

庆阳市市区及环江—泾河沿岸土壤重金属含量生态风险评价

刘芳^{1,2}, 刘向军^{3*}, 张鹏博⁴, 唐道斌^{1,2}, 张胜强^{1,2}

1. 西北师范大学 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070

2. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070

3. 嘉应学院 地理科学与旅游学院, 梅州 514015

4. 西北师范大学 教育学院, 兰州 730070

摘要: 为评估庆阳市市区与环江—泾河沿岸表层土壤中重金属含量与生态风险状况, 本文采集了 18 组现代表层土壤样品, 采用石墨炉原子吸收光谱法等方法测定了 7 种土壤重金属元素 (Pb、As、Cd、Cr、Hg、Cu、Zn) 的含量, 利用单因子指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数等评价方法, 探讨了研究区土壤重金属含量、污染程度和生态风险, 并利用皮尔逊相关分析和主成分因子分析对市区和河流进行源解析。结果表明: (1) 对土壤重金属含量利用变异系数和峰度系数进行特征分析, 显示人类活动干扰土壤环境比较明显; (2) 与国家土壤环境标准 (GB 36600—2018) 对比发现, 庆阳市市区 Cr 元素存在一定的富集, 其余元素均处于安全范围之内; (3) 各类污染指数表明, Cd 和 Pb 在研究区的污染最为突出, 均高于其他土壤重金属的污染水平, 其余土壤重金属基本无污染; (4) 对市区各土壤重金属进行相关性分析后, 发现庆阳市市区的土壤重金属除与母质成分有关外, 在很大程度上与强烈的人类活动密切相关; 环江—泾河沿岸的土壤重金属元素间也具有相关伴生关系, 经过主成分分析后土壤重金属富集主要是自然来源和农业生产。

关键词: 土壤环境; 生态风险评价; 重金属污染; 庆阳市市区; 环江—泾河沿岸

Ecological risk assessment of heavy metal content in soil along the urban area of Qingyang City and the Huanjiang—Jinghe River

LIU Fang^{1,2}, LIU Xiangjun^{3*}, ZHANG Pengbo⁴, TANG Daobin^{1,2}, ZHANG Shengqiang^{1,2}

1. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

3. School of Geography and Tourism, Jiaying University, Meizhou 514015, China

4. College of Education, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Background, aim, and scope Soil provides food production and living space for human beings and it will continuously receiving all kinds of pollutants discharged by human. As the most important persistent

收稿日期: 2021-12-02; 录用日期: 2022-03-17; 网络出版: 2022-04-02

Received Date: 2021-12-02; Accepted Date: 2022-03-17; Online first: 2022-04-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2019KYQD24)

Foundation Item: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2019KYQD24)

通信作者: 刘向军, E-mail: xiangjunliu@126.com

Corresponding Author: LIU Xiangjun, E-mail: xiangjunliu@126.com

引用格式: 刘芳, 刘向军, 张鹏博, 等. 2022. 庆阳市市区及环江—泾河沿岸土壤重金属含量生态风险评价 [J]. 地球环境学报, 13(6): 746–756.

Citation: Liu F, Liu X J, Zhang P B, et al. 2022. Ecological risk assessment of heavy metal content in soil along the urban area of Qingyang City and the Huanjiang—Jinghe River [J]. Journal of Earth Environment, 13(6): 746–756.

toxic pollutants in soil, heavy metals are difficult to degrade and will continue to accumulate in the soil, therefore posing potential risks to the ecosystem and human beings as a global problem. In this study we take 18 surface soil samples from the urban area of Qingyang City and along the Huanjiang—Jinghe River, measure the contents of seven heavy metals, then use single-factor index method, Nemerow comprehensive pollution index method, geo-accumulation index and potential ecological risk assessment method, to estimate pollution degree and ecological risk in the study area. The source analysis of urban areas and rivers is carried out by both Pearson correlation analysis and main component analysis. **Materials and methods** A total of 18 modern topsoil samples (with sampling depth of 0—3 cm) were collected from the urban area of Qingyang City and along the Huanjiang—Jinghe River. Seven metal contents of these samples were measured at the Analysis and Testing Center of Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences. Pb, As, Cd and Cr were measured by graphite furnace atomic absorption spectrometry, Hg by atomic fluorescence spectrometry, Cu and Zn by ICP inductively coupled plasma emission spectrometry. Methods of single factor pollution index, geo-accumulation index, Nemerow comprehensive pollution index and potential ecological risk assessment were used to assess the ecological risks of heavy metals. The source analysis of urban areas and rivers is carried out by Pearson correlation analysis and main component analysis. **Results** There is no pollution of soil heavy metals along the Huanjiang—Jinghe River. Heavy metal pollution of soil has appeared in the urban area of Qingyang City, and the main source of pollution is traffic pollution. Potential ecological risks need to be properly monitored and corresponding measures to be taken. **Discussion** (1) The characteristics of soil heavy metals in this region were analyzed using the coefficient of variation and the coefficient of kurtosis, which indicate that the proportion of soil environment disturbed by human activities. (2) Compared to soil environmental quality risk control standard for soil contamination of development land (GB 36600—2018), there is a moderate enrichment of Cr element in the urban area of Qingyang City, and the other elements are within the safe range. (3) Various pollution indexes show that the pollution of Cd and Pb in the whole study area is the most prominent, which is higher than the pollution level of other heavy metals in the soil, and the pollution of other heavy metals in the soil is also on the warning line. (4) After analyzing the correlation between soil heavy metals in urban areas, it is found that soil heavy metals in the urban area of Qingyang City are closely related to strong human activities to a great extent, in addition to their maternal composition. There is also a correlation between soil heavy metals along the river, after analysis of the main composition soil heavy metal enrichment is mainly a natural source and agricultural production. **Conclusions** The pollution of heavy metals Cd and Pb in the topsoil of the urban area of Qingyang City and along the Huanjiang—Jinghe River was the most serious among the studied elements, followed by Cr, As, Cu, Zn and Hg. Subregionally, soil heavy metal pollution has occurred in the urban area of Qingyang, and there is a potential ecological risk, mainly human activities. River basins are pollution-free, and the sources of heavy metal enrichment are mainly natural sources and agricultural production. **Recommendations and perspectives** Although the urban area of Qingyang City and the Huanjiang—Jinghe River Basin as a whole are in a weak ecological risk, it is still necessary to give attention to their ecological risks, and make scientific evaluation and management. This is of great significance to support the benign and sustainable development of Qingyang City's social economy and to accelerate the pace of ecological civilization construction.

