

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.02.018

# 基于因果分析的金沙江流域气象-水文干旱传播特征及其未来情景预估

张 丹<sup>1</sup>, 要 威<sup>1</sup>, 肖 华<sup>1</sup>, 苑如玮<sup>2</sup>, 梁瀚续<sup>3</sup>

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 河北省水文勘测研究中心, 河北 石家庄 050031; 3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**为探究干旱发生发展机理,减轻旱灾损失,基于标准化降水指数和径流指数,采用收敛交叉映射算法,从因果性的视角分析了金沙江流域气象-水文干旱的传播特征,并利用 CMIP6 气候模式预估了未来气候情景下的干旱传播特征。结果表明:历史时期(1985—2014 年)金沙江流域汛期、枯水期干旱传播时间分别为 1 月和 6~8 月,汛期干旱传播率(0.90~0.97)大于枯水期(0.89~0.93),空间上屏山站干旱传播率最大,石鼓站次之,小得石站最小;相较于历史时期,流域未来(2030—2089 年)汛期干旱传播时间几乎不变,枯水期变幅较大,空间上干流石鼓站和屏山站枯水期缩短 1 月,支流小得石站枯水期延长 1~2 月;与历史时期相比,流域未来干旱传播率增大,其中汛期干旱传播率增幅较小(2.50%~9.83%),枯水期增幅较大(5.82%~11.72%),空间上小得石站增幅最大,石鼓站次之,屏山站最小,且不同气候情景间干旱传播率增幅差异较小。

**关键词:**干旱传播;气候变化;收敛交叉映射;因果分析;金沙江流域

中图分类号:P339      文献标志码:A      文章编号:1004-6933(2025)02-0158-07

**Meteorological drought to hydrological drought propagation characteristics in the Jinsha River Basin and their prediction under future scenarios based on causal analysis**//ZHANG Dan<sup>1</sup>, YAO Wei<sup>1</sup>, XIAO Hua<sup>1</sup>, YUAN Ruwei<sup>2</sup>, LIANG Hanxu<sup>3</sup> (1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Hebei Hydrologic Survey and Research Center, Shijiazhuang 050031, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** To explore the development mechanism and reduce the loss of droughts, based on standardized precipitation and runoff indices, the meteorological drought to hydrological drought propagation characteristics in the Jinsha River Basin were revealed from the perspective of causality using the convergent cross mapping method. The drought propagation characteristics under future climate scenarios were predicted using the CMIP6 climate model. The results show that the drought propagation time in the Jinsha River Basin during the historical period from 1985 to 2014 was one month and six to eight months in wet and dry seasons, respectively. The propagation rate in wet season during the historical period was larger (0.90~0.97) than that in dry season (0.89~0.93), and it was the largest at Pingshan Station, followed by that at Shigu Station, and lowest at Xiaodeshi Station. The drought propagation time in the future from 2030 to 2089 in the basin will have little change during wet season, but have a significant spatial difference during dry season, and it will be shortened by one month at Shigu and Pingshan stations in the mainstream, while be extended by one to two months at Xiaodeshi Station in the tributary. The drought propagation rate in the future will increase in the basin, with a small increase in wet season (2.50%~9.83%) and a large increase in dry season (5.82%~11.72%). In terms of spatial distribution, Xiaodeshi Station will have a larger increase in the drought propagation rate in the future, followed by Shigu Station, and Pingshan Station will have the smallest increase. Moreover, the differences in the increase of drought propagation rates between different climate scenarios will be relatively small in the future.

