

# 基于相关分析的流域汛期划分初探

郭霞<sup>a,c</sup>, 王正中<sup>a,b</sup>, 王双银<sup>b</sup>

(西北农林科技大学 a 水利工程安全与病害防治研究中心, b 水利与建筑工程学院, c 理学院, 陕西 杨凌 712100)

**[摘要]** 【目的】确定恰当的流域汛期,为水库的防洪安全奠定基础,同时为水资源的优化调度提供决策依据。**【方法】**基于相关分析方法,采用千河流域 31 年的日均流量资料,对流域不同时间段的径流自相关性进行研究,根据其显著性差异确定千河流域的汛期和主汛期。最后从水文气象学原理出发,结合西北地区的气候特征分析,对汛期和主汛期的划分结果进行验证。**【结果】**确定千河流域的汛期为 5 月下旬至 10 月上旬,与千河流域主要降雨期一致;主汛期为 07-01—08-31,与千河流域的暴雨峰值期一致;说明汛期、主汛期的划分结果是合理的。**【结论】**基于相关分析法的汛期划分研究,方法简单直观,物理概念清晰,可为千河流域冯家山水库的安全运行及水资源调度决策提供参考。

**[关键词]** 相关分析;自相关系数;汛期划分;主汛期

**[中图分类号]** P338<sup>+</sup>.2;TV697.1<sup>+</sup>1

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2010)03-0206-05

## Preliminary study of basins' flood season division based on correlation analysis

GUO Xia<sup>a,c</sup>, WANG Zheng-zhong<sup>a,b</sup>, WANG Shuang-yin<sup>b</sup>

(a Research Center of Engineering Safety and Disease Prevention; b College of Water Resources and Architectural Engineering; c College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】The research was conducted to determine the flood season and main flood season properly, make sure of the base of hydrological safety and the prerequisite of water resource optimization dispatch. 【Method】With the 31 years daily flow data of Qianhe basin, the self-correlation coefficients of runoff in different time were calculated by correlation analysis. According to the self-correlation significant and the coefficient critical value table, the flood season and the main flood season were determined easily. According to the principle of hydrometeorology and weather in Northwest China, the flood season and main flood season results were confirmed. 【Result】The inquired time of flood season from May 21st to Oct. 10th was the same time of rain season of Northwest area and the inquired main flood season of Qianhe basin from July 1st to Aug. 31st was coincident with the concentrated raining period, in this way the results were reasonable. 【Conclusion】This method is simple and intuitive, its physical concept is clear. Furthermore, the division result provides reference for the safe operation of Fengjiashan reservoir of Qianhe basin and regulation decision of water resources.

**Key words:** correlation analysis; self-correlation coefficient; flood season division; main flood season

我国大部分地区的洪水主要由暴雨形成。在西北地区, 1977-07-05—1977-07-06 陕西延安地区暴雨

\* [收稿日期] 2009-09-07

[基金项目] 国家“863”高新技术研究与发展计划项目(2002AA62Z3191); 国家冻土工程重点实验室基金项目(9901)

[作者简介] 郭霞(1983—), 女, 湖北武穴人, 在读硕士, 主要从事工程应用数学研究。E-mail: guoxia110745@126.com.cn

[通信作者] 王正中(1963—), 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构及冻土本构研究。

E-mail: wangzz0910@yahoo.com.cn

成灾,造成当地百年未见的特大洪水;1981-08 陕、甘、川连续暴雨,造成历史上罕见的洪涝和泥石流灾害。但总体而言,暴雨对西北地区利大于弊。西北地区属于干旱、半干旱地区,有些最干旱的地方既无河流,地下水源又不足,往往要靠拦蓄暴雨洪水解决农田灌溉和生活用水需要。而暴雨大多数出现在副热带高压西北侧锋区降雨带中,这类暴雨区外围伴有大范围降雨区<sup>[1]</sup>,对解除西北地区农业干旱及水库蓄水和发电极为有利。另一方面,西北地区地处高原附近,坡地多,河床落差大。虽然西北的暴雨强度较弱,但是降雨形成的地表径流迅速向山谷汇集下泄,形成局地山洪,对水库大坝等拦洪建筑物亦可造成相当程度的危害。西北地区需要降雨但又担忧暴雨洪水带来的灾难,因此利用水库调蓄,在保证防洪安全的前提下最大限度地调蓄雨洪资源极为必要。传统的水库防洪调度运行方式,要求水库在整个汛期以较低的汛限水位迎汛,往往导致了众多水库汛期不敢蓄水,而汛期过后又无水可蓄,防洪与兴利之间矛盾尖锐,洪水资源不能有效利用。科学确定流域汛期,合理制定水库动态汛限水位<sup>[2]</sup>,使水库调度运行更符合流域洪水特性,是实现洪水资源利用、缓解水资源短缺矛盾的一个重要途径,而制定和调整分期汛限水位的前提条件,就是对水库控制流域的汛期进行科学合理地划分。

