

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.01.007

# 澜沧江-湄公河流域水库联合调度防洪作用

侯时雨<sup>1</sup>, 田富强<sup>1</sup>, 陆颖<sup>2</sup>, 倪广恒<sup>1</sup>, 卢麾<sup>3</sup>, 刘慧<sup>4</sup>, 魏靖<sup>1</sup>

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 云南大学亚洲国际河流中心, 云南 昆明 650500;  
3. 清华大学地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 澜沧江-湄公河流域汛期洪灾频发, 气候变化极有可能进一步加剧该区域洪水的量级和发生频率, 需要上下游合作共同应对。建立了澜沧江-湄公河全流域分布式水文及水库调度模型, 模拟 1991—2005 年全流域 13 条支流和 5 个干流防洪控制断面的逐日天然流量过程, 在此基础上模拟全流域已建、在建和规划水库的联合调度过程, 分析防洪作用。结果表明: ① 全流域水库联合调度对湄公河 5 个主要断面均有显著的防洪作用, 在完全按照防洪目标对水库进行调度的情况下可将 200 年一遇洪水减至 20~50 年一遇。② 湄公河左岸支流的防洪能力远高于右岸, 具有较高防洪能力的支流有澜沧江、南乌河、南俄河、南屯河、濛河、色公河和桑河。③ 对不同断面起主要防洪作用的支流不同: 在琅勃拉邦上游, 澜沧江、南乌河起主要作用; 在那空帕农断面, 南俄河与南屯河加总的防洪作用与澜沧江基本相等; 在巴色下游, 濛河和色公河的作用均超过澜沧江。澜湄合作机制为上下游防洪合作提供了重要契机, 研究成果可为流域国协商建立联合防洪调度机制提供参考。

**关键词:** 水文模型; 水库联合调度; 防洪作用; 澜沧江-湄公河

**中图分类号:** P33      **文献标志码:**      **文章编号:** 1001-6791(2021)01-0068-11

澜沧江-湄公河是东南亚最重要的河流, 发源于中国青藏高原, 流经中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨、越南等 6 个国家, 最后汇入南中国海。中国境内为澜沧江, 出境后称湄公河。其干流全长 4 880 km, 汇流面积约 81 万 km<sup>2</sup>, 年均流量 14 500 m<sup>3</sup>/s<sup>[1]</sup>, 被誉为“东方的多瑙河”<sup>[2]</sup>, 哺育滋润了流域内 6 500 多万人<sup>[3-4]</sup>, 孕育了著名的吴哥文明<sup>[5]</sup>。

澜沧江-湄公河是世界上著名的雨洪河流, 单位面积洪峰流量接近全球极限值<sup>[6]</sup>, 两岸分布有大量居民点和基础设施<sup>[7]</sup>, 量级大、频率高的洪水给当地人民带来了巨大的生命财产损失<sup>[8]</sup>。例如在 2000 年大洪水中, 柬埔寨和越南死亡人数 347 人和 453 人, 道路被冲毁, 上万公顷农田受灾, 数百万人的生活受到影响<sup>[9]</sup>。多项研究结果表明, 气候变化导致该区域的洪水持续时间、发生频率和洪峰量级均呈上升趋势<sup>[10-15]</sup>, 这在客观上对防洪提出了更高要求。

20 世纪 50 年代以来, 随着东南亚经济的快速发展, 澜沧江-湄公河流域修建了越来越多的大坝, 各国从本国经济社会发展需要出发, 建设步骤各异, 目标也不相同: 泰国的水库主要用于灌溉, 老挝和中国的水库主要用于发电, 缅甸的水库大多处于规划阶段, 柬埔寨和越南由于地势偏低、地形相对平缓, 水库数量较少。21 世纪以来, 流域内水库建设速度明显加快, 相关资料表明 2020 年将成为全流域历史上新建水库投入运行数量最多的一年<sup>[16-17]</sup>。水利设施建设促进了中国、老挝和柬埔寨的经济发展, 为泰国和越南提供了电力<sup>[16]</sup>。预计到 2030 年, 全流域投入运行的水库总库容将超过 1 000 亿 m<sup>3</sup><sup>[15,18-20]</sup>。与一般的国内河流相比, 构建跨境防洪调度机制面临的挑战更大, 如何充分利用这些水库为全流域防洪做出贡献, 是流域各国普遍关注的问题。目前已有不少文献<sup>[10,15,21-28]</sup>研究澜沧江-湄公河流域水库建设对于下游的影响, 但大多使用局部

**收稿日期:** 2020-03-27; **网络出版日期:** 2020-09-03

**网络出版地址:** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200903.1411.002.html>

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0601603); 国家自然科学基金资助项目(51961125204)

**作者简介:** 侯时雨(1994—), 女, 陕西西原人, 博士研究生, 主要从事水文学水资源研究。

E-mail: housy16@mails.tsinghua.edu.cn

**通信作者:** 田富强, E-mail: tianfq@tsinghua.edu.cn

而非全流域的水库, 且多针对水文、生态方面, 缺乏联合防洪调度的相关研究。

本研究使用全流域可获得的所有在建、已建和规划水库的位置和库容信息, 基于分布式水文和水库调度模型, 分析上下游、左右岸支流水库联合调度的防洪作用, 以期为澜湄合作机制下开展联合防洪调度实践和相应制度建设提供参考。

## 1 研究区域和数据

湄公河三角洲地势平坦, 河网纵横, 水力关系复杂, 单一的水文模型不适用于其洪水模拟。因此, 本研究以柬埔寨金边以上流域为对象, 汇流面积约  $66.3 \text{ km}^2$ <sup>[29]</sup>, 占全流域总面积的 81.9%, 该区域是水库的主要分布区。

气象和降雨数据来源于湄公河委员会 (Mekong River Commission, MRC), 共 470 个雨量站和 32 个常规气象站 1991—2005 年的数据。166 个数据时间连续性较好的雨量站和 32 个常规气象站的降雨数据, 为模型提供逐日降雨信息。32 个常规气象站还提供大气压、温度、湿度、风速、日照时间、太阳辐射等逐日气象要素。

土壤数据使用联合国粮农组织 (FAO) 提供的全球土壤数据库, 空间分辨率为  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 。归一化植被指数 (NDVI)、叶面积指数 (LAI) 和积雪覆盖面积采用 MODIS 提供的数据产品, 空间分辨率为  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ , 时间分辨率为 16 d。

