

张媛婕, 宋铁燕, 陈莹, 等. 气候变化下山美水库流域旱涝急转时空演变规律[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 55-67. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.005

ZHANG Yuanjie, SONG Tieyan, CHEN Ying, et al. The temporal and spatial evolution of drought-flood abrupt alternation in the Shanmei Reservoir Basin under climate change [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 55-67. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.005

# 气候变化下山美水库流域旱涝急转时空演变规律

张媛婕<sup>1</sup>, 宋铁燕<sup>1</sup>, 陈莹<sup>1,2,3</sup>, 陈兴伟<sup>1,2,3</sup>, 高路<sup>1,2,3</sup>, 刘梅冰<sup>1,2,3</sup>, 邓海军<sup>1,2,3</sup>

(1. 福建师范大学地理研究所, 福建福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建福州 350007; 3. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福建福州 350007)

**摘要:**【目的】山美水库流域属于亚热带季风气候, 受热带气旋、副热带高压等天气系统及复杂地形的影响, 旱涝急转(DFAA)事件频发, 严重威胁流域水安全。准确识别和预测全球变化下山美水库流域旱涝急转时空演变规律, 对于区域防灾减灾具有重要意义。【方法】以山美水库流域为研究对象, 采用以12 d为前期降水影响日数的标准化降水指数(SPI-12 d), 探究研究区1980—2018年旱涝急转的时空变化特征, 并结合CMIP6多模式集合平均, 在SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下预测21世纪流域旱涝急转的时空演变规律。【结果】结果显示:(1)研究区旱转涝(DTF)和涝转旱(FTD)的频次呈先显著增加后缓慢减少趋势, DTF强度显著增加, FTD强度显著下降。DTF主要集中在1月、7月及9月至12月, FTD则集中在8月至11月。(2)DTF频次和强度的高值区位于南部; FTD频次和强度的高值区分别位于东北部和东南部。(3)未来DTF频次和强度均呈增加趋势, 且在SSP5-8.5情景下增幅更大; FTD在SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下频次分别呈不显著的下降和上升趋势, 强度均呈下降趋势。DTF在2月和12月增加最显著, 而FTD则在1月、8月和10月增加最显著。(4)未来研究区中南部发生DTF和FTD的频次和强度均呈增加趋势, 发生旱涝急转的风险增加。【结论】山美水库DFAA事件的影响整体呈增加趋势, 研究区中南部是高风险区; 相对于FTD, DTF的风险更大。研究结果可为DFAA的监测与应对提供科学基础。

**关键词:** 旱涝急转; 气候变化; 标准化降水指数; 山美水库流域; 水安全; 时空变化; 干旱

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV125

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0055-13



## The temporal and spatial evolution of drought-flood abrupt alternation in the Shanmei Reservoir Basin under climate change

ZHANG Yuanjie<sup>1</sup>, SONG Tieyan<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>1,2,3</sup>, CHEN Xingwei<sup>1,2,3</sup>, GAO Lu<sup>1,2,3</sup>, LIU Meibing<sup>1,2,3</sup>, DENG Haijun<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China; 2. State Key Laboratory of Mountain

收稿日期: 2024-12-13; 修回日期: 2025-02-26; 录用日期: 2025-02-27; 网络出版日期: 2025-03-17

基金项目: 福建省科技厅社会发展引导性项目(2022Y0007); 福建省科技厅杰出青年基金项目(2022J06018); 国家自然科学基金项目(U22A20554)

作者简介: 张媛婕(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱涝急转研究。E-mail: zyj9966888@163.com

通信作者: 陈莹(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事变化环境下水文过程及水文模拟的科学研究。E-mail: chenying\_nju@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Ecological Subtropical Humid Area, Fuzhou 350007, Fujian, China; 3. Fujian Provincial Engineering Research Center for Land Disaster Monitoring and Evaluation, Fuzhou 350007, Fujian, China)

**Abstract:** [Objective] The Shanmei Reservoir Basin, located in a subtropical monsoon climate zone, is frequently affected by tropical cyclones, subtropical high-pressure systems, and complex topography, leading to frequent drought-flood abrupt alternation (DFAA) events that severely threaten regional water security. Accurately identifying and predicting the spatiotemporal evolution of DFAA under global change is crucial for regional disaster prevention and mitigation. [Methods] Shanmei Reservoir Basin was taken as study area. Using the Standardized Precipitation Index with a 12-day antecedent precipitation period (*SPI*-12 d), the spatiotemporal characteristics of DFAA from 1980 to 2018 were analyzed. Additionally, CMIP6 multi-model ensemble projections under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios were employed to predict the spatiotemporal evolution of DFAA in the 21st century. [Results] Key findings include: (1) The frequency of drought-to-flood (DTF) and flood-to-drought (FTD) events initially increased significantly and then decreased gradually. DTF intensity rose significantly, while FTD intensity declined. DTF events were concentrated in January, July, and September-December, whereas FTD events mainly occurred from August to November. (2) High-frequency and high-intensity DTF areas were located in the southern watershed, while high-frequency FTD areas were in the northeast and high-intensity FTD areas in the southeast. (3) Future projections indicate increasing DTF frequency and intensity, with greater increases under SSP5-8.5. FTD frequency showed insignificant declines under SSP2-4.5 and slight rises under SSP5-8.5, while FTD intensity decreased. DTF increases were most pronounced in February and December, whereas FTD increases were notable in January, August, and October. (4) The central and southern watershed will face higher risks, with both DTF and FTD frequency and intensity projected to increase. [Conclusion] DFAA impacts in the Shanmei Reservoir Basin are intensifying overall, with the central-southern region as a high-risk zone. DTF poses a greater threat than FTD. These findings provide a scientific basis for DFAA monitoring and response.

**Keywords:** drought-flood abrupt alternation (DFAA); climate change; standardized precipitation index (*SPI*); Shanmei Reservoir Basin; water safety; spatiotemporal changes; drought

## 0 引言

在全球气候变化的背景下<sup>[1]</sup>, 大气环流异常和水汽输送的改变, 加上人类活动引发的下垫面变化, 进一步加剧了降水时空分布的不均衡, 导致极端天气事件发生频次和强度增加。近年来, 旱涝急转 (Drought-Flood Abrupt Alternation, DFAA) 作为一种突出的极端天气事件, 逐渐受到关注<sup>[2]</sup>。DFAA 是指在较短时间内, 干旱与洪涝快速交替的现象, 包括干旱转洪涝 (Drought to Flood, DTF) 和洪涝转干旱 (Flood to Drought, FTD)。DFAA 作为气候变化背景下衍生的复合型极端事件, 其灾害链式效应较之单一干旱或洪涝具有显著的破坏放大特征, 所带来的复合性灾害也更加严重, 不仅对生态系统产生影响, 还对农业、基础设施和粮食安全构成威胁。深入了解 DFAA 有助于提升对未来极端天气风险的预测能力, 为区域防灾减灾和农业生产提供科学依据。

目前, DFAA 研究主要集中在事件识别、时空演变规律及驱动因素分析等方面, 其中 DFAA 的识别是最基础、最关键的环节。根据识别方法的不同, 大致可以分为两大类。第一类是通过建立 DFAA 指数结合

游程理论提取事件, 最早的研究开始于吴志伟<sup>[3]</sup>对长江中下游地区夏季 DFAA 现象的研究, 定义了长周期旱涝急转指数 (*LDFAI*) 和短周期旱涝急转指数 (*SDFAI*), 并应用于华南地区<sup>[4]</sup>、西南地区<sup>[5]</sup>以及黄河流域、海河流域和淮河流域<sup>[6]</sup>等地区。闪丽洁等<sup>[7]</sup>在 *LDFAI* 和 *SDFAI* 指数的基础上, 构建了日尺度的 *DWAAI* 指数, 并识别长江中下游 DFAA 事件。第二类是基于常见的干湿指数, 如 Standardized Precipitation Index (*SPI*)、Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (*SPEI*)、Soil Water Assessment Project (*SWAP*)、Standardized Runoff Index (*SRI*) 等<sup>[8-11]</sup>, 这些指数通常与游程理论相结合, 或依赖于预定义的转换规则来识别事件。SON 等<sup>[12]</sup>基于日尺度的 *SPI* 分析了韩国 113 个中尺度流域 DFAA 事件的特征。BAI 等<sup>[13]</sup>研究表明相较于单独使用 *SPI*, 结合 *SWAP* 与 *SPEI* 能够显著提升旱涝事件的预测能力。张云帆等<sup>[14]</sup>基于 *SRI* 探究长江中游典型流域 DFAA 的演变规律及其驱动因子。ZHAO 等<sup>[15]</sup>利用 *SWAP* 探讨了汉江流域 DFAA 的演变特征, 结果表明 *SWAP* 指数能够可靠地判断研究区 DFAA 事件的发生、持续时间和强度, 可以有效地监测 DFAA 事件。相比第一

