

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.002

基于物理统计方法的丹江口水库月入库径流预报

冯小冲^{1,2}, 王银堂¹, 刘 勇³, 胡庆芳^{1,4}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
4. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:根据丹江口水库逐月入库径流与前一年逐月平均北太平洋海温场、100 hPa 和 500 hPa 高度场以及 74 项环流特征量的相关关系, 从中挑选出若干相关性较高的稳定气象因子作为关键影响因子, 利用逐步回归方法建立逐月入库径流预报模型。基于所建立的模型, 对丹江口水库 1957—2000 年逐月入库径流量进行模拟, 并对 2001—2006 年逐月入库径流量进行预报。结果表明, 分析得到的关键预报因子具有较好的稳定性, 径流预报精度较高, 平均预报合格率达到 84.7%, 可为丹江口水库水资源调度提供依据。

关键词:月径流量; 径流预报; 气象因子; 逐步回归法; 丹江口水库

中图分类号: P338+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)03-0242-06

随着经济社会的高速发展, 人们对水文预报的要求越来越高, 不仅要求有准确的短期预报, 以防御突发的暴雨洪水事件, 同时也要求有较长预见期的中长期水文预报, 为制定科学的水资源调度方案, 确保水利设施的安全和发挥其经济效益提供重要依据^[1-4]。随着预见期的增加和众多不确定性因素的影响, 加之认知能力和科技水平的限制, 目前中长期水文预报的精度尚不能满足生产部门的要求, 总体仍处于探索、发展阶段。因此, 探索建立具有物理背景、满足一定精度要求的水库中长期水文预报模型, 一直以来都是水文界研究的热点之一^[5-12]。

丹江口水库作为南水北调中线工程的水源地, 建立入库长期径流预报模型, 可为中线工程年和月水资源计划调度的制定提供年、月来水信息, 使人们在协调防洪、兴利、生态用水及各部门用水矛盾时, 及早采取措施进行统筹安排, 以获取最佳综合效益。本文通过相关普查, 分析了丹江口水库逐月入库径流环流及海温影响因子的关键区域以及不同时间段因子的变化, 在关键影响区域里, 根据其相关性及其稳定性逐月遴选出备选预报因子集, 利用逐步回归法^[1,13]建立预报模型, 可为水库的科学调度与运行提供可靠的预报信息依据。

1 径流长期预报模型的建立

1.1 基本思路

首先, 对流域长期径流资料进行分析, 从径流形成原因分析影响径流的气象因素及海洋因素, 然后, 建立预报对象(年、月径流量)和环流要素及海洋要素(同年或上一年度值)的对应关系, 进行相关普查, 根据资料年限及给定置信度挑选出具有显著影响的因子; 从物理背景上分析相关因子的关键影响区域及稳定性, 排除虚假相关, 最终遴选出备选预报因子, 利用逐步回归法挑选预报因子建立逐月预报模型。

1.2 模型建立步骤

a. 建立预报对象和预报因子之间的对应关系, 计算相关系数, 遴选出备选预报因子。

b. 根据因子重要性从备选预报因子中挑选第一个因子, 设第一步挑选的因子为 x_1 , 组成第一步过渡方程^[1-2]:

$$y = b_0^{(1)} + b_1^{(1)}x_1 \tag{1}$$

式中 $b_0^{(1)}, b_1^{(1)}$ 表示第一步方程的回归系数.

c. 挑选第二个因子,设选中的第二个因子为 x_2 , 则第二步方程为

$$y = b_0^{(2)} + b_1^{(2)}x_1 + b_2^{(2)}x_2 \tag{2}$$

这种步骤一直继续下去,直至在还未引入回归方程的因子中,不存在对预报对象作用显著的因子为止.

2 预报因子遴选方法

由于水文要素变化的复杂性,引起其未来变化的因素有很多,挑选预报因子是中长期水文预报的关键^[1].

