

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



## 2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

# 目次

|                                                        |                                                              |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 2016年京津冀地区红色预警时段PM <sub>2.5</sub> 污染特征与浓度控制效果          | 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)                                     |
| 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析                                     | 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)                            |
| 合肥市PM <sub>2.5</sub> 和PM <sub>10</sub> 中元素组成特征及重污染成因分析 | 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)                                          |
| 濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析                                  | 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)        |
| 关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析                                     | 康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)                       |
| 长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源                                   | 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)                            |
| 中国城市扩张及空间特征变化对PM <sub>2.5</sub> 污染的影响                  | 王桂林, 张炜 (3447)                                               |
| 不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM <sub>2.5</sub> 排放的影响                   | 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)                                 |
| 浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数                                | 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)                                 |
| 生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征                                  | 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)                            |
| 青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征                                    | 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)                                          |
| 广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价                             | 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)                                 |
| 截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征                              | 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501) |
| 黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析                         | 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)                                  |
| 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响                                  | 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)             |
| 向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应                                    | 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)                 |
| 外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响                                 | 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)                       |
| 新疆喀什三角洲地下水SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 化学特征及来源        | 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)                             |
| 黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析                                   | 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)                                       |
| 北京市河流秋季浮游动物群落特征分析                                      | 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)                |
| 三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系                               | 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)                      |
| 渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测                                 | 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)                                 |
| 汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系                             | 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)                                         |
| 饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析                                 | 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)                                |
| 基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果                             | 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)                            |
| 植被对绿色屋顶径流量和水质影响                                        | 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)                                     |
| 光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制                           | 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)                                     |
| 多种材料对水中氨氮的吸附特性                                         | 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)                            |
| 不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响                                 | 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)                                |
| 3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程                                | 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)                  |
| 铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制                                   | 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)                                 |
| 缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮                            | 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)                            |
| 连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响                           | 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)                                    |
| FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制                                  | 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)                          |
| ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件                                 | 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)                                      |
| 全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析                                   | 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)                                          |
| 不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比                                 | 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)                                    |
| 异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析           | 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)                         |
| Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现                             | 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)                     |
| 高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N <sub>2</sub> O产生特征                    | 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)                                      |
| 生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响                                         | 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)                                         |
| 两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响                                     | 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)                     |
| 承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征                             | 孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)                       |
| 厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析                               | 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)                      |
| 宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析                                 | 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)                                 |
| 铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果                                  | 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)                                          |
| 铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用                               | 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)                               |
| 生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响                        | 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)                                |
| 有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响                                | 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)                                          |
| 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响                               | 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)                             |
| 宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响                             | 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)                                  |
| 不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律                                 | 何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)                                |
| 基于成组生物毒性测试的PM <sub>2.5</sub> 毒性                        | 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)                     |
| 《环境科学》征订启事 (3587)                                      |                                                              |
| 《环境科学》征稿简则 (3595)                                      |                                                              |
| 信息 (3611, 3705, 3745)                                  |                                                              |

# 宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析

张军<sup>1,2</sup>, 董洁<sup>1</sup>, 梁青芳<sup>1</sup>, 杨宁宁<sup>1</sup>, 耿雅妮<sup>1</sup>

(1. 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710064)

**摘要:** 为深入分析工业城市土壤重金属污染的影响因子及来源途径, 本文以宝鸡市区采集的 62 份表层(0~20 cm)土壤样品为研究对象, 使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定重金属(Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn 和 Ni)含量, 基于地统计方法及地理探测器模型, 以土壤重金属污染负荷指数(PLI)为主导指标, 探测土壤重金属污染的影响因子, 并使用 Unmix6.0 受体模型进行重金属源解析。结果表明:① 宝鸡市区表层土壤重金属 Cd、Pb、Cu、Zn、As、Cr、Mn 和 Ni 含量均值分别为 0.77、16.75、40.52、261、17.03、49.18、331 和 30.52 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中 Cd 和 Zn 均值超过了国家二级标准, 是陕西省土壤背景值的 8.2 倍和 3.8 倍, Cu、As 和 Ni 均值也超过了陕西省土壤背景值, Cd 和 Zn 在城区土壤中存在重度污染现象。② 宝鸡市区表层土壤重金属区域总污染负荷指数(PLI<sub>zone</sub>)达 1.36, 为轻度污染, 经地理探测器分析, 土壤质地和铁路距离对污染分布的解释力最强,  $P_{D,H}$  分别为 0.040 和 0.026, 交互解释力均达 0.099。③ Cd、Cu 和 As 主要为工农业活动所致的“人为源”, Zn 和 Ni 为交通排放造成的“人为源”, Cr、Pb 和 Mn 主要为“混合源”。研究区表层土壤重金属主要来源为“混合源”, 为轻度污染级, 土壤质地和距铁路距离是土壤重金属污染的主要影响因子。本研究可以为宝鸡市土壤重金属污染与防治提供科学依据。

**关键词:** 重金属; 土壤; 地理探测器; 空间分布; 宝鸡市

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3774-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811114

## Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils

ZHANG Jun<sup>1,2</sup>, DONG Jie<sup>1</sup>, LIANG Qing-fang<sup>1</sup>, YANG Ning-ning<sup>1</sup>, GENG Ya-ni<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to analyze the sources and factors influencing heavy metal pollution in industrial cities, 62 surface layer (0-20 cm) soil samples were collected in Baoji City for analysis using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Cd, As, Cu, Pb, Zn, Cr, Mn, and Ni were detected in the samples. Based on geostatistical methods and geo-detector models, the soil heavy metal pollution load index (PLI) was selected as the best indicator of factors affecting heavy metal pollution. The Unmix 6.0 receptor model was also used to analyze the heavy metal source. The results showed that: ① The average concentrations of Cd, Pb, Cu, Zn, As, Cr, Mn, and Ni in the surface soils of Baoji City were 0.77 mg·kg<sup>-1</sup>, 16.75 mg·kg<sup>-1</sup>, 40.52 mg·kg<sup>-1</sup>, 261 mg·kg<sup>-1</sup>, 17.03 mg·kg<sup>-1</sup>, 49.18 mg·kg<sup>-1</sup>, 331 mg·kg<sup>-1</sup>, and 30.52 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. These values exceeded the national secondary standard for Cd and Zn, which were 8.2 and 3.8 times more abundant, respectively, than in the background soils of Shaanxi Province, indicating that urban soils are seriously polluted with Cd and Zn. The average concentrations of Cu, As, and Ni also exceeded the background levels; ② The total pollution load index (PLI<sub>zone</sub>) for heavy metals in the surface soils of Baoji City was 1.36, which indicated mild levels of pollution, as analyzed using a geo-detector. Soil texture and distance to the city's railway had the strongest explanatory power for the distribution of pollutants ( $P_{D,H}$  = 0.040 and 0.026, respectively, with a combined explanatory power of 0.099); ③ Cd, Cu, and As mainly derive from “artificial sources” associated with industrial and agricultural activities, and Zn and Ni derive from traffic emissions. Cr, Pb, and Mn mainly derive from “mixed sources”. Overall, the main source of heavy metals in the surface soils of the study area was classified as “mixed source” and soils were classified as having a mild level of pollution. These results provide scientific support for the prevention and control of heavy metal pollution in the soils of Baoji City.

**Key words:** heavy metals; soil; geo-detector; spatial distribution; Baoji City

重金属污染主要是指人类工农业生产过程中, 重金属或其它化合物给自然环境或人体健康带来损害的过程及现象<sup>[1~3]</sup>。重金属进入土壤后具有难降解性、累积性和长期性等特点。城市土壤承载有高密度人口和频繁的工业活动, 随之产生的重金属进入城市土壤后, 由于重金属缺乏有效输出途径, 致使城市土壤通常作为重金属循环系统的末端<sup>[4]</sup>。当前, 因

工农业及城市化发展的步伐不断加快, 城市土壤重

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2019-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771215); 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室项目(310829151140、310829151141); 宝鸡市科技计划项目(2017JH2-25); 陕西省地理学重点学科项目

作者简介: 张军(1974~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向区域重金属污染控制及风险评价, E-mail: zhangjun1190@126.com

金属污染成为全球面临的的城市环境问题之一<sup>[3~5]</sup>,近期我国关于《土壤污染防治行动计划》的实施,加大了土壤污染防治的力度.因此,分析城市土壤重金属污染的影响因素,并进行源解析,为保障良好的城市生态环境和居民生活质量,以及为政府部门对环境政策制定,具有重要的理论和现实意义.

