

王孟悦, 郭生练, 何晓东, 等. 多途径多方案复核论证丹江口水库设计洪水[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 141-149.
WANG M Y, GUO S L, HE X D, et al. Check calculation and verification of design floods for Danjiangkou Reservoir based on multiple approaches and schemes[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 141-149. (in Chinese)

多途径多方案复核论证丹江口水库设计洪水

王孟悦¹, 郭生练¹, 何晓东², 丁洪亮², 王伟²

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072; 2. 汉江水利水电(集团)有限责任公司, 武汉 430048)

摘要: 丹江口水库初设洪水成果偏大, 导致汛期运行水位和蓄满率偏低, 无法满足水资源高效利用和生态环境保护的新需求。将丹江口水库坝址洪水系列还原并延长至 2023 年, 重新考证历史调查洪水, 构建 P-Ⅲ型分布/适线法洪水频率分析模型, 拟定 5 种不同方案, 复核计算水库设计洪水; 结合汉江流域的古洪水资料和可能最大洪水经验公式的计算结果, 通过多途径多方案分析和比较论证, 结果表明: 丹江口水库设计洪水的复核成果明显偏小; 水库坝址千年一遇设计洪水和万年一遇校核洪水分别为 $56\,950\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $70\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 比初设成果减少了 27.91% 和 40.68%; 千年一遇年最大 7 d 洪量比初设成果减少了 21 亿 m^3 , 丹江口上游新建水库又增加了 17 亿 m^3 的防洪库容。因此, 建议丹江口水库夏汛期的汛限水位可调整为 163 m, 在确保防洪安全的前提下提高水资源利用效率和水库蓄满率, 充分发挥水库的综合利用效益。

关键词: 设计洪水; 洪水频率分析; 历史洪水; 古洪水; 丹江口水库

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2025.0014

准确估算设计洪水对水利水电工程的规划、设计、施工和运行管理至关重要^[1]。它不仅关系着流域的水资源规划布局、工程安全与投资规模确定, 还关系着水库建成后所发挥的经济、社会和生态效益^[2]。丹江口水库作为汉江流域防洪的控制性工程以及南水北调中线工程的水源地, 在防洪、供水、发电等方面发挥了巨大的作用^[3-4]。1964 年, 长江流域规划办公室依据 1929—1963 年的实测资料系列, 并考虑了 1583 年以来 7 场历史调查洪水资料, 计算提出了丹江口水库初期规模的设计洪水成果。1990 年和 2003 年长江水利委员会水文局先后对丹江口水库的设计洪水进行了复核计算, 尽管复核结果偏小 5% 左右, 但从偏安全的角度考虑, 继续沿用原计算结果。丹江口水库控制流域面积 (9.52 万 km^2) 不到三峡水库 (100 万 km^2) 的 1/10, 但其初设校核洪水 ($118\,000\text{ m}^3/\text{s}$) 与三峡水库的校核洪水 ($124\,300\text{ m}^3/\text{s}$) 差别不大, 国内时有专家^[5]提出疑问。

在全球变暖和人类活动的影响下, 汉江水文情

势发生了显著变化, 特别是近几十年来, 汉江上游已兴建了一批水库群, 丹江口水库的自身功能和社会需求也有了较大调整。因此, 丹江口水库初设洪水及特征水位已无法满足需求, 开展设计洪水复核计算势在必行^[6-7]。此外, 水文气象科学技术的进步使世界各地均有相应的暴雨洪水记录、洪水外包线等经验公式以及古洪水的研究成果^[8]。丹江口水库已建成运行近 60 年, 积累了更为翔实的长序列洪水资料, 为设计洪水复核计算提供了更可靠的支撑。

我国《水利水电工程设计洪水计算规范: SL 44—2006》(以下简称《规范》)推荐选择 P-Ⅲ型分布作为频率曲线的线型^[9], 采用统计方法初步估计分布参数, 再采用适线法确定最终取值。常见的参数估计方法^[10]有: 矩法、极大似然法、线性矩法、概率权重矩法、权函数法。现行水文计算常用目估适线法, 主观性强, 任意性和不确定性较大, 往往达不到优选的目的。优化适线则可避免目估适线的人为不确定性^[11]。费永法等^[12]运用离差绝对

收稿日期: 2024-08-09 修回日期: 2024-11-27 网络出版时间: 2024-11-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241129.1127.004>

基金项目: 国家自然科学基金长江联合基金项目(U2340205); 汉江水利水电(集团)有限责任公司科研项目(HJJS2024009)

作者简介: 王孟悦(2001—), 女, 山西晋城人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: mengyuewang@whu.edu.cn

通信作者: 郭生练(1957—), 男, 福建龙岩人, 教授, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: slguo@whu.edu.cn