Key words: soil environment; ecological risk assessment; heavy metal pollution; the urban area of Qingyang City; Huanjiang—Jinghe River Basin

土壤是人类生存的基本要素, 为人类提供食物等生产资料和生活空间, 也持续容纳环境中其余污染物质, 例如气溶胶的沉淀、废弃污水的排放等。重金属作为土壤主要的持久性有毒污染物

质, 具有难降解等特性, 并不断在土壤中累积, 成为对生态系统和人类构成潜在风险的全球性问题(夏星辉和陈静生, 1997; 陈怀满等, 1999; 崔德杰和张玉龙, 2004)。通过各种途径进入环境中

的 Pb、As、Cd、Cr、Hg、Cu 和 Zn 元素及其化合物, 会对农作物带来直接伤害, 导致植物的死亡, 使农产品中重金属含量增加, 导致农产品污染, 威胁农产品质量安全; 也会通过各种食物链, 经过逐级生物富集对人体健康产生危害, 还可以通过影响水体和大气环境质量间接对人类健康造成威胁, 诱发脑、血管、肾等疾病, 并具有致癌性 (张婷等, 2019; 李茸, 2020)。土壤重金属污染问题受到国内外学者的重视, 已有广泛的研究, 土壤重金属污染评价常用的方法是内梅罗综合指数法、生态风险评价等方法或者利用主成分分析法和相关模型对污染源进行解析, 阐明土壤重金属的污染程度及其对相关地区生态环境可持续发展的影响 (Marr et al, 1999; 和莉莉等, 2008; 陈秀端等, 2011; 郭伟等, 2013; Chen and Lu, 2018)。Bortey-Sam et al (2015) 对加纳 Tarkwa 农业土壤中重金属进行了研究, 认为采矿活动是该区域主要的污染源; 宋明义等 (2009) 通过对宁波市城市土壤重金属综合异常区 Hg、Cd、Pb、As、Zn、Cu 化学形态的研究, 认为该市区表层土壤中重金属相对于深层土壤富集系数高, 其原因除主要与该市工业“三废”的排放密切相关外, 与所处的地质背景也有一定联系; 李春亮和刘文辉 (2012) 对甘肃省白银市区土壤中 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 的分布、存在形式和在水体中的含量进行分析, 认为该区土壤、水体已受到 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 等重金属污染。

庆阳市位于陕甘宁三省的交汇处, 域内的董志塬被誉为陇东粮仓, 但近十几年来庆阳市大规模的石油开采已对土壤健康造成影响, 因此需密切关注庆阳市市区内土壤环境的健康状况, 目前这方面的研究工作开展较少, 亟待加强 (陈丽华等, 2011)。梁俊宁 (2011) 对陇东塬区的土壤重金属含量进行了分析及土壤质量评价, 以油田为切入点进行了分析, 发现土壤中 Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni 的含量均属于未污染状态, 土壤质量清洁, 但土壤 Cd 污染程度严重, 油田重金属含量整体关系为: 华庆 < 马岭 < 西峰, 他们的研究缺少对城区和河流的研究。本研究将庆阳市市区及环江—泾河沿岸作为研究对象, 使用单因子污染指数、地累积指数、内梅罗综合污染指数及潜在生态风险评价方法分析庆阳市市区和环江—泾河沿岸的表层土壤中重金属的含量、污染分布特征及潜在生态风险等问

题, 并采用皮尔逊相关系数法和主成分分析法进行源解析, 为后续的重金属污染土壤修复和城市发展规划提供相关依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

庆阳市市区 (107°27'42" — 107°52'48"E, 35°25'55" — 35°51'11"N) 地处甘肃省东部、泾河上游, 位于陇东黄土高原董志塬北部, 平均海拔 1421 m, 主要土壤类型有黄绵土、灰褐土、黑垆土、新积土、水稻土、红黏土、潮土 7 类。研究区属温带大陆性半干旱气候, 年日照时数 2400—2600 h, 年降水量 400—600 mm, 年平均气温 10℃, 年无霜期 160—180 d, 光照充足, 四季分明。环江发源于庆阳市北部, 自西北向西南流至董志塬东侧, 汇入马莲河, 蒲河位于董志塬西侧, 蒲河和马莲河在董志塬南侧汇合, 形成泾河, 流向东南汇入渭河 (潘峰等, 2012)。庆阳市以农业为主, 种植小麦、玉米等抗旱作物, 工业主要以石油产业为主, 本文的采样点不涉及石油区域, 故影响可忽略, 第三产业旅游业正在起步阶段。研究区市区采样点的土地利用方式主要为商业用地, 附近无大型工业的存在, 而环江—泾河沿岸的土地利用以农业为主。

