

文章编号:1001-4810(2009)03-0255-06

# 石期河流域岩溶水系统及其水资源构成分析

劳文科, 蓝笑宁, 蒋忠诚, 覃小群, 谢运球, 邓艳  
(中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

**摘要:**在深入研究石期河流域岩溶水系统含水介质结构特征、水资源形成的基础上,通过对流域岩溶水总排泄口流量动态长观资料系列的分析,选择2005年丰水期内最后一次洪峰(年内最大洪峰)后的流量衰减过程,根据该过程的数据资料建立本流域岩溶水总排泄口的流量衰减方程,并利用该流量衰减方程对流域岩溶水资源的构成进行定量分析研究。结果表明,石期河流域岩溶水系统在2005年最大洪峰状态下,可自然排泄的岩溶水资源总量为 $69\,469.95 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其中:流域坡面产流占3.64%,赋存于大型溶洞或管道中的溶洞-管道水占4.53%,赋存于小型管道或强岩溶化裂隙中的管道-裂隙水占74.10%,赋存于细小溶蚀裂隙中的溶隙水占17.73%。从衰减期的初始时刻起,它们各自可供消耗(可作为有效利用岩溶水资源)的时效分别为2日、8日、35日和126日以上。

**关键词:**岩溶水系统;水资源构成;石期河流域

**中图分类号:**P641.8 **文献标识码:**A

## 0 引言

在我国西南岩溶区,岩溶流域广泛分布。这些岩溶流域一方面由于地处亚热带湿润气候区,降雨量大,水源充沛,流域水资源总量非常丰富,常成为区内人类社会生产和生活中重要的供水水源;另一方面由于岩溶地区含水介质的多重性和复杂性及降雨在年内的分布极不均匀等多种原因,常造成这些地区水资源短缺。以往人们对岩溶流域水资源的研究<sup>[1~6]</sup>,主要关注岩溶水的资源总量问题,对岩溶水资源构成的研究尚未得到应有的重视。而岩溶流域的水资源通常系由多种不同性质的岩溶水类型共同构成,且各种不同性质岩溶水类型的资源量及其变化情况和它们作为可有效利用资源的时效都存在很大的差异。换言之,它们作为具有供水意义的资源价值存在着很大的差别。因此,从岩溶水可有效利用资源的角度出发,开展岩溶流域水资源构成的定量分析和研究,对岩溶流

域水资源评价方法的探索和研究具有重要的意义。

## 1 自然地理及地质概况

### 1.1 自然地理

石期河流域位于湘南—桂北岩溶丘陵区南部,地处亚热带季风气候区,多年平均气温 $17.7^\circ\text{C}$ ,多年平均无霜316天,多年平均年降雨量 $1\,420.4\text{ mm}$ ,雨量充沛,但在年内不同季节的分配极不均匀,每年4、5、6三个月为丰水期,降雨量占全年总降雨量的46.5%;3、7、8三个月为平水期,降雨量占全年总降雨量的25.3%;9、10、11、12及次年的1、2六个月为枯水期,降雨量占全年总降雨量的28.2%。地貌上以溶丘洼(谷)地和残丘宽谷地貌类型为主。总的地势南高北低、东西高中部低,呈向北开口马蹄形地势。石期河是流域内唯一的地表水系,由中上游的东、西部两条支流在东湘桥附近汇合后自南向北径流,最后于石期市

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAC01A10);中国地质调查局地质调查项目(200310400043);中国地质科学院基本科研业务费专项经费(YWF060722);岩溶地质研究所所控项目(200709,2008008)资助  
第一作者简介:劳文科(1957-),男,副研究员,长期从事岩溶水文地质、工程地质研究。  
收稿日期:2009-06-04

