

文章编号:1001-4810(2009)02-0149-06

典型岩溶槽谷区地下河水文动态响应研究 ——以重庆青木关地下河为例^①

刘 仙¹, 蒋勇军^{1,2}, 叶明阳¹, 杨平恒¹, 扈志勇¹, 李元庆¹

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆400715; 2. 西南大学岩溶环境与石漠化治理研究所, 重庆400715)

摘 要:为了更好地掌握重庆青木关地下河水文动态变化规律,2007年5月至2008年6月利用WGZ-1型光电数字水位计和水质监测仪(CTDP300型在线水质分析仪),对降雨量和地下河水位、水温、pH及电导率进行了连续自动监测,并采用水文动态曲线型分析法分析了该地下河水文动态变化对降水事件的响应。结果表明,地下河水文动态对降雨响应迅速,水位流量过程曲线型呈不对称尖峰型,尤其在2007年7月17日出现的大暴雨事件中,最高水位为1.175 m,滞后最大雨强6h10 min,最大流量为2.578 1 m³/s,而观测中该地下河最小流量仅为0.018 9 m³/s,反映出该岩溶地下河发育强烈,赋水空间较单一,含水层对水资源调蓄能力较弱。电导率、pH和水温对降雨也同样表现为快速响应,电导率由602.7 μs/cm降到462.09 μs/cm,pH由7.23降到7.01,水温由18.9℃上升到19.5℃,各指标滞后不超过15 h。

关键词:岩溶槽谷;岩溶地下河;水文动态变化;降雨强度;重庆青木关

中图分类号:P641.74

文献标识码:A

岩溶地下河是南方碳酸盐岩地区重要的岩溶形态,是地下水赋存的一种独特形式,而且往往是控制当地洪涝的咽喉。据调查,在我国西南碳酸盐岩出露的46.9万 km²^[1]范围内,共分布有2 836条地下河系^[2],总长度13 919 km,总流量达1 482 m³/s,相当一条黄河。因此,准确定量评价和预测赋存于地下河系统的水资源量大小和变化特征是十分必要的^[1~3]。岩溶地下河水文动态变化受气候、水文地质等多种因素制约,对地下水开采、引水灌溉等人活动反应较为敏感,能够真实反映地下水的补给、径流、排泄等水文地质条件之间的关系,成为岩溶地区水文地质勘察的重要内容之一^[4~9]。但由于过去缺乏长期的地下河系统观测资料及无法刻画地下河系统含水介质的结构等原因,从而无法确切把握系统中的水文动态变化,特别是洪水期间的详细情况,而洪水期又是了解系统对降雨反映和水文变化过程的至关重要时段^[10]。近

年来,随着重大项目在典型岩溶地区的开展及观测仪器和方法技术的改进,为获取地下河的连续水文资料和把握地下河系统的水文动态的精细变化提供了条件。

岩溶地下水观测工作分为长期观测和短期观测^[6]。长期观测时间至少为一个水文年,而短期观测通常以一个月或一次降雨事件为周期。基于“西南岩溶地区水资源的演变机理与影响因素”项目,以重庆青木关典型岩溶槽谷区作为研究试验场,对该区地下河出口的水位及水化学动态变化进行自动监测,获得了2007年5月以来该地下河的水文动态变化情况。本文选取2007年5月至2008年6月的水文数据,从宏观上分析了地下河出口处水位流量的动态变化特征,特别是重点研究了2007年7月3次强降雨期间地下河出口的水位流量、水温、电导率和pH与降雨的响应关系,为分析该地下河水文动态变化及系统内部结构

① 基金项目:973前期研究专项(2008CB417208)“重庆市岩溶地下河形成、分布及水循环规律”项目(CSTC2007BC7001)

