

桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对降水的响应

卢丽, 邹胜章, 赵一, 樊连杰, 林永生, 王

Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin

LU Li, ZOU Shengzhang, ZHAO Yi, FAN Lianjie, LIN Yongsheng, and WANG Zhe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44-56

蒸散发水源组成与测定方法研究进展

A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration

王周锋, 王文科, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 1-9

地下采动下含深大裂隙岩溶山体变形响应特征

Deformation response characteristics of karst mountains with deep and large fissures under the condition of underground mining

钟祖良, 高国富, 刘新荣, 王南云, 李皓 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 97-106

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

何剑波, 李玉山, 胡立堂, 尹政, 胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43

岩溶矿区水文地球化学特征及其水源指示意义

Groundwater source identification in carbonate-hosted deposit using hydrogeochemistry, hydrogen and oxygen isotope method

黄荷, 陈植华, 王涛, 罗朝晖, 张亮, 王剑, 项彩娟, 孙帮涛, 王勇 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 19-19

薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型

Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones

张宽, 唐朝晖, 柴波, 孙巧, 张洁飞 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 167-174



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202027

卢丽, 邹胜章, 赵一, 等. 桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对降水的响应 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 63-72.
LU Li, ZOU Shengzhang, ZHAO Yi, et al. Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 63-72.

桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环 对降水的响应

卢丽^{1,2,3,4}, 邹胜章^{1,2,3,4}, 赵一^{1,2,3,4}, 樊连杰^{1,2,3,4}, 林永生^{1,2,3,4}, 王喆^{1,3,4}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; 2. 广西岩溶资源环境工程技术研究中心, 广西桂林 541004; 3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西桂林 541004; 4. 自然资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要: 岩溶湿地是西南岩溶生态系统的重要调节器, 对该地区的可持续发展有重要意义, 而水循环作为维系岩溶湿地健康运转的核心因素, 已经成为当前的研究热点。2020年4月15日—5月30日野外监测了桂林会仙湿地狮子岩地下河系统参数, 采用水文动态分析与水均衡等方法, 开展了地下河系统水循环研究。结果表明: (1) 地表径流、土壤水、表层岩溶带水和岩溶地下水均对大气降雨响应敏感, 但敏感程度有差异, 其中岩溶地下水的敏感性最高, 地表径流和表层岩溶带水的敏感性较弱, 土壤水的敏感性受深度影响较大。(2) 不同等级降雨中地下河系统的各类水变化量的比例有差异。本次研究中, 小雨(24 h 累计降雨量范围为 4.2~10 mm)时系统内土壤水变化量比例最大, 约为 75.87%; 中雨(24 h 累计降雨量为 17.8 mm)时土壤水变化量和岩溶地下水变化量的比例最大, 分别约为 43.38% 和 44.12%, 大雨(24 h 累计降雨量为 24 mm)和大暴雨(24 h 累计降雨量范围为 110.8~128.2 mm)时岩溶地下水变化量比例最大, 约为 66.48%。(3) 研究区调蓄系数平均值约为 0.53, 明显高于其他岩溶地区, 表现出较强的调蓄能力, 且随着降雨量的增大, 调蓄系数逐渐减小。(4) 地下河系统水循环概念模型包含大气降雨、地表径流、土壤水、表层岩溶带水和岩溶地下水之间的转化关系及转化量, 建立概念模型可为岩溶湿地水资源开发利用和湿地保护提供理论基础。

关键词: 湿地; 岩溶; 水循环; 调蓄系数; 水文过程

中图分类号: P641.134

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0063-10

Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin

LU Li^{1,2,3,4}, ZOU Shengzhang^{1,2,3,4}, ZHAO Yi^{1,2,3,4}, FAN Lianjie^{1,2,3,4}, LIN Yongsheng^{1,2,3,4}, WANG Zhe^{1,3,4}

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Karst Resources and Environment Research Center of Engineering Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin, Guangxi 541004, China; 4. Key

收稿日期: 2022-02-19; 修订日期: 2022-04-18

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB22080070); 国家重点研发计划项目(2017YFC0406104); 国家自然科学基金项目(41807218; 41602277); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221758; DD20190825); 中央公益性研究机构基本科研业务费项目(2020020)

第一作者: 卢丽(1985-), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事岩溶水文地质环境地质研究。E-mail: luli@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 邹胜章(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩溶水文地质环境地质研究。E-mail: zshengzhang@mail.cgs.gov.cn

Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Karst wetland is an important regulator of karst ecosystems in southwest China and is of great significance to the sustainable development of the region. Water cycle, as the core factor to maintain the healthy operation of karst wetlands, has become a hot topic in current researches. Based on the field monitoring data of the Shizhiyan underground river system in the Guilin Huixian Wetland from April 15, 2020 to May 30, 2020, hydrological dynamic analysis and water balance are used to study the water cycle of the underground river system. The results show that (1) surface runoff, soil water, surface karst zone water and karst groundwater are sensitive to atmospheric rainfall, but the sensitivity degree is different. The sensitivity of karst groundwater is the highest, the sensitivity of surface runoff and surface karst zone water is weak, and the sensitivity of soil water is greatly affected by depth. (2) The proportion of all kinds of water circulation in the underground river system is different at different grades of rainfall, and the proportion of soil water in the system is the largest in light rain (24 h cumulative rainfall ranges from 4.2 mm to 10 mm), which accounts for about 75.87%. The proportion of soil water and karst groundwater in moderate rain (24 h cumulative rainfall is 17.8 mm) is the largest, which is about 43.38% and 44.12%, respectively. The proportion of karst groundwater in heavy rain (24 h cumulative rainfall is 24 mm) and heavy rainstorm (24 h cumulative rainfall ranges from 110.8 mm to 128.2 mm) is the largest, accounting for about 66.48%. (3) The average coefficient of regulation and storage in the study area is about 0.53, which is significantly higher than that of other karst areas, showing strong regulation and storage capacity. With the increasing rainfall, the coefficient of regulation and storage gradually decreases. (4) The conceptual model of water cycle of underground river system includes the transformation relationship and transformation amount among atmospheric rainfall, surface runoff, soil water, surface karst zone water and karst groundwater. The establishment of the conceptual model can provide a theoretical basis for the development and utilization of water resources and wetland protection of karst wetland.