镇的石期河总出口处排入湘江,排泄总量为13.53亿 $m^3/a$ ,最大流量720.35 $m^3/s$ ,最小流量0.35 $m^3/s$ 。

## 1.2 地质

区内的岩石地层<sup>①</sup>除侏罗系缺失外,自下古生界奥陶系上统至新生界各地层均有出露。其中:奥陶系上统天马山组( $O_3t$ )及泥盆系下统源口组( $D_{1y}$ )、中统跳马涧组( $D_2t$ )等碎屑岩地层仅在流域南部东西两侧分水岭地带局部地段出露,构成本流域南部周边的中低常态山区;泥盆系中—上统至二叠系中统为一连续沉积且厚度大的碳酸盐岩地层,广泛分布于流域内的不同地段;二叠系上统至三叠系下统和白垩系仅在流域中北部的部分地段出露;第四系则多分布于流域内的洼(谷)地底部或斜坡地带。研究区在构造上属桂湘褶皱带Ⅰ级构造单元内,跨邵阳褶皱束和桂林隆起褶皱束两个三级构造单元,总体为一北北东向复式向斜构造槽谷,两翼为寒武、奥陶系浅变质碎屑岩系,并构成槽谷的下垫面,轴部为古生界碳酸盐岩及少量碎屑岩,河谷及洼地内有少量中新代地层出露。

## 2 岩溶水系统

岩溶水系统系指由岩溶含水系统和岩溶水水流系统构成的统一体。整个石期河流域(三级岩溶流域)岩溶水系统是由Ⅰ-1、Ⅰ-2和Ⅰ-3三个相关联的一级岩溶水子系统构成,其中:一级岩溶水子系统Ⅰ-3由Ⅱ-1、Ⅱ-2和Ⅱ-3三个相关联的二级岩溶水子系统构成,而二级岩溶水子系统Ⅱ-3则由Ⅲ-1和Ⅲ-2两个相关联的三级岩溶水子系统构成。分布在流域中上游的Ⅰ-2和Ⅰ-3两个一级岩溶水子系统是相互独立的系统,其各自排泄的岩溶地下水分别构成石期河中上游的东部支流和西部支流的源头(在个别部位存在有一定的潜流),并主要通过石期河东部支流和西部支流以地表径流的形式补给与之相邻的石期河中、下游主流Ⅰ-1一级岩溶水子系统并与其共同构成整个石期河流域岩溶水系统;而分布在流域上游补给区白宝和潮水江等地带的Ⅲ-1和Ⅲ-2两个三级岩溶水子系统以相类似的形式构成当地Ⅱ-3二级岩溶水子系统。各级岩溶水子系统的分布状况及其主要特征见表1和图1。

表1 石期河流域各级岩溶水子系统主要特征表

Tab.1 Main features of karst water subsystems in the Shiqihe basin

岩溶水系统						水文地质特征		
一级岩溶水子系统		二级岩溶水子系统		三级岩溶水子系统		主要地貌类型	主要含水介质空间	岩溶含水层出露条件
代号	面积/ $km^2$	代号	面积/ $km^2$	代号	面积/ $km^2$			
Ⅰ-1	215.0	未划分		未划分		残丘宽谷、缓丘坡地、溶丘洼(谷)地	岩溶裂隙网络系统及少量小型管道	大部分为覆盖区,西部近分水岭为裸露区
Ⅰ-2	273.0	未划分		未划分		南部为溶丘洼(谷)地、北部为残丘宽谷	南部为地下河管道系统、北部为岩溶裂隙系统	南部地带为裸露区、北部地带为覆盖区
Ⅰ-3	471.0	Ⅱ-1	89.0	未划分		残丘宽谷区、西部有少量溶丘洼(谷)地	岩溶裂隙网络系统	大部分为覆盖区,西部近分水岭为裸露区
		Ⅱ-2	120.0	未划分		溶丘洼(谷)地区	地下河管道系统	绝大部分地带为裸露区,局部为少量覆盖
		Ⅱ-3	262.0		Ⅲ-1	171.0	溶丘洼(谷)地、西部近分水岭地带为常态中低山	地下河管道系统、西部近分水岭地带为风化裂隙系统
				Ⅲ-2	91.0	溶丘洼(谷)地	地下河管道系统及岩溶裂隙网络系统	裸露区、局部地带少量覆盖
合计(流域)面积( $km^2$ )							959.0	

