

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间歇期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙展翔, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙均兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 童瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例

刘书淮¹, 王德伟^{2*}, 施泽明^{1,3}, 唐亮^{1,3*}, 章凤英¹, 廖程¹, 李晓雨¹, 徐文斌¹

(1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081; 3. 成都理工大学地球核技术四川省重点实验室, 成都 610059)

摘要: 城乡融合区是城市与农村的连接区域, 是城市农产品最重要供给区, 其土壤地球化学性质影响因素复杂. 为此, 以四川省天府新区青龙融合区为研究对象, 共采集了 395 个土壤样品, 测定了 pH 值、有机质(SOM)、全钾(TK)、速效钾(AK)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、全磷(TP)、有效磷(AP)、Se、B、V、Zn、Mn、Mo、Ni、Co、As、Cd、Cr、Cu、Hg 和 Pb 等指标. 结果表明, TN、Se、Hg 和 TP 含量相较于成都经济区背景值明显偏高, Cr、Mn、pH 和 TK 明显偏低. 结合相关性统计、地统计学及 PMF 源解析研究, 得到重金属元素主要受四类源的影响, 大小关系为: 自然源(32%) > 工业源(30%) > 农业源(25%) > 交通源(14%). 此外, 从地形、工业园边界、农户密度和交通流量等角度对源解析结果进行了验证, 认为研究区 Mo、Co、Ni 和 V 的含量主要受坡度影响(母岩暴露), Hg 和 As 的含量受农业活动影响, Cd、Mn、Cr 和 Zn 的含量主要受工业生产影响, Pb、Zn、Cu、Cd 和 Hg 的含量与交通运输有关.

关键词: 城乡融合区; 土壤地球化学; 源解析; 正定矩阵因子分析法(PMF); 青龙片区

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1535-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202105154

Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District

LIU Shu-huai¹, WANG De-wei^{2*}, SHI Ze-ming^{1,3}, TANG Liang^{1,3*}, ZHANG Feng-ying¹, LIAO Cheng¹, LI Xiao-yu¹, XU Wen-bin¹

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 3. Applied Nuclear Techniques in Geosciences Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Qinglong Area of Tianfu New District in China is the connection area of Chengdu city, Sichuan Province, which dominantly supports the primary agricultural products for the metropolis. The soil quality, therefore, has been deteriorating in recent decades due to the intensive planting and industrial pollution. Thus, the evaluation of soil quality and the identification of the pollution sources are significant for sustainable soil planting and regulation. To this end, 395 soil samples were collected, and the parameters of pH, soil organic matter (SOM), total potassium (TK), available potassium (AK), total nitrogen (TN), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), Se, B, V, Zn, Mn, Mo, Ni, Co, As, Cd, Cr, Cu, Hg, and Pb were analyzed. The results revealed that TN, Se, Hg, and TP were obviously higher than the background value of the Chengdu Economic Zone, and the Cr, Mn, pH, and TK were depleted. The combination of correlation statistics, geostatistics, and positive matrix factorization (PMF) source analysis revealed that heavy metal enrichments were mainly affected by four sources, namely natural sources (32%) > industrial sources (30%) > agricultural sources (25%) > traffic sources (14%). Likewise, the source apportionments were verified regarding topography, industrial boundary, farmer density, and traffic flow. It was estimated that Mo, Co, Ni, and V were affected by slope; the enrichment of Hg and As was the result of agricultural activities; Cd, Mn, Cr, and Zn were affected by industrial waste diffusion; and Pb, Zn, Cu, Cd, and Hg were related to transportation. To a certain extent, agricultural fertilization and pesticide application have partially controlled soil fertility and pollution (Hg and As).

Key words: urban-rural integration area; soil geochemistry; source apportionment; positive matrix factorization; Qinglong Area

城市在快速的发展过程中形成了多种城乡融合模式, 由此衍生出城市与村庄的过渡区域——城乡融合区^[1]. 传统的城乡土地利用空间格局被打破, 土地可持续利用状况令人担忧^[2], 城乡融合区承载的非农产业对土壤环境造成污染, 对正常农业生产造成影响, 使得区域居民处于潜在致癌风险中^[3], 因此有必要对城乡融合区开展土壤地球化学源解析. 目前, 源解析模型包括化学质量平衡模型(chemical mass balance, CMB)^[4,5]、主成分分析模型(principal component analysis, PCA)^[6,7]、主成分分析-绝对主成分分数-多元线性回归受体模型(PCA-APCS-MLR)^[8,9]、正定矩阵因子分解模型

(positive matrix factorization, PMF)^[10,11]、稳定同位素源解析模型^[12,13]、UNMIX 法^[14,15]和随机森林法^[16,17]等. 各种源解析模型都有局限性和优势, 所以国内外源解析领域研究对源解析方法进行了改良, 一种改良路线是结合多种源解析方法相互验证结果, 提高源解析准确性^[8,14,15,18~21], 另一种改良路

收稿日期: 2021-05-16; 修订日期: 2021-08-11

基金项目: 中国地质调查局成都多要素城市地质调查项目(WKZB1811SCM910328); 成都市典型地区地下空间综合评价项目(DD20189210-04); 成都龙泉山城市森林公园多要素地质调查项目(LDD2019005)

作者简介: 刘书淮(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: 2019020133@stu.cdut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: 155343514@qq.com; tangliang17@cdut.edu.cn

线是在源解析之前增加多元统计分析与 GIS 制图^[18]、地统计分析^[20,21]、相关性分析^[21]和分区计算^[22]等辅助方法,或者在源解析基础上结合实际地理要素验证^[23]。

四川省天府新区青龙片区作为典型城乡融合区,复杂的土地利用类型可能干扰污染来源的确定。对比各类源解析方法,PMF 解析结果具有更多来源数,更高的 R^2 和更小的不可解释变异等特点^[8,14,18]。因此本文选用 PMF 法作为主要解析方法,以相关性分析和地统计分析作为确定各因子来源的辅助方法,最后结合青龙片区各种地理要素和关键元素空间分布进行分析验证。通过探寻复合源解析方法对城乡融合区的适用性,以期为同类型区域的土地利用规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青龙片区位于四川省成都市与眉山市交界处,毗邻成都市新津区,属于四川盆地与川西丘状山地过渡地带,亚热带湿润气候,雨量充沛,气候温和。区域海拔西北高、东南低,东面河滩最低海拔 433 m,西面山区最高海拔 627 m。东面主要分布居民密居区和工业区,交通发达(研究区有 2 条高速公路、1

