

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

时序马尔可夫模型和有限元模型在中国北方型 岩溶水资源评价中的应用

——以徐州市张集水源地裂隙岩溶水为例

钱家忠¹⁾ 吴剑锋²⁾ 朱学愚²⁾ 李如忠¹⁾

1) 合肥工业大学资源与环境科学学院, 230009; 2) 南京大学地球科学系, 210093

内容提要 为满足城市不断发展对水资源的需求,本文分析了徐州市拟建水源地——张集水源地水文地质条件,建立了与研究区裂隙岩溶含水层相适应的三维数学模型,并用等参有限元方法求解。考虑到大气降水的多寡及其分配状况是影响地下水资源评价的最终决定因素,而且具有随机分布性质,建立了研究区大气降水的时间序列——马尔可夫模型,其精度高于单一的时间序列模型,与有限元方法结合并用于评价该区的地下水资源,得出水源地地下水允许开采量为 $16.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。结论对水源地地下水资源可持续开发利用方案的确定提供了科学依据,同时对中国其他类似地区地下水资源正确评价具有重要的参考价值。

关键词 裂隙岩溶水 时序马尔可夫模型 有限元模型 地下水资源评价 张集水源地 徐州

徐州市是中国北方一个以地下水为主要供水水源的重要工业化城市。但由于受自然条件限制,水资源短缺一直是阻碍城市发展的一个重要因素(周念清等,2001;吴剑锋等,1999)。张集水源地是徐州市拟建的大型水源地。为了使水源地保持可持续开发并能最大限度地向徐州市供水,有必要对其地下水进行准确评价。

对于一个完整的地下水系统,其所获得的补给量大小归根结底来自于大气降水的多寡及其分配状况。未来大气降水量的组合直接影响到地下水资源的评价结果。以前人们多采用不同经验频率组合的降水量对地下水量进行预报,往往太保守(谢春红等,1988);吴剑锋^①曾采用时间序列分析方法预报降水量,模型总体精度虽然较好,但在降水量峰值处,预测误差较大。马尔可夫过程已成为随机过程的一个重要分支。该方法利用变量的概率状态转移矩阵可预报变幅较大的随机波动,在地质学、生物学、运筹学等许多领域中有广泛应用(Simon et al., 1984;严颖等,1995;Knotters et al., 1997;董胜等,1999;钱家忠等,2000)。基于此,本文提出时序马尔可夫模型和有限元模型,以期合理地得到张集水源地允许开采量。

1 研究区概况

研究区位于徐州市东南25 km处,面积约为356.41 km²。该区地层以震旦系(Z)和寒武系(Є)的碳酸盐岩为主,并在低山丘陵区裸露;第四系(Q)砂粘土,广泛分布在平原区,但厚度一般小于40 m。

研究区构造以复式褶皱和断层为主,构造线方位呈NE—ENE向。后期发育的WNW向断层或断裂带,是区内主要控水断裂(图1)。

研究区含水岩组可分为第四系松散岩类孔隙水含水岩组和碳酸盐岩裂隙溶洞水含水岩组。此外,第三系(E)、白垩系(K)、侏罗系(J)及岩浆岩(β)可作为相对隔水层。

废黄河断裂带是一个强径流带。北部山丘区的裂隙岩溶水都汇流入该带,并沿该带流动,流向东南。但沿废黄河断裂带,地下水开采不多。而南面的张集镇附近及前谢一带有一定数量的开采井和自流井。废黄河断裂带的地下水一部分继续向东南流,由人工开采排泄。

2 地下水流数学模型的建立和求解

根据水文地质概念模型,本区的裂隙岩溶地下

注:本文为国家自然科学基金项目(编号40002022,40202027)资助成果。

① 吴剑锋. 1999. 徐州市裂隙岩溶水资源评价与管理研究. 南京大学博士学位论文.

