jiangmen Municipal Bureau of Statistics. Jiangmen statistical

yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.jiangmen.gov.cn/bmpd/jmstjj/tjsj/tjnj/content/post_2742922.html.

[50] 阳江市统计局. 阳江市统计年鉴2022[M/OL]. 2023. http://www.yangjiang.gov.cn/yjtjj/gkmlpt/content/0/682/post_682171.html#952. Yangjiang Municipal Bureau of Statistics. Yangjiang statistical yearbook 2022[M/OL]. 2023. http://www.yangjiang.gov.cn/yjtjj/gkmlpt/content/0/682/post_682171.html#952.

[51] 湛江市统计局. 湛江市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.zhanjiang.gov.cn/zjsfw/bmdh/tjxxw/zwgk/tjsjzl/tjnj/content/post_1702352.html. Zhanjiang Municipal Bureau of Statistics. Zhanjiang statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.zhanjiang.gov.cn/zjsfw/bmdh/tjxxw/zwgk/tjsjzl/tjnj/content/post_1702352.html.

[52] 茂名市统计局. 茂名2021年国民经济与社会发展统计公报[M/OL]. 2022. http://www.maoming.gov.cn/mmtjj/gkmlpt/content/1/1008/post_1008431.html#17108. Maoming Municipal Bureau of Statistics. Maoming statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. http://www.maoming.gov.cn/mmtjj/gkmlpt/content/1/1008/post_1008431.html#17108.

[53] 肇庆市统计局. 肇庆市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.zhaoqing.gov.cn/zqtjj/gkmlpt/content/2/2794/post_2794991.html#4470. Zhaoqing Municipal Bureau of Statistics. Zhaoqing statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.zhaoqing.gov.cn/zqtjj/gkmlpt/content/2/2794/post_2794991.html#4470.

[54] 清远市统计局. 清远市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.gdqy.gov.cn/xxgk/zzjg/zfjg/qystjj/tjxx/tjnj/content/post_1654783.html. Qingyuan Municipal Bureau of Statistics. Qingyuan statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.gdqy.gov.cn/xxgk/zzjg/zfjg/qystjj/tjxx/tjnj/content/post_1654783.html.

[55] 潮州市统计局. 潮州市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.chaozhou.gov.cn/zwgk/tjxx/tjnj/content/post_3825154.html. Chaozhou Municipal Bureau of Statistics. Chaozhou statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.chaozhou.gov.cn/zwgk/tjxx/tjnj/content/post_3825154.html.

[56] 揭阳市统计局. 揭阳市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. http://www.jieyang.gov.cn/tjj/tjsj/nj/content/post_735452.html. Jieyang Municipal Bureau of Statistics. Jieyang statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. http://www.jieyang.gov.cn/tjj/tjsj/nj/content/post_735452.html.

[57] 云浮市统计局. 云浮市统计年鉴2022[M/OL]. 2022. https://www.yunfu.gov.cn/tjj/zdht/sy/tjnj/content/post_1650780.html. Yunfu Municipal Bureau of Statistics. Yunfu statistical yearbook 2022[M/OL]. 2022. https://www.yunfu.gov.cn/tjj/zdht/sy/tjnj/content/post_1650780.html.

[58] 吴殿廷, 张东威. 中国表层土壤镍背景值分异规律的研究[J]. 中国环境监测, 1992, 8(3):49-53. WU D T, ZHANG D W. Study on the background value of nickel in surface soils of China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 1992, 8(3):49-53.

[59] 胡红青, 陈松, 李妍, 等. 几种土壤的基本理化性质与Cu^{2+}吸附的关系[J]. 生态环境, 2004, 13(4):544-545. HU H Q, CHEN S, LI Y, et al. Effects of physiochemical and surface characteristics of soils on copper adsorption[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4):544-545.

[60] 郭鹏然, 段太成, 刘欣丽, 等. 粘粒和阳离子交换量对土壤中钍形态分布的影响[J]. 环境化学, 2009, 28(1):76-79. GUO P R, DUAN T C, LIU X L, et al. Effects of soil clay and cation exchange capacity on fraction distribution of thorium in soil from Baotou areas [J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(1):76-79.

[61] PALANSOORIYA K N, SHAHEEN S M, CHEN S S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: a critical review[J]. *Environment International*, 2020, 134:105046.

[62] 梁以豪, 倪才英, 黎衍亮, 等. 稻田土壤溶解性有机质组成及其与Cd^{2+}络合过程研究[J]. 土壤学报, 2025, 62(1):153-164. LIANG Y H, NI C Y, LI Y L, et al. Research of paddy soil dissolved organic matter composition and its binding process with Cd^{2+}[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(1):153-164.

[63] 郭微, 戴九兰, 王仁卿. 溶解性有机质影响土壤吸附重金属的研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(3):761-768. GUO W, DAI J L, WANG R Q. Progress in the effect of dissolved organic matter on adsorption of heavy metals by soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3):761-768.

[64] 李俊莉, 宋华明. 土壤理化性质对重金属行为的影响分析[J]. 环境科学动态, 2003, 28(1):24-26. LI J L, SONG H M. The analysis of effect of soil physical chemistry charaoter on heavy metals[J]. *Environmental Science Trends*, 2003, 28(1):24-26.

[65] 南忠仁, 李吉均. 干旱区耕作土壤中重金属镉铅镍剖面分布及行为研究:以白银市区灰钙土为例[J]. 干旱区研究, 2000, 17(4):39-45. NAN Z R, LI J J. Study on the distribution and behavior of selected metals(Cd, Ni, Pb)in cultivated soil profile in arid zone(take Baiyin region as an example)[J]. *Arid Zone Research*, 2000, 17(4):39-45.

(责任编辑:潘淑君)