条高速铁路和 1 条普通铁路过境,普通公路较密集),有长江支流岷江流经。西面主要为耕地及山区林地,耕地集中(图 1)。

研究区主要地层包括第四系的全新统和更新统,白垩系上统灌口组和夹关组。其中全新统主要为河流冲击卵砾石,坡积和残坡积堆积物。更新统岩性主要为冰川、湖河砾石、砂土和黏土沉积层。灌口组为紫红色和砖红色的含钙质长石石英粉砂岩和夹粉砂质泥岩,含大量的石膏晶粒和膏模孔;层面具虫迹构造,微波状层理、小型斜错层理和水平层理发育。夹关组为紫红色和砖红色的中厚-厚层块状含钙质中细粒长石石英砂岩,夹薄层状泥岩和粉砂岩,底部可见细砾岩;发育大型交错层理、平行层理、槽状层理、龟裂和泥裂构造等^[24]。

1.2 样品采集与加工

土壤调查共采集到 395 个土壤样品,采样密度控制在 $9 \text{ 点} \cdot \text{km}^{-2}$ 左右,采样深度为 0~20 cm。长方形地块以“S”形布设分样点,似正方形地块以“X”形布设分样点^[25]。为提高样品代表性,在采样小格中沿路线 3~5 处多点采集组合,各子样点土壤样品去除杂物后充分混合成一个样品装入样品袋中,单样质量在 1.5~2 kg 之间。

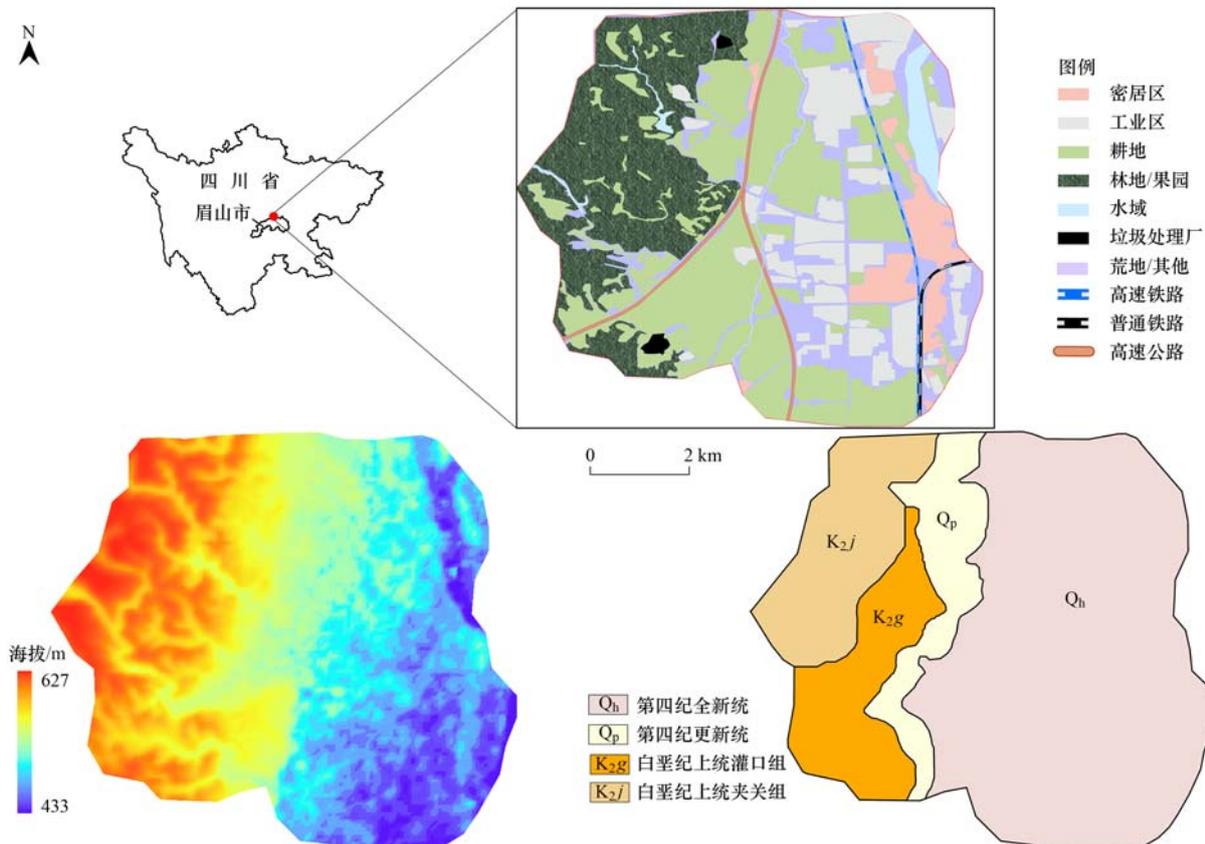


图 1 研究区地理位置、土地利用要素、海拔和地质背景

Fig. 1 Geographical location, land usage attributes, altitude, and geological background

1.3 样品分析与质量控制

测试了土壤 pH 及 22 项地球化学指标. 分析方法和检出限如表 1, 符合《区域地球化学样品分析方法》(DZ/T 0279-2016) 和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016) 的要求. 质量控制按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258-2014) 的要求, 采用外部检查和标准参考物相结合的方法进行质量控制,

表 1 土壤样品检测方法及检出限

Table 1 Detection method and limitation of soil samples

指标	检出方法	检出限/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
pH	水浸提、玻璃电极法	0.05(无量纲)
SOM	重铬酸钾氧化法	200
TK、TP 和 Mn	压饼, X 射线荧光光谱分析(XRF)	0.001%(TK, 质量分数); 3(TP); 0.02(Mn)
TN	混酸溶解, 盐酸滴定法	5
AK	乙酸铵提取-火焰光度法	1
AP	柠檬酸浸取-钼钼黄比色法	0.1
AN	碱解扩散法	1
Zn、Cd、Mo、Cu、Ni、Co、Cr、V 和 Pb	四酸溶矿, 电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)	0.03(Zn); 0.05(Cd); 0.1(Mo, Cu); 0.2(Ni, Co, Cr); 0.3(V) 0.7(Pb)
B	加缓冲剂, 原子发射光谱法(AES)	1
Se	三酸溶矿, 原子荧光法(AFS)	0.01
As 和 Hg	王水溶样、AFS	0.05(As); 0.005(Hg)

1.4 PMF 模型和不确定度的计算

PMF 是一个多变量因素分析工具, 它把采样数据矩阵(\mathbf{X}) 分解成因子贡献值矩阵(\mathbf{G})、源图谱矩阵(\mathbf{F}) 和残差矩阵(\mathbf{E}), 表达式如下^[26]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{GF} + \mathbf{E} \quad (1)$$

单个样品数据的分解式如下^[27]:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (2)$$

($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$)

式中, x_{ij} 为样品 i 中元素 j 的检测浓度; g_{ik} 为源 k 对样品 i 的相对贡献; f_{kj} 为源 k 中元素 j 的浓度; e_{ij} 为残差, 代表 PMF 模型对采样数据 x_{ij} 中无法解释的部分. 为了采样数据矩阵分解得到的结果可靠性较高, PMF 模型设置一个目标函数 Q , 函数借助加权最小二乘法做限定和进行迭代计算, 不断分解采样数据矩阵 \mathbf{X} , 当 Q 最小时即得到最优解, 目标函数 Q 计算式如下^[26, 28]:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)

式中, σ_{ij} 为样品 i 中元素 j 检测浓度的标准差.