自 1973 年德国工业排放致土壤重金属污染报道以来,土壤重金属污染问题备受国内外学者关注,已有大量关于重金属的文献从不同区域<sup>[6~8]</sup>、不同尺度<sup>[9,10]</sup>、不同介质<sup>[11,12]</sup>等方面进行了较丰富地研究.广大学者对重金属源解析<sup>[13~18]</sup>,风险评价<sup>[19,20]</sup>,重金属修复<sup>[21,22]</sup>,空间分布<sup>[23]</sup>及变异性<sup>[24]</sup>等方面开展了深入研究.对土壤重金属与影响因子的研究中,单一影响因子的定性研究较为成熟,如吕建树使用单因素方差分析法,得出土地利用类型是影响日照市土壤中 Cd、Hg 浓度的主要因子<sup>[25]</sup>;刘世梁通过对矿区土壤重金属质量比研究,发现土地利用类型对土壤重金属质量比的影响较大<sup>[26]</sup>.目前,土壤重金属与多个影响因子之间的定量表述,以及对不同影响因子对重金属污染交互作用的研究有待深入探讨.近年来“3S”技术的迅速发展,已成为地理环境指标空间量化表达的重要手段,已在土壤重金属研究领域内有较多应用<sup>[23,27]</sup>.此外,为定量分析地理空间属性问题,还需用到空间统计方法.2010 年,Wang 等<sup>[28]</sup>基于统计学的空间方差分析原理,成功研发的地理探测器模型,因能客观反映地理环境要素对解释因子的影响力,及度量空间异质性而受到较多关注<sup>[29~35]</sup>.目前,已有个别学者将地理探测器引入到农田土壤重金属的相关研究中,如肖武等<sup>[33]</sup>通过地理探测器对巢湖流域典型农田土壤重金属进行了生态风险评价,李雨等<sup>[34]</sup>研究了土壤中不同重金属元素之间的相关关系,Wang 等<sup>[35]</sup>使用地理探测器对河流灌区土壤重金属做了健康风险评价.城市人口密度大,人类活动影响强烈等因素导致城市土壤中重金属含量高、来源复杂、种类较多,工业城市土壤重金属含量的影响因子更具多元性特点,因此,本文试图引入地理探测器模型,分析多种地理环境因子对城市土壤重金属污染的影响.同时,进行土壤重金属探源分析,是其污染治理的重要步骤.当前,在众多源解析方法中,以多元统计法<sup>[36]</sup>及 PMF (positive matrix factorization) 模型、FA (factor analysis) 模型、CMB (chemical mass balances) 模型等以研究污染区域为主的受体模型的应用较多<sup>[37,38]</sup>.近年来,美国环境保护署新颁布的 Unmix6.0 受体模型,能够通过受体浓度的高低直接进行源解析,该模型因具有

对污染源进行分类判别,及不同污染源对特定元素贡献率以定量化表达等优点<sup>[37~39]</sup>,已在国内外众多土壤重金属源解析研究中广泛运用,但国内应用较少.此外,与多元统计等方法相比,Unmix6.0 模型具有计算过程更简捷,解析结果更为准确等优点<sup>[40,41]</sup>.

宝鸡市作为陕西省重要的老工业基地,其土壤重金属污染已受到较多学者的关注<sup>[6,42,43]</sup>,但早期研究因受技术条件及数据资料所限,加之近年来市区面积的扩展,已有研究范围多集中在市区部分区域,对城区土壤重金属浓度和空间分布进行整体研究的较少;也缺乏对土壤重金属污染影响因子及源解析的研究.本文以宝鸡市区为研究区域,通过对土壤中 8 种重金属元素 (Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn 和 Ni) 含量的测定,在“3S”技术基础上,使用地统计法及地理探测器模型,对土壤重金属污染与地理环境因子之间的关系进行探讨,并使用 Unmix6.0 模型对土壤重金属进行源解析,同时结合地理信息系统 (GIS) 技术,对源贡献率进行定量化、可视化表达,以期宝鸡市重金属污染防治和来源解析提供实践和科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

宝鸡市地处东经 106°18′~108°03′,北纬 33°35′~35°06′之间,城区坐落于渭河谷地之上,南、北、西三面为山地塬地貌,城区面积约 110 km<sup>2</sup>,人口近 150 万.宝鸡市是陕西省重要的河谷型工业城市,市区分布有众多工矿类、化学化工类、冶金类、机械制造类等企业,宝成线、陇海线等重要交通干线穿城而过.近年来,市区建设呈以渭河为中轴向东拓展的趋势.城市主导风向为西风,年平均降水量在 755 mm 左右,气候属于暖温带半湿润类型.

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 土壤样品采集及处理

于 2017 年 3 月,采集市区表层 0~20 cm 土壤样品 62 份 (图 1).采样点主要以铁路沿线及工业区较密,且兼顾全城区的方法,借助遥感影像图和 GIS 技术布设,实际采样时,在采样点所在地设一正方形 (边长 5 m),使用手动钢制土钻取各顶点及对角线交点的 5 个分样做 1 个混合样,如遇街道等狭长的路面硬化地点时,沿绿化带取 5 个间隔 5 m 的分样做 1 个混合样,每个混合样重约 1.0 kg,最后装入聚乙烯自封袋.样品运回实验室后,采用 HNO<sub>3</sub>-HCl-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法进行消解,用电感耦合等离子体

质谱仪 (ICP-MS, NexION350X, PE) 测定 Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、Ni 的含量. 实验过程中采用国家标准土壤样品 GSS-25 进行质量控制, 元素回

收率控制在 92% ~ 105% 之间. 每个样品重复测量 3 次, 相对标准偏差 (RSD) 小于 10%. 实验所用药剂均为优级纯.

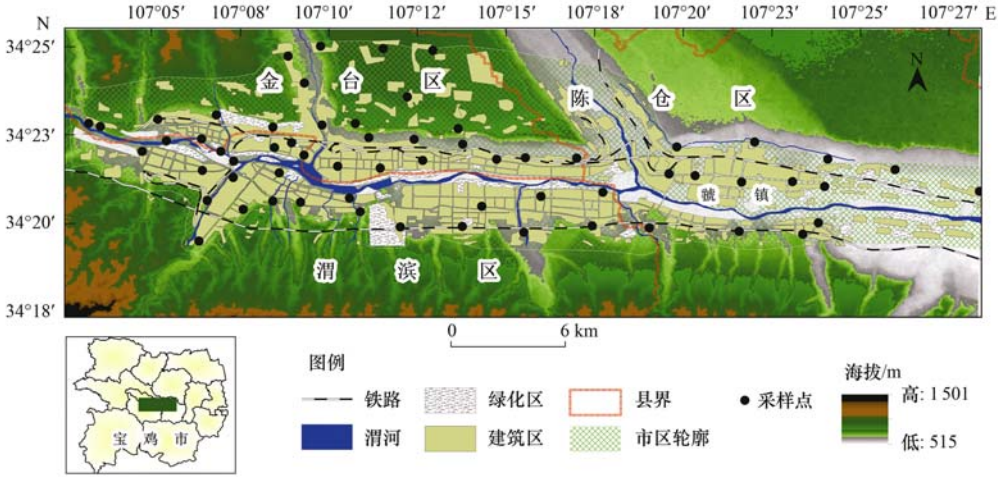


图1 宝鸡城区采样位置示意  
Fig. 1 Sampling locations in the Baoji urban area

1.2.2 指标选取及数据获取

地理环境因子包括高程因子、土壤因子、植被因子和土地利用等, 对应每类因子, 本文参照文献 [33 ~ 35] 的因子选取, 根据宝鸡市区实际情况, 最终选取数字高程模型 (digital elevation model, DEM)、距铁路距离、距工厂距离、公路密度、土壤类型、土壤质地、植被覆盖指数 (NDVI)、距河流距离和土地利用这 9 个因子. DEM (GDDEMDEM 30m) 及影像数据 (Landsat 8 OLI\_TIRS) 来自于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 环境数据均来自资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>), 在 ArcGIS10.5 与 ENVI5.3 中对数据进行相应地整理和预处理.

