

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)	

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¹, 徐子琪², 严俊霞^{1*}, 赵秀阁³, 王丹璐³

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029; 3. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 室内灰尘中的重金属元素会对人体造成不利影响. 为了解采暖季太原市城乡居民室内灰尘中重金属的污染特征, 对太原市城区和农村居民区室内灰尘样品中 11 种重金属元素的含量水平进行分析, 用地累积指数和污染载荷指数法评价室内灰尘中重金属的污染特征, 用富集因子和主成分分析法探讨了重金属的来源, 利用潜在生态危害指数对室内灰尘中的重金属的潜在生态风险进行了评价. 结果表明: ①除 Co、Mn 和 V 外, 室内灰尘中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、As、Zn 和 Hg 含量均超过了山西省土壤背景值; Co、Cr、Cu、Mn、Ni 和 Hg 含量在城乡之间存在显著差异 ($P < 0.05$). ②整体上室内灰尘中重金属表现为城区中度污染, 农村轻度污染. 城区居民区室内灰尘中 Co、Mn 和 V 未受到污染, As、Ni 和 Hg 受到轻度污染, Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 为偏中度污染; 农村室内灰尘中除 Hg 和 V 外, 其余 9 种元素的污染程度都低于城区. ③太原市城区和农村居民区室内灰尘中 As、Cd、Cu、Pb、Zn 和 Hg 含量主要受人为源的影响. 城区主要来自于交通污染源和重工业污染源, 而农村主要来自于燃煤和吸烟产生的烟尘和煤灰沉积; 太原市城区和农村居民区室内灰尘中的 Co、Cr、Mn、Ni 和 V 含量主要受自然源的影响. ④太原市城区和农村居民区室内灰尘重金属污染处于较高生态风险水平, 综合生态风险指数分别为 359.43 和 471.02, Cd 和 Hg 贡献率最大.

关键词: 室内灰尘; 重金属; 来源; 生态风险评价; 太原市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2143-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008045

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 Hao¹, XU Zi-qi², YAN Jun-xia^{1*}, ZHAO Xiu-ge³, WANG Dan-lu³

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The presence of heavy metals in indoor dust is a world-wide concern owing to its negative impact on humans. In this study, we collected indoor dust samples from urban and rural residential areas during the heating season in Taiyuan City. We then identified the concentrations of 11 heavy metals (Cd, Co, Cr, Pb, Mn, Ni, Cu, Zn, V, As, and Hg) using inductively coupled plasma-mass spectrometry. Based on the concentrations, we categorized the pollution levels of indoor dust using the geo-accumulation index and the pollution load index. We further identified the sources of heavy metals using the enrichment factor and principal component analysis. Finally, we evaluated the potential ecological risks of heavy metals via the potential ecological index. The results illustrated that ① with the exception of Co, Mn, and V, the mean concentrations of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, As, Zn, and Hg in indoor dust were higher than the soil background values of Shanxi Province. There was a significant difference ($P < 0.05$) in the concentrations of Co, Cr, Cu, Mn, Ni, and Hg between the urban and rural areas. ② Overall, the pollution degree of heavy metals in indoor dust was identified as moderate in the urban area of Taiyuan City, but slight in the rural area. The indoor dust sample in the urban area was not contaminated by Co, Mn, and V. However, it was slightly polluted by As, Ni, and Hg. In addition, it was close to moderately polluted by Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn. In the rural area, the pollution degrees of all the metals, except for Hg and V, in indoor dust were lower than those in the urban area. ③ The As, Cd, Cu, Pb, Zn, and Hg in indoor dust for both urban and rural areas might have mainly originated from anthropogenic sources. The pollution sources were mainly transportation and industry in the urban area and coal combustion and indoor smoking in the rural area. The Co, Cr, Mn, Ni, and V in indoor dust in Taiyuan City might have mainly originated from natural sources. ④ The ecological risk of heavy metal pollution in indoor dust for both the urban and rural areas of Taiyuan City was relatively high, with integrated ecological risk indexes of 359.43 and 471.02 in the urban and rural areas, respectively. In addition, Cd and Hg were the largest contributors.

Key words: indoor dust; heavy metal; sources; ecological risk assessment; Taiyuan City

收稿日期: 2020-08-05; 修订日期: 2020-11-13

基金项目: 重点地区环境与健康调查、监测和风险评估项目(2111101); 山西省高等学校“服务产业创新学科群建设计划”项目(20181401)

作者简介: 黄浩(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: 15035649467@163.com

* 通信作者, E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

重金属是指密度大于 $5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的金属,具有累积性和难降解等特点,积累于人体可引发多种危害^[1]. 室内灰尘是由有机和无机颗粒组成的一种多相和复杂的粒子混合物^[2],其来源复杂,是人体重金属暴露的重要途径之一^[3,4]. 室内灰尘中的重金属可通过呼吸道、消化道和皮肤接触 3 种途径对人体健康带来危害^[5]. 据报道,人在室内污染物的暴露量约为室外环境的 1 000 倍^[6],加上人们待在室内的时间约占 1 d 总时间的 80% 以上^[7],因此,研究室内灰尘中重金属含量及其来源对人体健康具有重要的意义.

目前,国内外对室内灰尘中重金属的含量、来源、空间分布和健康风险等进行了许多研究^[3,5,6,8-12]. 有研究表明,室内灰尘来源复杂,主要包括室内和室外来源. 对尼泊尔 4 个主要城市室内灰尘中重金属的含量及其来源研究表明,Ag、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Sb、Mn 和 Zn 比背景值高 2 ~ 13 倍,Cr、Ni、Sb、Ag、Pb、Cu 和 Zn 主要受人为源的影响,Co、Fe、As、Mn 和 Cd 则主要来自自然源^[8]. Bao 等^[9]对甘肃农业大学宿舍的室内外灰尘中重金属的污染状况进行了研究,发现冬季灰尘样本中重金属的浓度高于夏季,室内灰尘中的 Hg 主要来源于建筑材料和室内人为活动. Zhang 等^[10]对成都市城区室内灰尘中的重金属研究表明,室内灰尘中重金属的浓度高于街道尘,交通污染源和合金腐蚀是导致灰尘中重金属含量升高的重要因素,成都居民家庭灰尘中重金属存在轻微的非致癌和致癌风险. 太原市作为国家的能源重化工基地,煤炭、冶金、机械、化工和电力为其支柱产业,一度被列入全国环境污染最重城市之一,尤其采暖季是灰霾的高发期^[13]. 目前,学者们已经对太原市土壤^[14]、大气颗粒物^[15]、蔬菜^[16]和地表灰尘^[17]中重金属的含量水平、污染来源和风险评估进行了报道,但有关太原市室内灰尘中重金属的污染程度及来源尚未见相关报道. 本文对采暖季太原市城乡居民区室内灰尘中 11 种(Cd、Co、Cr、Pb、Mn、Ni、Cu、Zn、V、As 和 Hg)重金属的污染程度和污染来源进行分析,并对各元素的潜在生态风险进行评价,旨在为太原市室内环境质量的改善提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

太原市($37^{\circ}27' \sim 38^{\circ}25' \text{N}$, $111^{\circ}30' \sim 113^{\circ}09' \text{E}$)位于山西省晋中盆地北部,是全国重要的新材料和先进制造业基地,以煤炭为主要能源,其工业门类齐全,能耗结构具有一定代表性.

