

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比:以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例

谢国文¹, 杨平恒^{1*}, 盛婷¹, 邓书金², 洪爱花²

(1. 西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 自然资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 400715;

2. 重庆地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆市地下水资源利用与环境保护实验室, 重庆 401121)

摘要: 为探讨人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉水化学变化, 以重庆金佛山水房泉和碧潭泉为例, 基于两泉自然环境和人类活动强度差异, 利用独立样本 t 检验、Gibbs 图解法、主成分分析(PCA)及地球化学敏感性分析等方法, 对两泉水文地球化学特征及其控制因素进行对比研究. 结果表明, 垂直气候带岩溶发育的差异性导致碧潭泉离子总浓度高于水房泉. 不同高程的岩性决定了水房泉水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 而碧潭泉为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型. 碳酸盐岩溶蚀是两泉 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的主要来源, 水房泉 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 K^+ 和 Na^+ 在冬夏季受酒店排污影响出现峰值, 碧潭泉各指标年内变化平稳. 水房泉水属于Ⅳ类水, 而碧潭泉水质相对较好. PCA 分析表明水-岩作用为两泉的首控因子, 酒店排污和来自降水的离子输入分别对水房泉、碧潭泉水质具有重要影响, 同时降水导致的水土流失与淋滤效应也对两泉有一定影响. 水房泉的地球化学敏感性大于碧潭泉, 故应针对不同高程岩溶系统特点制定相应保护措施, 特别是要重视景区酒店污水的处理.

关键词: 岩溶泉; 水化学特征; 主成分分析(PCA); 酒店排污; 金佛山

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3078-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812010

Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing

XIE Guo-wen¹, YANG Ping-heng^{1*}, SHENG Ting¹, DENG Shu-jin², HONG Ai-hua²

(1. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Natural Resources, Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Laboratory of Chongqing Groundwater Resource Utilization and Environmental Protection, Nanjiang Hydrogeological Team Under the Chongqing Geological Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, China)

Abstract: To investigate the hydrochemical variation of karstic groundwaters in a vertically zoned climate region affected by human activity, Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain area of Chongqing were selected as a study site. Based on the differences between the natural state and intensity of human activity of these two springs, their hydrogeochemical characteristics and the controlling factors on karstic groundwaters were analyzed by means of independent sample t tests, the Gibbs graphic method, principle component analysis (PCA), and geochemical susceptibility analysis. The results show that differences in karst development in the vertical climatic zone leads to higher total ion concentrations in Bitan Spring than in Shuifang Spring. The hydrochemical types of Shuifang Spring and Bitan Spring are $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, respectively, which reflect the lithology of their different elevations. Carbonate rock dissolution is the main source of Ca^{2+} , Mg^{2+} , and HCO_3^- in karstic groundwaters. Hotel sewage discharge supplies SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , and Na^+ in Shuifang Spring, which peaked in winter and summer, while hydrochemical parameters of Bitan Spring changed smoothly throughout the year. The water quality of Bitan Spring is better than Shuifang Spring (Shuifang Spring water is classified as Class IV). PCA shows that the water-rock interaction was the first controlling factor. Hotel sewage discharge and ions from precipitation had important effects on Shuifang Spring and Bitan Spring, respectively. In addition, the effects of soil erosion and leaching caused by precipitation also impact on the water quality of two springs to some extent. The geochemical susceptibility of Shuifang Spring was greater than that of Bitan Spring; therefore, corresponding measures should be formulated according to the characteristics of these differently elevated karst systems when exploiting groundwater resources. This is especially the case for the treatment of hotel sewage.

Key words: karst spring; hydrochemical characteristics; principle component analysis(PCA); hotel sewage; Jinfo Mountain

我国岩溶地下水资源量占地下水总量的 1/4, 岩溶地下水是岩溶区水资源开发的主要甚至唯一对象, 在区域社会经济发展中占据重要地位^[1, 2]. 表层岩溶带岩石裂隙化程度高, 岩溶作用和渗透性强烈, 形成一个独特的含水层^[3]. 岩溶地下水储存于

收稿日期: 2018-12-01; 修订日期: 2019-01-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2018AB002, XDJK2014C114)

作者简介: 谢国文(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶水化学及水文地质, E-mail: xiegw92@126.com

* 通信作者, E-mail: pinghengyang@126.com

岩溶含水层中, 以岩溶泉、河流泄流和蒸发等方式排泄^[4]. 表层岩溶泉的流量、水温和水化学组分等特征是自然地理、地质和地下水等多方因素综合作用的反映. 同时, 岩溶环境是旅游资源的重要载体之一, 近年来人类活动对岩溶地下水的污染日益严重^[5, 6]. 由于岩溶系统对环境变化敏感^[3], 具有特殊的资源环境效应^[7, 8], 故表层岩溶泉的水文地球化学特征及其影响因素的研究不断加强, 受到学界关注.

前人的研究多集中于地下水脆弱性^[9]、污染物来源^[10]、水文模型^[11]和岩溶碳循环^[12, 13]等角度, 对岩溶泉水文地球化学特征及其影响因素研究以单个泉点的自然机制^[14]或人为影响^[15]居多. 而在岩溶泉系统受自然因素与人为活动的综合影响方面, 这些研究缺乏不同点之间的对比分析. 同时研究时间尺度过短^[16, 17], 研究指标较少^[18, 19], 难以系统掌握岩溶泉对外界环境的响应机制.

重庆金佛山具有典型的垂直气候带岩溶生态环境, 水房泉和碧潭泉分别代表山体不同高度的温带和亚热带两大岩溶生态系统^[20], 同时水房泉流域人类活动强度大, 岩溶地下水存在潜在污染. 两泉水的理化性质能够反映这种外界环境的差异性. 基于此, 本研究利用独立样本 t 检验、Gibbs 图解法、主成分分析 (principle component analysis, PCA) 和地球化学敏感性分析等方法, 对两泉水的水文地球化学特征及控制因素进行对比研究, 通过进一步揭示垂直气候带岩溶动力系统运行规律, 以期防治污

染、保护岩溶地下水资源提供科学依据.

1 研究区概况

1.1 自然地理环境

金佛山自然保护区 ($28^{\circ}55' \sim 29^{\circ}07'N$, $107^{\circ}06' \sim 107^{\circ}18'E$) 位于重庆市南川区境内 (图 1), 面积达 441 km^2 . 金佛山属大娄山东段的一部分, 为向斜中山, 山势高峻, 主峰风吹岭海拔 $2\,251 \text{ m}$. 山体北坡陡峻, 南坡平缓. 由于海拔高, 金佛山气候带的垂直分异明显, 从山脚到山顶温度差可达 $8 \sim 9^{\circ}\text{C}$. 土壤和植物分布也具有明显的垂直分带性. 从山脚向山顶土壤依次为黄壤、暗棕壤、黄棕壤和棕壤, 植被分别为偏湿性常绿阔叶林带、偏暖性针叶林带、偏暖性针阔叶混交林带及落叶常绿阔叶和竹类偏寒湿林带. 海拔差异造成气温和降水量的不同, 进而导致岩溶环境的差异, 山顶与山脚分别形成不同的岩溶生态环境. 水房泉位于海拔 $2\,050 \text{ m}$ 的金佛山山顶西坡陡崖上, 介于二叠系灰岩与龙潭煤系地层之间, 地质构造呈倾角很小的宽缓向斜 (图 1). 山顶多年平均气温、降雨量分别为 8.5°C 、 $1\,434.5 \text{ mm}$, 降水集中分布于 $4 \sim 10$ 月, 约占全年降水量的 83% ^[21], 11 月~次年 3 月出现降雪. 植被为亚热带常绿落叶阔叶林、灌丛和草甸, 土壤厚度 $30 \sim 120 \text{ cm}$. 因温度低, 现代岩溶发育较弱, 代表山体顶部温带岩溶生态系统^[22]. 碧潭泉位于水房泉的北西向, 海拔约 730 m , 为典型低山峡谷地貌 (图 1). 碧潭泉为接触式溢流泉, 岩性为寒武系