1.3 研究方法

1.3.1 污染负荷指数

采用 Tomlinson 等<sup>[44, 45]</sup> 提出的污染负荷指数 (PLI) 对土壤重金属污染评价, 计算公式为:

$$CF_i = C_i / C_n \tag{1}$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \cdots \times CF_n} \tag{2}$$

$$PLI_{zone} = \sqrt[m]{PLI_1 \times PLI_2 \times \cdots \times PLI_m} \tag{3}$$

式中,  $CF_i$  为元素  $i$  的污染指数;  $C_i$  和  $C_n$  分别表示元素  $i$  含量实测值和背景值,  $mg \cdot kg^{-1}$ ;  $n$  为所测元素总量;  $PLI_{zone}$  为区域总污染负荷指数;  $m$  表示样本容量. 污染分级标准如表 1 所示.

表1 污染分级标准

| Table 1 Pollution grading standards |              |                  |                  |           |
|-------------------------------------|--------------|------------------|------------------|-----------|
| 项目                                  | 无污染          | 轻度污染             | 中度污染             | 重度污染      |
| 参数值                                 | $CF \leq 1$  | $1 < CF \leq 2$  | $2 < CF \leq 3$  | $CF > 3$  |
|                                     | $PLI \leq 1$ | $1 < PLI \leq 2$ | $2 < PLI \leq 3$ | $PLI > 3$ |

1.3.2 地理探测器

地理探测器是基于空间分异理论, 采用 GIS 空间分析技术, 探测变量间交互作用的工具<sup>[29 ~ 35]</sup>. 其模型由因子探测器、生态探测器、风险探测器和交互探测器 4 个子模型组成, 其中因子探测器是核心部分. 模型如下:

$$P_{D,H} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m n_{D,i} \cdot \sigma_{D,i}^2}{n\sigma^2} \tag{4}$$

式中,  $P_{D,H}$  为因子  $D$  对  $H$  (PLI 指标空间分布) 的解释力,  $n$  为总的研究区单元数,  $n_{D,i}$  为因子  $D$  中第  $i$  分区的单元数,  $\sigma$  为 PLI 的总标准差,  $\sigma_{D,i}$  为因子  $D$  中第  $i$  分区标准差.  $P_{D,H}$  的大小表示空间分异程度的强弱,  $P_{D,H} \in [0, 1]$ , 当  $P_{D,H}$  值越靠近 1 时, 则空间分异性越强, 反之亦然.

交互作用探测器衡量双因子对污染指标的解释力, 若值越靠近 1, 则表示交互作用越明显 (表 2)<sup>[33 ~ 35]</sup>, 本文试图根据因子探测器和交互作用探测器的结果, 得出影响宝鸡市区土壤重金属污染分布较强的因素.

表2 交互作用结果划分

| Table 2 Results of the interaction segmentation |                                                                                   |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 交互结果                                            | 解释力                                                                               |
| 非线性减弱                                           | $P_{D,H}(x \cap y) < \min[P_{D,H}(x), P_{D,H}(y)]$                                |
| 单因子减弱                                           | $\min[P_{D,H}(x), P_{D,H}(y)] < P_{D,H}(x \cap y) < \max[P_{D,H}(x), P_{D,H}(y)]$ |
| 相互独立                                            | $P_{D,H}(x \cap y) = P_{D,H}(x) + P_{D,H}(y)$                                     |
| 双因子增强                                           | $P_{D,H}(x \cap y) > \max[P_{D,H}(x), P_{D,H}(y)]$                                |
| 非线性增强                                           | $P_{D,H}(x \cap y) > P_{D,H}(x) + P_{D,H}(y)$                                     |

1.3.3 Unmix6.0 受体模型

Unmix6.0 模型是美国环保署推荐的源解析模型,其公式<sup>[40, 41]</sup>如下:

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^m F_{jk} S_{ik} + E \tag{5}$$

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  $k$  ( $k=1, \dots, m$ ) 的源组成;  $S_{ik}$  为源  $k$  在第  $i$  个样品的贡献率;  $E$  为各个源组成的标准偏差. 本研究具体源解析工作在 Unmix 6.0 软件中完成.

为保证源解析结果精确可靠,同时考虑到土壤中各元素的含量存在较大数量差异,在将实验所得原数据导入 Unmix 6.0 软件前,将原数据进行离差标准化处理,处理后的数据处于  $[0, 1]$  之间且无量纲. 离差标准化公式如下:

$$X_k = \frac{X_i - \text{Min}X_i}{\text{Max}X_i - \text{Min}X_i} \tag{6}$$

式中,  $X_k$  为离差标准化后的值(其中  $k=1, \dots, n$ ),  $X_i$  为土壤样品的实测值,  $\text{Max}X_i$  和  $\text{Min}X_i$  分别为土壤样品实测值的最大值与最小值.

2 结果与分析

2.1 重金属元素含量

土壤重金属元素的描述统计见表 3. 除 Cd 与 Zn 元素外,其余各重金属元素均值均未超过国家二级标准. 元素 Cd、Cu、As、Ni 和 Zn 的均值都超过了陕西省土壤背景值,其中元素 Cd 和 Zn 的均值分别是背景值的 8.2 倍和 3.8 倍. 各元素含量最大值超过了陕西省土壤背景值,说明市区土壤重金属聚集明显. 从偏度和峰度值可知,各重金属含量不符合正态分布,按照 吕建树等<sup>[25]</sup> 和 马群等<sup>[46]</sup> 对变异程度的分类,研究区内各重金属元素均为高度变异(变异系数  $>36\%$ ),变异系数较高,表明市区土壤已受到人为活动的干扰.

表3 土壤重金属描述统计

Table 3 Descriptive statistics for soil heavy metals

| 元素 | 均值<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 范围<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 变异系数 | 峰度   | 偏度    | 陕西省背景值<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 国家二级标准<br>/mg·kg <sup>-1</sup> |
|----|----------------------------|----------------------------|------|------|-------|--------------------------------|--------------------------------|
| Cd | 0.77                       | 0.14~5.50                  | 1.34 | 41.6 | 6.36  | 0.094                          | 0.3                            |
| As | 17.03                      | 2.9~67.93                  | 1.08 | 1.6  | -0.49 | 11.2                           | 30                             |
| Cu | 40.52                      | 4.7~214                    | 1.18 | 34.0 | 5.61  | 21.4                           | 100                            |
| Pb | 16.75                      | 0.00~49.2                  | 0.67 | 5.1  | 1.44  | 21.4                           | 300                            |
| Zn | 261                        | 22.9~1882                  | 1.14 | 16.7 | 3.74  | 69.4                           | 250                            |
| Cr | 49.18                      | 8.4~249                    | 0.72 | 0.87 | -0.96 | 62.5                           | 200                            |
| Mn | 331                        | 0.00~614                   | 0.65 | 1.15 | -1.00 | 557                            | —                              |
| Ni | 30.52                      | 6.73~198                   | 0.82 | 26.8 | 4.72  | 28.8                           | 50                             |

空间插值模型选择是土壤重金属空间分布特征、污染评价的关键<sup>[27, 47]</sup>. 非参数地统计学中的指示克里格法是理想的处理非正态的土壤重金属含量数据<sup>[25]</sup>,因此本研究选用单元指示克里格插值法,借助 ArcGIS 10.5 绘制土壤重金属含量空间分布(图 2),如图 2 所示,各元素在空间分布上具有一定差异,其中, Cd 和 Mn 的极值点空间分布相反,说明二者来源不同,其中 Cd 的高值区在渭滨区和金台区的中部交界处,以东西走向带状分布,在陈仓区东部以片状分布,其他地方属低值区; Pb 和 Cr 的高值区主要在渭滨区和金台区的东部交界处,以团块状分布; Zn 和 Ni 的空间分布较一致,即二者具有共同来源,高值区呈西北-东南带状走向分布,主要集中于金台区和渭滨区的中部,市区其他大部分区域为低值区; Cu 高值区和 Zn 与 Ni 的空间分布较一致,主要集中于金台区与渭滨区的中部,但呈东北-西南带状走向; As 高值区主要位于金台区中西部和陈仓区与金台区相交交界处,以块状形式分布.

2.2 重金属污染负荷指数

经公式(1)~(3)计算得到宝鸡市区土壤重金属污染指数,如图 3 所示, Cr、Pb 和 Mn 的 CF 均值均小于 1,属于无污染程度, Cu、As 和 Ni 的 CF 均值在 1~2 之间,属于轻度污染; Cd 和 Zn 的 CF 均值超过 3,属于重度污染;宝鸡市区  $PLI_{zone}$  为 1.36,属于轻度污染.

根据各采样点的 PLI 值,采用单元指示克里金插值绘制 PLI 的空间分布(图 4),从图 4 可知,研究区重度污染区主要聚集于城区渭河干流与支流交汇处的周边区域,市区近一半的区域处于中度污染级,陈仓区东部与渭滨区西南部暂处于无污染级.

2.3 地理探测器结果分析

各地理环境因子数据(图 5)最终在 ArcGIS 10.5 中处理成 100 m×100 m 的渔网数据,提取相应的渔网中心值,以进行地理探测器分析.

2.3.1 因子分析

因子探测器反映了地理环境因子对 PLI 空间分布的解释力,由公式(4)可得,各环境因子的  $P_{D,H}$

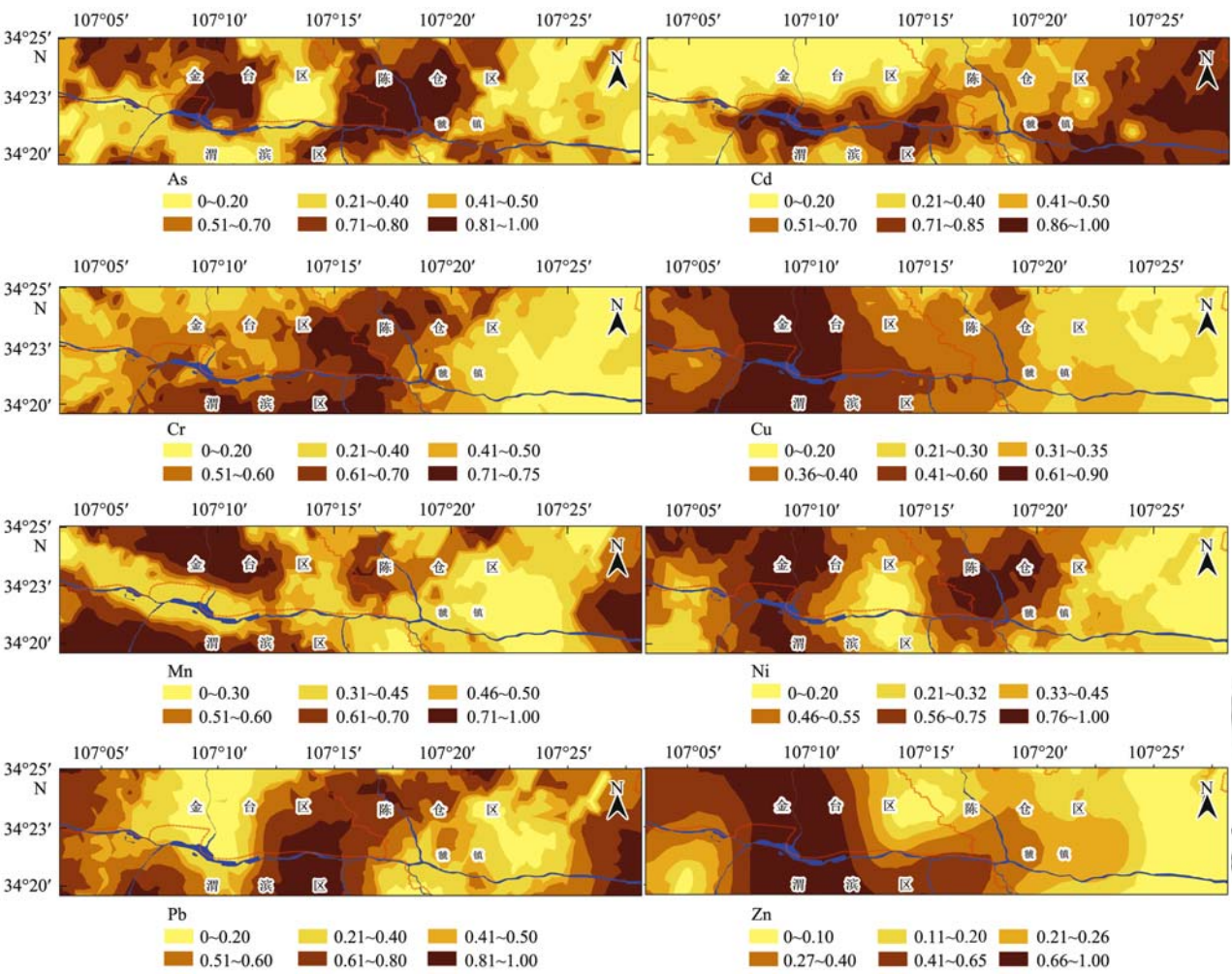


图 2 土壤重金属含量分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals in the sample soils

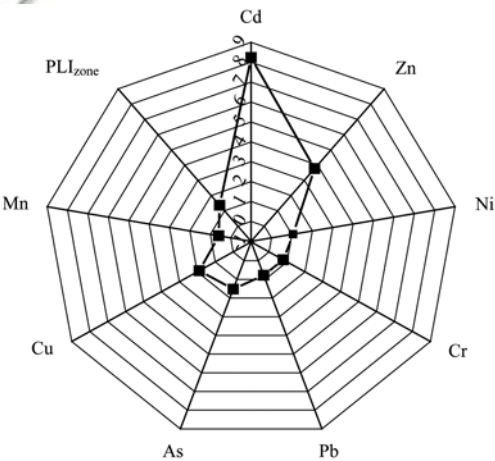


图 3 土壤重金属污染指数

Fig. 3 Soil heavy metal pollution index

值降序排列为土壤质地 (0.040) > 距铁路距离 (0.026) > 公路密度 (0.020) > DEM (0.013) > NDVI (0.011) > 土壤类型 (0.010) > 距河流距离 (0.009) > 距工厂距离 (0.002) > 土地利用类型 (0.001). 其中土壤质地、距铁路距离和公路密度对研究区土壤重金属 PLI 的解释力较强.

2.3.2 交互作用探测分析

表 4 显示了两种环境因子叠加后的  $P_{D,H}$ , 结果表明, 各环境因子两两之间均为非线性增强, 表明各环境因子的交互作用大于单独作用, 其中, 距离铁路距离和土壤质地对重金属污染分布交互作用较强 (交互解释力达 0.099), 说明污染源与铁路运输和土壤质地存在相关性.

3 讨论

3.1 基于 Unmix 6.0 模型的源解析

采用 Unmix 6.0 软件, 将土壤 8 种元素解析为 3 个源 (表 5). 其中 3 个源的拟合相关系数  $\text{Min Rsq} = 0.82$ , 代表该模型可解释 82% 的物种方差; 信噪比  $\text{Min Sig. Noise} = 2.49$ , Unmix 6.0 模型要求信噪比的最低值需大于 2, 即  $\text{Min Sig. Noise} > 2$  [39~41], 由此可知这 3 个源得出的结果可信. 如表 5 所示, Cd、As 和 Cu 在源 1 上有较大的载荷, Cr、Pb 和 Mn 在源 2 上有较大载荷, Zn 和 Ni 在源 3 上有较大载荷. 各源贡献比例依次为源 2 (77.67%) > 源 3 (13.75%) > 源 1 (8.58%), 说明源 2 为研究区的

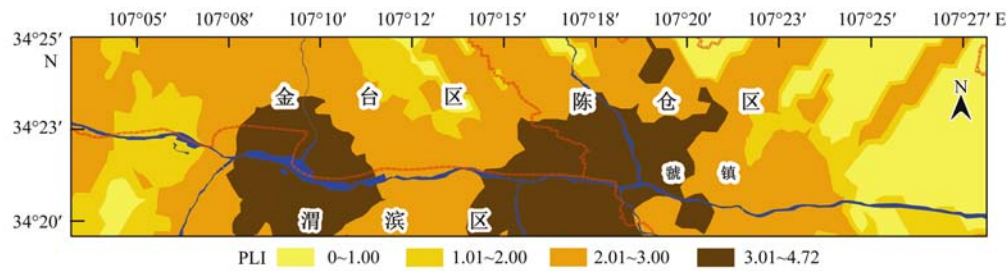


图4 重金属污染指数 (PLI) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of heavy metal pollution index

表4 地理环境因子对 PLI 的交互作用

Table 4 Interaction of geographic environment factors with PLI

|        | DEM   | 公路密度  | 土地利用类型 | NDVI  | 土壤类型  | 土壤质地  | 距河流距离 | 距铁路距离 | 距工厂距离 |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DEM    | 0.013 |       |        |       |       |       |       |       |       |
| 公路密度   | 0.043 | 0.020 |        |       |       |       |       |       |       |
| 土地利用类型 | 0.017 | 0.029 | 0.001  |       |       |       |       |       |       |
| NDVI   | 0.025 | 0.035 | 0.017  | 0.011 |       |       |       |       |       |
| 土壤类型   | 0.036 | 0.034 | 0.015  | 0.024 | 0.010 |       |       |       |       |
| 土壤质地   | 0.092 | 0.067 | 0.055  | 0.064 | 0.056 | 0.039 |       |       |       |
| 距河流距离  | 0.030 | 0.035 | 0.015  | 0.024 | 0.028 | 0.063 | 0.009 |       |       |
| 距铁路距离  | 0.043 | 0.050 | 0.031  | 0.042 | 0.043 | 0.099 | 0.045 | 0.026 |       |
| 距工厂距离  | 0.022 | 0.027 | 0.010  | 0.015 | 0.019 | 0.049 | 0.021 | 0.043 | 0.002 |

表5 源划分

Table 5 Source division

| 元素     | 源 1     | 源 2     | 源 3     |
|--------|---------|---------|---------|
| Cd     | 0.1220  | -0.0064 | -0.0093 |
| Cr     | 0.0540  | 0.1320  | -0.0101 |
| Pb     | -0.0590 | 0.3570  | -0.0175 |
| As     | 0.1440  | 0.0948  | -0.0137 |
| Zn     | 0.0002  | 0.0274  | 0.1010  |
| Cu     | 0.0923  | 0.0477  | 0.0372  |
| Mn     | -0.1750 | 0.5500  | 0.0545  |
| Ni     | -0.0357 | 0.0733  | 0.8690  |
| 总计     | 0.1430  | 1.2938  | 0.2290  |
| 源贡献率/% | 8.58    | 77.67   | 13.75   |

主要污染源.

由 Unmix 6.0 模型源贡献的空间分布可知(图 6),源 1 高值区主要集中于金台区北部与陈仓区虢镇附近,源贡献率为 8.58%. 对照描述性统计结果(表 3),Cd、As 和 Cu 的平均值高于陕西省土壤背景值,变异系数较高,说明 Cd、Cu、As 受到人为活动的影响,其中 Cu、As 属于轻度污染,Cd 已达重度污染. 结合图 5(土地利用类型)和图 6(源 1)发现,源 1 高值区的土地利用类型为耕地,农业生产过程中农药化肥的过量使用易导致 Cd、As 的污染<sup>[22, 37, 40]</sup>,堆肥、猪粪等有机肥的使用,会使土壤 Cu 含量成倍增加<sup>[37]</sup>,在实地采样中发现,源 1 高值区有较多随意丢弃的农药及化肥包装袋等污染物,说明农业生产对该区域的土壤环境造成较严重的污染,这与郭晓东等<sup>[48]</sup>的研究结果一致;此外,

周雪明等<sup>[18]</sup>、Wei 等<sup>[49]</sup>和王洪涛等<sup>[50]</sup>的研究表明,工业活动(如冶炼加工和垃圾焚烧等)产生的废渣和废气等,也是 Cd 和 Cu 的主要来源. 近年来,随着宝鸡市区向东拓展,市区氮肥厂、冶炼厂和垃圾焚烧区等工业企业也随之搬迁到陈仓区虢镇及附近,从而造成该地的土壤 Cd 和 Cu 等污染,这与宋志廷等<sup>[51]</sup>对天津武清区、车丽娜等<sup>[17]</sup>对哈尔滨市等地区的土壤重金属源解析结果一致. 因此源 1 为工农业活动所致的“人为源”.

源 2 贡献率高达 77.67%,高值区主要在金台、渭滨和陈仓三区交界处,以块状形式集中. 由表 3 可知,Cr、Pb、Mn 的平均值虽低于陕西省土壤背景值,处于无污染级,结合图 2(Cr 和 Mn 的含量分布)和图 5(土壤质地)发现,Cr 和 Mn 含量和土壤质地的空间分布较一致,说明 Cr 和 Mn 主要来自土壤中,这与 Sajn 等<sup>[52]</sup>和 Borůvka 等<sup>[53]</sup>发现 Cr、Mn 一般受地质背景控制的结果一致,众多研究表明<sup>[14~17, 36, 44]</sup>,汽车尾气经大气沉降会对土壤中 Pb 的含量产生重要影响,本研究图 2 中 Pb 含量的高值区与图 5 中公路密度的高等级分布相吻合,这说明研究区 Pb 主要来自交通排放. 此外,本研究结果显示,Cr、Mn 和 Pb 虽处于无污染级,但在空间上也属高度变异,说明 Cr、Mn 和 Pb 在局域上也受到人类活动干扰,车丽娜等<sup>[17]</sup>和王利军等<sup>[36]</sup>认为,长期堆放的生活垃圾、工厂排放等易引起重金属 Cr 和 Mn 含量增加,因此政府部门应做好关于 Cr、Pb、Mn 的防御措施;此外,李小平等<sup>[6, 54, 55]</sup>曾发现,因

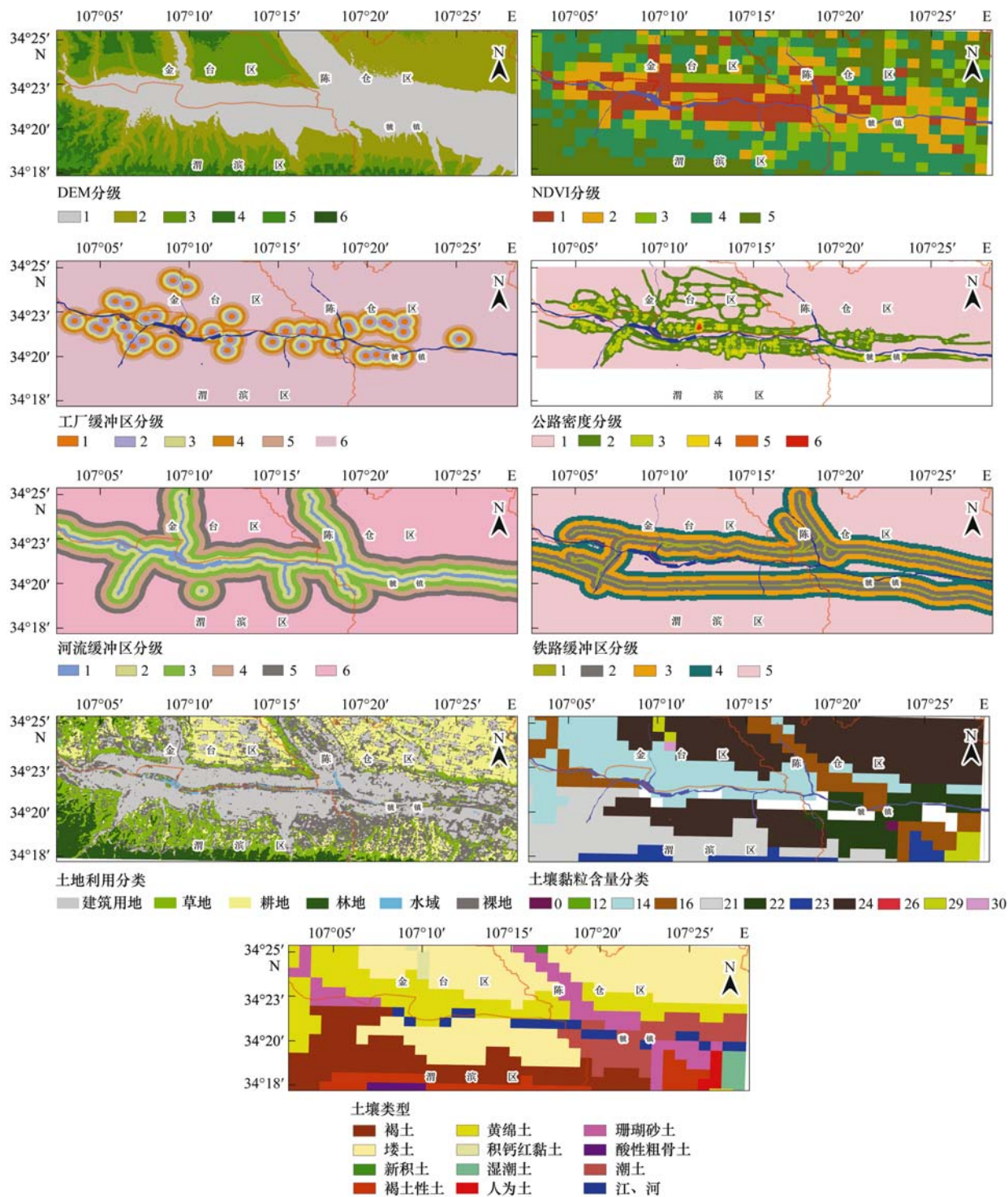


图5 地理环境因子(分级)空间化表达

Fig. 5 Geographical environmental factor (hierarchical) spatial representation

汽车尾气排放等原因, 重金属 Pb 是宝鸡市区土壤最主要的环境污染物, 本研究结合上述结论发现, 当前宝鸡市区土壤 Pb 污染治理效果明显, 综合可知, 源 2 为“混合源”。

源 3 高值区主要集中于金台区和渭滨区的中部, 呈南北带状走向分布, 对照表 3, Zn 和 Ni 的平均值均高于陕西省土壤背景值, 同时 Zn 和 Ni 的含量在空间上属高度变异, Ni 属于轻度污染, Zn 达

到重度污染, 说明 Zn 和 Ni 在局域上受到人为干扰, 具有人为属性。有研究表明<sup>[25, 33]</sup>, Zn 和 Ni 主要以自然源的形式存在于土壤中, 这与本研究发现 Zn 和 Ni 在城区绝大部分区域无污染的结果吻合。Jiang 等<sup>[16]</sup>和卢鑫等<sup>[37]</sup>均认为, Zn 是一般汽车刹车片、轮胎、机动车润滑油的主要添加剂, 居民生活垃圾的堆放也是 Zn 的主要来源, 卢鑫等<sup>[37]</sup>、艾建超等<sup>[40]</sup>和王菊等<sup>[42]</sup>认为化石燃料的燃烧是 Ni

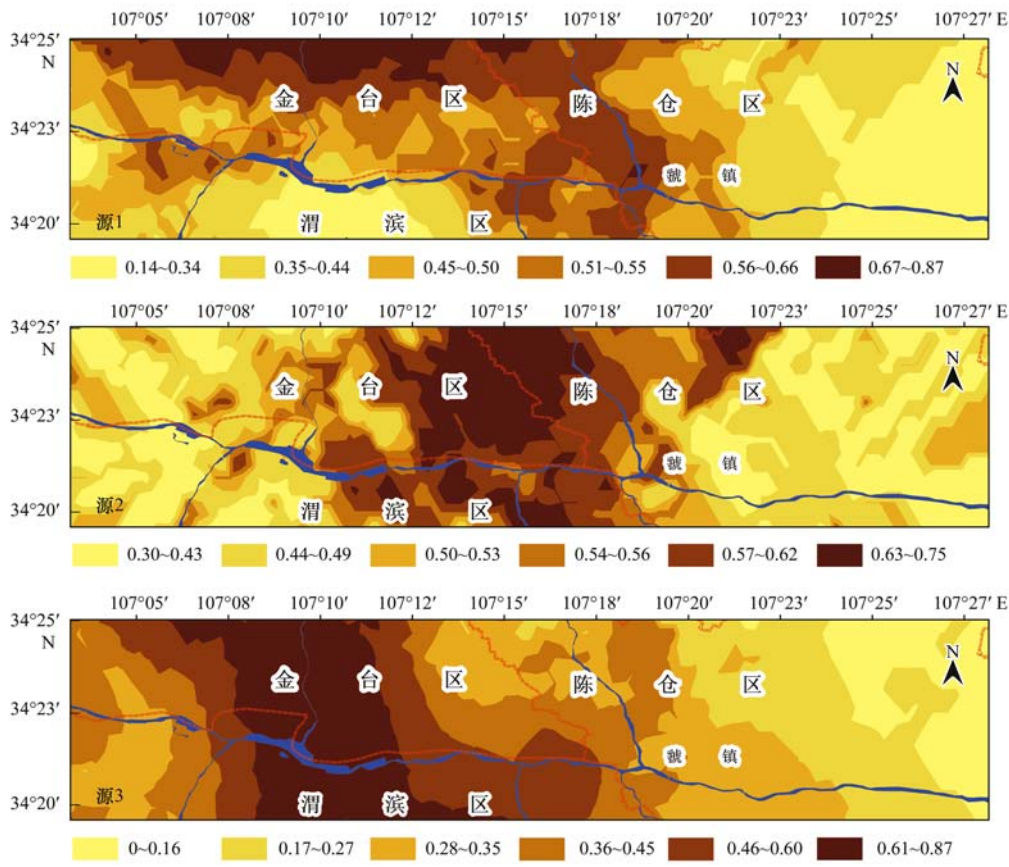


图6 Unmix 6.0 模型源贡献空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of source contributions from the Unmix 6.0 model

的重要来源途径，本研究在采样中发现，源3高值区内分布有宝鸡市汽车站、汽修厂、驾校及进出市区的较长坡道，大量客货车辆的频繁制动和启动，导致汽车轮胎的磨损、润滑油和刹车片的耗损严重，以及车辆燃油的不充分燃烧和机油等泄漏，使得Zn和Ni直接或经大气沉降间接进入土壤，从而造成污染。因此，源3主要为由交通排放造成的“人为源”。

3.2 重金属污染影响因子探测

本文基于地理探测器模型对宝鸡市区土壤重金属污染影响因子进行了探讨。由于地理探测器模型问世不久<sup>[28, 29]</sup>，在城市土壤重金属污染方面的应用并不多，加之重金属来源复杂，进入土壤的途径多样，因此在地理环境因子的选择标准方面还有待后续进一步研究。本文在参考文献[33~35]对农田等类型土壤重金属影响因子选取的基础上，选取土壤质地、距铁路距离、公路密度、DEM、NDVI、土壤类型、距河流距离、距工厂距离及土地利用类型这9类地理环境因子作为自变量，尝试对因变量（城市土壤重金属污染负荷指数PLI）的解释力，最终得出土壤质地、距铁路距离和公路密度对PLI解释力较大，这与吕建树等<sup>[25]</sup>采用单因素方差分析

法对日照市、王桢等<sup>[56]</sup>对日本新潟县等地的研究结果较一致，表明地理探测器模型可以很好地应用于城市土壤重金属污染的研究。

4 结论

- (1) 宝鸡市区表层(0~20 cm)土壤重金属 $PLI_{zone}$ 为1.36，属轻度污染；Cd、Zn、Cu、As和Ni均值超过了陕西省土壤背景值，Cd和Zn的CF均值超过3，属于重度污染级，应引起注意。
- (2) 宝鸡市区除陈仓区东部和渭滨区西南部外，其它区域土壤重金属PLI达到了中度污染级，其中城区渭河干流与支流交汇处的周边区域为土壤重金属PLI重度污染区。由地理探测器模型可得，土壤质地和距铁路距离对宝鸡市区土壤重金属PLI的交互解释力为0.099，有相互增强作用。
- (3) 宝鸡市区表层土壤中Cd、Cu和As主要为工农业活动所致的“人为源”，Zn和Ni为交通排放造成的“人为源”，Mn、Cr和Pb主要为“混合源”。

参考文献：

[1] Ganugapenta S, Nadimikeri J, Chinnapolla S R R B, et al. Assessment of heavy metal pollution from the sediment of Tupilipalem Coast, southeast coast of India[J]. International Journal of Sediment Research, 2018, 33(3): 294-302.  
[2] Zhang P Y, Qin C Z, Hong X, et al. Risk assessment and

- source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 1136-1147.
- [3] Pons-Branchu E, Ayrault S, Roy-Barman M, *et al.* Three centuries of heavy metal pollution in Paris (France) recorded by urban speleothems [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **518-519**: 86-96.
- [4] 白秀玲, 马建华, 孙艳丽, 等. 开封城市土壤磷素组成特征及流失风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 909-915.  
Bai X L, Ma J H, Sun Y L, *et al.* Characterization of phosphorus in urban surface soils in Kaifeng city and its risk of loss [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 909-915.
- [5] Kosheleva N E, Vlasov D V, Korlyakov I D, *et al.* Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 854-863.
- [6] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(4): 1241-1249.  
Li X P, Xu C L, Liu X Y, *et al.* Bioactivity and environment risk of heavy metals in urban soil from Baoji City, P. R. China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(4): 1241-1249.
- [7] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地理学报*, 2017, **72**(9): 1680-1694.  
Eziz M, Mamut A, Mohammad A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(9): 1680-1694.
- [8] Nannoni F, Protano G. Chemical and biological methods to evaluate the availability of heavy metals in soils of the Siena urban area (Italy) [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **568**: 1-10.
- [9] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **261**: 387-397.
- [10] Hu W Y, Huang B, Shi X Z, *et al.* Accumulation and health risk of heavy metals in a plot-scale vegetable production system in a peri-urban vegetable farm near Nanjing, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **98**: 303-309.
- [11] 郭鹏然, 雷永乾, 蔡大川, 等. 广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 684-691.  
Guo P R, Lei Y Q, Cai D C, *et al.* Characteristics of speciation and evaluation of ecological risk of heavy metals in sewage sludge of Guangzhou [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 684-691.
- [12] Muhammad S, Shah M T, Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan [J]. *Microchemical Journal*, 2011, **98**(2): 334-343.
- [13] 董咏睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 2103-2111.  
Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- [14] 董辰寅, 张卫国, 王冠, 等. 上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 754-759.  
Dong C Y, Zhang W G, Wang G, *et al.* Lead isotope signatures and source identification in urban soil of Baoshan district, Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 754-759.
- [15] Bressi M, Sciare J, Gheri V, *et al.* Sources and geographical origins of fine aerosols in Paris (France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(16): 8813-8839.
- [16] Jiang Y X, Chao S H, Liu J W, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China [J]. *Chemosphere*, 2016, **168**: 1658-1668.
- [17] 车丽娜, 刘硕, 韩金凤, 等. 哈尔滨市融雪径流中重金属污染空间分布及源解析[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(5): 1572-1580.  
Che L N, Liu S, Han J F, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in the snowmelt runoff in Harbin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(5): 1572-1580.
- [18] 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 等. 2011~2012 年北京大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的污染特征与来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4054-4060.  
Zhou X M, Zheng N J, Li Y H, *et al.* Chemical characteristics and sources of heavy metals in fine particles in Beijing in 2011-2012 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4054-4060.
- [19] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China, Pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 690-700.
- [20] Doabi S A, Karami M, Afyuni M, *et al.* Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil, atmospheric dust and major food crops in Kermanshah province, Iran [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **163**: 153-164.
- [21] 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 等. 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4268-4276.  
Yao G H, Xu H Z, Zhu L G, *et al.* Effects of different kinds of organic materials on soil heavy metal phytoremediation efficiency by sedum alfredii Hance [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4268-4276.
- [22] 吴涛, 伍钧. 铜、铅单一及其复合污染对鱼腥草吸收累积铜和铅的影响[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(3): 670-674.  
Wu T, Wu J. Effects of single and combined pollution by Cu and Pb on the accumulation of Cu and Pb in the *Houttuynia cordata* Thunb [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(3): 670-674.
- [23] 宋静宜, 傅开道, 苏斌, 等. 澜沧江水系底沙重金属含量空间分布及其污染评价[J]. *地理学报*, 2013, **68**(3): 389-397.  
Song J Y, Fu K D, Su B, *et al.* Spatial distribution of heavy metal concentrations and pollution assessment in the bed loads of the Lancang river system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(3): 389-397.
- [24] 赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 等. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3151-3159.  
Zhao K L, Fu W J, Ye Z Q, *et al.* Spatial variation of soil heavy metals in an E-waste dismantling area and their distribution characteristics [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3151-3159.
- [25] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. *地理学报*, 2012, **67**(7): 971-984.  
Lv J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in

- Rizhao city[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 971-984.
- [26] 刘世梁, 郭旭东, 姚喜军, 等. 草原煤矿开采区土壤重金属污染分布特征及影响因子[J]. *安全与环境学报*, 2016, **16**(3): 320-325.
- Liu S L, Guo X D, Yao X J, *et al.* Analysis of the influential factors and the heavy metal content distribution in the soil in prairie coal-mining regions [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, **16**(3): 320-325.
- [27] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 710-716.
- Wang Y Q, Bai Y R, Wang J Y. Distribution of urban soil heavy metal and pollution evaluation in different functional zones of Yinchuan city[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 710-716.
- [28] Wang J F, Li X H, Christakos G, *et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, **24**(1): 107-127.
- [29] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, **33**: 114-115.
- [30] Wang Y, Wang S J, Li G D, *et al.* Identifying the determinants of housing prices in China using spatial regression and the geographical detector technique[J]. *Applied Geography*, 2017, **79**: 26-36.
- [31] 通拉嘎, 徐新良, 付颖, 等. 地理环境因子对螺情影响的探测分析[J]. *地理科学进展*, 2014, **33**(5): 625-635.
- Tong L G, Xu X L, Fu Y, *et al.* Impact of environmental factors on snail distribution using geographical detector model [J]. *Progress in Geography*, 2014, **33**(5): 625-635.
- [32] 董玉祥, 徐茜, 杨忍, 等. 基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 135-147.
- Dong Y X, Xu Q, Yang R, *et al.* Delineation of the northern border of the tropical zone of China's mainland using Geodetector [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 135-147.
- [33] 肖武, 隋涛, 王鑫, 等. 巢湖流域典型农田土壤重金属污染评价与地理探测分析[J]. *农业机械学报*, 2018, **49**(7): 144-152.
- Xiao W, Yan T, Wang X, *et al.* Assessment and geographical detection of heavy metal pollution in typical farmland soil in Chaohu Lake basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2018, **49**(7): 144-152.
- [34] 李雨, 韩平, 任东, 等. 基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析[J]. *中国农业科学*, 2017, **50**(21): 4138-4148.
- Li Y, Han P, Ren D, *et al.* Influence factor analysis of farmland soil heavy metal based on the geographical detector[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, **50**(21): 4138-4148.
- [35] Wang H F, Wu Q M, Hu W Y. Using multi-medium factors analysis to assess heavy metal health risks along the Yangtze River in Nanjing, Southeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **243**: 1047-1056.
- [36] 王利军, 卢新卫, 雷凯, 等. 宝鸡市街尘重金属元素含量、来源及形态特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2470-2476.
- Wang L J, Lu X W, Lei K, *et al.* Content, source and speciation of heavy metal elements of street dusts in Baoji City [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(8): 2470-2476.
- [37] 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.
- 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.
- [38] 魏迎辉, 李国琛, 王颜红, 等. PMF 模型的影响因素考察——以某铅锌矿周边农田土壤重金属源解析为例[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(11): 2549-2559.
- Wei Y H, Li G C, Wang Y H, *et al.* Investigating factors influencing the PMF model: A case study of source apportionment of heavy metals in farmland soils near a lead-zinc ore [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(11): 2549-2559.
- [39] 赵红安, 臧亮, 张贵军, 等. 县域尺度土壤重金属污染特征及源解析——以赵县为例[J]. *土壤通报*, 2018, **49**(3): 710-719.
- Zhao H A, Zang L, Zhang G J, *et al.* Soil heavy metal pollution characteristics and source apportionment at county scale-take Zhaoxian county as an example [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(3): 710-719.
- [40] 艾建超, 王宁, 杨净. 基于 UNMIX 模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3530-3536.
- Ai J C, Wang N, Yang J. Source apportionment of soil heavy metals in Jiapigou goldmine based on the UNMIX MODEL [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3530-3536.
- [41] 段淑辉, 周志成, 刘勇军, 等. 湘中南农田土壤重金属污染特征及源解析[J]. *中国农业科技导报*, 2018, **20**(6): 80-87.
- Duan S H, Zhou Z C, Liu Y J, *et al.* Distribution and source apportionment of soil heavy metals in central-south of Hunan province [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, **20**(6): 80-87.
- [42] 王菊, 张悦悦, 金美英, 等. 应用 UNMIX 模型解析长春市大气中 PM<sub>10</sub> 来源[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(5): 812-816.
- Wang J, Zhang Y Y, Jin M Y, *et al.* Source apportionment of atmospheric PM<sub>10</sub> in Changchun by UNMIX [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(5): 812-816.
- [43] 刘哲民. 宝鸡土壤重金属污染及其防治[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, **19**(2): 101-104.
- Liu Z M. Heavy metals pollution in vegetable fields and its prevention [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, **19**(2): 101-104.
- [44] 张军, 董洁, 梁青芳, 等. 宝鸡城区土壤重金属空间分布特征及生态风险评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, **32**(10): 100-106.
- Zhang J, Dong J, Liang Q F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in urban soils of Baoji city [J]. *Arid Area Resources and Environment*, 2018, **32**(10): 100-106.
- [45] 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]. *Helgoland Marine Research*, 1980, **33**(1-4): 566-575.
- [46] 马群, 赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响[J]. *自然资源学报*, 2010, **25**(11): 1834-1844.
- Ma Q, Zhao G X. Effects of different land use types on soil nutrients in intensive agricultural region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(11): 1834-1844.
- [47] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(1): 81-91.
- Song J X, Zhu Q, Jiang X S, *et al.* GIS-based heavy metals risk assessment of agricultural soils-a case study of Baguazhou,

- Nanjing[J]. *Acta Metall Sinica*, 2017, **54**(1): 81-91.
- [48] 郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 等. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(9): 1875-1883.
- Guo X D, Sun Q F, Zhao Y S, *et al.* Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(9): 1875-1883.
- [49] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. *Microchemical Journal*, 2010, **94**(2): 99-107.
- [50] 王洪涛, 张俊华, 丁少峰, 等. 开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染来源及风险评估[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4520-4530.
- Wang H T, Zhang J H, Ding S F, *et al.* Distribution characteristics, sources identification and risk assessment of heavy metals in surface sediments of urban rivers in Kaifeng[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4520-4530.
- [51] 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 等. 基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2756-2762.
- Song Z T, Zhao Y J, Zhou Q W, *et al.* Applications of geostatistical analyses and stochastic models to identify sources of soil heavy metals in Wuqing district, Tianjin, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2756-2762.
- [52] Sajn R, Halamić J, Peh Z, *et al.* Assessment of the natural and anthropogenic sources of chemical elements in alluvial soils from the Drava River using multivariate statistical methods [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **110**(3): 278-289.
- [53] Borůvka L, Vacek O, Jehlička J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2005, **128**(3-4): 289-300.
- [54] Li X P, Feng L N. Multivariate and geostatistical analyzes of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **47**: 58-65.
- [55] 李小平, 黄春长. XRF 光谱法研究城市工业区的土壤环境污染[J]. *土壤*, 2007, **39**(4): 567-572.
- Li X P, Huang C C. Study on the soil environment pollution in City industry zone by XRF METHOD[J]. *Soils*, 2007, **39**(4): 567-572.
- [56] 王桢, 张建强, 渡边泉, 等. 铁路和道路沿线土壤重金属含量及来源解析[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(2): 364-372.
- Wang Z, Zhang J Q, Watanabe I, *et al.* Concentrations and sources of heavy metals in soil near railway and road[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(2): 364-372.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                           |                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016 .....             | ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397) |
| Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter .....                                 | XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)        |
| Elemental Composition Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> , and Heavy Pollution Analysis in Hefei .....                                             | LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)                        |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China .....                                                 | CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)         |
| Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM <sub>2.5</sub> in the Guanzhong Area .....                                                         | KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)    |
| Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun .....                                                                      | WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)             |
| Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM <sub>2.5</sub> Pollution in China .....                                                             | WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)                                    |
| Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM <sub>2.5</sub> from Coal-Fired Power Plants .....                                                  | DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)          |
| Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province .....                         | XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)       |
| Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site .....                                                | MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470) |
| Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao .....                                                                          | GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)                        |
| Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou .....                                                               | SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)          |
| Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project .....                        | HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)            |
| Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta .....  | QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)         |
| Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China .....                                       | YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)      |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir .....                                                    | WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)       |
| Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging .....                                                   | LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)             |
| Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang .....                                                                          | WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)        |
| Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands .....                                                        | LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)                |
| Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing .....                                                                                        | WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)        |
| Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors .....                                        | LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)                |
| Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin .....                                                 | WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)          |
| Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen ..... | WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)              |
| Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water .....                                                        | HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)      |
| Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling .....                                                     | PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)               |
| Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs .....                                                                                            | ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)  |
| Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process .....                                                  | FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)          |
| Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials .....                                                                                  | JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)           |
| Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains .....                                              | CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)      |
| Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials .....                                                        | LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)     |
| Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid .....                                                      | HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)                |
| Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR .....                                                                        | YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)       |
| Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System .....                                     | XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)  |
| Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX .....                                             | MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)         |
| Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems .....                                                                                        | DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)        |
| Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China .....                                                             | ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)                      |
| Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations .....                                    | LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)     |
| Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1 .....                                  | YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)         |
| Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification .....                       | GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)                |
| Nitrification, Denitrification, and N <sub>2</sub> O Production Under Saline and Alkaline Conditions .....                                                                | DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)      |
| Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil .....                                                                                                   | WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)                    |
| Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields .....                                                                                             | ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)      |
| Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde .....                                           | SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)    |
| Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City .....                                                              | ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)     |
| Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils .....                                                                                  | ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)        |
| Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As( V ) and P .....                                                                                                            | LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)                      |
| Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions .....                                                                      | ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)   |
| Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils .....                                       | LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)          |
| Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils .....                                           | WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)                     |
| Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates .....                                                                          | LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)       |
| Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia .....      | GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)                   |
| Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents .....                                                                           | HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)     |
| Toxicity of PM <sub>2.5</sub> Based on a Battery of Bioassays .....                                                                                                       | JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)     |