

Correlation Analysis of Summer and Autumn Floods for Danjiangkou Reservoir

Yao Hu, Shenglian Guo, Zhangjun Liu, Xingjun Hong

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University,
Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Security, Wuhan
Email: 1182872483@qq.com

Received: Dec. 12th, 2013; revised: Jan. 16th, 2014; accepted: Feb. 10th, 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

Correlation rules of summer and autumn floods can provide a scientific basis for the autumn flood prevention and impoundment of Danjiangkou Reservoir, and are conducive for the reservoir's flood control, water supply, power generation and other utilization efficiency. The optimized Copula function was used to establish the joint distribution of summer and autumn flood peaks and maximum 7-day flood volume respectively for Danjiangkou reservoir. The distributions of conditional probability during autumn flood season were derived and analyzed when the flood peak and maximum 7-day flood volume during summer flood season occur with different grades. Analysis results show that there are certain regularities between the summer and autumn floods of Danjiangkou reservoir basin. When small flood flow occurs during the maximum 7-day flood volume in summer flood season, the probability that less than 20-year-frequency flood occurs during the maximum 7-day flood volume in autumn flood season is 95.3%, while the probability that less than 50-year-frequency flood occurs is 98.1%.

Keywords

Seasonal Flood, Correlation Analysis, Joint Distribution, Copula Functions, Conditional Probability

丹江口水库夏秋汛洪水相关性规律研究

胡 瑶, 郭生练, 刘章君, 洪兴骏

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

作者简介: 胡瑶, 女, 硕士研究生, 研究方向为水文统计。

Email: 1182872483@qq.com

收稿日期: 2013年12月12日; 修回日期: 2014年1月16日; 录用日期: 2014年2月10日

摘 要

研究丹江口水库夏汛期洪水和秋汛期洪水的相关性规律, 可以为丹江口水库秋汛期防洪和提前蓄水提供科学依据, 有利于充分发挥水库的防洪、供水与发电等综合利用效益。利用优选的Copula函数建立丹江口水库的夏秋汛洪峰和最大7日洪量的联合分布, 并进行条件概率分析, 得出当夏汛期洪峰和最大7日洪量发生不同等级的洪水时, 秋汛期的条件概率和洪水等级的分布。分析结果表明: 丹江口水库夏秋汛洪水的实测资料具有一定的相关性规律。当夏汛期最大7日洪量发生小洪水时, 秋汛期最大7日洪量发生小于二十年一遇的洪水概率为95.3%, 发生小于五十年一遇的洪水概率为98.1%。

关键词

汛期洪水, 相关性分析, 联合分布, Copula函数, 条件概率

1. 引言

丹江口水库是位于汉江流域中上游的一座综合性大型水利枢纽, 是南水北调中线工程的水源地, 也是治理开发汉江的关键性工程, 具有防洪、供水、发电灌溉等多种功能。如何协调水库防洪安全与供水兴利之间的关系是管理者面临的一个重要任务。通过水文气象预测预报等先进技术, 实施汛限运行水位动态控制和提前蓄水等措施, 是目前提高水库洪水资源利用效率的主要非工程措施之一[1]。

汛末提前蓄水的开始时间和蓄水方式的选择, 是蓄水调度决策者最为关心的两个方面, 同时也是水库蓄水策略研究的热点。现有的研究成果试图建立适应于所有来水情景下的蓄水调度规则、调度图或调度函数[2], 没能利用蓄水开始前已有的水情信息, 视来水情况灵活地制定提前蓄水方案。由于秋汛期是水库调度的关键时期, 在确保防洪安全的前提下, 还要尽可能地抓住时机蓄水, 以保证枯水时期供水。因此, 秋汛期的提前蓄水对水库的科学调度有着十分重要的意义[3]。本文对丹江口水库的夏汛期与秋汛期洪水的相关性进行研究, 利用Copula函数建立联合分布, 分析夏汛期不同的来水情况下, 秋汛期发生洪水的条件概率, 为水库提前蓄水提供科学依据, 在确保防洪安全的前提下, 充分发挥水库的供水、发电等综合利用效益。

