

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.018

温忠辉, 张依楠, 苏佳林. 落水洞直径对岩溶泉流量影响的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 111-116. WEN Zhong hui, ZHANG Yi nan, SU Jia lin. Experimental research on the effects of sinkhole diameter on karst spring[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 111-116. (in Chinese)

# 落水洞直径对岩溶泉流量影响的试验研究

温忠辉<sup>1</sup>, 张依楠<sup>1</sup>, 苏佳林<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 21009; 2. 水利部水文局, 北京 100053)

**摘要:** 基于裂隙-管道介质物理模型, 通过设计多组试验方案, 研究落水洞直径的改变对岩溶含水系统调蓄能力及泉流量过程的影响。经试验数据分析发现: 调蓄系数随着落水洞直径增大而增大; 在低强度下, 落水洞直径的改变对裂隙和落水洞共同释水阶段的衰减能力影响不大, 而在高强度下, 其衰减能力随着落水洞直径的增大明显减小; 底部管道释水阶段的衰减系数不受补给强度和落水洞直径的影响, 其值约为0.0017 1/h; 调蓄系数与第一阶段衰减系数的乘积与落水洞直径无关, 与补给强度呈负相关关系。

**关键词:** 岩溶泉流量; 物理试验; 落水洞直径; 调蓄系数; 衰减系数

**中图分类号:** P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0111-06

## Experimental research on the effects of sinkhole diameter on karst spring

WEN Zhong hui<sup>1</sup>, ZHANG Yi nan<sup>1</sup>, SU Jia lin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydrology Bureau, the Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

**Abstract:** Using the physical model of fissure-conduit media, we designed several experiments to study the effects of sinkhole diameter variations on the storage capacity and spring flow process of the karst aquifer system. Data analysis revealed that the regulating coefficient increased with the increase of sinkhole diameter. At low recharge rates, the variation of sinkhole diameter had little effect on the attenuation capacity at the stage where the fissure and sinkhole released water simultaneously. However, at high recharge rates, the attenuation capacity obviously declined with the increase of sinkhole diameter. The attenuation coefficient at the stage where the bottom pipeline released water was about 0.0017 1/h, and it was not affected by the recharge rate or the sinkhole diameter. The product of the regulating coefficient and the attenuation coefficient of the first stage was negatively correlated to the recharge rate, but was independent of the sinkhole diameter.

**Key words:** karst spring flow; physical experiment; sinkhole diameter; regulating coefficient; attenuation coefficient

## 1 研究背景

在我国西南岩溶地区, 虽降水充沛, 但由于该地区的落水洞、岩溶漏斗、地下河天窗等岩溶地貌极其发育, 大气降水及地表水会沿着这些岩溶通道

集中入渗补给地下水, 从而导致地表水匮乏, 人水矛盾突出<sup>[1]</sup>, 并且水资源短缺问题将随着岩溶地貌进一步发育而更加严重。近年来, 许多学者对西南岩溶地区含水系统水动力特征展开研究, 以便为解决水资源问题提供有力的理论支撑。

收稿日期: 2017-01-15 修回日期: 2017-04-22 网络出版时间:  
网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172203; 41572210)

Funds: National Natural Science Foundation of China (41172203; 41572210)