预报因子的遴选方法可分为物理成因分析方法和统计推断方法两种.物理成因分析方法是分析预报对象的各种物理过程,弄清预报因子与预报对象之间的物理联系;统计推断方法是指挑选出来的因子应符合数理统计中的一些原则,如因子与预报对象之间的相关性要显著等.由于目前技术水平的限制,水文过程的某些现象还未被揭示,预报因子与预报对象之间的内在物理联系尚未完全弄清,所以,一般情况下,都是以统计推断方法为挑选因子的主要方法^[14].

本文将物理背景分析与统计推断分析两种方法相结合进行因子遴选,主要遴选步骤如下:

a. 相关性普查.首先根据流域历年降雨天气系统背景的统计分析,挑选可能对流域降雨径流造成影响的因子,主要从前期环流形势、大气运动的能量来源、下垫面因素以及前期水文气象要素等方面挑选,然后进行相关普查,即建立预报对象与预报因子之间的相关关系,计算两者之间长系列的相关系数.在一定置信度下根据资料年限确定相关系数门限值(由于预报因子与预报对象属于遥相关,根据相关系数检验表,在一定置信度下,通过系列长度选取相关系数门限值,认为相关系数大于该门限值时则为显著相关,如取置信度 0.01,资料长度 50 a,则相关系数大于 0.36 时即为显著相关),据此挑选出所有大于该门限值的相关影响因子.

b. 物理成因分析.针对挑选出来的相关因子,分析影响预报对象的“关键区”与“关键时段”,再考虑时间与空间上的连续性与天气学上的物理意义,分析相关因子与预报对象之间的物理成因联系,同时考虑因子地域性影响因素以及不同季节的变化规律,去除虚假相关因子(指高相关但无物理成因联系的因子).

c. 预报因子确定.在考虑相关因子资料的获取性及可操作性的前提下,分析水文因素及气象因素的不确定性(即随着时间的变化,部分相关因子也会改变),寻找稳定性较好的相关因子.在上述工作的基础上,根据相关因子与预报对象之间的相关性要高、因子与因子之间满足独立性这一原则,确定预报因子库.

3 丹江口水库月入库径流预报

3.1 数据资料

基本资料包括丹江口水库 1957—2006 年(共 50 a)逐月入库径流量资料;北太平洋 1956—2006 年(共 51 a)逐月海温资料(美国国家海洋和大气局提供);北半球 1956—2006(共 51 a)100 hPa 和 500 hPa 逐月平均高度场资料(美国环境预报中心和美国国家大气研究中心提供);1956—2006 年(共 51 a)74 项逐月环流特征量资料(中国气象局气候中心提供).

3.2 预报因子遴选

首先分析丹江口水库逐月径流量与前一年逐月平均北太平洋海温场、100 hPa 和 500 hPa 高度场以及 74 项环流特征量的单相关系数,初选出相关系数大于 0.36 的气象因子,进行关键区域及稳定性分析.由于每月因子分析方法相同,以下均以 5 月入库径流量为例进行分析说明,其他月份因子遴选在此就不一一赘述.

3.2.1 因子的关键影响区域分析

针对 5 月径流量相关系数大于 0.36 的气象因子,分析其分布情况,找出影响径流量的关键区域并以此区域作为因子遴选的参考,剔除虚假相关因子.

a. 北太平洋海温(SST)场关键影响区域分析.北太平洋海温场中关键影响区域海温与大气环流之间有冷热源的互换关系.热带洋面海表温度异常,可以通过海气相互作用对热带和全球的大气环流产生很大的影响,进而影响长期的天气过程.图 1 为 5 月径流量与前一年 9 月北太平洋海温场相关系数等值线图,图中数

字为 5 月经流量与前一年 9 月北太平洋海温场各格点的相关系数,其绝对值越大,相关性越好.由图 5 分析可知,5 月经流的北大平洋海温场关键影响区域特点为 (a) 相关区位置比较集中,大致分布在北太平洋西部和赤道附近,特别是黑潮区的负相关和北亚热带区的负相关较为明显,赤道区也存在明显的负相关 (b) 相关时间段主要出现在前一年的秋冬季节,显著相关时期为前一年的 8—10 月,而春夏季节海温对 5 月经流影响不显著.