样品数据的不确定度包括取样和分析等误差, PMF 5.0 只接受基于观察和基于方程两种形式的不确定度文件. 以观察为基础的不确定度文件需提供

仪器经过 12 次国家一级标准物质 GBW07401 ~ GBW07412 系列样品测试, 各被测元素测定的含量平均值与标准值之间的准确度(对数误差)和精密度(相对标准差)符合: 含量范围在检出限 3 倍以内的对数误差 ≤ 0.13 , 相对标准差 $\leq 15\%$; 在检出限 3 倍以上的对数误差 ≤ 0.11 , 相对标准差 $\leq 10\%$, 含量范围 $> 1\%$ 的对数误差 ≤ 0.07 , 相对标准差 $\leq 7\%$.

样品中每个元素的不确定度估值; 基于方程的不确定度文件采用检测浓度与所提供的方法检出限(MDL)大小关系确定. 当检测浓度小于或等于 MDL 时, 计算如下^[26]:

$$\text{Unc} = (5/6) \text{MDL} \quad (4)$$

当检测浓度大于 MDL 时, 计算如下:

$$\text{Unc} = \sqrt{(\text{EF} \times c)^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} \quad (5)$$

式中, EF 为误差系数, c 为样品检测浓度, MDL 为方法检出限.

由于不同土壤的理化性质不同, 实验之前的前处理及保存方法不同, 不同指标测样时所使用仪器的分析原理不同, 不宜完全根据官方公式进行计算, 应尝试结合其它的不确定度算法进行计算, 以此提高源解析计算结果的可靠性^[27-29]. 本研究结合前人的研究结果, 经过各种组合尝试, 选择如下公式计算不确定度:

$$\text{Unc} = 0.1c + (\text{MDL}/3) \quad (6)$$

1.5 统计与讨论方法简介

数据统计、正态检验以及相关性分析使用 SPSS 24.0 软件完成, 变异函数拟合以及确定相关参数使用 GS + 9.0 地统计软件完成, 元素空间分布使用 Kriging 插值, 基于 ArcGIS Pro 2.5 软件进行, 重金属源解析使用 PMF 5.0 软件完成.

坡度、农户密度、工业和交通影响的验证结合

使用 ArcGIS Pro 2.5、SPSS 24.0 和 Google Earth 等软件完成。使用 ArcGIS Pro 2.5 提取采样点高程、坡度等要素；使用最新 Google Earth 影像图，提取研究区农户民房位置信息（共3 736户），获取采样点民房密度指数（指示施肥、耕作强度等）。对研究区工业园边界矢量化（共 180 处），进行工业区缓冲区分析，工业区边界 0~100 m 内以 5 m 设置缓冲带，100 m~500 m 以 10 m 设置缓冲带，探讨工业区缓冲带和重金属之间的耦合关系。以研究区一定时段客货运汽车的 GPS 位置数据获得交通流量讯号点（共4 412个）并进行密度分析，探讨交通运输强度与土壤含量之间的关系。

2 结果与讨论

2.1 土壤元素统计

研究区表层土壤元素含量及背景值数据见表 2。与成都经济区土壤背景值相比^[30]，TK、Cr、Mn 和 pH 的平均值明显偏低，TN、TP、Se、Cd 和 Hg 的平均值明显偏高，其余组分差距不大。其中，有益元素 AP 极值比最大（1 742.86），重金属 Hg 的极值比最大

（162.4），说明 AP 和 Hg 的异常高值较多。变异系数可反映土壤组分的空间差异性^[31]，研究区 TK、TN、SOM、AN、pH、V、B、Cr、Se、As、Zn、Cu 和 Pb 属于中等变异（变异系数 20%~50%），TP、Cd、Mn、Mo 和 Hg 属于高度变异（变异系数 50%~100%），AK、AP、Co 和 Ni 的变异系数属于极度变异（变异系数 >100%），表明城乡融合区复杂的土地利用类型，已经明显影响区内农业用地土壤元素分布。

2.2 土壤元素相关性分析

元素显著正相关指示具有相似来源，或迁移与富集地球化学行为类似；元素显著负相关说明来源具有差异或拮抗作用（元素含量的减少可以促进另一种元素的吸附或促进释放）^[32]。由图 2 可知，Ni、Mn、Mo 和 Co 之间的相关系数都在 0.8 左右，说明这 4 种元素在来源、富集和迁移等方面具有相似的地球化学行为；Cr、Ni、Cu 和 Zn 之间的相关系数较高，说明这 4 种元素可能具有同源性。此外，V、As、Pb 和 Hg 与其他元素的相关系数都较低或无显著相关性，说明可能存在独立的高贡献源，或者来源广泛且各来源贡献值都不高。

表 2 研究区土壤元素数据统计¹⁾

Table 2 Geochemical characteristics of soil data in the Qinglong area

组分	变异系数/%	最小值	中位数	最大值	平均值	标准差	背景值 ^[30]
TK	21.20	0.33	1.71	3.23	1.75	0.37	2.47
pH	22.30	3.47	6.4	8.64	6.38	1.42	7.65
V	24.10	40.4	83.8	135	84.51	20.34	100.1
B	28.00	24	65	230	64.46	18.04	63
Cr	32.20	22.1	52.6	179.9	53.85	17.36	85.98
Se	32.50	0.04	0.24	1.23	0.25	0.08	0.11
TN	32.80	0.28	1.27	2.8	1.31	0.43	0.547
SOM	36.80	1.6	19.9	46.4	20.7	7.61	
As	37.60	0.4	8.8	20.7	9.49	3.57	8.39
AN	41.30	20	123	369	127.21	52.58	
Zn	42.90	33	77	478	81	34.77	73.48
Cu	45.00	8.7	29	213.8	30.2	13.58	27.21
Pb	47.50	1.9	31	186.1	31.09	14.76	26
Cd	51.50	0.025	0.26	1.68	0.28	0.14	0.14
Mn	56.50	114	405	4 053	419.86	237.18	702.3
Mo	65.90	0.4	1.1	13.2	1.16	0.77	0.91
Hg	66.00	0.002 5	0.07	0.406	0.09	0.06	0.04
TP	72.10	156	628	4 479	772.72	557.13	452.13
AK	104.10	25	118	1 585	185.35	192.92	
Co	165.00	5.1	12.6	460.3	13.78	22.74	15.93
AP	210.30	0.7	17.25	1 220	63.76	134.09	
Ni	252.70	10.8	25.9	1 509.5	29.65	74.92	33.8