1.2 样品采集与测定

本文以庆阳市市区和环江—泾河沿岸为研究对象, 共采集 18 个现代土样品 (采样深度为 0—3 cm), 其中: 庆阳市市区采集 9 个样品 (编号为 C1—C9, 图 1a); 环江沿岸采集 6 个样品, 泾河沿岸采集 3 个样品 (编号为 R1—R9, 图 1b), 市区样品采集筛选人流量较大的特征点, 如陇东学院、市人民医院、小什字、九龙路等公共场所; 河流样品采集河流节点及沿岸特征点, 如堡子电厂、庆城马莲河供水站、长武亭口河流、环县环江边等。样品采集好后用塑料自封袋密封, 在实验室取出样品并在烘箱中 (40℃) 烘干。用 GPS 记录采样点经纬度坐标, 采样时间为 2015 年 5 月。烘干的样品先压碎, 挑拣出样品中的异物, 之后用玛瑙研钵将样品磨成粉末, 过 200 目尼龙筛后送往实验室进行前处理和重金属含量测定 (曾方明, 2017)。样品的重金属元素含量在中国科学院西北高原生物研究所分析测试中心进行前处理和测定, 测定的重金属共包括 Pb、As、

Cd、Cr、Hg、Cu、Zn 7种。Pb、As、Cd、Cr 的总量采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-H}_2\text{O}_2$ 湿法消解,用石墨炉原子吸收光谱法测定;Hg 用王水 ($V_{\text{王水}}:V_{\text{水}}=1:1$) 消解后用原子荧光光谱法测定;Cu、Zn 采

用 HF 湿法消解后用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP) 测试。采用国家标准物质 GBW07405、空白和 20% 的平行样进行质量控制,平行样品的相对标准偏差均小于 10%,回收率为 81%—128%。

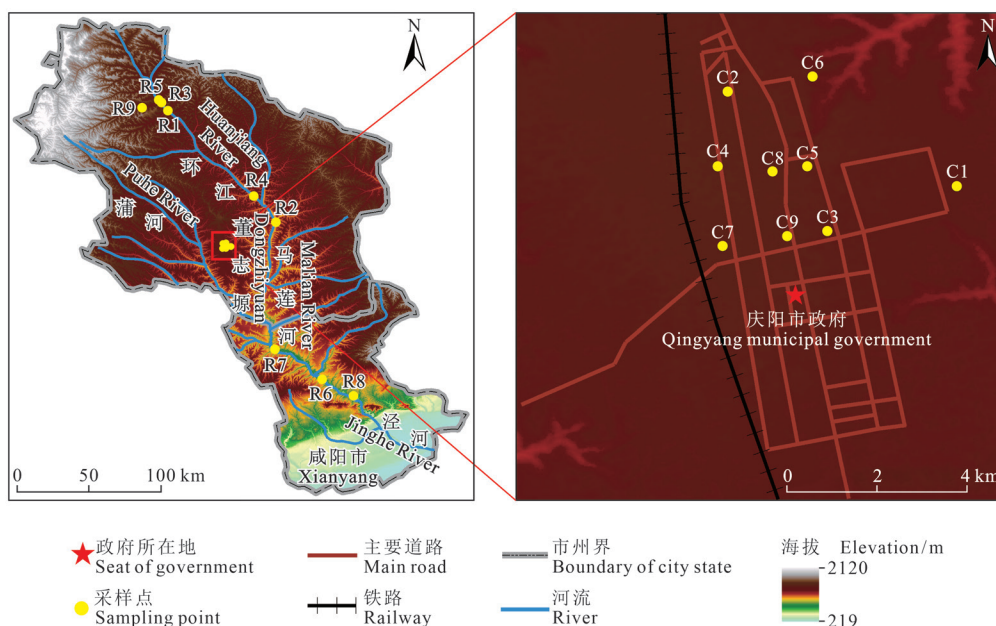


图1 研究区概况图及采样点位置图

Fig. 1 Overview map of research area

1.3 数据分析方法

1.3.1 单因子指数法

单项污染评价可采用单项污染分级指数法,用于评价土壤中某一重金属元素富集和污染等级(范拴喜等,2010)。根据下式计算单项污染分级指数,并对单项污染程度进行分级:

$$P_i = C_i \div S_i \quad (1)$$

式中: C_i 为实测土壤重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S_i 为土壤背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 本研究选取甘肃省土壤背景值作为参照(中国环境监测总站,1990;郭平等,2005;刘勇等,2011)。若 $P_i \leq 1$, 则为无污染,等级为1;若 $1 < P_i \leq 2$, 则为轻微污染,等级为2;若 $2 < P_i \leq 3$, 则为轻度污染,等级为3;若 $3 < P_i \leq 5$, 则为中度污染;若 $P_i > 5$, 则为重度污染。

1.3.2 地累积指数法

地累积指数法是一种用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,近年来被国内外学者应用于土壤重金属污染评价(Müller, 1969;郭笑笑等,2011)。其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 (C_n \div k \div B_n) \quad (2)$$

式中: I_{geo} 为地质累积指数; C_n 为样品中元素 n 的测定浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_n 为沉积物中该元素的地球化学背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 本文选用甘肃省土壤重金属背景值; k 为修正指数(一般取值1.5)(Islam et al, 2018)。根据 I_{geo} 的计算结果,若 $I_{\text{geo}} \leq 0$, 则无污染; $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$, 为轻度污染,等级为1; $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$, 为偏中度污染,等级为2; $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$, 为中度污染,等级为3; $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$, 为偏重污染,等级为4; $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$, 为重污染,等级为5; $5 < I_{\text{geo}} \leq 10$, 则为严重污染,等级为6。