2. 基于联合分布的相关性分析

选择丹江口水库 1954 年~2011 年的日流量系列和流域气象水文资料为实验数据, 采用天气系统成因分析[4]、数理统计分析[5]、矢量统计和变点分析[6]等方法, 研究确定丹江口水库的汛期分期方式: 将汛期划分为夏汛期(6.21~8.20)、过渡期(8.21~8.31)、秋汛期(9.1~10.10)三个分期, 鉴于过渡期内仅在 1956 年 8 月 23 日、1993 年 8 月 27 日、1976 年 8 月 28 日发生了三场较小洪水, 同时按照习惯且保证设计洪水取样, 将丹江口水库的夏汛期与过渡期合并, 将 6 月 21 日至 8 月 31 日作为夏汛期样本。分别统计夏汛期、秋汛期内最大洪峰流量, 得到夏秋汛洪峰流量和夏秋汛最大 7 日洪量实测值, 并进行相关性分析。

2.1. 零相关检验

衡量事物之间或变量之间线性相关程度的强弱, 并用适当的统计指标表示出来, 这个过程就是相关

分析[7]。一般,如果两个随机变量的线性相关系数越高,则相关系数的绝对值会越大;反之,则相关系数的绝对值越小。但是,有时即使两个随机变量的不相关,甚至相互独立,由于抽样的随机性仍有可能有较大的样本相关系数。因此常常有必要对相关系数是否为零进行检验,这种检验称为零相关检验[8]。

将夏秋汛洪峰流量和夏秋汛最大 7 日洪量分别组成联合观测序列,采用 Pearson 方法计算相关系数 r [9]。采用零相关检验分析其相关性及相关程度。即提出原假设, H_0 : 相关性为零; H_1 : 相关性不为零。计算统计量 r_α 的公式如下:

$$r_\alpha = \frac{t_{\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{n-2+t_{\frac{\alpha}{2}}^2}} \quad (1)$$

式中: n 为样本数。取 $\alpha = 0.1$, 查询 t 分布表得 $t_{\alpha/2} = 1.672$, 代入式(1), 算出 $r_\alpha = 0.218$ 。若当统计量 r 的绝对值大于临界值 r_α 时, 则拒绝原假设, 说明两个变量间相关性不为零; 当统计量 r 的绝对值小于临界值 r_α 时, 则接受原假设, 说明两个变量间相关性为零。

夏秋汛洪峰流量和夏秋汛最大 7 日洪量的 Pearson 相关性系数分别为 0.37 和 0.40, 均通过零相关检验, 说明二者具有相关性, 故选择其构建联合分布是合理的。

2.2. 边缘分布的确定

根据丹江口水库汛期分期结果, 采用《水利水电工程设计洪水计算规范》[10]方法, 推求夏汛期和秋汛期的分期设计洪水。采用传统的矩法, 计算不同分期各时段年最大序列的 P-III 型分布参数, 作为初始值, 通过目估适线法确定参数, 结果见表 1。

2.3. 联合分布的建立

Copula 函数是定义域为 $[0,1]$, 均匀分布的多维联合分布函数[11]。由 Sklar 定理, 设 X 、 Y 为连续的随机变量, 边缘分布函数分别为 F_X 和 F_Y , $F(x,y)$ 为变量 X 和 Y 的联合分布函数, 则存在唯一的函数 $C_\theta(u,v)$ 使得:

$$F(x,y) = C_\theta(F_X(x), F_Y(y)), \forall x,y \quad (2)$$

式中: u 和 v 为随机变量的边缘分布函数; θ 为 Copula 函数的参数, 可由其与 Kendall 秩相关系数的关系求得。

在水文分析计算中, 常用的 Copula 函数有 Gumbel-Hougaard、Clayton 和 Frank[12]。为选择最合适的 Copula 函数, 采用离差平方和最小准则(OLS)来评价 Copula 方法的有效性, 并选取 OLS 最小的 Copula 作为联结函数[12]。OLS 的计算公式如下:

Table 1. The estimated parameters of P-III distribution for summer and autumn flood peak and maximum 7-day flood volume
表 1. 夏秋汛洪峰和最大 7 日洪量系列的 P-III 型分布参数估计值