1.2 样品采集

室内灰尘样品于 2019 年 1 月采集. 共采集了 72 户家庭的室内灰尘样品,其中太原市城区 36 户,农村 36 户. 城区和农村的采样点分别位于太原市山西大学、学府东和双西二社区以及太原市委烦县的向阳村、童子崖村和潘家庄村. 样品采集时,用无尘毛刷在室内(客厅、卧室)易积累灰尘的柜顶、窗台和桌面等处多点收集,每户 1 个样品. 同时收集调查家庭活动较频繁的场所以内灰尘 6 份. 共采集室内灰尘样品 78 个. 样品采集后带回实验室自然风干后过 100 目尼龙筛备用. 采集灰尘的同时,对各家庭进行了暴露行为模式调查,调查的主要内容包括居民基本信息,与环境相关的暴露行为模式和调查对象家庭及工作场所周边环境状况等.

1.3 样品分析

样品经 $\text{HNO}_3\text{-HF-H}_2\text{O}_2$ 消解后,用电感耦合等离子体质谱仪(NexION 350,珀金埃尔默公司)测定 Cd、Co、Cr、Pb、Mn、Ni、Cu、Zn 和 V 的含量,用原子荧光光度计(AFS-930,北京吉天)测定 As 和 Hg 的含量. 测定过程中用 10% 平行样、国家标准土样(GSS-33)和空白样进行质量控制,结果达到质量控制要求.

1.4 地累积指数

采用地累积指数评价室内灰尘的重金属污染程度. 地累积指数(I_{geo})通常称为 Müller 指数,该法同时考虑自然地质过程造成的背景值和人为活动对重金属污染的影响^[18],其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right] \quad (1)$$

式中, C_n 表示室内灰尘中某一重金属元素的质量分数($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_n 为相应重金属元素的土壤背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),本文采用山西省土壤元素背景值^[19]; 1.5 为修正指数,通常用来表征沉积特征及其它影响. 室内灰尘重金属的污染程度分级标准为: $I_{\text{geo}} < 0$,无污染; $0 \leq I_{\text{geo}} < 1$,轻度污染; $1 \leq I_{\text{geo}} < 2$,偏中度污染; $2 \leq I_{\text{geo}} < 3$,中度污染; $3 \leq I_{\text{geo}} < 4$,偏重度污染; $4 \leq I_{\text{geo}} < 5$,重度污染; $I_{\text{geo}} \geq 5$,极重度污染.

1.5 污染负荷指数法

采用污染负荷指数法(PLI)评价研究区室内灰尘中重金属元素污染的整体水平,其计算公式如下^[20]:

$$\text{CF}_i = C_i / S_i \quad (2)$$

$$\text{PLI} = \sqrt[n]{\text{CF}_1 \times \text{CF}_2 \times \cdots \times \text{CF}_n} \quad (3)$$

式中, CF_i 为元素 i 的污染指数; C_i 为元素 i 的实测含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为元素 i 的背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),本文采用山西省土壤元素背景值^[19]; PLI 为多种重

金属元素的污染负荷指数; n 为评价的重金属元素种数. 其污染评价标准为: $PLI \leq 1$ 为无污染, $1 < PLI \leq 2$ 为轻度污染, $2 < PLI \leq 3$ 为中度污染, $3 < PLI$ 为强度污染.

1.6 富集因子法

富集因子法^[21] (EF) 常被用来评价金属元素在灰尘或土壤中的富集程度, 可以判断人类活动对环境的扰动程度, 其计算公式如下:

$$EF = (C_i/C_n)_{\text{sample}} / (C_i/C_n)_{\text{background}} \quad (4)$$

式中, C_i 为室内灰尘中某一重金属元素的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_n 为参比元素的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 本研究选择 Mn 作为参比元素, 采用山西省土壤元素背景值作为参考值^[19]. 当 $EF \leq 2$ 为无富集或轻微富集, $2 < EF \leq 5$ 为中度富集, $5 < EF \leq 20$ 为显著富集, $20 < EF \leq 40$ 为强烈富集, $EF > 40$ 为极强富集.

1.7 生态风险评价

利用瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态危害指数^[22] 对室内灰尘中的重金属潜在生态危害进行评价, 该指数能够综合反映重金属对生态环境的影响, 计算公式如下:

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_n^i} \quad (5)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (6)$$

$$RI = \sum_{n=1}^m E_r^i \quad (7)$$

式中, C_f^i 为第 i 种重金属的污染系数; C_i 为室内灰尘样品中第 i 种重金属的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_n^i 为第 i 种重金属的参比值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 采用山西省土壤元素背景值^[19]; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态风险系数; T_r^i 第 i 种重金属的毒性系数, 本研究分别取 30 (Cd)、5 (Co)、2 (Cr)、5 (Cu)、1 (Mn)、5 (Ni)、5 (Pb)、10 (As)、1 (Zn)、40 (Hg) 和 2 (V)^[23]; RI 为多种重金属的综合潜在风险指数. 潜在生态风险

分级标准详见表 1.

表 1 潜在生态风险评价指标分级标准

Table 1 Grading standards of the potential ecological risk index

E_r^i	风险程度	RI	风险程度
< 40	轻微生态风险	< 150	轻微生态风险
40 ~ 80	中等生态风险	150 ~ 300	中等生态风险
80 ~ 160	较高生态风险	300 ~ 600	较高生态风险
160 ~ 320	高生态风险	> 600	高生态风险
> 320	极高生态风险		

1.8 统计分析

用 SPSS 19.0 (IBM, USA) 进行数据的描述统计分析和污染来源分析. 用单样本柯尔莫哥洛夫-斯米洛夫 (one-sample Kolomogorov, K-S) 检验数据是否符合正态分布, 当 $P_{K-S} > 0.05$ 时, 则认为数据服从正态分布. 符合正态分布的数据采用独立样本 t 检验、不符合正态分布的数据采用独立样本曼-惠特尼 U 检验来分析城、乡室内灰尘重金属含量均值的差异程度. 利用皮尔逊相关系数来分析不同重金属元素之间的相关性, 利用主成分分析来揭示重金属元素的污染来源. 所有的图用 SigmaPlot 14.0 软件绘制.