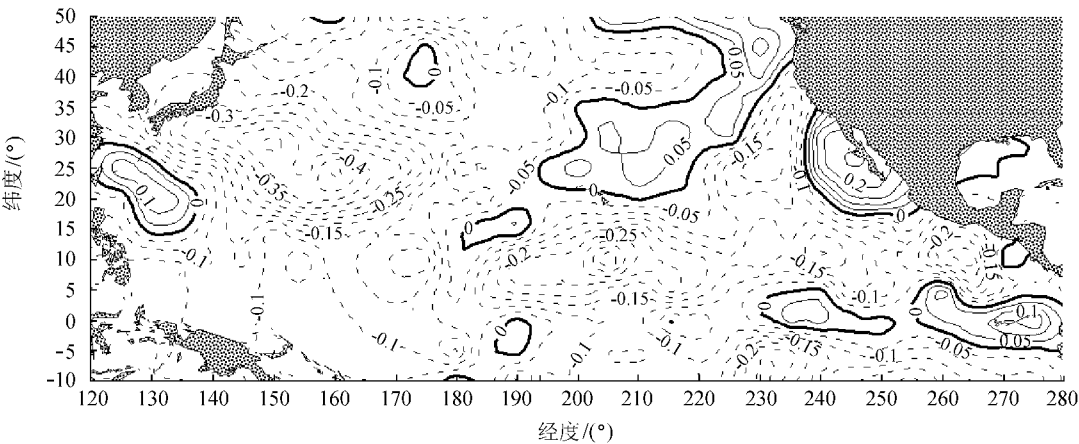


图 1 5 月经流量与前一年 9 月北太平洋海温场相关系数等值线

Fig. 1 Isograms of correlation coefficient between monthly runoff in May and North Pacific SST fields in September in previous year

b. 北半球 100 hPa 和 500 hPa 高度场关键影响区域分析.图 2 和图 3 分别是 5 月经流量与前一年 1 月 100 hPa 和 500 hPa 的高度场相关系数等值线图.分析图 2、图 3 可知,5 月经流的高度场关键影响区域特点为 (a) 100 hPa 高度场中的相关区位置比较集中,主要分布在较高纬度的北冰洋附近、北太平洋东部和北美洲的东部;500 hPa 高度场除了分布在较高纬度的北冰洋附近外,大西洋的中纬度地区以及北太平洋的中

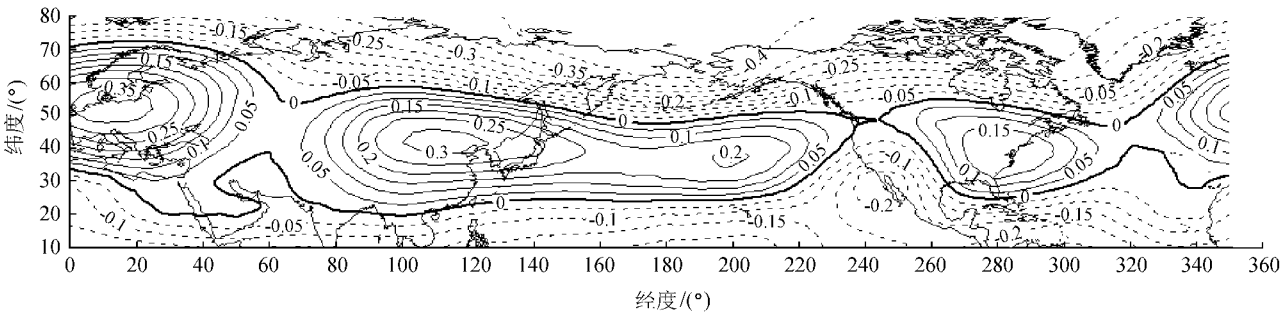


图 2 5 月经流量与前一年 1 月北半球 100 hPa 高度场相关系数等值线

Fig. 2 Isograms of correlation coefficient between monthly runoff in May and Northern Hemisphere 100 hPa height circulation fields in January in previous year

