

焦友军,潘晓东,曾洁,等.岩溶管道结构影响泉流量变化的数值模拟研究[J].中国岩溶,2017,36(5):736-742.
DOI:10.11932/karst2017y48

岩溶管道结构影响泉流量变化的数值模拟研究

焦友军,潘晓东,曾洁,任坤

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西桂林 541004)

摘要:采用 MODFLOW-CFP 建立管道流数值模型,模拟岩溶含水系统在暴雨期的响应过程,以泉口流量峰值作为因变量,分别对控制管道结构的4个参数以及落水洞集中补给比例进行调整,研究管道结构如何控制泉流量变化过程。结果表明:管道直径、管壁渗透系数和落水洞补给比例对泉口流量峰值均表现为正相关,其中管壁渗透系数影响最大;管道弯曲度值较小时其增大促进出口流量峰值变大,当径流途径变长引起的流量减小幅度超过管壁面积变大引起的流量增大幅度时,流量峰值逐渐变小;管壁粗糙度在达到两个相对应的雷诺数临界值时水流状态发生突变,导致流量峰值也表现为两次突变。

关键词:岩溶含水介质;管道参数;数值模拟;MODFLOW-CFP

中图分类号:P641.134

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2017)05-0736-07

0 引言

岩溶地区丰富的地下水资源对当地生产生活具有重要意义,但岩溶形态空间分布的不均匀性导致其赋存规律难以掌握,给岩溶水开发利用带来很大困难^[1-2]。泉口流量对降雨的响应变化可用于推测岩溶水系统内部信息,将系统作为黑箱或灰箱模型处理,对系统的输入和输出进行定量分析,是目前研究系统内部结构的一种常用方法^[2-4],如柯婷婷等^[5]将泉流量过程线分为前期蓄水量、快速径流和慢速径流三个组成部分,通过建立后寨岩溶水系统降雨量和泉流量的传递函数得出从上游到下游快速径流和慢速径流所占的比例变化,进而说明上下游裂隙管道岩溶发育程度变化。但是泉口流量变化的复杂程度使得对系统内部信息的获取非常有限,现有研究仅可概述岩溶管道的发育程度或者简单推测内部管道结构的组合情况^[6]。

为进一步挖掘泉流量变化所包含的岩溶水系统内部管道结构信息,可从岩溶水系统分布式模型模拟

的角度探求管道结构如何控制泉流量变化,通过已知管道结构来研究泉流量变化规律,为实际岩溶水系统泉流量变化的解读提供依据,如孙晨等^[7]基于物理试验结果对管道和裂隙采用等效渗透系数法,通过 Visual MODFLOW 建立水流数值模型,选取模型结构参数包括排水沟的平均渗透系数、垂直层面裂隙等效渗透系数以及管道等效渗透系数,并分析了这些参数对泉流量过程的影响程度;常勇^[8]使用 MODFLOW-CFP 管道流模型讨论了平均管道直径以及局部管道直径、管道中水流状态对泉流量变化的影响。管道结构影响泉流量变化的参数除管道直径和管壁渗透系数外还包括管道弯曲度、粗糙度等几何形态参数^[9],管道几何形态对水流状态和管壁水量交换均有影响,另外落水洞发育规模与管道直接相连也控制着泉流量的直接补给比例。

对于岩溶含水介质内部结构的概化研究国内外均开展了大量探索,从简单等效多孔介质到双重介质,再到裂隙介质、管道流的引入,以及基质、裂隙和管道三重介质的概念^[1,2,8],这些方法在不同的岩溶

资助项目:中国地质调查局地质调查项目“乌蒙山连片贫困缺水地区1:5万水文地质调查”(DD20160285)、中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2017028)联合资助

第一作者简介:焦友军(1990—),男,研究实习员,从事岩溶水研究。E-mail: jiaoyj@karst.ac.cn。

通信作者:潘晓东,男,高工,从事岩溶水研究。E-mail: panxiaodong@karst.ac.cn。

收稿日期:2017-03-28

含水介质概化中均取得了较好结果。其中对于相对均匀的小裂隙和大中型裂隙以大小两种孔隙度的多孔介质来代替,即双重介质方法^[10]。而对于岩溶含水层中大规模的溶蚀裂隙和地下河管道,则需要采用管道和周围含水介质相结合的方式,同时管道中水流状态多为紊流^[11],需结合管道非达西流经验公式与多孔介质水流运动方程进行模拟^[12]。本文从管道结构控制泉流量角度建立岩溶管道流模型,模拟降雨过程中泉口流量变化,探求不同管道特征参数对泉流量变化的影响。

