

地下水流量衰减方程研究进展及展望

董贵明¹, 束龙仓²

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 地下水流量衰减分析是水文地质学和水文学的一种重要方法, 衰减方程的研究又是衰减分析研究的重要内容。对基于含水层水流方程、流域蓄-泄关系和经验关系的地下水流量衰减方程进行了归纳总结, 共整理了16个较常使用的衰减方程, 阐述了每一个衰减方程的由来、方程参数含义及其应用情况, 其中指数衰减方程应用最为广泛。最后提出了研究展望: (1) 研究水文地质条件与衰减方程的对应关系; (2) 新衰减方程的研究; (3) 采用数值试验方法进行衰减方程的研究。

关键词: 地下水; 流量衰减分析; 衰减方程

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2014)04-0045-07

地下水流量衰减研究一般包括基流量、泉流量和地下河出口流量等的衰减研究。地下水流量衰减研究在地下水资源评价、径流模拟和认识含水层水文地质特征等方面具有重要意义, 在没有实测水文地质和地表水资料或者实测资料不足的情况下尤为重要。国内外的水文地质学家和水文学家对含水层地下水流量衰减的研究已有一百多年的历史^[1]。其中, 衰减方程形式的研究是流量衰减研究的重要内容, 对衰减方程表达式也已经进行了大量的研究, 积累了一批有代表性的衰减方程。

地下水流量衰减方程主要依据含水层水流方程、流域蓄-泄关系、经验关系和统计方法获得, 这也形成了四种类型的衰减方程。统计方法主要是利用了相关分析方法, 包括自相关分析和互相关分析, 具体得到的流量衰减方程因水文地质条件不同差异较大, 一般没有统一的表达式。本文将对前三种类型的衰减方程进行归纳总结, 并提出衰减方程的研究展望, 以促进地下水流量衰减方程以及衰减分析

的研究。

1 基于含水层水流方程的衰减方程

1.1 指数衰减方程

Boussinesq 是第一个进行地下水流量衰减方程理论研究的, 使用的潜水运动基本方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{\varphi} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中: K ——渗透系数;

φ ——重力给水度;

h ——水头;

t ——时间。

在求解过程中做了如下假定: 含水层均质、各向同性, 含水层宽(垂直于河流方向) L , 长 l , 忽略毛细作用, 含水层隔水底板是凹形的, 最低处低于河流水位 H , h 的变化相对于 H 是忽略不计的。水文地质概念模型见图1。

在这些假设的基础上, Boussinesq 通过线性化的方法得到了近似解:

$$Q(t) = Q(0)e^{-\alpha t} \quad (2)$$

$$Q(0) = \frac{\pi K H l}{2} \frac{h_m}{L} \quad (3)$$

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

式中: $Q(0)$ ——初始流量;

$Q(t)$ —— t 时刻的流量;

α ——衰减系数;

h_m ——距离河流为 L 、整个含水层宽度处的 t 时

收稿日期: 2013-08-12; 修订日期: 2013-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202179); 国家自然科学基金项目(51209109); 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: 董贵明(1979-), 男, 在站博士后, 讲师, 主要从事地下水数值模拟和水资源评价等的教学和科研工作。

E-mail: guiming14432@126.com。

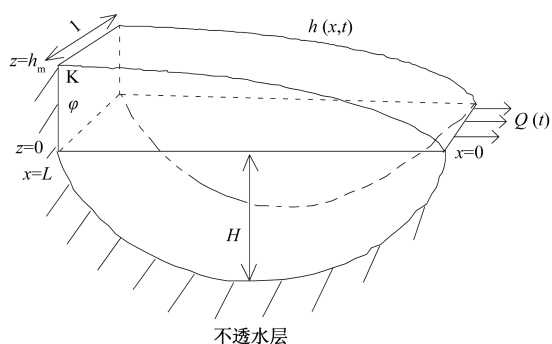


图1 Boussinesq 水文地质概念模型

(据 Dewandel 等^[2],2003)

Fig.1 Boussinesq Hydrogeological conceptual model

(From Dewandel, Inc.^[2],2003)