Keywords: wetland; karst; water cycle; storage coefficient; hydrological processes

我国西南岩溶区分布面积约为 $54 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1], 是世界上最大的岩溶连片分布区。本区作为我国生态系统中的重要组成部分, 与西南地区的社会经济可持续发展紧密相关^[2-3]。西南岩溶地区具有特殊的地表-地下双层结构^[4-5], 且岩溶水资源分布极为不均, 地表污染物极易进入岩溶含水层而产生持续污染^[6-7], 直接影响这一地区经济和社会的健康发展。岩溶水循环是本领域的重要研究内容之一, 对保护岩溶水资源安全有着重要意义。

目前, 国内外学者采用多种方法对岩溶水循环开展研究, 包括水文学方法^[8-9]、水化学方法^[10]、示踪试验法^[11]、数值模拟法等^[12-13], 主要集中在岩溶洞穴^[14]、岩溶流域^[15-16]、岩溶泉域^[17-19]、岩溶盆地^[20-21]、岩溶高原^[22]等地区, 重点刻画了岩溶地表水与地下水的相互作用和转化过程^[23]。以往的研究主要集中在“二水”循环(地表水与地下水)或“三水”循环(降水、地表水、地下水)方面, 没有从系统性角度完整反映岩溶水循

环过程, 缺少了诸如表层岩溶带水、土壤水等类型分析。同时, 岩溶湿地作为我国西南岩溶区重要的生态系统, 具有特殊性、复杂性和脆弱性等特点^[24]。岩溶地下水作为岩溶湿地内主要地下水类型, 在水资源调蓄、生态环境涵养等方面有着重要作用。以往在岩溶湿地水循环方面多是水位动态、水文生态效应等简单分析^[25-26], 少数研究采用数值模型分析降水、地表水、岩溶地下水之间的定量转化规律, 但受监测手段限制, 很难准确给出模型所需要的参数, 模拟结果存在不确定性。

本文以桂林会仙湿地狮子岩地下河系统为研究对象, 开展大气降雨、地表径流、土壤水、表层岩溶带水、岩溶地下水的循环及其对降雨的响应研究, 探讨地下河系统中大气降雨、地表径流、土壤水、表层岩溶带水、岩溶地下水的循环特征与机制, 为合理开发利用岩溶湿地水资源以及保障水环境安全提供科学依据。

1 研究区概况及地下河系统水循环概念模型

1.1 研究区概况

桂林会仙湿地位于广西桂林市临桂区南部, 地处桂江与柳江分水岭上的低洼地带, 为一相对封闭的水文系统。区内主要水体有古桂柳运河、睦洞河、睦洞湖、分水塘等, 地貌以岩溶峰林平原为主, 地形较为平坦, 相对高差 50~100 m。该区年平均降雨量约为 1 863.2 mm。湿地北部边界和西部边界为山区地表分水岭, 南部边界为排泄边界(古桂柳运河), 东部边界为非碳酸盐岩隔水边界。湿地核心区内分为 2 个子系统, 分别是睦洞河分散排泄子系统和马面地下河子系统。

狮子岩地下河系统是本次开展水循环分析的研究区(图 1), 地处马面地下河子系统的南部, 属于马面背斜的南翼, 出露地层为上泥盆统东村组(D₃d)浅灰-灰白色灰岩、下石炭统岩关阶(C₁y)深灰色白云岩、含燧石灰岩, 发育一条南北向的地下河主管道和一条北西-南东向的地下河支管道, 长度分别约为 900, 400 m。大气降雨为研究区主要补给来源, 补给区位于系统北部。地下水类型以裂隙溶洞水为主(富水性丰富), 基岩裂隙水为辅(富水性中等)。研究区属于全排型的地下河系统, 即区内北部地表水通过分水塘村北侧 500 m 的落水洞直接进入地下河管道内, 全部转化为地下水, 随后地下水受区域地形和北东-南西向构造的控制, 整体由北向南径流, 在分水塘村以地下河出口的形式排泄出地表, 最终补给南部古桂柳运河(图 2)。该区岩溶水位埋深较大, 区内蒸散发强度较小。研究区土壤层以第四系红黏土、砂质黏土为主, 沉积物由上而下为均质红土、网纹红土和砂砾石, 层次分明, 厚度 1~4 m。

1.2 地下河系统水循环概念模型

研究区包括大气降雨、地表径流、土壤水、表层岩溶带水和岩溶地下水等类型水, 这些水之间可以相互转化, 但在一定时间尺度内, 系统的总水量处于相对均衡状态。

地下河系统水循环的具体过程为: 首先在地下河系统内形成大气降雨, 随着降雨的不断延续, 土壤层水分亏缺不断得到补充, 土壤含水量也逐渐增大, 当土壤层达到蓄满状态时, 超过入渗能力的部分降雨便转化为地表径流。当降雨继续延续时, 表层岩溶带逐渐达到饱水状态, 进而出现了洞穴滴水情况, 这期间