第一作者简介:刘仙(1983-),女,硕士研究生,主要从事岩溶资源环境与GIS应用研究。E-mail:liuxianqd@163.com。

通讯作者:蒋勇军,副教授,主要从事岩溶水文资源环境与GIS应用研究。

收稿日期:2008-08-23

提供依据。

1 研究区概况

青木关槽谷区位于四川盆地东南部,重庆市北碚区、沙坪坝区和璧山县的交界处,属亚热带湿润季风气候区,气候温暖湿润,多年平均气温为 16°C 。降水受季风环流影响,雨量充沛,季节差异明显,具有春雨、夏洪、冬干的特点。年降水量 $1\ 100\sim 1\ 300\text{ mm}$,主要集中在5—9月,占年降水量的70%,且多暴雨。

槽谷形成于川东平行岭谷缙云山温塘峡背斜南延部分——青木关背斜轴部,背斜表面破碎严重,断层发育,有较大面积的三叠系碳酸盐岩出露,在长期的水流溶蚀作用下,形成“一山两岭一槽”式的典型岩溶槽谷地貌形态。槽谷为北北东—南南西走向,成狭长带状微度弯曲的弧形构造,南北长 12 km (图1)。山

脉走向与构造线方向基本一致,地势呈现出北高南低的趋势,山峰与谷地相对高差在 $200\sim 300\text{ m}$ 之间,起伏不大。青木关地下河系统发育于青木关槽谷中并沿槽谷延伸,汇水范围由槽谷内三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})和两侧山坡地带中统雷口坡组(T_{2l})碳酸盐岩及部分上统须家河组(T_{3xj})石英砂岩、泥岩地层出露区组成。上游地表水在平缓的谷地中汇集后经岩口落水洞(洞口标高 524 m)进入地下河,中下游地表水通过串珠状洼地中的小型落水洞或岩溶裂隙进入地下河系,最终通过南部敞开处的地下河出口(高程 320 m)排出。其中,岩口落水洞与地下河出口相距 7.4 km 。

槽谷区封闭条件较好,大气降水是该区地下河系统的主要补给来源。大部分降水沿坡面汇集到槽谷底部的洼地,并通过表层裂隙等以面状分散入渗和经落水洞以集中注入方式补给地下河。

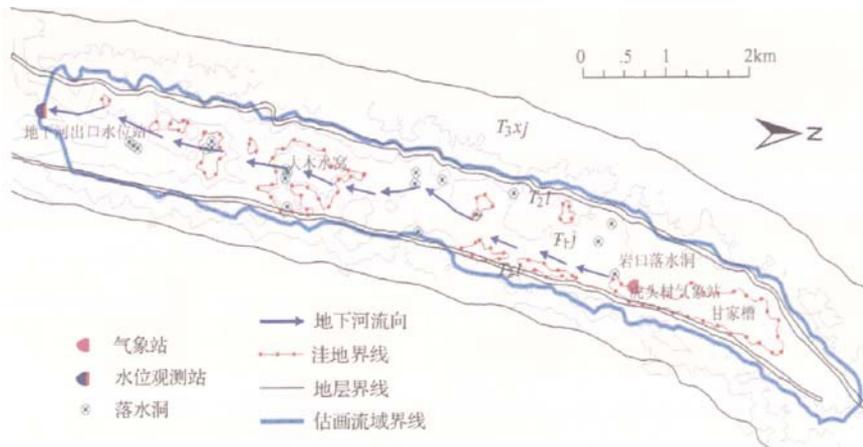


图1 青木关地下河分布图

Fig. 1 Distribution map of the Qingmuguan subterranean stream

2 研究方法

2007年4月,在青木关地下河上游的虎头村建立了HOBO小型气象站(图1),自动记录该地区的降雨量和气温等气象数据。其中降雨量每 5 min 记录一次,精度为 0.2 mm 。在地下河出口处建立了水文观测站,利用WGZ-1型光电数字水位计连续监测获取出口处的水位动态变化数据,水位变幅超过 2 mm 时, 5 min 记录一次,否则 1 h 记录一次,精度为 0.001 m ;出口处修建了规则的矩形水堰,根据曼宁公式计算得出出口处流量。并用CTDP300型在线水质分析仪(澳大利亚Greenspan公司生产)对地下河出口处的水温、电导率和pH进行实时监测,每 15 min 记录一次,