作者简介: 温忠辉(1964-), 女, 内蒙古赤峰人, 副教授, 博士, 从事地下水资源评价与管理等研究。E-mail: wenzh2812@sina.com

通讯作者: 张依楠(1991-), 女, 辽宁营口人, 主要从事地下水数值模拟及开发利用方面研究。E-mail: 1533672974@qq.com

落水洞作为岩溶垂直发育阶段的产物,是岩溶含水介质内主要的集水区域和过流通道<sup>[2]</sup>。其在形成的初始阶段,侵蚀作用以沿垂直裂隙的溶蚀为主。当孔洞扩大以后,补给强度很大时,大量地表水流集中汇入落水洞,水流所携带的大量泥沙石砾不断地对洞壁四周进行磨蚀,同时还会伴随着岩体的崩塌,使落水洞迅速扩大<sup>[3]</sup>。相比落水洞的扩大速度,岩溶裂隙和地下河因受地下水流的溶蚀所引起的尺寸改变可忽略。落水洞除起着汇水和输水作用外,在补给强度很大的情况下,落水洞内很可能来不及消水,水位壅高<sup>[4]</sup>,这时落水洞还起着储水作用。由此可见,落水洞对岩溶含水介质水流运动有着重要影响。

岩溶含水介质水流运动研究的一个重要方面是泉流量过程的研究,特别是泉流量衰减过程<sup>[5]</sup>。泉流量衰减过程不仅反映含水层的结构特征,亦反映含水介质对地下水的调蓄能力。黄敬熙<sup>[6]</sup>利用流量衰减方程计算各亚动态贮水量占总贮水量的百分比,分析了洛塔地区不同块段岩溶水的主要赋存形式。程星等<sup>[7]</sup>从影响岩溶地下水调蓄功能的因素出发,对影响岩溶泉流量衰减的岩性、构造、降水入渗方式、洞穴地貌演化阶段、排泄条件等因素进行了定性分析。孙晨等<sup>[8]</sup>利用裂隙-管道双重介质物理模型,定量分析了泉口大小、降雨、蓄水状态等对泉流量衰减过程的影响。

目前,针对落水洞对岩溶泉流量过程影响的研究还未多见。本文将以落水洞为研究对象,探究岩溶通道的发育程度对含水系统地下水流运动规律的影响。因实测资料有限,理想化数学模型适用范围受限制,所以依据西南岩溶地区的水文地质概念模型,建立了含有落水洞的裂隙-管道介质物理模型,通过改变落水洞直径来探讨其对岩溶含水系统调蓄能力及泉流量过程的影响,以期为岩溶地貌发育对地下水流运动规律影响的研究提供参考。

## 2 研究方法

### 2.1 物理模型

物理模型之所以成为研究岩溶含水系统的有效工具,是因为其在一定程度上可以按照野外实际的水文地质条件进行任意改变<sup>[9]</sup>。本文通过对裂隙-管道介质水文地质概念模型合理简化,建立了如图1中的裂隙-管道介质物理模型。该物理模型由三部分组成:裂隙-管道介质区、降雨补给系统、流量采集系统。裂隙-管道介质模拟区长1.20 m,高0.89 m,宽0.04 m,其中水平层间裂隙隙宽为2 mm,共设8层;垂直裂隙隙宽为1 mm,每层10条。裂隙网

络右侧和底部均设置一条截面为0.04 m × 0.04 m的方形管道,其中右侧管道模拟落水洞,底部管道模拟地下暗河。降雨补给系统采用共同补给方式,即裂隙分散补给和落水洞集中补给,并通过调节阀门控制补给强度大小。流量采集系统与底部管道连通的泉口处接有电磁流量计,以便实时记录出口流量的变化过程。

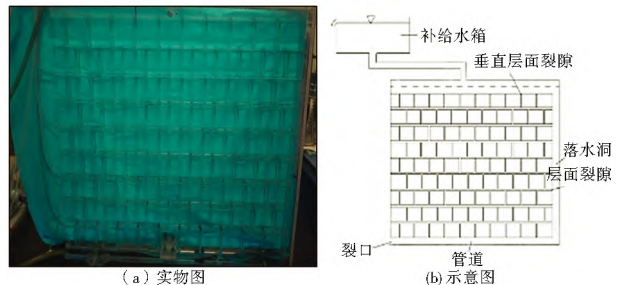


图1 裂隙管道介质物理模型  
Fig. 1 Fissure conduit media physical model

### 2.2 调蓄系数法

调蓄系数  $I$  是衡量含水系统调蓄能力大小的定量指标<sup>[10-11]</sup>,计算公式如下:

$$I = \frac{\Delta Q}{P} \quad (1)$$

式中:  $\Delta Q$  为含水系统水资源的增量;  $P$  为降雨入渗补给量。  $I$  值越大,降雨入渗量在含水系统中滞留比例越大,调蓄能力越强。

