

目次

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

古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因

唐春雷^{1,2,3,4}, 申豪勇^{1,4}, 赵春红^{1,4}, 王志恒^{1,4}, 谢浩^{1,4}, 赵一^{1,4}, 梁永平^{1,4*}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所自然资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 2. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 桂林 541004; 4. 广西岩溶资源环境工程技术研究中心, 桂林 541004)

摘要: 古堆泉为山西省著名岩溶大泉之一, 是唯一的中低温温泉, 具有悠久的开发观赏历史, 凝聚着丰厚的人文积淀. 以古堆泉域岩溶地下水为研究对象, 通过系统地样品采集与同位素分析, 综合运用水化学 (Durov 图、离子比例、Gibbs 图和氢氧同位素) 同位素方法分析地下水水化学特征和地下水系统径流特征. 古堆泉域岩溶地下水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在 0.709 ~ 0.717 之间, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca})$ 值在 0.27 ~ 0.74 之间. 通过分析 Sr 同位素组成和 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca})$ 、 $1/\text{Sr}$ 变化特征, 得出古堆泉域岩溶地下水为深部热水与浅部冷水的混合水, 中条山南梁泉岩溶水子系统呈现碳酸盐岩地层径流特征, 佛岭山-高显海头泉岩溶水子系统和侯马盆地深循环子系统呈现碳酸盐岩地层与火成岩地层径流特征, 塔儿山-九原山古堆泉岩溶水子系统呈现碳酸盐岩地层与古老硅铝质岩地层径流特征. 通过 2014 年样品与 2021 年相同位置取样点的氢氧同位素比对分析, 得出古堆泉口水样变化原因是其受三泉水库补给随时间的积累的结果, 三泉水库的变化原因是受引黄水的影响. 研究区岩溶地下水水化学类型可分为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 和 Cl-Na 型. 岩溶地下水水化学类型从 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg} \rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca} \rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$ 呈现明显的水化学成分分带.

关键词: 北方岩溶; 水化学特征; 氢氧同位素; Sr 同位素; Durov 图; Gibbs 图

中图分类号: X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)09-4874-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202210153

Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment

TANG Chun-lei^{1,2,3,4}, SHEN Hao-yong^{1,4}, ZHAO Chun-hong^{1,4}, WANG Zhi-heng^{1,4}, XIE Hao^{1,4}, ZHAO Yi^{1,4}, LIANG Yong-ping^{1,4*}

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Ministry of Natural Resources, Guilin 541004, China; 2. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. International Research Centre on Karst under the Auspices of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Guilin 541004, China; 4. Guangxi Karst Resources and Environment Research Center of Engineering Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: As one of the famous karst springs in Shanxi Province, the Gudui spring is the only medium-low temperature hot spring, with a long history of development and a rich cultural accumulation. The karst groundwater in the Gudui spring catchment was taken as the research object. Through systematic sample collection and isotope analysis, hydrochemistry (Durov map, ion ratio, Gibbs map, and hydrogen and oxygen isotope) methods were comprehensively used to analyze groundwater hydrochemistry and groundwater system runoff characteristics. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value of karst groundwater in the Gudui spring catchment was 0.709 to 0.717, and the $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca})$ value was 0.27 to 0.74. By analyzing the Sr isotope composition and $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca})$ and $1/\text{Sr}$ variation characteristics, it was concluded that the karst groundwater in the Gudui spring catchment was a mixture of deep hot water and shallow cold water. The karst water subsystem of Nanliang spring presented the characteristics of carbonate stratum runoff. The karst water subsystem of Fuling Mountain Gaoxian Haitou spring and the deep circulation subsystem of Houma Basin exhibited the runoff characteristics of carbonate rock and igneous rock strata. The karst water subsystem of Taiershan Jiuyuanshan Gudui spring presented the runoff characteristics of carbonate rock and ancient silicoaluminate strata. The $\delta^{18}\text{O}$ value in karst groundwater of Gudui spring area ranged from -11.46‰ to -7.81‰ , and the average value was -10.08‰ . The range of the δD value was -83.7‰ to -60.8‰ , and the average value was -73.6‰ . This showed that karst groundwater in the spring area was the result of mixing of various types of water. Through comparative analysis of hydrogen and oxygen isotopes of 2014 and 2021 sampling points at the same location, it was concluded that the change in water samples at the Guduiquan resulted from the gradual accumulation of water supplied by Sanquan Reservoir. The change in Sanquan Reservoir was due to the influence of Yellow River diversion. The karst groundwater in the spring area were characterized by large calcium ion, magnesium ion, and sodium ion values; a small potassium ion value; a large sulfate value; and a small chloride value. The hydrochemical types of karst groundwater in Gudui spring catchment could be divided into $\text{SO}_4\text{-Na}$, $\text{SO}_4\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, and Cl-Na . The hydrochemical types of karst groundwater showed evident hydrochemical composition zoning from $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg} \rightarrow \text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg} \rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca} \rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$. According to the comprehensive analysis of hydrochemical isotope and hydrogeological conditions, the karst water subsystem of Nanliang spring was primarily recharged by rainfall infiltration in the exposed limestone area and river infiltration, and its karst groundwater was recharged by runoff from south to north to the karst water subsystem of Fuling Mountain Gaoxian Haitou spring and the deep circulation subsystem of Houma Basin. The karst water subsystem of Taier Jiuyuan Mountain Gudui spring received rainfall infiltration supplement and upstream runoff supplement from the exposed limestone area. Its karst groundwater flowed from north to south and received the supply of Sanquan Reservoir from Yellow River water in the natural discharge area of Gudui spring.

Key words: karst in northern China; hydrochemical characteristics; hydrogen and oxygen isotopes; strontium isotope; Durov diagram; Gibbs chart

收稿日期: 2022-10-15; 修订日期: 2022-11-21

基金项目: 广西自然科学基金项目(2021GXNSFAA220071); 中国地质调查项目(DD20221758)

作者简介: 唐春雷(1984 ~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为北方岩溶泉域环境地质问题, E-mail: yourfriendtcl@163.com

