

孔隙-管道型西南岩溶地下河系统参数与 流量衰减系数关系的数值试验研究

田娟¹, 董贵明², 束龙仓³

(1. 江苏师范大学城市与环境学院, 徐州 221116; 2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221116;
3. 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 210098)

摘要: 流量衰减分析是地下河系统研究中常用的方法之一。为深入流量衰减分析研究, 在对地下河系统概化的基础上, 使用作者编制的地下河系统水流运动数值模拟程序 UGRFLOW9 分析了孔隙-管道型地下河系统特征与衰减特征之间的关系。结果表明: 第一段衰减系数与渗透系数、衰减含水层厚度、模型宽度及面积、管网密度和管道流量系数均成幂函数关系, 随着其数值的增加而减小; 第二段衰减系数与给水量关系不明显; 第二段衰减系数与渗透系数和管网密度成直线关系, 随着其数值的增加而增加; 第二段衰减系数与给水量、衰减含水层厚度、模型宽度及面积成幂函数关系, 随着其数值的增加而减小; 管道衰减系数与渗透系数、衰减含水层厚度和管网密度均成幂函数关系, 随着其数值的增加而减小, 与相应的管道流量系数也为幂函数关系, 管道衰减系数与给水量和含水层宽度关系不明显。

关键词: 岩溶; 地下河系统; 衰减分析; 衰减系数; 数值方法

中图分类号: P641.134

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2013)02-0013-06

西南岩溶地区分布的 3000 多条地下河是该地区地下水资源的重要组成部分^[1]。西南岩溶地下河系统分布的广泛性及其系统本身的复杂性, 已成为解决西南岩溶区水资源短缺问题、石漠化治理和多重介质水流运动规律的重点研究对象之一^[1]。

认识地下河系统水文地质基本特征是水资源开发利用的基础。目前, 我们仅能对少数研究程度比较高的地下河系统有比较多的认识, 大部分地下河系统水文地质特征并不清楚^[2]。这一方面是由于研究投入不足, 更主要的原因是系统本身的复杂性^[2~5]。在地下河系统地区已有的水文地质勘察方法往往不容易得到有效的结果, 水文地质特征认识不清已经成为研究中的最大障碍。研究人员在为获取系统水文地质特征方面做了大量的工作, 其中, 流量衰减分析是最常用的方法之一。

流量衰减过程是系统水文地质特征的集中反映, 通过分析衰减过程认识系统参数是可行的, 其研究已

有一百多年历史^[6~8]。衰减分析的数据主要来自于实测流量资料, 还有室内流量衰减分析试验^[9~10]。由于系统的复杂性, 通过室内试验分析难度较大。目前, 衰减分析主要是能够给出各含水介质所含水的体积, 对于系统参数与衰减特征之间的关系缺乏研究, 而系统参数与衰减特征之间的关系是通过衰减特征更深入地认识系统参数的重要前提。

目前, 地下河系统特征与衰减特征之间的关系还不清楚, 尤其在定量化研究方面更是比较欠缺。本文首次尝试通过数值试验的方法研究孔隙-管道型地下河系统参数与衰减特征之间的关系, 并得到衰减特征与系统参数之间的函数方程, 为通过衰减特征更深入地认识系统特征提供参考。

1 孔隙-管道型西南岩溶地下水系统概念模型及数值模型

袁道先等^[12]、裴建国等^[13]和郭纯青^[11]都对西南岩溶地下水系统的分类进行了研究。结合岩溶地下河的类型、分布及其开发利用, 裸露型、裸露-覆盖型和覆盖型且管道与周围空隙介质水力联系密切、具有集中排泄的地下河系统应是研究的重点^[14]。根据地下河系统分类的研究成果, 西南岩溶地下河系统的含水介质类型主要包括孔隙、裂隙和管道。其中裂隙的规模和裂隙面参数的变化范围较大, 对于细小的裂隙可

收稿日期: 2012-04-15; **修订日期:** 2012-06-05

基金项目: 中国矿业大学青年科研基金资助项目(2009A031); 国家“973”计划项目(2006CB403204); 中国矿业大学人才引进资助项目; 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 田娟(1980-), 女, 讲师, 研究方向为水文与水资源保护。