1.3.3 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法是在单因子指数评价基础上进行的一种兼顾极值或突出最大值的计权型多因子环境质量指数(张汪寿等,2010;Yang et al, 2019)。具体公式如下所示:

$$P_n = \sqrt{(P_{\text{imax}}^2 + P_{\text{iavg}}^2) \div 2} \quad (3)$$

式中: P_n 为综合污染指数; P_{imax} 为单项污染指数中的最大值; P_{iavg} 为土壤中所有单项污染指数的平均值, 本文选用土壤重金属元素污染物的评价标准

《HJ/T 166—2004, 土壤环境监测技术规范》(国家环境保护总局, 2004)。内梅罗综合污染指数评价标准为 $P_n \leq 0.7$, 污染等级安全, 污染水平清洁(1级); $0.7 < P_n \leq 1$, 污染等级处于警戒限, 污染水平尚清洁(2级); $1 < P_n \leq 2$, 污染等级处于轻度污染, 土壤处于轻度污染水平(3级); $2 < P_n \leq 3$, 污染等级处于中度污染, 土壤处于中度污染水平(4级); $P_n > 3$, 污染等级处于重度污染, 土壤处于很严重的污染水平(5级)。

1.3.4 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价法是一种对土壤中重金属污染评价的方法, 考虑了土壤的重金属含量, 并且将重金属的生态效应、环境效应和毒理学综合考虑, 采用等价属性指数分级法评价(Hakanson, 1980)。RI 为多种重金属综合潜在生态风险指数, 其数值等于各个重金属潜在生态危险系数之和(徐争启等, 2008):

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (4)$$

$$E_r^i = T_r^i \times (C_{\text{表}}^i \div C_n^i) \quad (5)$$

式中: $C_{\text{表}}^i$ 为重金属的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_n^i 为计算所参比的数值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 文中采用甘肃省土壤环境背景值作为参照标准(中国环境监测总站, 1990); T_r^i 为第 i 种重金属元素的毒性系数, 其中 $\text{Pb}=\text{Cu}=5$, $\text{Zn}=1$, $\text{Cr}=2$, $\text{As}=10$, $\text{Hg}=40$, $\text{Cd}=30$; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害指数。若 $E_r^i < 40$, 则污染程度为轻微生态危害, 等级为 1; $40 \leq E_r^i < 80$, 污染程度为中等生态危害, 等级为 2; $80 \leq E_r^i < 160$, 污染程度为强生态危害, 等级为 3; $160 \leq E_r^i < 320$, 污染程度为很强生态危害, 等级为 4; $E_r^i \geq 320$, 则污染程度为极强生态危害, 等级为 5。若 $RI < 150$, 污染程度为轻微生态危害, 等级为 1; $150 \leq RI < 300$, 污染程度为中等生态危害, 等级为 2; $300 \leq RI < 600$, 污染程度为强生态危害, 等级为 3; 若 $RI \geq 600$, 则污染程度为很强生态危害, 等级为 4(徐争启等, 2008)。

2 结果及讨论

2.1 土壤重金属含量特征分析

本研究主要从变异系数、峰度进行土壤重金属含量特征分析, 具体结果如表 1 所示, 而变异系数是对概率分布分散程度的标准化度量。总体

上看, 7 种重金属中绝大多数为中到高变异性, 表明研究区土壤重金属的变异性较高, 空间分散程度较大(Chai et al, 2020)。而峰度能很好地反映所测数值在均值附近的集中程度, 本研究中峰度最大的为 Cd (8.76), 表明其与均值的差值较大, 离散程度高, 其次是 Pb (0.84), 其余重金属的峰度均小于 0, 数据与均值差异较小。

2.2 与国家土壤环境质量的对比

中国土壤环境质量标准规定了不同类型土壤中重金属含量的筛选值和管制值, 因此, 本文将庆阳市市区和环江—泾河沿岸土壤分别按照《GB 36600—2018, 土壤环境质量: 建设用地土壤污染风险管控标准》(中华人民共和国生态环境部和国家市场监督管理总局, 2018a)和《GB 15618—2018, 土壤环境质量: 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(中华人民共和国生态环境部和国家市场监督管理总局, 2018b)对比研究(表 2)。环江—泾河沿岸的土壤重金属含量值远低于农用地土壤污染筛选值, 故可推断环江—泾河沿岸的土壤重金属为非富集状态, 并未达到污染水平, 其最大值与农用地土壤污染筛选值相差最小的为 As, 相差最大的为 Hg, 并对比环江—泾河从上游至下游采样点的重金属含量, 发现并没有累积或者减小的趋势; 而庆阳市市区的土壤重金属含量除 Zn 没有可对照标准值外, Cr 含量远大于建设用地土壤污染筛选值, 均值为第一类用地的 10 倍, 超第二类用地筛选值 5 倍, 说明该区域 Cr 存在一定范围内的富集, 其余土壤重金属含量均处于安全值之内。

2.3 土壤重金属污染各类指数分析

研究区表层土壤各类污染指数评价结果如表 3 所示。单因子污染指数大小排序为: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Cr}$ 。Cd 的单因子污染指数最大, 介于 2—3, 为轻度污染; Pb 的单因子污染指数大于 1, 为轻微污染; 其他重金属的污染指数均小于 1, 无污染, 最小为 Cr。地累积污染指数大小排序为: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Cr}$, 其与单因子污染指数结果相同, Cd 和 Pb 均大于 0, 为轻度污染, 其余重金属的污染指数均小于 0, 无污染。内梅罗综合污染指数大小排序为: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Cr}$, 与前两个污染指数的结果略有差别, 其中污染指数最大的依旧为 Cd, 污染等级为重度污染, 土壤污染已很严重; Pb 污

