

湄公河S1水电站PMP/PMF估算研究

王成¹, 熊景华², 郭生练², 杨媛婷², 徐郡璘¹

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武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年7月1日; 录用日期: 2023年8月11日; 发布日期: 2023年8月31日

摘要

基于MSWEP卫星反演降水数据延长APHRODITE降水数据系列, 采用改进的统计法和SCS模型估算湄公河S1水电站坝址PMP/PMF, 并与实测流量系列的频率分析结果进行比较验证。求得S1水电站坝址万年一遇校核洪水为91,700 m³/s, PMF估算结果为112,950 m³/s; S1坝址可能最大洪水约为万年一遇校核洪水的1.23倍。这与上游梯级电站的设计成果基本一致, 研究结论基本合理。

关键词

卫星数据, PMP/PMF, SCS模型, 校核洪水, S1水电站, 湄公河

Study of PMP/PMF Estimation at the S1 Hydropower Plant in the Mekong River

Cheng Wang¹, Jinghua Xiong², Shenglian Guo², Yuanting Yang², Junlin Xu¹

¹PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou Zhejiang

²State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Jul. 1st, 2023; accepted: Aug. 11th, 2023; published: Aug. 31st, 2023

Abstract

Based on MSWEP satellite retrieval precipitation data, the extended APHRDITE precipitation data series are used to estimate the PMP/PMF at the S1 Hydropower Plant dam site in the Mekong River based on the improved statistical method and SCS model, and compared with the flood frequency analysis results. It is shown that the 10,000-year check flood of the S1 dam-site is 91,700 m³/s, and the estimated PMF is 112,950 m³/s. The PMF is about 1.232 times of the 10,000-year check flood, which is consistent with upper cascade reservoir designed values and the conclusion is basically reasonable.

作者简介: 王成, 工程师, 主要研究方向: 流域规划和设计洪水分析计算, Email: wang_c28@hdec.com

Keywords

Satellite Data, PMP/PMF, SCS Model, Check Flood, S1 Hydropower Plant, Mekong River

Copyright © 2023 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. 概述

湄公河 - 澜沧江水系是亚洲最重要的跨界河流, 发源于中国青海省玉树州的杂多县, 在中国境内名为澜沧江, 途经青海、西藏、云南; 出中国境后称湄公河, 流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨、越南, 先后接纳南欧江、蒙河、桑河、洞里萨河等主要支流, 在越南境内形成三角洲, 汇入南海。干流全长 4350 km, 流域面积 79.5 万 km², 年径流量 4750 亿 m³。湄公河 - 澜沧江总体流向自北向南, 跨越纬度广, 流域上下游自然条件、地理形态等均有非常显著的差异。

S1 水电站是湄委会规划的泰国清盛以下湄公河干流梯级中的第 10 级电站¹, 上邻东萨宏(Don Sahong)水电站, 下接松博(Sambor)水电站, 工程开发任务以发电为主。为了不影响老挝, 电站正常蓄水位按月变化, 从 49.0 m 到 55.0 m; 月最高正常蓄水位 55.0 m 对应的库容 7.190 亿 m³。电站初期拟装机容量 1400 MW, 相应多年平均发电量 58.44 亿 kW h, 年利用小时数为 4174 h。

根据中国《防洪标准》(GB50201-2014)及《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》(DL5108-2003)规定, S1 水电站工程为一等大 I 型工程, 主要建筑物均按 1 级建筑物设计, 次要建筑物按 3 级建筑物设计。本工程采用混凝土坝、河床式厂房及两岸均质土坝的设计洪水和校核洪水重现期, 分别为 1000 年一遇和 10,000 年一遇。枢纽主要由左右岸均质土坝、河床泄洪闸为混凝土重力坝、河床式厂房、通航建筑物、鱼类仿自然旁通道等组成。坝顶全长约 7100 m, 最大坝高 71 m。泄洪闸坝布置于中间河道, 泄洪闸长 962 m, 坝顶高程 59.0 m, 根据水下地形测量推测泄洪闸最大坝高为 37 m (含基础回填混凝土), 其中建筑物最大高度 26 m, 共设 58 孔开敞式泄洪闸, 孔口尺寸为 13 m × 18 m (宽 × 高), 堰顶高程 37.0 m, 采用平底宽顶堰型式。闸室下游设 60 m 长的混凝土护坦, 护坦厚度 3 m, 护坦首部与堰顶高程 37.00 m 相接, 以 2% 的顺坡倾向下游。

