

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评估

陈慧¹, 赵鑫宇¹, 常帅¹, 宋圆梦¹, 卢梦淇¹, 赵波¹, 陈昊达¹, 高赛¹, 王琳静¹, 崔建升^{1,2}, 张璐璐^{1,2*}

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

摘要: 地下水重金属污染已引起全球的广泛关注, 重金属来源解析及其健康风险评估将为地下水中重金属污染的精准防控提供数据和方法支撑。因此, 选取华北平原典型城市——石家庄作为研究区, 筛选20个样点, 利用APCS-MLR模型和健康风险模型解析评估了石家庄市地下水中10种重金属的污染源及其健康风险。结果表明: ①石家庄市地下水中典型重金属的浓度均值排序为: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Al} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$, 其中 $\rho(\text{Fe})$ 和 $\rho(\text{Pb})$ 的均值分别为 $260.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.01 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 根据单因子和内梅罗指数, Pb、Fe 和 Cd 是石家庄市地下水主要的污染重金属; ②重金属浓度范围为 $47.30 \sim 2560 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 就空间分布而言, 重金属浓度在 S3 处最高 ($2560 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 而在 S9 处最低 ($47.30 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); ③污染源解析结果表明: 工农业活动、交通排放和地质背景是石家庄市地下水中重金属的3个主要来源, 其中工农业活动对重金属的累积贡献率最大 (47.83%); ④除工农业活动来源的重金属对成人造成潜在威胁 ($\text{HI} > 1$) 外, 其余来源的重金属对成人和儿童造成的非致癌风险均处于可接受水平 ($\text{HI} < 1$), 而致癌风险对成人和儿童均存在潜在威胁; 工农业活动是非致癌风险 (成人: 52.46%, 儿童: 52.45%) 和致癌风险 (成人: 65.22%, 儿童: 65.69%) 的主要贡献者, 其中 Cd 和 As 的致癌风险较高。因此, 为了保障石家庄地下水环境安全, 需严格控制污染来源, 进一步加强地下水中重金属污染的风险管控。

关键词: 华北平原; 城市地下水; 重金属; 源解析; 健康风险

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-4884-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202210121

Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain

CHEN Hui¹, ZHAO Xin-yu¹, CHANG Shuai¹, SONG Yuan-meng¹, LU Meng-qi¹, ZHAO Bo¹, CHEN Hao-da¹, GAO Sai¹, WANG Lin-jing¹, CUI Jian-sheng^{1,2}, ZHANG Lu-lu^{1,2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Biotechnology Laboratory for Pollution Control in Hebei Province, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Increasing attention has been paid to the heavy metal pollution in groundwater. The source analysis and risk assessment of heavy metals will provide data and method support for the targeted control of heavy metal pollution in groundwater. In this study, 20 sampling sites were selected in Shijiazhuang City. The APCS-MLR model and health risk model were applied to analyze and evaluate the pollution sources and health risks of 10 types of heavy metals in the groundwater of Shijiazhuang. The results showed that ① the mean concentration of heavy metals in groundwater followed the order of $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Al} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$, and the mean $\rho(\text{Fe})$ and $\rho(\text{Pb})$ were $260.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $10.01 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. According to the results of the single factor and Nemerow index, Pb, Fe, and Cd primarily contributed to the heavy metal pollution in the groundwater. ② The concentration of heavy metals ranged from 47.30 to $2560 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. In terms of spatial distribution, the highest concentration appeared at S3 ($2560 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), whereas the lowest concentration was at S9 ($47.30 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$). ③ Source analysis results showed that industrial and agricultural activities, transportation emission, and geological background were the major heavy metal sources, among which the contribution of industrial and agricultural activities was the highest (47.83%). ④ The industrial-agricultural activities posed a potential threat to adults ($\text{HI} > 1$); however, the non-cancer and the cancer risks of other sources for both adults and children were at an acceptable level ($\text{HI} < 1$) and potential threat level, respectively; industrial-agricultural activities were the major source of non-cancer (adults: 52.46%, children: 52.45%) and cancer risks (adults: 65.22%, children: 65.69%), among which Cd and As showed high cancer risk. Therefore, to ensure the safety of the groundwater environment, strictly controlling the pollution sources and further strengthening the risk control of heavy metal pollution in groundwater are necessary.

Key words: North China Plain; urban groundwater; heavy metals; source analysis; health risks

世界上约25亿人依赖地下水来满足日常用水需求,地下水在生态系统以及农业、工业和生活用水中都发挥着重要作用^[1,2]。然而,城市化、工业化和集约型农业化的不断推进,使得重金属、硝酸盐和有机污染物等污染物进入地下水,影响了地下水水质^[3,4],加剧了地下水污染^[5]。其中,重金属因其具有毒性强、持久性高、难降解和生物富集强等特

性引起了全球广泛的关注^[6,7]。此外,重金属还可通过饮用摄入和皮肤吸收等途径进入人体,引起骨损

收稿日期: 2022-10-12; 修订日期: 2022-11-24

基金项目: 河北省自然科学基金项目(D2019208152); 河北省教育厅重点项目(ZD2021046)

作者简介: 陈慧(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为地下水污染与评价, E-mail: chh1007@163.com

* 通信作者, E-mail: zhanglulu19850703@163.com

伤、贫血和肾病,甚至诱发心血管、神经系统疾病和内脏癌等^[8,9],进而对人群造成健康风险^[10,11]。因此,亟需明晰地下水中重金属的污染特征及其主要污染源。

目前,越来越多的研究开始关注地下水中重金属的污染源解析及其健康风险评估。地下水中重金属的来源总体可分为地质背景和人为源,其中地质背景包括母岩的风化和成土作用^[12],人为源包括金属冶炼^[13]、污水灌溉^[14]、工业排放^[15]和农药化肥等^[16,17]。近年来,地下水中重金属的源解析方法主要包括多元统计分析和模型。多元统计分析主要包括相关性、主成分和因子分析等^[18],而模型主要包括化学质量平衡(CMB)、绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)和正定矩阵因子分解(PMF)等^[19]。例如,王晓东等^[20]采用因子分析对宁夏地区地下水中重金属来源进行研究,发现该研究区呈现工农业活动、交通尾气、采矿和沉积物溶解等复合污染源特征。Sheng等^[21]采用APCS-MLR模型研究发现张掖盆地地下水中重金属主要来源为地质背景和人类活动。尽管如此,此前的研究多集中于地下水中重金属污染源的相对贡献及健康风险,而较少评估地下水中重金属的特定来源的健康风险。地下水中高浓度的重金属可能不会造成高健康风险^[11],但不同源会显著影响重金属的浓度、分布及其风险。因此,定量评估地下水中重金属的来源健康风险对于重金属的科学精准管控具有重要意义。

石家庄作为华北平原典型的缺水型城市,地下水是当地居民饮用水和灌溉用水的重要来源^[22]。此外,石家庄作为河北省的省会城市,是全国最大的医药工业基地和重要的纺织基地之一;同时其也是中国北方绿色农业基地之一,全市总耕地面积达 $5.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$,大量工业废水和化肥农药中的重金属经多种途径进入到地下水中,加剧了石家庄地下水环境中的重金属污染。目前石家庄地下水的研究主要集中于其地下水环境质量评价^[23]、典型污染物分布特征^[24~26]和水文特征等^[27,28],而关于地下水中重金属的来源解析及其健康风险评估的研究仍相对有限。鉴于此,本文选取华北平原典型城市——石家庄市地下水为研究对象,筛选了20个采样点,对地下水中10种重金属进行来源解析和特定来源健康风险评估,以期对地下水重金属污染及其风险管控提供数据支撑和科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石家庄地处中国河北省中南部($113^\circ 30' \sim$