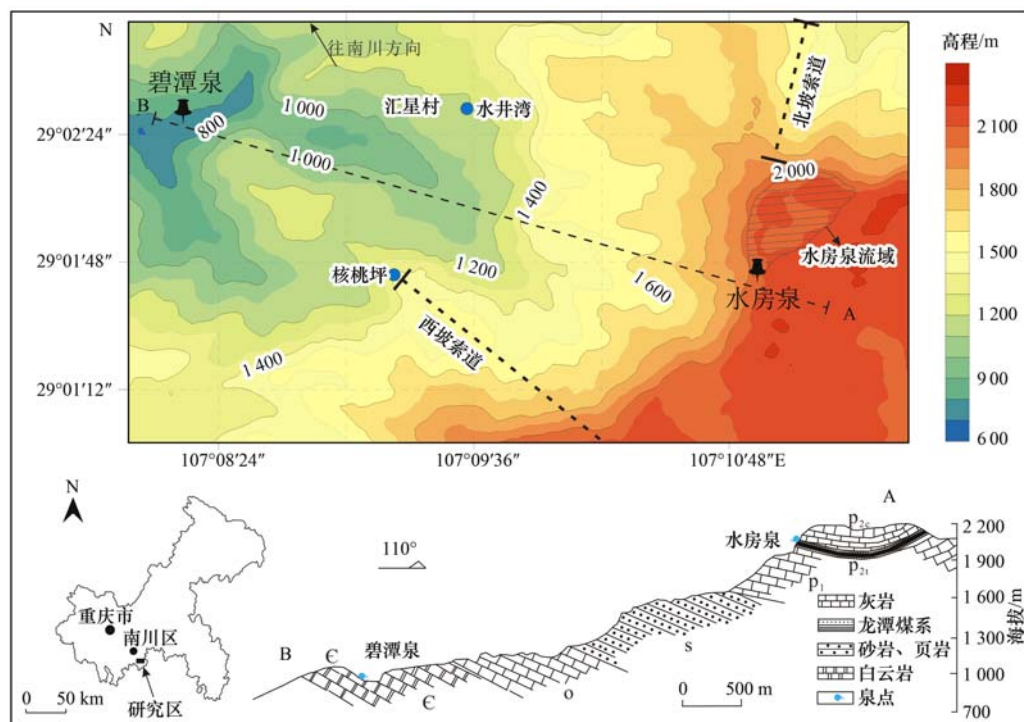


图 1 研究区位及水文地质剖面示意

Fig. 1 Geographical location and hydrogeological map of the study area

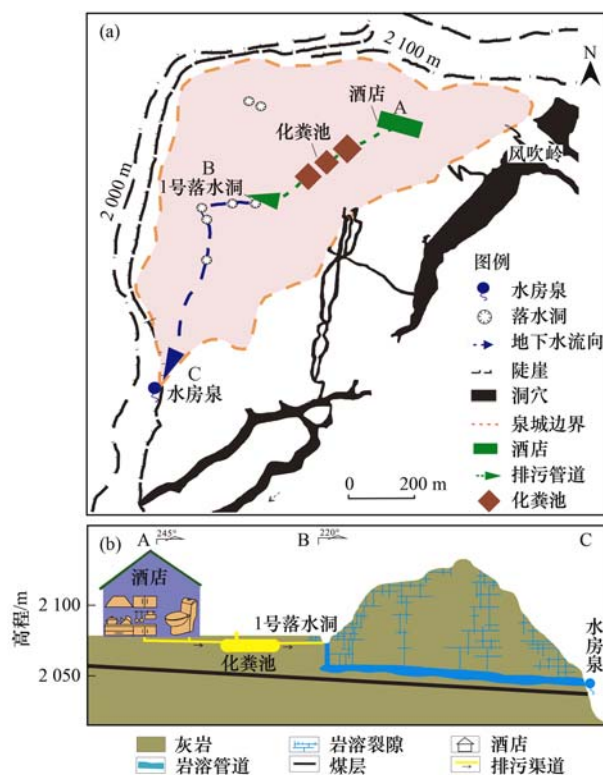
上统毛田组灰质白云岩. 土壤厚度 50 ~ 80 cm, 植被主要为次生灌丛, 覆盖率 70%. 多年平均气温、降雨量分别为 16.6℃、1 286.5 mm. 水热条件较好, 岩溶发育较强, 有大面积钙华沉积, 代表山体下部亚热带岩溶生态系统.

1.2 人类活动

金佛山是西南地区重要的旅游目的地, 2013 年被评为国家 5A 级风景名胜区, 2014 年 6 月入选世界自然遗产. 据统计, 2014 年景区共接待游客 519 100 人次. 冬夏两季为旅游高峰期, 冬季赏高山冰雪美景, 夏季上山避暑. 景区拥有北坡和西坡两条观光索道, 其中北坡索道可直达水房泉流域(图 1). 水房泉流域内建有某大型酒店[图 2(a)], 共有 96 间套房、195 张床位和 620 人的餐厅^[15]. 酒店的生活污水由流域中部的一个地下化粪池系统处理, 化粪池容积约 120 m³, 经过三级分格沉淀和厌氧消化后, 作为点源的污水通过 1 号落水洞排入岩溶含水层[图 2(b)]. 前人的示踪实验表明^[23-25], 酒店、1 号落水洞和水房泉三者间存在直接水力联系, 污水在地下管道的最短滞留时间仅为 16.9 h. 水房泉是区域含水层的主要出口, 较短的污水处理时间及岩溶含水介质发育极易造成地下水污染. 而碧潭泉所在的碧潭幽谷景区, 人类活动强度较小, 只有一条观光步道通行, 无大型游客接待设施.

2 研究方法

定期采集两泉水的化学样品, 频率为 24 d 一次, 时间跨度为一个水文年(2016-09 ~ 2017-09), 两泉各有 16 组样品. 样品现场经 0.45 μm 混合纤维素滤膜过滤后, 分别用 50 mL、550 mL 经硝酸浸泡的高密度聚乙烯瓶分装为阳离子、阴离子样品(阳离子水样酸化至 pH 值 < 2), 后放入 4℃ 冰箱冷藏. 使用硬度计和碱度计(德国 Aquanmerck 公司), 现场测试泉水的 Ca²⁺、HCO₃⁻ 浓度, 精度分别为 2 mg·L⁻¹、0.1 mmol·L⁻¹. 使用 Multi3430 便携式水质仪(德国 WTW 公司), 对泉水 pH 值、水温、电导率和溶解氧进行测定, 精度分别为 0.001、0.01℃、1 μS·cm⁻¹ 和 0.01 mg·L⁻¹. 利用 Manta2 多参数水质分析仪(美国 Eureka 公司)获取水位数据, 再经水位-流量曲线转化成流量. K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 等阳离子浓度检测采用 ICP-OES Optima 2100DV (美国 PerkinElmer 公司)完成, 仪器 1 h 内相对标准偏差 ≤ 0.5%. NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 PO₄³⁻ 等阴离子测试参照饮用天然矿泉水检测方法(GB/T 8538-2008), 使用紫外分光光度计(UV2450, 日本岛津公司)检测, Cl⁻ 测



(a) 水房泉流域平面, (b) 水房泉流域剖面 (修改自文献[24])

图 2 水房泉流域示意

Fig. 2 Map showing the location of the Shuifang Spring basin

试采用 AgNO₃ 滴定法. 以上测试均在西南大学岩溶环境重庆市重点实验室进行.

利用 AquaChem 5.1 软件绘制两泉水化学 Piper 图. 利用 SPSS 19 的独立样本 *t* 检验法, 从统计学的角度判断水房泉、碧潭泉的水化学指标有无差异及其显著程度. 统计之前, 各个指标均通过单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验, 渐进显著性均 > 0.05, 符合正态分布. 主成分分析(PCA)通过降维的方法, 把一系列相关参数精简为几个相对独立的指标, 可解析一些化学组分的来源问题. 经检验, 两泉的 16 组数据均通过 KMO 和 Bartlett 球形检验.