2 结果与讨论

2.1 重金属含量

2.1.1 室内灰尘重金属含量

太原市居民区采暖季室内灰尘中 11 种重金属元素的含量见表 2. 总体看, 除 Co、Mn 和 V 元素外, 其余 8 种元素含量的几何均值均大于山西省土壤背景值中对应元素的含量值, 表明重金属元素在居民区室内灰尘中存在一定程度的富集. Cd 和 Zn 含量达到背景值的 4 倍以上, Hg 和 Pb 达到背景值 3 倍以上 (表 2), 表明这些元素在灰尘中富集程度较重; 相反 Cr、Cu、Ni 和 As 富集程度较轻. 曹冬霞^[17] 对太原市城区地表灰尘中重金属的研究结果表明, Cr、Cu、Ni、Pb 和 Mn 均超过了土壤背景值, 并具有一

表 2 太原市室内灰尘重金属含量¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Heavy metal content of indoor dust in Taiyuan City / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

元素	P_{K-S}	最小值	最大值	算术均值	几何均值	变异系数	标准差	背景值	倍数 ¹⁾	国家标准
Cd	0.20	0.08	1.20	0.56	0.49	0.47	0.26	0.10	4.81	0.30
Co	0.20	4.28	12.09	8.19	8.02	0.19	1.59	10.10	0.79	—
Cr	0.00	4.80	492.42	133.92	82.21	1.03	137.30	55.30	1.49	200.00
Cu	0.00	8.10	282.68	68.40	53.62	0.76	52.15	22.90	2.34	100.00
Mn	0.20	255.21	711.49	443.94	431.68	0.24	106.92	532.00	0.81	—
Ni	0.00	5.55	103.47	40.46	34.69	0.56	22.61	29.90	1.16	50.00
Pb	0.02	5.01	128.13	50.29	44.84	0.44	21.97	14.70	3.05	300.00
As	0.20	9.63	28.61	17.42	16.97	0.23	4.00	9.10	1.86	30.00
Zn	0.20	31.81	645.96	291.60	255.21	0.47	136.85	63.50	4.02	250.00
Hg	0.00	0.00	0.57	0.10	0.07	0.98	0.10	0.02	3.12	0.50
V	0.20	23.29	66.62	48.79	47.89	0.18	8.92	63.40	0.76	—

1) 倍数为重金属元素含量的几何均值与土壤背景值的比值

定的空间分布特点. 参照中国土壤环境质量标准^[24], 选用二级标准(维护人体健康的土壤限制值)判断重金属含量对人体的危害性, 发现 Cd 和 Zn 含量超过限定标准, 其余重金属元素含量均未超标.

2.1.2 城乡居民区室内灰尘重金属含量差异性分析

11 种重金属元素中, 除 Pb、Hg 和 V 外, 其余 8 种元素含量均表现为城区高于农村的特点. 其中 Co、Cr、Cu、Mn 和 Ni 含量表现为城区显著大于农村的特点($P < 0.05$), Hg 含量城区显著低于农村($P < 0.05$) (表 3). 其余元素含量城区和农村之间没有显著差异($P > 0.05$). 城乡之间重金属元素含量的差异可能与城乡之间交通流量、采暖方式、燃料类型和工业生产等因素的差异有关. 有研究表明人类活动的强度对街道灰尘中重金属的含量具有正累积效应^[25]. 本研究中农村 3 个采样点均位于娄烦县, 该县是太原市最重要的水源地和绿色生态屏障区, 也是国家扶贫开发重点县, 受工业和交通的影响相对城区来说较小, 人类活动的干扰强度弱于城区. 此外, 根据本研究问卷调查的结果, 农村采样点约 90% 的调查户采用土暖、10% 采用烧煤炉的采暖方式, 冬季燃煤是做饭和取暖的主要燃料, 而城区采样点均实现了集中供暖, 做饭的燃料类型以天然气为

主. 日常生活和室外环境的差异导致了城乡之间室内灰尘中重金属含量的差异.

2.2 污染水平

采暖季太原市城乡居民区室内灰尘中重金属污染的 I_{geo} 评价结果见图 1. 从中可以看出, 城区居民区所有室内灰尘样品中 Co、Mn 和 V 的 I_{geo} 均小于 0, 未受到污染; Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、As、Zn 和 Hg 的 I_{geo} 的变化范围分别为 $-0.85 \sim 2.98$ 、 $-4.11 \sim 2.57$ 、 $-2.08 \sim 3.04$ 、 $-3.01 \sim 1.21$ 、 $-2.14 \sim 2.54$ 、 $-0.44 \sim 1.07$ 、 $-1.58 \sim 2.76$ 和 $-1.01 \sim 1.60$. 从 I_{geo} 的中位数来看, As、Ni 和 Hg 受到轻度污染, 其 I_{geo} 分别为 0.39、0.15 和 0.52, Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 为偏中度污染, 其 I_{geo} 分别为 1.98、1.47、1.43、1.14 和 1.71 [图 1(a)]. 与城区相比, 农村居民区室内灰尘样品中除 Hg 和 V 外, 其余 9 种元素的 I_{geo} 的平均值都低于城区 [图 1(b)], 其中 Cr、Cu、Ni 和 Hg 达到极显著水平($P < 0.01$), 其余元素的 I_{geo} 无显著差异($P > 0.05$). Cr、Cu、Ni 和 Hg 的污染程度与城区不同, 分别为无污染、轻度污染、无污染和偏中度污染, 其余元素的污染程度城区和农村相同. 从污染负荷指数看, 城区居民区室内灰尘样品中重金属 PLI 的变化大于农村, 变异系数分别为 31.58% 和 21.42%, 变化范围分别为 0.50 ~ 3.78 和 0.84 ~ 2.63, 表明城区的变异较大, 受人为活动影响大于农村. 城区有 7.5% 的样品中的重金属未受到污染、15.0% 轻度污染、52.5% 中度污染和 25% 强度污染, 农村 2.56% 未受到污染、66.67% 轻度污染和 30.77% 中度污染. 太原市城区居民区室内灰尘中重金属的 PLI 的平均值为 2.51, 呈现中度污染; 农村为 1.89, 呈现轻度污染 (图 2).