目前,汛期的划分方法主要有成因分析法<sup>[3]</sup>、数理统计法<sup>[4]</sup>、模糊集分析法<sup>[5]</sup>、分形法<sup>[6]</sup>、变点分析法<sup>[7]</sup>、模糊聚类法<sup>[8]</sup>和 Fisher 最优分割法<sup>[9]</sup>等。其中,成因分析法物理概念明确,但由于暴雨的成因错综复杂,导致汛期分期的工作难度较大。数理统计法简单明了,但对特性指标的选择带有主观性,影响了分期结果的客观性。模糊集分析法对各指标阈值的选取均存在一定的主观性,使得分期过程存在较大的任意性。分形法中样本固定值的选择带有不确定性。变点分析法需要严格的数学假定,变点个数的选取也存在一些主观性。模糊聚类法不能考虑指标在时间上的连续性,存在一定的局限性。Fisher 最优分割法抽象且计算量大,计算过程比较繁琐。因而亟待探索一种方法简便、概念清晰、适用范围广、分期结果准确的汛期分期方法。

相关分析在水文学、水文气象学中的应用十分广泛,但主要应用在水文计算、水文气象统计及其预测等方面<sup>[10-12]</sup>,目前尚没有将其应用于汛期划分研究的报道。本研究首次应用相关分析法进行汛期划分研究,采用千河流域 31 年日均流量资料,对径流

自相关性进行分析,对千河流域汛期及主汛期的划分进行研究,以期冯家山水库的安全运行及水资源的调度决策提供参考。

## 1 汛期划分的相关分析方法

### 1.1 相关分析

自然界中的许多现象之间存在着一定的联系,它们之间既不是函数关系,也不是完全无关。相关分析就是研究两个或多个随机变量之间的这种联系,给出两者或多者间相依程度的定量描述,建立一些合理的指标(如相关系数)来衡量变量之间关系的密切程度。如变量  $x$ 、 $y$  之间的关系愈密切,则两者的相关性越明显,即  $x$  的取值对  $y$  取值的影响愈大。

按照变量的时间、空间性划分,可将相关关系分为自相关和互相关。自相关分析是进行时间序列分析的有效方法,其简单易行、较为直观,如用于建立径流的自回归模型进行枯季径流预报<sup>[13]</sup>。

径流的形成是降雨开始到水流汇集至流域出口断面的物理过程。每次降雨结束时刻,一部分雨量正处于产流或汇流阶段,尚未形成河网断面径流。由于时间上的滞后性,径流的主要补给来源除了本期降雨外,还有前期径流。

### 1.2 相关系数及其检验

相关系数是相关分析中描述随机变量  $x$  与  $y$  间线性关系强弱程度的一个参数。其中,相关系数的计算公式为:

$$\rho(i) = [\text{cov}(X_i, X_{i-1})] / [\sigma(X_i) \cdot \sigma(X_{i-1})] \quad (1)$$

式中: $\rho(i)$  为  $X_i$  与  $X_{i-1}$  的相关系数; $X_i$  为第  $i$  个月(旬)的径流量系列; $X_{i-1}$  为第  $i-1$  个月(旬)的径流量系列; $\text{cov}(X_i, X_{i-1})$  为  $X_i$  系列与  $X_{i-1}$  系列的协方差; $\sigma(X_i)$ 、 $\sigma(X_{i-1})$  分别为  $X_i$  系列与  $X_{i-1}$  系列的标准差。