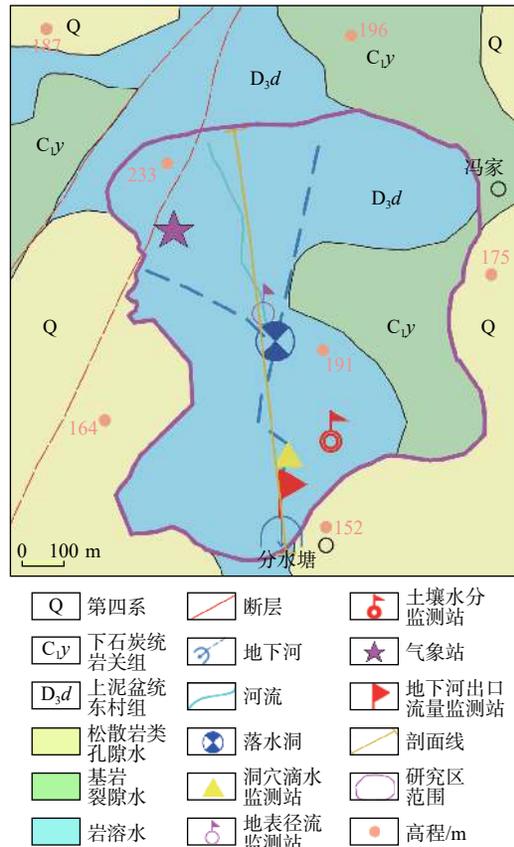


图 1 狮子岩地下河系统水地质略图

Fig. 1 Hydrogeological outline map of the Shiziyuan underground river system

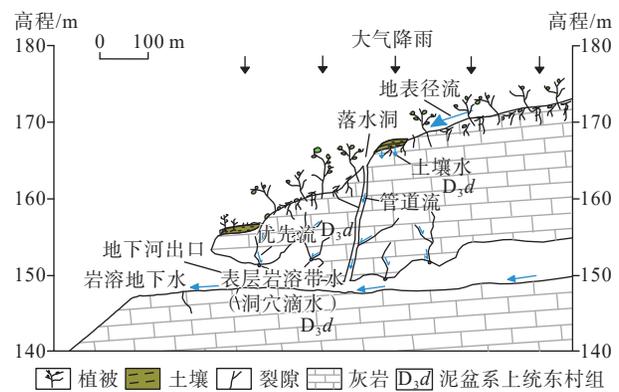


图 2 基于野外调查的研究区水循环概念性剖面模式图

Fig. 2 Profile showing the conceptual model of water cycle in the study area based on field investigation

表层岩溶带水的来源主要包括 2 部分: (1) 地表径流通过连通性良好的裂隙优先渗入; (2) 土壤水以活塞入渗的方式下渗。当表层岩溶带达到饱水状态时, 剩余降雨继续下渗至基岩裂隙和管道中, 加上通过落水洞等直接进入地下河管道的部分地表径流, 最终形成岩溶地下水, 从地下河出口排泄到地表(图 3)。

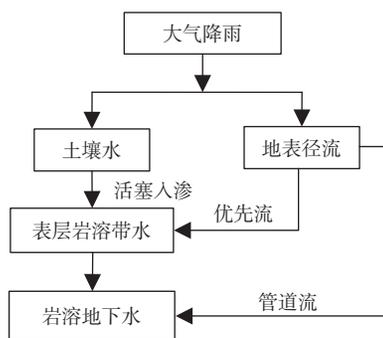


图 3 会仙湿地狮子岩地下河系统水循环流程

Fig. 3 Water circulation process of the Shizhiyan underground river system in Huixian wetland

2 研究方法

2.1 监测项目

本次主要监测会仙湿地狮子岩地下河系统的大气降雨、土壤水、表层岩溶带水、地表径流和岩溶地下水。其中土壤水是指 20 cm 和 40 cm 2 个深度的土壤含水量。表层岩溶带水是指洞穴滴水量。地表径流是指北部地表河流进入落水洞之前的径流量，岩溶地下水是指地下河出口流量。

2.2 监测装置

监测研究区大气降雨是采用美国 Onset 公司生产的 Onset HOBO 型翻斗式雨量桶自动记录仪，监测精度为 0.1 mm，监测频率为 15 min/次。监测土壤水是采用美国 Spectrum 公司生产的 WatchDog 2 400 型土壤

水分自动监测仪，主要监测 20 cm 和 40 cm 2 个深度的土壤含水量，精度为 0.1%，频率为 15 min/次。运用自主开发的洞穴滴水监测装置监测表层岩溶带水流(图 4)，该装置包含 2 部分：收集装置为矩形坡面收集棚，将分散的滴水导流到测流装置中；测流装置包括流量桶和三角堰。针对地表径流和岩溶地下水，采用断面法与堰流法联合监测径流量，低水位时采用矩形堰监测，高水位时采用断面法监测，监测精度为 1%，监测频率为 5 min/次。

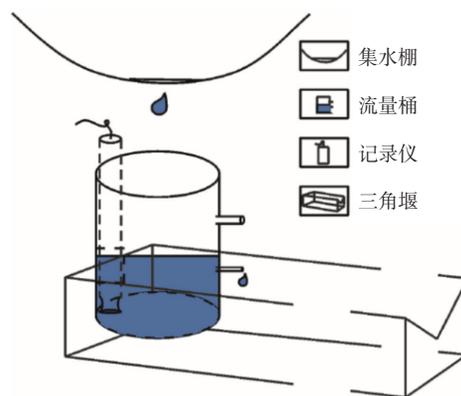


图 4 洞穴滴水监测装置示意图^[14]