流量数据采用允景洪、清盛、琅勃拉邦、廊开、那空帕农、穆达汉、巴色和上丁 8 个干流水文站 1991—2005 年实测逐日流量, 湄公河水文站点的径流数据来自于 MRC, 站点分布见图 1。

水库数据来源于 CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems, 全流域共 452 个已建、在建、规划的水库, 其中 127 个库容较大的水库有库容、位置、建设年份、装机容量等信息, 其总库容为  $1\ 339.5 \text{ 亿 m}^3$ , 本研究在防洪调度中使用所有这些有库容和位置信息的已建、在建和规划的水库, 水库分布见图 1。其余没有详细信息水库的库容都小于  $200 \text{ 万 m}^3$ , 对于总库容的影响可忽略不计<sup>[18]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 研究思路

(1) 收集整理澜沧江-湄公河流域的地形、土壤、植被、气象、水文等数据, 建立分布式水文模型, 模拟湄公河干流 5 个重要防洪控制断面和 13 个主要支流 1991—2005 年的天然径流过程。1991—2005 年全流域建成的水库数量较少, 水库对水文过程影响较小, 利于水文模型的模拟和率定。

(2) 对模拟天然径流进行多年平均得到代表性径流过程线, 根据洪峰比例进行缩放得到用于模拟水库调度的汛期入库径流过程。

(3) 建立简单线性概念化水库调度模型, 模拟主要支流经过全流域所有已建、在建和规划水库调度后的径流过程。

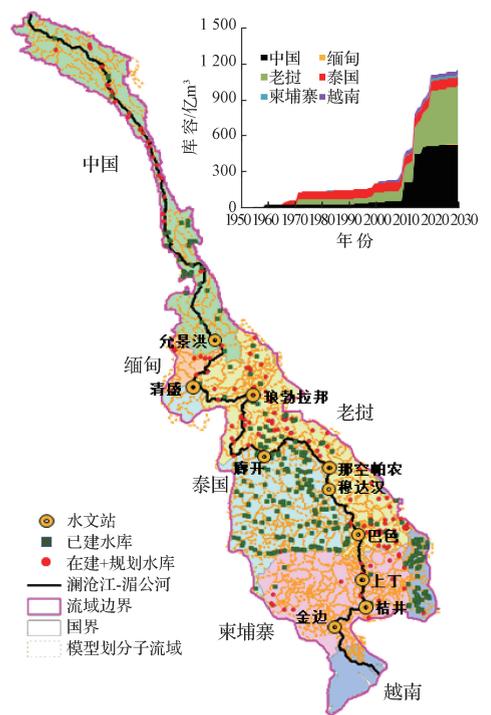


图1 澜沧江-湄公河流域水库和水文站点分布

Fig. 1 Dams and hydrological gauges in the Lancang-Mekong River basin

(4) 考虑洪水演进时间, 叠加 13 条支流经水库防洪调度后的径流过程线, 得到干流 5 个防洪控制断面调度后的径流过程线。

(5) 评估湄公河 13 条支流的防洪能力及水库联合调度对 5 个干流防洪控制断面的防洪作用。

## 2.2 水文模型

采用 THREW 模型(Tsinghua Hydrological Model based on Representative Elementary Watershed Model)模拟澜沧江-湄公河流域的天然径流过程<sup>[30]</sup>。该模型是基于代表性单元子流域的分布式物理性水文模型, 已在许多不同气候和下垫面条件的流域得到应用, 例如美国的伊利诺伊河流域<sup>[31-32]</sup>、奥地利的利恩茨流域<sup>[33]</sup>、雅鲁藏布-布拉马普特拉河流域<sup>[34]</sup>, 对径流均能达到良好的模拟效果。

基于 1 km × 1 km 空间分辨率的数字高程模型 DEM(Digital Elevation Model), 使用 Pfafstetter 方法<sup>[35]</sup>先将研究区域划分为 595 个子流域, 进一步将面积大于 5 000 km<sup>2</sup> 的 33 个子流域继续细分, 最终研究区域共被划分为 651 个子流域单元, 每一个子流域单元的面积小于 5 000 km<sup>2</sup>, 划分结果如图 1。模型中每一个子流域单元进一步被划分为 7 个子区, 包括积雪覆盖子区、饱和子区、不饱和子区、植被覆盖子区、裸土子区、子河网和主河网等。使用 1991—1999 年湄公河干流 8 个水文站点的实测逐日流量序列对模型进行嵌套式率定, 率定规则为: ① 从上游到下游依次率定; ② 固定率定好的上游子流域参数, 采用下游水文观测资料率定下游子流域参数。验证期为 2000—2005 年。模拟的时间步长为天, 采用纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient,  $E_{NS}$ )来评价模拟结果,  $E_{NS}$ 定义如下:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o(t) - Q_m(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o(t) - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

式中:  $Q_o(t)$  是  $t$  时刻的实测流量, m<sup>3</sup>/s;  $Q_m(t)$  是  $t$  时刻的模拟流量, m<sup>3</sup>/s;  $\bar{Q}_o$  是研究期的实测平均流量, m<sup>3</sup>/s。  $E_{NS}$  的取值范围是  $(-\infty, 1]$ ,  $E_{NS}$  越小说明模拟效果越差,  $E_{NS} = 0$  说明模拟结果接近实测流量的平均值,  $E_{NS}$  越接近 1 代表模拟效果越好,  $E_{NS} = 1$  说明模拟径流过程与实测径流过程完全重合。

## 2.3 不同重现期的汛期代表性径流过程线

湄公河流域往往形成复峰型洪水, 洪水持续时间长, 峰高量大, 过程线高而胖<sup>[36]</sup>, 洪峰流量及洪水持续时间均是决定洪灾严重程度的重要指标<sup>[37]</sup>。根据 MRC 的报告<sup>[38]</sup>, 湄公河汛期平均开始于 6 月中下旬、结束于 11 月中下旬, 因此本研究对 6 月 1 日—11 月 30 日径流过程进行全流域水库联合调度的防洪作用开展研究。