相关系数可通过查相关系数显著性临界值表进行检验。由自由度  $(n-2)$  及显著水平  $\alpha$ ,查表得临界值  $r_\alpha$ 。若  $|\rho(i)| \leq r_\alpha$ ,表明  $X_i$  与  $X_{i-1}$  的相关性在  $\alpha$  水平上不显著,其物理意义为第  $i$  个月(旬)与第  $i-1$  个月(旬)径流的主要补给来源不同,第  $i$  个月(旬)径流的主要补给来源为本期内的降雨;反之,若  $|\rho(i)| > r_\alpha$ ,表明第  $i$  个月(旬)与第  $i-1$  个月(旬)径流间的相关性在  $\alpha$  水平上显著,第  $i$  个月(旬)径流的主要补给来源为前期流域的蓄水。

### 1.3 汛期的定义

气象上定义的“汛期”为全年雨量最为集中且一年中降雨量最大的时期。在汛期,根据大气环流

特征和气候背景分析,又将雨量高度集中,大雨以上降雨出现概率最高的时期称为主汛期。我国大部分地区河川径流靠雨水补给,季节性变化剧烈,有明显的汛期和枯水期。汛期河水暴涨,容易泛滥成灾;枯水期水量很小,水源不足。

在汛期,降雨对径流具有决定性作用,是汛期径流的主要补给来源,径流与前期径流的相关关系不明显;在枯水期,枯水径流主要来自流域蓄水,与前期径流的相关关系较为显著。

本研究的主要目的是考察月(旬)径流与前一月(旬)径流的相关性,以及候径流与前一间隔候径流相关性的变化波动情况,因此研究的重点是不同时段径流间的简单自相关性。

## 2 千河流域的汛期划分

### 2.1 千河流域概况

千河是渭河左岸的一条主要支流,位于宝鸡市西北部,全长 152.6 km,流域总面积 3 493.9 km<sup>2</sup>。

千阳水文站为千河流域控制站,集水面积 2 935 km<sup>2</sup>。千阳站上游有一中型水库,即段家峡水库,上游支流上另有大沟、夜叉母、桐花庄、郝家坡、东河沟五个小(I)型水库。流域下游冯家山水库是关中最大的以农业灌溉、城市生活、工业供水为主,兼作防洪保安、发电养殖及向外灌区供水等综合利用的大(II)型水利工程,是宝鸡市重要的水源地。截止 2003 年底,冯家山水库累计向灌区供水 37 亿 m<sup>3</sup>,累计向宝鸡市区和宝鸡第二电厂供水 3.3 亿 m<sup>3</sup>,市区供水人口达 40 万人,灌溉农田 2 727 万 hm<sup>2</sup>,增产粮食 39.8 亿 kg。平均每年为下游渭河错峰 23 亿 m<sup>3</sup>,城市供水年产生效益 3.5 亿元,社会效益为 5.04 亿元,防洪减灾社会效益为 4.2 亿元<sup>[14]</sup>。

