



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2017.05.015

齐天松, 束龙仓, 张依楠, 等. 落水洞对裂隙-管道介质排水过程的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 97-103. QI Tiarr song, SHU Long cang, ZHANG Yi nan, et al. A analysis of the effects of the sinkhole size on the drainage process of fissure conduit media[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 97-103. (in Chinese)

## 落水洞对裂隙-管道介质排水过程的影响

齐天松<sup>1</sup>, 束龙仓<sup>1</sup>, 张依楠<sup>2</sup>, 温忠辉<sup>1</sup>, 刘波<sup>1</sup>, 鲁程鹏<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 广东省中山市黄圃镇水利所, 广东 中山 528429)

**摘要:** 利用自行研制的裂隙-管道介质物理模型进行多组试验, 探究落水洞对介质排水过程的影响。对裂隙-管道介质按照介质空隙结构特点进行分区, 引入反映介质排水过程中水体排泄快慢的单位时间排水量, 进而得到对应不同介质分区和介质整体的四个单位时间排水量。利用单位时间排水量分析九种落水洞横截面积对裂隙-管道介质排水过程的影响。结果表明: 落水洞横截面积的增大对裂隙-管道介质结构的影响为增大其储水空间和导水空间; 落水洞横截面积的增大会加快裂隙-管道介质的排水过程, 排水过程对落水洞横截面积增大的响应在横截面积的增大大量达到某一阈值后才会发生, 该阈值和介质空隙结构有关; 排水过程的三个不同阶段的阈值不同, 末期的阈值小于初期、中期的阈值。

**关键词:** 落水洞; 裂隙-管道介质; 排水过程; 物理试验

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)05-0097-07

### Analysis of the effects of the sinkhole size on the drainage process of fissure conduit media

QI Tiarr song<sup>1</sup>, SHU Long cang<sup>1</sup>, ZHANG Yi nan<sup>2</sup>, WEN Zhong hui<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, LU Cheng peng<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Huangpu Town Water Conservation Station of Zhongshan City, Zhongshan 528429, China)

**Abstract:** The effects of the sinkhole size on the drainage process of fissure conduit media were analyzed using the self designed physical model of fissure conduit media. The media was divided into three regions according to the structural characteristics of the media voids. Water discharge per unit time, a concept that represents the speed of water drainage, was introduced. The water discharges per unit time of the three regions and of the media as a whole were calculated. The water discharge per unit time was used to analyze the effects of nine different sinkhole sizes on the drainage process of the fissure conduit media. The results showed that as the cross sectional area of the sinkhole increased, the water storage volume and water conducting volume of the media were enlarged, and the drainage speed was enhanced. It was only when the cross sectional area reached a certain threshold that the drainage process would respond to the increase in the cross sectional area of the sinkhole. This threshold depended on the structure of the media voids. The three different stages of the drainage process had different thresholds. The threshold in the final stage was smaller than that in the initial or middle stage.

**Key words:** sinkhole; fissure conduit media; drainage process; physical experiment

收稿日期: 2016-08-10 修回日期: 2016-10-24 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1933.026.html>

基金项目: 国家自然科学基金“西南岩溶裂隙-管道介质地下水流运动规律试验研究”(41172203); 人工调控下干旱区地下水水循环演化规律研究(41572210)

Funds: National Natural Science Foundation of China "The research of groundwater flow in a karst aquifer with fissure conduit media" (41172203); Study on water cycle evolution of groundwater reservoir in the arid area under artificial regulation (41572210)

作者简介: 齐天松(1992-), 男, 河南开封人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 2685271286@qq.com

通讯作者: 束龙仓(1964-), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 主要从事地下水资源评价与管理、地下水与生态环境研究。E-mail: lcs@hhu.edu.cn

落水洞是消泄地表水的近于垂直的或倾斜的洞穴<sup>[12]</sup>,是岩溶含水介质的主要储水空间和导水通道<sup>[3]</sup>。由于成岩沉积时的非均质性、成岩后的碎裂和岩溶作用等,岩溶含水系统具有高度非均质性<sup>[4]</sup>,这给岩溶水流运动规律的研究带来了很大困难,建立物理模型来进行室内试验成为研究岩溶水流的有效方法<sup>[5-7]</sup>。

