

# 岩溶泉流量衰减曲线分析

常 勇<sup>1,2</sup>, 吴吉春<sup>2</sup>, 刘 玲<sup>3</sup>, 罗 跃<sup>2</sup>

(1. 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室(中国地质科学院岩溶地质研究所), 广西 桂林 541004; 2. 南京大学地球科学与工程学院水科学系, 江苏 南京 210023; 3. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

**摘要:** 由于岩溶含水介质的强烈非均质性和各向异性, 如何有效认识岩溶含水层内部的水文地质特征为研究难点之一, 岩溶泉衰减曲线分析为认识岩溶含水层的一种有效手段。总结了目前广泛用于泉流量衰减曲线分析的几种常见方法, 主要包括指数型衰减、非指数型衰减分析方法以及综合型的衰减曲线分析方法, 讨论了管道可能对泉流量衰减曲线的影响, 最后提出了今后对岩溶泉流量衰减曲线分析拟解决的一些关键问题。

**关键词:** 岩溶泉; 衰减曲线; 指数衰减; 非指数衰减; 管道

**中图分类号:** P641.134      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0852(2016)01-0015-07

在岩溶地区, 由于地下水对碳酸盐岩的强烈溶蚀作用, 含水层内管道裂隙高度发育, 含水介质具有强烈的非均质性和各向异性, 如何有效认识岩溶含水层内部的水文地质特征为目前研究的难点之一。岩溶含水层不同于其它含水系统, 岩溶含水系统往往以点状形式(泉)排泄系统内的地下水, 岩溶泉的一些指标(例如流量、温度、水化学性质等)的动态变化过程也易于获取, 如何解译岩溶泉这些指标的动态变化过程, 并从中获取有关岩溶含水层内部的一些信息也是目前研究的热点之一。

岩溶泉流量为岩溶含水层对降雨的响应, 当降雨经过岩溶含水系统时, 降雨入渗及其汇流过程必然受到含水系统内部结构和性质的影响, 因此泉流量曲线中也应含有岩溶含水层的一些内部信息, 这也是通过分析岩溶泉流量曲线认识含水层内部特征的物理基础。总体上, 典型的岩溶泉流量曲线可分为上升曲线和衰减曲线两部分<sup>[1-2]</sup>, 根据衰减曲线是否受到降雨的影响, 衰减曲线又可分为洪水衰减和基流衰减两部分。基流衰减曲线基本不受到降雨的影响, 被认为衰减曲线中最稳定且最能反应岩溶含水层性质的部分, 但在实

际分析过程中, 洪水衰减和基流衰减很难区分开来, 因此一些方法仍研究整个泉流量衰减曲线。

目前岩溶泉衰减曲线分析方法主要来源于数值解析和经验公式两种。从泉基流曲线的衰减方式, 衰减曲线的分析方法又可分为指数衰减方法、非指数衰减方法以及两者相结合的综合型衰减分析方法, 本文主要以该分类方式介绍泉流量衰减曲线的分析方法。

## 1 指数衰减分析方法

指数衰减分析方法认为泉流量的衰减曲线服从指数衰减过程, 该指数衰减过程与简单线性水箱的退水过程一致, 泉流量衰减曲线可用以下公式形式表示:

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为指数衰减系数(1/T);  $Q_0$  为初始流量(L<sup>3</sup>/T)。

根据公式(1), 当将衰减曲线绘制于  $\ln Q-t$  图上时, 衰减曲线呈一条直线, 该直线的斜率即为指数衰减系数  $\alpha$  (图1)。该衰减系数与泉流量和衰减时间无关, 仅取决于含水层的内部性质, 因此可用于认识或比对不同的岩溶含水层内部特征。该分析方法简单且易于操作, 被广泛用于岩溶泉衰减曲线分析<sup>[3-6]</sup>。

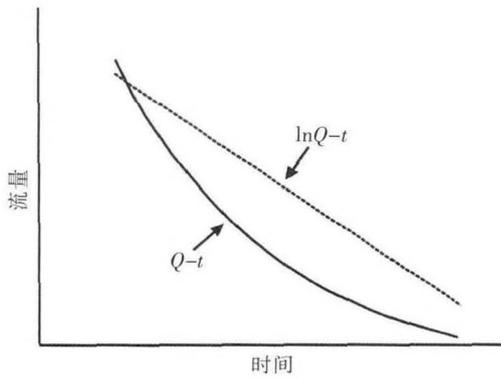


图1 典型的指数衰减曲线

Fig.1 The typical exponential recession of the karst spring

该方法的物理基础最早来源于 Boussinesq 于 1877 年基于一维简单含水层排水过程的解析解<sup>[7]</sup>, 含水层结构见图 2, 该解析解与公式(1)具有相同的形式, 并给出了指数衰减系数的详细物理意义:

$$\alpha = \frac{\pi^2 KH}{4\varphi L^2} \quad (2)$$

式中:  $K$  为含水层的渗透系数 ( $L/T$ );  $\varphi$  为含水层给水度;  $L$  为含水层的长度 ( $L$ );  $H$  为含水层出口与含水层底板之间的高度 ( $L$ )。