通过模拟已知岩溶水系统的泉流量过程,研究泉流量曲线与岩溶管道结构的对应关系,找出泉流量曲线变化过程所代表的岩溶水系统信息,据此规律可研究其他未知岩溶水系统的泉流量过程线,推测其岩溶管道结构信息,以期对岩溶地区地下水资源量准确评价和开发利用提供参考依据。

1 研究方法

1.1 岩溶管道流数学模型

地下水以不同水流状态赋存于不同含水空隙中,孔隙含水层和均匀的中小型裂隙含水层可概化为孔隙介质,水流为层流;大型裂隙、管道水流包括层流和紊流,其过渡可根据雷诺数(Re)上下界区分。多孔介质含水层中水流满足达西(Darcy)定律,其三维水流方程^[13]为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)\pm W=S_s\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) \quad (1)$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分别为沿渗透主轴方向的渗透系数($L \cdot T^{-1}$); h 为水头(L); W 为单位体积的补排流量(T^{-1}); S_s 为贮水率(L^{-1}); t 为时间(T)。

大型裂隙和管道中的水流为紊流时不再满足Darcy定律,此时可用Darcy-Weisbach方程来表示圆管中充满水流状态方程:

$$\Delta h = h_L = f \frac{\Delta l}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

式中: Δh 和 h_L 为沿圆管 Δl 长度(L)上的水头损失(L); f 为摩擦因子(无量纲); d 为管道直径(L); V 为平均流速($L \cdot T^{-1}$); g 为重力加速度常数($L \cdot T^{-2}$)。当管道水流为未充满状态时,方程中 d 需修正为有效直径(d_e)。Darcy-Weisbach方程对圆管中的层流和紊流均适用。由式(2)中平均流速和水流断面即可

得出流量表达式(3):

$$Q = A \sqrt{\frac{\Delta h d 2g}{f \Delta l}} \quad (3)$$

当管道水流为层流时,断面上流速表现为抛物线状,流量由层流Hagen-Poiseuille方程表示:

$$Q = -A \frac{\rho g d^2 \Delta h}{32 \mu \Delta l \tau} \quad (4)$$

式中: τ 为弯曲度(无量纲),为管道实际长度与直线长度之比;水的密度(ρ)和动力粘度(μ)是地下水温度的函数。

当管道水流为紊流时,摩擦因子(f)为雷诺数(Re)和管壁平均粗糙度(k_c)的函数,可用Colebrook-White经验公式表示^[12]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51 \mu}{R_e \sqrt{f}} + \frac{k_c}{3.71 d} \right) \quad (5)$$

结合Darcy-Weisbach方程得:

$$Q = - \sqrt{\frac{|\Delta h| g d^5 \pi^2}{2 \Delta l \tau}} \log \left(\frac{2.51 \mu}{\sqrt{2 \frac{|\Delta h| g d^3}{\Delta l \tau}} + \frac{k_c}{3.71 d}} \right) \frac{\Delta h}{|\Delta h|} \quad (6)$$

管道与含水层之间的水流交换计算是通过管壁传导系数(pipe conductance)和水头差来实现的:

$$Q_{ex} = \alpha_{p,a} (h_p - h_a) \quad (7)$$

式中: Q_{ex} 为交换流量($L^3 \cdot T^{-1}$), $\alpha_{p,a}$ 为管壁传导系数, h_p 为管道中水位, h_a 为含水层水位;管壁传导系数由管壁渗透系数(K_p)和管壁面积决定;水量交换发生于全部管壁且为层流。

岩溶管道水流模拟中需要获取多个管道参数,其中地下洞穴探测可获得管道直径和弯曲度;粗糙度通过对地下河管道洞壁的微观几何形态进行采样和平均,然后使用洞壁平均起伏高度来计算^[12]。而雷诺数和管壁渗透性仅在室内实验或者局部现场测试才能获得,平均渗透性和管道中各处的雷诺数很难获取。实验室通过对圆管和其他形状的管道水流研究可得出雷诺数下界的范围,雷诺数上界一般在模拟校正时获得^[9]。落水洞发育规模对地下水系统的影响可以通过监测落水洞集中补给量占降水入渗的补给比例来反映。