**Key words:** drought propagation; climate change; convergent cross mapping; causal analysis; the Jinsha River Basin

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200302)  
作者简介:张丹(1994—),女,工程师,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail:zhangdan\_main@163.com  
通信作者:梁瀚续(1999—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:767355988@qq.com

干旱成因复杂,发生频率高、时间跨度大且破坏力强,是人类社会面临的主要自然灾害之一。干旱通常分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱<sup>[1]</sup>,气象干旱是其他干旱的触发器,持续的气象干旱会引发农业干旱、水文干旱等<sup>[2]</sup>。干旱传播存在成因上的密切联系及复杂的作用机制<sup>[3]</sup>。近年来,气象-水文干旱的传播特征得到了国内外研究者的广泛关注<sup>[4-5]</sup>。深入探究气象-水文干旱间的传播特征有助于理解干旱的发生发展机理,增强旱情监测预警,提高综合抗旱能力<sup>[6]</sup>。

气象-水文干旱传播特征主要包括干旱传播时间和传播率<sup>[7-8]</sup>。研究干旱传播特征常见的统计方法有相关分析<sup>[9]</sup>、小波分析<sup>[10]</sup>、Copula 函数<sup>[11]</sup>、贝叶斯网络<sup>[12]</sup>、随机森林<sup>[13]</sup>等,其中相关分析应用最为广泛。Liu 等<sup>[14-16]</sup>基于干旱时序的多尺度特征,采用相关分析分别探究了长江、渭河、塔里木河流域的干旱传播时间及其影响因素。然而,线性或非线性相关可以描述两个时间序列间的接近程度,难以表征干旱传播的方向性。此外,Sugihara 等<sup>[17]</sup>指出,由于伪相关的存在,相关关系既不是因果关系的充分条件,也不是其必要条件,尤其在非线性动力系统中。考虑到不同类型间的干旱传播往往包含复杂的非线性因果关联<sup>[18]</sup>,亟须从因果性的视角揭示干旱传播的内在机制。近年来,蓬勃发展的时序因果推理方法为解决该问题提供了技术支撑<sup>[19]</sup>。Shi 等<sup>[20]</sup>基于收敛交叉映射 (convergent cross mapping, CCM) 算法,从因果性的视角探究了珠江流域和渭河流域的气象-水文干旱传播特征,证实了该方法的有效性,尤其在干旱传播方向的检测中,相较传统的相关分析更有优势。Shiau 等<sup>[21]</sup>同样采用 CCM 因果推理方法,探讨了水库调度背景下台湾南部某流域的气象-水文干旱传播特征。上述研究表明,因果分析为解耦干旱传播特征提供了新的视角,可进一步推广应用。

金沙江流域是南水北调西线工程的调水源区与中国最大的水电基地,该区域水能资源极其丰富,目前有 25 座已建和在建水电站,其中向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德四大水电站年发电量约 1.8 亿 kW·h。受气候变化影响,近年来金沙江流域干旱频发,对区域水与能源安全造成严重威胁<sup>[22]</sup>。未来气候变暖可能进一步加速水文循环过程,并通过改变降水和温度等气象要素的时空分布直接作用于干旱的时空格局,进而影响干旱特征及其传播过程<sup>[23]</sup>。目前,已有部分研究基于最新 CMIP6 气候模式,评估了金沙江流域未来降水、径流以及气象干旱、水文干旱的变化规律<sup>[24-25]</sup>,但干旱传播特征有待进一步研究。

本文基于 CCM 算法,从因果性的视角揭示了金沙江流域现状及未来气象-水文干旱的传播特征,研究结果可为金沙江流域干旱监测与防治提供理论参考,有助于变化环境下的流域水资源综合管理。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

金沙江流域 (24°28'N ~ 35°46'N、90°23'E ~ 104°37'E) 地处长江上游,发源于青海省唐古拉山脉,横跨云贵高原和四川盆地西缘,流域面积 47.5 万 km<sup>2</sup>,约占整个长江流域面积的 26.3%,干流全长 3486 km,流经青海、西藏、云南、四川和贵州 5 省区。流域地势西北高、东南低,海拔差超过 6000 m (图 1),其自然地理较为复杂,高原、峡谷、盆地、丘陵等地形相互交错,区域内气候差异十分显著<sup>[26]</sup>。金沙江上游属高原山地气候,区域年平均气温为 -4.8 ~ 9.5℃,年平均降水量为 249 ~ 810 mm,年平均流量为 631 ~ 1316 m<sup>3</sup>/s,出口水文站为石鼓站;金沙江中下游区域大部分属亚热带季风气候,年平均气温为 12.7 ~ 14.6℃,年平均降水量为 631 ~ 1105 mm,年平均流量为 821 ~ 2419 m<sup>3</sup>/s,出口水文站为屏山站;金沙江支流雅砻江流域大部分属高原山地气候,区域年平均气温为 6.9 ~ 8.9℃,年平均降水量为 613 ~ 911 mm,年平均流量为 1164 ~ 2140 m<sup>3</sup>/s,出口水文站为小得石站。流域径流主要由降水补给,其次是融雪和地下水。此外,金沙江流域水能资源丰富,是我国最大的水电基地,目前规划梯级电站 40 余座,装机容量超 9000 万 kW。

