

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.03.007

梯级水库下游最不利洪水地区组合法

钟斯睿, 郭生练, 何彦锋, 谢雨祚, 王俊

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 梯级水库运行调度显著改变了下游洪水的时程分配, 而现有洪水地区组合法没有考虑对工程设计和防洪调度最不利或最恶劣的情景。本文基于灾害风险理论, 根据未控区间洪量及地区组成概率, 提出一种最不利洪水地区组合法。雅砻江梯级水库实例分析表明: 最不利地区组合法分配给下游未控区间流域的洪量总是大于同频率组合法和最可能组合法; 最不利组合法推求的雅砻江出口断面1000年一遇设计洪峰、3 d和7 d洪量分别为16700 m³/s、41.6亿和85.1亿 m³, 均大于其他洪水地区组合法估计值。理论推导和统计试验表明最不利地区组合法可合理分配洪量并兼顾下游防洪风险, 具有深入研究和应用的价值。

关键词: 设计洪水; 梯级水库; 洪水地区组成; 洪量分配; 雅砻江

中图分类号: TV122.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)03-0430-10

中国已建成投运水库9万余座, 形成了复杂的混联梯级水库格局。梯级水库的运行调度显著地改变了下游的水文情势, 其洪水量级和时空分配发生了重大变化^[1]。因此, 研究分析受上游水库调蓄影响后下游断面的设计洪水, 已成为流域梯级水库规划和运行管理的研究热点^[2-3]。同时, 水库防洪风险也是运行调度重点关注的问题之一^[4], 如何从风险的角度定量推求受梯级水库影响下的最不利运行期设计洪水, 是亟待解决的理论技术难题。

《水利水电工程设计洪水计算规范: SL 44—2006》^[5](以下简称《规范》), 推荐采用地区组合法(包括典型年法、同频率法、离散求和法)推求受上游水库影响的设计洪水; 闫宝伟等^[6]通过 Copula 函数描述水库上游和区间洪量的相关性, 首次提出最可能地区组合法, 以求解设计频率下发生概率最大的一种地区组成方案; 刘章君等^[7]进一步推导完善了梯级水库最可能地区组合法的计算通式。这些方法均是基于典型年的洪水资料或统计概率分析, 得到一种相对合理的区间洪量分配方案, 并没有考虑对防洪最不利或最恶劣的情景。《规范》指出设计洪水地区组成不仅“应符合大洪水地区组成的一般规律”, 还要“选择对下游设计断面不利的洪水组成作为设计依据”, 且建议“选用以未控区间来水为主、上游水库洪水相应的这种地区组合”来考虑对下游断面是否最不利。由于不受上游水库的调控且距离设计断面较近, 未控区间流域发生的暴雨洪水通常极易形成峰高量大的洪水过程, 可能导致下游断面洪水超出安全流量并带来防洪风险。考虑到洪水风险损失与下游超额承担的洪量密切相关^[8-9], 本文借鉴灾害风险的数学定义, 以未控区间流域洪量作为评估最不利洪水地区组成的关键因子, 兼顾洪量分配方案的合理性, 提出一种梯级水库最不利洪水地区组合法, 通过定量洪水风险来推求最不利情景下的水库运行期设计洪水, 为水利工程设计和防洪调度提供理论依据和技术参考。

选择雅砻江两河口、锦屏 I 级和二滩 3 座控制性梯级水库为研究对象, 以流域出口桐子林站为设计断面, 分析对比最不利地区组合法、同频率地区组合法和最可能地区组合法; 通过理论推导、统计试验, 进一

收稿日期: 2023-12-28; 网络出版日期: 2024-04-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240417.1738.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2340205); 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3202801)

作者简介: 钟斯睿(1999—), 男, 江西宜春人, 博士研究生, 主要从事水文与水资源方面研究。

E-mail: zhongsr@whu.edu.cn

通信作者: 郭生练, E-mail: slguo@whu.edu.cn

步论证最不利地区组合法的合理性和适用性。

1 洪水地区组成方法

1.1 洪水地区组成

图1展示了 n 个水库 A_1, A_2, \dots, A_n 与设计断面 C 的洪水地区组成情况, 其中 B_1, B_2, \dots, B_n 为梯级水库的 n 个区间流域。随机变量 $X_i, Y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和 Z 分别表示水库 A_i 、区间流域 B_i 和设计断面 C 的天然来水量, 依次取值为 x_i, y_i 和 z 。设计洪水的地区组成本质上是 将指定断面 C 某一设计频率 p 的时段洪量 (z_p) 合理分配给上游的总计 $n+1$ 个区间。对于洪水的组合方案 $(x_1, y_1, y_2, \dots, y_n)$, 应满足水量平衡原理约束。得到洪量分配结果后, 可以从实测系列中选择有代表性的典型年以放大各分区的洪水过程线, 然后输入到梯级水库系统进行调洪演算, 即可推求断面 C 在同一设计频率 p 下受上游梯级水库调蓄影响的运行期设计洪水。

