

气候变化情景下杨房沟水电站未来设计洪水计算

刘金华¹, 唐俊龙¹, 张磊磊¹, 郭靖^{1*}, 刘正坤²

¹中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州

²华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉

Email: *guo_j2@hdec.com

收稿日期: 2021年7月8日; 录用日期: 2021年8月20日; 发布日期: 2021年8月30日

摘要

受气候变化和下垫面变化的影响, 水文序列的一致性遭到破坏, 传统基于水文序列一致性假设的水文频率计算方法已不再适用。针对变化环境下杨房沟水电站的非一致性设计洪水问题, 采用ASD降尺度模型进行未来降水预测, 基于贝叶斯模型加权平均法进行未来降水的不确定性分析, 应用GAMLSS模型对洪水序列进行非一致性洪水频率分析, 估算水电站未来设计洪水, 为变化环境下的水电站防洪设计及防洪调度提供科学依据。

关键词

设计洪水, 气候变化, 不确定性分析, GAMLSS模型, 杨房沟水电站

The Future Design Flood Estimation of Yangfanggou Hydropower Station under the Climate Change Scenario

Jinhua Liu¹, Junlong Tang¹, Leilei Zhang¹, Jing Guo^{1*}, Zhengkun Liu²

¹PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou Zhejiang

²School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Email: *guo_j2@hdec.com

Received: Jul. 8th, 2021; accepted: Aug. 20th, 2021; published: Aug. 30th, 2021

Abstract

The stationary of hydrologic series has been undermined by climate change and underlying surface

作者简介: 刘金华(1985-), 男, 江苏淮安人, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向是水文水资源规划。

*通讯作者。

文章引用: 刘金华, 唐俊龙, 张磊磊, 郭靖, 刘正坤. 气候变化情景下杨房沟水电站未来设计洪水计算[J]. 水资源研究, 2021, 10(4): 399-407. DOI: 10.12677/jwrr.2021.104043

change, and the traditional hydrologic frequency calculation method based on the hypothesis of hydrologic series stationary is no longer applicable. In view of the problem of non-stationary design flood of Yangfanggou hydropower station in the changing environment, this study uses the ASD downscaling model to forecast future precipitation, and uncertainty analysis of the precipitation based on Bayesian model averaging. Then, the future design flood of the projection is estimated by the GAMLSS model, which will provide scientific basis for design flood and flood control operation of hydropower station under changing environment.

Keywords

Design Floods, Climate Change, Uncertainty, GAMLSS Models, Yangfanggou Hydropower Station

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

水文时间序列是一定时期内气候因素、下垫面条件及人类活动等共同作用下的结果。传统水文频率分析工作的一个基本前提是水文序列样本满足一致性假设，然而在气候变化和人类活动的影响下，该假设越来越难以满足，水文序列存在非一致性已成为不争的事实[1]。2008年Milly [2]就已提出：流域水文情势的变化使得水文序列的“一致性”不复存在，水文序列的一致性假设受到了质疑。

近年来，国内外对非一致性水文序列的频率计算开展了大量的研究，主要集中在以下两方面：一是基于还原/还原途径，将不同时期不同环境的水文序列还原为同分布序列[3] [4]；二是采用时变矩法，假定水文变量的分布类型不变，分布的参数随时间或其它协变量变化[5] [6] [7] [8] [9]。无论是“还原”还是“还原”，所推求水文序列的概率分布只能反映过去或者现状环境下的水文情势，仍然无法反映未来水文情势。时变矩法在一定程度上可以避免此问题，其中，基于位置、尺度和形状参数的广义可加模型(简称 GAMLSS 模型) [6]，可以建立水文变量的统计参数与协变量之间的统计关系，是目前应用最为广泛的非一致性水文频率分析方法。为此，本文选用第五次耦合模式比较计划(CMIP5)的未来3种典型排放浓度(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)，采用多种全球气候模式(GCM)进行未来不同情景降水的预测，并以降水为协变量，采用 GAMLSS 模型进行杨房沟水电站时变设计洪水计算，为该水电站的防洪安全提供科学依据。