精度分别为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.01\text{ }\mu\text{s/cm}$ 、 0.2 pH 。观测站建成后,每月中旬到现场获取记录数据,观测时间已经超过1个水文年。

3 结果与分析

3.1 地下河出口年内水文动态变化

岩溶地下水水位是表征地下水动力条件的重要标志^[7]。邹成杰(1995)综合不同岩溶发育地区众多钻孔和溶洞地下水观测资料,将复杂的水位历时曲线归纳为5种线型:对称尖峰型、不对称尖峰型、不对称台面型、波状起伏型和平缓跳跃型,其线型主要取决于降水、所处的岩溶地貌单元、地下水补排条件和岩溶

发育程度及岩体的透水性,该方法称为岩溶地下水动态曲线线型分析法^[6]。水位动态曲线是进行地下水动态分析的基本资料,可以依据水位动态变化曲线过程来认识岩溶发育程度和岩溶含水介质的结构及调蓄能力等。

图2为2007年5月至2008年6月青木关地下河出口处水位流量与降雨的对应曲线,表现出中国南方地下河所具有的普遍的水文过程动态特征线,属明显的管道流为主的响应曲线。水位流量动态对降水响应非常敏感,随降雨量同步变化。旱季时(11月到次年3月)水位平缓,雨季时水位流量变化急剧,水位峰值

高,流量大,尤其是2007年6、7月特大暴雨期间,降雨量分别为256.4 mm和485.8 mm,占全年降雨量的50%以上,水位最高(7月17日)达1.175 m,变幅超过1 m,最大流量分别为1.645 m^3/s 和2.578 m^3/s ,而最小流量分别仅为0.0189 m^3/s 和0.2814 m^3/s 。表明该地下河系统岩溶发育强烈,岩体透水性大,水位流量峰值持续时间短,充分体现出该地下河管道流的“过路水”特征,不利于含水介质的蓄水^[11~13],可见该地下河属于气象水文型动态类型^[14~15]。同时水位流量曲线上升比下降快,表现为不对称尖峰型,也表明降水补给地下水的速度很快,排泄相对较慢。

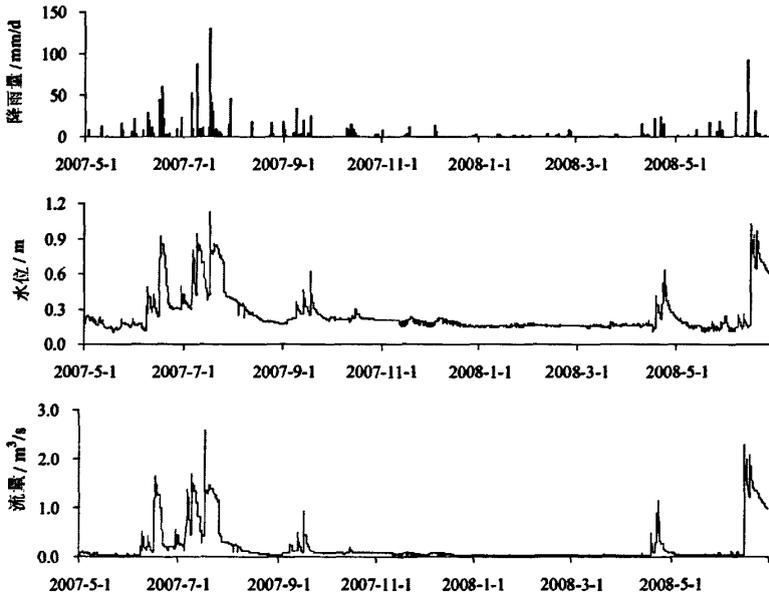


图2 2007/5—2008/6青木关地下河出口水位、流量与日降雨对应变化曲线

Fig. 2 The corresponding curves among the water table, discharge and precipitation at the Qingmuguan subterranean stream outlet (from May, 2007 to June, 2008)