* 通信作者, E-mail: lyp0261@karst.ac.cn

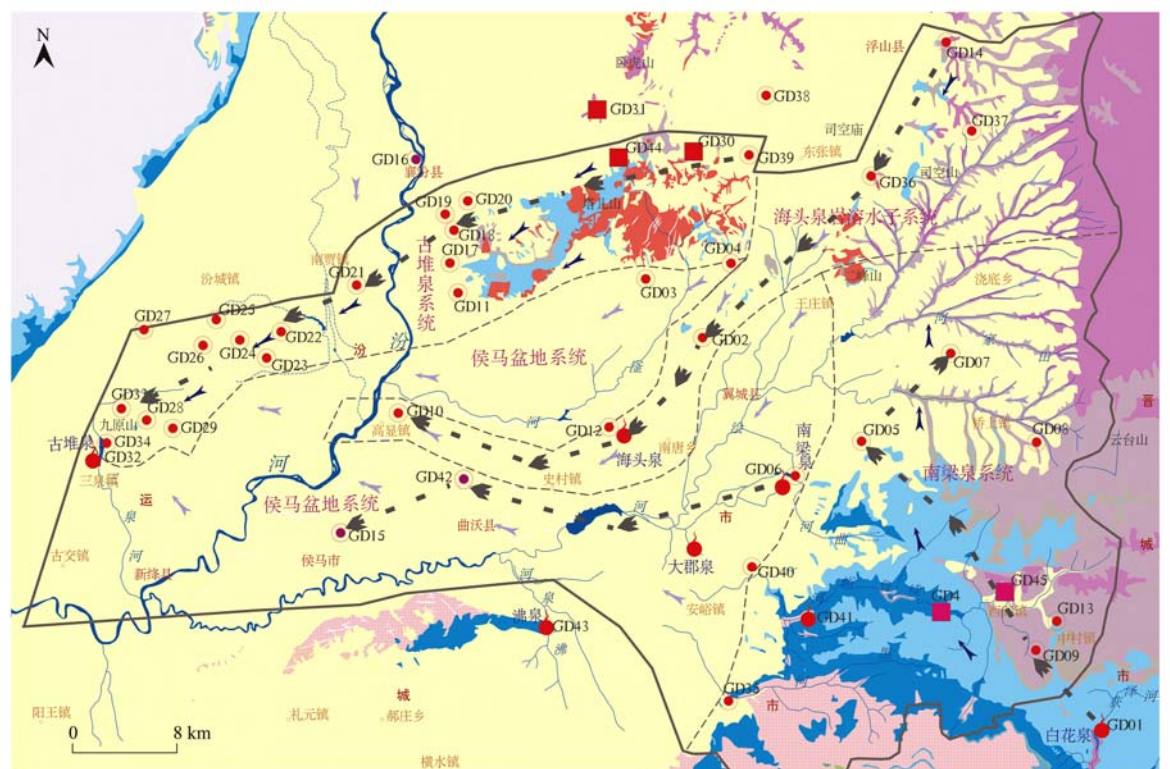
地下水水环境演化是水-岩作用研究的热点之一^[1~4]。地下水系统中蕴含着环境变化的重要信息, 连接大气圈、生物圈和岩石圈的重要媒介。地下水水环境是研究地下水及其赋存空间环境在内外动力地质作用和人为活动作用影响下所形成的状态及其变化。地下水环境演化过程中, 地下水具有环境和气候信息的存储功能。地下水既受环境的影响, 又反过来影响环境^[5]。岩溶水文地球化学是研究岩溶地下水状态及其变化的重要手段, 以地球科学系统理论为指导, 它既要研究岩溶系统的地球化学背景条件, 也要研究岩溶发育特征、岩溶水量、水质特征和其形成、演化的机制^[6]。水化学类型法^[7~9]、统计学方法^[10~12]、同位素分析方法^[13~16]和水文地球化学模拟^[17~19]等逐渐应用于水文地球化学研究。

20 世纪八九十年代, 我国水文地质学者对岩溶水系统结构、水资源要素、泉域边界和泉水流量衰减进行了系统的研究^[20]。近年来, 在人类活动和气候变化的双重影响下岩溶水系统的水动力场和水化学场等都发生了很大改变, 出现了水质变差, 泉水流量衰减甚至枯竭等一系列的环境问题, 引起有关学者的关注^[21~24]。有研究利用水化学模拟和数值模拟等方法研究古堆泉地下水水位及主要污染因子的演

化规律^[25~27]。申豪勇等^[28]通过对古堆泉域岩溶地下水系统的地质结构特征、水文地质结构特征和岩溶地下水循环演化规律分析, 厘定古堆泉域岩溶地下水系统面积为 2 942 km², 并将古堆泉域岩溶水系统分为 4 个子系统, 分别为中条山南梁泉岩溶水子系统、佛岭山-高显海头泉岩溶水子系统、侯马盆地深循环子系统和塔儿山-九原山古堆泉岩溶水子系统。在新厘定的岩溶地下水系统边界条件下, 利用多种同位素结合水化学特征研究古堆岩溶地下水的文献鲜见报道。古堆泉域岩溶水是工农业生产和城市水源地, 研究其水化学和同位素环境特征, 查明水环境特征及成因, 对合理开发利用岩溶地下水资源与生态保护具有重要的意义。

1 研究区概况

古堆泉(“古水”或“鼓水”)又称“石鼓神泓”, 是山西省内发育的 19 个岩溶大泉之一, 而且是唯一的中低温温泉。古堆泉形成于公元前 466 年晋南发生的一次大地震, 周围有大小泉眼 29 个, 其中龙王泉、琵琶泉、莲花泉最大, 照面泉、涌珠泉、方池泉、洗脸盆泉和怪泉次之。诸泉汇流, 经冯家村、三泉、李村和南北王等注入汾河(图 1)。泉水出露高程约



图例

前寒武 寒武 奥陶 石炭 二叠 三叠 第四系、第三系 火成岩 冷水系统地下水流向
 ● 岩溶井水样 ● 岩溶热水水样 ● 岩溶泉水水样 ■ 火成岩裂隙水样 ■ 地表水样 地表水 泉域范围 子系统范围 热水系统地下水流向
 - - - 岩溶地下水沿流向方向采样路线

图 1 古堆泉域水文地质和采样点示意

Fig. 1 Hydrogeological map and sampling sites of Gudui spring catchment

450 m, 泉水温度 $23 \sim 25^{\circ}\text{C}$ [29]. 古堆泉出露于山西省新绛县三泉镇古堆村的九原山西麓冯古庄断裂带上, 为断裂构造上升泉. 泉域内地层由老到新有寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、新近系和第四系 (图 1). 含水层包括松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩类岩溶裂隙水这 4 种类型. 在九原山-汾阳岭-塔儿山隆起带, 岩溶地下水接受区内碳酸盐岩裸露区和覆盖区的降水入渗补给, 岩溶水沿隆起带径流至九原山地段, 天然条件下由古堆泉水排泄. 1970 年以前泉水流量一般稳定在 $1.20 \sim 1.30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 近年来, 由于超量开采地下水, 泉水的补给量的减少等原因, 1980 年泉水流量为 $0.72 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 1988 年衰减到 $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 至 2000 年已经基本干枯.

2 材料与方法

通过开展野外地质、水文地质补充调查, 查明古堆泉域水文地质条件, 于 2021 年 8 ~ 9 月取样 46 组, 其中岩溶泉水 3 组, 岩溶热水 2 组, 岩溶井水 34 组, 地表水 2 组, 火成岩裂隙水 4 组, 水库 1 组. 样品采集按照《水质采样技术指导》(HJ 494-2009) 进行取样. pH、温度和电导率等指标由美国 Eureka Manta4.0 多参数水质仪现场测定. Ca^{2+} 和 HCO_3^- 由德国默克测试盒现场测定. 化学分析在国土资源部太原矿产资源监督检测中心实验室完成, 由 PHS-3C pH 计、可见光光度计和离子色谱仪等测定. $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ 同位素由中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部重点实验室完成, 采用美国 Picarro 液体水同位素分析仪 (L2130-i) 进行测定, 精度分别为 $\pm 2.0\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在中国地质调查局武汉地质调查中心实验室测试完成, 采用阳离子树脂交换法分离和纯化锶, 用德国赛默飞热电质谱仪 (TRITON Plus) 进行测定. 所有水样阴阳离子平衡相对误差小于 5%, 利用 Aquachem 软件绘制 Durov; 利用 Origin 软件绘制离子比例系数、Gibbs 和同位素分析.

3 结果与讨论

3.1 岩溶地下水补给来源

氢氧同位素是研究地下水起源与演化的理想示踪剂, 可利用地下水中的稳定氢氧同位素识别研究区地下水补给来源 [30~33]. 研究区的 39 个水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 $-11.46\text{‰} \sim -7.81\text{‰}$, 平均值为 -10.08‰ , δD 值范围为 $-83.7\text{‰} \sim -60.8\text{‰}$, 平均值为 -73.6‰ . 如图 2 所示古堆泉域岩溶水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 值位于全球大气降水线 (GWML) 的左下方, 表明古堆岩溶水接受古水和现代水的混合补给. 古

堆泉口岩溶井地下水 (GD32) 由于受到地表水三泉水库 (GD34) 的补给, $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 值与三泉水库和孔隙水接近. 间接说明泉口现在主要接受地表水和孔隙水的补给, 其原因是区域岩溶地下水位下降, 岩溶地下水流场发生变化, 在古堆泉口附近出现地表水、松散层孔隙水补给岩溶地下水的现象.

