

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子茜, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落叶杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素

刘元晴^{1,2}, 周乐², 吕琳², 李伟², 王新峰², 邓启军², 郑一迪², 李常锁^{1*}

(1. 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, 济南 250014; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051)

摘要: 为研究牟汶河中上游孔隙水化学特征及离子来源, 在牟汶河中上游莱芜盆地采集了孔隙水样品 29 组, 综合利用相关性和主成分分析、Piper 三线图和 Gibbs 图集离子比值等方法, 分析了该区孔隙水主要离子特征及其控制因素, 揭示了该区孔隙水中的主要物质来源。结果表明, 牟汶河中上游孔隙水阴阳离子以 HCO_3^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 为主; 以 $\text{TDS} > 1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为标准, 正常值点水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{NO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水, 异常值点水化学类型主要为 $\text{NO}_3\cdot\text{Cl-Ca}$ 型水。地下水化学演化过程主要受岩石风化、阳离子交替吸附和人类活动影响, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 主要来自硅酸盐风化溶解作用, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来自以方解石为主要矿物的碳酸盐岩风化及碳酸和硫酸参与的溶解作用; 阳离子交替吸附与硅酸盐岩的风化作用为孔隙水提供了盈余的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ; 生活污水混入、农业种植活动和铁矿煤矿开采等工矿活动改变着孔隙水化学成分, 特别是 NO_3^- 超标现象, 已成为当地地下水化学环境的主要问题。

关键词: 牟汶河; 离子来源; 水化学; 化学风化; 水文地质

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)03-1429-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202204161

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River

LIU Yuan-qing^{1,2}, ZHOU Le², LÜ Lin², LI Wei², WANG Xin-feng², DENG Qi-jun², ZHENG Yi-di², LI Chang-suo^{1*}

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan 250014, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

Abstract: In order to study the hydrochemical characteristics and ion sources of pore water in the middle and upper reaches of the Mouwen River, 29 groups of pore-water samples were collected in the Laiwu Basin. The main ion characteristics and their controlling factors of pore-water in this area were analyzed by using correlation and principal component analysis, Piper trigram, and Gibbs diagram methods. The main material sources of pore water in this area were revealed. The results showed that HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , and Ca^{2+} were the main anions and cations in the pore water of the middle and upper reaches of the Mouwen River. With $\text{TDS} > 1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ as the standard, the normal water chemistry type was mainly $\text{HCO}_3\cdot\text{NO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, whereas the abnormal water chemistry type was mainly $\text{NO}_3\cdot\text{Cl-Ca}$. The chemical evolution of groundwater was mainly influenced by rock weathering, cation alternation adsorption, and human activities. $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ mainly came from silicate weathering and dissolution, and HCO_3^- , Ca^{2+} , and Mg^{2+} came from calcite weathering and dissolution involving carbonate and sulfuric acid. Alternation adsorption of cations and weathering of silicate rock provided a surplus of Ca^{2+} and Mg^{2+} for pore water. Industrial and mining activities such as domestic sewage mixing, agricultural planting activities, and iron and coal mining changed the chemical composition of pore water, especially NO_3^- exceeding the standard, which has become the main problem of the local groundwater chemical environment.

Key words: Mouwen River; ion source; hydrochemistry; chemical weathering; hydrogeology

地下水是人类生存发展必不可少的重要基础资源, 是生态和环境系统的基本要素。随着工业化和城镇化进程的推进, 水资源及水环境问题日益凸显, 因此查明人类活动对地下水水化学特征及形成的影响对于地下水的合理开发、利用、保护具有十分重要的意义^[1~3]。地下水化学特征受控于一系列自然因素(降水、地表水、沉积环境等)和人为因素(人为污染、地下水开采等), 是地下水与环境长期作用的产物, 水体中主要离子成分常被用来分析地下水化学控制因素及物质来源^[4,5]。目前较为成熟的方法是结合水文地质条件、水文地球化学理论及人类活动影响, 统筹运用数理统计和离子系数比值等方法, 揭示水化学分布控制因素及成因来源^[6~9]。

牟汶河是黄河下游的最大支流——大汶河水系

上游的主要干流, 流经济南市钢城区、莱芜区及泰安市岱岳区、泰山区, 是山东省工矿企业和重点工程项目集中分布区, 地下水资源开发程度高^[10]。特别是 20 世纪 70 年代以来, 区内持续的矿业开发、冶炼工业和农业种植活动对地下水资源及水环境特征造成了强烈的影响^[11]。目前有关牟汶河中上游地下水化学特征及其成因分析的相关研究主要集中在岩溶地下水方面, 受人类活动影响程度更高的孔隙水鲜有专门报道^[11,12]。2016~2017 年对牟汶河中

收稿日期: 2022-04-14; 修订日期: 2022-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41240021); 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心(筹)开放基金项目(KJS-21-0012); 中国地质调查局地质调查项目(DD202175403, DD20190259, DD20160289)

作者简介: 刘元晴(1988~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为流域水文地球化学, E-mail: lyq198896@126.com

* 通信作者, E-mail: lics120@163.com

上游进行了孔隙水样品采集及测试,研究其水化学类型及形成的主要控制因素,探讨其水文地球化学过程,以期为牟汶河中上游孔隙水合理开发及科学管理提供理论依据。

1 研究区概况

牟汶河发源于济南市钢城区的东南部山区,中上游主要支流有瀛汶河、方下河和孝义河等,流域面积1 372.96 km². 多年平均降水量为760.0 mm,受季节性降水及蒸发量影响,水系流量及水位变化大. 牟汶河自东向西流经的莱芜盆地位于鲁中泰沂山区,北、东、南三面环山,中部为低缓起伏的平原,

海拔150~200 m. 区内地下水类型包括盆地外围的太古宙变质花岗岩类裂隙水,寒武-奥陶系碳酸盐岩类岩溶水;盆地内部主要为隐伏奥陶系碳酸盐岩类岩溶水,石炭-二叠系、侏罗-白垩系、古近系碎屑岩类裂隙水及分布广泛的第四系孔隙水(图1). 地下水流向由盆地外围向中心呈“向心式”汇流,与地表水流向一致,沿地形坡降由东向西径流^[13,14]. 莱芜盆地内部沉积了石炭-二叠系煤系地层;矿山、铁铜沟等闪长岩体与奥陶系马家沟群碳酸盐接触带多形成接触交代-热液铁矿(图1). 据不完全统计,盆地内共有鄂庄、南冶和陈盘龙等8处煤矿;张家洼、西尚庄和业家庄等16处铁矿床^[11].