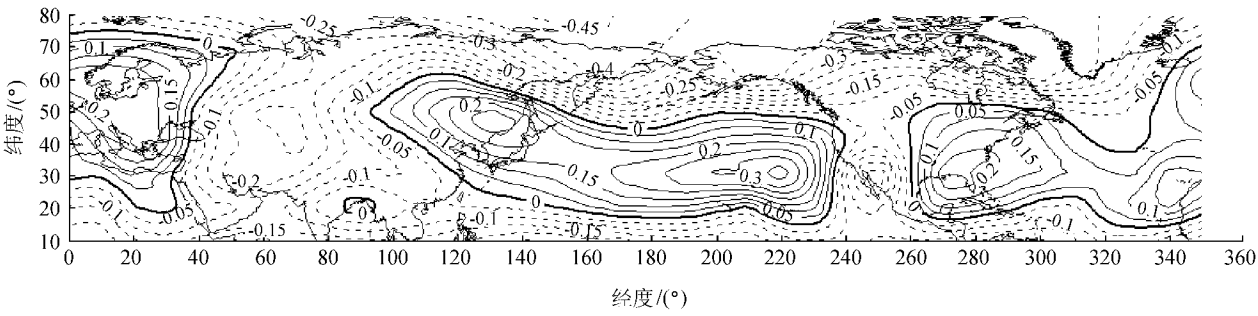


图 3 5 月经流量与前一年 1 月北半球 500 hPa 高度场相关系数等值线

Fig. 3 Isograms of correlation coefficient between monthly runoff in May and Northern Hemisphere 500 hPa height circulation fields in January in previous year

纬度偏西地区也都是较高相关区域 (b)100 hPa 和 500 hPa 高度场中相关时间段较为一致 ,主要出现在前一年的冬春季 ,显著时间都为 11 月和 1 月 ,夏秋季节高度场对 5 月经流量影响不显著 .

3.2.2 影响因子的稳定性分析

分析 1957—2006 年不同时段(1957—2006 年 ,1966—2006 年 ,1971—2006 年 ,1976—2006 年 ,1981—2006 年 ,1986—2006 年 ,1991—2006 年)逐月经流量与前一年气象因子的相关关系 .统计各个因子在不同时段与逐月经流量的相关系数 ,如果大于 0.36 ,则此因子在这个时段内对径流量影响显著 ,认为该因子在此时段内与该月经流量显著相关 .显然 ,相关程度高且因子显著相关的次数越多表明该因子越稳定 .

3.2.3 预报因子的确定

根据 1957—2006 年的关键区域影响因子的相关系数绝对值进行排序 ,同时参考因子的稳定性 ,遴选出前 17 个因子作为预报对象的备选因子 .通过物理成因分析^[15-16] ,从 74 项环流特征量中选出前一年 6 月北半球副高强度指数、前一年 6 月西太平洋副高北界、前一年 4 月亚洲经向环流指数作为预报因子 .本文选出 20 个稳定的高相关预报因子作为预报 5 月经流量的备选因子 ,见表 1 .