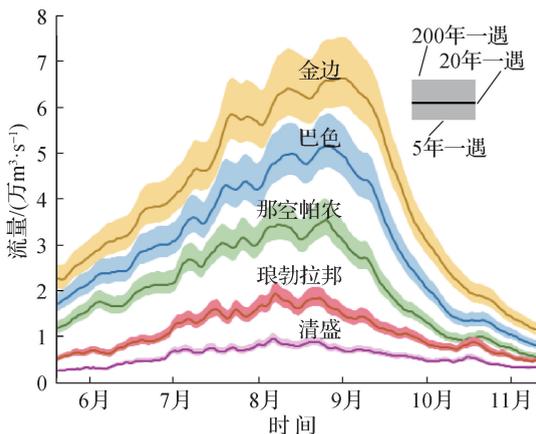


图2 5个防洪控制断面  $n$  年一遇的径流过程线  
Fig. 2 Flood hydrographs in different flood recurrence intervals at 5 sections on the Mekong River

为简化计算, 本研究对各支流出口和干流断面 1991—2005 年汛期径流过程线分别进行多年平均得到各处的汛期代表性径流过程线, Räsänen 等<sup>[28]</sup>的研究也采用了这一方法。在代表性径流过程线的基础上, 计算得到  $n$  年一遇的径流过程线, 步骤如下:

(1) 计算  $Q_n/Q_0$ , 其中  $Q_0$  是桔井站模拟的代表性径流过程线的洪峰流量,  $Q_n$  是桔井站  $n$  年一遇的洪峰流量。  $Q_n$  来自于 MRC 的报告<sup>[39]</sup>,  $n$  为 2、5、10、20、50、100、200 时,  $Q_n$  分别为 51 000 m<sup>3</sup>/s、59 500 m<sup>3</sup>/s、63 000 m<sup>3</sup>/s、66 500 m<sup>3</sup>/s、70 000 m<sup>3</sup>/s、72 500 m<sup>3</sup>/s、75 000 m<sup>3</sup>/s。桔井站是金边上游且最靠近金边的水文站, 位置见图 1。

(2) 使用  $Q_n/Q_0$  对各处的代表性径流过程线进行同比例缩放得到  $n$  年一遇的径流过程线, 如图 2 所示。这样得到的  $n$  年一遇径流过程线的峰值流量与历史统计值

一致, 而且保留了历年洪峰的时间信息, 与特定年份的径流过程线相比, 其洪峰频次更高, 在此径流过程线下进行水库调度, 可以使研究结果偏于安全。需要说明的是, 由于澜沧江-湄公河支流的相关研究较少, 没有收集到各支流  $n$  年一遇的洪峰数据, 因此, 本研究对所有支流和干流断面的径流过程线均采用桔井站的比例进行缩放。这可能不完全符合一些支流的实际情况, 但并不改变研究结论, 即水库在该防洪目标下的作用不会发生变化。

## 2.4 水库调度模型

本研究应用改进的简单线性概念化水库调度模型 (Simple Linear conceptual Model, SLM) 模拟澜沧江-湄公河流域水库联合调度对汛期径流过程的调节作用。在 SLM 模型中<sup>[40]</sup>, 水库调度分为 3 个阶段: ① 当入库流量小于下游安全流量时, 不进行水库调度, 出库流量等于入库流量; ② 当入库流量大于下游安全流量时, 水库发挥蓄水功能拦截部分入库水量, 使得出库流量小于入库流量; ③ 当水库蓄水量达到总库容时, 水库不再进行防洪调度而是优先保证大坝自身安全, 此时出库流量等于入库流量。由于本研究的目标是评估全流域水库联合调度的防洪作用, 因此对 SLM 规则进行适当调整, 即当入库流量小于下游安全流量且库内水位较高时, 水库在保证出库流量不大于下游安全流量的前提下释放部分库内存水, 尽早为可能到来的下一次洪峰腾出库容。这是一种偏于安全的汛期水库调度规则, 可通过如下方程来描述:

$$Q_{\text{out}} = \begin{cases} \min\{S_t/(60 \times 60 \times 24) + Q_{\text{in}}, Q_s\} & Q_{\text{in}} \leq Q_s \\ \max\{Q_s, Q_{\text{in}} - (S_m - S_t)/(60 \times 60 \times 24)\} & Q_{\text{in}} > Q_s \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $Q_{\text{out}}$  为经水库调度后的出库流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\text{in}}$  为入库流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_s$  为下游安全流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $S_m$  为水库总库容,  $\text{m}^3$ ;  $S_t$  为  $t$  时刻的水库蓄水量,  $\text{m}^3$ ,  $0 \leq S_t \leq S_m$ ;  $S_t/(60 \times 60 \times 24)$  和  $S_m/(60 \times 60 \times 24)$  为用径流形式表示的库容。

相关研究<sup>[40-41]</sup>定义了量纲一的水库影响指数  $I_{\text{RI}}$  (Reservoir Impact Index, 即库容和径流量的比值, 简称库径比) 来表示一条河流上水库对径流可能的影响程度, 计算方法见公式(3)。本研究借鉴其思想, 定义了适用于评估防洪调度中库容利用率和水库承担风险程度的水库防洪指数  $I_{\text{FD}}$  (Flood Detention Index), 计算方法见公式(4)。

$$I_{\text{RI}} = \frac{S}{A} \quad (3)$$

$$I_{\text{FD}, i, j} = \frac{\max(S_t)}{S} \quad (4)$$

式中:  $S$  为给定径流站上游控制流域范围内所有水库总的最大库容,  $\text{m}^3$ ;  $A$  为该站处的年径流量,  $\text{m}^3$ ;  $i, j$  分别为入库洪水、出库洪水重现期,  $a, i$  和  $j$  的组合表示防洪目标。

$I_{\text{FD}}$  的计算公式中, 分母是总库容, 分子是特定防洪目标下库水位最高时的水库蓄水量, 二者相除可以表征水库在特定防洪目标下的库容利用率, 反映防洪调度中水库本身面临的风险。水库在防洪中发挥的作用不仅和洪量有关, 还受到径流过程线和调度规则的影响, 因此, 分母采用调度过程中的最大蓄水量, 而非最大 30 日洪量。 $I_{\text{FD}}$  的有效取值范围是  $[0, 1]$ ,  $I_{\text{FD}}$  接近 0 说明防洪调度中库容利用率小, 水库面临的风险较低;  $I_{\text{FD}}$  接近 1 说明库容利用率大, 水库在防洪中承担的风险较高。