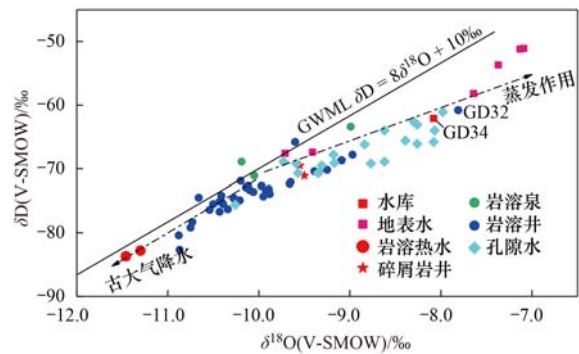


图 2 古堆泉域岩溶地下水 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 2 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of karst groundwater in Gudui spring catchment

分析 Sr 同位素组成和 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca})$ 、 $1/\text{Sr}$ 变化规律, 加深对岩溶水补给来源及运移过程的认识. 如图 3 所示沉积碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值通常在 $0.706 \sim 0.710$ 之间 [34~36], 灰岩端元的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值约为 0.706 , 白云岩端元的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值约为 0.710 [37]. 大陆地壳古老硅铝质岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值通常在 0.720 左右 [38]. 古堆泉域岩溶地下水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化于 $0.709 \sim 0.717$ 之间, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca})$ 值在 $0.27 \sim 0.74$ 之间. 显示出白云岩地层与古老硅铝质岩径流特征, 说明古堆泉域岩溶地下水为深部热水与浅部的岩溶地下水的混合水. 利用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $1/\text{Sr}$ 关系揭示岩溶地下水的动力条件 (图 4), 可将泉域岩溶地下水分为东部裸露区岩溶冷水 (中条山南梁泉岩溶水子系统)、火成岩入侵区岩溶热水 (佛岭山-高显海头泉岩溶水子系统和侯马盆地深循环子系统) 和排泄区低温岩溶热水 (塔儿山-九原山古堆泉岩溶水子系统).

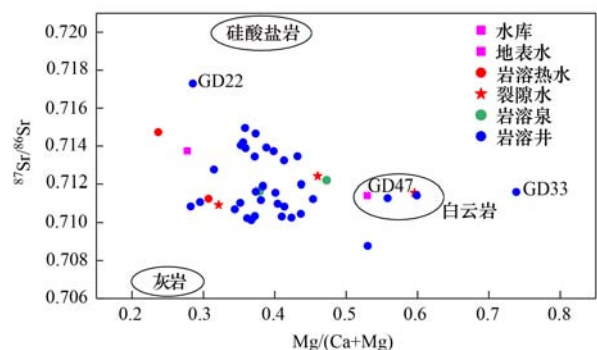


图 3 古堆泉域岩溶地下水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca})$ 关系

Fig. 3 Relationship between $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca})$ of karst groundwater in Gudui spring catchment

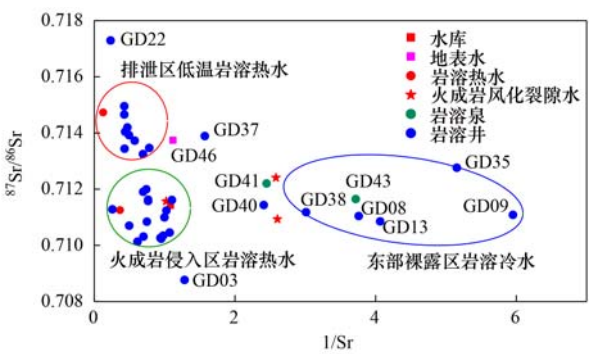


图 4 古堆泉域岩溶地下水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $1/\text{Sr}$ 关系
Fig. 4 Relationship between $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $1/\text{Sr}$ of karst groundwater in Gudui spring catchment

3.2 水化学特征

岩溶地下水化学特征不但受到区域内的地层岩性、地质构造和水动力条件等因素的控制,同时还受人类活动直接或间接的影响,而岩溶地下水的水化学特征能很好地保存和反演这些复杂的信息^[39~43].

据本次工作所取得的岩溶水(热水)、地表水和火成岩裂隙井水样分析结果,得出岩溶水(热水)的 pH 值为 7.48~8.06,均值为 7.70. $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 范围为 19.3~647.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 100.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 范围为 13.3~120.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 35.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{K}^{+} + \text{Na}^{+})$ 范围为 3.6~476.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 105.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 范围为 14.4~2247.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 285.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

地表水、火成岩裂隙井水样的 pH 值为 7.7~8.1,均值为 7.9. $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 范围为 34.4~83.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 55.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 范围为

12.7~33.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 22.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{K}^{+} + \text{Na}^{+})$ 范围为 14.4~141.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 63.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 范围为 12.2~167.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 80.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 1、图 1 和图 5).

按照舒卡列夫分类法,研究区碳酸盐岩含水岩组地下水主要类型是 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 类包括: $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型; $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 类包括 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型; $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 类包括: $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型; $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ 类包括: $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ 型; $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 类包括: $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型; $\text{Cl}\text{-Na}$ 类包括 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 和 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型; 岩溶地下水水化学类型从 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 呈现明显的水化学成分分带.

中条山南梁泉岩溶水子系统主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型 (GD01、GD08、GD09、GD13、GD30、GD35 和 GD41). 佛岭山-高显海头泉岩溶水子系统从补给区到排泄区的水化学类型依次为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ (GD14) $\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ (GD36) $\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ (GD02) $\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ (GD12) $\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ (GD10). 侯马盆地深循环子系统从补给区到排泄区的水化学类型依次为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}$ (GD03) $\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$

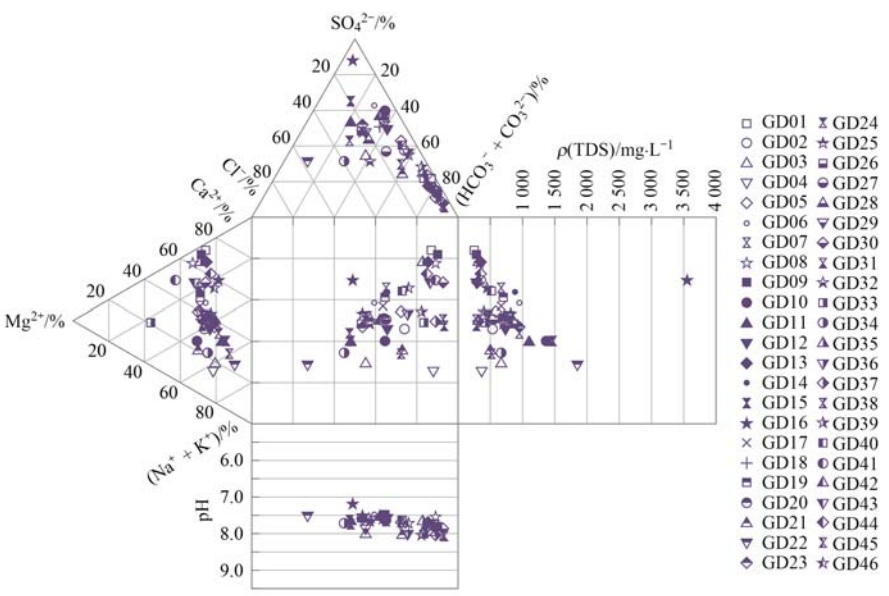


图 5 岩溶地下水的 Durov 图
Fig. 5 Durov diagram of karst groundwater

(GD42) →SO₄-Na·Ca (GD15). 塔儿山-九原山古堆泉岩溶水子系统从补给区到排泄区的水化学类型依次为: 补给区为 HCO₃-Ca·Mg (GD30) 或者 HCO₃·SO₄-Ca·Na·Mg (GD39) →径流区为 SO₄·HCO₃-Ca·Na·Mg (GD20 和 GD18) 或者 SO₄·HCO₃-Ca·Mg (GD19) 或者 SO₄·HCO₃-Ca·Mg·Na (GD17) →径流区为 SO₄·HCO₃-Ca·Na