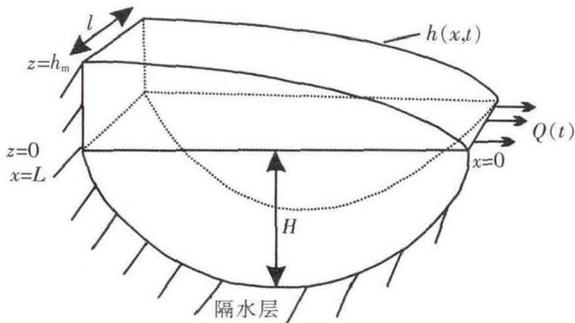


图2 Boussinesq(1877)提出的一维潜水含水层结构

Fig.2 The structure of one-dimension phreatic aquifer proposed by Boussinesq (1877)

由式(2)可知, 指数衰减系数与含水层内水文地质参数(渗透系数、给水度)有关外, 还与含水层的厚度和长度有关。对于一些已知含水层厚度和长度的简单岩溶含水层, 指数衰减系数可用于估算出含水层的平均渗透系数和给水度的比值( $K/\varphi$ )<sup>[8-9]</sup>, 这对于认识和调查岩溶化程度较低的含水层具有重要的意义。但需要指出的是, 利用该方法获取的参数基于 Boussinesq (1877)提出的含水层结构和初始条件之下, 因此利用该方法获取的参数仍需谨慎。

这种单一的线性水箱模型仅适用于解释一些简单

泉流量衰减曲线, 而很多实际的岩溶泉流量衰减曲线可能包含若干个指数衰减部分。针对这一现象, Forkasiewicz 和 (1976)引入非岩溶区地表河衰减曲线的分析方法<sup>[10]</sup>, 采用若干个平行线性水箱(一般为 3 个)来解释含有多个指数衰减曲线的泉流量衰减过程(图 3), 泉流量衰减公式具有以下形式:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n Q_i e^{-\alpha_i t} \quad (3)$$

式中:  $Q_i$  为每个并联水箱的初始衰减流量 ( $L^3/T$ );  $\alpha_i$  为每个水箱的指数衰减系数;  $n$  为水箱个数, 一般为 3 个。一般认为模型中衰减系数最大的水箱代表岩溶含水层中管道的排水过程, 衰减系数最小的水箱代表微小裂隙的排水过程, 而衰减系数居中的水箱代表居于管道和微小裂隙之间的裂隙的排水过程。Baedke 和 Krothe (2001)利用这种方法解释了位于印度的两个岩溶泉的衰减曲线<sup>[9]</sup>, 并获得了与实测值近似的管道与裂隙的平均导水系数和给水度比值( $KH/\varphi$ ), Shevenell (1996)甚至将该方法用于解释岩溶含水层中钻孔水位衰减曲线<sup>[11]</sup>。

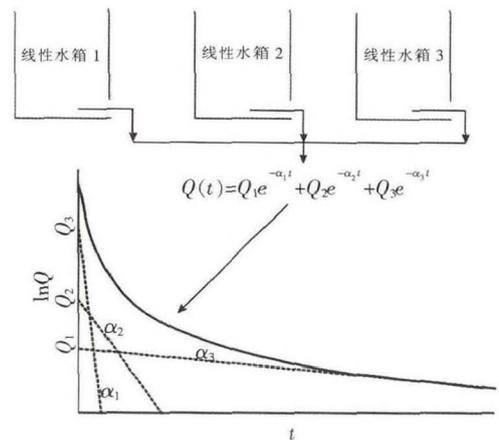


图3 含三个指数衰减曲线的泉流量衰减曲线

Fig.3 The recession of the karst spring contains three exponential parts

尽管 Forkasiewicz 提出的方法被大量用于解释泉流量衰减曲线, 但该方法在物理机制上存在明显的不确定性。首先, Forkasiewicz 的方法假设每个线性水箱相互独立, 即各水箱代表的含水层各单元之间相互独立, 这种假设往往与实际情况相违背, 例如管道与裂隙之间就存在着密切的水力联系<sup>[12-13]</sup>。其次, 一些作者基于单一介质的含水层也获得具有多个指数衰减部分的流量衰减曲线<sup>[14-15]</sup>。Eisenlohr (1997)在模型中仅考虑两种不同渗透系数的介质来分别表示管道和裂隙, 但模