耿克勤等<sup>[8]</sup>利用特制的岩石裂隙渗流物理试验装置研究了渗透系数与介质空隙结构特点的关系。钱家忠等<sup>[9-12]</sup>主要对单一流路基岩裂隙水的流态进行了物理试验研究。刘咏<sup>[13]</sup>根据室内物理试验,研究了窄缝条件下(0.1~1.5 mm)裂隙水流的雷诺数随裂隙开启度、裂隙水平流速以及裂隙壁面粗糙度不同而变化的规律。沈振中等<sup>[14]</sup>研制了光滑岩溶管道和裂隙交叉的水力特性物理试验模型。Faulkner 等<sup>[15]</sup>利用物理模型模拟了孔隙-管道介质中的渗流与管流耦合情况。腾强等<sup>[16]</sup>在室内建立了一套裂隙介质管道网络物理模型试验装置,并开展裂隙渗流和溶质运移试验。黄勇等<sup>[17]</sup>设计了含有单一管道和双管道的裂隙充填试验,研究了裂隙填充条件下的地下水流及溶质运移特点。刘波等<sup>[18]</sup>建立了裂隙管道网络概念模型,搭建了不同管径不同连通方式的管道网络试验装置,进行了渗流和溶质运移试验。

目前针对落水洞的研究主要为探究其过流能力<sup>[19-20]</sup>,在建立岩溶水文模型和探究岩溶水文过程中也会考虑落水洞的影响<sup>[21-22]</sup>。

本文利用自制的裂隙-管道介质物理模型进行物理试验,探究落水洞的变化对裂隙-管道介质内水体流动的影响。在外界补给停止后,裂隙-管道介质的排水过程仅与介质自身空隙结构有关,因而排水过程可以较为直观地反映裂隙-管道介质结构对其赋存水体运动的影响。总之,落水洞结构的变化对裂隙-管道介质排水过程的影响可以反映落水洞对介质内水体运动的影响,利用物理模型试验分析这一影响,对进一步研究落水洞在岩溶水文过程中的储水与导水作用具有一定的参考价值。

## 1 物理模型与试验步骤

### 1.1 物理模型

由于岩溶含水介质的高度非均质性,如何利用物理模型准确刻画高度非均质裂隙-管道介质中的地下水运动规律,已成为水文地质学研究的热点之一。本文是该研究方向的初步探讨,是从最简单的含水介质结构出发,设计了裂隙-管道介质物理模型,其试验装

置主要由三部分组成:落水洞横截面积可变的裂隙-管道介质、降水补给装置和出流计量系统。

落水洞横截面积可变的裂隙-管道介质:如图 1 所示,裂隙-管道介质为物理模型的主体部分。模型整体长 1 200 mm,高 856 mm,厚 40 mm,由光滑的有机玻璃板拼接而成。裂隙网络部分共设置 8 层隙宽 2 mm 的水平裂隙,在两层水平裂隙之间、最下层水平裂隙之下和最上层水平裂隙之上均匀设置 10 条和水平裂隙垂直连通的隙宽 1 mm 的竖直裂隙。裂隙网络部分的右侧设置一条横截面积为 40 mm × 40 mm 的竖直落水洞结构,与 8 层水平裂隙均垂直连通,裂隙网络部分下方设置一条横截面积为 40 mm × 40 mm 的水平地下暗河结构,与位于最下层水平裂隙之下的 10 条竖直裂隙均垂直连通。落水洞结构和地下暗河结构也垂直相连通,构成模型的管道部分。

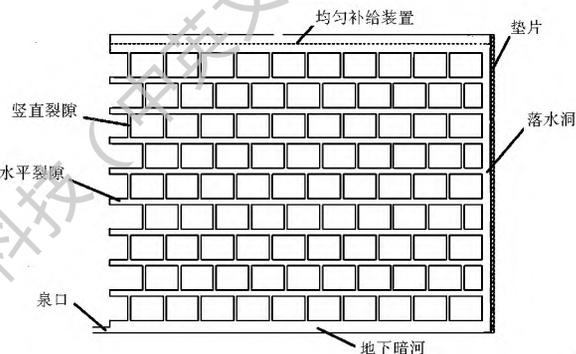


图 1 裂隙-管道介质物理模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical model of fissure conduit media

另有与落水洞结构等高、横截面积为 0.5 cm × 4 cm 的条状有机玻璃材质垫片 4 个,横截面积为 0.25 cm × 4 cm 的垫片 1 个,使得模型的落水洞横截面积可变。将不同条数、规格的垫片插入物理模型的落水洞结构中,可以得到 9 种横截面不同的落水洞结构,按横截面积从小到大排序依次为: 2 cm × 4 cm、2.25 cm × 4 cm、2.5 cm × 4 cm、2.75 cm × 4 cm、3 cm × 4 cm、3.25 cm × 4 cm、3.5 cm × 4 cm、3.75 cm × 4 cm、4 cm × 4 cm。

另外,模型上方有一均匀补给装置,与降水补给装置相连接,使由降水补给装置提供的水流均匀地降落在裂隙-管道介质模型的上表面;地下暗河结构的左端为一直径为 20 mm 的泉口,与出流计量系统相连接。