## 3 结果与分析

### 3.1 水文模型模拟结果

根据实测和模拟的逐日流量计算得到澜沧江-湄公河 8 个干流主要站点的  $E_{\text{NS}}$ , 如表 1 所示。率定期  $E_{\text{NS}}$  均大于 0.7, 验证期  $E_{\text{NS}}$  也基本在 0.6 以上, 说明模拟效果有较高的可信度<sup>[42-43]</sup>。

表1 模拟流量在湄公河干流8个水文站的  $E_{NS}$ Table 1  $E_{NS}$  values of simulated daily runoff at 8 hydrological gauges on the Lancang-Mekong River

水文站	率定期	验证期	水文站	率定期	验证期	水文站	率定期	验证期	水文站	率定期	验证期
允景洪	0.79	0.67	琅勃拉邦	0.71	0.89	那空帕农	0.85	0.54	巴色	0.75	0.79
清盛	0.78	0.59	廊开	0.81	0.85	穆达汉	0.86	0.69	上丁	0.82	0.78

### 3.2 主要支流防洪能力分析

图3展示了模型模拟的湄公河13条支流年均最大30日洪量和所有规划水库建成后的总库容,包括澜沧江、南垒河、南乌河、南俄河、南屯河、颂堪河、色邦亨河、色敦河、濠河、桑河、色公河、斯雷博河、洞里萨河。需要说明的是,澜沧江位于湄公河上游,为便于叙述,本文将其视为湄公河的一条支流。模拟结果显示,这13条支流的年均最大30日洪量占金边断面的81.6%。

$I_{FD}$ 同时描述水库在防洪调度中的库容利用率和风险程度, $I_{FD}$ 太小或太大均不是防洪的最佳状态。 $I_{FD}$ 过小说明洪量小、库容大,只需要一部分

同时描述水库在防洪调度中的库容利用率和风险程度, $I_{FD}$ 太小或太大均不是防洪的最佳状态。 $I_{FD}$ 过小说明洪量小、库容大,只需要一部分

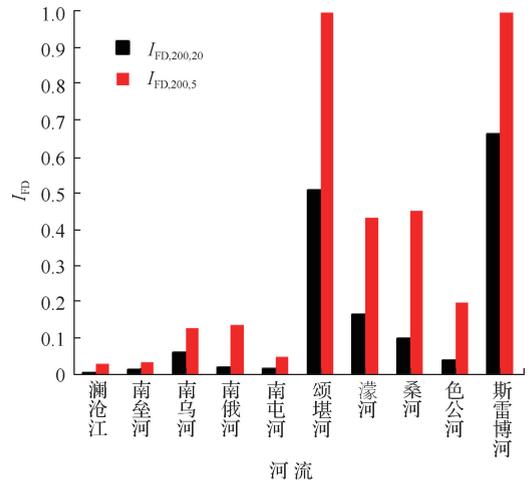
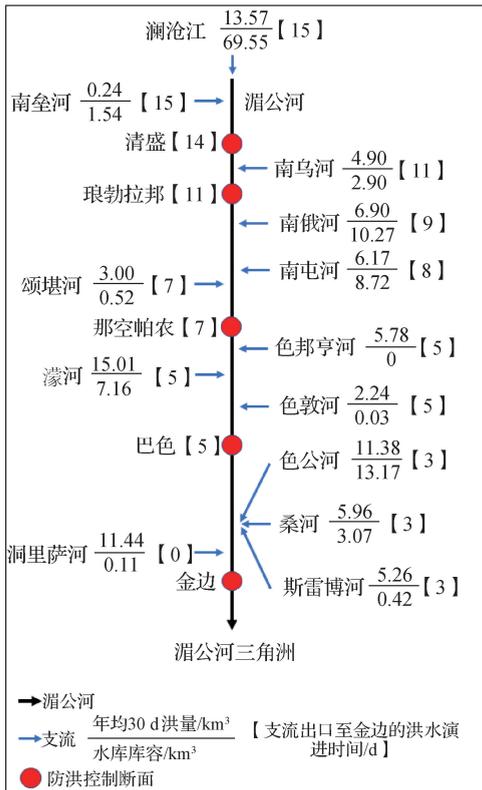
图4 10条支流的  $I_{FD,200,20}$  和  $I_{FD,200,5}$ Fig. 4  $I_{FD,200,20}$  and  $I_{FD,200,5}$  of 10 tributaries

图3 13条支流年均最大30 d洪量和库容分布

Fig. 3 Annual largest 30-day flood volumes and total reservoirs' storages of 13 tributaries

库容就已满足该支流的防洪要求,剩下的库容对于防洪而言是“多余”的。例如澜沧江的  $I_{FD,200,20}$  和  $I_{FD,200,5}$  均未超过0.05(见图4),这意味着相比于库容,澜沧江的洪量较小,其在湄公河下游防洪中发挥的作用与其库容大小不匹配。 $I_{FD}$ 过大也不好,这表明水库的防洪能力不足,承担防洪任务时大坝面临的安全风险较高。例如颂堪河和斯雷博河,  $I_{FD,200,20} > 0.5$ ,  $I_{FD,200,5} = 1$ ,说明其防洪能力十分有限,洪水来临时水库调度的优先目标应是保护大坝安全而非拦蓄洪水。

根据  $I_{FD}$  值可将这13条支流划分为3组:①澜沧江、南垒河、南乌河、南俄河、南屯河、色公河等6条支流,  $I_{FD,200,20} < 0.05$ ,  $I_{FD,200,5} < 0.2$ ,说明水库可以较好地控制洪水,洪水风险低。这些支流大多分布于湄公河上游或左岸,南垒河是其中唯一一条位于湄公河右岸的支流,但是由于洪量较小,且水库尚处规划阶段,因此可发挥的作用有限。②颂堪河、濠河、桑河、斯雷博河等4条支流,  $I_{FD,200,20} > 0.1$ ,  $I_{FD,200,5} > 0.4$ ,水库拦蓄洪水的能力有限,汛期防洪压力较大,洪水风险较高。③色邦亨河、色敦河、洞里萨河等3条支流,  $I_{FD,200,20}$  和  $I_{FD,200,5}$  均为1,因此未在图4中列出,这3条支流现阶段承担防洪任务的难度大。从图4中可

