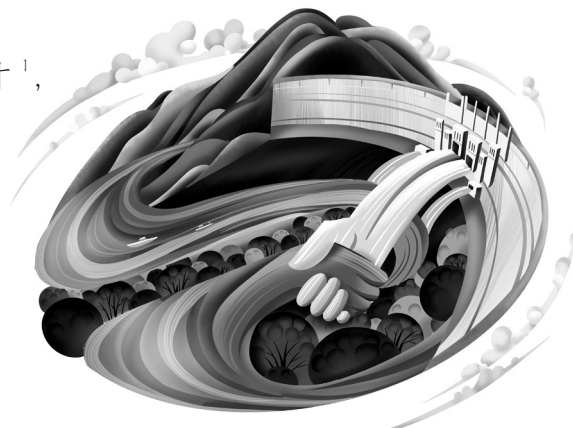


DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2020.008

运晓博, 汤秋鸿, 徐锡蒙, 等. 气候变化对澜湄流域上下游水资源合作潜力的影响 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16 (5): 555-563

Yun X B, Tang Q H, Xu X M, *et al.* Impact of climate change on water resource cooperation between the upstream and downstream of the Lancang-Mekong River basin [J]. Climate Change Research, 2020, 16 (5): 555-563

气候变化对澜湄流域上下游水资源合作潜力的影响

运晓博^{1,2}, 汤秋鸿^{1,2}, 徐锡蒙¹, 周园园¹, 刘星才¹,
王 杰^{1,2}, 孙思奥³¹ 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及
地表过程重点实验室, 北京 100101;² 中国科学院大学, 北京 100049;³ 中国科学院地理科学与资源研究所区域可持续发展分析与
模拟重点实验室, 北京 100101

摘 要: 澜沧江—湄公河(澜湄)流域南北跨越了 25 个纬度, 流域上下游气候差异明显。同时遭遇干旱或湿润通常不利于上下游水资源合作, 而水文气象条件正常或上下游间的干湿条件不一样时有利于缓解流域内的竞争性用水状况。为探究气候变化对澜湄流域上下游水资源合作潜力的影响, 基于普林斯顿降水数据集与全球气候模型预估数据, 利用标准化降水指数(SPI)和 Copula 函数计算了历史时期(1985—2016 年)与未来时期(2021—2090 年)澜湄流域上下游同时面临干旱、湿润以及干湿存在差异的发生概率。基于典型浓度路径 RCP4.5 和 RCP8.5 情景的预估结果显示与历史时期相比, 未来时期澜湄流域在 RCP4.5 与 RCP8.5 情景下具有相似的变化趋势, 即: 遭遇同期湿润的概率在逐渐增大(最大达到 199.5%), 遭遇同期干旱的概率则在逐渐减少(最小达到 -35.9%), 而遭遇干湿差异时期的概率在所有时段均大幅减少(-53.1% ~ -42.5%)。未来澜湄流域上下游同期湿润概率的增加和遭遇干湿差异概率的减少预计将加大上下游面临水资源竞争的可能性, 从而对澜湄流域各国家之间的水资源合作产生不利影响。这一研究可以为澜湄流域水资源合作策略的制定提供科学参考和依据。

关键词: 跨境河流; 气候变化; 澜湄流域; Copula 函数

引 言

澜沧江—湄公河(LMRB)是亚洲最重要的跨境河流, 流经中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨、越南, 最终汇入中国南海。澜沧江—湄公河流域(下文简称澜湄流域)属于西南季风气候区, 6—11 月为湿季, 12 月至次年 5 月为干季。流域内地形条件多变, 气候情况复杂, 年降水量相对较高,

但时空分布不均。澜湄流域的河流径流主要来源于降水与冰雪融水。澜沧江流域以高原气候与亚热带季风气候为主, 降水峰值集中在 6—8 月, 占全年降水量的 60% 以上, 径流补给以降水与融雪为主; 而湄公河流域以热带雨林气候与热带季风气候为主, 其降水峰值集中在 9—10 月, 占全年降水量的 75% 以上, 径流补给以上游来水与降水为主^[1]。上游与下游间的气候及水资源分布特征

收稿日期: 2020-01-10; 修回日期: 2020-05-21

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20060402); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0208); 国家自然科学基金(41425002, 41730645)

作者简介: 运晓博, 男, 博士研究生, yunxiaobo17@mails.ucas.ac.cn; 汤秋鸿(通信作者), 男, 研究员, tangqh@igsrr.ac.cn