1) pH 值无量纲，SOM、TK 和 TN 单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其余组分为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

2.3 重金属元素的半方差函数分析

对重金属进行半方差函数分析有利于进一步确认各重金属空间分布特性。基台值 ($C + C_0$) 和块金值 (C_0) 可描述空间变异程度， $C + C_0$ 表示重金属含量在空间的最大变异，其值越大表明总的空间变异

程度越高。块基比 [$C_0 / (C + C_0)$] 表示随机部分引起的空间变异性在总变异中所占的比重，可以比较变量的空间相关性强弱^[33]，pH、Mn、Mo、As、Cd 和 Hg 块基比在 0.25~0.75 之间（表 3），属于中等程度空间变异，说明这些元素受结构性因素及随机性

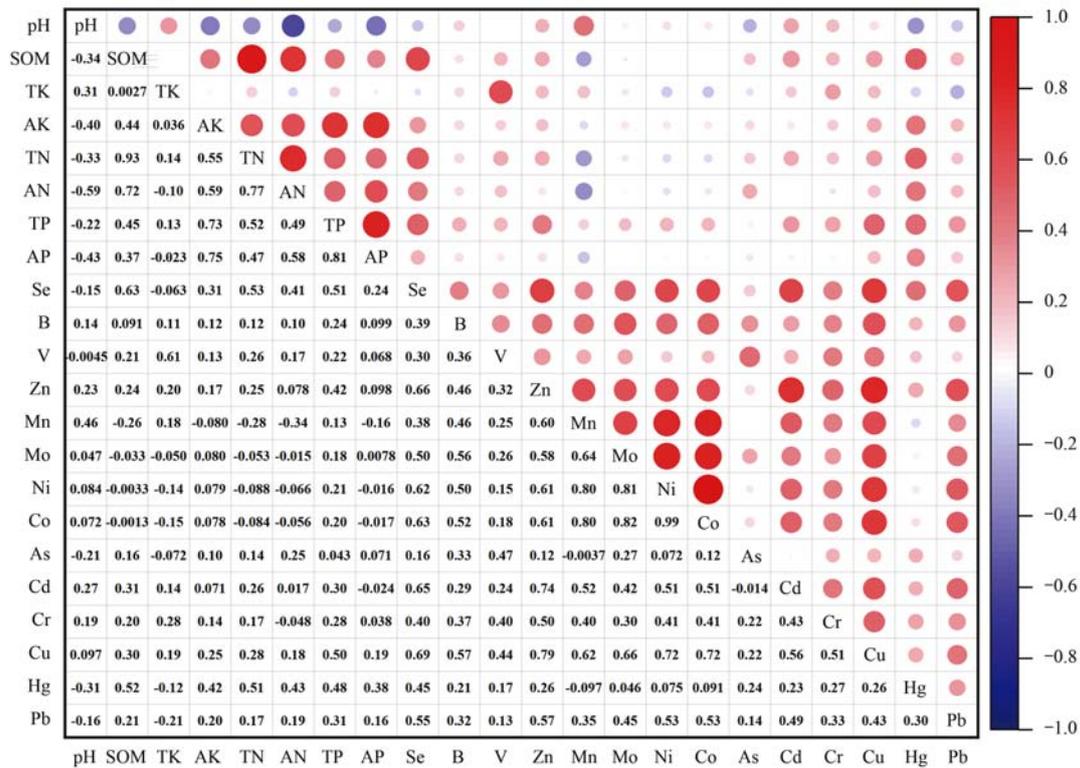


图2 研究区元素相关性

Fig. 2 Element correlation coefficient in the study area

因素共同影响,而 Zn、Cr、Cu 和 Pb 的块基比 > 0.75 且决定系数 > 0.9,空间相关性较弱,说明这些元素很可能主要受随机性因素影响。

变程是变异函数达到基台值所对应的距离,它表示元素的空间自相关范围,变程的大小反映元素

的自相关性强弱^[34]。研究区土壤 Cd 和 Cu 的变程偏大,说明这 2 种元素自相关性较强,影响因素可能较为单一;而 V 和 As 的变程偏小,说明这 2 种元素的自相关性较弱,在小范围内的变异较强,说明影响因素可能较为复杂。

表3 研究区重金属半方差拟合数据

Table 3 Semi-variance fitting data of heavy metals

组分	理论模型	块金值(C_0)	基台值($C + C_0$)	块基比 [$C_0 / (C + C_0)$]	变程/m	残差	决定系数 (R^2)
pH	球状	0.262 0	0.090 3	0.710	3 260	1.280E -04	0.977
V	球状	0.321 0	1.364 0	0.765	2 130	0.171	0.865
Zn	球状	0.724 0	3.458 0	0.791	11 470	0.360	0.915
Mn	指数	7.050	18.470	0.618	40 80	21.2	0.848
Mo	球状	0.022 9	0.093 7	0.726	13 420	2.926E -04	0.832
Ni	高斯	0.400 0	5.809 0	0.931	10 340	5.53	0.716
Co	高斯	0.207 0	2.524 0	0.918	13 475	0.423	0.715
As	球状	0.091 4	0.349 8	0.739	2 010	2.766E -03	0.958
Cd	指数	0.007 83	0.019 06	0.589	16 230	1.159E -05	0.841
Cr	指数	0.300 0	1.301 0	0.769	5 700	0.098 5	0.906
Cu	指数	0.338 0	1.435 0	0.764	16 230	0.048 5	0.921
Hg	球状	3.280 0	9.096 0	0.639	3 060	1	0.977
Pb	指数	0.147 0	1.541 0	0.905	4 530	0.058 4	0.969

2.4 PMF 重金属源解析

对土壤样品的各重金属元素进行 PMF 源解析。依次设定因子数 3 ~ 7,经反复对比发现因子数为 7 时,解析结果最稳定且残差值在 -3 ~ 3 之间,最小 Q 值为 3 969.8,且 Q_{Robust} 和 Q_{True} 间的差别最小,因此

本研究设定因子数为 7 个。此时重金属元素拟合曲线系数 (R^2) V 为 0.62,契合 V 和其他元素相关性较差且影响因素复杂的结论;其余均大于 0.7,As、Cd、Mn、Pb 和 Hg 的 R^2 大于 0.95,整体拟合效果好(图 3)。