降水补给装置和出流计量系统:降水补给装置由水头恒定的补给水箱、具有不同开启度的阀门、内径为 15 mm 的软管构成,通过均匀补给装置对裂隙-管道介质进行补给。裂隙-管道介质的泉口外接

一电磁流量计,即为出流计量系统。

## 1.2 试验步骤

(1) 在落水洞结构内插入一定条数、规格的垫片,确定本组试验的落水洞结构截面条件。

(2) 开启控制补给强度的阀门,记录时刻为  $T_1$ 。

(3) 当有水体从泉口出流时,记录时刻为  $T_2$ 。

(4) 当物理模型内水位稳定或水位到达模型顶部时,记录此时相对于模型底面的相对水位  $H$ ,同时关闭补给阀门,记录时刻为  $T_3$ 。

(5) 当物理模型内水位下降至裂隙网络部分与地下暗河结构交界面时,记录时刻为  $T_4$ 。

(6) 当物理模型内水位下降至泉口上缘时,记录时刻为  $T_5$ 。

(7) 当泉口停止出流时,记录时刻为  $T_6$ 。

(8) 重复步骤(2)至(7),得到同一落水洞结构截面条件下不同补给强度的试验数据。

(9) 重复步骤(1)至(8),得到9种落水洞结构截面条件下各种补给强度的试验数据。

(10) 将流量过程从电磁流量计中读出。

## 2 研究方法

### 2.1 介质分区

在停止补给之后,裂隙-管道介质排水过程开始,含水介质内饱和水体的水位随之下降。介质排水过程对应的介质内饱和水体水位的下降过程可以划分为三个阶段,如图2所示。

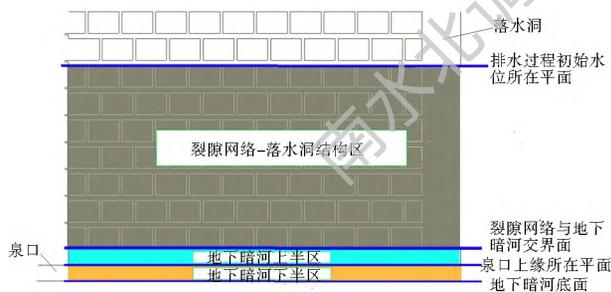


图2 介质排水过程水位下降与介质分区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the decline of water level during the drainage process and the regions of the media

停止补给后,介质排水过程开始,裂隙-管道介质内饱和水体水位从排水过程初始水位所在平面迅速下降至裂隙网络与地下暗河交界面,这是水位下降的第一个阶段,对应介质排水过程的初期;进而水位从裂隙网络与地下暗河交界面较为缓慢地下降至泉口上缘所在平面,这是水位下降的第二个阶段,对应介质排水过程的中期;最后水位从泉口上缘所在平面更为缓慢地下降至地下暗河底面,这是水位下降的第三个阶段,对应介质排水过程的末期。

介质内水位下降过程的这三个阶段对应介质不同区域的含水状态的变化。在水位下降的第一个阶段,介质的裂隙网络和落水洞结构从饱水状态变为非饱水状态,此阶段地下暗河始终处于饱水状态,泉口出流为饱和水流。在水位下降的第二个阶段,裂隙网络和落水洞结构始终处于非饱水状态,地下暗河在泉口上缘所在平面以上部分从饱水状态变为非饱水状态,地下暗河在泉口上缘所在平面以下部分始终处于饱水状态,泉口出流为饱和水流。在水位下降的第三个阶段,裂隙网络、落水洞结构和地下暗河在泉口上缘所在平面以上部分始终处于非饱水状态,地下暗河结构在泉口上缘所在平面以下部分从饱水状态变为非饱水状态,泉口出流为非饱和水流。

在介质排水过程中,不同区域介质内水体的流动特点不同,对应介质排水过程的不同时期;同时,三个介质区域自身的结构特点也不一样。根据介质内水流特点和自身结构的不同,对裂隙-管道介质进行分区,利用介质排水时水位下降过程中高度递减的四个水平面将介质分为三个依次相通但结构特点迥异的区域,如图2所示。

将水位下降的第一个阶段经过的介质分区称为裂隙网络-落水洞结构区:该分区的储水介质为裂隙网络-落水洞结构,裂隙网络在左,落水洞结构在右,两者相通;该分区内的水体直接排泄至位于其正下方的、与裂隙网络和落水洞结构均相通的地下暗河,其排水过程在三个阶段中最为迅速;对应介质排水过程的初期。

将水位下降的第二个阶段经过的介质分区称为地下暗河上半区:该区域的储水介质结构单一,为地下暗河结构(上半部分);该区域内的水体直接排泄至地下暗河结构(下半部分),其排水过程在三个阶段中较为缓慢;对应介质排水过程的中期。