1.2 MODFLOW-CFP数值模型

MODFLOW-CFP是美国地质调查局Shoemaker等^[12]在MODFLOW-2005基础上结合管道流、优势流开发应用于岩溶地区地下水流的数值模拟软件,采用有限差分法进行网格剖分、Newton-Raphson迭

代方法数值求解。CFP 模型可以实现三种水流模式:CFPM1 将多孔介质水流与具体管道模型通过水量交换边界耦合;CFPM2 针对某一含水层中有大量复杂且难以详细刻画的大空隙、地下水流既有层流也有紊流的情况,实现对某一层优势流的模拟^[14];CFPM3 是前两种模式的组合。该模型体现了岩溶含水层多孔隙度和非达西流的特征,同时继承了 MODFLOW 众多模块对多孔介质达西流模拟的优势^[8]。

2 岩溶管道水流模拟

2.1 管道流模型建立

如图 1 所示,该理想模型取自贵州六冲河流域深切峡谷地带岩溶管道含水层的基本特征,含水系统由裂隙溶隙网络和管道组成,接受落水洞集中补给^[15-16]。将裂隙网络基质以等效连续介质处理,概化水平渗透系数取经验值为 $0.4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$,由于岩溶顺层发育较垂向强烈,水平与垂向渗透系数比值根据该地区相关资料取平均值为 5,概化含水层厚度为 100 m,边界长宽均为 1 000 m。

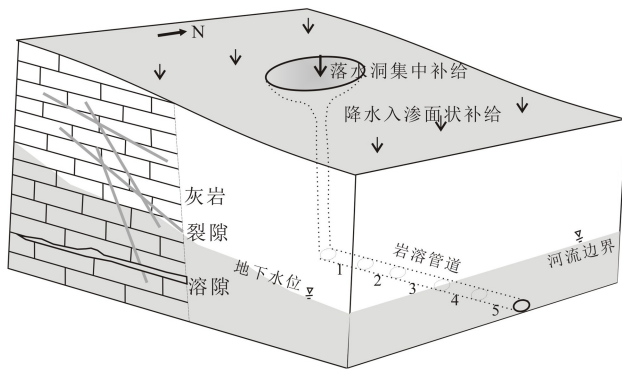


图 1 岩溶含水层裂隙、管道模型示意图

Fig. 1 Concept model of karst aquifer with fractures and conduit

模型计算网格划分为 5 层,每层厚 20 m,图 2 为第 5 层网格划分,每个网格长宽均为 100 m。东侧为河流边界,水位保持恒定 45 m。管道分布在第 5 层,呈单管形状,占据 6 个网格节点,相邻两个节点连接构成一个管道单元,共形成 5 个管道单元,总长度为 50 m,其中第二个网格节点与地表落水洞相连接受集中补给,落水洞位于管道 1 和管道 2 之间。管道直径为 0.2 m,弯曲度为 1.0,粗糙度为 0.001 m。雷诺数上下临界值分别设为 2 000 和 4 000。管壁渗透性受到管壁低渗透性充填物的影响,其渗透系数取平均值 $0.005 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

岩溶含水层接受地表降水面状补给和落水洞集中补给,暴雨期产生的降水入渗速率随时间的变化如图 3 所示,落水洞接受降水补给量的 2% 直接进入地下管道。根据当地年降水量、地表径流和蒸发量确定系统的基础净补给量,作为整个模拟过程平水期的面状补给源^[16],并综合考虑土壤、表层岩溶带补给下渗,最后到达潜水含水层的净补给量取值为 $0.000 1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 。暴雨过程前 10 h 为平水期,地下水流为稳定流;暴雨期为第 10 h 至第 62 h,峰期为第 34 h 至第 38 h,暴雨后持续模拟 300 h。