2.3 重金属来源

2.3.1 富集因子法

采暖季农村居民区室内灰尘重金属富集因子从小到依次依次为 $V < Co < Cr < Ni < As < Cu < Pb < Zn < Cd < Hg$, 其中 V、Co、Cr 和 Ni 的 EF 的中位值均小于 2 (图 3), 表明这些元素主要来源于地壳, 主要

表 3 太原市城乡室内灰尘重金属统计/ $mg \cdot kg^{-1}$
Table 3 Statistics of the heavy metals in urban and rural indoor dust in Taiyuan City/ $mg \cdot kg^{-1}$

元素	城区		农村		差异性分析 $P^{(1)}$
	均值	标准差	均值	标准差	
Cd	0.61	0.28	0.51	0.24	0.41
Co	8.33	1.79	8.04	1.36	0.05
Cr	224.91	147.63	45.26	11.58	0.00
Cu	97.61	60.76	42.19	20.75	0.00
Mn	499.76	111.55	386.65	63.63	0.01
Ni	56.54	22.89	25.61	6.48	0.00
Pb	49.26	25.05	51.49	18.10	0.33
As	18.20	4.37	16.68	3.52	0.24
Zn	321.72	140.95	258.96	126.16	0.91
Hg	0.05	0.02	0.15	0.63	0.00
V	47.93	9.58	49.58	8.31	0.75

1) Cd、Co、As、Mn、Zn 和 V 为独立样本 t 检验结果, Cr、Cu、Ni、Hg 和 Pb 为独立样本曼-惠特尼 U 检验结果

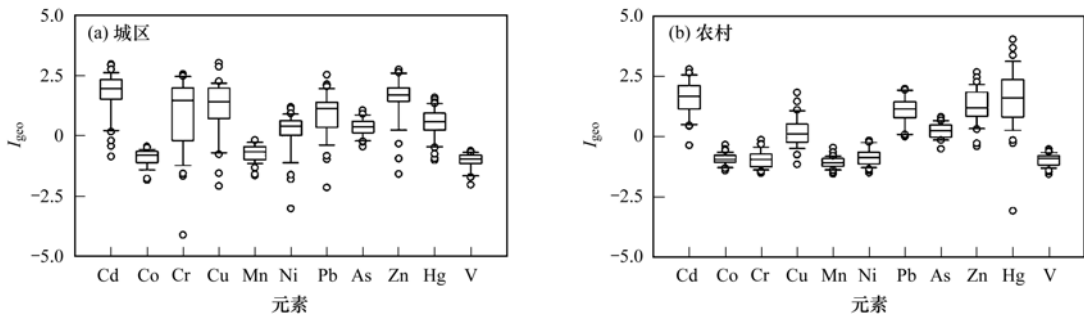


图 1 太原市城区和农村居民区室内灰尘地累积指数 (I_{geo}) 评价结果

Fig. 1 Boxplots of the geo-accumulation index (I_{geo}) for 11 heavy metals in indoor dust of urban and rural areas in Taiyuan City

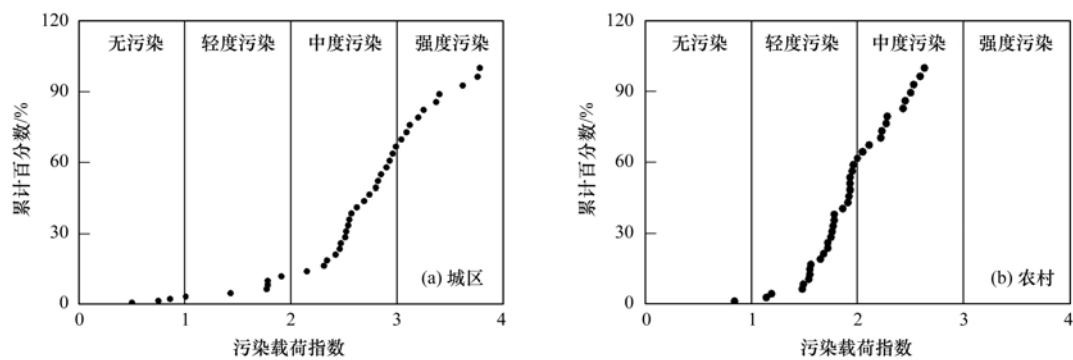


图2 太原市城区和农村居民区室内灰尘污染载荷指数 (PLI) 评价结果

Fig. 2 Pollution load index (PLI) for heavy metals in indoor dust of urban and rural areas in Taiyuan City

受自然因素影响; As、Cu 和 Pb 的 EF 的中位值介于 2~5 之间,属于中度富集,主要受自然因素影响,同时一定程度上也受到人为因素影响; Zn、Cd 和 Hg 的 EF 介于 5~20 之间,属于显著富集,表明这些元素受到自然因素和人为因素双重影响,并且 EF 值越大,受到的人为干扰越大.采暖季太原市城区居

民区室内灰尘重金属的富集因子从小到大依次为 $V < Co < Ni < As < Hg < Pb < Cr < Cu < Zn < Cd$, 其中 V、Co、As、Pb、Cu、Zn、Ni 和 Cd 的富集程度与农村相同,Cr 的富集程度显著高于农村 ($P < 0.01$) 为中度富集,Hg 的富集程度显著低于农村 ($P < 0.01$) 为中度富集.

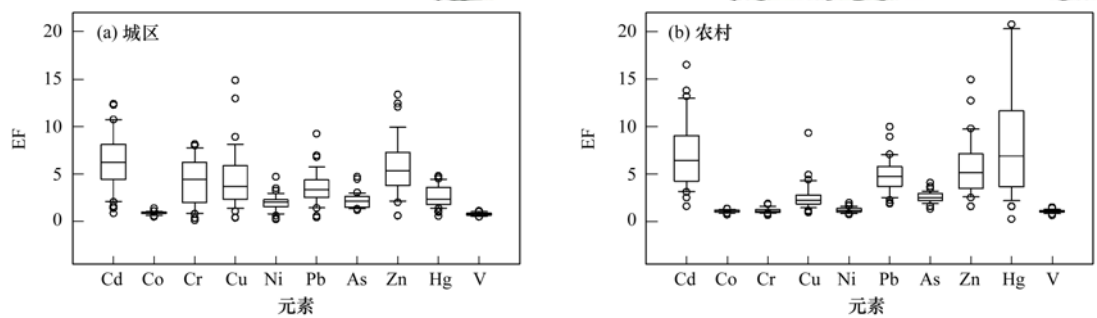


图3 太原市城区和农村居民区室内灰尘富集因子 (EF) 评价结果

Fig. 3 Boxplots of the enrichment factor (EF) for heavy metals in indoor dust of urban and rural areas in Taiyuan City