为便于计算,将式(1)进行适当的变形,如下:

$$I = 1 - \frac{Q}{P} = 1 - \frac{\int_0^T q(t) dt}{iT} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为排泄量;  $P$  为降雨入渗补给量;  $i$  为补给强度;  $q(t)$  为泉口出流量过程;  $T$  为装置内水位达到稳定的初始时间。本文将采用式(2)计算不同落水洞直径情况下的调蓄系数。

### 2.3 衰减系数法

衰减系数  $\alpha$  迄今为止还没有明确的定义,通常作为地下河枯季径流分析指标,反映衰减过程内流量的平均相对变化速率<sup>[12]</sup>。计算公式一般由单一指数型衰减方程<sup>[13]</sup>两边取对数获得,形式如下:

$$\alpha = \frac{\ln Q_0 - \ln Q_t}{t} \quad (3)$$

式中:  $Q_0$  为衰减初始时刻的流量;  $Q_t$  为  $t$  时刻的流量。  $\alpha$  值越大,衰减越快,抗旱能力越弱。本文将采用式(3)计算不同落水洞直径情况下的衰减系数。

### 2.4 衰减速率法

此外,本文从水位的角度定义了衰减速率  $v$ ,即水位的平均下降速率 (cm/s)。其计算公式如下:

$$v = \frac{H - 4}{t} \quad (4)$$

式中:  $H$  为稳定水位 (cm);  $t$  为从停止补给到水位降至底部管道所需的时间 (s)。衰减速率  $\nu$  也被作为衡量衰减能力的指标。

### 3 试验过程与结果分析

#### 3.1 试验过程

##### 1.1.1 方案设计

准备 2 种不同尺寸的垫片, 其中尺寸为  $85\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$  的垫片 4 个, 尺寸为  $85\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 0.25\text{ cm}$  的垫片 1 个。然后将两种垫片进行随机组合, 放入模型右侧的落水洞中, 以改变落水洞的直径。落水洞直径从  $2\text{ cm}$  增加到  $4\text{ cm}$ , 每增加  $0.25\text{ cm}$  为一组方案, 共九组试验方案。

此外, 由于泉流量过程与补给强度有关, 为保证结果的合理性与可靠性, 每组方案下设置多种不同补给强度。

##### 1.1.2 操作过程

开启补给阀门, 并保持补给强度不变, 直至装置内水位不再变化时停止补给。当泉口停止排水时, 即为一个完整的泉流量过程。此过程由电磁流量计每隔一秒记录一次, 数据可用 U 盘直接从温压补偿流量积算器设备中拷贝, 节省人力与时间。

#### 3.2 结果分析

##### 3.2.1 泉流量过程

根据试验所得到的时间流量序列, 绘制泉流量过程曲线, 见图 2。由图 2 可见, 一个完整的泉流量过程分为三个阶段: 上升阶段, 平稳阶段和下降阶段。其中下降阶段又分为四个阶段, 先陡然下降, 再平缓下降, 后急剧减小至零, 最终以零流量持续至断流。其中, 后两个阶段是当模型中水位降至泉口后的衰减过程, 由于此阶段泉口不饱和, 流量计无法准确测出其流量值。因此, 在后面分析中不做考虑。不同补给强度及不同落水洞直径情况下, 其泉流量过程曲线均与图 2 类似。