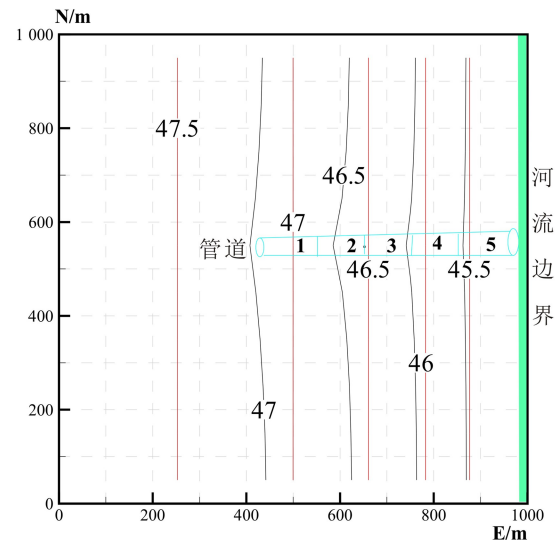


图 2 岩溶含水层第 5 层水位等值线图 (m)

(其中黑线和红线分别为有管道和无管道模拟等水位线图,绿色细线为管道位置,右侧为河流给定水头边界)

Fig. 2 Contours of water level in the 5th layer of karst aquifer

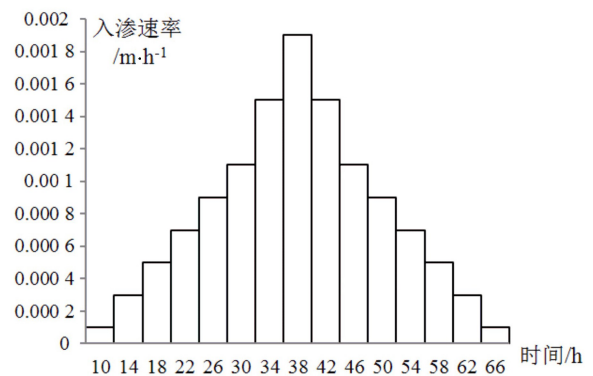


图 3 暴雨过程中含水层净补给速率随时间变化柱状图

Fig. 3 Histogram of net recharge on the aquifer in a storm period

2.2 模拟结果

图 2 为第 46 h(暴雨峰期后 8 h)第 5 层含水介质等水位线图,其中红色为无管道时的等效多孔介质等

水位线图,黑色为岩溶管道存在时含水层等水位线图,可看出含水层水位均低于无管道时的水位,且管道处水位低于两侧;红色等水位线与河流平行,而黑色等水位线凹向管道出口。由于河流边界水位高于

第5含水层顶板标高,使其处于承压状态,管道中水流状态在模拟期除管道1雷诺数在2 000到4 000之间,为层流向紊流的过渡状态,其他管道雷诺数从西向东由8 000增至17 000,均为紊流。

