

基于叠加马尔科夫链的矿井涌水量预测

——以成庄煤矿为例

李建林^{1,2}, 咎明军¹, 郑继东^{1,2}, 李志强¹

(1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003;

2. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对马尔科夫链预测的局限性, 提出了能够进行清晰定量计算的叠加矿井涌水量的马尔科夫链预测方法。基于2008年1月-2013年12月成庄煤矿72个月的涌水量资料, 进行涌水量状态分级, 计算状态转移矩阵, 将不同步长转移矩阵求得的预测值进行叠加平均, 进而建立了叠加马尔科夫链预测模型, 分析拟合效果, 预测了2014年1月-4月的涌水量, 并与实测值进行了对比。结果表明, 该模型的预测精度达到了94.84%, 预测效果较好, 从而为矿井涌水量的预测提供了一种新方法。

关键词: 叠加马尔科夫链; 矿井涌水量; 预测模型; 状态分级

中图分类号: TD742 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0409-04

Mine water inflow prediction based on superimposed Markov chain

— A case study in Chengzhuang coal mine

LI Jian lin^{1,2}, ZAN Ming jun¹, ZHENG Ji dong^{1,2}, LI Zhi qiang¹

(1. Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Henan Province, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Superimposed Markov chain was proposed to predict mine water inflow quantitatively since the general Markov chain has limitations. Based on the water inflow data in the Chengzhuang coal mine from January 2008 to December 2013 (72 months), water inflow status was classified, state transition matrix was calculated, the predicted values from different step matrices were superimposed and averaged, and thus the superimposed Markov chain model was built and the fitting results were analyzed. The water inflow data from January to April 2014 were predicted and compared with the observed data. The results showed that the model prediction accuracy is about 94.84%, so this new method can be used for mine water inflow prediction.

Key words: superimposed Markov chain; mine water inflow; prediction model; status classification

矿井涌水是煤矿建设和开采过程中不可避免发生的现象, 科学预报矿井涌水量, 能够为矿井排水能力的设计、矿井水害的预防提供依据, 从而有利于制定最优确保矿井安全生产的防治水方案^[1-2]。近年来, 矿井涌水量的预测方法不断更新, 从解析法、水均衡法等确定性预测方法逐渐发展出水文地质比拟法、模糊数学模型、灰色系统理论、BP神经网络等非确定性(随机)预测方法^[3-5]。每种方法都有其特点, 同时也有一定的局限性。其中, 马尔科夫链预测适用于波动性大、长序列的水文现象的预测, 但是其只能预测未来某个时期的涌水量处于某种状态的概率, 预测结果是一个区间^[6-8], 预测效果具有一定的模糊性。叠加马尔科夫链预测是在马尔科夫链预测

的基础上提出的, 能够充分利用已知信息, 得到具体的预测结果。该方法在地表水文序列预报中的应用较为广泛, 如廖捷^[9]、朱玉良^[10]分别对川西高原小金站和永吉县的降水量进行了叠加马尔科夫链预测, 预测效果也较好, 但在地下水文序列预测中的应用很少。基于此, 利用叠加马尔科夫链预测模型对矿井涌水量序列进行预测, 不仅为煤矿安全生产提供有益的参考, 也拓宽了该方法在水文序列预测中的应用范围。

1 叠加马尔科夫链预测模型的建立

马尔科夫链是一种无后效性的时间序列, 它描述了随机序列的动态变化过程; 马尔柯夫链预测是根据初始的状态概

收稿日期: 2014-10-09 修回日期: 2014-10-28 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1544.019.html>

基金项目: 国家自然科学基金“基于水化学关键因子的相似矿区煤层底板突水水源的识别”(41272250)

作者简介: 李建林(1973-), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源与水文地质方面的研究。E-mail: lj.l.wy@163.com