Fig. 4 Sketch map of the cave dripping water monitoring device

2.3 监测时间

由于各类型水监测装置的安装时间不同，导致各类型水的监测时间也有一定的差异，具体见表 1。

表 1 不同类型水的监测特征

Table 1 Monitoring characteristics of different types of water

类型	监测时间	监测设备	监测地点	监测频率	备注
大气降雨	2018年9月— 2020年6月	美国Onset HOBO型翻斗式雨量桶自动记录仪	分水塘村西北800 m	15 min/1次	
地表径流	2020年4月—6月	矩形堰和渠道	分水塘村北500 m	5 min/1次	
土壤水	2018年9月— 2019年9月	美国WatchDog 2 400型土壤水分自动监测仪	分水塘村北300 m	15 min/1次	监测深度为20、40 cm
表层岩溶水(洞穴滴水)	2020年4月—5月	洞穴滴水监测装置(专项开发)	分水塘村北狮子岩洞穴内	15 min/1次	洞穴滴水监测的 布设面积约为15.5 m ²
岩溶地下水(地下河出口流量)	2020年1月—6月	矩形堰和渠道	分水塘村	5 min/1次	

3 结果与讨论

3.1 地下河系统水文过程分析

3.1.1 降雨与地表径流的水文过程分析

根据降雨与地表径流的监测时间，选取 2020 年 4 月 2 日—6 月 28 日进行水文过程分析(图 5)，监测时间包含了从小雨至大暴雨(24 h 累积降雨量范围为 4.2 ~ 128.2 mm)共 5 个等级的降雨过程，具有较好的

代表性。从图 5 中可以看出，当降雨量大于 20 mm 时，地表径流与降雨有较好的对应关系，即地表径流量呈现出陡升陡降的现象，波峰呈尖瘦形，随着降雨的结束其峰值快速减小至零。

但并不是所有等级降雨都能产生地表径流，如 4 月 10—11 日的 5.6 mm、4 月 18—19 日的 9.0 mm、6 月 14—15 日的 15.8 mm 等降雨事件均未产生地表径

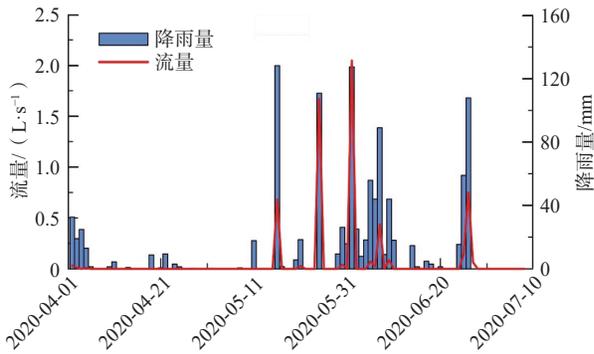


图 5 降雨量与地表径流量的关系

Fig. 5 Relationship between rainfall and surface runoff

流。原因是长期未降雨使得土壤含水量较低, 小规模的降雨不足以使土壤层变为蓄满状态。比如上述小规模降雨事件使得埋深 20 cm 处的土壤含水量由 0.19% 增至 0.23%, 但未达到蓄满状态(即土壤含水量 $\geq 0.27\%$), 因此未产生地表径流。

利用降雨量与地表径流量进行回归分析, 建立的回归模型为:

$$Y = 0.0041e^{0.0479X} \quad (1)$$

式中: Y ——地表径流量/($L \cdot s^{-1}$);

X ——降雨量/mm。

该回归模型的相对误差范围为 4.16% ~ 8.35%。从回归模型可以看出, 随着降雨量的逐渐增大, 地表径流量呈指数型快速增长。根据地表径流量的最小监测值(0.01 L/s), 利用回归模型计算出对应的降雨量为 19.86 mm; 在实际监测数据中, 当降雨量为 18, 24 mm 时, 对应的地表径流量分别是 0.00, 0.029 3 L/s。由此可以判断, 产生地表径流的降雨量阈值约为 20 mm, 即研究区内小雨及降雨强度较小的中雨(即 24 h 累计降雨量小于 20 mm)不会产生地表径流。

3.1.2 降雨与土壤水的水文过程分析

根据降雨与土壤水的监测时间, 选取 2018 年 9 月 21 日—2019 年 9 月 21 日进行水文过程分析, 见图 6。20, 40 cm 处土壤含水量的年内变化趋势基本一致, 但季节性变化显著。土壤水明显受降雨补给的影响, 40 cm 处土壤含水量高于 20 cm 处土壤含水量, 反映出土壤层下部储水较多, 明显高于上部表层土。这主要与土壤结构(孔隙度)和重力、蒸发“双向”驱动力等因素有关。

土壤含水量受降雨强度和降雨频率的影响呈现不同幅度的变化, 整体对降雨较为敏感。每次降雨后, 土壤含水量迅速升高, 然后快速降低, 这阶段为降

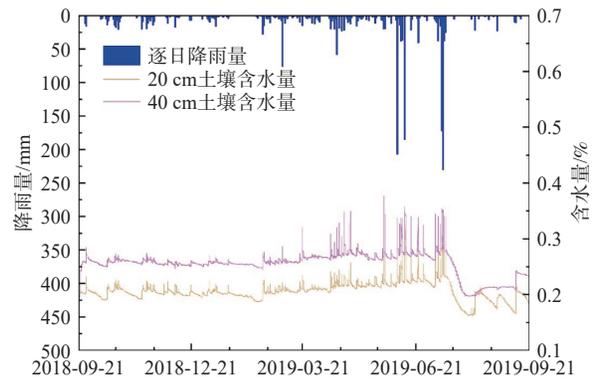


图 6 降雨量与土壤含水量的关系

Fig. 6 Relationship between rainfall and soil moisture content

雨入渗的过程, 随后转变为蒸发过程, 土壤含水量缓慢降低, 直至下一次降雨入渗时再次迅速升高。根据监测数据的分析结果, 当土壤含水量大于 0.23% 时, 会下渗补给岩溶水。