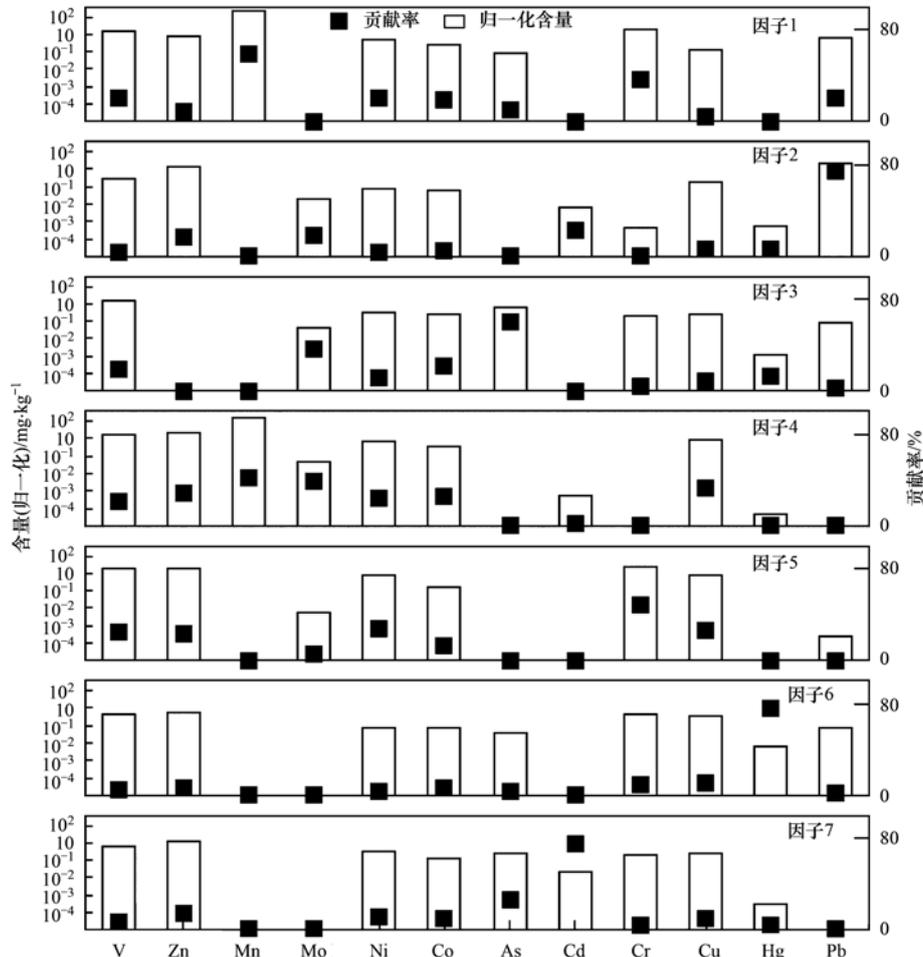


图3 PMF 源解析各因子贡献示意图

Fig. 3 Diagram of PMF source apportionments

2.4.1 自然源

因子4对Mn、Mo、Cu、Zn、Co、Ni和V都有一定贡献率,分别为41.4%、39.2%、33.3%、29.1%、25.2%、24.2%和21.4%,因子5对Cr、Ni、Cu、V和Zn的贡献率较高,分别为48.3%、27.1%、26.7%、22.6%和20.9%。有研究指出,与土壤母质成分有关的重金属常为污染程度较低的元素^[35,36],如Cr、Ni、Mn、Co和V等元素常来源于成土母质^[36~39]。研究区主要为第四系砾石及白垩系红色砂岩,矿物成分以石英、长石为主,不易吸附重金属;且 $\omega(\text{Mn})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 的平均值分别为 $419.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $53.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,小于成都经济区表层土壤背景值($702.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $85.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[30])。结合Cr、Ni、Cu和Zn以及Ni、Mn、Mo和Co两组元素在相关性分析显示出的同源性,综合认为因子4和5为自然源可能性更大。

坡度是影响土壤厚度、土质、含水性和肥力的因素之一^[40]。研究区坡度与各指标负相关排序为: $\text{Hg} > \text{SOM} > \text{TN} > \text{Cr} > \text{TP} > \text{Se} > \text{B} > \text{AN} > \text{Cu} > \text{AK} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{As} > \text{AP} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Ni}$ (图4),指示了坡度

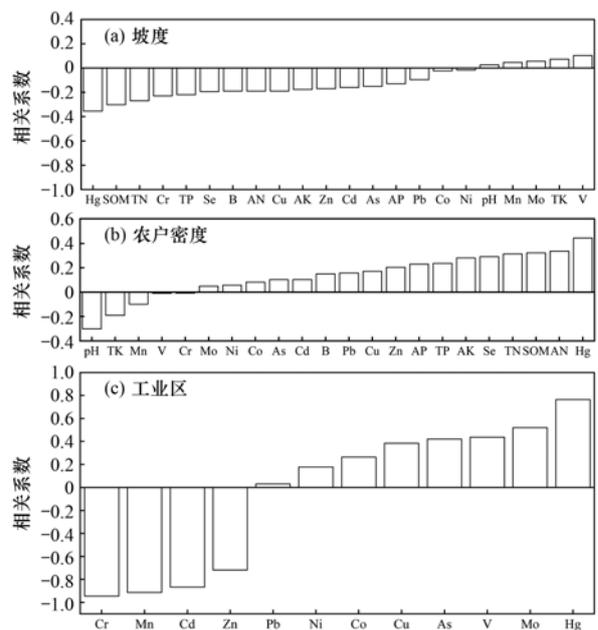


图4 元素与地理要素相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient between elements and geographical elements

对土壤元素含量的影响大小。在坡度较小区域,土壤

不易迁移,堆积时间长,是人类活动密集区(公路、工业区、居民点和农田密集分布),使得土壤受人类因素的影响更大,如 Hg 和 SOM 等;而 Co 和 Ni 等元素受坡度影响较小,表明其来源可能和地质背景有关.与坡度呈正相关的元素为: $V > TK > Mo > Mn > pH$. 坡度越大,土层越薄,土壤母质地球化学特征暴露越多. V 等元素含量高,表明这些元素主要受土壤母质控制,受自然源影响较大.此外,随着母岩的暴露,岩石风化碱性淋出使碱度增加(pH 值增大),研究区母岩主要为红色砂岩(白垩系灌口组、夹关组),富钾矿物(正长石等)的暴露增加了风化速率.

因此,结合土壤地球化学元素变异函数的块基比、变程,区域岩石地层性质,地形坡度(指示母岩暴露)等证据,笔者认为 Mn、Mo、Cu、Co、Ni、Cr、V 和 Zn 主要受地质背景影响. 2 个因子均指示自然源,可能和母质暴露(如 V)及元素化学惰性性质(Co、Ni)有关.

2.4.2 农业源

因子 3 对 As 的贡献率最高,为 61%,因子 6 对 Hg 的贡献率最高,为 76.3%. 有研究认为,As 和 Hg 可通过农药和化肥进入土壤^[37,41,42],青龙片区位于成都市近郊,旺盛的农产品需求刺激了区内蔬菜的种植,大量杀虫剂、除草剂和化肥的使用不可避免.结合相关性分析认为 As 和 Hg 各自存在一个相对独立的来源,初步判断因子 3 和因子 6 属于农业源.