### 2.2 汛期划分

以千阳水文站 1971—2001 年的日均流量实测资料,分别计算各月(旬)径流与前月(旬)径流的自相关系数,所得结果如图 1,2 所示。

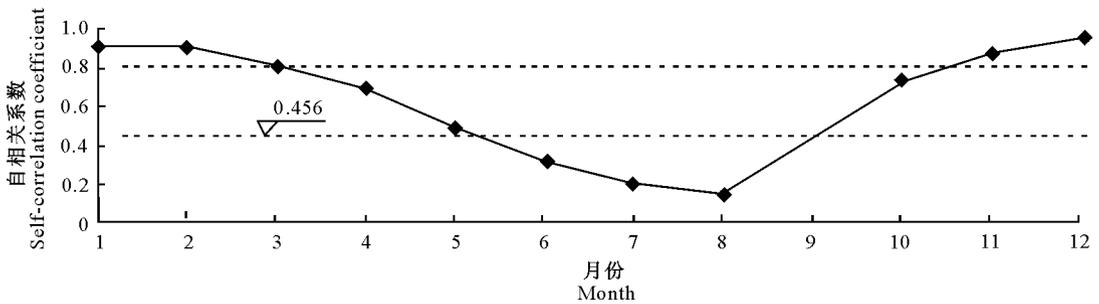


图 1 千河流域月径流自相关系数

Fig. 1 Self-correlation coefficient of Qianhe Basin's monthly runoff

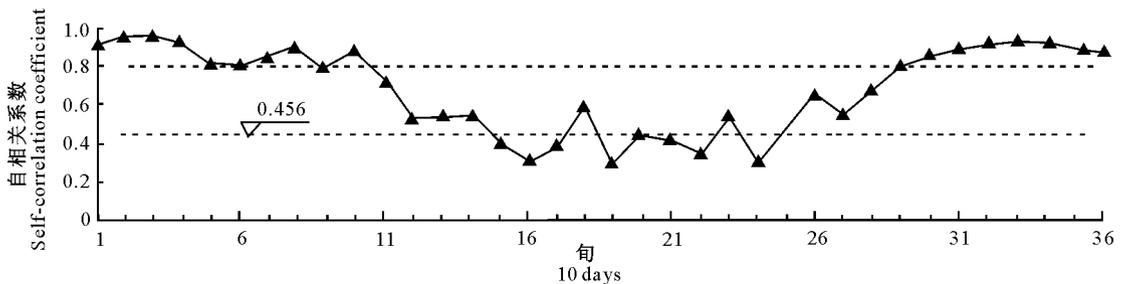


图 2 千河流域旬径流自相关系数

Fig. 2 Self-correlation coefficient of Qianhe Basin's 10 days' runoff

由图 1、2 可以看出,千河流域各月(旬)径流的自相关系数均为正值,各月(旬)径流与前月(旬)径流之间存在着正相关关系,这与流域径流的主要补给来源之一为前期径流是一致的。图中自相关系数大小不一,表明径流间相关程度不同,而降雨是导致自相关性不一致的主要因素。降雨量直接影响前月(旬)径流对此月(旬)径流的补给百分比,本期降雨

量增大,前月(旬)径流的补给百分比减小,其与当月(旬)径流间的密切程度减小,自相关系数减小;降雨量减小或为零时,前期径流的补给百分比增大,径流自相关系数增大。另外,各时期月径流自相关系数与旬径流自相关系数的大小一致,变化趋势亦基本相同。

由显著水平  $\alpha = 0.01$ ,查临界值表得  $r_{0.01} =$

0.456。由计算结果可以将千河流域全年,以日历年按旬划分为4个阶段:

(1) 10月中旬至翌年4月上旬为枯水期。第1—10旬和第29—36旬的旬径流自相关系数 $\rho > 0.8 > 0.456$ ,自相关性极显著。这个时期是河川径流的退水阶段,降水量很少,气温很低,伴有降雪,但未融化,径流的主要影响因素为前期径流。

(2) 4月中旬至5月中旬为枯水期转向汛期的汛前过渡期。第11—14旬的自相关系数大于临界值0.456,但小于0.8,且呈单调减小趋势,说明旬径流自相关性的显著性逐渐减小。4—5月正处于季节转换阶段,气温逐渐升高,河流冰层融化,且降水量慢慢增加,径流自相关性慢慢减小,径流主要补给来源仍为前期径流。

(3) 5月下旬至9月上旬为千河流域的汛期。第15—25旬的相关显著性变化波动较大,时而极显著,时而显著,时而不显著。相关系数在临界值0.456与0.6之间上下波动(图中呈锯齿状)。该阶段千河流域有大量的间断性降雨,地面较为潮湿,包气带很容易达到饱和状态,大量降雨直接形成地表径流。径流的主要影响因素为本期降雨,前期径流量的影响作用较小(千阳站上游段家峡中型水库的汛期调度对径流产生部分影响,使得9月份径流

的自相关系数及9月上旬的旬径流自相关系数表现异常,图中忽略此点)。

(4) 9月中旬至10月上旬为汛期转向枯水期的汛后过渡期。第26—28旬的相关系数大于临界值0.456但小于0.8。9月中旬至10月上旬正处于季节转换时期,气温逐渐降低,千河流域进入秋季少雨时期,降水量慢慢减少,其对千河径流的影响作用逐渐降低。

### 3 千河流域主汛期的确定

气候变化中存在着15d的时长韵律,我国人民结合天文、地理,在长期的生产实践中,将1年划分为24个节气。一般而言,大尺度的天气系统,时间长度为3~15d;一个连阴雨的天气过程,时间长度为3~5d<sup>[15]</sup>,15d的天气过程描述了1~2个长波过程或2~3个连阴雨天气,基本上能概括每年汛期最集中,即最大的2~3次降雨过程。