①本文使用的地层单位及其名称采用岩石地层的单位和名称。

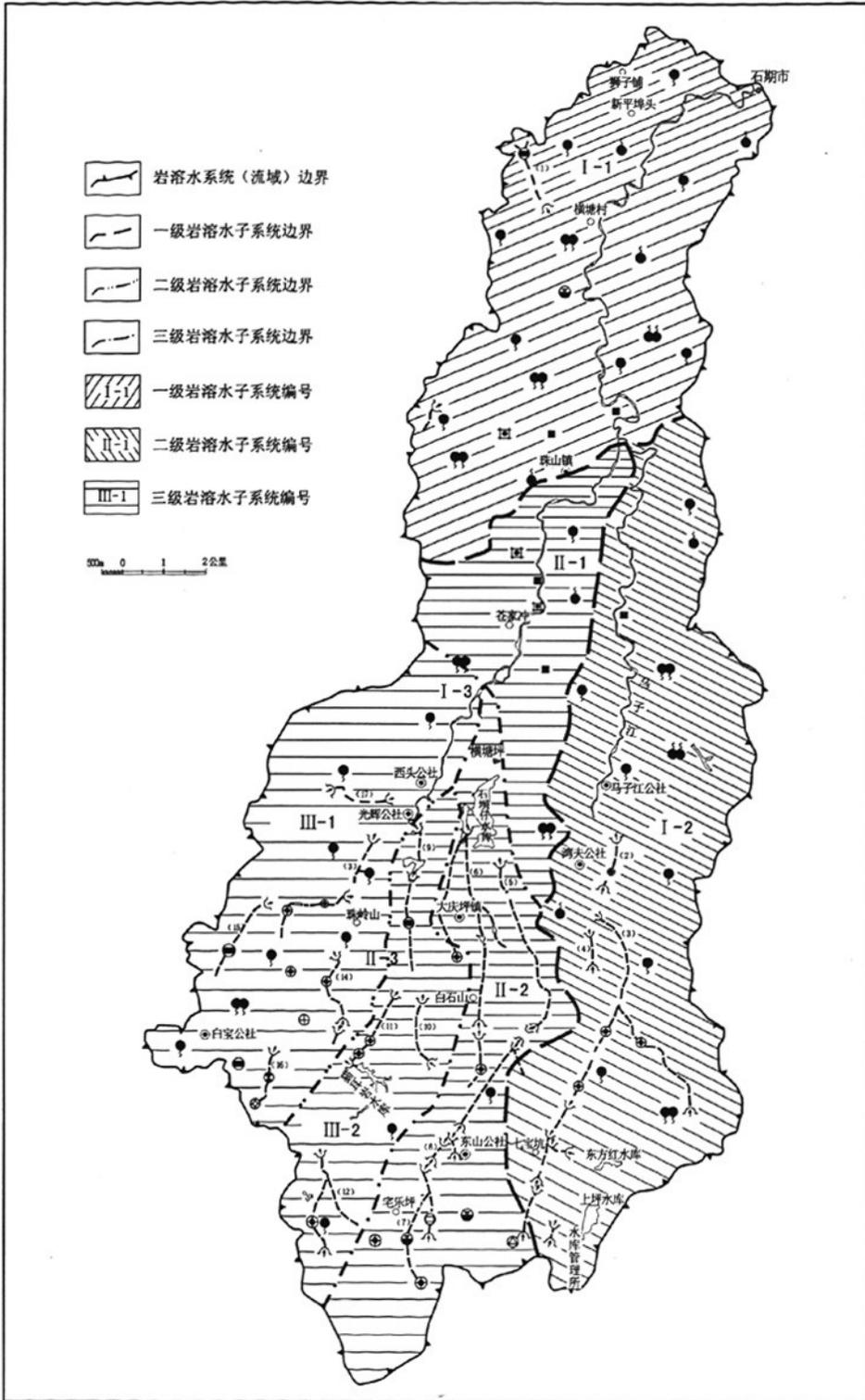


图1 石期河流域各级岩溶水子系统分布图

Fig.1 Distribution of karst water subsystems in the Shiqi basin

## 2.1 岩溶含水系统

石期河流域岩溶含水系统的平面边界具有与地表水流域边界相一致的系统,是一个平面边界封闭条件良好、独立完整的岩溶含水系统,流域面积959 km<sup>2</sup>,其中:碳酸盐岩分布面积886 km<sup>2</sup>,占流域总面积的92.4%;非碳酸盐岩分布面积73 km<sup>2</sup>,占流域总面积的7.6%。由上古生界泥盆系及石炭系的碳酸盐岩构成本流域的主要岩溶含水层。根据流域内地层发育及其岩性组合特征,将石期河流域内的岩溶含水岩组划分为:碳酸盐岩含水岩组、碳酸盐岩夹非碳酸盐岩含水岩组、碳酸盐岩与非碳酸盐岩互层含水岩组和非碳酸盐岩夹碳酸盐岩含水岩组4个类型。各岩溶含水岩组的划分结果及其分布状况见表2和图2。

