

基于 Vine Copula 的梯级水库短期发电调度风险估计

李继清¹, 谢宇韬¹, 孙凤玲²

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司小湾水电厂, 云南 大理 675702)

摘要: 基于能准确描述高维变量相关关系的 Vine Copula, 考虑短期径流预报误差的空间相关性, 构建了梯级水库短期发电调度风险估计模型, 并将模型应用于长江上游溪洛渡、向家坝和三峡水库, 分析了径流预报误差带来的单一水库、梯级水库短期发电调度风险。结果表明: 基于 C-vine Copula 构建的联合分布能较好地描述屏山站、朱沱站、寸滩站和武隆站的日径流预报误差特性; 随着水库可调节安全区间范围增大, 单一水库发电量不足风险率、弃水风险率均越来越小, 梯级水库发电量不足、弃水联合风险率和同现风险率越来越小, 即水库调节库容越大, 其承担的风险也就越小。

关键词: 发电调度风险; Vine Copula; 梯级水库; 短期径流预报误差; 溪洛渡水库; 向家坝水库; 三峡水库

中图分类号: TV124

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)04-0017-10

Risk estimation of short-term power generation operation of cascade reservoirs based on Vine Copula//LI Jiqing¹, XIE Yutao¹, SUN Fengling² (1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Xiaowan Hydropower Plant of Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Dali 675702, China)

Abstract: Based on Vine Copula, which can accurately describe the correlation between high-dimensional variables, and considering the spatial correlation of short-term runoff forecasting errors, a risk estimation model for short-term power generation scheduling of cascade reservoirs was constructed. The model was applied to the Xiluodu, Xiangjiaba, and Three Gorges reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River, and the short-term power generation scheduling risks of single reservoirs and cascade reservoirs caused by runoff forecasting errors were analyzed. The results show that the joint distribution based on C-vine Copula can better describe the error characteristics of daily runoff forecasting at Pingshan Station, Zhutuo Station, Cuntan Station, and Wulong Station. As the adjustable safety range of the reservoir increases, the risk rates of insufficient power generation and water abandonment in a single reservoir decrease, and the risk rate of insufficient power generation, joint risk rate of water abandonment, and co-occurrence risk rate of cascade reservoirs decrease. That is to say, the larger the regulating capacity of the reservoir, the smaller the risk it bears.

Key words: power generation operation risk; Vine Copula; cascade reservoirs; short-term runoff forecasting error; Xiluodu Reservoir; Xiangjiaba Reservoir; Three Gorges Reservoir

随着预报技术的发展, 入库径流预报在梯级水库调度决策中发挥着重要作用。然而由于径流预报存在不确定性^[1], 会给梯级水库调度的兴利效益造成不同程度的影响, 带来潜在的风险。相较于中长期发电调度, 梯级水库短期发电调度依赖准确度更高的入库径流预报资料, 因而受径流预报不确定性的影响更大。现有的研究大多以径流预报误差的形式考虑预报的不确定性, 进而采用矩阵分析法、专家

调查法等定性分析法^[2]和蒙特卡罗随机模拟法、最大熵法及模糊数学法等定量分析法^[3]分析梯级水库发电调度风险。例如: 钟文杰等^[4]通过构建日径流随机模拟模型, 分析了来水不确定性下常规调度和优化调度的风险水平; 武文杰^[5]通过研究水库入库径流预报误差的模糊分布规律, 建立了基于可信性理论的水电站短期发电调度近边界运行模糊风险分析模型, 得到了水电站短期发电调度在不同近边界运行情形下的三维模糊风险空间。采用传统多变

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179014); 国家重点研发计划项目(2022YFC3002702)

作者简介: 李继清(1972—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: jqli6688@163.com

通信作者: 谢宇韬(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xieyutao0117@163.com

量联合分布分析水库调度风险时,要求其边缘分布必须为相同的分布形式,而实际水文事件具有高度的复杂性与非线性,难以统一用一种边缘分布来描述,而且利用同一种边缘分布描述各种水文事件特性并不准确,导致构建的联合分布精度不高,难以满足要求^[6]。Copula 函数对边缘分布函数形式没有限制,并且能与相关结构分开考虑,反映变量之间复杂的相关性,是一种构建联合分布的有效方法。目前,Copula 函数在水库调度方面的应用从简单的二维 Copula 函数拓展到了四维 Copula 函数甚至更高维的 Copula 函数。应用的 Copula 函数种类也由单一的椭圆 Copula 函数逐渐变得丰富多样,出现了嵌套 Copula 函数、Vine Copula 等^[7-8]。然而,现有研究中 Copula 函数大多应用于考虑不同预见期径流预报误差的单一水库发电调度风险,鲜有考虑梯级水库入库径流预报误差空间相关性对梯级水库发电调度风险的影响。Copula 函数对于空间数据的描述具有独特的优势,可以反映空间数据信息量丰富、结构特殊、复杂程度高的特点^[9]。潘俞如^[10]基于能较好体现变量相关性时变特性的时变 Copula 函数和混合 Vine Copula 构建了多风电场有功出力 MVTV (mixed vine time varying) Copula;Cao 等^[11]采用 Pair Copula 理论描述不同风电场间风速的相关性,构建了风电场间风速联合概率分布函数,探讨风电场风速的高维依赖性对概率最优潮流的影响。

基于此,本文引入能准确高效描述高维变量相关关系的 Vine Copula,对梯级水库入库径流预报误差的空间相关性进行描述,针对 4 种常见的边缘分布和 5 种二元 Copula 函数进行参数优选后,建立梯级水库入库径流预报误差的 Vine Copula 联合分布,刻画梯级水库入库径流预报误差空间上的多元相关性。进而以入库径流预报误差作为水库短期发电调度风险因子,基于建立的 Vine Copula 修正径流预报值,选取发电量不足风险率、弃水风险率为风险指标,建立梯级水库短期发电调度风险估计模型,进一步分析径流预报误差带来的单一水库、梯级水库短期发电调度风险,以期为提高梯级水库发电调度效益和流域水能资源利用率提供参考。

1 研究方法

1.1 Vine Copula

随着 Copula 函数维数的提升,参数估计困难增加,进而导致难以准确描述高维变量之间的相关性^[12-13]。而 Vine Copula 可以避免求解边缘概率密度函数导数的计算问题,同时引入了各种类型的 Copula 函数,能够捕捉变量之间的各种相关性,是研

究高维相关性的方法中最具代表性的方法之一。Vine Copula 基于 Pair Copula 理论,解决了高维变量联合分布函数难求解的问题。Pair Copula 理论以二元 Copula 函数为基础,通过一定的逻辑结构采用将二元 Copula 逐层合并的方式来构造多元 Copula 的联合分布函数。Pair Copula 理论采用两两组合、层层递进的方式,最终得到条件分布函数^[14]。Cooke 于 2002 年提出了“藤”的思想,将多个二维 Copula 函数连接成为多维 Copula 函数,即 Vine Copula。Vine Copula 主要分为 C-vine 结构和 D-vine 结构^[15-16]。当藤 v 满足下列条件时,则被定义为建立在 n 维随机变量上的藤:① $v = (T_1, T_2, \cdots, T_{n-1})$;② T_1 为藤 v 上的一棵树, $N_1 = \{1, 2, \cdots, n\}$ 为 T_1 上的节点,两节点之间的连线称为边缘, T_1 上的所有边缘记作 E_1 ;③对于 $i = 2, 3, \cdots, n-1$, T_i 为藤 v 上除 T_1 外的第 i 棵树, T_i 上的所有边缘记作 E_i ,则 T_i 上的节点 N_i 满足 $N_i \subset N_1 \cup E_1 \cup E_2 \cup \cdots \cup E_{i-1}$ 。