2. 流域概况及数据资料

2.1. 流域概况

杨房沟水电站位于四川省凉山彝族自治州木里县境内的雅砻江干流处(101°13'E, 28°35'N)，是雅砻江中游河段“一库七级”开发方案中的第六级水电站，上游为孟底沟水电站，下游为卡拉水电站。杨房沟水电站坝址位于雅江水文站(上游)与麦地龙水文站(下游)两个控制断面之间，集水面积为 80,880 km²，设计洪峰流量为 9320 m³/s，校核洪峰流量为 11,200 m³/s。雅江水文站设立于 1947 年 12 月，麦地龙水文站设立于 2000 年 6 月，其中麦地龙水文站为杨房沟水电站设计代表站，该站控制面积为 81,161 km²。杨房沟水电站坝址以上流域(以下简称研究区域)水系概化图如图 1 所示。

2.2. 数据资料

本文所用数据包括：研究区域 1953~2012 年的历史实测洪水资料和同期面平均年降水资料；研究区域 CNRM、

MIROC、CanESM 和 GFDL4 种 GCM 在基准期 1984~2005 年的模拟降水数据, 以及在未来 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 2021~2100 年的模拟降水数据, 由 ASD 降尺度模型得到, 详见文献[10]。

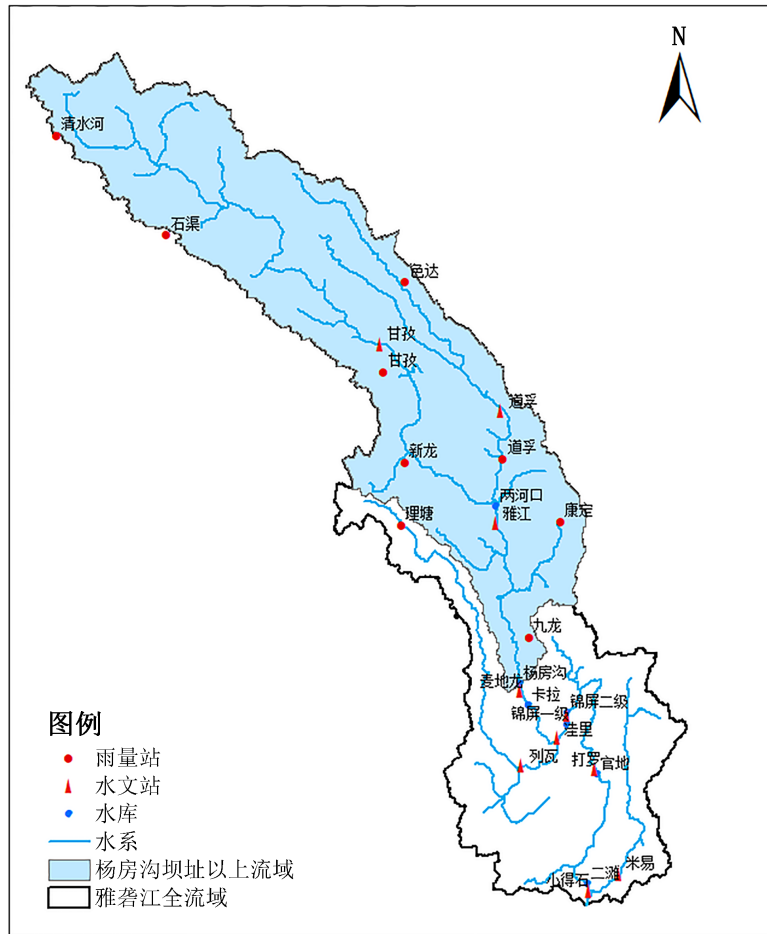


Figure 1. An overview of the water system in the basin above the dam site of Yangfanggou Hydropower Station

图 1. 杨房沟水电站坝址以上流域水系概化图

3. 研究方法

3.1. BMA 不确定性分析方法

贝叶斯模型加权平均方法(BMA)是一个通过加权计算不同模型的预报结果, 来获取更为可靠的综合预报结果的方法[11]。

假设 D 为实测序列、 Q 为模拟序列, K 为模型数量, 对实测数据和模拟序列进行正态化后可根据 BMA 加权平均公式求得平均预报值, BMA 加权平均公式为:

$$E(Q|D) = \sum_{k=1}^K p(f_k|D) \cdot E[g(Q|f_k, \sigma_k^2)] = \sum_{k=1}^K \omega_k f_k \quad (1)$$