(GD25) 或者 SO₄·HCO₃-Na·Ca (GD23 和 GD26) 或者 SO₄·Cl·HCO₃-Na·Ca (GD24) 或者 Cl·SO₄-Na (GD22) →排泄区为 SO₄·HCO₃-Ca·Na·Mg (GD28 和 GD29) 或者 HCO₃·SO₄·Cl-Na·Mg (GD32). 从补给区→径流区→排泄区明显的特征是阳离子 Na 增加, 阴离子 SO₄ 与 Cl 增加. 古堆泉 (GD32) 水化学类型为 HCO₃·SO₄·Cl-Na·Mg, 阴离子 HCO₃ 比例增加

表 1 古堆泉域岩溶地下水水化学类型

Table 1 Hydrochemical types of karst groundwater in Guodui spring catchment

编号	水点类型	水温/℃	pH	ρ/mg·L ⁻¹							水化学类型
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
GD01	岩溶泉	23.9	7.96	60.5	13.3	1.1	2.5	3.3	42.2	191.5	HCO ₃ -Ca·Mg
GD02	岩溶井	25.0	7.85	58.6	29.2	2.6	83.3	23.7	156.3	303.8	HCO ₃ ·SO ₄ -Na·Ca·Mg
GD03	岩溶井	24.5	8.02	41.2	27.9	3.1	152.2	101.2	170.6	245.6	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Na
GD04	岩溶井	24.5	7.73	19.3	17.3	0.9	94.4	9.8	42.5	303.8	HCO ₃ -Na
GD05	岩溶井	24.5	7.69	77.9	36.2	1.9	68.6	21.1	194.6	303.8	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Na·Mg
GD06	岩溶井	24.5	7.48	140.1	48.8	3.8	99.2	50.6	448.0	273.7	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Na·Mg
GD07	岩溶井	24.3	7.66	112.2	38.1	2.5	49.4	25.7	290.8	256.0	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Mg
GD08	岩溶井	24.7	7.54	75.9	24.7	1.1	7.5	6.8	43.2	308.0	HCO ₃ -Ca·Mg
GD09	岩溶井	23.9	7.81	69.6	17.5	1.1	4.3	5.9	31.4	258.0	HCO ₃ -Ca·Mg
GD10	岩溶井	25.0	7.65	109.5	83.0	3.6	223.8	43.6	610.6	472.4	SO ₄ ·HCO ₃ -Na·Mg
GD11	岩溶井	24.5	7.66	109.3	35.7	7.6	205.8	153.7	435.9	233.1	SO ₄ ·Cl-Na·Ca
GD12	岩溶井	24.5	7.59	81.6	34.5	4.6	113.5	39.5	271.9	301.7	SO ₄ ·HCO ₃ -Na·Ca
GD13	岩溶井	24.5	7.69	84.8	20.0	1.0	12.7	12.6	51.8	298.6	HCO ₃ -Ca·Mg
GD14	岩溶井	24.5	7.51	141.7	50.7	2.6	71.2	23.1	405.2	322.6	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Mg
GD15	热水	48.1	7.76	148.4	39.5	14.5	264.9	157.1	703.4	216.4	SO ₄ -Na·Ca
GD16	热水	42.7	7.19	647.6	120.6	17.7	254.1	138.4	2247.0	187.3	SO ₄ -Ca
GD17	岩溶井	24.7	7.65	91.2	38.0	3.6	69.7	41.2	260.0	251.8	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Mg·Na
GD18	岩溶井	23.9	7.51	85.8	40.0	3.0	92.7	51.0	272.4	270.5	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Na·Mg
GD19	岩溶井	25.0	7.48	106.1	39.6	3.4	62.1	26.0	299.6	249.7	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Mg
GD20	岩溶井	24.5	7.51	87.9	35.3	3.5	92.9	33.6	290.0	266.4	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Na·Mg
GD21	裂隙水	18.1	8.04	36.5	32.3	0.5	100.2	45.4	94.8	312.2	HCO ₃ -Na·Mg
GD22	岩溶井	38.4	7.53	147.4	35.3	22.3	454.1	606.6	444.5	216.4	Cl·SO ₄ -Na
GD23	岩溶井	30.4	7.61	110.6	39.3	7.7	145.3	107.4	370.1	265.3	SO ₄ ·HCO ₃ -Na·Ca
GD24	岩溶井	28.1	7.64	107.1	35.9	8.5	162.8	170.3	312.7	249.7	SO ₄ ·Cl·HCO ₃ -Na·Ca
GD25	岩溶井	24.0	7.52	111.7	37.0	6.2	104.5	105.5	302.5	253.9	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Na
GD26	岩溶井	24.9	7.57	107.5	38.4	7.5	127.5	111.7	320.1	259.1	SO ₄ ·HCO ₃ -Na·Ca
GD27	岩溶井	22.2	7.64	70.4	32.1	3.4	75.8	53.5	163.6	274.7	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Na·Mg
GD28	岩溶井	22.4	7.62	92.1	36.6	5.0	93.0	86.9	240.3	258.0	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Na·Mg
GD29	岩溶井	24.4	7.86	102.7	39.1	5.7	98.9	95.1	290.3	253.9	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Na·Mg
GD30	裂隙水	17.3	7.86	60.9	17.3	0.9	23.3	6.7	20.2	303.8	HCO ₃ -Ca·Mg
GD31	裂隙水	17.1	8.09	34.4	17.6	1.1	45.4	7.7	12.2	276.8	HCO ₃ -Na·Ca·Mg
GD32	岩溶井	20.2	7.68	85.5	36.1	6.3	103.4	111.2	175.4	308.0	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Na·Ca
GD33	岩溶井	20.1	8.02	32.0	54.2	0.4	41.2	16.0	77.0	330.9	HCO ₃ -Mg
GD34	水库	30.4	7.74	50.0	33.8	4.6	137.0	154.4	167.0	203.9	Cl·SO ₄ ·HCO ₃ -Na
GD35	岩溶井	15.8	7.68	69.3	19.1	1.7	8.1	8.9	60.7	228.9	HCO ₃ -Ca·Mg
GD36	岩溶井	20.0	8.03	62.4	25.4	2.1	58.9	16.2	129.8	264.3	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Na·Mg
GD37	岩溶井	18.1	8.06	45.2	15.2	1.2	53.1	11.2	28.2	283.0	HCO ₃ -Na·Ca
GD38	岩溶井	18.9	8.04	36.6	13.5	0.7	41.0	6.3	14.4	245.6	HCO ₃ -Ca·Mg
GD39	岩溶井	21.7	8.05	53.1	23.4	3.0	46.0	8.7	85.8	266.4	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Na·Mg
GD40	岩溶井	20.6	7.65	86.3	30.7	2.2	42.1	21.0	161.6	283.0	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg
GD41	岩溶泉	19.4	7.84	62.1	33.4	1.9	12.5	8.3	45.0	322.6	HCO ₃ -Ca·Mg
GD42	岩溶井	20.0	7.56	107.4	33.8	8.3	118.8	47.4	361.7	289.3	SO ₄ ·HCO ₃ -Na·Ca
GD43	岩溶泉	18.1	7.75	54.7	20.0	1.5	18.2	9.3	41.5	249.7	HCO ₃ -Ca·Mg
GD44	裂隙水	18.9	7.84	74.1	16.9	1.5	21.8	7.3	66.8	274.7	HCO ₃ -Ca
GD45	地表水	21.7	7.69	46.1	12.7	2.3	114.8	37.7	116.8	297.6	HCO ₃ ·SO ₄ -Na·Ca
GD46	地表水	21.7	7.72	83.1	19.1	2.1	40.2	17.7	119.5	266.4	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca

明显受到地表水或者松散层补给。

3.3 主要离子来源

Gibbs 图是宏观地反映水中主要离子的控制因素的一种分析方法,一般将主要的控制因素分为蒸发结晶作用、岩石风化作用和降水作用这 3 种^[44,45]。通常碳酸盐岩在 CO_2 和 H_2O 的参与下容易发生岩溶作用,研究区岩溶地下水 pH 值为 7.2 ~ 8.1, $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 范围为 19.3 ~ 647.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 99.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 范围为 13.3 ~ 120.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 35.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 范围为 2.5 ~ 454.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 98.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 $\rho(\text{Cl}^-)$ 范围为 3.3 ~ 606.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 35.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 范围为 187.3 ~ 472.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 272.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这说明石灰岩和白云岩溶解作用形成 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- ,其中石灰岩的溶解速率比白云岩快,所以 Mg^{2+} 比 Ca^{2+} 少。其次,研究区地下水中 Ca^{2+} 另一主要来源为石膏的溶解。如图 6 所示古堆泉域岩溶地下水水化学形成主要控制因素为碳酸盐岩风化与蒸发结晶作用。古堆泉域岩溶地下水水化学组分主要受方解石(文石)、白云石和石膏等矿

物影响。

如图 7(a) 显示 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 与 HCO_3^- 关系,如果点位于 1:1 直线上侧,说明地下水水化学形成的作用为碳酸盐岩的溶解;如果点位于 1:1 直线下侧则说明伴随有蒸发岩的溶解。由图可见古堆泉域岩溶地下水以碳酸盐岩和蒸发岩(石膏, NaCl 等)的溶解为主,本次所取样品中约 60% 的岩溶地下水伴随有蒸发岩的溶解;如图 7(b) 显示 $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 关系,岩溶地下水样品近似呈直线分布并偏离至 1:1 线以上,表明岩溶地下水以碳酸盐岩风化与蒸发结晶作用为主。如图 7(c) 显示 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$ 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ 关系,径流区部分点位于阳离子交换线附近,说明地下水水化学形成除方解石(文石)、白云石和石膏的溶解,还有阳离子交换作用。如图 7(d) 显示 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 关系,揭示地下水循环过程中不同物质(蒸发岩、硅酸盐岩、降水和碳酸盐岩)来源的影响。此图说明古堆泉域大部分岩溶地下水主要为降水、蒸发岩与碳酸盐岩相互作用。

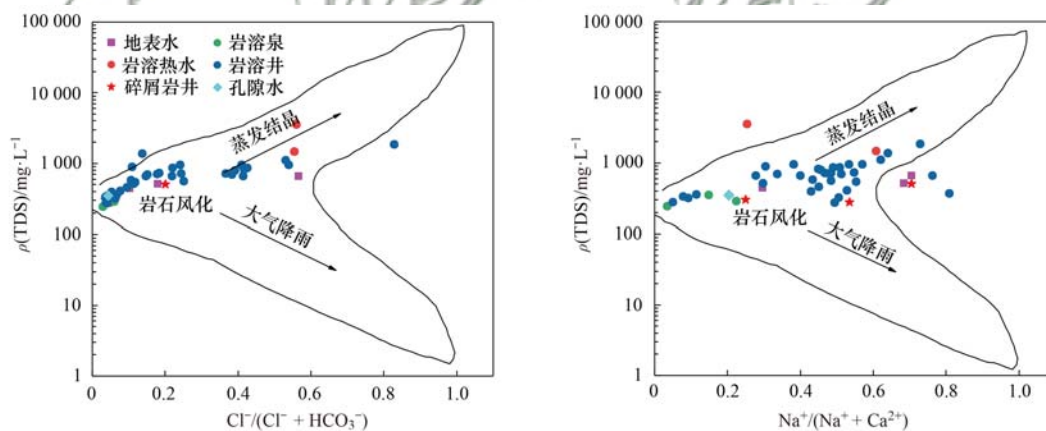


图 6 地下水和地表水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs diagram of groundwater and surface water

在岩溶水循环过程中, Sr^{2+} 浓度随着径流途径和水岩交互作用的时间而增加,相比之下 Ca^{2+} 浓度却受制于溶解平衡,因此,不同来源的水的 $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值不同,径流途径和水岩交互作用的时间越长,其值越大,反之越小^[46,47]。如图 8 所示古堆泉域岩溶地下水总体上 $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值,总体呈现为:佛岭山-高显海头泉岩溶水子系统 > 侯马盆地深循环子系统 > 塔儿山-九原山古堆泉岩溶水子系统 > 中条山南梁泉岩溶水子系统。如图 9 所示锶钙比与溶解性总固体(TDS)呈明显的线性相关关系,沿着地下水主径流带,从补给区到排泄区,锶钙比逐渐升高。岩溶热水游离于线性关系右侧,表明这些样品溶解性总固体的增加要快于锶钙比的增加,其径流路径远,含

水层埋藏深度大。TDS 是反映水质的综合指标。研究区 39 个岩溶水样品 $\rho(\text{TDS})$ 范围为 244.0 ~ 3 548.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 748.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。TDS 值总体呈现为岩溶地下水补给区 < 径流,排泄区 < 深埋滞留区。

3.4 不同时期水化学取样

通过不同年份相同取样点位置的水样测试比对比分析(见表 2),得出水化学方面,新绛县三泉水库水样(GD34)相差最大,其次为翼城县上河煤业岩溶井水样(GD09)。GD34 水样点主要表现在 Na^+ 和 Cl^- 的增加。GD09 水样点主要表现在 Na^+ 和 SO_4^{2-} 的增加。氢氧同位素方面如图 10 所示,三泉镇古堆村泉口岩溶井(GD32)水样相差最大,其次为新绛县三泉水库。GD32 点水样氢氧同位素变化是其受三泉水