2.3.2 相关性分析

相关性分析可以确定重金属是否来自同一污染源^[26].城区居民区室内灰尘中 Cd-Cr-Cu-Ni-Pb-Zn-Hg、Co-Cr-Mn-Ni-Pb-V、Cr-Mn-Ni-Pb-V、Cu-Ni-Pb-Zn-Hg、Mn-V、Ni-Pb-Zn-Hg 和 Pb-Zn-Hg 之间为极显著正相关 ($P < 0.01$), Cr-Cu-Hg 之间呈显著正相关 ($P < 0.05$). 11 种元素中, As 仅与 Zn 之间具有显著正相关关系,与其他元素相关性不显著,表明 As 和 Zn 可能有相似的来源.但是 V 与 Cu、Zn 呈显著、极显著负相关,表明 V 与 Cu 和 Zn 的来源不同.农村居民区室内灰尘中 Co-Cr-Mn-V、Cr-Cu、Cu-Pb-Zn、Mn-V 和 Ni-V 之间为极显著正相关, Cd-Cu-Pb-Zn、Cr-Mn-Ni-V 和 As-V 之间显著正相关. Hg 与各元素之间均无显著相关性,推断 Hg 可能与其它重金属的来源不同(表4).

2.3.3 主成分分析

根据特征值大于 1 的原则,采暖季太原市城区居民区室内灰尘中 11 种重金属提取了 4 个主成分,累计方差贡献率为 87.66% (表5).主成分 1 的方差

贡献率为 38.23%, Cd、Cu、Pb、Zn 和 Hg 的载荷较高,分别为 0.90、0.86、0.88、0.89 和 0.73. Cu、Pb 和 Zn 是交通污染源的标志性元素^[27],汽车轮胎磨损也会释放 Zn 和 Cd^[28].煤炭燃烧、汽车尾气排放、焦化和钢铁冶炼等会释放 Hg 和 Pb.此外,乳胶漆除含有 Pb 外,其杀菌剂中也含有 Cu 和 Zn^[10].太原市是以煤炭、冶金、机械、化工和电力为支柱产业的资源型重工业城市,其汽车保有量呈逐年增加的趋势,据文献^[29],2019 年末全市民用汽车保有量 168.37 万辆.因此,主成分 1 可能主要受人为源影响,主要来源于交通污染源、工业生产和室内环境等.主成分 2 为 Co、Cr、Ni 和 V 组合,其方差贡献率为 28.05%.结合前述分析可知,太原市城区 Co、Ni 和 V 基本未受到污染,属于无富集或轻微富集; Cr 的 EF 的变化范围从 0.11~8.15,同时受到自然源与人为源的作用,在主成分 1 上也有一定的正载荷(0.34),因此,主成分 2 主要来源于成土母质,为自然源.主成分 3 的方差贡献率为 10.89%, As 的载荷最高为 0.91. As 是燃煤尘的标志性元素. 11 种元

素中,As 仅与 Zn 之间具有显著相关关系,与其他元素相关都不显著,表明 As 和 Zn 可能有相似的来源,说明主成分 3 代表人为源,可能为燃煤尘. 主成分 4 的方差贡献率为 10.48%, Mn 的载荷最高为 0.93. Mn 是地壳标志性元素,受外界干扰影响较小,主要受成土过程和土壤流失影响^[30]. 本研究中太原市城

区内室内灰尘中 Mn 的几何均值低于山西省土壤背景值,Mn 与 Co 和 V 呈极显著正相关(表 4). 因此,主成分 4 主要来源与主成分 2 相同,为自然源. 综上所述,采暖季太原市城区居民区室内灰尘中 As、Cd、Cu、Pb、Zn 和 Hg 含量主要受人为源的影响,而 Co、Cr、Mn、Ni 和 V 含量主要受自然源的影响.

表 4 太原市城乡居民区室内灰尘中 11 种重金属含量相关性¹⁾

Table 4 Correlations between the heavy metal contents in indoor dust of urban and rural areas in Taiyuan City											
区域	元素	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	As	Zn	Hg	V
城区	Cd	0.22	0.50 **	0.71 **	0.25	0.50 **	0.80 **	0.17	0.61 **	0.65 **	-0.08
	Co	1	0.71 **	0.04	0.60 **	0.51 **	0.43 **	0.31	0.04	0.18	0.73 **
	Cr		1	0.37 *	0.54 **	0.69 **	0.55 **	0.10	0.17	0.38 *	0.57 **
	Cu			1	-0.04	0.49 **	0.69 **	0.22	0.72 **	0.53 **	-0.35 *
	Mn				1	0.28	0.27	-0.05	0.05	0.03	0.46 **
	Ni					1	0.52 **	0.22	0.56 **	0.46 **	0.01
	Pb						1	0.30	0.64 **	0.59 **	-0.00
	As							1	0.40 *	-0.01	0.01
	Zn								1	0.40 **	-0.50 **
	Hg									1	-0.06
	V										1
农村	Cd	0.03	0.21	0.42 *	0.03	0.28	0.42 *	-0.02	0.34 *	0.07	0.20
	Co	1	0.53 **	-0.01	0.60 **	0.50 **	0.21	0.31	-0.11	-0.21	0.80 **
	Cr		1	0.43 **	0.40 *	0.29	0.41 *	-0.05	-0.01	0.03	0.37 *
	Cu			1	0.12	0.28	0.52 **	0.02	0.47 **	0.32	-0.12
	Mn				1	0.31	0.27	0.03	-0.05	-0.14	0.43 **
	Ni					1	0.28	0.25	0.29	-0.02	0.51 **
	Pb						1	-0.12	0.56 **	0.18	-0.03
	As							1	-0.14	-0.18	0.37 *
	Zn								1	0.12	-0.24
	Hg									1	-0.17
	V										1