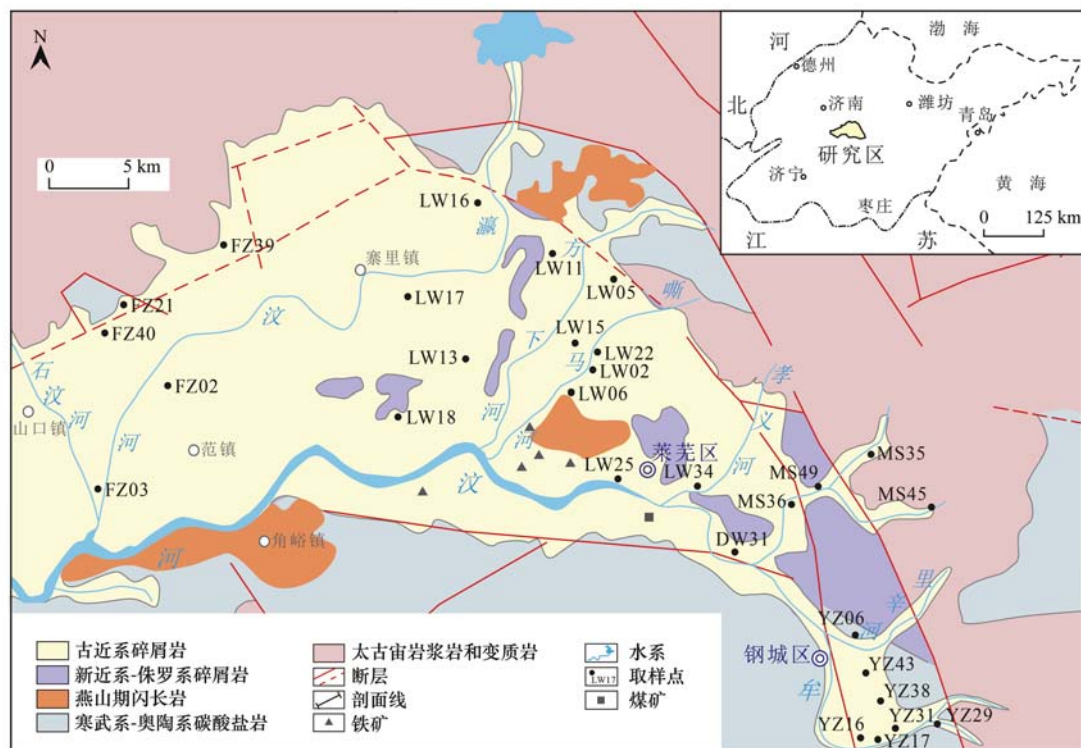


图1 牟汶河中上游水文地质状况和采样点分布示意

Fig. 1 Hydrogeological conditions and distribution of sampling locations in middle and upper reaches of Muwen River

2 材料与方法

2.1 采样点分布

第四系分布在莱芜盆地外围靠近山前洪积扇及盆地内部牟汶河干流、支流的河道、河漫滩和冲积扇内,主要岩性为厚度5~30 m的不同粒度砂砾石、黏土等碎屑松散沉积物. 本研究充分考虑该区的土地利用类型、城镇分布、水文地质条件和地质地貌条件,所采集样品尽量能代表牟汶河中上游孔隙水特征. 对受人类活动影响强烈的莱芜城区、钢城城区及以上河段进行加密取样,对羊里孔隙水水源地进行多年度样品测试资料收集及补充采样工作(图1中样点LW16).

2.2 样品采集与测试分析

2016年10月至2017年11月,牟汶河中上游莱芜盆地共采集孔隙水样品29组,采样点位置如图1所示. 地下水样品取自民井、农业灌溉井,采样井深5~30 m,地下水埋深0.3~5 m. 采样设备为离心泵或潜水泵,采样前对采样井进行抽水清洗,等排出水量大于井孔储水量3倍,并且现场指标稳定后再进行采样;然后用0.45 μm滤膜过滤,存储在聚乙烯样品瓶内,加入硝酸,使水样pH<2. 所采样品由山东省地矿工程勘察院实验室测定,采样现场利用水质多参数检测仪(in-situ SMARTROLL)对样品的水温、TDS、pH、溶解氧、电导率和Eh值进行测试;实验室条件下,严格遵照地下水水质检验方法,利

用 ICP 发射光谱仪对样品的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 和 K^{+} 的浓度进行测定,利用酸碱指示剂滴定法对 HCO_3^{-} 进行测定,利用离子色谱仪对 Cl^{-} 、 NO_3^{-} 和 SO_4^{2-} 的浓度进行测定.

3 结果与讨论

3.1 水化学组成特征

对研究区孔隙水水中主要指标的质量浓度数理统计分析见表 1. 地下水整体呈弱碱性,pH 值处在 7.2 ~ 8.0 之间;TDS 值介于 190.0 ~ 2 504.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,TDS < 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的淡水占比

75.9%,TDS > 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水占比 24.1%,其中 TDS > 2 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的有曹东村 LW25 和亓家官庄 LW13 两个样点,TDS 介于 1 000 ~ 2 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的有马盘龙村 DW31、大芹村 LW02、施庄村 FZ02 等 5 个样点(表 2). 孔隙水中 Ca^{2+} 、 HCO_3^{-} 、 NO_3^{-} 和 SO_4^{2-} 浓度较高(图 2),主要阳离子浓度呈现 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$ 的关系, Ca^{2+} 在阳离子组成中优势明显,占阳离子平均浓度的 71.0%,其次为 Na^{+} 和 Mg^{2+} ;阴离子浓度呈现出 $\text{HCO}_3^{-} > \text{NO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-}$ 的特点, HCO_3^{-} 浓度在孔隙水阴离子中占比较高,占阴离子平均浓度的 36.9%,其次为 NO_3^{-} 和 SO_4^{2-} .

表 1 研究区孔隙水水化学特征统计¹⁾

项目	K^{+}	Na^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}	NO_3^{-}	TDS	H_2SiO_3	pH
最大值	8.40	175.00	513.43	96.79	505.30	398.91	421.95	943.00	2504.00	43.19	8.00
最小值	0.08	4.09	47.15	2.20	13.25	4.53	38.18	4.59	190.00	15.35	7.20
平均值	1.32	38.11	176.65	32.56	94.51	166.70	255.32	174.85	833.62	24.75	7.43
标准差	1.61	38.29	110.66	20.07	105.99	110.14	97.82	235.84	551.03	6.12	0.19
变异系数/%	122.07	100.47	62.64	61.63	112.15	66.07	38.31	134.87	66.10	0.34	2.55

1) pH 为无量纲,其余成分单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

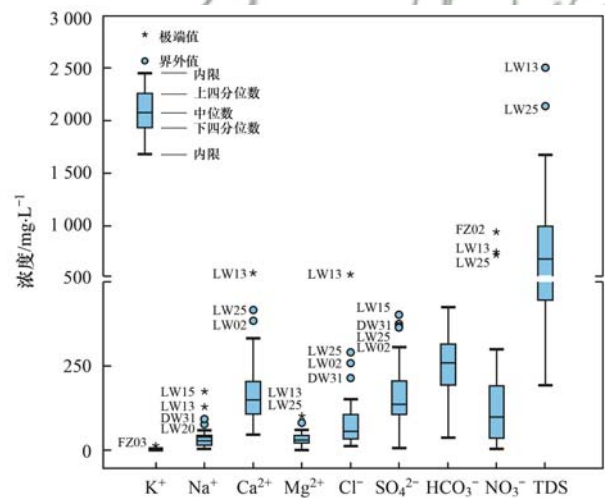


图 2 各水化学组分浓度箱型图

Fig. 2 Concentration box diagram of each hydrochemical component

依据地下水质量标准(GB/T 14848-2017)对所采集样品中的常规指标(TDS、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} -N、 Na^{+} 和 pH)进行质量评价,以主要适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水的Ⅲ类水限值为评价标准.结果显示,牟汶河中上游孔隙水主要存在 NO_3^{-} 和 TDS 两种常规指标超限现象:TDS > 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的有大芹村 LW02、曹东村 LW25 等 7 个样点,占全部水样的 24.1%,且呈现全区分布的特点;51.7% 的水样的 NO_3^{-} -N 超过Ⅲ类水限值 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,特别是施庄村 FZ02 样点的 NO_3^{-} 浓度高达 943.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;TDS 超限样点与 NO_3^{-} 异常高值点具良好的对应关系,说明 NO_3^{-} 在以上样点的 TDS 超限中贡献较大(表 2).