因此从气象学角度出发,联系15d的天气过程,为了确定更加精确的主汛期时间,以候(5~6d为1候)为基本分期单元,统计过渡期及汛期内每15d(3个候)径流相关性的变化波动,计算各候径流量与前一间隔候径流量间的相关系数,其结果见图3。

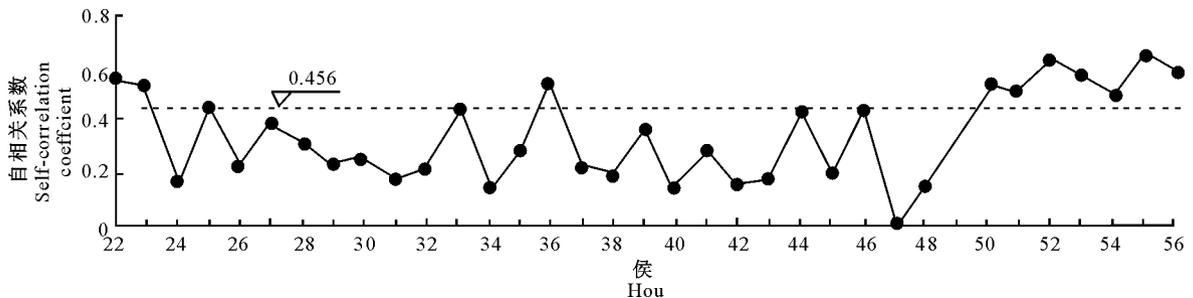


图3 千河流域候径流自相关系数

Fig. 3 Self-correlation coefficient of Qianhe Basin's 5 or 6 days' runoff

主汛期阶段的确定必须满足2个条件:一是大雨以上降雨出现概率高;二是雨量高度集中。同时要求相关系数小于临界值0.456,且满足时间上的连续性。由图3可知,满足条件的为第37—48候,由此确定千河流域主汛期为07-01—08-31。

《水利水电工程设计洪水计算规范》规定,洪水分期不宜太短,一般以不短于1个月为宜。汛期划分结果中,后汛期09-01—09-10仅为10d,因此将汛期到枯水期的后过渡期9月中旬至10月上旬归为后汛期。则整个后汛期为9月上旬至10月上旬。

综合以上分析,最终确定千河流域的枯水期为

10-11—04-10(翌年);汛前过渡期为04-11—05-20;前汛期为05-21—06-30;主汛期为07-01—08-31;后汛期为09-01—10-10。

### 4 讨论与分析

#### 4.1 汛期划分结果的合理性

副热带系统与西北地区降雨的关系非常密切<sup>[1]</sup>。6月中旬末到7月初,随着西太平洋副热带高压的第1次季节性北跃,西北地区东部雨量开始增加;7月上旬末随着副热带高压的第2次北跃,偏南气流再次加强向北发展,陕西、甘肃省区主要雨季

开始;7月底到8月上旬,副热带高压第3次北跃,相对较多的雨带推到甘肃;8月底到9月中旬,副热带高压南退,西北地区雨量渐减,多为秋季连阴雨。10月下旬以后冬季环流日盛,西北地区进入少雨季节。西北地区主要雨季与相关分析推求的千河流域汛期基本一致,表明本研究确定的汛期从5月下旬至10月上旬是合理的。

#### 4.2 主汛期划分结果的合理性

西北地区东部逐旬暴雨日数分布常出现3个峰值,这3个峰值期分别为5月中下旬、7月中下旬和8月中下旬<sup>[1]</sup>。7和8月的雨型多为冷锋雨和对流雨,降雨强度大、历时短、落区小,常常极易在小面积流域形成陡涨陡落的突发性洪水。考虑到西北地区处于我国干旱区域,5月中旬的降雨刚好湿润土壤而不会形成洪水。相关分析方法推求的汛期基本包括了3个峰值期,表明该结果是合理的;而主汛期包括了后2个暴雨峰值期,也说明了该分期结果的可靠性。