收稿日期:2002-08-21;改回日期:2002-10-21;责任编辑:周健。

作者简介:钱家忠,男,1968年生。博士,现为合肥工业大学副教授,主要从事水资源水环境模拟教学与科研工作。通讯地址:230009,合肥工业大学资环学院;Email:qjzy@hfut.edu.cn。

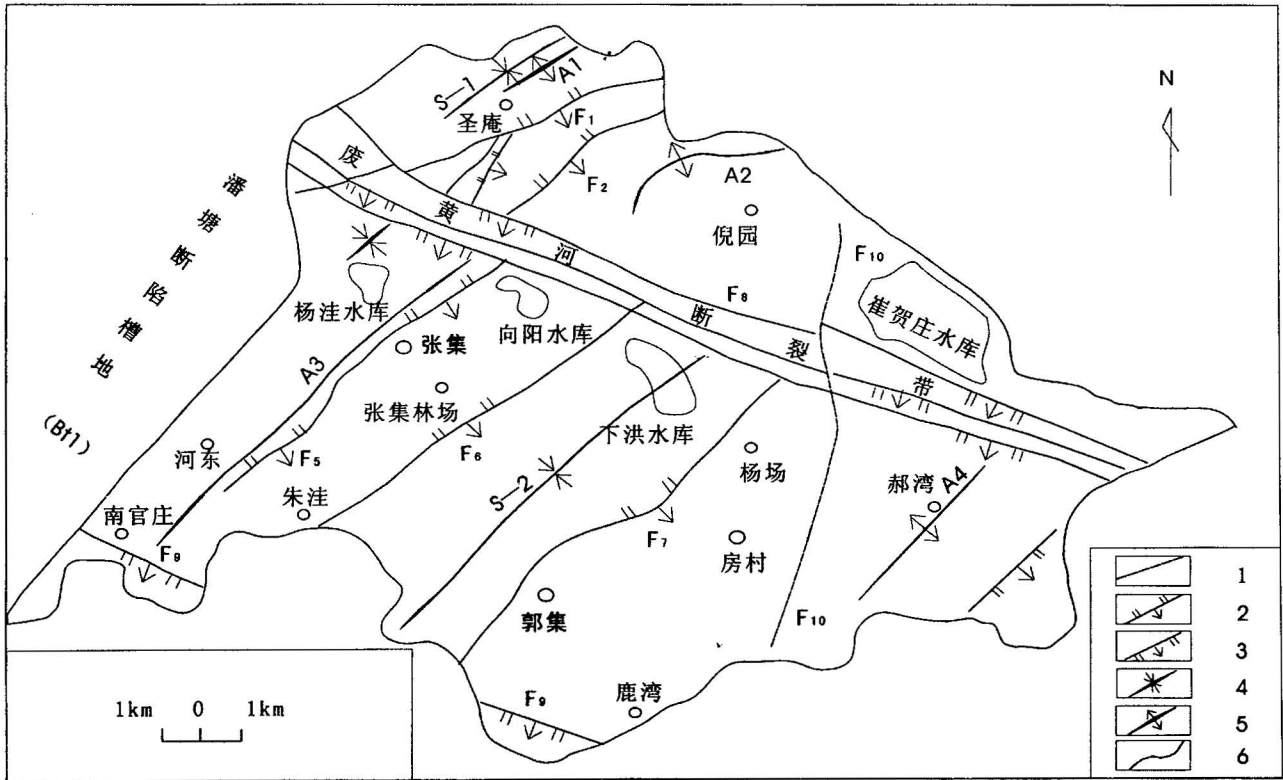


图1 徐州张集水源地构造纲要图

Fig.1 The sketch tectonic map of Zhangji well field in Xuzhou

1—平移断层;2—逆断层;3—正断层;4—向斜;5—背斜;6—边界线

1—Shear fault; 2—abnormal fault; 3—normal fault; 4—syncline; 5—anticline; 6—boundary line

水流可概化为非均质各向异性介质中的三维非稳定流问题。其数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z}) + W \\ = S_s \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z) \\ H(x, y, z, t) = \varphi(x, y, z, t) & (x, y, z) \in s_1 \\ K_{xx} \cos(n, x) \frac{\partial H}{\partial x} + K_{yy} \cos(n, y) \frac{\partial H}{\partial y} + \\ K_{zz} \cos(n, z) \frac{\partial H}{\partial z} = q & (x, y, z) \in s_2 \end{cases}$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分别为主轴方向渗透系数; $H = H(x, y, z, t)$ 为研究区内 t 时刻水头; S_s 为给水度或贮水率; $W = W_p + W_i + W_r - W_e - Q$ 为源、汇项。其中 W_p 为降水入渗补给强度; W_i 为灌溉入渗补给强度; W_r 为水库渗漏补给强度; W_e 为蒸发强度; Q 为开采强度; Ω 为研究的区域; s_1 为第一类边界曲面; s_2 为第二类边界曲面; $H_0(x, y, z)$ 为初始水头; $\varphi(x, y, z, t)$ 为第一类边界上水头; q 为第二类边界上的单位面积流量, 流入为正, 流出为负。