E-mail: tianjuan980106@126.com

以概化为孔隙,规模较大的裂隙可以概化为管道,在这种情况下,地下河系统实际上就变成了孔隙-管道型地下河系统。比如,贵州羊场地下河系统中的陇戛和朱官-陇黑地下河、湖南洛塔地区的烈士大洞地下河、亚大沟岩溶泉、响水沟岩溶泉、八仙洞等均为孔隙-管道型地下河系统;也存在裂隙的规模和特征既不能概化为孔隙,也不能概化为管道的情况,这种情况下,地下河系统实际上为孔隙-裂隙-管道型地下河系统。本文将针对孔隙-管道型地下河系统展开研究。

为研究地下河系统特征与流量衰减特征之间的关系,建立如图1所示的基本计算模型。立方体含水层,底部水平, L 、 W 和 B 分别为模型的长、宽、高;管道水平位于孔隙含水层底部中间,长度略小于含水层长度,出口端与含水层边界一致,上游端在含水层内部靠近边界的部位,宽度和高度沿管道方向不变,出口为定水头边界,入口为流量边界,管道水流可能是层流或者紊流,一维承压或无压流动,水流运动符合连续性方程和运动方程;孔隙介质均质、各向同性,水流三维运动,含水层顶部为自由面边界,其他部位除管道出口外均为隔水边界;在管道上游末端(入口)设置一个落水洞,以实现降雨过后管道流量可以有较快明显上升。

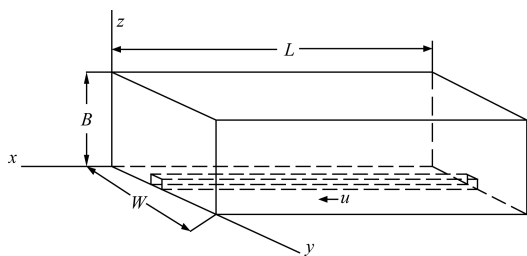


图1 计算模型图

Fig. 1 Calculation model

图1所示模型结构中的孔隙含水层为潜水含水层,这与很多实际的地下河系统是一致的,主要是一些裸露-裸露-覆盖型的岩溶地下河系统,比如贵州后寨地下河系统。因此,图1的模型结构从含水层埋藏条件和含水介质类型等方面都有一定的针对性,可以用来研究孔隙-管道型地下河系统参数与衰减系数的关系。

使用作者编制的地下河系统水流运动数值模拟程序 UGRFLOW09 对计算模型进行求解^[11,14-16]。该程序整体采用迭代法实现,孔隙介质单元采用空间多面体剖分,地下河管道采用一维剖分。程序对自由面问题、管道有压和无压转换、管道层流和紊流转换、计算时间尺度及落水洞等问题均进行了处理。

基本模型计算参数如表1所示。孔隙含水层剖分

5201个单元,管道剖分30个单元,模型共5层。从计算开始的一定时间内保持雨强不变,然后停止降雨,分析流量衰减曲线。第一阶段衰减系数 α_1 和第二阶段衰减系数 α_2 分别是系统出口流量衰减的第一、二阶段对应的指数衰减方程中的衰减系数。管道衰减系数为管道流量衰减过程对应的指数衰减方程中的衰减系数。管道流量系数为第一阶段衰减的初始时刻系统出口流量与管道流量之比。

表1 模型计算参数表

Table 1 Parameters of calculation model

参数	取值	参数	取值
模型长度	1000m	管道流态	层流、紊流
模型宽度	300m	雨强	$5.56 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$
含水层初始水位	29m	降雨入渗系数	0.3
管道出口水深	0.3 m	落水洞汇水面积	50 m^2
给水度	0.1	产水系数	0.5
管道宽和高	1m	降雨历时	200min
管道初始流速	0.2m/s	孔隙介质渗透系数	0.5m/d
管道糙率	0.04		