两岸均质土坝坝顶高程 59.8 m, 上游防浪墙顶高程 61 m, 最大坝高 17 m。左岸均质土坝坝长 2401 m, 右岸均质土坝坝长 2032 m。土坝坝顶宽 8 m, 上游坝坡 1:2.75, 下游坝坡 1:2.0, 坝体采用竖式排水接褥垫式水平排水形式。均质土坝上游坝坡采用干砌石护坡防护, 下游坝坡坡面植草防护。

按照国际工程要求, 需要开展 S1 水电站 PMP/PMF 估算研究[1]。

2. 基本资料

S1 水电站工程位于亚洲热带季风区, 5 月至 9 月底受来自海上的西南季风影响, 潮湿多雨, 5 月至 10 月为雨季; 11 月至次年 3 月中旬受来自大陆的东北季风影响, 干燥少雨, 11 月至次年 4 月为旱季。工程所在区域冬季(11 月至次年 3 月)并不十分寒冷, 夏季相对较炎热。各月的平均温度变幅不超过 5℃, 最高温度与最低温度差不大。全年最热的月份一般为 3 月和 4 月, 气温最低月份为 1 月。S1 气象站年均相对湿度 59%~81%, 多年平均降雨量 1903.7 mm。

2.1. 流量资料

S1 水电站设计洪水分析的依据站是上丁水文站和巴色水文站。上丁水文站位于柬埔寨上丁省上丁市, 为湄

¹2021~2030 Basin Development Strategy and MRC Strategic Plan 2021~2025.

公河干流控制站点，位于 S1 水电站坝址下游约 10 km 的湄公河桑河汇合口下游，控制流域面积 635,000 km²。上丁站自 1910 年设立起，每日观测水位，并不定时巡测流量，有 1910~2021 年逐日水位流量资料。巴色水文站位于老挝占巴塞省巴色市，为湄公河干流控制站点，位于 S1 水电站坝址上游约 170 km，控制流域面积为 545,000 km²。巴色站设立于 1923 年，有 1923~2021 年逐日水位流量资料。本次收集到上丁水文站 1910~2021 年、巴色水文站 1923~2021 年逐日流量资料。图 1 为本工程邻近水文站点分布示意图。

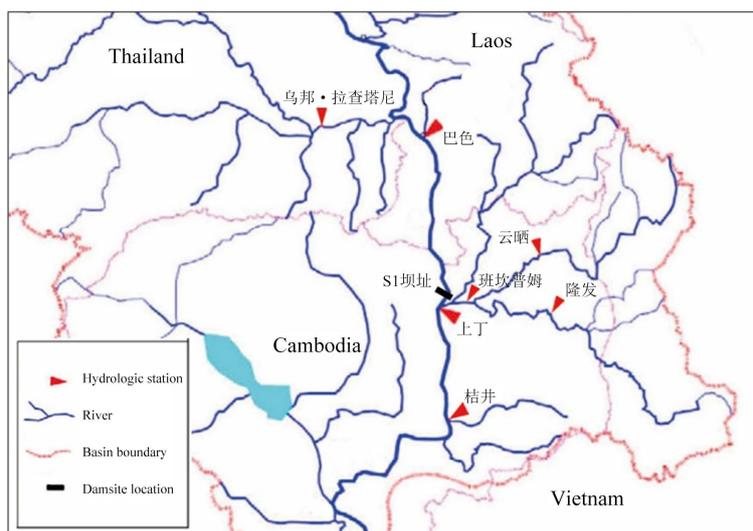


Figure 1. Spatial distribution of adjacent hydrological stations of the project
图 1. 本工程邻近水文站点分布示意图

2.2. 多源卫星降水资料分析处理

1) APHRODITE 降水数据集

以亚洲降水 - 高分辨率观测数据集成对比评估的水资源降水产品(Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation, APHRODITE)作为 PMP 估算的参考降水数据。该数据集由日本综合地球环境研究所和日本气象厅研究所提供，其基于亚洲各国提供的实测降水数据及该项目自设雨量站资料，以 0.25°的空间分辨率生成 1951~2015 年内的逐日栅格化降水产品，精度和适用性已经在亚洲多个国家得到了评估，在澜沧江 - 湄公河流域已被证明可直接作为资料稀缺地区站点降水数据的替代产品。该产品收集了 5000~12,000 个站点的降水、温度资料，可利用数据约为全球电信系统网络的 2.3~4.5 倍，该产品大大改善了东南亚、喜马拉雅山和中东山区的区域划分和降水变化。该产品在评估水资源、确定亚洲季风降水变化、卫星降水估算和验证高分辨率模型模拟以及改进降水预报等研究做出贡献。本研究选择了面向亚洲季风、中东和欧亚大陆北部的 APHRO_V1101 数据集[2]。