表 1 5 月经流量预报因子

Table 1 Forecast factors for runoff in May

序号	相关场	月份	编码	因子说明	相关系数	显著相关次数
1	SST	9	103	前一年 9 月 103 点海温	- 0.533	7
2	SST	2	171	前一年 9 月 171 点海温	- 0.499	7
3	500 hPa	4	217	前一年 4 月 217 点 500 hPa 高度	- 0.490	6
4	SST	10	53	前一年 10 月 53 点海温	- 0.489	7
5	500 hPa	10	196	前一年 10 月 196 点 500 hPa 高度	- 0.480	5
6	74	6	12	前一年 6 月北半球副高强度指数	- 0.480	7
7	500 hPa	6	211	前一年 6 月 211 点 500 hPa 高度	- 0.479	7
8	74	6	38	前一年 6 月西太平洋副高北界	- 0.478	7
9	SST	9	191	前一年 9 月 191 点海温	- 0.476	6
10	SST	9	77	前一年 9 月 77 点海温	- 0.475	7
11	SST	6	74	前一年 6 月 74 点海温	- 0.468	5
12	500 hPa	11	161	前一年 11 月 161 点 500 hPa 高度	- 0.465	5
13	500 hPa	8	105	前一年 8 月 105 点 500 hPa 高度	- 0.463	5
14	74	4	64	前一年 4 月亚洲经向环流指数	0.460	7
15	500 hPa	1	16	前一年 1 月 16 点 500 hPa 高度	- 0.459	6
16	SST	10	154	前一年 10 月 154 点海温	- 0.457	5
17	100 hPa	2	84	前一年 2 月 84 点 100 hPa 高度	- 0.452	7
18	100 hPa	11	102	前一年 11 月 102 点 100 hPa 高度	0.451	7
19	100 hPa	1	55	前一年 1 月 55 点 100 hPa 高度	- 0.448	6
20	SST	10	188	前一年 10 月 188 点海温	- 0.438	7

注 :表中相关场 74 是指 74 项环流特征量资料 ,编码则对应 74 项中各因子序号 .

3.3 长期径流预报模型的建立

以丹江口水库 5 月入库径流量为例建立预报方程 .对初选出的 20 个气象因子进行逐步回归分析 ,当给定置信度 $\alpha = 0.05$ 时 ,挑选出 5 个影响显著的优势因子 ,建立丹江口水库 5 月入库径流量的预报方程 :

$$y = 1\,396.8 - 0.96x_1 - 0.29x_2 + 0.51x_3 - 1.04x_4 - 0.15x_5 \tag{3}$$

式中 : x_1 ——前一年 9 月 103 点海温 ,此点位于黑潮区内 ,与 5 月经流量存在显著的负相关关系 ; x_2 ——前一年 10 月 196 点 500 hPa 高度 ,此点位于北太平洋中纬度地区 ,与 5 月经流量存在显著的负相关关系 ; x_3 ——前一年 4 月亚洲经向环流指数 ,与 5 月经流量存在显著正相关关系 ; x_4 ——前一年 10 月 188 点海温 ,此点位于赤道区 ,与 5 月经流量存在显著的负相关关系 ; x_5 ——前一年 1 月 55 点 100 hPa 高度 ,该点位于北冰洋附近 ,该区域 100 hPa 高度和 5 月经流量存在显著的负相关关系 .

3.4 模型预报结果分析

利用所建模型对丹江口水库 1957—2000 年逐月入库径流量进行模拟 ,对 2001—2006 年逐月入库径流量进行预报 ,图 4 给出了逐步回归方法 1991—2000 年的模拟过程 .关于预报模型精度评价 ,采用 SL250—2000 《水文情报预报规范》中的中长期预报精度评定规定作为预报模型预报的评价标准 .按多年变幅的 20% 作为合格标准 ,以预报结果达到合格标准的次数占预报总次数的百分比来统计合格率 ,统计结果见表 2 .