其中: $p(f_k|D)$ 为给定实测数据第 k 个模型预报 f_k 的后验概率, $g(Q|f_k, \sigma_k^2)$ 表示均值为 f_k 、方差为 σ_k^2 的正态分布, ω_k 为第 k 个模型的权重。

由 BMA 方法求得的权重 ω_k 和模拟误差 σ_k^2 即可采用蒙特卡罗抽样法确定预报值的不确定性区间。

3.2. GAMLSS 模型

近年来,随着统计分析数据量的猛增,为克服广义线性模型和广义可加模型等相关性模型的局限性,Rigby 等提出了基于位置、尺度和形状参数的广义可加模型(GAMLSS) [6]。GAMLSS 模型假定变量 x 服从参数为 $\theta_i (i=1,2,\dots,p)$ 的分布函数, p 为参数个数, $g_i(\theta_i)$ 表示 θ_i 与解释变量 Z_i 的单调函数关系

$$g_i(\theta_i) = \eta_i = Z_i \beta_i \tag{2}$$

式中: θ_i 、 η_i 为长度为 n 的向量, n 为变量 x 的样本长度, Z_i 是 $n \times I_i$ 的解释变量矩阵, $\beta_i = (\beta_{1i}, \beta_{2i}, \dots, \beta_{I_i i})^T$ 是长度为 I_i 的回归系数向量, I_i 为解释变量的个数。GAMLSS 模型以 β_i 的最大似然函数为目标函数,采用 RS 算法进行回归系数 β_i 的最优值估计。

4. 未来设计洪水计算

4.1. 未来降水的不确定性分析

文献[10]利用 ASD 模型,将 CNRM、MIROC、CanESM 和 GFDL4 种 GCM 输出的 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的气候因子,统计降尺度到雅砻江流域的 15 个气象站点,对比分析了 4 种 GCM 对研究区域的降水模拟效果。结果表明,各 GCM 在雅砻江流域均有一定的适用性。本文基于上述成果,进一步统计了研究区域未来不同情景下的年降水量,如图 2 所示。