##### 3.2.2 补给强度与稳定水位

补给强度与稳定水位存在着正相关关系, 补给强度越大, 稳定水位越高。本试验共有九种不同的落水洞直径方案, 取落水洞直径为  $2\text{ cm}$ 、 $2.5\text{ cm}$ 、 $3\text{ cm}$ 、 $3.5\text{ cm}$  和  $4\text{ cm}$  五种情况, 将其不同补给强度下的稳定水位点绘在同一张图上, 见图 3。

由图 3 可见, 这些散点大致分布在某一固定的直线上, 经计算可确定这一直线方程为  $y = 0.01136x + 0.98809$ 。即在不同的落水洞直径下, 补给强度与稳定水位之间的关系是确定的。

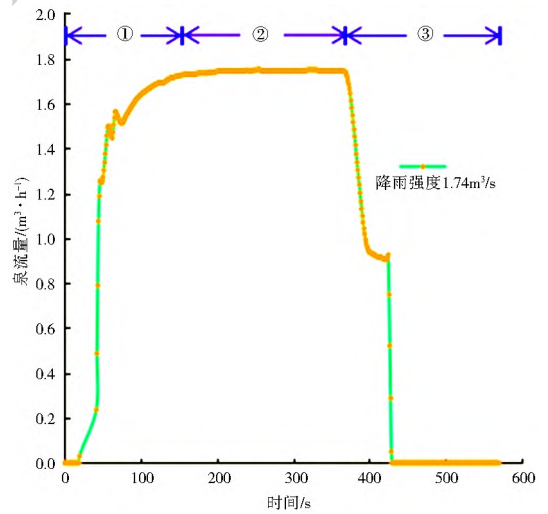


图 2 落水洞直径为  $2\text{ cm}$  时泉流量过程

Fig. 2 Spring flow process when sinkhole diameter is  $2\text{ cm}$

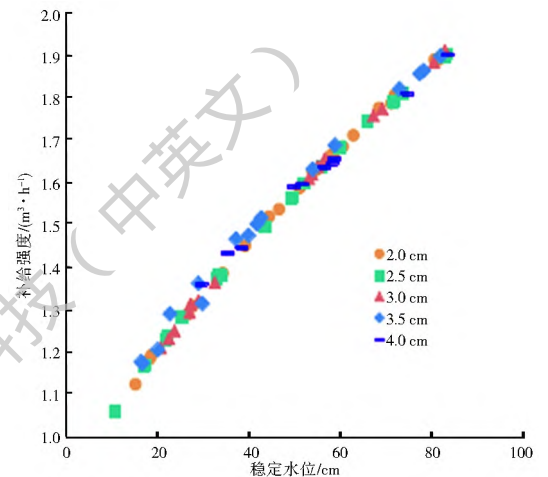


图 3 不同落水洞直径下补给强度与稳定水位的关系

Fig. 3 The relationship between recharge rate and stable water level under different sinkhole diameter

##### 3.2.3 调蓄系数

选取各方案下泉流量过程的第一阶段, 即泉流量上升阶段, 采用式 (2) 计算不同直径的落水洞的调蓄系数, 计算结果见表 1, 并绘图 4。

表 1 六种补给强度下不同直径落水洞的调蓄系数

Tab. 1 The storage coefficient of sink hole with different diameter under six recharge rates

落水洞直径/cm	补给强度/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )					
	1.28	1.38	1.58	1.63	1.74	1.82
2			0.397	0.392	0.354	0.304
2.25	0.447	0.432	0.402	0.387	0.353	0.360
2.5		0.474	0.414	0.366	0.337	0.323
2.75	0.479	0.470	0.444	0.436	0.377	0.338
3	0.568	0.523	0.429	0.412	0.353	0.361
3.25	0.551	0.545	0.476	0.411	0.402	0.354
3.5	0.577	0.511	0.470	0.418	0.440	0.377
3.75	0.569	0.515		0.414	0.397	0.382
4		0.599	0.502	0.475	0.433	0.392