2) MSWEP V2 卫星集成降水数据集

2013 年，普林斯顿大学发布了 Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation Version 2 (MSWEP_V2)降水数据集，该数据源是全球第一个 0.1°空间分辨率的 3 h 尺度降水数据源，具有精度高、认可广泛的优势。普林斯顿大学水中心融合多个站点数据源(包括 WorldClim, GHCND, GSOD, GPCC 和其他数据源)、卫星数据源(包括 CMORPH, GridSat, GSMaP 和 TMPA 3B42RT)和再分析数据源(ERA-Interim 和 JRA-55)，首先对降水数据进行频率和量级校正，再通过全球 13,762 个径流站的实测数据基于水通量过程对陆地降水进行偏差校正，是目前国际上时空精度最高的降水数据源之一，在对地观测、水资源调查评价、气候系统演化分析、气象灾害预报预警等领域得到广泛应用，并被国内外学者通过地面观测信息验证了该数据源的可靠性。本项目提取了 MSWEP_V2

数据集 1979~2021 年澜沧江 - 湄公河流域的逐日降水数据。

3) 插补延长 APHRODITE 降水数据系列

基于对多套现有卫星降水数据集产品的对比评估, 发现 MSWEP 降水数据在不同时间和空间尺度上的精度较高, 考虑到 APHRODITE 降水资料的时间序列只更新到 2015 年, 为此采用 MSWEP 产品将 APHRODITE 资料系列延长至 2021 年底, 首先, 使用同期(1983~2015)的 APHRODITE 数据对 MSWEP 数据进行偏差校正, 然后将校正因子运用到 2016~2021 年底时段内, 实现对 APHRODITE 数据的延长, 以估算湄公河流域 PMP。使用的偏差校正方法为基于月尺度的等率校正方法, 该法假设卫星反演降水(或再分析气温数据)和地面观测系列的月偏差在不同时期具有一致性, 首先基于地面观测信息计算各月份的校正因子, 再将该因子应用于同一月份的长系列模拟数据集。该方法易于操作且效果较好, 近年来广泛应用于卫星反演降水产品校正领域。本文对气象站点的每一个月份, 分别基于观测资料和模拟系列计算该月份的偏差比率(降水), 获得相应的校正因子后, 校正卫星降水系列:

$$P_{G,m}^{cor} = P_{G,m}^{raw} \times \left(\sum_{i=1}^N P_{obs,m}^i / P_{G,m}^i \right) \quad (1)$$

式中: $P_{G,m}^{cor}$ 和 $P_{G,m}^{raw}$ 分别是对应月份的校正后数据和原始数据, N 为第 m 月站点的总观测日数; i 为日降水系列时序。

3. 洪水频率分析计算

3.1. 降雨径流特性

湄公河流域的径流同降雨一样, 随季节变化, 每年有汛期和枯水期。湄公河下游地区 5 月到 10 月为雨季, 汛期的开始则要比雨季晚一到两个月, 通常是始于 6 月。尽管雨季通常在 10 月就停止了, 但是在大多数区域, 汛期要持续到 11 月。湄公河流域内水文年被分成了两个季节, 从 6 月到 11 月的汛期和从 12 月到次年 5 月的旱季。

湄公河年径流集中在汛期, 6 月~11 月的径流量约占年径流的 86% 左右, 其中, 7 月~10 月径流量占全年的 73%, 8 月、9 月的月平均流量最大, 分别占年总径流量的 22%~23%。在旱季, 最小流量发生在 2 月~4 月, 这三个月的径流量约占全年的 5%。3 月、4 月的平均流量最小, 这两个月份的径流量均只占全年总量的 2%。相对于年内分配显著差异, 湄公河径流量在年际间的变化相对不明显。巴色水文站年径流的变差系数为 0.16, 1923~2021 年系列中最大年和最小年径流量的比值仅为 2 倍。

3.2. 暴雨洪水特性

湄公河流域洪水主要由暴雨形成。造成暴雨的天气系统, 以西南季风、风暴、热带低压、热带气旋和冷气压为主。有时多种气象因素结合在一起, 通常就会导致强降雨, 日降水量可达到 150~300 mm。暴雨在面上分布不均, 降雨强度上、中、下游逐渐递减, 相差较大。流域全年均有暴雨发生, 但主要出现在 7 月~10 月, 11 月仍有较大暴雨出现, 但次数较少, 暴雨呈多中心分布。上下游出现洪水的日期不完全对应, 湄公河流域洪水和暴雨在年内分布是相应的, 洪水多出现于 8、9 月份, 其发生频率在 85% 以上, 10 月份还会出现年最大洪水和较大洪水。湄公河流域汛期降水多为连续过程, 较大洪水主要由连续暴雨形成, 其暴雨过程多为两次以上的天气过程, 暴雨呈多中心分布, 形成的洪水过程线形状一般为矮胖型, 且以复式峰型为主, 单峰所占比重不大。