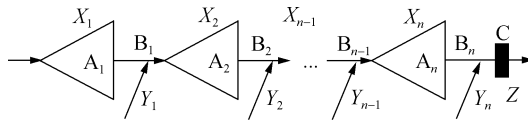


图1 梯级水库洪水地区组成概化

Fig. 1 Sketch diagram of cascade reservoir system

1.2 同频率地区组合法

《规范》推荐的同频率组合法已在工程设计中广泛应用, 其指定某一分区发生与下游设计断面同频率的洪水, 其余分区发生相应的洪水^[5]。以单库同频率地区组成(二维情况)为例, 上游水库 A_1 、区间 B_1 和下游断面 C 的年最大洪水分别采用随机变量 X, Y 和 Z 表示, 根据分区不同有 2 种可能情况, 即同频率 I 法和同频率 II 法。同频率 I 法假设上游水库 A_1 和下游断面 C 同频(设计频率为 p), 洪量分配方案可表示为 $(x_{E1}, z_p - x_{E1})$; 同频率 II 法假设未控区间 B_1 和下游断面 C 同频, 洪量分配方案可表示为 $(z_p - y_{E2}, y_{E2})$, 其中, z_p 为断面 C 设计洪量, x_{E1} 和 y_{E2} 分别为水库 A_1 和区间 B_1 的同频率洪量。

对于 n 座水库的梯级水库系统, 可自下而上逐级分解为 n 个单库系统并在水量平衡约束下分别讨论区间同频情况, 总计存在 2^n 种同频率方案。方案数的指数型增长显著降低了同频率地区组成的实用性。而其同频率假设没有考虑区间洪水的非均匀性和随机性, 缺乏严谨的数理基础, 方案的合理性和准确性受到影响^[10]。

1.3 最可能地区组合法

Copula 函数能将边缘分布和联合分布分开考虑, 灵活构造联合分布函数理论和方法, 现已广泛应用于求解多变量水文联合概率问题^[10-11]。假设有 n 个随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n , 其边缘分布函数可以分别表示为 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$, 联合分布函数为 $H(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则存在一个函数 $C(\cdot)$, 使得

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = H(F_1^{-1}(u_1), F_2^{-1}(u_2), \dots, F_n^{-1}(u_n)) = H(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

式中: 函数 $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; u_1, u_2, \dots, u_n 分别为 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$, 则 $x_i = F_i^{-1}(u_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)。根据 Sklar 定理^[12], 边缘分布 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$ 连续时, 联合分布函数 $H(\cdot)$ 和 Copula 函数 $C(\cdot)$ 是一一对应的, 则 $H(\cdot)$ 相应的联合概率密度函数为

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial^n C(u_1, u_2, \dots, u_n)}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_n} = c(u_1, u_2, \dots, u_n) \prod_{i=1}^n f_{x_i}(x_i) \quad (2)$$

式中: $c(u_1, u_2, \dots, u_n) = \partial^n C(u_1, u_2, \dots, u_n) / \partial u_1 \partial u_2 \dots \partial u_n$ 是 Copula 函数的全导数; f_{x_i} 是 X_i 的概率密度函数 ($i=1, 2, \dots, n$)。闫宝伟等^[6]将 Copula 函数理论引入设计洪水地区组成的研究中, 对于设计频率 p

时段洪量(z_p)的分配组合($x_1, y_1, y_2, \dots, y_n$), 可根据式(2)在水量平衡约束下得出最可能组成法数学模型:

$$\begin{cases} \max f(x_1, y_1, \dots, y_n) = c(u_1, v_1, \dots, v_n) f_{X_1}(x_1) \prod_{i=1}^n f_{Y_i}(y_i) \\ x_1 + \sum_{i=1}^n y_i = z_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_i 和 v_i 表示 X_i 和 Y_i 的边缘累积分布函数 $F_{X_i}(x_i)$ 和 $F_{Y_i}(y_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)。联合概率密度值 f 越大, 表明该洪水组合的发生概率越高。刘章君等^[7]基于 Copula 函数和 P-III 型边缘分布给出计算通式如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial x_1} f_{X_1}(x_1) - \frac{\partial c}{\partial y_i} f_{Y_i}(y_i) + c \left(\frac{\alpha_{x_1} - 1}{x_1 - \gamma_{x_1}} - \frac{\alpha_{y_i} - 1}{x_1 - \gamma_{y_i}} + \beta_{y_i} - \beta_{x_1} \right) = 0 \\ x_1 + \sum_{i=1}^n y_i = z_p \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_{x_1} 、 β_{x_1} 、 γ_{x_1} 和 α_{y_i} 、 β_{y_i} 、 γ_{y_i} 分别为变量 X_1 和 Y_i 的在 P-III 型分布中的形状、尺度和位置参数。

