

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)

植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)

基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)

不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)

北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)

武汉冬季大气 PM_{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)

运城市 PM_{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析 王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)

中国东部冷锋推进中的 PM_{2.5} 三维结构变化特征 牟南南, 朱彬, 卢文 (85)

粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)

西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)

拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)

杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)

上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 金丹 (132)

铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O₃ 和 SOA 形成潜势分析 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)

电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)

不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)

淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)

昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)

城市路面积尘微塑料污染特征 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)

塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)

赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)

无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)

白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 (230)

九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)

北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)

城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)

苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)

苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)

信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)

三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)

李家河水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)

岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)

宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)

快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)

长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)

洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)

基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)

三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 通量支干流对比及影响机制初探 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)

功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb²⁺ 的吸附行为 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 任嗣利 (387)

铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)

沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)

温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)

填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)

基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)

浙中典型硫铁矿田土壤重金属含量特征及健康风险 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)

农产品视角的城郊黑土地田土壤重金属风险分区 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)

基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)

调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)

设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)

电子垃圾拆解固废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)

雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)

重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)

长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)

土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)

化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)

秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)

全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 闫文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)

秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评价

王晓东, 田伟, 张雪艳*

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要: 为探究宁夏地区地下水中金属元素分布特征及评价其对人类健康的危害, 对宁夏地区 210 组地下水样品中 8 种金属元素(As、Cr、Al、Cu、Pb、Mn、Fe 和 Sr) 进行分析, 分别运用综合污染评价法、多元统计分析和健康风险评价模型揭示了宁夏地下水中金属元素的污染特征、分布状况和健康风险。结果表明, 研究区地下水金属元素平均质量浓度排序为: $\rho(\text{Sr}) > \rho(\text{Al}) > \rho(\text{Mn}) > \rho(\text{Cu}) > \rho(\text{Pb}) > \rho(\text{Cr}) > \rho(\text{As}) > \rho(\text{Fe})$, 其中 75.24% 的样品中 $\rho(\text{Sr})$ 达到饮用天然矿泉水国家标准; 地下水中 $\rho(\text{As})$ $76.60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{Cr})$ $145.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{Pb})$ $59.93 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $\rho(\text{Mn})$ $734.67 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的最大值均高于我国地下水质量标准(GB/T 14848-2017) III 类水标准限值。与自然对照相比研究区受 As 和 Pb 污染较为严重, 呈面状分布; Mn 和 Cr 污染相对集中, 分别集中在北部黄河两侧和东南部, 其余金属均污染较轻。多元统计结果表明, As 和 Pb 污染可能由自然因素、工业活动和大量使用农药引起, Mn 污染可能由采用黄河水灌溉引起, Cr 污染可能是由石油开采造成。健康风险评价结果表明, 饮水途径暴露的健康风险高于皮肤入渗途径且儿童的健康风险高于成人。非致癌健康风险(HI) 主要由 As 经饮水途径引起。研究区内成人和儿童由 As 和 Cr 经饮水和皮肤入渗途径暴露的致癌健康风险值均高于最大可接受风险水平(5.0×10^{-5}), Cr 对两种途径致癌风险的贡献率均在 80% 以上。因此从饮用水安全角度考虑, 需要重点关注地下水中 As 和 Cr 的管控。

关键词: 宁夏地区; 地下水; 金属元素; 分布特征; 健康风险

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0329-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105037

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China

WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan*

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To explore the distribution characteristics of metal elements in groundwater and evaluate the health risks they pose to the population in the Ningxia region of China, a total of 210 groundwater samples were collected, and eight metal elements (As, Cr, Al, Cu, Pb, Mn, Fe, and Sr) in the water samples were analyzed. The pollution characteristics, distribution, and health risks of the metals in the groundwater were revealed by a comprehensive pollution assessment, multivariate statistical analysis, and health risk assessment model, respectively. The results revealed that the mean mass concentrations of metal elements in groundwater from the study area were in the following order: $\rho(\text{Sr}) > \rho(\text{Al}) > \rho(\text{Mn}) > \rho(\text{Cu}) > \rho(\text{Pb}) > \rho(\text{Cr}) > \rho(\text{As}) > \rho(\text{Fe})$. The $\rho(\text{Sr})$ content of 75.24% of the samples exceeded that from drinking natural mineral water [$0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of $\rho(\text{Sr})$] as per China's standard. The maximum $\rho(\text{As})$ $76.60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Cr})$ $145.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Pb})$ $59.93 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, and $\rho(\text{Mn})$ $734.67 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ exceeded the corresponding standard limits. Compared with the natural control, the As and Pb pollution in the study area was more serious, showing a planar distribution. Mn and Cr pollution were relatively concentrated, mainly distributed in the northern Yellow River and southeast, respectively. Other metals were lightly polluted. The results of the multivariate statistical analysis showed that the concentrations of As and Pb pollution may be caused by natural factors, industrial activities, and the use of pesticides. Mn pollution may be caused by irrigation with the Yellow River. Cr pollution may be caused by mining for oil. The health risk assessment showed that the health risk to children was higher than that to adults, and the risk of drinking water exposure was higher than that of skin infiltration exposure. The non-carcinogenic health risk (HI) was mainly caused by As through the drinking water pathway. Due to the pollution of As and Cr, the carcinogenic risk through the drinking water and skin penetration pathways to children and adults in the study area was higher than the safety level (5.0×10^{-5}). The contribution rate of Cr to the carcinogenic risk through the two pathways was greater than 80%. For drinking water safety, the concentrations of As and Cr should be controlled before drinking.

Key words: Ningxia region; groundwater; metal elements; distribution characteristics; health risk

地下水是干旱地区和半干旱地区居民生活、农业和工业发展的主要水资源^[1]。但这些地区城市化发展、矿产资源的开采和化肥农药无节制使用, 导致地下水中氟化物、硝酸盐、多环芳烃和金属等有害物质急剧上升^[2,3]。地下水中的金属污染物相对其他污染物具有较强的持久性、生物毒性和不可降解性^[4], 它们主要通过饮用和皮肤入渗的途径大量富集在人类体内^[5], 进而影响人体肾脏和心脏等器官的功能, 同时也会诱发癌症和心脑血管等疾病产生^[6-8]。因此, 为了有效地控制地下水中金属元素引起的健康风险, 有必要探明金属元

素的分布特征和潜在的污染源^[9]。Qiao 等^[10]于 2018 年对中国关中平原地下水调查中发现, 浅层地下水主要受 Cr 和 As 污染, 成人和儿童长期使用该地下水存在较高的致癌健康风险。然而, 由于健

收稿日期: 2021-05-06; 修订日期: 2021-06-18

基金项目: 宁夏园艺学国家一流建设学科项目(2021-2025); 自治区科技创新领军人才项目(KJT2017001); 宁夏大学贺兰山学者项目(2020); 宁夏大学研究生创新项目(GIP2020040)

作者简介: 王晓东(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水微咸水环境与园艺作物品质生产, E-mail: 15164720693@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangxueyan123@sina.com

康风险评价模型中成人与儿童体重和接触面积等参数的差异,导致儿童比成人存在更高的健康风险^[11].此外,传统健康风险评价模型受到某些参数(体重、年龄和饮水量等)的不确定性限制,往往会低估或高估风险程度^[12],而 Orosun^[13]在对尼日利亚部分矿区地下水健康风险评价研究中发现,采用 Monte Carlo 模拟可有效改善传统模型的不足.与此同时,一些学者通过采用正定矩阵因子分解模型、因子分析和聚类分析等来识别地下水中金属来源,为进一步风险控制、地下水安全和可持续利用提供了可靠的科学依据^[14,15].

宁夏地处中国西北内陆,水资源较为匮乏,地下水是当地居民的主要生活水源^[16].随着 20 世纪西部大开发战略和“一带一路”战略推进,宁夏工业、农业及各项人类活动日益频繁,地下水安全逐渐受到重视^[17].近年来, Li 等^[18]在宁夏威宁平原黄河附近地下水调查中发现,地下水受造纸厂和工厂等人类活动影响,存在 Cr 和 Mn 污染;由于沉积物溶解和人类活动等因素,宁夏银川地区地下水具有较高的 As 含量,致癌健康风险较高区域约占总面积的 65.10%^[19].此外,工业废水、生活污水和生活垃圾等通过渗透作用持续污染着当地地下水^[20,21].因此揭示宁夏地区地下水中金属元素的分布特征和健康风险评价是十分必要的.

本研究主要目的是通过探究宁夏地区地下水中金属元素的空间分布特征,明确研究区金属污染程度,利用健康风险评价模型和 Monte Carlo 模拟评价研究区地下水对成人和儿童产生的健康风险,从而保障宁夏地区居民的健康与地下水的科学利用及治理.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区位于中国西北内陆干旱区(35°14'N~39°23'N, 104°17'E~107°39'E),北接内蒙古,西、南与甘肃相邻,东与陕西相邻,总面积为 $6.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[21].研究区地势南高北低,呈三级地势阶梯形下降,全区平均海拔 1 000 m 以上,属温带大陆性干旱和半干旱气候^[22].研究区光能充足,年日照时长约为 2 194~3 082 h,年平均气温 5~9℃,年平均降水量约为 200~680 mm,且主要集中在夏季,年蒸发量介于 1 214~2 803 mm 之间^[22].

根据地下水的水动力特征、含水层类型和赋存条件可将研究区地下水划分为 2 类,即北部川区属第四纪沉积物孔隙水,南部山区属第四纪沉积物岩溶水^[22,23].第四纪沉积物孔隙水和岩溶水是研究区

主要开采的地下水.近年来,受工业、农业和自然因素的影响,研究区地下水已受到不同程度的污染^[18,19].

1.2 样品采集与测试

本研究于 2020 年 9 月共采集 210 个地下水样品,均为井水样品,每个样点均采用 GPS 定位,样点分布见图 1.每个样品待井抽水 10 min,地下水化学条件趋于稳定后进行采样,所有样品均通过 0.45 μm 滤膜过滤,样品保存在经去离子水冲洗后的棕色聚乙烯塑料瓶中(500 mL),并加入 2 mL(1:1)硝酸以保证金属元素的稳定性.所有样品均在 4℃ 冰箱避光保存.样品中 As、Cr、Al、Cu、Pb、Mn、Fe 和 Sr 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国 Perkin-Elmer)测定.每个样品均设置 3 次重复,所有元素测试结果标准偏差均低于 5%,加标回收率均处于 90% 左右.

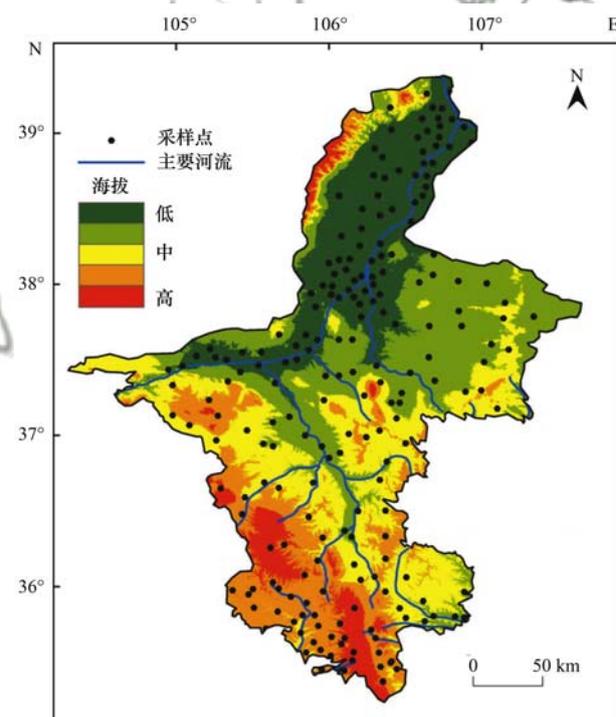


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.3 综合污染评价法

单指标污染标准指数法是由张兆吉等^[24]提出并在华北平原区域地下水污染评价中使用,该方法可直接反映地下水污染情况,从而针对性地对地下水污染进行治理.由于摄入富含 Sr 的食物和水有利于减少人类心脑血管等疾病的产生^[25],且 Sr 在《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)未规定为污染物^[26,27],因此将不对其进行污染等级评价及健康风险评价.本研究采用单指标污染标准指数法对宁夏地区地下

水中 As、Cr、Al、Cu、Pb、Mn 和 Fe 进行污染评价, 其计算公式如下:

$$P_i = (c_i - c_{oi})/c_{\text{III}i} \quad (1)$$

式中, P_i 表示第 i 种金属的污染指数; c_i 表示第 i 种金属的质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_{oi} 表示第 i 种金属的自然对照值, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $c_{\text{III}i}$ 表示第 i 种金属的指标限值, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 具体参照文献[26,27].

由于毒性金属在原生态地下水中质量浓度极

低, 因此将 As、Cr 和 Pb 的对照值设为 0, Al、Cu、Mn 和 Fe 的对照值参照南部山区原始森林处(人类活动较少区域)样本的质量浓度, 其值分别为 19.25、43.74、17.77 和 13.61 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 各金属的污染等级参照见表 1.

综合污染等级的确定遵循从劣不从优的原则, 即按照各样点单指标评价污染最为严重的指标等级来确定该样点综合污染等级^[24].

表 1 单指标污染标准指数评价分级

Table 1 Single factor standard index grade

项目	P_i					
	≤ 0	$>0 \sim 0.2$	$>0.2 \sim 0.6$	$>0.6 \sim 1$	$>1 \sim 1.5$	>1.5
污染等级	I	II	III	IV	V	VI
污染类别	未污染	轻污染	中污染	较重污染	严重污染	极重污染

1.4 健康风险评价模型

一般而言, 金属可通过直接摄入、皮肤入渗和呼吸方式进入到人体, 而通过饮用摄入及皮肤入渗是地下水中金属进入人体的主要方式^[28]. 研究采用中华人民共和国环境保护部推荐的水体中有害物质健康风险评价模型分别对成人和儿童通过两种途径暴露的非致癌与致癌健康风险做出评价^[29]. 中国环境保护部推荐的健康风险评价模型是以美国环保署 (USEPA) 推荐的健康风险评价模型为基础, 然而中国的模型制定了独特的参数来反映中国的具体情况^[18].

危险商 (HQ) 通常被用来评估非致癌健康风险, 其表达式如下:

$$\text{HQ}_{\text{ing/derm}} = \text{Exp}_{\text{ing/derm}}/\text{RfD}_{\text{ing/derm}} \quad (2)$$

$$\text{Exp}_{\text{ing}} = c_w \cdot \text{IR} \cdot \text{EF} \cdot \text{ED}/(\text{BW} \cdot \text{AT}) \quad (3)$$

$$\text{Exp}_{\text{derm}} = \frac{c_w \cdot \text{SA} \cdot K_p \cdot \text{ET} \cdot \text{EF} \cdot \text{ED} \cdot \text{CF}}{\text{BW} \cdot \text{AT}} \quad (4)$$

$$\text{SA} = 239 \cdot H^{0.417} \cdot \text{BW}^{0.517} \quad (5)$$

式中, $\text{HQ}_{\text{ing/derm}}$ 表示经饮用水/皮肤入渗摄入的危险商; Exp_{ing} 表示某元素通过饮水摄入的平均每日暴露量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; Exp_{derm} 表示某元素通过皮肤入渗的平均每日暴露量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; RfD 表示某化学元素推荐的每日平均摄入量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 各元

素的 RfD 值见表 2; c_w 表示水样中某金属的质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; IR 表示饮用水摄入量, 成人为 1.5 $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$, 儿童为 0.7 $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[18]; EF 表示暴露频率, 通常为 365 $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$; ED 表示持续暴露时间, 成人的暴露时间为 30 a, 儿童为 12 a^[10,18]; BW 表示宁夏居民平均体重, 成人为 70 kg, 儿童为 15 kg^[17]; AT 表示平均暴露时间, 成人为 10 950 d, 儿童为 4 380 d ^[18]; SA 表示皮肤的暴露面积, cm^2 ; H 表示宁夏居民平均身高, 成人为 165.3 cm, 儿童为 99.4 cm ^[18, 29]; K_p 表示皮肤渗透系数, $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$, 各元素的 K_p 值见表 2; ET 表示暴露时间, 成人和儿童分别为 0.633 3 $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 0.416 7 $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$; CF 为单位转换系数, 为 0.001^[11,30].

累积的非致癌健康风险, 通常是以 HI 表示, 该值为各元素 HQ 的总和, 计算公式如下:

$$\text{HI} = \sum \text{HQ}_{\text{ing/derm}} \quad (6)$$

式中, HI 表示总非致癌健康风险值, 当其大于 1 时, 表明该水样对人体具有较大的潜在影响.

致癌健康风险 ($\text{CR}_{\text{ing/derm}}$) 计算公式如下:

$$\text{CR}_{\text{ing/derm}} = \text{EXP}_{\text{ing/derm}} \cdot \text{SF}_{\text{ing/derm}} \quad (7)$$

式中, $\text{SF}_{\text{ing/derm}}$ 表示饮用摄入或皮肤渗透摄入的斜率因子, $(\text{kg}\cdot\text{d})\cdot\text{mg}^{-1}$, 各元素的 SF 值见表 2. 根据国

表 2 健康风险评价模型相关参数值^[13,29]

Table 2 Values of parameters related to the health risk assessment

金属元素	$K_p \times 10^{-3}$ $/\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{SF}/(\text{kg}\cdot\text{d})\cdot\text{mg}^{-1}$		$\text{RfD}/\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	
		饮用水摄入	皮肤渗透	饮用水摄入	皮肤渗透
As	1.8	1.5	3.66	0.000 3	0.000 123
Cr	2	41	41	0.003	0.003
Al	10	— ¹⁾	—	0.14	0.14
Cu	0.6	—	—	0.04	0.012
Pb	0.004	—	—	0.001 4	0.000 42
Mn	0.1	—	—	0.046	0.001 8
Fe	0.1	—	—	0.3	0.045

1) “—”表示无相应参考标准值

际癌症研究机构(IARC)与世界卫生组织(WHO)的规定,As 和 Cr 元素为化学致癌元素^[15,29],因此在本研究中对 As 和 Cr 元素的致癌风险进行了估算.当 $CR_{ing/derm}$ 值大于 5.0×10^{-5} 时则具有较高的致癌健康风险^[31].

1.5 Monte Carlo 模拟

Monte Carlo 模拟具有降低事件不确定性的优势,在评估食品和水等领域的健康风险中广泛应用^[32].在水体健康风险研究中,人体体重、饮水量和污染物浓度均是健康风险评价结果不确定性的来源,使用 1.4 节中的公式可能低估或高估健康风险^[33].因此通过 Monte Carlo 随机模拟,可更科学和合理地评估致癌风险.用于实现 Monte Carlo 模拟的软件为 Oracle Crystal Ball(11.1.2.4.850).

1.6 数理统计

原始数据的整理和计算均在 Excel 2019 软件中进行,利用 Matlab 2019 软件对数据进行因子分析和

Pearson 相关性分析,从而探明水样中各金属元素的内在联系.采样点分布、金属空间分布和污染特征分布均在 ArcMap10.6 软件中绘制.

2 结果与讨论

2.1 地下水金属元素空间分布特征

地下水样品中各金属的描述性统计见表 3,各金属平均质量浓度顺序为: $\rho(\text{Sr}) > \rho(\text{Al}) > \rho(\text{Mn}) > \rho(\text{Cu}) > \rho(\text{Pb}) > \rho(\text{Cr}) > \rho(\text{As}) > \rho(\text{Fe})$,均呈正态分布.地下水样品中各金属的空间分布特征见图 2,在人为活动和自然条件影响下,各金属元素空间分布特征具有一定差异性且表现出较高的空间变异性($CV > 30\%$),尤其是 As、Cr 和 Mn,其变异系数分别为 104.94%、128.93% 和 203.95%,这表明某些采样点金属质量浓度相对较高,可能存在点源污染.此外 Mn 的峰度相对较高,表明存在异常高的值,可能和人为活动有关.

表 3 地下水样品中金属的描述性统计¹⁾

Table 3 Descriptive statistics for metals in groundwater samples

金属	最大值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	最小值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	标准差/%	变异系数/%	超标率/%	偏度	峰度
As	76.60	0	12.93	13.56	104.94	52.38	2.60	8.27
Cr	145.01	0	20.14	25.97	128.93	9.52	2.98	9.50
Al	100.66	1.33	47.64	31.66	50.52	0	0.09	-0.45
Cu	54.40	2.33	38.45	12.15	31.60	0	-0.70	-0.78
Pb	59.93	0.45	27.11	21.24	78.36	60.00	-0.08	-1.57
Mn	734.67	0.03	42.09	85.85	203.95	72.86	4.47	25.35
Fe	30.00	0.17	9.13	6.41	70.17	0	-0.20	-1.20
Sr	2 425.33	3.40	451.54	428.37	94.87	—	2.35	6.16

1) “—”表示无该计算结果,黑体字表示该质量浓度超标

根据文献[26,27],地下水中 $\rho(\text{Mn})$ 、 $\rho(\text{Pb})$ 、 $\rho(\text{As})$ 和 $\rho(\text{Cr})$ 的最大值均超过安全限值(表 3).在所有样品中, Mn 超标率高达 72.86%, $\rho(\text{Mn})$ 较高的样点主要分布在宁夏北部地区,As 和 Pb 也呈现出同样的趋势. Cr 超标率相对较低,主要集中在东南部.而与《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) IV 类水限定标准相比,仅 6 个样点的 As 存在超标,其余元素均处于限值之内.因此宁夏部分地区地下水不宜直接作为集中式生活供水,适合农业和工业用水,在适当处理后也可作为饮用水源.

此外,有 75.24% 的样点 $\rho(\text{Sr})$ 达到文献[34]规定的 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除东南部区域,其余区域 $\rho(\text{Sr})$ 整体较高.

2.2 地下水金属元素污染特征

研究区地下水污染评价结果见图 3,与自然对照相比研究区内的化学致癌金属元素 As 的污染程度较为严重,均处于中污染以上,在石嘴山市、银川市和吴忠市呈现极重污染; Cr 污染程度在东南部表

现为极重污染,并呈现出逐渐向四周扩散的趋势.研究区内的化学非致癌金属元素 Pb 污染极为严重,约 60% 的区域处于极重污染,南部区域污染程度则相对较轻. Mn 在北部部分地区呈现极重污染,且主要分布在黄河两侧. Al、Fe 和 Cu 在整个研究区范围内基本呈现轻污染及以下水平,仅极少数地区 Al 呈现中度污染.

综合污染评价等级表明,研究区地下水存在不同程度的污染,绝大多数地区的地下水呈极重污染状态,其中起主导作用的是 As 与 Pb; 南部地区属于自然保护区,地下水受工业、人为活动影响相对较低,所以污染较轻^[23].

2.3 多元统计分析

研究区地下水中各金属元素的 Pearson 相关性见图 4. As、Cu、Pb 和 Fe 这四者间呈正相关($P < 0.05$),这表明其可能具有共同的来源;而 Mn、Cr、Al 和 Sr 之间并无显著相关性.

研究区内地下水中金属元素的因子分析见表

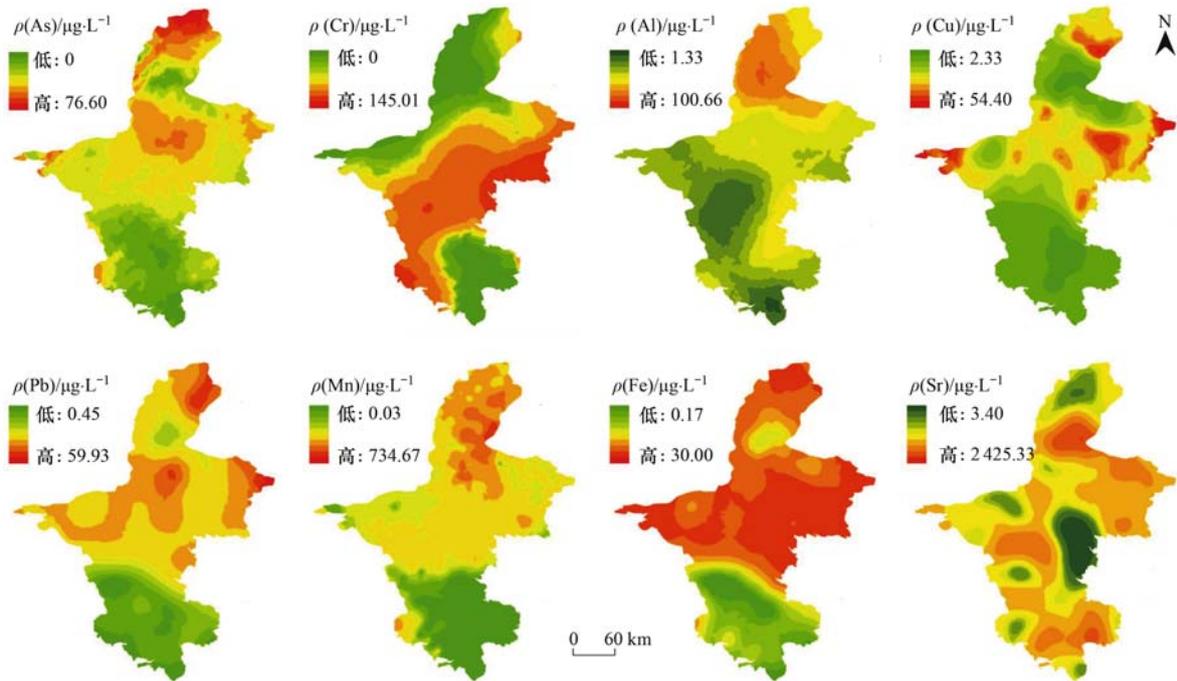


图2 地下水中金属的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of metals in groundwater

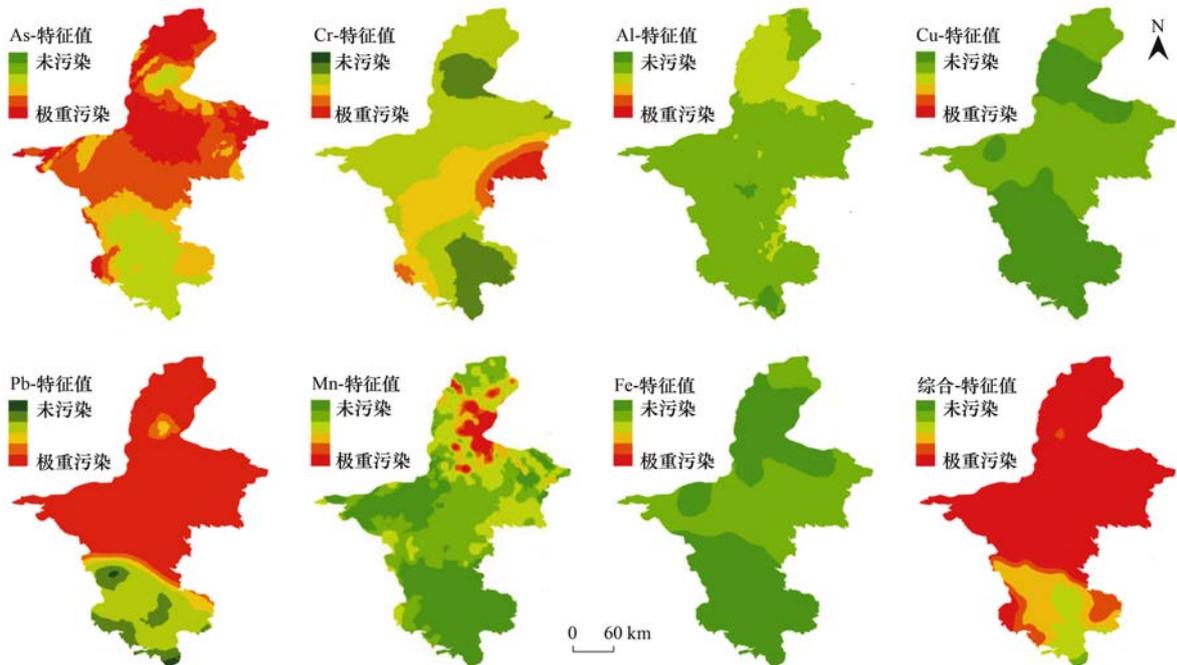


图3 金属元素污染特征

Fig. 3 Characteristics of metal pollution in groundwater

4, 提取特征值大于1的两个因子, 它们解释了总方差的62.17%. 因子1显示As、Cu、Pb和Fe具有较高的负荷量, 这一结果与Pearson相关性分析结果相同, 一般而言, 这些元素的来源主要来自于沉积物溶解、工业活动和汽车尾气等^[13]. 由图3可知, 污染物 $\rho(\text{As})$ 、 $\rho(\text{Cu})$ 、 $\rho(\text{Pb})$ 和 $\rho(\text{Fe})$ 最高的样点主要分布在研究区冶金、化工和采矿的北部及东南部地区, 因此造成这些地区As、Cu、Pb和Fe污染主要

原因可能来自工业活动和汽车尾气等, 其余地区则无明显的点源分布, 这些元素的另一来源可能是沉积物溶解^[32,33]. 此外As与Cu、Pb和Fe的相关性相对较弱, 这意味着其可能具有其它的污染源, 如农药和杀虫剂等^[13,35].

因子2中Al、Mn和Sr的负荷量较高, 但在相关性分析中其相关性不显著, 且污染物分布不具有较高的相似性, 因而其来源可能不同. 张敏^[36]在宁



图 4 地下水中金属元素 Pearson 相关性

Fig. 4 Pearson correlation of metal elements in groundwater

夏平原引黄灌区重金属污染特征研究中发现,受人类活动和工业排放等的影响,黄河宁夏段下游中 $\rho(\text{Mn})$ 较高,而在研究区地下水中 Mn 污染主要集中在黄河宁夏段下游的引黄灌区,因此,利用受 Mn 污染的黄河水进行农业灌溉,可能是造成该地区地下水锰污染的主要原因.高旭波等^[23]在中国北方岩溶地下水污染的研究中发现,受地质背景的影响,我国北方地区的地下水均呈弱碱性,Al 和 Sr 等碱金属的质量浓度较高,此外,人类活动也加

表 4 地下水金属元素的因子分析

Table 4 Factor analysis of metal elements in groundwater

项目	特征值	方差百分比/%	负荷量							
			As	Cr	Al	Cu	Pb	Mn	Fe	Sr
因子 1	3.38	42.21	0.66	0.14	0.03	0.96	0.91	-0.16	0.93	-0.54
因子 2	1.60	19.96	0.14	-0.34	0.70	0.01	0.24	0.74	0.17	0.59

2.4 地下水金属元素健康风险评价

2.4.1 评价单元划分

上述研究表明,研究区地下水金属污染源在南部、中部和北部各不相同,且污染等级差异较为明显,因此以区域土地利用方式和气候为参考,将研究区划分为 3 个评价单元(图 5),从而科学和合理地评估地下水健康风险.

2.4.2 健康风险评价

地下水中金属元素分别经饮水途径和皮肤入渗途径暴露的人群非致癌健康风险评价结果见表 5.由 7 种金属引起的非致癌健康风险程度高低为:北部引黄区 > 中部干旱区 > 南部山区,且儿童的非致癌健康风险均高于成人.由表 5 可知,通过饮水途径暴露的人群非致癌健康风险仅南部山区的成人 $\text{HI} < 1$,其他地区的成人和儿童均处于较高风险($\text{HI} >$

速了研究区内土壤沉积物中 Al 和 Sr 的溶解^[37].石油开采中原油的泄漏和沉积物溶解均会导致地下水受到 Cr 等金属的污染,本研究中 Cr 污染程度最严重区域位于黄土高原油气田区,因此该结果可能是由石油开采所导致,而其余地区则受到成土母质影响^[38,39].

多元统计分析表明,农业活动、工业活动、汽车尾气、矿产资源开采和沉积物溶解对宁夏地区地下水金属质量浓度具有较大影响.

1),HI 最高为北部引黄区的儿童.HI 评价结果表明,非致癌健康风险主要受到 As 影响,虽然 Mn 具有较高的质量浓度,但其 HQ 值远小于 1,因而对人类健康并无显著影响.3 个评价单元通过皮肤入渗途径暴露的 HI 均小于 1,因此金属通过皮肤入渗的途径对人类的健康影响较小.

地下水中金属元素分别经饮水途径和皮肤入渗途径暴露的人群致癌健康风险见表 6,在各评价单元中,Cr 的致癌健康风险值均高于 As,两种致癌金属经皮肤入渗暴露的致癌风险均小于饮水途径.两种金属经饮水途径暴露的致癌健康风险值均超过国际辐射防护委员会(ICRP)公布的 5×10^{-5} ;除此之外,Cr 经皮肤入渗的方式也暴露出较高的致癌风险.研究表明,长时间摄入 As 与 Cr 可能导致肺癌、皮肤癌、肾癌和肝癌^[8].

表 5 地下水中金属元素分别经饮水途径和皮肤入渗途径暴露的人群非致癌健康风险¹⁾

Table 5 Non-carcinogenic health risks exposed by metals in groundwater through the drinking and skin penetration pathways, respectively

项目	金属元素	北部引黄区		中部干旱区		南部山区	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
饮用水摄入	As	2.13	4.89	1.57	3.60	5.85×10^{-1}	1.34
	Cr	1.20×10^{-1}	2.80×10^{-1}	3.11×10^{-1}	7.12×10^{-1}	2.22×10^{-1}	5.08×10^{-1}
	Al	1.41×10^{-2}	3.23×10^{-2}	9.94×10^{-3}	2.28×10^{-2}	9.93×10^{-3}	2.13×10^{-2}
	Cu	3.19×10^{-2}	7.30×10^{-2}	3.72×10^{-2}	8.51×10^{-2}	2.04×10^{-2}	4.67×10^{-2}
	Pb	8.57×10^{-1}	1.96	9.16×10^{-1}	2.10	5.67×10^{-2}	1.30×10^{-1}
	Mn	6.59×10^{-2}	1.51×10^{-1}	2.86×10^{-2}	6.54×10^{-2}	6.99×10^{-3}	1.60×10^{-2}
	Fe	1.08×10^{-3}	2.47×10^{-3}	1.53×10^{-3}	3.50×10^{-3}	1.75×10^{-4}	4.00×10^{-4}
	HI	3.22	7.39	2.87	6.58	9.01×10^{-1}	2.06
皮肤入渗途径	As	4.85×10^{-2}	3.97×10^{-2}	3.57×10^{-2}	2.92×10^{-2}	1.33×10^{-2}	1.09×10^{-2}
	Cr	1.25×10^{-3}	1.03×10^{-3}	3.22×10^{-3}	2.64×10^{-3}	2.30×10^{-3}	1.88×10^{-3}
	Al	7.30×10^{-4}	1.35×10^{-3}	5.15×10^{-4}	9.49×10^{-4}	4.83×10^{-4}	8.89×10^{-4}
	Cu	3.30×10^{-4}	6.08×10^{-4}	3.89×10^{-2}	8.92×10^{-2}	2.11×10^{-4}	3.89×10^{-4}
	Pb	5.92×10^{-5}	1.09×10^{-4}	3.85×10^{-4}	7.09×10^{-4}	3.92×10^{-6}	7.22×10^{-6}
	Mn	8.73×10^{-4}	1.61×10^{-3}	3.78×10^{-4}	6.97×10^{-4}	9.26×10^{-5}	1.71×10^{-4}
	Fe	5.58×10^{-9}	1.03×10^{-8}	7.92×10^{-9}	1.46×10^{-8}	9.05×10^{-10}	1.67×10^{-9}
	HI	5.18×10^{-2}	4.44×10^{-2}	4.03×10^{-2}	3.43×10^{-2}	1.64×10^{-2}	1.42×10^{-2}

1) 黑体字表示非致癌健康风险超过允许的最大值

表 6 地下水中金属元素分别经饮水途径和皮肤入渗途径暴露的人群致癌健康风险¹⁾

Table 6 Carcinogenic health risk exposed by metals in groundwater through the drinking and skin penetration pathways, respectively

项目	金属元素	北部引黄区		中部干旱区		南部山区	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
饮用水摄入	As	9.60×10^{-4}	2.20×10^{-3}	7.06×10^{-4}	1.62×10^{-3}	2.63×10^{-4}	6.03×10^{-4}
	Cr	1.49×10^{-2}	3.41×10^{-2}	3.82×10^{-2}	8.76×10^{-2}	2.73×10^{-2}	6.25×10^{-2}
	合计	1.58×10^{-2}	3.63×10^{-2}	3.89×10^{-2}	8.92×10^{-2}	2.76×10^{-2}	6.31×10^{-2}
皮肤入渗途径	As	2.19×10^{-5}	1.79×10^{-5}	1.61×10^{-5}	1.32×10^{-5}	5.99×10^{-6}	4.90×10^{-6}
	Cr	1.54×10^{-4}	1.26×10^{-4}	3.96×10^{-4}	1.64×10^{-4}	2.83×10^{-4}	2.32×10^{-4}
	合计	1.76×10^{-4}	1.44×10^{-4}	4.12×10^{-4}	3.38×10^{-4}	2.89×10^{-4}	2.36×10^{-4}

1) 黑体字表示该致癌健康风险超过允许的最大值

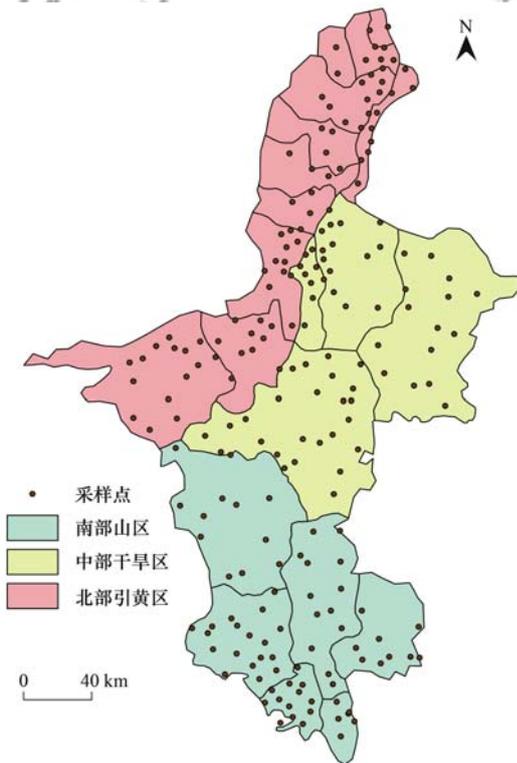


图 5 地下水健康风险评价单元

Fig. 5 Groundwater health risk assessment unit

2.5 致癌健康风险的 Monte Carlo 模拟

2.5.1 模拟结果

地下水作为当地的主要生活水源,且大众对其致癌风险关注程度较高,因此采用 Monte Carlo 随机模拟对水样致癌健康风险进一步评价. Monte Carlo 模拟共随机迭代 30 000 次,确定了致癌健康风险分布的第 5 分位值、第 95 分位值和平均值,结果见表 7. 概率风险评价结果与传统风险评价结果相似,其总致癌健康风险平均值均超过 ICRP 的限定值(5×10^{-5}). 但与第 95 分位值相比,传统风险评价结果较小,这可能误导对该区域地下水污染治理的措施建议. 因此基于 Monte Carlo 模拟的致癌风险模拟评价结果更具有科学意义和现实价值.

2.5.2 敏感性分析

采用 Monte Carlo 随机取样统计分析法对各参数进行敏感性分析,从而确定各参数对致癌健康风险值的影响程度. 对 As、Cr、饮水量、体重和身高进行敏感性分析,结果显示, Cr 对各评价单元的致癌健康风险贡献率均在 80% 以上(表 8),因此 Cr 为

影响致癌风险的主要因素,而 As、饮水量、体重和身高对致癌风险评价影响相对较小.因此在致癌风

险评价中应提高对 Cr 的测试精度从而降低评价结果的不确定性.

表 7 基于 Monte Carlo 模拟后的致癌健康风险

Table 7 Carcinogenic health risk based on Monte Carlo simulation

项目	类型	北部引黄区		中部干旱区		南部山区	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
饮用水摄入	第 5 分位值	4.41×10^{-3}	1.03×10^{-2}	-0.19×10^{-2}	-7.04×10^{-2}	-4.77×10^{-4}	-1.08×10^{-1}
	第 95 分位值	2.84×10^{-2}	6.5×10^{-2}	1.14×10^{-1}	2.60×10^{-1}	1.02×10^{-1}	2.38×10^{-1}
	平均值	1.60×10^{-2}	3.64×10^{-2}	3.93×10^{-2}	9.04×10^{-2}	2.73×10^{-2}	6.49×10^{-2}
皮肤入渗途径	第 5 分位值	5.38×10^{-5}	3.57×10^{-5}	-3.25×10^{-4}	-2.63×10^{-5}	-4.82×10^{-4}	-3.99×10^{-4}
	第 95 分位值	3.12×10^{-4}	2.64×10^{-4}	1.18×10^{-3}	9.69×10^{-4}	1.07×10^{-3}	8.76×10^{-4}
	平均值	1.78×10^{-4}	1.45×10^{-4}	4.15×10^{-4}	3.44×10^{-4}	2.96×10^{-4}	2.39×10^{-4}

表 8 Cr 对总致癌风险健康风险的贡献率/%

Table 8 Contribution rate of Cr to total carcinogenic health risk/%

摄入途径	北部引黄区		中部干旱区		南部山区	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
饮用水摄入	89.71	89.90	99.82	99.80	99.30	99.21
皮肤入渗途径	82.20	85.51	98.39	99.29	99.29	99.31

3 结论

(1)地下水金属元素平均质量浓度顺序为: $\rho(\text{Sr}) > \rho(\text{Al}) > \rho(\text{Mn}) > \rho(\text{Cu}) > \rho(\text{Pb}) > \rho(\text{Cr}) > \rho(\text{As}) > \rho(\text{Fe})$, 地下水体中 $\rho(\text{Sr})$ 较高, 其中 75.24% 的地下水采样点 $\rho(\text{Sr})$ 达到《饮用天然矿泉水国家标准》(GB 8537-2008) 标准. 地下水中金属元素 $\rho(\text{As})$ 、 $\rho(\text{Cr})$ 、 $\rho(\text{Mn})$ 和 $\rho(\text{Pb})$ 的最大值均高于我国地下水质量标准(GB/T 14848-2017) III 类水标准限值. 但与地下水质量标准 IV 类水限定标准相比, 仅 6 个样点的 As 存在超标, 其余元素均处于限值之内. 研究区地下水化学组分含量较高, 适用于农业和部分工业生产, 适当处理后也可用作居民生活水源.

(2)污染指数表明, 与自然对照相比研究区地下水 As 和 Pb 污染面积较大, 主要由沉积物溶解和工业活动等引起. Cr 和 Mn 污染分别受石油开采和采用黄河水灌溉影响, 分布较为集中.

(3)由 7 种金属引起的健康风险评价结果表明, 饮水途径暴露的健康风险高于皮肤入渗途径且儿童健康风险高于成人. 非致癌健康风险主要由 As 经饮水途径引起, 不同健康风险评价单元的非致癌健康风险排序为: 北部引黄区 > 中部干旱区 > 南部山区, 除南部山区成人外, 其余地区成人和儿童通过饮水途径暴露的 HI 均高于安全限值 1; 研究区内成人和儿童由 As 和 Cr 经饮水途径和皮肤入渗途径暴露的致癌健康风险值均高于 ICRP 规定的最大可接受风险值 5.0×10^{-5} . Monte Carlo 敏感性分析结果表明, Cr 对总致癌健康风险具有较高的贡献率. 从

饮用水安全角度考虑, 需重点关注地下水中 As 和 Cr 的管控.

参考文献:

- [1] Adimalla N, Qian H, Nandan M J. Groundwater chemistry integrating the pollution index of groundwater and evaluation of potential human health risk: a case study from hard rock terrain of south India [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **206**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111217.
- [2] Gao Y Y, Qian H, Ren W H, et al. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121006.
- [3] Kumar R, Mittal S, Sahoo P K, et al. Source apportionment, chemometric pattern recognition and health risk assessment of groundwater from southwestern Punjab, India [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**(2): 733-755.
- [4] He S, Wu J H. Hydrogeochemical characteristics, groundwater quality, and health risks from hexavalent chromium and nitrate in groundwater of Huanhe Formation in Wuqi county, northwest China [J]. *Exposure and Health*, 2019, **11**(2): 125-137.
- [5] Yang S Y, Zhao J, Chang S X, et al. Status assessment and probabilistic health risk modeling of metals accumulation in agriculture soils across China: a synthesis [J]. *Environment International*, 2019, **128**: 165-174.
- [6] Yao B D, Lu X J, Xu L, et al. Relationship between low-level lead, cadmium and mercury exposures and blood pressure in children and adolescents aged 8-17 years: an exposure-response analysis of NHANES 2007-2016 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **726**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138446.
- [7] Wallace D R, Taalab Y M, Heinze S, et al. Toxic-metal-induced alteration in miRNA expression profile as a proposed mechanism for disease development [J]. *Cells*, 2020, **9**(4), doi: 10.3390/cells9040901.
- [8] Coglianò V J, Baan R, Straif K, et al. Preventable exposures associated with human cancers [J]. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 2011, **103**(24): 1827-1839.

- [9] 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2675-2685.
Zhou J M, Jiang Z C, Xu G L, *et al.* Water quality analysis and health risk assessment for groundwater at Xiangshui, Chongzuo [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2675-2685.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Hu B F, Jia X L, Hu J, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze River Delta, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, **14**(9), doi: 10.3390/ijerph14091042.
- [13] Orosun M M. Assessment of arsenic and its associated health risks due to mining activities in parts of North-central Nigeria: probabilistic approach using Monte Carlo [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **412**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125262.
- [14] Huang J L, Wu Y Y, Sun J X, *et al.* Health risk assessment of heavy metal (loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with Positive matrix factorization model [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
- [15] 李军, 赵一, 邹胜章, 等. 会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 184-194.
Li J, Zhao Y, Zou S Z, *et al.* Metal pollutions and human health risks in groundwater from wet, normal, and dry periods in the Huixian karst wetland, China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 184-194.
- [16] Jia X Y, O'Connor D, Hou D Y, *et al.* Groundwater depletion and contamination: spatial distribution of groundwater resources sustainability in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **672**: 551-562.
- [17] 柳凤霞, 史紫薇, 钱会, 等. 银川地区地下水水化学特征演化规律及水质评价[J]. 环境化学, 2019, **38**(9): 2055-2066.
Liu F X, Shi Z W, Qian H, *et al.* Evolution of groundwater hydrochemical characteristics and water quality evaluation in Yinchuan area [J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(9): 2055-2066.
- [18] Li P Y, Li X Y, Meng X Y, *et al.* Appraising groundwater quality and health risks from contamination in a semiarid region of northwest China [J]. Exposure and Health, 2016, **8**(3): 361-379.
- [19] 陈玺, 朱亮, 刘景涛. 银川平原饮用地下水健康风险评价及风险控制研究[J]. 安徽农业科学, 2019, **47**(18): 78-84.
Chen X, Zhu L, Liu J T. Study on health risk assessment and risk control of drinking groundwater in Yinchuan plain [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, **47**(18): 78-84.
- [20] Wu C, Wu X, Qian C, *et al.* Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of high fluoride levels in the Yanchi endorheic region, northwest China [J]. Applied Geochemistry, 2018, **98**: 404-417.
- [21] 张娜, 韩小龙, 汤英, 等. 宁夏石嘴山市引黄灌区地下水时空变化特性及影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, **37**(5): 1124-1131.
Zhang N, Han X L, Tang Y, *et al.* Temporal and spatial characteristics of groundwater and its influencing factors in the Yellow River diversion irrigation area of Ningxia Shizuishan [J]. Arid Zone Research, 2020, **37**(5): 1124-1131.
- [22] 张兆迪, 于开宁, 刘景涛. 银川平原水化学特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2017, **44**(2): 23-30.
Zhang Z D, Yu K N, Liu J T. Analysis of characteristic of hydrogeochemistry in Yinchuan plain [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, **44**(2): 23-30.
- [23] 高旭波, 王万洲, 侯保俊, 等. 中国北方岩溶地下水污染分析[J]. 中国岩溶, 2020, **39**(3): 287-298.
Gao X B, Wang W Z, Hou B J, *et al.* Analysis of karst groundwater pollution in northern China [J]. Carsologica Sinica, 2020, **39**(3): 287-298.
- [24] 张兆吉, 费宇红, 郭春艳, 等. 华北平原区域地下水污染评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, **42**(5): 1456-1461.
Zhang Z J, Fei Y H, Guo C Y, *et al.* Regional groundwater contamination assessment in the North China Plain [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, **42**(5): 1456-1461.
- [25] Iegen B, Yilmaz F. Biosorption of strontium from aqueous solutions by *Micrococcus luteus* SrO₂ [J]. Geomicrobiology Journal, 2018, **35**(4): 284-293.
- [26] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].
- [27] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [28] Xia F, Niu X, Qu L Y, *et al.* Integrated source-risk and uncertainty assessment for metals contamination in sediments of an urban river system in eastern China [J]. CATENA, 2021, **203**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105277.
- [29] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- [30] Khan Y K, Toqeer M, Shah M H. Spatial distribution, pollution characterization and health risk assessment of selected metals in groundwater of Lahore, Pakistan [J]. Geochemistry, 2021, **81**(1), doi: 10.1016/j.chemer.2020.125692.
- [31] Zakir H M, Sharmin S, Akter A, *et al.* Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: a case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh [J]. Environmental Advances, 2020, **2**, doi: 10.1016/j.envadv.2020.100005.
- [32] Karami M A, Fakhri Y, Rezaia S, *et al.* Non-Carcinogenic health risk assessment due to fluoride exposure from tea consumption in Iran using Monte Carlo simulation [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(21), doi: 10.3390/ijerph16214261.
- [33] Augustsson A, Berger T. Assessing the risk of an excess fluoride intake among Swedish children in households with private wells—expanding static single-source methods to a probabilistic multi-exposure-pathway approach [J]. Environment International, 2014, **68**: 192-199.
- [34] GB 8537-2008, 饮用天然矿泉水[S].
- [35] 王磊, 汪文东, 刘懂, 等. 象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3194-3203.
Wang L, Wang W D, Liu D, *et al.* Risk assessment and source analysis of heavy metals in the river of a typical bay watershed

- [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3194-3203.
- [36] 张敏. 宁夏平原引黄灌区重金属污染特征及其两种土地利用类型源解析研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2020.
- [37] 周军明, 袁鹏, 余亮, 等. 八尺风化淋积型稀土矿凝灰岩风化壳中的细粒矿物特征[J]. *矿物学报*, 2018, **38**(4): 420-428.
Zhou J M, Yuan P, Yu L, *et al.* Mineralogical characteristics of fine particles of the tuff weathering crust from the Bachi rare earth element (REE) deposit [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2018, **38**(4): 420-428.
- [38] Orisakwe O E. Crude oil and public health issues in Niger Delta, Nigeria; much ado about the inevitable [J]. *Environmental Research*, 2021, **194**, doi: 10.1016/j.envres.2021.110725.
- [39] Sattar S, Jehan S, Siddiqui S. Potentially toxic metals in the petroleum waste contaminated soils lead to human and ecological risks in Potwar and Kohat Plateau, Pakistan; Application of multistatistical approaches [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, **22**, doi: 10.1016/j.eti.2021.101395.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2020年12月29日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2019年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2019年度总被引频次12 057,影响因子2.256,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i>	(1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil; A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i>	(11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i>	(26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i>	(37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i>	(46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i>	(74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen	(85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i>	(93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i>	(102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i>	(113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i>	(132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i>	(140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i>	(150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i>	(160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i>	(170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i>	(180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i>	(189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i>	(199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i>	(210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i>	(220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i>	(230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i>	(239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i>	(247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i>	(256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i>	(267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i>	(277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i>	(285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i>	(295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i>	(306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan	(329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i>	(349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i>	(363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i>	(369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i>	(377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i>	(387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(398)
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors; Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i>	(416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i>	(424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i>	(432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i>	(442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i>	(454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i>	(463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i>	(472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i>	(481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LU Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i>	(490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i>	(510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i>	(521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i>	(530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i>	(550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i>	(560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i>	(569)