

Identification of Flood Seasonality for the Lechang Gorge Reservoir Basin

Yixuan Zhong¹, Kairong Lin^{1*}, Jun Li²

¹Department of Water Resource and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou

²Shaoguan Subdivision, Bureau of Hydrology of Guangdong Province, Shaoguan

Email: linkr@mail.sysu.edu.cn

Received: Jul. 9th, 2014; revised: Jul. 18th, 2014; accepted: Jul. 25th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The North River is the second largest drainage system of the Pearl River basin, and recently it has been suffering floods, which is a serious threat to public safety and property. Therefore, the construction of its upper reaches flood control system is of great significance. The Lechang Gorge Reservoir is main part of the upper reaches flood control system of the North River, which protects the security of Shaoguan and Lechang Cities in downstream area. At present, the reservoir uses static flood limited level for operation, which can't make full use of resources sufficiently. Reasonable identification of flood seasonality for the Lechang Gorge will promote the benefits of flood control and power generation. Based on discussing the advantages and disadvantages of each method and utilizing hydrological characteristic analysis method, vector statistic method, fuzzy analysis method and orderly cluster method, it was found that both the flood frequency and magnitude were large between early May and early July, and finally flood seasonality for the Lechang Gorge Reservoir was identified as three parts, namely pre-rainy flood season (March 1st-April 20th), major flood season (April 21st-July 10th) and after-rainy flood season (July 11th-September 30st).

Keywords

The North River, Flood Seasonality, Flood Control, Lechang Gorge

北江乐昌峡水库流域汛期分期研究

作者简介: 林凯荣(1980-), 男, 福建龙海人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究工作。
*通讯作者。

钟逸轩¹, 林凯荣^{1*}, 李俊²

¹中山大学水资源与环境系, 广州

²广东省水文局韶关分局, 韶关

Email: linkr@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2014年7月9日; 修回日期: 2014年7月18日; 录用日期: 2014年7月25日

摘要

北江是珠江流域第二大水系, 近年来流域洪水灾害频发, 对当地居民生命和财产安全造成了严重威胁, 因此其上游防洪体系建设对流域防洪至关重要。乐昌峡水利水电枢纽是北江上游防洪控制性工程, 承担着下游韶关市和乐昌市等地的防洪任务。目前水库采用固定汛限水位法进行调度, 无法充分发挥枢纽效益, 根据汛期水文规律合理地进行汛期分期能够显著提升枢纽的防洪效益和发电效益。本文在讨论各分期方法的优缺点的基础上, 综合运用水文特征值法、矢量统计法、模糊分析法、有序聚类法等计算乐昌峡水库流域汛期分期方案, 发现乐昌峡水库在5月初至7月初洪水发生频率和量级都比较大, 并最终得到分期结果为前汛期3月1日至4月20日; 主汛期4月21日至7月10日; 后汛期7月11日至9月30日。

关键词

北江, 汛期分期, 防洪, 乐昌峡

1. 引言

汛期是指流域内由于季节性降水集中, 或融冰、化雪导致河水在一年中显著上涨的时期, 具有确定性、随机性、模糊性、中介过渡性等特点[1]。正确掌握汛期的时间划分, 对于流域防洪工作的顺利开展十分重要。据《水利水电工程设计洪水计算规范 SL44-2006》[2], 当汛期洪水成因随气候变化特征显著时, 应根据水库调度需要, 分析计算分期设计洪水, 进行调洪。国内外学者针对汛期分期问题做了大量研究, 郭生练[1]等研究得到长江三峡水库的汛期可分为前汛期 6.1~6.30、主汛期 7.1~9.10 和后汛期 9.11~9.30, 并将其应用于三峡水库汛限水位动态控制技术, 能显著提高防洪和发电效益; 刘攀[3]等研究了变点分析法在隔河岩水库汛期分期的应用, 并认为概率变点法较均值变点法更加合理; 王志宗[4]等针对汛期分期问题高维度、难求解的特性, 通过改进模糊 C-均值聚类法, 建立了有效聚类模糊分析模型; 严培胜[5]等将集对分析应用在汛期分期上, 取得了较为理想的效果; 吴东峰[6]等改进了 Cunderlik[7] [8]于 2004 年提出的矢量分析法, 使统计点信息更加充分利用。

