

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

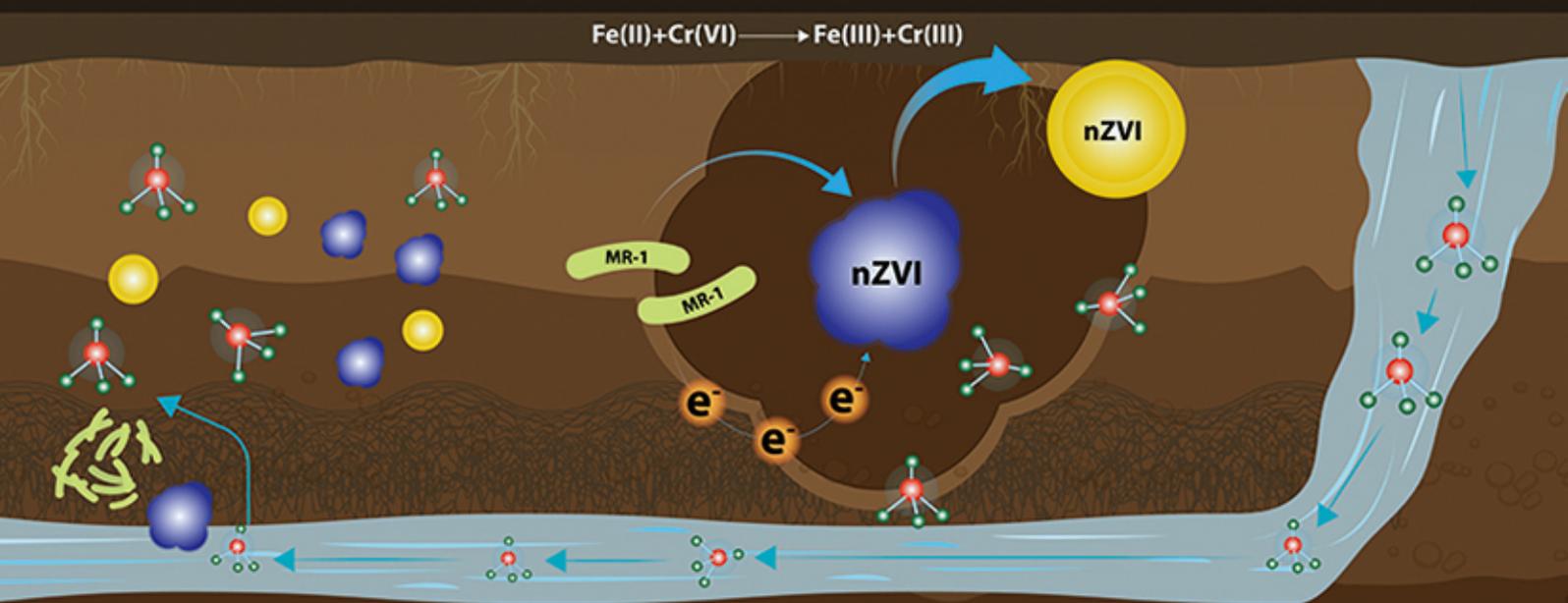
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJIANG KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 时空分布与健康效应评估 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM_{2.5} 污染影响 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM_{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N₂O 排放的影响 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH₄⁺-N 生物炭对土壤 N₂O-N 排放和 NH₃-N 挥发的影响 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价

师环环¹, 潘羽杰¹, 曾敏², 黄长生², 侯清芹¹, 皮鹏程¹, 彭红霞^{1*}

(1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

摘要: 地下水重金属的来源确定和健康风险评估, 是新时期我国环境管理中重点关注和亟待解决的问题之一。为了解雷州半岛地下水环境状况, 采集44件地下水样品, 测定分析了Cr、Mn、Cu、Zn、As、Cd、Hg和Pb元素的浓度和空间分布特征, 并运用相关系数和主成分分析探讨了地下水重金属的来源, 最后结合健康风险模型对不同途径所引起的健康风险进行评价。结果表明: ①除As、Mn和Cd外, 雷州半岛地下水重金属元素的平均值均未超过II类水质标准(GB/T 14848-2017)。②总体空间分布表现出明显的空间差异性, 即南部高于北部。③研究区8种重金属可被辨识出3种主成分(PCs), PC1(Cu、Zn、Cd和Pb)主要为工农业及交通因子, PC2(Cr、Mn和As)主要为自然源和人为源双重因子, PC3(Hg)主要为自然源因子。④研究区各金属的健康风险均在可接受范围内, 成人的风险高于儿童, 饮用途径的风险高于皮肤暴露途径。环保部门应指导合理地开采地下水资源, 严格控制污染源, 以期降低健康风险。

关键词: 地下水; 重金属; 来源解析; 风险评价

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4246-11 DOI: 10.13227/j.hjcx.202101147

Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula

SHI Huan-huan¹, PAN Yu-jie¹, ZENG Min², HUANG Chang-sheng², HOU Qing-qin¹, PI Peng-cheng¹, PENG Hong-xia^{1*}

(1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

Abstract: Source identification and health risk assessment of heavy metals in groundwater is one of the key issues in China's new era of environmental management. In order to reveal the status, sources, and health risk of pollutants in groundwater of the Leizhou Peninsula, 44 groundwater samples were collected, and the concentrations and spatial distribution of Cr, Mn, Cu, Zn, As, Cd, Hg, and Pb were measured and analyzed. The sources of heavy metals in groundwater were then determined through correlation coefficient and principal component analysis. Finally, the health risk model was used to evaluate the different health risks associated with these heavy metals. The results showed that the average value of heavy metal elements in groundwater of the Leizhou Peninsula does not inferior to the class II water quality standard(GB/T 14848-2017). However, As, Mn, and Cd do not meet the standard. The overall spatial distribution indicated obvious spatial differences, with higher values in the south than in the north. Heavy metal sources can be identified as three principal components (PCs). PC1 (Cu, Zn, Cd, and Pb) metals mainly originate from industrial, agricultural, and traffic sources. PC2 (Cr, Mn, and As) sources can be both natural and man-made, and PC3 (Hg) sources are primarily man-made. For the groundwater of the Leizhou Peninsula, the health risks of 8 metals are with the acceptable range, the carcinogenic risk of adults is higher than that of children, and the risk of drinking exposure is higher than that of skin exposure. The study shows that the environmental protection department should encourage the rational exploitation of groundwater resources and control the sources of pollution to reduce health risks.