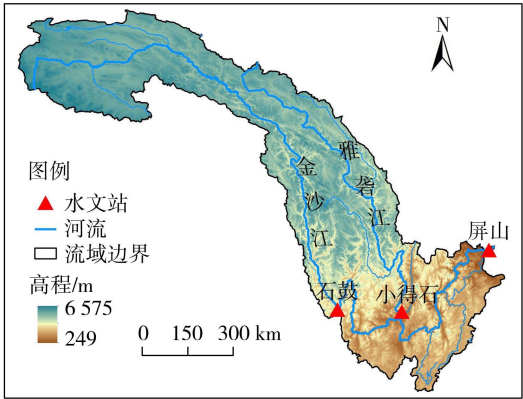


图 1 金沙江流域概况

Fig. 1 Overview of the Jinsha River Basin

### 1.2 数据来源

研究数据主要包括历史时期 (1985—2014 年) 和未来 (2030—2089 年) 的气象水文数据。除历史时期金沙江流域石鼓、小得石和屏山水文站的实测月径流数据来自水文年鉴外,其余数据均来源于跨领域国际影响模型比较计划第三阶段 (ISIMIP3) 公

开数据集 (<https://data.isimip.org/search/>)。该数据集分为 ISIMIP3a 和 ISIMIP3b 两个部分,分别为历史模拟和模型验证、全球变暖影响预测。历史气象驱动数据(降水、湿度、气温、气压、风速、辐射)取自欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据集 ERA5,空间分辨率为 0.5°;未来气候数据选用 ISIMIP3b 中的全部 5 种 CMIP6 气候模式,包括 GFDL-ESM4、IPSL-CM6A-LR、MPI-ESM1-2-HR、MRI-ESM2-0、UKESM1-0-LL,分别来自美国、法国、德国、日本和英国。采用分位数映射法进行统计偏差校正<sup>[27]</sup>,选取 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 分别代表低和高碳排放的典型情景。径流模拟数据来自分布式全球水文模型 Watergap2.2e<sup>[28-29]</sup>,该模型主要由冠层、雪、土壤、地下水、地表水体等模块组成,可用于模拟河川径流、蒸发蒸腾和地下水补给等水文过程。Liang 等<sup>[30-31]</sup>研究表明,Watergap2.2e 在金沙江流域具有较高的模拟精度,石鼓、小得石、屏山站径流模拟的纳什效率系数(NSE)在 0.8 以上,相对偏差(BIAS)低于 12%,可进一步用于未来气候变化的响应研究。

## 2 研究方法

### 2.1 干旱指数计算

采用标准化降水指数(SPI)和标准化径流指数(SRI)分别表征气象和水文干旱。SPI、SRI 仅以降水和径流序列为输入,计算简便,广泛应用于气象水文干旱研究领域。以 1 月为研究时间尺度<sup>[32]</sup>,针对各月降水和径流序列分别建立对数正态分布函数,采用等概率变换将序列的累积分布转化为标准正态分布,即可得到相应的 SPI 和 SRI 序列。

### 2.2 干旱传播特征提取

基于 Sugihara 等<sup>[17]</sup>提出的时间序列因果推理 CCM 算法,提取干旱传播时间和干旱传播率。CCM 算法利用延时嵌入理论,通过检测重构吸引子流形之间的拓扑相似性,推断非线性动力系统中两个时间序列之间的因果关系。CCM 算法假设变量  $X$ 、 $Y$  同属于一个非线性动力系统  $M$ ,如果  $X$  导致  $Y$ ,则自变量  $X$  在因变量  $Y$  中留下信息特征,即  $Y$  中包含  $X$  的演化信息,因此,可以根据  $Y$  的变化特征来估计  $X$ 。

Sugihara 等<sup>[33]</sup>研究表明,当变量受到同步性(由强耦合或动态共振引起的现象)影响时,CCM 算法可能实现收敛,这可能会导致虚假的双向因果关系,尤其是对于可能存在强耦合关系的气象水文系统。因此,本文采用 Ye 等<sup>[34]</sup>改进的带时间滞后的 CCM 算法,旨在利用时间依赖的非对称模式(即原因优先原则)克服同步性干扰。与传统 CCM 算法的区别是,带时间滞后的 CCM 算法假定  $Y$  和  $X$  间

存在滞后时间  $d$ ,即因果方向为  $X_t \rightarrow Y_{t+d}$ ,利用  $Y_{t+d}$  交叉映射  $X_t$ 。 $d$  为交叉映射的滞后时间,区别于重构状态空间的嵌入延迟  $\tau$ 。

考虑到干旱传播具有单向性,即传播方向是从气象干旱到水文干旱,设定 SPI 为自变量  $X$ ,SRI 为因变量  $Y$ ,通过交叉映射,得到不同滞后时间下的收敛相关系数。定义干旱传播时间为收敛相关系数极大值对应的滞后时间,而对应的收敛相关系数即为干旱传播率,表征从气象干旱向水文干旱转化的能力<sup>[35]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 基于 CCM 算法的历史干旱传播特征分析

基于金沙江流域历史时期(1985—2014 年)ERA5 降水和 Watergap2.2e 模拟的径流计算对应的 SPI 和 SRI,而后利用 CCM 算法计算不同滞后时间对应的收敛相关系数,结果如图 2 所示,其中,石鼓、小得石、屏山站分别对应各站控制的全部集水区域。由图 2 可见,各水文站的收敛相关系数均具有两个极大值,第一个极值对应的滞后时间均为 1 月;小得石站第二个极值对应的滞后时间为 6 月,而石鼓和屏山站则为 8 月。流域汛期水文循环较强,降雨-径流关系较强,径流生成时间较短,可能导致干旱传播时间较短;而枯水期气温较低,蒸发蒸腾较弱,水文循环较缓慢,可能延长干旱传播时间。据此可以初步认为,历史时期金沙江流域干旱传播时间具有明显的季节性,汛期为 1 月,枯水期为 6~8 月;金沙江流域汛期干旱传播率(0.90~0.97)大于枯水期(0.89~0.93),汛期干流屏山站最大,石鼓站次之,支流雅砻江小得石站最小。

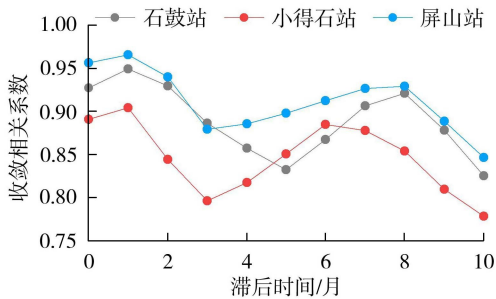


图 2 金沙江流域历史时期不同滞后时间对应的收敛相关系数

Fig. 2 Convergence correlation coefficients varying with lag time in historical period of the Jinsha River Basin

### 3.2 气候变化下流域未来干旱传播特征

未来(2030—2089 年)不同气候情景下多模式集合平均的降水量和径流量如图 3 所示,图中  $k_{SSP1-2.6}$ 、 $k_{SSP5-8.5}$  分别为 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景