表2 石期河流域岩溶含水岩组类型划分结果表

Tab. 2 Karst aquifer type of the Shiqihe basin

含水岩组类名称	所属地层
碳酸盐岩含水岩组	D <sub>2-3q</sub> 、D <sub>3x</sub> 、C <sub>1m</sub> 、C <sub>2d</sub> 、C <sub>2m</sub>
碳酸盐岩夹非碳酸盐岩含水岩组	C <sub>1s</sub> 、C <sub>1z</sub> 、P <sub>1-2q</sub>
碳酸盐岩与非碳酸盐岩互层含水岩组	D <sub>3c</sub>
非碳酸盐岩夹碳酸盐岩含水岩组	D <sub>2yj</sub> 、D <sub>3m</sub> 、C <sub>1f</sub> 、P <sub>2g</sub> 、T <sub>1z</sub>

### 2.1.1 边界特征

上部边界 石期河流域岩溶含水系统的上部边界为石期河流域范围内的地表面,为开放边界,是整个石期河流域岩溶含水系统接受大气降水补给输入和地下水蒸发输出的边界。

平面边界 整个石期河流域(三级岩溶流域)岩溶含水系统除在流域南端的局部地段以相对隔水层为边界外,其余地段均以流域地表分水岭为边界;而流域内的一、二、三级岩溶含水子系统则分别以流域的二、三、四级地下水分水岭为边界,各自构成相对独立、平面边界封闭完整的各级岩溶含水子系统。

底部边界 石期河流域岩溶含水系统的底部边界为泥盆系底部的碎屑岩隔水层,系封闭的不透水边界。

### 2.1.2 含水介质特征

在流域的南部(流域中上游)地区,地貌上以溶丘洼(谷)地为主要特征。泥盆系中—上统棋梓桥组(D<sub>2-3q</sub>)、上统锡矿山组(D<sub>3x</sub>)及石炭系下统马兰边组(C<sub>1m</sub>)等纯碳酸盐岩地层呈面状连片分布,岩溶洼地、漏斗、落水洞、天窗、溶洞及地下河管道等岩溶形态非常发育。岩溶含水介质空间以岩溶裂隙—地下河

管道的组合为主要特征。在垂向剖面上,含水系统的上部主要以各种溶蚀裂隙网络、表层岩溶带各种岩溶空间(部分地段存在有垂向通道)为地下水的主要积蓄空间和运移通道;而在下部则以水平通道(现代地下河或伏流管道等)为地下水的主要积蓄空间和运移通道。

在流域北部(流域中下游)地区,地貌上以残丘宽谷及缓丘坡地为主要特征。纯碳酸盐岩与不纯碳酸盐岩地层呈北北东向带状相间分布,有众多的岩溶泉(部分为上升泉)和较多的溶潭出露,有少量规模较小的溶洞及消水脚洞发育,地下河不发育,岩溶含水介质空间以岩溶裂隙网络为主要特征并构成本地区地下水的主要积蓄空间和运移通道。

根据实地调查观测并结合国内外前人的研究成果,石期河流域岩溶含水介质空间按其有效直径大小可划分为:有效直径以米计(大多在3至20余米间)的大型溶洞或管道、有效直径以分米计(大多在3 dm至8 dm)的小型管道或强岩溶化裂隙和有效直径以毫米或厘米计(大多在5 mm至10 cm)的细小溶蚀裂隙3种不同有效直径的岩溶含水介质空间类型,相应地可将赋存其间的岩溶地下水划分为:溶洞—管道水、管道—裂隙水和裂隙水3种不同性质的岩溶水类型。

## 2.2 岩溶水水流系统

大气降水是石期河流域岩溶水唯一的补给来源,流域周边东、南、西部较高的地势及所处的向斜构造为其创造了良好的汇水条件,地下岩溶的发育为岩溶水的储蓄和运移提供了良好的空间和通道。长轴轴向近南北的复式向斜从总体上控制着区内岩溶水的运动方向,并以当地河流(石期河)为排泄基准面,在不同的部位分别以岩溶泉、地下河或潜流的形式排向石期河,最后汇入湘江,总体上自南向北径流。