以明显看出, 湄公河流域偏上游支流的  $I_{FD}$  值普遍较小, 说明其控制洪水的能力较强, 而下游支流的防洪能力则尚显不足。

图5展示了将200年一遇洪水分别降至20年一遇和5年一遇的水库调度过程, 括号中的数字表示入库、出库洪水的重现期。和图4类似, 图5也没有展示色邦亨河、色敦河、洞里萨河的调度过程。

水库调度对下游防洪的作用受到天然洪水特征的影响, 以200年一遇洪水降至20年一遇为例: 一些支流的洪峰来得快去得也快, 水库需要在短时间内拦蓄大量洪水, 蓄水量主要呈现为单峰, 例如南乌河、南屯河、颂堪河、濠河、斯雷博河; 一些支流会长时间维持在较高水位, 水库调度持续时间长, 甚至可达一个月之久, 例如南垒河、色公河。一些支流不只一个洪峰, 水库需要在洪峰间歇期及时降低水位, 为下一个即将到来的洪峰腾出库容, 例如澜沧江、南俄河、桑河。

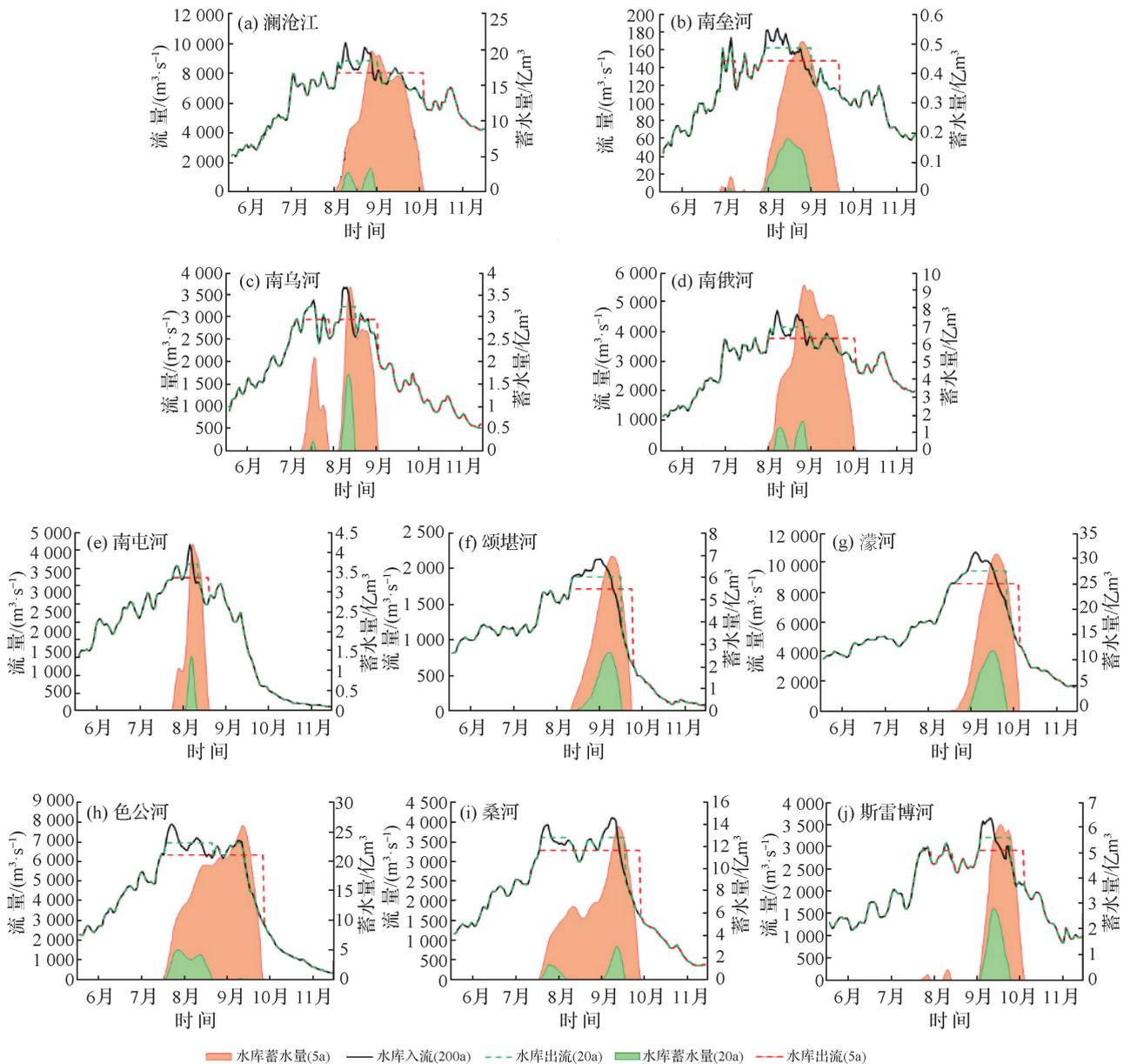


图5 将200年一遇洪水分别降至20年一遇和5年一遇的支流水库调度过程

Fig. 5 Flood processes of 10 tributaries under reservoir operation to mitigate flood recurrence interval from 200 years (inflow) to 20 and 5 years (outflow)

水库调度对下游防洪的作用还受到防洪目标的影响。当防洪目标从20年一遇变为5年一遇时,南乌河的最大蓄水量从1.7亿 $m^3$ 增至3.7亿 $m^3$ ,增加了一倍多,而南俄河的最大蓄水量则从2.0亿 $m^3$ 增至9.3亿 $m^3$ ,增加了将近4倍。濛河年均最大30日洪量比色公河大31.9%,在200年一遇洪水降至5年一遇的情景下,濛河的最大蓄水量比色公河高出19.2%,而在200年一遇洪水降至20年一遇的情景下,濛河的最大蓄水量超过色公河的2倍。

当防洪目标从20年一遇的洪水变为5年一遇,几乎所有支流水库的最大蓄水量都至少增加1倍,南屯河增加超过2倍,南俄河、澜沧江、色公河、桑河增加超过3倍。这说明提高防洪目标会导致支流水库承担的风险成倍增加。因此,通过上下游平等协商的方式,在联合防洪调度中设置一定的经济补偿是必要的,合理的经济补偿能够使得联合防洪调度机制更公平、更密切,也更长久。