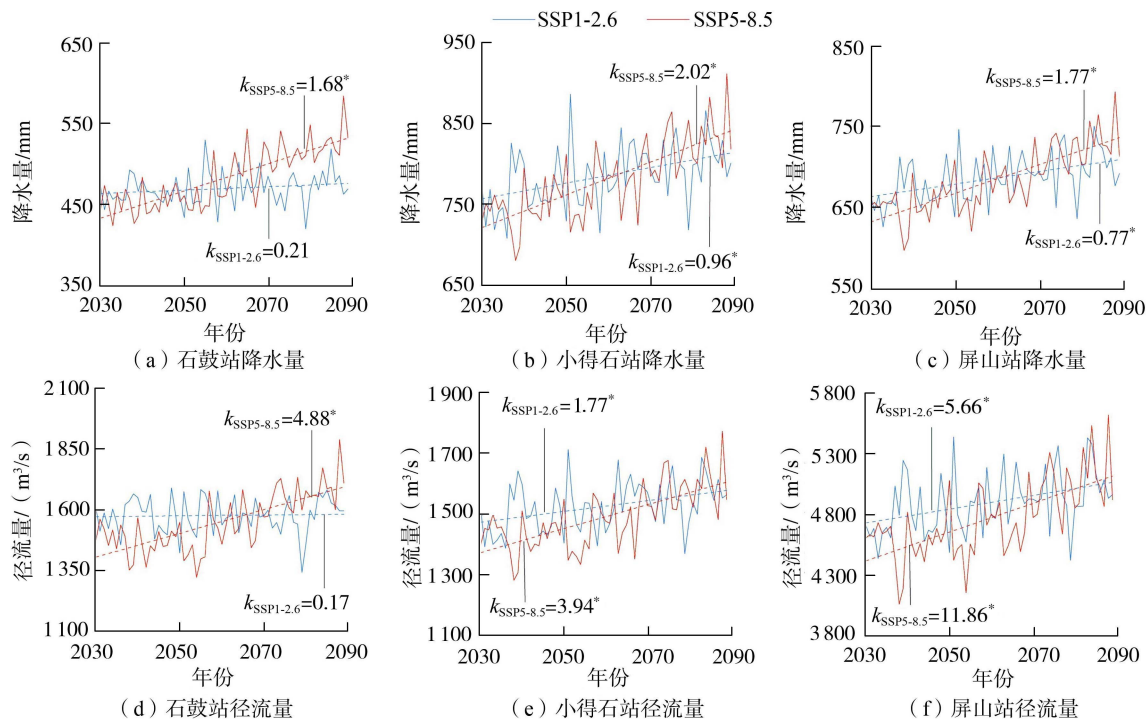


图3 金沙江流域未来降水量和径流量

Fig. 3 Future precipitation and runoff of the Jinsha River Basin

下的降水量和径流量变化趋势率, ( \* ) 表示通过去趋势预置白的 Mann-Kendall 检验趋势率在 0.01 水平上显著 ( $p<0.01$ )。对于降水量,石鼓站在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下的趋势率分别为 0.21、1.68 mm/a,小得石站分别为 0.96、2.02 mm/a,屏山站分别为 0.77、1.77 mm/a,除石鼓站在 SSP1-2.6 情景下不显著 ( $p=0.11$ ) 外,其余各水文站控制区在不同情景下降水量均呈显著增加的趋势,且小得石站增速最大,屏山站次之,石鼓站最小。对于径流量,石鼓站在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下的趋势率分别为 0.17、4.88  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ ,小得石站分别为 1.77、3.94  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ ,屏山分别为 5.66、11.86  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ ,除石鼓站在 SSP1-2.6 情景下不显著 ( $p=0.57$ ) 外,其余各水文站在不同情景下径流量均呈显著增加的趋势,且屏山站增速最快。金沙江流域未来降水和径流量总体均呈增加的趋势,且 SSP5-8.5 情景下增速较快。