四维 Vine Copula 结构的分解见图 1, T_1, T_2, T_3 分别为四维 C-vine Copula、D-vine Copula 的 3 棵树。由图 1(a)可见,C-vine 结构中每一棵树都有一个主变量与其余变量连接,两类组合逐层合并,最终得到多维随机变量的联合概率函数。C-vine 结构中主变量选取不同将会导致模型的多样化。在实际应用中,往往通过计算各随机变量之间的相关性,选取与其他变量相关系数之和最大的变量为主变量。由图 1(b)可见,D-vine 结构的变量之间不存在主次关系,每棵树的节点依次连接。一般地,当随机变量存在引导其他变量的主变量时,选择 C-vine 结构对变量进行描述,当随机变量之间相互独立时,选择 D-

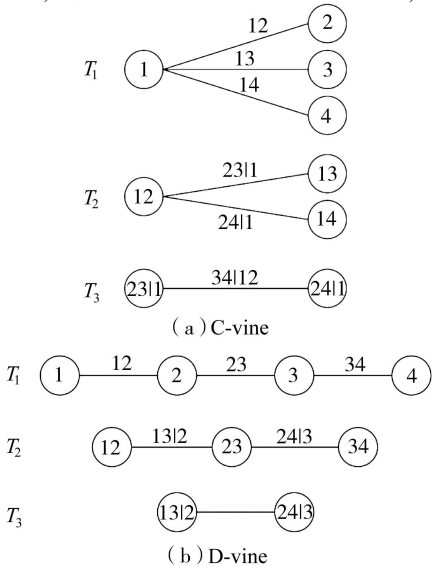


图 1 四维 Vine Copula 结构分解示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 4-dimensional Vine Copula structure decomposition

vine 结构对变量进行描述。

1.2 基于 Vine Copula 的梯级水库短期发电调度风险估计模型

考虑梯级水库入库径流预报误差空间上的相关性对短期发电调度的影响,构建基于 Vine Copula 的梯级水库短期发电调度风险估计模型,包括风险因子、风险指标、模型建立和模型求解 4 部分,如图 2 所示。

1.2.1 风险因子

选取入库径流预报误差作为水库短期发电调度风险因子,并采用相对误差的形式表示。基于 Vine Copula 构建梯级水库入库径流预报误差联合分布。
①选取常用的正态分布、 t Location-Scale 分布、Logistic 分布和广义极值分布作为边缘分布,并通过直观图形法、均方根误差 (RMSE)、决定系数 (R^2)、平均绝对百分比误差 (MAPE) 等后验检验和 K-S 检验选择拟合效果最好的边缘分布作为最佳边缘分布;
②考虑水流滞时的影响,对各水文站径流预报误差序列错时段之后进行相关分析,采用 Kendall 秩相关系数、Spearman 相关系数和 Pearson 相关系数分别计算各水库 (水文站) 径流预报误差序列的相关系数,选取相关系数之和最大的变量作为主变量;
③将选择的主变量与其他变量两两组合,构建径流预报误差二元 Gaussian Copula、 t Copula、Gumbel Copula、Clayton Copula 和 Frank Copula 函数,并对模

型进行检验,通过赤池信息准则 (AIC)、贝叶斯信息准则 (BIC) 和 K-S 检验^[17] 选取拟合度最好的 Copula 函数;
④根据 Copula 联合概率密度函数得到条件概率函数,并作为新的变量,重复②③步骤,确定下一级径流预报误差树 T_2 的最优 Copula 函数,并以此类推,直到求得径流预报误差树 T_{n-1} 的最优 Copula 函数。

基于优选出的 Copula 函数,生成 n 维 Copula 函数随机数 $Y=\{Y_1,Y_2,\cdots,Y_n\}$,各水库 (水文站) 径流预报误差序列为 $X=\{X_1,X_2,\cdots,X_n\}$,其对应的最佳边缘分布为 $U=\{U_1,U_2,\cdots,U_n\}$,通过求取各水库 (水文站) 最佳边缘分布的逆函数,得到模拟的径流预报误差序列 $X'=\{X'_1,X'_2,\cdots,X'_n\}$,其对应的径流预报误差为 $\{x'_1,x'_2,\cdots,x'_n\}$;基于模拟的径流预报误差序列 X' ,对径流预报序列 $Q'=\{Q'_1,Q'_2,\cdots,Q'_n\}$ 进行修正,得到修正后的径流预报序列 $Q''=\{Q''_1,Q''_2,\cdots,Q''_n\}$ 。

1.2.2 风险指标

当入库径流预报误差较小时,径流预报值与实际值基本相同,水库实际运行情况与发电计划相差不大,水库可满足发电计划要求,同时运行过程中也不产生弃水,此种情况是最理想的。当径流预报值与实际值相差较大时,实际来流量远远大于预报值时,水库若仍然按照发电计划运行则会对大坝自身安全产生影响,此时水库只能被迫弃水,造成弃水发

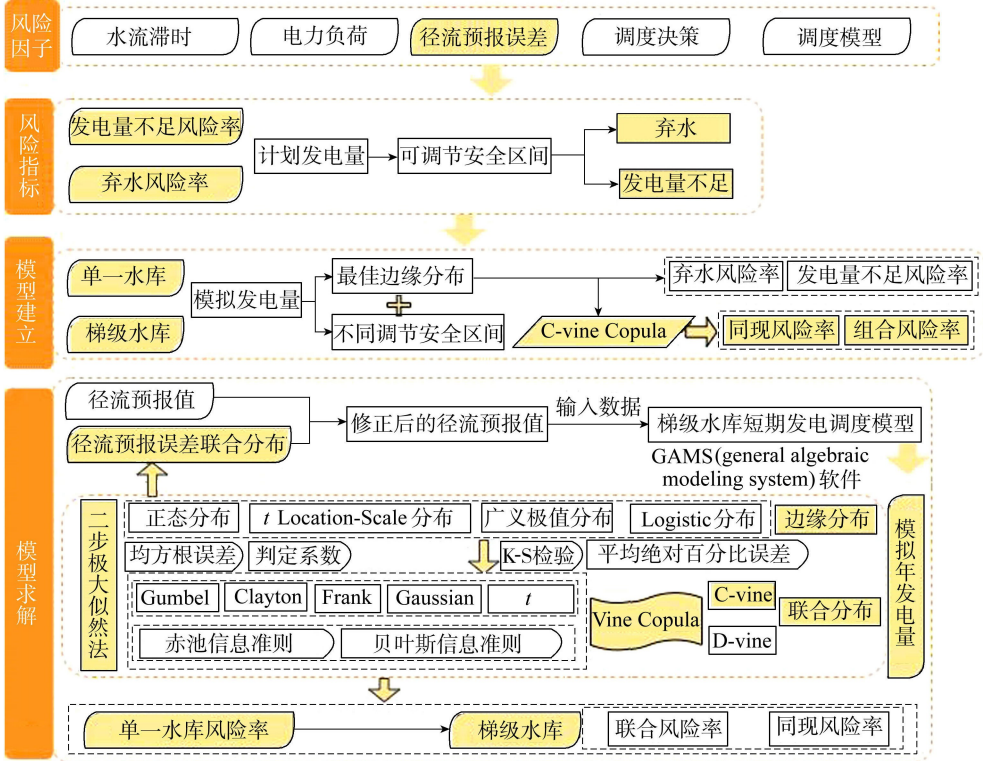


图 2 基于 Vine Copula 的梯级水库短期发电调度风险估计模型

Fig. 2 Vine Copula-based risk estimation model for Cascade Reservoir short-term power generation operation