2 地下河系统参数与衰减系数关系

2.1 孔隙介质渗透系数与衰减系数的关系

计算的概念模型如图1所示,模型计算参数如表1所示。其中,孔隙介质渗透系数与表1不同,渗透系数及衰减含水层厚度等见表2,衰减含水层厚度是整个衰减过程开始时的孔隙含水层平均厚度,衰减计算时间是整个衰减过程持续的时间,以管道顶部孔隙含水层平均厚度减小到1m左右为衰减结束时间,也即在整个衰减过程中管道上部一直与孔隙含水层有水量交换。从计算开始的一定时间内保持雨强不变,然后停止降雨,分析流量衰减曲线。

表2 模型其它参数表

Table 2 Other parameters of calculation model

模型编号	孔隙介质渗透系数(m/d)	衰减含水层厚度(m)	衰减计算时间(d)
1	0.03	29.7	151.8
2	0.1	29.7	15.8
3	0.5	29.6	73.6
4	0.9	29.5	39.3
5	1.25	29.4	13.8
6	1.5	29.4	22.5
7	1.75	29.3	18.8
8	2.0	29.3	16.3
9	3.0	29.2	14.5

模型1中由于渗透系数较小,在第二段衰减的后期,管道部分计算单元出现了层流。9个模型的衰减含水层

厚度基本相同,衰减计算时间随着渗透系数的增加而变 小。衰减系数与渗透系数及管道流量系数的关系见图 2。

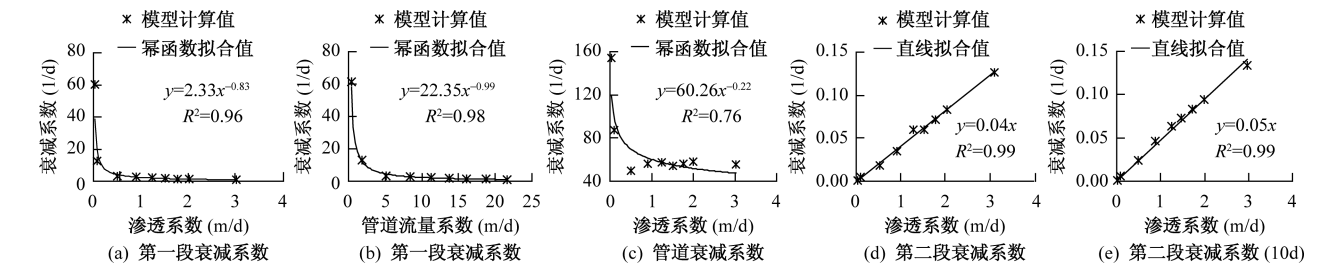


图 2 衰减系数与渗透系数的关系

Fig. 2 Relationship between attenuation coefficient and permeability coefficient

α_1 与渗透系数呈幂函数关系(图 2a), α_1 随着渗透系数的增加而减小,这是孔隙向管道补给量的增加,减缓了第一段衰减的速度,最终引起衰减系数的减小; α_1 与管道流量系数 β 呈幂函数关系, α_1 随着管道流量系数的增加而减小(图 2b);管道衰减系数与渗透系数呈幂函数关系,管道衰减系数随着渗透系数的增加而变小;由图 2a、b、c 可知,管道衰减系数与管道流量系数呈幂函数关系,管道衰减系数随着管道流量系数的增加而变小。

α_2 与渗透系数呈直线关系(图 2d), α_2 随着渗透系数的增加而增加,直线截距为 0,说明当渗透系数趋于 0 时,衰减系数趋于 0,这符合一般认识。衰减系数具有时变特性,不同的衰减计算时间得到的衰减系数是不同的,名义衰减系数同样和衰减计算时间有关,图 2e 是第九个模型第二段衰减持续到第 10 天时的衰减系数 α_2 与渗透系数的关系,此时,两者的关系同样为直线关系,这说明,时变特性对衰减系数 α_2 与渗透系数的直线关系没有影响。