将水位下降的第三个阶段经过的介质分区称为地下暗河下半区:该区域的储水介质结构单一,为地下暗河结构(下半部分);该区域内的水体通过位于地下暗河结构(下半部分)左端的圆形泉口排泄至介质外,其排水过程在三个阶段中最为缓慢;对应介质排水过程的末期。

相应地,对于裂隙-管道介质整体:储水介质为裂隙网络-落水洞结构-地下暗河,裂隙网络、落水洞结构一左一右在上,地下暗河在下,三者相互连通;水体通过位于地下暗河结构(下半部分)左端的圆形泉口排泄至介质外,其排水过程综合了各分区的排水过程,是一个由快至慢的变化过程;对应介质排水的全过程。

## 2.2 介质分区的单位时间排水量

不同介质分区介质结构不同,介质内水流特点不同,因而排水特点不同。为了量化排水特点,引入单位时间排水量  $C$ ,其物理意义为裂隙-管道介质在排水过程中单位时间内排泄出的水量。根据水量平衡,可以建立单位时间排水量与介质内水体含量变化的关系式:

$$C = - \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

式中: $C$  为单位时间排水量( $\text{cm}^3/\text{s}$ ); $V$  为介质内水体含量( $\text{cm}^3$ ); $t$  为时间( $\text{s}$ )。

式(1)表明,单位时间排水量的大小反映了介质排水过程中水体排泄的快慢。

不同的介质分区对应排水过程的不同时期,有不同的排水特点,相应地有各自的单位时间排水量  $C_{\text{介质分区}}$ ,其计算公式如下:

$$C_{\text{介质分区}} = \frac{V_{\text{介质分区}}}{t_{\text{下}} - t_{\text{上}}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{介质分区}}$  为介质分区的单位时间排水量( $\text{cm}^3/\text{s}$ ); $V_{\text{介质分区}}$  为介质分区水体含量( $\text{cm}^3$ ); $t_{\text{上}}$ , $t_{\text{下}}$  为排水过程中水位下降至介质分区上、下边界对应的时刻( $\text{s}$ )。

根据式(2)及试验数据,可以计算出不同落水洞截面条件下裂隙网络落水洞结构区的单位时间排水量  $C_1$ 、地下暗河上半区的单位时间排水量  $C_2$  和地下暗河下半区的单位时间排水量  $C_3$  以及介质整体的单位时间排水量  $C_4$ ,见表 1。

表 1 不同落水洞截面条件下各介质区域的单位时间排水量  
Tab. 1 The water discharge per unit time of each region with different cross sectional areas of the sinkhole

落水洞截面	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
2 cm × 4 cm	62.14	45.13	4.774	15.78
2.25 cm × 4 cm	63.03	45.41	4.866	16.21
2.5 cm × 4 cm	62.00	44.50	4.816	15.85
2.75 cm × 4 cm	64.01	43.61	4.837	16.19
3 cm × 4 cm	61.50	45.29	5.430	17.66
3.25 cm × 4 cm	62.37	44.33	5.811	18.22
3.5 cm × 4 cm	71.82	56.85	6.283	21.12
3.75 cm × 4 cm	72.71	54.96	6.217	21.55
4 cm × 4 cm	76.40	62.19	5.593	20.56

## 3 结果分析

### 3.1 对介质排水过程不同阶段的影响

#### 3.1.1 对排水过程初期的影响

在介质排水过程中,裂隙网络落水洞结构区的

水位下降过程对应介质排水初期,因而其单位时间排水量  $C_1$  随落水洞横截面积的变化反映了落水洞对裂隙-管道介质排水过程初期的影响。根据表 1 数据绘制  $C_1$ -落水洞横截面积关系图,如图 3。

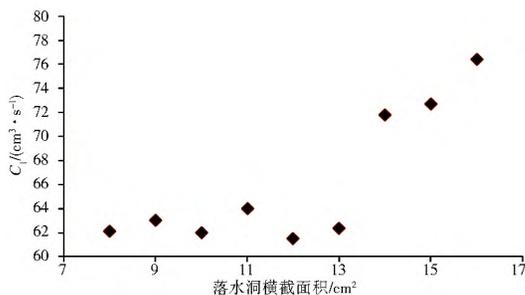


图 3  $C_1$ -落水洞横截面积关系

Fig. 3 Relation diagram between  $C_1$  and the cross sectional area of the sinkhole