变量名称	参数		
	x	Cv	Cv/Cs
Q_m 夏 (m^3/s)	11224	0.75	2.2
Q_m 秋 (m^3/s)	9215	0.88	2
W_7 夏 (m^3)	34	0.65	2.5
W_7 秋 (m^3)	33	0.79	2

$$OLS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Pe_i - P_i)^2} \quad (3)$$

式中: n 为样本数; Pe_i , P_i 分别为经验频率和理论频率。

OLS 的计算结果如表 2 所示, 从表 2 可以看出, OLS 值最小的 Copula 函数为 Clayton 函数, 因此本文选取 Clayton Copula 作为联结函数。

计算夏秋汛洪峰和最大 7 日洪量联合观测值的经验分布值与理论分布值, 点绘其经验分布值与理论分布值, 得到图 1(a)和图 2(a), 其线性相关系数分别为 0.9954 和 0.9758, 说明其经验分布和理论分布吻

Table 2. The optimized results of Copula functions

表 2. Copula 函数优选结果

参数值		Copula 函数	Clayton	Frank	Gumbel-Hougaard
Q_m	θ		0.58	2.1	1.29
	OLS 值		0.031	0.035	0.039
W_7	θ		0.53	1.96	1.27
	OLS 值		0.041	0.043	0.046

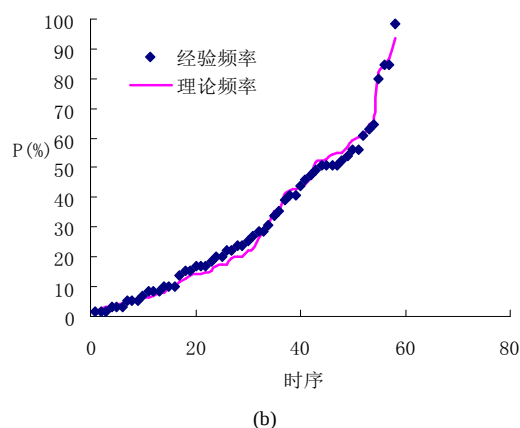
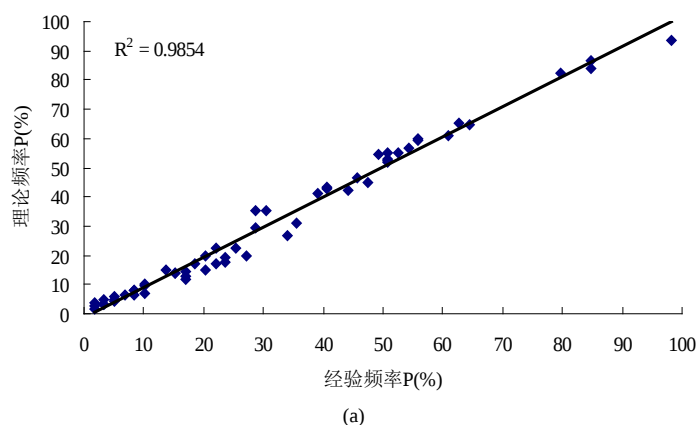


Figure 1. (a) The correlation of empirical and theoretical distribution of peak floods; (b) The plots of empirical and theoretical distribution of peak floods

