

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.34.004

引文格式: 周玉琴, 李文, 高迎秋, 王思梦, 肖婵华. 2025. 南昌市城区表层土壤铊元素含量分布规律及潜在风险评价[J]. 华东地质, 46(2): 268-279. (ZHOU Y Q, LI W, GAO Y Q, WANG S M, XIAO C H. 2025. Spatial distribution and potential risk assessment of thallium in surface soils from urban area of Nanchang City[J]. East China Geology, 46(2): 268-279.)

南昌市城区表层土壤铊元素含量分布规律 及潜在风险评价

周玉琴, 李文, 高迎秋, 王思梦, 肖婵华

(东华理工大学, 江西 南昌 330013)

摘要: 铊元素是一种毒性极强却鲜受关注的污染物质, 对环境与健康具有潜在威胁。文章以南昌市城区表层土壤为研究对象, 系统分析了铊元素的含量状况以及分布特征, 并采用单因子指数法、潜在生态风险指数法和健康风险评估法等方法对其进行风险评估。结果表明: ①南昌市城区表层土壤的铊元素含量为 0.11~0.92 mg/kg, 平均含量为 0.62 mg/kg, 低于江西省土壤背景值, 但高于中国表层土壤铊元素的平均含量; ②赣江东岸地区(老城区)表层土壤的铊元素平均含量略高于西岸地区, 赣江沿岸地区土壤的铊元素含量相对较高, 且具有向东西两侧呈轻微下降的趋势; ③单因子指数法、潜在生态风险法和健康风险评估法显示, 南昌市土壤中铊元素污染风险和生态风险较低, 但红谷滩区、东湖区等地区的个别点位存在一定的健康风险, 应加强对相关地区的铊污染监测工作。

关键词: 南昌市城区; 表层土壤; 铊元素; 潜在生态风险指数法; 健康风险评估

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2025)02-268-12

铊(Tl)是一种典型的剧毒元素, 有“元素周期表上最致命的金属之一”的称号。相较于镉、铜、铅和汞等重金属元素, 铊的毒性更为显著, 主要表现为神经毒性, 可导致肾脏、肝脏等多脏器官功能受损, 同时还存在致畸和致癌的潜在风险(鲁青庆, 2018; 伍建业, 2023)。研究表明, 铊经胃肠道吸收时, 对人体的急性中毒剂量为 6~40 mg/kg, 成人经胃肠道吸收的铊最小致死量为 12 mg/kg, 而 5~7.5 mg/kg 剂量的铊便能致使儿童死亡(李汉帆等, 2007)。此外, 铊元素还可以通过人体的皮肤和粘膜被吸收, 并在骨骼、肾脏甚至中枢神经中积累(段维霞等, 2019)。因此, 含铊化合物被世界卫生组织列为重点限制清单中的主要危险物质之一, 我国也将其列入优先控制的污染物名单(马军军和韩正昌, 2017; 赵文志等, 2024)。2022年, 我国生态环境部印发的《关于进一步加强重金

属污染防治的意见》中着重强调了铊污染的监测与防治工作; 2023年, 全国生态环境保护工作会议再次明确指出, 要突出加强对铊污染的排查及整治。

铊在土壤中的分布呈现不均一性, 世界土壤的铊元素含量平均值为 0.20 mg/kg (Fergusson, 1990), 而中国土壤铊元素含量平均值为 0.60 mg/kg (侯青叶等, 2020)。在自然成岩过程中, 铊更易在酸性岩石中富集, 酸性岩中铊元素的含量高于基性岩。例如, 全球花岗岩中铊元素含量的平均值(0.83 mg/kg)(何立斌等, 2005)普遍明显高于闪长岩(0.39 mg/kg)和玄武岩(0.2 mg/kg)(成永生等, 2024)。土壤和其他环境介质(如水系沉积物)中铊含量的异常还与富含铊的地质体风化和矿业活动有关(赵凤其, 2021; 陶春军等, 2023)。例如, 我国土壤铊地质高背景区与华南地区大量花岗岩体的出露范围高度吻合(田雷, 2009); 夏杰等(2020)

* 收稿日期: 2024-04-16 修订日期: 2024-08-29 责任编辑: 袁静

基金项目: 国家自然科学基金“罗布泊盐湖沉积中胶黄铁矿的形成保存机制及其环境意义(编号: 42167063)”项目资助。

第一作者简介: 周玉琴, 2000年生, 女, 硕士研究生, 主要从事污染物质监测研究工作。Email: 3045381573@qq.com。

通信作者简介: 李文, 1990年生, 男, 讲师, 博士, 主要从事环境变化与环境污染监测研究工作。Email: lw201960216@ecut.edu.cn。

发现, 广西贺州莲塘镇周边地区富含铊元素的黑色岩系风化后, 铊元素迁移至水体, 致使莲塘镇周边地下水中铊含量异常。电子、合金、玻璃制造和制药等产业活动, 尤其是矿产开采与冶炼, 是造成铊污染的最主要原因(常晋娜和瞿建国, 2005)。湖南湘江衡阳段、广东云浮市和广东北江水系等地均发生过含铊矿物开采或冶炼导致的铊污染事件(高博等, 2008; 刘敬勇, 2006; 王晨等, 2013; 程贤达等, 2022)。目前, 相较于矿区、河流水系等区域, 关于城市土壤中铊元素的研究与报道还相对较少。

基于 1:250 000 多目标区域地球化学调查数据统计结果, 江西省表层土壤中铊元素的环境背景值为 0.70 mg/kg, 明显高于全国土壤铊元素平均值 0.60 mg/kg(侯青叶等, 2020)。数据结果表明江西省土壤铊的环境容量较低, 需重点关注其潜在污染风险。赣江是江西省第一大河, 对江西省社会、经济和环境均具有重要影响。赣江上游的锦江和袁河分别在 2016 年 4 月和 2022 年 11 月发生过企业排放含铊废弃物导致的水体污染事件, 两次污染事件显示赣江流域存在一定的铊污染风险。南昌市作为江西省省会城市, 地处赣江下游, 已有研究表明其土壤中存在不同程度的汞、铅、铜、镉和镍等重金属污染(刘绍贵等, 2010; 唐志敏等, 2023), 但关于南昌市土壤铊元素含量及其污染风险的研究尚未见报道。因此, 本文以南昌市城区表层土壤样品为研究对象, 查明铊元素的分布特征, 并通过单因子指数法、潜在生态风险指数法和健康风险评估法对南昌城区环境安全开展风险预警研究, 为精准科学防治铊污染提供理论和技术支持。