由图 3 可知,在落水洞横截面积从  $8 \text{ cm}^2$  增大至  $13 \text{ cm}^2$  的过程中, $C_1$  分布在  $61 \sim 65 \text{ cm}^3/\text{s}$  之间,且明显没有上升趋势;在落水洞横截面积为  $14 \text{ cm}^2$ ,  $15 \text{ cm}^2$ ,  $16 \text{ cm}^2$  时, $C_1$  分布在  $71 \text{ cm}^3/\text{s}$  以上,变化趋势不明显。

落水洞横截面积在从  $8 \text{ cm}^2$  增大至  $13 \text{ cm}^2$  这一过程中,对  $C_1$  数值不存在明显的影响,排水过程初期的水体排泄快慢没有明显的变化;从  $13 \text{ cm}^2$  增大至  $14 \text{ cm}^2$  时, $C_1$  数值有了明显的增大趋势,排水过程初期的水体排泄明显加快;在从  $14 \text{ cm}^2$  增大至  $16 \text{ cm}^2$  这一过程中,无法判断对  $C_1$  数值的影响情况,排水过程初期的水体排泄快慢变化规律不明显。

#### 3.1.2 对排水过程中期的影响

在介质排水过程中,地下暗河上半区的水位下降过程对应介质排水中期,因而其单位时间排水量  $C_2$  随落水洞横截面积的变化反映了落水洞对裂隙-管道介质排水过程中期的影响。根据表 1 数据绘制  $C_2$ -落水洞横截面积关系图,如图 4。

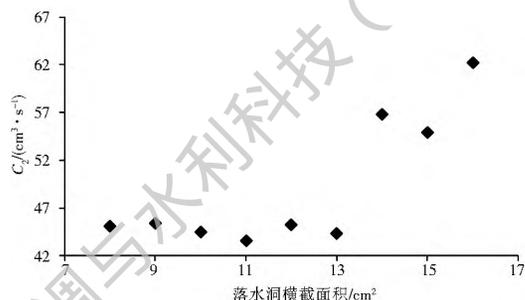


图 4  $C_2$ -落水洞横截面积关系

Fig. 4 Relation diagram between  $C_2$  and the cross sectional area of the sinkhole

由图 4 可知,在落水洞横截面积从  $8 \text{ cm}^2$  增大至  $13 \text{ cm}^2$  的过程中, $C_2$  分布在  $43 \sim 46 \text{ cm}^3/\text{s}$  之间,

且明显没有上升趋势;在落水洞横截面积为 14 cm<sup>2</sup>, 15 cm<sup>2</sup>, 16 cm<sup>2</sup> 时, C<sub>2</sub> 分布在 54 cm<sup>3</sup>/s 以上, 变化趋势不明显。

落水洞结构横截面积在从 8 cm<sup>2</sup> 增大至 13 cm<sup>2</sup> 这一过程中, 对 C<sub>2</sub> 数值不存在明显的影响, 排水过程中期的水体排泄快慢没有明显的变化; 从 13 cm<sup>2</sup> 增大至 14 cm<sup>2</sup> 时, C<sub>2</sub> 数值有了明显的增大趋势, 排水过程中期的水体排泄明显加快, 在从 14 cm<sup>2</sup> 增大至 16 cm<sup>2</sup> 这一过程中, 无法判断对 C<sub>2</sub> 数值的影响情况, 排水过程中期的水体排泄快慢变化规律不明显。

### 3.1.3 对排水过程末期的影响

在介质排水过程中, 地下暗河下半区的水位下降过程对应介质排水末期, 因而其单位时间排水量 C<sub>3</sub> 随落水洞横截面积的变化反映了落水洞对裂隙-管道介质排水过程末期的影响。根据表 1 数据绘制 C<sub>3</sub>-落水洞横截面积关系图, 见图 5。

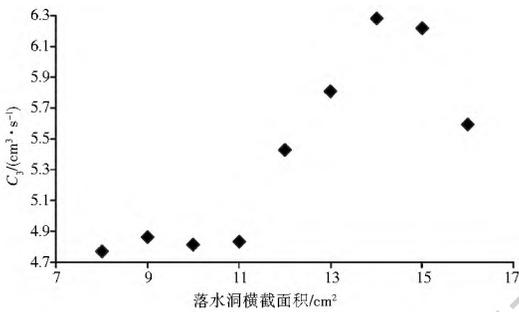


图 5 C<sub>3</sub>-落水洞横截面积关系

Fig. 5 Relation diagram between C<sub>3</sub> and the cross sectional area of the sinkhole

由图 5 可知, 在落水洞横截面积从 8 cm<sup>2</sup> 增大至 11 cm<sup>2</sup> 的过程中, C<sub>3</sub> 分布在 4.7~4.9 cm<sup>3</sup>/s 之间, 且明显没有上升趋势; 在落水洞结构横截面积从 12 cm<sup>2</sup> 增大至 16 cm<sup>2</sup> 的过程中, C<sub>3</sub> 分布在 5.4 cm<sup>3</sup>/s 以上, 变化趋势不明显。