3 结果与分析

3.1 水化学特征

受岩性和温度控制^[26], 发育于白云岩地层的碧潭泉, 其 Mg²⁺、HCO₃⁻、电导率和水温均高于水房泉, 离子总浓度是水房泉的 1.3 倍(表 1), 初步表明垂直气候差异对两泉水化学的影响. 碧潭泉溶解氧、流量均大于水房泉. 由 pH 值可知, 两泉为偏碱性水. 阳离子质量浓度方面, 水房泉排序为 Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺, Ca²⁺ 占阳离子总量的 90% 以上, 而碧潭泉为 Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > Na⁺, Ca²⁺、Mg²⁺ 为主要阳离子, 两者合计占阳离子总量的 97% 以上. 阴离子方面, 两泉的离子排序均为

$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{PO}_4^{3-}$, 水房泉以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主要阴离子, 三者占阴离子总量的 94% 以上, 而碧潭泉以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主. 水房泉阴阳离子 CV 值普遍大于碧潭泉(表 1), 反映了水房泉离子变幅更大, 干扰因素更多^[27]. 对两泉主要离子作 Piper 图(图 3), 可知两泉碳酸盐硬度超过 50%, 水房泉水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 碧潭泉为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型.

两泉水质差异较明显. 水房泉 NO_3^- 最大值为碧潭泉的 3.7 倍, 达到 $17.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 水房泉中全 Fe 和全 Mn 的最大值为 $0.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.238 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 两泉的 pH 值的最大值 ≥ 8.5 , Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 含量较低. 总体而言, 水房泉水中组分含量较高^[28], 根据我国地下水质量标准划分 (GB/T 14847-2017), 属于 IV 类水. 而碧潭泉各单指标浓度均较低(表 1), 水质较好.

表 1 水房泉、碧潭泉水化学特征值¹⁾

Table 1 Physical and chemical indexes of water in Shuifang Spring and Bitan Spring

采样点	项目	电导率	pH 值	溶解氧	水温	流量	HCO_3^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Cl^-	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	全 Fe	全 Mn	Sr^{2+}
水房泉	最小值	215	7.01	7.60	9.70	0.32	109.80	4.65	0.02	3.63	7.80	0.61	1.51	34.47	1.20	0.02	0.006	0.27
	最大值	307	8.97	9.31	13	30.75	158.60	17.87	0.41	18.50	13.47	1.76	4.74	72.85	2.51	0.28	0.238	0.62
	平均值	259	7.96	8.72	10.36	3.53	137.82	8.29	0.14	10.97	10.86	1.05	2.71	52.90	1.85	0.08	0.061	0.41
	标准偏差	29.15	0.52	0.39	0.78	2.89	13.33	4.68	0.14	3.98	1.84	0.42	0.94	9.75	0.39	0.06	0.06	0.09
	CV 值	0.11	0.07	0.04	0.08	0.82	0.10	0.57	0.98	0.36	0.17	0.40	0.35	0.18	0.21	0.83	1.05	0.21
碧潭泉	最小值	316	7.00	8.73	14.30	2.95	164.70	1.76	0.01	9.38	2.84	0.72	0.47	34.96	17.97	0.02	MDL	0.10
	最大值	357	8.55	9.52	15.70	196.10	219.60	4.80	0.10	21.62	8.51	1.37	1.03	46.73	24.05	0.10	0.005	0.23
	平均值	336.06	8.04	9.30	14.73	16.79	204.15	3.95	0.05	16.42	5.01	0.83	0.59	42.09	21.61	0.04	0.002	0.15
	标准偏差	12.27	0.48	0.24	0.38	20.83	12.60	0.71	0.03	3.04	1.63	0.17	0.15	2.94	1.39	0.02	0.00	0.04
	CV 值	0.04	0.06	0.03	0.03	1.24	0.06	0.18	0.60	0.19	0.33	0.21	0.25	0.07	0.06	0.59	0.93	0.26

1) 电导率单位 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 水温单位 $^{\circ}\text{C}$, 流量单位 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$, pH 值无单位, 其他单位均为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 下同; CV 值为变异系数, 表示各指标相对于平均值的离散程度; MDL 表示低于仪器检测限

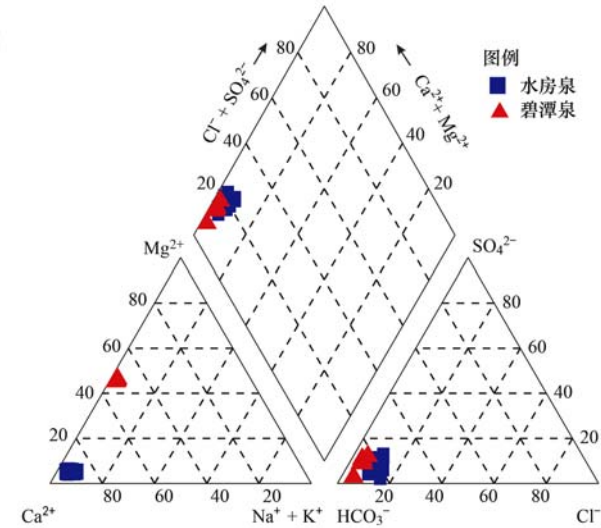


图 3 水房泉、碧潭泉水化学 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of groundwater in Shuifang Spring and Bitan Spring

3.2 理化指标季节变化特征

基于两泉的水化学指标独立样本 t 检验(表 2), 可知两泉绝大部分指标(13 个)差异极其显著, P 值均 <0.01 , 只有 pH 值、 K^+ 、 PO_4^{3-} 和全 Fe 这 4 个指标无明显差异或差异性不显著. 图 4 为水房泉与碧潭泉各指标 2016 年 9 月至 2017 年 9 月的年内变化趋势. 水房泉电导率在冬季和夏季升高, 而碧

潭泉基本稳定在 $336 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右, 全年变幅较小. 水房泉溶解氧各季节均出现波动, 变化相对无序, 碧潭泉则全年平稳. 两泉水温全年变幅较小, 且与两者当地的年均气温基本一致. 受雨季降水补给, 两泉在春秋两季及夏初时段为丰水期, 流量达到峰值, 其余季节为枯水期. 两泉 pH 值表现为夏秋低、冬春高, 以重庆为代表的西南地区酸雨污染严重^[29], 4 ~ 10 月为金佛山雨季, 土壤中 CO_2 浓度高^[30], 降雨之后, 随雨水渗入地下, 因而 pH 值在 4 ~ 10 月明显呈下降趋势. 与 pH 值相反, 两泉的 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Sr^{2+} 表现为夏秋高、冬春低, 特别是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Sr^{2+} 趋势高度一致(图 4), 表明其受共同因素控制. 水房泉的 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 Cl^- 、 K^+ 和 Na^+ 等离子季节变化大于碧潭泉, 其中水房泉 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 K^+ 和 Na^+ 在冬夏出现峰值, 而碧潭泉则全年平稳(图 4). 夏季(7 ~ 8 月)与冬季(12 ~ 1 月)为旅游旺季, 受山顶酒店排污影响, 水房泉水质急剧恶化, 大部分阴阳离子浓度均出现升高^[15, 23, 25]. Yang 等^[25] 利用 $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3) 和 $\delta^{18}\text{O}$ (NO_3) 证实了酒店污水对水房泉中硝酸盐的影响, 导致水中 NO_3^- 浓度升高, 故可知水房泉受人为干扰较大. 碧潭泉 Cl^- 在冬夏季节出现小幅上升, 而水房泉季节性不明显. 水房

表 2 水房泉、碧潭泉水化学指标独立样本 *t* 检验结果¹⁾

Table 2 Independent *t*-test results of water chemical indicators at Shuifang Spring and Bitan Spring

指标	电导率	pH 值	溶解氧	水温	流量	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	全 Fe	全 Mn	Sr ²⁺
水房泉平均值	259	7.96	8.72	10.36	3.218	137.82	8.29	0.14	9.84	10.86	1.05	2.71	52.9	1.85	0.076	0.061	0.41
碧潭泉平均值	336.06	8.04	9.3	14.73	12.797	204.15	3.95	0.05	15.57	5.01	0.83	0.59	42.09	21.61	0.04	0.002	0.15
平均差值	77.06	0.08	0.58	4.37	9.579	66.32	4.34	0.1	5.73	5.85	0.22	2.12	10.81	19.76	0.036	0.058	0.26
<i>t</i>	9.747	0.454	5.096	20.2	-3.346	14.216	-3.667	-2.639	3.43	-9.516	-1.904	-8.914	-4.234	53.244	-2.124	-3.666	-10.719
<i>P</i>	0	0.653	0	0	0.004	0	0.002	0.018	0.002	0	0.071	0	0.001	0	0.047	0.002	0

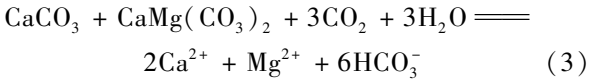
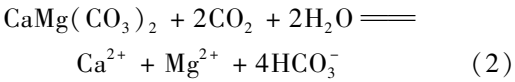
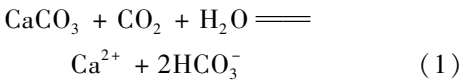
1) *P* < 0.05 说明两组数据有显著性差异, *P* < 0.01 说明两组数据差异极显著; 水房泉 *N* = 16, 碧潭泉 *N* = 16 (HCO₃⁻、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Sr²⁺、全 Fe 和全 Mn 的 *N* = 15)

泉全 Fe 和全 Mn 在秋季与夏季有升高现象, 碧潭泉则变化趋势平稳.