3.3. 设计洪水成果

1) Gumbel 分布和参数估计方法

广义极值(General Extreme Value, GEV)分布函数[3]的数学表达式如下:

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1+k\left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right]^{-1/k}\right\} \tag{2}$$

式中： k 、 ξ 和 α 分别为形状、位置和尺度参数。当 $K = 0$ 的时为 Gumbel 分布，其数学表达式如下：

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right] \tag{3}$$

Gumbel 分布在东南亚国家得到广泛的应用，通常采用矩法初估参数、并适线法推求设计洪水[4]。

2) 设计洪水估算

本工程上游巴色水文站流域面积 545,000 km²，有 1923~2021 年共 99 年实测逐日平均流量系列，下游上丁水文站流域面积 635,000 km²，有 1910 年~2021 年共 112 年实测逐日平均流量系列，两站均无历年最大洪峰流量统计资料。根据 Fuller 1914 年研究的经验公式：

$$Q_{\text{峰}} = Q_{\text{日}} * (1 + 2.66 * A^{-0.33}) \tag{4}$$

式中： $Q_{\text{峰}}$ 为洪峰流量 m³/s； $Q_{\text{日}}$ 为日平均流量 m³/s； A 为流域面积 km²。

经计算得巴色、上丁水文站最大洪峰流量与最大 1 日洪量关系均为 $Q_{\text{峰}} = Q_{\text{日}} * 1.05$ 。由巴色、上丁水文站实测资料，统计历年最大 1 日平均流量，并按照 1.05 倍折算作为最大洪峰流量系列。

表 1 列出上丁和巴色水文站洪水频率分析计算结果，S1 水电站坝址位于巴色水文站和上丁水文站区间，采用两水文站设计洪水成果按面积内插计算求得。

Table 1. Calculation results of flood frequency analysis at each station

表 1. 各站点洪水频率分析计算成果

水文站点	流域面积(Km ²)	统计参数		洪峰设计值(m ³ /s)					
		均值	标准差	0.01%	0.10%	1%	2%	5%	10%
巴色站	54,500	39,005	6602	86,300	73,700	61,100	57,300	52,200	48,200
上丁站	63,500	55,201	10,673	131,200	111,000	90,700	84,600	76,400	70,000
S1 坝址	55,900	/	/	91,738	78,217	64,685	60,606	55,131	50,840

4. 可能最大暴雨(PMP)估算

世界气象组织(WMO)推荐的 PMP 估算方法分为两类[1]，一类是统计估算，另一类是水文气象途径。水文气象途径包括当地暴雨放大法、暴雨移置法、概化估算法等。由于湄公河雨量站网稀缺，实测降雨资料系列较短，因此本文采用统计法估算 PMP [5]。

湄公河流域 PMP 统计法估算结果

1) 统计估算法简介

1961 年 Hershfield 提出统计法，其凭借概念清楚和计算简便的特点，广泛应用于估算流域 PMP，计算公式如下：

$$K_m = \frac{X_m - \bar{X}_{n-1}}{\sigma_{n-1}} \tag{5}$$

$$PMP = \bar{X}_n + K_m \sigma_n \tag{6}$$

式中： X_m 是降水序列最大值； \bar{X}_n 和 \bar{X}_{n-1} 分别为剔除 X_m 之前和之后降水序列的均值； σ_n 和 σ_{n-1} 则为剔除 X_m 之前和之后的标准差。

式(5)仅从降水资料系列的统计特性推求放大比，并未涉及设计频率。林炳章改进了传统的统计法[6] [7]，首先需要判断各降水序列长度是否大于最小序列要求 N_m ，其计算公式如下：