$115^\circ 20' \text{E}$, $37^\circ 27' \sim 38^\circ 47' \text{N}$),总面积 1.35 万 km^2 。市域跨太行山地和华北平原两大地貌单元,地势西北高东南低。研究区属温带季风气候,年均降水量为 $401.10 \sim 752.00 \text{ mm}$,夏秋季节降水丰富,占全年降水量的 $63\% \sim 70\%$ ^[28,29]。研究区地层以河流冲洪积作用形成的第四系沉积地层为主,岩性以亚砂土、含砂亚黏土、亚黏土和卵砾石为主。依据研究区地下水埋藏特征和水力特性将其划分为3类含水岩组:第一类为松散岩类孔隙水含水岩组,主要由第四系松散沉积物组成,分布于滹沱河、磁河和槐河等冲洪积扇;第二类为碳酸盐岩类岩溶水含水岩组,主要分布在井陉县和矿区,富水性强;第三类为基岩类裂隙水含水岩组,主要分布于灵寿县西北部和西北部山区^[28,30]。研究区内工农业发达,农业以种植业为主,拥有优质玉米、小麦、棉花等主要农作物,农业集约化和产业化水平较高,有“北方粮仓”之称。工业体系以制药、纺织、化工、冶金、建材和食品等为支柱产业。

1.2 样品采集与测试

2020年9月在石家庄市采集了20份地下水样品(图1),就采样点空间方位而言,S2、S5、S6、S9和S11为石家庄北部,S3、S4、S8、S15、S16和S20为中部,S1、S18和S19为南部,S7、S10、S12、S13、S14和S17为东部。采样深度为 $10 \sim 300 \text{ m}$,水样均取自于机井、民井和灌溉井。用QED(Sample ProTM采样泵)采样仪器采集水样,将样品收集到洁净的低密度聚乙烯容器(500 mL)中,然后加入1:1硝酸将样品酸化至 $\text{pH} < 2$,用冰盒运回实验室,并在 4°C 下保存,直至实验分析。现场使用便携式水质分析仪(HYDROLAB,DS5X)原位测定样品的水温、pH、电导率和溶解氧等基本理化指标,并记录数据。铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、汞(Hg)、砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)和铝(Al)采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, PerkinElmer Ltd., Waltham, MA, USA)测量^[31]。重复方法空白、加标空白和加标样品为本实验质量控制方法。所有目标重金属的平均回收率范围为 $86.9\% \sim 102.8\%$ 。被测物质的相对标准偏差维持在 $< 15\%$ 。

1.3 污染评价

采用单因子污染指数(P_i)和内梅罗指数(N_i)综合评价地下水中重金属污染水平^[4]。公式如下:

$$P_i = c_i/S_i \quad (1)$$

$$N_i = \sqrt{[(c_i/S_i)_{\text{mean}}^2 + (c_i/S_i)_{\text{max}}^2]}/2 \quad (2)$$

式中, i 为不同重金属, c_i 为地下水中重金属实测浓度, S_i 为地下水质量标准(GB/T 14848-2017)的

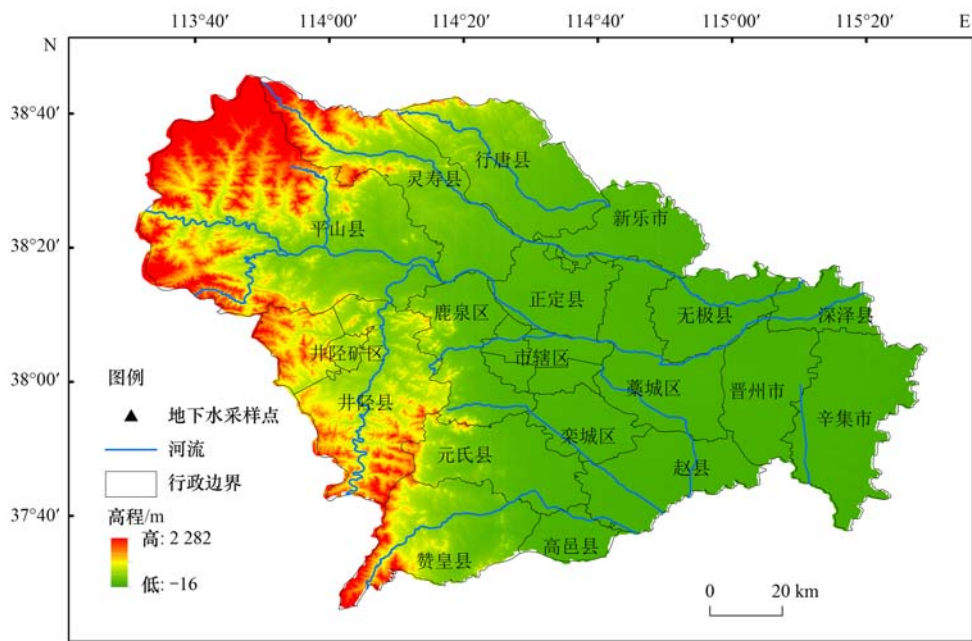


图 1 石家庄地下水采样点布设示意
Fig. 1 Groundwater sampling sites in Shijiazhuang

Ⅲ类浓度阈值. P_i 和 N_i 的分类如表 1^[32,33].

表 1 污染水平评价标准

Table 1 Pollution level evaluation criteria

P_i	污染水平	N_i	污染水平
$P_i \leq 1$	清洁	$N_i < 1$	清洁
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	$1 \leq N_i < 2.5$	轻度污染
$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$2.5 \leq N_i < 7$	中度污染
$P_i > 3$	重度污染	$N_i \geq 7$	重度污染

1.4 污染来源贡献比例

APCS-MLR 模型常用于量化地下水中重金属污染物的来源分配. 模型以绝对主成分因子得分作为自变量, 重金属浓度作为多线性回归的因变量^[21,34], 回归系数用于计算每个污染源的贡献.

首先, 根据以下方程将重金属浓度标准化:

$$X_{ij} = (c_{ij} - \bar{c}) / \sigma_j \quad (3)$$

式中, X_{ij} 为标准化后的浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); c_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种金属的浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); $\bar{c}$ 为第 j 种金属的平均浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); σ_j 为第 j 种金属的标准偏差.

其次, 在原始数据中引入具有 0 的人工样本, 然后按以下方式进行标准化:

$$(X_0)_i = \frac{0 - \bar{c}_i}{\sigma_i} = -\frac{\bar{c}_i}{\sigma_i} \quad (4)$$

最后, 通过从原始数据的因子得分中减去人工样本的因子得分来获得绝对主成分因子得分后进行线性回归, 根据公式计算源贡献:

$$c_i = b_0 + \sum_{k=1}^m b_k \text{APCS}_k \quad (5)$$

式中, b_0 为第 j 种重金属的恒定回归项, b_k 为第 m 种来源的第 j 种重金属的回归系数, m 为因素数量, APCS_k 为 m 来源的调整后分数, $b_k \text{APCS}_k$ 为 m 来源对地下水重金属浓度的平均贡献. 本研究中 APCS-MLR 模型计算由 IBM SPSS Statistical 24 进行.

地下水中每个样点的特定来源的重金属浓度贡献计算如下:

$$c_{ij}^k = c_{ij}^{k*} \times c_i \quad (6)$$

式中, c_{ij}^k 为第 i 个样品中第 k 个来源的第 j 种重金属的浓度贡献 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); c_{ij}^{k*} 为第 i 个样品中第 k 个来源的第 j 种重金属的计算贡献 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$).

1.5 健康风险评估

结合健康风险评估模型 (HRA) 与 APCS-MLR 模型来计算儿童 (6 岁以下) 和成人 (18 岁以上) 的健康风险^[35,36]. 通过饮用 ($\text{CDI}_{ij}^k \text{oral}$) 和皮肤接触 ($\text{CDI}_{ij}^k \text{derm}$) 途径计算第 i 个采样点的第 k 个来源中的第 j 种重金属的慢性每日摄入量 (CDI), 公式如下^[37]:

$$\text{CDI}_{ij}^k \text{oral} = \frac{c_{ij}^k \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (7)$$

$$\text{CDI}_{ij}^k \text{derm} = \frac{c_{ij}^k \times \text{SA} \times \text{PC} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (8)$$

式中参数取值见表 2 和表 3^[38].