基于多模式集合平均的降水和径流序列计算 SPI 和 SRI,再利用 CCM 算法计算不同滞后时间对应的收敛相关系数,以探究未来不同气候情景下近期(2030—2059 年)和远期(2060—2089 年)的干旱传播特征,结果如图 4 所示。总的来说,流域各水文站的干旱传播特征在未来不同时期不同气候情景下的差异不大,汛期、枯水期干旱传播时间分别为 1~2 月和 7~8 月;近期干旱传播率略高于远期,SSP1-2.6 情景下干旱传播率略高于 SSP5-8.5 情景下的值。近期在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下石鼓站汛期干旱传播时间分别为 2 月和 1 月,远期在两种气候情景下均为 1 月;近期在各气候情景下枯水期干旱传播时间均为 7 月,远期均为 8 月;无论汛期还是枯水期,近期在 SSP1-2.6 情景下干旱传播率均最大。未来不同时期在不同气候情景下,小得石站汛期干旱传播时间均为 1 月,在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下枯水期干旱传播时间分别为 7 月和 8 月;对

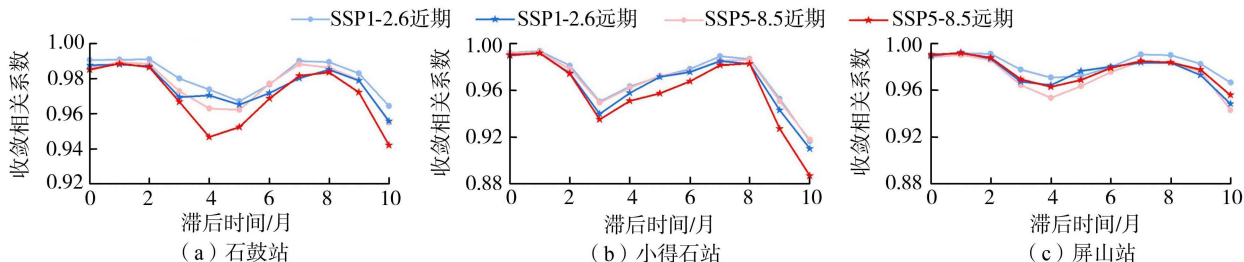


图4 金沙江流域未来不同时期干旱传播特征

Fig. 4 Drought propagation characteristics in different periods of the Jinsha River Basin in future

于干旱传播率,与石鼓站类似,无论汛期还是枯水期,近期在 SSP1-2.6 情景下均最大。未来不同时期在不同气候情景下屏山站汛期干旱传播时间均为 1 月,枯水期均为 7 月;远期在 SSP1-2.6 情景下汛期干旱传播率最大,近期在 SSP1-2.6 情景下枯水期干旱传播率最大。

表 1 进一步列出了金沙江流域未来干旱传播特征相对历史时期的变化。就干旱传播时间而言,汛期几乎保持不变,仅石鼓站近期在 SSP1-2.6 情景下增加 1 月;枯水期变化较大,小得石站干旱传播时间变长,在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下分别增加 1 月和 2 月,屏山站干旱传播时间缩短,各气候情景下均减少 1 月,而石鼓站近期在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下干旱传播时间减少 1 月。干旱传播时间的变化在不同气候情景间差异较小,均在 1 月以内。就干旱传播率而言,汛期增幅较小(2.50%~9.83%),枯水期增幅较大(5.82%~11.72%);空间上小得石站增幅最大(汛期约 9.7%、枯水期约 11.4%),石鼓站次之(汛期约 4.1%、枯水期约 7.1%),屏山站最小(汛期约 2.6%、枯水期约 6.1%);对于不同时期,石鼓站近期和远期增幅分别为 4.18%~7.47%和 4.02%~6.91%、小得石站增幅分别为 9.73%~11.72%和 9.63%~11.26%、屏山站增幅分别为 2.50%~6.57%和 2.65%~5.98%。总体而言,石鼓和小得石站近期干旱传播率增幅大于远期,而屏山站除在 SSP1-2.6 情景下枯水期外,近期增幅略小于远期;干旱传播率增幅在不同气候情景间差异较小,均小于 1%。