$$N_m = T_m^2 + 2 \tag{7}$$

$$T_m = \frac{X_m - \bar{X}_n}{\sigma_n} \tag{8}$$

按照公式(5)计算各栅格或流域放大因子 K_m ，同时对 \bar{X}_n 进行抽样误差校正：

$$X'_n = \left(1 + \frac{3C_{v_n}}{\sqrt{n}} \right) X_n \tag{9}$$

式中： n 为卫星降水序列长度， C_{v_n} 为其变差系数。按照公式(6)分别基于延长的 APHRODITE 降水数据计算栅格尺度和流域尺度的 PMP。

2) 湄公河流域 PMP 估算结果

利用经过校正延长的 APHRODITE 降水数据(1951~2021，系列长度 71 年)，采用改进的统计法估算湄公河流域 1d、3d、7d、15d 和 30d 的 PMP。湄公河流域内共有 0.25°分辨率的网格 829 个，其中共有 708 个位于流域边界内部，121 个与流域边界相交；坡诺水电站-S1 水电站坝址区间，共有 15 个 0.25°分辨率的网格，其中有 6 个位于流域边界内部，9 个与流域边界相交。经计算，APHRODITE 的降水序列长度略低于公式(8)的计算要求，为 86 年，可能影响 PMP 估算结果的代表性。进一步使用式(5)估算 PMP 放大因子，基于 APHRODITE 数据计算的湄公河流域放大因子分别为 3.38 (1 d)、2.48 (3 d)、2.96 (7 d)、3.24 (15 d)和 2.10 (30 d)。表 2 列出了湄公河流域 APHRODITE 降水 1 d、3 d、7 d、15 d 和 30 d 尺度 PMP 估计结果，分别为 49、89、159、261 和 383 mm，而最大网格点估值则分别为 340、628、724、1109 和 1594 mm。

Table 2. PMP results based on the APHRODITE precipitation data in the Mekong River basin
表 2. 湄公河流域 APHRODITE 降水数据的 PMP 估计结果

空间尺度	时间尺度	PMP (mm)
流域平均估值	1 d	49
	3 d	89
	7 d	159
	15 d	261
	30 d	383
最大网格点估值	1 d	340
	3 d	628
	7 d	724
	15 d	1109
	30 d	1594

图 2 绘出了湄公河流域 APHRODITE 降水产品在 1 d、3 d、7 d、15 d 和 30 d 尺度下 PMP 的空间分布，APHRODITE 结果显示湄公河流域 PMP 高值主要分布在流域东部及东南沿海山区，且降水中心区域 1 d~3 d 的 PMP 在 500~600 mm 之间，流域其它地区则为 200~300 mm 范围内变化。

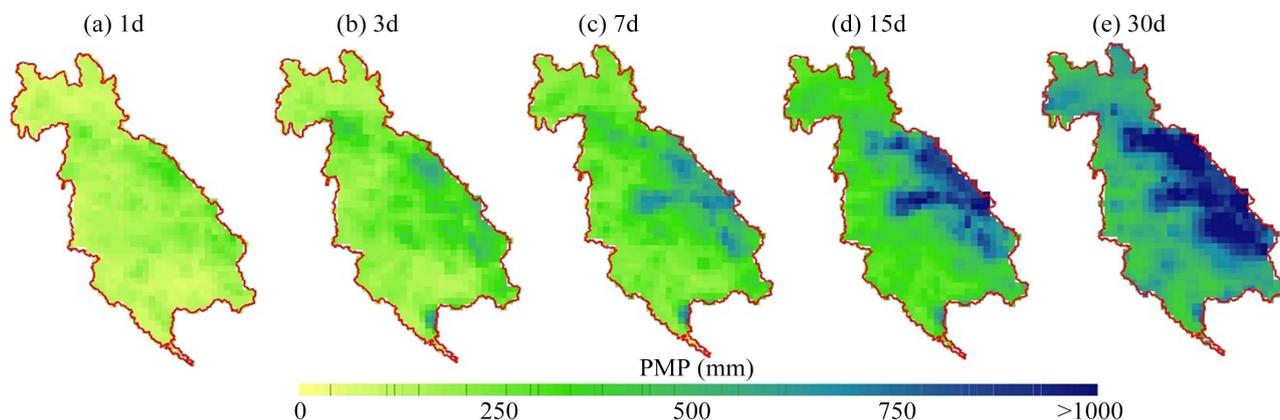


Figure 2. Spatial distribution of PMP results based on APHRODITE precipitation data on different time scales in the Mekong River basin

图 2. 湄公河流域 APHRODITE 降水数据多尺度 PMP 空间分布

3) 景洪 - 坡诺区间 PMP 估算结果

采用同样的方法计算景洪 - 坡诺坝址区间各历时 PMP，参考坡诺水电站设计洪水过程，分配景洪 - 坡诺坝址区间 30 d PMP 的分布过程，发现 30 d 的 PMP 过程存在一定高估，使用面积折算方法推求相应的产流过程(景洪 - 坡诺 369,120 km²)。如表 3 所示，最大 1 d 下的洪量较其它尺度明显偏大，造成 30 d 总洪量高估，达 1502.6 亿 m³，大于现有工程设计洪量的 1011.7 km³。这种高估的原因是湄公河流域面积很大，可能最大暴雨过程不可能同时覆盖全流域，因此可以使用流域面积折算系数，使得 30 d 的 PMF 总洪量与坡诺水电站设计成果接近，尽管调整后的洪峰流量仍然偏大，但 30 d 总洪量与设计值接近，为 1277.2 亿 m³ (扣损前)。

