DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241079

清河干流与碾盘河洪水遭遇规律分析

王大双

(辽宁省水利水电勘测设计研究院有限责任公司,辽宁 沈阳 110006)

摘要:干支流洪水叠加加剧了下游河道的防洪形势,分析洪水遭遇情况有利于加强洪水管理,优化水库洪水调度,保障下游防洪安全。目前,清河流域研究洪水遭遇问题所采用的分析方法,对稀遇洪水遭遇风险的定量估算具有局限性,缺乏对清河流域洪水规律更全面的认识。对此,采用统计分析和基于Copula函数定量分析的方法对清河干流与碾盘河洪水组成和遭遇情况进行分析。结果表明,清河与碾盘河年最大洪水遭遇概率较高,主要集中在7、8月份,且两河发生洪水量级具有正相关;两河发生年最大24 h洪水过程遭遇概率较年最大洪峰和3 d洪水过程遭遇概率更高,但两河同时发生大量级洪水的可能性极低,两河同时发生100年一遇年最大洪峰和年最大24 h、3 d洪水过程的遭遇概率分别为0.222%、0.255%、0.085%。

关键词:洪水遭遇;分析;Copula函数;清河干流;碾盘河

中图分类号:TV122 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)04-0022-04

1 概况

清河是辽河左岸一级支流,发源于辽宁省清原县英额门镇转湘湖村。碾盘河是清河右岸的主要支流,发源于辽宁省西丰县和隆满族乡万和村,流经西丰县、开原市,在开原市八棵树镇前耿王庄村汇入清河。清河干流上建有清河水库,是辽河流域大型综合利用水利枢纽工程,为辽河流域防洪安全提供了重要保障。清河干流和碾盘河上分别设有八棵树水文站和耿王庄水文站,其中八棵树站至清河和碾盘河汇流处河流长度10.4 km,耿王庄站至两河交汇处河流长度为4.2 km,两河汇流处至清河水库无较大支流汇入。研究区基本情况见图1。分析洪水遭遇组合能够揭示流域洪水遭遇中洪峰、洪量等洪水要素的变化规律,对防洪风险分析和洪水管理具有重要意义。洪水遭遇事件具有多个特征属性,可采用多变量联合分布函数科学全面分析洪水特征属性的发生频率。Copula函数能够灵活构建多变量联合概率分布,是描述变量间相关关系的有效工具。近年来Copula函数在构造洪水洪峰、洪量的联合分布方面应用广泛,例如陈璐等[1]通过建立长江上游多站点Copula联合模型描述了主站与从站日流量的时空关系,验证了Copula函数相比主站法得到

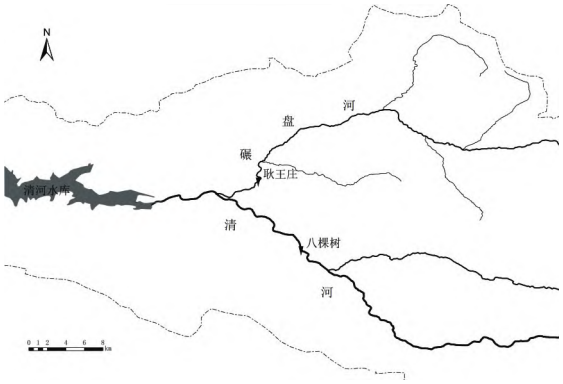


图1 研究区域示意图

Fig. 1 Study area diagram

的结果更接近于实测特征值;李继清等[2]采用Copula函数分别构建了川江干支流最大洪水的发生时间和量级的联合分布,分析了川江洪水遭遇发生时间和量级的规律。目前清河流域洪水问题仍采用传统的分析方法[3],对稀遇洪水遭遇风险的定量估算具有局限性。清河流域洪水多由雨量大、强度高、面积广的暴雨产生,清河干流与碾盘河洪水遭遇易形成峰高量大的组合洪水,使清河水库面临较大的防洪压力。本文采用统计分析及Copula函数研究清河干流与碾盘河洪水遭遇情况,以期提高对清河流域的洪水规律的认识,为清河水库的防洪调度提供理论参考和决策支持。