图 1. (a) 洪峰经验分布与理论分布的相关图; (b) 洪峰经验分布与理论分布的拟合情况

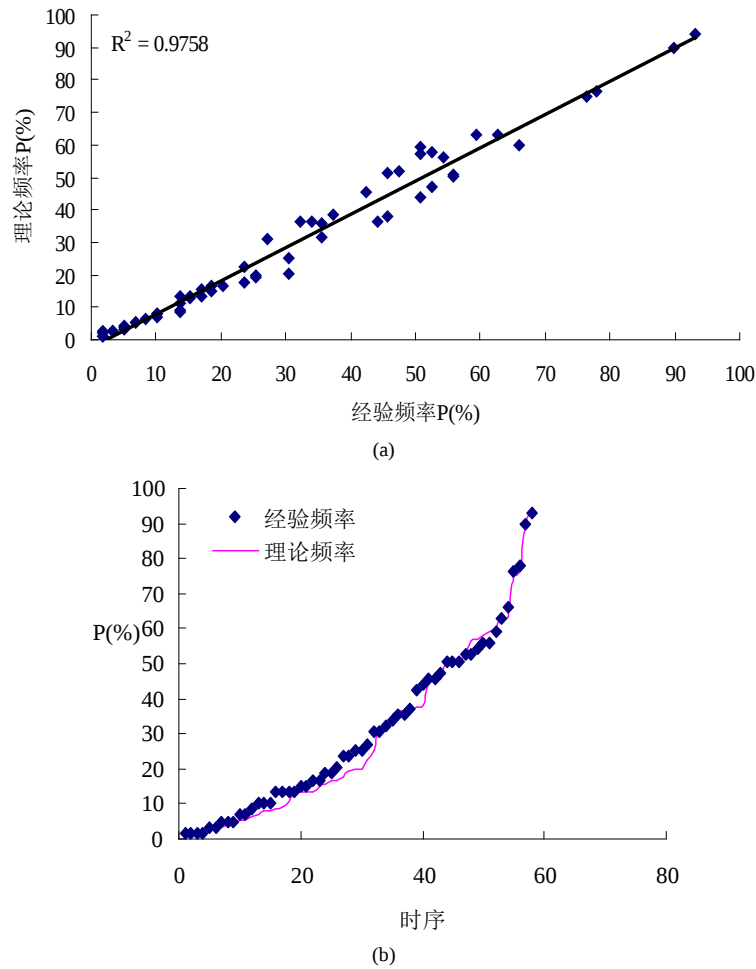


Figure 2. (a) The correlation of empirical and theoretical distribution of maximum 7-day flood volume; (b) The plots of empirical and theoretical distribution of maximum 7-day flood volume
图 2. (a) 最大 7 日洪量经验分布与理论分布的相关图; (b) 最大 7 日洪量经验分布与理论分布的拟合情况

合的很好。图 1(b)和图 2(b)以另外一种形式对联合观测变量的经验联合分布和理论联合分布进行了对比，图中的序号是根据联合观测值的理论分布进行升序排序后的序号。图 1 和图 2 表明，所建立的夏秋汛洪峰和最大 7 日洪量的联合分布是合理可行的。

采用 Clayton Copula 函数来构造夏汛期洪峰 X 和秋汛期洪峰 Y 的联合分布，夏汛期洪峰 X 和秋汛期洪峰 Y 的联合分布图如图 3(a)所示，联合分布的等值线图如图 3(b)所示。

采用 Clayton Copula 函数来构造夏汛期最大 7 日洪量 X 和秋汛期最大 7 日洪量 Y 的联合分布，夏汛期最大 7 日洪量 X 和秋汛期最大 7 日洪量 Y 的联合分布图如图 4(a)所示，联合分的等值线图如图 4(b)所示。

3. 条件概率分析

根据《水文情报预报规范》的相关规定[13]，洪水量级的划分如下：1) 水文要素重现期小于 5 年的洪水，为小洪水；2) 水文要素重现期大于等于 5 年，小于 20 年的洪水，为中等洪水；3) 水文要素重现期为大于等于 20 年，小于 50 年的洪水，为大洪水；4) 水文要素重现期大于 50 年的洪水，为特大洪水。