存在较大差异。

澜湄流域的下游地区人口密集, 农业是其重要的经济命脉, 流域内居民的生活面临着与日俱增的干旱与洪涝事件的威胁^[2]。Rees 等^[3]研究表明, 气候变化将会导致澜沧江流域降水量增加, 并进一步对下游产生影响。Hoang 等^[4]与 Kiem 等^[5]研究指出, 未来增多的降水量将会引起流域内洪涝事件的增加。Thilakarathne 等^[6]的研究表明, 尽管流域内年均降水量有所增加, 但下游湄公河在未来(2016—2099 年)仍将面临较为严重的极端干旱。澜湄流域上游是其下游地区的重要水源地。澜湄流域上游变化将通过河川径流向下游传播, 影响下游地区的水资源安全^[7-8]。因此, 当流域的上下游分别遭遇极端干旱与湿润事件时, 可以通过跨境水资源的调配与合作来应对。2016 年 3 月, 中国政府通过增大上游水库的出流量来帮助湄公河流域下游国家应对严重旱情, 取得了较好的效果。在下游遭遇干旱时, 上游能够通过增大水库出流来支援下游; 而上游遭遇干旱时, 上游能够通过减少水库出流来保证自身的用水, 并降低下游潜在洪涝事件的出现概率。但在全流域同期遭遇极端干旱或湿润事件时, 上下游国家之间的水资源合作潜力减小, 容易引起水资源分配的冲突。现有针对澜湄流域干旱与洪水的研究, 主要集中在独立分析上游澜沧江流域或下游湄公河流域受气候变化的影响, 忽略了对流域内上下游同期干湿事件的分析。世界灾害数据库^①(EM-DAT)的数据显示, 1980 年以来, 澜湄流域旱涝事件发生频次不断增加: 2010 年干季, 澜湄流域遭遇了百年一遇的全流域严重干旱, 各个国家间因水资源不足产生严重矛盾, 并引发了一系列外交问题; 2017 年湿季, 澜沧江流域遭遇 20 年来最大的洪水, 同时期下游的柬埔寨、越南地区也遭遇了洪水, 导致 1400 人失踪。上述实例表明, 澜湄流域上下游遭遇同期干旱/湿润可能会导致跨境水资源合作措施的暂时性失效, 而上下游间干湿差异则有利于流域内的合作。

在未来时期, 澜湄流域下游地区将会开垦更多的耕地以满足人口增长的需求, 预计 2050 年总耕地灌溉面积将翻倍, 从而导致灌溉用水量的大幅增加^[9], 流域内的农业经济更容易受到干旱与洪涝事件的影响。在气候变化背景下, 全球范围内的水循环加速^[10], 极端事件增多, 水灾害频发^[11-12]。气候变化将会加速澜湄流域上游“亚洲水塔”地区的冰川退缩, 引起流域内河流流量的变化。同时未来澜湄流域不断增加的干旱与洪涝事件的出现频率与持续时间^[13-14], 可能增加上下游间同期干旱与同期湿润的出现概率, 影响上下游国家之间的水资源合作潜力^[15-16]。澜湄流域是亚洲地缘政治博弈与经济合作的重点区域, 流域内水资源的变化与数亿人口的生活息息相关。分析气候变化对澜湄流域内上下游水资源合作的潜在影响, 将有助于评估流域内水资源的合作机制合理性与合作可持续性。本研究计算了历史时期 1982—2016 年澜湄流域上游与下游遭遇同期干旱、同期湿润与干湿存在差异的概率, 并以历史时期为基准, 分析了未来 2021—2090 年 RCP4.5 与 RCP8.5 情景下澜湄流域相应概率的变化特征, 结果可为澜湄流域水资源合作与管理策略的制定提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

澜沧江—湄公河全长约 4800 km, 位于亚洲东南部季风区。参考 Munia 等^[17]的研究, 将澜湄流域划分为上游的澜沧江流域与下游的湄公河流域, 如图 1 所示。澜湄流域内的径流主要源于降水, 降水补给占总径流量的 50% 以上, 上游地区平均每年向下游地区输送 17% 的水资源量, 其中旱季占比达到 35%^[18]。澜湄流域内生活着约 7000 万人, 预计到 2050 年流域人口将增加到 1.45 亿^[19]。以雨养农业为主的农村经济为湄公河三角洲地区提供了 65% 的经济收入, 在 20 世纪 80 年代后期开

① <https://www.emdat.be/>。

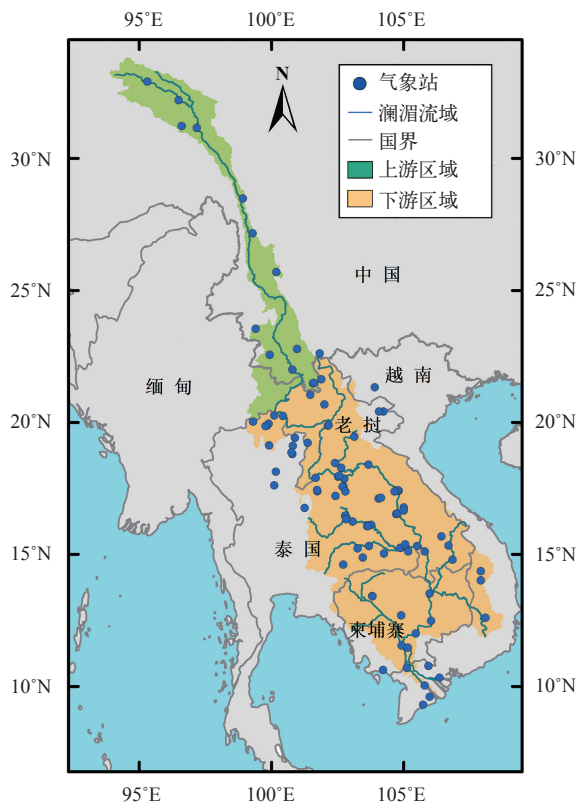


图 1 澜湄流域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Lancang-Mekong River basin (LMRB)