类方法, 第二类识别手段更简单且能准确地识别出研究区的旱涝情况, 筛选的急转事件具有明确物理意义并可提取事件特性。然而, 不同的干湿指数存在局限性, 应用不同的干湿指数可能会导致识别出的 DFAA 事件存在差异, 在 DFAA 识别之前验证这些指数的性能至关重要<sup>[16]</sup>。目前鲜有探究不同干湿指数识别 DFAA 事件适用性的成果。FU 等<sup>[17]</sup>和 ZHANG 等<sup>[18]</sup>分别基于 *SPI*、*SPEI* 和 *SWAP* 3 种干湿指数, 评估了其在珠江流域与东南沿海地区 DFAA 事件识别的有效性, 结果表明 *SWAP* 指数和 *SPI* 指数分别在珠江流域和东南沿海地区具有识别结果有效性高、对识别结果归纳准确度最优且归纳能力强的优势。

我国 DFAA 发生频次和强度整体呈上升趋势<sup>[19]</sup>, 且 DTF 和 FTD 的时空演变趋势不一致<sup>[20-22]</sup>。因此开展区域尺度 DFAA 的时空演变规律研究, 对区域的防灾减灾具有重要的理论与实践意义。然而, 已有研究多集中于长江流域、淮河流域、珠江流域和西南地区<sup>[23-24]</sup>, 对东南沿海地区的关注相对较少。受热带气旋、副热带高压等天气系统及复杂地形的影响, 东部沿海地区的干旱和极端降水事件呈现增多、增强趋势, 是 DFAA 发生的高风险区<sup>[25]</sup>, 且未来该地区将会经历更加频繁、更严重的 DFAA<sup>[26-27]</sup>。当前, 有关该区域旱涝灾害的研究多是从单一的旱或涝角度入手进行时空分布以及影响因素的分析<sup>[18]</sup>, 关于 DFAA 的研究相对较少。综上, 本文选择东南沿海的典型流域山美水库流域为研究区域, 基于以 12 d 为前期降水影响日数的 *SPI*-12 d, 从日尺度识别 DFAA 事件, 深入分析了研究区 1980—2018 年以及未来 2030—2100 年 DFAA 频次、强度的年际、年内变化和空间分布特征, 研究结果将对该地区科学应对旱涝灾害、制定适应与减缓措施提供理论参考。

## 1 研究区域概况

山美水库流域位于泉州市西北部, 涵盖南安、永春、德化等市县, 流域面积为 1 023 km<sup>2</sup>。流域为亚热带季风气候, 年降水量约为 1 600 mm, 年均气温约为 20 ℃, 多年平均径流量为 14 亿 m<sup>3</sup>。随着周边经济的不断发展, 山美水库的供水已成为晋江下游经济发展的重要支撑, 发挥着调节流域水资源分布、保障农业灌溉和城市用水的关键作用。

## 2 研究数据和研究方法

### 2.1 研究数据

本研究获取了山美水库流域 15 个降水站点

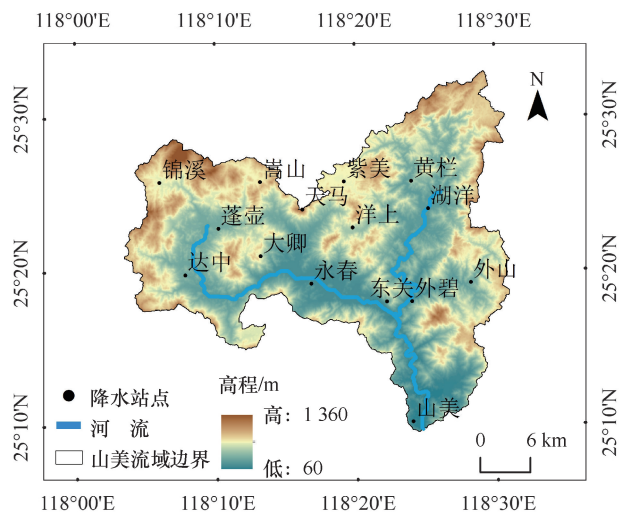


图 1 研究区范围及水文站点分布

Fig. 1 Distribution map of the study area and hydrological stations

1980—2018 年的日降水观测数据, 并选用未来 CMIP6 的 10 个全球气候模式(见表 1)在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景(2030—2100 年)和历史(1982—2014 年)模拟的日降水数据(<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>)。所有数据均使用双线性插值法重采样为 0.25°×0.25°的空间分辨率, 并基于分位数映射(Quantile Mapping, QM)技术分别对 10 个 GCMs 的两个排放情景进行了统计降尺度。为了减少不同全球气候模型的不确定性, 本文采用多模式集合平均方法, 通过对所有模式进行算术平均后, 得到研究区未来 2030—2100 年的降水序列<sup>[28]</sup>。

表 1 10 个 CMIP6 全球气候模式基本信息

序号	模式名称	所属机构(国家)	空间分辨率
1	CanESM5	CCCma (Canada)	2.81°
2	EC-Earth3	EC-Earth-Consortium (EU)	40 km
3	EC-Earth3-Veg	EC-Earth-Consortium (EU)	40 km
4	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth-Consortium (EU)	80 km
5	IPSL-CM6A-LR	IPSL (France)	2.5°×1.3°
6	MIROC6	CCSR (Japan)	1.4°
7	MRI-ESM2-0	MRI (Japan)	1.125°
8	NorESM2-LM	NCC (Norway)	1.9°×2.5°
9	NorESM2-MM	NCC (Norway)	1.25°
10	TaiESM1	NSPO/CAS (Taiwan)	1.25°

### 2.2 旱涝急转事件的识别方法

选取合适的前期降水影响日数作为旱涝识别指数的前期降水影响因子, 有助于避免短期干旱与强涝交替出现, 从而提高 DFAA 事件识别的精确度。ZHANG 等<sup>[18]</sup>探讨了 *SPI*、*SPEI* 和 *SWAP* 等在福建省

DFAA 识别中的适用性, 结果表明, 当前期降水影响日数设定为 12 d 时, 3 种指数的识别效果均达到最优, 其中基于 *SPI* 的识别方法在有效性、准确性和归纳能力等方面表现最佳。因此, 本研究选择了以 12 d 为前期降水影响日数的标准化降水指数 (*SPI*-12 d), 结合游程理论, 识别了 1980—2018 年和未来 2030—2100 年山美水库流域的 DFAA 事件。

*SPI* 由 MCKEE 于 1993 年提出, 通过将降水量数据转换为标准化值, *SPI* 能够有效地消除季节性变化的影响, 从而在不同地区和不同时间尺度上实现降水异常的对比和分析。*SPI*-12 d 指基于前 12 d 降水数据计算的标准化降水指数, 即每一天的 *SPI* 值都基于前 12 d 的降水数据计算得到, 表 2 为干湿等级的分类标准。

表 2 基于 *SPI* 值的干湿等级分类标准

Table 2 Classification criteria for dry and wet grades based on *SPI* values

类型	<i>SPI</i> 值
极端洪涝	$\geq 2.0$
严重洪涝	$1.5 \leq SPI < 2.0$
中等洪涝	$1.0 \leq SPI < 1.5$
轻微洪涝	$0.5 \leq SPI < 1.0$
正常	$-0.5 < SPI < 0.5$
轻微干旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
中等干旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
严重干旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
极端干旱	$\leq -2.0$

以洪涝事件为例, 当 *SPI*-12 d 值达到 0.5 且维持 10 d 以上时, 定义为洪涝事件; 当 *SPI*-12 d 值连续 7 d 低于 0.5 时, 视为本次洪涝事件结束。洪涝的持续时间是指从洪涝事件开始到结束的这段时间。类似地, 干旱事件的开始和结束标准为 *SPI*-12 d 值连续达到或低于 -0.5。由于干旱事件与洪涝事件的判定标准类似, 这里不再赘述。如果干旱事件与洪涝事件连续发生, 且两者之间的间隔时间小于 8 d, 则定义为旱涝急转事件。

为进一步刻画旱涝急转特征, 本文统计了旱涝急转事件的发生频次和强度, 具体如下。

(1) 事件发生频次  $N$ 。时段  $T$  内发生旱涝急转事件的次数。

(2) 事件强度  $K$ 。DFAA 的强度通过下式计算

$$K = \frac{\left| \sum_{D}^{D} index_{after} - \sum_{D}^{D} index_{before} \right|}{D} \quad (1)$$

式中,  $\sum_{D}^{D} index_{after}$  为急转点后 *SPI*-12 d 指数的累加值;