4 讨论

4.1 水化学主控因素分析

Gibbs 图^[31]可以指示天然水体中各种离子的起源机制及演化趋势, 其中间偏左侧、右上角和右下角分别表示水化学特征受到水-岩作用、蒸发结晶作用和降雨的控制. 由图 5 可知两泉的水化学特征为岩石风化型, 碳酸盐岩溶蚀-沉淀过程占主导地位, 大气降水的离子输入微弱, 这与重庆地区绝大部分地下河水化学特征的控制因素一致^[32]. 因垂直气候带下岩溶发育的差异性, 低海拔的碧潭泉热量条件好, 离子总浓度高于水房泉(表 1), TDS 值也大于水房泉, 故其较水房泉在图中偏左上方(图 5). 由高程差异导致的植被、土壤对两泉水化学特征也可能有贡献, 但贡献程度还不清楚. 岩溶区地层中方解石和白云石的比例控制着 *c*(Mg²⁺)/*c*(Ca²⁺) 比值^[33], 根据岩溶作用方程[公式(1)~(3)]绘制岩石溶蚀比例图[图 6(a)].



由图 6(a) 可知水房泉受方解石溶蚀控制, 碧潭泉则受方解石与白云石的混合溶蚀. 山上水房泉岩性为灰岩, 而山下碧潭泉为寒武系灰质白云岩, 两泉的比例关系反映了区内不同高程地质岩性的差异. 根据上述方程, 两泉水中 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 HCO₃⁻ 等离子主要为水-岩作用的产物. 理论上, 山下岩溶作用更强, 碧潭泉各离子浓度会相应高于山顶水房泉, 而碧潭泉 Ca²⁺ 实际却低于水房泉(表 1), 故推测有额外因素参与了水房泉灰岩溶蚀. 此外, 水房泉的 NO₃⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻、Cl⁻、K⁺ 和 Na⁺ 的浓度及变幅(CV 值)均大于碧潭泉(水房泉 SO₄²⁻ 浓度低于

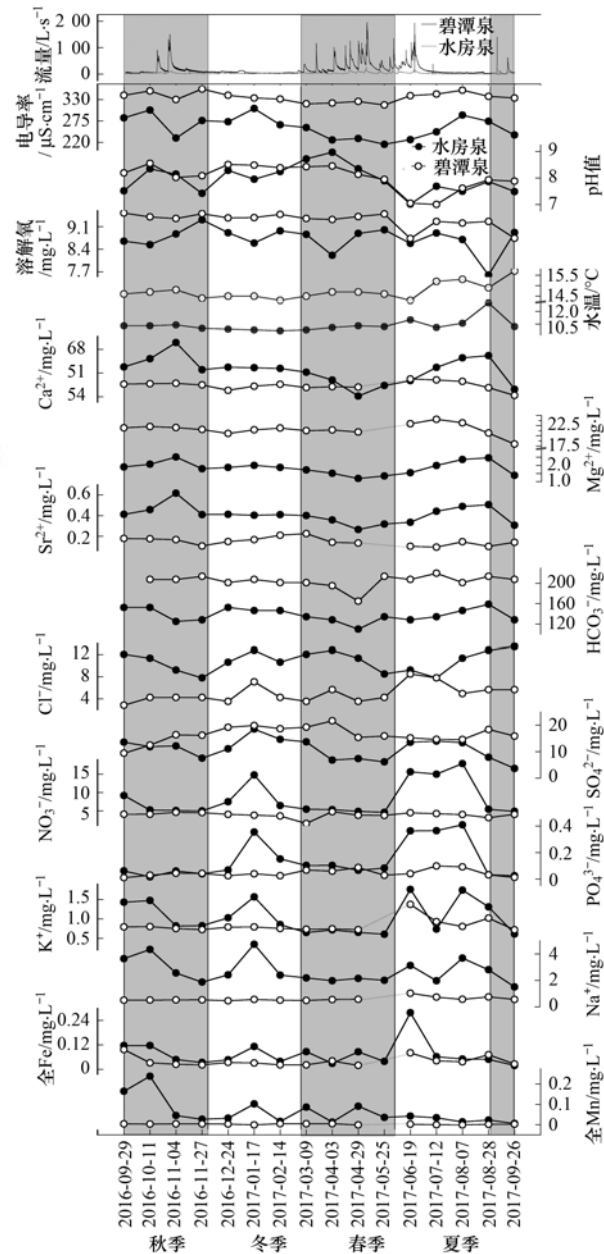


图 4 水房泉、碧潭泉水文地球化学特征变化

Fig. 4 Hydrogeochemical processes in Shuifang Spring and Bitan Spring from September, 2016 to September, 2017

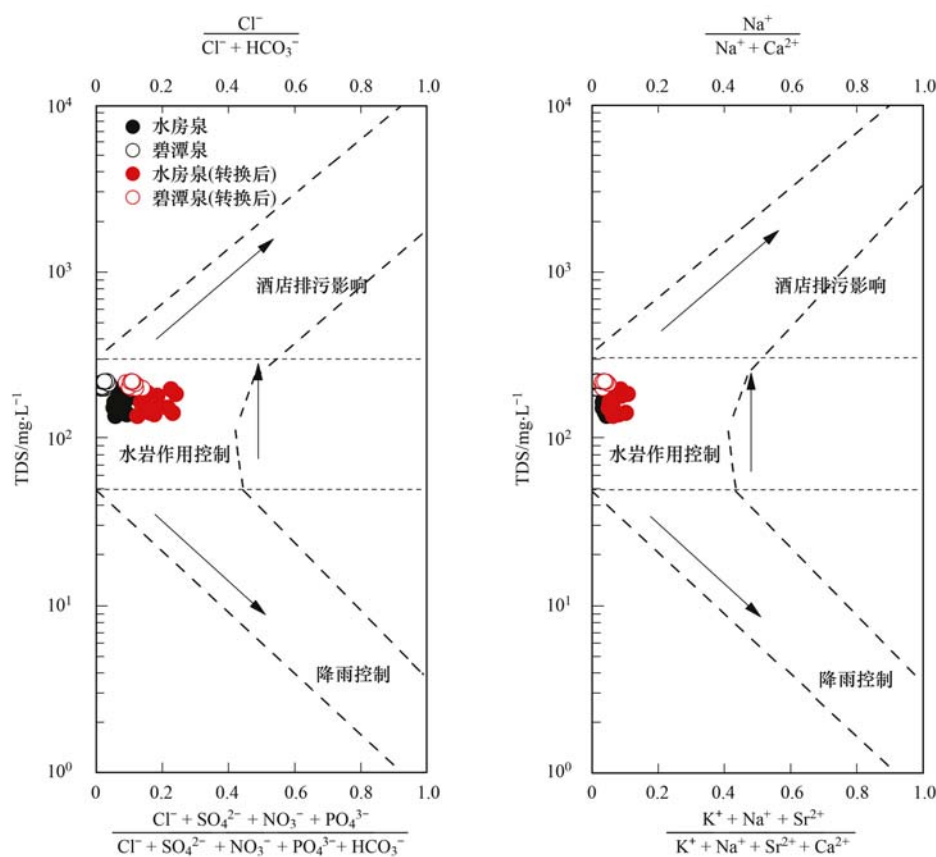


图5 水房泉与碧潭泉 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs diagram for Shuifang Spring and Bitan Spring