将空间区域 Ω 剖分为有限个六面体单元, 取单元的8个角点为节点。应用 Galerkin 有限元技术建立定解问题的线性代数方程组。由于单元为任意形状的六面体, 在总体坐标下对它求三重积分比较困难。所以笔者通过坐标变换, 把它变换为局部坐标下的正方形, 用等参有限元方法 (Isoparametric Finite Element Method) 求解。

利用群孔抽水试验资料模拟求参数: 根据研究区水文地质条件特征将研究区剖分为三层, 45个参数分区。总共1518个单元, 2228个节点; 计算时段分为抽水试验期和恢复期两部分, 总时段数为48个, 时间步长由半小时至一个月不等。

模型参数的识别采用间接法。通过参数识别, 得到研究区各个分区的水文地质参数。模型识别结果表明: 抽水试验阶段, 观测孔总数为35个 (包括岩溶水观测孔22个, 孔隙水观测孔13个), 绝对误差平均值小于0.5的观测孔有24个 (包括岩溶水的13个, 孔隙水的11个), 总共占拟合点的69% (其中岩溶水和孔隙水占各自观测孔总数的比率分别为59%及85%); 如果将绝对误差增加至0.7, 则合格的观测孔

总数为29个(包括岩溶水的17个及孔隙水的12个), 占总共拟合点的83%。水位恢复期, 观测孔总数为31个(包括岩溶水观测孔19个, 孔隙水观测孔12个), 绝对误差平均值小于0.5的观测孔有14个(岩溶水11个, 孔隙水3个), 总共占拟合点的45%; 如果将绝对误差增加至0.7, 则合格的观测孔总数为23个(包括岩溶水的14个及孔隙水的9个), 占总观测孔点的74%。拟合精度满足国家标准(GB/T14497-93), 由此说明水流模型具有很好的可信度。

3 研究区降水量的时间序列——马尔可夫模型

降水量逐月分配的时间序列, 可视为一维非平稳时间序列。可用公式表示如下:

$$X_t = M_t + T_t + W_t \quad (2)$$

式中 M_t 为趋势项, 它反映了 X_t 的变化趋势; T_t 为周期项, 反映了序列的季节变化; W_t 为平稳随机噪声项, 它反映了随机因素的影响, 一般假设 W_t 为平稳随机序列。

根据马尔可夫链理论: 考虑一组随机试验(数列) $A_i (i=1, 2, \dots)$, 每一试验只有有穷个或可列无穷多个基本事件 $E_i (i=1, 2, \dots)$ 可能发生, 若事件 E_i 发生, 则事件处于状态 E_i 。若状态 E_i 经过 k 步变为 E_j 的概率用 $P_{ij}^{(k)}$ 表示, 则:

$$P_{ij}^{(k)} = \frac{n_{ij}^{(k)}}{N_i} \quad (3)$$

式中 $n_{ij}^{(k)}$ 为状态 E_i 经过 k 步变为 E_j 的次数, N_i 为状态 E_i 出现的总次数, 则 k 步状态转移概率矩阵为:

$$R^{(k)} = \begin{pmatrix} P_{11}^{(k)} & P_{12}^{(k)} & \dots & P_{1j}^{(k)} \\ P_{21}^{(k)} & P_{22}^{(k)} & \dots & P_{2j}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{i1}^{(k)} & P_{i2}^{(k)} & \dots & P_{ij}^{(k)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

若初始状态 E_i 的初始向量 $v^{(0)}$, 经 k 步转移后, 向量 $v^{(k)}$ 为:

$$v^{(k)} = v^{(0)} \cdot R^{(k)} \quad (5)$$

利用式(3)~(5)可以确定变量的下一步转向, 然后根据转向概率对时间序列模型预报值进行马尔可夫修正。由于马尔可夫状态转移矩阵具有追踪变量随机波动的能力, 加之马氏链的“无后效性”, 与时间序列模型有机结合, 从而可提高模型的预报精度。