3.1.3 降雨与洞穴滴水的水文过程分析

根据降雨与洞穴滴水的监测时段, 选取 2020 年 4 月 15 日—5 月 30 日进行水文过程分析, 见图 7。该时间段包含了从小雨至大暴雨共 5 个等级的降雨过程, 具有较好的代表性。从图 7 可以看出, 洞穴滴水与降雨有较好的对应关系, 变化幅度受到降雨强度和岩溶洞穴顶板岩土体含水状况的影响。在降雨后表现出陡升陡降或陡升缓降的现象, 波峰呈尖瘦形或圆弧形, 且随着降雨的结束峰值很快减小并趋于缓和, 反映出含水介质中裂隙、管道并存的结构特点。在小雨及降雨强度较小的中雨事件后, 一般不会出现洞穴滴水的情况, 经过分析产生洞穴滴水的降雨量阈值为 15 mm。

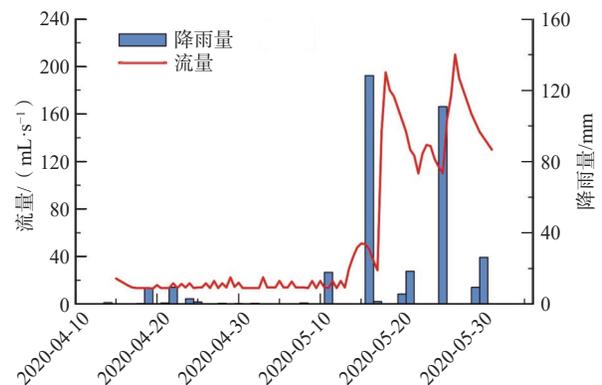


图 7 降雨量与洞穴滴水量的关系

Fig. 7 Relationship between rainfall and cave dripping water

洞穴滴水变化对降雨响应敏感, 但存在滞后情况, 且与不同的等级降雨密切相关。降雨等级越高,

即降雨量、降雨强度越大时,洞穴滴水量的滞后时间越小,即中雨(2.5 d)>大雨(1.5 d)>大暴雨(0.5 d)。利用降雨量与对应的滞后时间进行回归分析,建立的回归模型为:

$$Y = 658.58X^{-0.86} \quad (2)$$

式中: Y ——滞后时间/h;

X ——降雨量/mm。

该回归模型的相对误差范围为 1.35%~6.77%。从上述回归模型可以看出,随着降雨量的增大,洞穴滴水滞后时间呈负指数形快速减小。根据暴雨和特大暴雨等级的降雨量,利用回归模型计算出当暴雨和特大暴雨时,对应的洞穴滴水滞后时间分别是 1.0、0.25 d。

3.1.4 降雨与岩溶地下水的水文过程分析

根据降雨与地下河出口流量的监测时间,选取 2020 年 1 月 16 日—6 月 28 日进行水文过程分析(图 8)。与洞穴滴水相比,岩溶地下水对降雨的响应更加敏感,变化形态上呈现出陡升陡降的趋势,原因是岩溶管道比岩溶裂隙的导水性更强,介质更易储水和释水。同时,岩溶地下水的滞后时间比洞穴滴水的滞后

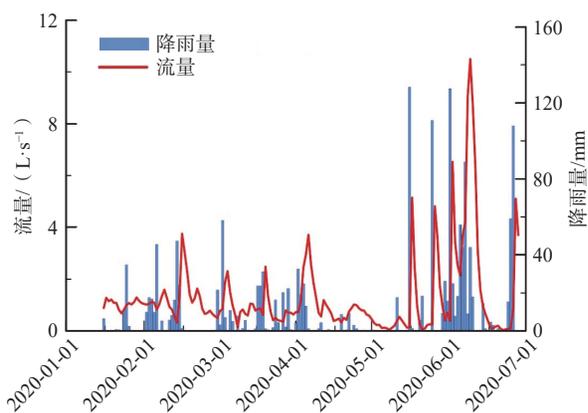


图 8 降雨量与岩溶地下水量的关系

Fig. 8 Relationship between rainfall and karst groundwater volume

时间短,其中大暴雨的滞后时间为 4 h,暴雨的滞后时间为 10 h,大雨的滞后时间为 20 h,中雨的滞后时间为 1.2 d,小雨的滞后时间为 1.5 d。

3.2 不同等级降雨条件水循环分析

3.2.1 水均衡公式

针对全排型地下河系统,在单次降雨过程中,水均衡公式为:

$$P = \Delta T + \Delta D + \Delta K + \Delta W + \Delta E \quad (3)$$

式中: P ——大气降雨量/ m^3 ;

ΔT ——土壤水变化量/ m^3 ;

ΔD ——地表径流变化量/ m^3 ;

ΔK ——表层岩溶带水变化量/ m^3 ;

ΔW ——岩溶地下水变化量/ m^3 ;

ΔE ——蒸散发量变化量/ m^3 。

虽然地下河出口处的下伏地层仍为上泥盆统东村组(D_3d)灰岩,且管道下存在沿溶蚀裂隙的垂向径流现象,但岩溶地下水主要以管道水的形式排泄,管道下的垂向流动水量整体较小,因此在水均衡式中不考虑该项水量。此外,表层岩溶带水主要通过溶蚀裂隙向下径流,而洞穴滴水作为表层岩溶水的主要排泄形式,用监测洞穴滴水量代替表层岩溶水量是合适的。

3.2.2 水循环量计算

由于大气降雨、地表径流、土壤水、表层岩溶带水和岩溶地下水的监测时间不同,为了便于水循环量计算,选择了 2020 年 4 月 15 日—5 月 30 日作为计算时间,计算结果见表 2。需要说明的是大气降雨、地表径流、表层岩溶带水和岩溶地下水(地下河出口流量)的变化量是根据野外自动化监测数据计算得出的,土壤水的变化量是根据水均衡公式计算出来的,地表径流量、土壤水、表层岩溶水和岩溶地下水的变化量比例是指在单次降雨过程中,各类型水的变化量与大气降雨量的比值。

表 2 不同降雨等级下各类型水变化量比例的计算结果

Table 2 Calculation results of water circulation under different levels of rainfall

序号	降雨等级	24 h 累计降雨量/mm	地表径流变化量比例/%	土壤水变化量比例/%	表层岩溶水变化量比例/%	岩溶地下水变化量比例/%
1	小雨	4.2	0.00	87.47	0.00	12.53
2	小雨	8.8	0.00	72.27	0.00	27.73
3	小雨	9.4	0.00	67.85	0.00	32.15
4	中雨	17.8	0.00	43.38	12.50	44.12
5	大雨	25	0.71	33.33	14.80	51.16
6	大暴雨	110.8	2.08	7.30	24.52	66.10
7	大暴雨	128.2	2.11	6.35	24.69	66.85

从表 2 中可以看出, 在小雨等级的降雨中, 由于土壤层与表层岩溶带的水分亏缺, 使得大部分降雨转化为土壤水变化量, 比例约为 67.85%~87.47%; 岩溶地下水变化量占比次之, 且随着降雨强度的小幅增大, 其比例也逐渐升高, 其余 2 种水的变化量占比为零。在中雨等级的降雨中, 首次出现了表层岩溶水变化量, 但比例较低; 土壤水变化量与岩溶地下水变化量的占比较为相近, 地表径流变化量占比为零。在大雨及大暴雨等级的降雨中, 地表径流、土壤水、表层岩溶带水和岩溶地下水均有变化量, 岩溶地下水变化量占主导地位, 比例均大于 50%, 表层岩溶水变化量比例次之, 地表径流变化量比例最小。

3.2.3 调蓄系数计算

陈植华等^[27]、邹胜章等^[28]、罗明明等^[29]曾对表层岩溶泉和岩溶流域进行水资源调蓄系数计算, 地下河系统的调蓄系数计算公式为:

$$I = \frac{Q_{\text{调蓄}}}{P} \quad (4)$$

式中: I ——调蓄系数;

$Q_{\text{调蓄}}$ ——地下河系统水资源调蓄量/ m^3 ;

P ——大气降雨量/ m^3 。

根据全排型地下河系统的水均衡公式, 在单次降雨过程中 $Q_{\text{调蓄}} = P - \Delta D - \Delta W$ 。因此, 地下河系统的调蓄系数计算公式变化如下:

$$I = \frac{P - \Delta D - \Delta W}{P} \quad (5)$$

式中: ΔD ——地表径流变化量/ m^3 。

利用式(5)和监测时段内大气降雨、地表径流和岩溶地下水的变化量, 计算不同等级降雨下狮子岩地下河系统的调蓄系数, 见表 3。

表 3 研究区与其他岩溶地区的调蓄系数计算结果

Table 3 Calculation results of regulation and storage coefficient between the study area and other karst areas

降雨等级	不同地区调蓄系数				
	会仙湿地	湖南洛塔赵家湾表层岩溶系统 ^[28]	香溪河流域 ^[29]	清江流域 ^[29]	Meramec 河流域 ^[29]
小雨	0.76				
中雨	0.56	0.28			
大雨	0.48	0.14	0.1	0.06	0.2
大暴雨	0.31	0.17			
平均值	0.53	0.20			

从表 3 可以看出, 随着降雨量的增大, 调蓄系数呈逐渐减小的趋势, 从小雨到大暴雨, 调蓄系数整体减少约 59.21%。产生原因是降雨量逐渐增大时, 土

壤层变为蓄满状态, 出现了地表径流且流量开始增加, 同时地下河出口的排泄量也增大, 导致地下河系统内蓄水量的比例逐渐减小。与其他岩溶地区的调蓄系数相比, 研究区的调蓄系数平均值约为 0.53, 明显高于湖南洛塔赵家湾表层岩溶系统、香溪河流域、清江流域和 Meramec 河流域。其原因为: (1)区内仍分布有湿地原生的芦苇和苔草等沼生植物, 具有较强的持水能力和蓄水能力; (2)区内地表普遍覆盖有第四系红黏土、砂质黏土, 厚度 1~4 m, 对岩溶裂隙、孔洞起到了很好的充填堵塞作用, 一定程度上抑制了地下水渗漏, 使得研究区具有良好的保水和储水能力。

4 结论

(1)研究区内地表径流和表层岩溶带水与大气降雨均有较好的对应关系, 且随着降雨量的增大, 水量呈指数形快速增长, 但二者均存在产生的降雨量阈值, 分别为 20, 15 mm。表层岩溶带水存在明显的滞后性, 但随着降雨等级越高滞后性越小, 即中雨(2.5 d)>大雨(1.5 d)>暴雨(1.0 d)>大暴雨(0.5 d)>特大暴雨(0.25 d)。土壤含水量受降雨强度和频率的影响呈现不同幅度变化, 且深部土壤含水量明显高于表层土壤。相比表层岩溶带水, 岩溶地下水量对降雨的响应更加敏感, 原因是两者具有不同的补给途径和补给方式。

(2)不同等级降雨下各类水的变化量比例有较大差异, 在小雨等级中土壤水变化量的比例最大, 约为 75.87%; 在中雨等级中土壤水变化量和岩溶地下水变化量的比例最大, 比例分别为 43.38%、44.12%, 二者相差较小, 且表层岩溶水变化量首次出现; 在大雨和大暴雨等级中, 区内岩溶地下水变化量的比例较大, 平均值约为 66.48%, 地表径流变化量首次出现但比例较小, 仅为 2.10%。

(3)随着降雨量的增大, 调蓄系数呈逐渐减小的趋势, 从小雨到大暴雨, 调蓄系数整体减少约 59.21%。研究区调蓄系数平均值约为 0.53, 明显高于湖南洛塔赵家湾表层岩溶系统、香溪河流域、清江流域和 Meramec 河流域, 表明了地下河系统比其他岩溶地区的调蓄能力更强。

(4)桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环的具体过程为大气降雨补充土壤层内水分亏缺, 部分降雨转化为地表径流, 剩余降雨入渗使表层岩溶带水逐渐饱和, 最后下渗至裂隙和管道中, 加上部分地表径流,

形成岩溶地下水。

岩溶水系统的主要特征包括含水介质的多重性、地下水分布的非均质性和水流的多项性,使得水循环转化频繁且难监测,在水循环量计算时会存在重复计算的问题。另外,岩溶水系统上覆土壤的最大特点是分布不均匀性极强,对土壤水分监测工作也有较大影响。因此,未来开展岩溶水系统水循环研究时,应结合岩溶水系统的特点,采用新方法与新技术有针对性地加强水循环转换监测、计算模拟和综合分析等工作,更加准确地分析岩溶水系统水循环规律。

参考文献 (References) :

- [1] 吕玉香, 胡伟, 杨琰. 岩溶关键带水循环过程研究进展[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 123 - 138. [LYU Yuxiang, HU Wei, YANG Yan. Research progress of hydrological cycle in Karst critical zone[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 123 - 138. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 曹建华, 袁道先, 章程, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 1 - 8. [CAO Jianhua, YUAN Daoxian, ZHANG Cheng, et al. Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest China[J]. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 1 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 吴泽燕, 章程, 蒋忠诚, 等. 岩溶关键带及其碳循环研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(5): 488 - 498. [WU Zeyan, ZHANG Cheng, JIANG Zhongcheng, et al. Advance of karst critical zone and its carbon cycle[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5): 488 - 498. (in Chinese with English abstract)]
- [4] HAO Y H, CAO B B, CHEN X, et al. A piecewise grey system model for study the effects of anthropogenic activities on karst hydrological processes[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(5): 1207 - 1220.
- [5] 梁桂星, 覃小群, 崔亚莉, 等. 分布式水文模型在岩溶地区的改进与应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 60 - 67. [LIANG Guixing, QIN Xiaoqun, CUI Yali, et al. Improvement and application of a distributed hydrological model in Karst regions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 60 - 67. (in Chinese with English abstract)]
- [6] SHAO Y X, WANG Y X, XU X Q, et al. Occurrence and source apportionment of PAHs in highly vulnerable karst system[J]. *Science of The Total Environment*, 2014, 490: 153 - 160.
- [7] 陈舟, 赵贵清, 王志光, 等. 岩溶区某磷石膏堆放场渗漏特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 144 - 150. [CHEN Zhou, ZHAO Guiqing, WANG Zhiguang, et al. Leakage characteristics of a phosphorus gypsum storage site in Karst area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2): 144 - 150. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈国富, 姜光辉, 周文亮, 等. 岩溶石山区山坡表层径流水文动态特征对比分析: 以桂林丫吉试验场为例[J]. 水文, 2013, 33(5): 58 - 63. [CHEN Guofu, JIANG Guanghui, ZHOU Wenliang, et al. Comparative analysis of surface runoff hydrologic dynamic characteristics in Karst mountainous areas: taking yaji experimental station as study case[J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, 33(5): 58 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 周文亮. 岩溶山区包气带洞穴滴水水文水化学过程与水量研究—以硝盐洞研究为例[D]. 重庆: 西南大学, 2014. [ZHOU Wenliang. Hydrochemical process and water volume of dripping water in vadose cave in Karst mountainous area: A case study of saltpeter cave[D]. Chongqing: Southwest University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 宋洋, 迟宝明, 谷洪彪, 等. 基于水化学及D、¹⁸O的柳江盆地东宫河流域地下水循环特征解析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 90 - 95. [SONG Yang, CHI Baoming, GU Hongbiao, et al. Study on groundwater cycle in Donggong River Basin using data of hydrochemistry, D and ¹⁸O[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(2): 90 - 95. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郭小娇, 龚晓萍, 袁道先, 等. 典型岩溶包气带洞穴滴水水文过程研究: 以桂林硝盐洞为例[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 537 - 548. [GUO Xiaojiao, GONG Xiaoping, YUAN Daoxian, et al. Research on hydrological processes of cave dripping water in a typical Karst vadose zone: A case study of Xiaoyan Cave, Guilin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(4): 537 - 548. (in Chinese with English abstract)]
- [12] LUO M M, CHEN Z H, CRISS R E, et al. Method for calibrating a theoretical model in karst springs: An example for a hydropower station in South China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(25): 4815 - 4825.
- [13] 罗明明. 南方岩溶水循环的物理机制及数学模型研