3.2 强降雨条件下水文动态变化特征

2007年7月1日—27日青木关地下河流域共出现3次集中强降雨事件:第一次集中降雨出现在7月5日20:45到7月6日0:25,强度较大,在不足4h的时间里累计降雨53.8 mm,最大雨强为33.2 mm/h;第二次集中降雨从7月9日1:35到6:35,累计降雨85.8 mm,之后在7月13日13:00出现分散的小雨;第三次集中降雨事件降雨量最大,仅从7月17日2:50到16:25,累计降雨量达129.6 mm。在3次集中降雨事件中,最大雨强出现在7月9日2:00,降雨强度为57.0 mm/h,其次为7月17日的5:00和8:00,降雨强度分别为26.0 mm/h和28.6 mm/h,青木关地下河对降雨事件的响应明显,水的电导率和pH急剧降低,而温

度和水位、流量则迅速上升(图3)。

3.2.1 pH响应

在对桂林岩溶试验场的研究中,刘再华等认为洪水期至少有两个重要过程控制水化学的变化:一是稀释过程,另一个是水—岩—气相互作用过程。管道中的水化学变化,雨水的稀释是主要的控制过程,即由于补给地下河的高pH和低电导率的雨水很快通过管道流出系统,所以观测到的水物理化学特点多表现为pH升高,电导率降低^[10]。但本研究的监测结果有所差异:地下水的pH在降雨之后呈快速下降趋势,由降雨前的7.25快速降到7.0附近,降幅达0.22个单位,之后再缓慢回升到原来水平。三次集中强降雨后,地下河水的pH相应快速出现低谷值,7月5日23:00