有研究发现,施肥、机械作业、杀虫剂和薄膜使用等农业活动已经影响到土壤肥力和重金属污染等^[43~46]. 蔬菜种植依赖于手工操作,无法工业化,农户密度一定程度上指示土地利用的强度及肥料和杀虫剂使用强度等.研究区与农户密度呈正相关的地球化学因子大小为: $Hg > AN > SOM > TN > Se > AK > TP > AP > Zn > Cu > Pb > B > Cd > As > Co > Ni > Mo$ (图 4). 土壤营养元素与农户密度正相关可能与氮肥、磷肥和钾肥的使用量较大有关,在农户民房聚集区域,绝大多数农作物生长所需的营养元素和有益元素出现富集.与此相伴,Hg 与农户密度达到最大正相关,显示农业活动(施肥和农药)是土壤 Hg 的最大带入源,Hg 具有较强的活性,在微生物的作用下易转化为甲基汞和二甲基汞等^[47],并进一步通过水系发生迁移(图 5). As 与农户密度的相关性较低,符合地统计分析中 As 的自相关性较弱,受结构性因素及随机性因素共同影响的特点. As 和 Hg 的相关系数的大小差距体现了两种元素的不同特性,研究区 As 高值区域与耕地区域整体高度重合,可能和频繁的耕作翻土促进自然源 As 释放到地表有关(图 5).

相反,与农户密度负相关的大小排序为: $pH > TK > Mn > V > Cr$. 钾盐是农作物的必需营养元素,区内土壤母质主要为红色砂岩及河流沉积物,土壤翻耕、破碎促进含钾矿物(如正长石和黑云母)的风化,黏土矿物的加速形成.此外,pH 值与农户密度负相关也可能和施肥有关,研究区主要施用化肥为酸性和中性,说明施肥促进了土壤的酸化,和研究区土壤 pH 值 6.38 明显低于成都经济区背景值 7.65 的数据吻合.综合分析结果,认为因子 3 和因子 6 属农业源.

2.4.3 工业源

因子 1 对 Mn 和 Cr 的贡献率较高,分别为 58.6% 和 36.2%,因子 7 对 Cd 的贡献率较高,为 74.9%. Mn 和 Cr 与农户密度无必然联系,可以排除因子 1 属农业源,加之地统计分析中 Cr 空间相关性较弱,主要受随机性因素影响;Cd 的自相关性强,影响因素可能较为单一.已有研究表明,工业生产会排放出 Cd、Mn 和 Cr^[37,48].通过耦合工业区边界和重金属含量关系,发现离工业园区越近含量越低的元素按相关系数排序为: $Hg > Mo > V > As > Cu > Co > Ni > Pb$ (图 4). Hg 和 As 越靠近工业区含量越低,结合工业区附近农田种植受限的实际情况,进一步证实 Hg 和 As 含量和农业活动密切相关. Mo、V、Cu、Co 和 Ni 等元素越靠近工业区含量也越低,由于工业园区地面硬化和农业翻耕减少使得 Mo 和 V 等元素向上迁移通道阻断,符合 Mo、V、Cu、Co 和 Ni 等元素主要受控于自然源的判断.

相反,离工业园区越近含量越高的元素排序为 $Cr > Mn > Cd > Zn$. 研究区 180 家工业用地中有 32 家为金属、建材、电镀和机械加工企业,金属加工产生的三废会导致 Cr、Mn、Cd 和 Zn 进入环境;此外,33 家为化工和化肥生产企业,其生产工艺所使用的原料或者触媒贡献了一定量的 Cd 化合物,使得工业区对土壤 Cd 的影响相对更大,也对应了 Cd 元素的高值基本出现在工业园区附近的地理特性(图 5).因此,居于研究区复杂的工业组合对土壤形成的交叉污染,综合认为因子 1 和因子 7 属工业源.

2.4.4 交通源

因子 2 对 Pb 的贡献率最高,为 74.8%,对 Cd、Mo、Zn、Hg、Cu、Co 和 Ni 也有一定贡献率,分别为 22.9%、16.3%、16.2%、8.2%、8.1%、6.2% 和 4.7%,其中 Pb、Cu 和 Zn 是交通污染源的标志性元素^[37],汽油燃烧会排放 Pb、Cd 和 Hg^[39,49],而 Zn、Cu、Mo、Co 和 Ni 可增强金属材料的强度、硬度和抗腐蚀性,被广泛应用于汽车车身和零部件的制造,汽车行驶过程中的磨损会释放这些元素进入环