刻水头。

式(2)为单一指数型衰减方程,也就是著名的 Maillet 公式^[3]。目前,单一指数衰减方程在地下水流量衰减中应用最为广泛,国内主要是用在各种水文模型的地下水模块和基流的衰减分析当中^[4]。

Werner 和 Sundquist^[5]提出了承压含水层流量衰减的表达式:

$$Q(t) = Q(0) \sum b_i e^{-a_i t} \quad (5)$$

式中: b_i ——常数。

式(5)实际上是叠加指数型衰减方程。克莱因霍夫(Kraijenhoff)^[6]针对位于两个不透水边界之间、且中间有河流穿过的潜水含水层,在一维流概念模型基础上,推导了含水层流量衰减方程,该方程为三角函数(不含时间变量)和指数的无穷项叠加,也属于叠加指数型衰减方程。

单一指数和叠加指数方程除了在非岩溶流域得到了广泛的应用之外,从20世纪60年代开始指数衰减方程在岩溶地区也得到了广泛的应用,使用较多的是叠加指数型方程。福卡西维奇(Forkasiewicz)和帕洛斯(Paloc)研究了法国的 Foux de la Vis 泉,建立了叠加型的指数衰减方程^[7]。Schoeller^[8]使用叠加指数型衰减方程分析了岩溶含水层的流量衰减过程。Mangin^[9]和 Moore^[10]认为叠加型指数方程很可能仅仅是由于增加了曲线的拟合参数,通过参数的调整达到了较好的衰减曲线拟合效果。

与国外相比,国内对岩溶地区流量衰减的研究起步较晚。1978年原国家地质总局岩溶考察组发表的“赴南斯拉夫岩溶地质考察技术报告”和1982年何宇彬的《喀斯特水文学》中最早引入了岩溶泉流量衰减

方程。在“五·五”、“六·五”期间对湖南洛塔流域、贵州普定南部、贵州独山南部、广西都安地苏地下河流域的水资源开发利用进行了较为详细的研究,这些流域都发育众多的地下河系,地下河流量衰减过程基本上都是使用的独立指数型、叠加指数型、直线方程(某些地下河流域的第一段使用直线方程)进行拟合,其中以独立指数型为主。

《勘察科学技术》杂志在1984年开设了“岩溶水亚动态衰减方程讨论”专栏,刊登了一些国内衰减方程研究的文章。黄敬熙^[11]以湖南洛塔岩溶盆地为例,分析了独立指数型流量衰减方程的应用。缪钟灵等^[12]分析了衰减系数的含义。林敏和陈崇希等^[13]对泉流量衰减方程中衰减系数的物理意义进行了探讨,通过砂柱的非稳定达西渗流试验推导出了流量和水位的独立指数衰减表达式。杨立铮^[14]建立了后寨地下河叠加指数型衰减方程。程俊贤^[15]和汤邦义^[16]指出了叠加指数型衰减方程是有误差的,会出现跳跃的情况。董贵明^[17]提出了新的叠加指数型衰减方程构建方法,避免了拟合过程中的跳跃现象。二十世纪七、八十年代期是中国较集中研究岩溶地下河流量衰减方程的时期。从二十世纪九十年代至今,衰减方程形式的研究尤其是针对岩溶流域的研究国内新的成果很少。

1.2 双曲线及其它衰减方程

Boussinesq 提出了另外一个流量衰减方程,水流方程仍然为式(1),水文地质概念模型如图2所示,含水层均质、各向同性,水位下降相对于含水层厚度不能忽略,隔水底板水平,河流位于隔水底板高程处,初始水位为下降的曲线。这个解的适用条件是排水时间足够长,即含水层水位的下降已经达到了零流量边界($x=L$ 处),图2对应的精确解析解为式(6)。该概念模型当排水时间较短时也有相应的解^[3]。