石期河流域岩溶水水流系统由地下水流系统和地表水流系统共同构成,其运移特征主要表现为:大气降水降落地面后,除有一部分通过蒸发蒸腾返回大气层外,余下的主要部分通过局部发育较深的溶蚀裂隙或落水洞等岩溶通道在流域内的不同地段分别渗入地下形成岩溶地下水,并通过流域内岩溶含水系统的汇集和运移构成区内各级岩溶地下水子系统的水流系统;另一部分以坡面产流的形式通过地表沟渠直接汇入地表河流。各级岩溶水水流子系统之间以从属或相连接的关系共同构成整个石期河流域的岩溶水水流系统,并在石期市镇的流域总出口处以地表径流的形式直接排入湘江。



### 3 岩溶水资源构成分析

石期河出口河段系石期河流域岩溶水的总排泄口,其径流过程系流域内各种不同性质岩溶水类型释放(或排泄)过程的综合反映。现场调查研究结果表明,石期河流域的径流主要由流域坡面产流和赋存于流域内大型溶洞或管道中溶洞—管道水、小型管道或强岩溶化裂隙中管道—裂隙水及细小溶蚀裂隙中裂隙水的释放(或排泄)共同构成。也就是说,石期河流域岩溶水总排泄口在峰值后的流量衰减动态是流域坡面产流及赋存于流域内各类不同级别有效直径岩

溶含水介质空间(通道)中地下水排泄(或消耗)的综合反映。由于流域的每次坡面产流及赋存于各类型岩溶含水介质空间中地下水的排泄(或消耗)的速率存在很大差异,反映在石期河流域总排泄口流量衰减过程各亚动态流量衰减系数的差异上,其差异程度可达1~2个数量级。根据石期河总出口河段2004年8月至2005年12月逐日流量长期观测资料的分析,选用2005年丰水期内最后一次洪峰(年内的最大洪峰)后流量衰减过程的数据资料,按流量衰减曲线作图方法和要求<sup>[8]</sup>,作出石期河流域岩溶水系统总排泄口流量衰减过程曲线如图3。

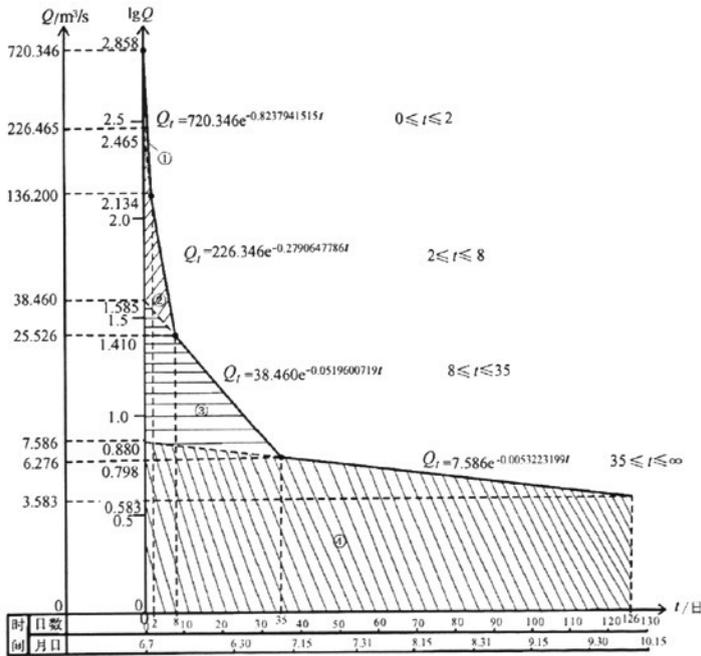


图3 石期河流域岩溶水系统总排泄口流量衰减曲线图

Fig. 3 The flow attenuation curve at the total discharge site of the karst water system in the Shiqihe basin

于是求得其流量衰减方程为:

$$Q_t = \begin{cases} 720.346e^{-0.8237941515t} & [0, 2] \\ 226.456e^{-0.2790647786t} & [2, 8] \\ 38.460e^{-0.0519600719t} & [8, 35] \\ 7.586e^{-0.0053223199t} & [35, \infty) \end{cases}$$

式中:  $Q_t$ —对应于  $t$  时刻的流量( $m^3/s$ )

$e$ —自然数( $e=2.718\ 281\ 828\dots$ ,无量纲)

$t$ —衰减期的任意时刻(日)

由图3可以看到,其流量衰减过程具有4个亚动态的特征,它们分别表征相应时段的流域坡面产流和赋存于流域内大型溶洞或管道中溶洞—管道水、小型管道或强岩溶化裂隙中管道—裂隙水及细小溶蚀裂

隙中裂隙水的释放(或排泄)过程,各亚动态完全消耗(排泄)的水量即为当时洪峰状态下流域内地表产流及赋存于流域内各类不同级别有效直径岩溶含水介质空间(通道)中地下水可自然排泄的资源量,它们共同构成当时状态下石期河流域岩溶水资源总量,且它们各自在流域岩溶水资源总量中所占的比重和可作为有效利用水资源的时效很不一致。在此,利用流量衰减方程方法对石期河流域在最大洪峰(2005年6月7日)状态下岩溶水资源的构成作一定量分析。

根据以上建立的流量衰减方程和流量衰减曲线图,石期河流域在当时洪峰状态下的坡面产流和赋存于流域内大型溶洞或管道中溶洞—管道水、小型管道

或强岩溶化裂隙中管道—裂隙水及细小溶蚀裂隙中溶隙水的资源量、流域水资源总量及各类水资源在流域水资源总量中所占的比例可按下列方法进行计算:

①流域坡面产流水资源量(第一亚动态可释放的总水量):

$$V_1 = 86400 \int_0^2 (720.346e^{-0.8327941515t} - 226.456e^{-0.2790647786t}) dt$$

②赋存于流域内大型溶洞或管道中溶洞—管道水的资源量(第二亚动态可释放的总水量):

$$V_2 = 86400 \int_0^8 (226.456e^{-0.2790647786t} - 38.460e^{-0.0519600719t}) dt$$

③赋存于流域内小型管道或强岩溶化裂隙中管道—裂隙水的资源量(第三亚动态可释放的总水量):

$$V_3 = 86400 \int_0^{35} (38.460e^{-0.0519600719t} - 7.586e^{-0.0053223199t}) dt$$

④赋存于流域内细小溶蚀裂隙中溶隙水的资源量(第四亚动态可释放的总水量):

$$V_4 = 86400 \int_0^{\infty} (7.586e^{-0.0053223199t}) dt$$

⑤流域内的岩溶水资源总量(坡面产流及赋存于流域内各类不同级别有效直径岩溶含水介质空间或通道中地下水资源量之和):

$$V_0 = \sum_{i=1}^n V_i \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

⑥各类型岩溶水的资源量占流域岩溶水资源总量的百分比:

$$K_i = (V_i/V_0)100\% \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

通过计算得出,石期河流域在2005年最大洪峰状态下的流域坡面产流、赋存于流域内各类不同级别有效直径岩溶含水介质空间或通道中地下水可自然排泄的水量及其在流域岩溶水资源总量中所占的比例见表3。

表3 2005年最大洪峰状态下石期河流域各类岩溶水资源量及其占流域水资源总量百分比计算成果表

Tab.3 The percentage of all types of karst water resources in total water resources during the largest flood peak in 2005 in the Shiqihe basin

水资源类型 (亚动态)	亚动态初始流量 /m <sup>3</sup> /s	衰减系数	消耗时长 /日	水资源量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	占水资源总量 /%
流域坡面产流 (第一亚动态)	720.346	0.8327941515	2	2 530.08	3.64
溶洞—管道水 (第二亚动态)	226.456	0.2790647786	8	3 147.26	4.53
管道—裂隙水 (第三亚动态)	38.460	0.0519600719	35	51 477.84	74.10
溶隙水 (第四亚动态)	7.586	0.0053223199	126 以上	12 314.75	17.73
合 计				69469.95	100

由表3可以看出,石期河流域岩溶水系统在2005年最大洪峰状态下可自然排泄的岩溶水资源总量为69 469.95×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,由流域坡面产流和赋存于大型溶洞或管道中的溶洞—管道水、赋存于小型管道或强岩溶化裂隙中的管道—裂隙水及赋存于细小溶蚀裂隙中的溶隙水等4种不同性质的岩溶水类型共同构成,它们各自分别占当时状态下石期河流域岩溶水系统可自然排泄的岩溶水资源总量的3.64%、4.53%、74.10%和17.73%,且它们各自从衰减期的初始时刻起,可供消耗(可作为有效利用岩溶水资源)的时效分别为2日、8日、35日和126日以上。

## 4 结 论

(1)石期河流域岩溶水系统是一个平面边界封闭条件良好、独立完整、集中排泄的岩溶水系统。由三个一级岩溶水子系统、三个二级岩溶水子系统和两个三级岩溶水子系统共同构成。

(2)系统内岩溶含水介质空间具多重性和复杂性。按其有效直径大小可划分为:有效直径以米计的大型溶洞或管道、有效直径以分米计的小型管道或强岩溶化裂隙和有效直径以毫米或厘米计的细小溶蚀

裂隙等3种不同有效直径的岩溶含水介质空间类型,相应地可将赋存其间的岩溶地下水划分为:溶洞—管道水、管道—裂隙水和溶隙水3种不同性质的岩溶水类型。

(3)在洪峰状态下,石期河流域岩溶水系统的岩溶水资源由流域坡面产流和赋存于大型溶洞或管道中的溶洞—管道水、赋存于小型管道或强岩溶化裂隙中的管道—裂隙水及赋存于细小溶蚀裂隙中的溶隙水等4种不同性质的岩溶水类型共同构成。

(4)流域内各种不同性质岩溶水类型的水资源量在同期内流域岩溶水资源总量中所占的比例存在很大的差别。在最大洪峰状态下,流域坡面产流占3.64%,溶洞—管道水占4.53%,管道—裂隙水占74.10%,溶隙水占17.73%。它们各自构成可有效利用岩溶水资源的时效存在较大的差异,分别为2日、8日、35日和126日以上。

## 参考文献

- [1] 袁道先.对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J].中国岩溶,2006,19(2):103-108.
- [2] 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征[J].地球学报,2000,27(5):393-402.
- [3] 陈传友,王春元,高迎春.论水资源学[J].水利水电科技进展,2002,22(2):1-6.
- [4] 陈植华,陈刚,靖娟利,等.西南岩溶石山表层带岩溶水资源调查能力初步评价[C]//中国地质调查局.中国岩溶地下水与石漠化研究.南宁:广西科学技术出版社,2003:148-154.
- [5] 劳文科,蒋忠城,等.中国西南岩溶丘陵地区典型岩溶水系统研究——以石期河岩溶流域为例[M].北京:地质出版社,2008,50-79.
- [6] 袁道先,戴爱德,蔡五田,等.中国南方裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究——以桂林Y吉村为例[M].桂林:广西师范大学出版社,1996,88-118.
- [7] 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.
- [8] 黄敬熙执笔.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,(2):118-126.

## Analysis on karst groundwater system and its water resources composition in Shiqihe basin

LAO Wen-ke, LAN Fu-ning, JIANG Zhong-cheng, QIN Xiao-qun, XIE Yuan-qi, DENG Yan  
(Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Based on the further study to the aquifer structure characteristics and water resources formation of the karst groundwater system in Shiqihe basin, the flow attenuation process after the last flood peak in 2005 (the biggest flood in the year) was taken as the data source to establish a total discharge-flow attenuation equation through the series analysis on the long-term observation data of the dynamic flow at the total discharge site. And then, the water resources composition was studied and analyzed by means of the attenuation equation in the paper. The results show that total natural karst water discharge of the Shiqi river karst groundwater system is  $69\ 469.95 \times 10^4\ \text{m}^3$  during the largest flood peak in 2005, which is composed of 4 parts: Slope runoff accounts for 3.64%, large scale karst conduit flow accounts for 4.53%, small karst conduit flow or strong developed karst fissure flow accounts for 74.10%, and small karst fissure flow accounts for 17.73%. From the initial attenuation (can be regarded as the effective karst water resources), those flow can last for 2, 8 and 35 as well as more than 126 days respectively.

**Key words:** karst groundwater system; water resources composition; Shiqihe basin