目前汛期分期的方法体系已较为完善, 主要分为两大类: 成因分析法和数理统计法[1]。然而, 各类方法都具有一定的优缺点, 尚未有一个公认的汛期分期方案[9]。因此, 最终分期方案常由多种方法得到的分期结果综合而来。

乐昌峡水利枢纽工程等别为 II 等大(2)型, 为季调节型水库, 以防洪为主, 结合发电, 兼顾航运和灌溉。枢纽防洪调度采用固定汛限水位法, 预期结合北江上游防洪体系, 能够使乐昌市防洪标准由目前的 10 年一遇提高到 50 年一遇, 使韶关市区防洪标准由 20 年一遇提高到 100 年一遇, 但此法不能充分利用洪水资源, 导致水库蓄满率较低, 发电效益无法完全发挥。乐昌峡水库汛期分期对于保障北江上游流域以及乐昌市的防洪安全以及提高枢纽的发电效益具有重要的研究意义, 本文旨在采用水文特征值法、矢量统计法、模糊分析法、有序聚类法, 综合分析得到乐昌峡水利枢纽流域汛期分期方案, 供枢纽制定调

度方案参考。

2. 研究流域概况

北江是珠江流域第二大水系，属亚热带季风性气候，流域内高温多雨，年均降雨量约 1800 mm，汛期 4~9 月占年降雨量的 80% 左右，多年平均径流量为 482 亿 m^3 ，水能资源蕴藏丰富。乐昌峡水利枢纽是北江上游防洪控制性工程，位于广东省韶关乐昌市境内，下距乐昌市 14 km，距韶关市 81.4 km，集雨面积 4988 km^2 ，控制武江流域面积的 70.3%，流域 DEM 图如图 1 所示。

乐昌峡水利枢纽各项主要防洪指标见表 1[10]。乐昌峡水库的调度目前采用固定汛限法，易导致汛末水库难以蓄满，汛期分期后，可在不降低防洪标准的条件下运用分期设计洪水及动态汛限水位调度技术对水库进行调度，显著提高枢纽的防洪兴利效益[1]。

本文所用资料主要有犁市(二)水文站 1956~2006 年日平均流量值序列，数据时间分辨率为 1 个/日；犁市(二)水文站 1955~2006 年汛期实测资料，数据时间为各年汛期时段，根据汛情加密测量；乐昌雨量站 1959~2009 年月降雨量累计序列，每年 12 个数据。所有数据都已通过三性审查，可直接用作分析。