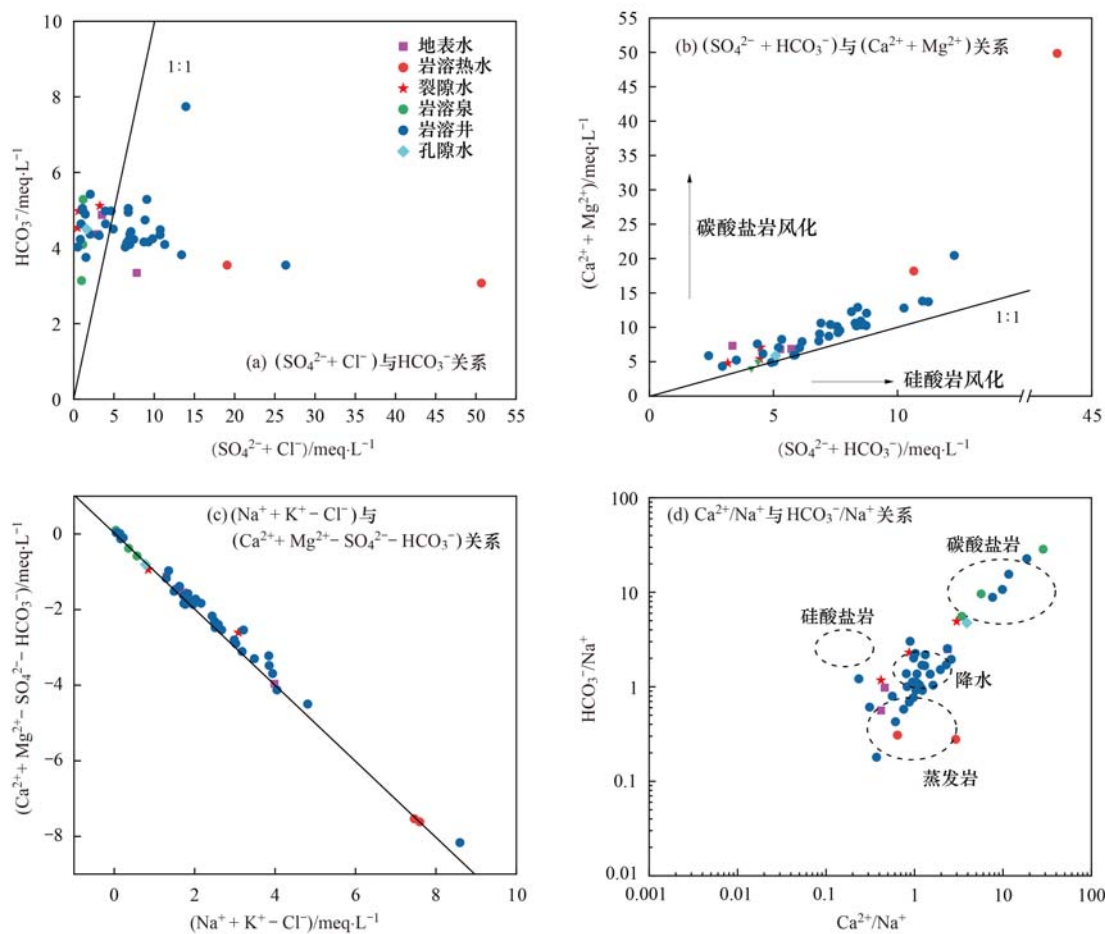


图 7 古堆泉域岩溶地下水离子关系

Fig. 7 Ion relationship of karst groundwater in Gudui spring catchment

表 2 古堆泉域岩溶地下水不同时期水化学取样

Table 2 Hydrochemical sampling of karst groundwater during different periods in Gudui spring catchment

编号	pH	$\rho/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$									$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}	Sr^{2+}		
GD01_2014	7.74	64.8	14.0	1.3	2.2	211.0	30.1	6.7	11.4	0.1	-10.0	-68.0
GD01_2021	7.96	60.5	13.3	1.1	2.5	191.5	42.2	3.3	15.8	0.1	-10.2	-68.9
GD06_2014	7.62	146.0	48.4	3.1	88.8	274.0	446.0	56.0	2.9	1.0	-10.2	-75.0
GD06_2021	7.48	140.1	48.8	3.8	99.2	273.7	448.0	50.6	5.9	1.6	-10.2	-74.9
GD09_2014	7.68	86.5	15.3	1.2	8.2	286.0	41.4	7.7	7.9	0.6	-10.4	-73.0
GD09_2021	7.81	69.6	17.5	1.1	4.3	258.0	31.4	5.9	7.7	0.2	-10.7	-74.5
GD15_2014	7.78	150.0	41.5	13.0	203.0	252.0	607.0	153.0	0.2	1.9	-11.4	-83.0
GD15_2021	7.76	148.4	39.5	14.5	264.9	216.4	703.4	157.1	0.1	2.7	-11.5	-83.7
GD29_2014	7.90	107.0	41.5	5.9	95.5	252.0	273.0	104.0	4.4	1.9	-10.5	-75.0
GD29_2021	7.86	102.7	39.1	5.7	98.9	253.9	290.3	95.1	9.6	2.0	-10.4	-75.1
GD32_2014	7.96	101.0	39.6	6.0	91.7	282.0	239.0	93.8	8.9	1.6	-9.8	-71.0
GD32_2021	7.68	85.5	36.1	6.3	103.4	308.0	175.4	111.2	7.2	1.4	-7.8	-60.8
GD34_2014	7.49	51.9	24.3	9.9	75.2	168.0	149.0	85.2	0.8	0.5	-7.7	-59.0
GD34_2021	7.74	50.0	33.8	4.6	137.0	203.9	167.0	154.4	1.2	0.9	-8.1	-62.1
GD41_2014	7.80	74.7	27.2	1.2	10.0	293.0	64.0	10.5	4.2	0.2	-9.1	-64.0
GD41_2021	7.84	62.1	33.4	1.9	12.5	322.6	45.0	8.3	7.1	0.4	-9.0	-63.4

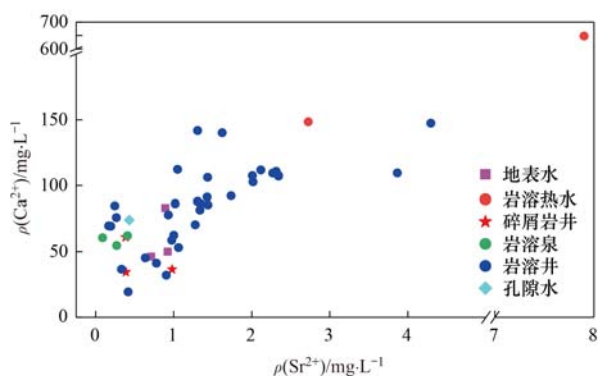
图 8 古堆泉域岩溶地下水 Sr^{2+} 与 Ca^{2+} 关系

Fig. 8 Relationship between Sr^{2+} and Ca^{2+} of karst groundwater in Gudui spring catchment

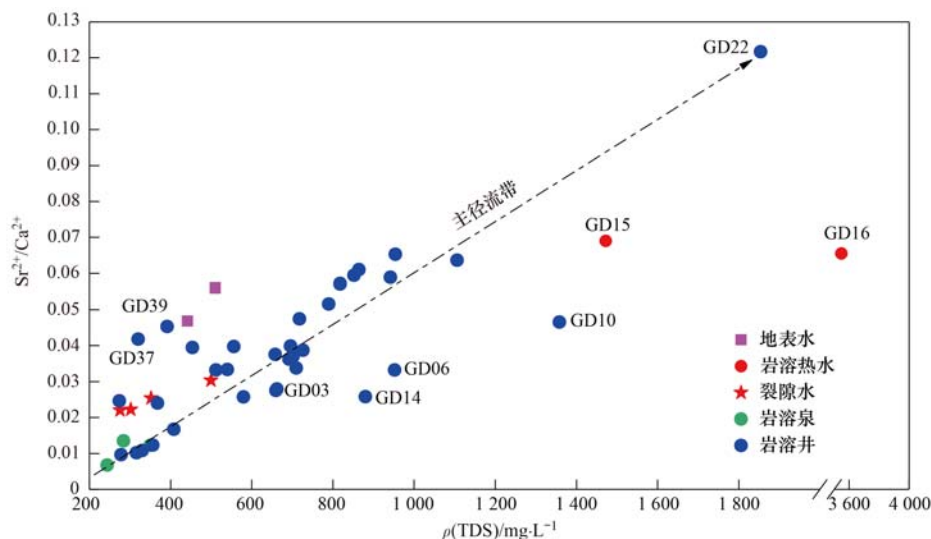
图 9 古堆泉域岩溶地下水 $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 与 TDS 关系

Fig. 9 Relationship between $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ and TDS of karst groundwater in Gudui spring catchment