1 研究区域概述

南昌市(115°27'~116°35'E, 28°09'~29°11'N)地处江西省中部偏北, 位于赣江和抚河下游, 北接鄱阳湖, 是江西省政治、经济和文化中心, 行政区划下辖东湖区、西湖区、青云谱区、青山湖区、新建区、红谷滩区、南昌县、安义县和进贤县, 总面积约 7 195 km², 总人口约 643.7 万。该市属于亚热带季风气候区, 年平均降水量 1 600 mm 左右, 年平均气温为 17~18 ℃。南昌市位于古扬子陆地的九岭隆起、丰城—萍乡凹陷与鄱阳湖断陷盆

地的交替过渡地带, 域内地形以平原为主, 东南地势平坦, 西北地势较高。西北部属于构造剥蚀的低山区, 而东南地区则为鄱阳湖及水系侵蚀堆积形成的平原区(吕保贵, 2013)。土壤类型以红壤为主, 城市用地类型主要有商业用地、工业用地、住宅用地和绿地等。在产业结构方面, 主要支柱型产业有汽车及零部件、光电光伏、大飞机及零部件、软件及服务外包、生物和新医药等。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

新建区、红谷滩区、东湖区、西湖区、青云谱区和青山湖区作为南昌市的主城区, 是人口与产业密集分布区域, 在这些区域进行采样并开展研究能够有效反映整个南昌地区表层土壤中铊元素的含量水平和风险特征。2023 年 6—7 月, 在上述区域沿主要交通干道采集绿化带内的表层土壤样品, 共计 100 个样品, 采样点分布如图 1 所示。采样时, 首先将土壤表层的植物与石块等杂物清除干净, 随后使用铲刀采集样品; 采样深度为 0~5 cm, 每个采样点的土壤均由多点混合而成。所有样品用聚乙烯样品袋装好带回实验室, 在室内经 40 ℃ 低温烘干后, 人工剔除样品中碎石和植物残渣, 采用玛瑙研钵将样品研磨至粉末状, 过 200 目筛。

将过筛的样品每份称取 0.5 g 于 Teflon 试管中, 用硝酸、盐酸、高氯酸和氢氟酸分 3 个阶段进行消解。首先加入硝酸和高氯酸进行预氧化, 随后加入氢氟酸于电热板上进行加热, 该阶段硅酸盐和硅铝酸盐与氢氟酸持续反应, 不会导致氢氟酸过快挥发。待样品完全分解后, 将溶液蒸发至近干, 去除残留的氢氟酸。残液用盐酸溶液稀释并定容, 再用电感耦合等离子体发射光谱仪进行分析。测试时采用国家一级标准物质(GBW07389、GBW07458 和 GBW07461)监控分析质量, 确保测量方法的精密度(相对偏差, RD<10%)和准确度(相对误差, RE<10%)。铊元素检测浓度范围为 0.02~1 000 μg/g。所有测试均在广州澳实矿物实验室完成。

2.2 污染评价方法

在土壤重金属污染的定量评价中, 最常用的数理统计方法有单因子指数法、内梅罗综合污染

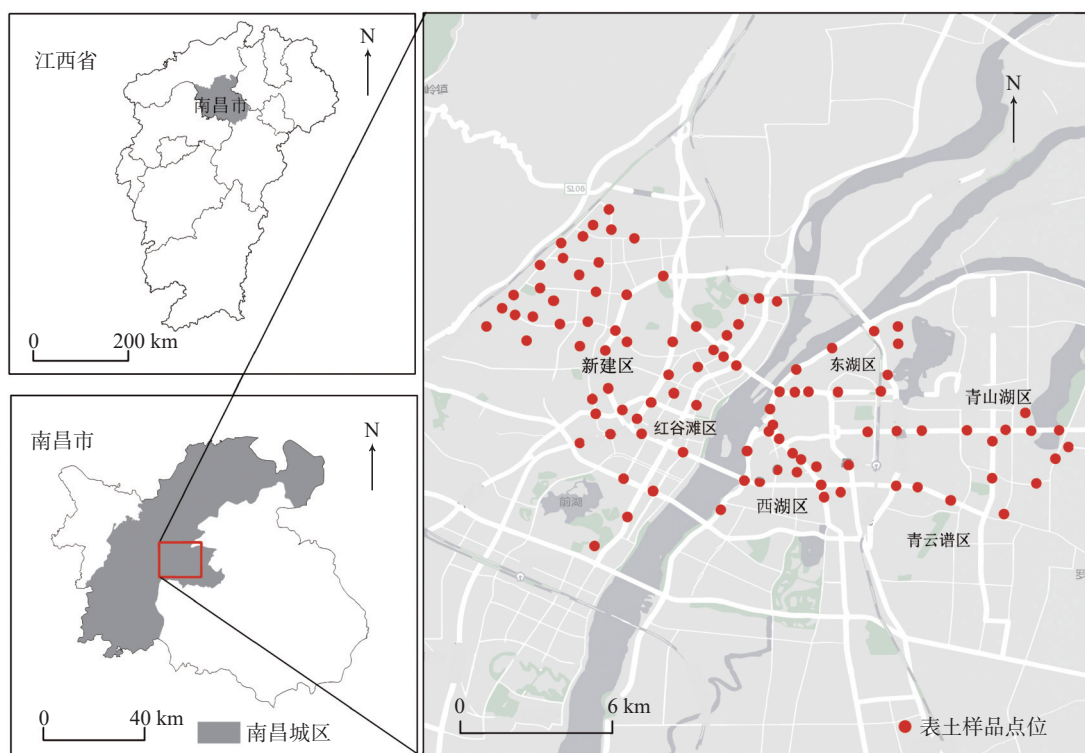


图1 南昌市表层土壤采样点分布图

Fig. 1 Distribution of surface soil sampling points in Nanchang City

指数法、地积累指数法和潜在生态危害指数法等, 这些方法在计算方式、参数选择和分级标准等方面各有优劣, 在实际研究中应结合研究区的具体情况选择适宜的评价方法(贾中民, 2020)。单因子污染指数法主要用于评估土壤样品中铊元素与背景水平的差异, 潜在生态风险法则在此基础上考虑了铊元素的毒性特征, 而健康风险评估法则综合考虑了铊元素在不同暴露途径下对不同年龄段人群的健康危害。本文综合运用单因子指数法、潜在生态风险法和健康风险评估法对南昌市表层土壤中铊元素的含量水平和潜在风险进行科学合理地分析, 为区域重金属污染防控提供科学依据。

2.2.1 单因子指数法

单因子指数法是以土壤元素背景值为评价标准, 对单个重金属元素在某地的污染程度进行评价(周长松等, 2015), 可直接反映土壤中重金属的污染情况(刘强等, 2021), 其计算公式如下:

$$C_f = \frac{C_i}{C_n}, \quad (1)$$

式中: C_i 为研究区土壤中某种重金属的实测含量值; C_n 为某种重金属元素在土壤中的背景值; C_f 为土壤中某重金属的单因子指数(高博等, 2008)。

本文 C_n 值选取江西省表层土壤铊元素的平均值 0.70 mg/kg (侯青叶等, 2020)。

2.2.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是一种融合环境化学和生态毒理学等理论的定量评估方法, 该方法能够系统地划分出重金属的潜在危害程度, 是目前污染物生态风险研究中应用最为广泛的评价方法之一(Hakanson, 1980), 其计算公式如下:

$$E_r = T_r \times C_f, \quad (2)$$

式中: E_r 值为某单一污染物的风险程度, 从低到高分 5 个等级(表 1); T_r 为重金属毒性响应系数。

表1 土壤单元素 C_f 和 E_r 等级划分(Hakanson, 1980; 何茂粉和张成丽, 2019)