利用徐州市历年降雨资料自1948年1月至1986年12月共468个月的降雨量作为拟合数据, 求得模型中趋势项 M_t , 周期项 T_t 和随机项 W_t 的参数, 得到

降雨量时间序列模型为:

$$P_t = 71.78 - 64.61\cos(2\pi i/12) + 7.714\sin(2\pi i/12) - 42.47\cos(2\pi i/6) + 36.66\sin(2\pi i/12) + 0.07409P_{t-1} + 0.09510P_{t-5} - 0.1112P_{t-14} + 0.08333P_{t-22} - 0.1132P_{t-26} - 0.1116P_{t-36} + 0.1363P_{t-49} - 0.1225P_{t-51} + 0.09079P_{t-61} + 0.1108P_{t-64} + 0.09592P_{t-65} - 0.1302P_{t-72} - 0.08451 \quad (6)$$

式中 $i=1, 2, \dots, N; t=1+i, P_t$ 表示预报的未来某月降雨量, P_{t-1} 表示该月前一个月降雨量, 以此类推。式(6)中右端第1项为趋势项; 第2至第5项为周期项, 其余为随机变化项。

模型的拟合结果表明: 从整体上看, 模拟结果比较好, 除某些峰值点的拟合误差较大外, 拟合值与实测值基本一致。

利用1992年1月至1999年12月降雨量作为模型的检验数据进行检验。结果显示其后验差比值 C 为0.65, 或然误差的观测频率 $P_{\text{或然误差}}$ 为0.78(表1), 预报效果介于合格与较好之间。实测值与拟合值比较见图2。由此说明所建立模型能够比较客观地反映实际, 但是, 模型在峰值点处, 一般拟合误差较大, 表明其对波动较大的数列辨识能力差。为了减小拟合误差, 提高模型的预报效果, 笔者植入马尔可夫预报模型。

表 1 时间序列预报效果的检验

Table 1 Verification standards for time series model

预报效果	后验标准差比值 C	或然误差的观测频率 $P_{\text{或然误差}}$
特好	<0.15	>0.95
良好	0.15~0.25	0.80~0.95
较好	0.25~0.50	0.50~0.80
合格	0.50~0.75	0.25~0.50
不合格	>0.75	<0.25

针对时间序列模型预报的误差, 进行状态划分, 建立马尔可夫模型。由于状态界限的不确定性, 在划分状态区间求状态转移概率矩阵时采用适算法(Knotters et al., 1997)。选定以-100%、-30%、30%、100%为界限, 将误差序列分为五个区, 即 I 区 ($\Delta P_1(i) < -100\%$)、II 区 ($-100\% \leq \Delta P_1(i) < -30\%$)、III 区 ($-30\% \leq \Delta P_1(i) \leq 30\%$)、IV 区 ($30\% < \Delta P_1(i) \leq 100\%$)、V 区 ($\Delta P_1(i) > 100\%$)。据此可确定相对误差 $\Delta P_1(i)$ 所处状态, 求出一步概率转移矩阵。利用相对误差的一步概率转移矩阵, 对时间序列模型的预报值进行马尔可夫修正, 得二次拟合值, 并将二次拟合值与实测值进行比较(图3)。