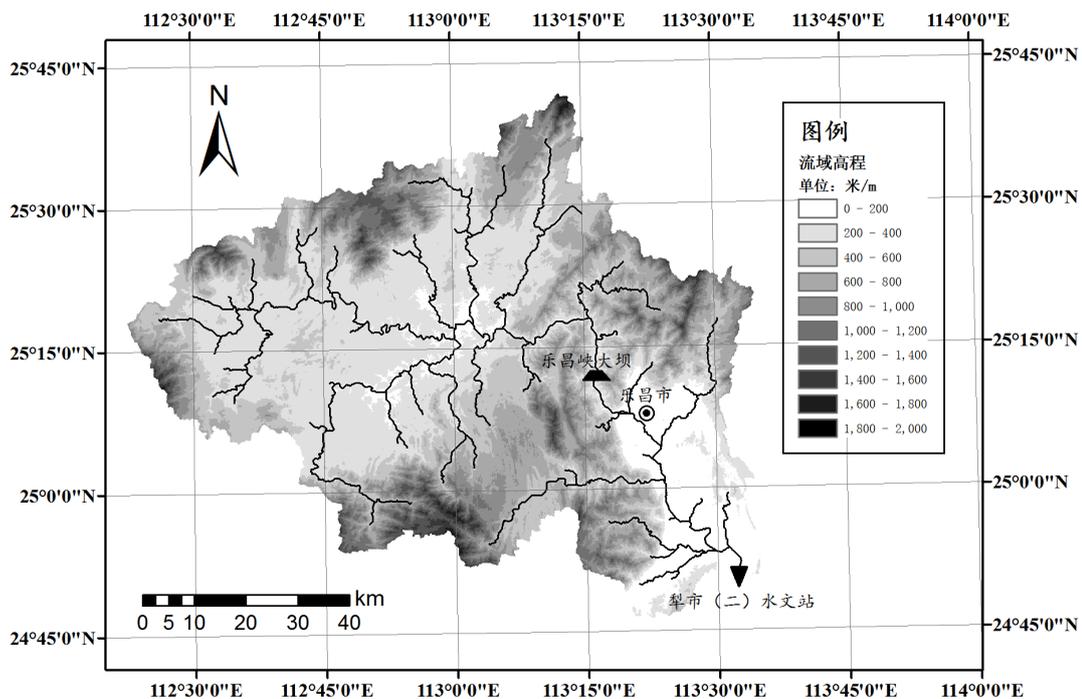


Figure 1. The map of Lechang Gorge Reservoir Basin
图 1. 乐昌峡水库流域图

Table 1. Major flood indexes of the Lechangxia Reservoir
表 1. 乐昌峡水利枢纽主要防洪指标

项目	指标值/m	项目	指标值/m	项目	指标值/亿 m^3
最大坝高	84.2	正常蓄水位	154.5	总库容	3.44
坝顶高程	164.2	汛限水位	144.5	防洪库容	2.11
坝顶长度	256	校核洪水位	163.0	调节库容	1.037
坝顶宽度	7	死水位	141.5	死库容	0.98

3. 汛期分期计算与分析

为确定研究流域的汛期时段, 综合考虑乐昌峡水库流域 1959~2009 年月均雨量占比及北江流域汛期 4~9 月的划分, 最终将乐昌峡流域汛期定为每年 3~9 月。根据多年平均降雨资料分析得到 3~9 月降水量占全年比重大于 80%。

现有的汛期分期方法较多, 主要有成因分析法、数理统计法、矢量统计法、模糊分析法、有序聚类法、变点分析法、圆形分布法、相对频率法等。不同的分期方法具有不同的优缺点, 方彬[11]等对此作了比较: 成因分析法具备较强的水文、气象分析基础, 但对于较大流域成灾天气组合众多, 工作量大, 且有一定的主观性; 数理统计法简便易行, 但临界值选取较为主观, 划分方案不精确; 模糊分析法考虑了汛期的时间模糊性, 但在选取分布函数和设定临界值时都要依靠经验, 且只适合划分出主汛期, 对多分期问题适用性不强; 有序聚类法具备较强数理统计基础, 也可考虑多项因子指标; 变点分析法分期结果可精确至日, 一定程度上更加客观、可靠, 但取样需要满足特定分布, 且所需雨洪数据序列较长; 圆形分布法同时考虑了洪水的发生时间和量级; 相对频率法简单易行, 结果直观, 但只能考虑单因素。由于目前汛期分期方法无公认的最优方案, 本文选用矢量统计法、模糊分析法、水文特征值法和有序聚类法对乐昌峡水库的汛期分期方案展开研究。

3.1. 矢量统计法

Cunderlik[7] [8]于 2004 年提出了用以解决汛期分期问题的矢量统计法, 其基本思路是利用矢量的方向性来进行汛期的季节性划分, 再根据统计得到的矢量间的相似程度判断分割点, 对研究流域进行汛期分期。

