DOI: 10.14042/j. cnki. 32.1309.2022.05.007

# 变化环境下澜沧江-湄公河流域干旱趋势

# 龙 笛,韩忠颖,王一鸣

(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)

摘要:为提升变化环境下澜沧江-湄公河(简称澜湄)流经国对干旱的抵御能力,亟需对流域未来干旱趋势进行科学 研判。本研究选取了 CMIP6 的 5 个 GCM 模式,使用 3 种共享社会经济路径-典型浓度路径组合情景下的驱动数据, 采用分布式水文模型 CREST-Snow,预估了 2020—2050 年澜湄径流演变和气象、水文干旱发展趋势,量化了澜沧江 梯级水库调度对未来径流的调节作用。结果表明:2020—2050 年,澜湄流域整体呈湿润趋势,但极端干湿事件发 生频率增加,其中 2020—2029 年干旱频发,2030—2050 年更偏湿润,老挝、泰国 2020—2050 年干旱发生的频率和 强度比流域内其他国家更高;澜沧江梯级水库可有效提升下游干季径流量,增幅从上游(99%)至下游(68%)递减, 在缓解湄公河干季旱情方面具有重要作用。未来有待进一步加强澜湄水资源合作,优化水库调度方式,促进澜湄

近70 a 来在气候变化和人类活动共同影响下,全球和区域水循环发生深刻改变,突出表现是水旱灾害的频率、强度、影响范围及周期等特征发生变化<sup>[1-3]</sup>。厘清径流情势和水旱灾害改变的自然及人为因素,将为水资源安全保障和水灾害防治工作奠定基础。澜沧江-湄公河(简称澜湄)是亚洲最重要的跨境河流,全长约4 350 km,是东南亚最长的河流,流域集水面积约79.5万 km<sup>2</sup>。澜湄起源于中国(中国境内称澜沧江),流出国境后依次流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南(出境后称湄公河),为沿岸国家的生产生活用水及水力发电提供了重要的淡水资源<sup>[4]</sup>。变化环境给澜湄流域水资源管理带来了巨大的压力。一方面,由于气候变暖引起的降水相态及冰雪融化过程改变,导致发源于青藏高原的澜沧江源区径流对气候变化十分敏感<sup>[5-8]</sup>;另一方面,人口增长导致水资源和能源需求急剧增加,澜湄干支流正在开展大规模的水电开发<sup>[9]</sup>。

近年来,澜湄流域干旱频发(如 2004—2005 年、2009—2010 年、2015—2016 年和 2019—2020 年干 旱)<sup>[10]</sup>。据统计,过去 30 a间,干旱影响了东南亚超过 6 600 万人口;过去 5 a间,东南亚 70% 的土地和 60% 的人口受严重旱灾影响,造成了巨大的经济损失。正确认识干旱发展趋势,及时、全面地做好风险防范 和应对工作,是减轻干旱影响和降低干旱损失的必然要求。国内外研究工作主要聚焦于澜湄未来径流和洪水 预估,较少涉及干旱<sup>[11-12]</sup>,澜湄流域未来干旱趋势以及澜沧江梯级水库发挥的作用仍待探索<sup>[13-14]</sup>。另外, 国际上有研究称澜沧江水库蓄水发电会加剧湄公河下游国家的旱情<sup>[15-18]</sup>,亟需相关科学研究的持续跟踪和 支持,以更好地回应下游国家的关切。

本研究旨在解析变化环境下澜湄流域未来径流演变和气象水文干旱的发展趋势,量化澜沧江梯级水库对 径流的调节作用,为跨境河流水资源管理和干旱防治提供理论依据和技术方法,以期促进中国与其他澜湄相 关国家在水资源和灾害防治方面的合作共赢。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(92047203; 92047301)

收稿日期: 2022-03-24; 网络出版日期: 2022-08-24

网络出版地址: https: //kns. cnki. net/kcms/detail/32.1309. P. 20220823.1458.002. html

作者简介:龙笛(1982—),男,贵州贵阳人,研究员,博士,主要从事遥感水文水资源研究。

E-mail: dlong@tsinghua.edu.cn

### 1 研究区域

澜湄是亚洲最重要的跨境水系,发源于"地球第 三极"青藏高原,流经中国、缅甸、老挝、泰国、柬 埔寨、越南6国,最终汇入南海(图1)。澜湄流域呈 带状,地势从西北向东南逐渐降低,流域内高程差超 过5 km。澜沧江发源于青藏高原唐古拉山脉,流经 整个横断山区, 自云南省流出国境。其约 2 200 km 长河流伴随着 4.5 km 的落差, 河流河谷陡峭, 蕴含 丰富水能,但巨大的高程差也加大了站点布设的难度, 使其成为典型的缺资料流域。澜沧江流域降水量由西 北向东南递增,流域年平均降水量约735 mm<sup>[3]</sup>。湄 公河长约2150 km, 落差约500 m, 干流河谷较宽. 多弯道。湄公河流域年平均降水量空间分布不均、泰 国东北部降水量最少、约1000~1600 mm、老挝南 部和柬埔寨降水量最大,约3000 mm<sup>[19]</sup>。受西风和 印度季风影响, 澜湄湿季一般为6—11月, 干季一般 为12月至次年5月,流域中下游属热带季风气候, 干湿分明。澜湄径流主要来自降水,75%~85%的年 径流量在湿季产生,径流量峰值通常出现在8月或9 月<sup>[20]</sup>。本研究选择澜湄干流允景洪、琅勃拉邦、穆 达汉、上丁4个站点(表1)。



Fig. 1 Location information on the Lancang-Mekong River basin

表1 澜沧江-湄公河干流主要水文站

Table 1 Information on major gauging stations on the mainstem of the Lancang-Mekong River

水文站	国家	纬度	经度	集水面积/万 km <sup>2</sup>	多年平均径流量/亿 m <sup>3</sup>
允景洪	中国	22°00′ N	100°48′ E	14.2	536
琅勃拉邦	老挝	$18^{\circ}00'$ N	102°24′ E	26.8	1 211
穆达汉	泰国	16°48′ N	104°48′ E	39.1	2 848
上丁	柬埔寨	13°36′ N	105°54′ E	63.5	4 074