电机会损失;当实际来流量远远小于径流预报值时,水库因来水不足无法按照发电计划运行,此时会造成水库出力受阻等情况。

为研究日径流预报误差对梯级水库发电调度风险产生的累积效应,以3座梯级水库为研究对象,计算3座水库年发电量,选取发电量不足风险率、弃水风险率为风险指标。参考张佳新^[18]对水库发电调度风险的研究方法,当水库发电量位于可调节安全区间内,水库可通过自身的调节能力调节来水过程使水库按照发电计划运行;当水库发电量小于可调节安全区间下限时,水库发电量小于计划发电量,无法完成发电计划,水库将面临发电量不足风险;当水库发电量大于可调节安全区间上限时,水库来水流量大于预报径流,为防止水库超越水位上限的风险、保护大坝自身安全,水库只能被迫弃水,水库存在弃水风险。发电量不足风险率和弃水风险率的计算公式为

$$P_b = \varphi(E_d < E_l) / D \quad (1)$$

$$P_q = \varphi(E_d > E_u) / D \quad (2)$$

式中: P_b 为发电量不足风险率; P_q 为弃水风险率; E_d 为水库模拟年发电量; E_l 为水库可调节安全区间下限; E_u 为水库可调节安全区间上限; $\varphi(\cdot)$ 为符合条件的调度次数函数; D 为模拟总次数。

1.2.3 模型建立

以修正后的日径流预报序列为水库调度模型输入数据,输出一系列水库可能的模拟年发电量,以其为研究对象,从正态分布、 t Location-Scale 分布、广义极值分布和 Logistic 分布中选择拟合效果最好的分布作为最佳边缘分布;进而基于 Vine Copula 构建梯级水库模拟年发电量联合分布,其分布函数见式(3);根据建立的联合分布模型,结合梯级水库短期发电调度发电量不足风险率、弃水风险率等风险指标,进一步分析梯级水库发电量不足、弃水联合风险率与同现风险率^[19-21],梯级水库发电量不足联合风险率指任意一个水库存在发电量不足风险时的可能性,梯级水库发电量不足同现风险率指梯级水库同时存在发电量不足风险的可能性;梯级水库弃水联合风险率、弃水同现风险率同理。单一水库发电量不足风险率、弃水风险率计算公式见式(4)~(5),以3座水库为例,梯级水库发电量不足、弃水联合风险率与同现风险率计算公式见式(6)~(9)。

$$f(E_1, E_2, E_3) = c(u_1, u_2, u_3) f_1(E_1) f_2(E_2) f_3(E_3) \quad (3)$$

$$P(E_1 < E_l) = u_{l1} \quad (4)$$

$$P(E_1 > E_u) = 1 - u_{u1} \quad (5)$$

$$P(E_1 < E_{l1} \cup E_2 < E_{l2} \cup E_3 < E_{l3}) = u_{l1} + u_{l2} + u_{l3} - C(u_{l1}, u_{l2}) - C(u_{l1}, u_{l3}) - C(u_{l2}, u_{l3}) + C(u_{l1}, u_{l2}, u_{l3}) \quad (6)$$

$$P(E_1 < E_{l1} \cap E_2 < E_{l2} \cap E_3 < E_{l3}) = C(u_{l1}, u_{l2}, u_{l3}) \quad (7)$$

$$P(E_1 > E_{u1} \cap E_2 > E_{u2} \cap E_3 > E_{u3}) = 1 - u_{u1} - u_{u2} - u_{u3} + C(u_{u1}, u_{u2}) + C(u_{u1}, u_{u3}) + C(u_{u2}, u_{u3}) - C(u_{u1}, u_{u2}, u_{u3}) \quad (8)$$

$$P(E_1 > E_{u1} \cup E_2 > E_{u2} \cup E_3 > E_{u3}) = 1 - C(u_{u1}, u_{u2}, u_{u3}) \quad (9)$$

式中: $f_1(\cdot)$ 、 $f_2(\cdot)$ 、 $f_3(\cdot)$ 为3座水库的发电量边缘密度函数; E_1 、 E_2 、 E_3 为3座水库发电量; u_1 、 u_2 、 u_3 为3座水库发电量边缘分布函数; u_{l1} 、 u_{l2} 、 u_{l3} 为3座水库发电量下限对应的概率; u_{u1} 、 u_{u2} 、 u_{u3} 为3座水库发电量上限对应的概率; $c(\cdot)$ 为发电量联合概率密度函数; $C(\cdot)$ 为发电量联合分布函数。

1.2.4 模型求解

首先,采用 Vine Copula 对各水文站日径流预报误差进行随机抽样,得到各水文站各时刻修正后的径流预报值,并根据各水文站流量与水库入库流量之间的关系,转化为各水库入库径流模拟序列;其次,以模拟入库日径流为输入数据,采用 GAMS 软件求解梯级水库短期发电调度模型,得到各水库的调度过程;再次,以各水库模拟年发电量为研究对象,采用二步极大似然法求解梯级水库模拟年发电量联合分布;最后,根据水库可调节安全区间,基于构建的梯级水库短期发电调度风险估计模型,计算水库发电量不足、弃水风险率以及水库群发电量不足、弃水联合风险率和同现风险率。具体步骤如下:

步骤1 基于 Vine Copula 构建的径流预报误差联合分布,随机模拟产生各水文站调度期 T 内的径流预报误差序列 X' ,并对预报径流序列进行修正,并根据各水库入库径流与水文站流量之间的关系,得到水库 i 模拟入库径流序列 $Q_i = \{Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{im}\} (i=1, 2, \dots, m)$ 。

步骤2 以梯级水库发电量最大为目标函数,求解梯级水库短期发电调度模型,得到水库 i 模拟入库径流序列 Q_i 下的模拟年发电量 $e_i = \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{im}\}$ 。

步骤3 不断重复步骤1、2,得到足够多的梯级水库模拟年发电量序列 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 。

步骤4 采用二步极大似然法估计各水库模拟年发电量序列 E 的边缘分布、联合分布参数,并根据拟合指标选取最佳边缘分布,进而基于 C-vine Copula 构建梯级水库群模拟年发电量联合分布

模型。

步骤 5 基于各水库模拟年发电量最佳边缘分布、梯级水库模拟年发电量联合分布,假定数个水库可调节安全区间,根据式(4)~(9)计算不同水库可调节安全区间下,各水库发电量不足风险率、弃水风险率及梯级水库发电量不足、弃水联合风险率、同现风险率。