已知汛期总天数为 N , 以 D_i 表示汛期中第 i 日, 按照式(1)进行矢量化:

$$\theta_i = 2\pi \frac{D_i}{N} \quad (0 < \theta_i \leq 2\pi) \quad (1)$$

按照式(2)(3)推求汛期洪水的平均发生时间 M :

$$\bar{\theta} = \begin{cases} \arctan \bar{y}/\bar{x} & \bar{x} > 0, \bar{y} \geq 0 \\ 2\pi + \arctan \bar{y}/\bar{x} & \bar{x} > 0, \bar{y} < 0 \\ \pi + \arctan \bar{y}/\bar{x} & \bar{x} < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \bar{x} = 0, \bar{y} > 0 \\ \frac{3\pi}{2} & \bar{x} = 0, \bar{y} < 0 \\ \text{未定} & \bar{x} = 0, \bar{y} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$M = \bar{\theta} \frac{N}{2\pi} \quad (3)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos \theta_i$, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin \theta_i$, 分别表示平均时间矢量在 x 轴的方向值和在 y 轴的方向值。

平均矢量 \bar{r} 按式(4)计算:

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \quad (4)$$

当 \bar{r} 值接近 1 的时候, 表明样本各场洪水的矢量方向与平均矢量方向较为紧密, 当 \bar{r} 值接近 0 时, 则表明样本各场洪水发生时间的离散程度较大。

采用矢量统计法分析日均流量序列和汛期流量序列，其中样本洪水流量序列采用年最大值法取样，结果如图2所示。

根据点据的疏密程度，可以对汛期进行分期。图2(a)中，点据大致可分为三段，按照矢量分析法得到平均洪水发生日期为6月2日，汛期分界点分别为5月3日和7月4日，相应的汛期分期方案为：前汛期，3月1日至5月2日；主汛期5月3日至7月3日；后汛期7月4日至9月30日。图2(b)中的点据大致也可分为三段，计算结果表明，平均洪水发生日期为5月30日，汛期分界点分别为4月4日和7月1日，相应的汛期分期方案为：前汛期，3月1日至4月3日；主汛期4月4日至6月30日；后汛期7月1日至9月30日。

两套分期结果之间的区别主要在于前汛期与主汛期的分界点，由日均流量序列得出结果较汛期流量序列得出结果推迟约1个月。

3.2. 模糊分析法

模糊分析法[1]通过计算汛期隶属度 μ 进行汛期分期，具体分期方法如下：

- 1) 设定区分汛期与非汛期的流量阈值 QF ；
- 2) 由实测流量序列得到各年汛期区间；
- 3) 计算汛期内各日被各年汛期区间覆盖的次数 n_t ，则若资料总年数为 N ，那么计算得到日期 t 对应的汛期隶属度为：

$$\mu_t = \frac{n_t}{N} \quad (5)$$

- 4) 依据隶属度 μ 对汛期进行分期。选取临界隶属度 μ_0 ，将 $\mu > \mu_0$ 部分作为主汛期，其前后分别为前汛期和后汛期。

计算得到乐昌峡流域汛期各日隶属度曲线，如图3所示。

本文取多年日均径流量序列90%分位流量作为阈值，即 $P(Q \leq QF) = 90\%$ ；取隶属度阈值 $\mu_0 = 0.7$ 。结合图3隶属度曲线，按照模糊分析法判别步骤得到分期方案：3月1日至4月8日为前汛期；4月9日至6月25日为主汛期；6月26日至9月30日为后汛期。隶属度曲线大体呈现出三段较为平稳的形态，