染等级处于中度污染,土壤处于中度污染状态,其余重金属污染等级处于警戒限下,土壤污染水平为清洁,富集量最小的元素为Cr。潜在生态风险因子大小排序为 $Cd>Hg>Pb>As>Cu>Cr>Zn$,最大值依旧为Cd, Hg次之,最小值为Zn,与前述污染指数评价结果有所区别,将其计算得

到潜在生态风险指数RI为104.27,等级为1,潜在生态危机程度为轻微生态危害。从各个土壤重金属富集程度的评价结果来看,庆阳市市区和环江—泾河沿岸的土壤重金属污染情况不严峻,但需要注意防范Cd和Pb的累积对环境和人体造成危害。

表1 庆阳市市区及环江—泾河沿岸样品重金属含量
Tab. 1 Heavy metal content of samples from the urban area of Qingyang City and Huanjiang—Jinghe River

样点序号 Sample code	重金属含量 Heavy metal content/(mg·kg ⁻¹)						
	Pb	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn
C1	42.01	8.854	0.0045	0.8864	27.93	20.75	67.96
C2	24.24	5.289	0.0035	0.2104	21.65	14.36	48.27
C3	40.14	6.601	0.0037	0.2583	33.01	30.87	84.68
C4	51.66	7.676	0.0079	0.3431	34.24	32.24	93.41
C5	68.42	8.666	0.0074	1.5287	34.30	27.59	94.71
C6	42.61	9.840	0.0205	0.2927	32.74	23.59	90.69
C7	33.81	5.798	0.0187	0.2284	31.05	19.61	64.63
C8	32.46	2.915	0.0200	0.2977	21.24	18.69	70.74
C9	52.42	7.346	0.0132	0.3188	33.85	27.08	76.31
R1	27.63	4.702	0.0105	0.1169	30.46	18.22	43.49
R2	21.40	4.566	0.0025	0.1338	22.08	11.49	27.92
R3	19.64	4.216	0.0041	0.1107	19.64	12.38	28.77
R4	21.21	5.228	0.0051	0.0941	24.77	13.89	35.11
R5	30.03	10.451	0.0044	0.1766	26.58	18.56	41.09
R6	19.77	3.528	0.0029	0.0839	22.04	10.48	25.02
R7	22.62	5.428	0.0042	0.1373	24.71	16.36	37.25
R8	20.60	7.811	0.0037	0.1210	23.81	15.48	45.37
R9	22.90	5.522	0.0140	0.1459	25.48	15.29	35.56
变量 Variable	Pb	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn
最大值 Max/(mg·kg ⁻¹)	68.42	10.451	0.0205	1.5287	34.30	32.24	94.71
最小值 Min/(mg·kg ⁻¹)	19.64	2.915	0.0025	0.0839	19.64	10.48	25.02
平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	32.98	6.358	0.0084	0.3047	27.19	19.27	56.17
甘肃省土壤重金属背景值 Soil background value in Gansu Province/(mg·kg ⁻¹)	20.83	14.03	0.02	0.13	75.35	28.91	81.24
毒性系数 Toxicity factor	5	10	40	30	2	5	1
相关性 Coefficient	0.42	0.34	0.74	1.17	0.19	0.34	0.43
峰度 Kurtosis	0.84	-0.77	-0.40	8.76	-1.53	-0.50	-1.39

2.4 庆阳市市区及环江沿岸土壤重金属污染源分析

2.4.1 相关性分析

河流沿岸土壤重金属含量分析是评价河流人为污染的重要途径之一,河流生态也是一个非常重要的指示剂(Soares et al, 1999; 马媛媛, 2016)。利用SPSS 26.0软件对样品重金属含量进行相关性分析,重金属间的相关性可以推测其来源是否相同,是否具有较强的伴生关系(Borůvka

et al, 2005)。对环江—泾河沿岸样品土壤重金属进行相关性分析可得(表4): Pb与Cd、Cr, As与Cd、Cu, Cr与Zn在0.05水平上具有显著相关性; Pb、Cr、Zn与Cu在0.01水平上具有显著相关性,具有相关伴生关系。由于环江—泾河沿岸附近没有工商业活动的痕迹,大多为农业用地的灌溉生产,可推测土壤重金属富集来源主要为母岩风化和施用农药化肥(Varol, 2011; 匡荟芬, 2020)。为进一步揭示和识别土壤中重金属

来源,用主成分分析对表土中 7 种重金属含量进行特征因子提取,可提取出两个特征值大于 1 的因子,其最大旋转后特征值占总方差的 82.313% (表 5),故可以解释 7 种重金属的大部分信息。第一主成分因子贡献率为 63.687%,各元素贡献率依次为: Cu > Pb > Zn > Cr > As > Cd > Hg,各个重金属所占比例大体相似,可以佐证相关性分析的结果,推测为自然来源,即成土母质的风

化过程对土壤重金属基底含量的影响和风力、水力搬运的自然物理和化学迁移过程;第二主成分因子贡献率为 18.627%,载荷较高的是 Hg、As 和 Cr 等土壤重金属,推测为施用农药化肥等农业活动导致污染,即人类活动所导致的土壤重金属富集。从主成分因子分析中可推测环江—泾河沿岸大部分样品土壤重金属富集主要是自然来源,并且伴有一定的人为因素影响。