展农业改革后, 越南已成为世界上最大的稻米出口国之一。

1.2 数据

研究中涉及的历史降水数据来源于 0.25° 分辨率的普林斯顿全球降水数据集^[20-21], 并基于来自于中国气象数据网^②与湄公河委员会^[22]的实际气象站观测数据采用反距离权重法对数据集进行插值校准。未来降水预估数据来源于跨部门影响模型比较项目^③(ISIMIP)提供的 0.5° 降水数据, 并采用反距离权重法插值降尺度为 0.25° 。

1.3 SPI 计算

标准化降水指数 (SPI)^[23] 是将降雨量分布进行正态标准化处理后的数据, 其数值的大小能代

表流域内不同时段相对干湿水平。参考研究中常用的 McKee 等^[23] 的分类标准, 将 $SPI \leq -1$ 的时期划分为干旱时期, 而 $SPI \geq 1$ 的时期划分为湿润时期。本研究基于 SPI 方法评估澜湄流域的气象干旱与异常湿润情况。3 个月尺度的 SPI (记作 SPI-3) 对季风区的干湿特征分析有较好的效果^[24], 选取 SPI-3 分析澜湄流域的历史时期 (1982—2016 年) 和未来 (2021—2090 年) 干湿状况变化, 其中历史时期作为基准期, 未来 SPI-3 的变化以历史基准期特征值为基础进行计算。研究通过对校准后的数据网格求和计算单位时间内区域的总降水量, 并计算得到对应的历史时期的 SPI-3 变化。基于 Kolmogorov-Smirnov 法^[25] 评估 Gamma、皮尔逊 -III 型 (Pearson-III) 与广义极值分布对 SPI-3 的拟合优度, 其中 Pearson-III 分布函数的拟合效果最好 ($p=0.91$, Gamma 与广义极值分布的 p 值分别为 0.84 与 0.78), 因此被用于拟合本研究中的 SPI-3。

1.4 Copula 函数

Copula 是一种多变量概率分布函数。1982—2016 年上游与下游的 SPI-3 的相关系数为 0.31 ($n=140, \alpha=0.01$), 两个地区的 SPI-3 变化并不完全独立, 需借助 Copula 函数^[26] 来计算上下游同期干旱与同期湿润的概率。Copula 函数有很多类别, Huard 等^[27] 提出的权重理论能够有效评估不同 Copula 函数对随机变量的适应性。本研究评估了 AMH, Gumbel, Frank, Clayton, A12, A14, FGM, Gauss 等 8 种常用 Copula 函数在澜湄流域上下游地区 SPI 联合概率分布的适应性, 其中 FGM 的权重数值 (0.387) 最高, 其余类型的权重值在 0.026 ~ 0.256 之间, 这表明 FGM Copula 在澜湄流域内的适应性最好, 因此选取其作为连接函数。

方程 (1) 是表征变量 X 和 Y 联合分布 $F(x, y)$ 的 Copula 函数。其中 X 和 Y 分别代表上游与下游的 SPI-3 时间序列, 其分布函数分别由 $F_X(x)$ 与

② <http://data.cma.cn/>。

③ <https://www.isimip.org/>。

$F_Y(y)$ 表示, P 表示概率密度函数, C 表示 Copula 函数。

$$F(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) = C(F_X(x), F_Y(y)). \quad (1)$$

有效的水资源合作能够缓解不同区域间水资源分布不均的问题。SPI-3 从干旱到湿润的数值差为 2, 上下游 SPI-3 的差值绝对值 ≥ 2 时, 表示上下游间存在较大的干湿差异, 此时流域的上下游间具有较高的合作潜力。方程 (2) 是表征变量 X 和 Y 较高合作潜力时期的联合分布函数。

$$P(2 \leq |x - y|) = C(2 \leq |F_X(x) - F_Y(y)|). \quad (2)$$

1.5 未来气候变化预估

在全球变化的背景下, 澜湄流域的气候也会随之改变。全球气候模式 (GCM) 被认为是预估不同情景下未来气候变化趋势的有效工具。现有研究表明^[28], GCM 能够较好地评估澜湄流域的降水变化特征。由于不同的 GCM 对未来降水变化的预估存在差异, 因此采用多种 GCMs 以减少未来降水变化预测的不确定性^[29]。基于 ISIMIP 对多种 GCM 可靠性的评估结果^[30], 本研究采用 ISIMIP2b 提供的 GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM 及 NorESM1-M 这 5 个 GCM 的降尺度降水数据集, 并分中排放代表性浓度路径 (RCP4.5) 与高排放代表性浓度路径 (RCP8.5) 情景下进行分析, 以

考虑未来不同情景下降水预估的不确定性。其中 RCP4.5 指 2100 年辐射强迫稳定在 4.5 W/m^2 的情景, 是全球各国采取一定应对气候变化政策的情景; 而 RCP8.5 指 2100 年辐射强迫上升至 8.5 W/m^2 的情景, 是全球各国不采取任何应对气候变化政策的情景。