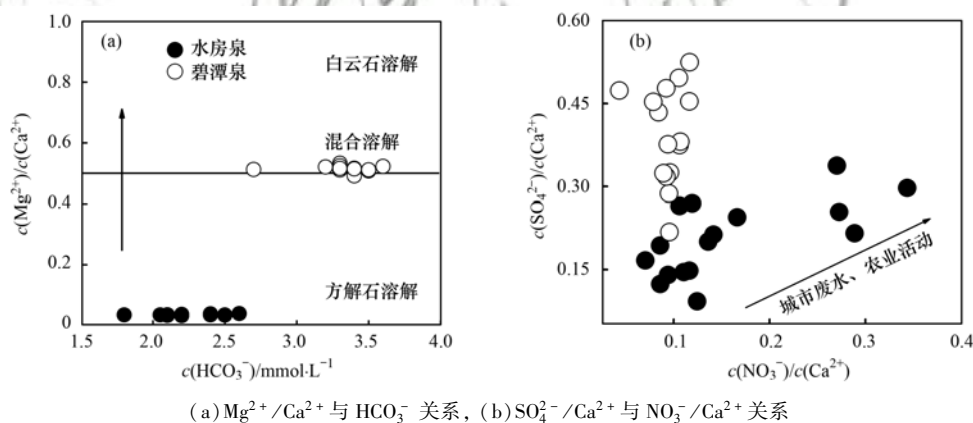
(a) $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 与 HCO_3^- 关系, (b) $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 关系

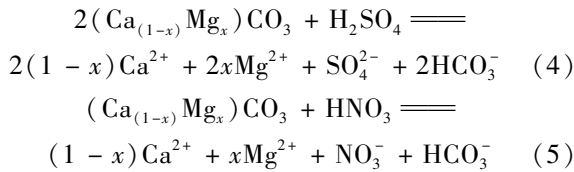
图6 水房泉、碧潭泉离子比值关系

Fig. 6 Ion ratio relationships for Shuifang Spring and Bitan Spring

碧潭泉), 人类活动输入的可能性较大. 水房泉 NO_3^- 与 SO_4^{2-} 相关性较高 ($R^2 = 0.644$), 说明他们具有相同的来源. 水化学 $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{Ca}^{2+})$ 与 $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Ca}^{2+})$ 关系^[32]可指示地下水受人为干扰的类型. 由图6(b)可知, 水房泉数值落在图中城市废水、农业活动范围内. 水房泉流域内建有某大型酒店而无农业活动, 酒店污水在化粪池中停留时间短, 难以得到有效处理^[25]. 游客粪便产生的 NH_4^+ 在微生物硝化作用下会转变为硝酸^[34], 酒店厨房洗涤剂中的磺酸物断键后可形成无机硫酸盐^[23, 35],

这些酸通过1号落水洞潜入含水层后[图2(b)], 与碳酸盐岩反应可产生 NO_3^- 和 SO_4^{2-} [公式(4)、(5)]. 水房泉 SO_4^{2-} 虽变幅大于碧潭泉, 但浓度反而偏低. 一般煤系地层黄铁矿氧化可形成 SO_4^{2-} ^[36], 但水房泉下覆龙潭煤系实为隔水层, 部分水流沿层面渗流, 直接从陡崖排出^[27]. 此外, 污水中含有机质, SO_4^{2-} 在细菌的作用下会生成 H_2S , 使水体发臭, 降低了 SO_4^{2-} 浓度^[37]. 经查证^[15], 游客粪便中还包含 K、Na 和 $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$ (尿酸), 酒店生活污水主要包含 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (磷酸四钠盐)、 $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (三聚

磷酸五钠盐)、NaClO、NaOH 和 ClO₂, 这些成分进入水体后表现为 K⁺、PO₄³⁻、Cl⁻ 和 Na⁺ 等. 因此可知酒店排污是导致水房泉 NO₃⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻、Cl⁻、Na⁺ 和 K⁺ 浓度升高的主要原因.



改变 Gibbs 模型的横轴离子比例关系, 将上述 SO₄²⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻ 和 K⁺ 等受人类活动影响的离子添加到阴阳离子式中. 此外, 重庆地处内陆季风气候区, 年蒸发量小的同时也不存在卤化矿物地层, 故 Gibbs 图右上方主控因素变为酒店排污影响, 得到转换后的 Gibbs 图(图 5). 可知两泉仍主要受控于水-岩作用, 但水房泉较碧潭泉样品往右侧偏移更明显, 说明加入上述带有类活动影响特征的离子后, 水房泉地下水受到水-岩作用的影响更为强烈, 这也在一定程度上增加了 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 HCO₃⁻ 浓度[公式(4)、(5)]. 因此可知山顶水房泉除了受水-岩作用控制外, 酒店排污对其水质具有重要影响, 而碧潭泉基本受垂直气候带下的低海拔岩溶作用控制.

4.2 主成分分析

为进一步阐明两泉地球化学的影响因素, 采用主成分分析法(PCA), 对各大因子归类、定级. 选取水房泉特征值 > 1 的 4 组主成分, 其方差贡献率分别为 35.879%、18.596%、13.839% 和 10.518%, 累计方差贡献率为 78.832%. 选取碧潭泉特征值 > 1 的 4 组主成分, 其方差贡献率分别为 35.833%、15.001%、13.152% 和 11.676%, 累计方差贡献率为 75.662%(表 3).

水房泉 PC1 中高载荷指标有 HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Sr²⁺, 其载荷分别为 0.752、0.774、0.835 和 0.681(表 3), 这 4 种离子是岩溶作用的产物^[38], 表征水-岩作用的强弱. 电导率是水-岩作用程度的直接体现^[39], 载荷也较高, 达到 0.757. 流量与 PC1 呈负相关, 载荷为 -0.757. 所以, PC1 可部分归纳为枯水期水-岩作用因素. 同时, PC1 中 K⁺、Na⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 也有较高载荷, 分别为 0.828、0.793、0.568 和 0.506. 如前文所述, 所以 PC1 的另一部分代表酒店排污的离子输入. PC2 中全 Fe、NO₃⁻ 和 PO₄³⁻ 载荷分别为 0.628、0.748 和 0.811, 与 PC2 关系密切. 亚热带土壤发生脱硅富铝化作用, 使得硅酸盐和盐基离子淋失, 铁锰氧化物不断聚集. 而水房泉流域坡度较大, 土层

浅薄, 且 2017 年下半年景区升级改造, 地表植被破坏严重, 夏秋季节暴雨集中, 易发生水土流失, 致使全 Fe 在夏秋季有升高现象(图 4). 另一方面, 病原微生物等污染物质易吸附在土壤颗粒上^[40], 随降雨的淋滤效应通过落水洞以分散面状入渗和集中灌入补给进入含水层^[41], 导致地下水中 NO₃⁻ 和 PO₄³⁻ 浓度升高. 故 PC2 代表了雨季降水引发的水土流失及淋滤效应. PC3 中 Sr²⁺、Cl⁻ 和全 Mn 的载荷分别为 -0.521、0.576 和 0.614. 水房泉 Sr²⁺ 年内变化为夏秋高、冬春低(图 4), 冬春季节气温低, 水-岩作用较弱, 春季温度虽然回升, 但为降雨集中期, 稀释效应明显^[42]. 而 Cl⁻ 和全 Mn 代表了污染物输入及水土流失作用. 与 PC4 密切相关的溶解氧和水温, 其载荷分别为 0.567 和 -0.818. 地下水中溶解氧主要来源为大气, 同时受微生物、水生植物生化过程、气温和光照等要素影响^[4]. 污水中微生物的呼吸作用及对有机物的分解需消耗氧气, 这将导致地下水中的溶解氧下降, 因而其并非受酒店排污影响. 水房泉流域为高山小气候, 水温受控于气温, 而温度越低气体溶解度越高. 重庆地区多夜雨, 降雨到达地面使水温降低, 同时溶解大气和土壤 O₂, 使水体溶解氧浓度升高.