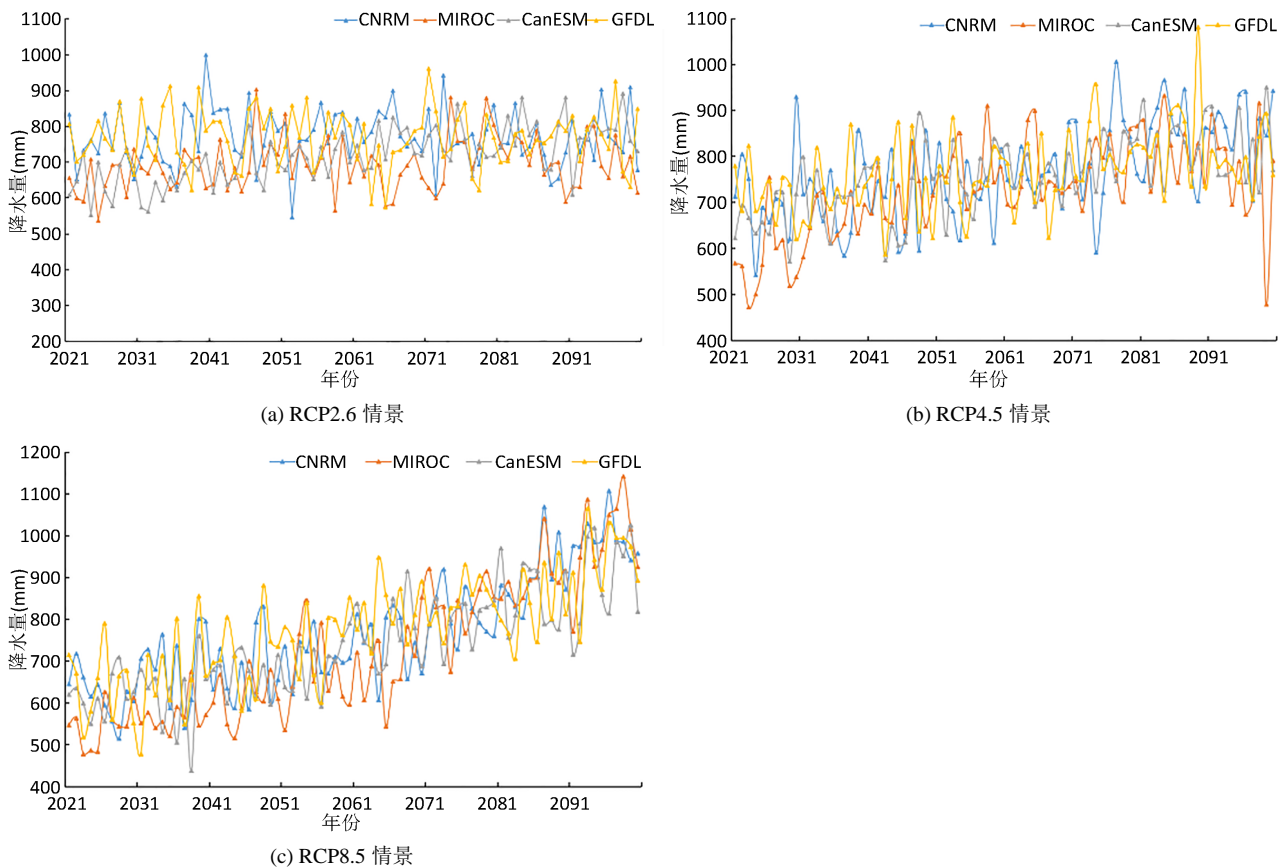


Figure 2. The results of the next year's precipitation calculation of GCM in different scenarios in the future

图 2. 未来不同情景不同 GCM 下年降水量计算结果

可以看出,尽管各 GCM 未来年降水的变化趋势大致相同,但每年的模拟结果差别较大,不同模式生成的

未来降水存在较大程度的不确定性。利用上述 4 个 GCM 在基准期的模拟降水值及实测值，采用 BMA 方法对其进行不确定性分析，得出年降水的集合平均值及不确定性评价指标，如表 1 所示。

Table 1. Evaluation of 4 GCM and BMA annual precipitation forecast values
表 1. 4 种 GCM 和 BMA 年降水量模拟值不确定性分析评价表

评价指标		CNRM	MIROC	CanESM	GFDL	BMA
不确定性区间	均方根误差	131.69	126.25	151.26	127.17	105.21
	相对误差	0.13	0.10	0.20	0.01	0.10
	覆盖率 CR(%)	72	96	100	80	92
不确定性区间	平均带宽 B(mm)	424	414	489	415	325
	平均偏移幅度 D(mm)	125	70	46	136	72
权重	$\omega(\%)$	26.3	27.1	18.4	28.2	-

综合分析，BMA 模型的模拟精度更高，不确定性更小，可将其作为未来非一致性设计洪水的依据，BMA 的模拟结果如图 3 所示。

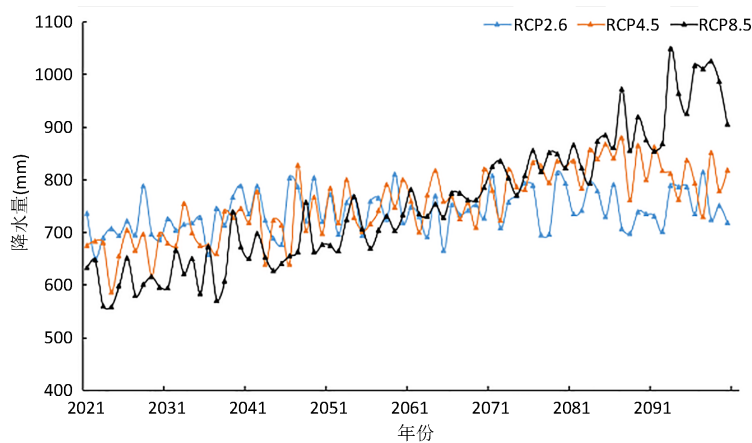


Figure 3. BMA results for precipitation in different scenarios in the future
图 3. 未来不同情景下年降水量 BMA 结果