表 2 庆阳市市区及环江—泾河沿岸样品重金属含量与国家土壤环境质量的对比									
Tab. 2 Comparison of heavy metal contents for samples of the urban area of Qingyang City and Huanjiang—Jinghe River with quality standards of national soil environments									
区域及对比标准 Regional and comparative standards	重金属含量 Heavy metal content/(mg·kg ⁻¹)								
	参数 Parameter	Pb	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn	
环江—泾河沿岸 Along the Huanjiang—Jinghe River	均值 Mean	22.87	5.72	0.0057	0.1245	24.40	14.68	35.51	
	最大值 Max	30.03	10.45	0.0140	0.1766	30.46	18.56	45.37	
	最小值 Min	19.64	3.53	0.0025	0.0839	19.64	10.48	25.02	
GB 15618—2018, 土壤环境质量: 农用地土壤污染风险管控标准(试行)									
GB 15618—2018, soil environmental quality: risk control standard for soil contamination of agricultural land		170	25	3.4	0.6	250	100	300	
庆阳市市区 The urban area of Qingyang City	均值 Mean	43.09	7.00	0.0110	0.4849	30.00	23.86	—	
	最大值 Max	68.42	9.84	0.0205	1.5287	34.30	32.24	—	
	最小值 Min	24.24	2.92	0.0035	0.2104	21.24	14.36	—	
GB 36600—2018, 土壤环境质量: 建设用地土壤污染风险管控标准									
GB 36600—2018, soil environmental quality risk control standard for soil contamination of development land value		400	20	8	20	3.0	2000	—	
		II	800	60	38	65	5.7	18000	—

表 3 表层土壤各类污染指数评价结果								
Tab. 3 Evaluation results of various pollution indexes of surface soil								
各类污染指数	Various pollution indexes	Pb	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn
	P_i	1.58	0.45	0.42	2.34	0.36	0.67	0.69
	I_{geo}	0.08	-1.73	-1.84	0.64	-2.06	-1.17	-1.12
	P_n	2.58	0.62	0.78	8.48	0.41	0.92	0.96
	E_r^I	7.92	4.53	16.76	70.32	0.72	3.33	0.69

表 4 环江—泾河沿岸样品土壤重金属的相关性系数								
Tab. 4 Correlation coefficient of soil heavy metals along the Huanjiang—Jinghe River								
	Pb	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn	
Pb	1							
As	0.624	1						
Hg	0.341	-0.059	1					
Cd	0.681*	0.738*	0.213	1				
Cr	0.797*	0.329	0.595	0.325	1			
Cu	0.836**	0.667*	0.440	0.632	0.828**	1		
Zn	0.588	0.659	0.332	0.425	0.732*	0.888**	1	
* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。								
* means significant correlation at the 0.05 level (bilateral), ** means significant correlation at the 0.01 level (bilateral).								

表5 环江—泾河沿岸样品土壤重金属的总方差解释
Tab. 5 The total variance is explained of soil heavy metals along the Huanjiang—Jinghe River

	PC1	PC2
Cu	0.970	0.045
Pb	0.894	-0.034
Zn	0.853	0.028
Cr	0.838	0.442
As	0.737	-0.609
Cd	0.723	-0.426
Hg	0.470	0.743
方差贡献特征值 The variance contribution feature value	4.458	1.304
贡献率 Contribution rate/%	63.687	18.627
累积率 Cumulative contribution rate/%	63.687	82.313

由于KMO和Bartlett的检验小于判别值,故不对城区的土壤重金属进行主成分分析。对所得样品进行相关性分析如表6所示:Pb与Cd、Cr、

Cu和Zn,Cr与Pb、As和Zn均在0.05水平上具有显著相关性;Cu与Zn、Cr在0.01水平上具有显著相关性,即具有较强的伴生性。就样点而言,土壤重金属污染最严重的地点是小什字东口,接下来是市人民医院、庆阳宾馆、陇东学院和九龙路北口,均为城市交通活动主要地点,故而Pb、Cr、Cd、Zn、Cu和As所产生的复合型污染应多为汽车尾气排放过多所致,即交通污染占比较大,可能为汽车尾气排放及汽车轮胎磨损等交通运输影响所致(Huang et al, 2018;王菲菲,2019;Xiao et al, 2019;周怡等,2020)。城市土壤中重金属元素的含量除与成土母质成分有关外,在很大程度上与强烈的人类活动密切相关,但庆阳市市区并没有大型工矿业的存在,多为商业娱乐教育办公等场所,人流量大,商业活动密集,交通流动频繁,城市生活垃圾的堆砌和电子废旧产品回收处理不当也会影响土壤环境,从而造成土壤重金属污染(张军等,2019;刘宇峰等,2020)。

表6 庆阳市市区土壤重金属的相关性系数
Tab. 6 Correlation coefficient of soil heavy metals in the urban area of Qingyang City

	Pb	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn
Pb	1						
As	0.612	1					
Hg	-0.132	-0.187	1				
Cd	0.726*	0.455	-0.319	1			
Cr	0.756*	0.707*	-0.036	0.263	1		
Cu	0.721*	0.452	-0.215	0.191	0.838**	1	
Zn	0.792*	0.565	0.091	0.373	0.774*	0.855**	1

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

* means significant correlation was observed at the 0.05 level (bilateral), and ** means significantly correlated at the 0.01 level (bilateral).

3 结论

通过测定庆阳市市区和环江—泾河沿岸表层土壤7种重金属(Pb、As、Cd、Cr、Hg、Cu、Zn)元素的含量,并利用单因子指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数和潜在生态风险评价方法,评估了庆阳市市区与环江—泾河沿岸表层土壤中重金属富集含量与生态风险状况,得出以下结论:(1)利用变异系数和峰度对土壤重金属含量进行特征分析,显示人类活动干扰土壤环境比较明显;(2)与国家土壤环境标准对比,发现庆阳市市区Cr元素存在一定的富集,其余元素均处于安全范围之内;(3)各类污染指数表明Cd和Pb在研究区的污染最为突出,其余土壤重

金属基本无污染;(4)对庆阳市市区各土壤重金属相关性分析后,发现庆阳市市区的土壤重金属除与母质成分有关外,在很大程度上与强烈的人类活动密切相关;环江—泾河沿岸的土壤重金属元素间也具有相关伴生关系,经过主成分分析发现土壤重金属富集主要是自然来源和农业生产。后续需要对重金属迁移性和生物利用性进行更细致的研究,为城市建设和整个区域的发展规划提出科学建议。

参考文献

- 陈怀满,郑春荣,涂从,等.1999.中国土壤重金属污染现状与防治对策[J].AMBIO——人类环境杂志,28(2):130-134,207.[Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al.

1999. Heavy metal pollution in soils in China: status and countermeasures [J]. *AMBIO—A Journal of the Hunman Environment*, 28(2): 130–134, 207.]
- 陈丽华, 雒晓芳, 哈斯其美格. 2011. 油区土壤重金属污染状况及相关性分析 [J]. *中北大学学报 (自然科学版)*, 32(2): 189–194. [Chen L H, Luo X F, Hasi Qimeige. 2011. Pollute situation and correlation analysis of soil heavy metals in oil field [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 32(2): 189–194.]
- 陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤, 等. 2011. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征 [J]. *地理学报*, 66(9): 1281–1288. [Chen X D, Lu X W, Zhao C F, et al. 2011. The spatial distribution of heavy metals in the urban topsoil collected from the interior area of the second ring road, Xi'an [J]. *Acta Geographica Sinica*, 66(9): 1281–1288.]
- 崔德杰, 张玉龙. 2004. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展 [J]. *土壤通报*, 35(3): 366–370. [Cui D J, Zhang Y L. 2004. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 35(3): 366–370.]
- 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 2010. 土壤重金属污染评价方法进展 [J]. *中国农学通报*, 26(17): 310–315. [Fan S X, Gan Z T, Li M J, et al. 2010. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26(17): 310–315.]
- 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 2005. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价 [J]. *地理科学*, 25(1): 108–112. [Guo P, Xie Z L, Li J, et al. 2005. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 25(1): 108–112.]
- 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 2013. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 [J]. *环境科学*, 34(4): 1561–1567. [Guo W, Sun W H, Zhao R X, et al. 2013. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot [J]. *Environmental Science*, 34(4): 1561–1567.]
- 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 2011. 土壤重金属污染评价方法 [J]. *生态学杂志*, 30(5): 889–896. [Guo X X, Liu C Q, Zhu Z Z, et al. 2011. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 30(5): 889–896.]
- 国家环境保护总局. 2004. HJ/T 166—2004, 土壤环境监测技术规范 [S]. 北京: 中国环境科学出版社. [Ministry of Environmental Protection of the Peoples Republic of China. 2004. HJ/T 166—2004, the technical specifications for soil environmental monitoring [S]. Beijing: China Environmental Science Press.]
- 和莉莉, 李冬梅, 吴钢. 2008. 我国城市土壤重金属污染研究现状和展望 [J]. *土壤通报*, 39(5): 1210–1216. [He L L, Li D M, Wu G. 2008. Heavy metal contamination of urban soils in China: state and prospect [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 39(5): 1210–1216.]
- 匡荟芬. 2020. 鄱阳湖区沉积物和土壤重金属污染特征、风险评价及源解析 [D]. 南昌: 南昌大学. [Kuang H F. 2020. Pollution characteristics, risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments and soils of Poyang Lake area [D]. Nanchang: Nanchang University.]
- 李茸. 2020. 土壤重金属污染与修复技术研究 [J]. *环境与发展*, 32(3): 66–67. [Li R. 2020. Study on heavy metal pollution and remediation technology in soil [J]. *Environment and Development*, 32(3): 66–67.]
- 李春亮, 刘文辉. 2012. 甘肃省白银市区土壤环境质量评价 [J]. *物探与化探*, 36(6): 1014–1019. [Li C L, Liu W H. 2012. An assessment of the soil environmental quality in the downtown area of Baiyin City, Gansu Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 36(6): 1014–1019.]
- 梁俊宁. 2011. 陇东塬区土壤重金属含量分析及土壤质量评价研究 [D]. 兰州: 兰州大学. [Liang J N. 2011. Study on soil's heavy metal contents and soil quality evaluation of Longdong tableland area [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 2011. 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*, 31(6): 1285–1293. [Liu Y, Yue L L, Li J C. 2011. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(6): 1285–1293.]
- 刘宇峰, 原志华, 廖世芳. 2020. 咸阳城区表层土壤重金属污染特征及生态健康风险评价 [J]. *国土资源科技管理*, 37(2): 1–13. [Liu Y F, Yuan Z H, Liao S F. 2020. Heavy metal pollution characteristics and ecological health risk assessment of surface soil in Xianyang City [J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 37(2): 1–13.]

- 马媛媛. 2016. 玛河流域城市土壤重金属污染状况及风险评价 [D]. 石河子: 石河子大学. [Ma Y Y. 2016. Heavy metal pollution characteristics in the Manasi River basins [D]. Shihezi: Shihezi University.]
- 潘峰, 赵艳萍, 梁俊宁, 等. 2012. 甘肃省陇东塬区土壤及农作物中微量元素的分布特征 [J]. 环境科学研究, 25(3): 290–296. [Pan F, Zhao Y P, Liang J N, et al. 2012. Distribution characteristics of several trace elements in soil and crops in Longdong tableland plateau, Gansu Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 25(3): 290–296.]
- 宋明义, 刘军保, 周涛发, 等. 2009. 宁波城市土壤重金属的化学形态分析及生态效应 [J]. 土壤通报, 40(6): 1426–1431. [Song M Y, Liu J B, Zhou T F, et al. 2009. Chemical speciation of some heavy metals in Ningbo urban soil and ecological effects [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 40(6): 1426–1431.]
- 王菲菲. 2019. 河西走廊农田土壤重金属污染评价及源解析 [D]. 兰州: 兰州大学. [Wang F F. 2019. Contamination assessment and source apportionment of heavy metals in agricultural soil in Hexi Corridor [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 夏星辉, 陈静生. 1997. 土壤重金属污染治理方法研究进展 [J]. 环境科学, 18(3): 72–76. [Xia X H, Chen J S. 1997. Advances in the study of remediation methods of heavy metal contaminated soil [J]. *Environmental Science*, 18(3): 72–76.]
- 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 2008. 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, 31(2): 112–115. [Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 31(2): 112–115.]
- 曾方明. 2017. 青海省湟水河西宁段重金属的污染与评价 [J]. 盐湖研究, 25(2): 8–12, 59. [Zeng F M. 2017. Assessment of heavy metal pollution in Xining section of the Huangshui River [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 25(2): 8–12, 59.]
- 张军, 董洁, 梁青芳, 等. 2019. 宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 [J]. 环境科学, 40(8): 3774–3784. [Zhang J, Dong J, Liang Q F, et al. 2019. Heavy metal pollution characteristics and influencing factors in Baoji urban soils [J]. *Environmental Science*, 40(8): 3774–3784.]
- 张婷, 费利东, 赵海卫, 等. 2019. 土壤重金属污染现状及修复技巧探讨 [J]. 世界有色金属, (22): 254, 256. [Zhang T, Fei L D, Zhao H W, et al. 2019. Status of heavy metal pollution in soil and its remediation techniques [J]. *World Nonferrous Metals*, (22): 254, 256.]
- 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 等. 2010. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法 [J]. 农业工程学报, 26(12): 311–318. [Zhang W S, Li X X, Huang W J, et al. 2010. Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26(12): 311–318.]
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. [China National Environmental Monitoring Centre. 1990. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press.]
- 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 2018a. GB 15618—2018, 土壤环境质量: 农用地土壤污染风险管控标准 (试行) [S]. 北京: 中国环境出版集团. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. 2018a. GB 15618—2018, soil environmental quality: risk control standard for soil contamination of agricultural land [S]. Beijing: China Environment Publishing Group.]
- 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 2018b. GB 36600—2018, 土壤环境质量: 建设用地土壤污染风险管控标准 [S]. 北京: 中国环境出版集团. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. 2018b. GB 36600—2018, soil environmental quality risk control standard for soil contamination of development land [S]. Beijing: China Environment Publishing Group.]
- 周怡, 胡文友, 黄标, 等. 2020. 我国高速公路周边土壤重金属污染现状及研究进展 [J]. 中国环境监测, 36(5): 112–120. [Zhou Y, Hu W Y, Huang B, et al. 2020. Current status and research progress of heavy metal pollution in soils surrounding highways of China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 36(5): 112–120.]
- Bortey-Sam N, Nakayama S M M, Akoto O, et al. 2015.

- Ecological risk of heavy metals and a metalloid in agricultural soils in Tarkwa, Ghana [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(9): 11448–11465.
- Borůvka L, Vacek O, Jehlička J. 2005. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 128(3/4): 289–300.
- Chai L, Wang Y H, Wang X, et al. 2021. Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China [J]. *Ecological Indicators*, 125: 107507. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107507.
- Chen X D, Lu X W. 2018. Contamination characteristics and source apportionment of heavy metals in topsoil from an area in Xi'an City, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 151: 153–160.
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, et al. 2018. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China [J]. *Journal of Environmental Management*, 207: 159–168.
- Islam M S, Hossain M B, Matin A, et al. 2018. Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River Estuary, Bangladesh [J]. *Chemosphere*, 202: 25–32.
- Marr K, Fyles H, Hendershot W. 1999. Trace metals in Montreal urban soils and the leaves of *Taraxacum officinale* [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(2): 385–387.
- Müller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geology Journal*, 2: 108–118.
- Soares H M V M, Boaventura R A R, Machado A A S C, et al. 1999. Sediments as monitors of heavy metal contamination in the Ave River Basin (Portugal): multivariate analysis of data [J]. *Environmental Pollution*, 105(3): 311–323.
- Varol M. 2011. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 195: 355–364.
- Xiao R, Guo D, Ali A, et al. 2019. Accumulation, ecological-health risks assessment, and source apportionment of heavy metals in paddy soils: a case study in Hanzhong, Shaanxi, China [J]. *Environmental Pollution*, 248: 349–357.
- Yang B, Ren J, Wang M, et al. 2019. Concentrations and chemical fractions of Cu, Zn, Cd, and Pb at ten metallurgical sites in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(4): 3603–3611.