注: 空白处为缺测数据。

由表 1 可见,同一直径下,补给强度越大,调蓄系数越小。由前面可知,补给强度越大,稳定水位越高,模型中蓄水量越大,但同时达到稳定水位所需要的时间也越长,因而,补给量在模型中滞留的比例越小,调蓄能力越弱。由图 4 可见,在同一补给强度下,调蓄系数随着落水洞直径的增大有增大的趋势。由前面可知,补给强度相等时,稳定水位也基本相等,落水洞直径越大,模型中蓄水量越大,同时达到稳定水位所需时间基本相等,因而,补给量在模型中滞留的比例越大,调蓄能力越强。

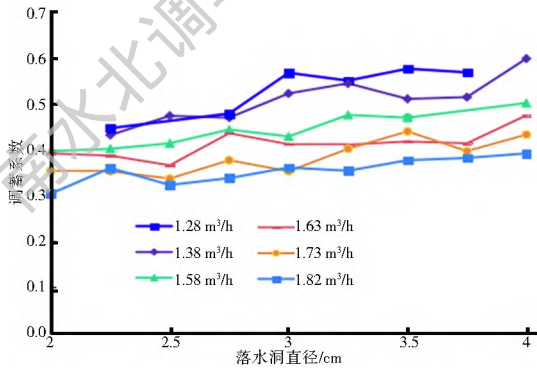


图 4 不同补给强度下落水洞直径与调蓄系数的关系

Fig. 4 The relationship between storage coefficient and sinkhole diameter under different recharge rates

### 3.2.4 衰减系数

泉流量衰减过程仅考虑前两个阶段,即陡然下降阶段和平缓下降阶段,详见图 5 中的<sup>1</sup>和<sup>o</sup>。经数据分析可知,前者为裂隙和落水洞共同释水阶段,后者为底部管道部分释水阶段。采用式(3)分别对两个阶段进行曲线拟合,求出相应的衰减系数。

(1) 第一阶段衰减系数。

裂隙和落水洞共同释水阶段的衰减系数与补给强度和落水洞直径的关系见图 6 和图 7。由图 6 可见,衰减系数随着补给强度先增加后趋于不变,转折

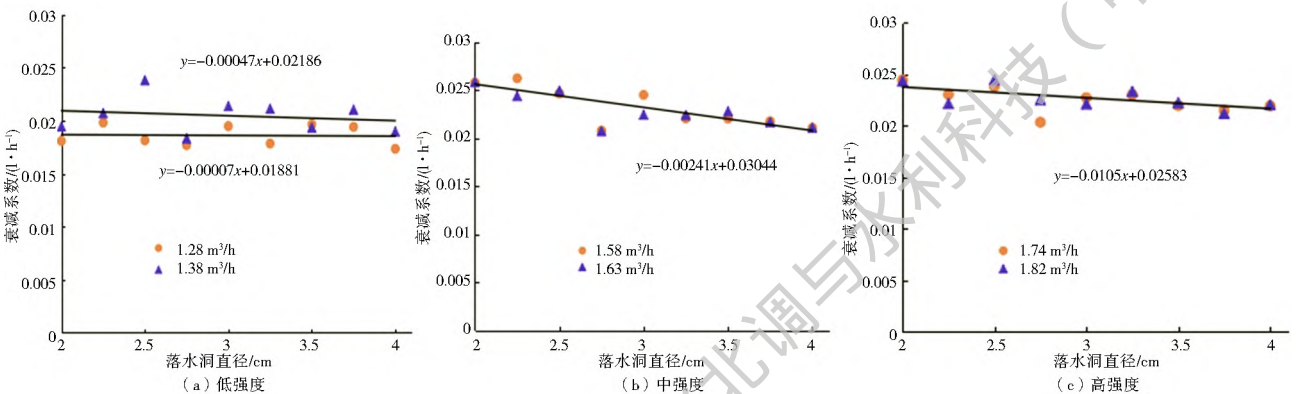


图 7 不同补给强度下第一阶段衰减系数与落水洞直径的关系

Fig. 7 The relationship between the attenuation coefficient of first phase and sinkhole diameter under different recharge rates