为研究孔隙水水化学参数空间变化特征,沿地

表 2 研究区 TDS 异常值点统计¹⁾

原始编号	样点位置	K^{+}	Na^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}	NO_3^{-}	H_2SiO_3	pH	TDS
LW02	莱芜市大芹村	0.44	55.00	384.49	39.59	258.45	371.71	313.53	242.70	17.95	7.2	1 520.00
LW13	莱芜市亓家官庄	1.14	128.00	513.43	82.88	505.30	308.25	395.57	750.00	27.34	7.3	2 504.00
LW15	莱芜市西邹村	0.08	175.00	203.16	44.80	142.48	398.91	421.95	139.75	21.76	7.3	1 331.00
LW25	莱芜市曹东村	1.25	90.00	416.23	96.79	288.27	371.71	257.86	729.50	25.95	7.4	2 140.00
DW31	莱芜市马盘龙村	2.56	80.00	227.17	43.68	212.06	371.61	298.88	34.79	21.39	7.4	1 133.00
FZ02	泰安市施庄村	0.83	38.67	331.86	58.58	90.41	124.08	156.41	943.00	31.95	7.3	1 680.00
FZ03	泰安市岔河村	8.40	57.78	219.84	35.24	148.90	151.65	334.29	225.00	15.35	7.4	1 030.00

1) pH 为无量纲,其余成分单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

下水流向自东向西绘制了水化学组分沿流程变化规律曲线(图 3).从图 3 中可见,TDS、主要阳离子

Ca^{2+} 、 Na^{+} 和 Mg^{2+} 及主要阴离子 HCO_3^{-} 、 NO_3^{-} 和 SO_4^{2-} 浓度均呈现出“增大-减小-增大”的变化趋势,

各离子浓度在牟汶河源头秦家庄村至马盘龙村段呈增加趋势,至曹东村离子浓度达到最大值.马盘龙-曹东村为莱芜城区范围,区内分布有多处铁矿和煤矿等大型工矿企业,人类生活及工矿企业活动导致离子浓度大幅度增加;何官庄村附近为莱芜盆地中部南北向古近系背斜核部,第四系覆盖层薄,周边无工矿企业,孔隙水离子浓度降低;岔河村附近第四系厚度大,受山口镇工矿企业及农业种植活动影响孔隙水离子浓度增加,特别是 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度的大幅度增加.

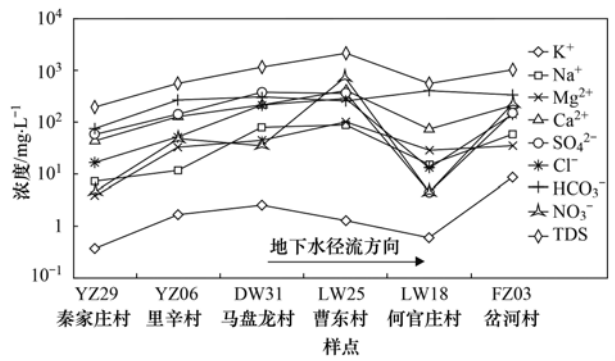


图3 研究区孔隙水化学参数沿流向变化

Fig. 3 Variation diagram of pore-water chemical parameters along flow direction in the study area

3.2 水化学类型

利用Piper三线图可以了解孔隙水化学的主要离子组成及演化特征^[15-18].以 $\text{TDS} > 1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为标准将水样进行分组,进行Piper三线图的绘制.从图4可以看出,TDS异常值点与正常值点在离子浓度上分区较为明显,表现为异常值点的 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 浓度更高且在图4中分布集中,分别占据阴、阳离子组分的60%~80%和80%~90%;正常值点的 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 浓度相对较低,且分布较散,分别占据阴、阳离子组分的10%~60%和60%~90%.整体上, Ca^{2+} 为浓度

优势阳离子, HCO_3^- 为浓度优势阴离子,而 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化,说明该区主要受岩石的风化作用^[19,20].由于部分水样中 NO_3^- 浓度较高,足够参与舒卡列夫水化学分类,对水化学样品进行分类统计表明,TDS正常点水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{NO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水,占有水化学类型的54.5%;而TDS异常样点水化学类型主要为 $\text{NO}_3\cdot\text{Cl-Ca}$ 型水,占有水化学类型的42.9%.

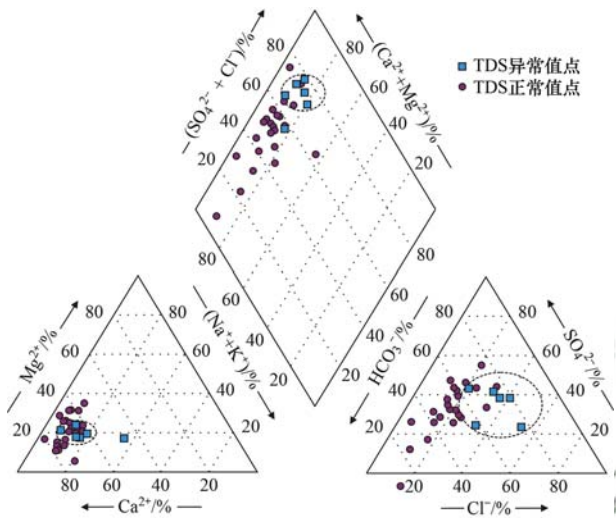


图4 研究区水化学Piper图

Fig. 4 Piper diagram for chemical composition in the study area

3.3 水化学组分控制因素及来源

3.3.1 各水化学指标之间的关系

水化学之间的相关性分析常用来揭示离子之间的来源关系^[18,19].从牟汶河中上游孔隙水中各化学组分之间的相关关系矩阵看出(表3),TDS与 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 存在显著的正相关关系($P < 0.01$),说明这些离子对TDS的贡献较大,尤其是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 相关系数均在0.90以上,说明这3种离子是TDS的主要来源. Cl^- 和 SO_4^{2-} 分

表3 水化学参数相关系数矩阵¹⁾

Table 3 Correlation coefficient matrix of hydrochemical parameters

	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	H_2SiO_3	pH
TDS	1.00										
K^+	0.09	1.00									
Na^+	0.76 **	0.10	1.00								
Ca^{2+}	0.98 **	0.09	0.67 **	1.00							
Mg^{2+}	0.91 **	0.04	0.66 **	0.85 **	1.00						
Cl^-	0.91 **	0.15	0.74 **	0.91 **	0.79 **	1.00					
SO_4^{2-}	0.75 **	0.03	0.78 **	0.71 **	0.70 **	0.73 **	1.00				
HCO_3^-	0.36	0.11	0.54 **	0.34	0.37 *	0.40 *	0.34	1.00			
NO_3^-	0.86 **	0.04	0.46 *	0.84 **	0.78 **	0.65 **	0.38 *	0.08	1.00		
H_2SiO_3	0.15	-0.13	0.12	0.13	0.05	0.05	0.22	-0.11	0.18	1.00	
pH	-0.34	-0.07	-0.30	-0.30	-0.30	-0.32	-0.37	-0.07	-0.32	-0.33	1.00

1) **表示在0.01水平上显著相关,*表示在0.05水平上显著相关

别与 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 有着极显著的正相关关系 ($r > 0.6$, $P < 0.01$), 说明 Cl^- 、 SO_4^{2-} 与 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 有同一来源, 可能来源于盐岩溶解、蒸发岩或者硅酸盐矿物的风化; HCO_3^- 与 Na^+ 有着显著的相关关系 ($r > 0.5$, $P < 0.01$), 说明 HCO_3^- 与 Na^+ 可能来源于盐岩以及碳酸盐矿物的风化和硫酸溶解^[21]; NO_3^- 和 Cl^- 呈极显著正相关关系 ($r > 0.6$, $P < 0.01$), 说明两者具有同源性, 反映出人类活动对地下水化学组分的影响作用。