非致癌风险 ($\text{HQ}_{ij,r}^k$) 是第 i 个样品中第 j 种重金属的第 k 个来源在第 r 条暴露途径上的危害商, 累积致癌风险 (HI) 表示非癌症风险的总和, 公式如下:

$$HI = \sum HQ_{ij,r}^k = \frac{CDI_{ij,oral}^k}{RFD_{oral}} + \frac{CDI_{ij,derm}^k}{RFD_{derm}} \quad (9)$$

式中, $RFD_{oral/derm}$ 为饮用/皮肤接触途径的暴露参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]. 各重金属的 RFD 值见表 3^[39]. 根据 USEPA 分级, $HI < 1$ 表示非致癌风险较低; $HI > 1$ 表示存在潜在不利影响.

致癌风险 ($CR_{ij,r}^k$) 是第 i 个样品中第 j 种重金属的第 k 个来源在第 r 条暴露途径上的危害商^[40]. 公式如下:

$$CR = \sum CR_{ij,r}^k = \frac{CDI_{ij,oral}^k}{CSF_{oral}} + \frac{CDI_{ij,derm}^k}{CSF_{derm}} \quad (10)$$

式中, $CSF_{oral/derm}$ 为饮用/皮肤接触途径的致癌斜率因子 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]. 根据国际癌症研究机构将所检测的 Cr、Cd 和 As 视为潜在致癌污染物. As、Cr 和 Cd 的 CSF_{oral} 值分别为 1.50、0.50 和 6.10, CSF_{derm} 值分别为 3.66、0.50、0.38^[41,42]. 根据 USEPA 分级, $CR < 1.0 \times 10^{-6}$ 表示无致癌风险或致癌风险很小; $CR > 1 \times 10^{-4}$ 表示可能具有潜在致癌风险.

表 2 健康风险评价模型相关参数
Table 2 Related parameters of health risk assessment model

参数	含义	参考值		单位	文献
		成人	儿童		
IR	每日摄入率	1.7	1.14	$\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$	[43,44]
EF	暴露频率	350	350	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	[43,44]
ED	暴露持续时间	30	9	a	[43,44]
BW	平均体重	57	24	kg	[43,44]
AT	平均暴露时间	25 500	25 500	d	[43,44]
SA	皮肤的暴露面积	16 000	9 300	cm^2	[43,44]
ET	暴露频率	0.633 3	0.416 7	$\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$	[43,44]
CF	体积转换因子	0.001	0.001	$\text{L} \cdot \text{cm}^{-3}$	[45]

1.6 数据统计与分析

使用 IBM SPSS Statistical 24 对采样数据进行描述性统计分析. 使用 ArcMap 10.6 软件绘制各重金属浓度空间分布. 采用 Spearman 相关系数法度量各重金属之间的相关性(显著性水平分别为 $P < 0.05$

和 $P < 0.01$), 并使用 Origin 2019 软件绘制相关性图.

表 3 健康风险评价模型皮肤渗透系数(PC)和
日均摄入参考剂量(RFD)值

Table 3 PC and RFD values for health risk models

重金属	PC $\times 10^{-3}$ $/\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	RFD/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	
		饮用途径	皮肤接触途径
Fe	0.1	0.300	0.045
Mn	0.1	0.046	0.001 8
Cu	0.6	0.040	0.012
Zn	0.6	0.30	0.01
Hg	1.8	0.000 3	0.001 3
As	1.8	0.000 3	0.000 1
Cd	1	0.000 5	0.000 5
Cr	2	0.003	0.003
Pb	0.004	0.001 4	0.001 4
Al	10	0.14	0.14

2 结果与分析

2.1 地下水重金属污染特征

就各重金属浓度均值而言, 呈 $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Al} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$ 的趋势(表 4), 其中 $\rho(\text{Fe})$ 和 $\rho(\text{Pb})$ 均值分别为 $260.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.01 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 除 Pb 浓度均值较高外, 其余重金属浓度均值均低于国家地下水质量标准 III 类限值(GB/T 14848-2017). 就偏度而言, 呈 $\text{Zn} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Al} > \text{Hg}$ 的趋势, 其中 Zn 和 Mn 可能受人为活动影响较大使其浓度产生较大偏度. 研究区大部分重金属呈现较高的空间变异性($\text{CV} > 100\%$), 尤其是 Zn(222%)、Fe(152%)、Mn(144%) 和 Pb(111%), 表明不同采样点重金属浓度相差较大, 可能存在点源污染^[46].

石家庄地下水中重金属浓度均值为 $407.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 范围为 $47.30(\text{S9}) \sim 2\,560 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}(\text{S3})$ [图 2(a)]. 就采样点而言, 污染浓度贡献率最大的采样点分别是 S3、S8 和 S20. 就各重金属浓度占比而言 [图 2(b)], Fe 浓度最高, 占重金属总浓度的 63.78%; 其次为 Zn 和 Mn, 分别占重金属总浓度的 20.92% 和 6.26%.

表 4 石家庄地下水重金属浓度分析统计

Table 4 Analysis of heavy metal concentrations in Shijiazhaung

项目	Fe	Mn	Cu	Zn	Hg	As	Cd	Cr	Pb	Al
平均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	260.2	25.58	11.09	85.50	0.04	0.93	0.89	2.06	10.01	10.42
最大值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	1 600	150.0	42.00	803.0	0.10	2.00	2.10	5.20	39.50	24.00
最小值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	20.00	3.60	0.80	3.00	0.00	0.35	0.20	0.20	1.00	0.58
标准差/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	397.1	36.73	9.75	190.0	0.03	0.43	0.53	1.36	11.07	5.64
变异系数	1.52	1.44	0.88	2.22	0.69	0.46	0.59	0.66	1.11	0.54
峰度	5.53	5.88	4.22	10.61	-0.88	1.31	1.57	0.34	2.42	0.59
偏度	2.30	2.41	1.94	3.25	0.08	1.32	1.55	1.10	1.67	0.57
国家 III 类标准/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	300.0	100.0	1 000	1 000	1.00	10.00	5.00	50.00	10.00	200.0

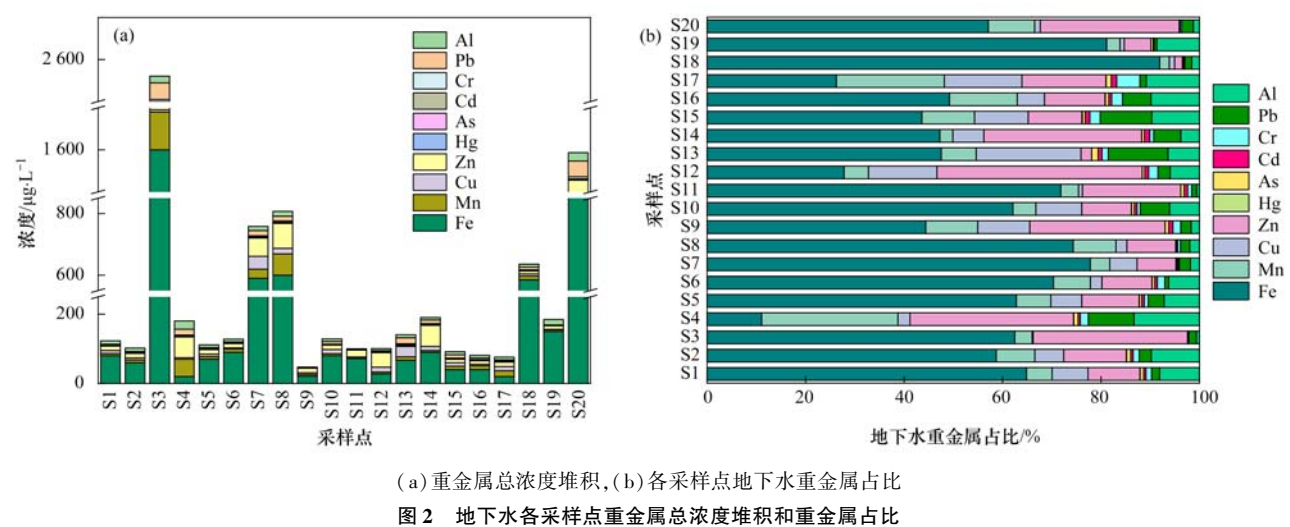


Fig. 2 Accumulation and proportion of heavy metals in each groundwater sampling site