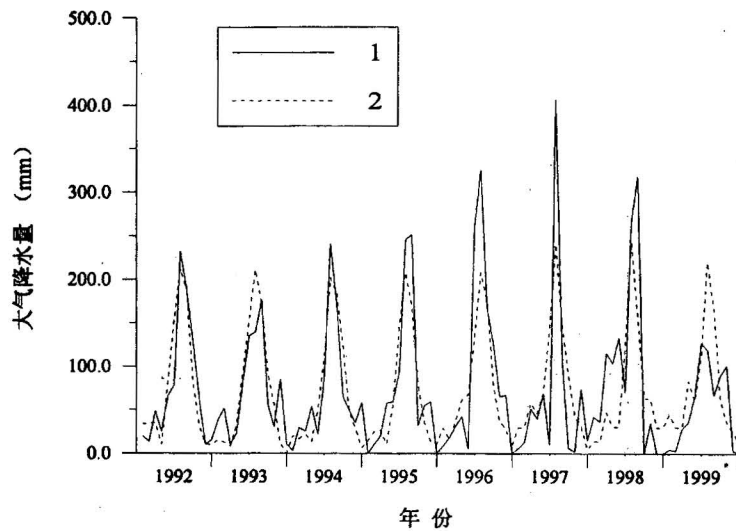


图2 降雨量时间序列检验预报曲线图

Fig. 2 Verification between observed and calculated rainfalls by time series

1—实测值; 2—预报值

1—Observed rainfalls; 2—calculated rainfalls

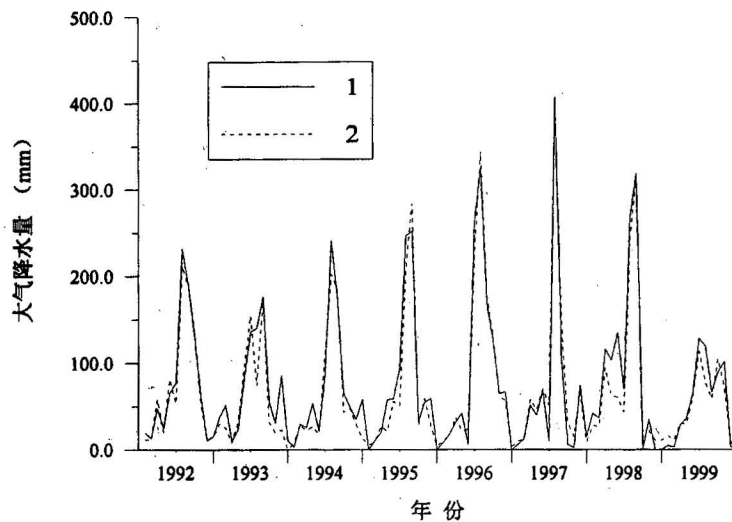


图3 降雨量时间序列—马尔可夫检验预报曲线图

Fig. 3 Verification between observed and calculated rainfalls by time series—Markov

1—实测值; 2—预报值

1—Observed rainfalls; 2—calculated rainfalls

对模型进行检验,其后验标准差比值 C 为 0.25, 或然误差的观测频率 $P_{\text{或然误差}}$ 为 0.78。对照表1及单一的时间序列模型预报检验结果 ($C=0.65$, $P_{\text{或然误差}}=0.78$) 可知:基于时间序列分析的马尔可夫模型预报效果较好,且明显好于单一的时间序列模型预报效果。

4 水源地地下水资源评价

地下水资源评价实质上就是允许开采量的计

算,即在一定开采量下对研究区未来地下水位进行预测。地下水流模型(1)经过校正和检验以后,就可以利用所得的各种参数,结合时间序列模型预测大气降水量,来进行地下水位的预测。由模型(6)可预测得到2000年至2009年间计算区内的逐月降雨量(图4)。预测的结果显示未来10年间研究区的降水量平均值为864.3 mm,为其多年降水量的846.4 mm (1951~1999年)的102%,稍稍偏向于丰水年。

根据未来降水量的预报值,代入张集水源地裂

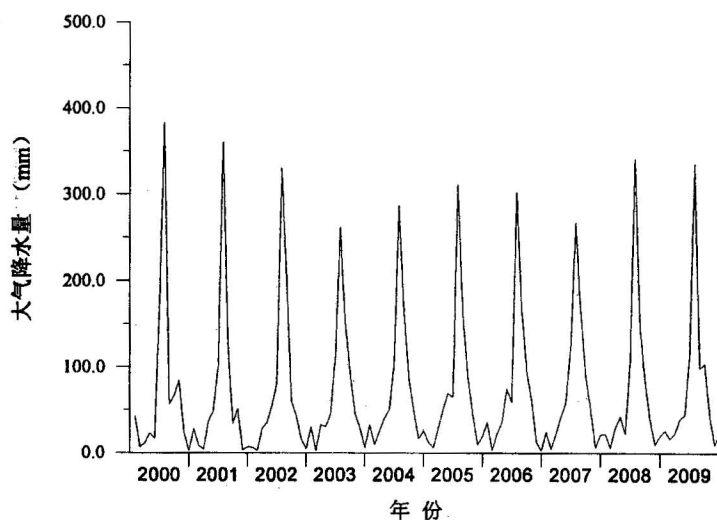


图 4 时间序列—马尔可夫模型预报的未来降水量(2000~2009年)