4.2. 非一致性水文频率分析

通过构造位置、尺度和形状参数的链接函数，建立基于 P-III 分布的广义可加模型，以年降水量为协变量，对杨房沟水电站洪峰序列进行非一致性水文频率分析。为使模型在不过多增加自由度的前提下仍可体现水文序列的时间变化趋势，仅考虑分布参数的线性变化情况，其中 P-III 分布中的形状参数非常敏感而难以估计，故将其视为固定值，不考虑该分布形状参数的非一致性变化。P-III 分布的概率密度函数及其函数关系如下：

$$f_x(x|\mu, \sigma, \nu) = \frac{1}{\sigma \mu \Gamma(1/\nu^2)} \left(\frac{x - \mu}{\mu \sigma \nu} + \frac{1}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{\nu^2} - 1} \exp \left[- \left(\frac{x - \mu}{\mu \sigma \nu} + \frac{1}{\nu^2} \right) \right] \quad (3)$$

式中， $\mu = Ex, \sigma = Cv, \nu = 0.5Cs$ ，分别为 P-III 分布的位置、尺度和形状参数。链接函数为：

$$g_1(\mu) = \ln(\mu), g_2(\sigma) = \ln(\sigma), g_3(\nu) = \nu \quad (4)$$

当以年降水为协变量时，P-III 分布的 GD、AIC 和 SBC 值如表 2 所示。由表 2 可得，以年降水量为协变量

时，第三种时变参数变化情况的 GD、AIC 和 SBC 值均为最小，因此选取 P-III 分布中位置参数随年降水变化，尺度参数和形状参数均为常量的模型为最优非一致性模型。

Table 2. A statistical table of GD, AIC, and SBC values for the non-consistent model with precipitation as a covariate
表 2. 以降水为协变量的非一致性模型的 GD、AIC 和 SBC 值统计表

时变参数	GD	AIC	SBC
$g(\mu) \sim 1, g(\sigma) \sim 1$	996.2	1002.2	1008.5
$g(\mu) \sim 1, g(\sigma) \sim P$	994.6	1002.6	1011
$g(\mu) \sim P, g(\sigma) \sim 1$	961.8	969.8	978.1
$g(\mu) \sim P, g(\sigma) \sim P$	961.8	971.8	982.2

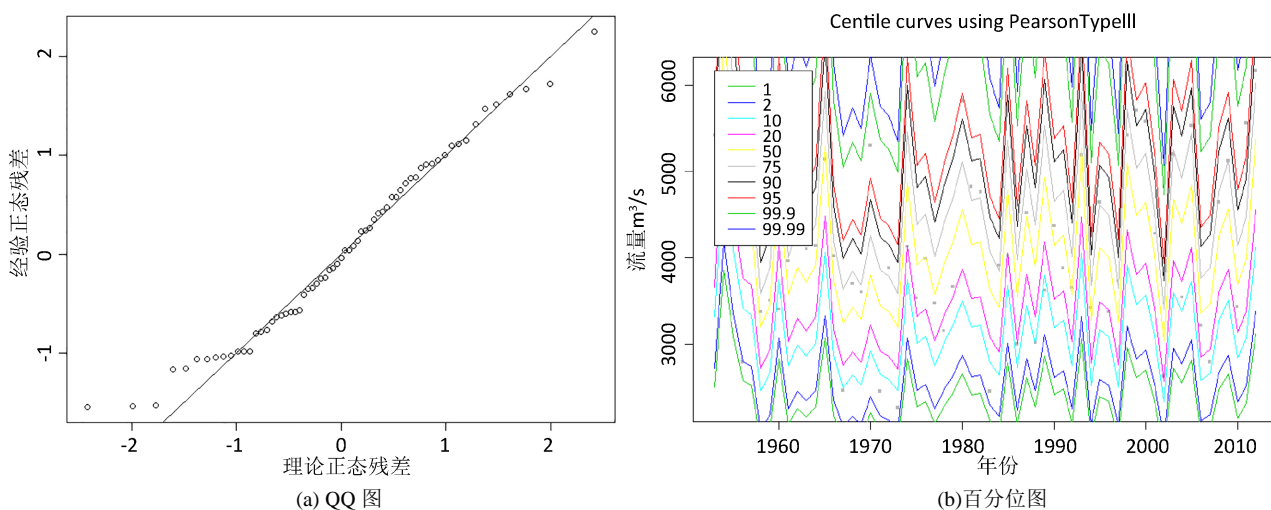


Figure 4. The QQ and centile curves of the optimal non-conformity model of the flood peak flow sequence with precipitation as the covariate

图 4. 洪峰流量序列以降水为协变量最优非一致性模型的 QQ 图及百分位图

由图 4 可得，残差正态 QQ 图显示除个别点偏离外，大部分点都分布在 1:1 线附近，百分位曲线图也直观展示了实测点据在不同区间的分布情况，这些都说明所选非一致性模型效果较好。表 3 为杨房沟站洪峰序列以年降水量为协变量时的最优非一致性 GAMLSS 模型残差定量评价指标。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时，当 Filliben 相关系数 Fr 大于临界值 0.978 时可认为模型通过检验。由此结果，可定量地判断出模型的总体模拟效果较好。

Table 3. The quantitative evaluation index with GAMLSS model of residual residuals of the Yangfanggou station's Hongfeng sequence is optimal and non-consistent

表 3. 杨房沟站洪峰序列最优非一致性 GAMLSS 模型残差定量评价指标

序列	均值	方差	偏态系数	峰态系数	Filliben 相关系数 Fr
洪峰	-0.0002	1.0171	-0.0007	2.3606	0.9910

由 GAMLSS 模型可以输出 P-III 分布的参数与协变量的线性表达式为

$$\ln \mu_t = 6.7524 + 0.0024P_t \quad t = 1953 \sim 2012 \quad (5)$$

式中： μ_t 为 P-III 分布时变的位置参数， P_t 为年降水量。由式中参数与协变量之间的关系可进行未来时期非一致性设计洪水研究。

4.3. 未来设计洪水计算

将未来 2021~2100 年分成 3 个时期,分别为 2021~2050 年(简称 2030S)、2051~2075 年(简称 2060S)和 2076~2100 年(简称 2090S)。未来设计洪水采用 P-III 分布计算,由于以年降水为协变量的时变设计洪水每年都是变化的,实际应用中既无必要,也难以实施,因此,可以分时期计算未来的设计洪水,其均值由式(5)得到,其中,未来年降水量为各个时期的 BMA 多年平均降水;未来时期的 C_v 和 C_s 采用基准期的参数值,即 $C_v = 0.29, C_s = 4C_v$ 。由此可以得到未来不同情景各个时期的设计洪水频率曲线,如图 5 所示。

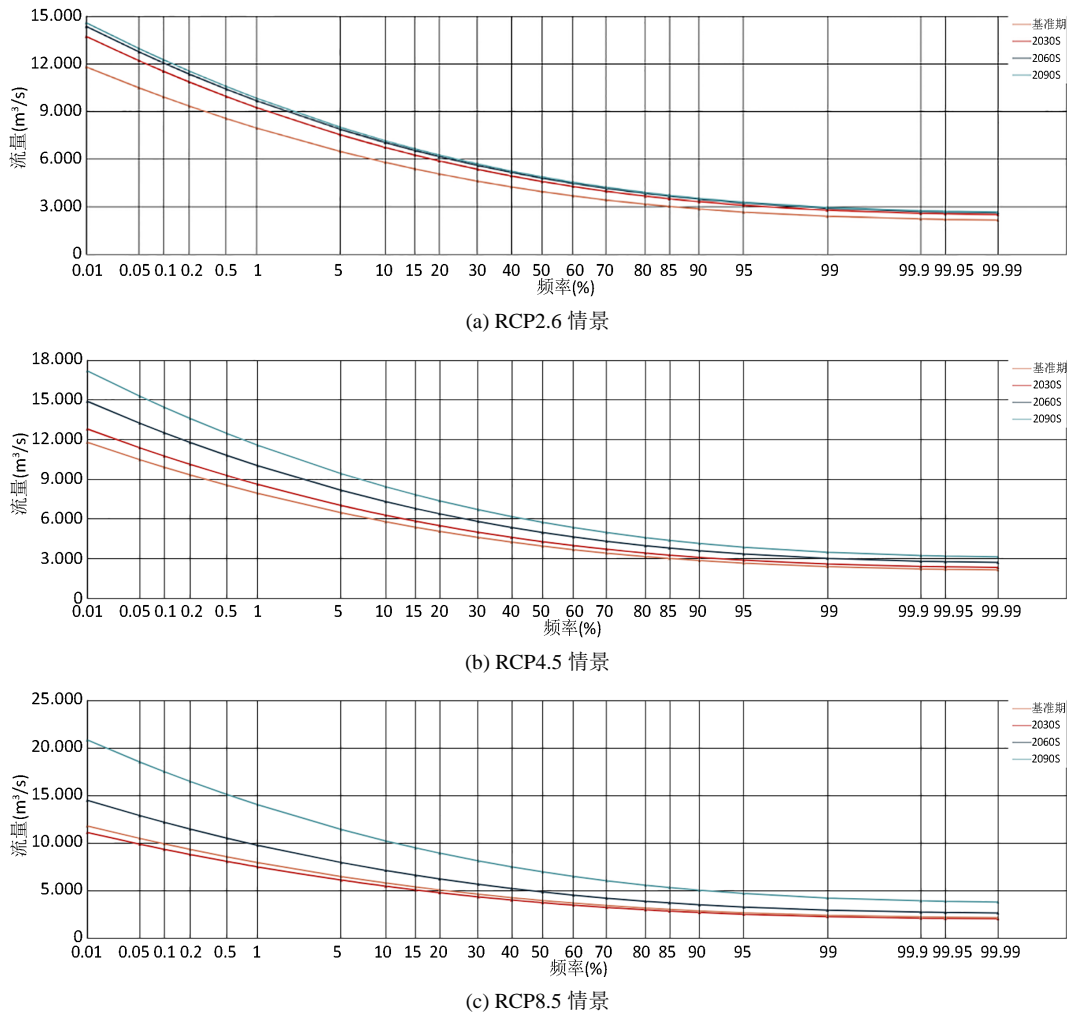


Figure 5. Design flood frequency curves for each period of future scenarios
图 5. 未来情景各个时期的设计洪水频率曲线

采用以年降水为协变量的 GAMLSS 模型进行未来设计洪水的计算,未来设计洪水一定程度上取决于 BMA 计算的未来年降水,未来情景下年降水预测结果如表 4 所示。可以看出,除 RCP8.5 情景下 2030S 时期的年降水小于基准期外,其余各个情景各个时期均大于基准期,其中 RCP2.6 情景下,增幅为 10.30%~14.19%; RCP4.5 情景下,增幅为 5.93%~24.7%; RCP8.5 情景下,增幅为-3.15%~36.92%。增幅最大的为 RCP8.5 情景下 2090S 时期,相比基准期增加为 39.51%。由此得到的设计洪水也呈现不同程度的增加,如表 4 所示。可以看出,在未来情景下除 RCP8.5 情景下 2030S 时期的设计洪水和校核洪水小于基准期外,其余各个情景各个时期均大于基准期,其中 RCP2.6 情景下,超设计洪水的增幅为 16.29%~23.61%,超校核洪水的增幅为 16.57%~23.91%; RCP4.5

情景下, 超设计洪水的增幅为 8.58%~45.79%, 超校核洪水的增幅为 8.84%~46.3%; RCP8.5 情景下, 超设计洪水的增幅为-5.85%~76.76%, 超校核洪水的增幅为-5.63%~77.09%; 设计洪水和校核增幅最大的均为 RCP8.5 情景下 2090S 时期, 相比基准期分别增加为 76.66%和 77.09%。

Table 4. Future design flood and school nuclear flood calculation table

表 4. 未来设计洪水和校核洪水计算结果表

项目	基准期	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		2030S	2060S	2090S	2030S	2060S	2090S	2030S	2060S	2090S
年降水(mm)	658	726	745	751	697	760	821	637	749	901
增幅(%)	/	10.30	13.16	14.19	5.93	15.57	24.70	-3.15	13.79	36.92
设计洪水(m ³ /s)	9320	10,838	11,336	11,520	10,120	11,773	13,588	8775	11,450	16,465
增幅(%)	/	16.29	21.63	23.61	8.58	26.32	45.79	-5.85	22.85	76.66
校核洪水(m ³ /s)	11,200	13,056	13,656	13,878	12,190	14,182	16,386	10,570	13,792	19,834
增幅(%)	/	16.57	21.93	23.91	8.84	26.63	46.3	-5.63	23.14	77.09

5. 结论

本文以杨房沟水电站为研究对象, 计算了考虑未来降水的水库设计洪水, 主要研究结论如下:

1) 以年降水为协变量进行时变设计洪水计算, 不仅使得模型具有一定的物理意义, 更能充分利用已有的一些先验信息, 提高了洪水频率计算的精度。

2) 基于基准期的最优非一致性 GAMLSS 模型, 以 BMA 方法得出的未来不同情景下的年降水为协变量, 对杨房沟水电站未来不同时期的设计洪水进行了计算, 在一定程度上提高了未来设计洪水的可靠性。

3) 未来 3 种气候变化情景下, 杨房沟水电站设计及校核洪水均有一定程度的增加, 需加强防范。

基金项目

中国电力建设股份有限公司项目(DJ-ZDZX-2016-02)。

参考文献

- [1] DENMAN, K., BRASSEUR, G. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Computational Geometry*, 2007, 18(2): 95-123.
- [2] MILLY, P. C. D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., et al. Stationarity is dead: Whither water management. *Science*, 2008, 319(5863): 573-574. <https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- [3] 陆中央. 关于年径流量系列的还原计算问题[J]. *水文*, 2000, 20(6): 9-12.
LU Zhongyang. About the reduction calculation of the annual runoff series. *Journal of China Hydrology*, 2000, 20(6): 9-12. (in Chinese)
- [4] 韩瑞光, 丁志宏, 冯平. 人类活动对海河流域地表径流量影响的研究[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(3): 4-7.
HAN Ruiguang, DING Zhihong and FENG Ping. Study on the effects of human activities on surface runoff in the Haihe River basin. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(3): 4-7. (in Chinese)
- [5] STRUPCZEWSKI, W. G., SINGH, V. P., et al. Non-stationary approach to at-site flood frequency modelling. I. Maximum likelihood estimation. *Journal of Hydrology*, 2001, 248(1): 123-142. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00397-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00397-3)
- [6] RIGBY, R. A., STASINOPOULOS, D. M. Generalized additive models for location, scale and shape. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 2005, 54(3): 507-554. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2005.00510.x>
- [7] VILLARINI, G., SERINALDI, F., SMITH, J. A., et al. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century. *Water Resources Research*, 2009, 45(8): 2263-2289. <https://doi.org/10.1029/2008WR007645>
- [8] 江聪, 熊立华. 基于 GAMLSS 模型的宜昌站年径流序列趋势分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(11): 1505-1514.

-
- JIANG Cong, XIONG Lihua. Analysis of the trend of annual runoff sequence in Yichang station based on the GAMLSS model. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1505-1514. (in Chinese)
- [9] 杜涛, 熊立华, 李帅, 邵骏, 许崇育, 闫磊. 基于风险的非一致性设计洪水及其不确定性研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(2): 241-253.
DU Tao, XIONG Lihua, LI Shuai, SHAO Jun, XU Songyu and YAN Lei. Risk-based non-consistent design of floods and their uncertainty. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(2): 241-253. (in Chinese)
- [10] 曹琛, 岳青华, 郭靖, 等. 四种 GCM 在雅砻江流域的比较及未来降水模拟研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020, 458(12): 27-32.
CAO Chen, YUE Qinghua, GUO Jing, et al. The comparison of four GCM in the Yalu River basin and the simulation of future precipitation. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, 458(12): 27-32. (in Chinese)
- [11] 董磊华, 熊立华, 万民. 基于贝叶斯模型加权平均方法的水文模型不确定性分析[J]. *水利学报*, 2011, 42(9): 1065-1074.
DONG Leihua, XIONG Lihua and WAN Ming. Analysis of hydrological model uncertainty based on the weighted average method of Bayesian model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(9): 1065-1074. (in Chinese)