### 3.3 支流水库联合调度对干流防洪作用分析

本研究通过分析湄公河干流8个水文站点实测逐日流量数据,基于上下游对应洪峰的发生时间,计算历史平均的洪水演进时间。在此基础上,将支流水库的防洪效果叠加在湄公河干流的径流过程线上,分析全流域13个支流水库联合调度对湄公河5个防洪控制断面的防洪作用,包括清盛、琅勃拉邦、那空帕农、巴色、金边,位置关系如图1和图3所示。这些断面均位于洪水风险较高的区域,对水库联合防洪调度有较大的需求<sup>[8]</sup>。

表2列出了湄公河干流5个防洪控制断面的削峰率及13条支流水库的防洪贡献率,削峰率指干流断面洪峰被削减的比例,防洪贡献率指某条支流拦洪量占所有支流总拦洪量的比例。结果显示:当各支流对200年一遇洪水按照20年一遇标准进行防洪调度时,5个防洪控制断面的削峰率分别是6.7%、4.9%、2.9%、2.7%、2.7%;按照5年一遇标准进行防洪调度时,5个断面的削峰率分别是11.3%、8.6%、5.7%、6.7%、6.9%。根据历史洪水数据<sup>[39]</sup>,与桔井处200年一遇洪峰相比,100年一遇洪峰降低3.3%,50年一遇洪峰降低6.7%,20年一遇洪峰降低11.3%。由此可见全流域水库联合调度有能力将湄公河干流洪水从200年一遇减至20~50年一遇,洪峰显著降低不仅有利于保护下游人民的生命安全,也意味着巨大的经济效益。以万象断面为例,根据MRC统计的洪水损失情况<sup>[44]</sup>,1991—2007年所有洪峰流量低于20000 $m^3/s$ 的场次洪水所造成的损失均未超过2300万美元,而2008年的大洪水造成至少5600多万美元的损失,如果此次洪水事件能够削峰10%,就可以避免大约3000万美元的损失。

表2 湄公河干流5个防洪控制断面的削峰率以及13条支流的防洪贡献率

%

Table 2 Peak-clipping rates at 5 sections and flood control contribution rates of 13 tributaries

项目	支流	200年一遇洪水减至5年一遇					200年一遇洪水减至20年一遇				
		清盛	琅勃拉邦	那空帕农	巴色	金边	清盛	琅勃拉邦	那空帕农	巴色	金边
断面削峰率		11.3	8.6	5.7	6.7	6.9	6.7	4.9	2.9	2.7	2.7
	澜沧江	95.0	62.5	29.6	14.5	9.7	97.5	77.9	38.2	23.6	15.4
	南垒河	5.0	3.3	1.6	0.8	0.5	2.5	2.0	1.0	0.6	0.4
	南乌河	-	34.2	15.4	7.4	4.8	-	20.2	8.3	4.8	3.0
	南俄河	-	-	17.6	8.4	5.5	-	-	31.4	18.2	11.4
	南屯河	-	-	12.3	5.9	3.9	-	-	9.5	5.5	3.4
	颂堪河	-	-	23.5	11.3	7.4	-	-	11.7	6.8	4.2
支流水库 防洪贡献率	色邦亨河	-	-	-	0	0	-	-	-	0	0
	色敦河	-	-	-	1.1	0.7	-	-	-	0.4	0.2
	濛河	-	-	-	50.7	33.5	-	-	-	40.1	25.2
	桑河	-	-	-	-	8.6	-	-	-	-	11.3
	色公河	-	-	-	-	14.3	-	-	-	-	21.3
	斯雷博河	-	-	-	-	7.9	-	-	-	-	3.4
	洞里萨河	-	-	-	-	3.1	-	-	-	-	0.9

(1) 对于湄公河干流不同断面,起主要防洪作用的支流不同。以将200年一遇洪水降至20年一遇为例:在清盛断面,澜沧江起主要作用;在琅勃拉邦断面,澜沧江的防洪贡献率超过2/3,南乌河的防洪贡献率约为1/5;在那空帕农断面,澜沧江的防洪贡献率超过1/3,南俄河、颂堪河、南屯河、南乌河4条支流加总的防洪贡献率约为3/5;在巴色断面,濠河的防洪贡献率约为2/5,澜沧江约为1/4,南俄河约为1/6;在金边断面,防洪贡献率超过20%的支流有濠河、色公河,防洪贡献率超过10%的支流有澜沧江、南俄河、桑河。

(2) 支流的防洪效果随支流出口与干流防洪控制断面之间距离的增加而减小。这主要是因为澜沧江-湄公河流域南北狭长,支流众多,随着越来越多的支流汇入湄公河,上游水库的防洪贡献率便逐渐减小。例如在将200年一遇洪水减至5年一遇的情景下,澜沧江对清盛断面的防洪贡献率为95.0%,但对金边断面仅为9.7%;南乌河对琅勃拉邦断面的防洪贡献率为34.2%,但对金边断面仅为4.8%;颂堪河对那空帕农断面的防洪贡献率为23.5%,但对金边断面仅为7.4%。

(3) 澜沧江梯级水库对湄公河下游的防洪作用不宜过高估计。当湄公河发生洪灾时,域内外国家往往都将关注点首先集中于澜沧江,认为澜沧江梯级水库库容较大,可以在湄公河下游的防洪中发挥主要作用。其实不然,研究结果表明,在湄公河下游巴色—金边断面的防洪中,澜沧江的作用远远不及濠河和色公河。这是因为影响防洪作用的因素不仅有水库库容,还有洪量。澜沧江虽然库容大,但不是湄公河汛期的主要产流区,防洪作用有限。如果在澜沧江-湄公河流域防洪合作中过于强调上游澜沧江水库,会使其他支流水库的作用被忽视。