#### 4.3 相关分析与模糊统计方法分期结果的对比如

陈守煜等<sup>[16]</sup>用模糊试验方法统计了冯家山水库1970—1986年的降雨量,确定相对隶属度为1时的汛期为7月上旬至8月下旬。本方法通过研究千阳水文站径流量,确定千河主汛期为07-01—08-31,二者结果是一致的。

## 5 结 论

1)千河下游的大(Ⅱ)型水库——冯家山水库设计的主汛期为07-01—09-30,共92d,与千河流域实际降水的主要时段有明显差异。而基于相关分析方法得到的千河流域的汛期为5月下旬至10月上旬,与千河流域降雨集中期基本一致,主汛期为07-01—08-31,包含了西北地区东部后2个暴雨峰值期,结果具有合理性,对冯家山水库优化调度具有重要参考意义。

2)本研究应用的相关分析法方法简单,物理概念清晰,容易掌握。此方法不仅适用于千河流域的汛期划分,亦可为西北地区其他流域的汛期划分提供参考。

#### [参考文献]

- [1] 白肇焯. 中国西北天气 [M]. 北京:气象出版社,1988.  
Bai Z Y. Synoptic of northwest China [M]. Beijing: Meteorological Press, 1988. (in Chinese)
- [2] 李 玮,郭生练,刘 攀. 水库汛限水位确定方法评述与展望 [J]. 水力发电,2005,31(1):66-70.

- Li W, Guo S L, Liu P. Review and perspective of reservoir flood limit level determination methods [J]. Water Power, 2005, 31(1):66-70. (in Chinese)
- [3] 蒋云种,周惠成,王本德. 我国北方水库汛期描述的综合分析方法 [J]. 水电能源科学,1995,13(3):143-148.  
Jiang Y Z, Zhou H C, Wang B D. A synthetical method for describing flood season of reservoir in the northern basins in China [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1995, 13(3):143-148. (in Chinese)
- [4] 刘 明. 水库汛期描述及汛限水位确定方法研究与应用 [D]. 大连:大连理工大学,2001.  
Liu M. Study and application of description of reservoir's flood season and methods of definition of limiting level [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese)
- [5] 许士国,陈守煜. 水文分期描述的模糊统计方法 [J]. 大连理工大学学报,1990,30(5):585-590.  
Xu S G, Chen S Y. Fuzzy statistics method to describe hydrologic seasons [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1990, 30(5):585-590. (in Chinese)
- [6] 侯 玉,吴伯贤. 分形理论用于洪水分期的初步探讨 [J]. 水科学进展,1999,10(2):140-143.  
Hou Y, Wu B X. Preliminary study on the seasonal periods classification of floods by using fractal theory [J]. Advances in Water Science, 1999, 10(2):140-143. (in Chinese)
- [7] 刘 攀,郭生练. 三峡水库汛期分期的变点分析方法研究 [J]. 水文,2005,5(1):18-23.  
Liu P, Guo S L. Flood season staged for three Gorges Reservoir based on the change-point approach [J]. Hydrology, 2005, 5(1):18-23. (in Chinese)
- [8] 高 波,刘克琳,王银堂,等. 系统聚类法在水库汛期分期中的应用 [J]. 水利水电技术,2005,6(6):1-5.  
Gao B, Liu K L, Wang Y T, et al. Application of system clustering method to dividing flood season of reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 6(6):1-5. (in Chinese)
- [9] 丁元芳,高凤丽. Fisher最优分割法在星星哨水库汛期分期划分中的应用 [J]. 吉林水利,2006(11):4-6.  
Ding Y F, Gao F L. Application of Fisher-the optimal break up in the flood period divided of Xingxingshao Reservoir [J]. Jilin Water Resources, 2006(11):4-6. (in Chinese)
- [10] 欧阳如琳,程维明,王伟胜,等. 新疆阿克苏河流域径流预报方法研究 [J]. 中国科学(D辑:地球科学),2006,36(S2):15-23.  
Ouyang R L, Cheng W M, Wang W S, et al. Discharge forecasting method for Akesu river basin [J]. Science in China(Series D: Earth Sciences), 2006, 36(S2):15-23. (in Chinese)
- [11] 郑金陵,林镜榆. 水库水情的长期预报方法研究 [J]. 水科学进展,2004,15(5):665-668.  
Zheng J L, Lin J Y. Long-term prediction method for reservoirs water regime [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5):665-668. (in Chinese)