1) **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$

表 5 太原市城乡居民区室内灰尘中重金属含量因子分析的旋转成分矩阵

Table 5 Rotated component matrix for the heavy metal content data of indoor dust of urban and rural areas in Taiyuan City											
元素	城区					农村					
	因子				变量 共同度	因子					变量 共同度
	1	2	3	4		1	2	3	4	5	
Cd	0.90	0.19	-0.01	0.11	0.86	0.12	0.19	-0.09	0.15	0.89	0.87
Co	0.37	0.86	0.25	0.08	0.95	0.94	0.09	0.14	-0.10	0.16	0.93
Cr	0.34	0.87	-0.06	0.23	0.92	0.92	0.20	0.09	0.11	-0.04	0.90
Cu	0.86	0.20	0.13	0.18	0.83	0.32	0.60	0.16	0.55	-0.04	0.80
Mn	0.11	0.22	-0.01	0.93	0.92	0.65	0.14	0.56	-0.16	0.12	0.80
Ni	0.44	0.82	-0.04	0.18	0.90	0.57	0.51	-0.04	0.26	-0.25	0.72
Pb	0.88	0.17	0.16	-0.01	0.82	0.21	0.72	0.03	0.07	0.43	0.76
As	0.20	0.20	0.91	0.01	0.91	0.13	-0.14	0.94	0.05	-0.12	0.93
Zn	0.89	0.07	0.27	0.23	0.92	-0.17	0.88	-0.18	-0.01	0.12	0.85
Hg	0.73	0.27	-0.24	-0.32	0.77	-0.10	0.04	-0.03	0.92	0.17	0.88
V	-0.25	0.81	0.36	-0.04	0.84	0.85	-0.34	0.11	-0.02	0.17	0.88
特征值	4.21	3.09	1.20	1.15		3.41	2.15	1.30	1.30	1.16	
解释总方差/%	38.23	28.05	10.89	10.48		30.96	19.58	11.85	11.78	10.56	
累积解释总方差/%	38.23	66.28	77.18	87.66		30.96	50.53	62.38	74.16	84.72	

对农村居民区室内灰尘而言,11 种重金属提取的 5 个主成分的累计方差贡献率为 84.72%(表 5). 其中,主成分 1 的方差贡献率为 30.96%,Co、Cr、

Ni、V 和 Mn 的载荷较高. 结合前述分析可知,太原市农村 Co、Cr、Ni、V 和 Mn 未受到污染,属于无富集或轻微富集,因此,主成分 1 的主要来源为成土母

质,为自然源.主成分 2 的方差贡献率为 19.58%, Cu、Pb 和 Zn 的载荷较高,分别为 0.60、0.72 和 0.88,Ni 也有一定的载荷为 0.51.主成分 5 的方差贡献率为 10.56%,Cd 的载荷最高为 0.89(表 5).本研究中 Cd 与 Cu、Zn 和 Pb 呈显著正相关,表明它们有可能有相似的来源.喷洒农药、饲料添加剂、畜禽粪便和施用化肥等农业活动中都含有 Pb、Cu、Zn 和 Cd^[31~33].室内乳胶漆中含有 Cu、Zn 和 Pb^[10].此外,吸烟是家庭粉尘中重金属最重要的来源之一^[34],本研究中农村调查对象 73.8% 的家庭中有吸烟者.据报道,香烟中 Cd、Cu、Ni、Zn 和 Pb 的含量分别为 2.71、9.70、17.9、27.0 和 2.07 mg·kg⁻¹^[35].卷烟中的重金属可以通过吸烟产生的悬浮颗粒物和烟灰释放到室内环境中.本研究中,与城区不同,农村采样点附近交通流量小、无重型工业企业,因此排除交通污染源和工业污染源.故主成分 2 和 5 的污染源主要为农业活动和室内源,为人为源,如燃煤、室内涂料、施肥、喷洒农药和吸烟等;主成分 3 的方差贡献率为 11.85%,As 的载荷最高为 0.94.11 种元素中,As 仅与 V 显著正相关,其富集因子的平均值为 2.54,地累积指数为 0.25,表明 As 主要受自然因素影响,同时一定程度上也受到人为因素影响;主成分 4 方差贡献率为 11.78%,Hg 的载荷最高为 0.92.煤炭燃烧排放的 Hg 是环境中 Hg 的最大来源^[35].本研究中 3 个农村采样点采暖季室内取暖均采用土暖或烧煤炉的方式,燃煤是取暖和烹饪的主要燃料来源,故认为主成分 4 污染来源于室内燃煤,属人为污染.综上所述,采暖季太原市农村居民区室内灰尘中 Cd、Cu、Hg、Zn 和 Pb 含量主要受人为源的影响,而 Co、Cr、Ni、V 和 Mn 主要受自然源的影响.

2.4 重金属潜在生态风险评价

采暖季太原市城区和农村居民区室内灰尘中各重金属 E_r^i 的平均值由高到底分别为 Cd > Hg > Cu > As > Pb > Ni > Cr > Zn > Co > V > Mn 和 Hg > Cd > As > Pb > Cu > Ni > Zn > Co > Cr > V > Mn(表 6).除城区 Cd、Hg 和农村 Hg 的 E_r^i 在 160~320 之间、为高生态风险水平,农村 Cd 的 E_r^i 在 80~160 之间、为较高生态风险水平外,其余重金属的 E_r^i 都低于 40,生态危害级别为轻微.城区和农村 RI 的平均值分别为 359.43 和 471.02,表明太原市城乡居民区室内灰尘中重金属污染整体上属于较高生态风险水平.从变化范围来看,太原市城区的 RI 的变异系数(36.85%)小于农村(47.82%),变化范围分别为 95.86~654.56 和 88.14~1154.08,城区居民区中有 10% 的调查点重金属生态风险处于轻微生态风险水平,17.5% 处于中等生态风险水平,67.5% 处于较高生态风险水平,5% 处于高生态风险水平.农村居民区分别有 2.56%、23.08%、48.72% 和 5.64% 的调查点处于轻微、中等、较高和高生态风险水平(图 4).从不同元素对 RI 的贡献率来看,城区和农村居民区室内灰尘中各重金属对 RI 的贡献率由高到底分别为 Cd > Hg > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn > Co > V > Mn 和 Hg > Cd > As > Pb > Cu > Ni > Co > Zn > Cr > V > Mn. Cd 和 Hg 分别对城区和农村居民区室内灰尘中重金属 RI 的贡献率为 47.53%、29.96% 和 35.20%、48.97%,其余重金属的贡献率都低于 7%,表明 Cd 和 Hg 是本研究区域主要的潜在生态风险来源(图 5),主要原因可能是由于 Cd 和 Hg 的土壤背景值较低、毒性系数较高,表明低浓度的重金属对潜在生态风险的贡献率应该引起重视,这与赵珍丽等^[36]对电镀厂周边大气的研究结论相一致.