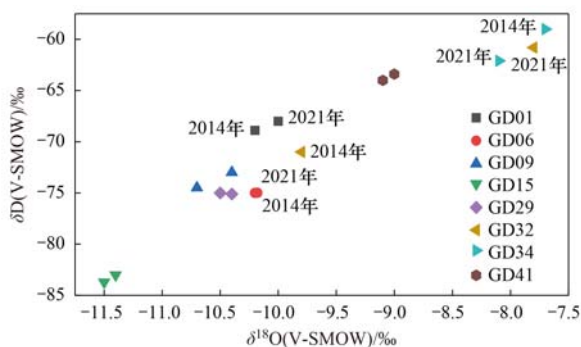
图 10 不同时期岩溶地下水 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 10 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of karst groundwater in different periods in Gudui spring catchment

(2) 通过分析 Sr 同位素组成和 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca})$ 、 $1/\text{Sr}$ 变化规律, 得出古堆泉域岩溶地下水为深部热水与浅部岩溶水的混合水; 中条山南梁泉岩溶水子系统为碳酸盐岩地层径流特征; 佛岭山-高显海头泉岩溶水子系统和侯马盆地深循环子系统为碳酸盐岩地层与火成岩地层径流特征; 塔儿山-九原山古堆泉岩溶水子系统为碳酸盐岩地层与古老硅铝质岩

库补给随时间的积累的结果. 三泉水库的氢氧同位素变化是受引黄水的影响.

4 结论

(1) 研究区的 39 个水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 $-11.46\text{‰} \sim -7.81\text{‰}$, 平均值为 -10.08‰ , δD 值范围为 $-83.7\text{‰} \sim -60.8\text{‰}$, 平均值为 -73.6‰ , 体现了泉域岩溶地下水是各种类型水混合的结果. 通过 2014 年样品与 2021 年相同位置取样点的氢氧同位素比对分析, 得出古堆泉口水样变化原因是其受三泉水库补给随时间的积累的结果. 三泉水库的变化原因是受引黄水的影响.

地层径流特征.

(3) 古堆泉域岩溶地下水的 pH 值为 $7.48 \sim 8.06$, 均值为 7.70 . $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 范围为 $19.3 \sim 647.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $100.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 范围为 $13.3 \sim 120.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $35.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{K}^{+} + \text{Na}^{+})$ 范围为 $3.6 \sim 476.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $105.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 范围为 $14.4 \sim 2247.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $285.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 泉域岩溶地下水总体特征表现为阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^{+} 浓度大, $\rho(\text{K}^{+})$ 值小; 阴离子 SO_4^{2-} 浓度大, Cl^{-} 浓度小.

(4) 研究区岩溶地下水水化学类型可分为 SO_4 -Na 类、 SO_4 -Ca 类、 HCO_3 -Na 类、 HCO_3 -Mg 类、 HCO_3 -Ca 类和 Cl-Na 类; 岩溶地下水水化学类型从 HCO_3 -Ca·Mg $\rightarrow \text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca·Mg $\rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ -Na·Ca $\rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ -Na·Ca 呈现明显的水化学成分分带.

(5) 水化学同位素结合水文地质条件综合分析得出, 中条山南梁泉岩溶水子系统主要接受裸露灰岩区降雨入渗补给和河流入渗补给, 其岩溶地下水

由南向北径流,最后侧向径流补给佛岭山-高显海头泉岩溶水子系统和侯马盆地深循环子系统.塔儿山-九原山古堆泉岩溶水子系统接受裸露灰岩区降雨入渗补给和上游方向径流补给,其岩溶地下水由北向南径流,由于区域地下水位下降,在古堆泉口区域主要接受三泉水库引黄水的补给.

参考文献:

- [1] 沈照理,王焰新.水-岩相互作用研究的回顾与展望[J].地球科学-中国地质大学学报,2002,27(2):127-133.
Shen Z L, Wang Y X. Review and outlook of water-rock interaction studies[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 127-133.
- [2] 沈照理,王焰新,郭华明.水-岩相互作用研究的机遇与挑战[J].地球科学-中国地质大学学报,2012,37(2):207-219.
Shen Z L, Wang Y X, Guo H M. Opportunities and challenges of water-rock interaction studies[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(2): 207-219.
- [3] 唐春雷,赵春红,申豪勇,等.娘子关泉群水化学特征及成因[J].环境科学,2021,42(3):1416-1423.
Tang C L, Zhao C H, Shen H Y, et al. Chemical characteristics and causes of groups water in Niangziguan spring[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1416-1423.
- [4] 唐春雷,郑秀清,梁永平,等.山西太原晋祠—平泉水力联系及对晋祠泉复流的贡献[J].中国地质,2020,47(6):1755-1764.
Tang C L, Zheng X Q, Liang Y P, et al. The hydraulic connection between Jinci and Pingquan in Taiyuan, Shanxi and its contribution to the reflow of Jinci spring[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1755-1764.
- [5] 王焰新,马腾,郭清海,等.地下水与环境变化研究[J].地学前缘,2005,12(S1):14-21.
Wang Y X, Ma T, Guo Q H, et al. Groundwater and environmental change[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(S1): 14-21.
- [6] 袁道先.中国岩溶地球化学研究的进展[J].水文地质工程地质,1990,(5):41-42.
Yuan D X. Advances in karst geochemistry in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1990, (5): 41-42.
- [7] Karmann I, Cruz F W Jr, Viana O, et al. Climate influence on geochemistry parameters of waters from Santana-Pérolas cave system, Brazil[J]. Chemical Geology, 2007, 244(1-2): 232-247.
- [8] 王珺瑜,王家乐,靳孟贵.济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J].地球科学,2017,42(5):821-831.
Wang J Y, Wang J L, Jin M G. Hydrochemical characteristics and formation causes of karst water in Jinan spring catchment[J]. Earth Science, 2017, 42(5): 821-831.
- [9] 谢浩,梁永平,李军,等.龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价[J].环境科学,2021,42(9):4257-4266.
Xie H, Liang Y P, Li J, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of metal elements in groundwater of Longzici spring area[J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4257-4266.
- [10] 章程.模糊聚类分析在岩溶水化学分类中的应用[J].中国岩溶,1995,14(1):9-17.
Zhang C. The application of fuzzy cluster analysis in karst hydrochemical classification[J]. Carsologica Sinica, 1995, 14(1): 9-17.
- [11] 曹阳,滕彦国,刘昀竺.宁夏吴忠市金积水源地地下水水质影响因素的多元统计分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(1):235-244.
Cao Y, Teng Y G, Liu Y Z. Multivariate statistical approach to identify influencing factors of groundwater quality in Jinji water source of Wuzhong City[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(1): 235-244.
- [12] Busico G, Cuoco E, Kazakis N, et al. Multivariate statistical analysis to characterize/discriminate between anthropogenic and geogenic trace elements occurrence in the Campania Plain, Southern Italy[J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 260-269.
- [13] 马燕华,苏春利,刘伟江,等.水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J].环境科学,2016,37(12):4690-4699.
Ma Y H, Su C L, Liu W J, et al. Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: evidences from isotopic and hydrochemical characteristics[J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4690-4699.
- [14] Lingle D A, Kehew A E, Krishnamurthy R V. Use of nitrogen isotopes and other geochemical tools to evaluate the source of ammonium in a confined glacial drift aquifer, Ottawa County, Michigan, USA[J]. Applied Geochemistry, 2017, 78: 334-342.
- [15] 唐春雷,梁永平,王维泰,等.龙子祠泉域岩溶水水化学同位素特征[J].桂林理工大学学报,2017,37(1):53-58.
Tang C L, Liang Y P, Wang W T, et al. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of the karst groundwater systems in Longzici spring basin[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(1): 53-58.
- [16] 梁永平,赵春红,唐春雷,等.山西娘子关泉水及污染成因再分析[J].中国岩溶,2017,36(5):633-640.
Liang Y P, Zhao C H, Tang C L, et al. Reanalysis of spring water and its pollution causes of the Niangziguan spring in Shanxi[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 633-640.
- [17] 李华,文章,谢先军,等.贵阳市三桥地区岩溶地下水水化学特征及其演化规律[J].地球科学,2017,42(5):804-812.
Li H, Wen Z, Xie X J, et al. Hydrochemical characteristics and evolution of karst groundwater in Sanqiao District of Guiyang City[J]. Earth Science, 2017, 42(5): 804-812.
- [18] Xiao K, Wilson A M, Li H L, et al. Crab burrows as preferential flow conduits for groundwater flow and transport in salt marshes: a modeling study[J]. Advances in Water Resources, 2019, 132, doi: 10.1016/j.advwatres.2019.103408.
- [19] 唐春雷,郑秀清,梁永平.龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J].环境科学,2020,41(5):2087-2095.
Tang C L, Zheng X Q, Liang Y P. Hydrochemical characteristics and formation causes of ground karst water systems in the Longzici spring catchment[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2087-2095.
- [20] 韩行瑞,鲁荣安,李庆松,等.岩溶水系统——山西岩溶大泉研究[M].北京:地质出版社,1993.
- [21] 张晓娟.运城市地下热水的分布特征及成因分析[J].山西水利科技,2007,(2):61-62,64.
Zhang X J. Analysis on formation origin and characters of hot underground water in Yuncheng City[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2007, (2): 61-62, 64.
- [22] 曹小虎.南梁—古堆泉域岩溶地下水系统研究分析[J].地下水,2005,27(3):181-183.
Cao X H. Systematic analysis and research of karst groundwater