# 2 研究方法

### 2.1 CREST 水文模型

### 2.1.1 CREST 水文模型介绍

CREST(Coupled Routing and Excess STorage)水文模型是由美国俄克拉荷马大学和美国国家航空航天局(NASA)联合开发的分布式水文模型<sup>[21]</sup>。该模型基于蓄水容量曲线计算流域产流,采用多层线性水库模型计算流域汇流<sup>[22]</sup>。CREST-Snow 在 CREST 基础上耦合了地下水和积雪冰川模块,使模型适用于具有冰冻圈水文过程的高山区,是 CREST 的升级版<sup>[23-24]</sup>。卫星遥感数据逐渐被用作地面监测数据的重要补充<sup>[25-27]</sup>,CREST-RS 在 CREST-Snow 的基础上耦合了遥感径流模块,可以采用遥感观测的水位/河宽率定模型,从而使模型适用于无测站流域的径流模拟<sup>[28]</sup>。CREST-RS 模型结构示意图见文献[29]。本研究搭建高分辨率(1 km×1 km, 1 d)的 CREST-Snow 分布式水文模型模拟澜沧江天然径流。

CREST-Snow 模拟的天然径流包括降雨径流( $Q_{\text{RR}}$ )、融雪径流( $Q_{\text{SM}}$ )和融冰径流( $Q_{\text{GM}}$ )。模型中每个网格的总径流(Q)计算如下:

$$Q = Q_{\rm RR} + Q_{\rm SM} + Q_{\rm GM} \tag{1}$$

其中,融雪径流采用基于度日因子(F<sub>DD</sub>)的温度指数模型计算。相比于能量平衡模型,温度指数模型所 需驱动数据少,更适用于数据稀缺流域。融雪过程受度日因子和温度控制,且融雪量应小于网格中雪水当 量,具体计算过程如式(2)—式(4)所示:

$$Q_{\mathrm{SM},t} = \min(S_{\mathrm{mlt},t}, S_{\mathrm{WE},t})$$
(2)

$$S_{\text{mlt},t} = F_{\text{DD,snow}} \left( \frac{T_{\text{ls}} + T_{\text{a}}}{2} - T_{\text{s,mlt}} \right) \Delta t$$
(3)

$$S_{WE,t+1} = S_{WE,t} - Q_{SM,t} + P_{s,t}F$$
(4)

式中:  $Q_{SM,t}$ 为 t 时刻的融雪径流;  $S_{mlt,t}$ 为 t 时刻的潜在融雪量;  $S_{WE,t}$ 为 t 时刻网格所含雪水当量;  $F_{DD,snow}$ 为积 雪融化度日因子;  $T_{ls}$ 为 MODIS 地表温度;  $T_{a}$ 为近地面气温;  $T_{s,mlt}$ 为积雪融化温度阈值;  $\Delta t$  为模型模拟时间 步长;  $P_{s,t}$ 为 t 时刻的降雪量; F 为积雪升华参数。

冰川融化亦采用温度指数模型计算(式(5)),假设冰川上积雪融尽后冰川才开始融化,计算过程如下:

$$Q_{\rm GM,t} = \begin{cases} F_{\rm DD,ice} \left( \frac{S_{\rm mlt,t} - Q_{\rm SM,t}}{2} + T_{\rm s,mlt} - T_{\rm i,mlt} \right) \Delta t & S_{\rm WE,t} > 0 \\ F_{\rm DD,ice} \left( \frac{T_{\rm ls} + T_{\rm a}}{2} - T_{\rm i,mlt} \right) \Delta t & S_{\rm WE,t} = 0 \end{cases}$$
(5)

式中: *F*<sub>DD,ice</sub>为冰川融化度日因子; *T*<sub>i,mlt</sub>为冰川开始融化的温度阈值。模型物理机制内容详见文献[23-24]。 CREST-Snow 共有 24 个参数,其中产汇流模块含 16 个参数,冰川模块含 2 个参数,积雪模块含 6 个参数, 表 2 为 CREST-Snow 模型主要参数及率定范围。

### 2.1.2 CREST 水文模型应用

针对澜沧江流域出水口允景洪水文站,驱动数据包括 CGDPA (China Gauge-based Daily Precipitation Analysis, 0.25°×0.25°)降水、ERA-Interim(0.75°×0.75°)气象数据计算的潜在蒸散发、ERA-Interim 气温数据。 CGDPA 和 ERA-Interim 的时间跨度分别是 1955—2014 年和 1980—2019 年,覆盖了实测径流数据时段,满足 参数率定和验证需求。首先,采用 Dai 等<sup>[30]</sup>方法计算雪水当量,对 CREST-Snow 融雪模块进行率定和验证, 率定时段为 2003 年 7 月至 2005 年 12 月,验证时段为 2006 年 1 月至 2010 年 12 月<sup>[6]</sup>。允景洪水文站 1980— 2007 年期间的实测径流数据(仅供研究使用的非公开数据)用于率定 CREST-Snow 模型融雪模块之外的其余 参数,率定时段为 1980—1986 年,验证时段为 1987—2007 年(由于 2008 年后,允景洪水文站径流受水库修 建和调度影响较大,故 2008 年后径流数据未纳入验证时段)。

		0			
模型模块	模型参数	单位	最小值	最大值	
<b>本</b> 汇 运 档 <b></b>	平均蓄水容量(W <sub>m</sub> )	mm	80	300	
)但弧侠坏	蓄水容量曲线指数	-	0.05	1.5	
	融冰温度阈值(T <sub>i,mlt</sub> )	°C	- 5	5	
你川侯吠	冰川融化度日因子( $F_{DD,ice}$ )	mm/( $^{\circ}C \cdot d$ )	0	10	
	融雪温度阈值(T <sub>s,mlt</sub> )	°C	- 8	8	
	降雪温度阈值(T <sub>s</sub> )	°C	- 5	5	
积雪模块	降雨温度阈值 $(T_r)$	°C	- 5	5	
	积雪融化最大度日因子( $F_{DD,snow,max}$ )	mm/( $^{\circ}C \cdot d$ )	0	10	
	积雪融化最小度日因子( $F_{DD \text{ snow min}}$ )	mm∕(℃ · d)	0	5	