值和准则、离差平方和准则等对全国 91 座大型水库的洪水资料系列进行了分析计算,得出无论是频率曲线参数还是各频率洪水设计值,离差平方和最小准则结果均与采用成果差别最小的结论。郭生练等^[13]回顾了我国近 30 年来的主要研究成果,分析现有方法存在的主要问题和不足,提出设计洪水研究的前沿热点问题与未来的研究方向。宋松柏^[14]从水文频率分布函数选择、水文数据、分布函数参数计算、经验频率等方面分析了水文频率计算研究面临的挑战。刘伟等^[15]根据七大流域设计洪水的修订成果及变化情况,对不同流域影响设计洪水成果的因素进行了分析,通过与原审批成果的对比分析,推荐了设计洪水成果修订的采用成果,以此作为各站点修订后的成果以及以后工程设计的依据。

本文延长洪水实测资料系列,重新考证汉江流域主要断面的历史调查洪水,采用多途径多方案复核论证丹江口坝址设计洪水。通过比较分析,重新确定丹江口水库设计洪水以及运行特征水位,在确保防洪安全的前提下,提高水资源利用效率和水库蓄满率,充分发挥水库的综合利用效益。

1 丹江口坝址洪水序列资料

1.1 丹江口坝址洪水还原计算

丹江口枢纽 1967 年 11 月下闸蓄水,1975 年黄龙滩水库建成,1990 年安康水库下闸蓄水,丹江口坝址天然洪水受到影响。为满足洪水资料系列的“一致性”假定要求^[16],需要考虑上游水库的调蓄影响,对丹江口坝址的洪水资料系列进行还原计算。其中丹江口坝址 1929—2000 年的洪水资料系列包含洪峰和 7 d 洪量,直接采用由长江水利委员会水文局复核计算的数据成果,2001—2023 年丹江口水库坝址的洪水系列需要还原计算。

1.1.1 考虑安康水库调蓄影响的安康水文站洪水还原计算

安康水库下游约 18 km 处有安康水文站,坝址与安康水文站之间有支流月河入汇,由长枪铺水文站控制。收集到安康水文站 2001—2023 年实测径流过程资料、安康水库 2001—2023 年坝上水位过程和库容曲线以及长枪铺水文站径流资料。

根据水量平衡原理,在任一时段内,入库与出库水量之差等于水库增加或减少的蓄水量。水量平衡计算公式为

$$\Delta V / \Delta t = (Q_1 + Q_2) / 2 - (q_1 + q_2) / 2 \quad (1)$$

式中: Q_1 、 q_1 分别为时段初入、出库流量, m^3/s ; Q_2 、 q_2 分别为时段末入、出库流量, m^3/s ; ΔV 为时段内水库库容增量, m^3 ; Δt 为推算时段长, s 。

根据时段初、时段末的库水位 Z_1 、 Z_2 查库容曲线对应的 V_1 、 V_2 , 即可计算出该时段内的水库调蓄量,并将其转化为时段平均流量。安康水文站来水过程主要受上游安康水库泄水控制,根据安康水库 2001 年以来坝上水位过程以及水位-库容曲线,求得逐时段安康水库蓄变量,采用水量平衡公式,推求受安康水库调蓄影响的径流过程。考虑到安康水库至安康水文站的传播时间为 3 h,将延后 3 h 的调蓄流量过程同安康水文站的实测径流过程叠加,即可得到安康水文站 2001—2023 年天然径流过程。综合考虑水库规模及还原洪水精度,本次计算时段取 2 h。

汉江干流安康水文站至丹江口入库的洪水传播时间为 12~18 h。根据丹江口反推年最大入库洪水日期时间,按传播时间提前确定安康水文站同期实测洪水,统计其实测系列的洪峰、洪量,再依据已推求的安康水文站的天然洪水过程,统计相应的天然洪峰、洪量,两者之差即为安康水库的调蓄影响。

1.1.2 考虑堵河潘口-黄龙滩水库调蓄影响的黄龙滩水文站洪水还原计算

根据汉江支流堵河潘口和黄龙滩水库的建成蓄水时间,分别收集了潘口水库 2013—2023 年、黄龙滩水库 1995—2023 年的水位库容系列数据。经过数据整理和插值计算,潘口和黄龙滩水库分别采用 2013 年 7 月—2023 年 12 月和 2012 年 1 月—2023 年 12 月的逐时水位库容数据。

堵河出口控制站(黄龙滩水文站)至丹江口入库的洪水传播时间为 3~6 h。考虑潘口-黄龙滩水库的调蓄影响,还原计算得到黄龙滩水文站天然与实测洪峰(洪量)之差,即为水库调蓄的影响。

1.1.3 丹江口坝址天然洪水还原计算

2001—2023 年丹江口坝址天然洪水还原计算的主要步骤如下:

步骤一,根据黄家港水文站(丹江口水库出库站)2001—2023 年洪水摘录和丹江口水库 2001—2023 年日运行资料,运用式(1)计算得到丹江口的入库洪峰洪量序列。

步骤二,考虑安康水库的调蓄影响,计算安康水文站同期天然与实测洪峰洪量差值。

步骤三,考虑堵河梯级水库的调蓄影响,计算黄龙滩水文站同期天然与实测洪峰洪量差值。

步骤四,将上述3项洪峰洪量计算结果错时相加,即可得到考虑上游水库调蓄影响还原后的丹江口入库天然洪峰洪量序列。

郦建平^[17]分析了丹江口坝址洪水与入库洪

水之间的关系。本研究采用相同的系列资料,建立丹江口入库洪水与坝址洪水之间的线性相关关系。从图1可以看出,洪峰(Q_m)和7d洪量(W_{7d})系列的相关性系数分别高达0.975 9和0.999 6。因此,可依据相关方程式计算得到2001—2023年坝址还原后的年最大洪峰和7d洪量天然序列。