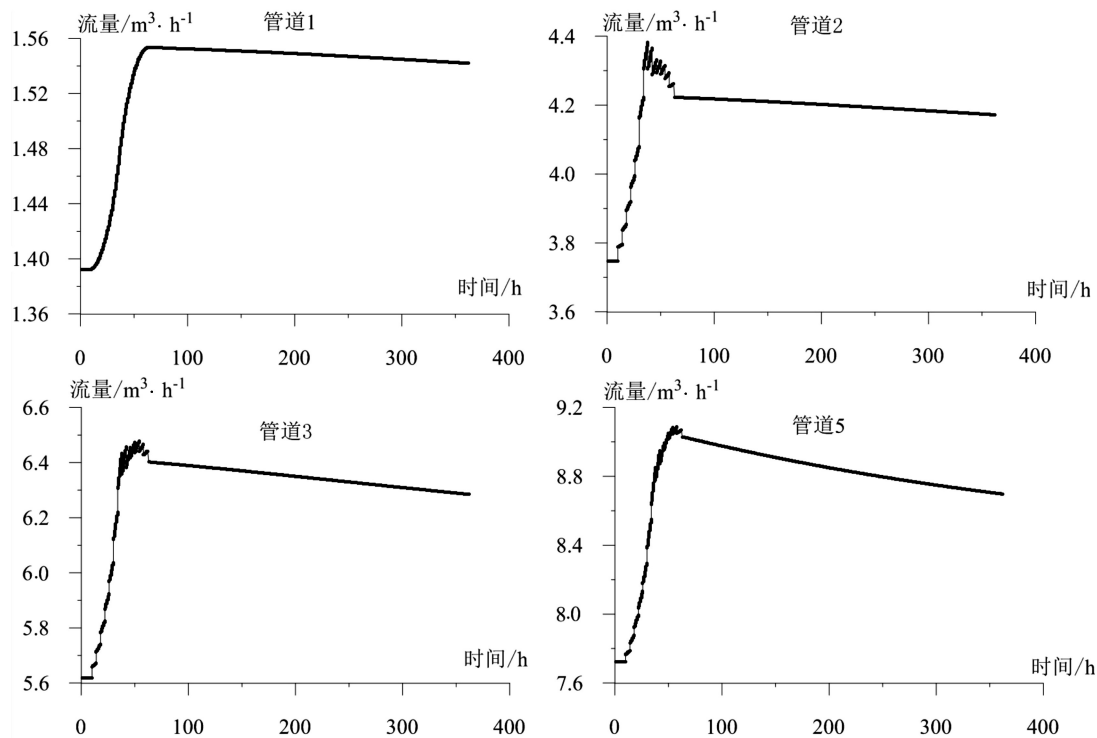


图4 各管道中流量在模拟期的变化

Fig. 4 Modeled flow changes in different conduits

图4为各管道在模拟期的流量变化,其中管道1和管道2接受落水洞集中补给,管道5代表泉口排泄流量。管道中水流自西向东,由于管道1东侧接受落水洞补给与水流方向相反,由 $1.38 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 增大至峰值 $1.54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,达到峰值时间为65 h;管道2接受落水洞补给与水流方向相同,流量由 $3.75 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到峰值 $4.35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,管道2增长流量是管道1的3倍,在38 h达到峰值;管道3在54 h达到最大峰值,比暴雨峰期晚了16 h;泉口流量(管道5)在58 h达到峰值 $9.01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,比暴雨峰期时间晚了20 h,到模拟期结束流量逐渐减小至 $8.63 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,后期曲线平缓变化幅度较小。尽管后期泉口流量逐渐变小,但并没有恢复到暴雨之前的流量 $7.67 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。延长模拟时间至3 000 h流量最终降至 $8.02 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,多次延长模拟期得出恢复暴雨前流量的时间约为1 000 d(24 000 h)。

由于管道2接受落水洞集中补给,对降水变化响

应及时,流量峰值出现时间与暴雨峰期相同。而其他管道较暴雨峰期时间均有不同程度的延迟,不同管道地下水的径流、排泄过程也不同。在相对短暂的暴雨期后,泉口流量由峰值变小恢复到暴雨之前的流量需要相当长的时间,说明一次极端降水对含水层的补给是影响巨大的,流量曲线会出现一个强烈的拖尾现象,体现了岩溶含水层的蓄存能力^[16]。

3 讨论

管道中水流流量受到管道直径、弯曲度、粗糙度以及管壁渗透性的影响,同时与补给条件和水流状态密切相关。为探求这些因素对管道流量的影响,在模型中仅改变一个参数,其他因子均与第三节模型初始参数相同,选取每次模拟中流量曲线的峰值作为因变量,流量峰值与各参数变化如图5所示。

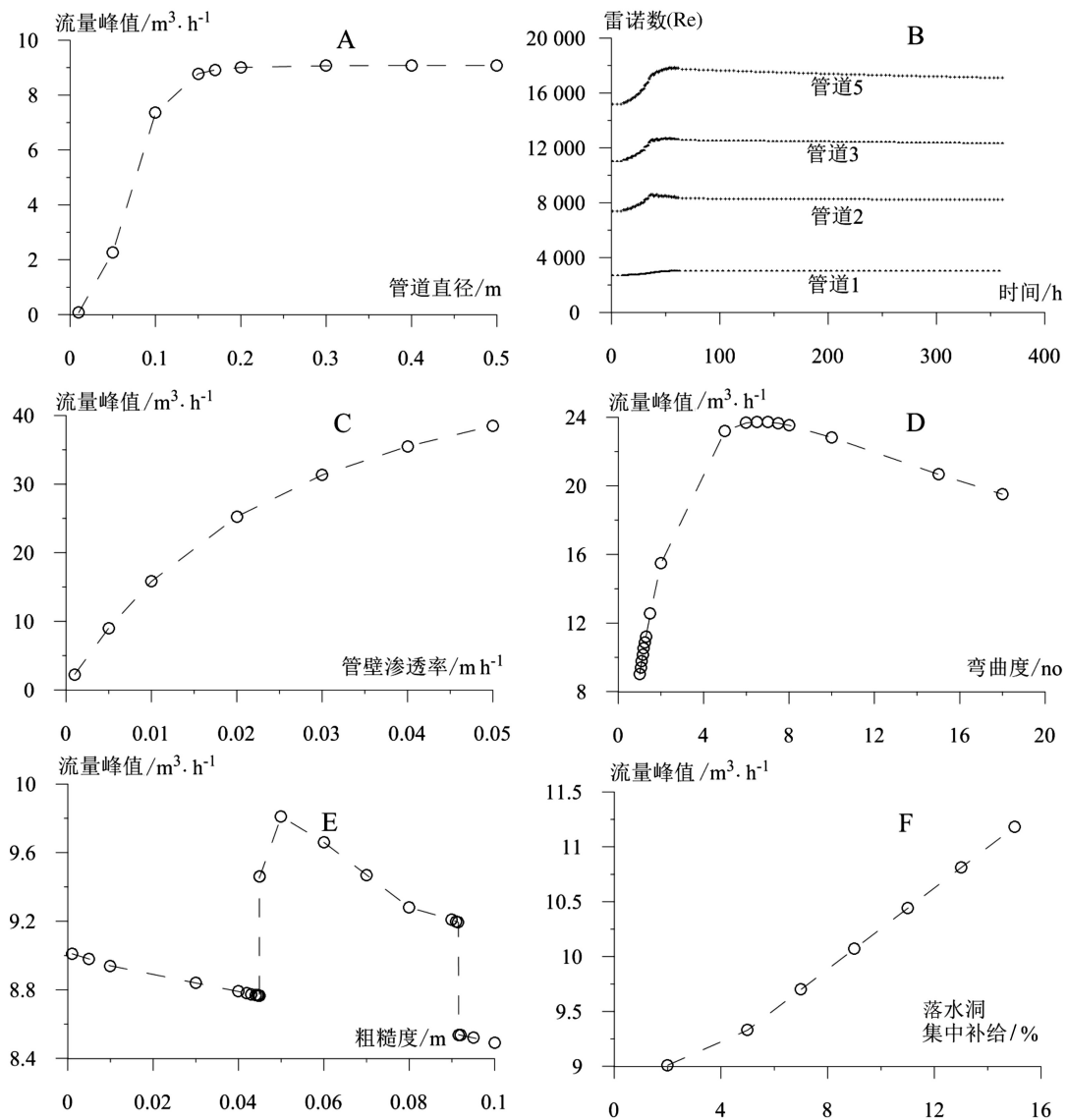


图5 不同管道形态参数变化对泉口流量峰值的影响

Fig. 5 Effects of various conduit parameters on spring-outlet flow peak

3.1 管道直径(d)

图5A中管道直径变化从0.01 m到0.5 m时,初期泉口流量随管径变化逐渐变大,而在管径达到0.2 m继续扩大流量峰值受管径的影响很小,稳定在 $9.01 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,即管径增大到一定程度后不再是制约泉口流量变化的主要因素。图5B给出了当管道直径为0.5 m时各管道中水流Re随时间的变化,管道1中水流Re在模拟期间均小于下临界值2 000,水流状态为层流;管道2中Re在3 000和4 000之间,为层流向紊流过渡状态;管道3和管道5中Re的变化范围均超出了上临界值4 000,水流状态为紊流。据Dreybrodt^[3]当管壁越粗糙、管道越弯曲、管壁直径和形状突变时,雷诺数下界会变得更小,

水流也越容易转变为紊流,雷诺数上界在较平滑的管道中可达到12 000。这种相关性也表明当管径或其他参数变化过程中需相应调整雷诺数的上下临界值。

3.2 管壁渗透性(K_p)

当保持管道直径为0.2 m时,如图5C管壁渗透系数值变化范围从0.001到0.05 $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$,泉口流量峰值逐渐增大,增长速度逐渐变缓。在3.1节中管道直径大于0.2 m后流量峰值改变很小,而继续改变管壁渗透系数后泉口流量大幅增加,因此管壁渗透性是控制含水层与管道之间水量交换的重要参数。