Table 3. PMP calculation results in the Jinghong-Ponointerval basin

表 3. 景洪 - 坡诺坝址区间流域 PMP 估计结果

时间尺度	1 d	3 d	7 d	15 d	30 d
PMP (mm)	64	109	186	281	407
面积折算系数	0.35	0.55	0.65	0.75	0.85
调整后流域 PMP (mm)	22	60	121	211	346
区间流域估算洪量(亿 m ³)	82.8	221.1	445.6	778.8	1277.2
坡诺工程设计洪量(亿 m ³)	55.6	164.9	365.8	684.8	1055.2

5. 可能最大洪水(PMF)估算

本流域暴雨法设计洪水采用 SCS 单位线推求。考虑景洪-S1 区间流域面积为 379,800 km²，而坡诺-S1 坝址区间流域面积仅为 10,680 km²，景洪-S1 坝址区间与景洪 - 坡诺坝址区间流域面积仅相差 2.8%。本次先采用 SCS 单位线法得到景洪 - 坡诺坝址区间 PMF 洪水过程线，再按面积比放大推算景洪-S1 坝址区间 PMF 洪水过程线，通过叠加景洪水电站坝址 PMF 洪水过程计算得到 S1 水电站坝址 PMF。

5.1. 产流计算

SCS 模型是美国农业水土保持局(Soil Conservation Service, 简称 SCS)于 1954 年代研制的流域水文模型，广泛应用于各个国家的流域工程规划、水土保持及防洪、城市水文及无资料流域的水文问题研究[8]。

SCS 方法除用于总径流，还可以用于估算一次暴雨的逐时径流过程。逐时径流过程的推求是用每个时段末的累积降雨推求相应的累积 R，相邻时段的累积径流相减，就得每个时段的径流。

5.2. 汇流计算

参考文献中所介绍的概化无量纲单位线进行汇流推算[9]。通过确定单位线洪峰流量及峰现时间确定景洪 - 坡诺区间流域单位线, 进而推算设计洪水过程线。

结合前述 PMP 过程线, 求得景洪 - 坡诺坝址区间 PMF 洪峰流量为 $64,269 \text{ m}^3/\text{s}$, 按面积比计算景洪-S1 坝址区间 PMF 洪峰流量为 $75,150 \text{ m}^3/\text{s}$, 经叠加景洪坝址 PMF 过程, 计算得 S1 水电站坝址 PMF 洪峰流量为 $112,950 \text{ m}^3/\text{s}$, 详见表 4。

对比坡诺电站、景洪水电站 PMF 洪水过程线如图 3 所示。本次 S1 电站坝址 PMF 洪水过程线相对坡诺电站高, 峰现时间与坡诺电站基本一致, 比景洪电站滞后, 本次成果相对比较合理。

Table 4. Comparison of dam-site PMF estimations in the Jinghong, Pono, and S1 hydropower plants
表 4. 景洪、坡诺、S1 电站坝址 PMF 估值比较表

项目	$Q_m (\text{m}^3/\text{s})$	$W_{1d} (\text{亿 m}^3)$	$W_{3d} (\text{亿 m}^3)$	$W_{7d} (\text{亿 m}^3)$	$W_{15d} (\text{亿 m}^3)$	$W_{30d} (\text{亿 m}^3)$
景洪	39,900	34.3	101.9	227.1	437.7	634.8
坡诺	94,237	80.9	240.2	539.1	1026.0	1545.7
S1	112,950	97.3	288.6	641.0	1208.2	1890.4

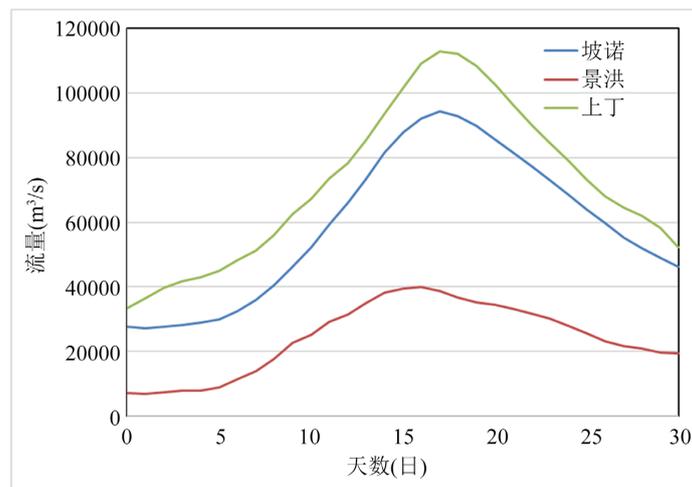


Figure 3. Comparison of PMF process of the main cascade hydro-power plants in Lancang-Mekong River