2 计算结果与分析

2.1 澜湄流域历史时期的变化

采用改进的 Mann-Kendall 趋势检验法^[31], 对 1982—2016 年澜湄流域上游与下游的 SPI-3 变化趋势进行分析, 结果如图 2 所示。在 95% 的信度水平下, 上游的 SPI-3 值并没有明显增加, 变化率为 $-0.036 (10 \text{ a})^{-1}$; 而下游的 SPI-3 呈现明显增加趋势, 变化率为 $0.064 (10 \text{ a})^{-1}$, 表明澜湄流域下游地区的湿润程度显著增加。1982—2016 年上游干旱与下游干旱 ($\text{SPI-3} \leq -1$) 的概率分别为 15.4% 与 16.9%; 上游湿润与下游湿润 ($\text{SPI-3} \geq 1$) 的概率分别为 16.2% 与 13.2%。其中, 下游 64% 的干旱出现在 1982—1998 年, 而 66% 的湿润出现在 1999—2016 年。随着时间的变化, 下游地区的干旱时期在不断减少, 而湿润时期在不断增多。

图 3 显示基于 FGM Copula 函数计算的 1982—2016 年澜湄流域上下游 SPI-3 的联合概率分布, 该分布是上游 SPI-3 与下游 SPI-3 累积概率

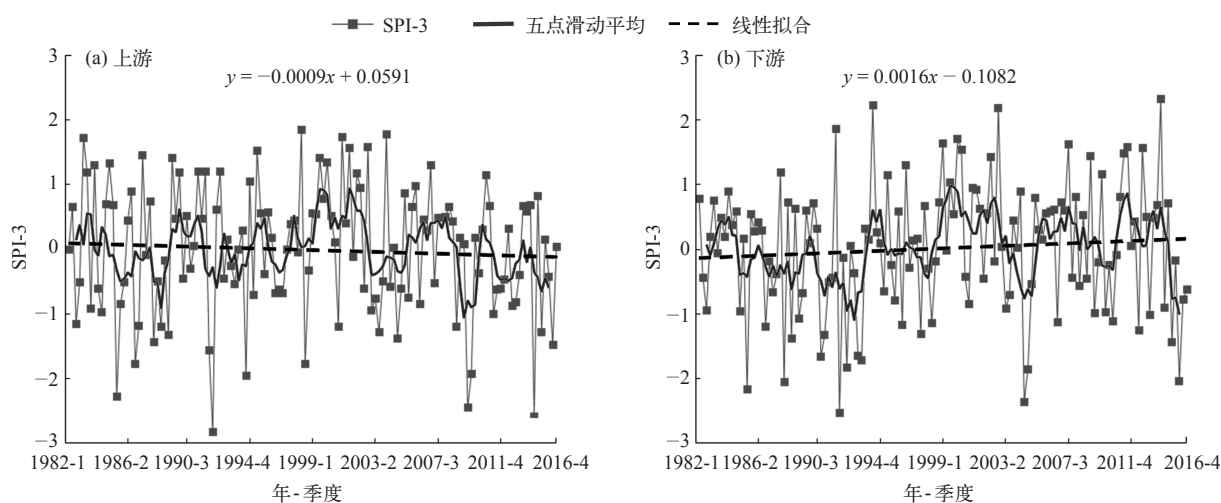
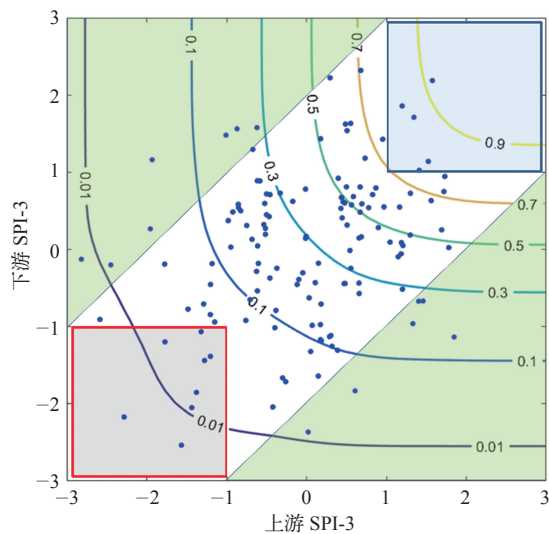


图 2 1982—2016 年澜湄流域上游 (a) 与下游 (b) SPI-3 的变化

Fig. 2 The variation of SPI-3 in upstream (a) and downstream (b) from 1982 to 2016 in the LMRB



注: 红色区域代表同期干旱 ($SPI-3 \leq -1$) 的时期, 蓝色区域代表同期湿润 ($SPI-3 \geq 1$) 的时期, 绿色区域表示干湿差异的时期。

图 3 1982—2016 年澜湄流域上下游 SPI-3 联合概率分布的累积等值线

Fig. 3 Level curve of the joint probability distribution of the SPI-3 in upstream and downstream from 1982 to 2016 in the LMRB (The red frame area indicates the concurrent drought, the blue frame area indicates the concurrent wet, the green area indicates the uneven water resource period)

密度函数通过 Copula 函数连接后在二维空间中的联合展开。1982—2016 年上下游地区遭遇同期干旱的概率为 5.9%, 遭遇同期湿润的概率为 3.7%; 上下游干湿差异的出现概率为 9.6%, 可见此时期上下游间的干湿差异较大, 具有较高的合作潜力。