此外,利用式(4)计算第一阶段的衰减速率,取

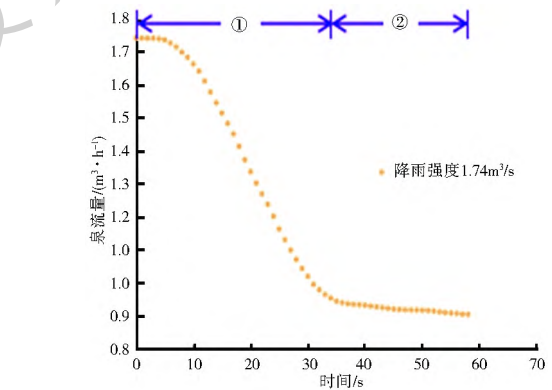


图 5 落水洞直径为 2 cm 时的泉流量衰减过程

Fig. 5 Spring flow attenuation when sinkhole diameter is 2 cm 点在补给强度为  $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$  左右。其它不同直径落水洞的第一阶段衰减系数变化趋势均与上述相同。由图 7 可见,在不同补给强度下,衰减系数均随着落水洞直径的增大而减小。其中在低强度下,落水洞直径的改变对衰减能力的影响不大,斜率小于 0.001。而在中等强度和高强度下,衰减系数均随着落水洞直径的增大呈直线下下降趋势。这是因为补给强度越高,稳定水位越高,不同直径落水洞的稳定蓄水量相差越大。

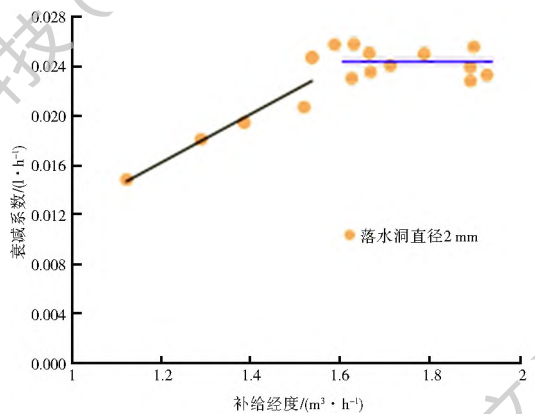


图 6 第一阶段衰减系数与补给强度的关系

Fig. 6 The relationship between the attenuation coefficient of first phase and recharge rate

其中五种直径,点绘其衰减速率与补给强度的散点

图。由图 8 可见,同一直径下,衰减速率随着补给强度的增加先增加后趋于平稳,转折点在补给强度为  $1.7 \text{ m}^3/\text{h}$  左右。在低强度下,不同直径落水洞下的衰减速率相差不大。高强度下,落水洞直径越大,其衰减速率越小。上述变化规律与衰减系数基本一致。

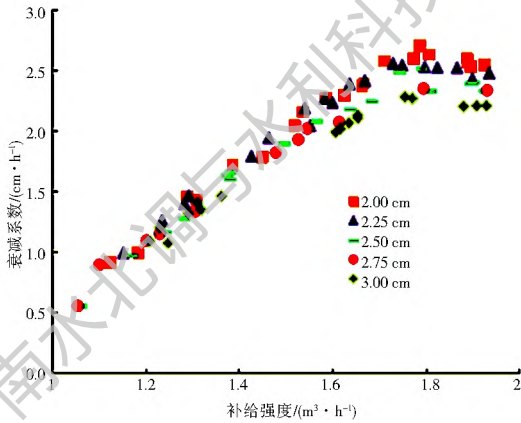


图 8 不同落水洞直径下衰减速率与补给强度的散点

Fig. 8 The relationship between attenuation rate and recharge rate under different sink hole diameter