$\sum_{D}^{D} index_{before}$  为急转点前 *SPI*-12 d 指数的累加值;  $D$  为从急转点到旱涝急转事件结束之间的时间间隔。

在此基础上, 将  $1.0 \leq K \leq 2.0$  定义为轻度事件, 将  $2.0 < K < 3.0$  定义为中度事件, 将  $3.0 \leq K$  定义为重度事件<sup>[29]</sup>。

### 3 结果分析

#### 3.1 基于观测数据的旱涝急转特征分析

##### 3.1.1 年际变化特征

1980—2018 年山美水库流域 DFAA 发生频次的变化速率在 0.023~0.374 次/10 a 之间波动[见图 2(a)]。2000 年是一个转折点, 1980—2000 年 DFAA 频次呈显著的上升趋势, 变化速率为 0.036 4 次/a; 2001—2018 年则呈现不显著的下降趋势, 变化速率为 -0.032 2 次/a。从事件的类型来看, 1980—2000 年 DTF 的发生频次显著增加, 变化速率为 0.016 7 次/a ( $p < 0.05$ ); 2000 年之后, DTF 呈现微弱的下降趋势, 变化速率为 0.008 8 次/a, 未达到显著性水平。FTD 在 1980—2000 年间呈显著的上升趋势, 变化速率为 0.019 6 次/a; 2001—2018 年间则呈不显著的下降趋势, 变化速率为 -0.023 4 次/a。

就强度而言, 1980—2018 年研究区 DFAA 的强度整体呈现上升趋势[见图 2(b)], 平均强度集中在 1.976~3.037 之间。进一步分析表明, DTF 的强度显著增加, 变化速率为 0.014 0/a ( $p < 0.05$ ), 而 FTD 的强度则显著下降, 变化速率为 -0.012 3/a ( $p < 0.05$ )。此外, DTF 的轻度、中度和重度事件分别占 31.43%、60.00% 和 8.57%; 而 FTD 的轻度、中度和重度事件分别占 5.41%、83.78% 和 10.81%, 表明研究区 DFAA 总体以中度事件为主。

##### 3.1.2 年内分布特征

图 3 展示了 1980—2018 年研究区 DFAA 发生频次的年内变化。DTF 在 1 月、7 月、9 月—12 月的发生频次显著高于其他月份[见图 3(a)], 占全年发生频次的 61.80%, 其中重度 DTF 在 9 月的发生频次最高, 占当月总频次的 31.25%。FTD 主要发生在 8—11 月[见图 3(b)], 占全年发生频次的 64.04%, 且主要为中度和重度事件, 重度 FTD 在 9 月的发生频次最高, 占当月总频次的 35.56%。

##### 3.1.3 空间演变特征

1980—2018 年, 研究区 DFAA 的发生频次为 8.2~17 次/10 a, 其中 FTD 的发生频次(5.2~10 次/10 a)高于 DTF 的发生频次(3~7 次/10 a)(见图 4)。DTF 的

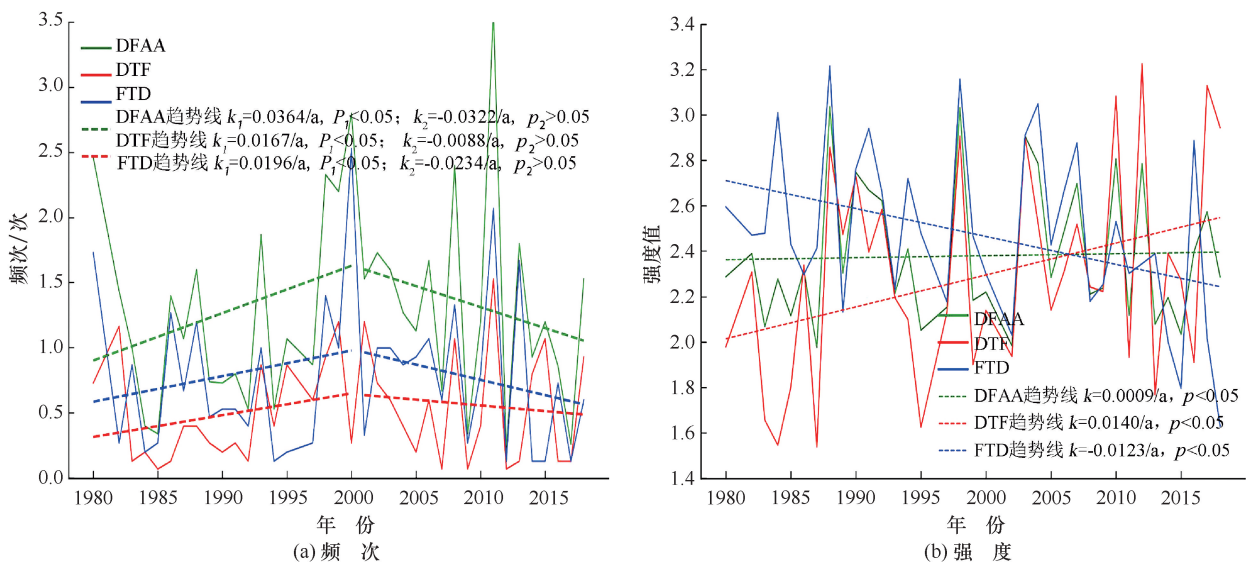


图2 1980—2018年山美水库流域旱涝急转事件发生频次和强度的年际变化

Fig. 2 Interannual variations in the frequency and intensity of drought-flood abrupt alternation events in the Shanmei Reservoir Basin from 1980 to 2018

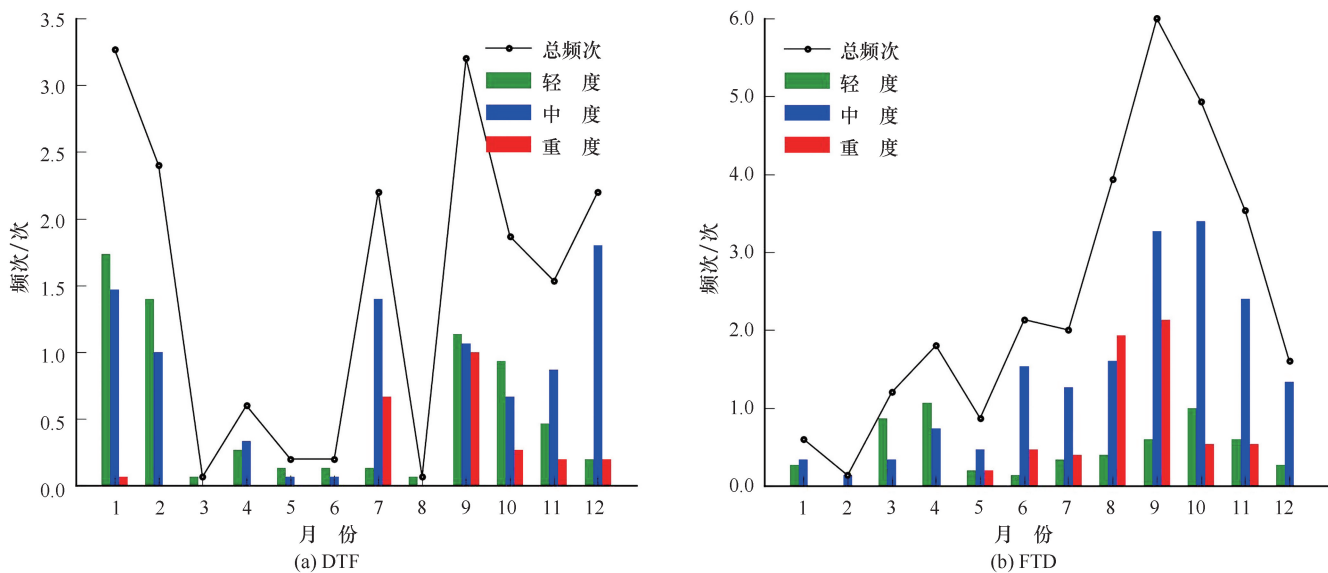


图3 1980—2018年山美水库流域旱涝急转事件发生频次的年内分布

Fig. 3 Intra-annual distribution of the frequency of drought-flood abrupt alternation transition events in the Shanmei Reservoir Basin from 1980 to 2018

高发区主要集中在研究区的西部、南部和东北部, 发生频次为 4.87~6.67 次/10 a, 且以轻度和中度事件为主, 占比为 84.35%。而 FTD 的高发区则主要分布在流域的中部和东北部, 发生频次为 7.25~9.25 次/10 a, 以中度事件为主, 占比为 59.16%。DTF 与 FTD 的强度在空间上分布特征基本一致(见图 5), 其中高强度 DFAA 集中分布于锦溪、达中、永春、山美、外山等站点, 呈周边分散状分布; 低强度的 DFAA 则主要分布于研究区的北部和中部。