拟的泉流量衰减曲线仍包含3个指数衰减部分,他指出衰减曲线获得的中间指数衰减系数并不一定对应含水层中某一具体的部分,它可能是管道排水向裂隙排水过渡过程中出现的一种临时现象<sup>[16]</sup>。Kovács 和 Perrochet(2008)提出一个二维矩形均质含水层流量衰减的解析解<sup>[17]</sup>,该解析解也有若干个指数衰减部分组成,也可用于解释具有多个指数衰减部分的泉流量衰减曲线。除此之外,一些作者也指出不同的指数衰减过程也可能由排水过程中岩溶含水层面积和有效孔隙度的变化造成<sup>[4-5,18]</sup>。因此,这种多个指数衰减曲线叠加方法虽然能良好模拟泉流量的退水过程,但对于每个指数衰减阶段的解释可能存在很大的不确定性<sup>[12]</sup>,利用该方法解译泉流量衰减曲线时,需对含水层结构有一定的认识,否则可能得出错误的分析结果。

## 2 非指数衰减分析方法

该分析方法认为泉流量的衰减过程偏离指数衰减,当将衰减曲线绘制于  $\ln Q-t$  图上时,指数衰减系数随着泉流量和时间变化。Boussinesq(1903)也基于一个简单的含水层(见图4)求出一个非指数衰减的解析解<sup>[19]</sup>:

$$Q(t) = \frac{Q_0}{(1+\alpha t)^2}, \alpha = \frac{1.115Kh_m}{\varphi L^2} \quad (4)$$

式中:  $h_m$  为含水层最左端的初始水头(L)。需要指出的是, Boussinesq 于 1877 年和 1903 年提出两个不同的解析解基于不同的含水层结构和初始条件,但这两个含水层内均未考虑垂向径流的存在。Dewandel(2003)详细讨论了含水层内垂向径流的存在对衰减曲线的影响<sup>[20]</sup>,当含水层内存在较强的垂直径流,公式(4)仍能较准确的描述含水层流量衰减过程,衰减过程偏离指数衰减,仅当含水层厚度较大时,流量衰减曲线才可能服从指数衰减,但此时衰减曲线的指数衰减系数( $\alpha$ )与公式(2)的计算值存在很大的差异。

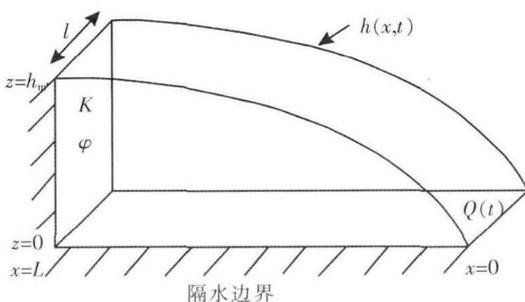


图4 Boussinesq(1903)提出的一维潜水含水结构  
Fig.4 The structure of one-dimension phreatic aquifer proposed by Boussinesq(1903)

Boussinesq 于 1903 年提出的精确解基于一定的初始水头条件(初始水头分布服从不完全  $\beta$  函数形式),而不能良好的表示饱和含水层的排水过程。Brutsaert 和 Nieber(1977)进一步补充了含水层的排水过程,他们将饱和含水层排水分为两个过程<sup>[21]</sup>(图5): (1)当地下水自由水面未达到含水层最右端隔水界面时,含水层排水不受右端边界的影响,此时类似于无限远边界,如图5中的  $t_1 \sim t_3$ ; (2)当地下水自由水面达到最右端隔水界面时,排水过程受右端边界影响,如图5中的  $t_4$ ,该排水过程才可用公式(4)表示。这两种排水过程能统一采用以下公式表示:

$$\frac{dQ}{dt} = -aQ^b \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1.133}{K\varphi H^3 L^2}, & b_1 = 3 & \text{排水过程(1)} \\ a_2 = \frac{2.402K^{1/2}}{\varphi l^{1/2} L^{3/2}}, & b_2 = 3/2 & \text{排水过程(2)} \end{cases}$$