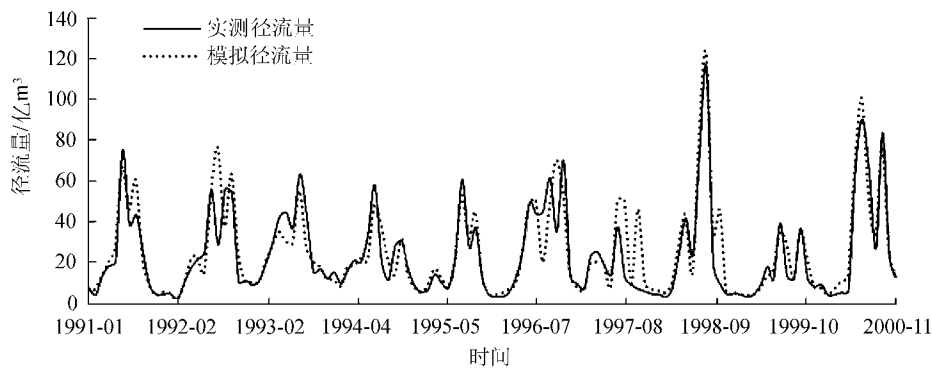


图 4 1991-2000 逐步回归方法模拟过程

Fig. 4 Simulated process of stepwise regression method during 1991-2000

表 2 2001—2006 年预报合格率

Table 2 Qualified rate of forecast during 2001-2006

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
合格率/%	100.0	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	66.7	83.3	83.3	100.0	100.0	66.7

由表 2 可知平均预报合格率为 84.7% ,达到较好精度 ,结果令人满意.由图 4 可知 ,整个模拟过程与实际径流过程拟合较好 ,峰值对应关系较好.

4 结 论

- a. 通过建立逐月入库径流量与前一年逐月平均北太平洋海温场、100 hPa 和 500 hPa 高度场以及 74 项环流特征量的相关关系 ,在相关普查、关键区域分析以及稳定性分析的基础上 ,遴选出具有物理成因联系的稳定因子.以遴选出的因子作为预报因子建立预报方程 ,达到了较好的预报精度 ,可为年和月水资源计划调度的制定提供参考.
- b. 从物理成因出发 ,挑选出相关性较好的稳定因子 ,利用逐步回归方法进行预报 ,可达到较好的预报效果 ,从而说明因子遴选的重要性.
- c. 考虑影响因子的年代际变化 ,挑选出相对稳定的因子 ,使预报精度不随时间的改变而降低.

参考文献 :

[1] 范钟秀.中长期水文预报[M].南京 :河海大学出版社 ,1999.

[2] 汤成友 ,宫学文 ,张世明.现代中长期水文预报方法及其应用[M].北京 :中国水利水电出版社 ,2008 :30-38.

[3] 王富强.中长期水文预报及其在平原洪水资源利用中的应用研究[D].大连 :大连理工大学 ,2008.

[4] 冯小冲 ,王银堂 ,胡庆芳.三参数月水量平衡模型在丹江口水库控制流域的应用[J].水利水电科技进展 ,2010 ,30(3) :5-7. (FENG Xiao-chong ,WANG Yin-tang ,HU Qing-fang. Application of three-parameter monthly water balance model in Danjiangkou Reservoir Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2010 ,30(3) :5-7. (in Chinese))

[5] 陈守煜.中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J].水利学报 ,1997(8) :16-22. (CHEN Shou-yu. Theoretical pattern of comprehensive analysis and method for mid and long term hydrology forecast[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1997(8) :16-22. (in Chinese))

[6] 张俊 ,程春田 ,林剑艺 ,等.中长期水文预报方法研究综述[J].水利水电科技进展 ,2010 ,30(增刊 1) :170-176. (ZHANG Jun , CHEN Chun-tian ,LIN Jian-yi ,et al. Research summary of mid and long term hydrological forecasting methods[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2010 ,30(Supl) :170-176. (in Chinese))

[7] 郭生练 ,张俊 ,郭靖 ,等.基于气象模式的汉江流域洪水预报系统[J].水利水电科技进展 ,2009 ,29(3) :1-5. (GUO Sheng-lian , ZHANG Jun ,GUO Jing ,et al. Flood forecasting system of Hanjiang Basin based on meteorological mode[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2009 ,29(3) :1-5. (in Chinese))

[8] 王文圣 ,熊华康 ,丁晶.日流量预测的小波网络模型初探[J].水科学进展 ,2004 ,15(3) :382-386. (WANG Wen-sheng ,XIONG Hua-kang ,DING Jing. Study on wavelet network model and its application to the prediction of daily discharge[J]. Advances in Water

Science 2004 ,15(3) 382-386.(in Chinese))

[9] CHENG Chun-Tian ,XIE Jing-Xin ,CHAU K W ,et al. A new indirect multi-step-ahead prediction model for a long-term hydrologic prediction[J].Journal of Hydrology 2008 ,361(1) :118-130.

[10] CHAU K W ,CHENG Chun-tian ,WANG Wen-chuan ,et al. A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series[J].Journal of Hydrology 2009 ,374(3) :294-306.

[11] 林剑艺 程春田.支持向量机在中长期径流预报中的应用[J].水利学报 2006 ,37(6) :681-686.(LIN Jian-yi ,CHEN Chun-tian. Application of support vector machine method to long-term runoff forecas[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2006 ,37(6) :681-686. (in Chinese))

[12] 张铭 李承军 张勇传.贝叶斯概率水文预报系统在中长期径流预报中的应用[J].水科学进展 2009 ,20(1) :40-44.(ZHANG Ming ,LI Cheng-jun ,ZHANG Yong-chuan. Application of the Bayesian statistic hydrological forecast system to middle-and long-term runoff forecas[J]. Advances in Water Science 2009 ,20(1) :40-44.(in Chinese))

[13] 葛朝霞 薛梅 宋颖玲.多因子逐步回归周期分析在中长期水文预报中的应用[J].河海大学学报 :自然科学版 ,2009 ,37(3) :255-257.(GE Zhao-xia ,XUE Mei ,SONG Ying-ling. Application of multi-factor stepwise regression cycle analysis in medium and long-term hydrological forecas[J].Journal of Hohai University :Natural Sciences 2009 ,37(3) :255-257.(in Chinese))

[14] 顾月红.洪家渡水电站月径流量预报方案的研究[D].南京 :河海大学 2007.

[15] 许书成 徐森林 徐元顺 等.副高与台风活动对丹江口水库流域 9~10 月降水的影响[J].湖北气象 ,1998(1) :15-17.(XU Shu-cheng ,XU Sen-lin ,XU Yuan-shun ,et al. The influence on subtropical high and typhoon activities on precipitation in Danjiangkou Basin from September to Octobe[J]. Journal of Hubei Meteorology ,1998(1) :15-17.(in Chinese))

[16] 徐元顺.近 75 年丹江口水库入库流量时间变化特征与气候成因[J].湖北气象 2005(4) :21-23.(XU Yuan-shun. The temporal variation characteristics of inflow of Danjiangkou reservoir and climate reason in recent 75 year[J].Journal of Hubei Meteorology 2005 (4) :21-23.(in Chinese))

Monthly runoff forecast for Danjiangkou Reservoir based on physical statistical methods

FENG Xiao-chong^{1 2} , WANG Yin-tang¹ , LIU Yong³ , HU Qing-fang^{1 4}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,
Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China ;

2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower , Guangzhou 510610 , China ;

3. College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

4. Department of Hydraulic and Hydro-Power Engineering , Tsinghua University , Beijing 100982 , China)

Abstract : According to the correlation between the monthly runoff in Danjiangkou Reservoir and the North Pacific sea surface temperature , the Northern Hemisphere 100 and 500 hPa height fields and the 74 circulation characteristic values in the previous year , the stable meteorological factors with high correlation were selected as the key factors. A monthly runoff forecast model was established by means of the stepwise regression methods. This model was employed to simulate the monthly runoff of Danjiangkou Reservoir during 1957-2000 and to predict it during 2001-2006. The results show that the key forecast factors have good stability and the runoff forecast have high accuracy. The qualified rate of the average forecast is 84.7% . It can provide the basis for water resources regulation in Danjiangkou Reservoir.

Key words : monthly runoff ; runoff forecast ; meteorological factor ; stepwise regression method ; Danjiangkou Reservoir