2.2 澜湄流域未来时期的变化

GCM 是常用的预估未来气候变化的方法, 已有大量研究评估了不同 GCM 在澜湄流域的模拟能力^[28,32-33]。经过测试, 1982—2010 年间澜湄流域内 5 种模式模拟降雨数据与历史降雨的相关系数均在 0.61 以上, 年均降水量误差保持在 $-32 \sim 163$ mm 之间 (相对误差 6% 以内), 呈现出较好的模拟效果, 因此可将其用于评估澜湄流域未来降水的变化, 这与先前研究的结论一致。

RCP4.5 与 RCP8.5 两种情景下的 5 个 GCM 降尺度气候模式降水数据表明, 与 1982—2016 年的历史时期相比, 2021—2090 年未来年均日降水量的变化为 $-0.141 \sim 0.495$ mm ($-2\% \sim 7\%$)。

以历史时期的 SPI-3 分布特征为基准, 对澜湄流域 2021—2090 年的 SPI-3 变化进行评估, 结果如图 4 所示。未来时期流域内的 SPI-3 呈现增加趋势。其中上游未来 SPI-3 变化率为 $0.041 \sim 0.053$ $(10 \text{ a})^{-1}$, 与历史时期上游变化趋势相反; 下游流域的未来 SPI-3 变化率为 $0.026 \sim 0.037$ $(10 \text{ a})^{-1}$, 与历史时期下游变化趋势一致, 但整体增长幅度相对较小。整体而言, 上游流域受气候变化的影响较大, 其 SPI-3 的增长速率比下游快。

另外, 本研究以历史时期的时间长度为基础, 将未来时期划分为近期 (2021—2055 年) 与远期 (2056—2090 年) 两个时段, 分别评估了 5 个 GCM 在不同情景下 SPI-3 在空间尺度上的变化趋势, 其结果如图 5 所示。在未来近期, RCP4.5 情景下 80% 的模式与 RCP8.5 情景下全部的模式均表明澜湄流域呈现变湿的趋势。而在未来远期, 两种情景下均有 60% 的模式表明澜湄流域呈现变湿的趋势。整体而言, 2021—2090 年澜湄流域的降水量在近期快速增加, 随后在远期增速变慢。同时 RCP4.5 情景下 80% 的模式结果表明未来远期湄公河下游三角洲地区呈现变干的趋势, 虽然在 RCP8.5 情景下仅有 40% 的远期模式呈现相同

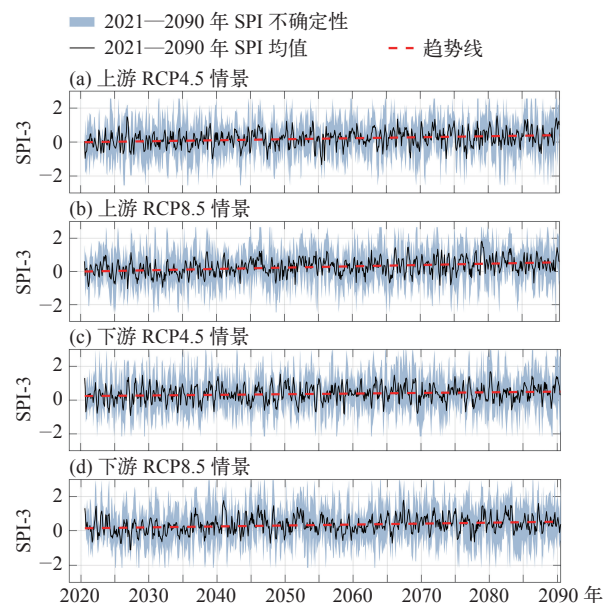


图 4 2021—2090 年澜湄流域上下游 SPI-3 的变化趋势
Fig. 4 SPI-3 of upstream and downstream from 2021 to 2090 in the LMRB

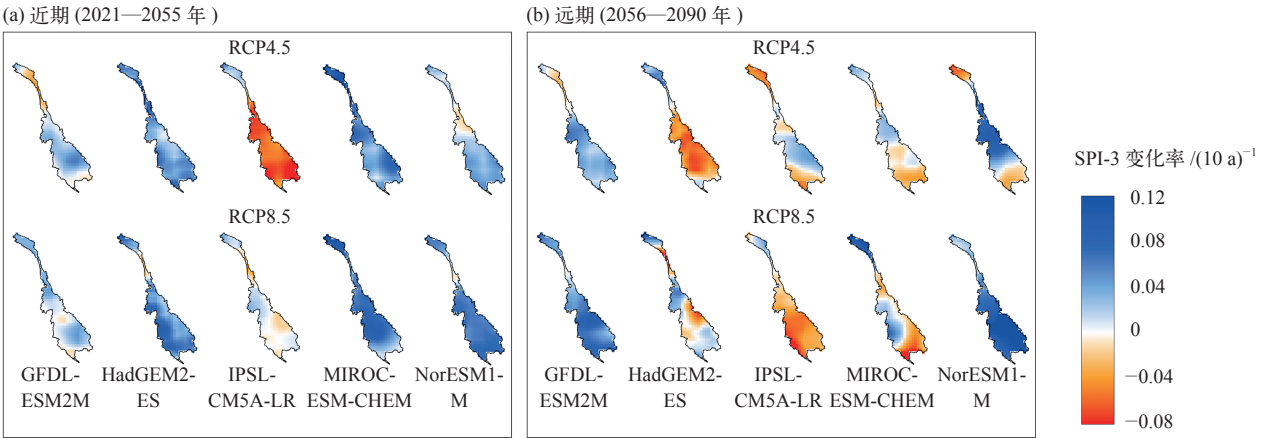


图 5 未来湄公河流域的 SPI-3 变化率分布
Fig. 5 Distribution of SPI-3 change rate in the LMRB based on GCMs

