

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)	

基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价

胡梦珺, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 在分析兰州市主城区公园表土重金属含量水平的基础上, 采用 UNMIX 模型对重金属进行来源解析, 同时引入 Hakanson 毒性响应系数修正传统权重, 运用物元可拓模型对重金属污染水平进行评价, 并将评价结果与内梅罗综合污染指数 (P_N) 和潜在生态风险指数 (RI) 进行对比。结果表明: ① 研究区公园表土重金属含量均值都高于兰州市土壤背景值, 其中 Ni、Cu 和 Co 的点位含量超标比例各为 100%, Cr、V、Pb 和 As 分别为 58.82%、14.71%、20.59% 和 2.94%。② 源解析显示研究区公园表土重金属存在 3 大污染源, 源 1 为建筑业污染源, 对 Co 的贡献率为 56%; 源 2 为交通污染源, 对 Cu 和 Pb 的贡献率各为 44% 和 52%; 源 3 为自然源, 对 V、Cr、Ni 和 As 的贡献率各为 62%、60%、56% 和 56%, 自然源占主导作用。③ 各重金属权重修正效果显著, Cr 和 V 的降幅各为 44% 左右, 而 Ni、Cu、Pb、As 和 Co 的修正权重比常规权重有所增加, 增幅依次为 $Co < Pb < Cu < Ni < As$, As 的权重变化最为明显, 增加约 188% 左右。④ 物元评价结果显示, 研究区 46% 的公园表土为 V 级状态 (重度污染), 41% 为 IV 级状态 (中度污染), 3% 为 III 级状态 (轻度污染), Co 为主要污染因子; 物元可拓模型评价结果与 P_N 及 RI 结果大致相同, 说明物元可拓模型可用于土壤重金属污染评价, 评价结果准确客观。

关键词: UNMIX 模型; 物元可拓模型; 毒性响应系数; 重金属; 公园

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2457-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008168

Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City

HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, JI Tian-qi, ZHENG Deng-you

(College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The UNMIX model was used to analyze the source of heavy metals found to be present in the topsoil of parks in the main district of Lanzhou City. The Hakanson toxicity response coefficient was used concurrently to modify the traditional weights in the model, and the matter-element extension model was used to evaluate heavy metal pollution. The results of the evaluation were compared with the comprehensive pollution index (P_N) and potential ecological risk index (RI). The results were as follows. ① The average heavy metal content in the topsoil at each sampling point was higher than that of the background value of soil in Lanzhou, with the proportion of Ni, Cu, and Co being 100% while the proportion of Cr, V, Pb, and As contents were 58.82%, 14.71%, 20.59%, and 2.94%, respectively. ② The results of source analysis showed that there were three major sources of heavy metal pollution in the topsoil of the parks in the study area. Source 1 is construction pollution, which contributes 56% of the Co present. Source 2 is traffic pollution, which contributes 44% and 52% of Cu and Pb, respectively. Source 3 is natural, and contributes 62%, 60%, 56%, and 56% of V, Cr, Ni, and As, respectively. Thus, this research showed that natural sources are predominant. ③ The weight correction effect for each heavy metal was significant; there was an approximately 44% reduction in both Cr and V, while the corrected weights of Ni, Cu, Pb, As, and Co increased in the order $Co < Pb < Cu < Ni < As$ compared with the conventional weights. The most obvious change in weight was that of As, which increased by approximately 188%. ④ The results of the evaluation using the matter-element model showed that the state of 46% of the topsoil in the parks in the study area was grade V (severely polluted), while 41% was grade IV (moderately polluted) and 3% was grade III (lightly polluted); Co was the main pollutant. The results of the model evaluation were roughly the same as of from the P_N and RI, indicating that the matter-element extension model can be used to evaluate heavy metal pollution in soil and the evaluation results are accurate and objective.

Key words: UNMIX model; matter-element extension model; toxic response coefficients; heavy metals; parks

城市公园是市民休闲娱乐的重要场所, 在人类活动下面临着重金属污染的风险, 公园环境中的重金属可通过手-口摄入等暴露途径进入人体并危害健康^[1]. 国内外学者对城市绿地土壤重金属开展了大量研究, 如 Biasioli 等^[2] 对意大利 Torino 公园土壤中 Cu、Zn、Cd 和 Pb 等进行了研究, Marr 等^[3] 分析了英国主要城市绿地土壤重金属的浓度分布和土壤性质的关系; 国内学者则主要集中在经济发达的大

中型城市, 如上海市公园土壤中 Pb、Zn 和 Cu 是主要污染因子^[4]; 北京市公园表土中 Cr、Pb、Cu、Zn 和 Cd 的平均含量都高于背景值^[5]. 目前 UNMIX 受体模型作为新型源解析方法被广泛应用于土壤重金

收稿日期: 2020-08-16; 修订日期: 2020-11-21

基金项目: 甘肃省高等学校科研项目 (2018A-009); 国家自然科学基金项目 (41171018)

作者简介: 胡梦珺 (1974 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为沙区环境演变与元素地球化学, E-mail: lele200466@163.com

属源解析,其自带的数据库系统不需设定污染源数目,降低了人为因素的干扰,使解析结果更加准确^[6]. 有研究发现,除自然源外,携带重金属的地表扬尘和大气降尘是公园水体与土壤的重要污染源^[7];工业“三废”和交通运输等人类活动也是其重金属富集的重要因素^[8].

重金属污染评价方法中污染负荷指数没考虑不同污染物的背景差别^[9],内梅罗指数难以凸显单一元素的质变特征^[10],模糊综合评价法计算过程相对复杂^[11]. 蔡文创立的物元分析理论^[12],将指标和特征量值作为物元,通过实验数据和评价等级建立经典域、节域和关联度,最终确立综合评价体系;可拓模型是物元和可拓集合理论的有机结合^[13],是用来解决不相容问题的方法,可排除主观干预因素,减少信息缺失,客观反映待评对象的总体状况,广泛应用于大气^[14~16]、水^[17~19]和土壤^[20,21]等生态环境的污染评价,已有研究均表明,物元可拓模型较其它评价方法,精确度和可靠性更高. 运用物元可拓模型对土壤重金属污染评价的研究较少^[22~24],故本文在采用 UNMIX 模型对重金属来源解析的基础上,运用物元可拓模型对兰州市主城区公园表土重金属污染进行评价,并将评价结果与内梅罗污染指数和生态风险指数的结果进行对比,验证物元可拓模型在土壤重金属污染方面的适用性及精确性,研究结果对扩展土壤重金属污染评价方法和完善土壤重金属污染评价体系具有现实意义.

1 研究区概况

兰州市(103.58~103.95°E,36.03~36.15°N)地处黄土高原、青藏高原和内蒙古高原的交汇地带,黄河穿城而过,是典型的河谷型城市. 兰州市属温带大陆性半干旱气候,年均温 6~9℃,年均降水量 300 mm 左右,风力一般为 1~4 级. 受特殊地形和大陆气团控制的影响,兰州市冬季静风条件下形成的大气逆温层,阻碍了污染物的扩散;加之作为西北地区重要的工业基地、综合交通枢纽和社会经济中心,近几十年来快速城市化和工业化,使得兰州市环境问题诸多且较为严重. 本文所研究的兰州市主城区指以黄河为主线,沿河谷南北分布的西固区、安宁区、七里河区和城关区的城区部分,其中西固区是综合工业区,安宁区以科学教育为主,七里河区以民族商贸和新兴加工业为主,城关区则是政治和经济中心^[25].

2 材料与方法

2.1 样品采集与测定

本文以兰州市主城区公园为研究对象,共采集到 34 个表土样品. 采样时以剖面刀除去表层浮尘,采集 0~15 cm 内的土壤样品,每个样品均由临近相同类型的 5 个点均匀混合而成,采集样品不少于 1 kg,装入贴好标签的自封袋中;用 GPS 记录采样点坐标,用 ArcGIS 10.2 绘制研究区公园表土样点示意(图 1).