为进一步探讨牟汶河中上游孔隙水体主要离子组成及控制因素^[22~24], 对研究区 29 组水样的 10 项指标进行主成分分析。基于特征值大于 1 的筛选要求, 分别识别出影响牟汶河孔隙水水质演化的 2 个主成分因子, 累计方差贡献率为 76.48%, 各主成分因子提取结果与成分矩阵见表 4; 根据主成分因子得分绘制牟汶河中上游水样主成分分析(图 5), 如图 5(a) 右上角表示孔隙水主要离子浓度同时受主成分因子 F1 和 F2 的影响, 右下角表示主要离子浓度受 F1 的影响, 左上角表示主要离子浓度受 F2 的影响, 左下角表示主要离子浓度受除 F1 和 F2 以外其他因素的影响^[25]。由表 4 可知, 第一主成分因子 F1 方差贡献率为 63.81%, 与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 相关性最大, 与图 5(a) 表示的结果一致, 结合表 3 的各离子相关性分析, 推测主成分因子 F1 受盐岩、蒸发岩、硅酸盐矿物的风化和人类活动影响; 第二主成分因子 F2 方差贡献率为 12.65%, 与 HCO_3^- 、 K^+ 的正相关性最大, 与 H_2SiO_3 为显著负相关, 与图 5(a) 表示的结果一致, 推测主成分因子 F2 受碳酸盐矿物的风化和硫酸溶解的影响。此外, 由图 5(b) 可知, 牟汶河中上游孔隙水的 65.5% 样点主要离子浓度受主成分因子 F1 和 F2 的影响, 且 TDS 异常样点受影响程度更大, 部分

表 4 主成分分析对主要离子的因子荷载¹⁾

Table 4 Factor loading of the principal component

参数	主成分因子	
	F1	F2
K^+	0.12	0.46
Na^+	0.83	0.32
Ca^{2+}	0.95	-0.17
Mg^{2+}	0.91	-0.14
Cl^-	0.93	0.03
SO_4^{2-}	0.81	0.17
HCO_3^-	0.45	0.70
NO_3^-	0.78	-0.49
H_2SiO_3	0.17	-0.78
TDS	0.99	-0.14
因子方差贡献/%	63.81	12.65
因子方差累计贡献/%	63.81	76.46

1) 黑体字表示高荷载

TDS 正常样点主要离子浓度受除主成分因子 F1 和 F2 以外, 也受其他因素的影响作用。

3.3.2 岩石风化作用

源自海水的降水中的 $n(\text{Na}^+)/n(\text{Cl}^-)$ (物质的量浓度比, 下同) 约为 0.86^[26], 可利用 Na^+ 和 Cl^- 量浓度比研究降水对孔隙水水化学的影响。数据分析结果表明, 研究区孔隙水 $n(\text{Na}^+)/n(\text{Cl}^-)$ 变化范围为 0.30 ~ 1.90, 平均值为 0.74, 与 0.86 相差较远, 表明研究区孔隙水水化学组分受大气降水影响有限, 主要受其他作用影响。Gibbs 图常用来定性判断大气降雨、岩石风化和蒸发浓缩作用对地下水离子来源的影响^[27~29]。从图 6 可以看出, 大部分样品分布在 TDS 与阳离子质量浓度比值 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和阴离子质量浓度比值 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的关系中部, 均落在“岩石风化型”端元, 说明岩石风化作用是孔隙水的主要离子组成的来源的控制因素。图 6 中, 样点分布远离“大气降雨型”和“蒸发浓缩型”端元, 再次表明大气降水对研究区内孔隙水

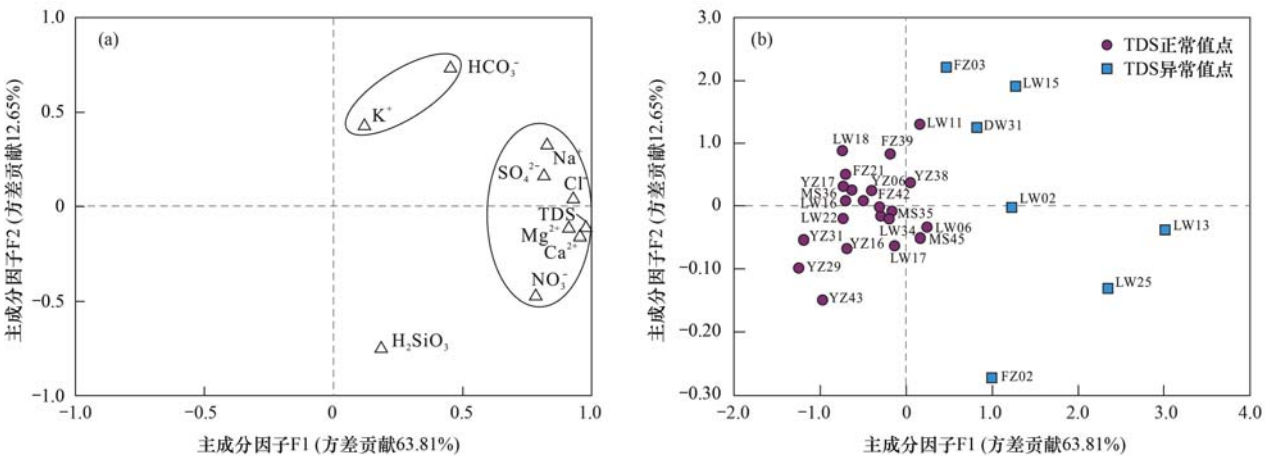


图 5 水体离子的主成分分析
Fig. 5 Principal component analysis of pore water ions

主要离子来源贡献较小,蒸发浓缩作用同样不是本区孔隙水主要离子来源成因.图6(b)中个别TDS异常点样品的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值大于0.5,说明这些样品受一定的人类活动影响^[4].

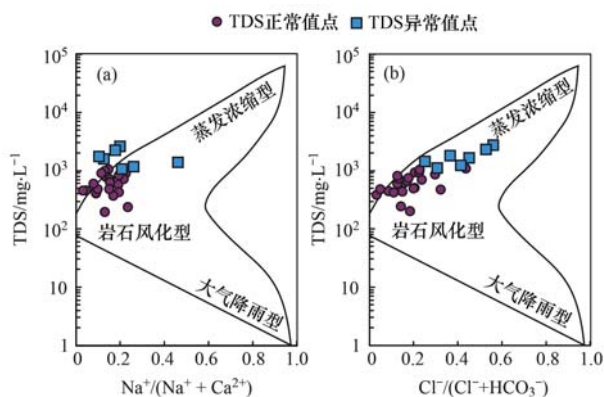


图6 牟汶河中上游孔隙水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs plots of the pore water in the middle and upper reaches of Muwen River

由于地下水中 $n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ 、 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ 和 $n(\text{HCO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 不受流速、稀释和蒸发作用的影响,常用 $n(\text{HCO}_3^-)/n(\text{Na}^+) - n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ 和 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Na}^+) - n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ 的关系变化定性识别碳酸盐岩、硅酸盐和蒸发岩风化作用对地下水溶质的影响^[30,31].图7所示,孔隙水样品集中分布在硅酸盐岩风化和碳酸盐岩风化控制端元中间,说明硅酸盐岩和碳酸盐岩风化溶解作用共同参与形成了孔隙水中的溶质,与莱芜盆地内部部分裸露及隐伏在第四系下部的碎屑岩含水层及碳酸盐岩含水层分布有关. LW15、DW31等TDS异常点相比较更加靠近硅酸盐岩风化端元,说明硅酸盐岩风化更多地参与了TDS异常点孔隙水中的溶质的形成.样品点均远离蒸发盐岩风化溶解控制端元,说明该区孔隙水离子组分受蒸发盐岩风化的作用较小.

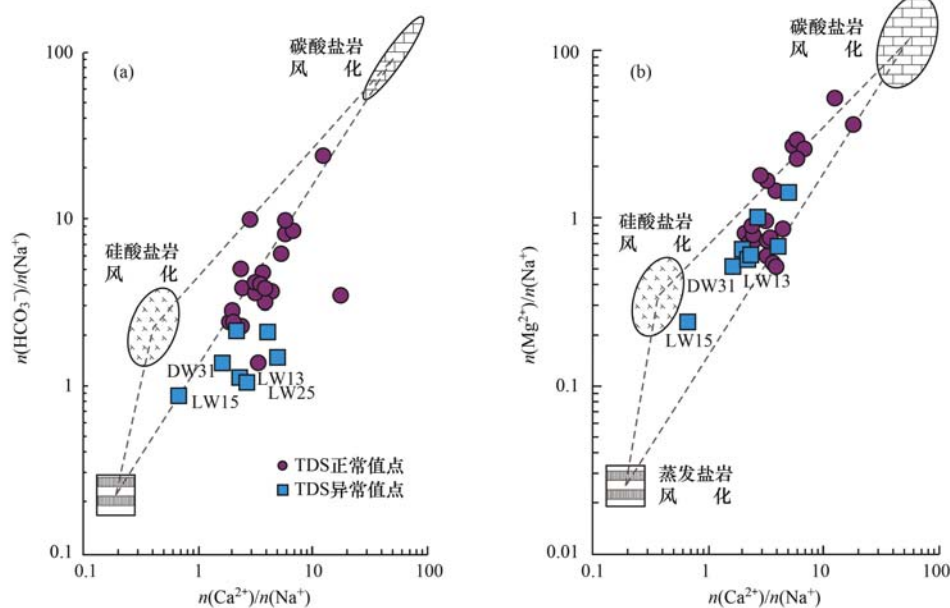


图7 研究区孔隙水体的 $n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ 与 $n(\text{HCO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 和 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Na}^+)$

Fig. 7 Plots of $n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ versus $n(\text{HCO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$, $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ of the pore water in the study area

3.3.3 离子比值关系及主要组分来源

由于地下水与含水层岩石之间发生反应,各种离子之间的相互关系为揭示地下水中离子来源和水文地球化学过程提供了有效的手段^[18,32].利用 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ (毫克当量比值关系,下同)可判断水体中的 Na^+ 与 K^+ 的主要来源,盐岩溶解产生 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) = 1$,而硅酸盐岩风化产生的 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) > 1$.由图8(a)可以看出,本区孔隙水样点绝大多数位于 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) = 1$ 的下面,特别是LW13、LW25等TDS异常值水样点,样点大幅度偏离 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) = 1$ 线.结合图7分析结果显示,研究区孔隙

水除受硅酸盐风化作用外,应还受其他作用的强烈影响,如曹东村(LW25)、马盘龙村(DW31)附近的煤矿、铁矿开采加工,亓家官庄(LW13)和大芹村(LW02)农业种植活动等均会造成水中 Cl^- 的相对盈余.此外,研究区阳离子交替吸附可引起水中 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 的相对亏损.

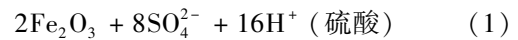
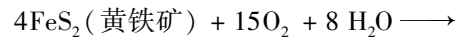
天然水体中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化及蒸发盐岩(石膏)的溶解,因此,可用 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 来分析地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的来源^[5,33].若地下水中 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 全部来自碳酸盐岩风化及蒸发盐岩(石膏)矿物溶解作用,在

$\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 相关图上样点将沿着 1:1 线分布^[34,35]。图 8(b) 中几乎全部的孔隙水样点分布在 1:1 毫克当量线比值线上方, 表现出 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相对盈余的特点, 特别是 LW13、LW25 等 TDS 异常值点, 大幅度偏离 1:1 线。前文分析证实, 孔隙水离子组分受蒸发盐岩风化的作用较小, 因此, 除碳酸盐矿物风化作用外, 还应存在其他因素参与水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的形成及盈余, 如酸参与硅酸盐的溶解或阳离子交替吸附作用。

对于碳酸盐岩矿物溶解作用的研究, 通常利用 $\gamma(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 来揭示方解石和白云石风化溶解对水体中主要物质组成的贡献关系, 当水中仅白云石溶解时 $\gamma(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}) = 1$, 仅方解石溶解时 $\gamma(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}) = 0$, 当两者同时参与溶解时, $\gamma(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}) = 0.5$ ^[4,36]。在图 8(c) 中, 除个别点外, 孔隙水样点几乎全部分布在 0.5 比值以下, 说明方解石为该区参与碳酸盐岩溶解的主要矿物组分。

$\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 与 $\gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 常用来分析碳酸、硫酸参与地下水碳酸盐岩溶解情况^[21,37]。研究区矿山、铜铁沟、角峪等闪长岩体外围黄铁矿开采为硫酸或硫酸根的产生提

供可能, 其产生机制如下:



仅有碳酸参与碳酸盐岩溶解时, $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-) = 1$, $\gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{HCO}_3^-) = 0$; 仅有硫酸参与碳酸盐岩溶解时, $\gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{HCO}_3^-) = 1$, $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-) = 2$ 。图 8(d) 中孔隙水接近一半样点, 特别是多数的 TDS 正常值点分布于碳酸和硫酸参与碳酸盐岩溶解之间, 说明碳酸和硫酸共同参与了碳酸盐岩溶解作用; LW25、LW13 等全部 TDS 异常值点及部分 TDS 正常值点分布于硫酸参与碳酸盐岩溶解端元外侧, 且表现出 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-) > 2$ 的盈余的现象, 与图 8(b) 分析的结果一致, 说明除碳酸盐矿物溶解作用外, 还存在其他因素参与水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的形成。莱芜盆地外围广泛分布的岩浆岩和变质岩中的钙镁硅酸盐矿物的风化溶解为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的盈余提供可能, 如硫酸参与硅酸盐岩反应, 产生更多的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ^[38]:

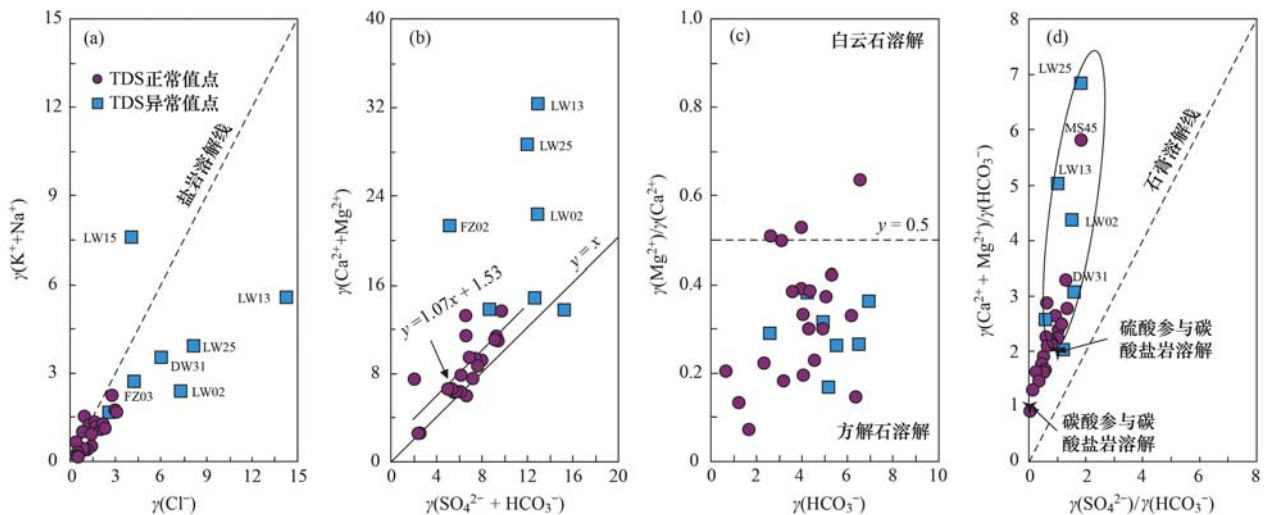
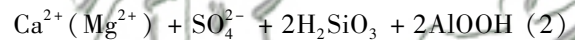


图 8 主要离子比例关系

Fig. 8 Relationship between ion concentrations

3.3.4 阳离子交替吸附作用

一定条件下, 岩土表面所吸附的某些阳离子与地下水中的阳离子发生的交换作用即为阳离子交替吸附, 通常用 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 来反映, 若发生阳离子交换作用, $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 约等于 -1^[39,40]。图 9(a) 中研究区孔隙水中 TDS 正常值点的 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 值为 2.32, TDS 异常值点比值

为 2.23, 样点整体远离 1:1 线; 考虑到牟汶河中上游孔隙水中 NO_3^- 浓度较高的特点, 采用 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{NO}_3^-)/\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 进行分析, 可见研究区孔隙水中 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{NO}_3^-)$ 与 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 有着较强的相关关系 ($R^2 = 0.76$), 且比值为 -0.96, 样点全部靠近 1:1 线[图 9(b)], 说明该区存在一定阳离子交换作用。

为进一步研究阳离子交替吸附的方向和强度,

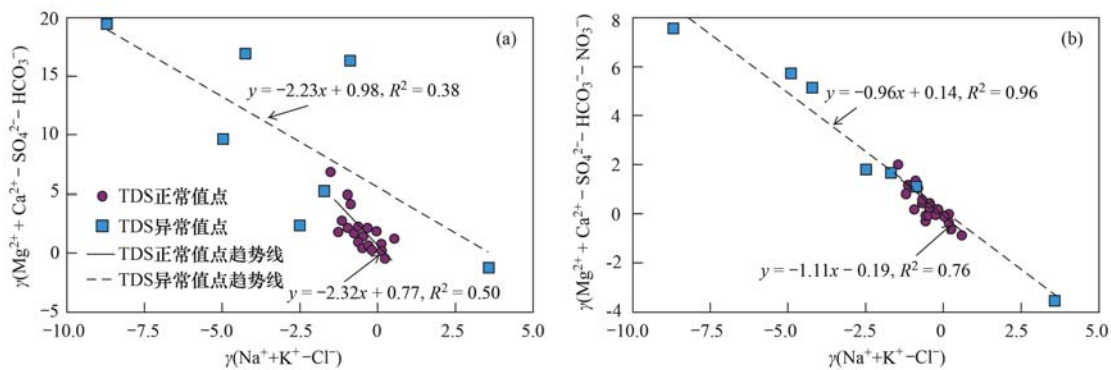


图9 研究区孔隙水中 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 分别与 $\gamma(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 和 $\gamma(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{NO}_3^-)$ 关系

Fig. 9 Plots of $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ versus $\gamma(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$, $\gamma(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{NO}_3^-)$ in the study area

采用氯碱指数 (CAI) 进行判断, 如下式所示:

$$\text{CAI-1} = \gamma(\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{K}^+) / \gamma(\text{Cl}^-) \quad (3)$$

$$\text{CAI-2} = \frac{\gamma(\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{K}^+)}{\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-)} \quad (4)$$

地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 将含水层矿物中的 Na^+ 和 K^+ 交换出来, 氯碱指数 CAI-1 和 CAI-2 均为负值; 反之, 地下水中的 Na^+ 、 K^+ 交换含水层矿物中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 氯碱指数 CAI-1 和 CAI-2 均为正值^[40,41]. 从氯碱指数与 TDS 关系中可以看出 (图 10), 79.3% 孔隙水样点的氯碱指数为正值, 说明研究区孔隙水主要发生反阳离子交换作用, 即孔隙水中的 Na^+ 、 K^+ 交换含水层矿物中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 使得水中 Na^+ 和 K^+ 降低, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度增加.

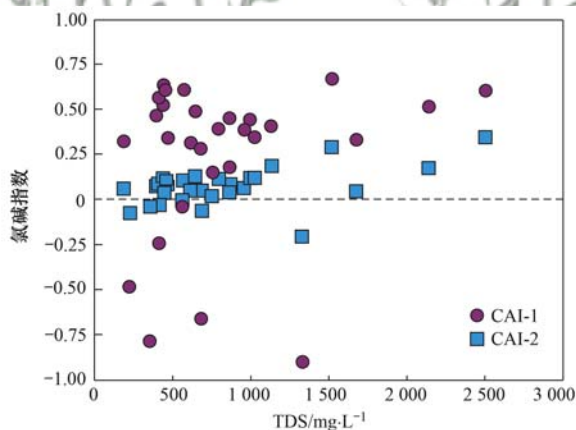


图10 研究区孔隙水氯碱指数与 TDS 关系

Fig. 10 Relationship between CAI and TDS of pore water in study area

3.3.5 人类活动影响

硝酸盐、氯化物和硫酸盐通常是对人类活动产生的污染物质较为敏感的组分, 可利用 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ 与 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 和 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 与 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 的关系研究人类活动对地下水化学成分的影响作用^[42~44]. 通过研究区孔隙水的 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ 与 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 关系可以看出 (图 11), 样点多数位于降水、生活污水和农业活

动单元内部, 说明牟汶河中上游孔隙水受人类活动影响强烈, 生活污水及农业活动参与了地下水化学组分的形成, 比如 LW13 和 LW18 点受生活污水混入影响较大, FZ02 和 LW17 等受农业活动影响较大. 由 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 与 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 关系可知 (图 12), 部分孔隙水样点表现为 $n(\text{NO}_3^-)/$

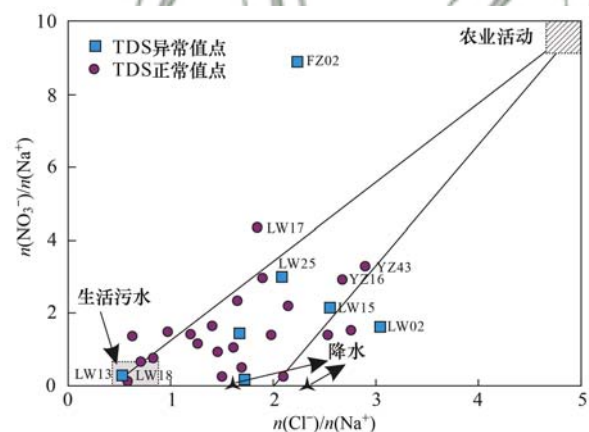


图11 孔隙水中 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ 与 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 的关系

Fig. 11 Plots of $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ versus $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ in pore water

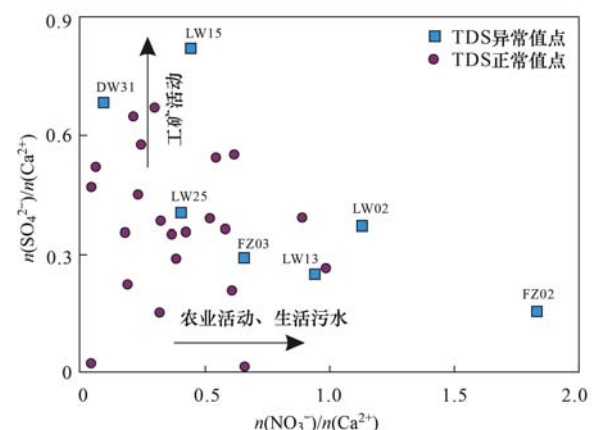


图12 孔隙水中 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 与 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 的关系

Fig. 12 Plots of $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ versus $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ in pore water

$n(\text{Ca}^{2+})$ 低而 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 高的特点, 如 LW15、LW25 和 DW31 等, 分别与张家洼铁矿、曹东铁矿和盘龙煤矿等开采活动有关; 部分孔隙水样点表现为 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 低而 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 高的特点, 如 LW02、LW13 和 FZ02 等, 与农业种植活动及生活污水混入有关; 介于两者之间的样点或同时受到农业、工矿活动和生活污水混入的影响。

2000 年以来, 随着牟汶河流域中上游城镇规模、人口增长和居民生活水平提高, 一系列与地下水开采有关的环境地质问题愈发凸显出现, 其中最明显的有地下水位下降及地下水污染问题^[11]。通过整理莱芜盆地羊里孔隙水水源地 1998~2015 年间长系列的水质资料及 2016 年补充取样测试结果, 分析 90 年代以来牟汶河中上游孔隙水地下水化学环境变化特征。羊里孔隙水中 TDS、总硬度以及 Ca^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度逐年增加明显, 并且 TDS 和总硬度与 Ca^{2+} 和 NO_3^- 浓度之间呈现相似的波动趋势; 孔隙水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Mg^{2+} 浓度较低, 年际变化较小, 波动不明显; Cl^- 浓度较低, 增长较缓慢, HCO_3^- 浓度处于持续波动状态(图 13)。从 2000 年开始, 该区孔隙水中 NO_3^- 浓度就超过 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并在 2006 年超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高于地下水质量标准 (GB/T 14848-2017) 中Ⅲ类水限值 (NO_3^- -N 为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),

NO_3^- 约 $88.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 且处于持续增长状态, 已成为当地地下水化学环境的主要问题^[45]。

4 结论

(1) 牟汶河中上游孔隙水地下水整体呈弱碱性, TDS 值介于 $190.0 \sim 2\,504.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 水中阳离子以 Ca^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主; 孔隙水样点中占比 51.7% 的 NO_3^- 和 24.1% 的 TDS 值超过Ⅲ类水限值; 以 $\text{TDS} > 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为标准, TDS 正常点水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{NO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca 和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca·Mg 型水, TDS 异常样点水化学类型主要为 $\text{NO}_3 \cdot \text{Cl}$ -Ca 型水。受人类生活及工矿企业活动影响, 沿地下水流向, 孔隙水中主要阴、阳离子浓度和 TDS 均呈现出“增大-减小-增大”的变化趋势。

(2) 大气降水及蒸发浓缩作用对研究区内孔隙水主要离子来源贡献较小; 硅酸盐岩和碳酸盐岩风化作用共同参与了孔隙水中的溶质的形成, 其中, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 主要来自硅酸盐风化作用; HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来自碳酸盐岩风化及碳酸和硫酸参与的溶解作用; 方解石是碳酸盐岩矿物溶解作用中的主要矿物组分。

(3) 牟汶河中上游孔隙水样点中占比 79.3% 的氯碱指数为正值, 主要发生反阴阳离子交换作用, 使得水中 Na^+ 和 K^+ 降低, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度增加。阳离子交替吸附作用与硅酸盐岩的风化作用, 为研究区孔隙水(特别是 TDS 异常值点)贡献了更多的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 使得孔隙水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 呈现盈余特点。

(4) 牟汶河中上游孔隙水受人类活动影响强烈, 生活污水混入、农业种植活动和铁矿煤矿开采等工矿活动改变着孔隙水化学成分。以羊里孔隙水为例, 水中 TDS、总硬度以及 Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度逐年增加明显, 特别是 NO_3^- 超标现象, 已成为当地地下水化学环境的主要问题。

参考文献:

- [1] 中国科学院. 中国学科发展战略·地下水科学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] Gleeson T, Befus K M, Jasechko S, et al. The global volume and distribution of modern groundwater[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(2): 161-167.
- [3] 宋煜, 李保珠. 云南会泽铅锌矿区地下水化学和同位素分析[J]. 地质学报, 2018, 92(5): 1081-1089.
Song Y, Li B Z. Hydrochemical and isotopic analysis of groundwater in the Huize Lead-Zinc Mining District, Yunnan [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(5): 1081-1089.
- [4] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4981-4990.
Zhang T, He J, Li J J, et al. Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River basin[J].

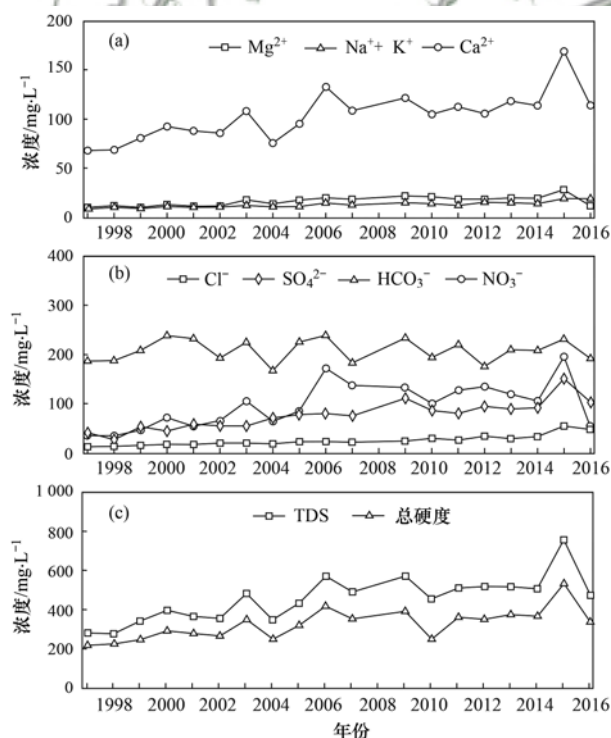


图 13 羊里孔隙水水化学组分多年浓度曲线

Fig. 13 Multiyear content curves of chemical components of Yangli pore water

- Environmental Science, 2018, **39**(11): 4981-4990.
- [5] 郑涛, 焦团理, 胡波, 等. 涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 766-775.
Zheng T, Jiao T L, Hu B, *et al.* Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the Central Guohe River basin[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 766-775.
- [6] Farid I, Trabelsi R, Zouari K, *et al.* Hydrogeochemical processes affecting groundwater in an irrigated land in Central Tunisia[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **68**(5): 1215-1231.
- [7] Fan B L, Zhao Z Q, Tao F X, *et al.* Characteristics of carbonate, evaporite and silicate weathering in Huanghe River basin: A comparison among the upstream, midstream and downstream[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, **96**: 17-26.
- [8] 唐金平, 张强, 胡漾, 等. 巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4543-4552.
Tang J P, Zhang Q, Hu Y, *et al.* Hydrochemical characteristics of karst groundwater in the mountains of northern Bazhong City, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4543-4552.
- [9] 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4042-4051.
Wei X, Zhou J L, Nai W H, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Kashgar delta area in Xinjiang[J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4042-4051.
- [10] 刘元晴, 周乐, 李伟, 等. 鲁中山区发现富水的古近系含水岩组[J]. 中国地质, 2020, **47**(6): 1928-1929.
Liu Y Q, Zhou L, Li W, *et al.* The watery Paleogene aquifer formation discovered in the central mountain area of Shandong province[J]. Geology in China, 2020, **47**(6): 1928-1929.
- [11] 刘元晴, 周乐, 马雪梅, 等. 莱芜盆地地下水开发利用中的环境地质问题及成因[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(11): 118-124.
Liu Y Q, Zhou L, Ma X M, *et al.* Environmental geological problems and causes during development and utilization of groundwater in Laiwu basin, Shandong province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, **34**(11): 118-124.
- [12] 陈晨, 高宗军, 李伟, 等. 泰莱盆地地下水化学特征及其控制因素[J]. 环境化学, 2019, **38**(6): 1339-1347.
Chen C, Gao Z J, Li W, *et al.* Characteristics and possible factors of hydrochemistry in the groundwater in Tailai basin[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(6): 1339-1347.
- [13] 刘元晴, 周乐, 李伟, 等. 山东莱芜盆地西北缘古近系半固结含水岩组的特征及其成因[J]. 地球学报, 2018, **39**(6): 737-748.
Liu Y Q, Zhou L, Li W, *et al.* The characteristics and genetic analysis of the Paleogene semi-consolidated water-bearing formation on the northwestern margin of Laiwu basin, Shandong Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2018, **39**(6): 737-748.
- [14] 周乐, 刘元晴, 李伟, 等. 山东大汶河流域中上游古近系含水岩组水文地质特征[J]. 中国地质, 2019, **46**(2): 316-327.
Zhou L, Liu Y Q, Li W, *et al.* Characteristics of the Paleogene water-bearing Formation in the middle and upper reaches of the Dawenhe River basin, Shandong Province[J]. Geology in China, 2019, **46**(2): 316-327.
- [15] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1944, **25**(6): 914-928.
- [16] Li C Z, Li B H, Bi E P. Characteristics of hydrochemistry and nitrogen behavior under long-term managed aquifer recharge with reclaimed water: a case study in North China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **668**: 1030-1037.
- [17] Wang W H, Wu T H, Zhao L, *et al.* Hydrochemical characteristics of ground ice in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2018, **626**: 366-376.
- [18] 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 等. 鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1236-1244.
He J, Zhang Y K, Zhao Y Q, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of groundwater in the Xialatuo basin section of the Xianshui River[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1236-1244.
- [19] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4003-4010.
Zhang T, Wang M G, Zhang Z Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Ranwu Lake basin[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4003-4010.
- [20] 徐森, 李思亮, 钟君, 等. 赤水河流域水化学特征与岩石风化机制[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 667-678.
Xu S, Li S L, Zhong J, *et al.* Hydrochemical characteristics and chemical weathering processes in Chishui River basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(3): 667-678.
- [21] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3220-3229.
Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Influence of sulfuric acid to karst hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the upper and middle reaches of the Wujiang River[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3220-3229.
- [22] Yang W J, Zhao Y, Wang D, *et al.* Using principal components Analysis and IDW interpolation to determine spatial and temporal changes of surface water quality of Xin'anjiang River in Huangshan, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(8), doi: 10.3390/ijerph17082942.
- [23] Ewaid S H, Abed S A, Al-Ansari N, *et al.* Development and evaluation of a water quality index for the Iraqi Rivers[J]. Hydrology, 2020, **7**(3), doi: 10.3390/hydrology7030067.
- [24] Mgbenu C N, Egbueri J C. The hydrogeochemical signatures, quality indices and health risk assessment of water resources in Umunya district, southeast Nigeria[J]. Applied Water Science, 2019, **9**(1), doi: 10.1007/s13201-019-0900-5.
- [25] 李文江, 王文科, 段磊, 等. 新疆克孜勒河流域喀什段水化学特征及成因[J]. 南水北调与水利科技, 2016, **14**(6): 159-164.
Li W J, Wang W K, Duan L, *et al.* Study of hydro-chemical characteristics and genesis in Kashi reach of Kizil River basin in Xinjiang[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, **14**(6): 159-164.
- [26] 王雨山, 程旭学, 张梦南. 马莲河流域河水化学特征和化学风化过程分析[J]. 地球与环境, 2018, **46**(1): 15-22.
Wang Y S, Cheng X X, Zhang M N. Hydrochemistry and chemical weathering processes of Malian River basin[J]. Earth and Environment, 2018, **46**(1): 15-22.
- [27] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J].

- Science, 1970, **17**(3962): 1088-1090.
- [28] Li Z J, Yang Q C, Yang Y S, *et al.* Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities[J]. Journal of Hydrology, 2019, **576**: 685-697.
- [29] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs diagram[J]. Applied Geochemistry, 2018, **97**: 209-212.
- [30] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [31] Gan Y Q, Zhao K, Deng Y M, *et al.* Groundwater flow and hydrogeochemical evolution in the Jiangnan Plain, central China[J]. Hydrogeology Journal, 2018, **26**(5): 1609-1623.
- [32] Mukherjee A, Fryar A E. Deeper groundwater chemistry and geochemical modeling of the arsenic affected western Bengal basin, west Bengal, India[J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(4): 863-894.
- [33] 林聪业, 孙占学, 高柏, 等. 拉萨地区地下水水化学特征及形成机制研究[J]. 地学前缘, 2021, **28**(5): 49-58.
Lin C Y, Sun Z X, Gao B, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Lhasa area, China[J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(5): 49-58.
- [34] Ma R, Wang Y X, Sun Z Y, *et al.* Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, northern China[J]. Applied Geochemistry, 2011, **26**(5): 884-897.
- [35] 魏善明, 丁冠涛, 袁国霞, 等. 山东省东汶河沂南地区地下水水化学特征及形成机理[J]. 地质学报, 2021, **95**(6): 1973-1983.
Wei S M, Ding G T, Yuan G X, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yin'an, East Wenhé River basin in Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, **95**(6): 1973-1983.
- [36] Pu J B, Yuan D X, Xiao Q, *et al.* Hydrogeochemical characteristics in karst subterranean streams: a case history from Chongqing, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2015, **30**(3): 307-319.
- [37] 王攀, 靳孟贵, 路东臣. 河南省永城市浅层地下水化学特征及形成机制[J]. 地球科学, 2020, **45**(6): 2232-2244.
Wang P, Jin M G, Lu D C. Hydrogeochemistry characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Yongcheng City, Henan Province[J]. Earth Science, 2020, **45**(6): 2232-2244.
- [38] 刘松韬, 张东, 李玉红, 等. 伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1184-1196.
Liu S T, Zhang D, Li Y H, *et al.* Water sources and factors controlling hydro-chemical compositions in the Yiluo river basin[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1184-1196.
- [39] Li X Y, Wu H, Qian H, *et al.* Groundwater chemistry regulated by hydrochemical processes and geological structures: a case study in Tongchuan, China[J]. Water, 2018, **10**(3), doi: 10.3390/w10030338.
- [40] Charfi S, Zouari K, Feki S, *et al.* Study of variation in groundwater quality in a coastal aquifer in north-eastern Tunisia using multivariate factor analysis[J]. Quaternary International, 2013, **302**: 199-209.
- [41] Thakur T, Rishi M S, Naik P K, *et al.* Elucidating hydrochemical properties of groundwater for drinking and agriculture in parts of Punjab, India[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(6), doi: 10.1007/s12665-016-5306-1.
- [42] Sun M Z, Wu W H, Ji X J, *et al.* Silicate weathering rate and its controlling factors: A study from small granitic watersheds in the Jiuhua Mountains[J]. Chemical Geology, 2019, **504**(20): 253-266.
- [43] Roy S, Gaillardet J, Allègre C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, **63**(9): 1277-1292.
- [44] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下水水文地球化学特征及环境意义[J]. 水科学进展, 2010, **21**(5): 628-636.
Pu J B, Yuan D X, Jiang Y J, *et al.* Hydrogeochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China[J]. Advances in Water Science, 2010, **21**(5): 628-636.
- [45] 马振民, 刘立才, 陈鸿汉, 等. 山东泰安岩溶水系统地下水化学环境演化[J]. 现代地质, 2002, **16**(4): 423-428.
Ma Z M, Liu L C, Chen H H, *et al.* Hydrochemical environmental evolution of karst water system in Tai'an, Shandong province[J]. Geoscience, 2002, **16**(4): 423-428.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)