石家庄地下水中的 Mn 和 Cr 浓度显著低于雷州半岛、会仙岩溶湿地和大同盆地^[47~49],但较关中平原高^[50],这可能与地层岩性等地质背景有关(表 5)。例如,雷州半岛以玄武岩为主的第四纪火山岩分布广泛,而玄武岩作为高地质背景的基性火山岩,含有高浓度的重金属元素,因此其 Mn 和 Cr 的浓度远高于其他地区。石家庄地下水中 Cu 和 Cd 的浓度均略低于雷州半岛,但远高于关中平原和大同盆地等,Zn 和 Pb 浓度则远高于其他区域。

这可能是因为石家庄作为中国北方农业基地之一,全市总耕地面积大($5.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$),化肥农药消耗量大,仅 2019 年就高达 130.6 万 t^[51]。此外,由于过度开采地下水导致石家庄第 I 含水层已基本疏干,再生水成为农业灌溉中最主要的水源,然而长期的再生水回灌造成土壤中重金属浓度增高,进而在大气降雨的淋滤作用下加剧了浅层地下水的重金属污染。总体而言,不同地区地下水中重金属的浓度差异很大。

表 5 不同区域地下水重金属浓度均值¹⁾

研究区域	浓度均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$										文献
	Fe	Mn	Cu	Zn	Hg	As	Cd	Cr	Pb	Al	
石家庄	260.2	25.58	11.09	85.50	0.04	0.93	0.89	2.06	10.01	10.42	本研究
雷州半岛	—	93.25	18.21	1.59	0.03	—	1.04	5.50	2.24	—	[47]
会仙岩溶湿地	—	62.18	0.57	3.18	0.65	1.32	—	2.36	0.27	65.32	[48]
关中平原	27.38	1.21	0.15	3.60	—	1.20	0.04	21.27	0.30	2.46	[50]
大同盆地	103.9	59.47	1.87	—	—	50.13	—	5.26	0.21	—	[49]

1) “—”表示未检测

2.2 重金属浓度空间分布特征

研究区地下水各重金属浓度的空间分布如图 3,重金属浓度均值总体呈中部($885.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 东部($314.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 南部($232.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 北部($97.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)的规律。重金属 Cd、Cr、Cu、As 和 Pb 的空间分布特征相似,中部和东部区域浓度较高,Mn 和 Zn 的高浓度主要分布在中部地区,Fe、Hg 和 Al 的高浓度集中于中部和南部。

不同重金属的空间分布规律总体一致,主要分布于中部和东部(主要包括 S3、S4、S7、S13、S14 和 S20 样点)。其中,中部(S3、S4 和 S20)距离城区较近,人口密度较大,市内工业发达,周边大型制药厂、纺织厂、化肥厂和污水处理厂等较多,大量工业废水和生活污水排入附近地表河流,加之石家庄

平原区的地下水和地表水转换频繁,促使地下水中重金属浓度升高,进而加剧地下水中重金属污染。而东部地区(S7、S13 和 S14)是平原农牧果集约农业区,农业活动相对发达,对地下水资源的开发利用程度较大,连续大量抽取地下水导致水位下降,从而改变了原有地下水动力条件,引起地面污水向地下水倒灌,使得地下水污染程度不断加重。

2.3 地下水重金属污染评价

石家庄地下水中重金属的单因子污染指数 P_i 值在 0.00 ~ 3.95 之间(图 4),平均值为 0.25。根据 P_i 值排序标准,轻、中和重度重金属污染的点位个数分别为 6、1 和 2 个。重度污染主要位于 S3 和 S20 样点,Pb、Fe、Cd 元素是地下水污染的主要贡献者。内梅罗指数 N_i 值范围为 0.01 ~ 3.82,平均值为

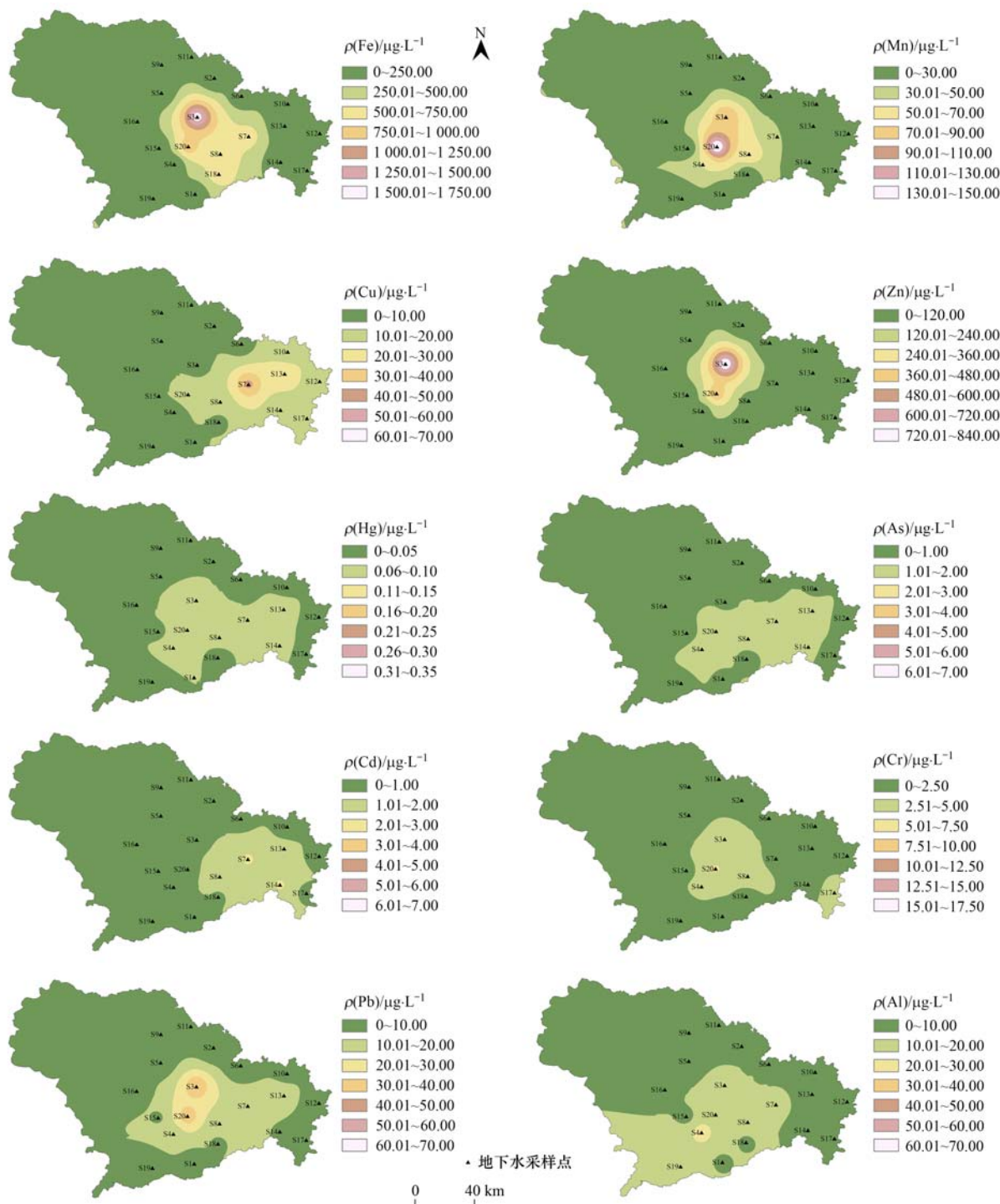


图3 地下水中各重金属浓度的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of heavy metal concentrations in groundwater

0.89. N_i 值大小排序为: $Fe > Pb > Mn > Zn > Cd > Al > Cr > Hg > Cu > As$. 其中 Fe 和 Pb 的 N_i 值分别是 3.82 和 2.88, 为中度污染; 而 Mn 为轻度污染 ($N_i = 1.07$). 其余重金属 N_i 值都小于 1, 处于清洁水平, 占总数的 70%. 总体而言, 石家庄市多数地区地下水水质良好.

2.4 健康风险评价

根据 APCS-MLR 模型中提取的每种来源的贡献率, 进一步计算了特定来源的健康风险(表 6). 对

于非致癌风险, 儿童和成人的 HI 值变化规律一致, 其大小顺序为: $As > Cd > Fe > Pb > Cr > Mn > Zn > Cu > Hg > Al$. 非致癌风险值均为成人 $>$ 儿童, 且工农业活动造成的非致癌风险最高. 除工农业活动来源($PC1$)的重金属对成人造成潜在威胁 ($HI > 1$) 外, 其余来源的重金属对成人和儿童造成的 HI 值均小于 1, 其非致癌风险均处于可接受水平. 对于致癌风险, $PC1$ 来源的重金属对成人和儿童造成的致癌风险值均高于 USEPA 推荐的最大可接受风险水平

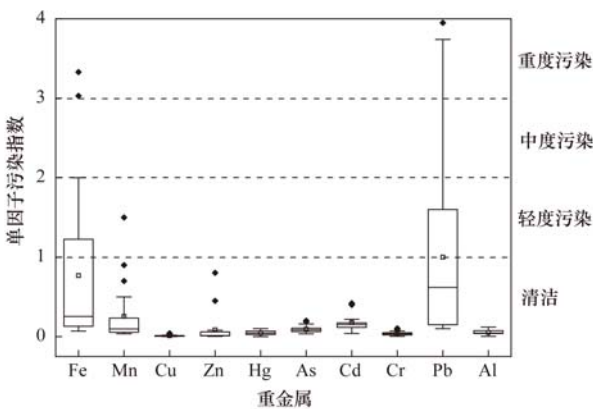


图 4 地下水重金属单因子污染指数

Fig. 4 Single factor contamination index for heavy metals in groundwater

1×10^{-4} ,表明存在潜在致癌风险,且成年人的 CR 值均高于儿童,这与之前 Imran 等^[52]研究的结果一致.成人和儿童的致癌风险平均值变化规律一致($Cd > As > Cr$),其中 Cd 和 As 是引起致癌健康风险的主要因子,因此应重视研究区地下水中的 Cd 和 As 污染,采取相关治理措施.

此外,发现成人和儿童这 3 种来源的非致癌和致癌风险占比相似(图 5).工农业活动是非致癌风险(成人:52.46%,儿童:52.45%)和致癌风险(成人:65.22%,儿童:65.69%)的主要贡献者,这可能是因为工农业活动包含高毒性的 As 和 Cd,与其他重金属相比,As 和 Cd 的高 CSF 和低 RFD 往往会带来更高的健康风险^[53,54].因此,为了更好地保护人

表 6 成人和儿童的地下水重金属特定来源健康风险

Table 6 Groundwater heavy metal specific sources of health risks in adults and children

项目	重金属	成人			儿童		
		PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
非致癌物风险	Fe	4.73×10^{-2}	1.47×10^{-1}	1.94×10^{-2}	2.25×10^{-2}	7.03×10^{-2}	9.25×10^{-3}
	Mn	3.86×10^{-2}	9.38×10^{-2}	6.31×10^{-3}	1.83×10^{-2}	4.45×10^{-2}	2.99×10^{-3}
	Cu	4.61×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.27×10^{-2}	2.19×10^{-2}	4.77×10^{-3}	6.05×10^{-3}
	Zn	1.74×10^{-2}	1.56×10^{-2}	4.46×10^{-2}	7.95×10^{-3}	7.14×10^{-3}	2.04×10^{-2}
	Hg	3.12×10^{-2}	2.18×10^{-3}	2.67×10^{-3}	1.49×10^{-2}	1.04×10^{-3}	1.27×10^{-3}
	Pb	5.33×10^{-2}	2.79×10^{-2}	9.43×10^{-2}	2.55×10^{-2}	1.33×10^{-2}	4.51×10^{-2}
	Al	1.26×10^{-2}	1.41×10^{-3}	5.32×10^{-3}	5.89×10^{-3}	6.58×10^{-4}	2.47×10^{-3}
	As	5.03×10^{-1}	2.27×10^{-3}	2.77×10^{-1}	2.37×10^{-1}	1.07×10^{-3}	1.31×10^{-1}
	Cd	3.36×10^{-1}	9.61×10^{-2}	6.49×10^{-3}	1.60×10^{-1}	4.58×10^{-2}	3.09×10^{-3}
	Cr	2.69×10^{-2}	1.18×10^{-1}	2.52×10^{-2}	1.28×10^{-2}	5.62×10^{-2}	1.19×10^{-2}
致癌物风险	HI	1.11	5.15×10^{-1}	4.94×10^{-1}	5.27×10^{-1}	2.45×10^{-1}	2.33×10^{-1}
	As	9.81×10^{-5}	4.42×10^{-7}	5.39×10^{-5}	4.68×10^{-5}	2.11×10^{-7}	2.57×10^{-5}
	Cd	3.36×10^{-4}	9.61×10^{-5}	6.49×10^{-6}	1.60×10^{-4}	4.58×10^{-5}	3.09×10^{-6}
	Cr	1.56×10^{-5}	6.85×10^{-5}	1.46×10^{-5}	6.94×10^{-6}	3.05×10^{-5}	6.48×10^{-6}
合计		4.49×10^{-4}	1.65×10^{-4}	7.50×10^{-5}	2.13×10^{-4}	7.64×10^{-5}	3.52×10^{-5}

类健康,应优先预防和控制工农业活动重金属的排放量.

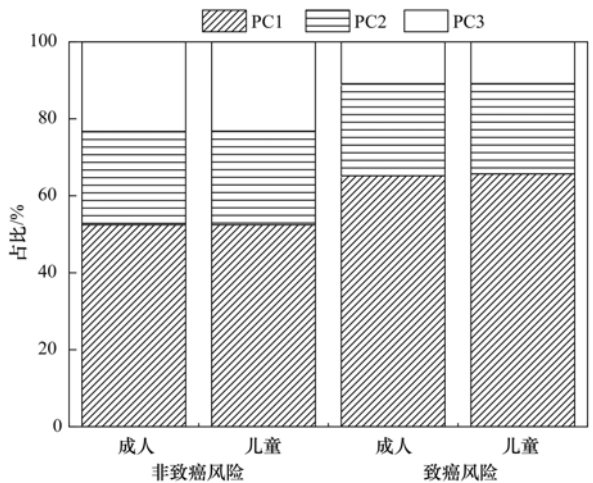


图 5 成人和儿童不同来源的健康风险占比

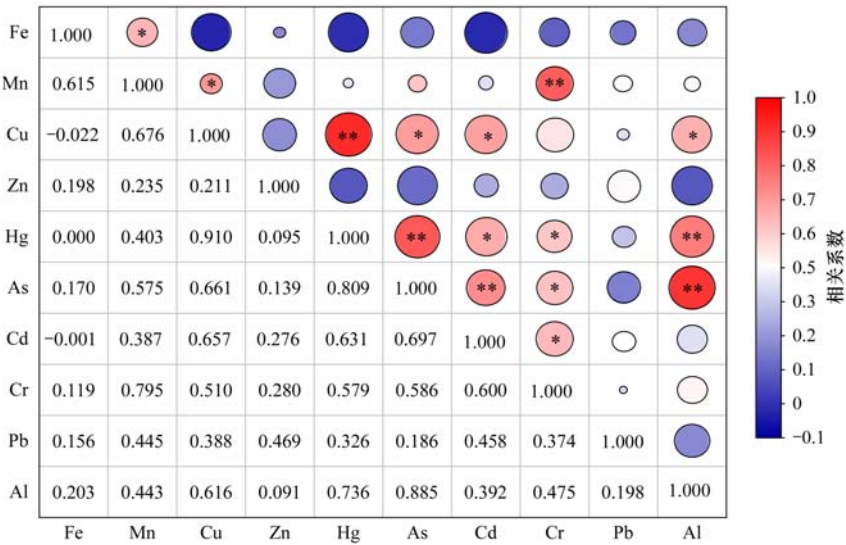
Fig. 5 Proportion of health risks of specific sources in adults and children

3 讨论

3.1 地下水中重金属污染来源解析

采用 Spearman 对石家庄地下水中重金属进行了相关性分析(图 6).结果表明,重金属 Hg-Al、Hg-Cu、As-Hg、Cr-Mn、Al-As 和 Cd-As 之间的相关系数分别为 0.736、0.910、0.809、0.795、0.885 和 0.697,表明两两之间呈显著正相关($P < 0.01$),它们可能具有共同的物质来源和相似的水文地球化学行为^[55].而 Zn 和 Pb 与其他金属元素之间无明显相关性,表明这些金属元素的物质来源或迁移转化途径存在较大差异.

利用主成分分析提取方法,对重金属样本数据进行巴特利特球形度和 KMO(Kaiser Meyer Olkin)检验,得到 Bartlett 值和 KMO 分别为 0.000($P < 0.001$)和 0.683,表明重金属数据可以进行因子分析^[56].基于特征值大于 1,共提取 3 种主成分因子,



** 表示相关系数在 0.01 水平上显著, * 表示相关系数在 0.05 水平上显著

图 6 地下水中重金属元素 Spearman 相关性

Fig. 6 Spearman correlation of heavy metal elements in groundwater

累计可解释 88.93% 的方差. PC1 约占总方差的 58.38%, 在 Cu(0.956)、Hg(0.842)、As(0.815)、Cd(0.856)和 Al(0.836)上表现出强正载荷. PC2 解释了总方差的 15.73%, 在 Fe(0.891)、Mn(0.727)和 Cr(0.683)上表现较强的正载荷. PC3 贡献了总方差的 14.82%, Zn(0.944)和 Pb(0.920)为主要的载荷元素(图 7).

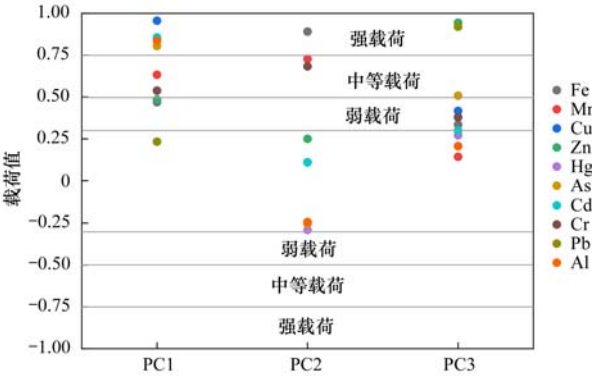


图 7 地下水中重金属元素旋转因子载荷

Fig. 7 Rotating the factors of heavy metals in groundwater

为了更好地揭示地下水中重金属的相关性和量化来源,运用 APCS-MLR 模型(表 7). 结果表明,已知源 PC1 以 Cu、Hg、As、Cd 和 Al 为主,高负载量分别为 66.95%、86.56%、64.32%、76.64% 和 65.29%. Spearman 相关性也显示 Cu、Hg、As、Cd 和 Al 两两之间显著正相关(图 6). 有研究表明,As、Cu 和 Cd 常被认为是农业活动的关键指标,其被广泛用作化肥、农药、杀虫剂和除草剂的添加剂^[57,58]. 石家庄东部的 As、Cu 和 Cd 浓度较高,这主要是因为东部是农牧果集约农业区,该地区具有较高的农药化肥施用率. 据悉,2019 年研究区内化

肥和农药消费量分别达 128.1 万 t 和 2.54 万 t^[51]. 此外,有色金属冶炼加工、合金加工等工业废物排放可能导致 As 和 Cu 进入地下水系统^[53],这与前文中 As 和 Cu 较高浓度集中于中部(S4 和 S20 样点)相一致,这些样点距离城区较近. 石家庄市地下水中 Hg 浓度较低,且 Hg 与 As 和 Cu 的相关性显著,因此推断其来源相同. Al 主要受到未经处理的工业废水的影响^[21],并结合 Al 的空间分布特征,其在中部地区浓度较高,这些区域为人口聚集区,存在大量工业废水与生活污水排放^[59]. 因此,PC1 可视为工农业活动因子.

APCS-MLR 模型中 PC2 的权重主要是 Cr (69.41%),其次是 Fe (68.86%) 和 Mn (67.62%). Fe 元素主要来源于土壤母质(即自然因素)和农业活动^[60],Cr 和 Mn 主要受地质背景的控制^[61]. 石家庄平原区第四系沉积层黏土、亚黏土中普遍含铁锰结核,地层中的硫化物、硅酸盐以及高锰酸盐等是区内浅层地下水中 Fe 和 Mn 聚集的物源基础^[62]. Cr 的来源可归因于侵入性岩石风化、交通和制革废水等^[63],Cr 天然存在于岩石、植物、土壤以及火山灰中,它强烈地粘附在土壤颗粒上,从土壤到地下水的流动性有限^[64]. 而石家庄市地下水中 Cr 浓度较低,除 S20 样点外,其余样点均在国家地下水质量标准 I 类标准范围内,因此推断其为地质源. 鉴于此,可认为 PC2 是地质背景因子.

PC3 以 Zn 和 Pb 为主,高负载率分别为 57.48% 和 53.76%,有研究表明,Zn 的主要来源有汽车尾气、畜禽粪便和农药等,Pb 是交通源的标志性元素,主要来源有汽车尾气、塑料薄膜和磷肥

等^[65,66]. Zn 和 Pb 高浓度集中于研究区的中部,中部人口多、交通量大,刹车、轮胎和润滑油中都含有 Pb 和 Zn^[67],推断汽车尾气排放和生活污水导致该地 Zn 和 Pb 浓度高于其它采样点. 因此,PC3 可视为交通排放因子.

综上所述,工农业活动、地质背景和交通排放是石家庄市地下水中重金属积累的 3 个主要源. 其中工农业活动对重金属积累的贡献率最大(47.83%),其次是地质背景(29.19%),最后是交通排放(22.98%).

表 7 APCS-MLR 模型中每种重金属元素贡献率/%

Table 7 Proportion of each heavy metal element in the APCS-MLR model/%

重金属	APCS-MLR		
	已知源 PC1	已知源 PC2	已知源 PC3
Fe	22.08	68.86	9.06
Mn	27.83	67.62	4.55
Cu	66.95	14.58	18.47
Zn	22.41	20.11	57.48
Hg	86.56	6.05	7.39
As	64.32	0.29	35.38
Cd	76.64	21.89	1.48
Cr	15.83	69.41	14.77
Pb	30.35	15.89	53.76
Al	65.29	7.28	27.44

表 8 不同区域地下水重金属污染源

Table 8 Pollution sources of heavy metals in groundwater in different regions

研究区域	来源/个	主要源及贡献率	来源解析方法	文献
石家庄	3	工农业活动(47.83%)、地质背景(29.19%)和交通排放(22.98%)	APCS-MLR	本研究
西北张掖盆地	5	浸出-富集系数(35.51%)、初级地质-农业活动(23.87%)、煤炭相关工业污染(13.02%)、工业污染(15.04%)和工农业活动(12.56%)	APCS-MLR	[21]
安徽淮北市	3	采矿活动(39.29%)、自然来源(21.34%)和农业活动(15.42%)	因子分析	[11]
江苏沿海地区	4	工业污染(34.69%)、海水入侵(27.56%)、矿物溶解(8.82%)、矿石风化和溶解(7.97%)	因子分析	[69]
印度巴斯塔尔	3	自然来源(38.56%)、地质来源(36.56%)和农业来源(34.69%)	PMF	[71]

4 结论

(1)石家庄地下水中 Fe、Mn 和 Pb 有明显的积累,地下水的污染程度整体相对较低.

(2)石家庄地下水中重金属浓度空间分布具有显著差异,总体呈现中部 > 东部 > 南部 > 北部的空间分布规律.

(3)石家庄地下水重金属的主要来源为工农业活动、交通排放和地质背景,其中工农业活动对重金属积累的贡献率最大(47.83%).

(4)工农业活动是非致癌和致癌风险的主要贡献者,其中 Cd 和 As 的致癌健康风险较高.