2.2 孔隙介质给水度与衰减系数的关系

计算的概念模型如图 1 所示,模型计算参数如表 1 所示。其中,给水度和初始含水层厚度与表 1 不同。给水度、初始含水层厚度和衰减含水层厚度等见表 3。从计算开始的一定时间内保持雨强不变,然后停止降雨,分析流量衰减曲线。

表 3 模型其它参数表

Table 3 Other parameters of calculation model

模型编号	给水度	初始含水层厚度(m)	衰减含水层厚度(m)	衰减计算时间(d)
1	0.03	14.2	16.4	6.4
2	0.05	14.7	16.3	10.1
3	0.07	15.3	16.2	14.8
4	0.10	15.8	16.5	21.9
5	0.15	15.9	16.4	30.1
6	0.20	16.0	16.3	42.8
7	0.25	16.1	16.3	54.1
8	0.30	16.1	16.3	63.6
9	0.35	16.1	16.3	75.6

9 个模型的初始衰减时刻含水层厚度基本相同,衰减计算时间随着给水度的增加而增加。第二段衰减系数与给水度的关系见图 3。

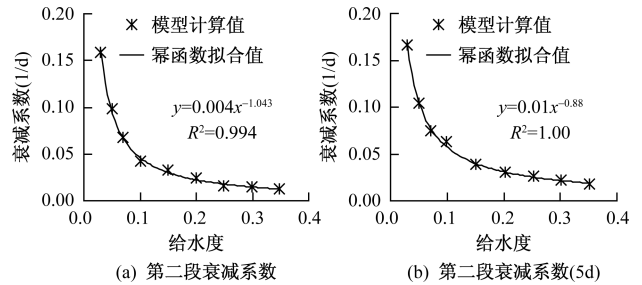


图 3 α_2 与给水度的关系

Fig. 3 Relationship between α_2 and water supply degree

α_2 与给水度呈明显的幂函数关系(图 3a), α_2 随着给水度的增加而减小,即给水度的增加使得含水层水量相对下降的速度减小;图 3b 是 6 个模型的第二段衰减时间分别到第 5 天时的衰减系数 α_2 与给水度的关系,同样为幂函数关系,这说明 α_2 与给水度的幂函数关系在不同的衰减计算时间下都是成立的。

9 个模型计算出的第一段衰减系数 α_1 基本没有变化, α_1 与给水度、管道流量系数的关系不明显。管道衰减系数与给水度有幂函数关系,但拟合效果不好。这主要是给水度本身对第一阶段的衰减影响很小,文献[11]中的灵敏度分析证明了这一点。

2.3 衰减含水层厚度与衰减系数的关系

计算的概念模型如图 1 所示,模型计算参数如表 1 所示。其中,初始含水层厚度和降雨历时与表 1 不同,初始含水层厚度和降雨历时等见表 4。从计算开始后的降雨历时时间内保持雨强不变,然后停止降雨,分析流量衰减曲线。