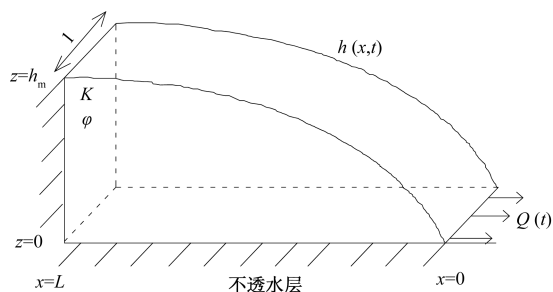


图2 Boussinesq 水文地质概念模型

(据 Dewandel 等^[2],2003)Fig.2 Boussinesq (1903,1904) Hydrogeological conceptual model(From Dewandel, Inc.^[2],2003)

$$Q(t) = \frac{Q(0)}{(1 + \alpha t)^2} \quad (6)$$

$$Q(0) = 0.862Kl \frac{h_m^2}{L} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1.115Kh_m}{\varphi L^2} \quad (8)$$

式(2)和式(6)是基于地下水流运动方程的地下水流衰减的两个基本解,式(6)是精确解析解,而式(2)是近似解析解。双曲线方程也是一类重要的衰减方程,在岩溶和非岩溶领域都得到了较广泛的应用。

Horton^[19]在式(2)的基础上得出了一个新的衰减方程:

$$Q(t) = Q(0)e^{-\alpha t^m} \quad (9)$$

式中: m ——常数。

式(9)也常被叫做霍顿双指数型(Horton double exponential)。

埃迪尔曼(Edelman)^[6]在半无限潜水一维含水层条件下得到了埃迪尔曼型衰减方程:

$$q(0, t) = -h_0 \sqrt{\frac{\mu KD}{\pi t}} \quad (10)$$

式中: $q(0, t)$ —— t 时刻位于出流边界处的单宽流量;

h_0 ——河水位以上含水层初始厚度;

D ——含水层在流量衰减期间的平均厚度。

Nutbrown^[19]把标准模式(normal-mode)应用到河流部分切割含水层时含水层的衰减分析,并基于二维水流方程和Dupuit假设得到流量衰减的表达式:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i K_i' \quad (11)$$

式中: A_i ——依赖于含水层流量的初始值 $Q(0)$ 和含水层的初始水位分布。

Kovács^[21~22]参考了Carslaw和Jaeger的热传导方程的解析解得到了研究区为立方体形状的二维孔隙介质流量衰减表达式:

$$Q(t) = \frac{128}{\pi^2} T \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{Tt}{\mu L^2}\right) \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{Tt}{\mu L^2}\right)}{(2n+1)^2} \quad (12)$$

式中: T ——含水层的导水系数;

μ ——给水度;

L ——研究区平面边长。

忽略系列的高阶项,并将解析表达式带入Maillet的经典公式中,二维均质区的衰减系数如式(13)所示,Kovács将该衰减系数表达式应用到了实际岩溶地区。

$$\alpha = \frac{2\pi^2 T}{\mu L^2} \quad (13)$$

2 基于流域蓄-泄关系的衰减方程

Maillet首先根据线性蓄-泄关系得到了与式(2)一致的衰减方程。在实际应用过程中,研究者发现线性水库的蓄泄系数不总是常数,可能会随着含水层流量的减小出现增加的趋势,流域的蓄-泄关系表现出较强的非线性特征^[23]。这种非线性关系经常使用幂函数形式表示:

$$W(t) = a[Q(t)]^b \quad (14)$$

式中: $W(t)$ —— t 时刻该河流断面以上流域蓄水量;

a, b ——常数,且 $b \neq 1$ 。

结合式(14)和枯水期水量平衡方程,可得:

$$Q(t) = Q(0)[1 + at]^\theta \quad (15)$$

式中:

$$\alpha = \frac{(b-1)Q(0)}{bW(0)} \quad (16)$$

$$W(0) = a[Q(0)]^b \quad (17)$$

$$\theta = \frac{1}{b-1} \quad (18)$$

当 $b=0.5$ 时,式(15)即为Boussinesq提出的双曲线衰减模型。

文献[23]中取 $\theta = -1.67$,对实际流域的流量衰减进行了很好的拟合。法国的德罗古^[18]通过对由100个泉组成的泉和泉群的12个观测点的流量衰减数据进行分析,比较了 θ 分别取 -0.5 、 -1.5 、 -2 、 -3 和 -5 的结果,分析表明 θ 取 -1.5 更为合适。文献[24]认为,简单流域适用于线性蓄-泄关系,而复杂的流域一般符合非线性蓄-泄关系。

Cheng^[24]使用时变流域蓄-泄关系式(19)和式(20)的基础上分析流量衰减过程。

$$W(t) = \tau(t)Q(t) \quad (19)$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau(t)}Q(t) \quad (20)$$

令 $\frac{1}{\tau(t)} = \frac{1}{\tau t^m}$, Cheng分析了当 $m \geq 0$ 时的衰减方程,这时的方程包括了单一指数型和霍顿双指数模型等基本

模型。对 $\tau(t)$ 在 t_0 时刻展开,并保留前三项,得到了一个幂函数、指数函数混合的衰减方程:

$$Q(t) = ct^{-\alpha_0} e^{-\alpha_1 t + \alpha_2 \frac{1}{t}} \quad (21)$$

式(21)中包含四个常数: c 、 α_0 、 α_1 、 α_2 。Cheng 对比了单一指数型、反转指数型($Q(t) = ae^{\frac{b}{t}}$)、幂函数型、混合模型在实际地区的应用效果,分析表明混合型有更好的拟合效果。

3 基于经验关系的衰减方程

Coutagne^[25]提出了一个水库出流模型:

$$Q(t) = Q(0) [1 + (n-1)\alpha_0 t]^{n/(1-n)} \quad (22)$$

$$\alpha_t = \alpha_0 [1 + (n-1)\alpha_0 t]^{-1} \quad (23)$$

式中: n ——常数,且 $n \neq 1$ 。

式(22)和式(23)是较早的以经验为主的整个流量过程衰减方程。Padilla^[26]指出当 n 取值在 $0 \sim 2$ 时,式(22)能应用到河流或者非岩溶泉的流量衰减过程,但不适用于岩溶泉。Padilla 在式(22)中引入了一个常数 Q_c ,常数 Q_c 代表相邻含水层或者下部的弱透水层的衰退,表达式如下:

$$Q(t) = (Q(0) - Q_c) [1 + (n-1)\alpha_0 t]^{n/(1-n)} + Q_c \quad (24)$$

Toebes 等^[27]在单一指数型衰减模型的基础上引入了一个常数 b ,表达式如下:

$$Q(t) = (Q(0) - b)e^{(-t/c)} + b \quad (25)$$

Otnes^[28]通过对挪威南部一些流域的研究,提出了一个新的双曲线模型:

$$Q(t) = at^{-1} - Q(0) \quad (26)$$

式中: a ——常数。

后来,Otnes 又提出了一个模型:

$$Q(t) = at^{-r} \quad (27)$$

式中常数 $r > 1$,在挪威的一些湖分布较多的流域采用该模型有较好的适用性,到目前为止,在挪威的衰减分析研究中还常常使用式(27)。式(27)与 Toebes 等^[27]提出的另外一个模型(式(28))只相差一个常数 b :

$$Q(t) = at^{-r} + b \quad (28)$$

Mangin^[29]通过线性和非线性两部分来描述岩溶系统的流量衰减:

$$Q(t) = \varphi(t) + \varphi(t) \quad (29)$$

$$\varphi(t) = q_{r0} e^{-\alpha t} \quad (30)$$

$$\varphi(t) = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t} \quad (31)$$

式中: q_{r0} ——初始基流量;

q_0 ——最大渗透流量;

$\varphi(t)$ ——衰减的线性部分;

$\varphi(t)$ ——非饱和带的地表入渗补给。

Samani 等^[30]提出了一个类似于 Mangin 的也是由两部分组成的衰减模型:

$$Q(t) = \varphi(t) + \theta(t) \quad (32)$$

$$\varphi(t) = q_{r0} e^{-\alpha t} \quad (33)$$

$$\theta(t) = (Q(0) - q_{r0}) [1 + (n-1)\alpha_0 t]^{n/(1-n)} \quad (34)$$

其中的两部分是分别用来描述饱和带和非饱和带流量衰减。

上述国外学者提出的衰减方程形式总结见表 1。

4 研究展望

衰减方程形式的研究已有一百多年的历史,但仍有下列问题需要进一步研究:

(1)什么条件下采用什么样的衰减方程。已经提出的衰减方程在不同的流域都得到了不同程度的应用,并且都取得了一定的效果。比如,单一指数衰减方程尽管是从均质各向同性的一维潜水方程推导出来,但在岩溶地下河系统中也得到了广泛的应用,也具有较好的拟合效果。然而,具体的某一水文地质条件下采用哪一种或者哪几种衰减方程即水文地质条件和衰减方程的对应关系目前还没有一致的结论。水文地质条件和衰减方程之间到底能不能有对应关系,具体是如何对应的,这也是在应用和研究中首先要面临的问题。水文地质条件主要包括含水层的类型、含隔水层的空间分布特征、补径排条件、边界条件和水文地质参数等方面,应进一步分析研究这些条件与衰减方程的对应关系,为衰减方程的更合理选取提供理论依据。

(2)新衰减方程的研究。在已经提出的衰减方程中,有些形式比较简单,方程及其参数的物理意义一般比较明确,但这些方程对于复杂流域不容易得到满意的拟合效果;有些形式比较复杂,这些方程对于复杂流域也能得到较为满意的拟合效果(复杂形式的衰减方

表 1 常用衰减方程汇总

Table 1 Commonly used recession equation collection

衰减曲线来源	年份	主要提出者	衰减方程	应用情况
基于含水层水流运动方程	1877	Boussinesq	$Q(t) = Q(0)e^{-\alpha t}$	很多区域都有应用
	1903, 1904	Boussinesq	$Q(t) = \frac{Q(0)}{(1 + \alpha t)^2}$	很多区域都有应用
	1933	Horton	$Q(t) = Q(0)e^{-\alpha t^m}$	应用的较少
	1947	Edelman	$q(0, t) = -h_0 \sqrt{\frac{\mu K D}{\pi t}}$	应用的较少
	1951	Werner, Sundquist	$Q(t) = Q(0) \sum_{i=1}^n b_i e^{-\alpha_i t}$	很多区域都有应用
	1975	Nutbrown	$Q(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i K_i^t$	应用的较少
基于流域蓄-泄方程	2003, 2005	Kovács	$Q(t) = \frac{128}{\pi^2} T \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(- (2n + 1)^2 \pi^2 \frac{Tt}{\mu L^2}\right) \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(- (2n + 1)^2 \pi^2 \frac{Tt}{\mu L^2}\right)}{(2n + 1)^2}$	意大利北部城市米兰的岩溶系统
	1905	Maillet	$Q(t) = Q(0) [1 + \alpha t]^\theta$	很多区域都有应用
	2008	Cheng	$Q(t) = ct^{-\alpha_0} e^{-\alpha_1 t + \alpha_2 \frac{1}{t}}$	美国安大略湖区域
	1948	Coutagne	$Q(t) = Q(0) [1 + (n - 1) \alpha_0 t]^{n/(1 - n)}$	应用的较少
	1994	Padilla	$Q(t) = (Q(0) - Q_c) [1 + (n - 1) \alpha_0 t]^{n/(1 - n)} + Q_c$	应用的较少
基于经验关系	1964	Toebes	$Q(t) = (Q(0) - b) e^{(-t/c)} + b$ $Q(t) = at^{-r} + b$	波兰、丹麦的一些流域
	1953	Otnes	$Q(t) = at^{-1} - Q(0)$	挪威南部一些流域
	1978	Otnes	$Q(t) = at^{-r}$	挪威的一些流域
	1970, 1975	Mangin	$Q(t) = \varphi(t) + \varphi(t)$	应用的较少
	1996	Samani	$Q(t) = \varphi(t) + \theta(t)$	应用的较少

程拟合效果提高的原因之一是增加了拟合参数),但方程及其参数的物理意义一般不明确。衰减方程除了应具有较好的适应性之外,方程本身及其参数还应该具有明确的物理意义。因此,应进一步加强新的具有较好的适应性且方程本身及其参数具有明确物理意义的衰减方程的研究。

(3)采用数值试验方法进行衰减方程的研究。已经提出的衰减方程,其来源主要是简单的水文地质模型下的解析解、线性或非线性蓄-泄关系和经验关系,并主要通过实际的观测数据检验拟合效果。而实际地区的水文地质条件是各种各样的,尤其是一些复杂地区(比如岩溶地下河地区)又比较缺乏水文地质资料和流量观测数据。这些都使得衰减方程的研究受到了限制,而建立地下水系统数值模型,通过数值试验的方法,可以人为设定各种水文地质条件,并通过分析流量衰减过程实现对相应条件下衰减方程的研究,将为衰

减方程的研究提供更加广阔的“场景”。

地下水流量衰减分析已有一百多年的历史,已经取得了丰富的成果,多种不同类型和形式的衰减方程被提出并得到了应用。地下水流量衰减分析是水文地质学和水文学的一种重要方法,应继续加强这方面的研究。

参考文献:

[1] Boussinesq J. Essai sur la théorie des beaux courante denouements nonpermanent des beaux southerliness [J]. Acad Sci Inst Fr, 1877,23:252 - 260.

[2] 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: 248 - 269.

[3] Brutsaert W, Nieber J L. Regionalized drought flow

- hydrographs from a mature glaciated plateau [J]. Water Resour Res, 1977(34):233-240.
- [4] 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)]
- [5] Weruer P W, Sundquist K J. On the groundwater recession curve for large watersheds[J]. IAHS Publ, 1951(33): 202-212.
- [6] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.[WU X F. Principles of hydrology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese)]
- [7] Forkasiewicz J, Paloc H. Le régime de tarissement de la Foux de laVis (Gard-France) [J]. Etude préliminaire Proc Hydrol des Roches Fissurées, Dubrovnik, 1965,21:213-226.
- [8] Schoeller H. Hydrodynamique dans le karst [J]. Chronique d'hydrogéol, 1967(10):7-21.
- [9] Mangin A. Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement [J]. Ann Spéléol, 1970, 25: 581-610.
- [10] Moore R D. Storage-outflow modeling of streamflow recessions, with application to a shallow-soil forested catchment[J]. Journal of Hydrology, 1997,198:260-270.
- [11] 黄敬熙.流量衰减方程及其应用:以洛塔岩溶盆地为例[J].中国岩溶,1982,1(2):118-126.[HUANG J X. Recession equation and its application; case history of luota karst basin [J]. Carsologica Sinica, 1982, 1(2): 118-126. (in Chinese)]
- [12] 缪钟灵,缪执中.指数衰减方程在地下水研究中的运用[J].勘察科学技术,1984(5):1-5.[LUO Z L, LUO Z Z. Exponential decay equation in groundwater studies in the use [J]. Investigation Science and Technology, 1984(5): 1-5. (in Chinese)]
- [13] 林敏.泉流量衰减方程中 α 系数物理意义的探讨[J].勘察科学技术,1984(5):6-10.[LI M. Spring discharge attenuation coefficient of the physical meaning of the equation Discussion [J]. Site Investigation Science and Technology, 1984(5):6-10. (in Chinese)]
- [14] 杨立铮.地下河流域岩溶水天然资源类型及评价方法[J].水文地质工程地质,1982(4):22-25.[YANG L Z. Vnderground river Karst water natural resource types and evaluation methods [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1982(4):22-25. (in Chinese)]
- [15] 程俊贤.岩溶水消耗期亚动态叠加及应用[J].勘察科学技术,1985(2):52-58.[CHENG J X. Karst water consumption and application of Asian dynamic overlay [J]. Site Investigation Science and Technology,1985(2):52-58. (in Chinese)]
- [16] 汤邦义.多亚动态型泉水流量衰减方程的探讨[J].勘察科学技术,1984(5):10-15.[TANG B Y. Multi Asian dynamic type Equation of spring flow attenuation [J]. Site Investigation Science and Technology, 1984(5):10-15. (in Chinese)]
- [17] 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. Karst underground river system water movement numerical model and attenuation characteristics of dry season flows [D]. Nanjing: Hohai University,2009. (in Chinese)]
- [18] Drogue C. Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques [J]. Journal of Hydrology, 1972(15):49-68.
- [19] Horton R E. The role of infiltration in hydrologic cycle [J]. Trans. Am. Geophys. Union, 1933,14:446-460.
- [20] Nutbrown D A. Normal mode analysis of the linear equation of groundwater flow [J]. Water Resources Research, 1975,11(6):979-987.
- [21] Kovács A. Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers; A hydrodynamic modeling approach [D]. Doctoral thesis, University of Neuchâtel, Switzerland, 2003.
- [22] Kovács A, Perrochet P, Király L, et al. Quantitative method for the characterization of karst aquifers based on spring hydrograph analysis [J]. Journal of Hydrology, 2005,303:152-164.
- [23] Wittenberg H. Nonlinear analysis of flow recession curves[J]. IAHS Publ,1994(221):61-67.
- [24] Cheng Q M. A combined power-law and exponential model for streamflow recessions [J]. Journal of Hydrology, 2008(352):157-167.
- [25] Coutagne A. Météorologie et hydrologie. Etude générale des débits et des facteurs qui les conditionnent. 2ème partie: les variations de débit en période noninfluencée par les précipitations [C]// Le

- débit d'infiltration (corrélations fluviales internes). La Houille Blanche, 1948: 416 – 436.
- [26] Padilla A, Pulido-Bosh A, Mangin A. Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring[J]. Ground Water, 1994, 32: 267 – 277.
- [27] Toebes C, Strang D D. On recession curves, 1 – Recession equations[J]. Journal of Hydrology, 1964, 3(2): 2 – 15.
- [28] Otnes J. Uregulerte elvers vassføring itrrvaersperioder [J]. Nor Geogr Tidsskr, 1953, 14: 210 – 218.
- [29] Mangin A. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques[D]. Institut des sciences de la Terre de l'université de Dijon, Moulis, Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, 1975.
- [30] Samani N, Ebrahimi B. Analysis of spring hydrographs for hydrogeological evaluation of a karst aquifer system[J]. Theor Appl Karstol, 1996 (9): 97 – 112.

Research progress and prospects of groundwater flow attenuation equation

DONG Gui-ming¹, SHU Long-cang²

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

Abstract: In hydrogeology and hydrology, it is important to study attenuation equation, which is the main part of flow attenuation analysis. Sixteen common attenuation equations are proposed from three kinds of groundwater flow attenuation equation based on flow equation of aquifer, the storage-outflow theory of watershed and empirical relation. Furthermore, the origin, meaning of equation parameter and application of all sixteen attenuation equations is described respectively. It shows that exponential attenuation equation is widely used. Finally, some prospects are discussed including relationship of hydro-geological parameters, exploration of new attenuation equation and application of numerical experiments.

Key words: groundwater; flow attenuation analysis; attenuation equation

责任编辑: 张若琳

· 书讯 ·

《热储工程学》书评

国际知名地热专家格兰特教授(Grant M A)、比克斯勒(Bixley P F)编写的《Geothermal Reservoir Engineering》(第二版)的中译本《热储工程学》已于近日由测绘出版社出版。该书由中国地质科学院水文地质环境地质研究所王贵玲研究员等翻译。

本书是我国引进的第一本热储工程学专著,从热储的概念模型、定量模型和概化方法,测井原理及资料解释、压力-温度-涡轮测流的井下测量装置及其局限性,地热井的激发、热储模型、工程型地热系统以及相关案例研究等几个方面对热储工程学理论、方法和应用进行了系统阐述。全书图文并茂,案例丰富,使读者不但清楚地了解相应的技术原理,也同时知道如何利用所获数据评价整个热田的行为,是一本全面系统论述热储工程学基础理论及其应用分析方法的著作。

本书内容丰富,具基础性、前沿性,有广泛的实用性,对从事地热地质、热储工程、地热测井等的研究者及地热资源开发利用管理者等都具有重要的参考价值。