- 究: 以香溪河岩溶流域为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017. [LUO Mingming. The physical mechanism and mathematical model of Karst water circulation: A case study of the Xiangxi River Karst Basin, South China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 郭小娇, 姜光辉, 汤庆佳, 等. 典型岩溶石山包气带洞穴水流的水文过程浅析[J]. 中国岩溶, 2014, 33(2): 176 - 183. [GUO Xiaojiao, JIANG Guanghui, TANG Qinjia, et al. Analysis of hydrological process of drip water in the aeration zone of a typical karst stone hill[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(2): 176 - 183. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 吴乔枫, 刘曙光, 蔡奕, 等. 流域非闭合特性对岩溶地区水文过程模拟的影响[J]. 水利学报, 2017, 48(4): 457 - 466. [WU Qiaofeng, LIU Shuguang, CAI Yi, et al. Effect of unclosed characteristics of the basin on hydrological modeling in Karst regions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(4): 457 - 466. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈晓宏, 颜依寒, 李诚, 等. 溶蚀丘陵型岩溶流域概念性水文模型及其应用[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 1 - 9. [CHEN Xiaohong, YAN Yihan, LI Cheng, et al. Conceptual hydrological model of corrosional hill karst watershed and its application[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(1): 1 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 孙斌, 彭玉明. 济南泉域边界条件、水循环特征及水环境问题[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 272 - 279. [SUN Bin, PENG Yuming. Boundary condition, water cycle and water environment changes in the Jinan spring region[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(3): 272 - 279. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 孙斌, 邢立亭, 彭玉明, 等. 济南十大泉群特征、形成模式及水循环差异性浅析[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 409 - 419. [SUN Bin, XING Liting, PENG Yuming, et al. Characteristics, formation models and water cycle differences of ten major spring groups in Jinan city[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 409 - 419. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李向全, 张春潮, 侯新伟. 采煤驱动下晋东大型煤炭基地地下水循环演变特征: 以辛安泉域为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 3015 - 3026. [LI Xiangquan, ZHANG Chunchao, HOU Xinwei. Characteristics of groundwater circulation and evolution in Jindong large coal base driven by coal mining: An example of Xin'an spring area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 3015 - 3026. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 朱磊. 普者黑峰林湖盆区稳定同位素水文过程研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2016. [ZHU Lei. Stable isotope hydrology process research in Puzhehei peak forest-lake basin[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [21] ZHANG Z C, CHEN X, GHADOUANI A, et al. Modelling hydrological processes influenced by soil, rock and vegetation in a small karst basin of southwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 25(15): 2456 - 2470.
- [22] 李向全, 马剑飞, 张春潮, 等. 川藏铁路格聂山和察雅段构造岩溶发育规律及岩溶地下水循环模式研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 34 - 45. [LI Xiangquan, MA Jianfei, ZHANG Chunchao, et al. Evolution regularity of the plateau tectonic Karst and the relevant Karst groundwater circulation mode in Mount Genie and Zaya sections along the Sichuan-Xizang Railway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 34 - 45. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 陈静, 罗明明, 廖春来, 等. 中国岩溶湿地生态水文过程研究进展[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 221 - 230. [CHEN Jing, LUO Mingming, LIAO Chunlai, et al. Review of eco-hydrological process in Karst wetlands of China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 221 - 230. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王月, 尹辉, 李晖, 等. 桂林会仙岩溶湿地生态环境保护与生态补偿研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(1): 66 - 69. [WANG Yue, YIN Hui, LI Hui, et al. Ecological environment protection and ecological compensation to Huixian karst wetland in Guilin[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(1): 66 - 69. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 赵一, 邹胜章, 申豪勇, 等. 会仙湿地岩溶地下水系统水位动态特征与均衡分析[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 325 - 333. [ZHAO Yi, ZOU Shengzhang, SHEN Haoyong, et al. Dynamic characteristics and equilibrium of water level of the Karst groundwater system beneath the Huixian wetland[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 325 - 333. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 等. 桂林会仙岩溶湿地水位

- 动态特征及水文生态效应[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 661 - 670. [ZHU Danni, ZOU Shengzhang, ZHOU Changsong, et al. Dynamic characteristics of water Level and hydro-ecological effects in Huixian Karst wetland in Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(4): 661 - 670. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 陈植华, 陈刚, 靖娟利, 等. 西南岩溶石山表层岩溶带岩溶水资源调蓄能力初步评价[C]//中国岩溶地下水与石漠化治理. 桂林: 广西科学出版社, 2003: 180-188. [CHEN Zhihua, CHEN Gang, JING Juanli, et al. Preliminary evaluation on the capacity of karst water resources regulation and storage in the surface karst zone of karst stone mountain in southwest China[C]//Karst Groundwater and Rock Desertification Control in China. Guilin: Guangxi Science Press, 2003: 180-188. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 邹胜章, 张文慧, 梁小平, 等. 表层岩溶带调蓄系数定量计算: 以湘西洛塔赵家湾为例[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(4): 37 - 42. [ZOU Shengzhang, ZHANG Wenhui, LIANG Xiaoping, et al. Quantitative calculation of regulating coefficient for epikarsk zone: Case study of Zhaojiawan, Luota, West of Hunan[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2005, 32(4): 37 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 罗明明, 陈植华, 周宏, 等. 岩溶流域地下水调蓄资源量评价[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 14 - 20. [LUO Mingming, CHEN Zhihua, ZHOU Hong, et al. Assessment of regulating groundwater resources in karst watersheds[J]. [Hydrogeology and Engineering Geology](#), 2016, 43(6): 14 - 20. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