当水库数量较多时, 式(4)不易求解, 且 Archimedean Copula 函数簇的嵌套会带来较大的计算误差。熊丰等^[13]推荐采用 t -Copula 函数建立分区洪水的联合分布, 并采用遗传算法直接对式(3)的数学模型进行求解, 得到最可能洪水地区组成法洪量分配方案($x_{L1}, y_{L1}, y_{L2}, \dots, y_{Ln}$)。

1.4 最不利洪水地区组成法

风险(R)具有多种多样的数学定义形式, 常表述为危害性和易损性的乘积^[14-16]。孙章丽等^[17]指出洪灾风险领域的实践中, 危险性通常用发生概率(P_R)描述, 易损性则体现为灾害损失后果(D_R), 即对于某一具体洪水事件的风险可以量化为 $R = P_R \times D_R$ 。地区组成法主要是计算考虑梯级水库调蓄后的下游断面设计洪水, 灾害损失后果难以精准量化, 考虑到地区组成法本质是洪量的合理分配, 结合《规范》对不利洪水地区组成的描述, 本文将 D_R 设定为与未控区间洪量大小相关的指标, 以提高方法的理论性和实用性。因为从水文设计而言, 上游水库和上游区间洪量均受工程控制, 而下游未控区间洪量(Y_n)直接对设计断面带来威胁, 若洪水组成方案中未控区间分配洪量较多, 则对下游断面的防洪更加不利, 故洪量分配方案的风险后果 D_R 定义为

$$D_R = \begin{cases} y_n - y_{En} & y_n - y_{En} > 0 \\ 0 & y_n - y_{En} \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: y_{En} 为同频率组成法中未控区间分配的洪量, 在数据资料充足的情况下, 应尽量选择未控区间洪量为主的同频率组成法^[5]。则最不利地区组成方案($x_{U1}, y_{U1}, y_{U2}, \dots, y_{Un}$)可由如下数学模型求解:

$$\begin{cases} \max R = D_R(y_n) \cdot f(x_1, y_1, \dots, y_n) \\ x_1 + \sum_{i=1}^n y_i = z_p \end{cases} \quad (6)$$

2 雅砻江梯级水库应用实例

雅砻江是金沙江第一大支流, 位于青藏高原东部, 介于 $26^{\circ}32'N$ — $33^{\circ}58'N$ 、 $96^{\circ}52'E$ — $102^{\circ}48'E$ 之间, 干流河道全长为 1 535 km, 流域面积约 12.8 万 km^2 , 6—9 月为汛期。下游河段已建成投运两河口、杨房沟、锦屏 I 级、锦屏 II 级、官地、二滩和桐子林等水库电站, 其中两河口、锦屏 I 级、二滩为控制性水库工程, 总调节库容为 158 亿 m^3 , 具备优良的径流调节能力, 联合其余 4 座径流式水库电站形成“三库七级”梯级水库格局^[18]。桐子林水库位于雅砻江出口附近, 以此为设计断面进行最不利洪水地区组成研究, 讨论两河口上游、两—锦区间、锦—二区间和二—桐区间洪量 X 、 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 的分配方案。雅砻江 3 座控制性水库和

桐子林水库断面的基本参数如表 1 所示。

表 1 雅砻江梯级水库电站基本参数
Table 1 Characteristic parameters of cascade reservoirs in Yalong River

年份	正常蓄水位/m	汛限水位/m	死水位/m	总库容/亿 m ³	调节库容/亿 m ³	防洪库容/亿 m ³	调节能力	设计洪峰流量/(m ³ /s)	校核洪峰流量/(m ³ /s)
两河口	2 865	2 845.9	2 785	107.67	65.60	20.00	多年	7 260	10 400
锦屏 I 级	1 880	1 859.0	1 800	79.90	49.11	16.00	年	13 600	15 400
二滩	1 200	1 190.0	1 155	58.00	33.70	9.00	季	20 600	23 800
桐子林	1 015	/	1 012	0.91	0.15	/	日	/	/

雅砻江 3 座控制性水库设计洪水标准均为 1 000 年一遇, 以 3 d、7 d 洪量为控制, 采用 Vine Copula 构建洪量联合分布, P-III 型曲线拟合边缘分布, 遗传算法求解最可能和最不利洪水地区组成。表 2 给出雅砻江梯级水库各断面 7 d 洪量分配结果。同频率组合法是基于水库和区间洪量的设计频率进行求解计算的, 同频率 I 法洪量分配呈现上游区间多、下游区间少的特点, 同频率 II 法则相反。但同频率组合法的假定并不合理, 水库和区间洪量并不是完全线性相关的。最可能组合法则充分考虑了各子流域洪水的相关关系, 其求得的洪量分配方案倾向于将洪量分配给下游锦—二区间和二—桐区间。如式(6)所示, 最不利组合法是在最可能组合法基础上, 考虑了未控区间流域的洪水权重, 增加了未控区间的洪量分配, 水库上游区间相应减少。