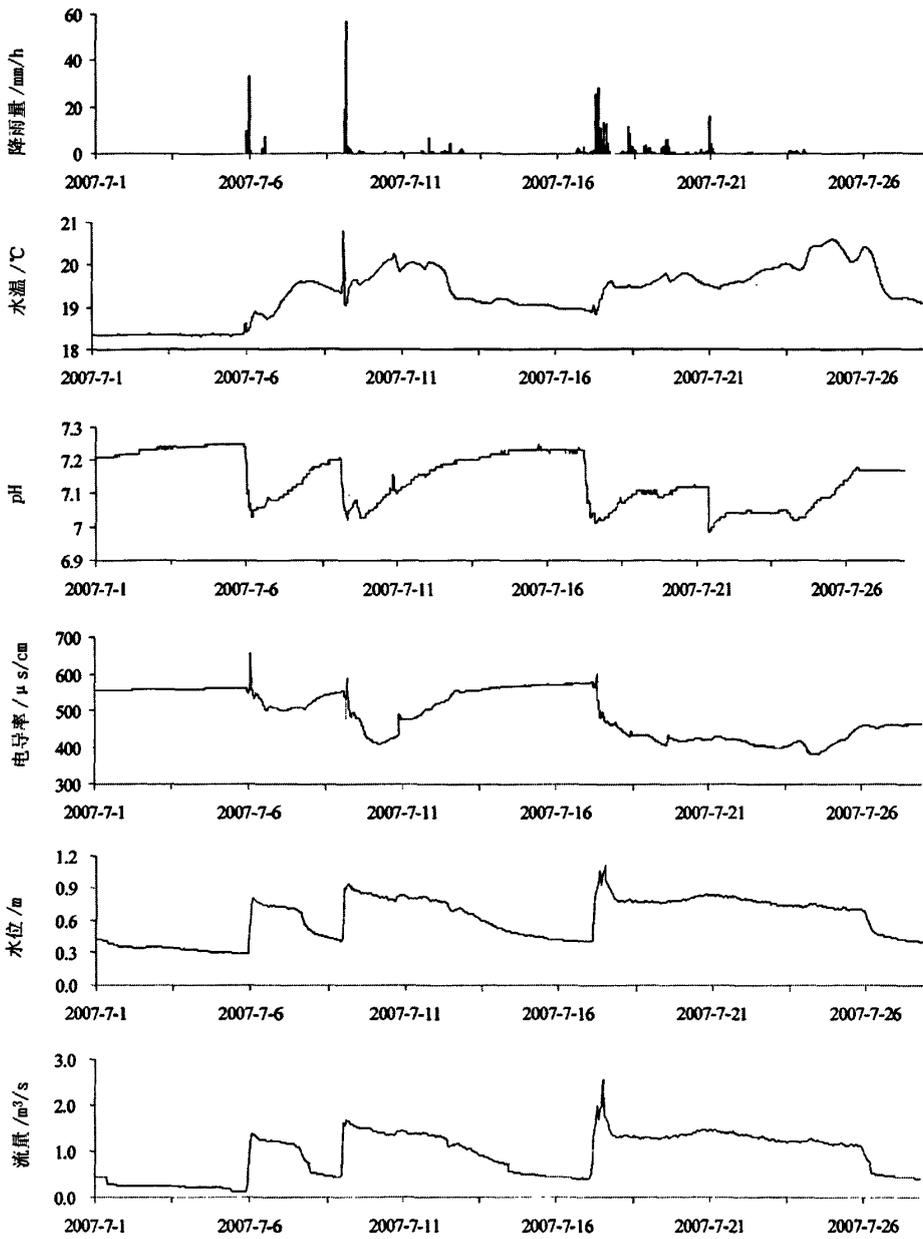


图3 2007/7/1—2007/7/27 地下河出口水文过程线

Fig. 3 The hydrologic curves of the subterranean stream outlet (July, 1~27, 2007)

到7月6日04:45, pH由7.25降到7.03, 7月9日02:15到07:30, pH由7.21降到7.02, 7月17日01:45到15:00, 由7.23降到7.01, 分析其原因主要是本区雨水的pH较低(根据现场测验为5.6), 因受大量雨水补给而导致地下水pH明显降低。而随着集中降雨的结束, 地下水pH受降水的影响减少, 又从低值缓慢回升。

3.2.2 电导率响应

降雨前, 电导率稳定在560 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 上下, 随着强降雨的出现, 电导率突然升高, 超过600 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 然后急剧下降, 之后又缓慢回升。第一次强降雨后, 电导率快速出现峰值, 在7月6日01:45达到656.05 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 在14:15, 电导率出现低谷, 为498.44 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。第二次强降雨后, 电导仍然快速升高, 7月9日04:30达到

591.48 $\mu\text{s}/\text{cm}$,在7月10日06:15又降到了411.1 $\mu\text{s}/\text{cm}$;第三次降雨强度大,持续时间长,在7月17日08:15达到602.7 $\mu\text{s}/\text{cm}$,20:30降到462.09 $\mu\text{s}/\text{cm}$,在7月19日13:15降到了405.57 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。

电导率的突然升高可能是由于活塞效应导致,而后快速下降则是雨水的稀释作用造成。根据现场测验雨水的电导率较低,小于100 $\mu\text{s}/\text{cm}$,随着降雨的结束,地下河水的电导率也开始缓慢回升。三次集中降雨过程相比,第三次强降雨事件中,电导率下降幅度达200 $\mu\text{s}/\text{cm}$,且低值持续时间长,到7月24日13:30才开始回升,这可能是由于持续降雨造成的,7月17日降雨量多且降雨强度大,大量雨水快速进入地下管道后与地下水混合,从18日到24日雨水持续不断的补给,使地下水一直受雨水的稀释作用影响,故其电导率长时间保持较低值。可见,降雨量越多,电导率下降幅度越大,持续时间越长。

3.2.3 水温响应

夏季雨水的温度较地下水高,降水到达地面进入地下河使岩溶管道水温在雨后迅速上升,最大变幅达2.46 $^{\circ}\text{C}$,表明地下水温受降水温度影响明显。第二次强降水开始后,水温从19.56 $^{\circ}\text{C}$ 急剧升高至20.79 $^{\circ}\text{C}$ (7月9日03:15),然后迅速下降,水温如此急剧的升降是由于当时降雨强度太大的缘故。第三次集中强降雨后,水温上升较缓且持续时间长,直到7月26日04:15达到20.43 $^{\circ}\text{C}$,才开始下降,这与第三次降雨持续时间较长有关。此外,水温与pH和电导变化趋势相反,呈较好的负相关关系。