3.2 不同地区地下水中 重金属污染源

不同区域地下水中重金属主要来源存在显著差异(表 8). 石家庄地下水中的重金属污染源表现为复合特征^[68],且主要源为工农业活动. 据调查,石家庄有 100 多处潜在工业污染源,工业废水排放量约 $1.42 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$; 此外,还有长期农田污灌历史,污灌影响依然存在. 而西北张掖盆地地下水中重金属的主要源为原始地质与人类活动(35.51%),这可能与张掖盆地区域沉积岩和变质岩分布广泛有关. 该区域蕴藏丰富的铁矿、铜矿和镍矿等矿产资源,这些矿物通过风化淋滤进入地下水导致重金属富集;而人类活动进一步加剧了地下水的重金属污染^[21]. 安徽淮北市地下水中重金属主要来源为采矿和农业活动(39.29%),其作为我国重要的煤炭基地之一,拥有 3 座大型地下矿山以及大量焦化厂、燃煤电厂和选煤厂等大型工厂;加之农业活动施用的大量化肥通过淋滤作用加剧了地下水重金属污染^[11]. 江苏沿海地区地下水中重金属的主要来源则为工业污染(34.69%),其作为中国东部沿海地区的典型区域,人口密集,社会发展程度高^[69]. 在巴斯塔尔地区,自然源是其重金属主要来源(38.56%)^[70],该区是印度矿产丰富区,分布着大量片麻岩、花岗岩和镁铁质等火成岩,以及含有高锰和高铁的岩脉^[71].

参考文献:

- [1] Teng Y G, Zuo R, Xiong Y N, *et al.* Risk assessment framework for nitrate contamination in groundwater for regional management [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134102.
- [2] Latchmore T, Hynds P, Brown R S, *et al.* Analysis of a large spatiotemporal groundwater quality dataset, Ontario 2010-2017: informing human health risk assessment and testing guidance for private drinking water wells [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140382.
- [3] Lu J, Wu J, Zhang C, *et al.* Possible effect of submarine groundwater discharge on the pollution of coastal water: occurrence, source, and risks of endocrine disrupting chemicals in coastal groundwater and adjacent seawater influenced by reclaimed water irrigation [J]. *Chemosphere*, 2020, **250**, doi:

- 10.1016/j.chemosphere.2020.126323.
- [4] Wen X H, Lu J, Wu J, *et al.* Influence of coastal groundwater salinization on the distribution and risks of heavy metals [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **652**: 267-277.
- [5] Wang Z Y, Gao Z J, Wang S, *et al.* Hydrochemistry characters and hydrochemical processes under the impact of anthropogenic activity in the Yiyuan city, Northern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, **80** (2), doi: 10.1007/S12665-020-09361-0.
- [6] Lu J, Lin Y C, Wu J, *et al.* Continental-scale spatial distribution, sources, and health risks of heavy metals in seafood: challenge for the water-food-energy nexus sustainability in coastal regions? [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28** (45): 63815-63828.
- [7] Wu H H, Xu C B, Wang J H, *et al.* Health risk assessment based on source identification of heavy metals: a case study of Beiyun River, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **213**, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.112046.
- [8] Manoj S, Ramyapriya R, Elango L. Long-term exposure to chromium contaminated waters and the associated human health risk in a highly contaminated industrialised region [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28** (4): 4276-4288.
- [9] Watanabe Y, Nogawa K, Nishijo M, *et al.* Relationship between cancer mortality and environmental cadmium exposure in the general Japanese population in cadmium non-polluted areas [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2020, **223** (1): 65-70.
- [10] Luo M H, Zhang Y, Li H L, *et al.* Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: the role of groundwater discharge [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **807**, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.151070.
- [11] Jiang C L, Zhao Q, Zheng L G, *et al.* Distribution, source and health risk assessment based on the Monte Carlo method of heavy metals in shallow groundwater in an area affected by mining activities, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **224**, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.112679.
- [12] Duan X C, Yu H H, Ye T R, *et al.* Geostatistical mapping and quantitative source apportionment of potentially toxic elements in top- and sub-soils: a case of suburban area in Beijing, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **112**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106085.
- [13] Qu S Y, Wu W H, Nel W, *et al.* The behavior of metals/metalloids during natural weathering: a systematic study of the mono-lithological watersheds in the upper Pearl River Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134572.
- [14] Yu H C, Chen F, Ma J, *et al.* Comparative evaluation of groundwater, wastewater and canal water for irrigation on toxic metal accumulation in soil and vegetable: pollution load and health risk assessment [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, **264**, doi: 10.1016/J.AGWAT.2022.107515.
- [15] 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.
- [16] 刘昭, 周宏, 刘伟, 等. 清江流域地下水重金属含量特征及健康风险初步评价 [J]. *环境工程*, 2021, **39** (5): 196-203.
- Liu Z, Zhou H, Liu W, *et al.* Heavy metal concentration properties analysis and primary health risk assessment in groundwater in the Qingjiang river [J]. *Environmental Engineering*, 2021, **39** (5): 196-203.
- [17] Lu J, Wu J, Wang J H. Metagenomic analysis on resistance genes in water and microplastics from a mariculture system [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2022, **16** (1), doi: 10.1007/S11783-021-1438-Y.
- [18] Jafarabadi A R, Bakhtiyari A R, Toosi A S, *et al.* Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments and coastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian gulf, Iran [J]. *Chemosphere*, 2017, **185**: 1090-1111.
- [19] 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.
- [20] 王晓东, 田伟, 张雪艳. 宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2022, **43** (1): 329-338.
- Wang X D, Tian W, Zhang X Y. Distribution characteristics and health risk assessment of metal elements for groundwater in the Ningxia region of China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (1): 329-338.
- [21] Sheng D R, Meng X H, Wen X H, *et al.* Contamination characteristics, source identification, and source-specific health risks of heavy metal (loid)s in groundwater of an arid oasis region in Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **841**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156733.
- [22] 孙菊秋. 石家庄地下水资源动态变化及农业灌溉优化 [J]. *水利规划与设计*, 2018, (8): 33-34, 74.
- [23] 毕海超, 赵俊梅, 李彬, 等. 石家庄市地下水质量综合评价分析 [A]. 见: 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集 (三) [C]. 北京: 工业建筑杂志社有限公司, 2021. 54-56.
- [24] 孟红然. 石家庄滹沱河冲洪积扇中部浅层地下水硝酸盐变化特征及趋势 [D]. 石家庄: 河北地质大学, 2019.
- Meng H R. Characteristics and trends of nitrates in shallow groundwater in the middle of the Hutuo river alluvial fan, Shijiazhuang [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2019.
- [25] 张小文, 何江涛, 黄冠星. 石家庄地区浅层地下水铁锰分布特征及影响因素分析 [J]. *地学前缘*, 2021, **28** (4): 206-218.
- Zhang X W, He J T, Huang G X. Iron and manganese in shallow groundwater in Shijiazhuang: distribution characteristics and a cause analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28** (4): 206-218.
- [26] 毕海超, 赵俊梅, 李凡, 等. 石家庄地下水有机污染特征及检测研究 [A]. 见: 《环境工程》2018 年全国学术年会论文集 (中册) [C]. 北京: 《工业建筑》杂志社, 2018. 28-31.
- [27] 张喆. 石家庄平原区浅层地下水水量—水位双控指标研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- Zhang Z. Study on double control index of shallow groundwater quantity and water level in Shijiazhuang plain area [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [28] 李梦涛. 石家庄平原区地下水动态变化与水均衡研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- Li M T. Study on groundwater dynamic change and water balance in Shijiazhuang Plain [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.
- [29] 于占江, 张尧. 1970-2010 年石家庄地区大气水资源特征 [J]. *河北师范大学学报 (自然科学版)*, 2019, **43** (3): 256-