- in Nanliang-Gudui springhead area[J]. *Ground Water*, 2005, **27**(3): 181-183.
- [23] 陈素霞. 古堆泉域地下水现状监测分析[J]. *山西水利科技*, 2017, (4): 49-50, 64.
- Chen S X. Surveying and analyzing the present situation of groundwater of the Gudui spring-feeding field [J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 2017, (4): 49-50, 64.
- [24] 南阳红. 古堆泉开发利用与保护分析研究[J]. *地下水*, 2008, **30**(5): 80-81.
- [25] 任柳妹. 古堆泉生态修复地下水环境演化数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [26] 张松涛. 古堆泉生态复流方案及效果分析[J]. *山西水利*, 2017, **33**(5): 6-8.
- [27] 王亚琴. 古堆泉地下水化学成分演化规律及形成机理模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [28] 申豪勇, 梁永平, 赵春红, 等. 古堆泉岩溶地下水系统特征及系统圈划[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, **50**(1): 217-225.
- Shen H Y, Liang Y P, Zhao C H, *et al.* Hydro-geological characteristics and demarcation of Gudui spring karst groundwater system[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, **50**(1): 217-225.
- [29] 山西省水资源管理中心, 山西水利发展研究中心, 石鼓神泓—鼓堆泉[J]. *山西水利*, 2010, **26**(8): 3-6.
- [30] 唐春雷, 晋华, 梁永平, 等. 娘子关泉域岩溶地下水位变化特征及成因[J]. *中国岩溶*, 2020, **39**(6): 810-816.
- Tang C L, Jin H, Liang Y P, *et al.* Characteristics and causes of variation of karst groundwater level in the Niangziguan spring area [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, **39**(6): 810-816.
- [31] Tang C L, Jin H, Liang Y P. Using isotopic and hydrochemical indicators to identify sources of sulfate in karst groundwater of the Niangziguan spring field, China[J]. *Water*, 2021, **13**(3), doi: 10.3390/w13030390.
- [32] 唐春雷, 梁永平, 韩凯, 等. 玉泉山泉九龙山—香峪向斜的水文地质意义[J]. *中国岩溶*, 2015, **34**(5): 431-437.
- Tang C L, Liang Y P, Han K, *et al.* Hydrogeological significance of the Jiulongshan-Xiangyu syncline at Yuquanshan spring[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, **34**(5): 431-437.
- [33] 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 等. 汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4440-4448.
- Zhao C H, Shen H Y, Wang Z H, *et al.* Hydrochemical and isotopic characteristics in the surface water of the Fenhe river basin and influence factors[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4440-4448.
- [34] 黄文辉, 杨敏, 于炳松, 等. 塔中地区寒武系-奥陶系碳酸盐岩 Sr 元素和 Sr 同位素特征[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2006, **31**(6): 839-845.
- Huang W H, Yang M, Yu B S, *et al.* Strontium isotope composition and its characteristics analysis of Cambrian-Ordovician carbonate in Tazhong District, Tarim basin[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2006, **31**(6): 839-845.
- [35] 刘昊年, 黄思静, 胡作维, 等. 锶同位素在沉积学中的研究与进展[J]. *岩性油气藏*, 2007, **19**(3): 59-65.
- Liu H N, Huang S J, Hu Z W, *et al.* Advances of strontium isotope in sedimentology [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, **19**(3): 59-65.
- [36] 郭耀庚. 地质矿物风化作用下形成锶同位素在沉积学领域的应用[J]. *世界有色金属*, 2020, (22): 178-179.
- Guo Y G. Application of strontium isotope formed by weathering of geological minerals in Sedimentology [J]. *World Nonferrous Metals*, 2020, (22): 178-179.
- [37] 高旭波, 向绚丽, 侯保俊, 等. 水化学—稳定同位素技术在岩溶水文地质研究中的应用[J]. *中国岩溶*, 2020, **39**(5): 629-636.
- Gao X B, Xiang X L, Hou B J, *et al.* Application of hydrochemistry coupled with stable isotopes in the study of karst water hydrogeology[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, **39**(5): 629-636.
- [38] 江茂生, 朱井泉, 陈代钊, 等. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2002, **32**(1): 36-42.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Jeelani G, Shah R A, Deshpande R D, *et al.* Distinguishing and estimating recharge to karst springs in snow and glacier dominated mountainous basins of the western Himalaya, India[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, **550**: 239-252.
- [42] 唐春雷, 梁永平, 晋华, 等. 山西娘子关泉群及其水的来源[J]. *中国岩溶*, 2022, **41**(2): 174-182.
- Tang C L, Liang Y P, Jin H, *et al.* Niangziguan spring group in Shanxi Province and its water source [J]. *Carsologica Sinica*, 2022, **41**(2): 174-182.
- [43] 唐春雷, 梁永平, 晋华, 等. 山底河流域煤矿酸性矿井水野外监测[J]. *中国岩溶*, 2022, **41**(4): 522-531.
- Tang C L, Liang Y P, Jin H, *et al.* Overview of field monitoring for acid mine water system of the coal mine in Shandi river basin [J]. *Carsologica Sinica*, 2022, **41**(3): 522-531.
- [44] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [45] Moran-Ramírez J, Ramos-Leal J A, Mählknecht J, *et al.* Modeling of groundwater processes in a karstic aquifer of Sierra Madre Oriental, Mexico[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, **95**: 97-109.
- [46] Keul N, Langer G, Thoms S, *et al.* Exploring foraminiferal Sr/Ca as a new carbonate system proxy [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, **202**: 374-386.
- [47] Yokota Y, Tanaka C, Kurosawa S, *et al.* Effects of Ca/Sr ratio control on optical and scintillation properties of Eu-doped Li(Ca, Sr) AlF₆ single crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2018, **490**: 71-76.

CONTENTS

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