Table 1 Grading of single element C_f and E_r in soil(Hakanson, 1980; He and Zhang, 2019)

评价范围	污染程度	评价范围	风险程度
$C_f < 1$	没有污染	$E_r < 40$	轻微生态风险
$1 \leq C_f < 3$	轻度污染	$40 \leq E_r < 80$	中等生态风险
$3 \leq C_f < 6$	较高污染	$80 \leq E_r < 120$	较高生态风险
$C_f \geq 6$	高污染	$120 \leq E_r < 320$	高生态风险
—	—	$E_r \geq 320$	极高生态风险

研究表明, 铊与砷具有相似的毒性特征。Liu et al.(2018)综合考虑了铊元素与砷元素的相对丰度与释放效应, 认为铊与砷具有相近的毒性系数。砷的毒性系数 Sr^{As} 为 10, 毒性响应系数 $T_r^{As}=S_r^{As} \times 1=10 \times 1=10$ (马建华等, 2020)。鉴于铊与砷的毒性相似性, 本研究在潜在生态风险指数计算中, 将公式(2)中的铊的毒性响应系数 T_r 取值为 10。

2.2.3 健康风险评估

健康风险评估是用于量化人类暴露于某种重金属环境下可能受到的健康损害程度的方法(US EPA, 2002)。研究发现, 土壤中的重金属主要通过经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触 3 种途径进入人体(US EPA, 2002; 李如忠等, 2012)。这 3 种暴露途径的人体暴露量(ADD)计算公式如下(各公式参数含义见表 2):

经口摄入途径的长期日暴露量:

$$ADD_{ing} = \frac{IngR \times CF \times EF_{ing} \times ED_{ing}}{BW \times AT} \times C_{soil} \quad (3)$$

经呼吸吸入途径的长期日暴露量:

$$ADD_{inh} = \frac{IngR \times EF_{inh} \times ED_{inh}}{PEF \times BW \times AT} \times C_{soil} \quad (4)$$

经皮肤直接接触途径的长期日暴露量:

$$ADD_{derm} = \frac{SA \times AF \times ABS \times CF \times EF_{derm} \times ED_{derm}}{BW \times AT} \times C_{soil} \quad (5)$$

非致癌风险的评估一般采用危害商(HQ)来衡量, 该指标通过量化人体暴露量与非致癌物参考剂量(RfD)的比值, 评估污染物对人体健康的潜在风险。计算公式如下:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad (6)$$

当 $HQ < 1$ 时, 认为人体因长期接触相关金属元素引发非致癌健康损害的风险较低; 当 $HQ > 1$ 时, 则认为存在健康风险, 应引起人们的警戒(US EPA, 2002)。

需要说明的是, 该健康风险评估方法是美国环境保护局为“超级基金场地”(即美国联邦政府认定的需长期治理的高污染地块)制定土壤筛选标准时的补充指南, 该方法因适用场景与城市土壤存在差异, 在直接应用于城市土壤有害重金属健康风险评估时存在局限性。然而, 已有研究表明, 该方法在评价城市土壤健康风险水平、分析污染物质对成人和儿童两类人群的影响差异方面具有一定参考价值(李如忠等, 2012; 刘福田等, 2021), 尤其是考虑到了对儿童健康风险的影响。

表2 非致癌风险健康评价暴露参数(US EPA, 2002)

Table 2 Exposure parameters for assessing non-carcinogenic health risk(US EPA, 2002)

参数	单位	含义	取值(成人)	取值(儿童)
C_{soil}	mg/kg	土壤中元素的实测含量	—	—
IngR	mg/d	土壤摄入率	100	200
$EF_{ing}=EF_{inh}=EF_{derm}$	d/a	暴露频率	350	350
$ED_{ing}=ED_{inh}=ED_{derm}$	a	暴露持续时间	24	6
BW	kg	平均体重	60	15
AT	h	平均暴露时间	365×24	365×24
CF	kg/mg	转换系数	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶
InhR	m ³ /d	呼吸速率	20	7.6
PEF	m ³ /kg	颗粒物排放因子	1.36×10 ⁹	1.36×10 ⁹
SA	cm ²	皮肤暴露面积	5 700	200
AF	mg/cm ²	皮肤黏着度	0.07	0.2
ABS	无量纲	皮肤吸收因子	0.001	0.001
RfD _{ing}	mg/(kg/d)	污染元素的参考剂量	8.00×10 ⁻⁵	8.00×10 ⁻⁵
RfD _{inh}	mg/(kg/d)	污染元素的参考剂量	8.00×10 ⁻⁵	8.00×10 ⁻⁵
RfD _{derm}	mg/(kg/d)	污染元素的参考剂量	8.00×10 ⁻⁵	8.00×10 ⁻⁵

因此,本文选择该方法开展南昌市表层土壤铊元素的健康风险评价工作。

3 评价结果

3.1 南昌城区表层土壤铊元素含量及其空间分布特征

如表3所示,南昌市表层土壤中铊元素含量

为 0.11~0.92 mg/kg, 平均值为 0.62 mg/kg, 该平均值低于江西省《建设用地土壤污染风险管控标准》中第一类用地的标准限值(0.87 mg/kg)和江西省表层土壤铊元素平均值(0.70 mg/kg), 但高于中国表层土壤铊元素平均值(0.60 mg/kg)(侯青叶等, 2020)。从空间分布来看(图2), 赣江东岸地区表层土壤中铊元素平均含量(0.65 mg/kg)略高于赣江西岸(0.59 mg/kg)。与江西省土壤铊元素背景

表3 南昌市城区表层土壤铊元素含量统计结果
Table 3 Statistics of thallium content of surface soils in Nanchang City

地区	样品数/个	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	超过背景值样品个数(比例)
整个研究区	100	0.11	0.92	0.62	0.21	0.19	18(18%)
研究区东部(赣江东岸)	45	0.36	0.92	0.65	0.10	0.15	10(22%)
研究区西部(赣江西岸)	55	0.11	0.86	0.59	0.13	0.22	8(14%)
青云谱区	6	0.36	0.92	0.63	0.19	0.30	1(16%)
新建区	33	0.11	0.76	0.53	0.11	0.20	1 (3%)
西湖区	13	0.50	0.74	0.63	0.06	0.10	1(7%)
东湖区	9	0.54	0.81	0.65	0.09	0.13	2(22%)
红谷滩区	22	0.50	0.86	0.66	0.11	0.17	7(31%)
青山湖区	17	0.43	0.84	0.65	0.09	0.14	6(35%)