落水洞横截面积在从 8 cm<sup>2</sup> 增大至 11 cm<sup>2</sup> 这一过程中, 对 C<sub>3</sub> 数值不存在明显的影响, 排水过程末期的水体排泄快慢没有明显的变化; 从 11 cm<sup>2</sup> 增大至 12 cm<sup>2</sup> 时, C<sub>3</sub> 数值有了明显的增大趋势, 排水过程末期的水体排泄明显加快; 在从 12 cm<sup>2</sup> 增大至 16 cm<sup>2</sup> 这一过程中, 无法判断对 C<sub>3</sub> 数值的影响情况, 排水过程末期的水体排泄快慢变化规律不明显。

### 3.1.4 对排水过程不同阶段影响的比较及原因分析

介质排水过程不同阶段的单位时间排水量随落水洞横截面积的变化既有共同特点, 也有差异之处。根据表 1 数据绘制各分区单位时间排水量-落水洞

横截面积关系图, 如图 6。

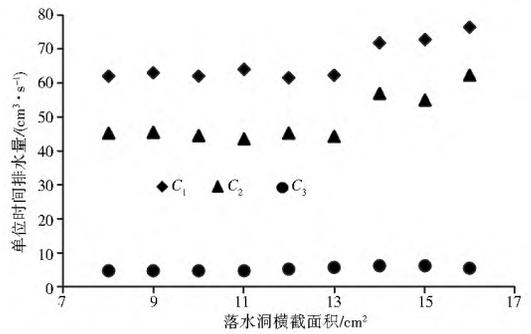


图 6 各分区单位时间排水量-落水洞横截面积关系

Fig. 6 Relation diagram between the water discharge per unit time of each region and the cross sectional area of the sinkhole

由图 6 及上文可知: C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 均有随落水洞横截面积增大而增大的趋势, 这种趋势均在落水洞横截面积达到某一阈值后才明显显现; 在相同落水洞横截面积条件下, C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 在数值上满足 C<sub>1</sub> > C<sub>2</sub> > C<sub>3</sub> 的关系并且随着落水洞横截面积的增大, C<sub>3</sub> 先于 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 出现增大趋势。

落水洞横截面积的增大对含水介质结构的影响为增大其储水空间和导水空间。储水空间的增大使得含水介质在排水时有更多地水量可以排出, 而导水空间的增大使得在同样的含水量的情况下可以更为快速地将水体排出, 这两方面的影响使得含水介质的单位时间排水量随着落水洞横截面积的增大而增大。

在落水洞横截面积增大到某一阈值后, 单位时间排水量才出现明显的增大趋势。这是由于相比于含水介质原有储水空间的体积, 落水洞横截面积增大导致的储水空间体积的增加量很小, 故而只有当落水洞横截面积的增大量累积的一定值时, 才会对含水介质的单位时间排水量产生明显的影响。

在相同落水洞横截面积条件下, C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 在数值上满足 C<sub>1</sub> > C<sub>2</sub> > C<sub>3</sub> 的关系。在介质排水过程初期, 介质内水体大部分为饱和水体, 相较于中期和末期, 水体势能大、流速快, 因而单位时间内排出的水量在三个阶段中是最大的。在介质排水过程末期, 介质内水体大部分为非饱和水体, 相较于初期和中期, 水体势能小、流速慢, 因而单位时间排水量在三个阶段中最小。

随着落水洞横截面积的增大, C<sub>3</sub> 先于 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 出现增大趋势。介质导水空间的增大导致介质排水速率的增大, 落水洞截面的增大对各个介质分区导水空间影响的差异并不明显, 因而带给各个分区排水速率的绝对增量差异不大; 但是各个分区原有的排水速率差异很大, 地下暗河下半区的排水速率远远

小于其他区域。所以落水洞截面增大带给各个分区排水速率的增大效应就明显不同,因而 $C_3$ 对落水洞截面增大的响应要先于 $C_1$ 和 $C_2$ 。

### 3.2 对介质排水过程的整体影响及分析

裂隙-管道介质整体的单位时间排水量 $C_4$ 随落水洞横截面积的变化反映了落水洞对裂隙-管道介质排水过程的整体影响。根据表1数据绘制 $C_4$ -落水洞横截面积关系图,如图7。