表 2 CREST-Snow 模型主要参数及率定范围 Table 2 Major parameters of the CREST-Snow model including values of their lower and upper bounds

针对湄公河干流琅勃拉邦、穆达汉和上丁水文站,由于湄公河降雨产流占总径流的绝大部分,故对这3 个水文站的径流模拟未开启积雪模块,不需要地表温度驱动数据,模型驱动数据为全球卫星降水制图产品 (Global Satellite Mapping of Precipitation, GSMaP, 0.1°×0.1°)和联合国饥荒预警系统(Famine Early Warning System, FEWS, 1°×1°)潜在蒸散发产品。GSMaP和FEWS的时间跨度分别为2000至今和2001至今,与实 测流量时段对应。3 个水文站实测流量数据(来自湄公河委员会)覆盖时段为2004—2014年,分别用于对 CREST-Snow模型进行率定和验证,率定时段为2004—2008年,验证时段为2009—2014年。本研究使用了 CMIP6 计划下 ScenarioMIP中的5 个使用频率较高的全球气候模式(Global Climate Model, GCM)进行径流的 未来预估,包括欧洲 EC-Earth3 模式、俄罗斯 INM-CM5-0 模式、日本 MIROC6 模式、德国 MPI-ESM1-2-HR 模式、挪威 NorESM2-MM 模式。这5 个模式均提供1800—2100年3种共享社会经济路径(SSP)-典型浓度路 径(RCP)组合情景(SSP126、SSP245、SSP585)的输出数据,包括日尺度降水、最高气温、最低气温、平均 气温等变量,用于驱动 CREST-Snow 模拟径流并计算干旱指数。

在模拟未来径流时,水文模型驱动数据为降水、气温和潜在蒸散发。其中,未来时期的潜在蒸散发采用 Hargreaves 方法<sup>[31]</sup>,利用逐日最高、最低、平均气温计算得到。输入模型前,需要对各 GCM 驱动数据进行 偏差校正。针对降水和潜在蒸散发 2 个变量,本研究采用分位数映射法(Quantile Mapping)对其按月进行逐 日校正<sup>[32]</sup>。降水参考数据为 2003—2014 年 GSMaP 降水数据,待校正数据为各 GCM 的降水数据。潜在蒸散 发参考数据为 2003—2014 年 FEWS 潜在蒸散发数据,待校正数据为基于各 GCM 气温数据计算得到的潜在蒸 散发数据。针对气温变量的校正,本研究采用差值法,即将历史时期参考数据与待校正数据时间序列差值的 平均值,加到待校正数据序列上<sup>[33]</sup>。气温参考数据为 2003—2014 年的 ERA- Interim 数据,待校正数据为各 GCM 的气温数据。

以往使用 GCM 进行未来径流预估的研究<sup>[11,34-36]</sup>并不鲜见,但较少有研究评估 GCM 在历史时期的表现以筛选合适的 GCM。本研究使用历史时期(2003—2014 年)校正后的 GCM 数据作为模型驱动数据,模拟 4 个水文站日尺度天然径流并累积计算月尺度值,计算模拟径流的纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient,  $E_{\rm NS}$ ),发现部分模式的驱动数据校正后模拟的径流指标仍不佳(见表 3)。故本研究设定,若模拟的历史时期径流日尺度  $E_{\rm NS}$  < 0.5 且月尺度  $E_{\rm NS}$  < 0.6,则排除该模式(表 3 下划线表示的模式),其余可用模式的均值作为最终结果。表 3 显示了历史时期(2003—2014 年)校正后 GCM 数据驱动水文模型,模拟 4 个水文站天然径流的日尺度和月尺度统计指标,包括  $E_{\rm NS}$ ,相关系数(Correlation Coefficient,  $C_{\rm c}$ )和相对偏差( $D_{\rm R}$ )。

#### 2.2 干旱分析方法

本研究基于气象和水文干旱指数,分析澜湄流域干旱趋势及气象干旱与水文干旱的联系。为量化气象干旱,世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)推荐使用标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, *I*<sub>sp</sub>)。*I*<sub>sp</sub>假定降水量服从 Gamma 分布,进行正态标准化处理,该指数可以对比不同地区在不同时间尺度的缺水状况。在短时间尺度上,*I*<sub>sp</sub>可以反映土壤水变化,对农业生产具有重要意义;在长时间尺度上,*I*<sub>sp</sub>可以反映土壤水变化,对农业生产具有重要意义;在长时间尺度上,*I*<sub>sp</sub>可以反映地下水、地表径流的演变等。使用月降水数据可计算不同统计尺度(1~36个月)的*I*<sub>sp</sub>(式(6)和式(7))<sup>[37]</sup>。

$$I_{\rm SP} = s \left\{ k - \frac{(c_2k + c_1)k + c_0}{[(d_3k + d_2)k + d_1]k + 1} \right\}$$
(6)  
$$k = \sqrt{\ln \frac{1}{H(x)^2}}$$

$$G(x) = \frac{1}{\beta \gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^x x^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) dx \qquad x > 0$$
(7)

式中: *s*为正负系数; *x*为降水值; *G*(*x*)为降水的概率分布函数, 若 *G*(*x*) >0.5,则 *H*(*x*) = 1 - *G*(*x*)且 *s* = 1, 否则 *H*(*x*) = *G*(*x*)且 *s* = -1;  $\beta$ 为尺度参数;  $\gamma$ 为形状参数; 其余参数为常数项,  $c_0$  = 2.515 517;  $c_1$  = 0.802 853;  $c_2$  = 0.010 328;  $d_1$  = 1.432 788;  $d_2$  = 0.189 269;  $d_3$  = 0.001 308。由于降水是计算  $I_{sp}$ 所需的唯一