备注：含量单位为mg/kg。

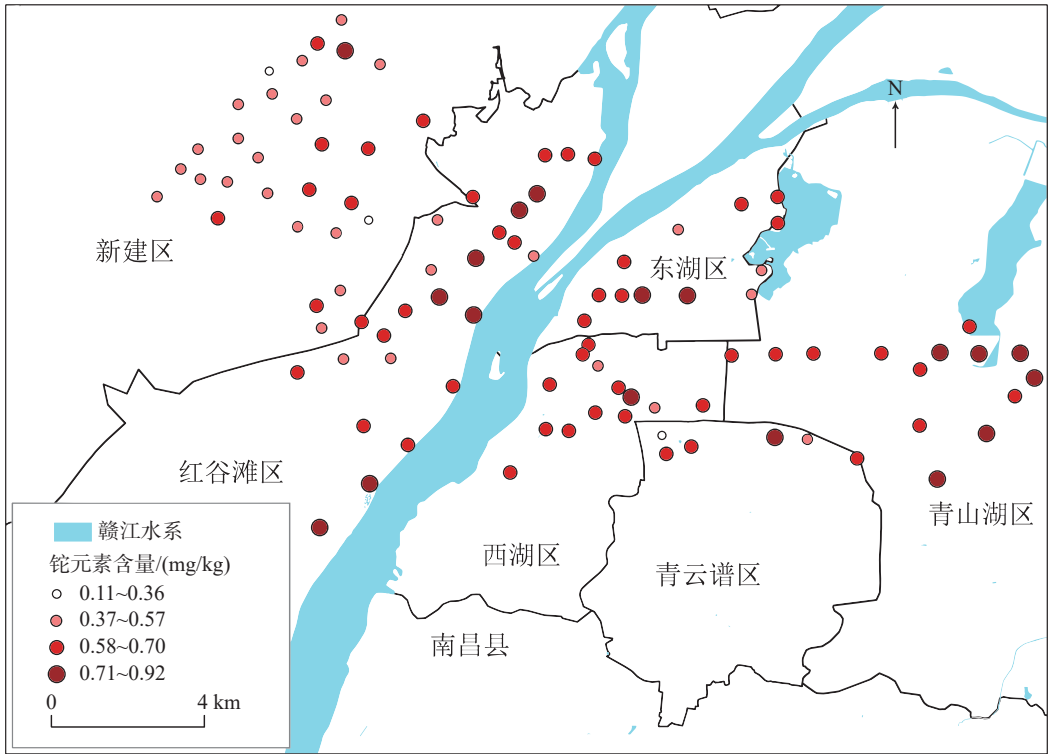


图2 南昌市表层土壤铊元素含量空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution of thallium content in surface soil of Nanchang City

值相比,赣江东岸和西岸样品中铊元素含量超过背景值的比例分别为 22% 和 8%。此外,赣江西岸土壤中的铊含量相比赣江东岸具有更大的变异系数,表明赣江西岸地区土壤中铊元素的含量具有较大的空间差异性,而东岸不同采样点间的铊含量差异相对较小。

南昌市不同行政区表层土壤中铊元素含量平均值由高到低依次为:红谷滩区(0.66 mg/kg)、东湖区与青山湖区(均为 0.65 mg/kg)、西湖区与青云谱区(均为 0.63 mg/kg)以及新建区(0.53 mg/kg)。各行政区表层土壤中铊元素含量超过江西省土壤铊元素背景值的比例存在明显梯度,由大到小依次为:青山湖区、红谷滩区、东湖区、青云谱区、西湖区、新建区。

3.2 污染水平评价与健康风险评估

南昌市土壤中铊元素的 C_f 值为 0.15~1.31, 平均值为 0.88, 其中 C_f 值>1(存在轻度污染)的样品数占全部样品数的 18%。潜在生态风险指数(E_r)值为 1.57~13.14, 平均值达到 8.76, 整体上生态风险较低。单因子污染指数和潜在生态风险指数的空间分布与含量变化相对一致, 表现为赣江东岸略高于赣江西岸(图 3(a), 图 3(b)), 赣江东岸地区样品的 C_f 值为 0.51~1.31(平均值为 0.92), 赣

江西岸地区样品的 C_f 值为 0.16~1.23(平均值为 0.84); 赣江东岸地区 E_r 值为 5.14~13.14(平均值为 9.21), 赣江西岸地区 E_r 值为 1.57~12.28(平均值为 8.4)。全市各区中单因子指数平均值最高的为红谷滩区($C_f=0.95$), 随后依次为青山湖区、东湖区、青云谱区、西湖区和新建区。

健康风险评估结果显示, 南昌市土壤中铊元素经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触 3 种途径的非致癌风险系数(HQ)的平均值和中位数均远<1, 表明该地区土壤中铊元素对成人和儿童均没有明显的非致癌风险。在 3 种暴露途径中, 经口摄入途径的风险最高(成人 HQ 值为 0.012, 儿童 HQ 值为 0.092), 其次为皮肤直接接触途径(成人 HQ 值为 4.9×10^{-5} , 儿童 HQ 值为 2.8×10^{-4})和呼吸吸入途径(成人 HQ 值为 9.1×10^{-6} , 儿童 HQ 值为 7.3×10^{-5})(表 4)。非致癌风险指数的空间分布特征(图 4(a)—4(d))与土壤铊元素含量和单因子指数的分布一致, 说明表层土壤铊元素含量的高低直接影响了该区域土壤铊元素的非致癌健康风险水平。值得注意的是, 南昌市城区表层土壤铊元素对儿童的健康风险明显高于成人, 约为成人风险水平的 8 倍, 这与刘福田等(2021)针对中国西南“三江”流域中浅层土壤铊元素的非致癌风险