的变干趋势，但 RCP4.5 情景是最接近现实情况的情景，因此认为湄公河三角洲地区在未来远期面临较高的变干风险。

表 1 显示了 2021—2090 年间澜湄流域上下游遭遇同期干旱、同期湿润与干湿差异时期的概率以及对比历史基准期的相对变化。RCP4.5 与 RCP8.5 情景展现的结果较为一致，其中 RCP4.5 计算得到的同期干旱与同期湿润概率要略低于 RCP8.5，这是因为 RCP4.5 代表了全球采取气候变化应对措施的情景，在此情景下极端干旱与极端降雨事件的数量要少于 RCP8.5 情景下。

在 RCP4.5 情景下，澜湄流域遭遇上下游同期干旱的平均概率从近期的 5.5% 降低到远期的 3.8%；遭遇同期湿润的平均概率从近期 7.1% 增加到远期 11.0%；上下游干湿差异的平均概率从近期 4.5% 变为 5.3%。与历史时期相比，未来澜湄流域遭遇同期干旱的概率逐渐减少；遭遇同期

湿润的概率则快速增加；而上下游干湿差异时期的出现概率在近期与远期均有所减少。

而在 RCP8.5 情景下，澜湄流域遭遇上下游同期干旱的平均概率从近期的 6.1% 降低到远期的 3.8%；遭遇同期湿润的平均概率从近期 7.4% 增加到远期 11.1%；上下游干湿差异的平均概率从近期 4.9% 变为 5.5%。与历史时期相比，未来澜湄流域遭遇同期干旱的概率先在近期少量增多（4.1%），随后在远期减少至 -35.3%；遭遇同期湿润的概率则明显增大；而上下游干湿差异时期的出现概率在近期与远期均有所减少。

整体而言，与历史时期相比，未来时期澜湄流域在 RCP4.5 与 RCP8.5 的情景下具有相似的变化趋势，即：遭遇同期湿润的概率在逐渐增大（最大达到 199.5%），遭遇同期干旱的概率则在逐渐减少（最小达到 -35.9%），而遭遇干湿差异时期的概率在所有时段均大幅减少（-53.1% ~

表 1 澜湄流域上下游近期与远期遭遇同期干旱、同期湿润与干湿差异时期的概率

Table 1 Probability of concurrent drought, concurrent wet and uneven water resource period between the upstream and downstream of the LMRB in the near and far future periods												
项目	RCP4.5 近期			RCP4.5 远期			RCP8.5 近期			RCP8.5 远期		
	同期干旱	同期湿润	干湿差异时期	同期干旱	同期湿润	干湿差异时期	同期干旱	同期湿润	干湿差异时期	同期干旱	同期湿润	干湿差异时期
5 种模式平均概率	5.5	7.1	4.5	3.8	11.0	5.3	6.1	7.4	4.9	3.8	11.1	5.5
相对变化	-7.1	92.4	-53.1	-35.9	196.2	-45.0	4.1	100.5	-49.4	-35.3	199.5	-42.5

-42.5%)。这表明未来澜湄流域遭遇全流域洪涝事件的概率将会大幅增加, 而遭遇全流域干旱事件的概率将有所降低。同时上下游干湿差异时期出现概率的减少, 将不利于上下游水资源合作措施的进一步展开。

3 讨论

澜湄流域是世界上最重要的跨境流域之一, 未来澜湄流域下游的大型三角洲地区会更易受到海平面上升、海水入侵、风暴潮与洪水频发的威胁^[34], 数千万居民的生活受到气候变化与旱涝事件的影响。现有研究表明, 气候变化使澜湄流域内的降水量增加, 但下游三角洲地区将面临较严重的干旱威胁^[35]。本研究分析了澜湄流域上下游间同期干湿特性的变化, 结果表明未来时期的澜湄流域上下游遭遇同期湿润的概率将大幅增加, 而遭遇同期干旱与上下游干湿差异时期的概率有所减少。这意味着未来澜湄流域上下游间的水资源问题将从“缺水”转向“多水”, 这将对现有的澜湄流域水资源安全与合作产生深远影响。需要注意的是, 本文采用的标准化降水指数 (SPI) 只考虑了未来降水变化对流域干湿状况的影响, 尽管降水对地表水资源有决定性的作用, 其他气候要素对地表水资源的影响仍然不可忽视。因此, 未来将考虑更多气候要素以便能够综合评估澜湄流域受气候变化的影响。

