

唐泽宇,赵瑞超,徐文杰,等.鄂西南地区岩溶槽谷地质构造对地下水动态的影响[J].地球科学与环境学报,2025,47(6):1114-1125.
TANG Ze-yu,ZHAO Rui-chao,XU Wen-jie,et al. Impact of Geological Structure on Groundwater Dynamics in a Karstic Valley of the Southwestern Hubei,China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2025,47(6):1114-1125.

DOI:10.19814/j.jese.2025.03001

鄂西南地区岩溶槽谷地质构造对地下水动态的影响

唐泽宇¹,赵瑞超²,徐文杰¹,陈乾龙³,牛俊强⁴,陈伟^{1,5,6},刘伟^{1*}

(1. 中国地质大学(武汉)自然资源调查研究院,湖北 武汉 430074; 2. 潍坊市水文中心,山东 潍坊 261061; 3. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司,湖北 武汉 430071;

4. 湖北省地质局水文地质工程地质大队,湖北 荆州 434020; 5. 中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430078; 6. 山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队,山东 泰安 271021)

摘要:鄂西南地区岩溶区地下水资源丰富,但高度发育的岩溶地质地貌导致地下水动态变化过程极为复杂。选取湖北省秭归县泗溪流域鱼泉洞和迷宫泉两处相邻地下水系统为研究对象,综合利用水文时间序列分析与流量衰减分析方法,分析了典型降雨事件中鱼泉洞和迷宫泉的流量动态特征,揭示了岩溶槽谷地貌及地下含水介质对其动态过程的影响规律。结果表明:①鱼泉洞—迷宫泉含水介质表现为较大裂隙与孔隙-较小裂隙共存的二元结构,均表现出显著的快速流与慢速流过程;鱼泉洞峰值流量对强、弱降雨事件响应的滞后时间分别为 4 和 9 h,迷宫泉峰值流量对强、弱降雨事件响应的滞后时间分别为 3 和 6 h。②在岩溶槽谷地表地貌和地质结构共同作用下,强降雨事件中鱼泉洞和迷宫泉的流量衰减均存在坡面径流-落水洞释水、宽裂隙-管道释水、中宽裂隙释水、孔隙-微小裂隙释水等 4 个不同过程,其中槽谷地貌加强了地表产流过程;弱降雨事件中鱼泉洞和迷宫泉的流量衰减仅有一个过程,均为中宽裂隙释水、孔隙-微小裂隙释水。③鱼泉洞、迷宫泉地质结构的差异性导致其水文动态过程存在不同。迷宫泉发育于较纯的厚层白云岩中,垂向裂隙相对发育,而鱼泉洞发育于中薄层泥质灰岩中,而且上下相邻地层均含有较多泥质成分,导致鱼泉洞上覆较厚土层,下伏岩层垂向裂隙发育较弱;强降雨事件中,迷宫泉的快速流占比(52.4%)比鱼泉洞的快速流占比(7.8%)更高;弱降雨事件中,鱼泉洞水流会在降雨入渗后的土-岩界面上形成临时饱水层并发生横向水流,再通过较大的垂向管道快速运输到地下水含水层,表现为鱼泉洞的快速流占比(33.6%)略高于迷宫泉的快速流占比(29.4%)。

关键词:地下水;地质构造;水文时间序列分析;流量衰减分析;含水介质;释水过程;岩溶槽谷;湖北中图分类号:P641.7;P642.25 文献标志码:A 文章编号:1672-6561(2025)06-1114-12

Impact of Geological Structure on Groundwater Dynamics in a Karstic Valley of the Southwestern Hubei, China

TANG Ze-yu¹, ZHAO Rui-chao², XU Wen-jie¹, CHEN Qian-long³, NIU Jun-qiang⁴,
CHEN Wei^{1,5,6}, LIU Wei^{1*}

(1. Institute of Natural Resource Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;
2. Weifang Hydrology Center, Weifang 261061, Shandong, China; 3. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., LTD. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China;

收稿日期:2025-03-01;修回日期:2025-05-13 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3710002);国家自然科学基金项目(42007178);
湖北省自然科学基金项目(2020CFB463);泰安市科技计划项目(2020NS292)

* 通信作者:刘伟(1985-),男,湖北仙桃人,副研究员,理学博士,E-mail:wliu@cug.edu.cn.

4. Hydrogeology and Engineering Geology Institute of Hubei Geological Bureau, Jingzhou 434020, Hubei, China; 5. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, Hubei, China; 6. No. 5 Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Tai'an 271021, Shandong, China)

Abstract: The karst region in the southwestern Hubei is endowed with abundant groundwater resources; however, its highly developed karst geology leads to complex hydrological variations. Two adjacent groundwater systems Yuquandong and Migongquan, located in the Sixi river basin of Zigui county, Hubei province, were focused on; hydrological time series analysis and flow recession analysis were applied to examine the flow dynamics of these two systems during typical rainfall events, and the influence of karst geological structures on the flow dynamics was investigated. The results show that ① hydrological time series analysis reveals a dual-structure aquifer in both systems, consisting of large fractures as well as pore-small fissure networks; the peak flow response times at Yuquandong are 4 hours (during intense rainfall) and 9 hours (during weak rainfall), whereas at Migongquan, the response times are shorter, at 3 hours and 6 hours, respectively. ② Flow recession analysis identifies four stages during intense rainfall, including slope runoff-sinkhole discharge, large fissure-conduit discharge, medium fissure discharge, and micro-fissure-pore discharge; in contrast, only medium and micro-fissure discharges dominate during weak rainfall in both systems. ③ Differences in geological structures between the two systems lead to distinct hydrological behaviors; the Migongquan groundwater system lies within pure, thick dolomite with well-developed vertical fractures; in contrast, the Yuquandong system is developed in medium to thin argillaceous limestone, with adjacent strata rich in argillaceous material; a thicker soil layer overlies the Yuquandong system, and the underlying rock has relatively less developed vertical fractures. As a result, during intense rainfall, the Migongquan system exhibits a higher proportion of rapid flow (52.4%). During weak rainfall, infiltration in the Yuquandong system leads to the formation of a temporary saturated zone at the soil-rock interface, where lateral flow develops and is transmitted to the aquifer through larger vertical conduits. This results in a slightly higher proportion of rapid flow in Yuquandong under weak rainfall conditions (33.6%).

Key words: groundwater; geological structure; hydrological time series analysis; flow recession analysis; aquifer media; discharge pattern; karstic valley; Hubei

0 引言

我国岩溶区分布广泛,南方岩溶区分布面积达 $1.14 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[1-2]。鄂西南地区为我国岩溶槽谷地貌区,适宜的水热条件导致岩溶发育强烈,发达的地下岩溶裂隙-管道网络^[3-9]使得岩溶水快速流失,进而导致区域水资源分布严重不均。岩溶区结构性缺水的问题,极大地限制了区域的经济发展^[10]。由此可见,研究岩溶区特殊的地质结构对地下水水文过程的影响有助于提升岩溶区水资源的科学利用^[11]。

前人运用系统理论分析方法^[12]、水箱模型^[13]、数值模型^[14-18]、基流分割法^[19]等众多方法和模型对岩溶水动态过程进行了研究。随着岩溶水文地质理

论研究的深入及新技术和新方法的应用,尤其是基于高性能计算机的数据处理技术的快速发展^[20],岩溶地下水动态分析研究得到了提升。例如,Rahnamaei 等利用频谱分析计算了降雨进入地下水含水层后的平均滞留时间,进而讨论了不同区域的岩溶发育特征^[21];Panagopoulos 等利用相关分析和频谱分析比较并讨论了希腊两个不同地下水含水层的岩溶发育程度^[22];Mayaud 等利用自相关和互相关分析并结合 MODFLOW 模型研究了奥地利两个相邻岩溶泉的水文动态过程^[23];Liu 等采用频谱分析定量讨论了中国贵州省后寨地区岩溶地下水含水层中岩溶管道和裂隙的发育特征^[24];李建鸿等系统总结了不同频谱分析方法的使用条件以及这些方法应用

