



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.018

周玥, 束龙仓, 方依雯, 等. 落水洞对裂隙-管道介质泉流量衰减过程影响的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 108-112. ZHOU Yue, SHU Long-cang, FANG Yi-wen, et al. Experimental study on the effects of sinkholes on spring flow attenuation process within fissure conduit media[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 108-112. (in Chinese)

落水洞对裂隙-管道介质泉流量衰减过程影响的试验研究

周玥, 束龙仓, 方依雯, 翟月, 王硕, 鲁程鹏

(河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 岩溶裂隙-管道是我国西南地区的主要地下储水空间和导水通道, 落水洞是岩溶地区临时性吸收地表水流的重要过水通道, 在西南地区分布密集。开展落水洞大小对裂隙-管道介质中泉流量过程影响的研究, 对指导岩溶水可持续开发利用和推动岩溶水研究具有深刻意义。文章研究了落水洞对泉流量衰减过程的影响, 利用自制的裂隙-管道物理模型, 模拟落水洞不同断面尺寸、填充程度下的泉流量衰减过程, 由衰减曲线探求衰减系数受不同因子的敏感程度。试验表明: 泉流量衰减过程可分为三个亚动态, 大致符合指数型衰减。其中, 第一亚动态的衰减系数受落水洞断面尺寸影响较大, 落水洞断面尺寸越小, 衰减系数越大; 落水洞的填充程度越高, 衰减系数越大。

关键词: 落水洞; 裂隙-管道介质; 物理模型; 泉流量过程

中图分类号: P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0108-05

Experimental study on the effects of sinkholes on spring flow attenuation process within fissure-conduit media

ZHOU Yue, SHU Long-cang, FANG Yi-wen, ZHAI Yue, WANG Shuo, LU Cheng-peng
(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The karstic fissures and conduits are the main underground water storing space and water conducting channels in Southwest China. Sinkholes are important water discharge channels for temporary storage of the surface water in karst area, and are widely distributed in the Southwest. To study the effects of sinkholes on the spring flow attenuation process is of great importance of karst water resources and the study of the karst hydrology. A physical model of fissure conduit medium was set up in this study, and was used to simulate the spring flow attenuation process for different cross-section sizes and filling degrees of the sinkhole. The sensitivity of the attenuation coefficient to different factors was explored with the attenuation curve. Results of the experiments demonstrated that the exponential attenuation formulation can describe the attenuation process generally, and the attenuation curve can be divided into three phases. The attenuation coefficient of the first phase is much subject to the cross-section size of the sinkhole. The attenuation coefficient will increase as the sinkhole cross-section size decreases, and it has positive correlation with the filling degree of sinkholes.

Key words: sinkhole; fissure conduit media; physical model; spring flow process

1 研究背景

我国西南岩溶面积占全国岩溶总面积的 1/3 左

右, 裂隙-管道是其主要的储水空间和导水通道。管道部分主要由临时性吸收地表水的落水洞、地下暗河等组成。落水洞导水、汇水能力强, 通道较宽大,

收稿日期: 2016-03-30 修回日期: 2017-02-28 网络出版时间: 2017-05-06
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1116.009.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41172203); 国家大学生创新创业训练项目(201510294006)

Fund: National Natural Science Foundation of China (41172203); The National College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (201510294006)

作者简介: 周玥(1995-), 女, 江苏盐城人, 从事地下水资源评价方面研究。E-mail: 2991081849@qq.com

通讯作者: 束龙仓(1964-), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 从事地下水资源评价与管理、地下水与地表水相互作用等研究。E-mail: lcsu@hhu.edu.cn

补给地下水速度快^[1]。因此在降雨季节,落水洞会对泉流量衰减产生一定影响。

岩溶水在地下的运动过程与运动规律难以直接观测,但地下水一般以泉的形式出露地面,因而研究泉流量过程是研究岩溶水运动的有效方法。在降水补给影响下,泉流量过程分为泉流量增大过程、稳定波动过程和衰减过程三部分^[2]。泉流量衰减分析是获取含水介质结构特征的重要工具^[3]。研究者发现泉流量衰减曲线可以反映含水介质的渗透系数、给水度等特征^[4]。杨立铮^[1]建立了后寨河冒水坑站泉流量单一指数型衰减方程,将其衰减分为三个亚动态。陈犖等^[5]和李颂章等^[6]分别根据所研究区域的泉流量资料拟合泉流量过程以探究人类活动对岩溶泉流量衰减的影响机制。