261.
Yu Z J, Zhang X. The atmospheric water resource characteristics of Shijiazhuang city from 1970 to 2010 [J]. *Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, **43** (3): 256-261.
- [30] 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 等. 近 40 年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. *中国地质*, 2021, **48** (4): 1142-1155.
Yang H F, Cao W G, Zhi C S, *et al.* Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment [J]. *Geology in China*, 2021, **48** (4): 1142-1155.
- [31] Wu J, Lu J, Zhang C, *et al.* Pollution, sources, and risks of heavy metals in coastal waters of China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2020, **26** (8): 2011-2026.
- [32] Chai L, Wang Y H, Wang X, *et al.* Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107507.
- [33] Vu C T, Lin C, Shern C C, *et al.* Contamination, ecological risk and source apportionment of heavy metals in sediments and water of a contaminated river in Taiwan [J]. *Ecological Indicators*, 2017, **82**: 32-42.
- [34] Guo G H, Wang Y T, Zhang D G, *et al.* Source-specific ecological and health risks of potentially toxic elements in agricultural soils in southern Yunnan province and associated uncertainty analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **417**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126144.
- [35] Gu C K, Zhang Y, Peng Y, *et al.* Spatial distribution and health risk assessment of dissolved trace elements in groundwater in southern China[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10** (1), doi: 10.1038/s41598-020-64267-y.
- [36] Mukherjee I, Singh U K, Singh R P, *et al.* Characterization of heavy metal pollution in an anthropogenically and geologically influenced semi-arid region of east India and assessment of ecological and human health risks [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135801.
- [37] Giri S, Singh A K, Mahato M K. Monte Carlo simulation-based probabilistic health risk assessment of metals in groundwater via ingestion pathway in the mining areas of Singhbhum copper belt, India [J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2020, **30** (4): 447-460.
- [38] Habib M A, Islam A R, Bodrud-Doza M, *et al.* Simultaneous appraisals of pathway and probable health risk associated with trace metals contamination in groundwater from barapukuria Coal Basin, Bangladesh [J]. *Chemosphere*, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125183.
- [39] U.S. EPA. Risk-based concentration table [R]. Washington: U.S. EPA, 2000.
- [40] Ukah B U, Egbueri J C, Unigwe C O, *et al.* Extent of heavy metals pollution and health risk assessment of groundwater in a densely populated industrial area, Lagos, Nigeria [J]. *International Journal of Energy and Water Resources*, 2019, **3** (4): 291-303.
- [41] Hossain M, Patra P K. Contamination zoning and health risk assessment of trace elements in groundwater through geostatistical modelling[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **189**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110038.
- [42] U.S. EPA. Risk assessment guidance for superfund Volume I: human health evaluation manual supplemental guidance [R]. Washington, DC: U.S. EPA, 1991.
- [43] 段小丽, 赵秀阁. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
Duan X L, Zhao X G. Highlights of the Chinese exposure factors handbook (Adult) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.
- [44] 段小丽. 中国人群暴露参数手册(儿童卷)概要[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
Duan X L. Highlights of the Chinese exposure factors handbook (children) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.
- [45] U.S. EPA. Exposure factors handbook [R]. EPA/600/P-95/002Fa, Washington, DC: U.S. EPA, 1992.
- [46] 谢浩, 梁永平, 李军, 等. 龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42** (9): 4257-4266.
Xie H, Liang Y P, Li J, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of metal elements in groundwater of Longzici spring area[J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (9): 4257-4266.
- [47] 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 等. 雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42** (9): 4246-4256.
Shi H H, Pan Y J, Zeng M, *et al.* Source analysis and health risk assessment of heavy metals in groundwater of Leizhou peninsula[J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (9): 4246-4256.
- [48] 李军, 邹胜章, 梁永平, 等. 会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41** (11): 4948-4957.
Li J, Zou S Z, Liang Y P, *et al.* Metal distributions and human health risk assessments on waters in the Huixian karst wetland, China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (11): 4948-4957.
- [49] Huq E, Su C L, Fahad S, *et al.* Distribution and hydrogeochemical behavior of arsenic enriched groundwater in the sedimentary aquifer comparison between Datong basin (China) and Kushtia district (Bangladesh) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25** (16): 15830-15843.
- [50] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, *et al.* Distributions of arsenic and other heavy metals, and health risk assessments for groundwater in the Guanzhong plain region of China [J]. *Environmental Research*, 2020, **181**, doi: 10.1016/j.envres.2019.108957.
- [51] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Shijiazhuang Municipal Bureau of Statistics, Shijiazhuang Survey Team of National Bureau of Statistics. Shijiazhuang statistical yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [52] Imran U, Khan M, Jamal R, *et al.* Probabilistic risk assessment of water distribution system in Hyderabad, Pakistan reveals unacceptable health hazards and areas for rehabilitation [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110233.
- [53] Jiang H H, Cai L M, Wen H H, *et al.* An integrated approach to quantifying ecological and human health risks from different sources of soil heavy metals [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **701**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134466.
- [54] U.S. EPA. Integrated risk information system (IRIS) [EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/>, 2008-06-30.
- [55] Jiang H H, Cai L M, Hu G C, *et al.* An integrated exploration

- on health risk assessment quantification of potentially hazardous elements in soils from the perspective of sources [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111489.
- [56] 陈俊华, 章艳红, 沈威, 等. 抚河南昌段重金属空间分布特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(11): 4936-4944.
- Chen J H, Zhang Y H, Shen W, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in Nanchang section of the Fuhe river [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(11): 4936-4944.
- [57] Wang L H, Gao S L, Yin X X, *et al.* Arsenic accumulation, distribution and source analysis of rice in a typical growing area in north China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **167**: 429-434.
- [58] Cai L M, Wang Q S, Wen H H, *et al.* Heavy metals in agricultural soils from a typical township in Guangdong province, China: occurrences and spatial distribution [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **168**: 184-191.
- [59] 单晓杰, 何江涛, 张小文, 等. 基于人为活动影响识别的区域地下水水质演化预测: 以石家庄地区为例[J]. *现代地质*, 2020, **34**(1): 189-198.
- Shan X J, He J T, Zhang X W, *et al.* Prediction of regional groundwater quality evolution affected by human activities: a case study of Shijiazhuang area [J]. *Geoscience*, 2020, **34**(1): 189-198.
- [60] Guan Q Y, Wang F F, Xu C Q, *et al.* Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: a case study in Hexi Corridor, northwest China [J]. *Chemosphere*, 2018, **193**: 189-197.
- [61] Šajin 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.
- [62] 赵红梅, 赵华, 毛洪亮, 等. 华北平原滹沱河冲洪积扇第四纪地层划分[J]. *地层学杂志*, 2014, **38**(2): 137-146.
- Zhao H M, Zhao H, Mao H L, *et al.* Quaternary stratigraphy division of Hutuohe alluvial fan deposits in the North China plain [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2014, **38**(2): 137-146.
- [63] Wagh V M, Panaskar D B, Mukate S V, *et al.* Health risk assessment of heavy metal contamination in groundwater of Kadava river basin, Nashik, India [J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2018, **4**(3): 969-980.
- [64] Alam M, Rais S, Aslam M. Hydrochemical investigation and quality assessment of ground water in rural areas of Delhi, India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **66**(1): 97-110.
- [65] Liu L L, Dong Y C, Kong M, *et al.* Insights into the long-term pollution trends and sources contributions in Lake Taihu, China using multi-statistic analyses models [J]. *Chemosphere*, 2019, **242**, doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125272.
- [66] Wang F F, Guan Q Y, Tian J, *et al.* Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor [J]. *CATENA*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104573.
- [67] Zhang J, Hua P, Krebs P. Influences of land use and antecedent dry-weather period on pollution level and ecological risk of heavy metals in road-deposited sediment [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **228**: 158-168.
- [68] 钱建平, 李伟, 张力, 等. 地下水中重金属污染源及研究方法综述[J]. *地球与环境*, 2018, **46**(6): 613-620.
- Qian J P, Li W, Zhang L, *et al.* Source and research status of heavy metal pollution in groundwater: a review [J]. *Earth and Environment*, 2018, **46**(6): 613-620.
- [69] Wang Z Y, Su Q, Wang S, *et al.* Spatial distribution and health risk assessment of dissolved heavy metals in groundwater of eastern China coastal zone [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **290**, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2021.118016.
- [70] Pervez S, Dugga P, Siddiqui M N, *et al.* Sources and health risk assessment of potentially toxic elements in groundwater in the mineral-rich tribal belt of Bastar, Central India [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, **14**, doi: 10.1016/J.GSD.2021.100628.
- [71] Dora M L. PGE mineralization in Bastar Craton, central India: prospects and constraints [J]. *Indian Journal of Geosciences*, 2014, **68**(2-3): 147-160.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qi, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)