3.2.4 水位流量动态

水位和流量对强降雨响应极快,水文过程线陡直上升,下降相对缓慢,表现为不对称尖峰型。三次强降雨事件中,相应地出现3次水位和流量峰值,7月6日02:20出现第一次水位和流量峰值,分别为0.819 m和1.403 m^3/s ,9日02:40出现第二次水位和流量峰值,分别为1.002 m和1.853 m^3/s ,17日14:40出现第三次水位和流量峰值,分别为1.175 m和2.578 m^3/s 。三次水位和流量峰值与场降雨量呈正相关关系,用SPSS相关分析得出两者的相关系数分别为0.919和0.992(表1),分散小雨时水位和流量变化平缓。

集中强降雨^[7](1~3h内的连续降雨量超过50 mm)时的水文尖峰滞后时间很短,滞后约3~4h,特大暴雨时甚至滞后不到1h。如7月9日1:00~3:00,两小时内降雨量达76.2 mm,最大降雨强度达57.0 mm/h,水位和流量峰值仅滞后45 min。7月5日21:00~0:00,

三小时内降雨51.8 mm,最大雨强为33.2 mm/h,水位和流量峰滞后最大雨强3h55 min。分析显示:水位和流量峰值滞后时间与最大雨强呈负相关关系,相关系数为-0.962(表2)。强度不大但累积降雨量大的强降雨时,水位和流量尖峰滞后时间比集中强降雨时长。如2007年7月17日,日降雨量达131.4 mm,最大雨强为28.6 mm/h,水位、流量峰滞后最大雨强6h10 min,地下水运移速度相对较慢。

表1 降雨量与水位和流量峰值相关分析结果

Tab.1 Correlation analysis results among rainfall, highest water table and discharge

变量间的皮尔森相关系数	降雨量	最大流量	最高水位
降雨量	1	0.992	0.919
最大流量	0.992	1	0.862
最高水位	0.919	0.862	1

表2 降雨强度与水位流量峰值滞后时间的相关分析结果

Tab.2 Correlation analysis results between rainfall intensity and the lag time

变量间的皮尔森相关系数	最大雨强	峰值滞后时间
最大雨强	1	-0.962
峰值滞后时间	-0.962	1

4 讨论

出口处水温、pH、电导率和水位流量急速升降是对降水的直接反映。强降雨在岩溶槽谷区两侧的山坡上形成水量较大的地表径流,汇聚到槽谷底部的洼地,大部分地表水最终通过落水洞集中补给地下水,使地下水水量急剧增加,地下水运移速度加快,使地下水位迅速升高,流量快速增大,导致出口处pH、电导及水温快速变化,而且pH和电导变化基本一致;强降雨停止后,槽谷中仍有大量地表水未排出,使各项指标恢复较为缓慢。尤其第三次降雨后,地下水水温、pH、电导率和水位变化持续到7月26日才开始逐渐恢复。可见,尽管槽谷区断层发育,且分布有大量裂隙,但强降雨时,落水洞注入式补给是该地下水最主要的补给方式,裂隙补给所占比重较小。同时,也表明槽谷区的落水洞与地下管道连通较好。

5 结论

(1) 青木关岩溶槽谷区作为一种特殊的地貌类型,具有很好的汇水条件,沿槽谷发育的地下河系统水

文动态变化完全受降雨支配。强降雨时,整个流域范围内接收到的降水主要经过落水洞以集中注入的形式补给地下水,导致水位急剧上升,且对地下水的稀释作用在pH、电导率等指标上的表现非常强烈;而集中强降雨结束后,各种指标缓慢恢复到原来的水平。

(2) 2007年7月的3次强降雨过程对应的青木关地下河的水位流量动态变化,表现出地下水水位、流量变幅与降雨强度密切相关。降雨量越大,降雨强度越大,地下河出口处的水位和流量变幅越大,水位和流量峰值滞后时间越短,滞后时间与最大雨强呈负相关关系,降水量和降雨强度是其水位和流量动态变化的主要影响因素,属于气象水文型动态类型。

(3) 青木关地下水水位和流量过程线呈不对称尖峰型,水温、pH和电导率对降雨响应快速,反映出该地下河岩溶发育强烈、赋水空间比较单一,以及从岩口落水洞到地下河出口之间管道畅通,而且含水层对水资源的调蓄能力较弱等特征。

参考文献

- [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.
- [2] 杨立铮. 中国南方地下河分布特征[J]. 中国岩溶, 1985, 4(1-2): 92-100.
- [3] 郭琳, 陈植华. 岩溶地区地下河系统水资源定量评价的问题与出路[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 1-5.
- [4] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 138-156.
- [5] 邹胜章, 朱明秋, 唐建生, 等. 西南岩溶区水资源安全与对策[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1637-1642.
- [6] 邹成杰. 岩溶地区地下水位动态分析[J]. 中国岩溶, 1995, 14(3): 261-269.
- [7] 齐跃明, 江玉祥, 孟茜, 等. 肥城矿区充水含水层地下水动态研究[J]. 水资源保护, 2008, 24(1): 12-15.
- [8] 何宇彬, 徐超. 喀斯特隙流水与管流水的耦合及转化关系研究[J]. 中国岩溶, 1995, 14(2): 150-160.
- [9] 王腊春, 章海生, 严苏宁. 贵州省岩溶区管道流及其水力特征[J]. 中国岩溶, 1995, 14(4): 315-322.
- [10] 刘再华, Chris GROVES, 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, 10(4): 13-18.
- [11] 何宇彬, 邹成杰. 试论喀斯特管流水特征[J]. 上海地质, 1997, (61): 22-30.
- [12] 庄金银, 黄永亮. 影响岩溶发育因素的几点探讨[J]. 西部探矿工程, 2008, (1): 127-128.
- [13] 程星, 杨子江. 影响喀斯特地下水调蓄功能的因素的探讨[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 52-57.
- [14] 周军, 翟平阳, 周继祥, 等. 佳木斯市城区地下水动态特征分析[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(1): 62-66.
- [15] 劳文科, 祁晓凡, 刘慧敏, 等. 广西果化龙何地区表层带岩溶水系统及其水资源特征[J]. 中国岩溶, 2008, 27(2): 122-128.

Study on hydrologic regime of underground river in typical karst valley — A case study on the Qingmuguan subterranean stream in Chongqing

LIU Xian¹, JIANG Yong-jun^{1,2}, YE Ming-yang¹, YANG Ping-heng¹, HU zhi-yong¹, LI Yuan-qing¹

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Research Institute of Karst Environment and Rock Desert Control, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to grasp the hydrologic regime of underground river, a case study on the Qingmuguan subterranean stream in Chongqing was carried out. During May 2007 to June 2008, a water table gauge (WGZ-1 photoelectric figure fluviograph monitor) and water quality monitoring site were set up to record the water level, temperature, pH and conductivity. Hydrology dynamic method was adopted to analyze the response of hydrologic dynamic of the subterranean stream to the rainfall in this paper. The result showed, during the rainfall, water table and discharge increased with the rain, especially on July 17, 2007, some peaks appeared in the large storm, the highest water level was 1.175 m, and the response lagged for 6 h 10 min after the largest rainfall intensity with the highest discharge being 2.578 1 m³/s and the smallest only 0.018 9 m³/s. It was found that there was a significant correlation between the water table regime and rainfall event, which indicated the Qingmuguan subterranean stream is developed intensity in intensity with single conduit and weak water-storing ability. Conductivity, pH and water temperature also responded to the rainstorm rapidly. Conductivity fell down from 602.7 to 462.09 μ S/cm, pH fell down from 7.23 to 7.01, and water temperature risen from 18.9 $^{\circ}$ C to 19.5 $^{\circ}$ C, all these indexes lagged shorter than 15 hours.

Key words: karst valley; subterranean stream; hydrologic regime; rainfall intensity; Qingmuguan, Chongqing