与碧潭泉 PC1 密切相关的有 Cl⁻、K⁺ 和 Na⁺, 载荷分别为 0.828、0.873 和 0.927. 地下水中 K⁺、Na⁺ 的来源有含钠岩石^[43] 和岩盐矿床^[44, 45] 的溶解、离子置换、大气降水输入、化肥和生活污水^[46]. 碧潭泉流域无人类活动, 岩性为白云岩, K⁺、Na⁺ 最可能来自大气降水. 地下水中 Cl⁻ 的来源可分为两大类, 即无机来源和有机来源. 无机来源主要是自然源, 包括岩盐矿床和其他氯化物沉积物的溶解以及雨水中海盐、含 HCl 工业废气的溶解^[44]. 金佛山降雨的水化学类型为 Cl-SO₄-Na-Ca 型^[37], 故 Cl⁻ 应为大气降水输入. pH 值与 PC1 呈负相关, 载荷为 -0.887, 全 Fe 的载荷为 0.798, 代表大气降水引发的水土流失作用. Sr²⁺ 的载荷为 -0.734, 推测受雨水稀释效应影响. PC2 中溶解氧载荷达到 0.631. 相较于山顶水房泉, 山下碧潭泉植被覆盖度更高, 土壤微生物活跃, 且地势开阔, 光照条件好, 溶解氧主要来源于植物光合作用及土壤. Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 两者载荷分别为 0.742 和 0.659, 指代水-岩作用. 此外, PO₄³⁻ 载荷为 0.707, 可能与碧潭幽谷景区小范围人类活动有关. PC3 与流量为负相关, 同时电导率和 HCO₃⁻ 的载荷分别为 0.751 和 0.645, 故 PC3 指代枯水期水-岩作用. 由于温度较低的雨水对地下水具有制冷作用, 因此水温与 PC4 呈负相

关, 其载荷为 -0.767. 同时全 Mn 的载荷也较高, 为 0.646. 因此 PC4 指代降水的降温作用及其引发的水土流失.

综上, 水房泉受酒店排污和水-岩作用综合影响, 降水引发的水土流失、淋滤作用及稀释效应也

对其具有重要影响. 而碧潭泉在水-岩作用控制的同时, 接受大气降水离子输入, 水土流失、雨水的稀释与降温作用也对其有一定影响. 同时垂直气候带差异导致的山顶小气候、光合作用等环境因素也对两泉水化学特征产生一定影响.

表 3 水房泉、碧潭泉水文地球化学指标主成分分析结果¹⁾

Table 3 Principal component analysis results for hydrogeochemical indicators in Shuifang Spring and Bitan Spring

指标	水房泉 (N = 16)				碧潭泉 (N = 16)			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
流量	-0.757	0.254	0.181	0.057	0.328	0.227	-0.735	-0.16
电导率	0.757	-0.144	0.174	0.421	0.397	0.193	0.751	0.018
pH 值	-0.247	-0.53	0.054	0.387	-0.887	-0.015	-0.006	0.237
溶解氧	-0.456	0.371	-0.4	0.567	-0.57	0.631	0.112	0.257
水温	0.357	-0.29	0.171	-0.818	0.124	-0.285	0.402	-0.767
HCO ₃ ⁻	0.752	-0.315	0.134	0.079	0.365	-0.298	0.645	0.412
NO ₃ ⁻	0.568	0.748	-0.083	-0.101	0.377	0.041	0.273	-0.099
PO ₄ ³⁻	0.395	0.811	-0.189	-0.056	0.249	0.707	-0.208	-0.425
SO ₄ ²⁻	0.506	0.464	-0.419	0.165	-0.228	-0.285	-0.497	0.117
Cl ⁻	0.169	-0.394	0.576	-0.049	0.828	-0.226	-0.02	0.033
K ⁺	0.828	0.324	0.356	-0.109	0.873	-0.179	-0.229	0.307
Na ⁺	0.793	0.165	0.428	0.28	0.927	-0.175	-0.279	0.1
Ca ²⁺	0.774	-0.342	-0.431	0.099	0.63	0.659	0.046	0.34
Mg ²⁺	0.835	-0.309	-0.4	-0.04	0.528	0.742	0.112	0.304
全 Fe	0.272	0.628	0.475	-0.11	0.798	-0.317	-0.157	0.261
全 Mn	0.278	-0.104	0.614	0.552	-0.387	-0.313	-0.011	0.646
Sr ²⁺	0.681	-0.368	-0.521	0.024	-0.734	0.118	-0.08	0.276
特征值	6.099	3.161	2.353	1.788	6.092	2.55	2.236	1.985
方差贡献率/%	35.879	18.596	13.839	10.518	35.833	15.001	13.152	11.676
累计方差贡献率/%	35.879	54.475	68.314	78.832	35.833	50.835	63.986	75.662

1) 碧潭泉 HCO₃⁻、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Sr²⁺、全 Fe、全 Mn 的 N=15

4.3 地球化学敏感性分析

在上文两泉水化学组分 PCA 判断基础上, 从岩溶泉系统受不同因子控制而具有不同敏感程度出发, 引入地球化学敏感性指数 (GSI). 选取酒店排污高峰的 7、8、10、12、1 和 2 月数据划分为组 1, 其余月份为组 2, 组 1 对应枯水期, 组 2 对应丰水期 (图 4), 对水房泉和碧潭泉水中 8 种宏量元素在排污高峰期与非高峰期 (枯水期与丰水期) 的泉水地球化学敏感性进行分析. 计算结果见表 4, 具体计算方法见文献 [47].

水房泉以 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺ 最为敏感, GSI 分别为 0.281 和 0.214 (表 4). NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的 GSI 值分别为 0.047 和 0.045, 也具有较强敏感性. Na⁺、Cl⁻ 和 Mg²⁺ 也表现出一定的地球化学敏感性. 而碧潭泉以 HCO₃⁻、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 最为敏感, 三者的 GSI 值

分别为 0.088、0.035 和 0.018 (表 4). SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的 GSI 值分别为 0.014、0.011, SO₄²⁻ 略大于 NO₃⁻. 其他离子 (Cl⁻、Na⁺ 和 K⁺) GSI 值均小于 0.01, 敏感性不强. 由上文 PCA 分析可知, 水-岩作用是两泉 HCO₃⁻、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的主要来源, 垂直气候带岩溶作用的差异及其变化造成其高敏感性. 结合上文 Gibbs 图分析, 可知酒店排污的季节差异造成了水房泉 NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺ 和 Cl⁻ 较大的敏感性. 而碧潭泉来自土壤的 NO₃⁻ 雨季受淋滤作用输入地下水, 使其雨季浓度高于旱季, SO₄²⁻ 雨季受稀释效应, 丰水期浓度低于枯水期 (图 4), 故二者敏感性也较强. 除了 Mg²⁺ 外, 水房泉的 GSI 值普遍大于碧潭泉 (表 4), 说明水房泉主要元素对外界环境的响应更强, 这与前文水房泉阴阳离子的 CV 值大于碧潭泉, 受人类活动干扰更大的判断相一致.

表 4 水房泉与碧潭泉水文地球化学敏感性指数

Table 4 Geochemical susceptibility index for major elements in Shuifang Spring and Bitan Spring

项目	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	GSI 排序
GSI (水房泉)	0.281	0.047	0.045	0.017	0.006	0.031	0.214	0.016	HCO ₃ ⁻ > Ca ²⁺ > NO ₃ ⁻ > SO ₄ ²⁻ > Na ⁺ > Cl ⁻ > Mg ²⁺ > K ⁺
GSI (碧潭泉)	0.088	0.011	0.014	0.008	0	0.002	0.018	0.035	HCO ₃ ⁻ > Mg ²⁺ > Ca ²⁺ > SO ₄ ²⁻ > NO ₃ ⁻ > Cl ⁻ > Na ⁺ > K ⁺

5 结论

(1) 水房泉和碧潭泉各理化指标差异极显著.

垂直气候带岩溶发育的差异性导致碧潭泉离子总浓度高于水房泉. 碳酸盐岩溶蚀是两泉 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 HCO₃⁻ 的主要来源, 水房泉受方解石溶蚀, 水化学

类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 碧潭泉则受方解石与白云石的混合溶蚀, 为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型. 冬夏两季旅游高峰期酒店排污引起水房泉水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 K^+ 和 Na^+ 浓度上升, 而碧潭泉各指标全年变化平稳. 水房泉总体上属于 IV 类水, 存在一定饮用及健康风险, 而碧潭泉水质相对较好.

