

# 岩溶地下水运动与计算的若干问题讨论

⑤

钱孝星

p641.2

18-22

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

**摘要** 阐述岩溶地下水运动特点,分别讨论南方岩溶地下水与北方岩溶地下水运动特征,在此基础上建立了概念性模型。论述岩溶地下水运动的若干计算方法、着重讨论了数值方法、系统分析方法及随机方法等的适用条件及计算精度,同时介绍了一些以往文献没有提及的水文地质现象。认为、应根据具体的岩溶地下水运动特点、选用相应的计算方法,使成果更符合实际。

**关键词** 岩溶地下水 管道流 裂隙流 数值模拟 随机方法

世界岩溶总面积达 2 200 万  $\text{km}^2$ , 占世界陆地面积的 15% 左右<sup>[1]</sup>, 主要分布在中国南部、地中海沿岸、欧州东部、东南亚和美国东南部地区。据资料统计, 我国可溶性岩石分布面积约占陆地面积的 1/3 以上, 岩溶水天然资源约占地下水资源的 1/4 强, 因此岩溶地下水是重要的供水水源。

据不完全统计, 国外岩溶地区修建大中型水利水电工程已在 130 座以上, 其中坝高在 100 m 以上者有 20 余座<sup>[2]</sup>。自 1970 年以来, 在岩溶地区修建水库和大坝的国家愈来愈多, 而且规模愈来愈大, 岩溶地下水问题也更加突出。据资料显示, 从 1951 年至今, 我国岩溶地区已兴建大中型水库 50 座以上, 总蓄水量在 358 亿  $\text{m}^3$  以上, 总装机容量在 585 万 kW 以上<sup>[2]</sup>。目前仍将有一大批水利工程在岩溶地区兴建, 岩溶水运动对水库渗漏, 坝基渗漏等影响很大, 正确的估算和预测渗流量, 对工程设计有着重要的意义。

## 1 岩溶地下水的运动特点

人们一般把秦岭—淮河以北的岩溶称为北方岩溶, 以南为南方岩溶。由于北方和南

方岩溶的发育状况不同, 因此岩溶水的分布, 径流补给, 动态等方面的特点也有差异。

南方岩溶介质比北方具有更强的非均质性和各向异性。在南方岩溶地区, 地下水流以管道流为主, 岩溶管道或地下河构成地下径流的主干。在两个管道流之间, 地下水在层理、节理、裂隙和溶孔中运动, 运动状况和一般的渗流相似。管道流流动阻力小, 流速大, 导水性好。据湖北、广西、云南、贵州等地研究资料<sup>[3]</sup>, 南方地下河发育区岩溶水流速, 一般枯水期为 8.64 ~ 17.28 km/d, 平水期 17.28 ~ 43.2 km/d, 洪水期为 43.2 ~ 129.6 km/d, 极端流速可达 172.8 km/d。可见在管道流或地下河发育区地下水运动已不符合达西定律。管道流和其周围的裂隙流存在着水量交换关系。在补给期, 管道流系统中水位的上涨和消退都比较快, 在水位上涨期间, 管道流中的地下水补充周围的裂隙, 但雨后水位很快消退, 管道流低于周围裂隙流的水位。裂隙和溶孔中的地下水源源不断地补给管道流, 维持枯季地下河或泉水流量。乌江水系的乌江水电站以上流域就具有南方岩溶的特点。

北方岩溶地区, 由于岩溶发育相对较弱,

作者简介: 钱孝星, 女, 教授, 从事地下水运动与计算研究, 曾发表《水文地质计算》等论著。

多属裂隙-岩溶水。含水层富水区的地下水往往具有统一的地下水面,像南方岩溶区那种孤立的管道水流较少发现,透水性相对比南方岩溶均匀,具有宏观渗流性质。万家寨水电站的岩溶具有北方岩溶的特点。

岩溶地下水的补给来源是大气降水,南方岩溶区多属灌入型补给,北方岩溶区多属渗入型补给,在隐伏岩溶地区多属间接型补给。当然这是指一般情况,三种类型的补给方式是不能绝对划分开来的。

南方岩溶地下水流量动态的特点是变幅大,变化迅速。其次是滞后时间短,流量的峰值出现的时间滞后于降水时间,一般只有数天,流量的大小一般只和当月和前几个月的降水有关。

北方岩溶地下水的动态特点则不同,其特点是不稳定系数小,年变幅小,流量变化缓慢,最大流量滞后于最大降水达3~5月,泉水流量和前数年的降水有关,如山西神头泉的流量和当前以及前9年的降水量有关。

总之,岩溶地下水动态特点具有地下水流对降水既敏感又滞后效应。

岩溶地区常具有地下水与地表水反复转化的特点。河流时明时暗,时而地上时而地下,不仅南方岩溶区有这现象,北方岩溶区某些地段也有这特点。

综上所述,岩溶地下水运动特点可归纳为:岩溶含水介质具有多重性,并具有裂隙流与管道流并存;层流与紊流并存;线性流与非线性流并存;连续水流与孤立水体并存等特殊水流的流动规律。岩溶地区水资源概化模

型如图1所示。

图中 $P$ 为直接降落在补给区的降水量; $R$ 为虽未直接降落在补给区,但由坡面径流到补给区的降水量; $U_{\max}$ 为洼地和植物拦蓄的最大水量; $U$ 为雨前的洼地和植物的拦蓄量; $\Delta U = U_{\max} - U$ ;  $PM$ 为产流量; $SRQ$ 为地表径流; $PEQ$ 为进入松散覆盖层的入渗量; $RF$ 为渗入微小裂隙的补给量; $RC$ 为灌入大管道的补给量; $L_{\max}$ 为包气带最大蓄水量; $LFC$ 为包气带最大持水量; $L$ 为雨前包气带的含水量; $\Delta L$ 为雨后包气带的水分增量; $EP$ 为地面蒸散发; $EQ$ 为土壤蒸发; $RV$ 为河流; $\Delta W$ 为含水层中地下水储存量的增量; $C$ 为松散的孔隙含水层; $B$ 为裂隙含水层; $A$ 为管道及大溶洞; $PW$ 为孔隙地下水; $FW$ 为裂隙地下水; $CW$ 为管道地下水; $WD$ 为地下水排泄量。

## 2 岩溶地下水运动若干计算方法的讨论

### 2.1 数值方法

一般的数值方法适用于以裂隙流为主的岩溶地区。因为数值方法可以处理复杂的边界条件和众多的非均质区,而且改变参数也比较容易。它多应用于北方岩溶区。

我们曾采用“斯诺法”和“最优化反求法”相结合的方法,求黄河上游万家寨水库西岸岩溶裂隙含水介质的渗透张量,然后对水库的渗漏进行计算和评价,计算结果与实际情况吻合较好。水位拟合情况见表1。对于复杂岩溶裂隙水地区,这样的拟合结果是好的。

表1 万家寨水库岩溶地下水位拟合结果<sup>[4]</sup>

| 钻孔<br>编号 | 实测值<br>$H/m$ | 计算值<br>$H^0/m$ | 计算值-实测值<br>$H - H^0/m$ |
|----------|--------------|----------------|------------------------|
| $B_2$    | 867.76       | 868.43         | 0.67                   |
| $B_3$    | 867.86       | 868.22         | 0.36                   |
| $B_6$    | 868.16       | 870.05         | 1.89                   |
| $B_{11}$ | 868.94       | 870.68         | 1.74                   |
| $B_{12}$ | 872.26       | 871.54         | -0.72                  |
| $B_{13}$ | 871.65       | 871.26         | -0.39                  |
| $B_{15}$ | 872.24       | 872.27         | 0.03                   |

根据多年从事岩溶水文地质计算的实践,尤其是地下水资源评价的实践,发现如下

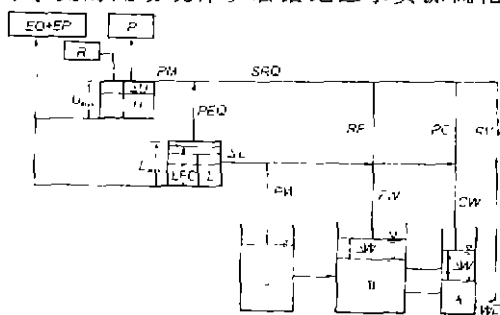


图1 岩溶地区水资源概化模型

水文地质现象,在计算时需加以注意。

a. 当用水井水位拟合方法进行参数估算时,某些地带的导水系数  $T$  可高达每天几万平方或每天几十万平方。它多出现在某些张性断裂带或中奥陶系和石炭系的不整合面附近。它反映一些较大的溶隙和管道的导水性。

b. 岩溶区抽水时有时会发现水位反常现象,有时距抽水井近的观测井水位高。距抽水井远的观测井水位低。这是因为远处的井有大的溶隙通到抽水井附近。而近处的井没有,水要绕流才能进入抽水井。计算时可用划分不同的非均质区或各向异性的方法来解决。

c. 在接近补给区的岩溶水水源地,地下水位有较大的季节变幅和年际变幅,比孔隙水要大得多。这是因裂隙岩溶水的给水度要比孔隙水小1~2个数量级,而导水系数却要大得多。因而裂隙岩溶含水层的调节能力小。在设计水井深度、自来水管道的和加压站时,要考虑这一特点。

d. 在岩溶地下水的大量超采地区,如短时间内大量削减开采量,开采区附近的地下水位会急剧上升。这主要是水动力平衡调整的结果。在地下水资源评价或管理模型计算时不要被这一现象迷惑,认为地下水资源量大量恢复了,或补给量已经大于排泄量。

e. 岩溶区往往有巨厚的包气带,故数值计算时,要考虑补给量在时间上的滞后性。

夏日元等人根据岩溶地下水流特殊的流动规律,提出岩溶地下水系统单元网络数学模拟方法<sup>[5]</sup>。该方法的实质是用大单元块段和管道网络分别代表岩溶区相对均匀的裂隙化区域及非均匀分布的岩溶管道,地下水流动特征按渗流运动规律及管道运动规律分别表达,耦合求解。计算时考虑因素比一般的数值方法全面,计算结果符合实际。地下水位拟合曲线如图2所示<sup>[5]</sup>。

## 2.2 系统分析方法

在南方岩溶地区,常常存在管道流和裂

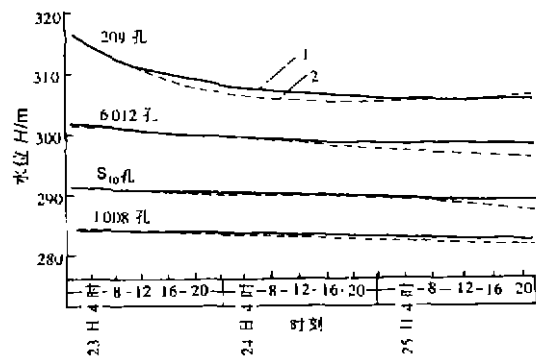


图2 北山矿径排区主要水位观测孔实测与模拟对比曲线

1. 实线为实测水位;2. 虚线为模拟水位

隙流同时并存或复杂的岩溶裂隙流,在这些地区又通常缺乏地下水长期观测资料或野外连通试验资料,可以运用系统分析的方法,借用地表水的观测资料,建立岩溶地区的流域水文模型,求得各项参数。它的优点是将水文地质与水文学相结合,不要求研究流域具备岩溶含水层或地下水的实测资料,可运用于大面积岩溶地区的地下水计算。

庄一鸽等人曾对乌江水系乌江渡电站以上流域的地下水径流过程进行研究,建立模型时考虑以下几方面<sup>[6]</sup>:

a. 岩溶流域具有复杂的岩溶分布和组合。

b. 把流域视为整体,地表水和地下水整体考虑,分别模拟。

c. 在地下水模拟中,根据岩溶含水层的结构以及相应的下渗流途径和方式,模拟多水源的汇流速度差异及汇流双向性的特点。

根据计算结果,得出如下规律:在乌江水电站以上流域面积,岩溶地下径流比例高达70%~80%,其中,快速地下水为60%~70%,慢速地下水比例较小。

## 2.3 随机方法<sup>[7~8]</sup>

该法在难以建立确定性数学模型或者积累了长期的实际资料而水文地质条件还没有完全查清的地区适用。它有如下特点:①可以充分利用长期的地下水观测资料;②不需要现场测定许多水文地质参数;③可以考虑一些随机因子。

故该方法尤其对于一些没有经过系统的水文地质勘测,地下水已经开采或已长期开采,需要重新评价地下水资源以便进行地下水管理的情况比较适用。

目前较为常用的方法为逐步回归分析方法和时间序列分析方法。逐步回归分析方法的数学模型的建立是以地下水流域的水量平衡为基础,一个地下水流域,一般有如下水量平衡方程:

$$\Delta V_g = P - E_t - \Delta V_{ic} + (R_g - D_g) + (R_s - D_s) - \Delta S - Q \quad (1)$$

式中  $\Delta V_g$  为地下水贮水体积的变化,按水层厚度计,增加为正; $P$  为降水量; $E_t$  为蒸散发量; $\Delta V_{ic}$  为包气带水分贮量的变化,按水层厚度计,增加为正; $R_g$  为地下水的其它补给量,如地下水的侧向流入,灌溉水的入渗等; $D_g$  为地下水排泄量; $R_s$  为地表水流入量; $D_s$  为地表水流出量; $Q$  为地下水的开采量,按水层厚度计; $\Delta S$  为地表水体贮量变化,以水层厚度计,增加为正。以上各项水层厚度均以毫米为单位。

一般在岩溶地区没有多大的地表水体,故式(1)中忽略地表水体贮水体积的变化, $\Delta V_g$  主要反映在地下水位的变化  $\Delta H$  上。在式(1)中,变化最活跃的因子为降水量  $P$  和开采量  $Q$ ,因而有如下关系:

$$\Delta H = f(P, Q)$$

根据上述内容,岩溶地下水的动态特别是北方岩溶水的动态存在滞后现象,故某一时段的地下水位变化,不仅受同期的降水和开采的影响,也受前期的降水和开采的影响,故有如下数学模型:

$$\Delta H_t = C + a_0 P_t + a_1 P_{t-1} + \dots + a_n P_{t-n} - b_0 Q_t - b_1 Q_{t-1} - \dots - b_m Q_{t-m} \quad (2)$$

$$\text{或 } \Delta H_t = C + \sum_{i=0}^n a_i P_{t-i} - \sum_{j=0}^m b_j Q_{t-j} \quad (3)$$

式中  $\Delta H_t$  为  $t$  时段开采区的地下水位变化; $C$  为反映除了降水和开采以外的其它各项因素对地下水位变化的影响的参数; $a_i, b_j$

为传递函数。此外,下标  $t-i, t-j$  表示时段号。 $t-n$  和  $t-m$  取何值时开始对  $\Delta H_t$  有明显的影响,取决于当地的水文地质条件。具体地说,和地下水流域的面积、开采井的位置、含水层的压力传导系数、包气带的特点和厚度等因素有关。

只要有降水量、地下水位和地下水开采量的系列资料,用多元回归分析方法求出参数  $a_i, b_j, c$  即可利用式(2)或式(3)进行以降水为主要补给来源的地下水资源预测。利用式(2)进行多元回归计算时,一个重要的问题是  $n$  和  $m$  如何取值,即多长时间以前的降水和开采,对水位变化或流量变化会产生显著的影响,通常用逐步回归分析方法确定,可以取一月,一季或一年作为一个时段单位进行计算。山东博山城区的地下水资源评价曾用该法,取得满意的结果。

时间序列模型的建立,一般对于非平稳的时间序列,要进行趋势分析和周期分析。地下水动态受降雨、蒸发和开采等多种因素综合影响,表现出非平稳性,所以首先应对所观测的资料作平稳性检验,对非平稳的观测资料进行分析,判断其趋势性和周期性的变化,采用相应的方法提取趋势项或周期项,使非平稳过程平稳化,再按平稳过程的分析方法来研究。设地下水位或流量时间序列  $Y_t$  的趋势项为  $N_t$ ,周期项为  $T_t$ ,平稳随机项为  $X_t$ ,则  $Y_t = N_t + T_t + X_t$ ,其中  $T_t, N_t$  可以通过时间序列拟合一个合适的随机模型来生成。

马善才等人以湖南海泉水源地为实例,建立时间序列模型,由地下水位拟合与实测值对比结果可看出,拟合残差大部分均小于 0.1 m,只有个别点达 0.2 m。可见该模型预报精度较高。

该时间序列模型如下:

$$H = 176.0659 - 0.08001 \ln t - 0.1005 \cos 2\pi \frac{1}{120} t + 0.1177 \sin 2\pi \frac{1}{120} t - 0.1447 \cos 2\pi \frac{1}{12} t - 0.0027 \sin 2\pi \frac{1}{12} t - 0.0843 \cos 2\pi \frac{1}{6} t -$$

$$0.0485 \sin 2\pi \frac{1}{6} t + 0.8333 x_{t-1} - 0.3781 x_{t-2} + 0.1351 x_{t-3} \quad (4)$$

### 3 结 论

a. 岩溶地下水运动特点有:岩溶含水介质具有多重性。裂隙流与管道流并存;层流与紊流并存;线性流与非线性流并存;连续水流与孤立水体并存等特殊水流的运动规律。

b. 在南方岩溶地区,地下水流以管道流为主或管道流与裂隙流并存,一般不符合达西定律。北方岩溶地区,以裂隙流为主,具有宏观渗流性质。

c. 一般的数值方法常用于裂隙流为主的地区。单元网络数学模拟适用于管道流与裂隙流并存地区。用系统分析方法建立的水文模型适用于不具备岩溶地下水的实测资料,但有地表水系统观测资料的地区,随机方法适用于积累了长期的实测资料而水文地质条件尚未查清的地区。

(上接第 5 页)

息科学的技术基础,如遥感、GIS、GPS、计算机通信网络、遥测、卫星通信等在水利行业的应用十分广泛。水利工作者不仅要关注地球信息科学的产生,也要为这一 21 世纪的新学科的发展作出贡献。

### 参考文献

- 1 Michael F. Goodchild. Future direction for geographic information science. In: Proceedings of Geo-Informatics '95, Hong Kong, 1995
- 2 Chen Shupeng. Geo-informatics and regional sustainable development. Beijing: Surveying and Mapping Publications, 1995
- 3 陈述彭,承继成,何建邦. 地理信息系统的基础研究——地球信息科学. 见:资源与环境信息系统国家重点实验室第三届学术委员会第一次会议文件汇编,北京,1997

(收稿日期:1997-12-29 编辑:许宇鹏)

### 参考文献

- 1 韩行瑞等. 岩溶水系统. 北京:地质出版社,1993
- 2 邹成杰等. 水利水电岩溶工程地质. 北京:水利电力出版社,1994
- 3 朱远峰. 中国岩溶水系统和岩溶水资源研究进展. 见:地矿部环境地质研究所主编. 工程地质、水文地质、环境地质论文集. 北京:地震出版社,1993. 194~199
- 4 钱孝星等. 岩溶裂隙水地区某水库的渗漏计算. 河海大学学报,1989,17(3):58~63
- 5 夏日元等. 岩溶地下水系统单元网络数学模拟方法研究. 中国岩溶,1992,11(4):267~278
- 6 庄一筠等. 新安江模型在岩溶地区的应用. 河海大学学报,1989,17(4):43~50
- 7 朱学愚等. 地下水资源评价. 南京:南京大学出版社,1987
- 8 马善才等. 随机模拟在岩溶地下水系统水位预报及开采资源评价中的应用. 工程勘察,1995,(5):32~38

(收稿日期:1996-11-08 编辑:许宇鹏)

(上接第 14 页)

站都可能受到水力共振的威胁。为了消除或减小水力共振发生的可能性,在水电站水力设计中应进行水力振动分析。

依照文中所述的方法和步骤进行自由振动和强迫振动分析,可以评估水力系统的水力振动特性,在某种程度上预测水力共振发生的可能性,保证水力系统安全和正常运行。

### 参考文献

- 1 周建旭. 水电站有压输水系统水力振动分析:[学位论文]. 南京:河海大学,1996
- 2 Wylie E B, Streeter V L, Suo Lisheng. Fluid transients in systems. Prentice Hall Inc., 1993

(收稿日期:1997-10-11 编辑:张志翠)