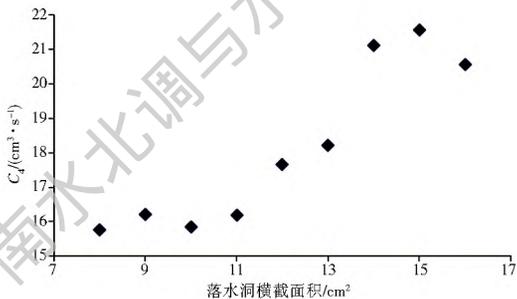


图7  $C_4$ -落水洞横截面积关系

Fig. 7 Relation diagram between  $C_4$  and the cross sectional area of the sinkhole

由图7可知,在落水洞横截面积从 $8\text{ cm}^2$ 增大至 $11\text{ cm}^2$ 的过程中, $C_4$ 分布在 $15.7\sim 16.3\text{ cm}^3/\text{s}$ 之间,且明显没有上升趋势;在落水洞横截面积为 $12\text{ cm}^2$ , $13\text{ cm}^2$ 时, $C_4$ 分别为 $17.7\text{ cm}^3/\text{s}$ 和 $18.2\text{ cm}^3/\text{s}$ ;在落水洞横截面积为 $14\text{ cm}^2$ , $15\text{ cm}^2$ , $16\text{ cm}^2$ 时, $C_4$ 分布在 $20.5\text{ cm}^3/\text{s}$ 以上,变化趋势不明显。

落水洞结构横截面积在从 $8\text{ cm}^2$ 增大至 $11\text{ cm}^2$ 这一过程中,对 $C_4$ 数值不存在明显的影响,介质水体排泄快慢没有明显的变化;从 $11\text{ cm}^2$ 增大至 $14\text{ cm}^2$ 这一过程中, $C_4$ 数值有了明显的增大趋势,介质水体排泄明显加快;在从 $14\text{ cm}^2$ 增大至 $16\text{ cm}^2$ 这一过程中,无法判断对 $C_4$ 数值的影响情况,介质水体排泄快慢变化规律不明显。

裂隙-管道介质整体的单位时间排水量对落水洞截面增大的响应特点综合了各介质分区的响应特点。介质整体的结构比介质分区更为复杂,其单位时间排水量的响应过程也更为复杂:随着落水洞横截面积的增大,介质整体的单位时间排水量在初始阶段并不受其影响;当增大到一定值时,介质整体的单位时间排水量才随之增大;继续增大到又一定值后,介质整体的单位时间排水量的变化情况在本文中并不清楚。介质整体的单位时间排水量的响应过程由两个落水洞横截面积值划分为三个阶段,这两个值的大小和含水介质结构有关系。

## 4 结论

本文利用裂隙-管道介质物理模型进行了多组

试验,探究落水洞对介质排水过程的影响。通过分析,主要得到以下三点结论。

(1) 落水洞横截面积的增大对裂隙-管道介质的影响为增大其储水空间和导水空间。

(2) 落水洞横截面积的增大会加快裂隙-管道介质的排水过程,排水过程对落水洞横截面积增大的响应在横截面积的增大量达到某一阈值后才会发生,该阈值和介质结构有关。

(3) 裂隙-管道介质排水过程的不同阶段对落水洞横截面积增大的响应阈值不同,末期的阈值小于初期、中期的阈值。

本文研究基于众多落水洞的某一落水洞,其位于实际地下水水流系统的某一位置,为了研究的简便,现有模型设计的是该落水洞下游的一定区域,没有考虑该落水洞上游区域。在此模型的基础上,后续研究中可以考虑包含多个落水洞的含水介质系统,使落水洞两侧均有裂隙-管道介质。同时后续研究可以将现有物理模型中的裂隙-管道介质设计为不规则的结构,这样也将使室内的物理模型更加符合野外实际的水文地质条件。

### 参考文献(References):

- [1] 袁道先. 岩溶学词典[M]. 北京:地质出版社,1988. (YUAN Dao xian. Glossary of karstology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. (in Chinese))
- [2] 俞锦标. 中国喀斯特发育规律典型研究[M]. 北京:科学出版社,1990. (YU Jir biao. Typical studies on developmental regularity of karst in China[M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese))
- [3] Neretnieks I, Erik sen T, T%htinen 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.
- [4] Quinn J J, Tomask o D, Kuiper J A. Modeling complex flow in a karst aquifer[J]. Sedimentary Geology, 2006, 184(3): 343-351.
- [5] 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, 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)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.01.007
- [6] 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. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201503206 (in Chinese))
- [7] 王熹,束龙仓,张春艳,等. 平行裂隙沿程水头损失规律的实验