(4) 可能对研究结果产生影响的因素有:① 水文站实测流量的误差。由于湄公河各个水文站隶属于不同国家,在观测标准和方法上难以统一,加之国家间经济发展水平各异,一些水文站的水位—流量关系曲线长期未得到更新,这些因素都加大了实测径流数据的误差,上下游水文站之间水量不平衡的情况时有发生,这在一定程度上会影响模型的率定和模拟。为尽量减小误差,本研究采用的8个水文站均为澜沧江-湄公河流域研究中最常用的水文站,应当说已是同类研究中最可靠的数据,但依然无法完全避免该因素的影响。② 洪水演进时间的误差。本研究通过分析历史实测径流过程中湄公河上下游对应洪峰的发生时间,计算湄公河干流的洪水演进时间,但洪水调度会导致出库流量变小,有可能影响洪水演进过程,导致支流防洪效果在叠加中产生误差。

## 4 结 论

本研究在澜沧江-湄公河流域建立分布式水文和水库调度模型,模拟1991—2005年湄公河13条支流和5个干流防洪控制断面的逐日天然流量,并在此基础上模拟全流域水库(包括已建、在建和规划水库)的联合调度过程,分析上下游和干支流水库联合调度的防洪作用,得出如下主要结论:

(1) 全流域水库联合调度对湄公河主要断面均有显著的防洪作用,在完全按照防洪目标对水库进行调度的情况下可将200年一遇洪水减至20~50年一遇。湄公河上游和左岸支流的汛期流量和水库库容均较大,对湄公河下游防洪起到显著作用,包括中国境内的澜沧江,老挝境内的南乌河、南俄河、南屯河,老挝、柬埔寨、越南境内的色公河、桑河。泰国境内的濠河虽位于湄公河右岸,但由于汇流面积大,在湄公河防洪中的作用也不可小觑。

(2) 在湄公河干流不同断面的防洪中,起主要作用的支流不同:在清盛断面以上,澜沧江起主要防洪作用;在琅勃拉邦断面,澜沧江、南乌河起到决定性的防洪作用;在那空帕农断面,澜沧江、颂堪河、南俄河、南乌河起主要防洪作用;在巴色断面以下,濠河的防洪作用最大,色公河、澜沧江、南俄河、桑河等支流均能对防洪起到一定作用。

(3) 不宜高估上游澜沧江梯级水库而忽视其他支流水库的防洪作用。澜沧江-湄公河防洪需要流域各国加强合作,建立上下游、干支流水库联合调度机制,以更好地发挥水库调节作用,应对未来可能的洪水威胁。

## 参考文献:

- [1] MRC. State of the basin report 2010[R]. Vientiane: MRC, 2011.
- [2] 林芸, 段玮, 刘阳容. 澜沧江上游流域暴雨天气成因分析[J]. 科技资讯, 2015, 13(34): 129-134. (LIN Y, DUAN W, LIU Y R. Causal analysis of stormy weather in the upstream of Lancang River basin[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(34): 129-134. (in Chinese))
- [3] MRC. State of the basin report 2018[R]. Vientiane: MRC, 2019.
- [4] 游珍, 封志明, 姜鲁光, 等. 澜沧江-湄公河流域人口分布及其与地形的关系[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 21-29. (YOU Z, FENG Z M, JIANG L G, et al. Population distribution and its spatial relationship with terrain elements in Lancang-Mekong River basin[J]. Mountain Research, 2014, 32(1): 21-29. (in Chinese))
- [5] MRC. Annual Mekong flood report 2008[R]. Vientiane: MRC, 2009.
- [6] USGS. The world's largest floods, past and present: their causes and magnitudes[R]. Virginia: US Geological Survey, 2004.
- [7] CHINH D T, GAIN A K, DUNG N V, et al. Multi-variate analyses of flood loss in Can Tho City, Mekong Delta[J]. Water, 2015, 8(1): 6.
- [8] 陈兴茹, 王兴勇, 白音包力皋. 1962 年以来湄公河流域国家洪灾损失时空分布分析[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 113-116. (CHEN X R, WANG X Y, BAIYINBAOLIGAO. Analysis of spatial and temporal distribution of flood losses in Mekong River basin since 1962[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 113-116. (in Chinese))
- [9] 陈兴茹, 王兴勇, 白音包力皋. 湄公河流域洪旱灾害损失分析[J]. 水利经济, 2019, 37(1): 54-58. (CHEN X R, WANG X Y, BAIYINBAOLIGAO. Flood and drought losses in Mekong River basin[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(1): 54-58. (in Chinese))
- [10] MRC. Assessment of basin-wide development scenarios: main report[R]. Vientiane: MRC, 2010.
- [11] HIRABAYASHI Y, MAHENDRAN R, KOIRALA S, et al. Global flood risk under climate change[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9): 816-821.
- [12] RÄSÄNEN T A, KUMMU M. Spatiotemporal influences of ENSO on precipitation and flood pulse in the Mekong River basin[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476(7): 154-168.
- [13] VÄSTILÄ K, KUMMU M, SANGMANEE C, et al. Modelling climate change impacts on the flood pulse in the Lower Mekong floodplains[J]. Journal of Water and Climate Change, 2010, 1(1): 67-86.
- [14] HOANG L P, LAURI H, KUMMU M, et al. Mekong River flow and hydrological extremes under climate change[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(7): 3027-3041.
- [15] WANG W, LU H, LEUNG L R, et al. Dam construction in Lancang-Mekong River basin could mitigate future flood risk from warming-induced intensified rainfall[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(20): 10378-10386.
- [16] MRC. IWRM-based basin development strategy 2016—2020 for the Lower Mekong basin[R]. Vientiane: MRC, 2016.
- [17] HIRSCH P. The shifting regional geopolitics of Mekong dams[J]. Political Geography, 2016, 51: 63-74.
- [18] LAURI H, De MOEL H, WARD P J, et al. Future changes in Mekong River hydrology: impact of climate change and reservoir operation on discharge[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(12): 4603-4619.
- [19] JOHNSTON R, KUMMU M. Water resource models in the Mekong Basin: a review[J]. Water Resources Management, 2012, 26(2): 429-455.
- [20] GRUMBINE R E, XU J C. Mekong hydropower development[J]. Science, 2011, 332(6026): 178-179.
- [21] 侯时雨, 田富强, 倪广恒. 澜沧江-湄公河流域产输沙和水库拦沙研究存在问题分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 619-628. (HOU S Y, TIAN F Q, NI G H. Review of sediment yield, transportation, and trap in reservoirs in Lancang-Mekong River basin[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(4): 619-628. (in Chinese))
- [22] TRUNG L D, DUC N A, NGUYEN L T, et al. Assessing cumulative impacts of the proposed Lower Mekong Basin hydropower cascade on the Mekong River floodplains and delta: overview of integrated modeling methods and results[J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 122511.
- [23] WYATT A B, BAIRD I G. Transboundary impact assessment in the Sesan River basin: the case of the Yali Falls Dam[J]. International Journal of Water Resources Development, 2007, 23(3): 427-442.