随着东南亚地区经济的发展, 澜湄流域对水资源的需求量不断增加, 流域内水资源变化对区域内能源与粮食安全的影响将更突出。未来上下游遭遇同期干旱概率的降低, 将有利于湄公河流域的农业与粮食生产, 并为下游三角洲地区的海水入侵与土壤盐渍化治理提供帮助^[36]。但同期湿润概率的大幅度增加将会带来更高的洪水风险, 影响下游三角洲地区夏、秋季的粮食生产, 并严重威胁流域内水利发电设施的基建安全; 洪水频率的增加也会影响下游物种的繁衍^[37]。上下游干湿差异出现概率的降低, 可能会影响流域内水库通过调节出流对上下游水资源进行再分配的有效

性, 不利于流域内的跨境水资源调度与合作。

在不断变化的气候条件下, 澜湄流域的上下游国家之间有必要展开深入的区域水资源管理与合作, 做好预防未知可能风险的准备。中国、老挝、越南与柬埔寨在澜湄流域修建的数百座大型水库提升了流域水资源调控能力, 并改善了当前流域内水资源时空分布不均的情况^[38-39], 但未来大幅增加的洪水风险为澜湄流域的洪涝事件治理带来了新的挑战。流域内国家有必要修建更多的水库并积极推进流域内跨国多水库防洪联合调度来应对未来频发的洪涝灾害。更为精准的洪水预报系统有助于流域内的洪涝灾害预警及防治, 提升流域应对洪涝灾害的能力。

4 结论

本文借助标准化降水指数 SPI 与 Copula 函数, 分析了历史时期澜湄流域上下游遭遇同期干旱/湿润以及干湿差异时期的出现概率, 并基于气候模式结果, 评估了其未来变化。

(1) 历史时期 (1982—2016 年) 澜湄流域上下游遭遇同期干旱的概率为 5.9%, 遭遇同期湿润的概率为 3.7%, 具有较高合作潜力的上下游干湿差异时期的出现概率为 9.6%。

(2) 与历史时期 (1982—2016 年) 相比, 未来时期 (2021—2090 年) 澜湄流域在 RCP4.5 与 RCP8.5 情景下具有相似的变化趋势, 即: 遭遇同期湿润的概率在逐渐增大 (最大达到 199.5%), 遭遇同期干旱的概率则在逐渐减少 (最小达到 -35.9%), 而遭遇干湿差异时期的概率在所有时段均大幅减少 (-53.1% ~ -42.5%)。这表明未来澜湄流域遭遇全流域洪涝事件的概率将会大幅增加, 而遭遇全流域干旱事件的概率将有所降低。同时上下游干湿差异时期出现概率的减少, 将不利于上下游水资源合作措施的进一步展开。■

参考文献

- [1] 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 of

- the Lancang-Mekong River basin [J]. *Yunnan Geography Environment Research*, 1995, 7 (1): 58-74 (in Chinese)
- [2] Shimizu K, Masumoto T, Pham T H. Factors impacting yields in rain-fed paddies of the lower Mekong River basin [J]. *Paddy and Water Environment*, 2006, 4 (3): 145-151
- [3] Rees H G, Collins D N. Regional differences in response of flow in glacier-fed Himalayan rivers to climatic warming [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20 (10): 2157-2169
- [4] Hoang L P, Lauri H, Kumm M, *et al.* Mekong River flow and hydrological extremes under climate change [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20 (7): 3027-3041
- [5] Kiem A S, Ishidaira H, Hapuarachchi H P, *et al.* Future hydroclimatology of the Mekong River basin simulated using the high-resolution Japan Meteorological Agency (JMA) AGCM [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22 (9): 1382-1394
- [6] Thilakarathne M, Sridhar V. Characterization of future drought conditions in the Lower Mekong River basin [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2017, 17: 47-58
- [7] 汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展 [J]. *科学通报*, 2019, 64: 2807-2821. Tang Q H, Lan C, Sun F G, *et al.* Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64: 2807-2821
- [8] 汤秋鸿, 刘星才, 周园园, 等. “亚洲水塔”变化对下游水资源的连锁效应 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34 (11): 1306-1312. Tang Q H, Liu X C, Zhou Y Y, *et al.* Cascading impacts of Asian water tower change on downstream water systems [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34 (11): 1306-1312 (in Chinese)
- [9] Meyfroidt L P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108 (9): 3465-3472
- [10] Huntington T G. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 319 (1-4): 0-95
- [11] Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, *et al.* Increasing risk of great floods in a changing climate [J]. *Nature*, 2002, 415 (6871): 514-517
- [12] 汤秋鸿. 全球变化水文学: 陆地水循环与全球变化 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50 (3): 436-438. Tang Q H. Global change hydrology: terrestrial water cycle and global change [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2020, 50 (3): 436-438 (in Chinese)
- [13] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 3 (1): 52-58
- [14] 王书霞, 张利平, 李意, 等. 气候变化情景下澜沧江流域极端洪水事件研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15 (1): 27-36. Wang S X, Zhang L P, Li Y, *et al.* Extreme flood in the Lancang River basin under climate change [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15 (1): 27-36 (in Chinese)
- [15] 刘波, 肖子牛. 澜沧江流域 1951—2008 年气候变化和 2010—2099 年不同情景下模式预估结果分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6 (3): 170-174. Liu B, Xiao Z N. Observed (1951—2008) and projected (2010—2099) climate change in the Lancang River basin [J]. *Climate Change Research*, 2010, 6 (3): 170-174 (in Chinese)
- [16] Long D, Scanlon B R, Longuevergne L, *et al.* GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40 (13): 3395-3401
- [17] Munia H, Guillaume J H A, Mirumachi N, *et al.* Water stress in global transboundary river basins: significance of upstream water use on downstream stress [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11 (1): 014002
- [18] 何大明, 张家楨. 澜沧江—湄公河流域持续发展与水资源整体多目标利用研究 [J]. *中国科学基金*, 1996 (3): 200-206. He D M, Zhang J Z. Research on the sustainable development of the Lancang-Mekong River basin and the multi-objective utilization of water resources [J]. *China Science Foundation*, 1996 (3): 200-206 (in Chinese)
- [19] Pech S, Sunada K. Population growth and natural-resources pressures in the Mekong River basin [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2008, 37 (3): 219-224
- [20] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 2012, 491 (7424): 435-438
- [21] Sheffield J, Goteti G, Wood E F. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19 (13): 3088-3111
- [22] MRC (Mekong River Commission). Hydrometeorological database of the Mekong River commission [R]. Vientiane, Lao PDR: Mekong River Commission, 2011
- [23] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [J]. *American Meteorological Society*, 1993: 179-183
- [24] Wu H, Svoboda M D, Hayes M J, *et al.* Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons [J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 27 (1): 65-79
- [25] Wilks D S. Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93 (3): 153-169
- [26] Nelsen R B. An introduction to Copulas (Springer series in statistics) [M]. New York, USA: Springer, 2006
- [27] Huard D, Evin G, Favre A C. Bayesian copula selection [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2006, 51 (2): 809-822
- [28] Qu X, Huang G, Zhou W. Consistent responses of East Asian summer mean rainfall to global warming in CMIP5 simulations [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 117 (1-2): 123-131
- [29] Thompson J R, Green A J, Kingston D G. Potential evapotranspiration-related uncertainty in climate change impacts on river flow: an assessment for the Mekong River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 259-279
- [30] Frieler K, Lange S, Piontek F, *et al.* Assessing the impacts of 1.5 °C global warming: simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP2b) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 12: 4321-4345
- [31] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. *Journal of Hydrology*, 1998
- [32] 高峰, 蔡万园, 张玉虎, 等. 5 种 CMIP5 模拟降水数据在中国的适用性评估 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24 (6): Gao F, Cai W Y,