输入变量,且没有考虑需水情景,使用标准化降水指数评估干旱的方法相对简单。但现有研究表明,雨养低 地水稻容易受气象干旱影响,因此,以降水为基础评估澜湄流域尤其是下游流域的气象干旱较为适 宜<sup>[34-35,38]</sup>。与旱季灌溉水稻生产力密切相关的水文干旱可通过水文干旱指数进行评估。

			日尺度						
水文站	模式名称	E <sub>NS</sub>	Cc	D <sub>R</sub>	E <sub>NS</sub>	C <sub>c</sub>	D <sub>R</sub>		
	EC-Earth3	0.27	0.92	-0.33	0.23	0.93	-0.33		
允景洪	INM-CM5-0	0.54	0.85	-0.28	0.55	0.88	-0.28		
	MIROC6	0.54	0.96	-0.32	0.54	0.97	-0.32		
	MPI-ESM1-2-HR	0.85	0.96	-0.13	0.85	0.97	-0.13		
	NorESM2-MM	0.42	0.88	-0.32	0.41	0.90	-0.32		
	EC-Earth3	0.56	0.75	-0.06	0.67	0.82	-0.06		
琅勃拉邦	INM-CM5-0	0.59	0.84	-0.16	0.76	0.91	-0.16		
	MIROC6	-0.55	0.82	0.53	-0.49	0.87	0.52		
	MPI-ESM1-2-HR	0.54	0.76	0.06	0.61	0.80	0.06		
	NorESM2-MM	0.45	0.73	0.13	0.60	0.81	0.13		
	EC-Earth3	0.73	0.87	-0.17	0.79	0.92	-0.17		
	INM-CM5-0	0.65	0.86	-0.21	0.76	0.91	-0.21		
穆达汉	MIROC6	0.51	0.81	0.08	0.60	0.84	0.08		
	MPI-ESM1-2-HR	0.61	0.81	-0.04	0.69	0.85	-0.04		
	NorESM2-MM	0.61	0.80	-0.10	0.73	0.86	-0.10		
	EC-Earth3	0.61	0.81	-0.21	0.69	0.87	-0.21		
	<u>INM-CM5-0</u>	0.47	0.83	-0.43	0.53	0.90	-0.43		
上丁	MIROC6	0.84	0.92	-0.11	0.88	0.95	-0.11		
	MPI-ESM1-2-HR	0.62	0.79	-0.07	0.68	0.83	-0.07		
	NorESM2-MM	0.68	0.86	-0.21	0.76	0.91	-0.21		

表 3 4 个水文站天然径流模拟的日尺度和月尺度统计指标

Table 3 Performance metrics of natural runoff simulations at daily and monthly scales for four gauging stations

本研究采用的水文干旱指数为标准化径流指数(Standardized Streamflow Index,  $I_{ss}$ )<sup>[39]</sup>,该指数使用径流数据作为输入,计算方法同  $I_{sp}$ 。计算  $I_{sp}$ 和  $I_{ss}$ 的统计尺度均为 12 个月,可反映气象干旱和水文干旱的年际 波动。根据《气象干旱等级: GB/T20481—2017》国家标准规定,干旱可以基于干旱指数划分为5 个等级,如 表 4 所示<sup>[37]</sup>。本研究基于干旱指数划分干旱事件,分析干旱频率、强度等干旱特征变量<sup>[40]</sup>。干旱现象被定 义为干旱指数( $X_i$ )小于干旱阈值( $X_0$ )的连续月份序列。干旱开始时间为干旱事件开始的月份;干旱结束时 间为缺水量足够小以致干旱不再持续的月份。干旱事件强度(S)是指干旱开始至结束时间段内, $X_i$ 与 $X_0$ 之差 的累积求和。本研究中采用 12 个月尺度的干旱指数( $I_{sp}$ -12 和  $I_{ss}$ -12)讨论中旱及以上等级的干旱,故 $X_0$  取 – 1。

表 4 基于 $I_{sp}$ 和 $I_{ss}$ 的干旱标准强度等级划分							
Table 4 Drought intensity categories based on $I_{sp}$ and $I_{ss}$							
干旱类型	无旱	轻旱	中旱	重早	特旱		

(-1.5, -1.0]

(-2.0, -1.5]

(-1.0, -0.5]

# 3 结果与分析

 $I_{\rm SP}$  ,  $I_{\rm SS}$ 

#### 3.1 降水及径流变化趋势分析

> -0.5

为评估流域降水及径流变化趋势,使用 5 个 GCM 2003—2050 年数据,分别计算历史时期(2003—2019年)和未来时期(2020—2050年)流域年均降水和 4 个站点年均径流。图 2 显示上丁站上游流域 5 个 GCM 模式算术平均后的多模式集合的未来年均降水变化趋势。相比历史时期,未来时期流域年均降水呈略微增加的趋势。空间上,流域年均降水量变化差异明显(-10%~30%)。其中,澜沧江源区降水增加最为明显;中游无明显变化或略有减小;下游降水呈增加趋势。时间上,不论在何种情景下,流域降水随时间推移逐渐增加;随温室气体排放浓度增加,流域年均降水变化更为明显,源区降水增加更多,中游降水减少更多。



图 2 上丁站上游流域多模式集合未来年均降水较历史时期(2003—2019年)的相对变化

Fig. 2 Relative changes of multi-model ensemble future mean annual precipitation with reference to the historical period (2003-2019) in the upper basin of the Stung Treng gauging station

≤ -2.0

图 3 显示了澜湄干流允景洪、琅勃拉邦、穆达汉和上丁水文站上游流域 2020—2050 年多模式集合年均流量 时间序列。CREST-Snow 模拟的多模式集合未来天然年均流量在 3 种 SSP-RCP 组合情景(SSP126、 SSP245、SSP585)下均呈不显著上升趋势,在SSP126 和 SSP585 情景下,年均流量变化速率大于 SSP245 情景 下的变化速率。相比历史时期,未来时期 4 个水文站上游流域多年平均流量将分别增加 6%、4%、1% 和 2%。由于历史时期和未来时期年径流数据同样使用 GCM 集合平均模拟结果,故水文模型模拟偏差不会对多 年平均流量变化产生显著影响,以上平均流量的增加主要由气候变化导致。空间上,气候变化导致的流域多 年平均径流量变化与多年平均降水量的变化较为一致,允景洪和琅勃拉邦站径流增加较多,可能受源区径流 补给增加所致;中游降水变化不大甚至略有减小,导致穆达汉和上丁站径流增幅较小。



图 3 澜湄干流水文站 2020—2050 年多模式集合平均年均流量时间序列

Fig. 3 Multi-model ensemble mean annual discharge during 2020—2050 at four gauging stations on the mainstem of the Lancang-Mekong River

### 3.2 气候变化对干旱频次的影响

澜湄干流 4 个水文站上游流域的 *I*<sub>sp</sub>-12 和 *I*<sub>ss</sub>-12 时间序列如图 4 所示。各水文站 *I*<sub>sp</sub>-12 和 *I*<sub>ss</sub>-12 无显著 变化趋势,干湿事件交替变化,*I*<sub>ss</sub>-12 较 *I*<sub>sp</sub>-12 滞后 1 个月。如表 5 所示,允景洪、琅勃拉邦、穆达汉和上 丁水文站上游流域在 2020—2029 年 SSP126、SSP245 和 SSP585 情景下发生中等及以上水文干旱(*I*<sub>ss</sub>-12 ≤ -1)的平均频率分别为 29%、26%、29% 和 30%,发生中旱等及以上气象干旱(*I*<sub>sp</sub>-12 ≤ -1)的平均频率分 别为 28%、28%、27% 和 27%。4 个水文站上游流域在 2030—2050 年 3 种 SSP-RCP 组合情景下,发生水文 干旱的平均频率分别为 10%、8%、9% 和 13%,发生气象干旱的平均频率分别为 9%、10%、11% 和 12%。 以上干旱频率指干旱月数与时段总月数之比。

总体而言,气象干旱和水文干旱发生的频率接近。2020—2050 年澜湄流域总体呈湿润趋势,其中 2020—2029 年干旱频发,2030—2050 年洪水风险增加<sup>[41]</sup>。随温室气体排放浓度增加,2020—2050 年干湿震 荡加剧,2020—2029 年干旱频率下降,2030—2050 年干旱频率上升。



图 4 澜湄干流 4 个水文站上游流域的 Iss-12 和 Isp-12 时间序列

Fig. 4 Iss-12 and Isp-12 series in the upper basins of four gauging stations on the mainstem of the Lancang-Mekong River

#### 表 5 基于 Iss和 Isp统计未来气候情景下澜沧江-湄公河流域干旱频率

Table 5 Drought frequencies in the Lancang-Mekong River basin under future climate scenarios based on  $I_{ss}$  and  $I_{sp}$ 

申 位・%	0%	•	付	笚	È
-------	----	---	---	---	---

<b>사</b> 고 하	计人场过佳星	干旱频率(20	20—2029 年)	干旱频率(2030—2050年)		
小文站	社云 红 07 用 泉	$I_{\rm SS}$	I <sub>SP</sub>	I <sub>SS</sub>	I <sub>SP</sub>	
	SSP126	33	29	5	5	
允景洪	SSP245	35	36	12	11	
	SSP585	18	19	13	11	
	SSP126	42	43	4	4	
琅勃拉邦	SSP245	27	27	11	14	
	SSP585	10	15	10	11	
	SSP126	47	46	5	5	
穆达汉	SSP245	31	23	14	15	
	SSP585	9	13	9	13	
	SSP126	44	40	6	6	
上丁	SSP245	29	23	15	15	
	SSP585	18	17	18	16	

#### 3.3 气候变化对干旱强度的影响

如表 6 所示, 计算允景洪、琅勃拉邦、穆达汉和上丁水文站在 2020—2029 年 3 种 SSP-RCP 组合情景下 的干旱等级强度,并统计发生中旱等级以上水文干旱事件的平均数分别为 4、6、4 和 5,发生中旱等级以上 气象干旱的平均数分别为 5、9、6 和 8。4 个水文站在 2030—2050 年 3 种 SSP-RCP 组合情景下,发生中旱等 级以上水文干旱事件的平均数分别为 6、4、6 和 4,发生中旱等级以上气象干旱的平均数分别为 7、7、8 和 6。总体而言,气象干旱往往较水文干旱更严重,随温室气体排放浓度增加,2030—2050 年干旱强度有所升 高;空间上,2020—2050 年老挝、泰国的干旱在强度和频率上比澜湄流域其他国家更为严重,这和降水空 间变化一致。

国际环境管理中心(International Centre for Environmental Management)在关于气候变化对澜湄下游流域影响的研究报告中指出<sup>[42]</sup>,若月降水量不足蒸散量的 50%则认为该月发生农业干旱,基于第三次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 3, CMIP3)GCMs 数据分析得出结论:截至 2050 年, 澜湄下游流域发生的农业干旱主要集中在老挝和泰国东北部地区,这与本研究结论相似。另外,以穆达汉站 为例(图 4 和表 6),随温室气体排放浓度增加,2030—2050 年发生中旱和特旱事件数增加,干旱严重程度增 加但干旱持续时间可能缩短。

表 6 基于 I<sub>ss</sub>和 I<sub>sp</sub>统计未来气候情景下澜湄流域不同干旱标准强度等级的干旱事件数 Table 6 Numbers of drought events based on I<sub>ss</sub> and I<sub>sp</sub> for different drought intensity levels in the Lancang-Mekong River basin under future climate scenarios

-+ +			干旱事件数(20202029年)					干旱事件数(2030-2050年)					
水文站	木米	中	中旱		重旱		特旱		中旱		重旱		<del>,</del> 早
旧尽	I <sub>ss</sub>	$I_{\rm SP}$	$I_{\rm SS}$	$I_{\rm SP}$	$I_{\rm SS}$	$I_{\rm SP}$	$I_{\rm SS}$	$I_{\rm SP}$	I <sub>ss</sub>	I <sub>SP</sub>	I <sub>SS</sub>	I <sub>SP</sub>	
	SSP126	1	3	0	1	3	2	5	4	0	1	0	0
允景洪	SSP245	1	1	1	0	1	2	8	7	1	2	0	0
	SSP585	2	2	1	2	1	1	2	6	2	1	1	1
	SSP126	4	5	0	0	3	3	0	2	0	0	1	1
琅勃拉邦	SSP245	4	7	0	1	2	2	4	5	2	2	0	4
	SSP585	4	8	0	1	0	0	1	3	1	2	2	1
	SSP126	1	6	2	1	1	2	3	2	1	0	0	1
穆达汉	SSP245	3	3	0	1	1	1	4	9	0	0	2	2
	SSP585	3	4	0	1	0	0	4	6	1	1	2	2
	SSP126	4	5	1	3	1	1	1	1	1	0	0	1
上丁	SSP245	3	6	0	1	1	1	3	3	1	3	1	1
	SSP585	4	3	1	2	1	1	1	5	2	0	2	3

#### 3.4 水库调度对干旱变化趋势的影响

利用历史水库调度规律曲线作为水库调节径流演算的调度方案<sup>[43]</sup>,使用 GCM 驱动数据结合 2.1 中率定的 CREST-Snow 模拟天然径流时间序列,可进一步模拟经澜沧江梯级水库调节后 4 个水文站所在河道断面的 日尺度水库调节径流,评估未来澜沧江梯级水库对径流的调节作用。图 5 显示了澜湄干流 4 个水文站 2020—2050 年的多年平均天然月均流量和水库调节后的月均流量,从中可以看出水库对径流具有明显的削峰补枯 作用,水库的调节作用从上游到下游逐渐减弱。





Fig. 5 Multi-year mean monthly natural and reservoir-regulated discharge during 2020—2050 at four gauging stations on the mainstem of the Lancang-Mekong River

基于模拟的逐日径流量,可计算其干季和湿季径流量(表7)。结果表明:2020—2050年允景洪站经水库 调节后干季径流量增加了近1倍; 琅勃拉邦站、穆达汉站和上丁站干季径流量增幅分别为83%、83%和 68%。允景洪站2020—2050年多年平均干季天然径流量占下游3个水文站多年平均干季天然径流量的比例 分别为66%、44%和30%,经水库调节后该比例分别为72%、47%和34%。干季是湄公河流域农业用水的 高峰期<sup>[10]</sup>,澜沧江干季径流对下游农业十分重要,澜沧江干流梯级水库发挥调丰补枯作用,可大幅增加下 游湄公河干季径流量,有助于缓解下游干季旱情,保障下游国家水资源安全。

表 7 澜沧江-湄公河干流 4 个水文站 2020—2050 年多年平均干湿季天然径流量和水库调节径流量

Table 7Multi-year averaged dry and wet season natural and reservoir-regulated streamflow during 2020—2050 at

		干季			湿季	
水文站	天然径流量/	水库调节径流量/	亦从变加	天然径流量/	水库调节径流量/	亦化变/0
	亿 m <sup>3</sup>	亿 m <sup>3</sup>	文化平/%	亿 m <sup>3</sup>	$Z m^3$	受化平/%
允景洪	143	285	99	397	225	- 43
琅勃拉邦	216	396	83	817	646	-21
穆达汉	328	603	83	1 943	1 772	- 8
上丁	496	834	68	2 830	2 658	- 6

four gauging stations on the mainstem of the Lancang-Mekong River

允景洪站 2020—2050 年天然状态多年平均湿季径流量经水库调节后减小了 43%; 琅勃拉邦站、穆达汉 站和上丁站湿季径流量减小幅度分别为 21%、8%和 6%。澜沧江梯级水库调度在减小湿季径流方面,对允 景洪和琅勃拉邦站作用较为明显,对穆达汉和上丁站作用较小。

图 6 显示了澜湄干流 4 个水文站上游流域分别基于天然径流和水库调节径流计算所得 *I*<sub>ss</sub>-12 时间 序列。尽管澜沧江干流梯级水库可大幅提升允景洪站下游湄公河干季径流,但 *I*<sub>ss</sub>-12 时间序列差别不 大,表明澜沧江干流梯级水库虽有 2 座大型水库(小湾和糯扎渡),但一直发挥季节性调节作用,难以 有效缓解多年持续干旱(尤其在 2020—2029 年间),未来可进一步优化水库调度方式,更好地应对澜 湄流域干旱。



图 6 澜湄干流 4 个水文站分别基于天然径流和水库调节径流计算所得的 Iss-12 时间序列

Fig. 6 I<sub>ss</sub>-12 series from natural and reservoir-regulated streamflow at four gauging stations on the mainstem of the Lancang-Mekong River

### 4 结 论

本文在澜湄流域使用经偏差校正的 CMIP6 计划 5 个 GCM 模式,在 3 种 SSP-RCP 组合情景(SSP126、 SSP245、SSP585)下的气象数据,驱动 CREST-Snow 分布式水文模型,预估了 2020—2050 年气候变化情景下 的径流演变趋势。基于 *I*<sub>sp</sub>和 *I*<sub>ss</sub>时间序列,分析了澜湄流域气象和水文干旱的未来发展趋势,量化了澜沧江 干流梯级水库调度对下游径流的调节作用。主要结论如下:

(1) 澜湄干流上丁站上游流域平均降水相比于历史时期(2003—2019年)呈略微增加趋势。空间上,流 域年均降水量变化差异明显(-10%~30%),其中澜沧江源区和下游流域降水呈增加趋势;中游流域降水 无明显变化或略有减小。CREST-Snow模拟所得澜湄干流从上游至下游4个水文站的多模式集合未来天然年 径流在3种 SSP-RCP组合情景下均呈不显著上升趋势。

(2) 基于 *I*<sub>ss</sub>和 *I*<sub>sp</sub>分析澜湄流域未来干旱趋势,结果表明,水文干旱较气象干旱滞后1个月,且气象干旱在多数情况下重于水文干旱。2020—2050 年澜湄流域整体呈湿润趋势;在3种 SSP-RCP 组合情景下,澜湄流域极端干湿事件发生频率均增加,其中 2020—2029 年干旱频发,2030—2050 年更偏湿润;随温室气体排放浓度增加,干湿震荡加剧,干旱严重程度增加。空间上,老挝和泰国在 2020—2050 年干旱的频率和强度比流域内其他国家更高。

(3) 澜沧江干流梯级水库可有效提升澜湄干流干季径流量,增幅从上游(99%)至下游(68%)递减,梯级水库调度可有效缓解湄公河干季旱情,保障流域水资源和生态安全。梯级水库调度亦有助于下游防洪,对

中国和老挝北部防洪效果更为明显,对泰国东北部、柬埔寨和越南防洪作用有限。目前,澜沧江干流梯级水 库仅发挥季节性调节作用,难以有效缓解流域可能发生的多年持续干旱,未来有待进一步加强澜湄合作,优 化水库调度方式,促进流域内各国水资源安全和水旱灾害防治。

#### 参考文献:

- 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.
- [2] PACHAURI R K, ALLEN M R, BARROS V R, et al. 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 [M]. Copenhagen: IPCC, 2014.
- [3] HAN Z Y, LONG D, FANG Y, et al. Impacts of climate change and human activities on the flow regime of the dammed Lancang River in Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 96-105.
- [4] Mekong River Commission. State of the basin report 2010 [J/OL]. [2021-04-06]. https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/ resources/6EE2EE9B57E77748492577700023F7BD-MRC-SOB-report-2010.pdf.
- [5] LUTZ A F, IMMERZEEL W W, SHRESTHA A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(7): 587-592.
- [6] HAN Z Y, LONG D, HAN P F, et al. An improved modeling of precipitation phase and snow in the Lancang River basin in Southwest China[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(7): 1513-1527.
- [7] HAN P F, LONG D, HAN Z Y, et al. Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 224: 44-59.
- [8] LI X Y, LONG D, HAN Z Y, et al. Evapotranspiration estimation for Tibetan Plateau headwaters using conjoint terrestrial and atmospheric water balances and multisource remote sensing [J]. Water Resources Research, 2019, 55(11): 8608-8630.
- [9] POKHREL Y, BURBANO M, ROUSH J, et al. A review of the integrated effects of changing climate, land use, and dams on Mekong River hydrology [J]. Water, 2018, 10: 266.
- [10] 刘慧,杨泽川,许凤冉,等. 澜沧江-湄公河流域干旱分析及上游水库影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(6): 479-485. (LIU H, YANG Z C, XU F R, et al. Drought in Lancang-Mekong River basin and the impact of upstream reservoirs[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(6): 479-485. (in Chinese))
- [11] 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. (HOUSY, TIANFQ, NIGH. 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))
- [12] 侯时雨,田富强,陆颖,等. 澜沧江-湄公河流域水库联合调度防洪作用[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 68-78. (HOU S Y, TIAN F Q, LU Y, et al. Potential role of coordinated operation of transboundary multi-reservoir system to reduce flood risk in the Lancang-Mekong River basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 68-78. (in Chinese))
- [13] 刘苏峡,丁文浩,莫兴国,等. 澜沧江和怒江流域的气候变化及其对径流的影响[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13
   (4): 356-365. (LIUSX, DINGWH, MOXG, et al. Climate change and its impact on runoff in Lancang and Nujiang River basins[J]. Climate Change Research, 2017, 13(4): 356-365. (in Chinese))
- [14] 陈晓宏,钟睿达. 气候变化对澜沧江下游梯级电站发电及生态调度的影响[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 754-764.
   (CHEN X H, ZHONG R D. Hydropower generation and ecological operation under climate change: a case study of the down-stream cascade of Lancang River hydropower plants[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 754-764. (in Chinese))
- [15] CAMPBELL I C. Perceptions, data, and river management: lessons from the Mekong River[J]. Water Resources Research, 2007, 43(2): W02407.
- [16] STONE R. Severe drought puts spotlight on Chinese dams[J]. Science, 2010, 327(5971): 1311.
- [17] BASIST A, WILLIAMS C. Monitoring the quantity of water flowing through the Upper Mekong basin under natural (unimpeded) conditions[R]. Bangkok: Sustainable Infrastructure Partnership, 2020.
- [18] VU D T, DANG T D, GALELLI S, et al. Satellite observations reveal 13 years of reservoir filling strategies, operating rules, and hydrological alterations in the Upper Mekong River basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26 (9): 2345-2364.

- [19] DANDRIDGE C, LAKSHMI V, BOLTEN J, et al. Evaluation of satellite-based rainfall estimates in the Lower Mekong River basin (Southeast Asia) [J]. Remote Sensing, 2019, 11(22): 2709.
- [20] Mekong River Commission. Overview of the hydrology of the Mekong basin[J/OL]. (2005-11-01)[2021-01-06]. http://www.mekonginfo.org/assets/midocs/0001968-inland-waters-overview-of-the-hydrology-of-the-mekong-basin.pdf.
- [21] WANG J H, HONG Y, LI L, et al. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model[J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56(1): 84-98.
- [22] SHEN X Y, HONG Y, ZHANG K, et al. Refining a distributed linear reservoir routing method to improve performance of the CREST model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2017, 22(3): 04016061.
- [23] CHEN X, LONG D, HONG Y, et al. Improved modeling of snow and glacier melting by a progressive two-stage calibration strategy with GRACE and multisource data: how snow and glacier meltwater contributes to the runoff of the Upper Brahmaputra River basin? [J]. Water Resources Research, 2017, 53(3): 2431-2466.
- [24] 杜明达. 缺资料地区基于多源遥感数据的水文模型研究[D]. 北京:清华大学, 2018. (DU M D. Development of a hydrological model driven and calibrated by multisource remote sensing data in poorly gauged basins[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese))
- [25] 白亮亮,曾超,盖长松,等.基于高分卫星数据多时相重建的水体信息提取[J].水力发电学报,2021,40(2):111-120.(BAILL,ZENGC,GAICS, et al. Extraction of water body information from GF-1 satellite images using spatiotemporal reconstruction approach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(2): 111-120.(in Chinese))
- [26] 岩腊,龙笛,白亮亮,等.基于多源信息的水资源立体监测研究综述[J]. 遥感学报,2020,24(7):787-803.(YAN L, LONG D, BAI L L, et al. A review on water resources stereoscopic monitoring systems based on multisource data[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(7):787-803.(in Chinese))
- [27] 龙笛,李雪莹,李兴东,等. 遥感反演 2000—2020 年青藏高原水储量变化及其驱动机制[J]. 水科学进展, 2022, 33 (3): 375-389. (LONG D, LI X Y, LI X D, et al. Remote sensing retrieval of water storage changes and underlying climatic mechanisms over the Tibetan Plateau during 2000—2020[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 375-389. (in Chinese))
- [28] HUANG Q, LONG D, DU M D, et al. Daily continuous river discharge estimation for ungauged basins using a hydrologic model calibrated by satellite altimetry: implications for the SWOT mission [J]. Water Resources Research, 2020, 56 (7): e2020WR027309.
- [29] 黄琦. 基于多源遥感观测的西南缺资料流域河道径流量反演研究[D]. 北京:清华大学,2020. (HUANG Q. River discharge estimation using multisource remote sensing in poorly gauged headwaters of Southwest China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020. (in Chinese))
- [30] DAI L Y, CHE T, XIE H J, et al. Estimation of snow depth over the Qinghai-Tibetan Plateau based on AMSR-E and MODIS data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 1989.
- [31] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99.
- [32] PIANI C, HAERTER J O, COPPOLA E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe
   [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 99(1/2): 187-192.
- [33] HAY L E, WILBY R L, LEAVESLEY G H. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(2): 387-397.
- [34] 李昱,席佳,张弛,等. 气候变化对澜湄流域气象水文干旱时空特性的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 508-519.
   (LI Y, XI J, ZHANG C, et al. Impact of climate change on the spatio-temporal characteristics of meteorological and hydrological drought over the Lancang-Mekong River basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 508-519. (in Chinese))
- [35] THILAKARATHNE M, SRIDHAR V. Characterization of future drought conditions in the Lower Mekong River basin[J]. Weather and Climate Extremes, 2017, 17: 47-58.
- [36] DONG Z Q, LIU H, BAIYINBAOLIGAO, et al. Future projection of seasonal drought characteristics using CMIP6 in the Lancang-Mekong River basin[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127815.
- [37] 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. (Grades of meteorological drought: GB/T 20481—

2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese))

- [38] 顾磊,陈杰,尹家波,等. 气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播[J]. 水科学进展,2021,32(3):321-333. (GUL, CHEN J, YIN J B, et al. Risk propagation from meteorological to hydrological droughts in a changing climate for main catchments in China[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 321-333. (in Chinese))
- [39] 涂新军,谢育廷,吴海鸥,等.基于概率矩阵的干旱等级变化评估及应用[J].水科学进展,2021,32(4):520-533.
   (TU X J, XIE Y T, WU H O, et al. An evaluation method for drought level changes based on probability matrix and its application[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 520-533. (in Chinese))
- [40] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): L02405.
- [41] SEILER R A, HAYES M, BRESSAN L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring [J]. International Journal of Climatology, 2002, 22(11): 1365-1376.
- [42] HARTMAN P, GUSTAFSON S, CARLUCCI K. Climate change impact and adaptation study for the Lower Mekong basin: summary report[J/OL]. [2021-04-06]. https: // www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1861/USAID\_Mekong\_ARCC\_Climate\_Change\_Impact\_and\_Adaption\_Study\_Main\_Report.pdf.
- [43] HAN Z Y, LONG D, HUANG Q, et al. Improving reservoir outflow estimation for ungauged basins using satellite observations and a hydrological model[J]. Water Resources Research, 2020, 56(9): e2020WR027590.

# Projection of future droughts across the Lancang-Mekong River under a changing environment\*

LONG Di, HAN Zhongying, WANG Yiming

(State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To enhance the resilience of riparian countries associated with the Lancang-Mekong River (LMR) to drought under a changing environment, there is a pressing need to project future droughts across this river basin. Bias corrected projections from five CMIP6-GCMs under three Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) were used as forcing data of a distributed hydrologic model (CREST-Snow) to project future streamflow of the LMR, and to examine meteorological and hydrological droughts across the LMR basin during 2020—2050. The regulation effect of cascade reservoirs on the mainstem of the Lancang River on downstream streamflow in the future was also quantified. Results show that although the entire basin will likely experience an overall wetting trend, the frequency of extreme dry and wet events across the LMR basin is likely to increase during 2020—2050. Droughts will more frequently occur during 2020—2029, as opposed to wet events that will be mainly concentrated during 2030—2050. From a spatial perspective, Laos and Thailand are likely to experience more frequent and severe droughts than other riparian countries. Cascade reservoirs on the Lancang River in China can effectively increase dry-season streamflow in downstream areas (decreasing from 99% in the upper stream to 68% in the downstream), playing a positive and important role in mitigating water shortage during dry seasons or droughts. We advocate for enhancing the cooperation through improving regulation of reservoirs across the entire basin, which should benefit water security and mitigation of droughts for all riparian countries of the LMR.

Key words: drought projection; streamflow; reservoir operation; hydrological modeling; Lancang-Mekong River

<sup>\*</sup> The study was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 92047203; No. 92047301).