式中:  $H$  为含水层底板距地面的距离 ( $L$ );  $l$  为含水层的宽度 ( $L$ )。

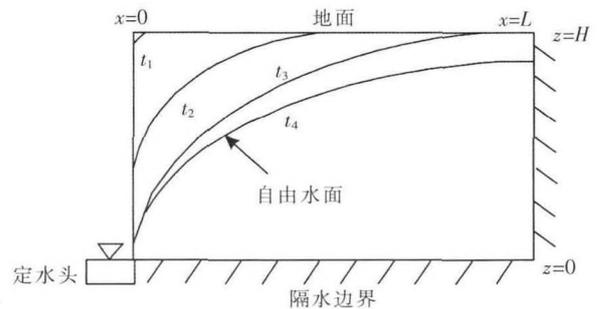


图5 饱和含水层的排水过程<sup>[25]</sup>  
Fig.5 The drainage process of the saturation aquifer

公式(5)可进一步整理为:

$$\lg\left(-\frac{dQ}{dt}\right) = \lg a + b \lg Q \quad (6)$$

因此当将整个衰减曲线绘于  $\lg(-dQ/dt)-\lg Q$  图上时,曲线的斜率即为  $b$ ,而曲线与  $\lg Q$  轴的截距为  $\lg a$ 。整个衰减曲线包含两段直线,分别对应排水阶段1( $b_1=3$ )和排水阶段2( $b_2=3/2$ ),两段直线在  $\lg(-dQ/dt)-\lg Q$  图与  $\lg Q$  轴的截距可用于求解含水层部分水文地质参数。该方法的提出很好的解决了用图解法来表示非线性指数衰减过程,但该方法主要被很多作者用于非岩溶区地表河流或泉的衰减曲线分析<sup>[22-25]</sup>。

虽然非指数衰减曲线也具有解析解基础,但该方法很少用于岩溶泉衰减曲线分析。这一方面由于该方法的

应用远比指数衰减方法复杂,另一方面由于岩溶含水层内部结构的复杂性,实际岩溶含水层远比上述解析解的含水层结构和条件复杂,最终泉流量衰减过程很难与解析解一致。目前对岩溶泉的非指数衰减曲线分析常采用一些经验公式,Droge(1972)基于Boussinesq(1903)提出解析解形式,将整个衰减曲线用一个双曲线形式表示<sup>[29]</sup>:

$$Q=Q_0/(1+\alpha t)^n \tag{7}$$

式中: $n$ 为指数常数,一般为1/2,3/2或2。在此基础上引进 $\beta=\alpha/\sqrt[3]{Q_0}$ , $\beta$ 主要与含水层的渗透系数、给水度、含水层面积和含水层及土壤的降雨前含水量有关。Padilla(1994)采用非线性水箱的流量衰减公式分析岩溶泉的衰减曲线<sup>[27]</sup>:

$$Q=(Q_0-Q_c)[1+(n-1)\alpha_0 t]^{n/(1-n)}+Q_c \tag{8}$$

式中: $n \neq 1$ ; $\alpha_0$ 为 $t=0$ 时的衰减系数; $Q_c$ 为一个常数。相对于解析解,这些经验公式没有明确的物理基础,不能用于获取含水层的相关水文地质参数,但这些公式可用于定量对比不同岩溶泉的衰减过程,易于分析不同岩溶含水层之间的差异。

### 3 综合衰减曲线分析方法

综合衰减曲线分析方法为指数衰减和非指数衰减方法的结合,该方法一般认为泉流量初期和后期衰减过程不同,后期的泉流量衰减过程服从指数衰减,而前期的衰减过程往往偏离指数衰减,很多作者也从解析解的角度证实了这种泉流量衰减过程的存在<sup>[28-30]</sup>。Forkasiewicz和Paloc(1976)提出的多个平行水箱模型,前期衰减曲线为多个指数衰减的叠加,也显示为非指数衰减,直至后期泉流量仅由一个水箱控制时,泉流量才呈指数衰减(图3)。由于不同时期泉流量衰减过程的不同,泉流量曲线被分为非指数衰减和指数衰减两部分。