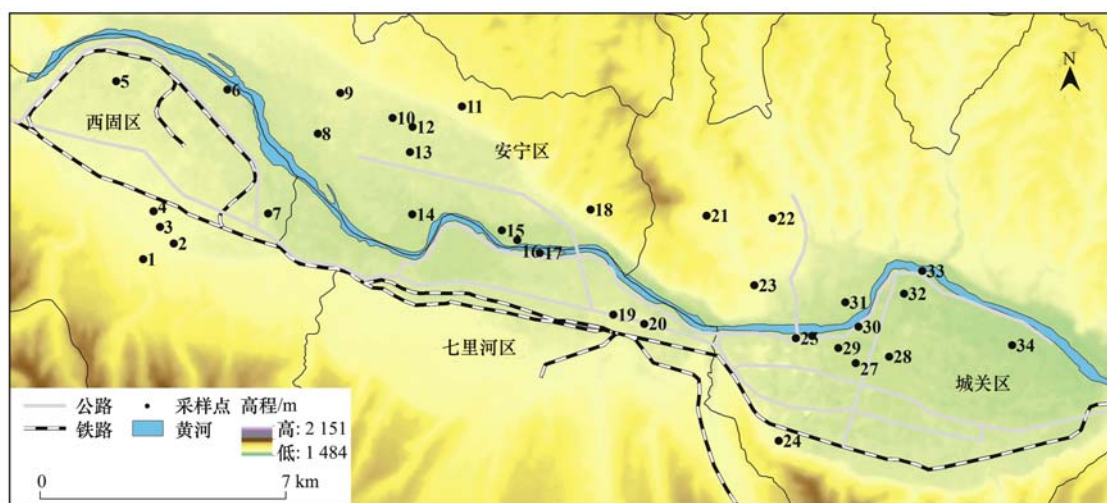


图 1 研究区域采样点分布示意

Fig. 1 Map of the study area and sampling locations

土壤样品剔除杂物、自然风干后过 0.15 mm 铜筛,混合均匀取 15 g 用碳化钨磨样机(ZHM-1A)研磨至粒径小于 200 目,研磨样品在 105℃ 下烘干后取 4 g 放入制样模具,加入硼酸镶边垫底,用 30 t 的

半自动压样机(ZHY-401A)压成内径为 32 mm 的样片放入干燥器中待测;用 X 射线荧光光谱仪(型号: Axios; 产地: 荷兰)测定元素含量,分析软件为 SuperQ Version 5.0,本文选取 Ni、Cu、Cr、V、Pb、

As 和 Co 进行分析。

2.2 评价方法

2.2.1 UNMIX 受体模型

UNMIX 6.0 模型是美国环保局开发的多元受体模型,表示在 m 个源的 N 个样品中, n 个被分析物种中的某一物种 j 的含量^[6],表示为:

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^m F_{jk} \times S_{ik} + E \quad (1)$$

式中, C_{ij} 为第 i 个样品($i=1, \dots, N$)中第 j 个物种($j=1, \dots, n$)的含量, F_{jk} 为第 j 个物种在源 k ($k=1, \dots, m$)的源成分谱, S_{ik} 为源 k 在第 i 个样品的贡献值, E 为各源组成的标准偏差.本文具体源解析工作在 Unmix 6.0 软件中完成。

2.2.2 物元可拓分析法

(1)建立物元矩阵 待评对象 N 、污染指标 C 和量值 Q ,共同构成物元 R ,记为 $R=(N, C, Q)$,表示为:

$$R=(N, C_n, Q_n) = \begin{pmatrix} N & C_1 & Q_1 \\ & C_2 & Q_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & Q_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

(2)确定经典域和节域 经典域 $R(N)$ 和节域 $R(P)$ 的物元矩阵为:

$$R(N) = (N_i, C_n, Q_n) = \begin{pmatrix} N_i & C_1 & Q_{i1} \\ & C_2 & Q_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & Q_{in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_i & C_1 & (e_{i1}, f_{i1}) \\ & C_2 & (e_{i2}, f_{i2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (e_{in}, f_{in}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$R(P) = (N_p, C_n, Q_p) = \begin{pmatrix} N_p & C_1 & Q_{p1} \\ & C_2 & Q_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & Q_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_p & C_1 & (e_{p1}, f_{p1}) \\ & C_2 & (e_{p2}, f_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (e_{pn}, f_{pn}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

显然有:

$$(e_{in}, f_{in}) \subset (e_{pn}, f_{pn}) \quad (n=1, 2, 3, \dots, i)$$

(3)关联度计算 关联度 $K(Q_i)_j \geq 0$ 是指评价指标符合某评价等级的归属程度,若 $K(Q_i)_j \geq 0$,评价对象符合标准; $K(Q_i)_j \leq -1$,评价对象

不符合标准; $-1 \leq K(Q_i)_j < 0$,评价对象不符合标准,但具备转化为符合标准的条件^[26],表示为:

$$Q_{ij} = |f_{in} - e_{in}| \quad (5)$$

$$\rho(Q_i, Q_{ij}) = |Q_{dn} - (f_{in} + e_{in}) \times 0.5| - (f_{in} - e_{in}) \times 0.5 \quad (6)$$

$$\rho(Q_i, Q_{pn}) = |Q_{dn} - (f_{pn} + e_{pn}) \times 0.5| - (f_{pn} - e_{pn}) \times 0.5 \quad (7)$$

$$K(Q_i)_j = \begin{cases} \frac{-\rho(Q_i, Q_{ij})}{|Q_{ij}|} & Q_i \in Q_{ij}, \\ \frac{\rho(Q_i, Q_{ij})}{\rho(Q_i, Q_{pn}) - \rho(Q_i, Q_{ij})} & Q_i \notin Q_{ij}. \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\rho(Q_i, Q_{ij})$ 和 $\rho(Q_i, Q_{pn})$ 分别为点 Q_i 到经典域 $Q_{ij}=(e_{in}, f_{in})$ 和节域 $Q_{pn}=(e_{pn}, f_{pn})$ 的距离, Q_i 、 Q_{ij} 和 Q_{pn} 分别为待评物元的量值、经典域物元和节域物元的量值范围。

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^n W_{Ki} \times K(Q_i)_j \quad (9)$$

式中, $K_j(N)$ 为综合关联度, W_{Ki} 为权重,若 $K_j = \max\{K_j(N)\}$,则待评对象 N 属于重金属污染等级 j 。

(4)权重修正 传统重金属污染评价的权重方法是超标倍数赋权法^[26],表示为:

$$W_{Ki} = (X_{Ki} / \bar{S}_i) / \left(\sum_{i=1}^n X_{Ki} / \bar{S}_i \right) \quad (10)$$

式中, X_{Ki} 为实测值, $\bar{S}_i$ 为评价等级的算数平均值, n 为因子个数。

为突出高毒性低浓度重金属的毒性作用,引入 Hakanson 重金属毒性响应系数($Cr = V = 2$ 、 $Cu = Ni = Pb = Co = 5$ 和 $As = 10$)^[27] 对常规权重进行修正,表示为:

$$W'_{Ki} = (W_{Ki} \times T_r^i) / \left(\sum_{i=1}^n W_{Ki} \times T_r^i \right) \quad (11)$$

式中, W'_{Ki} 为修正权重, W_{Ki} 为常规权重, T_r^i 为毒性系数。

2.2.3 传统评价方法

内梅罗综合污染指数^[10] (P_N) 和潜在生态风险指数^[27] (RI) 被广泛用于土壤重金属污染评价,为检验物元可拓结果的可靠性,使用 P_N 和 RI 对研究区表土重金属污染状况进行综合评价,表示为:

$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i/B_i)_{\max}^2 + (C_i/B_i)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (12)$$

式中, P_N 为综合污染指数, C_i 为重金属含量实测值

($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), B_i 为兰州市土壤背景值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[28].
 P_N 分级标准:重度污染($P_N > 3$)、中度污染($2 < P_N \leq 3$)、轻度污染($1 < P_N \leq 2$)、警戒线($0.7 < P_N \leq 1$)及非污染($P_N \leq 0.7$).

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i/B_i) \quad (13)$$

式中, RI 和 E_r^i 分别为综合和单项生态风险指数, RI 分级标准^[29]:轻微生态风险($RI < 40$)、中等生态风险($40 \leq RI < 80$)、强度生态风险($80 \leq RI < 160$)和极强度生态风险($RI \geq 160$).

表 1 重金属污染评价标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Criteria for assessing heavy metal pollution/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
重金属	Ni	Cu	Cr	V	Pb	As	Co
清洁 I	26.50	22.90	59.90	81.90	22	10.60	12.60
尚清洁 II	600	10 800	62.40	450	750	42	105
轻度污染 III	1 400	25 200	70.20	1 050	1 750	98	245
中度污染 IV	2 000	36 000	78	1 500	2 500	140	350
重度污染 V	2 600	46 800	101.40	1 950	3 250	182	455

3 兰州市主城区公园表土重金属含量统计与来源解析

3.1 重金属含量的统计特征

研究区表土重金属含量统计结果如表 2 所示, 公园表土重金属均值含量依次为 $As < Pb < Co < Cu < Ni < Cr < V$, 其中 Pb 的总量极值差距最大, 最大与最小值的比值达到 3.59, As 元素差距最小, 比值为 1.94, 说明 Pb 拥有较多异常的高值. 各样点的重金属含量均值都低于第二类建设用地管制值但高于

2.3 评价标准

本文以兰州市土壤背景值^[28]和《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018)^[30]中第二类建设用地土壤污染风险管制值确定重金属污染评价标准(表 1). 评价标准分为 5 级, 分别是 I 级(清洁)、II 级(尚清洁)、III 级(轻度污染)、IV 级(中度污染)和 V 级(重度污染), I 级上限值为兰州市土壤背景值; II 级上限值为管制值的 0.3 倍; III 级上限值为管制值的 0.7 倍; IV 级上限值为管制值; V 级上限值为管制值的 1.3 倍^[23,31].

兰州市土壤背景值, 为背景值的 1~6.82 倍; 其中 Ni 、 Cu 和 Co 的点位含量超出背景值的比例为 100%, V 、 Cr 、 Pb 和 As 分别为 14.7%、58.82%、20.59% 和 2.94%. 各重金属变异系数(CV)大小为 $Ni < As < Cr < Cu < Co < Pb < V$, V 和 Pb 的 CV 达到了 30% 以上, 属于强度变异性, 说明 V 和 Pb 含量空间分布差异大, 来源复杂; Cu 和 Co 的 CV 在 16%~30% 之间, 为中等强度变异性, 说明其空间分布相对均匀; Ni 、 Cr 和 As 的 CV 在 16% 以下, 为弱变异性, 表明这 3 种重金属受外界影响比较一致^[32].

表 2 表土重金属含量统计

Table 2 Statistics on the content of heavy metals in topsoil							
统计量	Ni	Cu	Cr	V	Pb	As	Co
范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	29.36~49.03	25.33~85.90	32.90~88.53	51.71~108.02	17.63~63.27	9.53~18.45	25.33~85.90
平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	38.22	36.1	60.11	76.08	30.89	14.5	36.10
标准差	4.02	10.04	7.93	29.51	9.98	1.74	10.19
超标比例/%	100	100	58.82	14.71	20.59	2.94	100
变异系数/%	11	28	13	38.79	32	12	28.23
兰州市背景值 ^[28] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	26.5	22.9	59.9	67.1	22	10.6	12.6
建设用地风险管制值 ^[30] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2 000	36 000	78	1 500	2 500	140	350

与国内外其它研究对比发现, 上海市不同类型绿地表土中 Cr 、 Ni 、 Cu 、 Zn 和 Pb 的平均含量都高于兰州市土壤背景值^[33]; 西安市公园土壤和灰尘中主要受到 Pb 和 Cu 的污染^[34]. 对都柏林城市表壤进行分析发现, Cd 、 Cu 、 Pb 、 As 、 Hg 、 Zn 和 Ni 的均值含量都高于兰州市土壤背景值, 这可能与都柏林的工业发展历史和市内分布的金属矿有关^[35]; 马来西亚城市表层土壤中 3 种重金属的平均质量分数依次为 $As(13.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) < Cr(74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) < Pb$

($2\,668.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 远高于兰州市公园表土重金属的均值含量^[36]. 相较而言, 本文 Ni 和 Cu 含量偏高, Cr 含量居中, V 、 Pb 和 As 含量较低; 相关研究中没有出现对公园表土 Co 富集水平的研究, 但本文 Co 富集严重, 需对各重金属作进一步的污染源解析.

3.2 基于 UNMIX 受体模型的源解析

相关系数对 UNMIX 解析结果的合理性以及污染源类型的判断有很大帮助^[8], 由表 3 可知, V - Ni 、 V - As 、 Cr - Ni 和 Cr - As 的相关系数分别为

0.915、0.714、0.725 和 0.442 ($P < 0.01$),说明这 4 种重金属两两之间的相关性很高,可能具有相同的来源; Fe_2O_3 和 MgO 为土壤母质风化形成的主要产物,与其相关性较高的元素常常被判断为自然来源^[37],本文中 $\text{V-Fe}_2\text{O}_3$ 和 V-MgO 、 $\text{Cr-Fe}_2\text{O}_3$ 和 Cr-MgO 、 $\text{Ni-Fe}_2\text{O}_3$ 和 Ni-MgO 的相关系数

较高且通过了 0.01 水平的检验,故初步判定 V、Cr、Ni 和 As 来源于成土母质. Cu-Pb 的相关系数为 0.628 ($P < 0.01$),表明这两种来源可能具有一致性; Co 与其它重金属的相关性均较低,故难以通过重金属间的相关系数判断其来源,其具体来源需要进行进一步分析.

表 3 各重金属之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients among heavy metal concentrations									
	V	Cr	Co	Ni	Cu	As	Pb	Fe_2O_3	MgO
V	1								
Cr	0.915 **	1							
Co	-0.375 *	-0.349 *	1						
Ni	0.714 **	0.725 **	0.134	1					
Cu	0.081	0.305	0.02	0.215	1				
As	0.460 **	0.442 **	-0.156	0.579 **	0.206	1			
Pb	-0.077	0.193	0.035	0.1	0.628 **	0.206	1		
Fe_2O_3	0.957 **	0.932 **	-0.315	0.753 **	0.132	0.409 *	0.005	1	
MgO	0.482 **	0.448 **	-0.433 *	0.327	0.149	0.717 **	0.001	0.415 *	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

利用 UNMIX 6.0 软件,将研究区 34 个样本 7 种重金属解析为 3 个源(表 4). 结果显示,3 个源的拟合相关系数 $\text{Min Rsq} = 0.98$,代表 98% 的物种方差可由该模型解释,大于系统要求的最小值(Min

$\text{Rsqr} > 0.8$); $\text{Min Sig./Noise} = 2.63$,大于系统要求的最低值($\text{Min Sig./Noise} > 2$),各种参数均满足要求,是模型给出的最优解,故这 3 个源得出的解析结果是可信的.

表 4 基于 UNMIX 模型各源成分谱及其贡献率

Table 4 Contribution rates and components of different sources of heavy metal pollution as per the UNMIX model						
重金属	源成分谱/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			源贡献率/%		
	源 1	源 2	源 3	源 1	源 2	源 3
V	11.10	18.00	46.90	15	24	62
Cr	8.02	16.10	36.00	13	27	60
Co	30.40	9.68	14.50	56	18	27
Ni	7.85	9.16	21.20	21	24	56
Cu	6.34	16.00	13.80	18	44	38
As	2.53	3.79	8.17	17	26	56
Pb	5.91	15.90	9.02	19	52	29

由表 4 可知,源 1 中 Co 的成分偏高,源 2 中 Cu 和 Pb 成分偏高,源 3 中 V、Cr、Ni 和 As 的成分偏高,故其各自代表不同的污染源. 结合相关性分析探讨 UNMIX 模型的源解析结果发现,源 1 对 Co 的贡献率为 56%,且 Co 与其它重金属及成土母质的相关性均很低,又是研究区主要的污染与生态风险因子,这指示 Co 不受自然源的控制,可能来源于人类活动. Co 的性质决定了它是生产超级耐热合金、工具钢、硬质合金和各种钴盐的重要原料,Co 还可用于催化剂、干燥剂以及油漆等,由于 Co 的上述特性,近年来含 Co 材料被广泛应用在建筑行业中^[38].

通过 UNMIX 模型解析结果得到 3 个源在各采样点的贡献值,根据贡献值绘制研究区不同污染源的空间分布图,结果如图 2 所示. 源 1 贡献高值区域主要分布在安宁区北部以及城关区与七里河区交界

处,该区域已成为了兰州房地产开发的主要对象,其中安宁区北部分布着大量的在建楼盘,而城关区与七里河区交界处作为城关区旧城改造承接区,工程施工或出售建筑材料的过程中均会释放不同浓度的 Co,故判定源 1 的特征元素代表建筑业污染源.

结合表 4 发现,源 2 对 Cu 和 Pb 的贡献率分别为 44% 和 52%,且 Cu 和 Pb 是交通运输源的标识重金属^[39]. 有研究表明,由于 Cu 具有高抗腐蚀性和导热性被大范围应用于汽车工业,车辆行驶过程中汽车轮胎和刹车片等金属零部件的磨损和老化,含 Cu 量较高的颗粒物都会释放至大气环境中,通过沉降进入城市表土环境^[40,41]; 虽现禁止使用含铅汽油,城市表土中的 Pb 主要来自于汽车运行过程中尾气的排放,兰州市已普及使用无铅汽油,但无铅主要指含铅量在 $0.013\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下的汽油,故汽车尾气中仍

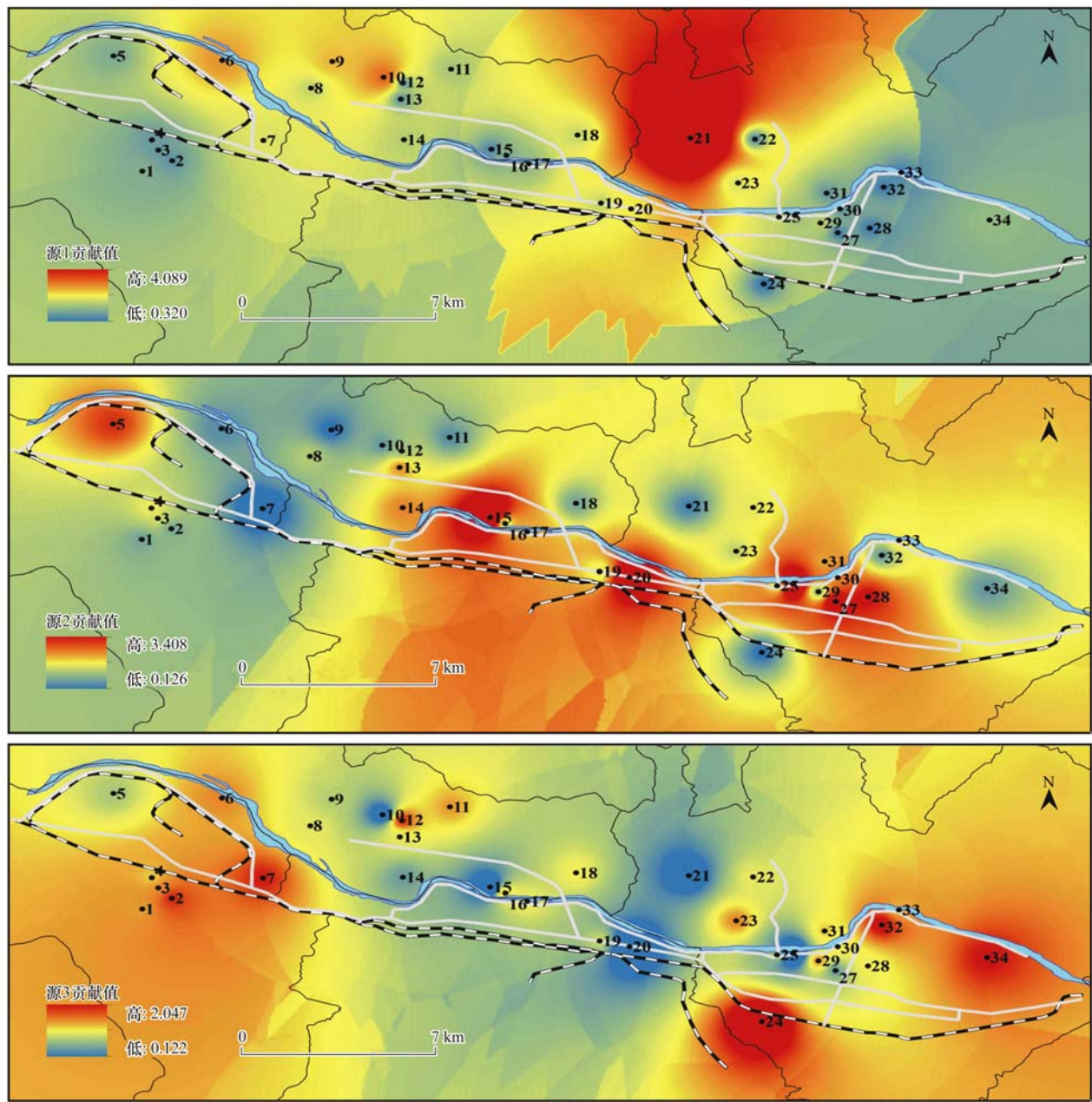


图2 UNMIX 模型源贡献空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of source contributions from the UNMIX model

有少量含铅的化合物和颗粒物^[42].由图2可知,源2贡献高值主要分布在七里河区和城关区,如20和26号点分别位于地铁站出口及兰州黄河大桥边,这些点位于主干道附近,分布有水泥和道路材料公司,每天都有大量的车流经过,交通密度大,属于兰州市的严重拥堵路段,故判定源2的特征元素代表交通源.

结合表4发现,源3对V、Cr、Ni和As的贡献率分别为62%、60%、56%和56%,由图2可知,源3高值样点主要分布在西固区和城关区部分区域,该区域位于黄河拐弯冲击处,地势低洼,重金属含量易受到水流冲击的影响而富集^[43];另外,由前文相关性分析可知,V、Cr、Ni和As两两之间以及与土壤

母质风化的主要产物(Fe_2O_3 和 MgO)相关性都较高,故判定源3的特征元素代表自然源.总体来看,研究区公园表土重金属污染以自然源为主(57%),交通污染源次之(31%),最后为建筑业污染源(12%).

4 兰州市主城区公园表土重金属污染评价

4.1 物元可拓法重金属污染评价

4.1.1 重金属权重修正

为更直观反映研究区各采样点7种重金属的权重修正结果,将传统污染物浓度超标倍数赋权法的权重值(W_{ki})与修正后各重金属的权重值(W'_{ki})进行对比(图3).

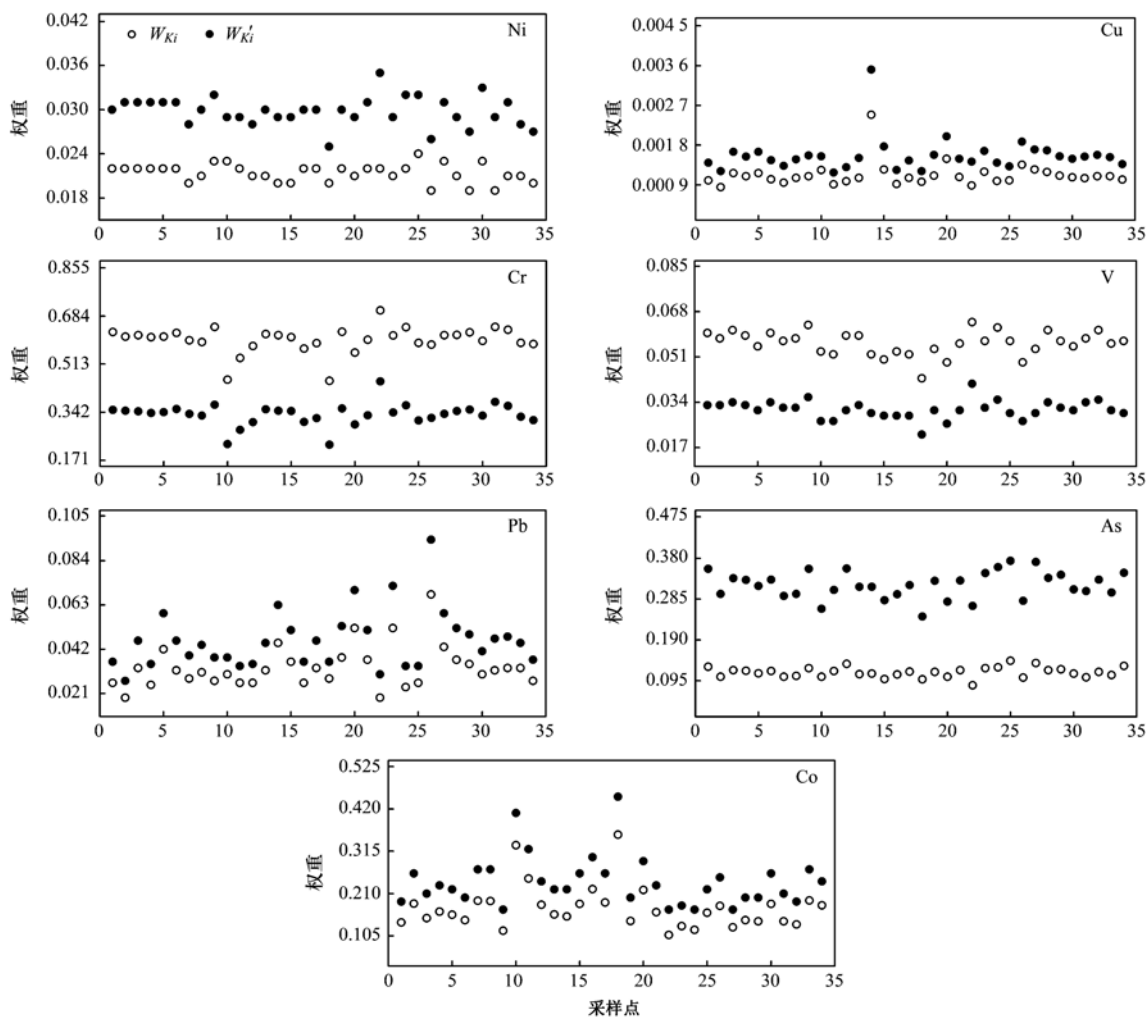


图3 重金属 W_{Ki} 与 W'_{Ki} 对比分析

Fig. 3 The W_{Ki} and W'_{Ki} analysis of heavy metals

由图3可知,各采样点的Cr和V的 W'_{Ki} 较 W_{Ki} 都有所降低,其降幅分别为44%左右;修正后Ni、Cu、Pb、As和Co的 W'_{Ki} 比 W_{Ki} 总体上呈现不同程度地增加,其增幅依次为 $Co < Pb < Cu < Ni < As$,其中Co的增幅最低,约为38%,As的权重变化最为明显,增加约188%左右。这是因为引入了Hakanson毒性响应系数, W'_{Ki} 值与各重金属的毒性程度呈正比,7种重金属 W'_{Ki} 变化幅度与其毒性系数的大小一致,毒性越大,权重增幅越大。故 W'_{Ki} 值不仅反映了重金属的毒性水平,还体现了污染物累积浓度的差异,更能反映土壤重金属污染的实际状况。

4.1.2 物元可拓法重金属污染评价及结果

由于物元可拓法运算过程较复杂,现以1号样点为例进行计算,其过程如下(Ni、Cu、Cr、V、Pb、As和Co的含量分别为38.07、31.49、61.83、79.40、23.50、15.88和42.70 $mg \cdot kg^{-1}$)。

(1)建立待判物元矩阵 样点 A_1 的物元矩

阵为:

$$R_1 = \begin{pmatrix} A_1 & Ni & 38.07 \\ & Cu & 31.49 \\ & Cr & 61.83 \\ & V & 79.40 \\ & Pb & 23.50 \\ & As & 15.88 \\ & Co & 42.70 \end{pmatrix}$$

(2)建立经典域和节域物元矩阵 依据土壤污染分级标准及实验结果,建立经典域和节域物元矩阵:

$$R(N_1) = \begin{pmatrix} N_1 & C_{Ni} & (0, 26.50) \\ & C_{Cu} & (0, 22.90) \\ & C_{Cr} & (0, 59.90) \\ & C_V & (0, 81.90) \\ & C_{Pb} & (0, 22) \\ & C_{As} & (0, 10.60) \\ & C_{Co} & (0, 12.60) \end{pmatrix}$$

$$R(N_2) = \begin{pmatrix} N_2 & C_{Ni} & (26.50, 600) \\ & C_{Cu} & (22.9, 10\ 800) \\ & C_{Cr} & (59.90, 62.40) \\ & C_V & (81.90, 450) \\ & C_{Pb} & (22, 750) \\ & C_{As} & (10.60, 42) \\ & C_{Co} & (12.60, 105) \end{pmatrix}$$

$$R(N_3) = \begin{pmatrix} N_3 & C_{Ni} & (600, 1\ 400) \\ & C_{Cu} & (10\ 800, 25\ 200) \\ & C_{Cr} & (62.40, 70.20) \\ & C_V & (450, 1\ 050) \\ & C_{Pb} & (750, 1\ 750) \\ & C_{As} & (42, 98) \\ & C_{Co} & (105, 245) \end{pmatrix}$$

$$R(N_4) = \begin{pmatrix} N_4 & C_{Ni} & (1\ 400, 2\ 000) \\ & C_{Cu} & (25\ 200, 36\ 000) \\ & C_{Cr} & (70.20, 78) \\ & C_V & (1\ 050, 1\ 500) \\ & C_{Pb} & (1\ 750, 2\ 500) \\ & C_{As} & (98, 140) \\ & C_{Co} & (245, 350) \end{pmatrix}$$

$$R(N_5) = \begin{pmatrix} N_5 & C_{Ni} & (2\ 000, 2\ 600) \\ & C_{Cu} & (36\ 000, 46\ 800) \\ & C_{Cr} & (78, 101.4) \\ & C_V & (1\ 500, 1\ 950) \\ & C_{Pb} & (2\ 500, 3\ 250) \\ & C_{As} & (140, 182) \\ & C_{Co} & (350, 455) \end{pmatrix}$$

$$R(P) = \begin{pmatrix} N_P & C_{Ni} & (0, 2\ 600) \\ & C_{Cu} & (0, 46\ 800) \\ & C_{Cr} & (0, 101.40) \\ & C_V & (0, 1\ 950) \\ & C_{Pb} & (0, 3\ 250) \\ & C_{As} & (0, 182) \\ & C_{Co} & (0, 455) \end{pmatrix}$$

(3) 评定污染等级 根据公式计算出 34 个待判物元关于各评价等级的单指标关联度, 关联度越大, 表示该指标与评价等级的复合度越高. 对于同一评价对象, 不同的指标关联度不同, 故污染等级也不同, 表现出物元的不相容性. 在单指标关联度的基础上计算各待评物元的综合关联度并进行等级评定.

以 1 号采样点为例, 其综合指标关联度依次为 -0.216 、 -0.131 、 -0.130 、 0.099 和 -0.711 , 其中 $\max\{K_j(N)\} = 0.211$, 按照判定原则, 可以得出 1 号样点属于Ⅳ级, 呈中度污染状态. 依照上述方法计算兰州市主城区 34 个待评物元表土重金属污染的各评价等级, 结果发现, 有 1 个样点在Ⅲ级的综合关联度最大, 占总样点的 3%, 按照评价标准属于Ⅲ级, 呈轻度污染状态; 有 14 个样点在Ⅳ级的综合关联度最大, 占总样点的 41%, 根据隶属度判定原则属于Ⅳ级, 呈中度污染状态; 有 15 个样点在Ⅴ级的综合关联度最大, 占总样点的 56%, 根据隶属度判定原则属于Ⅴ级, 呈重度污染状态, 没有Ⅰ级清洁和Ⅱ级尚清洁状态. 整体来看, 研究区公园表土重金属污染等级以重度污染为主, Co 为主要污染因子.

4.2 传统污染评价结果

内梅罗污染指数(P_N)结果表明, 研究区表土重金属污染以重度污染为主, 其中 Co 对 P_N 的贡献最大, 其已达到重度污染, Cu 也达到了轻度污染. 41% 样点的 P_N 介于 2~3 之间, 呈中度污染状态, 另有 59% 样点的 P_N 值大于 3, 这说明研究区公园表土重金属富集程度严重, 呈重度污染状态; 主城区的 P_N 依次为城关区 < 西固区 < 安宁区 < 七里河区, 这是因为七里河区人口密度高和交通流量大, 人类活动对公园的干扰较强烈.

生态风险指数(RI)结果也表现为城关区 < 西固区 < 安宁区 < 七里河区, 各重金属元素潜在生态风险依次为 $V < Cr < Pb < Ni < Cu < As < Co$, Co 对 RI 的贡献最大, 已达到强生态风险, As 也达到了中等生态风险. 97% 样点的 RI 小于 80, 为中等生态风险, 3% 样点的 RI 在 80~160 之间, 呈强生态风险, 如 21 号点作为兰州市主要景点之一, 来往游客较多, 由前文来源解析可知, 景点内古老建筑的脱漆及游客乱扔垃圾等都会对表土造成污染.

4.3 物元可拓法评价与传统评价结果对比分析

为更直观反映重金属污染程度的空间分布特征, 对 3 种评价方法的计算结果进行空间分析. 由图 4 可知, 物元可拓法显示研究区表土重金属以重度污染为主, 个别样点为轻度污染状态; 如安宁区个别样点(12 号)为轻度污染状态, 由前文来源解析可知, 这可能是由于该公园附近无工业企业分布, 人类活动对土壤干扰程度较低; 如城关区 22 号点距离市区较远, 车流量及人流量较小, 故污染程度为中度污染状态; 西固区和七里河区均为重度污染, 由前文来源解析可知, 兰州市全年盛行风向以偏东风为主, 西固区和七里河区均位于盛行风向的下风向, 携带重金属的大气降尘和地表灰尘均会对其表土造成

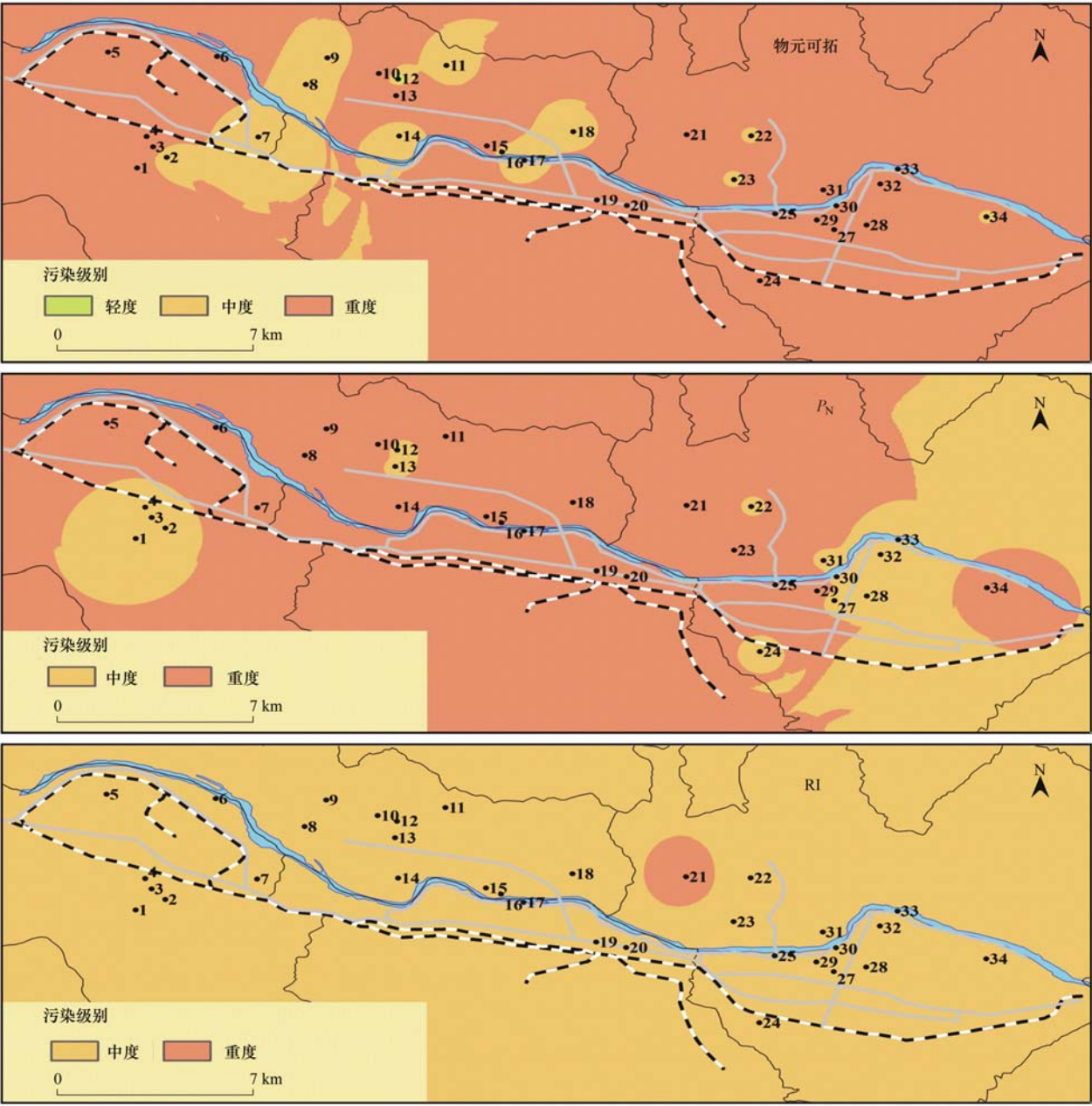


图4 3种方法评价结果空间插值

Fig. 4 Spatial differences of the results as assessed using three methods

污染；加上西固区是传统的工业区，而七里河区又分布着大量的化工、医药和有色金属的车间及仓储，这些工业企业燃煤烟气的排放及货物运输是 Co、Cu 和 Pb 等重金属富集的主要外部来源，故两区由于工业和交通造成的重金属污染空间分布最为显著^[25]。

3 种评价方法各有侧重，故计算结果存在部分差异。物元可拓计算结果中轻度污染占 3%，中度污染占 41%，重度污染占 46%； P_N 中度污染占 41%，重度污染占 59%；RI 中等生态风险占 97%，强生态风险样品占 3%；由于物元可拓模型由重金属含量及毒性系数依次赋权，既考虑了重金属对背景值的富集程度和在新土壤环境质量标准中土壤环境容纳量下的污染水平，也考虑了对生物的影响，而 P_N 和

RI 直接利用土壤背景值或结合毒性系数，易造成评价结果过高或过低。综合来看，运用物元可拓法的对兰州市主城区公园表土重金属的污染评价结果与传统的 P_N 和 RI 评价结果基本一致，研究区表土重金属以中、重度污染为主，3 种方法中度污染相似度占 41%。物元可拓评价结果为三级， P_N 和 RI 各为两级，说明物源可拓模型比 P_N 和 RI 更为敏感，出现这种现象的原因是物元可拓的关联度函数逻辑域在 $(-\infty, +\infty)$ 实数轴上，可取负值，保证了信息的完整性，克服了评价过程中的不确定性和模糊性，能全面分析重金属的污染程度^[15]；此外，物元可拓的关联度函数计算公式固定，不涉及取最值的模糊运算，不需要构造隶属函数，因而不会造成信息丢失^[16]。

综合分析可知,相较于传统的重金属污染评价方法,用物元可拓模型进行土壤重金属污染评价,既能全面分析重金属的污染程度,又不会造成信息的丢失,其评价结果则更准确客观,贾丽等^[31]的研究也证实了这一点,说明物元可拓模型可用于进行土壤重金属的污染评价。

5 结论

(1)研究区公园表土重金属均值含量依次为 As < Pb < Co < Cu < Ni < Cr < V,各重金属含量均值都高于兰州市土壤背景值,其中 Ni、Cu 和 Co 的点位超标比例各为 100%,Cr、V、Pb 和 As 各为 58.82%、14.71%、20.59% 和 2.94%。

(2)UNMIX 受体模型分析得出研究区表土重金属的 3 个主要污染来源,分别为建筑业污染源(源 1),源贡献率为 12%;交通污染源(源 2),源贡献率为 31%;自然源(源 3),贡献率为 57%,自然源占主导作用。

(3)Hakanson 毒性响应系数对传统权重修正效果显著,其中 Cr 和 V 的降幅各为 44% 左右,而 Ni、Cu、Pb、As 和 Co 的修正权重比常规权重有所增加,其增幅依次为 Co < Pb < Cu < Ni < As,As 的权重增加约 188% 左右。

(4)物元可拓分析结果显示,研究区公园表土整体上以 V 级(重度污染)为主,其中 46% 的样点呈重度污染,41% 的样点呈中度污染,3% 的样点呈轻度污染,Co 为主要污染因子。此方法兼顾了重金属的含量和毒性,且与 P_N 和 RI 的结果基本一致,证明其评价结果准确客观,可用于土壤重金属污染评价中。

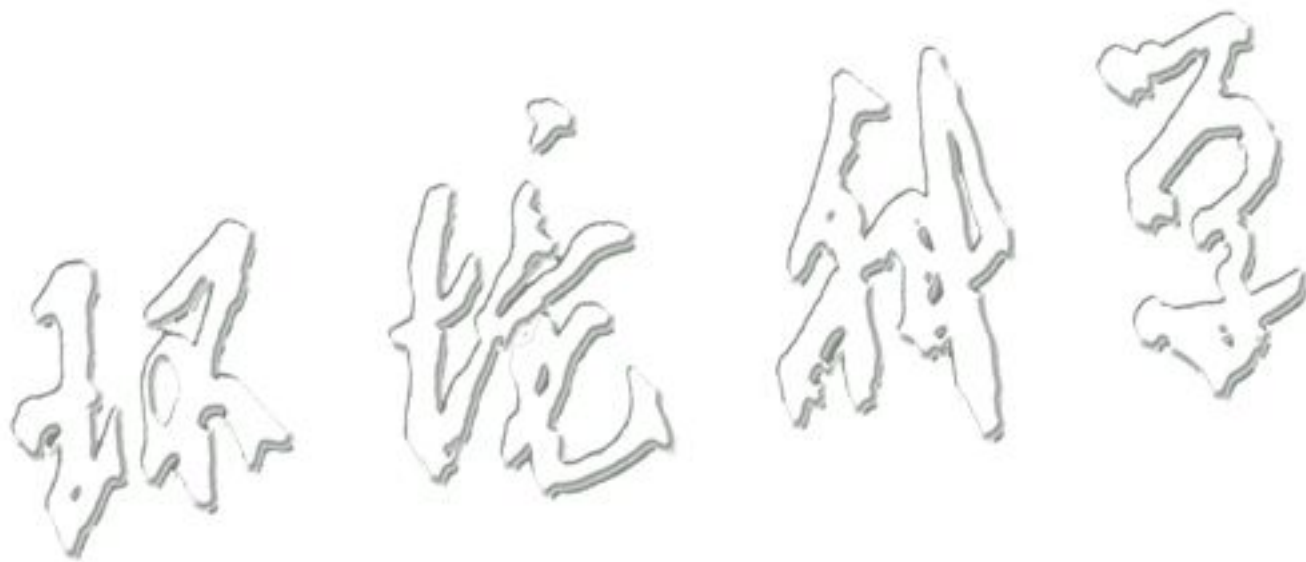
致谢:感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所公共技术服务中心提供样品测试服务,对中国科学院西北生态资源环境研究院张彩霞高级工程师协助完成元素测试致以诚挚的谢意!

参考文献:

- [1] Pekey H, Doğan G. Application of positive matrix factorisation for the source apportionment of heavy metals in sediments; a comparison with a previous factor analysis study [J]. *Microchemical Journal*, 2013, **106**: 233-237.
- [2] Biasioli M, Ajmone-Marsan F. Organic and inorganic diffuse contamination in urban soils: the case of Torino (Italy) [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2007, **9**(8): 862-868.
- [3] Marr K, Fyles H, Hendershot W. Trace metals in Montreal urban soils and the leaves of *Taraxacum officinale* [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, **79**(2): 385-387.
- [4] 史贵涛,陈振楼,许世远,等.上海市区公园土壤重金属含量及其污染评价[J]. *土壤通报*, 2006, **37**(3): 490-494.
- [5] 吴建芝,王艳春,田宇,等.北京市公园和道路绿地土壤重金属含量特征比较研究[J]. *北京园林*, 2016, **32**(3): 53-58.
- [6] 卢鑫,胡文友,黄标,等.基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1421-1429.
- [7] Lu X, Hu W Y, Huang B, et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX model [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1421-1429.
- [8] Malandrino M, Abollino O, Buoso S, et al. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(2): 169-178.
- [9] 刘玲玲,安燕飞,马瑾,等.基于 UNMIX 模型的北京城区公园土壤重金属源解析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(12): 2856-2863.
- [10] Liu L L, An Y F, Ma J, et al. Source apportionment of soil heavy metals in Beijing urban park based on the UNMIX model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(12): 2856-2863.
- [11] 赵亚楠,李小平,杨涛,等.典型能源开发区灰尘金属元素的空间分布特征、来源与健康风险[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(1): 350-362.
- [12] Zhao Y N, Li X P, Yang T, et al. The spatial distribution characteristics, sources and health risks of trace elements in dust in typical energy development zones [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 350-362.
- [13] 李吉玖,张毓涛.乌鲁木齐不同功能区林带土壤重金属污染特征分析[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(9): 1859-1866.
- [14] Li J M, Zhang Y T. Characteristics of heavy-metal pollution in forest belt soil of different functional zones in Urumqi, Xinjiang [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(9): 1859-1866.
- [15] 熊飏,赵颖,王建英.模糊数学在环境质量评价中的应用[J]. *河南科学*, 2002, **20**(5): 549-552.
- [16] Xiong B, Zhao Y, Wang J Y. Application of fuzzy maths in environmental quality assessment [J]. *Henan Science*, 2002, **20**(5): 549-552.
- [17] 王晓飞,魏萌萌,温中海,等.物元分析法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(3): 69-73.
- [18] Wang X F, Wei M M, Wen Z H, et al. Application of matter element analysis method in the evaluation of soil heavy metal pollution [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(3): 69-73.
- [19] Tan Z F, Ju L W, Yu X B, et al. Selection ideal coal suppliers of thermal power plants using the matter-element extension model with integrated empowerment method for sustainability [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, **2014**, doi: 10.1155/2014/302748.
- [20] 赵晓亮,齐庆杰,李瑞锋,等.基于熵权物元可拓模型的城市大气质量评价[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(2): 250-254.
- [21] Zhao X L, Qi Q J, Li R F, et al. Assessment of urban air quality based on the improved extension theory model with entropy weight [J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(2): 250-254.
- [22] 谢炳庚,刘智平.模糊-物元综合评价法在环境空气质量评价中的应用研究[J]. *经济地理*, 2010, **30**(1): 27-30.
- [23] Xie B G, Liu Z P. Fuzzy-matter element comprehensive evaluation method on air environmental quality assessment [J]. *Economic Geography*, 2010, **30**(1): 27-30.
- [24] 鲁然英.城市环境空气质量及其评价方法研究[D].兰州: Chinese Journal of Soil Science, 2006, **37**(3): 490-494.

- 兰州大学, 2006.
- Lu R Y. Study on the city ambient air quality and the assessment methods[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.
- [17] Wang X L, Wang G X, Wu Y X, *et al.* Comprehensive assessment of regional water usage efficiency control based on game theory weight and a matter-element model[J]. *Water*, 2017, **9**(2), doi: 10.3390/w9020113.
- [18] 虞未江, 贾超, 狄胜同, 等. 基于综合权重和改进物元可拓评价模型的地下水水质评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, **49**(2): 539-547. Yu W J, Jia C, Di S T, *et al.* Groundwater quality assessment based on comprehensive weight and improved matter-element extension evaluation model[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, **49**(2): 539-547.
- [19] Li P Y, He S, He X D, *et al.* Seasonal hydrochemical characterization and groundwater quality delineation based on matter element extension analysis in a paper wastewater irrigation area, northwest China[J]. *Exposure and Health*, 2018, **10**(4): 241-258.
- [20] 欧阳彦, 刘秀华. 基于熵权物元可拓模型的土地整理生态环境影响评价——以老河口市孟楼镇基本农田整理项目为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2009, **34**(6): 67-74. Ouyang Y, Liu X H. Eco-environment impact assessment on land consolidation based on entropy-weighted matter-element model—a case study of the land consolidation project in Menglou Town, Laohekou City[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, **34**(6): 67-74.
- [21] 黄辉玲, 罗文斌, 吴次芳, 等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(3): 316-322. Huang H L, Luo W B, Wu C F, *et al.* Evaluation of land eco-security based on matter element analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, **26**(3): 316-322.
- [22] 赵艳玲, 石娟娟, 何厅厅, 等. 基于物元可拓法的土壤重金属污染评价[J]. 金属矿山, 2014, **43**(2): 159-165. Zhao Y L, Shi J J, He T T, *et al.* Evaluation of soil heavy metal pollution based on the matter-element extension method[J]. *Metal Mine*, 2014, **43**(2): 159-165.
- [23] 赵杰, 罗志军, 赵弯弯, 等. 基于改进物元可拓模型的鄱阳湖区耕地土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(3): 521-533. Zhao J, Luo Z J, Zhao W W, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in arable soils in the Poyang Lake area based on the improved matter-element extension method[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 521-533.
- [24] 徐笠, 陆安祥, 田晓琴, 等. 典型设施蔬菜基地重金属的累积特征及风险评估[J]. 中国农业科学, 2017, **50**(21): 4149-4158. Xu L, Lu A X, Tian X Q, *et al.* Accumulation characteristics and risk assessment of heavy metals in typical greenhouse vegetable bases[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, **50**(21): 4149-4158.
- [25] 刘淑净. 兰州市城区建设用地开发强度与环境效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. Liu S J. Study on urban construction land exploit intensity and environmental effect in Lanzhou City[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [26] 高明美, 孙涛, 张坤. 基于超标倍数赋权法的济南市大气质量模糊动态评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(9): 150-154. Gao M M, Sun T, Zhang K. Dynamic fuzzy comprehensive evaluation on the atmosphere environmental quality of Ji'nan city based on the multiple super-scale weighting method[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, **28**(9): 150-154.
- [27] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [28] 何乱水, 马炳祥, 杜文奎, 等. 西北黄土高原干旱半干旱条件下城市污染特点——以西北某城市为例[J]. 中国地质, 2003, **30**(4): 442-448. He L S, Ma B X, Du W K, *et al.* Characteristics of urban pollution under arid and semi-arid condition on the Loess Plateau in northwestern China: examples form a city in northwestern China[J]. *Geology in China*, 2003, **30**(4): 442-448.
- [29] 宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 等. 都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2784-2792. Ning Z P, Xiao Q X, Lan X L, *et al.* Spatial distribution characteristics and potential ecological risk of antimony and selected heavy metals in sediments of Duliujiang River[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2784-2792.
- [30] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [31] 贾丽, 乔玉辉, 陈清, 等. 基于改进物元可拓模型评价设施菜地土壤重金属污染风险[J]. 农业资源与环境学报, 2020, **37**(6): 960-969. Jia L, Qiao Y H, Chen Q, *et al.* Assessment of heavy metal pollution risk in greenhouse soil based on an improved matter-element extension model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(6): 960-969.
- [32] 王天阳, 王国祥. 昆承湖水质参数空间分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(8): 1384-1390. Wang T Y, Wang G X. Spatial distribution of water quality parameters in Lake Kuncheng[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(8): 1384-1390.
- [33] 左倬, 王金凤, 由文辉. 上海城市不同绿地类型土壤重金属污染研究[J]. 生态科学, 2008, **27**(1): 12-16. Zuo Z, Wang J F, You W H. A study on heavy metal pollution in different greenbelts types of Shanghai[J]. *Ecological Science*, 2008, **27**(1): 12-16.
- [34] 贾锐鱼, 朱万勇, 李楠, 等. 西安市公园土壤及灰尘中重金属污染与生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2015, **22**(5): 316-320. Jia R Y, Zhu W Y, Li N, *et al.* Heavy metal contents and ecological risk assessment of soils and dust in urban parks of Xi'an City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, **22**(5): 316-320.
- [35] Glennon M M, Harris P, Ottesen R T, *et al.* The Dublin SURGE Project: geochemical baseline for heavy metals in topsoils and spatial correlation with historical industry in Dublin, Ireland[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2014, **36**(2): 235-254.
- [36] Praveena S M, Ismail S N S, Aris A Z. Health risk assessment of heavy metal exposure in urban soil from Seri Kembangan (Malaysia)[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, **8**(11): 9753-9761.
- [37] Wilson M J. Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates[J]. *Clay Minerals*, 2004, **39**(3): 233-266.
- [38] 陈颖. 基于校园样品的西安城市灰尘重金属污染研究[D].

- 西安: 陕西师范大学, 2014.
- Chen H. Metal contamination in urban dust of Xi'an, China; a study based on campus dust samples[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2014.
- [39] Wang S, Cai L M, Wen H H, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 92-101.
- [40] Lin M L, Gui H R, Wang Y, *et al.* Pollution characteristics, source apportionment, and health risk of heavy metals in street dust of Suzhou, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(2): 1987-1998.
- [41] 田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3118-3125.
- Tian C H, Yang R Z, Gulizhaer Yilihamu, *et al.* Pollution levels and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3118-3125.
- [42] Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun city, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **108**(1): 27-28.
- [43] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- Yu Y H, Lv J S, Wang Y M. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the lower Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2865-2874.



CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphotically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)