表 6 重金属潜在风险评价结果
Table 6 Potential ecological risk assessment of heavy metals

重金属		城区				农村			
		最小值	最大值	平均值	变异系数/%	最小值	最大值	平均值	变异系数/%
E_r^i	Cd	24.98	354.23	177.96	45.88	35.42	316.41	150.83	44.58
	Co	2.12	5.53	4.12	21.18	2.84	5.99	3.98	16.28
	Cr	0.17	17.81	8.13	63.93	1.06	2.76	1.64	25.59
	Cu	1.77	61.72	21.28	58.21	3.40	26.81	9.21	49.19
	Mn	0.48	1.34	0.94	22.03	0.52	1.10	0.73	16.24
	Ni	0.93	17.30	9.46	38.34	2.67	6.76	4.28	25.29
	Pb	1.71	43.58	16.75	49.54	7.57	30.01	17.51	32.26
	As	11.09	31.43	20.00	22.76	10.58	26.65	18.33	20.80
	Zn	0.50	10.17	5.07	43.25	1.15	9.67	4.08	46.76
	Hg	29.89	181.46	94.21	40.39	7.16	990.88	258.88	80.22
	V	0.73	1.97	1.51	18.98	1.03	2.10	1.56	16.75
RI	95.86	654.56	359.43	36.85	88.14	1 154.08	471.02	47.82	

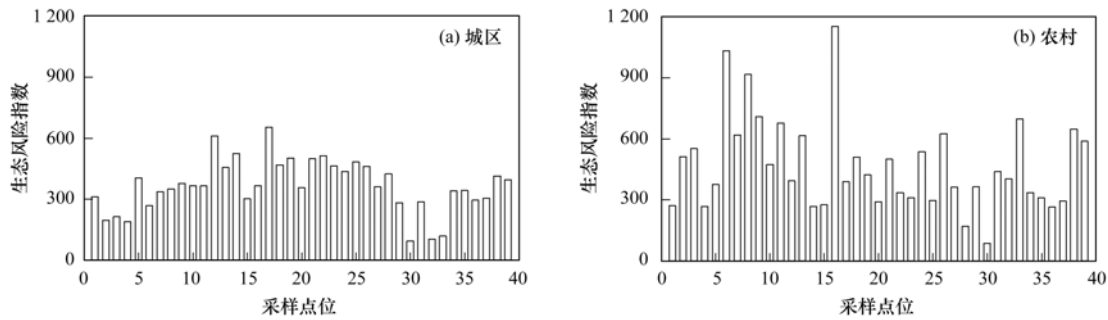
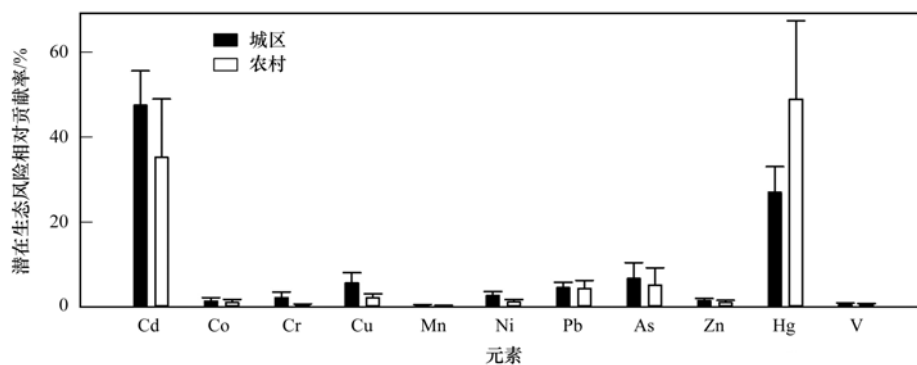


图4 太原市城区和农村居民区各采样点位室内灰尘中重金属元素潜在生态风险指数

Fig. 4 Potential ecological risk indexes (RIs) of heavy metals in urban and rural household dust samples in Taiyuan City



图中误差棒为标准偏差

图5 太原市城区和农村居民区室内灰尘中重金属元素对潜在生态风险相对贡献率

Fig. 5 Relative contribution rates of heavy metals to the potential ecological risk indexes (RIs) of urban and rural household dust in Taiyuan City

3 结论

(1)采暖季太原市城乡居民区室内灰尘中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、As、Zn 和 Hg 的含量均超过山西省土壤背景值,Co、Mn 和 V 的含量低于山西省土壤背景值.太原市城区居民区室内灰尘中的 Co、Cr、Cu、Mn 和 Ni 的含量均值显著高于农村,Hg 的含量显著低于农村($P < 0.05$).

(2)采暖季太原市城区居民区室内灰尘中 Co、Mn 和 V 未受到污染,Ni、As 和 Hg 受到轻度污染,Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 为偏中度污染.采暖季太原市农村居民区室内灰尘中 Cr、Cu 和 Ni 的污染程度低于城区,分别为无污染、轻度污染和无污染,Hg 的污染程度高于城区为偏中度污染,其余元素的污染程度和城区相同.整体上,采暖季太原市城区、农村居民区室内灰尘中重金属的污染程度分别为中度污染、轻度污染.

(3)采暖季太原市城区和农村居民区室内灰尘中 As、Cd、Cu、Pb、Zn 和 Hg 含量主要受人为源的影响,城区主要来自于交通污染源和重工业污染源,农村主要来自于燃煤和吸烟.太原市城区和农村室内灰尘中的 Co、Cr、Mn、Ni 和 V 含量主要受自然源的影响.由此可见,采暖季太原市城区居民区室内

灰尘主要受室外污染源的影响,而农村居民区室内灰尘主要受室内污染源的影响.进一步加强这些污染源的控制,能够有效降低室内灰尘的污染.

(4)采暖季太原市城区和农村居民区室内灰尘中重金属污染处于较高生态风险水平,综合生态风险指数分别为 359.43 和 471.02,Cd 和 Hg 贡献率最大.