3.3 管道弯曲度(τ)

改变管道弯曲度由1到20时,流量峰值曲线如图5D所示,可看出弯曲度为6时峰值达到最大,弯

曲度继续增大时流量峰值开始减小。出现这种现象的原因是管道弯曲度增大时管道长度变大,由此管道与含水层的管壁水量交换面积增大,进而使得泉口流量增大;另一方面弯曲度增大也会导致管道水流径流途径变长且更加曲折,使得水流受阻流速减小,泉口流量减小。因此模拟初期管壁水量交换面积增大引起的泉口流量增长量大于弯曲途径增加导致的流量减小量,流量峰值曲线表现为增大;但随着弯曲度持续增大,水流状态和流量峰值受管道径流途径曲折程度的影响变得明显,且大于管壁水量交换增加的影响,使得流量峰值曲线表现为减小。

3.4 管壁粗糙度(k_c)

为探求粗糙度的变化对水流状态和泉口流量的影响,选取粗糙度值变化范围 0.001 m 至 0.1 m。结果如图 5E 存在两个粗糙度临界值式,流量峰值表现为两次突变:首先流量峰值随粗糙度增大逐渐减小,当粗糙度增大至 0.044 9 m 时流量峰值由波谷 $8.76 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 突增至 $9.46 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,然后在粗糙度为 0.05 m 时达到波峰 $9.81 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,之后流量峰值逐渐变小,在粗糙度为 0.091 5 m 时流量由 $9.19 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 突减至 $8.54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。出现这种现象的原因是层流计算式(4)中与粗糙度无关,而紊流计算式(6)与粗糙度相关,当粗糙度逐渐增大至两种水流状态转变的雷诺数临界值时,该粗糙度两侧取值的管道水流状态的改变导致流量峰值在图中表现为突变;同时 Colebrook-White 公式中粗糙度与雷诺数之间的相关性使得峰值流量达到最大后转折变小;粗糙度继续增加使得管径内空隙越来越小,达到雷诺数临界值时水流状态由紊流向层流转变,流量峰值突减。模型中雷诺数上下界不能够随粗糙度变化而及时调整,同时雷诺数的获取本身就很难,这种现象可能存在与实际不符之处,其数值模型需进一步改进。

3.5 落水洞集中补给

图 5F 给出了不同落水洞集中补给比例对应的泉口流量峰值,补给比例从 2% 到 15%,两者近似呈直线关系,泉口流量对落水洞集中补给响应明显,在集中补给比例大于 5% 后几乎与暴雨同步,而补给比例为 2% 时泉口峰值流量比暴雨峰期晚了 20 h。落水洞与管道直接相连,其岩溶发育程度决定其接受补给的能力^[17-18],当其集中补给比例较大时就成为泉口流量最主要的补给来源;而在补给比例较小时落水洞集中补给导致泉口流量增加并不明显,管道与周围含水介质的水量交换是组成泉口流量的主要部分。

4 结 论

通过对暴雨过程中不同管道参数对应的岩溶水系统的泉口流量峰值变化进行模拟,得出如下结论:管道直径、管壁渗透系数和落水洞补给比例对泉口流量峰值均表现为正相关,且管壁渗透系数对泉流量变化影响最大;管道弯曲度初期增加使得管壁水量交换面积变大促进泉口流量峰值变大,但随着弯曲度继续增大,径流途径变长引起的泉口流量减小程度超过管壁面积增大引起的流量增大程度时,流量峰值逐渐变小;由于雷诺数与粗糙度参数之间的相关性,流量峰值呈现出先增大后减小的趋势,但在两个粗糙度值对应的雷诺数临界处水流状态发生突变,导致流量峰值也表现为两次突变。不足之处在于模型中雷诺数上下界不能随粗糙度变化而及时调整,需进一步改进。