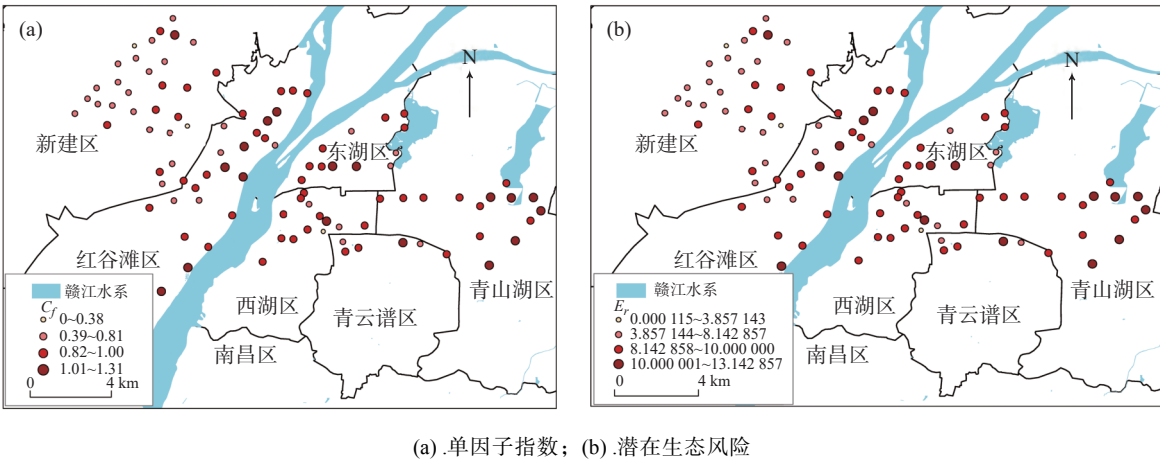


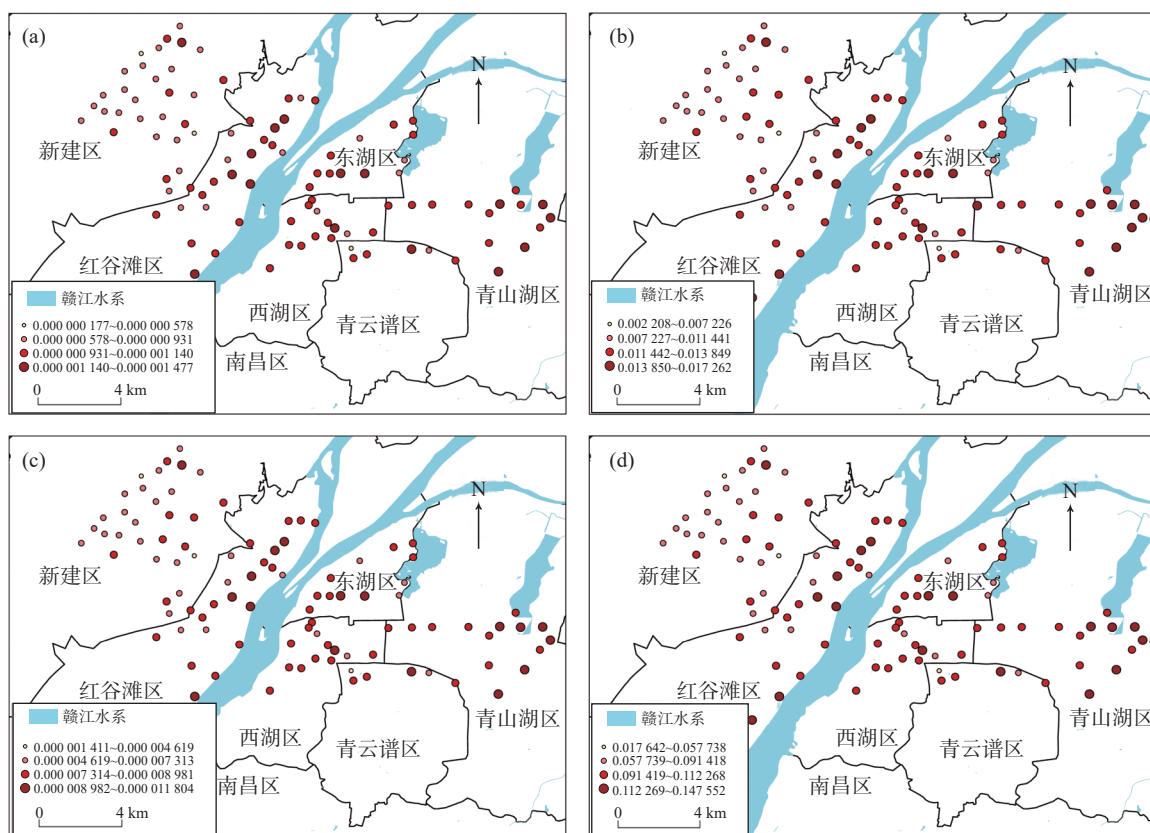
图3 南昌市表层土壤铊元素污染评价参数

Fig. 3 Pollution evaluation parameters of thallium in surface soil of Nanchang City

表4 南昌市表层土壤中铊元素成人/儿童 ADD 与 HQ 统计数据(平均值)

Table 4 Statistics(average value)of adult/child ADD and HQ of thallium of surface soils from Nanchang City

	成人口	成人呼吸	成人皮肤	儿童口	儿童呼吸	儿童皮肤
ADD	4.71×10^{-6}	7.30×10^{-10}	3.96×10^{-9}	7.94×10^{-6}	5.84×10^{-9}	2.22×10^{-8}
HQ	1.22×10^{-2}	9.12×10^{-6}	4.95×10^{-5}	9.92×10^{-2}	7.30×10^{-5}	2.78×10^{-4}



(a).成人 ADD; (b).成人 HQ; (c).儿童 ADD; (d).儿童 HQ

图4 南昌市表层土壤铊元素成人/儿童 HQ 和 ADD 空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of adult/child HQ and ADD of thallium in surface soil of Nanchang City

评估结果相似。这一结果可能与儿童身体组织器官尚未发育完全,尤其是肝肾等代谢器官的解毒、排泄功能较弱有关(陶春军等,2023)。

4 分析与讨论

土壤中重金属元素的来源主要包括自然风化和人类活动输入两种途径。通常情况下,若土壤样品中重金属元素含量低于背景值,则指示其主要来自于自然风化过程;若高于背景值,则可能存在人类活动的影响。本研究结果显示,南昌市表层土壤铊元素平均含量(0.62 mg/kg)低于江西省表层土壤铊元素含量平均值(0.70 mg/kg)(侯青叶等,2020),也低于加拿大土壤标准以及瑞士农业土壤标准中规定的铊最大允许浓度(1.00 mg/kg)(高博等,2008)。南昌市表层土壤中较低的铊元素含量以及健康风险表明绝大多数采样点的铊元素含量处于自然本底状态(来源于自然过程)。然而,个别点位铊元素含量超过背景值,指示局部区

域存在人类活动的影响。其中,铊污染程度相对较高($C_r \geq 1.2$)的点位分别位于青云谱区和红谷滩区。

污染物的空间变化趋势和空间异质性特征与污染源分布、污染物质传输路径等密切相关,对于污染源溯源具有指示意义(赵恒谦等,2023;于飒等,2021;郗海满等,2017;黄炎等,2020)。南昌市表层土壤铊元素含量的空间变化特征也指示部分区域存在人类活动的影响。南昌市最显著的自然地理空间特征为:以赣江为界,东西两岸地质地貌、土壤条件等差异明显。研究结果显示,南昌市赣江东岸地区土壤铊元素含量略高于赣江西岸地区,这与以往研究中南昌市土壤重金属含量的空间分布特征相似(唐春花等,2005);此外,在赣江东西两岸地区均呈现近江区域铊元素含量略高、向东西两侧轻微下降的趋势。基于以上结果,推测南昌市表层土壤铊元素含量空间变化趋势可能与人类活动有关。