### 3.2 未来流域旱涝急转特征分析

#### 3.2.1 年际变化特征

在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下, 研究区 2030—2100 年 DTF 的发生频次呈显著上升趋势[见图 6(a)], 且 SSP5-8.5 情景下的增长速度(0.003 7 次/10 a)高于 SSP2-4.5 情景(0.002 5 次/10 a)。与频次的变化特征相类似, DTF 强度在 SSP5-8.5 和 SSP2-4.5 情景下均呈增加趋势, 且在 SSP5-8.5 情景下的增长速度(0.008 0/10 a)通过显著性检验[见图 6(b)]。

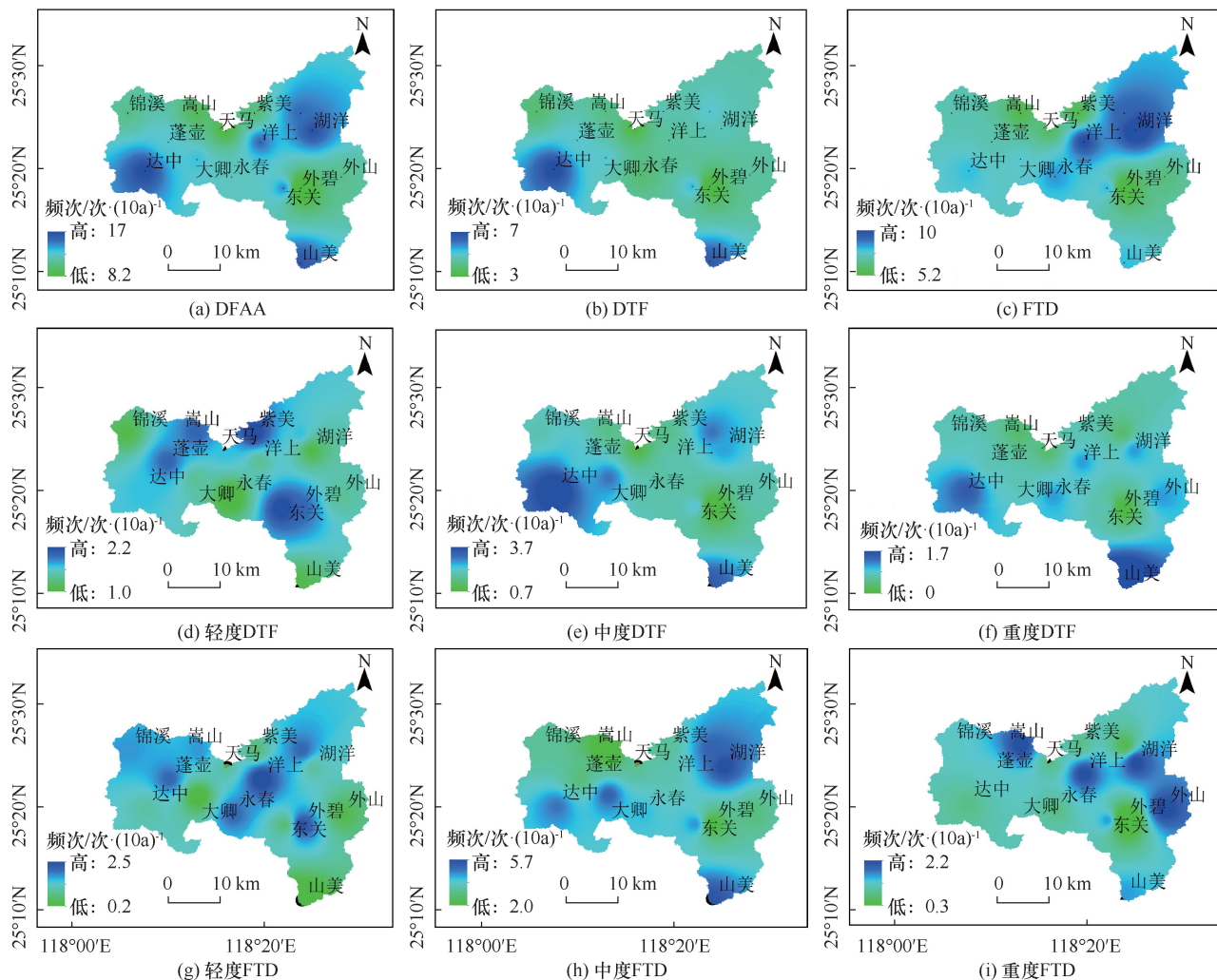


图4 1980—2018年山美水库流域旱涝急转事件发生频次的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the frequency of drought-flood abrupt alternation events in the Shanmei Reservoir Basin from 1980 to 2018

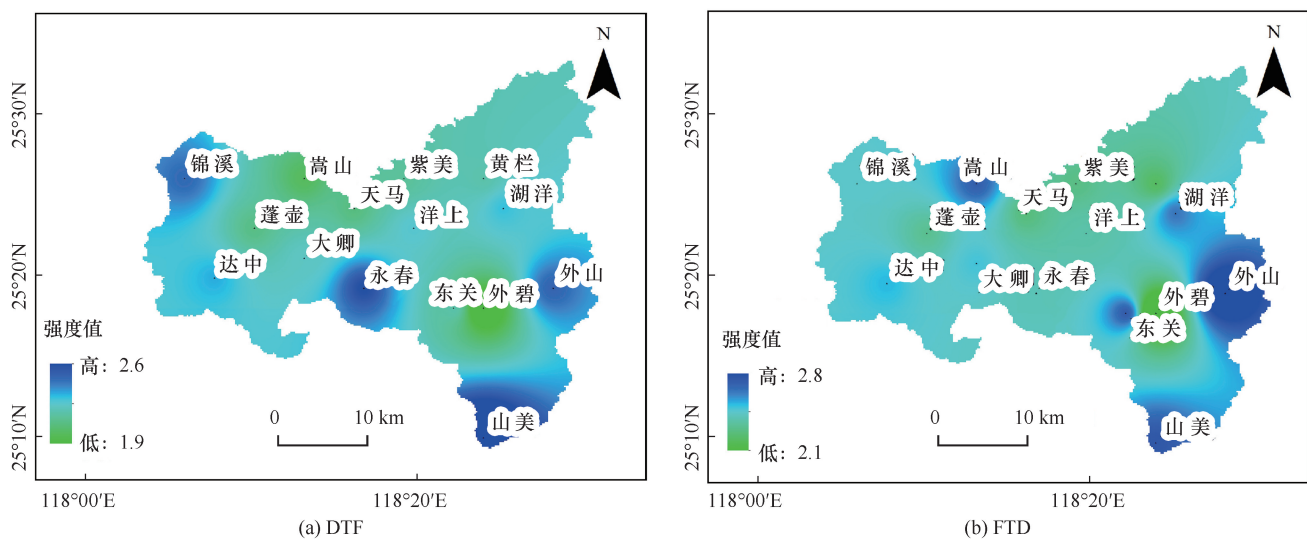


图5 1980—2018年山美水库流域旱涝急转事件强度的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the intensity of drought-flood abrupt alternation events in the Shanmei Reservoir Basin from 1980 to 2018