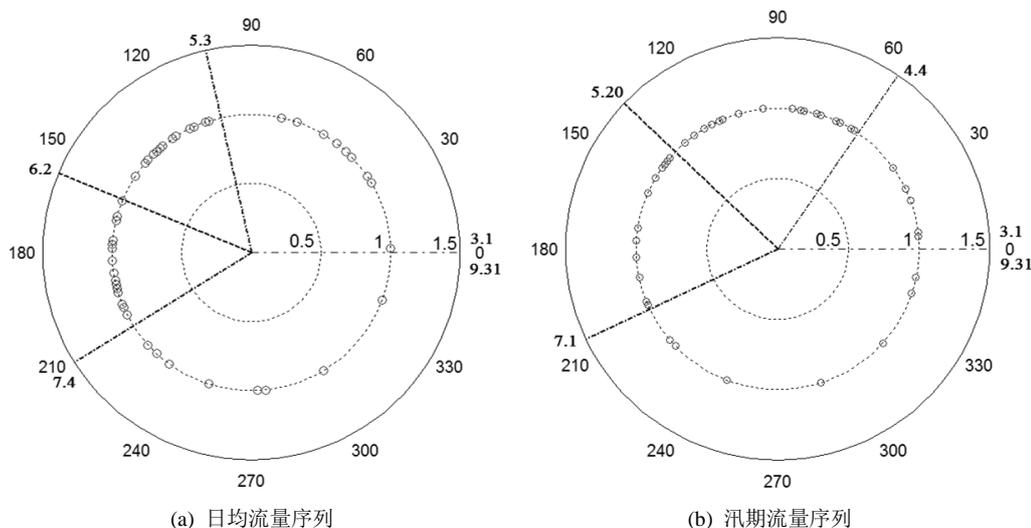


Figure 2. Flood season identification based on vector statistic method

图2. 矢量分析法分期结果

在各段之间有较为迅速的变化过程，表明将汛期划分为三段是合理的。

3.3. 水文特征值法

实践中，人们常常通过测量统计水文特征值对某区域的水文特征进行推测，据此也可对汛期进行分期[12]。常用的水文特征值有日均流量 $\overline{Q}_日$ 、洪峰流量 $\overline{Q}_峰$ 、流速 u 、水位 H 、降雨量 P 等。本文采用年最大值取样法得到犁市(二)年最大洪峰流量日期分布，如图4所示。该方法虽简单直观，但分期方案存在较大主观性。