图 3. 澜沧江 - 湄公河主要梯级电站 PMF 过程线对比图

5.3. 设计成果合理性分析

1) 基础资料

本次基础水文资料均通过湄公河管理委员会官方网站购买得到, 各站历年资料已经湄公河委员会水文部门审查、汇编, 整编资料精度较好, 水文站点的实测资料系列较长, 能满足本次分析 S1 水电站坝址 PMF 需要。

2) 降水数据

APHRODITE 降水数据集是由日本综合地球环境研究所和日本气象厅研究所提供的亚洲区域降水数据集, 其基于亚洲各国提供的实测降水数据及该项目自设雨量站资料生成的空间分辨率 0.25° 的网格化降水产品, 提供了 1951~2015 年的逐日高精度降水资料, 其适用性已经在亚洲多个国家得到评估。考虑本次工程设计流域较大, 已有实测站点资料偏少, 采用该降水数据集更能考虑流域范围内的降水时空分布情况, 因此将该降水数据应用于湄

公河流域是合适的。将 APHRODITE 降水数据集与多种卫星产品进行比较,发现 MSWEP 产品与 APHRODITE 降水之间一致性最强,相关系数 CC 达 0.93,使用相对精度最高的 MSWEP 产品将 APHRODITE 延长至 2021 年底,并进行校正,该方法是合适的[10]。

3) 邻近梯级计算方法比较

由于景洪 - 坡诺坝址区间集水面积与景洪-S1 坝址区间集水面积仅相差约 2.8%,本次将景洪 - 坡诺区间 PMF 成果按照面积比折算的方式计算景洪-S1 坝址区间 PMF 成果是合适的。参考临近 Ban Koum 水电站可行性研究报告计算方法,通过计算 Chiang Saen-Pakse 区间 PMF 成果,叠加上游景洪水电站 PMF 成果得到 Ban Koum 坝址 PMF 成果;本次采用景洪电站 PMF 叠加景洪-S1 坝址区间 PMF 成果的方法是合适的。

4) 计算模型方法

本次由 PMP 计算 PMF 产汇流过程采用 SCS 水文模型法,土壤类型数据采用联合国粮食与农业组织(FAO)的世界土壤数据库资料,土地利用采用马里兰大学的 1 km 分辨率土地覆盖数据,均广泛应用于科研及生产实践中,资料准确性得到广泛认可。

5) 洪水外包线计算

参考王国安等[11]世界已知最大洪水外包线经验公式,计算 S1 坝址可能最大洪水成果。当流域面积 $A = 300 \sim 3,000,000 \text{ km}^2$:

$$Q_m = 1830A^{0.316} \quad (9)$$

S1 水电站坝址控制流域面积为 $555,900 \text{ km}^2$,由式(9)计算得到可能最大洪水为 $119,638 \text{ m}^3/\text{s}$,由外包线方程计算得可能最大洪水为 $119,638 \text{ m}^3/\text{s}$,本次 PMF 计算成果为 $112,950 \text{ m}^3/\text{s}$,两者成果相差仅约 5.6%,故本次设计成果基本合理。

6) 国际大坝委员会(ICOLD)推荐公式计算

1984 年, Rodier 和 Roche 通过对全世界大约 1200 个极限洪峰的研究,所得出的表征洪峰流量的 K 因子计算公式[12]:

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

式中: Q_m 为最大洪峰流量(m^3/s); A 为流域面积(km^2)。在双对数坐标纸上,流域面积大于 100 km^2 的各种面积世界最大洪峰流量的外包线为一直线。

当式(10)中 k 值取最大值 6 时,相应的最大洪峰流量为 $125,313 \text{ m}^3/\text{s}$ 。本次 PMF 计算成果为 $112,950 \text{ m}^3/\text{s}$,两者成果相差 10.95%,故本次设计成果基本合理。

7) 与上游电站 PMP 成果对比分析

Table 5. Comparison of PMF with 10,000-year check flood results at the S1 and upstream hydropower plants

表 5. S1 及上游电站 PMF 与万年一遇校核洪水成果对比

水电站站点	集水面积(km^2)	万年一遇(m^3/s)	PMF (m^3/s)	PMF/万年一遇
景洪	149,100	37,200	39,900	1.07
Ban Koum	418,578	74,697	92,997	1.245
Phou Ngoy	545,220	75,721	94,237	1.245
S1 水电站	555,900	91,700	112,950	1.232

经与频率计算的 S1 坝址成果进行比较,推荐的 S1 坝址可能最大洪水成果基本合理,约为 10,000 年一遇设

计洪水成果的 1.232 倍；上游 Ban Koum 水电站 PMF/10,000 年一遇约为 1.245 倍，两者倍比关系接近(如表 5)，说明本次计算成果基本合理可行。

6. 结论和建议

世界气象组织推荐采用 PMP/PMF 确定水电工程坝址的设计(校核)洪水，并作为水库大坝建设规模及管理策略的重要依据。湄公河流域水文站网稀缺，观测资料系列较短，实测资料不全。本文采用统计估算法推求湄公河流域 PMP，采用 SCS 模型进行产汇流计算 PMF，得出的主要结论和建议如下：

1) 卫星遥感降水数据具有估算 PMP 的潜力和适用价值，可为基于地面资料的传统方法提供有力补充，更为缺资料地区的 PMP/PMF 估算提供了一条新的途径。

2) S1 水电站坝址万年一遇设计洪水为 91,700 m³/s，PMF 估算结果为 112,950 m³/s，比王国安和世界大坝委员会外包线经验公式小 10% 左右，成果基本合理。S1 坝址可能最大洪水成果 PMF 约为万年一遇设计洪水成果的 1.232 倍；上游 Ban Koum 水电站 PMF/10,000 年一遇约为 1.245 倍，两者倍比关系接近，验证本次计算成果的合理可靠性。

基金项目

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司(11SD210003A-01-2022)科研项目。

参考文献

- [1] World Meteorological Organization (WMO). Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP). WMO-No. 1045. Geneva: WMO, 2009.
- [2] 熊景华, 郭靖, 郭生练, 等. 基于多源降水数据估算澜湄流域可能最大降水[J]. 水力发电学报, 2022, 41(9): 77-86.
XIONG Jinghua, GUO Jing, GUO Shenglian, et al. Estimating probable maximum precipitation based on multisource data of precipitation in the Lancang-Mekong River basin. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(9): 77-86. (in Chinese)
- [3] 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.
GUO Shenglian. Advanced and evaluation of design flood study. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2005. (in Chinese)
- [4] 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 Shenglian, LIU Zhangjun and XIONG Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 302-314. (in Chinese)
- [5] 王国安. 可能最大暴雨和洪水计算原理和方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
WANG Guoan. Principles and methods of PMP/PMF calculations. Beijing: China Hydrology and Hydroelectric Press, 1999. (in Chinese)
- [6] 林炳章. 统计估算法在可能最大降水研究中的应用[J]. 河海大学学报, 1981(1): 52-62.
LIN Bingzhang. Application of statistical estimation in study of probable maximum precipitation. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1981(1): 52-62. (in Chinese)
- [7] 林炳章, 兰平, 张叶晖, 等. 可能最大降水估算研究综述[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 92-102+114.
LIN Bingzhang, LAN Ping, ZHANG Yehui, et al. Review of probable maximum precipitation estimation. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 92-102. (in Chinese)
- [8] 张文华, 郭生练. 流域降雨径流理论与方法[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2008.
ZHANG Wenhua, GUO Shenglian. Theories and methods of watershed rainfall-runoff process. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2008. (in Chinese)
- [9] WIESNER, C. J. Hydrometeorology. London: Chapman and Hall, 1970.
- [10] 郭生练, 李娜, 熊景华, 等. 澜湄流域可能最大降水估算结果分析评价[J]. 水资源研究, 2022, 11(3): 238-246.
GUO Shenglian, LI Na, XIONG Jinghua, et al. Analysis and assessment of probable maximum precipitation estimation results in the Lancang-Mekong River basin. Journal of Water Resources Research, 2022, 11(3): 238-246. (in Chinese)
- [11] 王国安, 王军良, 李保国. 世界已知最大洪水及其外包线公式[J]. 人民黄河, 2006, 28(2): 1-5.
WANG Guoan, WANG Junliang and LI Baoguo. Known maximum floods in the world and its envelope curve formula. Yellow River, 2006, 28(2): 1-5. (in Chinese)
- [12] RODIER, J. A., ROCHE, M. Word catalogue of maximum observed floods. IAHS Publication No.143, 1984.