于岩溶地下水系统分析的优势^[25]。上述研究充分验证了水文时间序列法和频谱分析方法在识别岩溶特殊地质结构方面的适用性。

针对鄂西南岩溶区,尹德超等曾在湖北省宜昌市雾龙洞地下河流域基于次降水事件分析了泉流量衰减规律^[26];罗明明等在湖北省兴山县香溪河流域基于泉流量衰减动态过程分析了地下水储存与运移的岩溶介质条件^[27]。然而,岩溶槽谷地貌及地质结构对地下水水文过程的影响机制仍需更深入讨论。基于此,本文针对鄂西岩溶槽谷区鱼泉洞与迷宫泉两个典型地下水系统,基于长序列高频气象水文监测数据,采用水文时间序列分析与流量衰减分析重点探讨了典型降雨事件中鱼泉洞与迷宫泉的流量动态特征以及岩溶含水介质对其动态过程的影响规律,以期对鄂西南岩溶区水资源可持续开发利用、经济和社会可持续发展等提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

鱼泉洞—迷宫泉地下水系统位于湖北省秭归县泗溪流域内。泗溪流域为茅坪河上游的一条支流,由西南流向东北,最终汇入长江[图 1(a)]。区域内地貌特征为山顶台原与深切峡谷相组合,海拔高差为203~1 300 m[图 1(b)]。山顶台原多发育有岩溶洼地和岩溶槽谷,谷底部多有岩溶大泉。其中,岩溶槽谷是一种长条形的溶蚀谷地,通常形成于流水作用,是一种负地形地貌。受长时间的侵蚀风化,在水流作用下,槽谷底部一般覆盖有较厚的土层,成为岩溶山区有限的农耕区。区内降水主要集中在5月至9月,近5年年平均降水量为1 420.36 mm。

流域内地层从上元古界至下奥陶系出露连续且完整,碳酸盐岩分布广泛,整体地层向西南倾斜,倾角为20°~40°[图 1(a)、(c)]。迷宫泉发育于寒武系娄山关组($\epsilon_2 O_1 l$)较纯厚层白云岩地下水含水层,因其下伏寒武系覃家庙组上段($\epsilon_2 q^3$)薄层白云岩夹泥岩阻隔成泉。鱼泉洞发育于寒武系覃家庙组中段($\epsilon_2 q^2$)中薄层泥质灰岩地下水含水层,因其下伏寒武系覃家庙组下段($\epsilon_2 q^1$)薄层泥质白云岩阻隔成泉。

综合野外调查和示踪实验结果发现^[28],迷宫泉地下水流补给路径分别是汪家大淌至迷宫泉和猪粪池至迷宫泉;鱼泉洞地下水补给路径分别是庙坪至鱼泉洞和猪粪池至鱼泉洞[图 1(a)]。鱼泉洞—迷宫泉地下水系统南部为奥陶系南津关组($O_1 n$),该地层上覆于寒武系娄山关组,其下部为碳质灰岩,相

对不透水,构成了系统的西南边界。覃家庙组上段为相对隔水层,将鱼泉洞与迷宫泉划分为两个相邻但相互独立的地下水系统[图 1(a)、(c)],覃家庙组下段的相对隔水层构成了系统的东部边界,系统的北侧边界为庙坪—小倒洞一带的地下分水岭[图 1(a)]。尽管鱼泉洞和迷宫泉有一个相同补给区——猪粪池,但对比两次不同降雨事件中的示踪实验结果后发现,鱼泉洞仅在降雨强度大到可以形成地表径流时,才会接受来自猪粪池的补给^[28],因此,本文将鱼泉洞和迷宫泉作为相对独立的系统进行分析。大气降雨是区域地下水的主要补给来源,研究区内岩溶较为发育,大气降雨通过岩溶洼地和槽谷内岩溶裂隙—管道网络系统向下入渗并补给地下水含水层,以岩溶大泉的形式排泄出去。

降水量数据来自自建气象站超长待机雨量记录仪(型号为JL-03-Y1),该仪器布设在台原补给区庙坪洼地内。地下水水位监测通过布设在两个泉口的Solinst 3001 LTC型地下水水位计展开。其中,雨量站监测频率为30 min·次⁻¹,水位监测频率为15 min·次⁻¹。监测时段自2017年至今,本文重点剖析2018年的监测数据。

2 分析方法

2.1 岩溶泉流量换算

根据鱼泉洞和迷宫泉的泉口实测水位,估算鱼泉洞和迷宫泉的泉流量。鱼泉洞泉口为矩形河道,迷宫泉泉口为矩形蓄水池,故泉流量分别通过明渠流量和堰流流量计算公式获得。其计算公式为

$$Q_1 = AC\sqrt{RJ} \quad (1)$$

$$Q_2 = \varphi ub\sqrt{2g}H^{1.5} \quad (2)$$

式中: Q_1 为明渠流流量; Q_2 为堰流流量; A 为过水断面面积; C 为谢才系数; R 为水力半径; J 为水力坡度; g 为重力加速度; φ 为流速系数; u 为修正系数; b 为堰宽; H 为堰前水头。