(2) PCA 分析表明, 水-岩作用是影响两泉地下水化学的首控因子, 决定水化学基本类型. 同时酒店排污和降水的离子输入分别对水房泉和碧潭泉具有重要影响. 此外, 水土流失、淋滤效应及稀释效应对两泉水质也有一定影响.

(3) 水房泉的地球化学敏感指数 (GSI) 大于碧潭泉, 水房泉对外界环境的响应较碧潭泉强烈. 开发利用岩溶地下水资源时, 要针对两泉的不同影响因素, 制定对应的保护措施, 特别是要重视酒店排污对地下水的潜在污染.

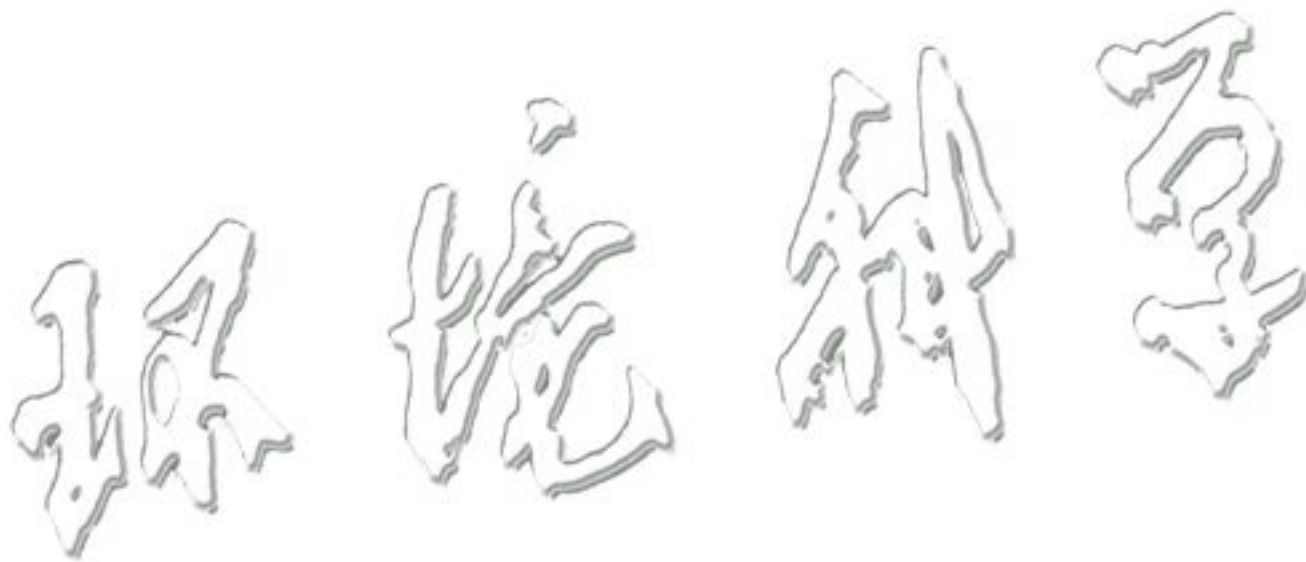
致谢: 感谢西南大学地理科学学院陈峰、詹兆君、任娟、覃彤、马哲煜、张海月、明晓星和罗丹在野外采样与实验中的帮助.

参考文献:

- [1] 袁道先, 朱德浩, 翁金桃. 中国岩溶学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 6-8.
- [2] 袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见 [J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 103-108.
Yuan D X. Aspects on the new round land and resources survey in karst rock desertification areas of south China [J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(2): 103-108.
- [3] 蒋忠诚, 王瑞江, 裴建国, 等. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能 [J]. 中国岩溶, 2001, 20(2): 106-110.
Jiang Z C, Wang R J, Pei J G, et al. Epikarst zone in south China and its regulation function to karst water [J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(2): 106-110.
- [4] 周训, 胡伏生, 何江涛, 等. 地下水科学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 2009: 179-182.
- [5] 张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 等. 重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 [J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1379-1388.
Zhang Y Z, He Q F, Jiang Y J, et al. Characteristics and transport patterns of ammonia, nitrites, nitrates and inorganic nitrogen flux at epikarst springs and a subterranean stream in Nanshan, Chongqing [J]. Environmental Science, 2016, 37(4): 1379-1388.
- [6] 郭芳, 王文科, 姜光辉, 等. 岩溶地下河污染物运移特征及自净能力——以广西里湖地下河为例 [J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 414-419.
Guo F, Wang W K, Jiang G H, et al. Contaminant transport behavior in a karst subterranean river and its capacity of self-purification: a case study of Lihu, Guangxi [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 414-419.
- [7] 袁道先. 地球系统的碳循环和资源环境效应 [J]. 第四纪研究, 2001, 21(3): 223-232.
Yuan D X. Carbon cycle in earth system and its effects on environment and resources [J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(3): 223-232.
- [8] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶系统的碳循环及其生态效应 [J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 316-324.
Jiang Z C. Carbon cycle and ecological effects in epi-karst systems in southern China [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(4): 316-324.
- [9] 章程, 蒋勇军, Lettingue M, 等. 岩溶地下水脆弱性评价“二元法”及其在重庆金佛山的应用 [J]. 中国岩溶, 2007, 26(4): 334-340.
Zhang C, Jiang Y J, Lettingue M, et al. Duality method for assessing karst groundwater vulnerability and its application in Jinfo Mountain of Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(4): 334-340.
- [10] 伍坤宇, 王鹏, 沈立成, 等. 金佛山地区地下水硝态氮污染时空变异性研究 [J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3247-3254.
Wu K Y, Wang P, Shen L C, et al. Spatial and temporal variability of nitrate contaminant in groundwater in Jinfo Mt. area, Chongqing, China [J]. Environmental Science, 2011, 32(11): 3247-3254.
- [11] 吴月霞, 蒋勇军, 袁道先, 等. 岩溶泉域降雨径流水文过程的模拟——以重庆金佛山水房泉为例 [J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 41-48.
Wu Y X, Jiang Y J, Yuan D X, et al. Simulation of hydrological response of karst spring to precipitation—case study of Shuifang Spring, Jinfo Mt., Chongqing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(6): 41-48.
- [12] 罗健, 蒋勇军, 胡毅军, 等. 亚高山表层岩溶泉域土壤溶蚀速率季节变化及碳汇量估算——以重庆金佛山水房泉流域为例 [J]. 中国岩溶, 2011, 30(4): 443-448.
Luo J, Jiang Y J, Hu Y J, et al. Seasonal changes of soil dissolution rate and estimations on carbon sequestration in the subalpine epikarst spring zone: a case study in the Shuifang Spring in Jinfoshan, Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(4): 443-448.
- [13] 胡毅军, 蒋勇军, 李林立. 表层岩溶泉域短时间尺度岩溶作用碳汇效应初步研究——以重庆市金佛山水房泉域为例 [J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 169-174.
Hu Y J, Jiang Y J, Li L L. Preliminary study on short-time carbon absorption in epikarst spring basin—a case of the Shuifang Spring in Jinfo Mountain, Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(2): 169-174.
- [14] 吴孔运, 何寻阳, 罗华彪. 重庆金佛山碧潭泉岩溶泉水的物理化学特征 [J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(4): 423-425.
Wu K Y, He X Y, Luo H B. Physical-chemical characteristics of Jinfoshan karst spring in Chongqing [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2005, 25(4): 423-425.
- [15] 任娟, 杨平恒, 王健力, 等. 旅游活动影响下的岩溶地下水理化特征演化及其概念模型——以世界自然遗产地金佛山水房泉为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 97-106.
Ren J, Yang P H, Wang J L, et al. Influences of tourism activities on evolution of physicochemical parameters in karst groundwater and its conceptual model: a case study of Jinfoshan Shuifang spring in the world natural heritage site [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(1): 97-106.
- [16] 李林立, 况明生, 张远瞩, 等. 典型表层岩溶泉水短时间尺度动态变化规律 [J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 222-226.
Li L L, Kuang M S, Zhang Y Z, et al. Study on diurnal change of physico-chemistry of karst spring of epikarst system [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2): 222-226.
- [17] 章程, 袁道先, 曹建华, 等. 典型表层岩溶泉短时间尺度动态变化规律研究 [J]. 地球学报, 2004, 25(4): 467-471.