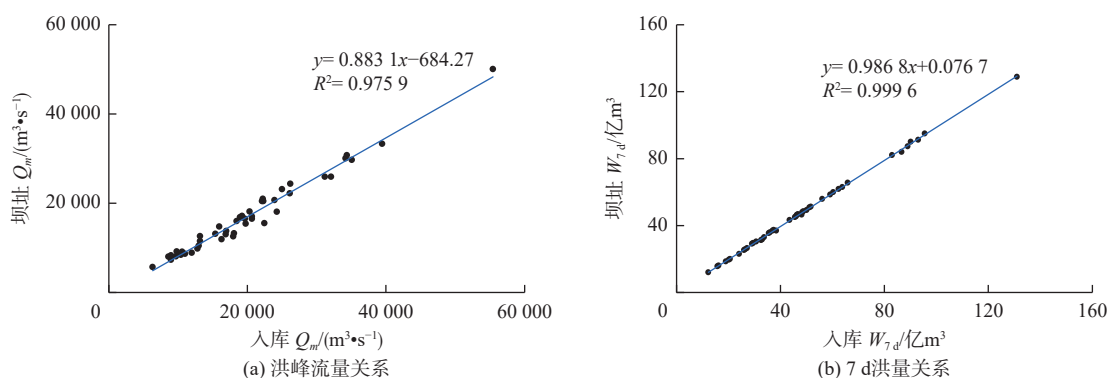


图1 丹江口水库坝址洪水与入库洪水相关关系

Fig. 1 Correlation between dam-site floods and inflow floods at the Danjiangkou Reservoir

1.2 历史调查洪水量级不确定性和考证期论证

历史调查洪水参与频率分析可以降低设计洪水的抽样误差^[18]。丹江口水库初设将1583年、1693年、1724年、1832年、1852年、1867年和1921年7场历史调查洪水和1935年大洪水作特大值处理,其中,1583年洪水最大($Q_m = 61\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$),1724年洪水次之(无量级资料),1935年实测洪水排序第三($Q_m = 50\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$),1867年洪水排序第四($Q_m = 45\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$),1852年洪水排序第五($Q_m = 45\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$),1693年洪水排序第六(Q_m 估值: $42\ 500 \sim 45\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,本次计算取 $45\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$),1832年洪水排序第七($Q_m = 44\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$),1921年洪水排序第八($Q_m = 38\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$);1583年、1832年、1852年、1867年和1921年的历史调查洪水包含7d洪量资料。本次复核计算重新考证汉江流域历史洪水的量级及重现期。

1979年颁布的《水利水电工程设计洪水计算规范SDJ 22—1979(试行)》明确要求,在计算设计洪水时必须调查和考证历史洪水,以提高计算结果的可靠性^[19]。1953年以来,多家单位开展了汉江流域历史洪水的考证和估算工作,得出丹江口水库现址附近调查洪水的最后成果:“明万历十一年(1583年)5—6月,7d洪量为171亿 m^3 ,水位104.05 m,流量 $61\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,重现期400 a”^[20]。1583年洪水作为最大的历史调查洪水,其估算洪峰限于当时的科技认知水平,存在很大的误差和不确定性^[5]。根据多年

的研究分析,本文对1583年估算洪峰 $61\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 提出2点质疑:1583年洪水过后在安康留下的石刻痕迹。既然这是汉江流域有史以来发生过的最大洪水,为何在安康下游没有找到第二处同期洪水的痕迹?根据该石刻高程估算得到安康水文站的洪峰为 $40\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,安康水文站至丹江口坝址距离260 km,在没有其他水位流量资料的条件下,如何得到丹江口坝址洪峰为 $61\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$?估算方法和计算过程缺少科学依据。1984年陕西省水利厅编印了《陕西省洪水调查资料汇编成果》,其中,丹江口水库初设采用的安康历史调查洪水都明显偏大,导致估算的丹江口坝址洪水也偏大。安康水文站历史上有3年(1583年,1867年,1983年)洪峰流量分别为 $34\ 000$ 、 $30\ 000$ 、 $31\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,对应估算(实测)的丹江口坝址洪峰分别为 $61\ 000$ 、 $45\ 500$ 、 $34\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$,都是安康发生了同样级别的大洪水,而估算的丹江口坝址洪峰流量差别甚大,说明1583年的估算洪峰 $61\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 存在很大的不确定性。

汉江1929年才在襄阳等处设水位站,1935年估算洪峰流量为 $50\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 比较准确合理。分析《郧台志》张国彦的3篇奏疏和《十堰市志》^[21]中对1935年大水的描述,认为这两场洪水比较类似。因此可以推理判断,1583年和1935年的洪水量级相当。查阅汉中、安康、丹江口、十堰、襄阳等地方志及相关资料可知,1583年是历史考证的最大洪水,并且该场洪水的重现期至少为656 a(1368—