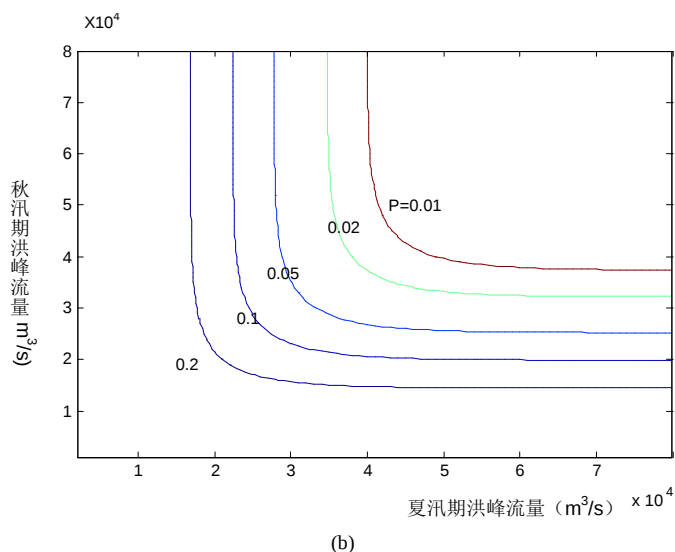
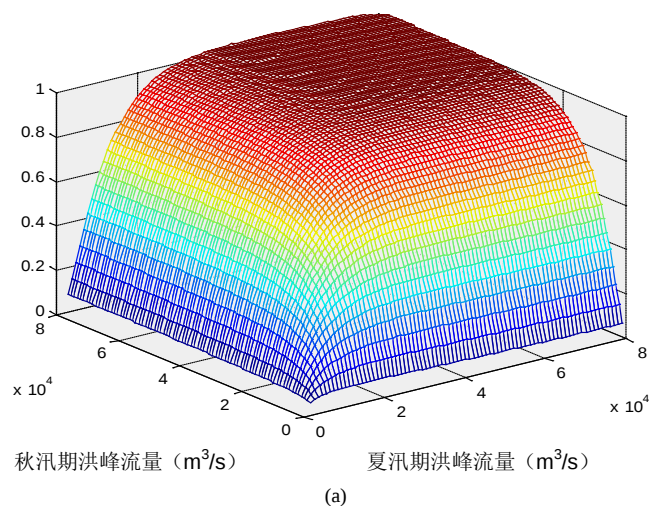


Figure 3. (a) Joint distribution of peak floods during summer and autumn seasons; (b) Contours of peak floods during summer and autumn seasons

图 3. (a) 夏秋汛期洪峰联合分布图; (b) 夏秋汛期洪峰联合分布等值线图

为了分析的方便起见，我们把特大洪水并入大洪水进行统计。

当已知夏汛期洪峰、最大 7 日洪量分别发生小水，中等洪水及大洪水，即当给定夏汛期洪峰、最大 7 日洪量 $X \leq x_k$ 、 $x_k < X < x_f$ 及 $X \geq x_f$ 时秋汛期洪峰、最大 7 日洪量 Y_i 的条件概率分布分别为：

$$F_{Y_i|X_k}(X, Y_i) = P(Y_i \leq y | X \leq x_k) = \frac{F(x_k, y)}{F_X(x_k)} \quad (4)$$

$$F_{Y_i|X_p}(X, Y_i) = P(Y_i \leq y | x_k \leq X \leq x_f) = \frac{F(x_f, y) - F(x_k, y)}{F_X(x_f) - F_X(x_k)} \quad (5)$$

$$F_{Y_i|X_f}(X, Y_i) = P(Y_i \leq y | X \geq x_f) = \frac{F_Y(y) - F(x_f, y)}{1 - F_X(x_f)} \quad (6)$$

得到秋汛期洪峰、最大7日洪量的条件概率分布图如图5所示，概率分布表如表3、4所示。

由表3可知，当夏汛期洪峰发生小洪水时，秋汛期洪峰发生小于五年一遇的洪水概率为82.1%，发生小于二十年一遇的洪水概率为95.6%，发生小于五十年一遇的洪水概率为98.2%，也即当夏汛期洪峰发

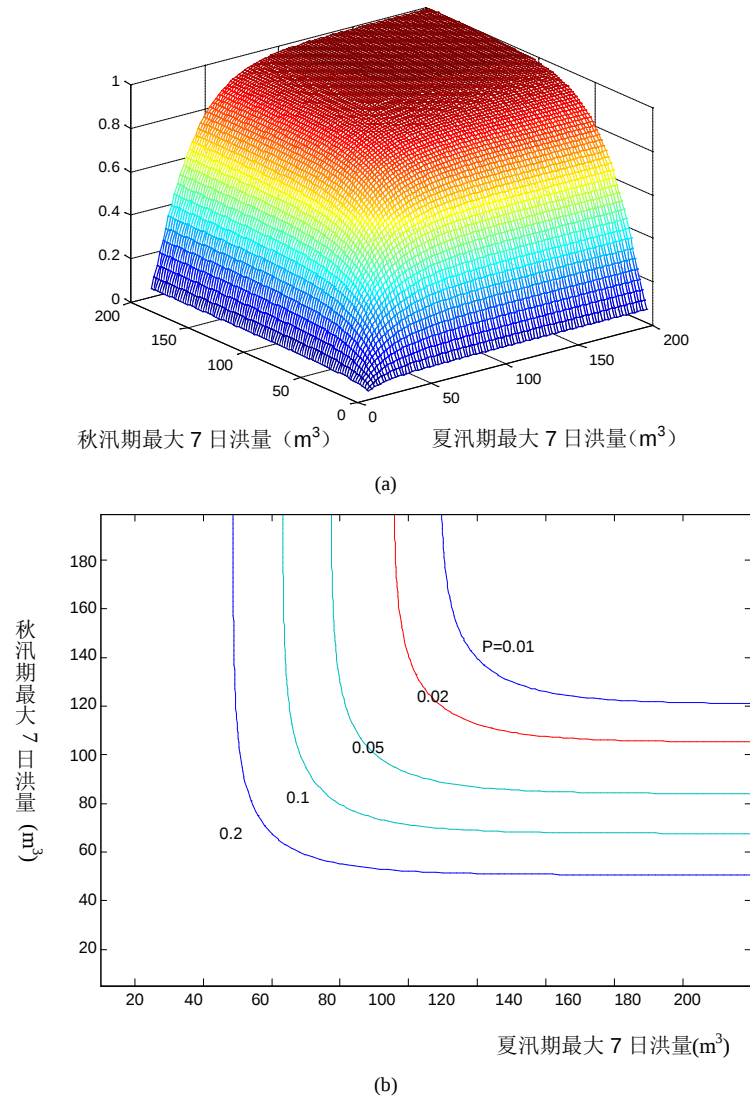


Figure 4. (a) Joint distribution of maximum 7-day flood volumes during summer and autumn seasons; (b) Contours of maximum 7-day flood volume during summer and autumn seasons
图 4. (a) 夏秋汛期最大 7 日洪量联合分布图; (b) 夏秋汛期最大 7 日联合分布等值线图

Table 3. Conditional probability distribution of autumn peak flood
表 3. 秋汛期洪峰的条件概率分布表

夏汛期等级	秋汛期条件概率				
	<20%	<10%	<5%	<2%	<1%
小洪水	82.1%	91.1%	95.6%	98.2%	99.1%
中等洪水	72.1%	85.7%	92.8%	97.1%	98.5%
大洪水	70.7%	84.9%	92.3%	96.9%	98.4%

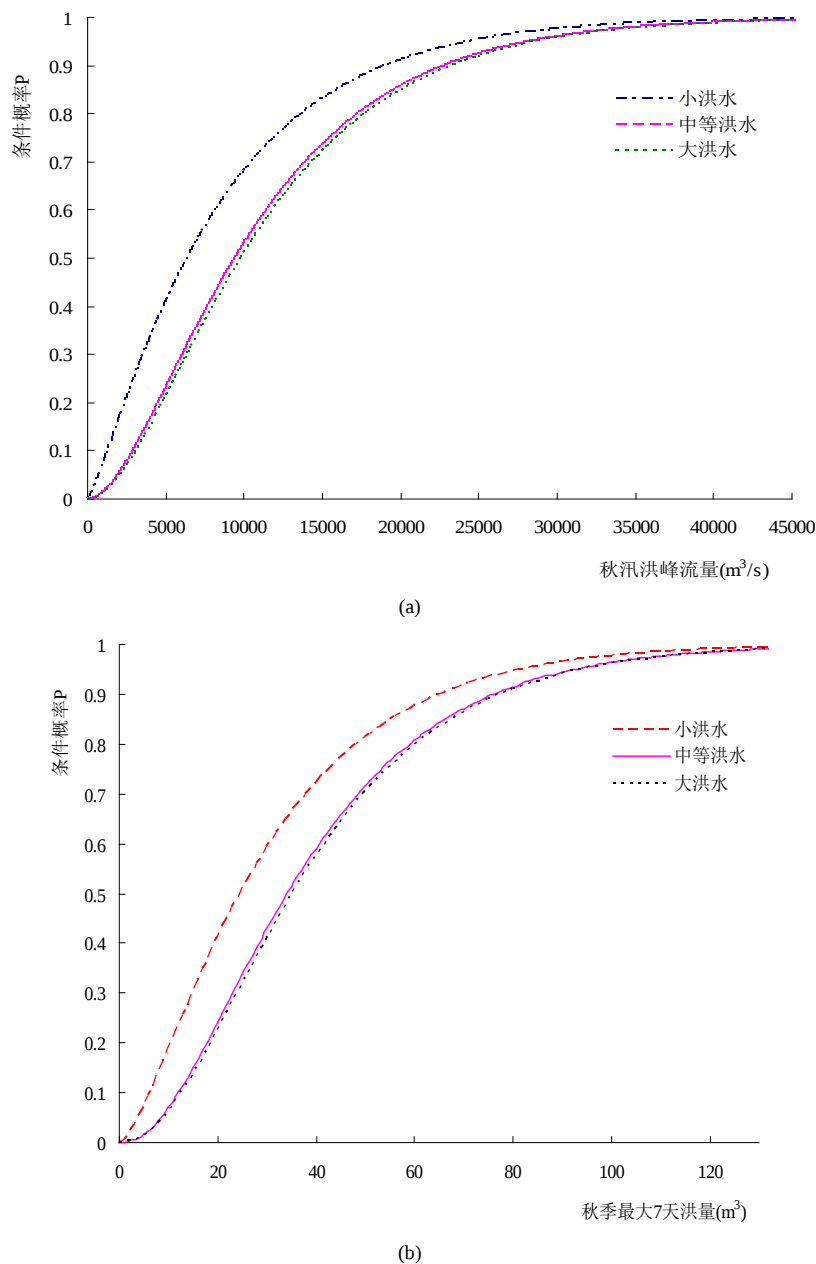


Figure 5. Conditional probability distribution of autumn flood peak when summer flood occur a specific magnitude, (a) flood peak; (b) maximum 7 days' flood volume
图 5. 夏汛期洪水发生特定量级洪水时秋汛期洪峰的条件概率分布, (a) 洪峰; (b) 最大 7 日洪量

Table 4. Conditional probability distribution of autumn maximum 7-day flood volume						
表 4. 秋汛期最大 7 日洪量的条件概率分布表						
夏汛期 7d 洪量等级	秋汛期条件概率	<20%	<10%	<5%	<2%	<1%
小洪水		81.4%	90.8%	95.3%	98.1%	99.1%
中等洪水		71.7%	85.5%	92.5%	97.0%	98.5%
大洪水		70.4%	84.7%	92.1%	96.8%	98.4%

生小洪水时, 秋汛期洪峰发生小洪水的概率较大, 发生中等洪水和大洪水的概率很小。当夏汛期洪峰发生洪水的量级越大, 秋汛期发生大洪水的概率越大。

由表 4 可知, 当夏汛期最大 7 日洪量发生小洪水时, 秋汛期最大 7 日洪量发生小于五年一遇的洪水概率为 81.4%, 发生小于二十年一遇的洪水概率为 95.3%, 发生小于五十年一遇的洪水概率为 98.1%, 也即当夏汛期最大 7 日洪量发生小洪水时, 秋汛期最大 7 日洪量发生小洪水的概率较大, 发生中等洪水和大洪水的概率很小。当夏汛期洪峰发生洪水的量级越大, 秋汛期发生大洪水的概率越大。

4. 结论

本文分别对夏秋汛洪峰和最大 7 日洪量实测资料进行分析, 并建立夏秋汛洪峰联合分布进行条件概率分析。由条件概率分析可知: 当夏汛期洪峰发生小洪水时, 秋汛期洪峰发生小于五年一遇的洪水概率为 82.1%, 发生小于二十年一遇的洪水概率为 95.6%, 发生小于五十年一遇的洪水概率为 98.2%, 也即当夏汛期洪峰发生小洪水时, 秋汛期洪峰发生小洪水的概率较大, 发生中等洪水和大洪水的概率很小。当夏汛期洪峰发生洪水的量级越大, 秋汛期发生大洪水的概率越大; 当夏汛期最大 7 日洪量发生小洪水时, 秋汛期最大 7 日洪量发生小于五年一遇的洪水概率为 81.4%, 发生小于二十年一遇的洪水概率为 95.3%, 发生小于五十年一遇的洪水概率为 98.1%。

参考文献 (References)

- [1] 张莉莉, 许继军, 霍军军, 陈进. 丹江口水库汛限水位分期控制初步探讨[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(3): 13-16. ZHANG Lili, XU Jijun, HUO Junjun and CHEN Jin. Study on stage flood control water level of Danjiangkou Reservoir. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(3): 13-16. (in Chinese)
- [2] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 三峡水库动态汛限水位与蓄水时机选定的优化设计[J]. 水利学报, 2004, 7: 86-91. LIU Pan, GUO Shenglian, WANG Caijun, et al. Optimization of limited water level in flood season and impounding scheme for reservoir in Three Gorges Project. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 7: 86-91. (in Chinese)
- [3] 金炎平, 赵文焕. 丹江口水库秋汛期水文气象要素变化规律的初步分析[J]. 水利水电快报, 2004, 25(10): 22-24. JIN Yanping, ZHAO Wenhuan. A preliminary analysis of Danjiangkou Reservoir autumn flood season variation of hydrological and meteorological factors. Express Water Resources & Hydropower Information, 2004, 25(10): 22-24. (in Chinese)
- [4] 史良如, 陈继东. 利用水文气象和统计规律对海河流域中南部水库汛期控制运用的研究[J]. 水文, 1996, 16(6): 52-56. SHI Liangru, CHEN Jidong. Study on reservoir control flood season in south-central of Haihe River Basin using Hydrometeorology and statistical laws. Hydrology, 1996, 16(6): 52-56. (in Chinese)
- [5] 冯尚友, 余数秋. 丹江口水库汛期划分的研究和实践效果[J]. 水利水电技术, 1982, 2: 56-61. FENG Shangyou, YU Fuqiu. I apply the autumn. The research and practice effect of flood season division for Danjiangkou Reservoir. Water Resources and Hydropower Engineering, 1982, 2: 56-61. (in Chinese)
- [6] 李妍清, 郭生练, 周研来. 汉江安康水库流域汛期分期研究[J]. 水资源研究, 2013, 2(1): 64-69. LI Yanqing, GUO Shenglian and ZHOU Yanlai. Identification of flood season for Ankang Reservoir in the Hanjiang Basin. Journal of Water Resources Research, 2013, 2(1): 64-69. (in Chinese)
- [7] 王文圣, 李跃清, 金菊良. 基于集对原理的水文相关分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(2): 1-5. WANG Wensheng, LI Yueqing and JIN Juliang. Relation analysis of hydrological variables based on set pair principle. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(2): 1-5. (in Chinese)
- [8] 黄振平. 水文统计学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2003. HUANG Zhenping. Hydrological statistics. Nanjing: Hohai University Press, 2003. (in Chinese)
- [9] Xiong, L. H., Guo, S. L. Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49(1): 99-112.
- [10] 水利部. 水利水电工程水文计算规范 SL278—2002[S]. 北京: 水利水电出版社, 2002. The Ministry of Water Resources of People's Republic of China. Standard for hydrological information and hydrological forecasting (SL278—2002). Beijing: Hydropower and Electrical Press, 2002. (in Chinese)
- [11] 肖义, 郭生练, 熊立华. 一种新的洪水过程随机模拟方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(2): 55-60.

- XIAO Yi, GUO Shenglian and XIONG Lihua. A new random simulation method for constructing synthetic flood hydrographs. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, 39(2): 55-60. (in Chinese)
- [12] NELSON, R. B. An introduction to Copulas. New York: Springer, 2006.
- [13] 水利部. 水文情报预报规范(GB/T22482-2008)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Ministry of Water Resources. Hydrology information forecast specification (GB/T22482-2008). Beijing: China Standards Press, 2009. (in Chinese)