- Zhang C, Yuan D X, Cao J H, *et al.* An analysis of short-term scale variation of the typical epikarst spring [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, **25**(4): 467-471.
- [18] 曾艳, 况明生, 李林立, 等. 重庆金佛山不同高度岩溶发育特征的差异研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2002, **20**(4): 9-12.
- Zeng Y, Kuang M S, Li L L, *et al.* Differences in karst features at different altitudes in Jinfo Mountain in Chongqing [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2002, **20**(4): 9-12.
- [19] 吴孔运, 姜光辉, 刘玉. 亚高山不同海拔高程中的岩溶泉水化学特征对比研究——以重庆金佛山碧潭泉和水房泉为例[J]. 地下水, 2005, **27**(3): 175-178.
- Wu K Y, Jiang G H, Liu Y. Study on the comparison of hydrochemical characters of karst spring for different elevations in submountain area—a case study on Bitan and Shuifang Springs of Jinfo Mt. in Chongqing [J]. *Ground Water*, 2005, **27**(3): 175-178.
- [20] Zhang C, Yan J, Pei J G, *et al.* Hydrochemical variations of epikarst springs in vertical climate zones: a case study in Jinfo Mountain national nature reserve of China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **63**(2): 375-381.
- [21] 李林立, 况明生, 蒋勇军, 等. 金佛山岩溶生态系统初步探讨——岩溶泉水化学特征分析[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2003, **26**(2): 201-204.
- Li L L, Kuang M S, Jiang Y J, *et al.* Study on the karst ecosystem of Mountain Jinfo [J]. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)*, 2003, **26**(2): 201-204.
- [22] 孙在斌. 垂直气候带表层岩溶泉水的理化性质与溶蚀作用研究——以金佛山国家自然保护区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2008. 18-19.
- Sun Z B. Study on physical and chemical properties and corrosion of surface karst springs on vertical climatic zones—a case study of Jinfo Mountain of nature protection area [D]. Chongqing: Southwest University, 2008. 18-19.
- [23] 于正良, 袁道先, 杨平恒, 等. 基于 PCA 和在线监测技术研究旅游活动对岩溶地下水水化学的影响[J]. 地球学报, 2016, **37**(2): 232-240.
- Yu Z L, Yuan D X, Yang P H, *et al.* Influences of tourism activities on hydrochemistry of karst groundwater revealed by principal component analysis and on-line monitoring technique [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, **37**(2): 232-240.
- [24] Yang P H, Ming X X, Groves C, *et al.* Impact of hotel septic effluent on the Jinfoshan karst aquifer, SW China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, **27**(1): 321-334, doi: 10.1007/s10040-018-1890-3.
- [25] Yang P H, Li Y, Groves C, *et al.* Coupled hydrogeochemical evaluation of a vulnerable karst aquifer impacted by septic effluent in a protected natural area [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 1475-1484.
- [26] 章程, 蒋忠诚, 何师意, 等. 垂直气候带岩溶动力系统特征研究——以重庆金佛山国家级自然保护区为例[J]. 地球学报, 2006, **27**(5): 510-514.
- Zhang C, Jiang Z C, He S Y, *et al.* The karst dynamic system of vertical zoned climate region: a case study of the Jinfo Mountain state nature reserve in Chongqing [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, **27**(5): 510-514.
- [27] 左太安, 刁承泰, 孙秀锋, 等. 金佛山不同高程泉水理化性质及变化比较[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, **36**(5): 174-181.
- Zuo T A, Diao C T, Sun X F, *et al.* Physicochemical properties of karst springs in the Jinfo Mountains and their variation with elevation [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2014, **36**(5): 174-181.
- [28] Lettingue M. Vulnerability and risk mapping, tracer tests and microbiological monitoring to assess the human impact on an UNESCO world heritage candidate site, the Jinfo karst plateau, China [D]. Neuchatel, France: Université de Neuchatel, 2007.
- [29] 周晓得, 徐志方, 刘文景, 等. 中国西南酸雨区降水化学特征研究进展[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4438-4446.
- Zhou X D, Xu Z F, Liu W J, *et al.* Progress in the studies of precipitation chemistry in acid rain areas of southwest China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4438-4446.
- [30] 章程. 不同土地利用下土溶蚀速率季节差异及其影响因素——以重庆金佛山为例[J]. 地质论评, 2010, **56**(1): 136-140.
- Zhang C. Seasonal variation of dissolution rate under the soil at different land uses and its influence factors a case study of Jinfo Mountain, Chongqing [J]. *Geological Review*, 2010, **56**(1): 136-140.
- [31] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [32] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下河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.
- [33] White W B. Geomorphology and hydrology of karst terrains [M]. New York: Oxford University Press, 1988. 103-148.
- [34] Monteagudo L, Moreno J L, Picazo F. River eutrophication: irrigated vs. non-irrigated agriculture through different spatial scales [J]. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2759-2771.
- [35] Rose S. The effects of urbanization on the hydrochemistry of base flow within the Chattahoochee River Basin (Georgia, USA) [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **341**(1-2): 42-54.
- [36] 刘从强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 265-375.
- [37] 杨平恒, 詹兆君, 明晓星, 等. 旅游酒店排污影响下的岩溶地下水水化学变化[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 416-428.
- Yang P H, Zhan Z J, Ming X X, *et al.* Hydrochemical variation of the karst groundwater impacted by the contaminant discharge from a tourism hotel [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(2): 416-428.
- [38] Yang P H, Yuan D X, Ye X C, *et al.* Sources and migration path of chemical compositions in a karst groundwater system during rainfall events [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(20): 2488-2496.
- [39] 刘再华, Groves C, 袁道先, 等. 水-岩-气相互作用引起的水化学动态变化研究——以桂林岩溶试验场为例[J]. 水文地质工程地质, 2003, **30**(4): 13-18.
- Liu Z H, Groves C, Yuan D X, *et al.* Study on the hydrochemical variations caused by the water-rock-gas interaction—an example from the Guilin karst experimental site [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, **30**(4): 13-18.
- [40] Mahler B J, Personné J C, Lods G F, *et al.* Transport of free and particulate-associated bacteria in karst [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, **238**(3-4): 179-193.
- [41] 姜光辉, 郭芳, 于爽. 岩溶水系统的水化学曲线及其在水文地质研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015,

- 45(3): 899-907.
- Jiang G H, Guo F, Yu S. Chemographs of karst water system and its new application in hydrogeological survey[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(3): 899-907.
- [42] Liu Z H, Li Q, Sun H L, *et al.* Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China; soil CO₂ and dilution effects [J]. Journal of Hydrology, 2007, 337(1-2): 207-223.
- [43] Helena B, Pardo R, Vega M, *et al.* Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis [J]. Water Research, 2000, 34(3): 807-816.
- [44] Valdes D, Dupont J P, Laignel B, *et al.* A spatial analysis of structural controls on Karst groundwater geochemistry at a regional scale[J]. Journal of Hydrology, 2007, 340(1-4): 244-255.
- [45] Aiuppa A, Bellomo S, Brusca L, *et al.* Natural and anthropogenic factors affecting groundwater quality of an active volcano (Mt. Etna, Italy) [J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(6): 863-882.
- [46] 蒋勇军, 吴月霞, Groves C, 等. 利用因子分析确定岩溶地下河系统水质的影响因素[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 1-7.
- Jiang Y J, Wu Y X, Groves C, *et al.* Identification of influencing factors of groundwater quality variation using factor analysis[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(4): 1-7.
- [47] 何守阳, 朱立军, 董志芬, 等. 典型岩溶地下水系统地球化学敏感性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1176-1182.
- He S Y, Zhu L J, Dong Z F, *et al.* Study on geochemical susceptibility of groundwater system in representative Karstic regions [J]. Environmental Science, 2010, 31(5): 1176-1182.



CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)