2 实例应用

2.1 研究区概况

长江干流宜昌市以上为上游,长 4 504.0 km,占长江全长的70.4%,控制流域面积100.0 万 km²,主要支流有雅砻江、岷江、沱江、嘉陵江、乌江,流域内建有众多的水文站。屏山水文站位于金沙江、岷江汇口上游59.5 km处,是金沙江主要控制站,集水面积45.9 万 km²,占金沙江流域面积97.0%,溪洛渡、向家坝坝址流量可通过屏山水文站利用集水面积插值得到;朱沱水文站位于重庆江津区朱沱镇,是长江上游控制站;寸滩水文站位于嘉陵江与长江汇合口下游7.5 km处,集水面积86.7 万 km²,为长江上游控制站;武隆水文站为乌江控制站,至河口距离为71.0 km,集水面积为83 035.0 km²,占乌江流域集水面积的94.4%。因此,本文选取屏山站、朱沱站、寸滩站及武隆站 4 座水文站 2014 年 1 月 1 日至 2016 年12 月 31 日(2014、2015、2016 为平水年)的日径流预报值、实际值,计算各水文站径流预报误差相对值;并将其作为溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库发电调度风险因子,其中,溪洛渡、向家坝水库的入库径流主要通过屏山站流量根据流域汇流面积进行推求,三峡水库入库径流为寸滩站和武隆站的流量之和,考虑到溪洛渡、向家坝水库与三峡水库之间距离较远,利用朱沱站反映区间径流;进而通过建立梯级水库发电调度风险估计模型,计算梯级水库发电量不足风险率、弃水风险率。3 座梯级水库的参数见表 1,4 座水文站地理位置见图 3。

表 1 3 座水库特征参数

Table 1 Characteristic parameters of three reservoirs					
水库	调节能力	死水位/ m	正常蓄 水位/m	兴利库容/ 亿 m ³	装机容量/ MW
溪洛渡	不完全年	540	600	64.60	13 860
向家坝	不完全季	370	380	9.03	6 400
三 峡	季	155	175	165.00	22 500

2.2 径流预报误差分析

计算屏山站、朱沱站、寸滩站及武隆站日径流预报误差序列,并从正态分布、Logistic 分布、*t* Location-Scale 分布和广义极值分布中采用 K-S 检

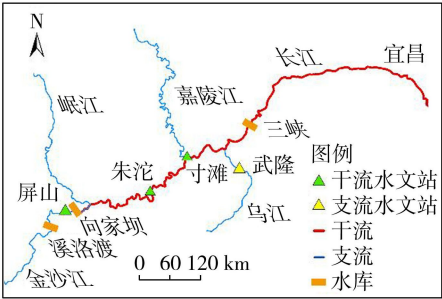


图 3 长江上游 4 座水文站地理位置

Fig. 3 Geographical locations of four hydrological stations in the upper Yangtze River

验、均方根误差、决定系数和平均绝对百分比误差优选,得出干流屏山站、朱沱站和寸滩站均选择广义极值分布作为日径流预报误差最佳边缘分布;支流武隆站选择 *t* Location-Scale 分布作为日径流预报误差最佳边缘分布。利用 Pearson 相关系数、Kendall 相关系数和 Spearman 相关系数对 4 座水文站日径流预报误差进行相关分析。在 $\alpha=0.01$ 显著性水平下,长江上游 4 座水文站日径流预报误差序列两两之间均存在相关关系。通过 C-vine Copula 构建长江上游 4 座水文站日径流预报误差联合分布,并将 D-vine Copula 作为对比模型,函数参数如表 2 所示。根据 AIC、BIC 准则及 K-S 检验结果,C-vine、D-vine Copula 的 *P* 值均大于 0.05,通过 K-S 检验;C-vine Copula 的 AIC、BIC 值均小于 D-vine Copula,即 C-vine Copula 拟合效果优于 D-vine Copula,因此选择 C-vine Copula 构建长江上游 4 座水文站日径流预报误差联合分布。

表 2 C-vine Copula 和 D-vine Copula 函数参数

Table 2 Parameters of C-vine Copula and D-vine Copula

树结构	连接边		Copula 类型		参数估计值	
	C-vine	D-vine	C-vine	D-vine	C-vine	D-vine
T_1	3,1	1,2	Frank	Frank	$\theta_{11}=2.02$	$\theta_{21}=-2.05$
	3,2	3,1	Frank	Frank	$\theta_{12}=-1.69$	$\theta_{22}=2.02$
	4,3	4,3	Gumbel	Gumbel	$\theta_{13}=1.44$	$\theta_{23}=1.44$
T_2	2,1;3	3,2;1	Frank	<i>t</i>	$\theta_{14}=-1.63$	$\rho_{24}=-0.16$
	4,2;3	4,1;3	Clayton270	Gumbel	$\theta_{15}=-0.19$	$\theta_{25}=1.02$
T_3	4,1;2;3	4,2;3;1	Frank	Clayton270	$\theta_{16}=-0.18$	$\theta_{26}=-0.21$

注:连接边中的 1、2、3、4 分别表示屏山站、朱沱站、寸滩站和武隆站日径流预报误差;Clayton270 表示 Clayton Copula 函数旋转了 270°; θ 表示相依结构。

根据建立的 C-vine Copula 联合分布对长江上游 4 座水文站日径流预报误差进行随机模拟,将模拟序列与原始序列均值、变差系数、偏态系数等特征值之间进行对比,结果如表 3 所示。由表 3 可见,模拟序列与实际序列的均值、变差系数和偏态系数均相差不大,其中朱沱站模拟序列的均值、变差系数与实际序列一致;而武隆站模拟序列与实际序列的特征值之间存在一定差距,分析原因是构建边缘分布

模型时所选的最佳边缘分布虽然通过检验,但其拟

表 3 随机模拟误差序列与实际误差序列特征值对比

Table 3 Comparison of characteristic values between randomly simulated error and actual error sequences

水文站	均值		变差系数		偏态系数	
	实际	模拟	实际	模拟	实际	模拟
屏山站	0.208	0.207	2.187	2.191	0.788	0.803
朱沱站	-0.029	-0.029	-2.527	-2.527	0.357	0.374
寸滩站	0.091	0.092	1.147	1.142	0.592	0.481
武隆站	0.452	0.291	1.651	4.701	3.683	9.739

合精度仍低于其他水文站。

进一步分析模拟序列与实际序列的相关性,模拟序列与实际序列的相关系数见表 4。由表 4 可见,寸滩站与武隆站日径流预报误差模拟序列与实际序列日径流预报误差 Pearson 相关系数相差略大,究其原因为在各站点构建最佳边缘分布时,武隆站拟合精度最低,寸滩站次之。其余两两水文站之间相关系数较为接近,特别是屏山站与武隆站日径流预报误差的 Kendall 相关系数及 Spearman 相关系数几乎相同。结合模拟径流预报与实际径流预报误差序列的特征值相差不大,相关系数基本相同,可认为基于 C-vine Copula 模拟的长江上游日径流预报误差序列能较好地反映实际径流预报误差序列的特征,同时能为梯级水库短期发电调度风险分析提供依据。

表 4 模拟序列与实际序列的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between simulated and actual sequences

水文站组合	Pearson 相关系数		Kendall 相关系数		Spearman 相关系数	
	实际	模拟	实际	模拟	实际	模拟
屏山站与朱沱站	-0.32	-0.29	-0.22	-0.22	-0.32	-0.33
屏山站与寸滩站	0.32	0.28	0.22	0.20	0.32	0.29
屏山站与武隆站	0.15	0.19	0.10	0.10	0.15	0.15
朱沱站与寸滩站	-0.28	-0.24	-0.19	-0.17	-0.28	-0.25
朱沱站与武隆站	-0.23	-0.25	-0.15	-0.14	-0.23	-0.21
寸滩站与武隆站	0.44	0.59	0.31	0.34	0.44	0.49