9 个模型的衰减计算时间随着衰减含水层厚度的增加而增加。衰减系数与衰减含水层厚度及管道流量系数的关系见图 4。

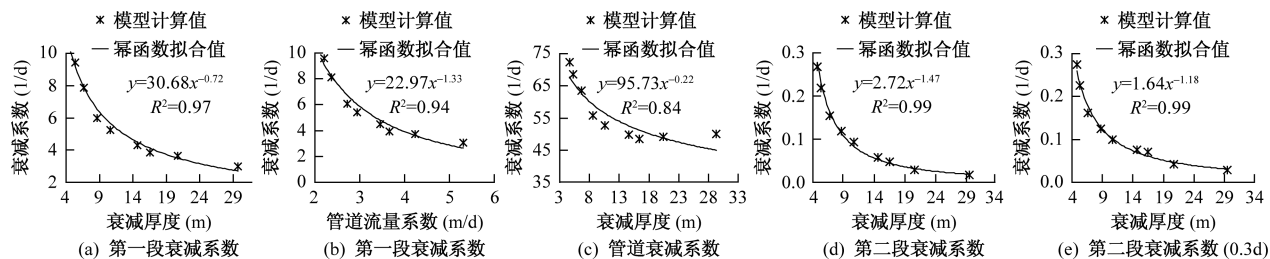


图4 衰减系数与衰减厚度的关系

Fig. 4 Relationship between attenuation coefficient and attenuation thickness

表4 模型其它参数表

Table 4 Other parameters of calculation model

模型 编号	初始含水层 厚度 (m)	降雨历时 (min)	衰减含水层 厚度 (m)	衰减计算 时间 (d)
1	4	200	4.6	0.5
2	4	400	5.3	0.8
3	4	800	6.7	1.7
4	8	200	8.6	3.9
5	8	800	10.6	6.7
6	14	200	14.6	15.9
7	14	800	16.5	7.4
8	20	200	20.6	41.2
9	29	200	29.6	73.6

α_1 与衰减含水层厚度呈幂函数关系(图4a), α_1 随着衰减厚度的增加而减小; α_1 与管道流量系数呈幂函数关系(图4b), α_1 随着管道流量系数的增加而减小; 管道衰减系数与衰减含水层厚度呈幂函数关系(图4c), 管道衰减系数随着衰减含水层厚度的增加而变小; 由图4a、b、c可知, 管道衰减系数与管道流量系数呈幂函数关系, 管道衰减系数随着管道流量系数的增加而变小。这些都是由于含水层厚度的增加进而增加了孔隙向管道的补给量, 最终引起了第一段流量相对变化速度的下降。

α_2 与衰减含水层厚度呈幂函数关系(图4d), α_2 随着衰减厚度的增加而减小。图4e是9个模型的第二段衰减时间分别到第0.3d时的衰减系数 α_2 与衰减含水层厚度的关系, 同样为幂函数关系, 说明 α_2 与衰减含水层厚度的幂函数关系在不同的衰减计算时间下都是成立的。

2.4 模型其它参数与衰减系数的关系

作者在概念模型图1的基础上, 进行了模型宽度、管网密度与衰减系数关系的数值试验研究, 具体模型设置见表5, 其他参数见表1。计算结果表明: α_1 与模型宽度、管网密度和管道流量系数均呈幂函数关系, α_1 随着它们的增加而减小; 管道衰减系数与模型宽度关系不明显, 且在宽度变化过程中, 管道衰减系数与管道流量系数的关系也不明显; 在管网密度变化过程中, 管

道衰减系数与管网密度、管道流量系数均成呈幂函数关系, 并随它们增加而减小。

α_2 与模型宽度呈幂函数关系, 随着模型宽度的增加而减小; α_2 与管网密度呈直线关系, 随着管网密度的增加而增加。

表5 模型其它参数表

Table 5 Other parameters of calculation model

	模型 编号	模型宽度 (m) /面积 (km ²)	衰减含水层 厚度 (m)	衰减计算 时间 (d)
宽度 /面积 变化 模型	1	20/0.02	21.6	7.1
	2	30/0.03	22.7	11.4
	3	60/0.06	23.8	20.9
	4	100/0.1	25.3	34.5
	5	140/0.14	26.1	47.2
	6	180/0.18	26.3	59.2
	7	210/0.21	26.4	70.6
	8	270/0.27	26.6	85.3
	9	540/0.54	27.8	156.2
管网 密度 变化 模型	1	1045	29.7	124.9
	2	1667	29.6	83.2
	3	3267	29.6	72.1
	4	3700	29.5	22.6
	5	5128	29.5	21.2
	6	6200	29.4	20.6
	7	8700	29.3	16.9
	8	11200	29.3	13.8
	9	14033	29.3	11.7

注: 模型宽度变化过程中, 模型的长度保持不变。

渗透系数和给水度等系统参数与衰减系数的关系汇总如表6所示。

3 结论

西南岩溶地下河系统的水文地质结构特征复杂, 本文概化研究了孔隙-管道型地下河系统参数与流量衰减特征之间的关系, 得到了以下认识:

表 6 孔隙-管道型地下河系统参数与衰减系数关系汇总表

Table 6 Relationship between parameters and attenuation coefficients of the pore-pipe underground river system