参考文献:

- [1] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44** (27): 3239-3245.
- [2] Maertens R M, Bailey J, White P A. The mutagenic hazards of settled house dust; a review [J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2004, **567**(2-3): 401-425.
- [3] Yoshinaga J, Yamasaki K, Yonemura A, *et al.* Lead and other elements in house dust of Japanese residences-source of lead and health risks due to metal exposure [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **189**: 223-228.
- [4] Tan S Y, Praveena S M, Abidin E Z, *et al.* A review of heavy metals in indoor dust and its human health-risk implications [J]. *Reviews on Environmental Health*, 2016, **31**(4): 447-456.
- [5] 蔡云梅, 黄涵书, 任露陆, 等. 珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3620-3627.
- Cai Y M, Huang H S, Ren L L, *et al.* Levels, sources, and health risk assessments of heavy metals in indoor dust in a college in the Pearl River Delta [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**

- (9): 3620-3627.
- [6] Hwang H M, Park E K, Young T M, *et al.* Occurrence of endocrine-disrupting chemicals in indoor dust[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **404**(1): 26-35.
- [7] US EPA. Exposure factors handbook[M]. Washington: National center for Environmental Assessment, 1997.
- [8] Yadav I C, Devi N L, Singh V K, *et al.* Spatial distribution, source analysis, and health risk assessment of heavy metals contamination in house dust and surface soil from four major cities of Nepal[J]. *Chemosphere*, 2019, **218**: 1100-1113.
- [9] Bao L L, Wang S L, Sun H L, *et al.* Assessment of source and health risk of metal(loid)s in indoor/outdoor dust of university dormitory in Lanzhou City, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(31): 32333-32344.
- [10] Zhang C, Chen L J, Li H H, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 621-629.
- [11] 李良忠, 胡国成, 张丽娟, 等. 矿区家庭灰尘中重金属污染及其潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 1230-1238.
- Li L Z, Hu G C, Zhang L J, *et al.* The pollution and potential ecological risk assessment of the heavy metals in household dusts from mineral areas[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 1230-1238.
- [12] 李晓燕, 谢馨洁. 我国西南三市家庭灰尘重金属水平及差异[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(2): 365-371.
- Li X Y, Xie X J. A study on heavy metals in household dusts in 3 cities in Southwestern China[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(2): 365-371.
- [13] 曹玲娟, 耿红, 姚晨婷, 等. 太原市冬季灰霾期间大气细颗粒物化学成分特征[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 837-843.
- Cao L X, Geng H, Yao C T, *et al.* Investigation of chemical compositions of atmospheric fine particles during a wintertime haze episode in Taiyuan City[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 837-843.
- [14] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- Liu Y, Yue L L, Li J C. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- [15] 李丽娟, 温彦平, 彭林, 等. 太原市采暖季PM_{2.5}中元素特征及重金属健康风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- Li L J, Wen Y P, Peng L, *et al.* Characteristic of elements in PM_{2.5} and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- [16] 张珍珍, 程滨, 李茹, 等. 太原市市售蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. *中国农学通报*, 2016, **32**(10): 169-175.
- Zhang Z Z, Cheng B, Li R, *et al.* Status and health risk assessment of vegetable heavy metal contamination in Taiyuan City[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, **32**(10): 169-175.
- [17] 曹冬霞. 太原市地表灰尘重金属的污染状况及环境风险[D]. 太原: 山西大学, 2012.
- Cao D X. Pollution and environmental risk of heavy metals in surface dust of Taiyuan[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2012.
- [18] Looi L J, Aris A Z, Yusoff F, *et al.* Application of enrichment factor, geoaccumulation index, and ecological risk index in assessing the elemental pollution status of surface sediments[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, **41**(1): 27-42.
- [19] 史崇文, 赵玲芝, 郭新波, 等. 山西土壤元素背景值及其特征[J]. *华北地质矿产杂志*, 1994, **9**(2): 188-196.
- Shi C W, Zhao L Z, Guo X B, *et al.* Background values of soil elements in Shanxi and their distribution feature[J]. *Jour of Geol & Min Res North China*, 1994, **9**(2): 188-196.
- [20] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, **33**(1): 566-575.
- [21] Buat-Menard P, Chesselet R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, **42**(3): 399-411.
- [22] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [23] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [24] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- GB 15618-1995, Environmental quality standard for soils[S].
- [25] 秦松. 西固城区街道灰尘重金属含量的分布、来源及质量评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- Qin S. Distribution, source and quality assessment of heavy metals in urban street dust of Xigu region[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [26] 郝社锋, 陈素兰, 朱佰万. 城市环境大气降尘重金属研究进展[J]. *地质学刊*, 2012, **36**(4): 418-422.
- Hao S F, Chen S L, Zhu B W. Review on progress of heavy metal elements in atmospheric deposition in urban environment[J]. *Journal of Geology*, 2012, **36**(4): 418-422.
- [27] 肖鹏飞, 李法云, 付宝荣, 等. 土壤重金属污染及其植物修复研究[J]. *辽宁大学学报(自然科学版)*, 2004, **31**(3): 279-283.
- Xiao P F, Li F Y, Fu B R, *et al.* Soil contaminated by heavy metal and its phytoremediation[J]. *Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition)*, 2004, **31**(3): 279-283.
- [28] 李晓燕, 汪浪, 张舒婷. 城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险: 以贵阳市为例[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2889-2896.
- Li X Y, Wang L, Zhang S T. Level and the courses of heavy metals and its risk assessment in indoor dust of city: take Guiyang as a case[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 2889-2896.
- [29] 太原市统计局国家统计局太原调查队. 太原市2019年国民经济和社会发展统计公报[N]. 太原日报, 2020-04-13(004).
- [30] Rodríguez Martín J A, Arias M L, Grau Corbi J M. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geo-statistical methods to study spatial variations[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 1001-1012.
- [31] 吕晓男, 孟赐福, 麻万诸, 等. 农用化学品及废弃物对土壤

- 环境与食物安全的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, **13**(4): 150-153.
- Lu X N, Meng C F, Ma W Z, *et al.* Effects of agrochemicals and wastes on soil environment and food safety[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, **13**(4): 150-153.
- [32] Wu S, Xia X H, Lin C Y, *et al.* Levels of arsenic and heavy metals in the rural soils of Beijing and their changes over the last two decades (1985-2008)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **179**(1-3): 860-868.
- [33] McBride M B, Spiers G. Trace element content of selected fertilizers and dairy manures as determined by ICP-MS [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, **32**(1-2): 139-156.
- [34] Böhlandt A, Schierl R, Diemer J, *et al.* High concentrations of cadmium, cerium and lanthanum in indoor air due to environmental tobacco smoke [J]. Science of the Total Environment, 2012, **414**: 738-741.
- [35] Pourkhabbaz A, Pourkhabbaz H. Investigation of toxic metals in the tobacco of different Iranian cigarette brands and related health issues[J]. Iranian Journal of Basic Medical Sciences, 2012, **15**(1): 636-644.
- [36] 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 等. 电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 18-26.
- Zhao Z L, Zhao W T, Huang T, *et al.* Seasonal characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in PM₁₀ around electroplating plants[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 18-26.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2020 年 12 月 29 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 19 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

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 Amphoterically 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)