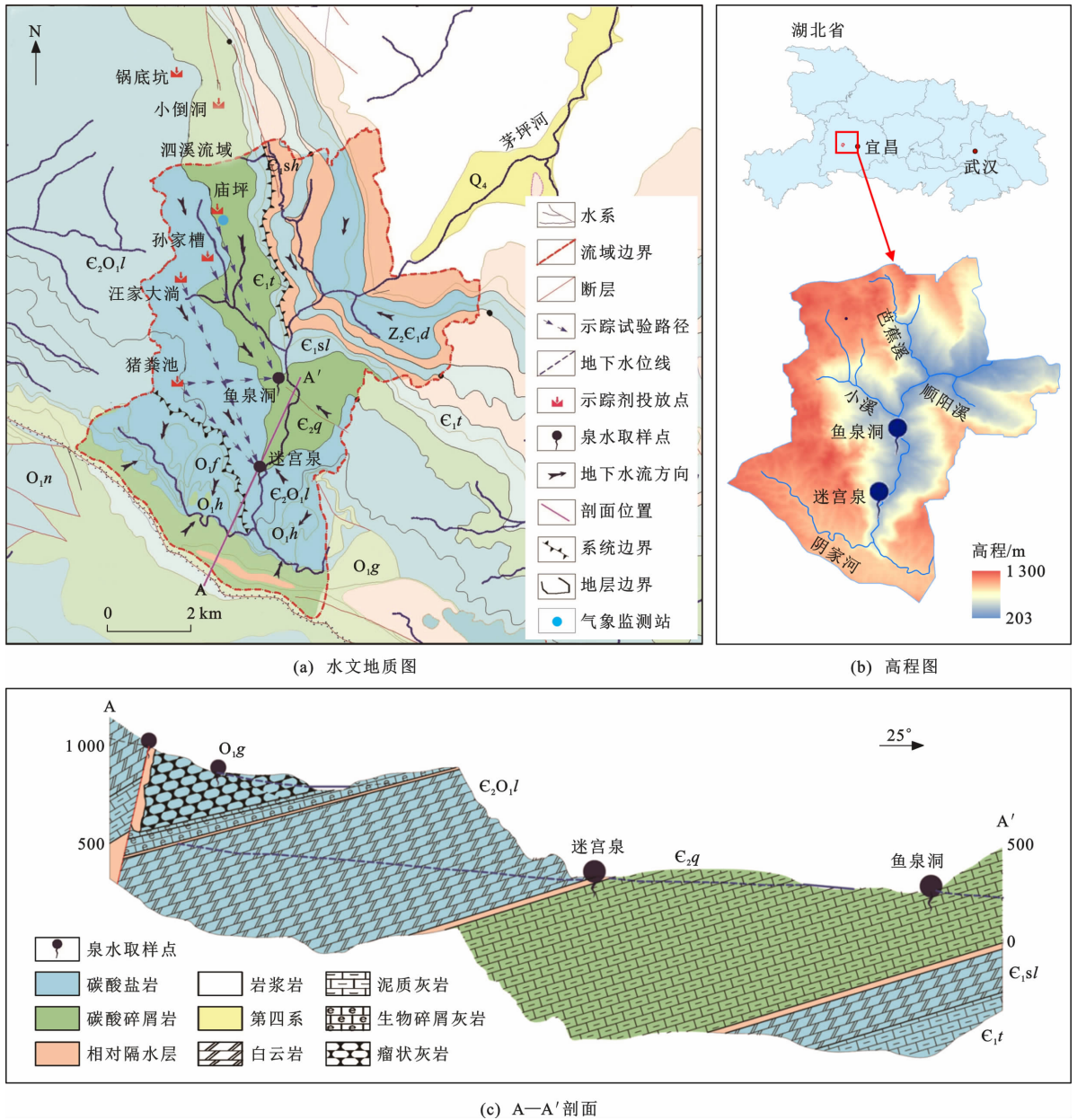
2.2 自相关分析

自相关分析可以描述变量自身不同滞后时间点上的相关性,用于揭示数据的周期性特征^[21,29-30]。本文对鱼泉洞和迷宫泉的泉口流量进行自相关分析。自相关系数和自协方差可表示为

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (3)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (4)$$

式中: $C(k)$ 为自协方差; $C_{xy}(k)$ 表示时间序列 x_n 对



O_{1g} 为奥陶系牯牛潭组; O_{1h} 为奥陶系红花园组; O_{1n} 为奥陶系南阳关组; O_{1f} 为奥陶系分乡组; $\epsilon_2 O_{1l}$ 为寒武系娄山关组; $\epsilon_2 q$ 为寒武系覃家庙组; ϵ_{1sl} 为寒武系石龙洞组; ϵ_{1t} 为寒武系天河板组; ϵ_{1sh} 为寒武系石牌组; $Z_2 \epsilon_{1d}$ 为震旦系灯影组; Q_4 为第四系

图 1 湖北省秭归县泗溪流域鱼泉洞—迷宫泉地下水系统地质概况图

Fig. 1 Geological Overview Map of Yuquandong-Migongquan Groundwater System in the Sixi River Basin of Zigui County, Hubei Province

y_n 的协方差; $C(0)$ 为方差; $r(k)$ 为自相关系数; t 为时间; k 为滞后时间 ($k=0, 1, 2, \dots, m$), m 为截断点; n 为样本数量; x_t 为 t 时刻的单个样本值; \bar{x} 为所有样本的平均值。

2.3 互相关分析

互相关分析是描述两个时间序列之间变量在不同时间点上的相关程度^[28,31-32]。本文对降水量与鱼泉洞、迷宫泉的泉口流量时间序列进行互相关分析。时间序列 x_n 对 y_n 的互相关系数 $r_{xy}(k)$ 表达式为

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad (5)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (6)$$

$$C_x(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \quad (7)$$

$$C_y(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 \quad (8)$$

式中: $C_x(0)$ 和 $C_y(0)$ 分别为时间序列 x_t 和 y_t 的标

准偏差; k 为滞后时间; x_t 为 t 时刻的流量; y_t 为 t 时刻的降水量; \bar{x} 为时间序列 x_n 所有样点的平均值; \bar{y} 为时间序列 y_n 所有样点的平均值。

2.4 交叉振幅分析

交叉振幅分析可得出岩溶泉水系统中快速流与慢速流的占比^[33]。交叉振幅函数 $\alpha_{xy}(f)$ 可表示为

$$\alpha_{xy}(f) = \sqrt{\gamma_{xy}^2(f) + \lambda_{xy}^2(f)} \quad (9)$$

$$\gamma_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m (r_{xy}(k) + r_{yx}(k) D(k) \cos(2\pi fk)) \right] \quad (10)$$

$$\lambda_{xy}(f) = 2 \left[\sum_{k=1}^m (r_{xy}(k) - r_{yx}(k) D(k) \sin(2\pi fk)) \right] \quad (11)$$

$$D(k) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi k}{m}\right) \right] \quad (12)$$

式中: $\alpha_{xy}(f)$ 为频率 f 的交叉振幅函数; $\gamma_{xy}(f)$ 为协谱; $\lambda_{xy}(f)$ 为四分谱; $r_{xy}(k)$ 表示时间序列 y_n 对 x_n 的互相关系数; $D(k)$ 为窗函数。

交叉振幅分析中,快速流在低频段通常表现出较高的幅值,而慢速流在高频段表现出较低的幅值^[34]。本文将振幅值快速衰减至某一阈值以下,并在此后始终小于该阈值并趋近于 0 的频段定为高频段^[24],快速流的占比根据阈值点的频率与总频率范围($0 \sim 0.5 \text{ h}^{-1}$)的比值确定。

2.5 流量衰减分析

鱼泉洞—迷宫泉地下水系统主要受到降雨补给,地下水系统边界比较明晰,可借用泉流量(Q)的指数衰减方程来拟合流量衰减过程,进而分析岩溶地下水含水层的含水介质结构特征^[35-36]。指数衰减方程^[37]为

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (13)$$

式中: Q_0 为流量衰减起始时刻的流量; Q_t 为流量衰减后第 t 小时的流量; α 为衰减系数。

3 结果分析与讨论

3.1 地下水系统流量动态响应特征

本文选取 2018 年的两次降雨事件对泉水流量动态过程进行分析,即一次强降雨过程(2018 年 4 月 22 日至 23 日)和一次弱降雨过程(2018 年 3 月 6 日至 7 日)。两次降雨事件前后 7 d 均无明显降雨,流量曲线可认为不受前期和后期降雨的影响,为充分吸释水过程。

强降雨过程从 2018 年 4 月 22 日 10:00 开始,

持续 3 h,总降水量为 110.50 mm[图 2(a)];鱼泉洞和迷宫泉的泉口流量对此次降雨均有迅速响应;降雨 4 h 后,鱼泉洞和迷宫泉均达到流量峰值(分别为 9.79 和 $7.32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),而且鱼泉洞和迷宫泉对降雨的响应趋势相似。弱降雨过程从 2018 年 3 月 6 日 00:00 开始,持续 30 h,总降水量为 17.20 mm[图 2(b)];迷宫泉的泉口流量表现出更迅速敏感响应,在降雨 6 h 后开始响应,在 12 h 后达到流量峰值($2.85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);鱼泉洞在降雨 8 h 后开始响应,在 15.5 h 后达到流量峰值($2.24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。

3.2 地下水动态响应过程

3.2.1 自相关分析结果

在两次降雨事件中,本文分别对鱼泉洞和迷宫泉的泉口流量过程进行自相关分析(图 3),发现随着滞后时间 k 的增加,自相关系数 $r(k)$ 均逐渐下降,相关性逐渐减弱。

强降雨事件中,鱼泉洞泉口流量的自相关系数随着时间的推移呈快速下降趋势,30 h 后出现拐点(拐点 1)之后自相关系数平缓下降。自相关系数-滞后时间曲线反映了地下水水流动态的记忆效应,其下降的速度突变在一定程度上可以反映出不同含水介质的释水过程。快速流主要通过较大岩溶管道释水;另外,短时强降雨会促进岩溶槽谷斜坡地表产流^[38],也会产生快速流。由此可见,鱼泉洞在拐点 1 之前主要为坡面径流和较大岩溶管道裂隙释水,而在拐点 1 之后主要为较小岩溶裂隙和孔隙释水的慢速流过程。迷宫泉泉口流量自相关系数-滞后时间曲线在 10 h 左右出现拐点(拐点 2),在拐点 2 之前为坡面径流和较大岩溶管道释水,但在拐点 2 之后自相关系数-滞后时间曲线变化比较稳定。由此可见,迷宫泉与鱼泉洞含水介质的导水性能较为相近。

弱降雨事件中,鱼泉洞泉口流量自相关系数-滞后时间曲线的拐点(拐点 3)出现在 20 h 左右。鱼泉洞上覆土层较厚,弱降雨过程会让土层充分吸水,但土层与下伏基岩的透水性存在较大差异。因此,在洪峰阶段(拐点 3 之前),土-岩界面上垂直下渗受阻会形成饱水层而发生横向流动,流向较大的垂向管道直至地下水含水层;洪峰过后(拐点 3 之后),水流可以直接通过分散的细小垂向裂隙向下渗透至地下水含水层。弱降雨事件中,迷宫泉泉口流量自相关系数-滞后时间曲线没有出现拐点,主要由于地下水系统内土层较薄,弱降雨可以直接通过单一的垂向裂隙下渗至地下水含水层。

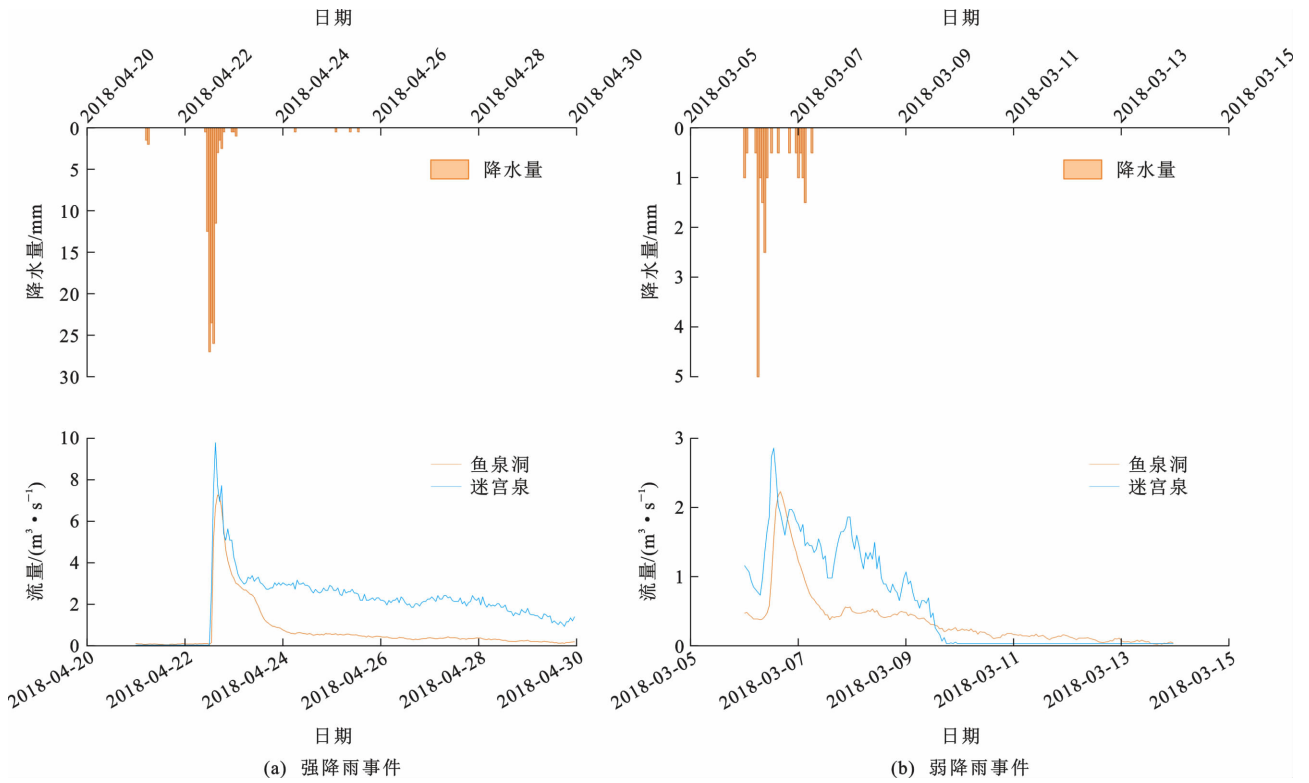


图 2 地下水系统对强、弱降雨事件的动态响应

Fig. 2 Dynamic Responses to Intense and Weak Rainfalls in Groundwater System

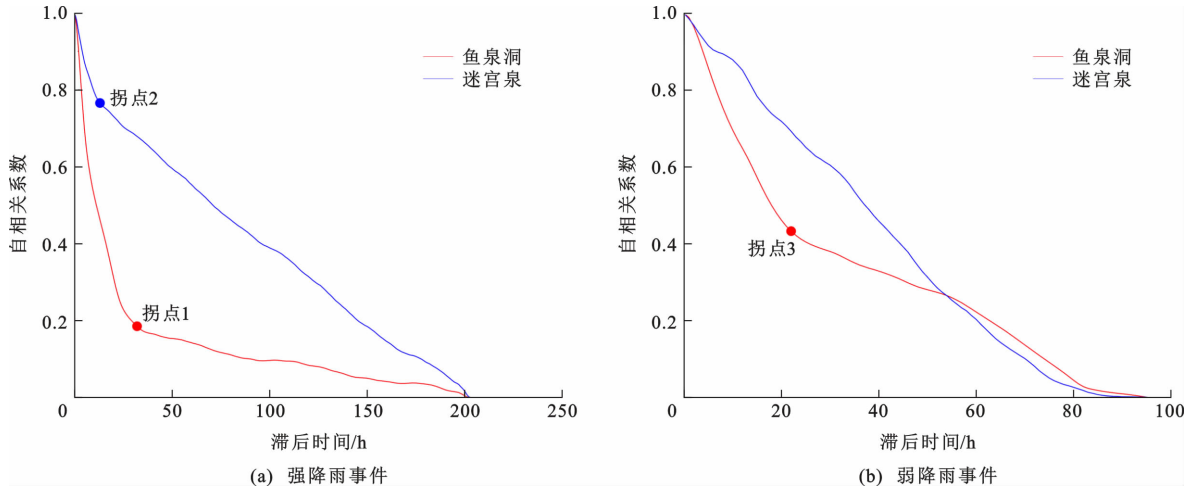


图 3 地下水系统泉口流量自相关分析结果

Fig. 3 Autocorrelation Analysis Results of Spring Discharge in Groundwater Systems

3.2.2 互相关分析结果

互相关系数 $r_{xy}(k)$ 的最大值表征了降雨峰值和泉口流量峰值之间的滞后时间^[39-40],该滞后时间是降雨峰与泉口流量峰之间的时间间隔。图 4 展示了降雨与鱼泉洞、迷宫泉泉口流量过程的互相关分析结果。

强降雨事件中,鱼泉洞泉口流量对降水量的互相关系数峰值为 0.758,滞后时间为 4 h,即鱼泉洞泉口地下水在强降雨 4 h 后达到峰值;迷宫泉泉口

流量对降水量的互相关系数峰值为 0.714,滞后时间为 3 h,即迷宫泉泉口地下水在降雨 3 h 后达到峰值 [图 4(a)]。由此可见,迷宫泉泉口流量对降水量的响应要比鱼泉洞更快。弱降雨事件中,鱼泉洞泉口流量对降水量的互相关系数峰值为 0.568,滞后时间为 9 h;迷宫泉泉口流量对降水量的互相关系数峰值为 0.457,滞后时间为 6 h [图 4(b)]。

3.2.3 交叉振幅分析结果

图 5 展示了降雨与鱼泉洞、迷宫泉泉口流量过

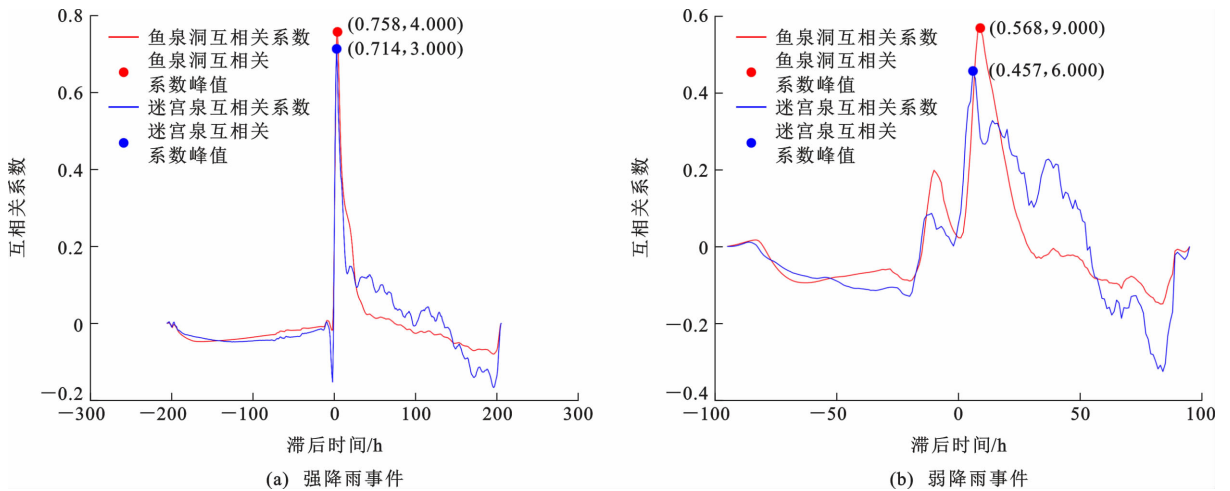


图4 地下水系统泉口流量对降水量的互相关分析结果

Fig. 4 Cross Correlation Analysis Results of Spring Discharge to Precipitation in Groundwater Systems

程的交叉振幅分析结果。交叉振幅谱密度快速衰减至0.1以下,并在之后逐渐平稳且趋于0,因此,本文将区分快速流与慢速流的交叉振幅谱密度阈值为0.1。

强降雨事件中,鱼泉洞的低高频分界点对应的频率与交叉振幅谱密度分别为 0.039 h^{-1} 和 0.064 ,迷宫泉的低高频分界点对应的频率与交叉振幅谱密度分别为 0.262 h^{-1} 和 0.099 [图5(a)],因此,在频率为 $0\sim 0.5\text{ h}^{-1}$ 时,鱼泉洞和迷宫泉的快速流占比分别为7.8%和52.4%。弱降雨事件中,鱼泉洞的低高频分界点对应的频率与交叉振幅谱密度分别为 0.168 h^{-1} 和 0.012 ,迷宫泉的低高频分界点对应的频率与交叉振幅谱密度分别为 0.147 h^{-1} 和 0.063 [图5(b)],因此,在频率为 $0\sim 0.5\text{ h}^{-1}$ 时,鱼泉洞和迷宫泉的快速流占比分别为33.6%和29.4%。

综上所述,鱼泉洞和迷宫泉地下水运动表现为

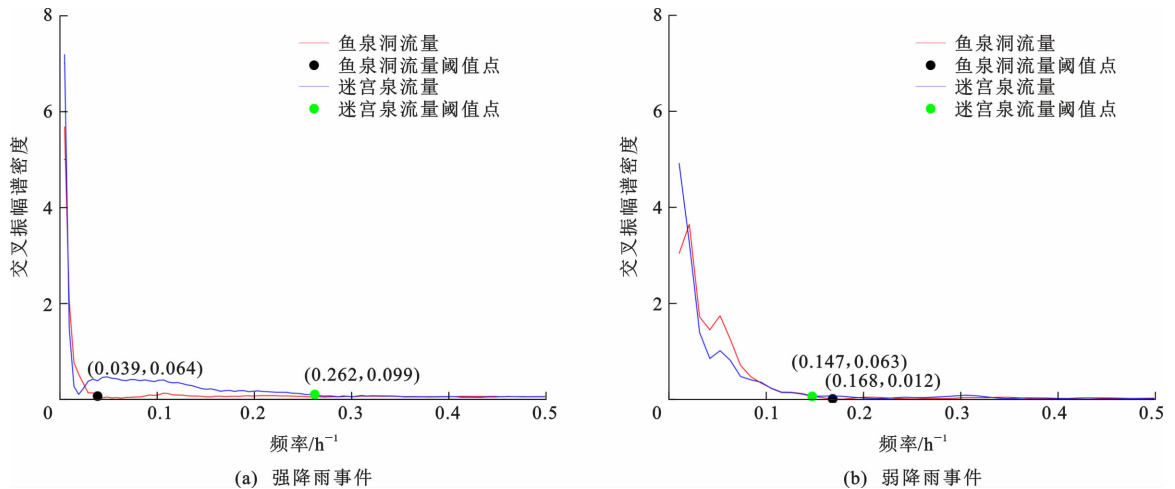


图5 地下水系统泉口流量交叉振幅分析结果

Fig. 5 Cross-amplitude Analysis Results of Spring Discharge in Groundwater Systems

快速流和慢速流并存。强降雨事件中,迷宫泉的快速流占比更高,说明迷宫泉发育有更大岩溶管道,这也与Liu等的研究结果^[28]一致;弱降雨事件中,鱼泉洞的快速流占比则高于迷宫泉。

3.3 岩溶地质条件对水文过程的调控作用

为进一步探究岩溶槽谷地貌和地质条件对地下水系统水文过程的调控作用,本文针对两次降雨事件分别对鱼泉洞和迷宫泉的泉口流量过程进行了衰减分析^[33,38]。

强降雨事件中,鱼泉洞和迷宫泉的流量衰减过程相似,均分为4个阶段[图6(a)、(b)]。鱼泉洞、迷宫泉第一阶段为强降雨事件中岩溶槽谷形成的坡面快速流过程(流量衰减系数 α 分别为0.110和0.290),第二阶段以宽裂隙-管道释水为主(α 分别为0.061和0.045),属于地下水含水层的快速径流过程;鱼泉洞、迷宫泉前两个阶段的流量衰减时间分

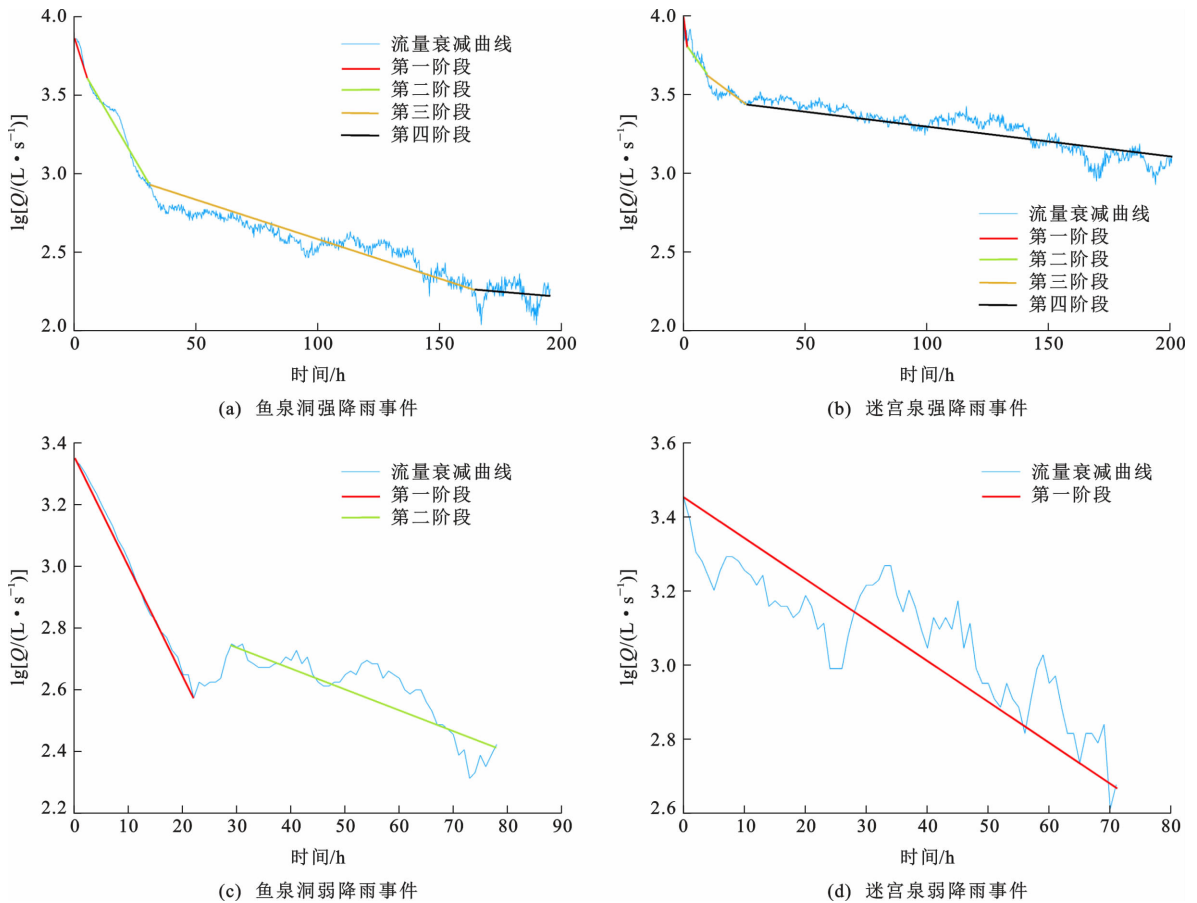


图 6 地下水系统流量衰减分析结果

Fig. 6 Flow Recession Analysis Results in Groundwater Systems

别为 30 和 10 h,与自相关系数-滞后时间曲线的拐点 1 和拐点 2[图 3(a)]对应。鱼泉洞和迷宫泉第三阶段以中宽裂隙、微裂隙释水为主(α 分别为 0.011 和 0.028),仍呈现较快衰减态势。鱼泉洞和迷宫泉第四阶段以微小裂隙及孔隙释水为主(α 分别为 0.003 和 0.004),流量衰减速率最为平缓。对比鱼泉洞和迷宫泉的流量衰减曲线可以发现:迷宫泉的流量衰减前 3 个阶段仅持续 26 h,之后就进入第四阶段(慢速流);鱼泉洞的流量衰减在 164 h 后才进入第四阶段。迷宫泉流量衰减较慢,流量衰减曲线较平缓。

弱降雨事件中,鱼泉洞和迷宫泉的流量衰减表现出不同的响应特征。鱼泉洞流量衰减过程总体可分为两个阶段[图 6(c)],流量衰减系数分别为 0.080 和 0.015,以中宽裂隙释水、孔隙-微小裂隙释水为主,其中第一阶段持续时间为 20 h,对应自相关系数-滞后时间曲线拐点 3[图 3(b)]。而迷宫泉流量衰减仅为一个阶段[图 6(d)],以中宽裂隙释水、孔隙-微小裂隙释水为主,这一特征与其自相关系数-滞后时间曲线平缓下降的分析结果[图 3(b)]

一致。

鱼泉洞与迷宫泉的水文动态差异揭示了二者地质结构与岩溶发育程度的分异。强降雨事件中,鱼泉洞和迷宫泉均呈现出显著的快速流与慢速流过程[图 5(a)和图 6(a)、(b)],这既印证了岩溶管道与孔隙-裂隙共存的二元结构特征,也佐证了槽谷地貌产生地表超渗产流机制的存在。其中,迷宫泉因较大裂隙更发育,其快速流占比(52.4%)远高于鱼泉洞的快速流占比(7.8%)。弱降雨事件中,鱼泉洞发育于寒武系覃家庙组中段($\in_2 q^2$)中薄层泥质灰岩,由于上覆覃家庙组上段($\in_2 q^3$)泥质岩石的风化,在鱼泉洞补给区洼地内沉积了较厚土壤,而下伏垂向管道发育有限,入渗水流在土-岩界面形成临时饱水层产生横向流,最终通过大型垂向管道下渗[图 6(c)];迷宫泉上覆土层较薄,下伏地层垂向裂隙相对发育,降雨可直接入渗地下水含水层,导致相对分散的入渗。这种结构差异导致弱降雨事件中鱼泉洞通过优先通道形成的快速流占比(33.6%)略高于迷宫泉的快速流占比(29.4%)[图 5(b)和图 6(d)]。

总体来说,综合水文时间序列以及流量衰减分

析结果可以得到鱼泉洞和迷宫泉地下水水流过程模式(图7)。强降雨事件初期,坡面径流通过落水洞与管道快速下渗形成洪峰[图2(a)],这一过程对应自相关系数-滞后时间曲线拐点前的陡降段[图3(a)]及流量衰减前两个阶段[图6(a)、(b)],即为坡面径流和管道流主导的快速流过程;强降雨事件后期,水流过程转为微小裂隙-孔隙释水的缓释过程,这一过程对应自相关系数-滞后时间曲线缓降段[图

3(a)]及流量衰减后两个阶段[图6(a)、(b)]。强降雨事件中,降雨会先通过表层孔隙和微小裂隙下渗,然后汇集于岩溶管道,再汇入地下水含水层[图3(b)和图6(c)、(d)]。由于鱼泉洞上覆较厚土层,土-岩界面会形成临时饱水层发生横向流动,并通过较大的垂向管道快速运输到地下水含水层[图7(a)];而迷宫泉的降雨经过较薄土层后可通过发达的垂向裂隙直接到达地下水含水层[图7(b)]。

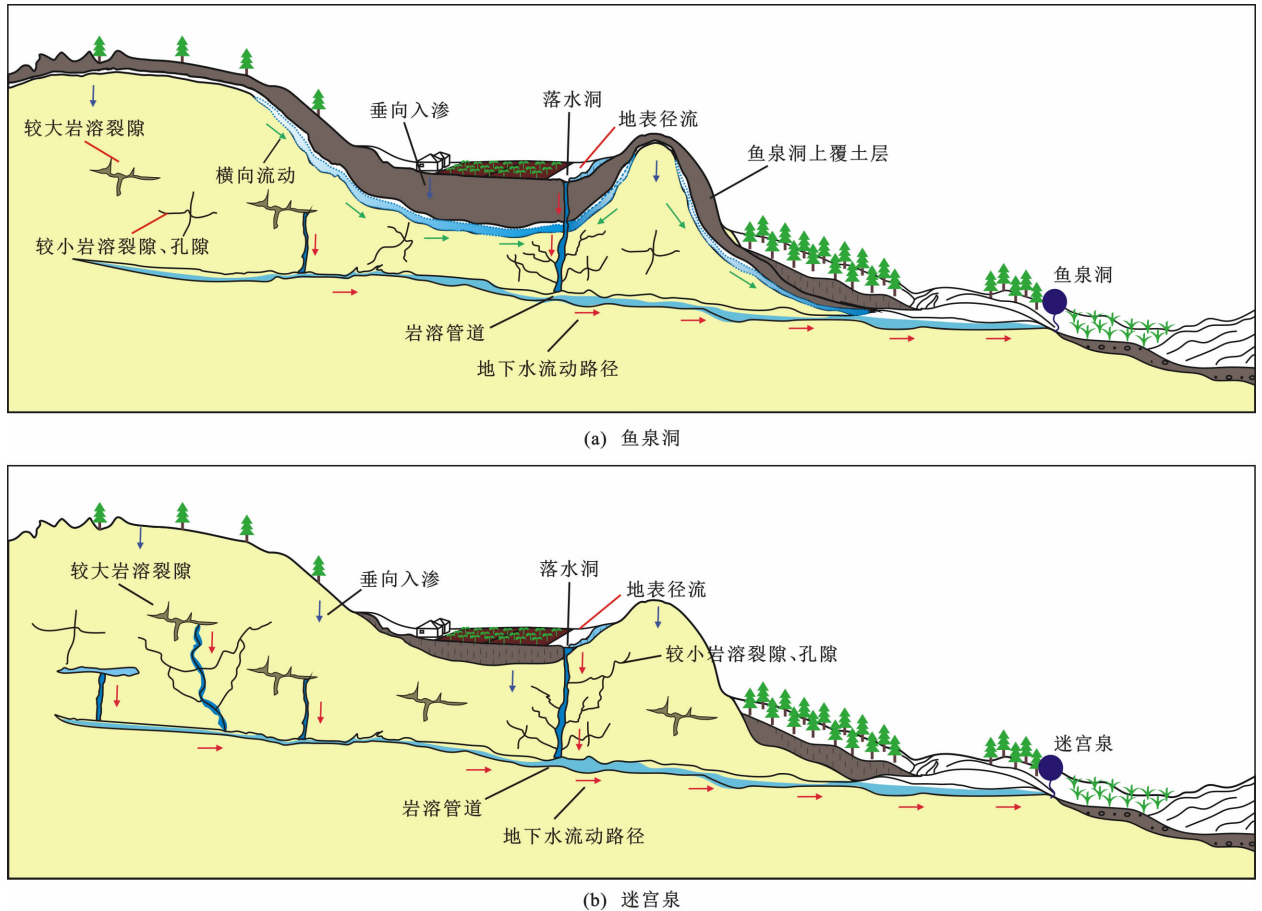


图7 鱼泉洞—迷宫泉地下水系统水流过程模式

Fig. 7 Conceptual Models of Flow Processes in Yuquandong-Migongquan Groundwater System

4 结 语

本文以鄂西南地区泗河流域泉鱼泉洞和迷宫泉等两个岩溶区为例,基于2018年一次强降雨过程和一次弱降雨过程开展自相关分析、互相关分析、交叉振幅分析、流量衰减分析,识别鱼泉洞和迷宫泉的岩溶地质结构,进而揭示岩溶地质条件对水文过程的调控作用。

(1)鱼泉洞—迷宫泉地下水系统中含水介质表现为较大裂隙与较小孔隙-裂隙的二元结构,地下水系统水文动态对降雨有明显的响应。鱼泉洞对强、弱降雨事件响应的滞后时间分别为4和9 h,迷宫泉

对强、弱降雨事件响应的滞后时间分别为3和6 h。鱼泉洞在强、弱降雨事件中的快速流占比分别为7.8%和33.6%,迷宫泉在强、弱降雨事件中的快速流占比分别为52.4%和29.4%。迷宫泉发育有更大的岩溶管道,强降雨事件中的快速流占比更高,但弱降雨事件中的鱼泉洞快速流占比略高。

(2)强降雨事件中,鱼泉洞和迷宫泉的流量衰减均存在坡面径流-落水洞释水、宽裂隙-管道释水、中宽裂隙释水、孔隙-微小裂隙释水等4个不同过程。弱降雨事件中,鱼泉洞和迷宫泉的流量衰减仅有一个阶段,均为中宽裂隙释水、孔隙-微小裂隙释水。

(3)鱼泉洞—迷宫泉地下水系统的地下水流过

程为:①在强降雨事件中,首先在地表形成坡面径流,经由落水洞通过较大垂向管道直接汇入地下水含水层,主要表现为快速流过程;之后为较小的孔隙-裂隙释水,主要为慢速流。②在弱降雨事件中,降雨会先通过表层孔隙和微小裂隙下渗,然后汇集于岩溶管道流入地下水含水层;但鱼泉洞上覆较厚土层,土-岩界面形成临时饱水层发生横向流动,导致通过较大的垂向管道快速运输到地下水含水层,而迷宫泉的降雨经过土层后直接通过较大垂向裂隙到达地下水含水层。

参考文献:

References:

- [1] 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 Dao-xian. 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.
- [2] 夏日元, 卢海平, 曹建文, 等. 南方岩溶区地下水资源特征与水资源保障对策[J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1139-1153.
XIA Ri-yuan, LU Hai-ping, CAO Jian-wen, et al. Characteristics of Groundwater Resources of Karst Areas in the Southern China and Water Resources Guarantee Countermeasures [J]. Geology in China, 2022, 49(4): 1139-1153.
- [3] 陈喜, 张志才. 喀斯特地区地球关键带科学与生态水文学发展综述[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 356-364.
CHEN Xi, ZHANG Zhi-cai. An Overview on the Development of Science and Ecological Hydrology of the Earth Critical Zones in Karst Area [J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 356-364.
- [4] 罗利川, 梁杏, 周宏, 等. 香溪河流域岩溶洞穴发育与分布特征[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 450-461.
LUO Li-chuan, LIANG Xing, ZHOU Hong, et al. Development and Distribution Characteristics of Karst Caves in the Xiangxi River Basin [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(3): 450-461.
- [5] 刘仙, 蒋勇军, 叶明阳, 等. 典型岩溶槽谷区地下水水文动态响应研究: 以重庆青木关地下河为例[J]. 中国岩溶, 2009, 28(2): 149-154.
LIU Xian, JIANG Yong-jun, YE Ming-yang, et al. Study on Hydrologic Regime of Underground River in Typical Karst Valley: A Case Study on the Qingmuguan Subterranean Stream in Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(2): 149-154.
- [6] 蒋忠诚, 夏日元, 时坚, 等. 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析[J]. 地球学报, 2006, 27(5): 495-502.
JIANG Zhong-cheng, XIA Ri-yuan, SHI Jian, et al. The Application Effects and Exploitation Capacity of Karst Underground Water Resources in Southwest China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(5): 495-502.
- [7] 劳文科, 蓝芙宁, 蒋忠诚, 等. 石期河流域岩溶水系统及其水资源构成分析[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 255-262.
LAO Wen-ke, LAN Fu-ning, JIANG Zhong-cheng, et al. Analysis on Karst Groundwater System and Its Water Resources Composition in Shiqihe Basin [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(3): 255-262.
- [8] 毛龙富, 付舒, 刘宏, 等. 基于氢氧稳定同位素的喀斯特泉水补给来源分析[J]. 地球科学, 2023, 48(9): 3480-3493.
MAO Long-fu, FU Shu, LIU Hong, et al. Analysis of Recharge Source of Karst Spring Water Based on Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes [J]. Earth Science, 2023, 48(9): 3480-3493.
- [9] 姜光辉, 郭芳. 我国西南岩溶区表层岩溶带的水文动态分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 89-93.
JIANG Guang-hui, GUO Fang. Hydrological Character of Epikarst in Southwest China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(5): 89-93.
- [10] 路洪海, 章程. 中国西南地区岩溶水资源的特征及可持续利用对策[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2006, 27(2): 139-142.
LU Hong-hai, ZHANG Cheng. Characteristics of Karst Water Resource in Southwest China and Its Sustainable Exploitation and Utilization [J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2006, 27(2): 139-142.
- [11] DUAN X Q, DENG Y E, CHU X W, et al. Identification of Hydraulic Conductivity Field of a Karst Aquifer by Using Transition Probability Geostatistics and Discrete Cosine Transform with an Ensemble Method [J]. Hydrological Processes, 2022, 36(11): e14755.
- [12] 袁道先, 戴爱国, 蔡五田, 等. 中国南方裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究: 以桂林丫吉村为例[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1996.
YUAN Dao-xian, DAI Ai-guo, CAI Wu-tian, et al. Research on Karst Water Systems and Their Mathemati-

- cal Models in Exposed Karst Fengcong Mountain Areas in Southern China: A Case Study of Yaji Village, Guilin[M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 1996.
- [13] 岑鑫雨, 钟金先, 邓国仕, 等. 基于迟滞排泄水箱模型模拟岩溶断流泉水文过程[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 711-721.
CEN Xin-yu, ZHONG Jin-xian, DENG Guo-shi, et al. Modelling the Hydrological Process of the Dried-up Karst Spring Based on a Reservoir Model for Hysteretic Discharge[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(4): 711-721.
- [14] WANG Y A, ZHAO R C, DING L, et al. Karst Trough Control of Solute Transport Processes at Two Karst Groundwater Flow Systems, Western Hubei, Central China[J]. *Journal of Earth Science*, 2025, 36(4): 1731-1741.
- [15] 成建梅, 罗一鸣. 岩溶多重介质地下水模拟技术及应用进展[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 220-229.
CHENG Jian-mei, LUO Yi-ming. Overview of Groundwater Modeling Technology and Its Application in Karst Areas with Multiple-void Media[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(5): 220-229.
- [16] 肖 竞, 万军伟, 成建梅, 等. MODFLOW-CFPv2 模型在岩溶隧道突涌水及对地下水环境影响中的应用: 以云南鹤庆锰矿沟岩溶水系统为例[J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 301-310.
XIAO Jing, WAN Jun-wei, CHENG Jian-mei, et al. Application of MODFLOW-CFPv2 Model in Karst Tunnel Water Inrush and Its Impact on Groundwater Environment: Example of the Mengkuanggou Karst Water System in Heqing County, Yunnan Province [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(3): 301-310.
- [17] 常 勇, 齐尧勇, 刘 玲. 基于改进的 Vensim 模型模拟岩溶泉水文过程[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 301-307.
CHANG Yong, QI Yao-yong, LIU Ling. Modelling the Hydrological Process of the Karst Spring Using a Revised Vensim Model[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(5): 301-307.
- [18] 罗明明, 姜光辉. 基于岩溶水动态模拟的补给面积计算方法[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 293-300.
LUO Ming-ming, JIANG Guang-hui. Estimation Method of Recharge Area Based on Hydrograph Simulation of Karst Water [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(5): 293-300.
- [19] 刘 伟, 周 宏, 周翠英, 等. 岩溶表层带基流分割及其变化特征: 以 Velika Pasica 溶洞为例[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 40-45.
LIU Wei, ZHOU Hong, ZHOU Cui-ying, et al. Base-flow Separation and Its Variation in Epikarst: A Case Study in the Velika Pasica Cave [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(5): 40-45.
- [20] BASU B, MORRISSEY P, GILL L W. Application of Nonlinear Time Series and Machine Learning Algorithms for Forecasting Groundwater Flooding in a Lowland Karst Area [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(2): e2021WR029576.
- [21] RAHNEMAEI M, ZARE M, NEMATOLLAHI A R, et al. Application of Spectral Analysis of Daily Water Level and Spring Discharge Hydrographs Data for Comparing Physical Characteristics of Karstic Aquifers [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 311(1/2/3/4): 106-116.
- [22] PANAGOPOULOS G, LAMBRAKIS N. The Contribution of Time Series Analysis to the Study of the Hydrodynamic Characteristics of the Karst Systems: Application on Two Typical Karst Aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete) [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3/4): 368-376.
- [23] MAYAUD C, WAGNER T, BENISCHKE R, et al. Single Event Time Series Analysis in a Binary Karst Catchment Evaluated Using a Groundwater Model (Lurbach System, Austria) [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 628-639.
- [24] LIU L H, CHEN X H, XU G Q, et al. Use of Hydrologic Time-series Data for Identification of Hydrodynamic Function and Behavior in a Karstic Water System in China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(8): 1577-1585.
- [25] 李建鸿, 蒲俊兵, 张 陶, 等. 相关和频谱分析法在岩溶系统中的应用研究综述 [J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 335-344.
LI Jian-hong, PU Jun-bing, ZHANG Tao, et al. Review on Application of Correlation and Spectrum Analyses in Karst System Research [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 335-344.
- [26] 尹德超, 罗明明, 张 亮, 等. 基于流量衰减分析的次降水入渗补给系数计算方法 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 11-16.
YIN De-chao, LUO Ming-ming, ZHANG Liang, et al. Methods of Calculating Recharge Coefficient of Precipitation Event Based on Spring Recession Analyses [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43

- (3):11-16.
- [27] 罗明明,尹德超,张亮,等.南方岩溶含水系统结构识别方法初探[J].中国岩溶,2015,34(6):543-550.
LUO Ming-ming, YIN De-chao, ZHANG Liang, et al. Identifying Methods of Karst Aquifer System Structure in South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(6):543-550.
- [28] LIU W, WANG Z J, CHEN Q L, et al. An Interpretation of Water Recharge in Karst Trough Zone as Determined by High-resolution Tracer Experiments in Western Hubei, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(14):357.
- [29] KOGOVSĚK B, JEMCOV I, PETRIC M. Advanced Application of Time Series Analysis in Complex Karst Aquifers: A Case Study of the Unica Springs(SW Slovenia)[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 626:130147.
- [30] 刘凤翱,邢学睿,张凤娟,等.基于水文时间序列的岩溶水系统时滞响应研究[J].中国农村水利水电,2025(8):68-76.
LIU Feng-ao, XING Xue-rui, ZHANG Feng-juan, et al. Research on the Time-lag Response of Karst Hydrological Systems Based on Hydrological Time Series[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2025(8):68-76.
- [31] JUKIC D, DENIC-JUKIC V, KADIC A. Temporal and Spatial Characterization of Sediment Transport Through a Karst Aquifer by Means of Time Series Analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609:127753.
- [32] GUO Y, WANG F, QIN D J, et al. Hydrodynamic Characteristics of a Typical Karst Spring System Based on Time Series Analysis in Northern China[J]. *China Geology*, 2021, 4(3):433-445.
- [33] 李严,王家乐,靳孟贵,等.运用水文时间序列分析识别济南泉域岩溶发育特征[J].地球科学,2021,46(7):2583-2593.
LI Yan, WANG Jia-le, JIN Meng-gui, et al. Hydrodynamic Characteristics of Jinan Karst Spring System Identified by Hydrologic Time-series Data[J]. *Earth Science*, 2021, 46(7):2583-2593.
- [34] PADILLA A, PULIDO-BOSCH A. Study of Hydrographs of Karstic Aquifers by Means of Correlation and Cross-spectral Analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 168(1/2/3/4):73-89.
- [35] LIU A W, BRANCELJ A, BURNET J E. Interpretation of Epikarstic Cave Drip Water Recession Curves: A Case Study from Velika Pasica Cave, Central Slovenia[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(15):2754-2762.
- [36] 李莲,唐越尔,杨琰,等.典型岩溶槽谷区地下水循环特征:以重庆酉阳龙潭槽谷为例[J].水文地质工程地质,2025,52(2):53-62.
LI Lian, TANG Yue-er, YANG Yan, et al. Characteristics of Groundwater Circulation in Typical Karst Trough Areas: A Case Study of Longtan Trough Valley in Youyang, Chongqing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2025, 52(2):53-62.
- [37] SIVELLE V, JOURDE H. A Methodology for the Assessment of Groundwater Resource Variability in Karst Catchments with Sparse Temporal Measurements[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(1):137-157.
- [38] 杨海明,王家乐,顾再柯,等.基于洪水退水过程的喀斯特小流域径流组分与含水层储水结构[J].地球科学与环境学报,2025,47(1):82-94.
YANG Hai-ming, WANG Jia-le, GU Zai-ke, et al. Runoff Components and Aquifer Storage Structure in Karst Small Watershed Based on the Flood Recession Process[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2025, 47(1):82-94.
- [39] MARTÍN-RODRÍGUEZ J F, MUDARRA M, DE LA TORRE B, et al. Towards a Better Understanding of Time-lags in Karst Aquifers by Combining Hydrological Analysis Tools and Dye Tracer Tests, Application to a Binary Karst Aquifer in Southern Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 621:129643.
- [40] 汪莹,宋小庆,王飞,等.基于连续小波-互相关分析的降雨-地下水水位动态响应特征研究:以贵阳岩溶盆地为例[J].中国岩溶,2024,43(4):843-853.
WANG Ying, SONG Xiao-qing, WANG Fei, et al. Response Characteristics of Groundwater Level Dynamics to Precipitation Based on Continuous Wavelet-cross Correlation Analysis: A Case Study of the Guiyang Karst Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(4):843-853.