很多学者已对裂隙-管道的水流运动进行大量研究,Kirly等^[7]建立第一个管流和渗流耦合的岩溶水数值模型,此后研究者多利用渗流-管道流耦合的数值模型模拟岩溶含水系统以探究岩溶水运动基本规律^[8-10]及溶质运移机理并应用于含水层污染评价^[11-13],而沈振中等^[14-16]则是通过室内试验探究多重含水介质的特性。上述研究发现:泉口大小是影响泉流量衰减的主要因素,泉口越大衰减系数越大,此外补给状态、含水介质初始蓄水状态同样影响泉流量衰减过程^[2,17]。在高度发育的岩溶地区,落水洞作为岩溶含水系统中地表水向下集中渗流的主要通道^[18],其断面尺寸及填充程度与泉流量衰减特征之间的关系研究,对促进岩溶水理论研究和可持续开发利用,提高石漠化治理水平具有重要作用。

本文基于自主研发的裂隙-管道双重介质模型对岩溶含水系统进行物理模拟,初步探究落水洞断面尺寸及填充程度对泉流量衰减过程的影响及其作用机理。

2 模型及方法介绍

2.1 模型介绍

该试验研究在贵州省普定县后寨河水文地质概念模型基础上将其简化成相应的裂隙-管道介质地下水运动的物理模型。

物理模型(图1)主要包括四部分:降雨补给系统,裂隙-管道介质模拟区,水头采集系统和排气系统。其中裂隙-管道介质模拟区长1.30 m,高0.98 m,宽0.04 m,材料为光滑有机玻璃板。模型内部层面裂隙隙宽为2 mm,共设8层;垂直层面裂隙隙宽为1 mm,每层设10条;裂隙网络最右侧落水洞断面尺寸为4 cm×4 cm,裂隙网格下方铺设一条断

面为4 cm×4 cm的水平管道。该装置对裂隙-管道介质设置降水喷淋供水系统,作为单独的供水系统。进入模拟区的降雨强度可通过入口处的阀门进行控制,阀门处有均匀刻度0至8。阀门关闭时记为补给强度0,阀门开至最大时,记为补给强度8,其余各阀门开度分别对应不同补给强度。补给强度为8时流量大小为127 cm³/s,强度为7时,流量为126 cm³/s,强度为6时,流量122 cm³/s,强度5时112 cm³/s,强度为4时,流量为92.7 cm³/s。管道出口处连接电磁流量计测量不同时刻的流量。层面裂隙左侧每间隔一层设置一条橡皮管作为排气设施。另外用厚度分别为2.5 mm和5.0 mm的若干有机玻璃条模拟整个落水洞的断面尺寸,以及长宽高为3 cm×2 cm×10 cm的若干有机玻璃块模拟实际落水洞的填充情况。

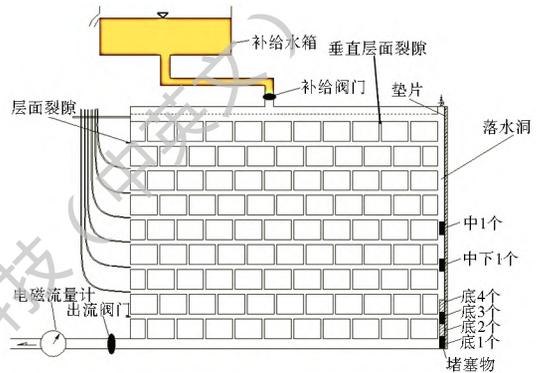


图1 裂隙-管道介质物理模型示意图

Fig. 1 Diagram of the fissure conduit medium physical model

2.2 衰减方程法

描述地下水非稳定运动的一维潜水非稳定渗流的 Boussinesq 方程为

$$K \frac{\partial}{\partial x} \left[h \frac{\partial H}{\partial x} \right] + W = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: K 为渗透系数 (m/s); h 为潜水含水层厚度 (m); H 为潜水位 (m); W 为垂向补给量 (m/s); μ 为给水度, 无量纲。