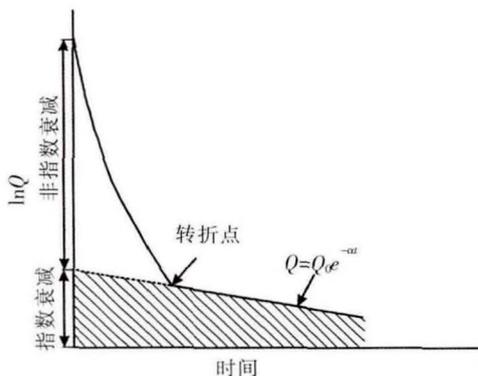


图6 综合衰减曲线分析方法示意图  
Fig.6 The schematic plot of the synthetic analysis method of the recession curve

非指数衰减部分往往采用一些经验公式表示,而指数衰减部分采用简单的线性水箱的指数衰减公式表示(图6),公式的一般形式为:

$$Q(t)=Q_n(t)+Q_0e^{-\alpha t} \tag{9}$$

式中: $Q(t)$ 为泉流量( $L^3/T$ ); $Q_n(t)$ 为 $t$ 时刻非指数衰减部分的流量( $L^3/T$ ); $Q_0$ 为指数衰减的初始流量( $L^3/T$ )。Atkinson(1977)在分析位于英格兰的Cheddar岩溶泉时,指出泉流量衰减25d后流量曲线才呈指数衰减,而在25d前为非指数衰减过程,并采用以下公式来表示前期的非指数衰减过程<sup>[31]</sup>:

$$Q(t)=Q_w(1+xt^y)^{-1} \tag{10}$$

式中: $x,y$ 均为常数; $Q_w$ 为非指数衰减的初始衰减流量( $L^3/T$ )。

Mangin(1975)根据排水过程中含水层内部的具体特点,将初期的非指数衰减过程归因于含水层中的非饱和带的排水过程,采用以下公式表示非指数衰减过程<sup>[32]</sup>:

$$Q_n(t)=(Q_w-Q_0)\frac{1-\eta t}{1+\epsilon t} \tag{11}$$

式中: $\eta$ 代表非饱和带的平均入渗速率(无量纲),含水层中非饱和带总入渗时间为 $1/\eta$ ; $\epsilon$ 显示非指数型衰减曲线段的凹曲程度(无量纲)。Mangin提出的分析方法也被一些作者用于分析岩溶泉的曲线并取得了良好的结果<sup>[27,33]</sup>,但上述表达式的提出基于对岩溶含水层内部水文过程的假设和简化,因此公式中参数的解释也可能存在一定的不确定性。Eisenlohr(1996)基于分布式模型模拟的结果就指出上述公式可能不能正确的反映含水层内部的入渗时长<sup>[16]</sup>。除此之外,Samani和Ebrahimi(1996)采用Padilla(1994)利用的非线性水箱拟合非指数衰减过程<sup>[34]</sup>:

$$Q_n(t)=(Q_w-Q_0)(1+(n-1)\alpha_0 t)^{n/(1-n)} \tag{12}$$

这种综合型衰减曲线分析方法一般认为指数衰减部分完全由含水层内的裂隙介质控制,代表岩溶含水层的慢速流或基流过程,而非指数衰减部分受到其它因素(比如包气带、降雨或管道等)的影响,部分作者也认为该部分代表岩溶含水层的快速流过程。该分析方法常用于泉流量衰减曲线分割,分析不同降雨条件岩溶含水层的性质变化,或对比分析不同岩溶含水层之间的差异。

### 4 管道对衰减曲线的影响

目前绝大部分衰减曲线分析方法均将整个岩溶含

水层概化为一个整体,但对于一些强烈非均质岩溶含水层,岩溶含水层具有明显的管道-裂隙二元结构特征。管道与裂隙的性质具有很大的差别,管道因其高渗透性一般为含水层主要的排水通道,而地下水在裂隙介质流速较低,一般为含水层主要的储水空间,两者应该分开考虑而不能概化为一个整体。在岩溶含水层中,管道一般与泉直接相连,在泉流量衰减初期,管道内的地下水首先通过泉口排泄,泉流量初期衰减曲线主要受到管道排水过程的影响。Forkasiewicz和Paloc(1967)提出的多个平行水箱模型中采用线性水箱考虑管道的排水过程,但线性水箱可能仅适合于反映层流管道的排水过程,而地下水在管道中可能呈紊流状态,线性水箱可能不能较好的反应管道这一性质<sup>[35-36]</sup>。当含水层中地下水在管道中呈紊流时,其排水过程可能更趋于服从线性衰减曲线,而非指数衰减曲线<sup>[5, 13]</sup>。

当管道内地下水排水过程结束时,后期的泉流量主要来自于裂隙介质内的地下水。Eisenlohr(1997)基于一个二维岩溶含水层的分布式模型模拟结果指出,泉流量后期的指数衰减过程也受到管道性质(例如管道渗透性、管道分布等)的影响<sup>[16]</sup>。Kovács(2005)详细讨论了管道渗透性可能对泉流量衰减曲线的影响<sup>[2]</sup>,他将含水层划分为两种类型:基质限定型和管道影响型。当管道渗透性足够大,管道在含水层中近似于定水头边界,管道基本不影响裂隙介质的排水过程,泉流量衰减过程主要受裂隙介质性质的影响,此含水层即为基质限定型;而在管道影响型含水层中,管道往往偏离于定水头边界,裂隙介质的排水过程也受到管道影响,因此泉流量衰减曲线也受到管道的影响。需要指出的是,Kovács的分析结论主要基于Király和Morel于1976年提出的等效多孔介质-管道模型<sup>[1, 37]</sup>,在该模型中管道流仅采用立方定律,即管道流量与水力梯度呈线性关系,而这一假设与实际岩溶含水层中的紊流管道仍存在一定的差距。

当岩溶含水层为基质限定型时,虽然泉流量衰减过程不受管道渗透系数的影响,但管道在含水层中的分布密度和走向仍会影响泉流量的衰减过程<sup>[40]</sup>。在基质限定型岩溶含水层中,管道在含水层中近似于定水头边界,裂隙介质被管道分割为若干个独立单元,泉流量衰减曲线为各裂隙介质单元排水流量的总和,泉流量衰减曲线主要受各裂隙单元性质的影响。根据公式(2)可知,指数衰减系数除与渗透系数 $K$ 和给水度 $\varphi$ 有关,

还与裂隙介质的长度 $L$ 有关。当考虑二维岩溶含水层时,指数衰减系数应与裂隙介质的几何形状和面积有关。Kovács给出了一个二维均质潜水含水层指数衰减系数的表达形式<sup>[2]</sup>:

$$\alpha = \frac{\gamma T}{\varphi A} \quad (13)$$

式中: $\gamma$ 为含水层的几何因子(无量纲),主要取决于含水层的形状和边界条件; $A$ 为含水层面积( $L^2$ ); $\varphi$ 为含水层给水度(无量纲); $T$ 为含水层导水系数( $L^2/T$ )。根据公式(13),岩溶含水层中各裂隙介质单元的排水过程主要与其形状和面积有关,管道在含水层中的分布主要通过影响各裂隙介质单元的形状和面积来影响泉流量衰减过程,例如管道在含水层中的分布密度越大,由管道分割的裂隙介质单元的面积越小,则基流的指数衰减系数应越大,泉流量衰减速度越快。

## 5 结论与展望

尽管岩溶泉流量衰减曲线分析的研究由来已久,研究成果也十分丰富,但仍然存在大量的问题待解决:

(1)目前有关岩溶泉衰减曲线的解析解均基于均质各向同性等效多孔介质含水层,而在岩溶含水层中裂隙介质一般强烈非均质和各向异性,将这部分的解析解应用于分析岩溶泉衰减曲线并获取部分水文地质参数的可靠性仍需要进一步论证。

(2)一些经验模型也被广泛用于岩溶泉流量曲线分析并取得了良好的结果,但这些经验模型所代表的物理意义仍需要进一步探索。

(3)岩溶泉流量衰减曲线的研究主要集中于含水层饱水带的研究,并未考虑非饱和带可能对泉流量衰减曲线的影响。在岩溶含水层中,其上部包气带往往发育有表层岩溶带,该层会对泉流量对降雨的响应过程和饱水带的补给产生重要影响,因此岩溶含水层中包气带特别是表层岩溶带对岩溶泉流量衰减曲线的影响也需要进一步研究。

(4)管道作为岩溶含水层的有机组成部分,也可能对岩溶泉衰减曲线产生明显的影响,但目前有关管道对泉流量衰减曲线的影响仅取得一些初步认识,对于复杂管道结构(例如多层管道)、紊流管道对泉流量衰减曲线的影响仍需要进一步研究。

(5)在岩溶地区,地表水和地下水之间存在密切的

联系,地表水可以通过落水洞或竖井直接补给岩溶含水层,影响泉流量,这种径流过程的存在对泉流量衰减曲线的影响也为以后的研究方向之一。

由于岩溶含水层内部碳酸盐岩的差异性溶蚀,含水介质往往表现出强烈非均质性和各向异性,含水层结构复杂,选取何种方法分析衰减曲线仍没有一定的标准。目前分析方法的选择主要依据泉流量的衰减过程决定,这也将导致分析结果的不确定性,对于一些复杂的岩溶含水层,笔者建议分析泉流量衰减曲线时可同时采用多种不同的分析方法。需要指出的是,绝大部分岩溶泉流量曲线的解析解均基于一定的假设条件,因此在利用一些方法分析泉流量衰减曲线时需要对被分析的岩溶含水层具有一定的了解,同时也最好能结合一些现场试验数据(抽水试验、示踪试验、洞穴勘察等)和泉水化学数据来辅助分析泉流量衰减曲线。由于岩溶含水层的复杂性,通过完全掌握含水层性质来解析泉流量衰减曲线一般不易实现,通过室内模拟实验或利用具有物理基础的分布式模型(例如 MODFLOW, CAVE, MODFLOW-CFP 等模型)来讨论不同结构或水文地质参数条件下泉流量衰减曲线的性质可能成为一种更为有效的手段<sup>[2,16,20,38-40]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] Kiraly L, Morel G. Remarques sur l'hydro gramme des sources karstiques simulé par modèles mathématiques[J]. Bulletin du Centre d'Hydrogéologie, 1976,1:37-60.
- [2] Kovács A, Perrochet P, Király L, et al. A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis [J]. Journal of Hydrology, 2005,303(1-4):152-164.
- [3] Amit H, Lyakhovsky V, Katz A, et al. Interpretation of spring recession curves [J]. Ground Water, 2002,40(5):543-551.
- [4] Bonacci O. Karst spring hydrographs as indicators of karst aquifers[J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 1993,38(1):51-62.
- [5] Fiorillo F. The recession of spring hydrographs, focused on karst aquifers [J]. Water Resources Management, 2014,28(7):1781-1805.
- [6] Fiorillo F, Revellino P, Ventafridda G. Karst aquifer draining during dry periods [J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2012,74(2):148-156.
- [7] Boussinesq J. Essai Sur La Théorie Des Eaux Courantes De Trissement Du Débit [M]. Imprimerie Nationale, 1877.
- [8] Chen X, Zhang YF, Xue XW, et al. Estimation of baseflow recession constants and effective hydraulic parameters in the karst basins of southwest China [J]. Hydrology Research, 2012,43(1-2): 102-112.
- [9] Baedke SJ, Krothe NC. Derivation of effective hydraulic parameters of a karst aquifer from discharge hydrograph analysis [J]. Water Resour Res, 2001,37(1):13-19.
- [10] Forkasiewicz J, Paloc H. Le regime de tarissement de la Foux-de-la-Vis[J]. Etude Preliminaire: Chronique d'Hydrogeologie, BRGM, 1967,3(10):61-73.
- [11] Shevenell L. Analysis of well hydrographs in a karst aquifer: estimates of specific yields and continuum transmissivities [J]. Journal of Hydrology, 1996,174(3-4):331-355.
- [12] Ford DC, Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology [M]. John Wiley & Sons, 2007.
- [13] Bailly-Comte V, Martin JB, Jourde H, et al. Water exchange and pressure transfer between conduits and matrix and their influence on hydrodynamics of two karst aquifers with sinking streams [J]. Journal of Hydrology, 2010,386(1-4):55-66.
- [14] Nutbrown DA, Downing RA. Normal-mode analysis of the structure of baseflow-recession curves [J]. Journal of Hydrology, 1976,30(4):327-340.
- [15] Szilagyi J. On the Use of semi-logarithmic plots for baseflow separation [J]. Ground Water, 1999,37(5):660-662.
- [16] Eisenlohr L, Király L, Bouzelboudjen M, et al. Numerical simulation as a tool for checking the interpretation of karst spring hydrographs [J]. Journal of Hydrology, 1997,193(1-4):306-315.
- [17] Kovács A, Perrochet P. A quantitative approach to spring hydrograph decomposition [J]. Journal of Hydrology, 2008,352(1-2):16-29.
- [18] Fiorillo F. Tank-reservoir drainage as a simulation of the recession limb of karst spring hydrographs [J]. Hydrogeology Journal, 2011,19(5):1009-1019.
- [19] Boussinesq J. Sur un mode simple d'écoulement des nappes d'eau d'infiltration a lit horizontal, avec rebord vertical tout autour lorsqu'une partie de ce rebord est enlevée depuis la surface jusqu'au fond [J]. CR Acad Sci, 1903,137(5):11.
- [20] 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(1-4):248-269.
- [21] Brutsaert W, Nieber JL. Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau [J]. Water Resources Research, 1977,13(3):637-643.
- [22] Brutsaert W, Lopez JP. Basin-scale geohydrologic drought flow features of riparian aquifers in the southern great plains [J]. Water Resources Research, 1998,34(2):233-240.
- [23] Szilagyi J, Parlange MB, Albertson JD. Recession flow analysis for aquifer parameter determination [J]. Water Resources Research, 1998,34(7):1851-1857.
- [24] Mendoza GF, Steenhuis TS, Walter MT, et al. Estimating basin-wide hydraulic parameters of a semi-arid mountainous watershed by recession-flow analysis [J]. Journal of Hydrology, 2003,279(1-4):57-69.