- 研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(03): 1-6. (WANG Xi, SHU Long-cang, ZHANG Chuan-yan, et al. Experimental study of the law on hydraulic headloss in paralleled fractures[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(03): 1-6. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.03.01 (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.03.01
- [8] 耿克勤, 陈凤翔, 刘光延, 等. 岩体裂隙渗流水力特性的实验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1996, 36(1): 102-106. (GENG Ke-qin, CHEN Feng-xiang, LIU Guang-yan, et al. Experimental research of hydraulic properties of seepage flow in fracture[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 1996, 36(1): 102-106. (in Chinese))
- [9] 钱家忠, 赵卫东, 刘咏, 等. 小隙 ( $b < 3 \text{ mm}$ ) 单一流径基岩水平均流速的实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(2): 35-38. (QIAN Jia-zhong, ZHAO Wei-dong, LIU Yong, et al. The average velocity test of bedrock water flow in a single fracture within 3 mm width[J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(2): 35-38. (in Chinese))
- [10] 钱家忠, 赵卫东, 潘国营. 单一流径基岩裂隙水流态的实验研究[J]. 焦作工学院学报: 自然科学版, 2000, 19(3): 192-195. (QIAN Jia-zhong, ZHAO Wei-dong, PAN Guo-ying. The experimental study of motion type of the flow in a single fracture[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology: Natural Science, 2000, 19(3): 192-195. (in Chinese))
- [11] 钱家忠, 李长青, 李开红, 等. 基岩裂隙水水位沿程变化曲线方程的实验研究[J]. 安徽地质, 2001, 11(2): 158-160. (QIAN Jia-zhong, LI Chang-qing, LI Kai-hong, et al. Experimental study on bedrock water table changing with distance in a single fracture within 3 mm width[J]. Geology of Anhui, 2001, 11(2): 158-160. (in Chinese))
- [12] Qian J Z, Zhan H B, Luo S H, et al. Experimental evidence of scale dependent hydraulic conductivity for fully developed turbulent flow in a single fracture[J]. Journal of Hydrology, 2007, 339: 206-215.
- [13] 刘咏, 钱家忠, 赵卫东. 窄缝裂隙水流雷诺数的实验研究[C]. 第七届全国水动力学学术会议暨第十九届全国水动力学研讨会文集(上册), 2005: 475-480. (LIU Yong, QIAN Jia-zhong, ZHAO Wei-dong. The laboratory study on the reynolds numbers of groundwater flow in a single fine fracture[C]. Proceedings of Seventh National Conference on Water Dynamics and the Nineteenth National Symposium on Water Dynamics (Volume 1), 2005: 475-480. (in Chinese))
- [14] 沈振中, 陈雾, 赵坚. 岩溶管道与裂隙交叉渗流特性实验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 137-145. (SHEN Zhen-zhong, CHEN Fen, 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] 腾强, 王明玉, 王慧芳. 裂隙管道网络物理模型水流与溶质运移模拟试验[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(1): 54-60. (TENG Qiang, WANG Ming-yu, WANG Hui-fang. Experiments on fluid flow and solute transport in the fracture network pipe model[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 31(1): 54-60. (in Chinese)) DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2014.01.009
- [17] Huang Y, Tang Y, Zhou Z, et al. Experimental investigation of contaminant migration in filled fracture[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(3): 1205-1211.
- [18] 刘波, 王明玉, 张敏, 等. 裂隙网络管道模型弥散试验[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2016(01): 230-239. (LIU Bo, WANG Ming-yu, ZHANG Min, et al. Dispersivity experimental investigation based on fracture network pipe model[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2016(01): 230-239. (in Chinese)) DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201601207
- [19] 张祖莲. 清江利川落水洞过流能力分析[J]. 中国农村水利水电, 2001(09): 36-38. (ZHANG Zu-lian. Analysis on the flow capacity of the sinkhole in Lichuan, Qingjiang[J]. China Rural Water and Hydropower, 2001(09): 36-38. (in Chinese))
- [20] 徐一帆, 冉华, 陈虹, 等. 小流域条件下岩溶落水洞的过流能力评价方法探索[J]. 凯里学院学报, 2013, 31(6): 122-124. (XU Yi-fan, RAN Hua, CHEN Hong, et al. Study on water ability to transflux the karst hole in the small valley[J]. Journal of Kaili University, 2013, 31(6): 122-124. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-9329.2013.06
- [21] 蒙海花, 王腊春, 苏维词, 等. 基于落水洞的岩溶半分布式水文模型的构建及其应用[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 550-554. (MENG Hai-hua, WANG La-chun, SU Wei-ci, et al. development of a karst sinkhole based semi distributed hydrological model and its application[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(4): 550-554. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2009.04.006
- [22] 常勇. 裂隙-管道二元结构的岩溶水文过程分析与模拟[D]. 南京: 南京大学, 2015. (CHANG Yong. Analysis and simulation of the hydrological process of the karst aquifer with fracture conduit dual structure[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese))