

澜沧江-湄公河流域干旱特性与 水库调度影响评估研究

2020年7月

作者

田富强

教授，清华大学跨境河流水与生态安全研究中心

刘慧

高级工程师，中国水利水电科学研究院水力学研究所

侯时雨

博士生，清华大学跨境河流水与生态安全研究中心

李琨彪

博士生，清华大学跨境河流水与生态安全研究中心

卢麾

副教授，清华大学跨境河流水与生态安全研究中心

倪广恒

教授，清华大学跨境河流水与生态安全研究中心

穆祥鹏

教授，中国水利水电科学研究院水力学研究所

白音包力皋

教授，中国水利水电科学研究院水力学研究所

免责声明

此评估报告由清华大学跨境河流水与生态安全研究中心和中国水利水电科学研究院水力学研究所共同编制。虽然研究人员已尽可能使此报告中所包含的信息、观点和分析结果基于可靠的来源，但完成单位并不直接或间接保证其准确性和完整性。报告中的观点反映了报告撰写者的判断，如有变更恕不另行通知。清华大学、中国水利水电科学研究院，其下属部门和员工，其项目合作方及其员工，均不承担由任何第三方引用此报告的信息、观点和分析结果所导致的法律义务和责任。

目 录

执行摘要.....	i
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目标和范围.....	2
第二章 研究方法和数据.....	6
2.1 研究方法综述.....	6
2.2 水文气象数据.....	8
2.3 干旱分析方法.....	10
2.4 分布式水文模型.....	13
2.5 基于 IMERG 卫星降水产品驱动的径流模拟.....	17
第三章 主要研究结果.....	19
3.1 澜湄流域干旱特性.....	19
3.2 2019 年干旱.....	21
3.3 湄公河流域天然径流组成.....	26
3.4 水库调度对干流流量的影响.....	29
第四章 结论和建议.....	31
4.1 主要结论.....	31
4.2 建议.....	32
致谢.....	33

执行摘要

澜沧江—湄公河流域（以下简称澜湄流域）近几十年干旱频发。由于非正常季风导致降雨偏少，厄尔尼诺现象导致高温强蒸发，2019年澜湄流域发生了严重干旱。此次旱情引起了域内外的广泛关注和报道。本研究旨在增强全流域的科学认知和互信，为抗旱联合行动奠定基础。通过收集全流域水文气象数据，利用国际先进的方法，揭示澜湄流域干旱特征，以及水库调度对湄公河干流径流的影响。

具体来说，本研究的目标包括：（1）揭示澜湄流域干旱发生频率和时空分布等特征。（2）量化湄公河干流重要断面的天然流量地区组成特征。（3）分析澜沧江梯级水库调度对湄公河干流径流的影响。

本研究采用两个气象干旱指标（SPEI 和 SPI）开展澜湄流域气象干旱特征分析，干旱指标的计算基于 1901-2019 年的 CRU TS 数据集和 1981-2019 年的 CHIRPS 数据。构建了澜湄流域（金边以上）的分布式水文模型（THREW），基于站点数据和遥感数据模拟了 1991-2019 年的径流。中国水利部和湄公河委员会提供了 8 个水文站（景洪、清盛、琅勃拉邦、廊开、那空帕农、穆达汉、巴色和上丁）的 1991-2019 年逐日径流数据。

研究表明，澜湄流域的干旱频率增大，干旱发生在干季

的概率显著高于雨季。2019年是过去一个多世纪最严重的干旱年份之一。澜湄流域水库调度可对流域抗旱发挥积极作用。主要结论如下。

(1) 干旱特征：澜湄流域干旱发生频率较高，发生严重气象干旱（ $SPEI < -1.5$ ）的平均频率为 7%。流域内遭受重特大气象干旱频率最高的地区位于澜沧江中上游，达到 12%以上。与过去 60 年相比，近 59 年来澜湄流域大部分地区发生重特大干旱的频率在增加。澜湄流域旱季干旱发生比例明显高于雨季，说明水库遵循正常调度规则，即蓄洪补枯的调度方式，从长期整体来看有利于湄公河流域干旱的应对。2019 年是澜湄流域近百年来最严重的干旱年份之一，干旱强度最大的地区位于澜沧江下游到湄公河上游（廊开）区间。2019 年的干旱特点是持续时间长，雨季降水量严重偏少。

(2) 天然径流组成：澜沧江年径流量占清盛站年径流量的 64.4%，越靠近湄公河下游，澜沧江径流量占比越小：廊开 39.5%，那空帕农 24.9%，上丁 14.3%。这意味着，当湄公河下游发生干旱时，位于澜沧江的水库可能无法补充足够的水，全流域上下游和干支流水库的联合调度可以更好地缓解下游干旱。

(3) 水库调度对干流流量的影响：澜沧江梯级水库雨季蓄洪，旱季放水，有效增加了湄公河旱季流量。考虑到湄公河流域农业需水高峰在旱季，且旱季干旱发生的频率远高于

雨季，因此澜沧江梯级水库发挥的调丰补枯作用总体上有利于缓解湄公河流域的旱情。

为提高流域抗旱能力，提出如下建议：

(1) 工程措施和非工程措施并举。澜湄流域旱季干旱发生的频率高于雨季。湄公河流域农业需水高峰出现在旱季，缺水更容易导致农业减产，建议采取综合措施应对旱季干旱，包括工程措施和非工程措施，如加强蓄水工程和配套渠系建设，提高供水能力；调整农业种植结构，选择抗旱作物类型；加强旱情监测预警系统建设；发展节水抗旱灌溉栽培技术等。

(2) 干支流水库联合调度发挥防洪抗旱作用。根据径流组成分析，澜沧江对湄公河干流流量的占比在廊开已降至 39.5%，在上丁进一步降低至 14.3%。需要注意的是，根据 CGIAR 水、土地和生态系统研究项目的数据，湄公河支流水库的总库容达到 372 亿 m^3 以上，到 2030 年，其总库容将超过 1000 亿 m^3 ，对湄公河干流的径流调节具有重要作用。澜湄流域的干旱具有明显的时空异步特征。建议澜湄流域各国加强上下游及干支流水库联合调度的相关研究，使这些水库更好的发挥调节作用，为增加整个流域的效益提供技术支持。

(3) 全流域洪旱预报系统联合研究。需加强合作以应对挑战，同时开展水资源及相关利益共享。建议澜湄六国的专家开展联合研究，携手建立全流域洪旱预报系统及互惠合作机制，促进流域防洪抗旱。

第一章 绪论

1.1 研究背景

澜沧江发源于我国青海省，流经西藏自治区和云南省，在云南省南部西双版纳傣族自治州流出国境，出境后称湄公河，流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南等 5 个国家，于越南胡志明市西部入南中国海。澜沧江—湄公河流域（以下简称澜湄流域）总面积 81.24 万 km²，干流全长约 4880km，居世界第十位；干流总落差约 5060m，河道平均比降 1.04‰；入海口多年平均径流量为 4750 亿 m³（Mekong River Commission and Ministry of Water Resources of China, 2016）。

本报告中，澜沧江指中国国内的河段，流经下游五国的河段为湄公河。湄公河从中、缅、老边界到老挝的万象为上游段，万象至巴色为中游段，巴色至柬埔寨的金边为下游，金边以下到河口为三角洲河段。澜沧江-湄公河干流主要水文站点位置见图 1，详细信息见表 1。

历史上澜湄流域水旱灾害频发，严重威胁着沿岸人民的生命和财产安全。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）历次报告表明，气候变化导致全球范围内气温升高(IPCC, 2014)，加剧极端洪旱灾害的发生频率和严重程度。近年来，澜湄流域

干旱事件的发生频次和强度均有增加(Tian and Liu, 2016; Guo et al., 2017), 对流域各国的生活用水、农业灌溉、生态系统和航运都带来了严重影响。2019年下半年, 澜湄流域再次发生全流域型的严重干旱。湄公河委员会有关监测数据和报告以及各国信息显示, 受持续高温少雨影响, 湄公河干支流各主要水文站水位6月份以后均低于常年同期水位, 大部分地区出现了不同程度的干旱, 其中老挝局部地区旱情达50年一遇; 泰国和越南更是经历了持续严重干旱的侵袭, 境内支流降雨明显减少; 柬埔寨受干旱和高温影响, 当地政府提示粮食歉收等情况。

众所周知, 澜湄流域是跨境河流, 各国加强协作联合抗旱十分重要。正如 Elinor Ostrom 所说, 建立认知和互信是采取联合行动解决问题的基础 (Ostrom, 2011)。因此, 对干旱特征和水利工程(例如水库)作用的科学理解是建立认知和互信的第一步, 这正是本研究的目标。本研究收集全流域的水文气象数据、采用国际先进的方法对澜湄流域的旱情进行评估, 并分析水库调度对湄公河干流径流的影响。希望本研究能够为认识这条由中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南等六国共享的重要河流提供有益的帮助。

1.2 研究目标和范围

以澜沧江-湄公河全流域为研究对象, 基于长序列历史资

料，选用国际认可的先进技术方法评估澜湄流域干旱特性及水库调度对缓解流域旱情的影响。具体研究目标为：

(1) 基于长序列气象数据集和气象干旱指标揭示澜湄流域干旱发生频率和季节分布等特征。

(2) 量化湄公河干流重要断面天然流量的地区组成特征。

(3) 分析澜沧江梯级水库调度对湄公河干流径流的影响。

表 1 澜沧江 - 湄公河流域干流水文站信息表

河名	站名	所在国家	集水面积(万 km ²)	距河口距离(km)
澜沧江	景洪	中国	14.91	2718
湄公河	清盛	泰国	18.90	2364
	琅勃拉邦	老挝	26.80	2010
	廊开	泰国	30.20	1580
	那空帕农	泰国	37.30	1221
	穆达汉	泰国	39.10	1128
	巴色	老挝	54.50	867
	上丁	柬埔寨	63.50	683

第二章 研究方法和数据

2.1 研究方法综述

(1) 干旱分析: 澜湄流域干旱分析采用了两个气象干旱指数, 即标准降水蒸散指数 (SPEI) 和标准降水指数 (SPI)。采用了两个长序列再分析数据集, 即 1901 年至 2019 年的 CRU TS (Climate Research Unit gridded Time Series) 数据集和 1981 年至 2019 年的 CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data) 降水数据。

(2) 径流组成分析: 本研究建立了澜湄全流域分布式水文模型 (THREW)。根据澜沧江-湄公河干流沿岸 8 个主要水文站观测流量对模型进行了校准和验证 (如表 1 所示)。采用历史上无水库影响期 (1991-2001 年) 的站点气象水文资料对模型进行分布式率定和验证。澜沧江主要大坝运行年份与基本参数如表 2 所示。由于 2005 年以后可用的雨量站数量显著减少, 我们采用 GPM IMERG 卫星遥感降水产品 (2001-2019 年) 数据驱动模型, 并利用站点观测降水和卫星遥感降水的重叠期 (2001-2005 年) 验证卫星遥感降水模拟结果的准确性。基于模型模拟结果分析了 8 个水文站点的径流组成。

(3) 水库调度对湄公河干流径流量的影响: 本研究采用 1991-2019 年集成降水数据 (降水观测数据与卫星降水产品)

驱动 THREW 水文模型模拟重建了湄公河流域清盛水文站天然径流。然后，通过比较不同时段清盛水文站天然流量和观测流量，研究了水库调度对径流的影响。根据大型水电站建设时间（如表 2 所示），以 1991-2001 年为没有明显大坝扰动的准自然期。在此期间，仅漫湾水库于 1995 年建设运行，其总库容为 8.87 亿立方米，与景洪 562 亿立方米的年平均径流量相比可以忽略不计（MRC and MWR of China, 2016）。然后我们以 2010-2019 年作为水库调度影响期，两座大型水库（小湾水电站和糯扎渡水电站）分别于 2010 年和 2014 年建成。

表 2. 澜沧江主要大坝建设年份及其基本参数 (WLE, 2018)

大坝名称	运行时间	死库容 (百万立方米)	总库容 (百万立方米)
漫湾	1992	630	887
大朝山	2003	465	740
景洪	2009	810	1119
小湾	2010	4750	14645
功果桥	2012	196	316
糯扎渡	2014	10414	21749
苗尾	2016	359	660
黄登	2017	1031	1418
乌弄龙	2018	236	272
大华桥	2018	252	293
里底	2019	57	71

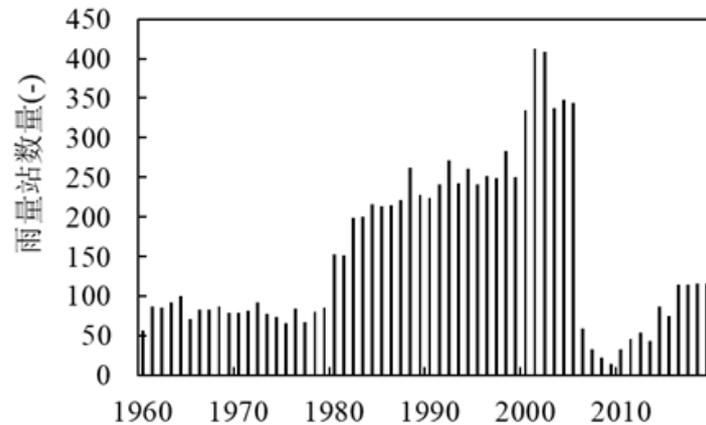


图 2. 1960-2019 年湄公河流域可用的雨量站数量

2.2 水文气象数据

(1) 站点气象和降水数据来源于湄公河委员会 (Mekong River Commission, MRC) 和中国气象局。湄公河区域包括 1991-2005 年 166 个雨量站和 32 个气象站的逐日数据。澜沧江区域包括 12 个气象站和 12 个雨量站的同期逐日数据。气象数据包括大气压、温度、湿度、风速、日照时间、太阳辐射、风速、风向等。根据 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散发作为 THREW 模型重要输入。

(2) 实测逐日流量数据采用 MRC 和中国水利部提供的澜沧江-湄公河干流 8 个水文站 1991-2019 年数据 (景洪、清盛、琅勃拉邦、廊开、那空帕农、穆达汉、巴色和上丁)。

(3) 由于 2005 年之后可用的雨量站数量大幅减少 (见图 2), 最近 14 年 (2006-2019) 的水文模拟采用了 IMERG Final Run 数据。IMERG 是全球降水测量计划 (Global

Precipitation Measurement, GPM) 发布的卫星降水产品, 大量研究表明 IMERG 数据产品在东南亚有良好的精度 (Li et al., 2019; Wang et al., 2017; He et al., 2017)。

(4) 干旱分析主要采用 CRU TS (Climatic Research Unit gridded Time Series) 全球再分析气象数据集和 CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data) 降水数据。CRU TS 产品是一套被广泛使用的实测气象数据集, 由英国 East Anglia 大学气候研究中心 (CRU) 国家大气科学中心 (NCAS) 提供。当前 CRU 序列长度为 1901-2019 年, 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 在气象水文研究中得到了广泛的应用 (Harris et al., 2020)。其包括基于近地表观测的 10 个变量: 温度 (平均值、最小值、最大值和昼夜温差), 降水量 (总量, 降水天数), 湿度 (以蒸气压计), 霜冻天数, 云量和潜在蒸散发。本研究基于 CRU TS 数据集提取澜湄流域过去 119 年 (1901-2019) 的长序列降水和潜在蒸散发数据。CHIRPS 降水数据由美国地质调查局 (USGS) 和加州大学圣芭芭拉分校 (University of California, Santa Barbara) 联合开发, 序列长度为 1981 年至近期, 空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。CHIRPS 降水数据已成功应用于湄公河流域的气象干旱分析 (Guo et al., 2017)。本研究使用 1981-2019 年 CHIRPS 月降水量数据, 目的是与基于 CRU TS 数据的结果进行比较。

2.3 干旱分析方法

(1) 气象干旱指标

本研究采用气象干旱指标——标准化降水蒸散指数 (SPEI) 和标准化降水指数 (SPI) 两个气象干旱指标开展分析。

标准化降水指数(SPI)是一种广泛采用的干旱诊断指标,用于评价各时间尺度上降水量过多或不足。计算 SPI 的典型过程如下: 1) 在 SPI 计算中采用 Γ 分布概率描述降水。2) 进行偏态概率分布标准化; 3) 使用标准降水累积频率分布来对干旱进行分级。SPI 是表示给定时期内降水发生概率的指标,适用于月尺度以上的气象干旱监测和评估。SPI 具有易于获取数据,易于计算,时间尺度灵活和区域可比性的优点,近年来已广泛用于描述气象干旱。计算 SPI 的公式如下 (McKee et al., 1993):

$$SPI = S \left\{ t - \frac{(c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1.0} \right\} \quad (1)$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}} \quad (2)$$

具体而言, x 是降水样本值; S 是概率密度的正负系数; c_0 , c_1 , c_2 和 d_1 , d_2 , d_3 是用于将 Γ 分布概率转换为累积频率的简化近似分析公式的计算参数, 而 $c_0=2.515517$, $c_1=0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_1=1.432788$, $d_2=0.189269$ 和 $d_3=0.001308$ 。

$G(x)$ 是与 Γ 函数有关的降水分布概率。根据 Γ 函数的概率密度积分公式为：

$$G(x) = \frac{2}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)} \int_0^x x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} dx, \quad x > 0 \quad (3)$$

其中，当 $G(x) > 0.5$ 时 $S = 1$ ，当 $G(x) \leq 0.5$ 时 $S = -1$ 。

SPEI 的计算过程与 SPI 相似。但是，SPEI 使用“气候水平衡”概念，即使用降水量与潜在蒸散发量之间的差值 ($P-ET_0$)，而不是降水量 (P) 作为输入 (Beguería et al., 2014)。

其计算尺度可从 1 个月到 48 个月或更长，表示为 SPEI1...SPEI48 (SPI1...SPI48) 等。较小尺度的 SPEI/SPI 指标用于表征短期干旱，更长时间尺度的指标，如 SPEI12/SPI12，则反应年际波动，若非连续 12 个月时段内显著湿润或干燥，指标会接近 0 (WMO, 2012)。考虑到长期干旱的影响更大，本研究在进行流域总体干旱特征分析时采用 12 个月尺度的指标。在分析较短时间尺度干旱特征和展示 2019 年干旱演进过程时采用 3 个月尺度的指标 SPEI3 和 SPI3。

由于考虑了蒸散发对干旱强度的影响，和仅仅基于降水的干旱指标相比，SPEI 更能反映干旱对水文系统和生态系统的影响。因此，本研究主要基于 CRU TS 数据集中的 1901-2019 年降水和潜在蒸散发数据计算 SPEI 指标，并开展分析。同时，为进一步验证结果的合理性，本研究还基于 1981-2019

年的 CHIRPS 数据计算了 SPI 指标。

根据中国国家标准《气象干旱等级》(GB/T 20481-2017) 和国际气象组织 (WMO) 相关导则, SPEI/SPI 的干旱等级划分如表 3 所示。两个等级划分体系对于中等、严重和特大干旱的划分标准是一致的。

表 3 基于 SPEI/SPI 干旱等级划分表

等级	类型	SPEI/SPI	
		WMO	国家标准
国家标准	国家标准/ WMO	WMO	国家标准
I	无旱	>0.0	>-0.5
II	轻旱	(-1.0, 0.0)	(-1.0, -0.5)
III	中旱	(-1.5, -1.0)	(-1.5, -1.0)
IV	重旱	(-2.0, -1.5)	(-2.0, -1.5)
V	特旱	≤-2.0	≤-2.0

(2) 干旱频率

在本研究中, 我们主要研究干旱频率特征。干旱频率是指整个时期内干旱发生次数。计算公式为:

$$d = (n/N) \times 100\% \quad (4)$$

其中, n 是干旱发生的月数, N 是整个序列长度。

2.4 分布式水文模型

本研究采用 THREW 模型 (Tsinghua Hydrological Model based on Representative Elementary Watershed Model) 模拟澜湄流域天然径流过程。该模型由清华大学田富强教授在美国伊利诺伊大学香槟分校 Murugesu Sivapalan 教授提出的代表性单元流域方法基础上考虑冰雪冻土等寒区水文过程而构建, 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 (Li et al., 2012; Tian et al., 2012), 奥地利的利恩茨流域(He et al., 2014), 中国的汉江流域(Sun et al., 2014)、乌鲁木齐河流域(Mou et al., 2009)、雅鲁藏布江-布拉马普特拉河流域(Xu et al., 2019) 等, 模型对径流均能达到良好的模拟效果。

基于 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 空间分辨率的数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM), 使用 Pfafstetter 方法先将研究区域划分为 595 个子流域, 进一步将面积大于 5000 km^2 的 33 个子流域继续细分, 最终研究区域共被划分为 651 个代表性单元子流域, 每一个子流域单元的面积小于 5000 km^2 。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。

土壤数据使用联合国粮农组织 (FAO) 提供的全球土壤

数据库,其空间分辨率为 $10 \times 10 \text{ km}$ 。归一化植被指数 (NDVI)、叶面积指数 (LAI) 和积雪覆盖面积 (Snow Cover) 采用 MODIS 提供的数据产品,空间分辨率是 $500 \times 500 \text{ m}$,时间分辨率是 16 天。

使用 1991-2001 年澜沧江-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空间嵌套式率定,率定规则为:

(1) 对雨季 (6-11 月)、旱季 (12-5 月) 径流分开率定,将率定好的模拟径流按照旱季和雨季拼接在一起。(2) 从上游到下游依次率定。(3) 固定率定好的上游子流域参数,继续采用下游水文观测资料率定下游子流域参数。率定期为 1991-1996 年,验证期为 1997-2001 年。模拟的时间步长为 1 天,采用广泛使用的模型评价指标 (NSE, $\ln \text{NSE}$, RE) 作为目标函数率定和评价模型模拟结果,其计算公式如下:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (Q_o^n - Q_s^n)^2}{\sum_{n=1}^N (Q_o^n - \overline{Q_o})^2} \quad (5)$$

$$\ln \text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (\ln Q_o^n - \ln Q_s^n)^2}{\sum_{n=1}^N (\ln Q_o^n - \overline{\ln Q_o})^2} \quad (6)$$

$$\text{RE} = \frac{\sum_{n=1}^N (Q_s^n - Q_o^n)}{Q_o^n \sum_{n=1}^N Q_o^n} - 1 \quad (7)$$

式中: Q_o^n 是 n 时刻的实测流量 m^3/s , Q_s^n 是 n 时刻的模拟流量 m^3/s , $\overline{Q_o}$ 是研究期的实测平均流量 m^3/s 。

图 3 显示了 8 个站点的模拟和实测逐日流量,表 4 展示了评价指标的值。模拟期内,景洪站的 NSE 和 $\ln \text{NSE}$ 在 0.85 至 0.9 之间,其他站点的 NSE 和 $\ln \text{NSE}$ 都在 0.9 左右或以

上，RE 均低于 $\pm 5\%$ 。因此，THREW 模型在模拟澜湄流域径流方面表现很好。

表 4 澜湄流域 THREW 模型模拟的评价指标

水文站	站点降水数据驱动				RE	IMERG 降水数据驱动 (2001-2005)NSE
	率定期		验证期			
	(1991-1996)		(1997-2001)			
	NSE	lnNSE	NSE	lnNSE		
景洪	0.86	0.78	0.89	0.85	-3.22%	0.89
清盛	0.88	0.85	0.9	0.92	1.31%	0.95
琅勃拉邦	0.88	0.89	0.92	0.94	3.21%	0.94
廊开	0.92	0.93	0.92	0.95	3.23%	0.95
那空帕农	0.92	0.92	0.89	0.94	-3.57%	0.9
穆达汉	0.94	0.93	0.93	0.95	4.92%	0.89
巴色	0.94	0.95	0.91	0.95	0.72%	0.87
上丁	0.92	0.92	0.89	0.93	2.60%	0.87
均值	0.91	0.9	0.91	0.93	-	0.91

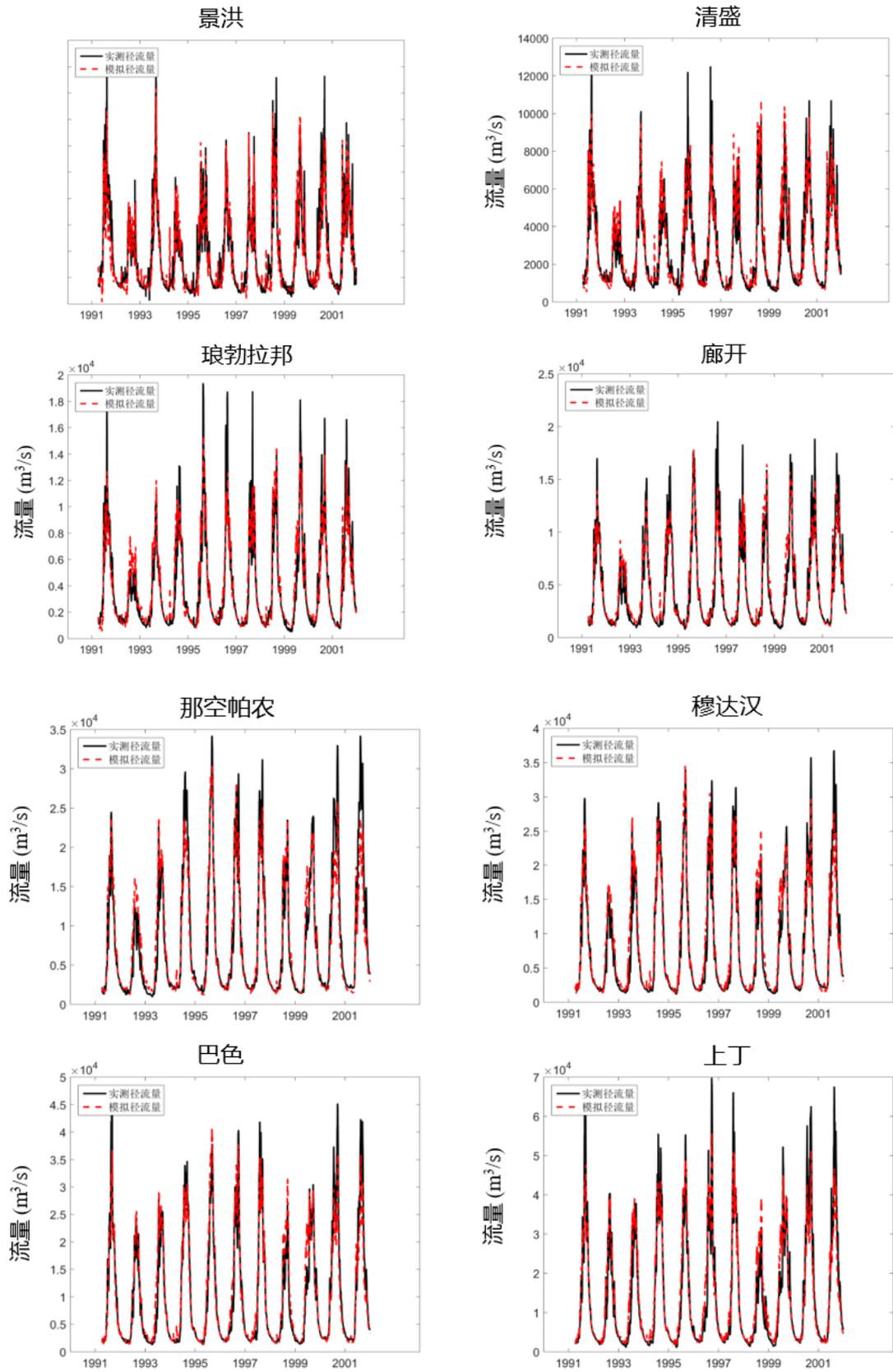


图3 澜沧江-湄公河8个水文站点逐日模拟径流和实测径流

2.5 基于 IMERG 卫星降水产品驱动的径流模拟

图 4 显示了 2001-2005 年分别由站点实测降水与卫星降水资料驱动模型模拟的径流。图 4 最后一行展示了以站点降水模拟径流量为实测值、以卫星降水模拟径流量为模拟值的各水文站点的 NSE，NSE 均达到 0.85 以上，表明卫星降水模拟径流具有较高的精度。我们使用模拟结果作为参考的原因是，2003 年有一座大坝投入使用，这可能会在一定程度上改变之后的径流（见表 2）。

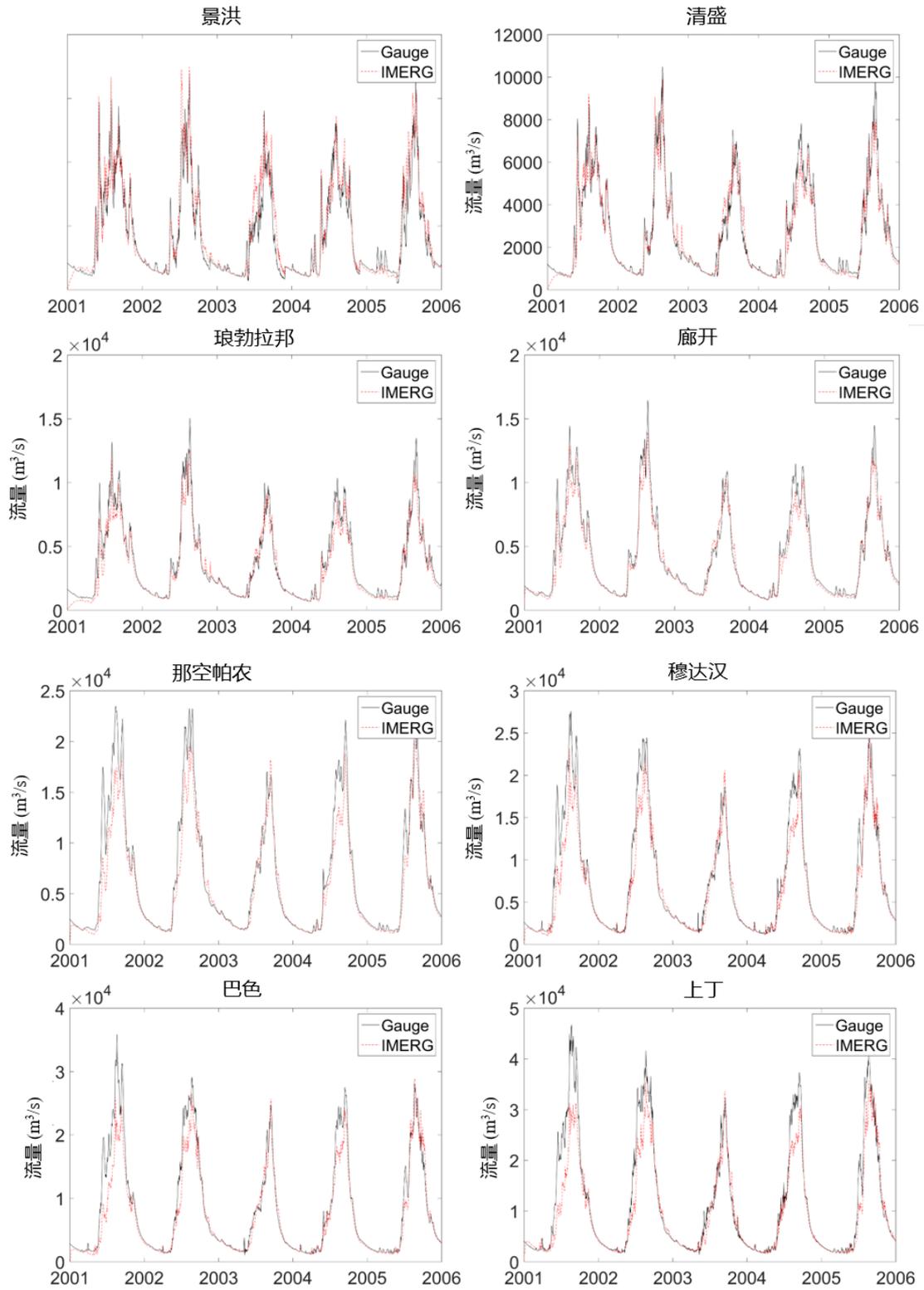


图 4 澜沧江-湄公河干流 8 个水文站卫星降水模拟径流和雨量站降水模拟径流

第三章 主要研究结果

3.1 澜湄流域干旱特性

为了研究干旱的变化趋势，我们将过去 119 年划分为 1901-1960 和 1961-2019 两个时期。基于 SPEI12 和 SPI12 的澜湄流域重特大干旱（SPEI 或 SPI <-1.5 ）频率空间分布如图 5 所示。结果表明，与过去 60 年相比，近 59 年来澜沧江流域重特大干旱发生频率更高，且主要分布于澜沧江的上游和中游段。在最近的 59 年中，澜湄流域重特大干旱发生频率约为 7%，而澜沧江流域的中游和上游约为 12%。在湄公河下游，大约一半的地区经历了重特大干旱的增加，这些干旱主要发生在泰国、柬埔寨东部和越南部分地区。相反，老挝的大部分地区、柬埔寨西部和湄公河三角洲地区的部分地区重特大干旱在减少。

此外，我们基于 CHIRP 数据的 SPI12 计算了最近 39 年重特大干旱的发生频率，结果如图 6 所示。该结果证实了图 5-b，即最近 59 年的干旱，干旱频率最高的地区位于澜沧江流域的中游和上游。

澜湄流域的干旱发生在旱季和雨季的比例如表 5 所示。对于所有等级的干旱(SPEI/SPI <-0.5)，发生在旱季的比例略高于雨季；对于中等及以上的干旱(SPEI/SPI <-1)，发生在旱

季的比例明显高于雨季。

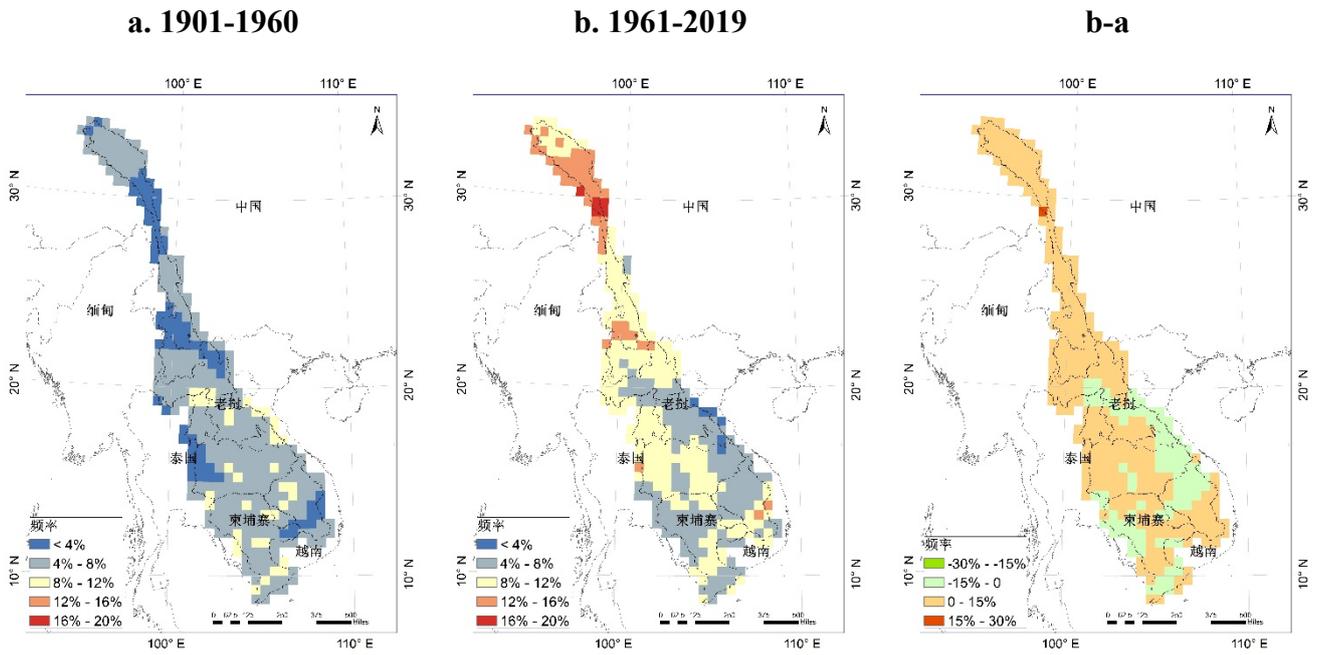


图 5 基于 SPEI12 得到的澜湄流域重特大干旱频率空间分布图

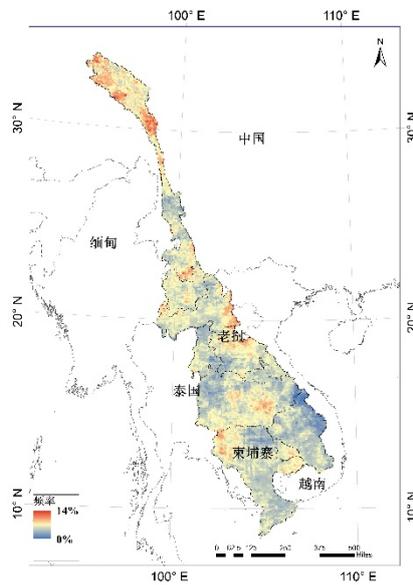


图 6 基于 SPI12 得到的澜湄流域重特大干旱频率的空间分布(1981-2019)

表 5 干旱发生在旱季和雨季的比例

干旱等级	季节	SPEI3	SPI3
II 级以上 (SPEI/SPI<-0.5)	旱季	54%	58%
	雨季	46%	42%
III 级以上 (SPEI/SPI<-1)	旱季	62%	64%
	雨季	38%	36%

3.2 2019 年干旱

根据中国气象局资料，2019 年澜沧江流域面雨量 680.4mm，较 30 年均值偏少约 25%，其中 4-6 月偏少 40%~70%。根据湄委会秘书处发布的湄公河流域洪水情况报告周报，湄公河流域大部分区域从 2019 年 5 月开始出现干旱少雨现象。湄公河干流清盛站、琅勃拉邦站和廊开站 6-10 月降雨量分别较多年均值减少 40%、50%和 20% (MRC, 2019)。此外，湄公河干流各水文站 7-11 月出现历史同期最低水位。

以上描述可以通过我们的分析得到证实。基于年尺度（12 个月）的澜湄流域 SPEI 和 SPI 结果均表明，2019 年和 2015 年是历史上最严重的干旱年份，如图 7 所示。

澜沧江流域和澜沧江-湄公河全流域的逐月 SPEI3 和 SPI3 如图 8 所示。全流域旱情始于 2019 年 3 月，一直持续至年底；澜沧江流域 4 月开始干旱，6 月达到重旱。根据 SPEI 结果，6 月和 8 月澜沧江流域旱情较全流域严重。不过，澜

沧江流域旱情从 2019 年 9 月开始有所缓解。

澜湄流域 2019 年逐月气象干旱指标如图 9 和图 10 所示。由此可知, SPEI3 和 SPI3 的空间分布具有较好的一致性, 均表明 2019 年 4 月流域内开始出现严重旱情, 干旱中心位于澜沧江下游至湄公河上游(廊开)。其中, 位于流域西部边缘的泰国境内的干旱持续了 12 个月。

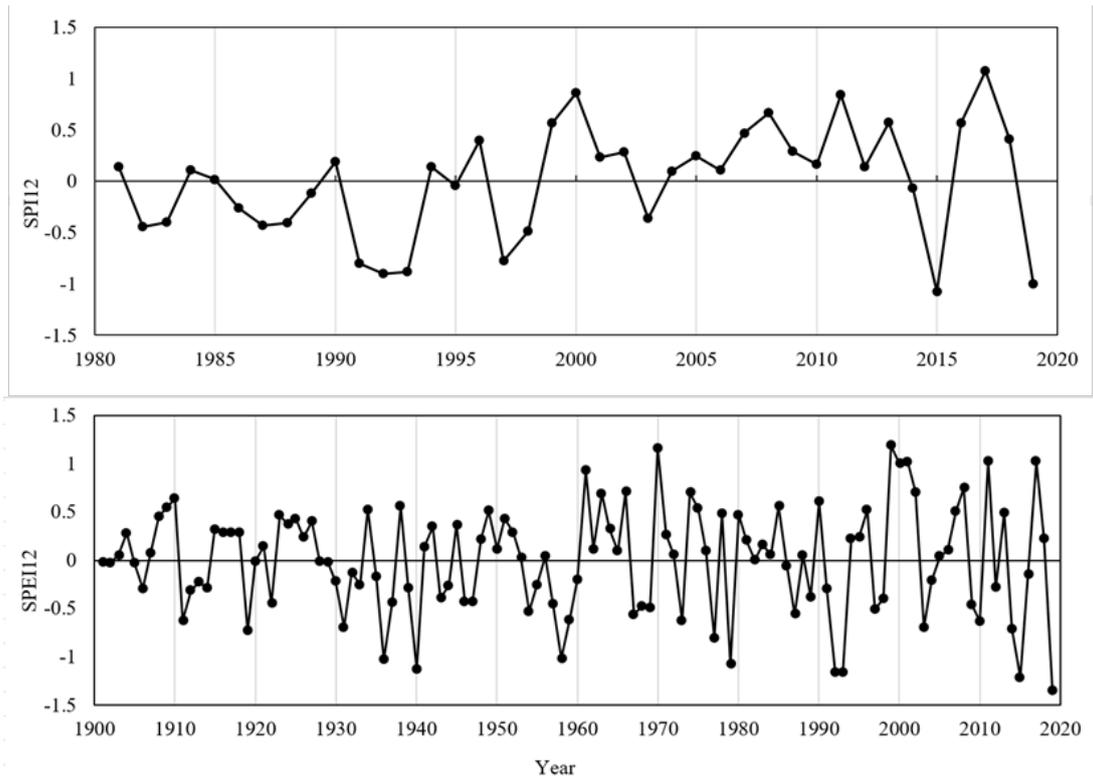


图 7 澜湄流域 SPI12 (1981-2019)与 SPEI12 (1901-2019)序列

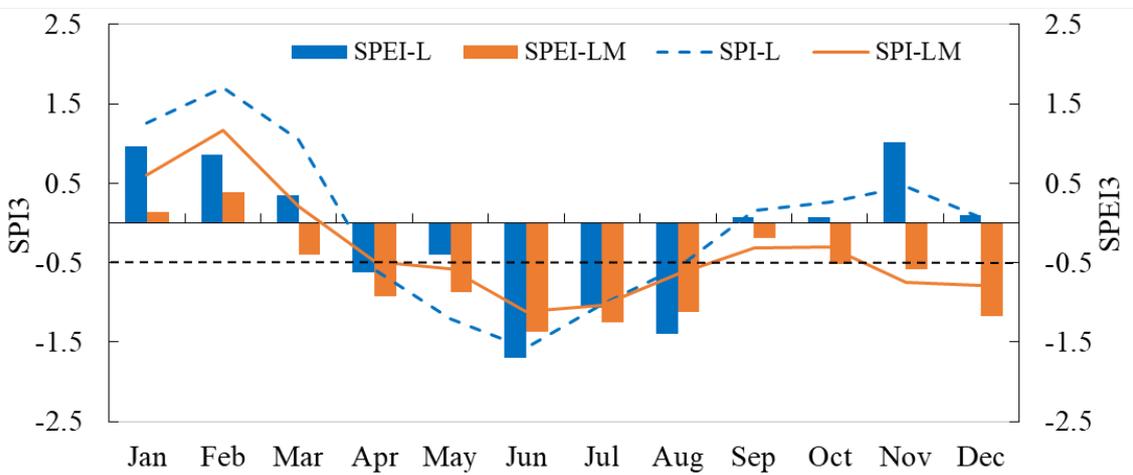


图 8 基于 SPEI3 和 SPI3 指标的 2019 年干旱指数 (L 表示澜沧江流域, LM 表示澜湄流域)

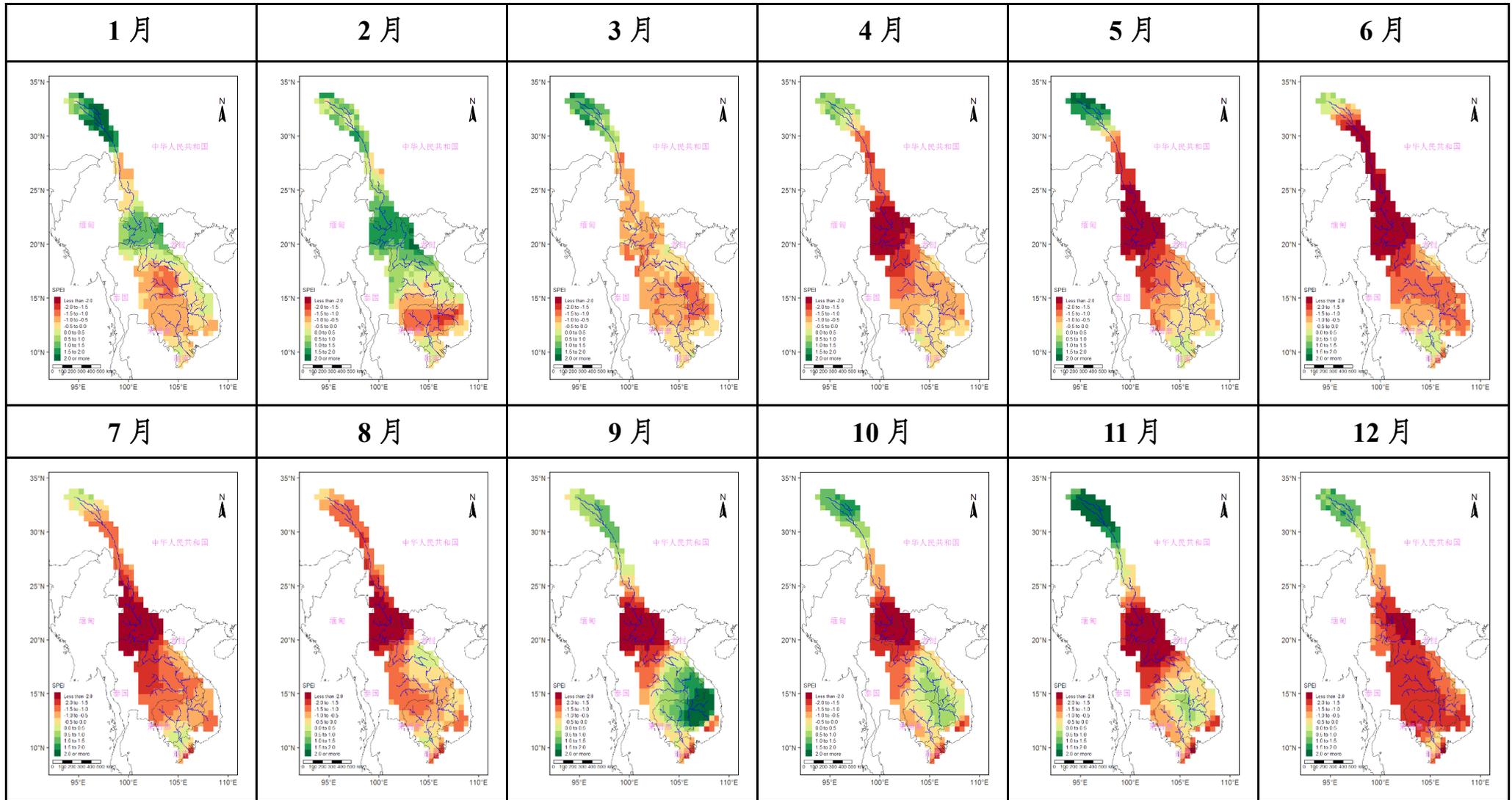


图9 2019年澜湄流域逐月SPEI3空间分布(基于CRU数据)

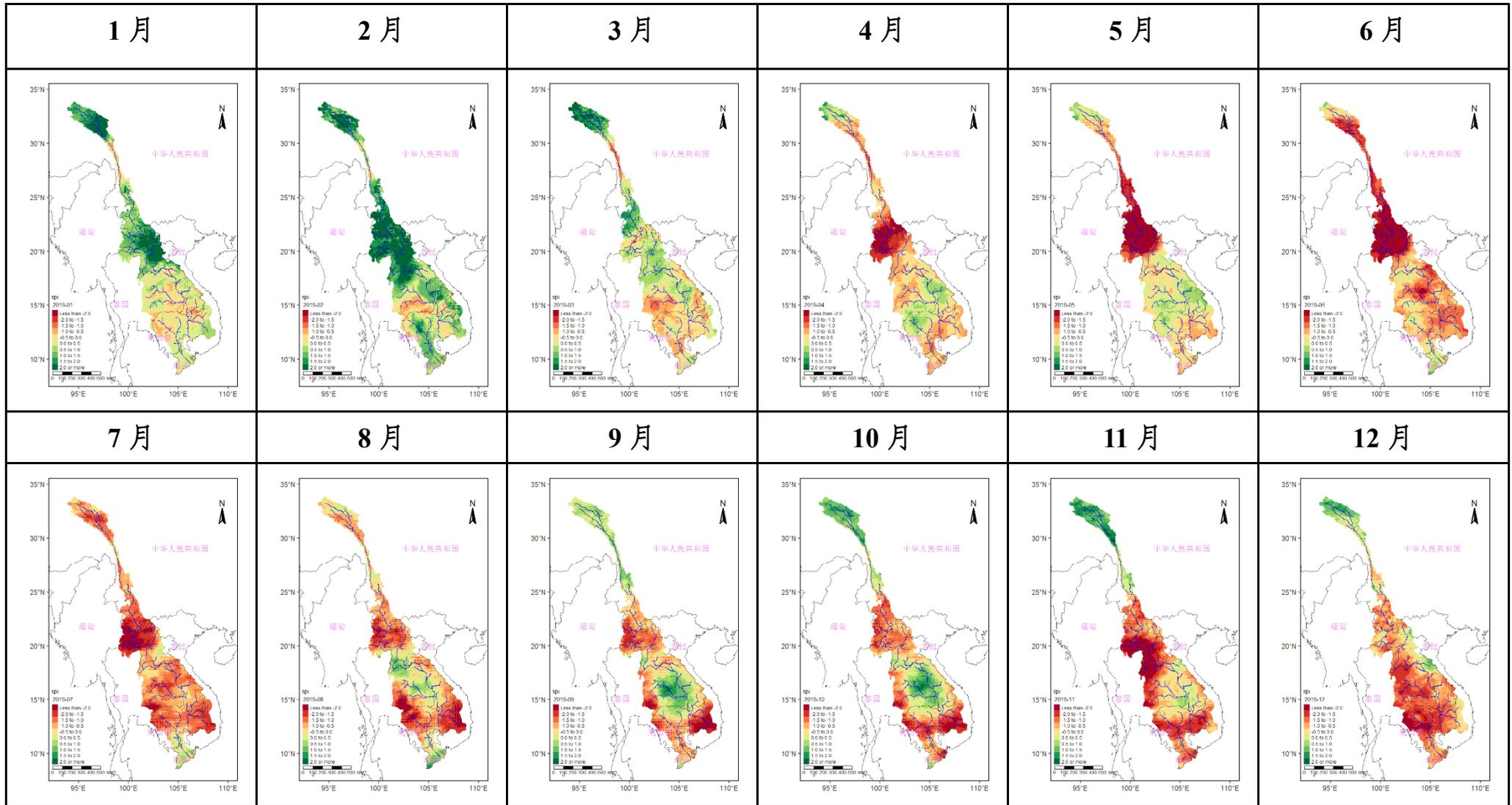


图 10 2019 年澜湄流域逐月 SPI3 空间分布 (基于 CHIRPS 数据)

3.3 湄公河流域天然径流组成

利用实测降水量和卫星降水数据集驱动水文模型，模拟 1991-2019 年的天然径流过程，计算澜沧江和湄公河 12 条支流年径流量占湄公河干流 8 个水文站的比例，如表 6 和图 11 所示。结果显示，越靠近下游，澜沧江径流量的占比越小，这在意料之中。清盛站断面（距景洪 354 公里）澜沧江径流量占比为 64.4%，那空帕农（距离景洪 1497 公里）为 24.9%，上丁（距离景洪 1851 公里）为 14.3%。占上丁年径流量较大的湄公河支流还有色公河、南俄河、濛河、桑河、斯雷博河。值得说明的是，本研究根据分布式水文模型得到的水量占比结果与 MRC 发布的结果（MRC, 2007）相近，见表 6。

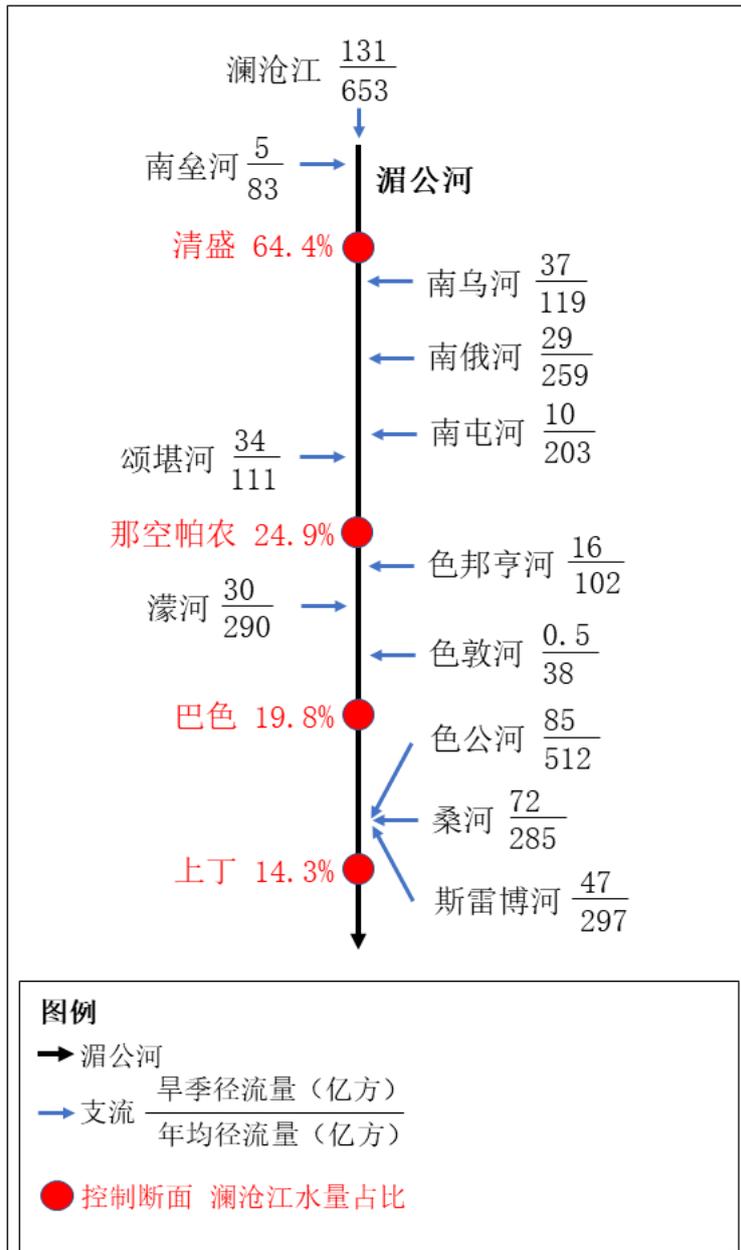


图 11 支流径流量占干流控制断面的比例

表 6 澜沧江和湄公河 12 条支流占 7 个水文站天然年径流量的比例（1991-2019）

年径流量占比 (%)	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
清盛	64.4	8.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
琅勃拉邦	45.2	6.0	8.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
廊开	39.5	5.3	7.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
那空帕农	24.9	3.3	4.5	8.2	6.9	4.8	-	-	-	-	-	-
穆达汉	22.9	3.0	4.2	7.5	6.3	4.4	-	-	-	-	-	-
巴色	19.8	2.6	3.6	6.4	5.4	3.8	2.6	0.9	6.8	-	-	-
上丁	14.3	1.9	2.6	4.6	3.9	2.7	1.9	0.7	4.9	5.8	8.9	6.7
桔井	13.8	1.8	2.5	4.5	3.8	2.6	1.8	0.7	4.7	5.6	8.6	6.5
MRC 报告中桔井的年径流量占比 (%)	16.5	-	3.1	4.9	5.7	2.4	3.4	1.4	5.6	4.0	8.2	6.6

*澜沧江径流为景洪站流量。

3.4 水库调度对干流流量的影响

表 7 展示了 2001-2019 年基于 IMERG 降水数据模拟的上丁站年径流量。结果表明，2019 年是 2001 年以来年径流量最小的一年，是近 19 年来水文干旱最严重的年份。该结果与长期干旱分析的结论一致。

图 12 显示了 2001-2019 年清盛站的天然（模拟）和实测径流过程（月平均径流量）。小湾大坝是 2010 年投入运行的大型水库，据此确定以 2001-2009 年和 2010-2019 年两个时段来研究水库调度对干流流量的影响。结果显示，2001-2009 年的天然和观测径流过程基本相同，这意味着水文模型在无水库条件下表现良好。此外，2010-2019 年的天然和实测径流过程线表明，水库调度减少雨季径流，补充旱季径流。

表 7 上丁站 2001-2019 年 IMERG 模拟年径流量和面降水量

年份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
年径流量（亿方）	3251	3387	2735	2828	3138	3411	3122	2924	2865	2781
年降水量（mm）	1732	1676	1494	1528	1617	1681	1653	1716	1540	1489
年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
年径流量（亿方）	3688	2775	3175	3240	2743	2852	3340	3460	2625	
年降水量（mm）	1775	1540	1712	1568	1424	1650	1753	1710	1010	

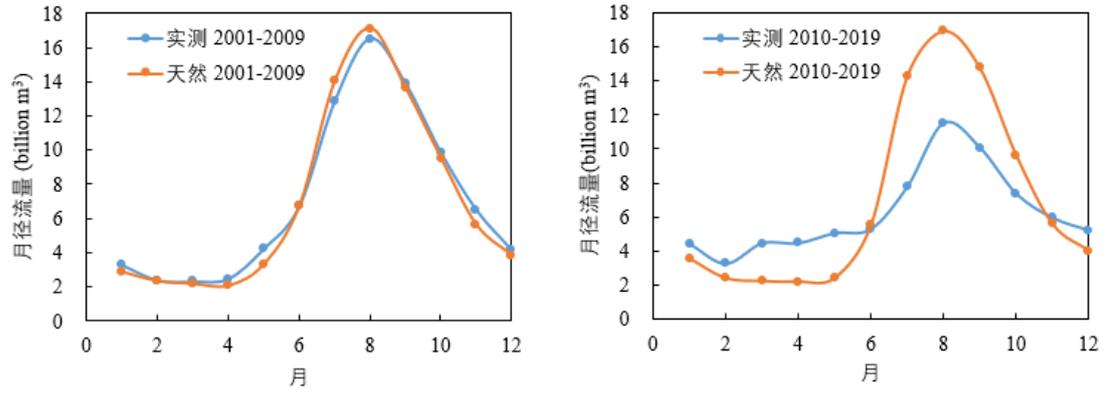


图 12 清盛水文站的模拟和实测径流过程

第四章 结论和建议

4.1 主要结论

(1) 澜湄流域干旱特征

澜湄流域干旱发生频率较高，发生重特大气象干旱（ $SPEI < -1.5$ ）的平均频率为 7%。流域内遭受重特大气象干旱频率最高的地区位于澜沧江中上游，达到 12%以上。与过去 60 年相比，近 59 年来澜湄流域大部分地区发生重特大干旱的频率在增加。

澜湄流域旱季干旱发生比例明显高于雨季，说明水库正常运行，即蓄洪补枯的调度方式，从整体来看有利于澜湄流域干旱的应对。

2019 年是澜湄流域近百年来最严重的干旱年份之一，干旱强度最大的地区位于澜沧江下游到湄公河上游（廊开）区间。2019 年的干旱特点是持续时间长，雨季降水量严重偏少。

(2) 天然径流组成

澜沧江年径流量占清盛 64.4%，越靠近湄公河下游，澜沧江径流量占比越小：廊开 39.5%，那空帕农 24.9%，上丁 14.3%。这意味着，当湄公河下游发生干旱时，位于澜沧江的水库可能无法补充足够的水，全流域干支流水库的联合调度可以更好地缓解下游干旱。

(3) 水库调度对干流流量的影响

澜沧江梯级水库雨季蓄洪，旱季放水，有效增加了湄公河旱季流量。考虑到湄公河流域农业需水高峰在旱季 (Do et al., 2020)，且旱季干旱发生的频率远高于雨季，因此澜沧江梯级水库发挥的调丰补枯作用总体上有利于缓解湄公河流域的旱情。

4.2 建议

(1) 工程措施和非工程措施并举

澜湄流域旱季干旱发生的频率高于雨季。湄公河流域农业需水高峰出现在旱季，缺水更容易导致农业减产，建议采取综合措施应对旱季旱情，包括工程措施和非工程措施，如加强蓄水工程和配套渠系建设，提高供水能力；调整农业种植结构，选择抗旱作物类型；加强旱情监测预警系统建设；发展节水抗旱灌溉栽培技术等。

(2) 干支流水库联合调度发挥防洪抗旱作用

根据径流组成分析，澜沧江对湄公河干流流量的占比在廊开已降至 39.5%，在上丁进一步降低至 14.3%。需要注意的是，根据 CGIAR 水、土地和生态系统研究项目的数据，湄公河支流水库的总库容达到 372 亿 m^3 以上，到 2030 年，其总库容将超过 1000 亿 m^3 (Wang et al., 2017)，对湄公河干流的径流调节具有重要作用。澜湄流域的干旱具有明显的时空

异步特征。建议澜湄流域各国加强上下游及干支流水库联合调度的相关研究，使这些水库更好的发挥调节作用，为增加整个流域的效益提供技术支持。

(3) 全流域洪旱预报系统联合研究

需加强合作以应对挑战，同时开展水资源及相关利益共享。建议澜湄六国的专家开展联合研究，为互惠合作机制打下坚实的基础，携手建立全流域洪旱预报系统，促进流域防洪抗旱。

致谢

感谢中国水利部、中国气象局、华能澜沧江水电公司和湄公河委员会的数据支持，同时感谢澜湄水资源合作中心专家和参加本报告国际研讨会的专家对改进本报告提供的宝贵建议。

参考文献

- Beguiría S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring [J]. *Int. J. Climatol.*, 2014, 34: 3001–3023.
- Do P, Tian F, Zhu T et al. Exploring synergies in the water-food-energy nexus by using an integrated hydro-economic optimization model for the Lancang-Mekong River basin [J]. *Science of the Total Environment*, 728 (2020) 137996.
- Elinor O. Reflections on ‘Some Unsettled Problems of Irrigation.’ [J]. *American Economic Review*. 2011, 101(1): 49-63.
- Guo H, Bao A, Liu T, et al. Meteorological drought analysis in the Lower Mekong Basin using satellite-based long-term CHIRPS product [J]. *Sustainability*, 2017, 9(6): 901.
- Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset [J]. *Scientific Data*, 2020, 7:109.
- He Z, Tian F, Gupta H V, et al. Diagnostic calibration of a hydrological model in a mountain area by hydrograph partitioning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 19(4): 1807-1826.
- He Z, Yang L, Tian F, et al. Intercomparisons of Rainfall Estimates from TRMM and GPM Multisatellite Products over the Upper Mekong River Basin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18 (2): 413–430.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Li Y, Wei W, Lu H, et al. Evaluation of Three Satellite-Based Precipitation Products Over the Lower Mekong River Basin Using Rain Gauge Observations and Hydrological Modeling [J]. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2019, 12: 2357-2373.
- Li H, Sivapalan M, and Tian F. Comparative diagnostic analysis of runoff generation processes in Oklahoma DMIP2 basins: The Blue River and the Illinois River [J]. *Journal of Hydrology*, 2012. 418: 90-109.
- McKee T, Doesken N, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [R]. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, USA, 17-22 January 1993; American Meteorological Society: Boston, MA, USA, 1993; pp. 179-184.
- Mou L, Tian F, Hu H. Artificial neural network model of runoff prediction in high and cold mountainous regions: a case study in the source drainage area of Urumqi River [J]. *Journal*

- of Hydroelectric Engineering, 2009(01):64-69.
- MRC. Water utilization project component A: development of basin modelling package and knowledge base (WUP-A). Vientiane, Lao PDR, 2007.
- MRC. Weekly Flood Situation Report for the Mekong River Basin covering the week from 23th to 28th October 2019 and potential trend next week. http://ffw.mrcmekong.org/weekly_report/2019/2019-10-29_weekly%20flood%20situation%20report.pdf
- Mekong River Commission and Ministry of Water Resources of China. Technical Report – Joint Observation and Evaluation of the Emergency Water Supplement from China to the Mekong River. Mekong River Commission, Vientiane, Lao PDR, 2016.
- Sun Y, Tian F, Yang L, et al. Exploring the spatial variability of contributions from climate variation and change in catchment properties to streamflow decrease in a mesoscale basin by three different methods [J]. Journal of Hydrology, 2014, 508:170-180.
- Tian F, Liu H. China-shared rivers, shared futures [N]. Vientiane: Vientiane Times, July 14, 2016. P15-16.
- Tian F, Li H, and Sivapalan M. Model diagnostic analysis of seasonal switching of runoff generation mechanisms in the Blue River basin, Oklahoma [J]. Journal of Hydrology, 2012. 418: 136-149.
- Wang W, Lu H, Zhao T, et al. Evaluation and Comparison of Daily Rainfall From Latest GPM and TRMM Products Over the Mekong River Basin [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(6):2540-2549.
- 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.
- WLE. Dataset on the Dams of the Irrawaddy, Mekong, Red and Salween River Basins. Vientiane, Lao PDR: CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems - Greater Mekong. <https://wle-mekong.cgiar.org/maps/>, 2018
- WMO. Standardized Precipitation Index User Guide [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2012.
- Xu R, Hu H, Tian F, et al. Projected climate change impacts on future streamflow of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra River [J]. Global and Planetary Change, 2019, 175:144-159.