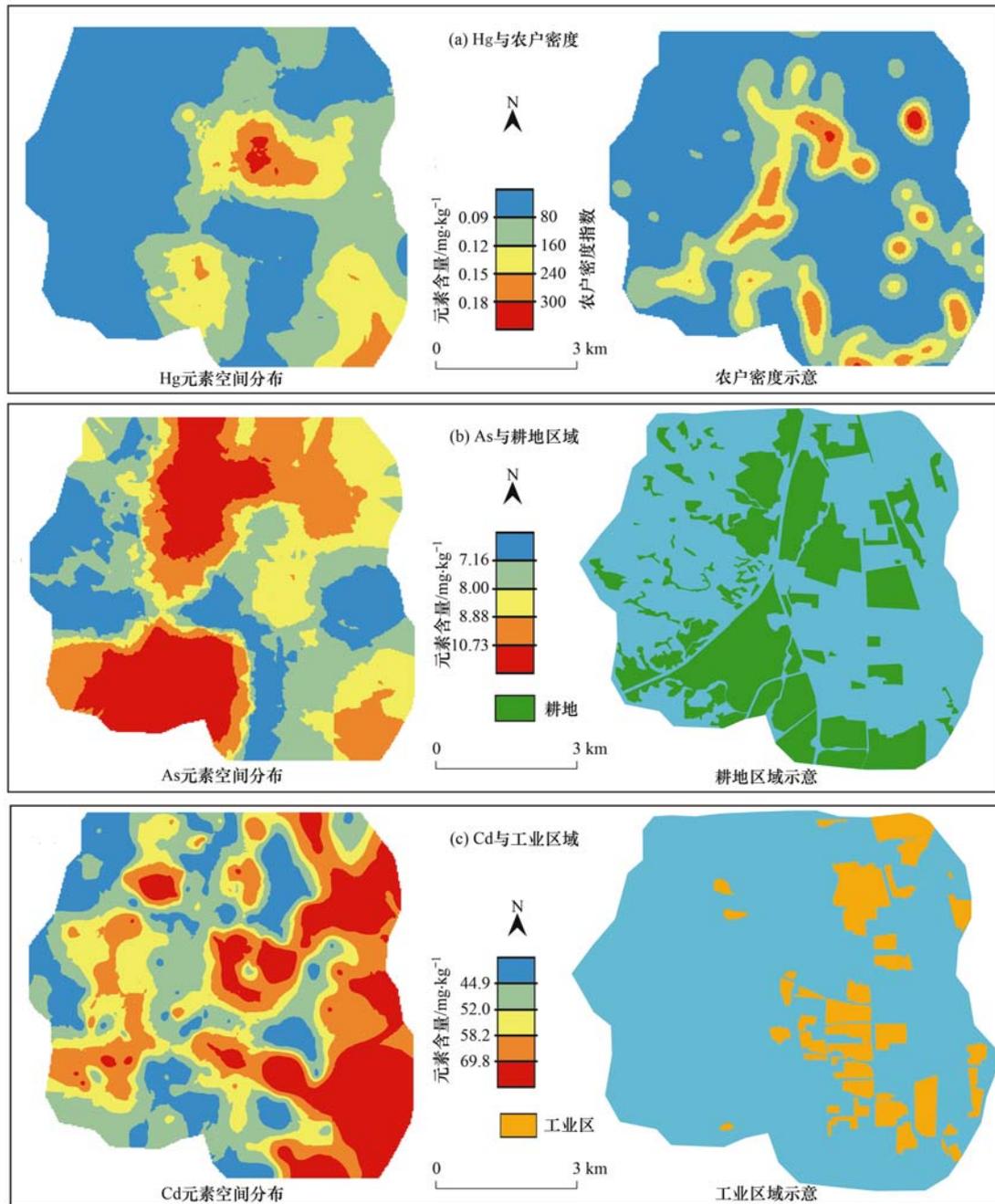


图5 元素空间分布与地理要素示意

Fig. 5 Spatial distribution of elements and map of geographical elements

境^[11,50].

分析研究区汽车密度与重金属含量的关系,发现元素含量与汽车密度呈负相关的为: $\text{As} > \text{Cr} > \text{V}$,呈正相关的为: $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Pb} > \text{Mo} > \text{Mn}$. 研究区发达的物流及客运导致交通运输和汽油燃烧的总量较高,汽车尾气排放、车辆部件磨损和工业产品运输洒落等将 Pb 、 Cu 、 Zn 、 Cd 和 Hg 等元素带入道路周边环境;而 As 、 Cr 和 V 主要受控于农业行为及地质背景,在主要交通线附近不富集,与之前判断吻合. 因此,因子2属于交通源.

3 结论

(1) 土壤重金属含量并非仅受控于某一因素,四川省天府新区青龙片区(城乡融合区)农业用地土壤元素地球化学特征受多重因素影响,即自然源(32%) > 工业源(30%) > 农业源(25%) > 交通源(14%)等. 区内复杂的土地利用类型已经形成了轻微的土壤重金属污染,但尚未出现明显点源污染.

(2) 天府新区青龙片区农业用地受农产品旺盛需求的影响,农业施肥、施药已经一定程度上控制了土壤肥力,并产生了轻微的土地污染. 同时,笔者

发现,受控于同一重金属来源的多因子可能和具体的生产活动关联,如农业源的 Hg(农业施肥、农药)和 As(频繁农用地翻耕),相关讨论尚需深入。

(3)研究区工业园污染物扩散,可能加速了区内土壤 Cr、Mn、Cd 和 Zn 等重金属元素在土壤中的富集,威胁到了城乡融合区蔬菜的种植安全(如 Cd 在食物链中的迁移)。

(4)本文尝试使用坡度、农户密度、工业园缓冲带、交通强度等指标进行土壤元素地球化学受控因素验证。笔者认为,以农用地地形坡度为研究对象,探讨土壤地质背景元素的暴露有一定的意义。本文使用农户密度因子,较为明确地证明了 Hg 含量和农业活动的关系,但居于遥感影像的农户密度解译方法尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] Song Z J, Chen Y, Li Y, *et al.* An analysis of the allometric and multifractal features of a development in the urban-rural area in the lower reaches of the Yangtze river: 2012 cross-sectional data of four provinces and one city[J]. *Complexity*, 2020, doi: 10.1155/2020/6963827.
- [2] Qu L L, Li Y R, Feng W L. Spatial-temporal differentiation of ecologically-sustainable land across selected settlements in China: an urban-rural perspective [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **112**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105783.
- [3] Liang M, Liang H D, Rao Z, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban-rural integration area soil, North China: spatial distribution, sources and potential human health risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2019, **234**: 875-884.
- [4] Angello Z A, Behailu B M, Tränckner J. Integral application of chemical mass balance and watershed model to estimate point and nonpoint source pollutant loads in data-scarce little Akaki River, Ethiopia [J]. *Sustainability*, 2020, **12** (17), doi: 10.3390/su12177084.
- [5] Li Y J, Wu Y D, Xu J, *et al.* Chemical characterization of particulate organic matter from commercial restaurants: alkyl PAHs as new tracers for cooking [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **770**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145308.
- [6] Salim I, Sajjad R U, Paule-Mercado M C, *et al.* Comparison of two receptor models PCA-MLR and PMF for source identification and apportionment of pollution carried by runoff from catchment and sub-watershed areas with mixed land cover in South Korea [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 764-775.
- [7] 马红璐, 赵欣, 陆建刚, 等. 宿迁市 PM_{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3899-3907.
- Ma H L, Zhao X, Lu J G, *et al.* Seasonal characteristics and source analysis of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Suqian City[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3899-3907.
- [8] Zhang H, Cheng S Q, Li H F, *et al.* Groundwater pollution source identification and apportionment using PMF and PCA-APCA-MLR receptor models in a typical mixed land-use area in Southwestern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140383.
- [9] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 886-894.
- Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 886-894.
- [10] Lv J S, Wang Y M. PMF receptor models and sequential Gaussian simulation to determine the quantitative sources and hazardous areas of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2019, **353**: 347-358.
- [11] 韩琳, 徐夕博. 基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5114-5124.
- Han L, Xu X B. Quantitative evaluation of human health risk of heavy metals in soils based on positive matrix factorization model and geo-statistics[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5114-5124.
- [12] Wang L W, Jin Y L, Weiss D J, *et al.* Possible application of stable isotope compositions for the identification of metal sources in soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **407**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124812.
- [13] 闫颖, 张晓文, 郭波莉. 铅-镉-锌-汞稳定同位素在重金属污染源解析中的研究进展 [J]. *环境化学*, 2020, **39** (10): 2712-2721.
- Yan Y, Zhang X W, Guo B L. Applications of lead-cadmium-zinc-mercury stable isotopes in source identification of heavy metal pollutions [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(10): 2712-2721.
- [14] Jain S, Sharma S K, Vijayan N, *et al.* Investigating the seasonal variability in source contribution to PM_{2.5} and PM₁₀ using different receptor models during 2013-2016 in Delhi, India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28** (4): 4660-4675.
- [15] Hong N, Yang B, Tsang D C W, *et al.* Comparison of pollutant source tracking approaches: heavy metals deposited on urban road surfaces as a case study [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115253.
- [16] Borlaza L J S, Weber S, Uzu G, *et al.* Disparities in particulate matter (PM₁₀) origins and oxidative potential at a city scale (Grenoble, France)-part 1: source apportionment at three neighbouring sites [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21** (7): 5415-5437.
- [17] Hu Y A, Cheng H F. A method for apportionment of natural and anthropogenic contributions to heavy metal loadings in the surface soils across large-scale regions [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 400-409.
- [18] Wang Y T, Guo G H, Zhang D G, *et al.* An integrated method for source apportionment of heavy metal (loid)s in agricultural soils and model uncertainty analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **276**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116666.
- [19] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟 [J]. *环境科学*, 2021, **42** (3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [20] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (2): 934-944.
- Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (2): 934-944.
- [21] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (6): 2865-