表 2 雅砻江流域梯级水库断面 7 d 洪量分配结果
Table 2 7 d flood volume allocation for cascade reservoirs in Yalong River basin

区间 7 d 洪量/亿 m ³	桐子林				二滩		锦屏 I 级	
	同频率 I 法	最可能组合法	同频率 II 法	最不利组合法	最可能组合法	最不利组合法	最可能组合法	最不利组合法
两河口上游	36.7	32.1	30.1	28.9	33.0	30.4	35.7	32.8
两—锦区间	33.3	30.8	28.9	26.7	30.7	28.0	34.4	37.2
锦—二区间	30.2	36.9	38.5	39.8	36.6	41.8	/	/
二—桐区间	18.1	18.4	20.7	22.9	/	/	/	/

张晓琦等^[9]指出, 风险后果是量化洪水风险的关键。如 D_R 随洪量分配的变化不敏感, 则最可能组成和最不利组成不会有显著差异; 如 D_R 的变动过于剧烈, 则求得 R 可靠性较差。以雅砻江实例为例, 二—桐未控区间的同频率洪量(y_{E3})变动时, 其最不利洪量的 y_{U3} 求解结果如图 2 所示, 图中 f_U 和 f_{max} 分别为相应最不

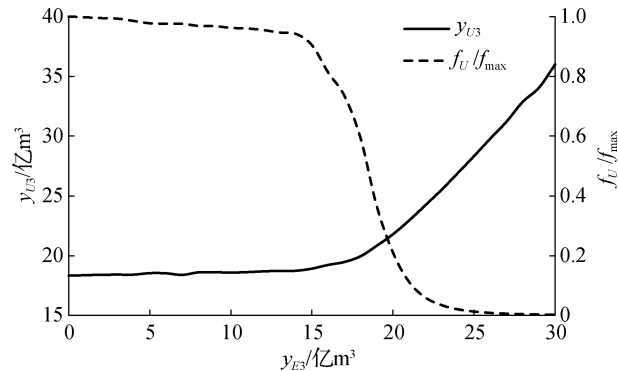


图 2 未控区间洪量对最不利组成的影响

Fig. 2 Impact of uncontrolled flood volume on the most unfavorable regional composition

利组成和最可能组成的概率密度。当 $y_{E3} < 15$ 亿 m^3 时, 最不利组成和最可能组成的结果相对接近, 此时 R 主要受概率密度的影响控制, 无法兼顾洪量分配风险性; 当 $y_{E3} > 25$ 亿 m^3 时, y_{E3} 几乎随之线性增长, 说明此时 R 由风险后果 (D_R) 主导, 且此时概率密度极低, 求得的最不利组成合理性有待商榷。雅砻江实例中同频率组成法推求的未控区间洪量 y_{E3} 范围为 18.1 亿 ~ 20.7 亿 m^3 , 该范围内求得的最不利组成概率密度和风险后果均有适度的变化, 结果也相对合理。

将表 2 中洪量组成方案输入雅砻江梯级水库系统, 以 1965 年洪水过程为典型, 计算各区间洪水过程和水库调蓄过程, 并演算至桐子林断面, 得到各地区组成方案相应的运行期设计洪水如表 3 所示。由于上游水库的调蓄作用, 下游设计断面的设计洪水有所削减, 其中 1 000 年一遇运行期设计洪水整体削减约 30% ~ 40%。图 3 绘出雅砻江桐子林水库断面 1 000 年一遇运行期设计洪水 (1965 典型年) 过程, 相对建设期设计洪水显著削减坦化, 程度由重到轻分别为同频率 I 组成法、最可能组成法、同频率 II 组成法和最不利组成法。

表 3 雅砻江梯级水库 1 000 年一遇设计洪水比较 (1965 典型年)

Table 3 Characteristic parameters of 1 000-year design flood at Tongzilin section in Yalong River (1965 typical year)

计算方法	设计洪峰		设计洪量					
	$Q_{max}/(m^3/s)$	削减比例/%	$W_{1d}/亿 m^3$	削减比例/%	$W_{3d}/亿 m^3$	削减比例/%	$W_{7d}/亿 m^3$	削减比例/%
建设期初设成果	24 300	/	20.7	/	58.4	/	117.3	/
同频率 I 组成法	14 100	-41.9	12.2	-41.1	36.2	-38.0	74.7	-36.3
最可能组成法	15 300	-36.9	13.2	-36.1	38.7	-33.6	79.3	-32.4
同频率 II 组成法	16 000	-34.0	13.8	-33.3	40.2	-31.2	82.3	-29.8
最不利组成法	16 700	-31.4	14.3	-30.7	41.6	-28.8	85.1	-27.5

各方案运行期设计洪水的量级大小与锦一二区间和二一桐区间所分配的洪量大小顺序保持一致, 下游未控区间所分配洪量越多, 其演算至下游设计断面的洪水越大。此外, 由于上游区间洪量分配少, 最不利洪水地区组成难以充分利用上游水库的防洪库容, 两河口和锦屏 I 级水库分别最高蓄至 2 859.36 m 和 1 872.98 m; 而同频率 I 组成法, 上游两库蓄至 2 864.06 m 和 1 879.78 m, 相对接近正常蓄水位。因此, 最不利组成法得到的设计洪水量级上最大, 给下游带来一定防洪压力。

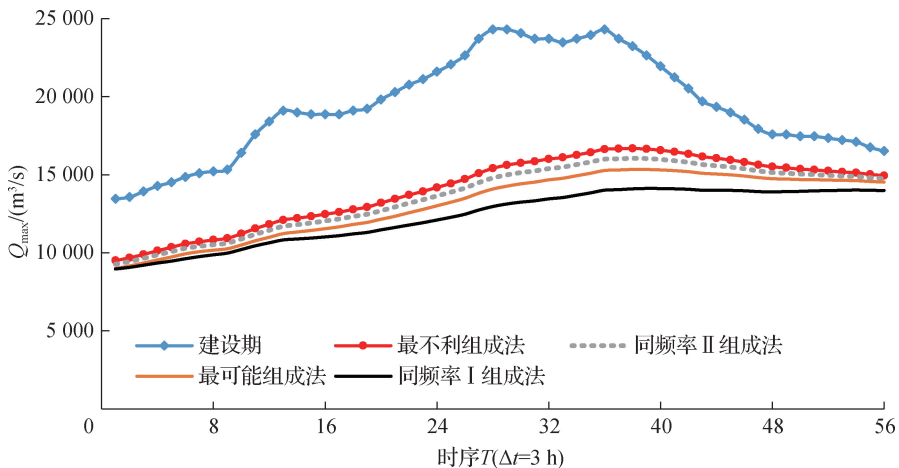


图 3 雅砻江桐子林 1 000 年一遇设计洪水 (1965 典型年)

Fig. 3 1 000-year design flood hydrographs at Tongzilin section in the Yalong River (1965 typical year)

3 分析讨论

3.1 理论推导比较

为进一步讨论本文定义风险的合理性, 推导比较同频率、最可能和最不利组成法的解析解。为简化公式推导, 以二维情况为例, 上游水库 A₁、区间 B₁ 和下游断面 C 的年最大洪水分别采用随机变量 X、Y 和 Z 表示, 假设 X、Z 分别服从正态分布, 同时 X 和 Z 联合密度函数服从二元正态分布, 即 $X \sim N(u_x, \sigma_x^2)$, $Z \sim N(u_z, \sigma_z^2)$, $(X, Z) \sim N(u_x, u_z; \sigma_x^2, \sigma_z^2, r)$, 其中, u_x 、 u_z 和 σ_x 、 σ_z 分别为 X 和 Z 的均值和标准差; r 为 X 和 Z 的线性相关系数^[19]。则根据正态分布相关假设和水量平衡原理 $Y = Z - X$ 易得出, 同样有 $Y \sim N(u_y, \sigma_y^2)$, 其中, 均值 $u_y = u_z - u_x$, 标准差 $\sigma_y = (\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - 2r\sigma_x\sigma_z)^{0.5}$ 。假设同频率 I 法、最可能法和同频率 II 法的洪量分配方案分别为 (x_{E1}, y_{E1}) 、 (x_L, y_L) 和 (x_{E2}, y_{E2}) , 其中, x、y 分别为上游水库和下游区间的洪量, 下标依次代表不同方案, 则由相关定义公式分别推得^[19]:

$$\frac{x_{E1} - u_x}{\sigma_x} = \frac{x_L - u_x}{r\sigma_x} = \frac{y_{E2} - u_y}{\sigma_y} = \frac{z_p - u_z}{\sigma_z} = t_z \tag{7}$$

式中: t_z 为标准化的随机变量 Z, z_p 是远大于 u_z 的定值, 故 $t_z > 0$ 。则根据水量平衡原理 $x + y = z_p$ 可推得:

$$\begin{cases} y_{E1} = z_p - u_x - \sigma_x t_z \theta_{E1}, & \theta_{E1} = 1 \\ y_L = z_p - u_x - \sigma_x t_z \theta_L, & \theta_L = r \\ y_{E2} = z_p - u_x - \sigma_x t_z \theta_{E2}, & \theta_{E2} = \frac{\sigma_z}{\sigma_x} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_x} - r\right)^2 + (1 - r^2)} \end{cases} \tag{8}$$

根据最不利组成法的定义式(6), 其洪量方案 (x_U, y_U) 对应风险 R 在对于 x 的一阶导等于 0 时取最大值 (z_p 为已知定值), 即:

$$\frac{\partial [(z_p - y_{E2} - x_U)f(x_U, z_p)]}{\partial x_U} = 0 \quad (x_U < z_p - y_{E2}) \tag{9}$$

$$\Leftrightarrow -f(x_U, z_p) \cdot \left[\frac{x_U - u_x}{\sigma_x} - r t_z \cdot \left(\frac{z_p - y_{E2} - u_x}{\sigma_x} - \frac{x_U - u_x}{\sigma_x} \right) + 1 \right] = 0 \tag{10}$$

显然 $f(x, z)$ 恒大于 0, 则求解式(9)、式(10)中关于 x_U 的一元二次方程有:

$$y_U = z_p - x_U = z_p - u_x - \sigma_x t_z \theta_U, \quad \theta_U = \frac{(r + \theta_{E2}) - \sqrt{(r - \theta_{E2})^2 + 4(1 - r^2)/t_z^2}}{2} \tag{11}$$

式(9)一式(11)中方程另一个解不满足 $x_U < z_p - y_{E2}$ 的约束条件, 故舍去。由于 u_x 、 σ_x 和 t_z 均为大于 0 的常量, 可推得:

$$\begin{cases} \theta_U - \theta_{E2} = \frac{(r - \theta_{E2}) - \sqrt{(r - \theta_{E2})^2 + 4(1 - r^2)/t_z^2}}{2} \leq 0 \\ \theta_{E2} - \theta_L = \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_x} - r\right) - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_x} - r\right)^2 + (1 - r^2)} \leq 0 \\ \theta_L - \theta_{E1} = r - 1 \leq 0 \end{cases} \tag{12}$$

$$\Rightarrow \theta_U \leq \theta_{E2} \leq \theta_L \leq \theta_{E1} \Rightarrow y_U \geq y_{E2} \geq y_L \geq y_{E1} \tag{13}$$

3.2 统计试验

进一步分析相关系数(r)和下游未控区间洪量的关系,根据式(8)、式(12)对比不同方法如图4所示(假设上游水库和设计断面平均洪量分别为50亿和100亿 m^3 ,变差系数(C_v)均为0.25)。同频率I组成法无法体现区间相关关系,假定 $r=1$ 进行求解,故其分配至未控区间的洪量不随 r 变化;最可能组成法中未控区间洪量随 r 增长逐渐递减,直至 $r=1$ 时得到与同频率I法相同结果,其变化是线性的;同频率II组成法和最不利组成法中未控区间洪量同样随 r 增长递减,但是其变化是非线性的, r 越大其递减越快,尤其是 r 接近1时,未控区间洪量锐减,其中最不利组成法分配至未控区间的洪量最多。整体而言, r 越小,不同方法差距越大; $r=1$ 意味着 X 和 Z 完全线性相关,且此时已知 z_p ,洪量组成方案($x_p, z_p - x_p$)唯一确定,与同频率、发生概率、风险度量等因素皆无关。

综上,相同条件下最不利组成法分配给下游未控区间的洪量最多,同频率II组成法次之,然后是最可能组成法,同频率I组成法最少,故最不利组成法的分配结果对下游防洪调度的风险最大。

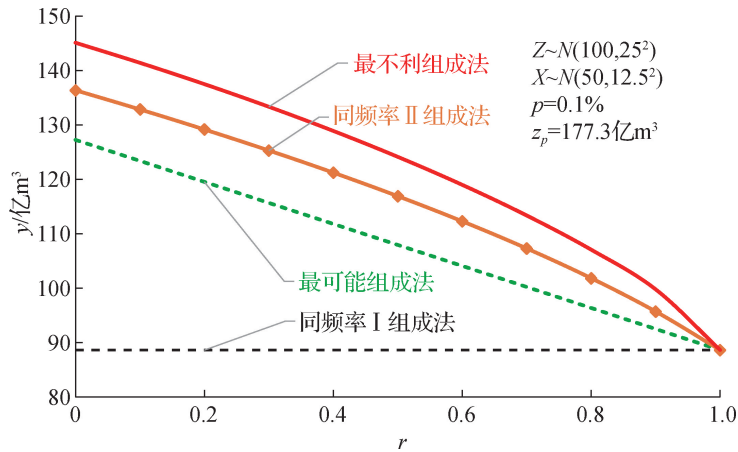


图4 洪水地区组成法未控区间洪量对比

Fig. 4 Comparison of flood volumes in uncontrolled sub-basin with various flood regional composition methods

3.3 综合对比分析

现有地区组成计算方法(典型年法、同频率法、离散求和法和最可能组成法)已被广泛研究和应用,研究结论表明这些方法存在一些明显的不足和缺陷:典型年法应用简便快捷,但人为主观因素影响过大;同频率法隐含假定上游分区洪量与断面设计洪量完全线性相关,忽略了流域洪水空间分布的非均匀性和随机性,且方案组合数随水库数增加呈指数增长,导致分析计算工作量大和最后方案选择的不确定性^[19];离散求和法存在独立性转换失真的隐患,且难以拓展至多座水库的高维问题^[20]。Xiong等^[19]和谢雨祚等^[10]通过理论推导和统计试验,分析对比了同频率法、离散求和法和最可能组成法的优劣和适用条件,得出结论如下:①离散求和法的总误差随着相关系数的增大而显著增加;当 $r > 0.2$ 时不宜使用。②对于单座或2座水库,离散求和法和同频率地区组成法的适用条件分别为 $0 < r < 0.2$ 和 $r > 0.7$ 。③对于3座及以上的梯级水库群,最可能组成法可得到唯一的最佳方案解。

为便于直观分析比较,表4针对 n 座梯级水库系统对比分析了离散求和法、同频率地区组成法、最可能地区组成法和最不利地区组成法的特点、洪量分配方式、方案个数、适用条件和局限性。

表4 不同洪水地区组合法对比

Table 4 Comparison of various flood regional composition methods

方法	主要特点	洪量分配方式	方案数/个	适用条件	局限性
离散求和法	对分区洪量进行独立性处理并计算地区组成概率和排频	根据设计洪水排频结果选择设计频率相应的洪量分配方式	1	$0 < r < 0.2$	独立性处理容易失真, 难以拓展至高维梯级水库
同频率组合法	隐含假定分区洪量同频率分布且完全线性相关, 计算简单	自下而上分析相邻区间洪量同频情况, 方案众多, 筛选困难	2^n	$r > 0.7$	当梯级水库多于3座时计算选择难度大
最可能组合法	充分考虑区间洪量非均匀分布, 选用联合概率密度最大的洪量组合分配方案	依据各分区洪量联合分布得到最可能的方案	1	无相关性限制	无法考虑最不利最恶劣工况的防洪风险
最不利组合法	在最可能组合法基础上考虑对防洪最不利的洪量组合分配方案	根据防洪风险分析给下游未控区间分配较多洪量	1	无相关性限制	需综合考虑如何定量防洪风险, 计算比较复杂

4 结 论

本文结合《水利水电工程设计洪水计算规范: SL 44—2006》和工程设计重点关注的极端不利条件, 基于灾害风险相关概念定义最不利洪水分配方案, 提出梯级水库下游最不利洪水地区组合法, 通过雅砻江梯级水库实例、理论推导和统计试验, 分析对比各种洪水地区组成方法, 主要结论如下:

(1) 最不利组合法分配给下游未控区间的洪量总是大于同频率组合法和最可能组合法。根据不同洪量组成方法的定义, 随着水库上游与未控区间洪量的相关性减弱, 不同地区组合法之间的差异变大; 当趋近线性相关时, 差异逐渐缩小。最不利组合法的洪量分配方案对设计断面的防洪压力一直是最大的。

(2) 最不利组合法是权衡未控区间洪量和发生概率的综合结果。雅砻江下游桐子林断面1 000年一遇最不利设计洪水洪峰约为 $16\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$, 比同频率I组合法、最可能组合法和同频率II组合法分别大2 600、1 400和 $700\ \text{m}^3/\text{s}$ 。同频率I、最可能、同频率II和最不利组合法计算的最大3 d洪量分别削减至36.2亿、38.7亿、40.2亿和41.6亿 m^3 。最不利组合法将洪量适量多分配给偏下游的未控区间, 导致受上游水库调蓄的洪水量级较小, 对下游防洪带来较大的压力和风险。

参考文献:

- [1] 郭生练, 刘攀, 王俊, 等. 再论水库汛期水位动态控制的必要性和可行性[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 1-12. (GUO S L, LIU P, WANG J, et al. Revisiting necessity and feasibility for dynamic control of reservoir water level during flood season[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(1): 1-12. (in Chinese))
- [2] 郭生练, 熊立华, 熊丰, 等. 梯级水库运行期设计洪水理论和方法[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 734-745. (GUO S L, XIONG L H, XIONG F, et al. Theory and method of design flood in cascade reservoir operation period[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 734-745. (in Chinese))
- [3] AWASTHI C, ARCHFIELD S A, REICH B J, et al. Beyond simple trend tests: detecting significant changes in design-flood quantiles[J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(13): 103438.
- [4] ZHANG X Q, LIU P, XU C Y, et al. Real-time reservoir flood control operation for cascade reservoirs using a two-stage flood risk analysis method[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 123954.
- [5] 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. (Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects: SL 44—2006[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))
- [6] 闫宝伟, 郭生练, 郭靖, 等. 基于Copula函数的设计洪水地区组成研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 60-65.

- (YAN B W, GUO S L, GUO J, et al. Regional design flood composition based on Copula function[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 60-65. (in Chinese))
- [7] 刘章君, 郭生练, 李天元, 等. 梯级水库设计洪水最可能地区组成法计算通式[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 575-584. (LIU Z J, GUO S L, LI T Y, et al. General formula derivation of most likely regional composition method for design flood estimation of cascade reservoirs system[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 575-584. (in Chinese))
- [8] ZHAO L D, LI J Z, ZHANG T, et al. Multi-method combined analysis of urban flood risks and its influencing factors under low impact development[J]. Journal of Hydrology, 2024, 632: 130927.
- [9] 张晓琦, 刘攀, 陈进, 等. 基于条件风险价值理论的水库群防洪库容协同作用[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 298-305. (ZHANG X Q, LIU P, CHEN J, et al. Research on the synergistic effect of multi-reservoir flood control capacity by considering the conditional value-at-risk[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 298-305. (in Chinese))
- [10] 谢雨祚, 郭生练, 王俊, 等. 梯级水库下游设计洪水地区组成法比较研究[J]. 水文, 2023, 43(5): 18-26. (XIE Y Z, GUO S L, WANG J, et al. Comparative study on design flood regional composition methods for downstream cascade reservoirs [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(5): 18-26. (in Chinese))
- [11] 刘章君, 郭生练, 许新发, 等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 148-159. (LIU Z J, GUO S L, XU X F, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources: a state-of-the-art review[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 148-159. (in Chinese))
- [12] NELSEN R B. An introduction to copulas[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2006.
- [13] 熊丰, 郭生练, 陈柯兵, 等. 金沙江下游梯级水库运行期设计洪水及汛控水位[J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 401-410. (XIONG F, GUO S L, CHEN K B, et al. Design flood and control water levels for cascade reservoirs during operation period in the downstream Jinsha River[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(3): 401-410. (in Chinese))
- [14] United Nations Department of Humanitarian Affairs. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management [S]. Geneva: United Nations Department of Humanitarian Affairs, 1992.
- [15] SHU E G, PORTER J R, HAUER M E, et al. Integrating climate change induced flood risk into future population projections [J]. Nature Communications, 2023, 14: 7870.
- [16] YOSRI A, GHAITH M, EL-DAKHAKHNI W. Deep learning rapid flood risk predictions for climate resilience planning[J]. Journal of Hydrology, 2024, 631: 130817.
- [17] 孙章丽, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 洪水灾害风险分析进展与展望[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 125-130, 136. (SUN Z L, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Flood risk analysis: progress, challenges and prospect[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 125-130, 136. (in Chinese))
- [18] 钟斯睿, 何彦锋, 郭生练, 等. 雅砻江梯级水库优化调度规则提取研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(10): 50-59. (ZHONG S R, HE Y F, GUO S L, et al. Extracting optimal operation rules for Yalong River cascade reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(10): 50-59. (in Chinese))
- [19] XIONG F, GUO S L, YIN J B, et al. Comparative study of flood regional composition methods for design flood estimation in cascade reservoir system[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125530.
- [20] 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. (GUO S L, LIU Z J, XIONG L H. Advances and assessment on design flood estimation methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 302-314. (in Chinese))

Most unfavorable regional composition method for design flood estimation in the downstream cascade reservoirs *

ZHONG Sirui, GUO Shenglian, HE Yanfeng, XIE Yuzuo, WANG Jun

(*State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: The operation of cascade reservoirs has significantly altered the spatiotemporal features of downstream floods, while the current flood regional composition methods do not quantitatively consider the most unfavorable or worst situation for hydraulic structure design and flood control. In this paper, we proposed the most unfavorable regional composition (MURC) method that is based on the hazard risk theory and derived by flood volume from uncontrolled downstream sub-basin and corresponding allocation probability. The case study in the Yalong River cascade reservoirs indicates that: the flood volume allocated into uncontrolled sub-basin by MURC method is always greater than the equal frequency regional composition method and the most likely regional composition method; the design flood peak, 3-day and 7-day flood volumes of the estuary section estimated by MURC method are 16 700 m³/s, 4.16 billion, and 8.51 billion m³, respectively, which are all larger than the values estimated by other regional composition methods. Theoretical derivation and statistical experiment analysis further prove that the MURC method can rationally allocate flood volume and balance the downstream flood control risk, which is worth for further study and practical application.

Key words: design flood; cascade reservoirs; flood regional composition; flood volume allocation; Yalong River

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2340205) and the National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3202801).