2.3 单一水库短期发电调度风险分析

径流预报是水库调度方案制定的依据,假定水

库根据预报径流进行发电调度得到的发电量为计划发电量 E^* , 以实际径流过程为梯级水库短期发电调度模型输入数据得到的年发电量记为实测发电量。基于随机模拟产生一系列屏山站、朱沱站、寸滩站和武隆站日径流预报误差模拟值,对各水文站日径流预报值进行修正,得到修正后的径流预报值,并根据水文站流量与水库入库流量之间的关系得到长江上游溪洛渡、向家坝和三峡水库入库流量模拟值,作为梯级水库短期发电调度模型的输入数据,以梯级水库发电量最大为目标,采用 GAMS 软件求解梯级水库短期发电调度模型,得到一系列水库模拟年发电量值,统计结果见表 5。由表 5 可见,溪洛渡、向家坝和三峡水库实测发电量、计划发电量均位于模拟年发电量最小、最大值之间,且模拟平均发电量(除三峡水库外)与计划发电量相差不大,且 3 座水库模拟年发电量平均值之和与实测发电量之和基本相同。

表 5 3 座水库模拟年发电量统计 单位:亿 kW · h

Table 5 Statistical of simulated annual power generation for three Gorges reservoirs unit: $10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$

水库	实测发电量	计划发电量	模拟最大值	模拟最小值	平均值
溪洛渡	549.90	612.67	707.38	486.82	597.19
向家坝	287.41	315.36	356.21	252.19	305.05
三 峡	890.74	904.45	943.20	654.53	825.04
总 计	1728.05	1832.48	2006.79	1393.54	1727.28

以溪洛渡、向家坝和三峡水库一系列的模拟年发电量值为研究对象,首先研究单一水库发电调度风险。基于溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年发电量,根据均方根误差、决定系数和平均绝对百分比误差指标、K-S 检验,从正态分布、 t Location-Scale 分布、广义极值分布和 Logistic 分布中选择各水库模拟年发电量最佳边缘分布。溪洛渡、向家坝和三峡水库各边缘分布的拟合效果见图 4,拟合指标值见表 6。经计算,溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年发电量的正态分布、 t Location-Scale 分布、广义极值分布和 Logistic 分布的 P 值均大于 0.05,通过 K-S 检验。

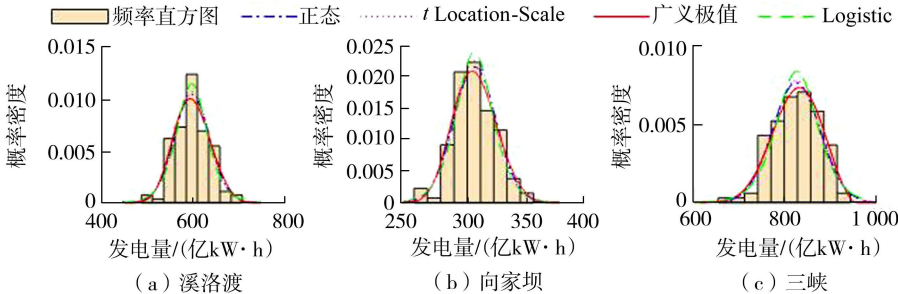


图 4 3 座水库模拟年发电量边缘分布拟合曲线

Fig. 4 Probability density curve of simulated annual power generation at three reservoirs

由图 4 可见,溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年

表 6 3 座水库各边缘分布拟合指标值

Table 6 Fitted marginal distribution parameters for three reservoirs

水库	分布	R^2	RMSE/ 亿 kW · h	MAPE/%
溪洛渡	正态	0.999	0.021	0.779
	t Location-Scale	0.999	0.022	0.781
	广义极值	0.999	0.019	0.754
	Logistic	0.998	0.026	0.826
向家坝	正态	0.999	0.020	0.934
	t Location-Scale	0.999	0.020	0.878
	广义极值	0.999	0.017	0.878
	Logistic	0.999	0.021	0.832
三 峡	正态	0.998	0.040	1.139
	t Location-Scale	0.998	0.040	1.122
	广义极值	0.998	0.033	1.071
	Logistic	0.997	0.040	1.110

发电量的正态、 t Location-Scale、广义极值和 Logistic 分布拟合曲线相差不大,其中 Logistic 分布的峰值均较其他分布和直方图偏高,广义极值分布峰值稍低于其他分布,但其分布中心与直方图更为贴近。结合表 6 中溪洛渡、向家坝和三峡水库各分布模型拟合指标值,3 座水库模拟年发电量的广义极值分布模型均优于其他分布,因此选择广义极值分布作为溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年发电量的最佳边缘分布,其分布函数见式(10)~(12)。此外,溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年发电量 E_1 、 E_2 和 E_3 主要范围为 550 亿~650 亿、280 亿~340 亿、750 亿~910 亿 kW · h,若以计划发电量 E^* 为参照,则为 $0.90E_1^* \sim 1.06E_1^*$ 、 $0.89E_2^* \sim 1.08E_2^*$ 、 $0.83E_3^* \sim 1.01E_3^*$,作为 3 座水库可调节安全区间,3 座水库实测发电量分别为 $0.90E_1^*$ 、 $0.91E_2^*$ 和 $0.98E_3^*$,位于分布边缘,属于极端情况,此时通过水库调节难以符合电网需求,需要协调电力调度部门进行调节。

$$F(E_1) = \exp\{-[1 + 0.25(E_1 - 583.05)/38.35]^{1/-0.25}\} \tag{10}$$

$$F(E_2) = \exp\{-[1 + 0.23(E_2 - 298.14)/18.24]^{1/-0.23}\} \tag{11}$$

$$F(E_3) = \exp\{-[1 + 0.37(E_3 - 808.82)/54.32]^{1/-0.37}\} \tag{12}$$

为分析不同可调节安全区间下各水库的弃水风险率、发电量不足风险率,需假定数个水库可调节安全区间。参考张佳新^[18]对水库发电调度风险的研究方法,在上述各水库发电量集中的区间基础上进行两次缩放,假定溪洛渡水库的可调节安全区间分别为 $0.90E_1^* \sim 1.06E_1^*$ 、 $0.93E_1^* \sim 1.03E_1^*$ 、 $0.96E_1^* \sim 1.00E_1^*$,记为 A1、A2 和 A3;向家坝水库的可调节

安全区间分别为 $0.89E_2^* \sim 1.08E_2^*$ 、 $0.92E_2^* \sim 1.05E_2^*$ 、 $0.95E_2^* \sim 1.02E_2^*$,记为 B1、B2 和 B3;三峡水库的可调节安全区间分别为 $0.83E_3^* \sim 1.01E_3^*$ 、 $0.86E_3^* \sim 0.98E_3^*$ 、 $0.89E_3^* \sim 0.95E_3^*$,记为 C1、C2 和 C3。根据式(4)(5)计算各水库考虑入库径流预报误差时水库发电量不足、弃水风险率,结果见表 7。

表 7 3 座水库可调节安全区间水库短期发电调度风险

Table 7 Short-term power generation operation risk of three reservoirs' adjustable safety margins

水库	可调节 安全区间	下限发电量/ 亿 kW · h	上限发电量/ 亿 kW · h	发电量不足 风险率/%	弃水 风险/%
溪洛渡	A1	551.40	649.43	12.04	9.83
	A2	569.78	631.05	24.82	19.98
	A3	588.16	612.67	41.76	34.55
向家坝	B1	280.67	340.59	9.33	3.40
	B2	290.13	331.13	21.90	9.07
	B3	299.59	321.67	39.75	19.36
三 峡	C1	750.69	913.49	8.51	3.41
	C2	777.83	886.36	18.67	12.35
	C3	804.96	859.23	34.21	27.47