Fig. 4 Values calculated rainfalls by time series—Markov (2000—2009)

隙岩溶水有限元数学模型,确定水源地的允许开采量。选取水源地日产 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水量的开采方案。原有的开采量 $1.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 依旧。调整通过研究区给定的25个控制点的水位控制标高与对应流场的地下水水位相比较来控制。我们将控制点的地下水水位历时变化绘制成图。考虑篇幅限制,这里仅列出典型观测孔的水位历时曲线(图5)。由图5可以看出,随着水源地的开采,水位趋向于稳定。各孔水位下降 $6 \sim 10 \text{ m}$,而各控制孔的上覆第四系埋深一般为 $12 \sim$

25 m ,故基岩水头仍在第四系范围内,造成岩溶塌陷的可能性较小。

由上述讨论可知:水源地允许开采量应为水源地设计开采量与本地原有开采量之和,即可达 $16.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,合 $6.10 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。张集水源地是一个相对独立的水文地质单元,其地下水的补给来源最终为大气降水量。根据江苏省徐州市张集水源地供水水文地质详查报告^①:水源地平均补给模数为 $23.50 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,水源地年均补给量为 $8.34 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。由此可得出未来本区裂隙岩溶水资源允许开采量 $16.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 是有保证的。

5 结论

(1)首次采用时间序列马尔可夫模型与有限元模型相结合探讨徐州市张集水源地裂隙岩溶水资源评价,得出张集水源地裂隙岩溶水资源允许开采量为 $16.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(2)利用裂隙流的多孔介质理论描述并建立了研究区裂隙岩溶水三维数学模型,再运用等参有限元技术对其进行求解,模型的校正和检验结果进一步证明了地下水流的多孔介质理论模型适用于中国北方型裂隙岩溶水流的模拟计算。

(3)将传统的时间序列预报模型与马尔可

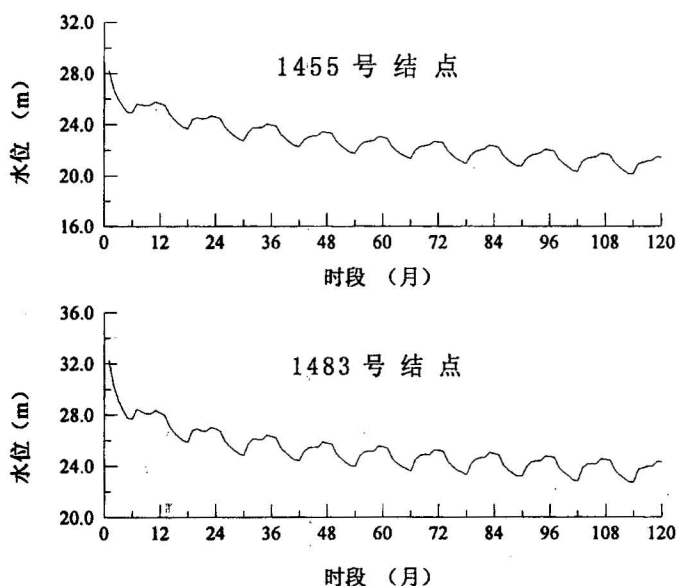


图 5 典型观测孔的水位预报历时曲线

Fig. 5 Curves of hydraulic head predicted in representative boreholes

① 江苏省水利勘察院,南京大学地球科学系:2001.江苏省徐州市张集水源地供水水文地质详查报告。

夫预报模型有机结合起来,建立了时间序列—马尔可夫预报模型,并用于徐州市大气降水量的预报。新建模型兼具时间序列模型及马尔可夫模型优点:既能预报总体趋势,又适合于波动性较大的随机序列预报,预报精度明显高于单一的时间序列模型。