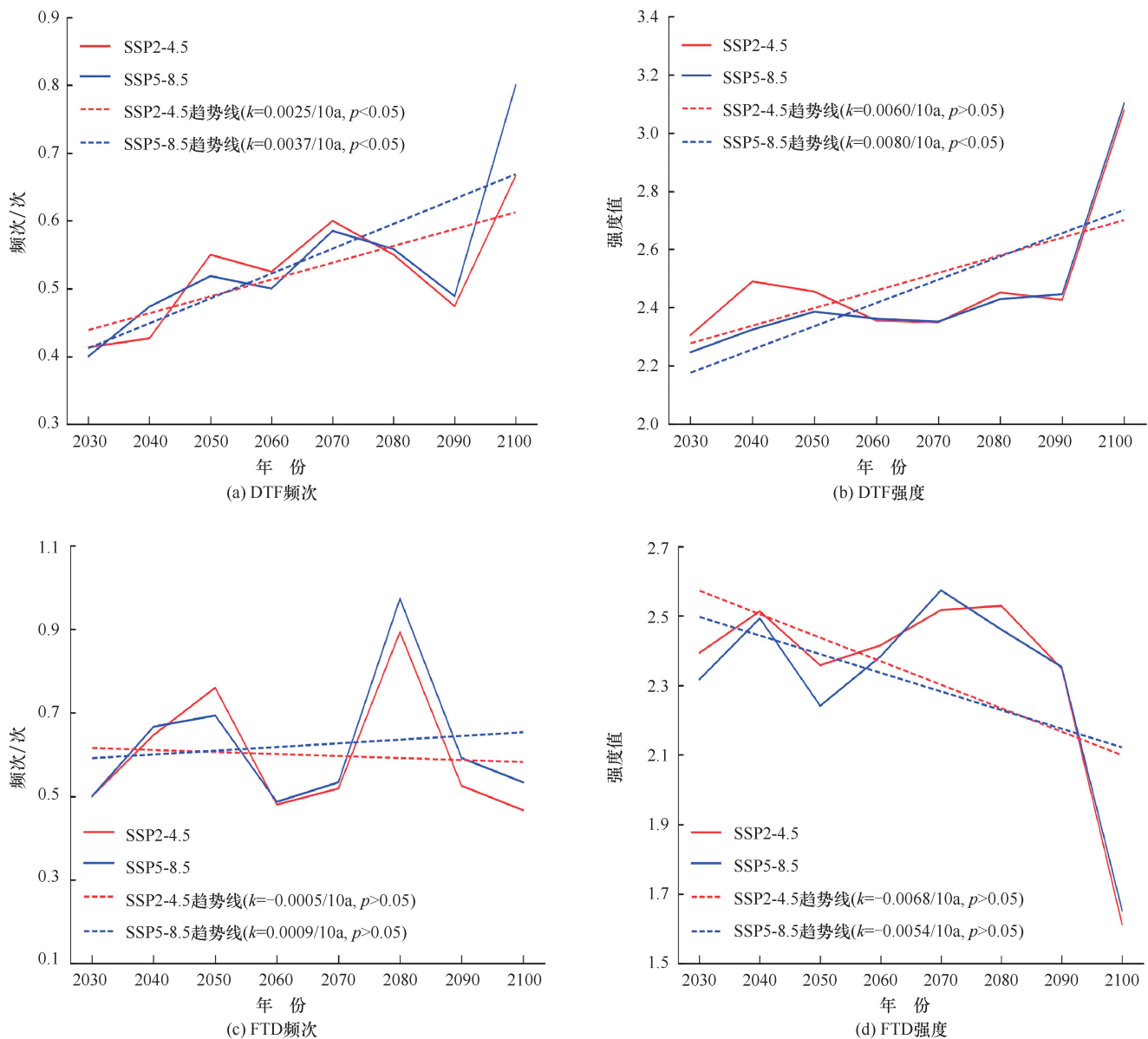


图6 2030—2100年山美水库流域旱涝急转事件频次和强度的年际变化趋势

Fig. 6 Interannual variation trend of the frequency and intensity of drought-flood abrupt alternation events in the Shanmie Reservoir Basin from 2030 to 2100

与DTF不同,FTD的发生频次在SSP2-4.5情景下呈下降趋势( $-0.0005$ 次/10a),而在SSP5-8.5情景下呈上升趋势( $0.0009$ 次/10a),两种情景的变化趋势均未达到显著性水平[见图6(c)].未来两种情景下FTD强度均表现出不显著的下降趋势[见图6(d)],且在SSP2-4.5情景下的下降速度( $-0.0068$ 次/10a)高于SSP5-8.5情景( $-0.0054$ 次/10a)。

### 3.2.2 年内变化特征

对比基准期,未来山美水库流域DTF事件在各月份的发生频次主要呈增加趋势,在2月和12月最为显著(见图7)。以SSP5-8.5情景为例,2月份DTF事件增加了4.1次,且主要由轻度和中度事件的增加

所导致,轻度和中度事件分别增加了1.4次和2.6次;12月DTF事件增加了3.3次,其中重度事件增加了2.7次。与DTF的变化相类似,未来FTD事件在各月份的发生频次主要呈增加趋势,在1月、8月和10月的增加最显著,且在SSP5-8.5情景下尤为突出[见图7(d)]。

### 3.2.3 空间演变特征

与基准期相比,研究区未来DTF的频次表现出显著的空间分布差异,在西部和中东部地区呈增加趋势,而中部和北部地区则呈减少趋势,且SSP5-8.5情景下的变幅( $-31.28\% \sim 49.76\%$ )比SSP2-4.5情景( $-31.29\% \sim 34.78\%$ )更显著(见图8)。相比DTF事

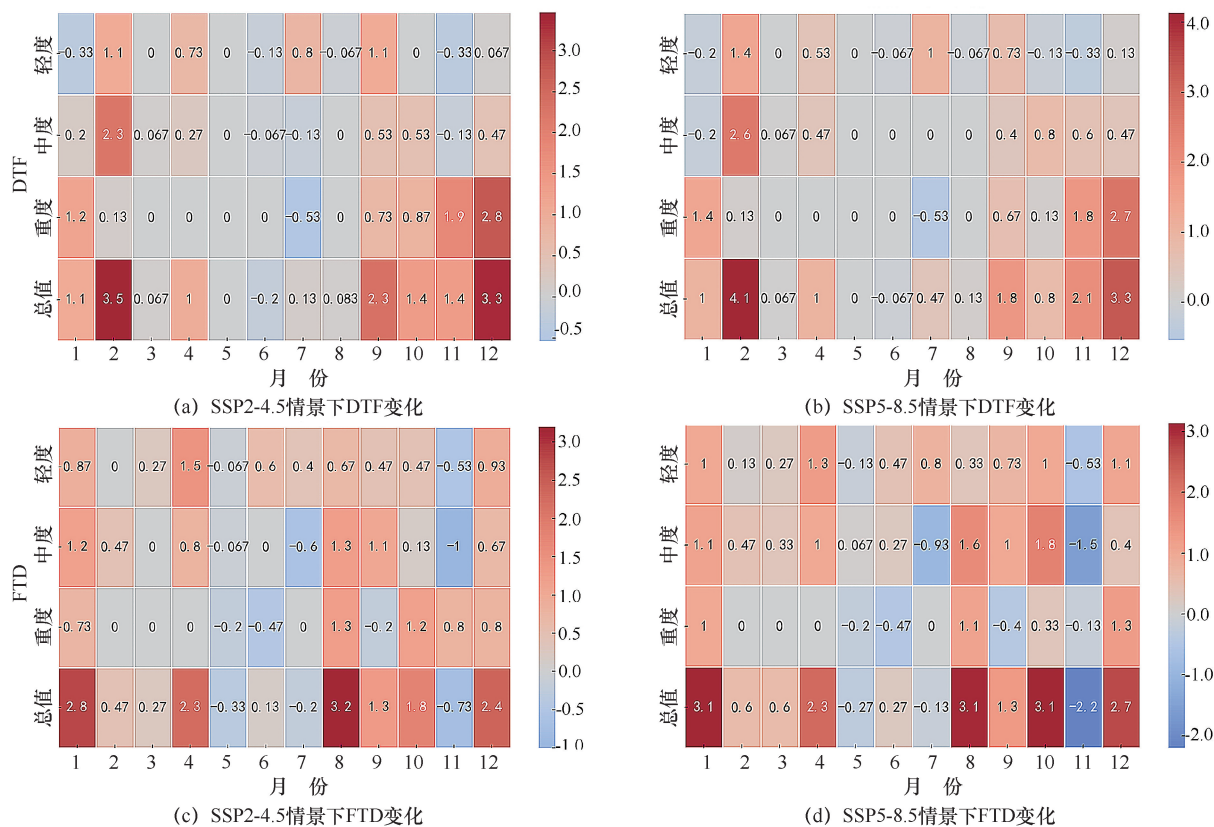


图7 2030—2100年山美水库流域旱涝急转事件发生频次相较历史时期的变化(单位:次)

Fig. 7 Changes in the frequency of drought-flood abrupt alternation in the Shanmei Reservoir Basin from 2030 to 2100 compared with historical periods(Unit: time)

件,未来FTD频次的变化幅度较小。在SSP2-4.5情景下,FTD频次变化为 $-30.5\% \sim 7.3\%$ ,在西南和东南部主要表现为增加,其他区域则为减少。在SSP5-8.5情景下,FTD整体呈减少趋势,且北部的减少幅度大于南部。

就强度变化而言,在SSP2-4.5情景下研究区DTF的强度变化了 $-4.87\% \sim 28.03\%$ [见图9(a)],其中在东南和东北部地区呈增加趋势( $9.01\% \sim 28.03\%$ ),在中部和西部则以减少或轻微增加为主( $-4.87\% \sim 3.47\%$ )。在SSP5-8.5情景下,研究区DTF的强度变化了 $-3.33\% \sim 24.84\%$ ,且空间变化特征与SSP2-4.5相似。相比之下,未来FTD强度的下降趋势更显著。在SSP2-4.5情景下,FTD强度变化了 $-14.62\% \sim 18.59\%$ ,仅在东南部和北部呈增加趋势,而其他区域普遍减少。在SSP5-8.5情景下,FTD强度变化了 $-11.24\% \sim 19.69\%$ ,且空间变化特征与SSP2-4.5相似。