其特解为

$$Q_t = Q_0 \exp(-\alpha t) \quad (2)$$

式中: Q_t 为 t 时刻的流量 (m³/s); Q_0 为衰减开始时刻的流量 (m³/s); α 为衰减系数, 无量纲。在高度发育的岩溶地区, 多使用指数衰减方程 (2) 对泉流量衰减过程进行拟合^[19]。因为当水流主体为重力水时, 指数衰减方程更能拟合实际水流运动。

衰减系数 α 即为半对数坐标纸上直线的斜率, 是定量描述泉流量衰减过程的重要指标, 本文利用公式 (2) 对模拟试验区泉流量衰减过程进行定量分析。

2.3 试验方案及过程

本文通过控制落水洞断面尺寸和填充程度的不

同,分析其对泉流量衰减过程的影响。具体设计方案如下。

实验 1: 通过控制出流阀门开度使泉口大小相同,控制补给阀门开度使补给强度相同,通过增加垫片来研究落水洞的整个断面尺寸对泉流量衰减系数的影响。随着加入垫片厚度的增加,落水洞断面尺寸减小。实验 1 共设置 5 组实验,各组落水洞断面尺寸为 $3.75\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 、 $3.5\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 、 $3.25\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 、 $3\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 、 $2.5\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 。

实验 2: 本实验共设计 2 组对照实验,分别为:
a. 同等体积不同位置的堵塞物对衰减系数的影响。
b. 不同体积同一位置的堵塞物对落水洞衰减系数的影响。a 组实验共设 3 组实验,分别在落水洞底部、中部、中下部增加 1 块 $2\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的有机玻璃块,即堵塞物。b 组实验共设 5 组实验,在落水洞底部分别增加 1 至 4 块同等规格的有机玻璃块,即设底部 1 块、底部 2 块、底部 3 块、底部 4 块有机玻璃块的四组实验。

试验步骤如下。

(1) 接通流量计电源,打开水箱补给开关,在其溢流后开启补给阀门,记录开始补给时间;

(2) 观测泉口出流情况,记录出流时间,待落水洞中水位稳定后,记录稳定水位;

(3) 关闭补给阀门,记录停止补给时间,观测泉口出流情况,记录断流时间;

(4) 将流量计中读数导出,进行后期处理分析。

在试验中流量计读数与真实流量间存在差值,采用滑动平均法对流量计进行校准。在泉流量衰减后期,因为流量计量程受限无法测量小流量数据,采用人工方法测量衰减后期流量。

3 结果分析

3.1 泉流量衰减过程亚动态划分

已有研究表明在整个衰减过程中,衰减系数是不断变化的,一般可根据衰减系数的大小将衰减曲线分为三个亚动态^[20]。

由图 2 可见,泉流量衰减过程大致可分为三个亚动态,其衰减系数分别为 0.0291, 0.0031, 0.0009。不同亚动态衰减系数相差近一个数量级。参照杨立铮^[1]对贵州普定后寨河地下河出口泉流量衰减过程的分析,可判断第一亚动态为管道释水阶段,第二亚动态为少量管道释水及裂隙释水阶段,第三亚动态为裂隙释水阶段。泉流量衰减过程第一亚动态拟合效果较差,单独研究得图 3。

第一亚动态的释水过程部分点据呈现极缓衰减

段、快速衰减段和缓慢衰减段三个部分。经分析,本文认为出现此过程的原因是流量计测流管中的水流由有压流转变为无压流。当水位降至出水口处时,水流未能充满整个流量计接水管,流量计测流管内水由有压流转变为无压流。当测流管中水流逐渐转变为无压流过程中,由于装置性能限制无法彻底排除气泡影响,流量计读数略有异常,在选取第一亚动态衰减系数时应排除其干扰。