参 考 文 献

- 董胜,刘德辅. 1999. 年极值水位的灰色马尔可夫预报模型. 水利学报, (1): 60~64.
- 钱家忠,朱学愚,吴剑锋. 2000. 矿坑涌水量的灰色马尔可夫预报模型. 煤炭学报, 25(1): 71~75.
- 吴剑锋,朱学愚,刘建立. 1999. 基于遗传算法的模拟退火罚函数方法求解地下水管理模型. 中国科学(E辑), 29(5): 474~480.
- 谢春红,朱学愚,黄卫华,等. 1988. 徐州市某水源地的裂隙岩溶水评价. 中国岩溶, 7(3): 265~272.
- 严颖,成世学,程佩. 1995. 运筹学随机模型. 北京:中国人民大学出版社, 99~145.
- 中华人民共和国国家标准: 地下水资源管理模型工作要求. GB/T 14497—93. 1994年3月1日实施.
- 周念清,钱家忠,吴剑锋,朱学愚,李根义. 2001. 中国北方岩溶区优势面控水机理及优势参数的确定与应用. 地质论评, 47(2): 151~156.

References

- Dong Sheng, Liu Defu. 1999. Grey Markov Model for predicting the maximum water level every year. Journal of Hydraulic Engineer-

- ing, (1): 60~64 (in Chinese with English abstract).
- Knotters M, van Walsum P E V. 1997. Estimating fluctuation quantities from time series of water-table depths using models with a stochastic component. J. Hydrol., 197(1): 25~46.
- National Criterion of People's Republic of China: Technical Request of management model for groundwater resource. (GB/T14497-93). Being into effect on March 1, 1994 (in Chinese).
- Qian Jiazhong, Zhu Xueyu, Wu Jianfeng, Pan Guoying. 2000. Grey Markov Model for predicting mine discharge. Journal of China Coal Society, 25(1): 71~75 (in Chinese with English abstract).
- Simon B, Disney R L. 1984. Markov renewal process and renewal process: Some conditions for equivalence. New Zealand Oper. Res., 12(1): 19~29.
- Wu Jianfeng, Zhu Xueyu, Liu Jianli. 1999. Using genetic algorithm based simulated annealing penalty function to solve groundwater management model. Science in China (series E), 42(5): 521~529.
- Xie Chunhong, Zhu Xueyu, Huang Weihua, et al. 1988. Evaluation on fracture-karst water resources in a well field in Xuzhou City. Carsologica Sinica, 7(3): 265~272 (in Chinese with English abstract).
- Yan Ying, Cheng Shixue, Cheng Kan. 1995. Operational Research and Stochastic Model. Beijing: China People's University Press, 99~145 (in Chinese).
- Zhou Nianqing, Qian Jiazhong, Wu Jianfeng, Zhu Xueyu, Li Genyi. 2001. The controlling mechanism of the preferred plane on groundwater flow and the determination and application of preferred parameters in the karst in Northern China. Geological Review, 47(2): 151~156 (in Chinese with English abstract).

Application of a Time Series Markov Model with Finite Element Method for the Evaluation of Fracture Karst Water Resources in Northern China: A Case of the Zhangji Well Field in Xuzhou, China

QIAN Jiazhong¹⁾, WU Jianfeng²⁾, ZHU Xueyu²⁾, LI Ruzhong¹⁾

1) School of Natural Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009

2) Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093

Abstract

To meet the demands for water resources for urban development, in this paper, based on the characteristics of the fracture karst water flow in the new well field—the Zhangji well field in Xuzhou City, a three-dimensional finite-element mathematics model is put forward. It is solved by using the isoparametric finite-element technique. Considering that the precipitation and its distribution are the main decisive factors affecting the evaluation of groundwater resources, and they are of stochastic characteristics, a time series Markov model is established. It has a higher accuracy than that of a single model of time series. Combined with the finite element method, the model is used to evaluate the groundwater resources in the well field, which yields the volume of groundwater resources allowed to be pumped to be $16.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. The conclusions provide a scientific basis for the sustainable exploitation and use of groundwater in the Zhangji well field. They are of important reference value for the evaluation of water resources in other areas of similar conditions.

Key words: fracture karst water; time series Markov model; finite element model; evaluation of groundwater resources; Zhangji well field; Xuzhou City