2 数据与方法

收稿日期:2024-06-12,**修回日期**:2024-07-18

作者简介:王大双(1997-),男,硕士、工程师,研究方向为为水资源系统分析与管理,E-mail:845936838@qq.com

中国知网 https://www.cnki.net

2.1　研究数据

以两河汇流前的干支流断面进行洪水遭遇分析。使用的资料系列是碾盘河汇入前的清河干流断面和碾盘河河口处断面的 1966～2021 年的洪水系列,其洪水系列是根据八棵树水文站和耿王庄水文站 1966～2021 年共 56 年实测资料,采用水文比拟法推求得到。考虑到清河属山区性河流,洪水陡涨陡落,一次洪水主要集中在 3 d,使用年最大选样法得到各断面年最大洪峰流量和年最大 24 h、3 d 洪量。

2.2　研究方法

构建联合分布模型首先要确定特征变量的边缘分布,将皮尔逊Ⅲ型分布作为洪水量级的边缘分布函数[4],采用定义区间在[0,1]均匀分布的 Copula 函数[5]作为洪水遭遇的联合分布函数。Copula 函数二维表现形式为:

$$H(x,y)=C(u,v) \tag{1}$$

式中,H 为边缘分布为 F 与 G 的联合分布函数;x、y 为具有相关性的随机变量;C 为 Copula 函数;u、v 均为边缘分布函数。

洪水变量关系普遍存在正相关,由适用变量正相关情况的 Archimedean Copula 函数来构建联合分布函数,选用常用于洪水遭遇分析的对称型 Clayton Copula、Frank Copula、非对称型 Gumbel Copula 三种不同形式的 Archimedean Copula 函数对两河洪水遭遇情况进行联合分布计算,其具体形式参见文献[6]。

选用离差平方和准则法(OLS)、均方根误差(RMSE)、信息准则法(AIC)进行多方面评价,评价结果越小说明函数拟合效果越好,根据最小准则[7]选择最优函数。

Copula 函数能够表示出给定条件下的概率。当变量同时达到特定值时事件发生的概率即为同现概率,两变量同现概率为:

$$P(X>x,Y>y)=1-u-v+C(u,v) \tag{2}$$

给定 $X>x$ 时 $Y>y$ 的条件概率公式为:

$$P(X>x\mid Y>y)=\frac{1-u-v+C(u,v)}{1-u} \tag{3}$$

3　结果与分析

3.1　相关性检验

分别采用 Pearson 线性相关系数、Kendall 相关系数和 Spearman 相关系数法,在显著性水平为 0.01 时,对碾盘河汇入前干支流断面的年最大洪峰和最大 24 h、3 d 洪量的相关性进行分析,得到两断面洪水参数相关性见表 1。由表 1 可知,碾盘河汇入前干支流断面的年最大洪峰和年最大 24 h、3 d 洪量在各相关性分析方法得到的检验结果均具有显著的正相关性,能够采用 Copula 函数构建联合分布函数。

表 1　干支流断面洪水相关性计算结果

Tab. 1　Flood correlation calculation results of mainstream and tributary sections

断面名称	分析方法	相关系数		
		洪峰	24 h 洪量	3 d 洪量
清河和碾盘河断面	Pearson	0.818	0.719	0.848
	Kendall	0.593	0.625	0.647
	Spearman	0.774	0.809	0.832

3.2　洪水遭遇规律分析

根据八棵树和耿王庄水文站 1966～2021 年实测洪水资料,考虑两水文站距河口距离相近,洪水传播时间基本一致,因此认为干支流洪水过程的洪峰同日出现,即为洪峰遭遇;最大 24 h、3 d 洪水过程若超过 1/2 时间重叠,即为洪水过程遭遇。由此得出清河上游碾盘河汇入前断面和支流碾盘河河口断面历年年最大流量各月出现频次见表 2。由表 2 可知,清河与碾盘河洪水多发生在夏季,其中又多集中于 7、8 两月,两月洪水量占系列的 70%以上。

表 2　清河和碾盘河历年最大流量出现频次表

Tab. 2　Frequency table of maximum flow in Qinghe River and Nianpan River over the years

月份	不同河流洪水次数		不同河流洪水频次/%	
	清河	碾盘河	清河	碾盘河
3	2	3	3.1	4.7
5		1		1.5
6	5	4	7.9	6.3
7	18	21	28.5	33.3
8	28	24	44.4	38.0
9	2	2	3.1	3.1
10	1	1	1.5	1.5

统计 1966～2021 年清河与碾盘河洪水过程遭遇次数和概率见表 3,以年最大洪峰遭遇情况为例,两河汇流处断面洪峰流量见图 2。由表 3 可知,两河年最大洪水遭遇概率达到 40%以上,其中 3 d 洪水过程遭遇概率较高,达到 50%,可见清河与碾盘河年最大洪水遭遇重现期达到两年一遇。

表 3　清河和碾盘河历年洪水遭遇频次

Tab. 3　Flood encounter frequency of Qinghe River and Nianpan River over the years

项目	洪峰情况		年最大 24 h 洪水情况		年最大 3 d 洪水情况	
	次数	频率/%	次数	频率/%	次数	频率/%
清河与碾盘河	25	45	23	41	28	50

中国知网　https://www.cnki.net

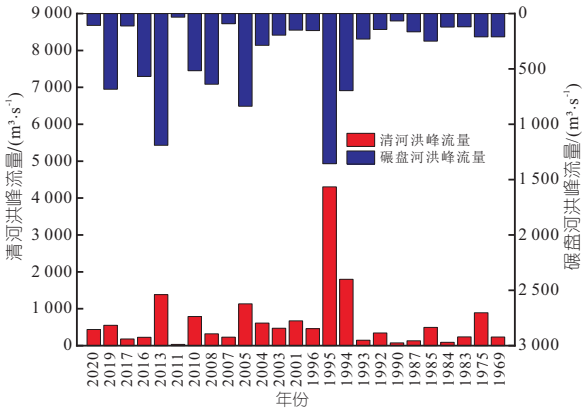


图 2 清河与碾盘河年最大洪峰遭遇情况

Fig. 2 Annual maximum flood peak encounter of Qinghe River and Nianpan River

3.3 洪水遭遇定量分析

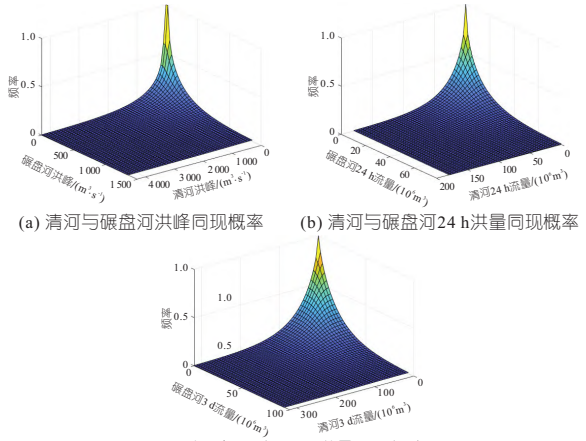
采用 P-Ⅲ型分布构建洪水边缘分布，清河断面和碾盘河断面 P-Ⅲ型分布函数的统计参数见表 4。选取二维阿基米德 Copula 函数中的 Clayton Copula、Frank Copula、Gumbel Copula 对两站进行联合分布计算。根据 OLS、RMSE、以及 AIC 最小准则，选择 Gumbel Copula 函数作为洪峰、24 h 洪量的联合分布函数，选择 Frank Copula 函数作为 3 d 洪量的联合分布函数，拟合得到的洪峰、24 h 洪量、3 d 洪量分布函数参数 θ 分别为 0.593、0.625、0.646，由此得到清河干流与碾盘河洪水遭遇的同现概率见图3，给定洪水组合下的同现概率见表 5～7。在碾盘河发生指定洪水前提下清河干流发生洪水的条件概率见图 4。

表 4 清河和碾盘河 P-Ⅲ型分布参数

Tab. 3 P-Ⅲ distribution parameters of Qinghe River and Nianpan River

参数	清河			碾盘河		
	洪峰	24 h 洪量	3 d 洪量	洪峰	24 h 洪量	3 d 洪量
均值	373.00	21.10	44.00	211.00	10.90	17.90
C_V	1.72	1.39	1.22	1.33	1.38	1.13
C_S	4.29	2.77	2.45	3.34	2.76	2.27

注：洪峰单位为 m^3/s，24 h 洪量、3 d 洪量单位均为 $10^6 m^3$。



(a) 清河与碾盘河洪峰同现概率　(b) 清河与碾盘河24 h洪量同现概率

(c) 清河与碾盘河3 d洪量同现概率

图 3 清河与碾盘河洪水遭遇同现概率分布图

Fig. 3 Probability distribution diagram of flood encounter co-occurrence probability of Qinghe River and Nianpan River

表 5 清河和碾盘河洪峰组合下的同现概率

Tab. 5 The probability of co-occurrence under the combination of Qinghe River and Nianpan River flood peaks %

概率/%		碾盘河洪峰流量设计值(重现期)					
		2 040 (500)	1 660 (200)	1 380 (100)	1 110 (50)	768 (20)	526 (10)
清河洪峰流量设计值(重现期)	5 050(500)	0.026	0.047	0.068	0.095	0.134	0.161
	3 990(200)	0.047	0.0889	0.138	0.201	0.304	0.382
	3 220(100)	0.068	0.138	0.222	0.344	0.552	0.723
	2 490(50)	0.095	0.201	0.344	0.559	0.968	1.334
	1 580(20)	0.134	0.3042	0.552	0.968	1.883	2.855
	978(10)	0.161	0.382	0.723	1.338	2.856	4.721

注：洪峰流量设计值单位为 m^3/s；重现期单位为 a。

表 6 清河和碾盘河 24 h 洪量组合下的同现概率

Tab. 6 Co-occurrence probability of 24 h flood volume combination of Qinghe River and Nianpan River %

概率/%		碾盘河 24 h 洪量设计值(重现期)					
		111 (500)	89.8 (200)	74.4 (100)	59.5 (50)	40.7 (20)	27.5 (10)
清河 24 h 洪量设计值(重现期)	215(500)	0.032	0.055	0.079	0.107	0.145	0.170
	174(200)	0.055	0.104	0.159	0.228	0.333	0.406
	144(100)	0.079	0.159	0.255	0.388	0.606	0.772
	115(50)	0.107	0.228	0.388	0.626	1.063	1.434
	78.8(20)	0.145	0.333	0.606	1.063	2.055	3.069
	53.2(10)	0.170	0.406	0.772	1.434	3.069	5.049

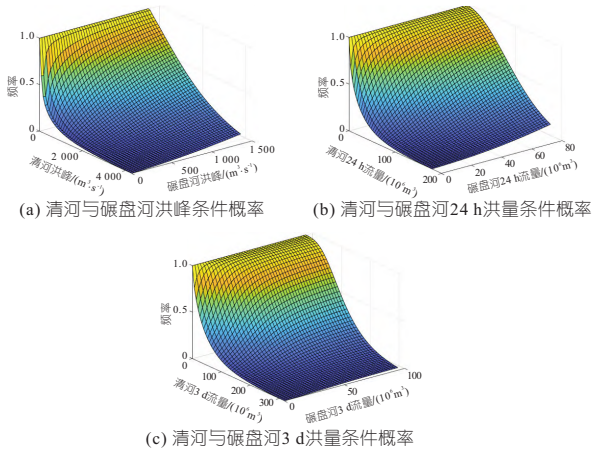
注：洪峰流量设计值单位为 m^3/s；重现期单位为 a。

表 7 清河与碾盘河 3 d 洪量组合下的同现概率

Tab. 7 Co-occurrence probability of Qinghe River and Nianpan River under 3-day flood volume combination %

概率/%		碾盘河 3 d 洪量设计值(重现期)					
		140 (500)	116 (200)	98.5 (100)	81 (50)	58.5 (20)	42.3 (10)
清河 3 d 洪量设计值(重现期)	381(500)	0.004	0.009	0.018	0.034	0.074	0.120
	313(200)	0.009	0.022	0.044	0.083	0.183	0.300
	263(100)	0.018	0.044	0.085	0.164	0.362	0.595
	214(50)	0.034	0.083	0.164	0.315	0.702	1.167
	152(20)	0.074	0.183	0.362	0.702	1.602	2.745
	107(10)	0.121	0.3	0.595	1.167	2.745	4.914

注：注：洪峰流量设计值单位为 m^3/s；重现期单位为 a。



(a) 清河与碾盘河洪峰条件概率　(b) 清河与碾盘河24 h洪量条件概率

(c) 清河与碾盘河3 d洪量条件概率

图 4 清河与碾盘河洪水遭遇条件概率分布图

Fig. 4 Probability distribution diagram of flood encounter conditional probaility of Qinghe River and Nianpan River

中国知网 https://www.cnki.net

通过同现概率分布图和条件概率分布图可以看出,两河洪水特征变量量级与发生概率呈负相关,洪水特征变量随着变量量级的增加,其发生概率逐渐减小。

由同现概率表可以看出,清河与碾盘河发生洪水遭遇时,年最大 24 h 洪水过程相比洪峰和 3 d 洪水过程遭遇概率更高;当两河同时发生 10 年一遇洪水时 3 d 洪水过程遭遇概率大于洪峰遭遇概率;当两河发生洪水量级大于 10 年一遇时,两河洪峰遭遇概率相比 3 d 洪水过程遭遇概率更大。两河发生大设计值的最大 3 d 洪水过程概率极低,如两河同时达到 100 年一遇的概率为 0.085%,相应重现期为 1 000 年一遇;同时达到 500 年一遇的概率为 0.004%,相应重现期为 25 000 年一遇。

由条件概率分布图可以得到类似的规律,清河洪水发生概率随碾盘河洪水特征量级的增大而增大;当碾盘河产生较大洪水时,清河产生相同重现期年最大 24 h 洪量相比洪峰、3 d 洪量更易产生。如当碾盘河分别发生 10、50、100 年一遇年最大 24 h 洪水过程,清河达到 50 年一遇年最大 24 h 洪水过程的概率分别为 14.34%、31.3%、38.8%;当碾盘河发生洪水特征变量均为 100 年一遇时,清河年最大洪峰、24 h 洪量和 3 d 洪量发生 100 年一遇的概率分别为 22.2%、25.5%、8.5%。当清河发生较大洪水时碾盘河所发生洪水概率的规律与之相似。

4　结论

a. 清河、碾盘河洪水主要发生在 7、8 月,占系列的 70%以上,但 3、10 月均有年最大流量发生的情况,因此清河水库还应注意春汛和秋汛的防洪管理。

b. 清河流域属山区性河流,洪水陡涨陡落,受降水影响明显,使得清河与碾盘河洪水具有一定的同步性,年最大洪水特征变量产生遭遇概率较高,达到 40%以上。同时在发生洪水遭遇时,两河最大 24 h 洪水过程相比最大洪峰和最大 3 d 洪水过程,有更高概率产生更高设计值的洪水遭遇情况,因此应重视清河与碾盘河 24 h 洪水过程叠加对下游地区产生的冲击,提高清河水库调节 24 h 洪水过程的能力,保障防洪安全。

c. 虽然清河与碾盘河常遇洪水发生遭遇可能性较高,但两河同时发生稀遇洪水遭遇的可能性很小。两河发生洪水量级具有正相关性,当其中一条河发生较大洪水时,另一条河很可能也发生较大量级的洪水。

参考文献:

[1] 陈璐,郭生练,周建中,等. 长江上游多站日流量随机模拟方法[J]. 水科学进展,2013,24(4):504-512.
[2] 李继清,谢宇韬,侯宇. 基于 Copula 函数的川江干支流洪水遭遇分析[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(5):1275-1283.
[3] 宁晓娜. 基于清河水库以下干支流洪水遭遇演进分析[J]. 黑龙江水利科技,2021,49(6):27-31.
[4] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范:SL44-2006[S]. 北京:中国水利水电出版社,2006:7-8.
[5] ROGER B NELSEN. An introduction to Copulas [M]. New York: Springer, 2006.
[6] 郭生练,闫宝伟,肖义,等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文,2008(3):1-7.
[7] 蒋楠,高成,夏欢. 基于 Copula 函数的锦河与连锦河洪水遭遇分析[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):85-91.

Analysis of Flood Encounter Law Between Qinghe River and Nianpan River

WANG Da-shuang
(Liaoning Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: The flood superposition of the main stream and tributaries aggravates the flood control situation of the downstream river channel. Analyzing the flood encounter situation is conducive to strengthening flood management, optimizing reservoir flood dispatching, and ensuring downstream flood control safety. At present, the study of flood encounter problems in the Qinghe River Basin is limited to statistical analysis and lacks a more comprehensive understanding. In this paper, statistical analysis and quantitative analysis based on Copula function were used to analyze the flood composition and encounter situation of Qinghe River and Nianpan River. The results show that the annual maximum flood encounter probability of Qinghe River and Nianpan River is higher, mainly concentrated in July and August, and the flood magnitude of the two rivers is positively correlated. The probability of encountering the annual maximum 24-hour flood process in the two rivers is higher than that of the annual maximum flood peak and the three-day flood process, but the possibility of simultaneous occurrence of large-scale floods in the two rivers is extremely low. The probability of encountering the 100-year maximum flood peak and the annual maximum 24-hour and three-day flood processes in the two rivers at the same time is only 0.222%, 0.255%, 0.085%.

Key words: flood encounter; analysis; Copula function; the main stream of the Qinghe River; Nianpan River

中国知网　https://www.cnki.net