Key words: groundwater; heavy metals; source analysis; risk assessment

随着城市化和工业化的快速发展,水体重金属污染问题日益突出^[1,2]。由于重金属具有隐蔽性、稳定性及难降解性等特点^[3~5],伴随富集效应,严重威胁着人体健康,如出现肾脏损害、骨骼损伤和神经错乱,甚至诱发皮肤癌、膀胱癌和肝癌等。因此,基于地下水重金属暴露特征,探究重金属污染源,评价其健康风险具有重要现实意义。

近年来,学者们广泛开展了水环境重金属污染源与健康风险研究,已有研究认为地下水重金属主要来源于自然因素和人为活动^[6~9],如风化堆积、工业活动、农药污染以及交通污染等。部分研究对水环境重金属进行健康风险评价主要采用美国国家环

保署(USEPA)模型,评估人群主要分为成人和儿童^[10,11]。大多认为饮用途径的健康风险值高于皮肤暴露途径,且成人的健康风险值高于儿童^[12,13]。健康风险评价是以风险度作为指标,基于危害鉴定、剂量-效应评估、暴露评估和风险表征的“四步法”,用以评估环境污染物对人体健康所产生的风险^[14~16]。雷州半岛由于降水季节分配不均,河流短小和蒸发

收稿日期: 2021-01-18; 修订日期: 2021-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877297); 中国地质调查局项目(12120114029601)

作者简介: 师环环(1993~),女,硕士,主要研究方向为地下水污染与评价, E-mail: shh961211@163.com

* 通信作者, E-mail: penghx@cug.edu.cn

旺盛原因,导致当地地表水资源严重不足,素有“十年九旱、赤地千里”之称,但雷州半岛火山岩覆盖下的地下水资源十分丰富^[17],地下水是当地居民生产生活主要水源^[18].地下水超采现象已造成海水倒灌和河道生态功能退化环境问题,严重制约其社会经济可持续发展^[19].目前对雷州半岛水环境的研究主要涉及地球化学特征^[20~22]、开采潜力^[18]、海水入侵特征^[23]、水循环演化和利用性^[24,25],而对来源解析和健康风险报道甚少.

本文以中国地质调查局“雷州半岛 1:5 万水文地质调查”项目为依托,基于 44 个地下水样本点的 8 种重金属(Cr、Mn、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb)暴露特征,运用 ArcGIS 分析了研究区重金属的空间分布特征,并采用相关系数和主成分分析来识别重金属来源,最后利用水环境健康风险评价模型对成人和儿童开展了人体健康风险评价,以期为研究雷州半岛地下水环境状况和改善区域环境质量提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雷州半岛地处中国广东省西南部,介于 109°55' E ~ 110°44' E、20°14' N ~ 21°44' N 之间,总面积 1.32 万 km²,现辖雷州、廉江和吴川 3 市,徐闻和遂溪 2 县,霞山、赤坎、坡头和麻章 4 区.地势平缓,海拔在 1 000 m 以下,如图 1 所示.横跨亚热带和热带季风气候,年平均气温 22.5℃,年平均降雨量 1 417 ~ 1 804 mm.由于时空分布不均且蒸发量较大,极易出现干旱现象,春旱尤为严重.该地地下水按地下含水介质类型、赋存条件和水力特征划分为基岩

裂隙水及碳酸盐岩类裂隙溶洞水两大类.基岩裂隙水分布于雷州半岛北部遂溪-廉江一带,含水层为花岗岩和砂岩,局部为寒武纪变质砂岩和页岩,属潜水,水量贫乏.民井和单井出水量 50 ~ 435 m³·d⁻¹,由于其水量小,仅作为分散村庄居民供水水源.碳酸盐岩类裂隙溶洞水主要分布于廉江市中部岩溶盆地,集中分布于中垌-廉江复式向斜中,泥盆系和石炭系灰岩中,埋深变化较大,总体从北往南即流域两侧向河谷逐渐增大,埋深约在 27.00 ~ 72.42 m,为低矿化度酸性中性水.

1.2 样品采集与处理

2014 年 12 月在雷州半岛采集了 44 件地下水样品,采样深度介于 0.2 ~ 80 m,水样取自于民井、机井和泉水.测试前使用 0.45 μm 的微孔过滤膜对水样进行过滤处理,现场使用 HACH40d 便携式水质分析仪测定样品的水温、pH、电导率和溶解氧等水质基本指标,并进行测试数据记录.将采集的水样装于洁净的 500 mL 聚乙烯塑料样瓶中,加入约 3 mL 的 65% HNO₃.水样 pH 值调至 2 以下,封口于 4℃ 的便携式冷藏箱保存,送至国土资源部长沙矿产资源监督检测中心进行测试.测试前使用样品测定方法参考地下水污染地质调查评价规范(DD 2008-01),运用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent7700X, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)分析测定,每 10 个样品测 1 次空白样和 1 次水质标准品,标准曲线的配制采用国家标准中心提供的标准物质,实验所用的样品均为优级纯样.

1.3 研究方法

1.3.1 描述性和多元统计

运用 SPSS 25.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 软件对研究区重金属元素含量进行描述性统计和多元统计分析.描述性统计包括范围、均值、中值、标准差、变异系数、偏度和峰度.相关分析被用来调查元素之间的联系,主成分分析被用来确定这些元素在研究区域的主要来源.采用相关性分析和主成分分析多元统计方法对地下水样品数据进行处理,以解析研究区重金属的主要来源.

1.3.2 反距离权重插值法

本文运用 ArcGIS 10.2 (<http://www.esri.com/software/arcgis>, ESRI, Redlands, California, CA, USA) 对 44 个采样点的重金属含量进行符号化分类,以分析雷州半岛地下水重金属含量的空间特征.研究运用 ArcGIS 中的反距离权重插值法(IDW)进行插值来分析成人和儿童的综合风险.反距离权重插值是一种加权平均插值法,可以平滑地变换或插值.选择参数控制如何通过离开栅格将权重系数指

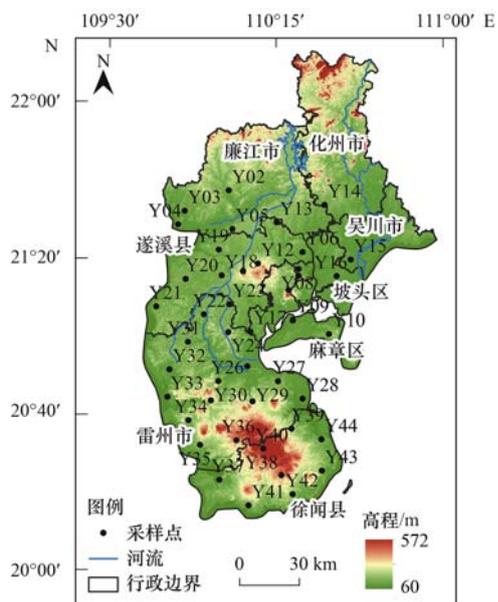


图 1 雷州半岛地下水采样点示意

Fig. 1 Groundwater sampling points in Leizhou Peninsula

定给关节顺序. 越接近的数据点被赋予较高的权重分布. 对于较小的订单, 权重更均匀地分配到每个数据点. 研究区地下水重金属采用线性, 无偏, 最优估计的插值方法, 未进行数据变换, 使用区域变量的原始数据进行插值.

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \varphi_i Z(X_i) \quad (1)$$

式中, $Z(X_0)$ 是估计的点含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; n 是采样点的总数; $Z(X_i)$ 是第 i 点的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 是一组权重系数. 该算法的核心是计算 $Z(X_0)$ 的最小无偏估计.

1.3.3 健康风险评价模型

美国国家环保署 (USEPA) 提出的人体健康风险评估方法由于计算简单且使用方便, 输出结果基本能代表研究区的实际水平, 在国内外重金属污染暴露人群的健康风险评估中应用广泛. 本研究利用 USEPA 水环境健康风险评估模型, 从饮用途径和皮肤暴露途径入手, 对成人和儿童 (6~9 岁) 两大人群进行 8 种重金属元素的健康风险评估. 模型包括非化学致癌物质 (Mn、Cu、Zn、Hg 和 Pb) 评价模型和化学致癌物质 (Cr、As 和 Cd) 评价模型. 由于直接引入

国外的模型, 在原理、使用条件、算法、考虑介质和过程等方面可能与我国实际情况有所差异^[16], 因此本研究针对实际情况, 通过查阅手册对暴露参数进行了一定的修改, 以便计算结果更加符合研究区的人体健康风险评估实际情况.

(1) 暴露剂量率

非致癌物质的暴露量通常用日均暴露剂量 (average daily dose, ADD) 表征, 致癌物质的暴露量通常用终生日均暴露剂量 (life-time average daily dose, LADD) 表征.

$$\text{ADD}_{\text{oral}} (\text{LADD}_{\text{oral}}) = \frac{\text{CW} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

$$\text{ADD}_{\text{dermal}} (\text{LADD}_{\text{dermal}}) = \frac{\text{CW} \times \text{SA} \times \text{PC} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

式中, ADD_{oral} 和 $\text{LADD}_{\text{oral}}$ 分别表示饮用途径下的非致癌和致癌性污染物的日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; $\text{ADD}_{\text{dermal}}$ 和 $\text{LADD}_{\text{dermal}}$ 分别表示皮肤暴露途径下的非致癌和致癌性污染物的日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 式中各参数取值如表 1 所示.

表 1 健康风险评估模型参数
Table 1 Health risk assessment model parameters

参数	含义	参考值		单位	文献
		成人	儿童		
CW	污染物浓度	— ¹⁾	— ¹⁾	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	实测值
IR	每日平均饮用量	1.70	1.14	$\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$	[26,27]
EF	暴露频率	350	350	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	[26,27]
ED	持续暴露时间	30	9	a	[26,27]
BW	体重	57.00	23.80	kg	[26,27]
AT	平均暴露时间	25 500	25 500	d	[26,27]
SA	接触的皮肤表面积	16 000	9 300	cm^2	[26,27]
PC	皮肤渗透系数	0.002 (Cr)、0.000 1 (Mn)、0.000 6 (Cu)、0.000 6 (Zn)、0.001 8 (As)、0.001 (Cd)、0.000 004 (Pb) 和 0.001 (Hg)		$\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	[28]
ET	暴露时间	360	360	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	[26,27]
CF	体积转换因子	0.001	0.001	$\text{L} \cdot \text{cm}^{-3}$	[28]

1) “—”表示为实测值

(2) 健康风险表征

致癌物以终身致癌风险值 (incremental lifetime cancer risk, ILCR) 表征, 非致癌风险用非致癌风险商 (hazard quotient, HQ) 和非致癌风险指数 (hazard index, HI) 表征.

致癌物风险值:

$$\text{ILCR} = q \times \text{LADD} \quad (4)$$

式中, ILCR 为人群终身超额危险度; q 为重金属的致癌强度系数, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 本研究中污染物致癌强度系数的参考剂量见 USEPA 资料^[29]. Cr 经饮用和皮肤暴露的致癌强度系数分别为 0.5

$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, As 经饮用和皮肤暴露的致癌强度系数分别为 $1.5 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $3.66 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, Cd 经饮用和皮肤暴露的致癌强度系数分别为 $6.1 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.38 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; LADD 为各致癌物质的日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 根据 USEPA 分级, 化学致癌物质的最大可接受风险值为 1×10^{-4} , 当 $\text{ILCR} > 1 \times 10^{-4}$ 时, 认为可能存在潜在致癌风险; 当 $\text{ILCR} < 1 \times 10^{-6}$ 时, 则认为不存在致癌风险或致癌风险很小.

非致癌物风险值:

$$\text{HQ} = \text{ADD}/\text{RfD} \quad (5)$$

$$HI = HQ_{\text{oral}} + HQ_{\text{dermal}} \quad (6)$$

式中, HQ 为非致癌物风险商; ADD 为非致癌物质的日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; RfD 为非致癌物质在不同暴露途径下的日均参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; HI 为同一个体在不同暴露途径下的综合风险值. 根据 USEPA 分级, 当 $HI < 1$ 时, 暴露个体的非致癌风险在可接受范围内; 当 $HI > 1$ 时, 表明非致癌化学物质对人类健康有潜在不利影响. 各重金属的 RfD 取值如表 2 所示.

表 2 健康风险模型 RfD 值Table 2 RfD values for health risk models

重金属	日均参考剂量 $RfD/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$		文献
	饮用途径	皮肤接触途径	
Cr	0.003 0	0.003 0	[15]
Mn	0.046 0	0.001 8	[15]
Cu	0.040 0	0.012 0	[15]
Zn	0.300 0	0.010 0	[15]
As	0.000 3	0.000 1	[15]
Cd	0.000 5	0.000 5	[15]
Hg	0.000 3	0.001 3	[30, 31]
Pb	0.001 4	0.001 4 ¹⁾	[15]

1) 无经皮肤暴露的数值, 用经口暴露的代替

2 结果与讨论

2.1 描述性统计分析

雷州半岛地下水重金属浓度见表 3, 可知各重金属的浓度差异较大. Cr、Mn、Cu、Zn、As 和 Cd 和 Pb 的平均值分别为 5.50、93.25、18.21、1.59、1.85、1.04、0.03 和 2.24 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 重金属 Mn、As 和 Cd 的平均值均高于国家地下水质量标准 II 类标准限值 (GB/T 14848-2017)^[32], 超标的重金属浓度范围排序为 $\text{Mn} > \text{As} > \text{Cd}$, 这与 Ahmed 等^[33]的研究结果一致. Mn 和 As 的浓度范围跨度最大, 二者最大值分别高于国家 II 类标准限值 21.6 倍和 24.6 倍, 考虑为自然背景值高导致的点源污染使个别样本点浓度严重偏高. 从偏度来看, 8 种重金属元素的排列顺序依次为: $\text{Cu} > \text{Mn} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Hg}$, Cu 和 Mn 的偏度较为突出, 可能受人为影响其含量产生较大幅度的正偏度. 变异系数可以反

映样品中元素含量的离散程度, 变异系数越大, 波动程度越大. 根据 Stoeva 等^[34]的研究, 可以对变异程度进行如下分类: $\text{CV} \leq 20\%$ 为低变异度, $20\% < \text{CV} \leq 50\%$ 为中等变异度, $50\% < \text{CV} \leq 100\%$ 为高变异度. Cr 的变异系数最小, 为 55.27%, Cu 的变异系数最大, 为 398.35%, 这 8 种重金属的变异程度均为高度变异, 且变异系数差别程度较大, 表明重金属受研究区地下水赋存空间影响较大, 不同重金属的污染来源及污染途径不一致.

2.2 空间分布特征

研究区地下水中重金属浓度的空间分布特征具有明显的区域差异性, 如图 2 所示. 各金属的空间分布特征表现为 Cr 的高值区分布较为集中, 主要分布在雷州半岛中部. As、Cu 和 Pb 重金属的空间分布状况相同, 低浓度区主要分布在雷州半岛北部地区, 高浓度区主要分布在雷州半岛南部地区. Zn 的浓度分布极为均衡, 44 个采样点均为低值区, 其浓度均符合国家地下水质量标准 I 类标准限值 (GB/T 14848-2017). Hg 浓度分布较为均衡, 无异常高值点, 29.5% 的采样点 Hg 浓度均为 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 符合国家地下水质量标准 I 类标准限值. Mn 的高值区主要集中在雷州半岛中部和南部地区, 其有 2 个异常高值点, 浓度为 $1\ 081 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1\ 010 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 样本点分别位于汽修厂附近 (Y09) 和公路旁 (Y34), 该样本点应考虑受到人类活动影响. 不同重金属的空间分布特征总体趋势一致, 即南部地区重金属浓度高于北部地区. 重金属空间分布特征的主要原因可能为南部地区有大面积的火山喷出岩^[35]; 南部地区工农业活动相对频繁, 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, 从而改变了原有的地下水动力条件, 引起地面污水向地下水的倒灌, 使得地下水污染的程度不断加重; 雷州半岛中南部地区人口密度较大, 这些地区仅有大型城市和县城设有污水排放系统, 其它乡镇的污水都是未经处理直接排入附近的地表河流, 加之平原地区地表和地下水转换频繁, 严重影响了地下水水

表 3 雷州半岛地下水重金属浓度分析统计

Table 3 Analysis of heavy metal concentration in Leizhou Peninsula

元素	平均值 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	中值 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	最小值 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	最大值 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	标准差 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	变异系数 /%	偏度	峰度	国家 II 类 标准 ^[32]
Cr	5.50	4.37	1.63	15.58	3.04	55.27	1.50	2.42	10.00
Mn	93.25	27.55	0.53	1 081.00	219.99	235.91	3.96	15.75	50.00
Cu	18.21	3.63	0.56	478.60	72.54	398.35	6.25	40.20	50.00
Zn	1.59	0.97	0.36	7.20	1.63	102.52	2.05	3.70	500.00
As	1.85	0.45	0.00	24.60	4.77	257.84	3.82	14.62	1.00
Cd	1.04	0.25	0.00	7.30	1.82	175.00	2.52	5.65	1.00
Hg	0.03	0.00	0.00	0.10	0.05	166.67	0.93	-1.19	0.10
Pb	2.24	0.29	0.02	18.31	4.26	190.18	2.51	5.65	5.00

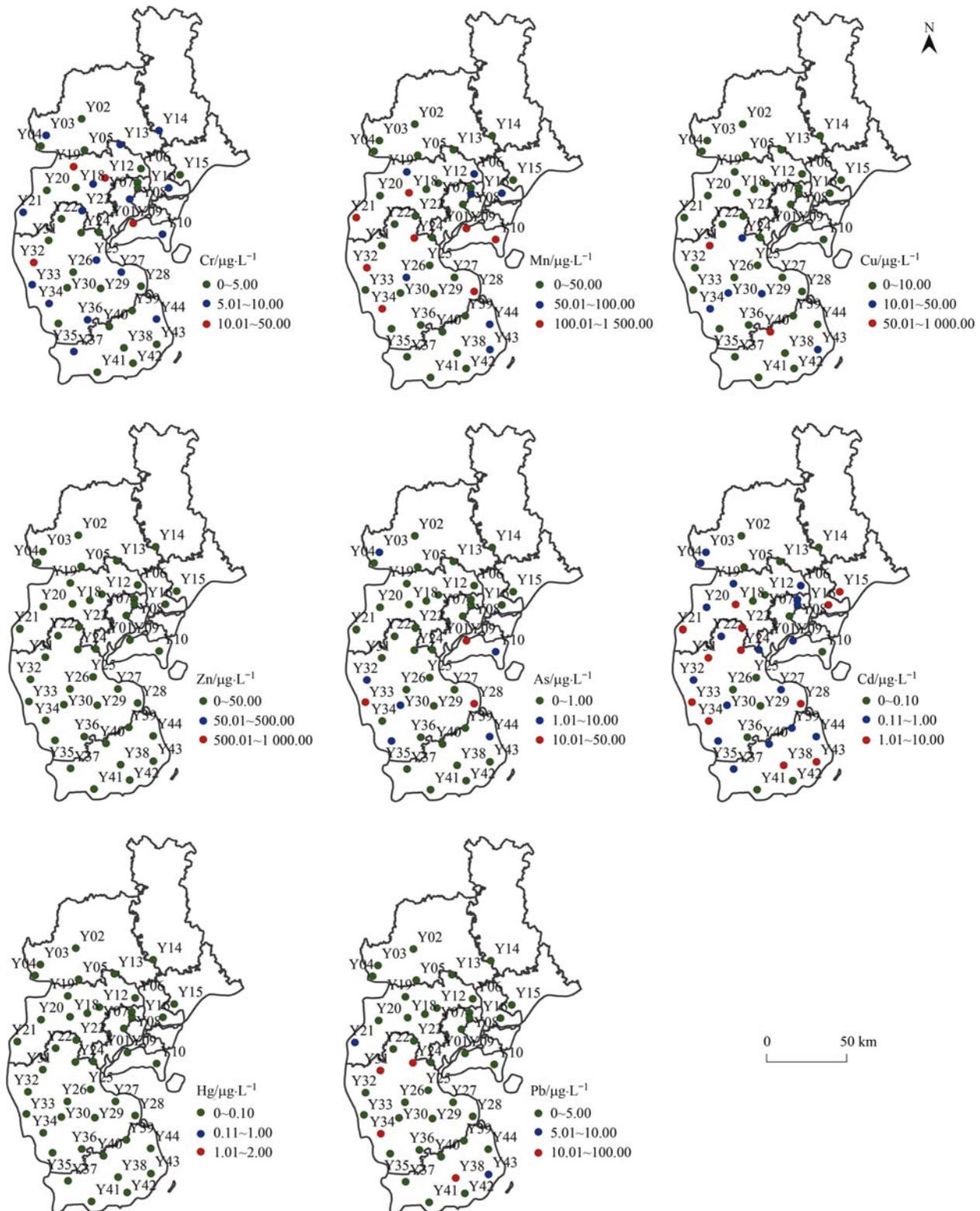


图2 重金属浓度的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal concentrations

质,对地下水重金属的浓度也产生直接影响.

2.3 污染来源解析

2.3.1 相关性分析

运用 SPSS 25.0 中的相关性分析对雷州半岛地下水重金属进行了 Pearson 分析,结果见表 4. 重金属元素 Zn-Mn、Cd-Mn、Pb-Zn、Cd-Zn 和 Cd-Pb 之

间的相关系数分别为 0.505、0.448、0.623、0.801 及 0.794,并且均通过 0.01 水平的相关检验,说明 Mn、Zn、Pb 和 Cd 两两之间存在显著的正相关,可认为具有相同的来源. Hg、Cr 和 As 与其他元素之间的相关性均小于 0.4,相关性较弱,表明可能来自不同的污染来源. 前人研究认为这些元素含量的富

集主要来自人类活动^[36~39], 因此, 可以运用主成分分析进一步推断和识别。

表 4 雷州半岛地下水重金属两两之间的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients between heavy metals in groundwater from the Leizhou Peninsula

	Cu	Mn	Zn	Hg	Cr	As	Pb	Cd
Cu	1							
Mn	-0.001	1						
Zn	0.044	0.505**	1					
Hg	-0.100	0.365*	0.147	1				
Cr	-0.107	0.346*	0.022	0.276	1			
As	-0.070	0.337*	0.102	0.007	0.291	1		
Pb	0.091	0.280	0.623**	0.253	-0.189	-0.157	1	
Cd	0.068	0.448**	0.801**	0.133	-0.056	0.079	0.794**	1

1) **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

2.3.2 主成分分析

主成分分析是判别重金属来源的有效方法^[40,41]. 在 SPSS 25.0 中对雷州半岛地下水重金属浓度进行 KMO 和 Bartlett 球度检验, 得到 KMO 值(0.671)和 Bartlett 球度检验结果($P < 0.001$), 表明 8 种重金属适合做主成分分析. 对雷州半岛地下水中重金属进行主成分分析, 结果见表 5、表 6 和图 3 所示, 共识别出了 3 种主成分 (principle

component, PC), 累计解释了总方差的 70.8%, 主成分的 1、2 和 3 的贡献率分别为 36.104%、21.555% 和 13.142%. 第 1 主成分包括 Cu、Zn、Cd 和 Pb, 其权重系数分别为 0.148、0.874、0.935 和 0.880, 表明这些元素间的相关性较强. 第 2 主成分包括 Cr、Mn 和 As, 其权重系数分别为 0.667、0.603 和 0.840. 第 3 主成分为 Hg, 其权重系数为 0.795.

表 5 雷州半岛地下水重金属主成分分析结果¹⁾

Table 5 Principal component analysis of heavy metals in groundwater from the Leizhou Peninsula

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	特征值	方差百分比/%	累积贡献率/%	特征值	方差百分比/%	累积贡献率/%	特征值	方差百分比/%	累积贡献率/%
1	2.888	36.104	36.104	2.888	36.104	36.104	2.804	35.049	35.049
2	1.724	21.555	57.659	1.724	21.555	57.659	1.616	20.205	55.255
3	1.051	13.142	70.800	1.051	13.142	70.800	1.244	15.546	70.800
4	0.929	11.613	82.413	—	—	—	—	—	—
5	0.579	7.240	89.654	—	—	—	—	—	—
6	0.429	5.363	95.017	—	—	—	—	—	—
7	0.275	3.436	98.453	—	—	—	—	—	—
8	0.124	1.547	100.000	—	—	—	—	—	—

1) “—”表示特征根小于 1 的成分未被提取和旋转

PC1 包括 Cu、Zn、Cd 和 Pb 这 4 种重金属, Cu 与其它重金属元素的相关系数较低, 可能是 Cu 的来源途径更复杂. 田林锋等^[42]对贵州红枫湖水体中的重金属元素进行聚类分析时, 将 Zn、Cu 和 Pb 划分为一类, 与本文 PC1 分类结果相类似. 有研究认为 PC1 上 Cd 和 Pb 这 2 种重金属主要受到人为因素的影响, Pb 和 Zn 是与工业活动密切相关的重金属元素^[43]. Zn 的来源主要有工业排放、汽车尾气和动物粪便等; Cd 是农业活动的标志性元素^[44], 除自然源输入外, 工业三废、农药化肥和塑料薄膜等人为源的影响也会造成其浓度偏高; Pb 是交通源的标志性元素^[45], 主要来源于汽车尾气和煤炭燃烧^[46]. PC1 中, Cd、Pb 和 Zn 的高含量采样点主要位于 Y31、Y34、Y38 和 Y40, 其中 Y34 和 Y38 位于公路附近, 土地利用类型为农业, 汽车尾气的排放以及农

药化肥和地膜的使用可能导致该地重金属浓度高于其它采样点. Y31 和 Y40 分别位于摩托车修理厂和农场附近, 频繁的工农业活动在一定程度上影响了地下水重金属的含量, 因此可认为 PC1 主要为“工农业及交通源因子”. PC2 上, 18.2% 的采样点 Mn 浓度超过国家地下水质量标准 III 类标准限值, 6.8% 的采样点 As 浓度过国家地下水质量标准 III 类标准限值, 判断其主要受人为因素的影响. Cr、Mn 和 As 的高浓度采样点主要为 Y09、Y10、Y28、Y31、Y32 和 Y33, 这些采样点均位于经济发展较快地区. Y09 和 Y10 分别位于汽修厂和钢铁基地周围, 工业活动在一定程度上增大了重金属浓度. Y28、Y31、Y32 和 Y33 均位于市境内, Y28、Y31 和 Y32 的土地利用类型为农业, 污染源主要为生活污水、化粪池以及农业活动, Y33 的土地利用类型为

城市,位于地下水流系统中的排泄区,污染源主要为城市生活污水、化粪池和养殖场。

表 6 雷州半岛地下水重金属元素因子载荷
Table 6 Heavy metal factor loadings in groundwater from the Leizhou Peninsula

重金属元素	PC1	PC2	PC3
Cr	-0.111	0.667	0.429
Mn	0.538	0.603	0.246
Cu	0.148	0.001	-0.571
Zn	0.874	0.168	-0.037
As	-0.007	0.840	-0.173
Cd	0.935	0.059	-0.067
Hg	0.259	0.086	0.795
Pb	0.880	-0.253	0.072

同时,根据 Šajn 等^[47]和 Facchinelli 等^[48]的研究,发现 Cr 和 Mn 均受地质背景的控制.雷州半岛第四纪火山岩分布广泛,该地火山岩是多次间歇性火山喷发而成,因而火山碎屑岩与玄武岩多层叠置,以玄武岩为主.玄武岩作为高地质背景的基性火山岩,含有高含量的重金属元素^[24],可认为 Cr 和 Mn 元素是混合来源,受到自然地质背景和人类活动的共同控制.PC3 上有较大载荷的仅有 Hg,44 个采样点的重金属浓度均符合国家地下水 I 类标准限值,可判断 Hg 属于自然源因子。

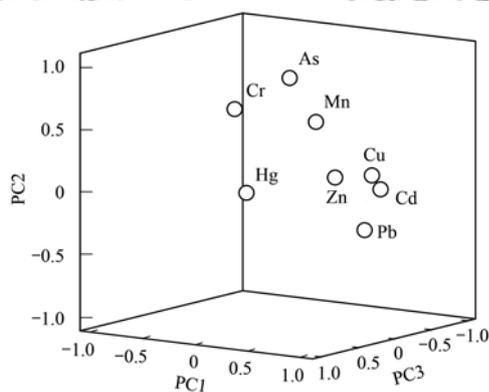


图 3 雷州半岛水体重金属元素三维因子载荷图

Fig. 3 Three-dimensional factor load diagram of heavy metal elements in water from the Leizhou Peninsula

2014 年环境保护部确定了国家重点监控的企业名单,研究区部分重点监控企业主要涉及石油化工、造纸工业、电力能源和糖业食品这 4 大类产业.根据调查结果,该地区工业污染源主要沿人口集聚区分布.港口及公铁路运输条件给工业原料的输入和产品的输出提供了较大的便利条件,但同时,车辆制动过程中的器械摩擦、尾气排放和设备磨损均也产生大量的 Cu、Pb 和 Ni^[49,50].有研究表明汽车润滑油的使用产生大量的 Zn 和 Cd^[51,52].石油化工类污染源多分布于沿海地带,尤其是港口城市郊区,例如

湛江港.糖业食品污染源分布于农业区内.制糖企业排放的废水和石油化工企业排放的“三废”中含有大量的 Cu、As、Cd 和 Pb 等重金属^[41].造纸类工业污染源多集中于经济开发区等一些城市边缘,一些重金属元素会随着造纸企业排放的废水不断淋溶而向下转移,Cu、As、Cd 和 Pb 这 4 种元素表现出较强的迁移性^[53].电力能源污染源多分布于半岛中部地区,电厂在运行过程中会产生富集 As 的飞灰,这些飞灰会通过大气沉降输送至水体中^[54].研究区农业污染源主要为农药化肥、农用塑料薄膜、牲畜和禽类的粪便和水产养殖等,这些污染源均会随下渗水流污染土壤和地下水。

2.4 人体健康风险评价

根据健康风险评价模型和参数,计算出雷州半岛地下水中重金属元素通过饮用途径和皮肤途径暴露的健康风险.饮用途径下,成人和儿童的非致癌物质的平均健康风险值变化趋势一致,其大小排序均为:As > Mn > Cr > Pb > Cu > Hg > Cd > Zn.皮肤接触途径下,非致癌物质所引起的健康危害的成人平均风险值在 $6.48 \times 10^{-5} \sim 7.57 \times 10^{-2}$ 之间,儿童平均风险值在 $5.54 \times 10^{-8} \sim 2.89 \times 10^{-4}$ 之间.从图 4(a)和 4(b)可以看出,两种暴露途径下,对于成人和儿童,Cr、Mn、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 这 8 种重金属的非致癌健康风险值均处于可接受水平,非致癌风险值均为成人 > 儿童,且饮用暴露途径健康风险值 > 皮肤接触途径健康风险值.同时,成人的 HI 为 0.106,儿童的 HI 为 0.097,成人和儿童的 HI < 1,均处于可接受水平,成人的 HI 是儿童的 1.09 倍,说明地下水重金属污染对成人的非致癌健康风险更高.从 HI 的空间分布特征来看(图 5),成人与儿童的分布特征相似,成人和儿童的 HI 均为南部地区高于北部地区,其分布特征与上文的重金属浓度空间分布特征一致。

对于致癌风险而言,重金属 Cr 和 As 通过饮用途径造成的平均致癌健康风险值相同,均高于 Cd 的致癌风险.从图 4(c)和 4(d)可以看出,两种暴露途径下,成人和儿童的健康风险值均处于可接受水平.皮肤暴露途径中,两人群致癌物质的风险值以 Cr 最大,Cd 最小.除 Cr 通过皮肤接触途径造成的致癌风险为儿童 > 成人外,As 和 Cd 的致癌风险均为成人 > 儿童.对比 2 种暴露途径下致癌物质的健康风险发现,饮用途径的风险值比皮肤暴露途径大 2~4 个量级.Cr、As 和 Cd 的两人群平均健康风险值在 $9.7 \times 10^{-11} \sim 3.4 \times 10^{-5}$ 之间,均低于美国环境保护署(USEPA)推荐的最大可接受风险水平 1×10^{-4} ,也低于国际辐射防护委员会推荐的最大可接

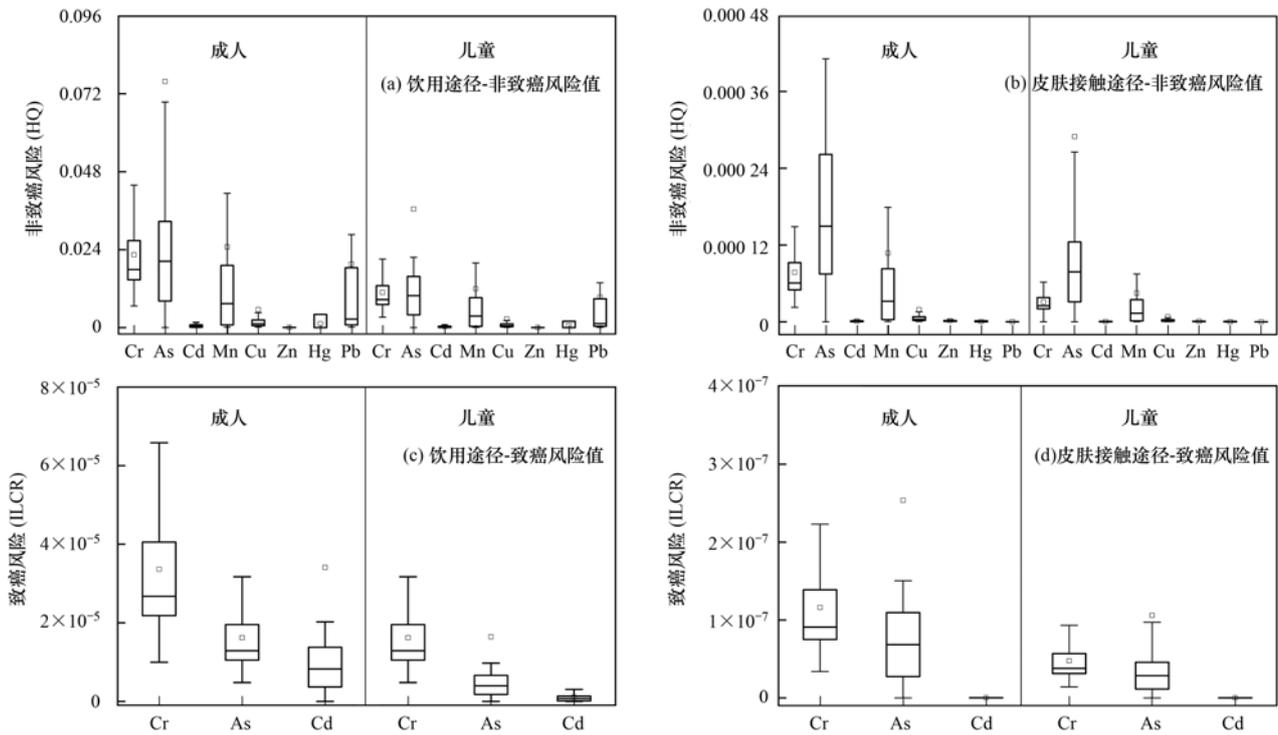


图 4 两种途径下重金属对成人和儿童的平均健康风险值

Fig. 4 Average health risk of heavy metals to adults and children via two exposure routes

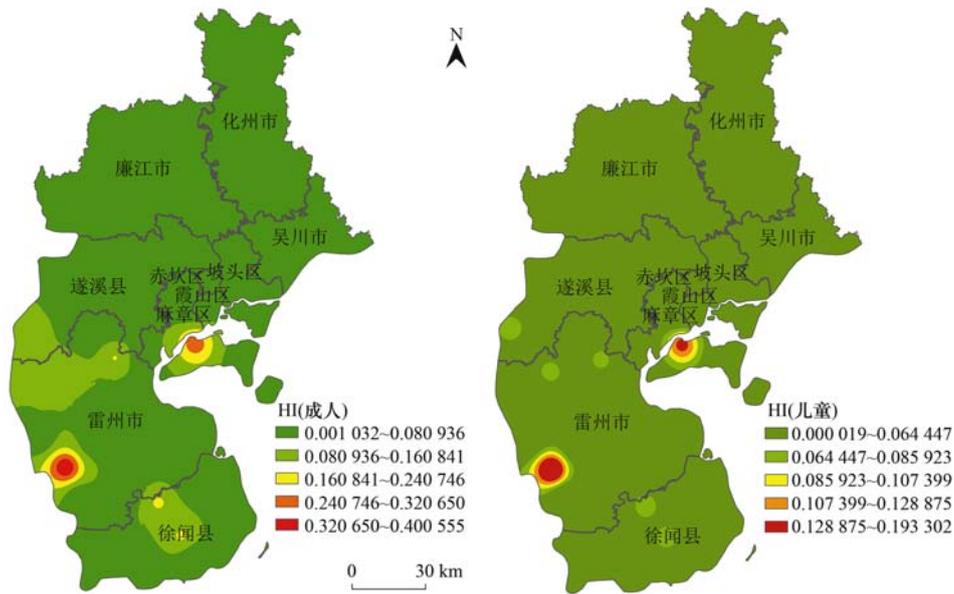


图 5 成人和儿童的 HI 空间分布

Fig. 5 HI spatial distribution for adults and children

受风险水平(ICRP) 5×10^{-5} . 值得注意的是, 饮用途径下, Cr、As 和 Cd 的两人群平均健康风险值均高于瑞典环境环保局、荷兰建设与环境部和英国皇家协会推荐的最大可接受风险水平 1×10^{-6} .

总体来说, 无论成人还是儿童, 研究区的健康风险值均处于可接受水平, 但饮用途径健康风险值均大于皮肤接触途径健康风险值, 这与艾提业古丽·热西提等^[12] 和郭森等^[13] 的研究结果相似, 说明开展地下水健康风险评估应重点关注饮用途径所造成的

健康风险.

本研究选取了雷州半岛 44 个较有代表性的采样点收集地下水中的重金属浓度, 样本量相对较少, 无法更为全面地反映整个雷州半岛地下水的重金属浓度水平. 采用 USEPA 提出的人体健康风险评估方法, 健康风险计算过程中模型参数的选取以中国人群暴露参数手册(成人卷和儿童卷)为主, 但不同地区人群的生活习惯、皮肤暴露面积、体重和劳动强度等必定存在一定的误差, 可能会对健康风险评估结

果产生影响,但并不影响本次健康风险评价工作的真实性及有效性,需要在今后的工作中进一步完善。

3 结论

(1) 雷州半岛地下水重金属的平均浓度排序为: $Mn > Cu > Cr > Pb > As > Zn > Cd > Hg$, 且 Cu 、 Zn 、 Hg 、 Cr 和 Pb 的平均浓度均符合国家地下水质量标准 II 类标准限值, 8 种重金属中 Mn 的超标率最高, 为 18.2%, Mn 有 2 个异常高值点, 是今后地下水重金属污染防治工作的重点。

(2) 重金属浓度总体空间分布特征表现出明显的空间差异性, 即南部地区高于北部地区。

(3) 来源解析结果表明, 研究区水体中重金属 Cu 、 Cd 、 Zn 和 Pb 主要来源于工农业及交通污染, Mn 、 Cr 和 As 受人为源和自然源的双重影响, Hg 的主要来源为自然源。

(4) 健康风险评价结果表明, 各种金属的 HQ 和不同人群的 HI 均处于可接受水平。成人的健康风险值高于儿童, 饮用途径的健康风险值高于皮肤接触途径, 表明饮水是主要的风险暴露途径。两种暴露途径下, Cr 、 As 和 Cd 的致癌风险值均低于 USEPA 推荐的最大可接受水平 1×10^{-4} 。

致谢: 感谢彭轲教授级高级工程师和赵信文高级工程师对本研究的指导和帮助!

参考文献:

- [1] 黄婉彬, 鄢春华, 张晓楠, 等. 城市化对地下水水量、水质与水热变化的影响及其对策分析[J]. 地球科学进展, 2020, 35(5): 497-512.
Huang W B, Yan C H, Zhang X N, et al. The impact of urbanization on groundwater quantity, quality, hydrothermal changes and its countermeasures [J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(5): 497-512.
- [2] Huang G X, Zhang M, Liu C Y, et al. Heavy metal(loid)s and organic contaminants in groundwater in the Pearl River Delta that has undergone three decades of urbanization and industrialization: distributions, sources, and driving forces [J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 913-925.
- [3] Liu Q Q, Wang F F, Meng F P, et al. Assessment of metal contamination in estuarine surface sediments from Dongying City, China: use of a modified ecological risk index [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 126: 293-303.
- [4] Zhang J F, Gao X L. Heavy metals in surface sediments of the intertidal Laizhou Bay, Bohai Sea, China: distributions, sources and contamination assessment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 98(1-2): 320-327.
- [5] Mahmood Q, Shaheen S, Bilal M, et al. Chemical pollutants from an industrial estate in Pakistan: a threat to environmental sustainability[J]. Applied Water Science, 2019, 9(3), doi: 10.1007/s13201-019-0920-1.
- [6] Qu W J, Wang C Y, Luo M H, et al. Distributions, quality assessments and fluxes of heavy metals carried by submarine groundwater discharge in different types of wetlands in Jiaozhou Bay, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 157, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111310.
- [7] Ravindra K, Mor S. Distribution and health risk assessment of arsenic and selected heavy metals in groundwater of Chandigarh, India [J]. Environmental Pollution, 2019, 250: 820-830.
- [8] Chiamsathit C, Auttamana S, Thammarakcharoen S. Heavy metal pollution index for assessment of seasonal groundwater supply quality in hillside area, Kalasin, Thailand [J]. Applied Water Science, 2020, 10(6), doi: 10.1007/s13201-020-01230-2.
- [9] 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.
- [10] 赵玉. 渭河干流浅层地下水与地表水中重金属 Cd 污染特征及风险评价[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(2): 267-277.
Zhao Y. Characteristics and risk assessment of heavy metal Cd pollution of shallow groundwater and Surface water in main stream of Weihe River, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(2): 267-277.
- [11] Khalid S, Shahid M, Natasha, et al. Heavy metal contamination and exposure risk assessment via drinking groundwater in Vehari, Pakistan [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(32): 39852-39864.
- [12] 艾提业古丽·热西提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 王维维, 等. 波斯腾河流域地下水重金属污染的人体健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(2): 251-259.
Rixit A, Eziz M, Wang W W, et al. The Human health risk assessment of heavy metal pollution of groundwater in Bosten Lake basin [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(2): 251-259.
- [13] 郭森, 肖捷颖, 张依章, 等. 环南四湖区地下水中重金属健康风险评价[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 59-64.
Guo S, Xiao J Y, Zhang Y Z, et al. Health risk assessment of heavy metals in groundwater of area around NanSi Lake [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11): 59-64.
- [14] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5628-5638.
Li C F, Cao J F, Lü J S, et al. Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5628-5638.
- [15] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评价中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Duan X L. Research methods of exposure factors and its application in environmental health risk assessment [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [16] 刘蕊, 张辉, 勾昕, 等. 健康风险评估方法在中国重金属污染中的应用及暴露评估模型的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1239-1244.
Liu R, Zhang H, Gou X, et al. Approaches of health risk assessment for heavy metals applied in China and advance in exposure assessment models: a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1239-1244.
- [17] 曾敏, 彭轲, 何军, 等. 雷州半岛东部地区地下水环境特征研究[J]. 地下水, 2018, 40(6): 17-20, 116.
Zeng M, Peng K, He J, et al. Research on groundwater environmental characteristics in eastern Leizhoupeninsula [J]. Ground Water, 2018, 40(6): 17-20, 116.

- [18] 梁靖. 雷州半岛地下水资源特征及开采潜力评价[J]. 华东地质, 2018, **39**(4): 299-304.
Liang J. Characteristics and potential assessment of groundwater resources in the Leizhou Peninsula [J]. East China Geology, 2018, **39**(4): 299-304.
- [19] 刘建梅, 谢丽莉, 刘宇. 广东省雷州半岛水资源承载能力分析[J]. 广东水利水电, 2019, (11): 47-51, 55.
Liu J M, Xie L L, Liu Y. Carrying capacity of water resources for Leizhou Peninsula [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2019, (11): 47-51, 55.
- [20] 黄向青, 何海军, 甘华阳, 等. 海陆过渡界面浅层地下水可溶性 SiO₂ 的变化特征——以雷州半岛和海南岛滨海地区为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, **28**(2): 62-67.
Huang X Q, He H J, Gan H Y, *et al.* Variation characteristics of dissolved SiO₂ in sea-land transition interface of shallow groundwater: taking Leizhou Peninsula and Hainan Island coastline as examples [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, **28**(2): 62-67.
- [21] 梁燕燕. 雷州半岛和海南岛滨海典型区地下水化学特征及可利用性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Liang Y Y. The chemical characteristics and available analysis of groundwater in the typical coastal area of Leizhou Peninsula and Hainan Island [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [22] 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4924-4935.
Zhang H X, Wu Y, Luo W Y, *et al.* Hydrogeochemical investigations of groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4924-4935.
- [23] 黄向青, 林进清, 甘华阳, 等. 雷州半岛东岸地下水化学要素变化以及海水入侵特征[J]. 地下水, 2013, **35**(3): 38-42, 48.
Huang X Q, Lin J Q, Gan H Y, *et al.* Characteristics of groundwater chemical elements variation and seawater intrusion in east coast of Leizhou Peninsula [J]. Ground Water, 2013, **35**(3): 38-42, 48.
- [24] 温汉辉. 雷州半岛地下水循环规律及合理开发利用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
Wen H H. Study on circulation pattern and numerical modeling of groundwater flow in Leizhou Peninsula [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [25] 姚彦欣, 吴卫熊, 刘宗强, 等. 雷州半岛水资源可持续利用评价的研究[J]. 亚热带水土保持, 2009, **21**(1): 16-18.
Yao Y X, Wu W X, Liu Z Q, *et al.* Study on sustainable utilization evaluation of water resources in Leizhou Peninsula [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2009, **21**(1): 16-18.
- [26] 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.
- [27] 环境保护部. 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. 1-208.
Environmental Protection Agency. Highlights of the Chinese exposure factors handbook (Children) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016. 1-208.
- [28] EPA/600/P-95/002Fa, Exposure factors handbook[S].
- [29] USEPA. Code of federal regulations, title 40: protection of environment[EB/OL]. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2013-title40-vol30/pdf/CFR-2013-title40-vol30.pdf>, 2013-07-01.
- [30] Alam M F, Akhter M, Mazumder B, *et al.* Assessment of some heavy metals in selected cosmetics commonly used in Bangladesh and human health risk [J]. Journal of Analytical Science and Technology, 2019, **10**(1), doi: 10.1186/s40543-018-0162-0.
- [31] Khandare A L, Validandi V, Rajendran A, *et al.* Health risk assessment of heavy metals and strontium in groundwater used for drinking and cooking in 58 villages of Prakasam district, Andhra Pradesh, India [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, **42**(11): 3675-3701.
- [32] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].
GB/T 14848-2017, Standard for groundwater quality[S].
- [33] Ahmed A S S, Hossain M B, Babu S M O F, *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in water from the subtropical river, Gomti, Bangladesh [J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2021, **15**, doi: 10.1016/j.enmm.2020.100416.
- [34] Stoeva N, Berova M, Zlatev Z. Effect of arsenic on some physiological parameters in bean plants[J]. Biologia Plantarum, 2005, **49**(2): 293-296.
- [35] Wang H X, Li X M, Chen Y, *et al.* Geochemical behavior and potential health risk of heavy metals in basalt-derived agricultural soil and crops: a case study from Xuyi County, eastern China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139058.
- [36] 何姜毅, 张东, 赵志琦. 豫北大田蔬菜种植区地下水重金属的分布特征及来源解析[J]. 环境化学, 2017, **36**(7): 1537-1546.
He J Y, Zhang D, Zhao Z Q. Distributions and sources of heavy metals in groundwater of vegetable fields in North Henan Province [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(7): 1537-1546.
- [37] 王秀, 王振祥, 潘宝, 等. 南淝河表层水中重金属空间分布、污染评价及来源[J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(2): 297-303.
Wang X, Wang Z X, Pan B, *et al.* Spatial distribution, contamination assessments and sources of heavy metals in surface water from the Nanfei River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, **26**(2): 297-303.
- [38] 林承奇, 陈枫桦, 胡恭任, 等. 基于 PMF 模型解析九龙江河口表层沉积物重金属来源[J]. 地球与环境, 2020, **48**(4): 443-451.
Lin C Q, Chen F H, Hu G R, *et al.* Source apportionment of heavy metals in surface sediments of the Jiulong River estuary based on positive matrix factorization [J]. Earth and Environment, 2020, **48**(4): 443-451.
- [39] 王帅, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江河口表层沉积物中重金属污染评价及来源[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(10): 1110-1118.
Wang S, Hu G R, Yu R L, *et al.* Pollution assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments from Jiulong River estuary [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(10): 1110-1118.
- [40] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2355-2363.
Zhang J Q, Tian Q, Xu D M, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye Lake [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- [41] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.
Lv J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and

- hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 971-984.
- [42] 田林锋, 胡继伟, 秦樊鑫, 等. 重金属元素在贵州红枫湖水体中的分布特征[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(3): 481-489.
- Tian L F, Hu J W, Qin F X, *et al.* Distribution of heavy metal elements in the water body from Lake Hongfeng [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(3): 481-489.
- [43] 蒲雅丽, 涂耀仁, 游镇烽, 等. Pb-Zn 同位素在沉积物重金属污染源解析方面的应用: 综述与展望[J]. *环境化学*, 2017, **36**(3): 581-590.
- Pu Y L, Tu Y R, You Z F, *et al.* Pb-Zn isotopic tracing technique in sediments: review and propectives [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(3): 581-590.
- [44] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(1): 163-178.
- [45] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3496-3502.
- Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, *et al.* Multivariate geostatistics and GIS-based approach to study the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in the Pearl River delta, China [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3496-3502.
- [46] 李磊, 王云龙, 蒋玫, 等. 江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2607-2613.
- Li L, Wang Y L, Jiang M, *et al.* Analysis of the source, potential biological toxicity of heavy metals in the surface sediments from shellfish culture mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(8): 2607-2613.
- [47] 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.
- [48] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(3): 313-324.
- [49] 夏建东, 龙锦云, 高亚萍, 等. 巢湖沉积物重金属污染生态风险评价及来源解析[J]. *地球与环境*, 2020, **48**(2): 220-227.
- Xia J D, Long J Y, Gao Y P, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metal pollutions in sediments of the Chaohu Lake[J]. *Earth and Environment*, 2020, **48**(2): 220-227.
- [50] 邵莉, 肖化云, 吴代赦, 等. 交通源重金属污染研究进展[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(3): 445-459.
- Shao L, Xiao H Y, Wu D S, *et al.* Review on research on traffic-related heavy metals pollution [J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(3): 445-459.
- [51] Kemp K. Trends and sources for heavy metals in urban atmosphere[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2002, **189**(1-4): 227-232.
- [52] Faiz Y, Tufail M, Javed M T, *et al.* Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan [J]. *Microchemical Journal*, 2009, **92**(2): 186-192.
- [53] 李丽锋, 苏芳莉, 关驰, 等. 造纸废水灌溉对湿地土壤重金属累积影响及趋势评价[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2964-2970.
- Li L F, Su F L, Guan C, *et al.* The effect of irrigation with paper-making wastewater on the accumulation of heavy metals and their fate assessment in wetland soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2964-2970.
- [54] 王里奥, 宋珍霞, 丁世敏, 等. 垃圾焚烧飞灰中 As 和 Hg 的粒径分布及浸出特性研究[J]. *安全与环境学报*, 2009, **9**(1): 62-65.
- Wang L A, Song Z X, Ding S M, *et al.* Research on the distribution of the particle sizes and leaching characteristics of arsenic and mercury in MSWI fly ash[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2009, **9**(1): 62-65.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAQ Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China, 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)