2023 年)。

2 丹江口坝址设计洪水复核计算

2.1 洪水频率分析模型

《规范》推荐采用 P-Ⅲ 型分布作为水文分析计算的分布函数,采用适线法确定分布参数。本次复核计算构建 P-Ⅲ 型分布/适线法洪水频率分析模型。

对于不连序系列,特大洪水系列经验频率公式为

$$P_M = \frac{M}{N+1} \quad M=1,2,\dots,a \quad (2)$$

实测系列内一般洪水经验频率公式

$$P_m = \frac{a}{N+1} + \left(1 - \frac{a}{N+1}\right) \frac{m-l}{n-l+1} \quad m=l+1,\dots,n \quad (3)$$

式中: M 为特大洪水降序排列的序号; P_M 为特大洪水第 M 序号的经验频率; N 为自最远的调查考证年份至今的年数; a 为特大洪水个数(含实测中的特大洪水); m 为实测系列降序排列的序号; P_m 为实测系列第 m 项的经验频率; n 为实测系列的年数; l 为实测系列中作特大值处理的个数。

频率曲线的线型采用 P-Ⅲ 型, P-Ⅲ 型分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-\mu)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-\mu)} \quad (4)$$

式中: α 、 β 和 μ 分别为 P-Ⅲ 分布函数的形状、尺度和位置参数。

线性矩法的统计性能优于其他参数估计法,基于该方法估计的频率曲线参数比常规矩更加稳定可靠^[4]。因此,本文采用线性矩法初估统计参数,采用离差平方和适线准则确定分布参数。

2.2 构建不同的设计洪水复核方案

样本由 7 场历史调查洪水以及 1929—2023 年共 95 a 的实测年最大洪峰和洪量系列资料组成不连续系列(其中 1935 年洪水作特大值处理)。为了深入开展比较分析研究,构建 5 种不同的设计方案,分别采用洪水频率分析模型复核设计洪水,并与初设成果进行对比。

方案一,考虑与原设计相同的历史调查洪水,并将实测洪水系列延长至 2023 年(即实测系列为 1929—2023 年的连续系列),其中,1724 年仅考虑第二排序,1935 年洪水作特大值处理并排序第三,此时 $N=441$ a(1583—2023 年)。

方案二,延长历史洪水考证期和实测洪水系列。为了分析比较 1583 年洪水最大历史考证期对丹江

口坝址设计洪水的影响,通过历史文献记载分析,1583 年是历史考证期的最大洪水,该场洪水至少是明朝(1368 年)以来的最大洪水,即历史考证期至少不低于 656 a(1368—2023 年)。其中,1724 年仅考虑第二排序,1935 年洪水作特大值处理并排序第三。

方案三,将 1583 年和 1724 年大洪水当作不定量历史洪水进行研究。由于 1583 年大洪水的量级存在较大的不确定性,重新估算难度大,因此将 1583 年大洪水当作不定量历史洪水进行研究,即仅考虑 1583 年和 1724 年大洪水第一和第二的排位顺序,不采用其量级;其余同方案二。

方案四,不考虑 1583 和 1724 年调查洪水。将 1935 年洪水作特大值处理并排序第一,它是 1693 年以来汉江流域的最大洪水,故此时 $N=331$ a(1693—2023 年)。

方案五,采用实测洪水序列资料,不考虑历史调查洪水。丹江口实测系列较长,1935 年洪水是 1921 年以来最大的洪水。参考长江水利委员会水文局 1990 年《丹江口设计洪水复核报告》的方法,由于实际洪水系列(1929—2023 年)共 95 a,其首位重现期接近等于末位历史洪水,故将 1935 年从实际系列中抽出作为特大洪水处理,历史洪水考证期为 103 a(1921—2023 年),使洪水计算系列完整化。

对于年最大 7 d 洪量不连续系列,1583 年、1832 年、1852 年、1867 年和 1921 年历史调查洪水和 1935 年大洪水包含 7 d 洪量资料,另 2 场没有量级资料的历史调查洪水按不定量洪水处理,仅考虑其排序。其余处理方法与上述 5 种方案类似。

2.3 设计洪水复核计算结果

表 1 列出各种方案下丹江口坝址洪水统计参数及设计值计算结果,可以得出以下几条结论:

本次研究将洪水系列延长至 2023 年,丹江口水库坝址设计洪水计算成果均明显偏小。百年一遇洪峰和 7 d 洪量分别比初设值偏小 4.04%~12.98% 和 7.09%~12.06%;千年一遇洪峰和 7 d 洪量分别比初设值偏小 4.47%~15.25% 和 6.38%~12.33%;万年一遇洪峰和 7 d 洪量比初设成果分别偏小 4.50%~16.65% 和 6.41%~13.25%。

方案三(将 1583 年 1724 年大洪水当作不定量历史洪水处理),百年一遇洪峰和 7 d 洪量分别比初设值偏小 7.87% 和 10.64%,千年一遇洪峰和 7 d 洪量分别比初设值偏小 9.24% 和 10.64%;方案五(不

考虑历史洪水资料),百年一遇洪峰和7 d 洪量比初设成果分别偏小 15.25% 和 11.70%。设成果分别偏小 12.98% 和 11.35%,千年一遇洪峰

表 1 丹江口坝址洪水统计参数及设计值

Tab. 1 Statistical parameters and design values of the flood at the Danjiangkou Dam site

项目	方案	实测系列	历史洪水 年份	历史考 证期/a	采用统计参数			设计值		
					E_x	C_v	C_s/C_v	0.01%	0.10%	1%
洪峰/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	原设计	1929—1962 ($n=34$)	1583、1724、1935、 1693、1867、1852、 1832、1921	380	15 700	0.60	2.5	82 300	64 900	47 000
	1	1929—2023 ($n=95$)		441	15 300	0.59	2.5	78 600 (-4.50%)	62 000 (-4.47%)	45 100 (-4.04%)
	2	1929—2023 ($n=95$)	1583、1724、1935、 1693、1867、1852、 1832、1921	656	15 100	0.56	2.5	73 100 (-11.18%)	58 100 (-10.48%)	42 700 (-9.15%)
	3	1929—2023 ($n=95$)		656	15 300	0.56	2.5	74 100 (-9.96%)	58 900 (-9.24%)	43 300 (-7.87%)
	4	1929—2023 ($n=95$)	1935、1693、1867、 1852、1832、1921	331	15 300	0.55	2.5	72 500 (-11.91%)	57 800 (-10.94%)	42 700 (-9.15%)
	5	1929—2023 ($n=95$)	1935	103	15 100	0.53	2.5	68 600 (-16.65%)	55 000 (-15.25%)	40 900 (-12.98%)
	原设计	1929—1962 ($n=34$)	1583、1724、1935、 1693、1867、1852、 1832、1921	380	50.00	0.58	2.0	234	188	141
	1	1929—2023 ($n=95$)		441	46.10	0.59	2.0	219 (-6.41%)	176 (-6.38%)	131 (-7.09%)
	2	1929—2023 ($n=95$)	1583、1724、1935、 1693、1867、1852、 1832、1921	656	45.71	0.56	2.0	205 (-12.39%)	166 (-11.70%)	125 (-11.35%)
	3	1929—2023 ($n=95$)		656	46.12	0.56	2.0	207 (-11.54%)	168 (-10.64%)	126 (-10.64%)
7 d 洪量/ 亿 m^3	4	1929—2023 ($n=95$)	1935、1693、1867、 1852、1832、1921	331	46.12	0.55	2.0	203 (-13.25%)	165 (-12.33%)	124 (-12.06%)
	5	1929—2023 ($n=95$)	1935	103	45.71	0.56	2.0	205 (-12.39%)	166 (-11.70%)	125 (-11.35%)

分析初设洪水成果偏大的原因,主要是实测资料系列短(34 a),最大历史调查考证期 380 a。本次研究将资料系列延长到 2023 年,并重新分析论证了历史洪水考证期和 1583 年洪水的不确定性。由于历史考证期和实测系列的延长,丹江口水库设计洪水复核成果减小是合理的。

图 2 绘出方案三和方案五丹江口坝址洪峰和 7 d 洪量频率分析曲线。

3 多途径分析比较丹江口坝址设计洪水

3.1 汉江流域古洪水研究成果

近 50 多年来,古洪水研究取得了丰硕成果^[22]。郑树伟等^[23]以汉江上游黄坪村剖面为研究对象,通过地层分析与对比确认该剖面记录了 1900—1700 年前发生的特大古洪水事件。他们采用 SWD 尖灭点法和厚度-含沙量关系法还原的洪峰高程分

别为 154.95 和 156.85 m,利用比降法计算得到的相应古洪水洪峰流量分别为 65 320 和 74 442 m^3/s ;参考 Baker^[24]提出的流域面积与特大洪水洪峰流量的关系,验证了所估算洪峰流量的合理性。取上述两种方法计算结果的均值 69 881 m^3/s 作为研究断面的古洪水洪峰流量,采用水文比拟法推求得到丹江口坝址的古洪水洪峰流量为 79 000 m^3/s ^[23]。

3.2 世界各国最大洪水记录和外包线

王国安等^[25-26]基于世界各国的大洪水记录,得到了最大洪峰流量与流域集水面积之间的关系。参考该结果,对于集水面积在 1 000~300 万 km^2 的流域,其外包线可采用以下经验公式计算:

$$Q_m = 1\,830F^{0.316} \quad (5)$$

式中: Q_m 为最大洪峰流量, m^3/s ; F 为流域集水面积, km^2 。丹江口水库的流域集水面积为 95 200 km^2 ,代入式(5)计算得到其外包线最大洪峰流量为 68 502 m^3/s 。

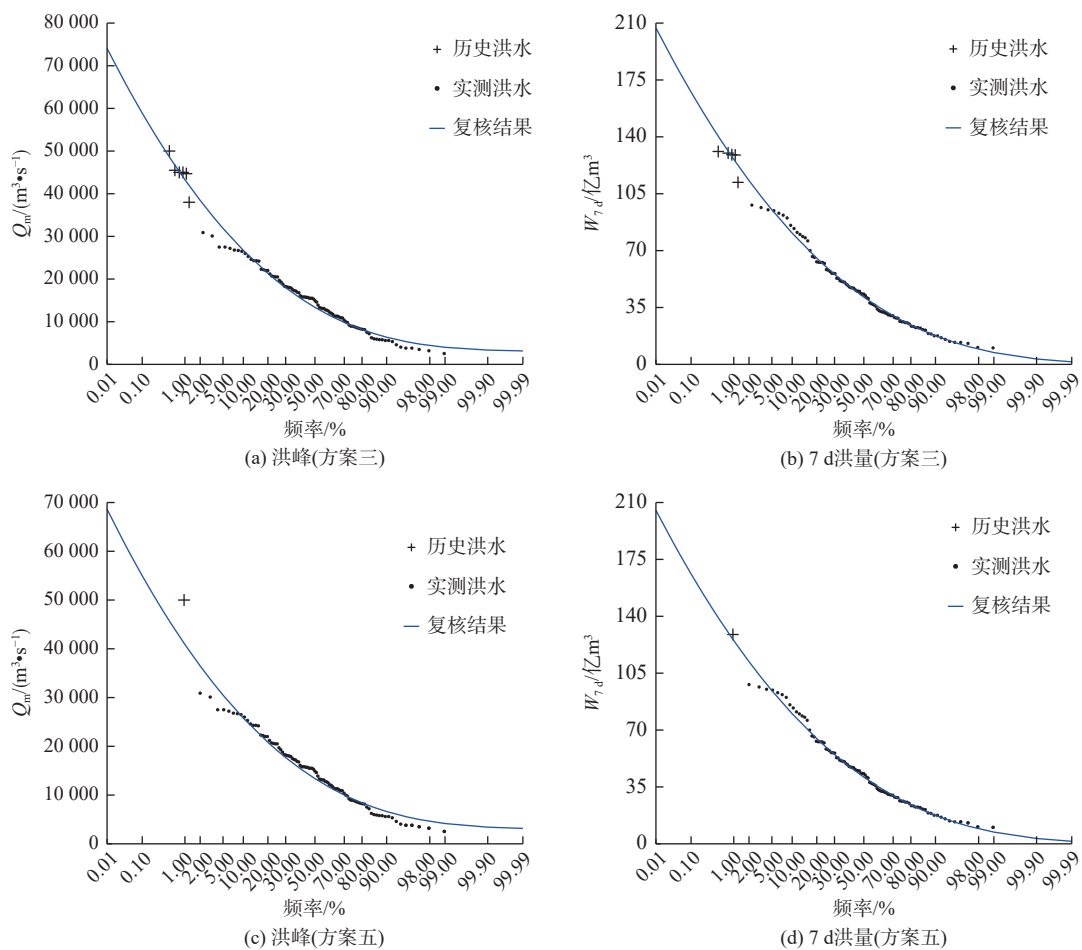


图 2 丹江口坝址洪峰和 7 d 洪量频率分析曲线

Fig. 2 Flood frequency analysis curve of peak discharge and 7 d flood volume at the Danjiangkou Dam site

3.3 国际大坝委员会经验公式

参考国际大坝委员会(ICOLD)提供的最大洪峰流量外包线与流域集水面积之间的关系图^[27]。对于面积在 100~10⁸ km² 的流域,其外包线可采用以下经验公式计算:

$$Q_m = 10^6 \left(\frac{F}{10^8} \right)^{1-K/10} \tag{6}$$

式中:K 为流域系数,其取值范围通常为 0~6。

对于湿润地区,流域系数 K 一般大于 4.5。我们取最大的 K 值(K=6)时,采用式(6)计算的最大洪峰流量为 61 866 m³/s,与式(5)的计算结果接近,说明了最大洪峰流量计算结果的合理性。

表 2 汇总采用多途径多方案推求的丹江口水库设计洪水值(洪峰流量保留三位有效数字)。丹江口水库采用千年一遇设计洪水、万年一遇校核洪水和 PMP/PMF 估算值,再按 20% 安全系数放大得到初设成果,即校核洪峰流量为 118 000 m³/s,分别比世界记录大洪水外包线估计值(68 500 m³/s)和丹江口水库古洪水推算值(79 000 m³/s)偏大 72.26% 和 49.37%,严重偏大和不合理。千年一遇 7 d 设计洪

量采用 P-Ⅲ 型适线法估计值(188 亿 m³),万年一遇 7 d 校核洪量采用 PMP/PMF 估算值(288 亿 m³)。

表 2 丹江口水库坝址设计(校核)洪水结果比较

Tab. 2 Comparison of the design (verification) flood results at the Danjiangkou Reservoir dam site

计算阶段	方法/方案	设计洪水 (千年一遇)		校核洪水 (万年一遇)	
		洪峰/ (m ³ ·s ⁻¹)	7 d 洪量/ (亿 m ³)	洪峰/ (m ³ ·s ⁻¹)	7 d 洪量/ (亿 m ³)
原设计	P-Ⅲ 型/适线法	64 900	188	82 300	234
	PMP/PMF	—	—	91 900	288
	初设采用成果	79 000	188	118 000	288
复核 计算	P-Ⅲ 型/ 适线法	58 900	168	74 100	207
	方案五	55 000	166	68 600	205
其他 研究	丹江口坝址古洪水估算结果	—	—	79 000	—
	王国安经验公式计算结果	—	—	68 500	—
	ICOLD 经验公式计算结果	—	—	61 900	—

4 结论

将丹江口水库的洪水资料还原并延长至 2023

年,重新考证了历史调查洪水的量级和重现期,构建了洪水频率分析模型,采用多途径多方案复核论证丹江口水库设计洪水,得出以下几条结论:

建议丹江口水库坝址设计洪水(千年一遇)取方案三和方案五计算结果的平均值 $56\,950\text{ m}^3/\text{s}$,比现有的设计洪水 $79\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 减少 $22\,050\text{ m}^3/\text{s}$ (或减小 27.91%);7 d 洪量同样取案三和方案五计算结果的平均值 167 亿 m^3 ,比现有结果减少了 21 亿 m^3 (或减小 11.17%)。

建议丹江口水库坝址校核洪水(万年一遇)取方案三、方案五、古洪水、外包线和 ICOLD 经验公式 5 种方法估计值的平均值(取整约 $70\,000\text{ m}^3/\text{s}$),比现有的校核洪水 $118\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 减少 $48\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。换句话说,丹江口水库坝址原校核洪水偏大 40.68%。

建议丹江口水库千年一遇年最大 7 d 洪量取 167 亿 m^3 ,比初设成果减少了 21 亿 m^3 。丹江口上游新建水库又增加了 17 亿 m^3 的防洪库容,同时根据丹江口水库的水位库容曲线,当水位分别为 160.0 和 163.5 m 时,对应的库容分别为 198.2 亿和 228.0 亿 m^3 ,两者库容差 29.8 亿 m^3 。因此,在确保防洪安全的前提下,丹江口水库的夏汛期的汛限水位可调整为 163 m。

丹江口水库运行近 60 年,水库蓄满年份低于 10%,水资源利用效率有待提高。通过设计洪水复核计算成果,调整水库汛限水位,可以显著提高水库的蓄满率,实现水资源的高效利用。这对于满足南水北调中线工程的调水需求,增加汉江中下游枯水期的生态流量,支撑汉江流域经济社会发展的用水需求,均具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 郭生练,熊丰,谢雨祚. 水库运行期设计洪水及汛期水位动态控制理论方法与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.
- [2] 郭生练,王俊,谢雨祚,等. 面向新时期新需求的三峡水库运行方案研究 [J]. 水利学报, 2024, 55(4): 379-388. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20230504.
- [3] 陈桂亚,郑静,张潇. 2021 年丹江口水库防洪与蓄水 [J]. 中国水利, 2022(5): 24-27. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.05.018.
- [4] 万育生,王栋,黄朝君. 丹江口水库来水情势分析与径流预测 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 417-426. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0045.
- [5] 沈豪,曹大岭,万洪涛,等. 基于一二维耦合模型和水库调度的长江宜宾河段洪水遭遇与淹没分析 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(4): 1-21. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.001.
- [6] 曾凌,陈金凤,刘秀林. 南水北调中线工程运行以来汉江中下游水文情势演变分析 [J]. 水文, 2022, 42(6): 13-18. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210462.
- [7] 邓乐乐,郭生练,田晶,等. 汉江上游径流情势变化及归因分析 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 761-769. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0074.
- [8] World Meteorological Organization (WMO). Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP) [M]. Geneva, Switzerland: WMO, 2009.
- [9] 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.
- [10] 郭生练. 设计洪水研究进展与评价 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [11] 马海波,赵东亮,祝薄丽. 几种水文频率曲线参数估计方法的比较 [J]. 人民黄河, 2016, 38(3): 9-11. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.03.003.
- [12] 费永法,平克建. 设计洪水频率曲线数学适线法的比较分析 [J]. 水文, 2001(6): 26-28. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2001.06.009.
- [13] 郭生练,刘章君,熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价 [J]. 水利学报, 2016, 47(3): 302-314. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150913.
- [14] 宋松柏. 水文频率计算研究面临的挑战与建议 [J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2): 12-18. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.002.
- [15] 刘伟,李爱玲,翟媛. 七大流域设计洪水修订成果分析 [J]. 水文, 2019, 39(3): 80-86. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2019.03.014.
- [16] 谢雨祚,郭生练,熊立华,等. 考虑历史洪水资料的三峡水库运行期非一致性设计洪水估算 [J]. 水利学报, 2024, 55(6): 643-653. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20230792.
- [17] 邴建平,邹宁,郭海晋,等. 丹江口入库洪水与坝址洪水关系研究 [J]. 人民长江, 2018, 49(22): 7-11. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.22.002.
- [18] 张涛,胡挺,胡琼方,等. 长江流域历史典型洪水研究 [J]. 人民长江, 2023, 54(9): 17-23. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.09.003.
- [19] 水利部,电力工业部. 水利水电工程设计洪水计算规范(试行)SDJ 22—1979 [S]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [20] 斐应章,彭遵古,潘彦文,等. 明万历《郧台志》(校注本) [M]. 武汉: 长江出版社, 2013.
- [21] 骆承政主编. 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 水利

- 部水文局, 南京水利科学研究院编. 中国历史大洪水调查资料汇编 [M]. 北京: 中国书店, 2006.
- [22] 詹道江, 谢悦波. 古洪水研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [23] 郑树伟, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游黄坪村段东汉时期古洪水水文学研究 [J]. [长江流域资源与环境](#), 2015, 24(2): 327-332. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj.201502020](#).
- [24] BAKER R V. Palaeoflood hydrology in a global context[J]. [Catena](#), 2006, 66(1): 161-168. DOI: [10.1016/j.catena.2005.11.016](#).
- [25] 王国安. 可能最大暴雨和洪水计算原理与方法 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [26] 王国安, 李保国, 王军良. 世界实测与调查最大点雨量及其外包线公式 [J]. [水科学进展](#), 2006, 17(6): 824-829. DOI: [10.3321/j.issn:1001-6791.2006.06.012](#).
- [27] International Commission on Large Dams (ICOLD). Selection of design flood [R]. Paris: ICOLD, 1993.

Check calculation and verification of design floods for Danjiangkou Reservoir based on multiple approaches and schemes

WANG Mengyue¹, GUO Shenglian¹, HE Xiaodong², DING Hongliang², WANG Wei²

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hanjiang Water Resources & Hydropower Group Co., Ltd., Wuhan 430048, China)

Abstract: Original design flood and the check flood for the Danjiangkou Reservoir are 79 000 m³/s and 118 000 m³/s respectively, which may be significantly overestimated. The overestimation of design floods would lead to a lower flood limited water level (FLWL) in the reservoir, a key parameter for balancing flood control and comprehensive utilization during the flood season. Simultaneously, the hydrological regime of the downstream Han River has changed significantly, and the original design floods for the Danjiangkou Reservoir cannot meet the new demands of efficient water resources utilization and eco-environment protection. Consequently, it is imperative to recheck the design floods and characteristic water levels of the Danjiangkou Reservoir to enhance the comprehensive utilization benefits under the condition of the flood prevention standards unchanged. The observed flood data series at the Danjiangkou Reservoir dam site was restored and extended to 2023, and the historical floods of the Han River basin were re-evaluated. The discontinuous data series consisted of seven historically investigated floods in the years of 1583, 1693, 1724, 1832, 1852, 1867, and 1921, along with 95 years of annual maximum peak discharge and flood volume series recorded from 1929 to 2023, while the 1935 observed large flood had been treated as an extraordinary flood event. The P-Ⅲ distribution and curve fitting method were selected for the frequency analysis, and the sample statistical parameters were initially estimated using the linear moment's method, followed by adjustments using the sum of squared deviations criterion to finalize the P-Ⅲ distribution parameters.

Five different schemes were proposed to recheck the design floods of the Danjiangkou Reservoir and described as follow: Scheme-1, Extend both the observed flow data series (1929-2023) and historical investigation period (1583-2023), while the historically investigated floods used were the same as in the original design; Scheme-2, Reevaluate historical investigation period (1368-2023), while the others were the same as Scheme-1; Scheme-3, Treat the floods of 1583 and 1724 as indeterminated historical floods, while the others were the same as Scheme-2; Scheme-4, Exclude the historically investigated floods of 1583 and 1724, while the others were the same as Scheme-2; Scheme-5, Extend and use the observed flood series data only (1921-2023), while remain the 1935 observed large flood being treated as an extraordinary flood event. Only the historically investigated 7-day flood volumes from the years 1583, 1832, 1852, 1867, and 1921 are available, while the other two, which lacked magnitudes, are treated as indeterminated floods that only consider for their ranking order. The other set of discontinuous data series is similar to the above five schemes mentioned above.

Multiple approaches, including palaeoflood estimation in the Han River basin, empirical formulas for the largest floods on record globally, and International Commission on Large Dams (ICOLD), are used to calculate probable maximum floods. After comprehensively analyzing and verifying the results estimated through multiple approaches and schemes, it is concluded that the checked design floods for the Danjiangkou Reservoir are significantly smaller

than the original design values; The 1 000-year design and 10 000-year check peak discharges at the Danjiangkou Reservoir dam site are $56\,950\text{ m}^3/\text{s}$ and $70\,000\text{ m}^3/\text{s}$, which have decreased by 27.91% and 40.68%, respectively. The 1 000-year annual maximum 7-day flood volume has reduced 2.1 billion m^3 , while the construction of upper stream reservoirs increases 1.7 billion m^3 flood prevention storage. Therefore, it is suggested that the FLWL during the summer flood season be raised to 163 m, which can effectively enhance the flood water utilization rate and reservoir refill rate, and maximize comprehensive benefits, and ensure the safety of flood control operations.

Key words: design flood; flood frequency analysis; historical flood; palaeoflood; Danjiangkou Reservoir