率向量和状态概率转移矩阵来推测某一变量未来某一时期所处状态的一种方法^[11-13]; 对于一系列相依的随机变量, 利用各阶(各种步长)马尔可夫链求得的绝对分布叠加来做预测分析, 称之为叠加马尔科夫链预测方法。矿井涌水量时间序列是一个水文过程, 具有明显的随机性和无后效性, 因此将马尔科夫链用于矿井涌水量预测是合理的。

叠加马尔科夫链模型预测的基本步骤如下: (1) 运用“均值-方差法”划分分级区间; (2) 根据已经确定的分级区间确定序列中各时刻所处的状态; (3) 计算不同步长的转移概率矩阵; (4) 设与待预测月份相距步长 k 的月份所处状态为 i , 利用各状态均值向量 a 和步长为 k 的状态转移矩阵 $P^{(k)}$ 的第 i 个行向量, 来叠加预测该月的月涌水量值, 即 $a = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a^T P^{(k)}(i, \cdot)$ ($i = 1, 2, 3, \dots$); (5) 将预测值与实际值进行对比, 评价预测结果。

2 研究区概况

成庄矿位于沁水煤田南翼, 晋城市西北 20 km 处, 跨泽州和沁水两县, 矿区面积 74 333.8 km²。井田区内发育的地层由东向西、岩层从老到新主要有: 奥陶系中统上马家沟组 and 峰峰组, 石炭系本溪组和太原组, 二叠系山西组、下石盒子组、上石盒子组及第四系。井田内构造主要为一走向北东(北部)逐渐转折为北东向(南部), 倾向北西的单斜构造, 共查明 117 条断层, 有大小陷落柱 185 个。一些正断层以及在奥灰岩溶水高水头压力之下的陷落柱的存在都为矿井涌水提供了可能。成庄矿井现主要开采 3 号煤层。从矿区构造及以往资料分析, 矿井主要水害为: 地表水体、3 号煤层采空区积水、古窑及小煤矿积水及井田西部煤层带压开采区奥陶系岩溶水突水等。

利用上述模型, 以 2008 年 1 月-2013 年 12 月的矿井涌水量实测数据为原始序列, 取 2014 年 1 月-4 月的涌水量作为对比值。其月涌水量变化曲线见图 1。

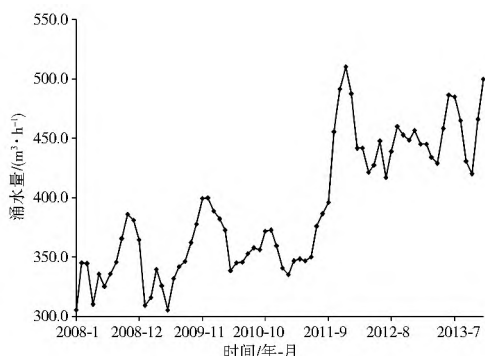


图 1 成庄矿矿井月涌水量变化曲线

Fig. 1 Monthly mine water inflow curve in the Chengzhuang coal mine

由图 1 可知, 涌水量的变化范围为 305.4~510.1 m³/h, 整体呈现缓慢增加趋势, 涌水量的变化幅度比较显著。

3 涌水量预测

3.1 涌水量分级

利用均值-均方差分级法对 2008 年 1 月-2013 年 12 月

(共 72 个月)成庄矿的月涌水量进行分级^[14]。对于序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 其均值为 \bar{x} , 均方差为 s , 将序列值划分为 5 级: $(-\infty, \bar{x} - 1.1s), [\bar{x} - 1.1s, \bar{x} - 0.5s], [\bar{x} - 0.5s, \bar{x} + 0.5s], [\bar{x} + 0.5s, \bar{x} + 1.1s], [\bar{x} + 1.1s, +\infty)$ 。经计算, 这 72 个月涌水量的均值是 390.8 m³/h, 方差为 55.0 m³/h, 则其状态分级标准及所在区间见表 1。

表 1 涌水量状态分级

Tab. 1 Water inflow status classification

状态	分级标准	涌水量区间(m ³ /h)
1	$x < \bar{x} - 1.1s$	$x < 330.26$
2	$\bar{x} - 1.1s \leq x < \bar{x} - 0.5s$	$330.26 \leq x < 363.27$
3	$\bar{x} - 0.5s \leq x < \bar{x} + 0.5s$	$363.27 \leq x < 418.29$
4	$\bar{x} + 0.5s \leq x < \bar{x} + 1.1s$	$418.29 \leq x < 451.30$
5	$x \geq \bar{x} + 1.1s$	$x \geq 451.30$

3.2 叠加马尔科夫链预测

根据表 1 的分级标准对所有月涌水量所处的状态进行划分, 见表 2。在建立叠加马尔科夫链模型之前, 需要利用步长为 1~4 的概率转移矩阵进行计算, 其中 k 步转移矩阵中第 i 行第 j 列的 $P_{ij}^{(k)}$ 元素, 代表由状态 i 经过 k 步到达状态 j 的概率, 即

$$P_{ij}^{(k)} = P(x_k = j | x_0 = i) = \frac{n_{ij}^{(k)}}{N_i} \quad (1)$$

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^[15]。由于涌水量时间序列构成的马尔科夫链不具有平稳转移概率, 则 k 步状态转移概率矩阵为

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

表 2 成庄煤矿月涌水量状态划分

Tab. 2 Monthly water inflow status division in the Chengzhuang coal mine

时间/年月 状态	时间/年月 状态	时间/年月 状态	时间/年月 状态
2008-01 1	2009-07 2	2011-01 2	2012-07 3
2008-02 2	2009-08 2	2011-02 2	2012-08 4
2008-03 2	2009-09 2	2011-03 2	2012-09 5
2008-04 1	2009-10 3	2011-04 2	2012-10 5
2008-05 2	2009-11 3	2011-05 2	2012-11 4
2008-06 1	2009-12 3	2011-06 2	2012-12 5
2008-07 2	2010-01 3	2011-07 3	2013-01 4
2008-08 2	2010-02 3	2011-08 3	2013-02 4
2008-09 3	2010-03 3	2011-09 3	2013-03 4
2008-10 3	2010-04 2	2011-10 5	2013-04 4
2008-11 3	2010-05 2	2011-11 5	2013-05 5
2008-12 3	2010-06 2	2011-12 5	2013-06 5
2009-01 1	2010-07 2	2012-01 5	2013-07 5
2009-02 1	2010-08 2	2012-02 4	2013-08 5
2009-03 2	2010-09 2	2012-03 4	2013-09 4
2009-04 1	2010-10 3	2012-04 4	2013-10 4
2009-05 1	2010-11 3	2012-05 4	2013-11 5
2009-06 2	2010-12 2	2012-06 4	2013-12 5

结合表 2, 并利用公式(1)和(2)计算各个步长的状态转移概率矩阵, 则有:

$$P_1 = \begin{bmatrix} \frac{2}{7} & \frac{5}{7} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{23} & \frac{16}{23} & \frac{4}{23} & 0 & 0 \\ \frac{1}{16} & \frac{4}{16} & \frac{9}{16} & \frac{1}{16} & \frac{1}{16} \\ 0 & 0 & \frac{1}{13} & \frac{8}{13} & \frac{4}{23} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{12} & \frac{8}{12} \end{bmatrix} \quad P_2 = \begin{bmatrix} \frac{2}{7} & \frac{5}{7} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{23} & \frac{13}{23} & \frac{8}{23} & 0 & 0 \\ \frac{2}{16} & \frac{4}{16} & \frac{7}{16} & 0 & \frac{3}{16} \\ 0 & 0 & \frac{1}{13} & \frac{7}{13} & \frac{5}{13} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{6}{11} & \frac{5}{11} \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} \frac{3}{7} & \frac{3}{7} & \frac{1}{7} & 0 & 0 \\ \frac{1}{23} & \frac{12}{23} & \frac{10}{23} & 0 & 0 \\ \frac{2}{16} & \frac{6}{16} & \frac{4}{16} & 0 & \frac{4}{16} \\ 0 & 0 & \frac{1}{12} & \frac{6}{12} & \frac{5}{12} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{7}{11} & \frac{4}{11} \end{bmatrix} \quad P_4 = \begin{bmatrix} \frac{1}{7} & \frac{5}{7} & \frac{1}{7} & 0 & 0 \\ \frac{1}{23} & \frac{9}{23} & \frac{12}{23} & 0 & \frac{1}{23} \\ \frac{3}{16} & \frac{7}{16} & \frac{2}{16} & \frac{1}{16} & \frac{3}{16} \\ 0 & 0 & \frac{1}{11} & \frac{3}{11} & \frac{7}{11} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{9}{11} & \frac{2}{11} \end{bmatrix}$$

状态均值向量 a 的元素是涌水量分级区间上下限的均值, 第一个元素的下限以及最后一个元素的上限分别是整个序列的最小值和最大值, 计算可得均值向量 $a = \{317.83, 346.765, 390.78, 434.795, 480.7\}$ 。根据 2013 年 9 月-2013 年 12 月这 4 个月涌水量所处的状态 i , 分别取距 2014 年 1 月的月数为相应的步长, 将该步长的转移概率矩阵的第 i 行与均值向量的转置 a^T 做乘积, 从而计算出相应月份涌水量的预测值, 对其进行叠加平均可得 2014 年 1 月涌水量的预测值, 见表 3。

表 3 成庄煤矿 2014 年 1 月涌水量预测结果

Tab. 3 Predicted water inflow results of the Chengzhuang coal mine in January 2014

时间/年-月	状态	步长	预测值/($m^3 \cdot h^{-1}$)
2013-09	4	4	460.005 9
2013-10	4	3	450.254 2
2013-11	5	2	455.660 9
2013-12	5	4	465.398 3
2014-01			457.829 8

取 2008 年 2 月-2013 年 12 月的涌水量, 以及 2014 年 1 月的预测值作为初始值, 利用叠加马尔科夫链模型预测 2014 年 2 月的涌水量, 按照类似方法预测 2014 年 3 月和 4 月的涌水量, 结果见表 4。

表 4 成庄煤矿涌水量叠加马尔科夫链预测结果

Tab. 4 Predicted water inflow results of the Chengzhuang coal mine based on superimposed Markov chain

时间/年月	实际值 / ($m^3 \cdot h^{-1}$)	预测值 / ($m^3 \cdot h^{-1}$)	残差 / ($m^3 \cdot h^{-1}$)	相对残差 (%)
2014-01	407.6	457.829 8	- 50.3	- 12.334 3
2014-02	428.4	439.429 7	- 11.0	- 2.573 4
2014-03	462.6	443.690 9	18.9	4.086 5
2014-04	451.0	443.516 3	7.5	1.659 4

对表 4 中的相对残差求其绝对值之后进行平均, 得

5.163 4%, 则叠加马尔科夫链的预测精度为 94.836 6%, 预测效果好。

3.3 讨论

(1) 马尔科夫链的转移矩阵中的元素都是某一状态下事件发生的概率, 需要长期的涌水量资料进行推算; 本文在进行马尔科夫链预测时, 采用了成庄煤矿连续 72 个月的涌水量资料, 可认为是一个大样本序列。在此情况下频率近似等于概率, 从而使马尔科夫链用于矿井涌水量预测具有可行性。廖捷^[9]运用叠加马尔科夫链对川西高原小金站降水量的预测精度是 90.56%、朱玉良^[10]利用该方法对永吉县降水量的预测精度是 88.942%, 本文对矿井涌水量的预测精度是 94.836 6%, 说明叠加马尔科夫链法对波动大的长时间水文序列进行预测时效果都比较好。

(2) 由表 1 可知, 2014 年 1 月的预测误差较大。分析原因如下: 从表 2 可以看出利用“均值-方差法”划分分级区间, 所确定出的状态比较集中, 这就使得状态 4 和状态 5 向状态 1、2 的转移概率都为 0, 而 2013 年 9 月-2013 年 12 月的涌水量都处于状态 4 或者 5, 进行内积运算时, 由于均值向量中的元素是逐渐增大的, 这就使得所预测出的结果较实际值大, 对其求平均时所得的 2014 年各月的预测值都比较大, 然而 2014 年 1 月的实际涌水量较之前 28 个月的涌水量都低, 从而使该月的预测误差较大。但由于叠加马尔科夫链预测具有很强的自我调节能力, 所以后续月份的预测值不会受到误差大的月份的预测值的影响。

(3) 为了克服马尔科夫链预测结果为一区间的缺点, 一些学者对其进行了改进。钱家忠等^[15]对焦作朱村矿二煤南区 1992 年-1998 年的矿井涌水量建立了灰色马尔科夫预报模型, 结果表明该方法预测相对误差较小, 可行性强; 马建琴等^[8]应用数据加载法对 GM(1, 1) 模型进行了残差修正, 提出了改进型的灰色马尔科夫耦合预测模型, 运用该模型对三门峡水库 1989 年-1993 年的径流量进行了预测, 使得预测值能更准确地落入状态区间内, 提高了径流预测的精度; 秦松^[13]对四川简阳市的降水量建立了加权的滑动平均-马尔科夫预测模型, 降低了序列的随机性, 提高了预测的准确性; 周秀平等^[16]将模糊马尔科夫链预测模型应用于桂江流域年径流预测分析, 根据隶属度函数确定最后所处的状态, 结果可信度高。而叠加马尔科夫链预测模型有别于以上的改进方法, 是对马尔科夫链模型本身的一种改进, 它使已知信息得以充分利用, 预测效果较好。

4 结论

(1) 叠加马尔科夫链预测克服了马尔科夫链预测无法给出具体预测值的缺陷, 充分利用已知信息, 使得预测结果更加明朗, 为矿井涌水量及其他水文序列的预测提供一种新方法。

(2) 对成庄煤矿矿井涌水量序列进行了叠加马尔科夫链预测, 其预测精度达到了 94.836 6%, 说明该方法强化了马尔科夫链的自我调节能力, 提高了预测精度。

参考文献(References):

[1] 彭辉才, 徐卫东, 付青, 等. 贵州绿塘煤矿涌水量预测研究[J].

- 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 58-61. (PENG Huicai, XU Weidong, FU Qing, et al. Research on prediction of water inflow in Lvtang coal mine of Guizhou Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(2): 58-61. (in Chinese))
- [2] 李建林, 管明军, 韩乐. 矿井突水判别方法与应用[J]. 河南理工大学学报, 2014, 33(5): 590-594. (LI Jianlin, ZAN Mingjun, HE Le. Application on methods for distinguishing sources of mine water invasion[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2014, 33(5): 590-594. (in Chinese))
- [3] 杜敏铭, 邓英尔, 许模. 矿井涌水量预测方法综述[J]. 地质学报, 2009, 29(1): 70-73. (DU Minming, DENG Ying'er, XU Mo. Review of methodology for prediction of water yield of mine[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 29(1): 70-73. (in Chinese))
- [4] 陈江峰, 崔金良, 杜明清. 矿井涌水量时间序列的 R/S 分析[J]. 煤矿安全, 2003, 34(5): 38-40. (CHEN Jiangfeng, CUI Jingliang, DU Mingqing. R/S analysis of mine discharge time series[J]. Safety in Coal Mines, 2003, 34(5): 38-40. (in Chinese))
- [5] 于兴杰, 畅建霞, 黄强, 等. 基于灰色马尔柯夫预测模型的径流量预测[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(1): 69-72. (YU Xingjie, CHANG Jianxia, HUANG Qiang, et al. Prediction of runoff based on grey markov model[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2008, 39(1): 69-72. (in Chinese))
- [6] 鞠远江, 罗鸿, 廉法宪. 新集一矿矿井涌水量的马尔科夫链预测[J]. 中国矿业, 2012, 21(12): 105-107. (JU Yuanjiang, LUO Hong, LIAN Faxian. A prediction of water inflow in the Xinji No. 1 coal mine with markov chain[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(12): 105-107. (in Chinese))
- [7] 高保彬, 李回贵, 于水军. 改进的灰色马尔可夫模型在采煤工作面涌水量预测中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(4): 73-77. (GAO Baobin, LI Huihui, YU Shujun. Application of an improved grey Markov model in prediction of water inflow from coal face[J]. Mining Research & Development, 2013, 33(4): 73-77. (in Chinese))
- [8] 马建琴, 许龙宾, 师琨. 改进型灰色马尔科夫模型在径流预测中的应用^[J], 华北水利水电学院学报, 2012, 33(2): 39-42. (MA Jianqin, XU Longbin, SHI Kun. The application of the improved grey markov model in runoff prediction[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33(2): 39-42. (in Chinese))
- [9] 廖捷, 胡豪然, 陈功. 叠加马尔科夫链在年降水量预测中的应用[J]. 安徽农业科学. 2012, 40(9): 5532-5533. (LIAO Jie, HU Haoran, Chen Gong. The application of superimposed markov chain for prediction of annual precipitation[J]. Journal of Anhui Agri. Sci, 2012, 40(9): 5532-5533. (in Chinese))
- [10] 朱玉良, 朱玉波. 基于叠加的马尔科夫链的永吉县降水量分析[J]. 吉林水利, 2013(11): 29-31. (ZHU Yuliang, ZHU Yubo. Assessment of the Precipitation of Yongji county based on the superimposed markov chain method[J]. Jilin Water Resources, 2013(11): 29-31. (in Chinese))
- [11] 刘次华. 随机过程[M]. 华中科技大学出版社, 2008: 42-43. (LIU Cihua. Stochastic Processes[M]. Huazhong University of Science and Technology Press, 2008: 42-43. (in Chinese))
- [12] 张守平, 樊科伟. 基于自适应 MGM(1, n)-马尔科夫链模型的大坝变形预测[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 145-148. (ZHANG Shouping, FAN Kewei. Prediction of dam deformation based on selfadaptive MGM markov model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 145-148. (in Chinese))
- [13] 秦松. 基于加权的滑动平均-马尔科夫预测模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013(1): 185-188. (QIN Song. Markov prediction model and its application based on the weighted sliding average[J]. Journal of WATER Resources & Water Engineering, 2013(1): 185-188. (in Chinese))
- [14] 冯耀龙, 韩文秀. 权马尔可夫链在河流丰枯状况预测中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(10): 89-93. (FENG Yaolong, HAN Wenxiu. The application of weighted markov chain to the prediction of river runoff state[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1999, 19(10): 89-93. (in Chinese))
- [15] 钱家忠, 朱学愚, 吴剑锋, 等. 矿井涌水量的灰色马尔可夫预报模型[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 71-75. (QIAN Jiazhong, ZHU Xueyu, WU Jianfeng, et al. Grey markov model for predicting mine discharge[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 71-75. (in Chinese))
- [16] 周秀平, 黄伟军, 王文圣, 等. 模糊马尔科夫链预测模型在桂江流域径流预测中的应用[J]. 广西水利水电, 2006(1): 29-31. (ZHOU Xiuping, HUANG Weijun, WANG Wensheng, et al. Application of fuzzy markov chain model in runoff prediction for guijiang basin[J]. GX Water Resources & Hydropower Engineering, 2006(1): 29-31. (in Chinese))