系统 参数 衰减 系数	渗透系数	给水度	衰减含水层厚度	模型宽度/面积	管网密度	管道流量系数
第一段衰减系数	幂函数(递减)	不明显	幂函数(递减)	幂函数(递减)	幂函数(递减)	幂函数(递减)
第二段衰减系数	直线(递增)	幂函数(递减)	幂函数(递减)	幂函数(递减)	直线(递增)	—
管道衰减系数	幂函数(递减)	不明显	幂函数(递减)	不明显	幂函数(递减)	幂函数(递减)

(1)使用作者编制的地下系统水流运动数值模拟程序 UGRFLOW09 首次分析了衰减系数 α_1 、 α_2 和管道衰减系数与地下河系统特征(渗透系数、给水度、衰减含水层厚度、模型宽度及面积、管网密度和管道流量系数)之间的关系; α_1 与渗透系数、衰减含水层厚度、模型宽度及面积、管网密度和管道流量系数均成幂函数关系, α_1 与相应的管道流量系数也为幂函数关系, α_1 随着这些参数值的增加而减小, α_1 与给水度关系不明显; α_2 与渗透系数和管网密度成直线关系,随着其数值的增加而增加; α_2 与给水度、衰减含水层厚度、模型宽度及面积成幂函数关系,随着其数值的增加而变小;管道衰减系数与渗透系数、衰减含水层厚度和管网密度均成幂函数关系,与相应的管道流量系数也为幂函数关系,随着其数值的增加而减小,与给水度和含水层宽度和关系不明显。

(2)在研究地下河系统特征与流量衰减特征之间的关系时,实测地下河系统流量衰减数据有限,且地下河系统内部特征很难有效获取,不同地下河系统水文地质条件又不便于对比分析,且室内试验的方法难度大,而数值试验方法能相对较好地克服上述的问题。

(3)通过数值试验的方法分析地下河系统特征与衰减特征之间的关系,是一种新的尝试和探索,还需要补充和完善;实际地下河系统特征比文中计算模型复杂,本文的主要结论对于实际的复杂地下河系统的研究具有参考价值。地下河系统特征与衰减系数的关系还需要进一步研究。

参考文献:

[1] 郭纯青. 中国岩溶地下河系及其水资源[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2004: 15 - 25. [GUO C Q. Underground rivers and karst water resources in China [M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2004: 15 - 25. (in Chinese)]

[2] 郭琳, 陈植华. 岩溶地区地下河系统水资源定量评价的问题与出路[J]. 中国岩溶, 2006, 25 (1): 1 - 5. [GUO L, CHEN Z H. The puzzles and solutions for quantitative assessment of water resources in karst

underground river system [J]. Carsologica Sinica, 2006, 25 (1): 1 - 5. (in Chinese)]

[3] 卢耀如, 张凤娥, 刘长礼, 等. 中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性[J]. 地球学报, 2006, 27 (5): 393 - 402. [LU Y R, ZHANG F E, LIU C L, et al. Karst water resources in typical areas of China and their eco - hydrological characteristics [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27 (5): 393 - 402. (in Chinese)]

[4] 李彬. 中国南方岩溶水资源特点及科技工作的思考[J]. 国土资源科技管理, 2001, 18 (2): 27 - 29. [LI B. Characteristics of the karst water resources in south China and relevant work of science and technology [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2001, 18 (2): 27 - 29. (in Chinese)]

[5] 蒋忠诚, 王瑞江, 裴建国, 等. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J]. 中国岩溶, 2001, 20 (2): 106 - 110. [JIANG Z C, WANG R J, PEI J G, et al. Epikarst zone in south China and its regulation function to karst water [J]. Carsologica Sinica, 2001, 20 (2): 106 - 110. (in Chinese)]

[6] Dewandel B, Lachassagne P, Bakalowicz M, et al. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2003 (274): 251 - 269.

[7] Smakhtin V Y. Low flow hydrology: a review [J]. Journal of Hydrology, 2001 (240): 147 - 186.