由表 7 可见,对于溪洛渡水库,当可调节安全区间为 A1,水库对应的发电量不足风险率、弃水风险率最小,分别为 12.04%、9.83%;当可调节安全区间为 A3 时,水库可调节范围为 $0.04E_1^*$,面临的风险最大,分别为 41.76%、34.55%。对于向家坝水库,当可调节安全区间为 B1 时,水库面临的发电调度风险最小,分别为 9.33%、3.40%;当可调节安全区间为 B3 时,水库可调节范围仅为 $0.07E_2^*$,发电量不足风险率、弃水风险率最大,分别为 39.75%、19.36%。对于三峡水库,当水库可调节安全区间为 C1 时,面临的发电量不足风险率、弃水风险率最小,分别为 8.51%、3.41%;当可调节安全区间为 C3 时,水库可调节范围仅为 $0.06E_3^*$,发电量不足风险率、弃水风险率最大,分别为 34.21%、27.47%。3 个水库都符合“随着可调节安全区间变窄,水库发电量不足、弃水风险率逐渐增大”的规律。此外,溪洛渡水库面临的发电量不足、弃水风险率均高于向家坝水库、三峡水库,向家坝水库和三峡水库的发电量不足、弃水风险率相差不大。

2.4 梯级水库短期发电调度风险分析

基于溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年发电量最佳边缘分布 $u_{溪}$ 、 $u_{向}$ 和 $u_{三}$,根据式(3),利用 C-vine Copula 构建溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年发电量的联合分布,其参数估计值见表 8,其联合概率密度函数、联合分布函数及联合概率等值线分别见图 5~7。

由图 5、6 可见,在树 T_1 结构中,溪洛渡-向家坝水库、溪洛渡-三峡水库模拟年发电量 t Copula 函数

的密度函数左右对称,两者具有相似性。溪洛渡-向家坝、溪洛渡-三峡水库模拟年发电量联合分布具有

表 8 3 座水库模拟年发电量 C-vine Copula 参数估计值

Table 8 Parameter estimates for C-vine Copula of simulated annual power generation at three reservoirs

树结构	连接边	Copula 类型	参数估计值
T_1	1,2 3,1	t t	$\rho_{11}=0.99, k_{11}=7.98$ $\rho_{12}=1.00, k_{12}=5.35$
T_2	3,2;1	Gumbel	$\theta_{21}=1.61$

注:连接边中的 1,2,3 分别表示溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年发电量; ρ 表示相关系数; k 表示自由度参数。

对称的尾部相关关系。从联合概率密度函数可以看出溪洛渡和向家坝水库、溪洛渡和三峡水库不同模拟年发电量时对应的联合概率。例如,对于溪洛渡和向家坝水库,当溪洛渡、向家坝水库模拟年发电量分别为 600 亿、290 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 时,其联合概率为 0.2,即溪洛渡和向家坝水库模拟年发电量分别小于 600 亿、290 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 时的概率为 0.2;对于溪洛渡和三峡水库,当溪洛渡、三峡水库模拟年发电量分别为 600 亿、840 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 时,其联合概率为 0.6,即溪洛渡和三峡水库模拟年发电量分别小于 600 亿、

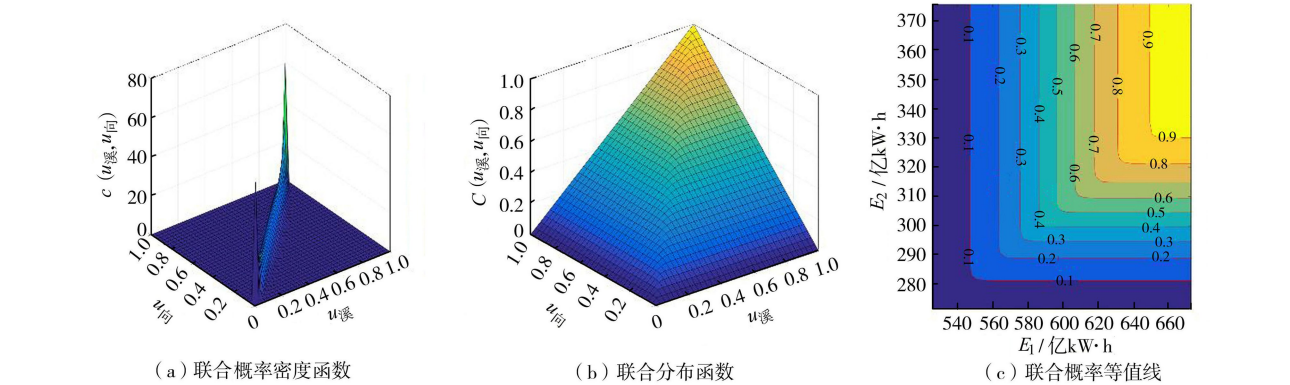


图 5 溪洛渡-向家坝水库模拟年发电量二元 t Copula 函数拟合结果

Fig. 5 Fitting results of bivariate t -Copula function for simulated annual power generation of Xiluodu-Xiangjiaba reservoirs

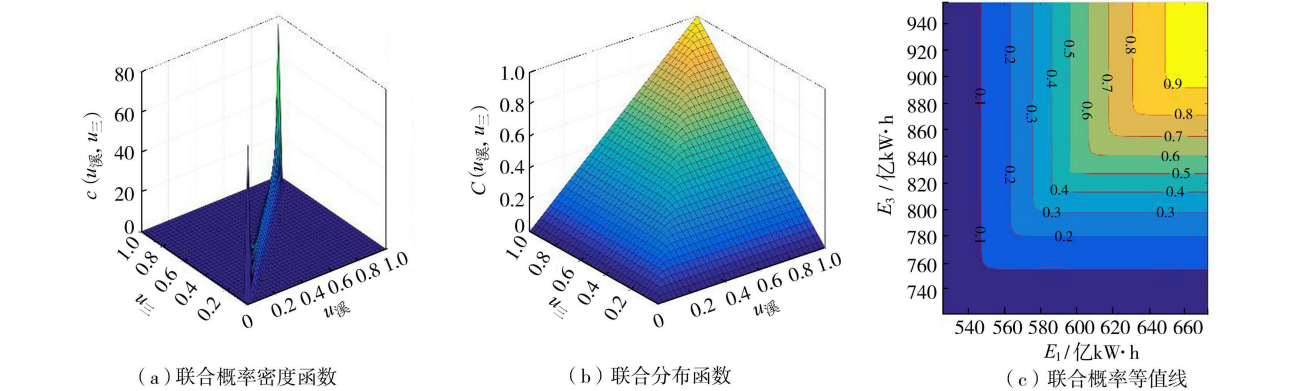


图 6 溪洛渡-三峡水库模拟年发电量二元 t Copula 函数拟合结果

Fig. 6 Fitting results of bivariate t -Copula function for simulated annual power generation of Xiluodu-Three Gorges reservoirs