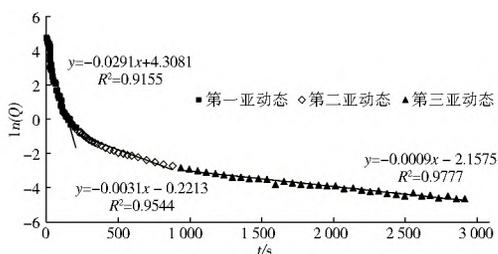


图 2 泉流量衰减过程划分

Fig. 2 Three phases of the spring flow attenuation process

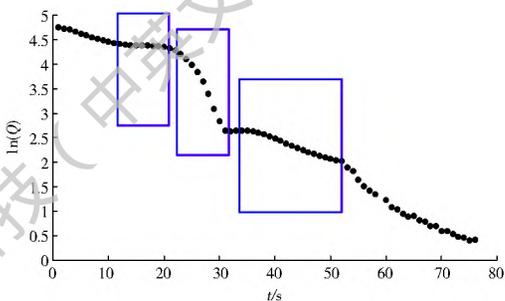


图 3 第一亚动态泉流量衰减过程

Fig. 3 Spring flow attenuation process in the first phase

3.2 落水洞对泉流量衰减过程的影响

实验 1 研究落水洞不同尺寸对衰减系数的影响,当补给强度为 6,垫片厚度分别为 0.25 cm、0.5 cm、0.75 cm、1 cm、1.5 cm 时,得到不同情况下泉流量衰减情况,见图 4。

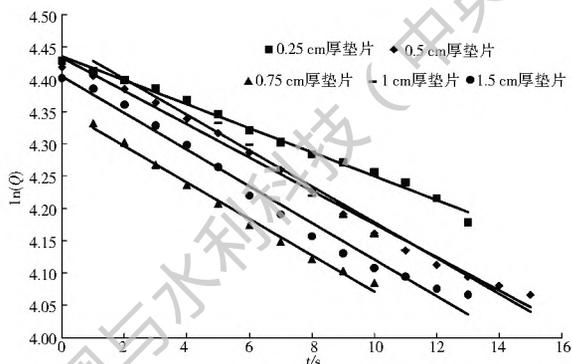


图 4 不同落水洞尺寸的第一亚动态 $\ln(Q)-t$ 关系线

Fig. 4 Curves of $\ln(Q)-t$ under different sizes of sinkholes in the first phase

由图 4 可见增加不同尺寸的垫片,第一亚动态的衰减系数差别较大,如表 1 所示。所加垫片较少时,落水洞衰减系数较小,不断增加垫片衰减系数也

逐渐增大。当所加垫片尺寸大于 0.75 cm 时, 衰减系数增大幅度减小。因此落水洞尺寸越大, 第一亚动态衰减系数越小。当落水洞断面尺寸大于等于 3.25 cm × 4 cm 时, 衰减系数随落水洞尺寸的减小而增大, 当落水洞断面尺寸小于 3.25 cm × 4 cm 时, 衰减系数变化幅度较小。可能的原因是: 当落水洞尺寸较大时, 落水洞中导水和储水能力较大, 补给管道能力强, 衰减系数小; 当落水洞尺寸较小时, 落水洞导水和储水能力较小, 在同样的泉口大小下, 落水洞补给管道的能力相对较弱, 衰减系数增大。

表 1 同落水洞断面尺寸条件下的衰减系数

Tab. 1 Attenuation coefficients under different cross section sizes of sinkhole

落水洞断面尺寸/(cm×cm) ⁻¹	垫片厚度/cm	第一亚动态衰减系数
3.75×4.00	0.25	0.0186
3.50×4.00	0.50	0.0258
3.25×4.00	0.75	0.0278
3.00×4.00	1.00	0.0282
2.50×4.00	1.50	0.0284

实验 2 研究落水洞的局部断面形态对衰减系数的影响, 通过在落水洞的不同位置增加不同数量的形状规则的玻璃块改变落水洞填充程度。本实验共设计两组对照组, 分别为: a. 同等体积不同位置的影响; b. 不同体积同一位置的影响, 具体衰减情况如图 5。

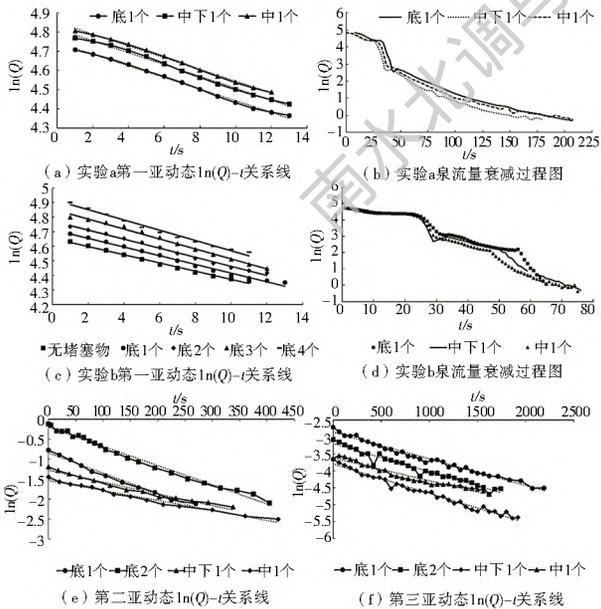


图 5 落水洞形态对衰减系数的影响

Fig. 5 Effects of sinkhole morphology on attenuation coefficient

由图 5(a)、5(b) 及表 2 发现落水洞不同断面处的同等形态变化对泉流量衰减过程无明显影响, 由图 5(c)、5(d) 及表 2 可得, 同一位置不同体积的堵

塞物对第一亚动态衰减系数有一定影响。堵塞体积越大, 衰减系数越大。实验结果可能是因为落水洞有极强的导水特性, 堵塞物的体积直接影响到落水洞的导水和储水能力, 所以当堵塞物尺寸较小时不同的堵塞位置影响不显著; 但当堵塞物尺寸增大时, 落水洞的导水和储水能力显著减小, 所以当加入的玻璃块体积越大, 落水洞导水能力越小, 第一亚动态泉流量衰减系数越大。由图 5(e)、5(f) 可得, 落水洞形态对泉流量衰减第二、三亚动态的衰减系数影响很小, 几乎可以忽略。这是因为泉流量衰减第二、三亚动态主要是裂隙和底部管道释水, 基本上不受落水洞的影响, 这也进一步证实了对不同亚动态划分的合理性。

表 2 不同落水洞形态下的衰减系数

Tab. 2 Attenuation coefficients under different sinkhole morphology

组别	堵塞物体积/位置	第一亚动态衰减系数
a. 同一位置 不同体积	无	0.028 0
	1	0.029 6
	2	0.030 8
	3	0.034 1
b. 不同位置 同一体积(1体 积堵塞物)	底	0.030 4
	中下	0.030 8
	中	0.030 7

注: 1 体积的堵塞物规格为 2 cm × 3 cm × 10 cm

4 结论

通过落水洞对裂隙-管道介质泉流量衰减过程影响的一系列物理试验, 得出以下结论。

(1) 泉流量衰减过程大致可分为三个亚动态: 第一亚动态为管道释水阶段, 第二亚动态为少量管道释水及裂隙释水阶段, 第三亚动态为裂隙及底部管道释水阶段。

(2) 落水洞的尺寸大小对第一亚动态的衰减系数的影响较大, 落水洞尺寸越小衰减系数越大。当落水洞的尺寸减小到一定程度时, 衰减系数增大幅度逐渐减小。

(3) 在保证落水洞与地下暗河连通的前提下, 落水洞断面形态变化的位置对泉流量衰减过程无明显影响, 落水洞的填充程度大小对第一亚动态衰减系数有一定影响。落水洞的填充程度越大, 衰减系数则越大。

(4) 落水洞形态对泉流量衰减第二、三亚动态的衰减系数影响很小, 几乎可以忽略。

参考文献(References):

- [1] 杨立铮. 贵州普定后寨地下河岩溶水运动特征[J]. 中国岩溶, 1982, 5(1): 18-26. (YANG Li zheng. Karst water movement in Houzhai Subterranean, Puding, Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 1982, 5(01): 18-23. (in Chinese))
- [2] 束龙仓, 范建辉, 鲁程鹏, 等. 裂隙管道介质泉流域水文地质模拟试验[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45(3): 908-917. (SHU Long cang, FAN Jian hui, LU Cheng peng, et al. Hydrogeological simulation test of fissure conduit media in springs watershed[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(3): 908-917. (in Chinese))
- [3] 柯婷婷, 束龙仓, 鲁程鹏, 等. 基于模糊随机模拟的后寨河岩溶泉流量衰减风险[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 113-117. (KE Ting ting, SHU Long cang, LU Cheng peng, et al. Depletion risk assessment of discharge of Houzhaihe Karst spring based on coupling method of stochastic simulation with triangular fuzzy numbers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(1): 113-117. (in Chinese))
- [4] 林敏. 泉流量衰减方程中 α 系数物理意义的探讨[J]. 勘察科学技术, 1984(5): 6-10. (LIN Min. Discussion on the physical meaning of coefficient α in spring flow attenuation equation[J]. Site Investigation Science and Technology, 1984, 5: 6-10. (in Chinese))
- [5] 陈萃, 张幼宽, 王长申. 基于时间序列分析的辛安泉流量变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 19-23. (CHEN Luo, ZHANG You kuan, WANG Chang shen. A study of evolution of the discharge of the Xin'an spring with time series analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 19-23. (in Chinese))
- [6] 李颂章, 荣冠, 罗琳, 等. 锦屏大河湾磨房沟泉流量衰减规律研究[J]. 工程勘察, 2013(12): 32-36. (LI Song zhang, RONG Guan, LUO Lin, et al. Dynamic study on discharge attenuation in Mofanggou spring at Jinping river bend[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(12): 32-36. (in Chinese))
- [7] Kirly L, Morel G. Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simulé par modèles mathématiques[J]. Bulletin du Centre d'hydrologie, 1976(1): 37-60.
- [8] Bauer S, Liedl R, Sauter M. Modeling of karst aquifer genesis: influence of exchange flow[J]. Water Resources Research, 2003, 39(10): 371-375.
- [9] Liedl R, Sauter M, Huckinghaus D, et al. Simulation of the development of karst aquifers using a coupled continuum pipe flow model[J]. Water Resources Research, 2003, 39(3): 597-676.
- [10] Birk S, Liedl R, Sauter M. Karst spring responses examined by process-based modeling[J]. Ground Water, 2006, 44(6): 832-836.
- [11] Gallegos J J. Modeling groundwater flow in karst aquifers: an evaluation of MODFLOW-CFP at the laboratory and sub regional scales[D]. Tallahassee: Florida State University, 2011.
- [12] Ghasemzadeh R, Hellweger F, Butscher C, et al. Review: Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico[J]. Hydrogeology Journal, 2012, 20(8): 1441-1461.
- [13] 刘久荣, 王新娟, 王荣, 等. 岩溶水数值模拟研究进展[J]. 城市地质, 2012, 7(4): 1-6. (LIU Jiu rong, WANG Xin juan, WANG Rong, et al. Advances in research of karstwater numerical simulation[J]. Urban Geology, 2012, 7(4): 1-6. (in Chinese))
- [14] 沈振中, 陈雾, 赵坚. 岩溶管道与裂隙交叉渗流特性试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 137-145. (SHEN Zhen zhong, CHEN Wu, ZHAO Jian. Experimental study on seepage characteristics of the intersection of tubular karst passage and fissure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 137-145. (in Chinese))
- [15] Faulkner J, Hu B X, Kish S, et al. Laboratory analog and numerical study of groundwater flow and solute transport in a karst aquifer with conduit and matrix domains[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2009, 110(3): 34-44.
- [16] 束龙仓, 张颖, 鲁程鹏. 管道-裂隙岩溶含水介质非均质性的水文效应[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 115-121. (SHU Long cang, ZHANG Ying, LU Cheng peng. Hydrologic effects caused by the heterogeneity of karstic conduit fissure medium[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 115-121. (in Chinese))
- [17] 孙晨, 束龙仓, 鲁程鹏, 等. 裂隙管道介质泉流量衰减过程试验研究及数值模拟[J]. 水利学报, 2014(1): 50-57. (SUN Chen, SHU Long cang, LU Cheng peng. Physical experiment and numerical simulation of spring flow attenuation process in fissure conduit media[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(1): 50-57. (in Chinese))
- [18] Barfield B J, Felton G K, Stevens E W, et al. A simple model of karst spring flow using modified NRCS procedures[J]. Journal of Hydrology, 2004, 287(1): 34-48.
- [19] 董贵明, 束龙仓. 地下水流量衰减方程研究进展及展望[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 45-51. (DONG Gui ming, SHU Long cang. Research progress and prospects of groundwater flow attenuation equation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 45-51. (in Chinese))
- [20] 汤邦义. 多亚动态型泉水流量衰减方程的探讨[J]. 勘察科学技术, 1984(5): 10-15. (TANG Bang yi. Discussion on the spring flow attenuation equation with multi-segments types[J]. Site Investigation Science and Technology, 1984(5): 10-15. (in Chinese))