以赣江为界,东西两岸经济和社会发展历程

不同。2000年前,南昌市的人口、经济和产业重心分布在赣江东岸地区。2000年后,南昌市重点开发赣江西岸的红谷滩区(邓康, 2021)。具体来看,赣江西岸地区铊元素随着距赣江距离的增加呈现下降趋势,如图5所示。赣江西岸铊含量高值区位于红谷滩区,主要集中在凤凰中大道与世贸路的十字交汇路口。红谷滩区是南昌市目前人口密度最高、经济最发达的区域之一,主要用地类型为商业用地和交通用地;凤凰中大道是红谷滩区交通密集、车流量最大的主干道之一。扬尘、燃煤排放、工业燃放和汽车尾气等均会造成铊元素污染(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1992),该区域铊污染程度相对较高可能

与汽车尾气排放、扬尘和燃料燃烧等有关。赣江东岸地区(老城区)表层土壤中铊元素含量相对略高,并向东呈现轻微下降趋势。东岸的青云谱区铊元素含量较高点位于解放西路和洪都南大道的交叉路口附近,周边主要为住宅区和交通用地,交通运输、燃料燃烧等人为活动的强度和频率较高。青山湖区铊元素含量较高点位于艾溪湖南部地区附近,对应于图5黑色实心点表示的集中连片区域。通常,临近公园绿地区域的土壤重金属污染较轻,但艾溪湖南部地区整体上铊元素含量较高,这可能与艾溪湖南部地区在2015年之前分布有漂染厂、化工厂等作坊式企业和猪、畜禽、水产等养殖场地有关。

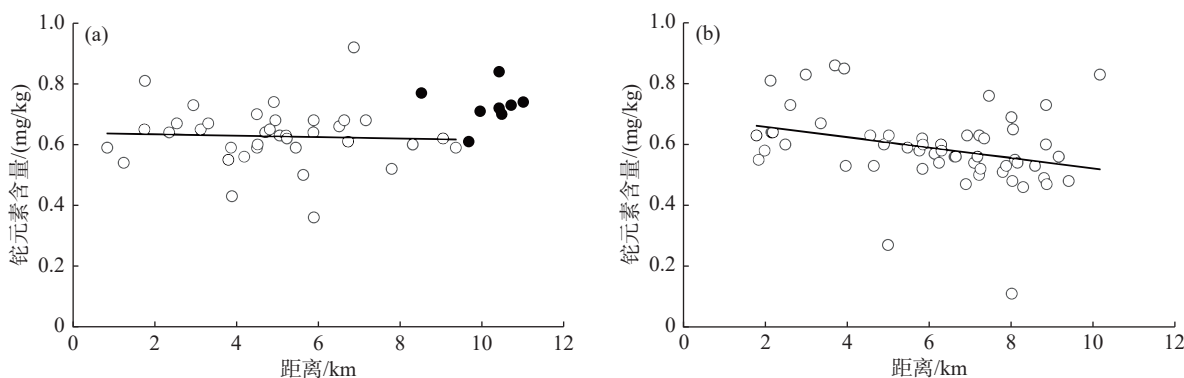


图5 南昌市赣江东岸(a)、西岸(b)地区铊元素含量与采样点至赣江距离的关系(黑色实心点位为艾溪湖南岸区域样点)
Fig. 5 Relation between the thallium content in the east bank (a) and west bank (b) of Nanchang's Gan River and the sampling distances to the River (black solid dots represent sampling points in the area south to Aixi Lake)

5 结论

(1)南昌市表层土壤铊元素含量为0.11~0.92 mg/kg,平均含量为0.62 mg/kg,低于江西省土壤背景值,但高于中国表层土壤中铊元素的平均值。

(2)潜在生态风险指数和健康风险评估显示,南昌市土壤铊元素的污染风险和健康风险均较低,但红谷滩区、东湖区等地的个别点位存在一定的健康风险。

(3)空间分布上,赣江东岸地区(老城区)表层土壤铊元素的平均含量略高于西岸地区;赣江沿岸地区土壤铊元素含量略高,向东西两侧呈轻微下降趋势。铊元素含量的空间变化与城市发展历程和社会经济中心的迁移高度吻合,印证了人类活动与土壤铊元素空间分布的显著相关性。

References

- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. 1992. Toxicological profile for thallium[M]. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- CHANG J N, QU J G. 2005. Heavy metal pollution in water body: ecological effects and biological monitoring[J]. Sichuan Environment, 24(4): 29-33 (in Chinese with English abstract).
- CHENG X D, SUN J W, JIA X, SHANG L N, ZHANG L, SUN Y K. 2022. Pollution and source apportionment of heavy metals in the farmland soils of the gold mining area in Tantou Basin, western Henan metallogenic belt[J]. East China Geology, 43(3): 313-323(in Chinese with English abstract).
- CHENG Y S, WANG D P, HUANG K X, ZHOU Y, ZENG D X, LI X Y, ZHANG Z W. 2024. Research status and devel-

- opment trend of causes of thallium pollution in surface water and soil environment[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 34(6): 2043-2058 (in Chinese with English abstract).
- DENG K. 2021. Study on the spatial and temporal evolution characteristics of urban morphology-water system relationship in Nanchang city and its affecting factors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- DUAN W X, SONG Y B, ZHOU Q. 2019. Research progress on adverse impacts of thallium on ecological environment and human health[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 36(9): 884-890 (in Chinese with English abstract).
- FERGUSON J E. 1990. The heavy elements: chemistry, environmental impact, and health effects[M]. New York: Pergamon Press, 614.
- GAO B, SUN K, REN M Z, LIANG X R, PENG P A, SHENG G Y, FU J M. 2008. Ecological risk assessment of thallium pollution in the surface sediment of Beijiang River[J]. Ecology and Environment, 17(2): 528-532 (in Chinese with English abstract).
- HAKANSON L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. [Water Research](#), 14(8): 975-1001.
- HE L B, SUN W Q, XIAO T F. 2005. Distribution and occurring forms of thallium and its potential damage to the environments[J]. Acta Mineralogica Sinica, 25(3): 230-236 (in Chinese with English abstract).
- HE M F, ZHANG C L. 2019. Thallium content analysis in Xinmi Mine area and its environmental risk assessment[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 40(5): 32-37 (in Chinese with English abstract).
- HEIM M, WAPPELHORST O, MARKERT B. 2002. Thallium in terrestrial environments-occurrence and effects[J]. [Eco-toxicology](#), 11(5): 369-377.
- HUANG Y, CHEN G G, LI X P. 2020. Discussion on the relationship between Wuyishan tea quality and geochemistry background characteristics[J]. East China Geology, 41(2): 166-176 (in Chinese with English abstract).
- HOU Q Y, YANG Z F, YU T, XIA X Q, CHENG H X, ZHOU G H. 2020. Soil geochemical dataset of China[M]. Beijing: Geology Press (in Chinese).
- JIA Z M. 2020. Characteristics, source apportionment, and ecological health risk assessment of soil heavy metals contamination in Northwest Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University (in Chinese with English abstract).
- LI R Z, PAN C R, CHEN J, JIANG Y M, DING G Z. 2012. Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling city[J]. China Environmental Science, 32(12): 2261-2270 (in Chinese with English abstract).
- LI H F, ZHU J R, FU J. 2007. The toxicity of thallium and its harm to human health[J]. Chinese Journal of Public Health Management, 23(1): 77-79 (in Chinese).
- LIU J Y. 2006. Application of element and lead isotope tracing to the migration of thallium in soil from Yunfu pyrite mine[D]. Guangzhou: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Institute of Geochemistry (in Chinese with English abstract).
- LIU F T, WANG X Q, CHI Q H. 2021. Spatial variation and health risk assessment of thallium in floodplain soil in "Three Rivers" regions of southwest China[J]. China Environmental Science, 41(4): 1765-1777 (in Chinese with English abstract).
- LIU Y X, WANG Q, ZHUANG W, YUAN Y L, YUAN Y N, JIAO K Q, WANG M T, CHEN Q. 2018. Calculation of thallium's toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index: a case study[J]. [Chemosphere](#), 194: 562-569.
- LIU Q, XIANG L H, CHENG Y, WU C, FANG T. 2021. Distribution characteristics and risk assessment of the heavy metals in agricultural land along the Yangtze River in the eastern suburbs of Nanjing city[J]. East China Geology, 42(1): 37-45 (in Chinese with English abstract).
- LIU S G, ZHANG T L, WANG X X, PAN J J. 2010. Heavy metal pollution characteristics of topsoil in suburban areas—a case study of Nanchang city[J]. Chinese Journal of Soil Science, 41(2): 463-466 (in Chinese with English abstract).
- LU Q Q. 2018. Graphite furnace atomic absorption spectrometry for determination of thallium in lead and zinc melted industry waste water[J]. Hunan Nonferrous Metals, 34(1): 75-77, 80 (in Chinese with English abstract).
- Lü B G. 2013. Ecological system health evaluation of urban wetlands in Nanchang city[D]. Nanchang: Nanchang University (in Chinese with English abstract).
- MA J J, HAN Z C. 2017. Status and progress of treating thallium-containing wastewater[J]. Environment and Sustainable Development, 42(5): 65-67 (in Chinese with English abstract).
- MA J H, HAN C X, JIANG Y L. 2020. Some problems in the application of potential ecological risk index[J]. Geographical Research, 39(6): 1233-1241 (in Chinese with English abstract).
- QIE H M, WEN B Y, WANG J Q, ZHOU Q Q, LIU B Q.

2017. Safety evaluation of heavy metal contents in selenium-rich soil in the Zishan area, Ganzhou, Jiangxi Province[J]. East China Geology, 38(3): 234-240(in Chinese with English abstract).
- TANG C H, FENG C H, MA Y L. 2005. Study on current situation of heavy metal contamination in soils of Nanchang city proper[C]//JIANGSU GEOLOGICAL SOCIETY. Earth Science and Social Sustainable Development—Collection of Papers from the 2005 East China Six Provinces and One City Geoscience and Technology Forum. Wuhan: China University of Geosciences Press, 5 (in Chinese).
- TANG Z M, ZHANG X D, ZHANG M, ZHOU M, TIAN F J, WANG S X, MA Q S, WANG C, ZHANG J, NIU X N, ZONG L L, HUANG D L. 2023. Geochemical characteristics of soil elements in Xin'an River Basin: constraints from rock formation types[J]. East China Geology, 44(2): 172-185(in Chinese with English abstract).
- TAO C J, LI M H, MA M H, ZHANG X R, DU G Q, LIANG H X. 2023. Ecological risk assessment of heavy metals in soil-rice in a typical selenium-rich area of southern Anhui Province[J]. East China Geology, 44(2): 160-171(in Chinese with English abstract).
- TIAN L. 2009. Geochemical characteristics of thallium in South China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- US EPA. 2002. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites[R]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, U. S. Environmental Protection Agency.
- WANG C, ZENG X Y, YU Z Q, SHENG G Y, FU J M. 2013. Distribution and risk assessment of thallium and other metals in sediments from Hengyang Section of Xiangjiang River[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 8(1): 16-22 (in Chinese with English abstract).
- WU J Y. 2023. Research on the typical heavy metals control in situ and biological environment improvement in mercury thallium mine waste[D]. Guiyang: Guizhou University (in Chinese with English abstract).
- XIA J, HU J L, LI K, ZHAO W Q, LIU F, ZHANG K, CHENG S B, CUI S, LIU B. 2020. Analysis of thallium anomaly in groundwater around Liantang Town, Hezhou, Guangxi[J]. South China Geology, 36(3): 263-269 (in Chinese with English abstract).
- YU F, WANG W, YU Y, WANG D H, LIU S B, GAO J Q, LÜ B T, LIU L J. 2021. Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from Jiulong Li-Be Mining Area, Western Sichuan Province, China[J]. Rock and Mineral Analysis, 40(3): 408-424(in Chinese with English abstract).
- ZHAO F Q. 2021. Mineralogical constraint on thallium mobility and transformation under supergenic conditions in Lanmuchang mercury-thallium mine, Xingren, Guizhou province, China[D]. Guiyang: Guizhou University (in Chinese with English abstract).
- ZHAO H Q, CHANG R Q, JIN Q, WU Y H, WANG X F, MA H C, LI M Y, FU H C. 2023. Spatial analysis and risk assessment of soil heavy metal pollution in the Xishimen iron mining area of Hebei province[J]. Rock and Mineral Analysis, 42(2): 371-382 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO W Z, XIE X, ZHANG B B, ZHANG J T, HE T. 2024. Application of deep eutectic solvent extraction in eco-geological sample analysis[J]. East China Geology, 45(1): 78-87(in Chinese with English abstract).
- ZHOU C S, ZOU S Z, LI L J, SHEN H Y. 2015. Comparison of evaluation methods for soil heavy metals contamination[J]. Earth and Environment, 43(6): 709-713 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常晋娜, 瞿建国. 2005. 水体重金属污染的生态效应及生物监测[J]. 四川环境, 24(4): 29-33.
- 程贤达, 孙建伟, 贾煦, 商连南, 张龙, 孙亚柯. 2022. 豫西成矿带潭头盆地金矿区农田土壤重金属污染及来源解析[J]. 华东地质, 43(3): 313-323.
- 成永生, 王丹平, 黄宽心, 周瑶, 曾德兴, 李向阳, 张泽文. 2024. 表生水土环境铊污染成因研究现状与发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 34(6): 2043-2058.
- 邓康. 2021. 南昌城水关系时空演变特征及其影响因素研究[D]. 武汉: 华中科技大学.
- 段维霞, 宋云波, 周取. 2019. 铊对生态环境和人体健康危害的研究进展[J]. 环境与职业医学, 36(9): 884-890.
- 高博, 孙可, 任明忠, 梁细荣, 彭平安, 盛国英, 傅家谟. 2008. 北江表层沉积物中铊污染的生态风险[J]. 生态环境, 17(2): 528-532.
- 何立斌, 孙伟清, 肖唐付. 2005. 铊的分布、存在形式与环境影响[J]. 矿物学报, 25(3): 230-236.
- 何茂粉, 张成丽. 2019. 新密市矿区铊含量分析及其环境风险评估[J]. 有色金属材料与工程, 40(5): 32-37.
- 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 夏学齐, 成杭新, 周国华. 2020. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社.
- 黄炎, 陈国光, 李雪平. 2020. 武夷山茶叶品质与土壤地球化学背景特征关系探讨[J]. 华东地质, 41(2): 166-176.

- 贾中民. 2020. 渝西北土壤重金属污染特征、源解析与健康风险评价[D]. 重庆: 西南大学.
- 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 姜艳敏, 丁贵珍. 2012. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 32(12): 2261-2270.
- 李汉帆, 朱建如, 付洁. 2007. 铊的毒性及对人体的危害[J]. 中国公共卫生管理, 23(1): 77-79.
- 刘敬勇. 2006. 云浮硫铁矿土壤中铊迁移行为的元素—铅同位素示踪研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所).
- 刘福田, 王学求, 迟清华. 2021. 中国西南“三江”流域区土壤铊空间分布及健康风险评估[J]. 中国环境科学, 41(4): 1765-1777.
- 刘强, 项立辉, 程瑜, 吴灿, 方涛. 2021. 南京东郊沿江地区农用地土壤重金属分布特征及风险性评价[J]. 华东地质, 42(1): 37-45.
- 刘绍贵, 张桃林, 王兴祥, 潘剑君. 2010. 南昌市城郊表层土壤重金属污染特征研究[J]. 土壤通报, 41(2): 463-466.
- 鲁青庆. 2018. 石墨炉原子吸收法测定有色冶炼环境水样中痕量铊[J]. 湖南有色金属, 34(1): 75-77, 80.
- 吕宝贵. 2013. 南昌城市湿地生态系统健康评价[D]. 南昌: 南昌大学.
- 马军军, 韩正昌. 2017. 含铊污染废水处理技术的现状及研究[J]. 环境与可持续发展, 42(5): 65-67.
- 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 2020. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 39(6): 1233-1241.
- 鄧海满, 文帮勇, 王继强, 周强强, 刘冰权. 2017. 江西赣州梓山地区富硒土壤重金属元素安全性评价[J]. 华东地质, 38(3): 234-240.
- 唐春花, 冯昌和, 马逸麟. 2005. 南昌城区土壤重金属污染现状研究[C]//江苏省地质学会. 地球科学与社会可持续发展——2005年华东六省一市地学科技论坛论文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 5.
- 唐志敏, 张晓东, 张明, 周墨, 田福金, 王尚晓, 马青山, 王冲, 张洁, 牛晓楠, 宗乐丽, 黄丁伶. 2023. 新安江流域土壤元素地球化学特征: 来自岩石建造类型的约束[J]. 华东地质, 44(2): 172-185.
- 陶春军, 李明辉, 马明海, 张笑蓉, 杜国强, 梁红霞. 2023. 皖南某典型富硒区土壤-水稻重金属生态风险评估[J]. 华东地质, 44(2): 160-171.
- 田雷. 2009. 中国南方地区铊地球化学特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王晨, 曾祥英, 于志强, 盛国英, 傅家谟. 2013. 湘江衡阳段沉积物中铊等重金属的污染特征及其生态风险评估[J]. 生态毒理学报, 8(1): 16-22.
- 伍建业. 2023. 汞铊矿废弃物中典型重金属的原位固持及生境改良研究[D]. 贵阳: 贵州大学.
- 夏杰, 胡俊良, 李堃, 赵武强, 刘飞, 张鲲, 程顺波, 崔森, 刘冰. 2020. 广西贺州莲塘镇周边地下水铊异常浅析[J]. 华南地质与矿产, 36(3): 263-269.
- 于泓, 王伟, 于扬, 王登红, 刘善宝, 高娟琴, 吕秉廷, 刘丽君. 2021. 川西九龙地区锂铍矿区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试, 40(3): 408-424.
- 赵凤其. 2021. 贵州兴仁滥木厂汞铊矿区表生条件下铊迁移转化的矿物学机制[D]. 贵阳: 贵州大学.
- 赵恒谦, 常仁强, 金倩, 吴艳花, 王雪飞, 马会春, 李美钰, 付含聪. 2023. 河北西石门铁矿区土壤重金属污染空间分析及风险评价[J]. 岩矿测试, 42(2): 371-382.
- 赵文志, 谢旭, 张兵兵, 张锦涛, 何添. 2024. 深共晶溶剂在生态地质样品分析中的应用研究[J]. 华东地质, 45(1): 78-87.
- 周长松, 邹胜章, 李录娟, 申豪勇. 2015. 几种土壤重金属污染评价方法的对比[J]. 地球与环境, 43(6): 709-713.

Spatial distribution and potential risk assessment of thallium in surface soils from urban area of Nanchang City

ZHOU Yuqin, LI Wen, GAO Yingqiu, WANG Simeng, XIAO Chanhua

(*East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China*)

Abstract: As a kind of highly toxic pollutant substance, thallium has received little attention. This study used the single factor index, potential ecological risk method, and health risk assessment to conduct a thorough risk evaluation and examine the distribution and content of thallium (Tl) in the surface soil of Nanchang's inner city area. The results show that: ①The average Tl concentration in Nanchang City's surface soil is 0.62 mg/kg, with a range of 0.11 to 0.92 mg/kg. This is greater than the average Tl level in China's surface soil but lower than the background value of Jiangxi Province's soil; ②The old town region on the eastern bank of the Gan River has somewhat higher Tl concentration than those in the western bank's surface soil, and soils closer to the Gan River exhibit significantly higher Tl concentration, which gradually decreases toward the east and the west; ③According to the risk assessment techniques adopted, there are typically few health and pollution problems associated with thallium in Nanchang's soil. However, places like Donghu District and Honggutun District have been linked to specific health hazards. As a result, it is imperative to improve the thallium pollution monitoring in these risky regions.

Key words: Nanchang City; surface soil ; thallium; potential ecological risks; health risk assessment