- Zhang Y H, *et al.* Evaluation on the applicability of 5 kinds of CMIP5 simulated precipitation data in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24 (6) (in Chinese)
- [33] 陈晓晨, 徐影, 许崇海, 等. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估 [J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10 (3): 217-225.
- Chen X C, Xu Y, Xu C H, *et al.* Assessment of precipitation simulations in China by CMIP5 multi-models [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10 (3): 217-225 (in Chinese)
- [34] IPCC. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1132
- [35] IFAD (International Fund for Agricultural Development), Cambodia Environmental and Climate Change Assessment. Prepared for IFAD's country strategic opportunities programmer 2013–2018 [R]. Rome, Italy: IFAD, 2018
- [36] Smajgl A, Toan T Q, Nhan D K, *et al.* Responding to rising sea levels in the Mekong Delta [J]. *Nature Climate Change*, 2015
- [37] Valbo-Jørgensen J, Coates D, Hurtle K. Chapter 8: fish diversity in the Mekong River basin [J]. *The Mekong*, 2009: 161-196
- [38] Lu X X, Li S, Kumm M, *et al.* Observed changes in the water flow at Chiang Saen in the lower Mekong: impacts of Chinese dams? [J]. *Quaternary International*, 2014, 336: 145-157
- [39] Cronin R. Mekong dams and the perils of peace [J]. *Survival*, 2009, 51 (6): 147-160

Impact of climate change on water resource cooperation between the upstream and downstream of the Lancang-Mekong River basin

YUN Xiao-Bo^{1,2}, TANG Qiu-Hong^{1,2}, XU Xi-Meng¹, ZHOU Yuan-Yuan¹,
LIU Xing-Cai¹, WANG Jie^{1,2}, SUN Si-Ao³

1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100101, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

Abstract: The Lancang-Mekong River basin flows southward across 25 degree of latitude with large climatic variations between the upstream and downstream. The concurrent drought and wet events will affect the water resources cooperation potential between upstream and downstream countries. Based on the Princeton precipitation dataset and global climate model data, the standardized precipitation index and Copula function were used to investigate the impacts of climate change on concurrent drought, concurrent wet and concurrence of different dry and wet conditions during the historical period (1982–2016) and future period (2021–2090) in the upstream and downstream of the Lancang-Mekong River basin. The results showed that compared with the historical period, the Lancang-Mekong River basin shows the similar change trend under the scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 in the future period: the probability of concurrent wet will gradually increase (maximum 199.5%), and the probability of concurrent drought will gradually decrease (minimum –35.9%), and the probability of uneven water resource situation will greatly reduce in all periods (–53.1% – –42.5%). The results indicate that water resources cooperation between the upstream and the downstream of the Lancang-Mekong River basin may be adversely affected by climate change, and there is an urgent need for adaptation strategy to address water resources cooperation in the Lancang-Mekong River basin.

Keywords: Transboundary river; Climate change; Lancang-Mekong River basin (LMRB); Copula function