(2) 第二阶段衰减系数。

底部管道释水阶段的衰减系数与补给强度和落水洞直径的关系见图 9 和图 10。由图 9 可知,衰减系数随着补给强度变化不大,因此,可求其均值作为不同直径落水洞下的衰减系数。由图 10 可知,落水洞直径的改变对底部管道释水能力的影响不大。经计算,第二阶段的衰减系数大约为  $0.0017 \text{ 1/h}$ ,数量级为  $-2$ ,比第一阶段小一个数量级。平均衰减时间为  $23 \text{ s}$ ,相当于模型蓄水一半时第一阶段的衰减历时。

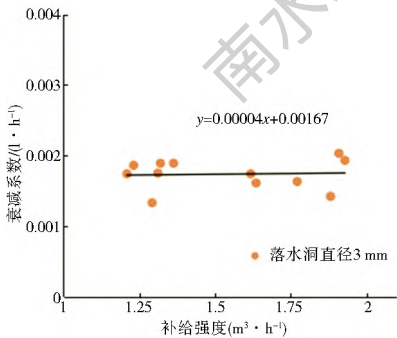


图 9 落水洞直径为 3 cm 时补给强度与衰减系数关系

Fig. 9 The relationship between recharge rate and attenuation coefficient when sinkhole diameter is 3 cm

3.2.5 调蓄系数与衰减系数

由前面分析可知,调蓄系数与第一阶段衰减系数呈负相关关系。在此,定义一个新参数  $B$ , 其为二者的乘积,计算公式如下:

$$B = I \times \alpha_1 \quad (5)$$

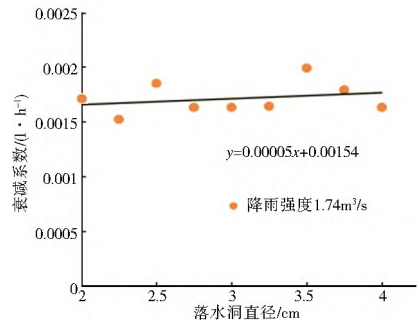


图 10 不同落水洞直径的第二阶段衰减系数

Fig. 10 The attenuation coefficient of second phase for different sink hole diameter

其中:  $I$  为调蓄系数;  $\alpha_1$  为第一阶段的衰减系数 ( $1/\text{h}$ )。  $B$  的单位与  $\alpha_1$  一致。计算结果见表 2。

表 2 六种补给强度下不同直径落水洞的  $B$  值

Tab. 2 B values of sinkhole with different diameter under six recharge rates  $1/\text{h}$

落水洞直径/cm	补给强度/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )					
	1.28	1.38	1.58	1.63	1.73	1.82
2			0.010	0.010	0.009	0.007
2.25	0.009	0.009	0.011	0.009	0.008	0.008
2.5		0.011	0.010	0.009	0.008	0.008
2.75	0.008	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008
3	0.011	0.011	0.011	0.009	0.008	0.008
3.25	0.010	0.012	0.011	0.009	0.009	0.008
3.5	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.008
3.75	0.011	0.011		0.009	0.009	0.008
4		0.011	0.011	0.010	0.009	0.009

由表 2 可见,  $B$  值范围在  $0.007 \sim 0.012$ 。在同一补给强度下,不同直径落水洞的  $B$  值相差不大,可认为  $B$  值与落水洞直径无关。在同一直径下,  $B$  值随着补给强度增大而减小。经计算,可确定  $B$  与  $i$  之间的关系为:  $B = -0.00429i + 0.01624$ 。

4 结论

本文通过设计多种试验方案,探讨了落水洞直径大小对岩溶含水系统调蓄能力及泉流量衰减过程的影响。主要得出以下结论:

(1) 调蓄能力与补给强度呈负相关关系,与落水洞直径呈正相关关系。

(2) 裂隙和落水洞共同释水阶段的衰减系数随着补给强度先增加后趋于不变,存在转折点。在低强度下,落水洞直径的改变对衰减能力影响不大。而在高强度下,衰减能力随着落水洞直径的增大明显减小。