#### 4 结果讨论

山美水库流域位于福建省东南沿海,是典型的季风气候区,近年来DFAA发生频次和强度均发生了变

化。本研究表明,1980—2018年山美水库流域DFAA的发生频次呈先增加后减少的趋势,而强度整体上呈现上升趋势。其中DTF发生频次在1980—2000年上升趋势达到显著水平,其强度也呈显著性增加趋势。这一结果与孙浩岩等<sup>[25]</sup>、BI等<sup>[21]</sup>、WANG等<sup>[26]</sup>结果具有相对一致性。

在全球变暖的背景下,诸多学者研究发现DFAA受到气象因素的直接影<sup>[32-41]</sup>,其中降水模式的变化发挥了重要作用,特别是强降雨事件强度和频率的增加,导致极端涝事件的发生率更高<sup>[30]</sup>。同时,全球变暖还导致蒸发速率增加,这可能延长干旱事件的持续时间,而干旱与高温的重叠会加剧干旱事件<sup>[21]</sup>。相关研究表明,中国东部沿海地区是旱涝并发的高风险区,其沿海区域降水集中度高,容易形成频繁的旱或涝事件,促使旱涝转换事件的发生<sup>[31-32]</sup>。

降水作为旱涝转换的关键要素,而大气环流是影响其变化的主要因素,大气环流异常导致暖湿空气的异常输送<sup>[33-36]</sup>,进而使得短期干旱和洪水之间发生快速转变<sup>[37]</sup>。雷晓平等<sup>[38]</sup>在中国南北过渡带DFAA的研究中指出遥相关因子和气象因素对短周期DFAA均具有显著影响。SHI等<sup>[32]</sup>在渭河流域DFAA驱动

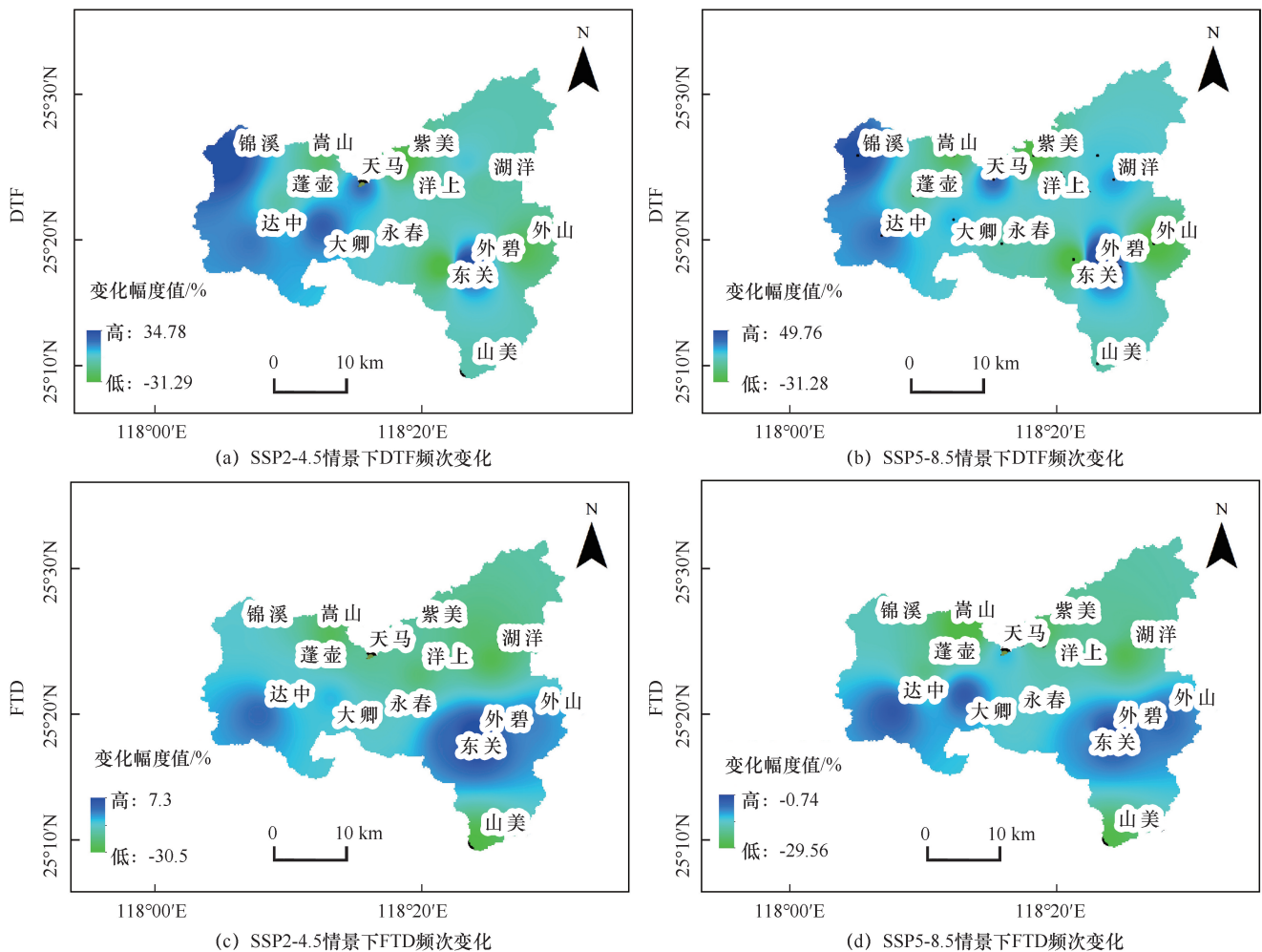


图8 2030—2100年山美水库流域旱涝急转事件的发生频次变化

Fig. 8 Changes in the frequency of drought-flood abrupt alternation events in Shanmei Reservoir Basin from 2030 to 2100

因素的研究中指出遥相关因子异常可能引起气象因素变化,从而导致DFAA事件发生。大气环流中的厄尔尼诺-南方涛动等现象,与DFAA的发生也存在密切关系,陈旭哲等<sup>[39]</sup>研究发现ENSO变化对华南地区的降水模式具有重要影响。闪丽洁等<sup>[15]</sup>研究指出拉尼娜事件极有可能成为长江中下游DFAA发生的预测信号。东南沿海地区因其特殊的地理位置,大气环流变化往往通过影响水汽输送能力来改变该地区的降水模式,进而导致DFAA的发生<sup>[32-40]</sup>。相关研究表明PDO和ENSO的相位变化会改变东南沿海地区的环流模式,进而导致DFAA强度发生变化<sup>[41-42]</sup>。

台风降水也是导致DFAA的重要因素之一。福建省自1960年以来,台风降水量、暴雨天数和过程最大体积降水量均呈现不同程度的增加趋势<sup>[43]</sup>,台风降水对东南沿海地区总降水的贡献率超过40%,导致了福建省70%的洪涝灾害。CHEN等<sup>[44]</sup>指出强度较高的台风过境时容易诱发DFAA。例如,2006年

8月10日,超强台风桑美在浙江南部沿海登陆,给浙闽两省带来了强降水,山美水库流域在8月10日至9月17日期间降水量达到428.70 mm,发生重度涝事件。然而,从9月中下旬至11月中旬,山美水库流域持续少雨,期间降水量不足10 mm,经历了中度旱事件,因此8月10日至11月19日,研究区经历了一场重度FTD事件( $K=3.19$ )。

此外,未来SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下研究区中南部DTF和FTD的频次和强度均呈增加趋势,这些区域未来发生DFAA的风险增加,增加了防汛抗旱工作的难度。针对山美水库流域的DFAA灾害防控,需构建基于气候-水文耦合的适应性治理框架。洪水资源化调度是核心策略,通过动态调整汛限水位(如主汛期分级控泄与枯水期蓄水优化),增加兴利水量,缓解下游供水压力<sup>[45]</sup>。在此基础上,探索跨流域调水(如山美水库与金鸡水闸联合调度)的合理方案,确保调水工程的可持续性,提升应对

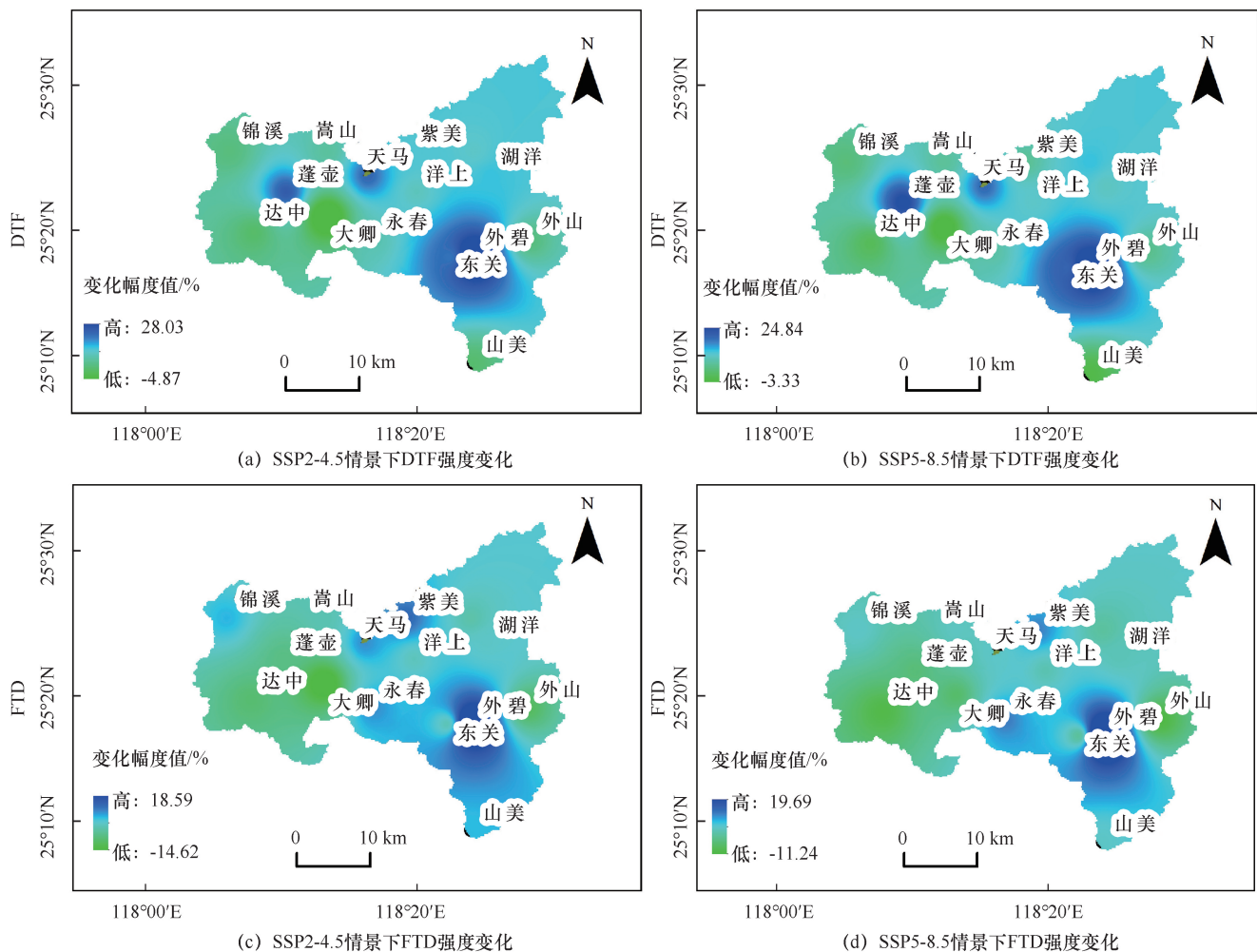


图9 2030—2100年山美水库流域旱涝急转事件强度的变化

Fig. 9 Changes in the intensity of drought-flood abrupt alternation events in Shanmei Reservoir Basin from 2030 to 2100

气候变化的能力, 最终实现水资源的优化配置与旱情的有效缓解。

本文采用的  $SPI-12\text{ d}$  虽然具有识别效果好、计算简单等优点, 然而, 该指数仅仅依赖于降水来识别干湿事件, 而不考虑可能导致或加剧此类极端气象水文事件的其他要素。由于水文过程之间复杂的物理联系, 从一个指标评估的水文气候极值往往与从另一个指标获得的水文气候极值可能不完全一致<sup>[46]</sup>。未来可以结合土壤水、径流等更多水文气象要素, 通过采用 Copula、元高斯模型等方法, 将降水、土壤和径流等多个水文气象变量结合在一起, 以更好地识别 DFAA 事件, 更全面地了解复合型极端事件的风险变化。

## 5 结论

本文基于  $SPI-12\text{ d}$  指数系统分析了山美水库流域 1980—2018 年 DFAA 的时空变化特征, 并基于

CMIP6 多模式集合, 预测了未来 2030—2100 年在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下研究区 DFAA 的时空演变规律, 得到以下结论。

(1) 近 39 年来, 山美水库流域 DFAA 频次呈现先上升后下降趋势, 强度呈显著上升趋势。其中, DTF 和 FTD 的频次先增加后减少, DTF 强度显著增加, FTD 强度显著下降。年内 DTF 主要集中在 1 月、7 月及 9 月至 12 月, 重度 DTF 多发生在 7 月和 9 月; FTD 主要集中在 8 月至 11 月, 重度 FTD 则多发生在 8 月和 9 月。

(2) DTF 频次和强度的高值区位于南部, FTD 频次和强度的高值区分别位于东北部和东南部, 表明这些地区 DFAA 的频次高、强度大。

(3) 未来研究区 DTF 频次和强度均呈增加趋势, 且在 SSP5-8.5 情景下更为显著。FTD 频次在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下分别呈不显著的下降和上升趋势, 强度则均呈下降趋势。在年内变化上, DTF 频

次在 2 月和 12 月增加最为显著, FTD 频次则在 1 月、8 月和 10 月增加最显著, 且在 SSP5-8.5 情景下增加趋势更显著。

(4)空间分布上, 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下研究区中南部 DTF 和 FTD 的频次和强度均呈增加趋势, 即这些区域未来发生 DFAA 的风险增加。

## 参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 赵子萌, 邵薇薇, 曹永强, 等. 辽宁省旱涝急转特征与趋势研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(6): 32-43.  
ZHAO Z M, SHAO W W, CAO Y Q, et al. Study on the characteristics and trends of drought-flood transition in Liaoning Province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(6): 32-43.
- [3] 吴志伟. 长江中下游夏季风降水“旱涝并存、旱涝急转”现象的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.  
WU Z W. Study on the “Drought-Flood Coexistence and Drought-flood Transition” Phenomenon of Summer Monsoon Precipitation in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2006.
- [4] 何慧, 廖雪萍, 陆虹, 等. 华南地区 1961—2014 年夏季长周期旱涝急转特征[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 130-141.  
HE H, LIAO X P, LU H, et al. Characteristics of long-term drought-flood sudden transition in summer in south China from 1961 to 2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 130-141.
- [5] 孙小婷, 李清泉, 王黎娟. 我国西南地区夏季长周期旱涝急转及其大气环流异常[J]. 大气科学, 2017, 41(6): 1332-1342.  
SUN X T, LI Q Q, WANG L J. Long-term drought-flood sudden transition in summer and its atmospheric circulation anomalies in southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(6): 1332-1342.
- [6] REN J, WANG W, WEI J, et al. Evolution and prediction of drought-flood abrupt alternation events in Huang-Huai-Hai river basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 869: 161707.
- [7] 闪丽洁, 张利平, 张艳军, 等. 长江中下游流域旱涝急转事件特征分析及其与 ENSO 的关系[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 25-40.  
SHAN L J, ZHANG L P, ZHANG Y J, et al. Analysis of the characteristics of drought-flood transition events in the middle and lower reaches of the Yangtze river basin and their relationship with ENSO [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 25-40.
- [8] 甘贝贝, 刘梅冰. 1962—2021 年闽江流域干湿演变特征及其对 ENSO 事件的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 545-556.  
GAN B B, LIU M B. Dry-wet evolution characteristics and response to ENSO events in the Minjiang River basin from 1962 to 2021 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 545-556.
- [9] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [10] 宋志红, 王辉, 景唤, 等. 引江济淮工程水源区和受水区干旱遭遇风险[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 996-1005.  
SONG Z H, WANG H, JING H, et al. The risk of concurrent drought between the water source and destination regions of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 996-1005.
- [11] WU J, MIAO C, TANG X, et al. A nonparametric standardized runoff index for characterizing hydrological drought on the loess plateau, China [J]. Global and Planetary Change, 2018, 161: 53-65.
- [12] SON H J, KIM J E, BYUN S H, et al. Monitoring and evaluating the severity of drought-flood abrupt alternation events using daily standardized precipitation index [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(2): 1002-1010.
- [13] BAI X, ZHAO C, TANG Y, et al. Identification, physical mechanisms and impacts of drought-flood abrupt alternation: A review [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1203603.
- [14] 张云帆, 翟丽妮, 林沛榕, 等. 长江中下游典型流域旱涝与旱涝/涝旱急转变规律及其驱动因子研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(10): 887-897.  
ZHANG Y F, ZHAI L N, LIN P R, et al. Study on the evolution patterns and driving factors of drought-flood and drought-flood/flood-drought abrupt alternation in typical basins of the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(10): 887-897.
- [15] ZHAO Y, WENG Z, CHEN H, et al. Analysis of the evolution of drought, flood, and drought-flood abrupt alternation events under climate change using the daily SWAP index [J]. Water, 2020, 12(7): 1969.
- [16] 梁曼琳, 刘丙军, 李旦. 珠江流域旱涝急转事件识别指数优选研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(4): 57-64.  
LIANG M L, LIU B J, LI D. Optimization of identification indices for drought-flood abrupt alternation events in the Pearl River Basin [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(4): 57-64.
- [17] FU J, LIU B, LU Y, et al. Validation of the detected dry-wet abrupt alternation by developing a weighting analysis method [J]. International Journal of Climatology, 2023, 43(10): 4572-4589.

- [18] ZHANG B W, CHEN Y, CHEN X W, et al. Spatial-temporal variations of drought-flood abrupt alternation events in southeast China [J]. *Water*, 2024, 16(3): 498.
- [19] 孙锦浩, 苏布达, 王东方, 等. 中国旱涝急转事件时空变化特征[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(8): 13-23.  
SUN J H, SU B D, WANG D F, et al. Spatiotemporal variation characteristics of drought-flood abrupt alternation events in China[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(8): 13-23.
- [20] 刘丙军, 傅健宇, 梁曼琳, 等. 珠江流域旱涝急转灾害时空演变趋势分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(6): 12-19.  
LIU B J, FU J Y, LIANG M L, et al. Spatiotemporal evolution trend analysis of drought-flood abrupt alternation disasters in the Pearl River Basin[J]. *China Flood and Drought Management*, 2023, 33(6): 12-19.
- [21] BI W, LI M, WENG B, et al. Drought-flood abrupt alternation events over China [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 875: 162529.
- [22] 夏军. 变化环境下长江流域滨海城市供水安全与适应性对策 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(2): 209-214.  
XIA J. Watersecurity and adaptive management for coastal cities of Yangtze River basin under changing environment[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(2): 209-214.
- [23] WANG S, TIAN H, DING X, et al. Climate characteristics of precipitation and phenomenon of drought-flood abrupt alternation during main flood season in Huaihe River basin [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(1): 31.
- [24] LIU B, JIANYU F, MANLIN L, et al. Spatio-temporal evolution trend analysis of drought and flood disasters in the Pearl River Basin [J]. *China Flood Drought Management*, 2023, 33: 12-19.
- [25] 孙浩岩, 王立辉, 唐萍, 等. 福建九龙江流域历史旱涝急转的识别与情势分析[J]. *人民珠江*, 2023, 44(10): 78-86.  
SUN H Y, WANG L H, TANG P, et al. Identification and situation analysis of historical drought-flood abrupt alternation in Jiulong River Basin of Fujian Province [J]. *People's Pearl River*, 2023, 44(10): 78-86.
- [26] WANG R, LI X, ZHANG Q, et al. Projection of drought-flood abrupt alternation in a humid subtropical region under changing climate [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 624: 129875.
- [27] 杨歌雨, 张容焱, 潘航, 等. 福建省多维度气象干旱特征时空分布分析[J]. *气象*, 2022, 48(12): 1565-1576.  
YANG X Y, ZHANG R Y, PAN H, et al. Spatiotemporal distribution analysis of multi-dimensional meteorological drought characteristics in Fujian Province [J]. *Meteorological Monthly*, 2022, 48(12): 1565-1576.
- [28] CHOI J R, CHUNG I M, JEUNG S J, et al. Development and verification of the available number of water intake days in ungauged local water source using the SWAT model and flow recession curves [J]. *Water*, 2021, 13(11): 1511.
- [29] DAI A, RASMUSSEN R M, LIU C, et al. A new mechanism for warm-season precipitation response to global warming based on convection-permitting simulations [J]. *Climate Dynamics*, 2020, 55: 343-368.
- [30] WRIGHT B, STANFORD B, WEISS J, et al. Climate change how does weather affect surface water quality? [J]. *Opflow*, 2013, 39(1): 10-15.
- [31] 谢晓平, 刘光生. 近60年来福建省降雨时空分布特征[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(8): 5-8.  
XIE X P, LIU G S. Spatiotemporal distribution characteristics of precipitation in Fujian Province over the last 60 years [J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(8): 5-8.
- [32] SHI W, HUANG S, LIU D, et al. Drought-flood abrupt alternation dynamics and their potential driving forces in a changing environment [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126179.
- [33] 龚志强, 赵俊虎, 封国林. 中国东部2012年夏季降水及年代际转型的可能信号分析[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 555-564.  
GONG Z Q, ZHAO J H, FENG G L. Analysis of precipitation in eastern China during summer 2012 and possible signals of decadal transition [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 555-564.
- [34] YANG Q, MA Z, XU B. Modulation of monthly precipitation patterns over east China by the pacific decadal oscillation [J]. *Climatic Change*, 2017, 144: 405-417.
- [35] ZHANG L, SIELMANN F, FRAEDRICH K, et al. Variability of winter extreme precipitation in southeast China: contributions of SST anomalies [J]. *Climate dynamics*, 2015, 45: 2557-2570.
- [36] XIAO M, ZHANG Q, SINGH V P. Spatiotemporal variations of extreme precipitation regimes during 1961—2010 and possible teleconnections with climate indices across China [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(1): 468-479.
- [37] CHEN H, WANG S, ZHU J, et al. Projected changes in abrupt shifts between dry and wet extremes over China through an ensemble of regional climate model simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(23): e2020JD033894.
- [38] 雷晓平, 宋小燕, 果华雯, 等. 中国南北过渡带短周期旱涝急转及潜在驱动因素分析[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(4): 31-43.  
LEI X P, SONG X Y, GUO H W, et al. Analysis of short-term drought-flood sudden transition and potential driving factors in the transitional zone between northern and southern China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(4): 31-43.
- [39] 陈旭哲, 范伶俐, 徐建军, 等. 华南汛期旱涝急转特征及其与海温异常的关系[J]. *广东海洋大学学报*, 2023, 43(1): 68-77.

- CHEN X Z, FAN L L, XU J J, et al. Characteristics of drought-flood transition during the flood season in south China and its relationship with sea surface temperature anomalies [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2023, 43(1): 68-77.
- [40] JIANG S, CUI H, REN L, et al. Will China's yellow river basin suffer more serious combined dry and wet abrupt alternation in the future? [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 624: 129871.
- [41] WANG H, WANG S, SHU X, et al. Increasing occurrence of sudden turns from drought to flood over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, 129(3): e2023JD039974.
- [42] DU J, QIU Y, LI Y, et al. Evolution characteristics of the interannual and intra-annual precipitation in China from 1956 to 2016 [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(2): 182-196.
- [43] 叶金玉. 基于多维矩阵的台风灾害链综合风险评估模型及其信息图谱表达[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- YE J Y. A Comprehensive Risk Assessment Model for Typhoon Disaster Chain Based on Multi-Dimensional Matrix and Its Information Mapping Representation [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015.
- [44] CHEN Y, LIAO Z, SHI Y, et al. Detectable increases in sequential flood-heatwave events across China during 1961—2018 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(6): e2021GL092549.
- [45] 刘奕山. 山美水库实践洪水资源化: 开展汛限水位动态控制的研究与探讨[C]//中国水利学会减灾专业委员会. 中国水利学会 2011 学术年会: 减灾专委会暨水库汛限水位动态研究学术年会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 51-58.
- LIU Y S. Practice of floodwater resource utilization at Shanmei Reservoir: Research and exploration on dynamic control of flood limited water level [C]// Disaster Reduction Professional Committee, Chinese Hydraulic Engineering Society. Proceedings of the 2011 Academic Annual Meeting of the Chinese Hydraulic Engineering Society; Disaster Reduction Specialized Committee & Academic Annual Conference on Dynamic Research of Reservoir Flood Limited Water Levels. Beijing: China Water & Power Press, 2011: 51-58.
- [46] NA W, NAJAFI M R. Rising risks of hydroclimatic swings: A large ensemble study of dry and wet spell transitions in North America [J]. *Global and Planetary Change*, 2024, 238: 104476.

(责任编辑 王海锋)