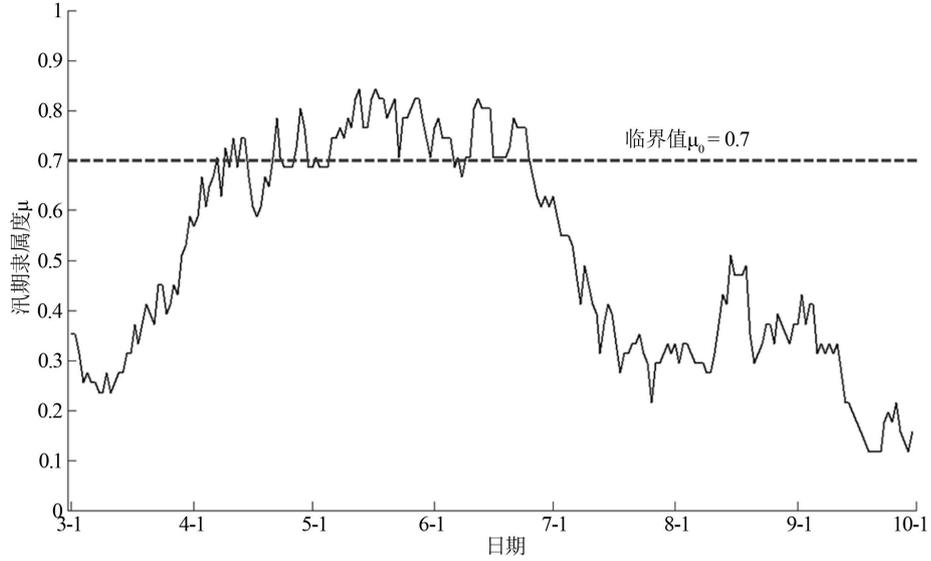


Figure 3. Flood season identification based on fuzzy analysis method

图3. 模糊分析法分期结果

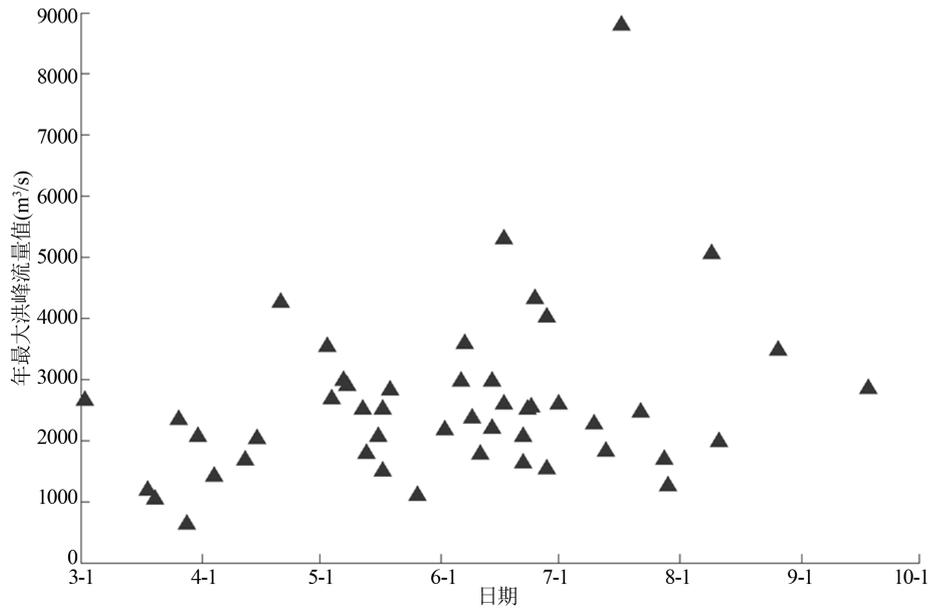


Figure 4. Flood season identification based on hydrological characteristic analysis method

图4. 水文特征值法分期结果

图 4 中散点的分布反映出以下规律:

- 1) 洪水频次和洪水量级的分布均呈现由弱变强, 再逐渐减弱的趋势;
- 2) 10 月之后基本无年最大洪水分布, 且两端洪水量级均较小, 说明乐昌峡汛期划分时段 3 月 1 日至 9 月 30 日是合理的;
- 3) 年最大洪峰点据较为集中在 4 月下旬至 7 月中旬, 可将此时段定为主汛期, 其前后分别为前汛期和后汛期。

3.4. 有序聚类法

聚类方法是对“物以类聚”思想的科学运用, 其目的是把分类对象按照一定规则划分成若干类, 这些类完全由数据特征确定, 而非事先给定。这种方法能够定量地反映样本数据的亲疏程度和相似性, 从而得到客观的分类结果[1]。

有序聚类法是聚类方法的一种, 其特点是分类时不能打乱时间序列的次序, 即通过推求最优分割点得到分类结果, 从而使得各类离差平方和之总和最小。

设有水文时间序列 X_n , 要将其分为 k 类, 即得到形如式(6)的结果:

$$\{\{X_{i_1}, X_{i_1+1}, \dots, X_{i_2-1}\}, \{X_{i_2}, X_{i_2+1}, \dots, X_{i_3-1}\}, \dots, \{X_{i_k}, X_{i_k+1}, \dots, X_n\}\} \quad (6)$$

对于第 j 类, 其离差平方和为:

$$S_j = \sum_{m=0}^{m=i_{j+1}-1} (X_{i_j+m} - \overline{X}_{i_j})^2 \quad (7)$$

式中: \overline{X}_{i_j} 表示第 j 类的均值, i_j 表示第 $j-1$ 类和第 j 类的分割点。

前已述及, 有序聚类的目标是使得各类离差平方和之总和最小, 因此目标函数为:

$$\min \sum_{j=1}^k S_j \quad (8)$$

汛期分期研究中, 采用流量值 Q 作为水文时间序列 X_n , 也可以加入其他变量如降雨量 P 、蒸发量 E 、温度 T 等进行多变量分析, 通过求解式(8)得到 i_j 值, 即可将汛期划分为式(6)中的 k 个分期。

本文选取乐昌峡流域汛期多年平均流量值序列, 运用有序聚类法得到图 5 分析结果。由图 5 可知, 乐昌峡汛期大致可分为三段, 其中前汛期、后汛期平均流量分别为 $179.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $194.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。而主汛期均流量为 $360.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 约为汛期其他时段均值的两倍, 变化十分明显。

有序聚类法具备较强的数理统计基础, 且可以定量给出最优分割点。根据分析结果, 将 3 月 1 日至 3 月 25 日定为前汛期, 3 月 26 日至 7 月 2 日定为主汛期, 7 月 3 日至 9 月 30 日定为后汛期。

3.5. 综合分析

运用不同方法得到乐昌峡流域汛期分期结果如表 2 所示。分析对比各方法得到的结果, 5 月初至 7 月初是乐昌峡流域易于出现较大汛情的时期, 洪水分布密集且洪量也较大。考虑各分期方法的特点以及保障安全和便利调度等因素, 最终对乐昌峡流域汛期作出划分: 3 月 1 日至 4 月 20 日为前汛期; 4 月 21 日至 7 月 10 日为主汛期; 7 月 11 日至 9 月 30 日为后汛期。

4. 结论

乐昌峡水库目前采用的固定汛限水位调度法不能有效地发挥水库效益和利用洪水资源。合理的汛期分期结果能够对水库实现动态汛限水位控制起到重要指导作用, 通过将汛期分期, 计算分期设计洪水, 水库能够更好地安排调度计划、合理利用洪水资源、有序组织防洪任务。本文运用水文特征值法、矢量

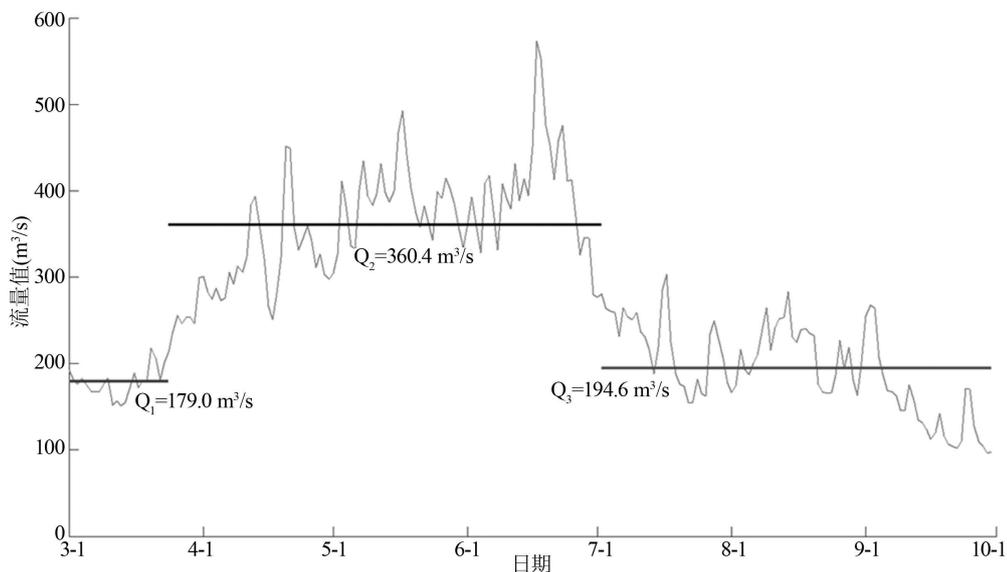


Figure 5. Flood season identification based on orderly cluster method

图 5. 有序聚类法分期结果

Table 2. Assemble of flood season identification results for the Lechang Gorge Reservoir Basin

表 2. 乐昌峡流域汛期分期结果汇总表

分期方法		前汛期	主汛期	后汛期
矢量统计法	日均值	3.1~5.2	5.3~7.3	7.4~9.30
	洪峰值	3.1~4.3	4.4~6.30	7.1~9.30
模糊分析法		3.1~4.8	4.9~6.25	6.26~9.30
水文特征值法		3.1~4.30	5.1~7.15	7.16~9.30
有序聚类法		3.1~3.25	3.26~7.2	7.3~9.30

统计法、模糊分析法、有序聚类法对北江乐昌峡水库流域汛期分期进行了研究，结果表明：

1) 不同分期方法结果基本一致，在目前无公认最优分期方案的情况下，应结合各方法本身存在的利弊，综合进行结果分析。

2) 乐昌峡水库流域汛期存在较为显著的分期现象，其主汛期日均流量约为汛期其余时段日均流量的两倍，分期效果明显。

3) 根据不同分期结果，并考虑安全和实际工作安排等因素，综合判定乐昌峡水库流域的汛期分期结果：3月1日至4月20日为前汛期；4月21日至7月10日为主汛期；7月11日至9月30日为后汛期。

需要说明的是，目前汛期分期无公认最优方案的原因之一是缺乏对分期结果合理性进行检验的手段。郭生练[1]等通过引入模糊优属度函数，改进 Cunderlik[7]于 2004 年提出的检验特定流域洪水是否具有季节性变化规律的方法并将其应用于分期结果和理性检验，取得了一定的效果。此外，由于汛期分期问题属于高维度时间序列的分割问题，其求解十分复杂，也使得不能采用单一方法得出结论[4]。相关问题仍有待进一步研究。

致 谢

本文获得国家自然科学基金面上项目(51379223)资助，在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 郭生练, 李响, 刘心愿, 等. 三峡水库汛限水位动态控制关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
GUO Shengliang, LI Xiang, LIU Xinyuan, et al. Study on key technique of dynamic control of flood limited water level in Three Gorges Reservoir. Beijing: China Water Power Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范 SL 44-2006[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
Ministry of Water Resources. Design flood calculation regulating for water resources and hydropower engineering. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 刘攀, 郭生练, 李玮, 等. 变点分析方法在隔河岩水库汛期分期中的应用[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(1): 8-11.
LIU Pan, GUO Shenglian, LI Wei, et al. Application of changing-point method for flood season stage in Geheyan Reservoir. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(1): 8-11. (in Chinese)
- [4] 王志宗, 王银堂, 胡四一. 水库控制流域汛期分期的有效聚类分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 580-585.
WANG Zongzhi, WANG Yintang and HU Siyi. Effective fuzzy cluster method for dividing reservoir flood season. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 580-585. (in Chinese)
- [5] 严培胜, 王先甲, 孙志禹. 集对分析在三峡水库汛期分期中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(3): 310-313.
YAN Peisheng, WANG Xianjia and SUN Zhiyu. Application of set pair analysis theory to stage analysis of flood seasons in Three Gorges Reservoir. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(3): 310-313. (in Chinese)
- [6] 吴东峰, 何新林, 付杨, 等. 改进矢量统计法在汛期分期中应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(5): 28-30.
WU Dongfeng, HE Xinlin, FU Yang, et al. Application research of the improved vector statistical method into the flood season division. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2007, 18(5): 28-30. (in Chinese)
- [7] CUNDERLIK, J. M., OUARDA, T. B. M. J. and BOBÉE, B. On the objective identification of flood seasons. Water Resources Research, 2004, 40(1): 1-12.
- [8] CUNDERLIK, J. M., OUARDA, T. B. M. J. and BOBÉE, B. Determination of flood seasonality from hydrological records. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49(3): 511-526.
- [9] 蒋海艳, 莫崇勋, 韦逗逗, 等. 水库汛期分期研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 75-80.
JIANG Haiyan, MO Chongxun, WEI Doudou, et al. Review of reservoir flood season staging. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 75-80. (in Chinese)
- [10] 黄家宝. 乐昌峡水利枢纽工程总控管理模式建立与应用[J]. 中国水利, 2011, 10: 33-34.
HUANG Jiabao. Establishment and application of general control management method for Lechang Gorge Water Control Project. China Water Resources, 2011, 10: 33-34. (in Chinese)
- [11] 方彬, 郭生练, 刘攀, 等. 分期设计洪水研究进展和评价[J]. 水力发电, 2007, 33(7): 71-75.
FANG Bin, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Advance and assessment of seasonal design flood methods. Water Power, 2007, 33(7): 71-75. (in Chinese)
- [12] 李妍清, 郭生练, 周研来, 等. 汉江安康水库流域汛期分期研究[J]. 水资源研究, 2013, 2: 64-69.
LI Yanqing, GUO Shenglian, ZHOU Yanlai, et al. Identification of flood seasonality for the Ankang Reservoir Basin. Journal of Water Resource Research, 2013, 2: 64-69. (in Chinese)