[8] 陈利群, 刘昌明, 李发东. 基流研究综述[J]. 地理科学进展, 2006, 25 (1): 2 - 15. [CHEN L Q, LIU C M, LI F D. Reviews on base flow researches [J]. Progress in Geography, 2006, 25 (1): 2 - 15. (in Chinese)]

[9] 王勇, 束龙仓, 董贵明, 等. 裂隙-管道介质泉水流量衰减过程中的有色噪声辨识与消减[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36 (3): 29 - 32. [WANG Y, SHU L C, DONG G M, et al. Colored noise identification and its decreasing of spring flow attenuation in fissure-conduit media [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36 (3): 29 - 32. (in Chinese)]

- [10] 束龙仓,陶玉飞,董贵明,等. 岩溶多重介质泉水流量衰减过程的室内模拟及分析[J]. 工程勘察,2008(9):32-34. [SHU L C,TAO Y F,DONG G M, *et al.* Laboratory simulation and analyses of spring attenuation process of karst multi-media [J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2008(9):32-34. (in Chinese)]
- [11] 董贵明. 西南岩溶地下河系统水流运动数值模型及枯季流量衰减特征研究[D]. 南京: 河海大学,2009. [DONG G M. Study on numerical model of groundwater flow and springflow attenuation law during dry season in karst underground river system, southwestern China [D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese)]
- [12] 袁道先,朱德浩,翁金桃,等. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社,1993. [YUAN D X,ZHU D H,WENG J T, *et al.* Karstology Sinica[M]. Beijing: The Geological Publishing House,1993. (in Chinese)]
- [13] 裴建国,梁茂珍,陈阵. 西南岩溶石山地区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计[J]. 中国岩溶,2008,27(1):6-10. [PEI J G,LIANG M Z,CHEN Z. Classification of karst groundwater system and statistics of the main characteristic values in southwest China karst mountain[J]. Carsologica Sinica,2008,27(1):6-10. (in Chinese)]
- [14] 董贵明,束龙仓,田娟,等. 西南岩溶地下河系统水流运动数值模型[J] 吉林大学学报:地球科学版,2011,41(4):1136-1143. [DONG G M,SHU L C,TIAN J, *et al.* Numerical model of groundwater flow in karst underground river system, southwestern China [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition,2011,41(4):1136-1143. (in Chinese)]
- [15] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙-孔隙三重介质地下水流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学,1995,20(4):361-366. [CHEN C X. Groundwater flow model and simulation method in triple media of karstic tube-fissure-pore [J]. Earth Science,1995,20(4):361-366. (in Chinese)]
- [16] 董贵明,束龙仓,王茂枚,等. 渗流-水平井流耦合数学模型和数值模拟研究[J]. 水科学进展,2009,20(6):830-837. [DONG G M,SHU L C,WANG M M, *et al.* A coupled seepage-horizontal well flow model and numerical experiments [J]. Advances in Water Science,2009,20(6):830-837. (in Chinese)]

Research on relationship between parameters and attenuation coefficients of pore-pipe underground river systems, southwest China

TIAN Juan¹, DONG Gui-ming², SHU Long-cang³

(1. City and Environment College, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. The School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 222116, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Attenuation analysis is one of the commonly used methods to study underground rivers. With the instantaneous attenuation coefficient, nominal coefficient, pipe flow coefficient and other related definitions, the relationship between the characteristic of discharge attenuation and that of underground river system was analyzed using numerical method UGRFLOW09 developed by the author. The results show that attenuation coefficient in the first stage decreases with the increase of permeability coefficient, thickness of attenuation aquifer, width and area of the model, density of pipe network and pipe flow coefficient, and a power function relation exists; attenuation coefficient in the second stage increases linearly with network density and decreases with the increase of water supply degree, thickness of attenuation aquifer, width and area of the model and a power function relation exists; pipe flow coefficient increases with the increase of permeability coefficient, thickness of attenuation aquifer and network density and a power function relation exists while it has no obvious relationship with width of the model.

Key words: karst; underground river system; attenuation analysis; attenuation coefficient; numerical methods

责任编辑:汪美华