2874.
Yu Y H, Lv J S, Wang Y M. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the lower Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- [22] Wu J, Li J, Teng Y G, *et al.* A partition computing-based positive matrix factorization (PC-PMF) approach for the source apportionment of agricultural soil heavy metal contents and associated health risks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121766.
- [23] Hu Y A, He K L, Sun Z H, *et al.* Quantitative source apportionment of heavy metal(loid)s in the agricultural soils of an industrializing region and associated model uncertainty [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **391**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122244.
- [24] 沈昕, 向芳, 李树霞, 等. 四川峨眉山地区白垩系物源[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, **48**(2): 129-141.
Shen X, Xiang F, Li S X, *et al.* Study of Cretaceous provenance in Emeishan area, Sichuan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2021, **48**(2): 129-141.
- [25] 廖程, 王德伟, 唐亮, 等. 基于最小数据集的成都平原某区土壤养分综合评价体系的构建[J]. 地球与环境, 2021, **49**(2): 189-197.
Liao C, Wang D W, Tang L, *et al.* Construction of soil nutrient comprehensive evaluation system based on minimum data set in Chengdu Plain[J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(2): 189-197.
- [26] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [EB/OL]. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=308292, 2015-08-20.
- [27] 陈志凡, 化艳旭, 徐薇, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田重金属污染源解析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(1): 276-283.
Chen Z F, Hua Y X, Xu W, *et al.* Analysis of heavy metal pollution sources in suburban farmland based on positive definite matrix factor model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 276-283.
- [28] Reff A, Eberly S I, Bhave P V. Receptor modeling of ambient particulate matter data using positive matrix factorization: review of existing methods[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(2): 146-154.
- [29] 张夏夏, 袁自冰, 郑君瑜, 等. 大气污染物监测数据不确定性评估方法体系建立及其对PMF源解析的影响分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 95-104.
Zhang X X, Yuan Z B, Zheng J Y, *et al.* Establishment of an uncertainty assessment framework for atmospheric pollutant monitoring data and its impact on PMF source apportionment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 95-104.
- [30] 国土资源部中国地质调查局. 中华人民共和国多目标区域地球化学图集: 四川省成都经济区[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [31] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. PMF模型解析土壤重金属来源的不确定性[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(2): 716-725.
Li J, Teng Y G, Wu J, *et al.* Uncertainty analysis of soil heavy metal source apportionment by PMF model [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(2): 716-725.
- [32] 王宏. 东洞庭湖湿地土壤重金属的分布特征及风险评价[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.
- [33] 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 等. 中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1396-1403.
Wang Y Q, Zhao Y P, Bai Y R, *et al.* Spatial heterogeneity of soil carbon and its fractions in the wolfberry field of Zhongning County[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1396-1403.
- [34] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys[A]. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). *Soil Spatial Variability* [M]. Wageningen, Netherlands: PUDOC, 1985. 166-194.
- [35] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于PMF模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 3919-3929.
Chai L, Wang X, Ma L, *et al.* Sources appointment of heavy metals in cultivated soils of Lanzhou based on PMF models [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- [36] Wang S, Cai L M, Wen H H, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 92-101.
- [37] 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 等. 多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1105-1113.
Zeng W B, Gu G Q, Wan X M, *et al.* Heavy metal contents of soil and surface dust and its ecological risk analysis in a multifunctional industrial park [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1105-1113.
- [38] 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 等. 雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2003-2015.
Zhou Y L, Yang Z B, Wang Q L, *et al.* Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiongan New District [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- [39] 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 等. 太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2143-2152.
Huang H, Xu Z Q, Yan J X, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution and ecological risk evaluation of indoor dust from urban and rural areas in Taiyuan City during the heating season [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2143-2152.
- [40] Moges A, Holden N M. Soil fertility in relation to slope position and agricultural land use: a case study of Umbulo Catchment in Southern Ethiopia [J]. *Environmental Management*, 2008, **42**(5): 753-763.
- [41] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 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, 2013, **34**(4): 1561-1567.
Guo W, Sun W H, Zhao R X, *et al.* Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- [42] Zhou Y T, Niu L L, Liu K, *et al.* Arsenic in agricultural soils across China: distribution pattern, accumulation trend, influencing factors, and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 156-163.
- [43] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 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[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2469-2479.
Xia W J, Zhang L F, Liu Z B, *et al.* Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2469-2479.

- [44] 王凯, 樊守彬, 亓浩云. 北京市农业机械排放因子与排放清单[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2602-2608.
Wang K, Fan S B, Qi H Y. Emission factors and emission inventory of agricultural machinery in Beijing under real-world operation[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2602-2608.
- [45] 徐强, 胡克林, 李季, 等. 华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2480-2488.
Xu Q, Hu K L, Li J, *et al.* Life Cycle environmental impact assessment on different modes of greenhouse vegetable Production in the North China Plain[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2480-2488.
- [46] 韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 等. 辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1781-1790.
Han L H, Xu L, Li Q L, *et al.* Levels, characteristics, and potential source of micro (meso) plastic pollution of Soil in Liaohe River Basin[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1781-1790.
- [47] 孙涛, 马明, 王永敏, 等. 西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1880-1887.
Sun T, Ma M, Wang Y M, *et al.* Migration and transformation of mercury in unsubmerged soil and sediment at one typical forest reservoir in Southwest China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1880-1887.
- [48] 秦鑫, 张泽锋, 李艳伟, 等. 南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4467-4474.
Qin X, Zhang Z F, Li Y W, *et al.* Sources analysis of heavy metal aerosol particles in north suburb of Nanjing [J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4467-4474.
- [49] Bourliva A, Christophoridis C, Papadopoulou L, *et al.* Characterization, heavy metal content and health risk assessment of urban road dusts from the historic center of the city of Thessaloniki, Greece [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017, **39**(3): 611-634.
- [50] 赵清, 李杏茹, 王国选, 等. 运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1626-1635.
Zhao Q, Li X R, Wang G X, *et al.* Chemical composition and source analysis of PM_{2.5} in Yuncheng, Shanxi Province in autumn and winter[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1626-1635.



CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)