致 谢:感谢编辑老师和匿名审稿专家提出的宝贵意见及对论文的修改润色。

参考文献

- [1] 袁道先,朱德浩,翁金桃. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [2] Birk S, Liedl R, Sauter M. Karst Spring Responses Examined by Process-Based Modeling[J]. Ground Water, 2006, 44(6): 832-836.
- [3] Dreybrodt W. Processes in karst systems: physics, chemistry, and geology[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] Reimann T, Geyer T, Shoemaker W B, et al. Effects of dynamically variable saturation and matrix-conduit coupling of flow in karst aquifers[J]. Water Resources Research, 2011, 47(11): 1-19.
- [5] 柯婷婷,束龙仓. 基于泉流量过程线的管道流与裂隙流识别[J]. 中国岩溶, 2015, 34(5): 460-467.
- [6] 扈志勇. 不同降雨过程下岩溶水文系统信息的响应研究[D]. 重庆:西南大学, 2010.
- [7] 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.
- [8] 常勇. 裂隙—管道二元结构的岩溶泉水文过程分析与模拟[D]. 南京:南京大学, 2015.
- [9] Hill M E. An evaluation of conduit conceptualizations and model performance[D]. Tampa, FL: University of South Florida, 2008.
- [10] 钱家忠,吴剑锋,董洪信,等. 徐州市张集水源地裂隙岩溶水三维等参有限元数值模拟[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 37-41.
- [11] Reimann T, Rehl C, Shoemaker W B, et al. The significance of turbulent flow representation in single-continuum models [J]. Water Resources Research, 2011, 47(9): 1-15.
- [12] Shoemaker W B, Kuniandy E L, Birk S, et al. Documentation of a conduit flow process (CFP) for MODFLOW-2005

- [M]. Reston, VA: U. S. Geological Survey Techniques and Methods, 2008.
- [13] 吴吉春, 薛禹群, 靳孟贵. 地下水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [14] 钱家忠, 潘国营, 吴剑锋, 等. 焦作矿区裂隙岩溶水优势流形成机理研究[J]. 水利学报, 2003, 34(6): 95-99.
- [15] 易连兴, 夏日元, 唐建生, 等. 地下水连通介质结构分析: 以寨底地下河系统实验基地示踪试验为例[J]. 工程勘察, 2010, 38(11): 38-41.
- [16] 刘丽红, 束龙仓, 鲁程鹏. 基于管道流模型的岩溶含水系统降雨泉流量响应规律: 以贵州后寨典型小流域为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(5): 1083-1089.
- [17] Kaufmann G. Modelling karst geomorphology on different time scales[J]. Geomorphology, 2009, 106(1): 62-77.
- [18] 毛亮, 于青春, 王敬霞, 等. 降雨对裂隙型岩溶含水系统演化影响的数值模拟研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 42-48.

Numerical modeling of the influence of karst-conduit structure on variation of spring flow

JIAO Youjun, PAN Xiaodong, ZENG Jie, REN Kun

(Institute of Karst Geology, CAGS / Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The spring hydrograph, such as variation of flow, can be used to extract information on the structure of karst conduits, while the complexity of these conduits makes such study not very successful. To solve this problem, this work employs a numerical model of the known karst conduit structure to reveal the relationship between the spring hydrograph and the conduit structure, which will help address this issue for real cases. This conduit flow model is built with MODFLOW-CFP to study the karst aquifer response in a storm period. The basic features of the karst aquifer of this simplified model are taken from a deeply-cut valley of the Liuchong river in Guizhou Province. This karst aquifer consists of a single conduit and a fracture network which is treated as an equivalent continuous porous medium. The valley is regarded as the river boundary of the karst water system, and the water level of the river is higher than the location of the spring outlet, so the conduit can be saturated with water. In the modeling spring hydrograph, the peak flow value is chosen as the dependent variable in the analysis of the karst conduit, and 4 parameters of the conduit structure and the recharge ratio of sinkhole are studied, respectively. The results show that the pipe diameter, wall permeability and the concentrated recharge of the sinkhole are characterized by positive correlation with the spring flow peak, of which the wall permeability has the greatest effect on the flow peak. When pipe bending is smaller, the spring flow becomes bigger, while the growth of the flow peak is limited by the tortuous flow path. The water flow status experiences two abrupt changes at the two critical Reynolds number of conduit-wall roughness, leading to twice of sudden variations of flow peak.

Key words karst aquifer, conduit parameters, numerical modeling, MODFLOW-CFP

(编辑 黄晨晖)