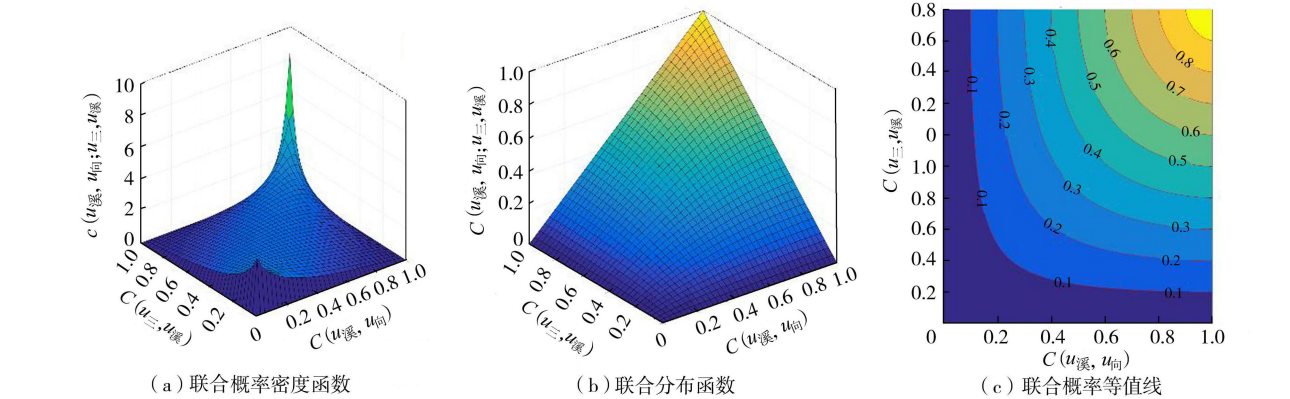


图 7 树 T_2 最优 Copula 函数的拟合结果

Fig. 7 Fitting results of optimal Copula function in Tree T_2

840 亿 kW · h 时的概率为 0.6。由图 7 可见,以溪洛渡-向家坝、溪洛渡-三峡水库的联合分布作为边缘分布构建的树 T_2 结构,联合分布采用 Gumbel Copula 函数,概率密度函数尾部不对称,上尾高,下尾低,呈现 J 字形,对边缘分布的上尾相关性较为敏感。基于树 T_1 结构中的溪洛渡-向家坝、溪洛渡-三峡模拟年发电量联合概率等值线,结合树 T_2 结构联合概率等值线,可得到溪洛渡、向家坝和三峡水库不同模拟年发电量下的联合概率。例如,当溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年发电量分别为 600 亿、290 亿和 840 亿 kW · h 时,溪洛渡-向家坝边缘分布的函数值为 0.2,溪洛渡-三峡水库边缘分布的函数值为 0.6,联合概率为 0.1,即溪洛渡、向家坝和三峡水库模拟年发电量分别小于 600 亿、290 亿和 840 亿 kW · h 的概率为 0.1。

将溪洛渡、向家坝和三峡水库的可调节安全区间进行组合,共得到 27 种溪洛渡、向家坝和三峡水库可调节安全区间组合,采用式(6) ~ (9) 计算 3 座水库不同可调节安全区间组合下的发电量不足、弃水联合风险率和同现风险率,结果见表 9。由表 9 可见,梯级水库 27 种水库可调节安全区间组合中,风险率最大值为 47.91%,对应的水库调节区间为 A3B3C3 时面临的弃水联合风险率,即溪洛渡、向家坝和三峡水库任意一个水库存在弃水风险的可能性,此时各单一水库对应的可调节区间最小;风险率最小值为 2.39%,其对应的是水库可调节安全区间为 A1B1C1 时面临的发电量不足同现风险率,即溪洛渡、向家坝和三峡水库同时存在发电量不足风险的可能性,此时各单一水库对应的可调节安全区间均为最大值;当溪洛渡水库可调节安全区间为 A3 时,向家坝水库、三峡水库不同可调节安全区间下的弃水联合风险率相差不大,均处于较高的水平。对于溪洛渡、向家坝和三峡水库 27 种可调节安全区间组合下梯级水库群的风险而言,无论是发电量不足风险率还是弃水风险率,其联合风险率均比同现风险率大,这与联合风险率求解事件并集、同现风险率求解事件交集的规律一致;从风险指标来看,梯级水库弃水联合风险率、同现风险率均比同组合下的发电量不足联合风险率、同现风险率偏高;随着梯级水库可调节范围逐渐变小,无论是发电量不足还是弃水联合风险率、同现风险率均变大,这跟水库实际调度规律一致。水库自身调节库容的大小在负荷调整中起着重要的作用,水库调节库容越大,则可调节的来水流量越大,水库也越能按照计划发电量运行,导致其承担的风险越小。

3 结 论

a. 基于能反映变量主次关系的 C-vine Copula

构建的联合分布较变量之间相对独立的 D-vine

表 9 3 座水库不同可调节安全区间组合下弃水、发电量不足风险率

Table 9 Risk rates of spillage and insufficient power generation for three reservoirs with different adjustable safety margins				
3 座水库可调节安全区间组合	弃水		发电量不足	
	联合风险率/%	同现风险率/%	联合风险率/%	同现风险率/%
A1B1C1	14.72	7.30	6.82	2.39
A1B1C2	16.62	7.67	12.64	3.10
A1B1C3	29.70	5.63	28.18	3.10
A1B2C1	15.14	8.10	16.34	2.93
A1B2C2	17.00	12.97	13.91	3.85
A1B2C3	29.92	10.95	26.04	3.85
A1B3C1	22.45	6.49	34.18	2.93
A1B3C2	23.78	14.23	31.57	3.85
A1B3C3	34.13	16.47	31.61	3.85
A2B1C1	29.02	11.46	19.46	2.42
A2B1C2	29.02	12.44	19.82	4.31
A2B1C3	34.46	10.39	30.09	5.20
A2B2C1	29.02	12.41	21.31	4.35
A2B2C2	29.02	17.93	15.33	8.35
A2B2C3	34.46	16.06	23.34	10.39
A2B3C1	29.87	12.06	36.06	4.80
A2B3C2	29.87	20.99	30.46	9.36
A2B3C3	35.16	25.80	26.71	11.72
A3B1C1	47.90	15.77	36.39	2.42
A3B1C2	47.90	16.74	36.76	4.32
A3B1C3	47.90	16.75	38.74	6.31
A3B2C1	47.90	16.72	37.69	4.44
A3B2C2	47.90	22.24	31.82	8.54
A3B2C3	47.90	22.42	33.25	13.39
A3B3C1	47.91	16.75	40.76	6.17
A3B3C2	47.91	25.68	37.01	12.59
A3B3C3	47.91	32.70	29.90	20.97

Copula 构建的联合分布拟合效果更好;随机模拟产生的屏山站、朱沱站和寸滩站日径流预报误差模拟序列与实际径流预报误差序列的均值、变差系数、偏态系数、相关系数等特性相差不大。

b. 单一水库发电量不足风险率、弃水风险率的最大值为 41.76%,对应溪洛渡水库可调节安全区间范围为 $0.96E_1^* \sim 1.00E_1^*$ 时的发电量不足风险率,此时溪洛渡水库的年发电量可调节幅度仅为 24.51 亿 kW · h。

c. 对于梯级水库而言,溪洛渡、向家坝和三峡水库可调节安全区间组合中,梯级水库弃水、发电量不足联合风险率和同现风险率最大值为 47.91%,此时溪洛渡、向家坝和三峡水库的可调节安全区间最小,代表 3 座水库任意一座水库发生弃水风险时的可能性,风险率最小值为 2.39%;随着水库可调节安全区间范围越大,梯级水库发电量不足、弃水联合风险率和同现风险率越小,即水库调节库容越大,其

承担的风险也就越小。

参考文献：

[1] 孙周亮,刘艳丽,张建云,等.中长期径流预报研究进展与展望[J]. 水资源保护,2023,39(2):136-144. (SUN Zhouliang, LIU Yanli, ZHANG Jianyun, et al. Research progress and prospect of mid-long term runoff prediction [J]. Water Resources Protection,2023,39(2):136-144. (in Chinese))

[2] 梁华男.基于不同风险因素组合的水库防洪风险分析[D]. 西安:长安大学,2016.