(3) 底部管道释水阶段的衰减系数不受补给强

度和落水洞直径的影响, 衰减系数大约为 $0.0017$   $1/h$ , 比第一阶段小一个数量级。

(4) 调蓄系数与第一阶段衰减系数的乘积与落水洞直径无关, 与补给强度呈负相关关系。

#### 参考文献(References):

- [1] 曹建华, 袁道先, 童立强, 等. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. 资源与生态学报, 2015, 6(4): 247-256. (CAO Jiannhua, YUAN Daoxian, TONG Liqiang. Features of karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China[J]. Pratacultural Science, 2015, 6(4): 247-256. (in Chinese))
- [2] Neretnieks I, Erikson T, Thtinen P. Tracer Movement in a Single Fissure in Granitic Rock: Some Experimental Results and Their Interpretation[J]. Water Resources Research, 1982, 18(4): 849-858.
- [3] 陈宁. 云南临沧某机场岩溶发育规律及地基稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. (CHEN ning. Research on karst growth law and foundation stability of some airport in Lincang, Yunnan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [4] 王腊春, 许有鹏, 张立峰, 等. 贵州普定后寨地下河流域岩溶水特征研究[J]. 地理科学, 2000, 20(6): 557-562. (WANG Lachun, XU Youpeng, ZHANG Lifeng, et al. The characteristic study of karst water at Houzhai Underground Basin in Puding County, Guizhou Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(6): 557-562. (in Chinese))
- [5] 刘丽红, 李娟, 鲁程鹏. 岩溶含水系统水动力特征研究进展[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 2124-2124. (LIU Lihong, LI Xian, LU Chengpeng. Research progress on hydrodynamic of karstic water system[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 2124-2124. (in Chinese))
- [6] 黄敬熙. 流量衰减方程及其应用: 以洛塔岩溶盆地为例[J]. 中国岩溶, 1982, 1(2): 118-126. (HUANG Jingxi. Recession equation and its application case history of Luota Karst Basin[J]. Carsologica Sinica, 1982, 1(2): 118-126. (in Chinese))
- [7] 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. (CHENG Xing, YANG Zijiang. A discussion on the factors of underground water regulation in Karst Areas[J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(1): 52-57. (in Chinese))
- [8] 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, 45(1): 50-57. (SUN Chen, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. Physical experiment and numerical simulation of spring flow attenuation process in fissure conduit media[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(1): 50-57. (in Chinese))
- [9] 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 Longcang, FAN Jianhui, LU Chengpeng, 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))
- [10] 陈植华, 陈刚, 靖娟利. 西南岩溶石山表层岩溶带岩溶水资源调蓄能力初步评价[A][J]. 中国岩溶地下水与石漠化研究, 2003, 180-188. (CHEN Zhihua, CHEN Gang, JING Juanyan. A preliminary evaluation of the capacity to storage groundwater of epikarst zone in Southwest Karst Mountain of China[A][J]. The Research of Karst Groundwater and Rock Desertification in China, 2003, 180-188. (in Chinese))
- [11] 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 Weihui, LIANG Xiaoping, et al. Quantitative calculation of Regulating coefficient for epikarst zone—Case study of Zhaojiawan, Luota, West of Hunan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(4): 37-42. (in Chinese))
- [12] 董贵明, 束龙仓, 田娟. 西南岩溶地区地下河系统流量衰减系数的时变特征[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6): 33-36. (DONG Guiming, SHU Longcang, TIAN Juan. Time varying characteristics of flow attenuation coefficient in karst underground river system at Southwestern China[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(6): 33-36. (in Chinese))
- [13] 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 Guiming, SHU Longcang. Research progress and prospects of groundwater flow attenuation equation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 45-51. (in Chinese))