- [25] Malvicini CF, Steenhuis TS, Walter MT, et al. Evaluation of spring flow in the uplands of Matalom, Leyte, Philippines [J]. *Advances in Water Resources*, 2005,28(10):1083–1090.
- [26] Drogue C. Analyse statistique des hydrogrammes de decrues des sources karstiques statistical analysis of hydrographs of karstic springs [J]. *Journal of Hydrology*, 1972,15(1):49–68.
- [27] Padilla A, Pulidobosch A, Mangin A. Relative important of baseflow and quickflow from hydro graphs of karst spring [J]. *Ground Water*, 1994,32(2):267–277.
- [28] Birk S, Hergarten S. Early recession behaviour of spring hydrographs [J]. *Journal of Hydrology*, 2010,387(1–2):24–32.
- [29] Rorabaugh M. Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow [J]. *International Association of Scientific Hydrology*, 1964,63:432–441.
- [30] Cuthbert MO. Straight thinking about groundwater recession [J]. *Water Resources Research*, 2014,3(50):2407–2424.
- [31] Atkinson TC. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain) [J]. *Journal of Hydrology*, 1977,35(1–2):93–110.
- [32] Mangin A. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques [D]. *Laboratoire Souterrain du Centre National de la Recherche Scientifique*, 1975.
- [33] Mohammadi Z, Shoja A. Effect of annual rainfall amount on characteristics of karst spring hydrograph [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2014,29(3):279–289.
- [34] Samani N, Ebrahimi B. Analysis of spring hydrographs for hydrogeological evaluation of a karst aquifer system[J]. *Theoretical Appl Karstol*, 1996,9:97–112.
- [35] Halihan T, Wicks CM. Modeling of storm responses in conduit flow aquifers with reservoirs [J]. *Journal of Hydrology*, 1998,208(1–2):82–91.
- [36] Halihan T, Wicks CM, Engeln JF. Physical response of a karst drainage basin to flood pulses: example of the Devil's Icebox cave system (Missouri, USA) [J]. *Journal of Hydrology*, 1998,204(1–4):24–36.
- [37] Kiraly L, Perrochet P, Rossier Y. Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs: a numerical approach [J]. *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie*, 1995,14:199–220.
- [38] 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))
- [39] 田娟,董贵明,束龙仓. 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[J]. *水文地质工程地质*, 2013,40(2):13–18. (TIAN Juan, DONG Guiming, SHU Longcang. Research on relationship between parameters and attenuation coefficients of pore-pipe underground river systems, southwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013,40(2):13–18. (in Chinese))
- [40] 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 Longcang, TAO Yufei, DONG Guiming, et al. Simulation and analysis of the recession curve of the karst spring [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008,(9):32–34. (in Chinese))

## On Recession Curve of Karst Spring

CHANG Yong<sup>1,2</sup>, WU Jichun<sup>2</sup>, LIU Ling<sup>3</sup>, LUO Yue<sup>2</sup>

(1. *Karst Dynamics Laboratory, MLR and GZAR, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, China;*

2. *Department of Hydrosciences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;*

3. *Geological Survey Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)*

**Abstract:** Because of strong heterogeneity and anisotropy of the karst aquifer, it is very hard to understand the internal properties of the karst aquifer. Analyzing the recession curve of the karst spring is an effective way to solve this problem. This paper reviewed the methods that were widely used to analyze the recession curve of the karst spring, including exponential recession, non-exponential recession and some combination analysis methods. The influence of the conduit on the recession curve was also discussed. Based on these analysis methods, some key problems need to be solved in the future were proposed.

**Key words:** karst spring; recession curve; exponential recession; non-exponential recession; conduit