[3] 丁紫玉,方国华,毛莺池,等.考虑发电、弃水风险的梯级水电站风险预控方法研究[J]. 水资源保护,2024,40(2):140-149. (DING Ziyu, FANG Guohua, MAO Yingchi, et al. Research on risk control methods for cascade hydropower station reservoirs considering power generation and water spillage risks[J]. Water Resources Protection,2024,40(2):140-149. (in Chinese))

[4] 钟文杰,陈璐,周建中,等.考虑随机来水的水电站中长期发电调度多重风险分析[J]. 长江科学院院报,2020,37(10):37-44. (ZHONG Wenjie, CHEN Lu, ZHOU Jianzhong, et al. Multiple risk analysis of medium- and long-term hydropower reservoir operation in consideration of stochastic inflow[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(10):37-44. (in Chinese))

[5] 武文杰.考虑入库径流预报误差的水电站短期发电调度及模糊风险分析[D]. 武汉:华中科技大学,2018.

[6] 宋松柏. Copula 函数在水文多变量分析计算中的问题[J]. 人民黄河,2019,41(10):40-47. (SONG Songbai. Discussion on application copula functions to multivariate hydrological analysis calculation[J]. Yellow River,2019,41(10):40-47. (in Chinese))

[7] TAO Yuwei, WANG Yuankun, WANG Dong, et al. A C-vine Copula framework to predict daily water temperature in the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology,2021,598:126430.

[8] 刘源,纪昌明,张验科,等.基于 Vine Copula 的短期径流预报不确定性分析[J]. 水力发电学报,2022,41(7):95-105. (LIU Yuan, JI Changming, ZHANG Yanke, et al. Vine Copula-based analysis on uncertainty of short-term streamflow forecasting [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2022,41(7):95-105. (in Chinese))

[9] 何朝飞,王晓云,陈伏龙,等.玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1):15-21. (HE Chaofei, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Risk analysis of snowmelt flood under different combination of flood peaks and flood volumes in Manas River[J]. Advances in Science and Technology of

Water Resources,2023,43(1):15-21. (in Chinese))

[10] 潘俞如.基于 MVTV Copula 方法的多风电场出力建模及其在无功优化中的应用[D]. 成都:西南交通大学,2020.

[11] CAO Jia, YAN Zheng. Probabilistic optimal power flow considering dependences of wind speed among wind farms by Pair-Copula method [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2017,84:296-307.

[12] 彭杨,张继鹏,时玉龙.基于多维 Copula 函数的日含沙量过程随机模拟方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2019,27(6):1235-1247. (PENG Yang, ZHANG Jipeng, SHI Yulong. Stochastic simulation of daily suspended sediment concentration sequences using multivariate copula function[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2019,27(6):1235-1247. (in Chinese))

[13] 冯凯,李彦彬,许桂平,等.西北地区农业干旱对气象干旱的时空多角度响应[J]. 水资源保护,2023,39(2):59-69. (FENG Kai, LI Yanbin, XU Guiping, et al. Spaitotemporal and multi-angle response of agricultural drought to meteorological drought in Northwest China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2) : 59-69. (in Chinese))

[14] 范敏韬,谢宇莹,余贞燕,等.基于 Pair-Copula 结构的珠江三角洲河网区水位空间依赖性分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):222-228. (FAN Mintao, XIE Yuying, SHE Zhenyan, et al. Analysis of spatial dependence of water level in river network area of Pearl River Delta based on Pair-Copula construction [J]. Water Resources Protection,2023,39(3):222-228. (in Chinese))

[15] 曾文颖,徐明庆,宋松柏,等.基于 R-Vine Copula 函数的极端降水联合分布模型及风险识别[J]. 水资源保护,2022,38(6):96-103. (ZENG Wenying, XU Mingqing, SONG Songbai, et al. Joint probability distribution and risk identification of extreme precipitation based on R-Vine Copula function [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):96-103. (in Chinese))

[16] DONG Weichao, SUN Hexu, TAN Jianxin, et al. Regional wind power probabilistic forecasting based on an improved kernel density estimation, regular vine copulas, and ensemble learning[J]. Energy,2022,238:122045.

[17] 霍竟群,谢平,桑燕芳,等.相关系数准则对水文相依模型的适用性及验证[J]. 水力发电学报,2021,40(11):25-38. (HUO Jingqun, XIE Ping, SANG Yanfang, et al. Applicability of correlation coefficient information criterion to hydrological dependence models and its validation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(11):25-38. (in Chinese))

[18] 张佳新.入库径流过程预报误差随机模拟模型及应用研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2021.

[46] 张伟,庄子孟,孙慧超,等.我国城市内涝风险图编制关键问题及研究展望[J].水资源保护,2023,39(5):58-68. (ZHANG Wei,ZHUANG Zimeng,SUN Huichao,et al. Key issues and study prospect of urban waterlogging risk map in China[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):58-68. (in Chinese))

[47] 陈鹏,赵洪阳,张硕,等.城市暴雨内涝灾害居民避难行为规律研究[J].吉林师范大学学报(自然科学版),2020,41(2):134-140. (CHEN Peng,ZHAO Hongyang,ZHANG Shuo,et al. Study on the shelter behavior of residents in urban rainstorm and waterlogging disaster[J]. Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition),2020,41(2):134-140. (in Chinese))

[48] 乔贤玲,侯精明,张文晴,等.社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J].水利水电科技进展,2023,43(5):73-81. (QIAO Xianling, HOU Jingming, ZHANG Wenqing, et al. Community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):73-81. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-23 编辑:王芳)

(上接第26页)

[19] 王磊之,崔婷婷,李笑天,等.降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险[J].水资源保护,2022,38(4):110-116. (WANG Leizhi,CUI Tingting,LI Xiaotian, et al. Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 110-116. (in Chinese))

[20] 赵玲玲,张鑫辉,刘昌明,等.华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):157-163. (ZHAO Lingling, ZHANG Xinhui, LIU Changming, et al. Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood in a small and medium-sized basin of South China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):157-163. (in Chinese))

[21] 韩世亮,陈泰霖.气候变化影响下黄河上游梯级水库群未来发电量预测[J].水利水电科技进展,2022,42(3):32-38. (HAN Shiliang, CHEN Tailin. Future power generation prediction of cascade reservoirs in upper reaches of the Yellow River under climate change [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(3):32-38. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-14 编辑:王芳)

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV)是教育部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊。《水资源保护》以水资源、水环境、水生态为论述主题,以推动水科学技术进步为办刊宗旨,反映在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境和水生态等领域中科学技术的最新成就、重要进展和发展趋势,交流新的科研成果、技术经验和科技动态。收稿范围:水文水资源、水环境、水生态、水安全等相关文章。本刊开设的栏目有特约专家论坛、水文水资源、水环境水生态等。

《水资源保护》1985年创刊,经过近40年的努力,办刊成绩斐然,现为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国权威学术期刊,已被美国《工程索引》(Ei)、荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、波兰《哥白尼索引》(IC)等国外重要数据库收录,是中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国核心期刊数据库统计源期刊。据中国科学文献计量评价研究中心最新出版的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2023版)》,《水资源保护》复合影响因子为6.155,位居79种水利工程类期刊的第1位。

《水资源保护》一直以来都是水利界和环保界备受关注的重点期刊,是国内较有影响的水利期刊之一,主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科研技术人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊,160页,30元/册,全年共计180元,每逢单月20日出版,全国公开发行,邮发代号:28-298。

地址:210098 南京市西康路1号
电话:(025)83786642
电子信箱:bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn