

北京市通州区绿地土壤重金属源解析及风险评价

孙经宇, 孙向阳, 李素艳, 王晨晨, 岳宗伟

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要: 【目的】北京市通州区土地利用类型变化较大, 本研究对通州区绿地土壤开展重金属调查, 进行源解析和风险评价, 评判现阶段的绿地利用是否符合清洁安全的要求并提出重金属风险防控建议。【方法】采集并测定研究区 60 个表层土壤样品中的 pH 值及镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)和汞(Hg)等 7 种重金属全量。运用主成分分析法和绝对因子得分-多元线性回归(APCS-MLR)受体模型等方法进行源解析; 采用地积累指数法、潜在生态风险评价法进行重金属污染评价。【结果】研究区土壤中 Cd、Cr、Pb、Hg、As、Cu 和 Zn 等 7 种重金属平均质量分数分别是 0.53、47.87、11.95、0.25、6.71、4.64、51.21 mg·kg⁻¹, 所有点位的重金属质量分数均没有超过 GB 15618—2018《农用地土壤污染风险管理标准》。主成分分析表明: Cd、Pb、Hg、As 受人为源影响, 主要来自煤炭燃烧、交通、工业和农业活动污染; Zn 受自然源影响, 和土壤母质有关; Cu 和 Cr 受混合来源影响, 来自土壤母质和农业活动污染。根据受体模型对重金属元素进行定量源解析, 发现在表层有一定累积的 Cd 大部分来自人为源(92%); Hg 分别来自工业源(29%)、燃煤和交通源(17%)、农业源(13%), 还有 35% 的未知源, 推测未知源可能是混合源。对绿地土壤进行环境质量评价, 地积累指数和潜在生态危险指数显示 Cd 和 Hg 有较高生态风险响应。研究区综合潜在风险值大部分处于轻微和中等潜在生态风险, 有少量点位处于重度生态风险。【结论】通州区绿地土壤整体风险等级处于中低风险, 引起风险的主要重金属元素为 Cd 和 Hg, 二者是生态风险优先控制元素, 可从燃煤、交通和工业排放方面进行控制。图 5 表 4 参 32

关键词: 绿地土壤; 重金属; 风险评价; 来源解析

中图分类号: X825; S714 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)00-0001-09

Sources and contamination assessment of heavy metals in the green land soils in Tongzhou District, Beijing

SUN Jingyu, SUN Xiangyang, LI Suyan, WANG Chenchen, YUE Zongwei

(Forestry College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The types of land use in Tongzhou District of Beijing have changed greatly. Heavy metals in the soil of green land were investigated, source analysis and risk assessment were carried out to understand whether the current use of green land meets the requirements of cleanliness and safety, and suggestions on risk prevention and control of heavy metals were given. [Method] The pH values and total amounts of heavy metals including Cd, Cr, Pb, Hg, As, Cu, and Zn in 60 surface soil samples from the study area were determined. Source apportionment was carried out using Principal Component Analysis and the Absolute Principal Component Scores-Multiple Linear Regression (APCS-MLR) receptor model. The assessment of heavy metal element pollution was conducted using the Geo-accumulation Index method and the Potential Ecological Risk Assessment method. [Result] The average contents of 7 heavy metals Cd, Cr, Pb, Hg, As, Cu and Zn in the soil were 0.53, 47.87, 11.95, 0.25, 6.71, 4.64 and 51.21 mg·kg⁻¹, while the average

收稿日期: 2023-08-25; 修回日期: 2023-12-29

基金项目: 科学技术部科技基础资源调查专项(2021FY100802)

作者简介: 孙经宇 (ORCID: 0009-0005-4551-2207), 从事土壤重金属研究。E-mail: 18731312020@163.com。通信作者:

孙向阳 (ORCID: 0000-0001-6813-1291), 教授, 博士, 从事森林土壤生态方面研究。E-mail: sunxy@bjfu.edu.cn

content of the remaining elements were below the background. All of the samples' heavy metal concentrations were less than the screening values for *Soil Pollution Risk Control Standards for Agricultural Land* (GB 15618–2018). Principal component analysis demonstrated that Cd, Pb, Hg and As were influenced by human sources, including coal combustion, traffic pollution, industrial and agricultural activities pollution; Zn originated from natural sources and was related to the soil parent material; Cu and Cr were mixed sources resulted by soil parent materials and agricultural pollution. The contribution rates of sources calculated by APCS-MLR were as follows, a certain amount of Cd accumulated on the surface came mostly from human sources (92%); Hg was from source 3 (29%), source 1 (17%), source 4 (13%), and there were also 35% unknown sources, which were suggested as mixed sources. Moreover, sources 1, 3, and 4 were all anthropogenic sources, while source 2 was a natural source. Environmental quality evaluation of green soil was investigated through the ground accumulation index, which illustrated that Cd and Hg performed a higher ecological risk response. Most of the comprehensive potential risk values in the study area were slight and medium potential ecological risks, only few points were belonged to severe ecological risks. [Conclusion] The study shows that the overall risk level of green land soil in Tongzhou District is in the middle and low risk. The main elements causing the risk are Cd and Hg, which are the priority control elements of ecological risk, and can be controlled from the control of coal burning, traffic and industrial emissions. [Ch, 5 fig. 4 tab. 32 ref.]

Key words: green land soil; heavy metal; contamination assessment; source apportionment

绿地土壤作为植物生长的介质^[1]，其质量直接影响植物的健康生长和绿地经济效益、景观功能和生态意义的发挥^[2]。近年来，随着金属冶炼、化石燃料使用、交通发展、农业种植等人类活动的增加，有害物质在绿地土壤中不断积累^[3]。绿地土壤作为污染物的汇集地和净化器^[4]，受污染情况是值得关注的环境问题。重金属因不能被微生物降解且容易积累，生物毒性强^[5]，成为了重点关注的土壤污染物之一。重金属会抑制土壤微生物的生长代谢，破坏微生物群落，降低生物多样性和活性，从而降低土壤质量和影响植物生长，降低生物多样性，对生态系统造成危害^[6]。重金属还可以通过食物链循环和人体接触等危害人体健康^[7]。因此对绿地土壤进行重金属风险评估及源解析，可为改善和规划治理绿地生态环境提供重要依据。关于绿地土壤重金属的研究多集中在污染特征^[8]、风险评价^[9]和源解析^[10]等。

通州区在2018年被选为北京城市发展副中心，启动了国家森林城市建设。根据2019年数据，通州区林木绿化率达36.99%，城市绿地率达46.43%，人均绿地面积达到42.96 m²^[11]。伴随新城开发建设、大规模的企业工厂拆迁腾退，以及造林工程实施等，该区域大量低污染产业被淘汰改建成城市绿地，农田变更为林地，这使该地区土地利用类型变化较大，这些变化影响了该区土壤重金属元素质量分数^[12]。绿地土壤的安全性和作为北京东南部生态屏障的通州区是否能发挥生态效益紧密相关，也和当地居民健康相关，因此，对该区域绿地土壤进行重金属调查和风险评价，可以为绿地土壤重金属源解析研究提供参考，也能为重金属污染防治和修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

通州区位于北京市东南部，总面积为906 km²，地处北京、天津、河北三省交界，为京津冀一体化发展战略的中心。属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候。土质多为潮黄土、两合土、沙壤土，土壤肥沃，质地适中^[13]。

1.2 样品采集和处理

2022年4月，在北京市通州区选取4种绿地类型，避开建筑密集和人类活动频繁区域布点，分别选取果园20个、苗圃10个、城市绿地15个、平原造林15个，共60个样点进行采样。以采样点为圆心均匀取半径5 m内的3个表层土(0~20 cm)均匀混合，按四分法取样1 kg。同时用全球定位系统(GPS)定位并记录采样点的地理坐标。研究区域及采样点位置如图1所示。土壤样品挑出石子、树叶

等, 经自然风干, 研磨过筛后测定土壤 pH、土壤重金属全量。

镉 (Cd)、铬 (Cr)、铅 (Pb)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、砷 (As) 和汞 (Hg) 测定前用 HF-HNO₃-H₂O₂ 微波消解法处理, 测定用电感耦合等离子光谱仪 (CP-2060T), As、Hg 的测定用原子荧光光度计 (AFS-8500)^[14]。质量控制均使用标准参考土样 (GSS-4 和 GSS-5) 进行。

1.3 源解析方法

1.3.1 主成分分析法 (PCA) 用 PCA 探究土壤重金属来源的组成。首先利用 KMO 和 Bartlett 球度检验 PCA 是否适用于本数据集。KMO 统计量越接近于 1, 变量间的偏相关性越强, 因子分析的效果越好。提取特征值大于 1.0 的主成分 (PCs)。

1.3.2 绝对因子得分-多元线性回归 (APCS-MLR) 采用 PCA 分析得到的归一化因子得分和特征向量进行 APCS-MLR 定量源解析。该模型假设所有潜在污染源均与最终受污染受体的污染呈线性关系。

1.4 重金属污染评价方法

采用地积累指数^[15]和潜在生态风险评价法^[16]对重金属进行污染评价。参照值采用北京市土壤背景值^[17]; 修正系数取值 1.5。地积累污染指数 (I_{geo})、土壤中重金属单项重金属潜在生态危害指数 (E_{r}^i) 和潜在生态风险指数 (I_{R}) 的分级标准如表 1 所示。

表 1 重金属污染程度分级标准
Table 1 Classification standard of heavy metal pollution

| 级别 | 地积累污染指数 | | 潜在生态风险指数 | | |
|----|-----------------------------|------|---------------------------------|--------------------------------|------|
| | I_{geo} | 污染等级 | E_{r}^i | I_{R} | 风险等级 |
| 1 | $I_{\text{geo}} \leq 0$ | 无污染 | $E_{\text{r}}^i \leq 40$ | $I_{\text{R}} \leq 150$ | 低 |
| 2 | $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ | 轻度污染 | $40 < E_{\text{r}}^i \leq 80$ | $150 < I_{\text{R}} \leq 300$ | 中 |
| 3 | $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ | 中度污染 | $80 < E_{\text{r}}^i \leq 160$ | $300 < I_{\text{R}} \leq 600$ | 偏高 |
| 4 | $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ | 重度污染 | $160 < E_{\text{r}}^i \leq 320$ | $600 < I_{\text{R}} \leq 1200$ | 高 |
| 5 | $I_{\text{geo}} > 3$ | 严重污染 | $E_{\text{r}}^i > 320$ | $I_{\text{R}} > 1200$ | 极高 |

1.5 数据处理

采用 SPSS 18.0 进行 *t* 检验、相关性分析、PCA 和定量源解析; 采用 ArcGIS 10.8.1 绘制研究区采样点分布图; 采用 Origin 9.0 绘制土壤重金属风险评价图和源贡献率图。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属描述性统计分析

研究区土壤 pH 范围为 7.51~8.66, 平均值为 8.11, 除城市绿地的 2 个点位和苗圃的 1 个点位土壤呈强碱性, 其他点位土壤均呈碱性。变异系数代表该元素在空间上分布均匀程度, $>0.16\sim0.36$ 时属于中等变异, >0.36 时属于高度变异。由表 2 可知: Zn 质量分数属于中度变异, Cd、Pb、Hg、As 和 Cu 变异系数均 >0.36 , 属于高度变异, 表明受人类活动影响强烈^[18]; Cr 变异系数 <0.16 , 表明其质量分数相对均一。各重金属偏度均 >0 , 属于右偏斜, 说明各点位中重金属质量分数偏高的样点多。Cr、Pb、As、Cu 和 Zn 质量分数属于正态分布, Cd 和 Hg 质量分数对数转化后仍不符合正态分布。与北京市土壤环境背景值相比, 通州区土壤中 Pb、As、Cu 和 Zn 的平均质量分数没有超过背景值, Cd、Cr 和 Hg 平均质量分数均超过背景值, 超背景值倍数分别为 3.4、0.6 和 2.1 倍。各项重金属质量分数均未超过 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》^[19] 中相应用地类型的风险筛选值 (均为总量筛选值)。

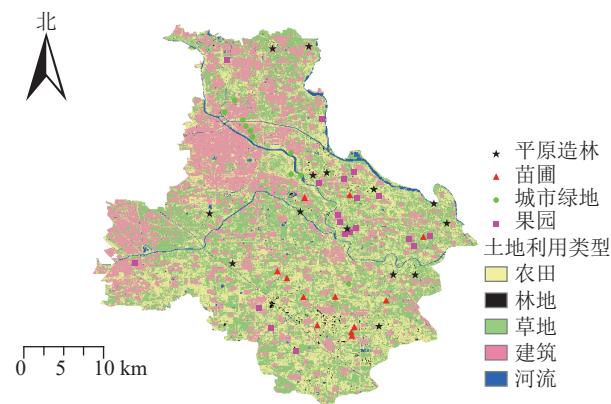


图 1 研究区域采样点分布示意图

Figure 1 Map of the study area and sampling location

表2 绿地土壤重金属质量分数描述性统计分析

Table 2 Descriptive statistics of 7 heavy metal concentrations in the study area soil

| 重金属 | 取值范围/ (mg·kg ⁻¹) | 平均值/ (mg·kg ⁻¹) | 标准差 | 变异系数 | 偏度 | 峰度 | P(K-S检验) | 背景值/ (mg·kg ⁻¹) | 农业用地风险值/ (mg·kg ⁻¹) |
|-----|---------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|----------|--------------------------------|------------------------------------|
| Cd | 0.03~2.35 | 0.53 | 0.25 | 0.472 | 2.990 | 16.107 | 0.000 | 0.12 | 0.6 |
| Cr | 38.78~62.70 | 47.87 | 5.45 | 0.114 | 0.621 | 0.095 | 0.000 | 29.80 | 250.0 |
| Pb | 1.68~31.20 | 11.95 | 5.80 | 0.485 | 0.880 | 2.037 | 0.000 | 24.60 | 170.0 |
| Hg | 0.06~1.30 | 0.25 | 0.24 | 0.953 | 2.636 | 7.360 | 0.000 | 0.08 | 25.0 |
| As | 1.83~12.50 | 6.71 | 2.65 | 0.395 | 0.148 | -0.518 | 0.000 | 7.09 | 3.4 |
| Cu | 0.05~18.32 | 4.64 | 4.21 | 0.907 | 1.514 | 2.591 | 0.000 | 23.60 | 100.0 |
| Zn | 24.62~84.06 | 51.21 | 13.85 | 0.270 | 0.501 | 0.025 | 0.000 | 102.60 | 300.0 |

2.2 土壤重金属来源分析

如表3所示：不同重金属质量分数之间，Cd和Pb极显著相关($P<0.01$)，相关系数为0.754；Cr和Zn极显著相关($P<0.01$)，相关系数为0.579。As和Hg质量分数显著负相关($P<0.05$)。Cu和其他重金属元素相关性不显著。

表3 研究区土壤重金属质量分数之间相关系数

Table 3 Correlation coefficients of 7 heavy metals in the study area soils

| 重金属 | Cd | Cr | Pb | As | Hg | Cu |
|-----|---------|---------|--------|---------|--------|-------|
| Cr | -0.052 | | | | | |
| Pb | 0.754** | -0.153 | | | | |
| As | 0.141 | -0.035 | 0.152 | | | |
| Hg | -0.114 | -0.211 | -0.139 | -0.305* | | |
| Cu | -0.052 | 0.081 | 0.083 | 0.117 | 0.039 | |
| Zn | 0.033 | 0.579** | -0.030 | -0.077 | -0.163 | 0.240 |

说明：**表示在0.01水平(双侧)上显著相关，*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

KMO和Bartlett检验表明：KMO值为0.806，Bartlett球形检验 $P<0.001$ 。研究区绿地土壤重金属质量分数主成分分析结果如表4，经过凯撒正态化最大方差法旋转后，提取4个因子包含7种重金属全部方差的83.05%，提取率超过70%，表明提取的4个因子能很好地体现原来7种重金属质量分数情况。第1主成分和Cd、Pb、Hg相关，占总体方差的27.07%；第2主成分和Cr、Cu、Zn相关，占总体方差的24.88%；第3主成分和Cd、As相关，占总体方差的16.32%；第4主成分和Hg、Cu相关，占总体方差的14.79%。

表4 研究区土壤重金属质量分数主成分分析

Table 4 PCA results of seven heavy metals in the study area soil

| 重金属 | 成分矩阵 | | | | 旋转成分矩阵 | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 |
| Cd | 0.870 | 0.049 | 0.317 | -0.158 | 0.935 | 0.020 | 0.061 | -0.071 |
| Cr | -0.206 | 0.820 | 0.078 | -0.239 | -0.109 | 0.870 | 0.083 | -0.036 |
| Pb | 0.896 | -0.001 | 0.285 | 0.022 | 0.928 | -0.083 | 0.093 | 0.087 |
| Hg | 0.420 | 0.127 | -0.709 | 0.310 | 0.072 | -0.189 | 0.833 | 0.241 |
| As | -0.325 | -0.460 | 0.595 | 0.275 | -0.096 | -0.308 | -0.767 | 0.232 |
| Cu | 0.028 | 0.355 | 0.143 | 0.883 | 0.011 | 0.136 | 0.030 | 0.953 |
| Zn | -0.101 | 0.845 | 0.277 | -0.027 | 0.048 | 0.869 | -0.034 | 0.205 |
| 特征值 | 1.895 | 1.741 | 1.142 | 1.035 | 1.765 | 1.669 | 1.303 | 1.076 |
| 贡献率/% | 27.07 | 24.88 | 16.32 | 14.79 | 25.22 | 23.85 | 18.62 | 15.37 |
| 累计贡献率/% | 27.07 | 51.94 | 68.26 | 83.05 | 25.22 | 49.07 | 67.68 | 83.05 |

分析重金属质量分数可知：Cd、Cr和Hg质量分数的均值超过背景值，生态风险评价显示Cd、

Cr、As 和 Hg 有不同程度的污染, 这 4 种元素变异系数显示高度变异, 说明其受人为影响较大, 因此对这 4 种重金属进行污染源贡献分析。根据 PCA/APCS 源解析计算 (图 2): Cd 主要来自燃煤和交通源 (62%), 其次是工业源 (23%)、农业源 (11%); Cr 主要来自自然源 (61%) 和未知源 (29%); Hg 主要来自工业源 (45%)、燃煤和交通源 (27%)、农业源 (17%) 和未知源 (35%); As 分别来自工业源 (36%)、自然源 (28%)、燃煤和交通源 (20%) 以及未知源 (36%)。

2.3 土壤重金属风险评价

地积累指数评价 (图 3) 显示: Pb 和 Cu 整体处于无污染等级; Cr 和 As 分别有 35.00% 和 91.67% 处于无污染等级, 65.00% 和 8.33% 处于轻微污染等级; Zn 有 98.33% 处于无污染等级, 有 1.67% 处于偏重污染等级; Cd 和 Hg 分别有 8.33% 和 28.33% 处于无污染等级, 18.33% 和 8.33% 处于轻微污染等级, 66.67% 和 11.67% 处于轻度污染等级, 此外 Cd 分别有 5.00% 和 1.67% 处于中度污染和偏重污染等级。

潜在生态危害指数 (图 4) 显示: Cr、Pb、As、Cu 和 Zn 整体处于低风险。Cd 和 Hg 分别有 8.33% 和 3.33% 处于低风险, 有 16.67% 和 36.67% 处于中风险, 有 53.33% 和 41.67% 处于偏高风险, 有 20% 和 10% 处于高风险, 有 1.67% 和 8.33% 处于极高风险。可见, Cd 和 Hg 有较高的生态风险响应。

绿地土壤综合潜在生态风险评价 (图 5) 显示: 研究区整体分别有 46.67% 和 51.67% 处于低风险和中风险, 另有 1.70% 处于重度生态风险。综合评价表明研究区潜在生态风险等级整体处于中低风险。

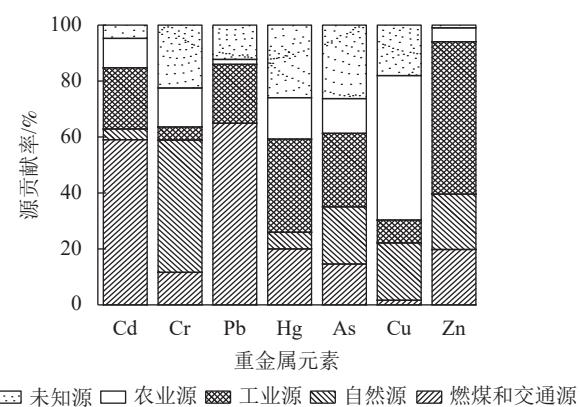


图 2 研究区土壤重金属源贡献率

Figure 2 Source contribution ratios of 7 heavy metals

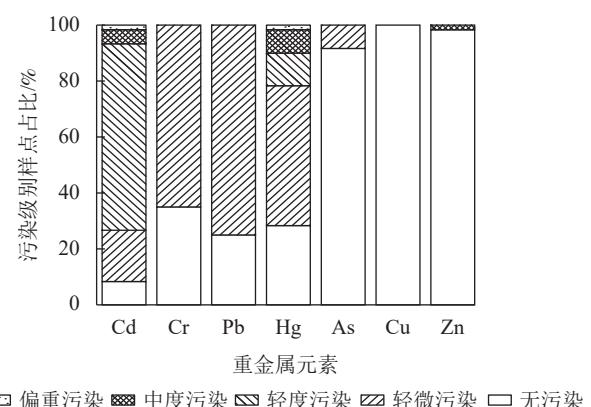


图 3 地积累指数评价结果分布图

Figure 3 Results of evaluation of the ground accumulation index

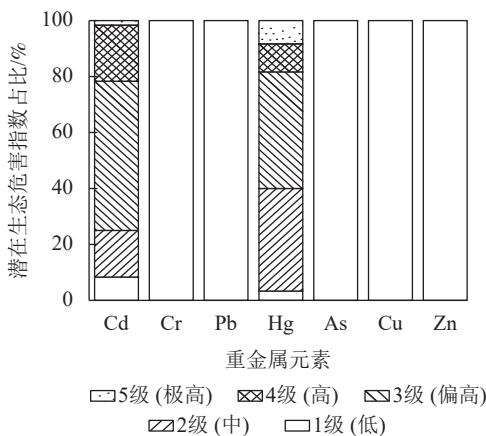


图 4 潜在生态风险评价结果分布图

Figure 4 Results of the potential ecological risk

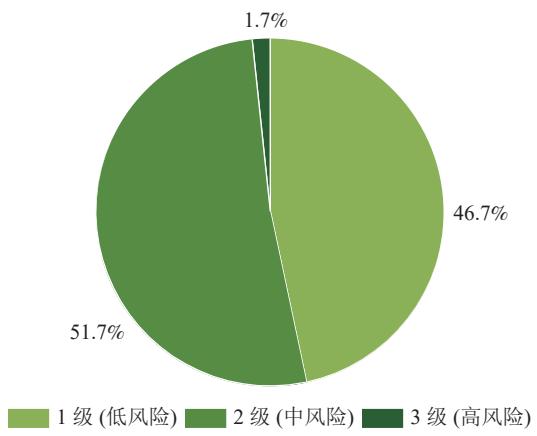


图 5 研究区土壤重金属潜在生态风险评价

Figure 5 Evaluation of potential ecological risk of 7 heavy metals

3 讨论

从重金属水平来看, 研究区绿地土壤重金属质量分数较低, 均未超标, 绿地土壤环境整体处于清洁状态。但 Cd 和 Hg 的平均质量分数分别超出北京市土壤背景值 3.4 和 2.1 倍, 可见有除土壤母质之外的

来源。综合重金属风险评价结果来看, Cd 和 Hg 在表层土壤中有一定累积, 存在潜在生态风险。张沁瑞等^[20]也指出北京东南郊表层土壤 Cd 和 Hg 质量分数相对较高。

本研究主成分分析表明: 第 1 主成分与 Cd、Pb 相关, Hg 也有一定载荷。已有研究表明该区域大气干湿沉降中 Cd、Pb 和 Hg 通量密度较高^[21]。Pb 常被认为是交通污染的标志性元素, 汽车尾气和轮胎磨损也会造成 Cd 和 Hg 在土壤中累积^[22]。Cd 和 Pb 在苗圃、城市绿地和平原造林的水平都较高, 这 3 种类型绿地比果园有更强的交通流通性, 果园种植密集, 且位置远离道路, 机动车尾气污染相对少。随着无铅汽油的推广使用, 2000 年之后 Pb 主要来源为煤炭和冶金^[23]。通州区近 10 a 能源消费为 200~300 万 t·a⁻¹ 标准煤。煤炭燃烧产生的 Hg 会吸附于飞灰表面, 而 Cd 和 Pb 会富集于炉渣, 最后都可通过大气沉降进入土壤。因此, 可认为第 1 主成分来自交通和燃煤源。第 2 主成分中载荷较高的有 Cr、Zn 和 Cu。土壤 Cr 主要来源于成土母质^[24]; Cu 和 Zn 质量分数远低于北京市土壤背景值, 因此, 可认为第 2 主成分是自然源。Cr 质量分数超出背景值 0.6 倍, 有除成土母质之外的来源。Cr 的主要用途是制造合金和电镀, 在合金和电镀生产过程中会产生含 Cr 的废气和废水^[25]。本研究 Cr 质量分数高的 2 个采样点在果园, 其附近有电气设备厂、燃机配件厂和电线电缆厂等, 含 Cr 废气可能通过大气沉降落到附近土壤表层。第 3 主成分与 As 和 Cd 相关。其中 As 有较大载荷, 土壤中的 As 主要来源于成土母质。有色金属冶炼^[26]、塑料稳定剂制作等工业生产活动也会产生 Cd, 并随粉尘通过大气沉降积累到土壤中^[27]。Cd 和 As 质量分数都高的采样点位于研究区北部, 该区域分布有大量小型工业企业, 土壤易受工业生产的影响。因此可以确定第 3 主成分为工业源。第 4 主成分的主要构成元素有 Cu、Hg 和 As, 其中 Cu 的质量分数远低于北京土壤背景值, 不构成重金属污染。有机质富含 Hg 高亲和能力的官能团, 过多施用有机肥会导致 Cu、Hg 和 As 局部地区水平偏高^[28], 受农业活动干扰 Hg 和 Cu 的变异系数也会偏高。有研究表明: 畜禽粪便和农药是土壤中 Cu 的主要来源^[29]; 除草剂、杀虫剂等含 As 农药以及磷肥的使用也会影响土壤 As 水平^[30]。通州区 2021 年肥料使用量超过 6 000 t, 包括磷肥和有机肥; 农药使用量超过 300 t^[17], 包含除草剂、杀虫剂。因此可认为第 4 主成分是农业污染源。

根据 PCA/APCS 源解析计算, 发现在土壤表层有一定积累的 Cd 大部分来自人为源 (92%), Cd 的累积和人类活动密切相关, 在人为源中主要来自燃煤和交通源 (59%), 还有工业源 (22%) 和农业源 (11%)。Hg 分别来自工业源 (29%)、燃煤和交通源 (17%)、农业源 (13%), 还有 35% 的未知源。引起土壤 Hg 污染的人为活动主要包括工业生产、农业生产和日常生活等, Hg 有很强的挥发性, 容易受自然风化、人为排放和大气沉降影响^[31], 未知源可能与自然源和人为排放有关。Cr 主要来自自然源 (43%), 人为源占 28%。Pb 大部分来自人为源。As、Cu 和 Zn 来自人为源的比例分别是来自自然源的 2.60、2.95 和 3.95 倍。

地积累指数和潜在生态风险指数评价结果相似, 均认为 Cd 和 Hg 对绿地土壤污染的贡献较大。地积累指数还显示 Cr 和 As 分别有 65.00% 和 8.33% 处于轻微污染等级, 潜在生态风险指数显示 Cr 和 As 处于清洁水平。2 种评价方法显示的差异性源于地积累指数评价是基于重金属质量分数与基准值 (土壤背景值) 的对比, 侧重于重金属水平; 而潜在生态风险评价结果受毒性响应系数影响较大^[32]。研究区综合生态风险指数整体处于中低风险, 绿地土壤相对清洁安全, 但位于城市绿地的 1 个点位处于重度生态风险等级, 需要引起警惕并重点监测。Cd 和 Hg 为生态风险优先控制元素, 可从控制燃煤、交通和工业排放方面进行控制。

4 结论

北京通州区绿地土壤中 Cd、Cr、Pb、Hg、As、Cu 和 Zn 的质量分数分别是 0.53、47.87、11.95、0.25、6.71、4.64、51.21 mg·kg⁻¹, 各项重金属质量分数均未超过 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》中相应用地类型的风险筛选值 (均为总量筛选值)。通州区绿地土壤重金属污染源有燃煤和交通源、自然源 (土壤母质)、工业源和农业源, 对土壤重金属富集的贡献率分别为 27.1%、24.9%、16.3% 和 14.8%, 人为源的贡献率大于自然源。在土壤表层有一定累积的 Cd 有 92% 来自人为源, Hg 有 60% 来自人为源, 有 35% 来自未知源, 推测 Cd 来源属于混合源。通州区绿地土壤质量整体处于中低风险等级。地积累指数指明有少量点位土壤 Cd 和 Hg 存在中度和重度污染, Zn 有个别点位处

于轻度污染; 潜在生态风险评价指明少量点位 Cd 和 Hg 存在中等度到强度不同程度的生态风险, 2 种评价结果基本一致。建议合理燃煤和交通排放, 监测督促工业污染的净化排放, 科学开展农业活动, 从管控陆地风险源来防止重金属污染, 保障绿地土壤洁净安全。

5 参考文献

- [1] 陈津, 游巍斌, 何东进, 等. 福州市中心城区公园绿地的供需关系及空间异质性 [J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(6): 1300–1310.
CHEN Jin, YOU Weibin, HE Dongjin, *et al.* Supply and demand relationship and its spatial heterogeneity of urban parks in downtown area of Fuzhou [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(6): 1300–1310.
- [2] 赵其国. 提升对土壤认识, 创新现代土壤学 [J]. *土壤学报*, 2008, **45**(5): 771–777.
ZHAO Qiguo. Improving knowledge of soil, innovating modern pedology [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(5): 771–777.
- [3] 包婕, 江峰, 马嘉伟, 等. 城市绿地土壤研究文献的CiteSpace可视化分析 [J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(3): 685–694.
BAO Jie, JIANG Feng, MA Jiawei, *et al.* Cite Space visualization analysis of urban green space soil research literature [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(3): 685–694.
- [4] 刘玥, 郭文强, 武晔秋. 大同市城区公园表层土壤重金属污染特征和健康风险及来源解析 [J]. *土壤通报*, 2023, **54**(1): 180–191.
LIU Yue, GUO Wenqiang, WU Yeqiu. Pollution characteristics, health risks and source analysis of surface soil heavy metals in urban parks of Datong City [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, **54**(1): 180–191.
- [5] 金钰, 叶令帅, 李华威, 等. 河南省柿主产区土壤重金属污染及其生态风险分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(6): 1303–1312.
JIN Yu, YE Lingshuai, LI Huawei, *et al.* Soil heavy metal pollution and its ecological risk analysis in the main *Diospyros kaki* producing areas of Henan Province [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(6): 1303–1312.
- [6] 张文娟, 王利军, 王丽, 等. 西安市地表灰尘中重金属污染水平与健康风险评价 [J]. *土壤通报*, 2017, **48**(2): 481–487.
ZHANG Wenjuan, WANG Lijun, WANG Li, *et al.* Assessment of pollution level and health risks of heavy metals in surface dust in Xi'an City, NW China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(2): 481–487.
- [7] 韩伟, 王成文, 彭敏, 等. 川南山区土壤与农作物重金属特征及成因 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2480–2489.
HAN Wei, WANG Chengwen, PENG Min, *et al.* Characteristics and origins of heavy metals in soil and crops in mountain area of southern Sichuan [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2480–2489.
- [8] WU Yufeng, LI Xiao, YU Lu, *et al.* Review of soil heavy metal pollution in China: spatial distribution, primary sources, and remediation alternatives [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2022, **181**: 106–261.
- [9] LIU Futian, WANG Xueqiu, DAI Shuang, *et al.* Spatial variations, health risk assessment, and source apportionment of soil heavy metals in the middle Yellow River Basin of northern China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2023, **252**: 107–275.
- [10] LIANG Jiahui, LIU Zhaoyue, TIAN Yiqi, *et al.* Research on health risk assessment of heavy metals in soil based on multi-factor source apportionment: a case study in Guangdong Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **858**: 159–991.
- [11] 北京通州年鉴编辑部. 北京通州年鉴(2021)[M]. 北京: 方志出版社, 2021.
Editorial Office of Beijing Tongzhou Yearbook. *Beijing Tongzhou Yearbook 2021* [M]. Beijing: Publishing House of Local Records, 2021.
- [12] 滕吉艳. 上海城市中心区不同类型绿地土壤重金属污染特征 [J]. *土壤通报*, 2021, **52**(4): 927–933.
TENG Jiyan. Contamination characteristics of heavy metals in soils from urban green space in central Shanghai [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(4): 927–933.
- [13] 周文洁. 北京市通州区不同绿化用地土壤肥力特征及评价 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
ZHOU Wenjie. *Soil Fertility Characteristics and Evaluation of Different Greening Lands in Tongzhou District, Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

- [14] 王彬, 郑成斌, 王俊伟, 等. 微波消解顺序注射冷蒸汽原子荧光光谱法测定沉积物中的痕量汞[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(4): 1106 – 1110.
WANG Bin, ZHENG Chengbin, WANG Junwei, *et al.* Determination of trace amounts of mercury in sediments by sequential injection cold vapor atomic fluorescence spectrometry coupled with microwave-assisted digestion [J]. *Spectroscopy and spectral Analysis*, 2012, **32**(4): 1106 – 1110.
- [15] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969(2): 108 – 118.
- [16] HÅKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975 – 1001.
- [17] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 117 – 122.
CHEN Tongbin, ZHENG Yuanming, CHEN Huang, *et al.* Background concentrations of soil heavy metals in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(1): 117 – 122.
- [18] 陈小敏, 朱保虎, 杨文, 等. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间分布、来源及污染评价[J]. 环境化学, 2015, **34**(12): 2248 – 2256.
CHEN Xiaomin, ZHU Baohu, YANG Wen, *et al.* Sources, spatial distribution and contamination assessments of heavy metals in gold mine area soils of Miyun Reservoir upstream, Beijing, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(12): 2248 – 2256.
- [19] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB15618—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018-06-22.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. *Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land: GB15618—2018* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018-06-22.
- [20] 张沁瑞, 李欢, 邓宇飞, 等. 北京东南郊土壤重金属元素分布及其在表层土壤中的富集特征[J]. 物探与化探, 2022, **46**(2): 490 – 501.
ZHANG Qinrui, LI Huan, DENG Yufei, *et al.* Distribution of heavy metal elements in soil of the Southeastern suburbs of Beijing and their enrichment characteristics in surface soil [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, **46**(2): 490 – 501.
- [21] YANG Shiyan, SUN Lijuan, SUN Yafei, *et al.* Towards an integrated health risk assessment framework of soil heavy metals pollution: theoretical basis, conceptual model, and perspectives [J/OL]. *Environmental Pollution*, 2023, **316**: 120596 [2023-08-15]. doi: 10.1016/j.envpol.2022.120596.
- [22] 蔡阳阳, 杨复沫, 贺克斌, 等. 北京城区大气干沉降的水溶性离子特征[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(7): 1071 – 1076.
CAI Yangyang, YANG Fumo, HE Kebin, *et al.* Characteristics of water-soluble ions in dry deposition in urban Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(7): 1071 – 1076.
- [23] 钱建平, 张力, 张爽, 等. 桂林市汽车尾气汞污染[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 944 – 950.
QIAN Jianping, ZHANG Li, ZHANG Shuang, *et al.* Mercury pollution from automobile exhaust in Guilin City [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 944 – 950.
- [24] 杨硕, 阎秀兰, 冯依涛. 河北曹妃甸某农场农田土壤重金属空间分布特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(9): 3064 – 3072.
YANG Shuo, YAN Xiulan, FENG Yitao. Spatial distribution and source identification of heavy metals in the farmland soil of the Caofeidian in Hebei Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(9): 3064 – 3072.
- [25] 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 等. 阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4545 – 4555.
CHEN Meng, PAN Yongxing, HUANG Yixiang, *et al.* Spatial distribution and sources of heavy metals in soil of a typical lead-zinc mining area, Yangshuo [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4545 – 4555.
- [26] 韩琳, 徐夕博. 基于PMF模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5114 – 5124.
HAN Lin, XU Xibo. Quantitative evaluation of human health risk of heavy metals in soils based on positive matrix factorization model and geo-statistics [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5114 – 5124.
- [27] 庾雄, 杨凌霄, 张婉, 等. 海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气PM_{2.5}污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(5):

- 2284 – 2293.
- TUO Xiong, YANG Linxiao, ZHANG Wan, *et al.* Characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Qingdao in winter under the action of sea-land-atmosphere convergence [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2284 – 2293.
- [28] HU Naiwen, YU Hongwen, DENG Boling, *et al.* Levels of heavy metal in soil and vegetable and associated health risk in peri-urban areas across China [J/OL]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, **259**: 115037[2023-08-15]. doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.115037.
- [29] 董丽君, 张展华, 张彤. 土壤环境汞污染现状及其影响因素研究进展[J]. 地球与环境, 2022, **50**(3): 397 – 414, 319.
DONG Lijun, ZHANG Zhanhua, ZHANG Tong. Research progress on soil environmental mercury pollution status and its influencing factors [J]. *Earth and Environment*, 2022, **50**(3): 397 – 414, 319.
- [30] 李颖慧, 姜小三, 王振华, 等. 基于土壤肥力和重金属污染风险的农用地土壤质量综合评价研究-以山东省博兴县为例[J]. 土壤通报, 2021, **52**(5): 1052 – 1062.
LI Yinghui, JIANG Xiaosan, WANG Zhenhua, *et al.* Comprehensive evaluation of soil quality of agricultural land based on soil fertility and heavy metal pollution risk: a case study of Boxing County, Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(5): 1052 – 1062.
- [31] 黄勇, 段续川, 袁国礼, 等. 北京市延庆区土壤重金属元素地球化学特征及其来源分析[J]. 现代地质, 2022, **36**(2): 634 – 644.
HUANG Yong, DUAN Xucuan, YUAN Guoli, *et al.* Geochemistry and source identification of heavy metals in the top and subsoil of Yanqing District in Beijing [J]. *Geoscience*, 2022, **36**(2): 634 – 644.
- [32] 陈小霞, 张敏, 李蓓, 等. 广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1397 – 1406.
CHEN Xiaoxia, ZHANG Min, LI Bei, *et al.* Risk assessment and source analysis of heavy metals pollution in surface sediments from major river systems in Maoming City, Guangdong Province [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1397 – 1406.