- [24] PIMAN T, COCHRANE T, ARIAS M, et al. Assessment of flow changes from hydropower development and operations in Sekong, Sesan, and Srepok Rivers of the Mekong Basin[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2013, 139(6): 723-732.
- [25] NGO L A, MASIH I, JIANG Y, et al. Impact of reservoir operation and climate change on the hydrological regime of the Sesan and Srepok Rivers in the Lower Mekong Basin[J]. *Climatic Change*, 2018, 149(1): 107-119.
- [26] PIMAN T, LENNAERTS T, SOUTHALACK P. Assessment of hydrological changes in the Lower Mekong Basin from basin: wide development scenarios[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(15): 2115-2125.
- [27] HOANG L P, van VLIET M T H, KUMMU M, et al. The Mekong's future flows under multiple drivers: how climate change, hydropower developments and irrigation expansions drive hydrological changes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 601-609.
- [28] RÄSÄNEN T A, KOPONEN J, LAURI H, et al. Downstream hydrological impacts of hydropower development in the Upper Mekong basin[J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(12): 3495-3513.
- [29] 何大明. 澜沧江-湄公河水文特征分析[J]. *云南地理环境研究*, 1995, 7(1): 58-74. (HE D M. Analysis of hydrological characteristics in Lancang-Mekong River[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1995, 7(1): 58-74. (in Chinese))
- [30] TIAN F Q, HU H P, LEI Z D. Thermodynamic watershed hydrological model: constitutive relationship[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(9): 1353-1369.
- [31] LI H Y, SIVAPALAN M, TIAN F Q. Comparative diagnostic analysis of runoff generation processes in Oklahoma DMIP<sub>2</sub> basins: the Blue River and the Illinois River[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 418/419: 90-109.
- [32] TIAN F Q, LI H Y, SIVAPALAN M. Model diagnostic analysis of seasonal switching of runoff generation mechanisms in the Blue River basin, Oklahoma[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 418/419: 136-149.
- [33] HE Z H, TIAN F Q, GUPTA H V, et al. Diagnostic calibration of a hydrological model in a mountain area by hydrograph partitioning[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(4): 1807-1826.
- [34] XU R, HU H C, TIAN F Q, et al. Projected climate change impacts on future streamflow of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra River[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 175: 144-159.
- [35] PFAFSTETTER O. Classification of hydrographic basins: coding methodology[R]. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1989: 25-28.
- [36] 李昌文, 徐照明, 游中琼, 等. 湄公河干流洪水洪灾特点及防洪对策研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(7): 35-45. (LI C W, XU Z M, YOU Z Q, et al. Flood characteristics and flood control countermeasures in mainstream Mekong River[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(7): 35-45. (in Chinese))
- [37] JAVELLE P, OUARDA T B M J, LANG M, et al. Development of regional flood-duration-frequency curves based on the index-flood method[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 258(1/2/3/4): 249-259.
- [38] MRC. Annual Mekong flood report 2014[R]. Vientiane: MRC, 2015.
- [39] MRC. Overview of the hydrology of the Mekong Basin[R]. Vientiane: MRC, 2005.
- [40] WANG W, LI H Y, LEUNG L R, et al. Nonlinear filtering effects of reservoirs on flood frequency curves at the regional scale [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(10): 8277-8292.
- [41] LÓPEZ J, FRANCÉS F. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(8): 3189-3203.
- [42] WANG W, LU H, YANG D W, et al. Modelling hydrologic processes in the Mekong River basin using a distributed model driven by satellite precipitation and rain gauge observations[J]. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0152229.
- [43] 彭雪婷, 卢麾, 汪伟, 等. 基于分布式水文模型的怒江流域气象干旱和水文干旱分析[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(8): 94-100. (PENG X T, LU H, WANG W, et al. Distributed hydrological model-based analysis on meteorological and hydrological drought of Nujiang River basin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(8): 94-100. (in Chinese))
- [44] MRC. Annual Mekong flood report 2008[R]. Vientiane: MRC, 2009.

## Potential role of coordinated operation of transboundary multi-reservoir system to reduce flood risk in the Lancang-Mekong River basin\*

HOU Shiyu<sup>1</sup>, TIAN Fuqiang<sup>1</sup>, LU Ying<sup>2</sup>, NI Guangheng<sup>1</sup>, LU Hui<sup>3</sup>, LIU Hui<sup>4</sup>, WEI Jing<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Asian International Rivers Center of Yunnan University, Kunming 650500, China;*

3. *Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

4. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)*

**Abstract:** The Lancang-Mekong River (LMR) basin has historically been affected by severe floods and is likely to suffer further flood events with higher peaks and longer duration in the future due to climate change, which calls for collective action to respond. This study examined the potential flood control effect of coordinated operation of the LMR transboundary multi-reservoir system by establishing a distributed hydrological model coupled with a reservoir operating model, simulating the runoff of 13 tributaries and 5 mainstream sections. Results show that: ① Flood magnitude at the five sections along the Mekong River is significantly reduced by mitigating flood recurrence from 200 years to 20—50 years. ② In terms of flood control, the left-bank tributaries contribute more than the right bank. Tributaries with relatively higher flood control capacity are: Lancang, Nam Ou, Nam Ngum and Nam Theun, Nam Mun, Se Kong and Se San. ③ Different tributaries play a major role in flood control across regions. Luang Prabang's main flood control tributaries are Lancang and Nam Ou. At Nakhon Phanom, Lancang's flood control contribution is same as Nam Ngum and Nam Theun's sum. In the downstream of Pakse, the flood control contribution of Nam Mun and Se Kong are higher than Lancang. This research provides a reference for transboundary flood control cooperation between riparian countries, which face an important opportunity underpinned by the Lancang-Mekong Cooperation Mechanism (LMC).

**Key words:** hydrological model; reservoir operation; flood control; Lancang-Mekong River

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFA0601603) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51961125204).