表 1 未来干旱传播特征相对历史时期的变化  
Table 1 Changes of drought propagation characteristics in future relative to historical periods

| 水文站 | 情景       | 时期 | 干旱传播时间变化/月 |     | 干旱传播率变化/% |       |
|-----|----------|----|------------|-----|-----------|-------|
|     |          |    | 汛期         | 枯水期 | 汛期        | 枯水期   |
| 石鼓  | SSP1-2.6 | 近期 | 1          | -1  | 4.33      | 7.47  |
|     |          | 远期 | 0          | 0   | 4.02      | 6.91  |
|     | SSP5-8.5 | 近期 | 0          | -1  | 4.18      | 7.25  |
|     |          | 远期 | 0          | 0   | 4.08      | 6.75  |
| 小得石 | SSP1-2.6 | 近期 | 0          | 1   | 9.83      | 11.72 |
|     |          | 远期 | 0          | 1   | 9.64      | 11.26 |
|     | SSP5-8.5 | 近期 | 0          | 2   | 9.73      | 11.42 |
|     |          | 远期 | 0          | 2   | 9.63      | 11.01 |
| 屏山  | SSP1-2.6 | 近期 | 0          | -1  | 2.66      | 6.57  |
|     |          | 远期 | 0          | -1  | 2.70      | 5.82  |
|     | SSP5-8.5 | 近期 | 0          | -1  | 2.50      | 5.95  |
|     |          | 远期 | 0          | -1  | 2.65      | 5.98  |

3.3 讨论

本文采用 CCM 算法得到金沙江流域汛期和枯水期干旱传播时间分别为 1 月和 6~8 月,与 Zhang

等<sup>[36]</sup>的研究结果基本一致。对于干旱传播的季节性特征,Shi 等<sup>[20]</sup>对渭河流域的研究结果表明,汛期和枯水期干旱传播时间分别为 2~3 月和 9~13 月;Zhao 等<sup>[35]</sup>对珠江流域的研究结果表明,汛期和枯水期干旱传播时间分别为 1~2 月和 5 月。不同流域均呈现出枯水期干旱传播时间长于汛期,这可能是由于汛期和枯水期水文循环速度不同所致<sup>[37]</sup>。此外,雅砻江小得石站控制区干旱传播时间较短,可能是由于该区域降水量较大,总体较为湿润,水文循环相对较快。

关于未来气候模式下的水文气象预估,Liang 等<sup>[31]</sup>基于 ISIMIP2 的 4 种 CMIP5 气候模式,预估金沙江未来径流量呈显著增加的趋势;张丹等<sup>[24]</sup>基于 CMIP6 气候模式预估金沙江流域未来降水和径流量均呈显著增加的趋势,本文结果与这些研究结果一致。金沙江流域是中国最大的水电基地,干流已建成并规划数座大型梯级电站,同时还是滇中引水和南水北调西线工程的调水源区。未来金沙江全流域干旱传播率增大,干流区干旱传播时间缩短,对区域水与能源安全构成潜在风险,亟须水资源管理部门制定适应性的水库调度方案,促进国家“西电东输”战略实施与社会经济的稳定发展。

此外,未来气候情景下的预测结果存在一定的不确定性,其主要来源于气候模式和水文模型的选取。本文选取 ISIMIP3b 的全部 5 种气候模式,利用多模式集合平均方法,一定程度上降低了模型异质性导致的不确定性,提高了气象水文变量的预测精度。然而,本文仅采用一个水文模型,可能导致模型结构的潜在不确定性。Wang 等<sup>[38]</sup>研究表明,水文模型结构的不确定性低于气候模式的不确定性,分析量化各类因素的不确定性是未来需要进一步研究的问题。此外,本文仅关注气候变化背景下的干旱传播,未考虑人类活动的影响。金沙江中下游人口密度较大,人类活动较为频繁,未来可进一步考虑农业灌溉、土地覆盖/利用变化、大坝和引水工程建设以及梯级水库调度对流域干旱传播的影响,深化对变化环境下金沙江流域干旱传播机制的理解,为流域水资源管理提供理论支撑。

4 结 论

a. 基于 CCM 算法,从因果性视角揭示了金沙江流域历史时期(1985—2014 年)汛期和枯水期的干旱传播时间分别为 1 月和 6~8 月。汛期干旱传播率(0.90~0.97)大于枯水期(0.89~0.93),空间上干流屏山站干旱传播率最大,石鼓站次之,支流小得石站最小。

**b.** 金沙江流域未来不同气候情景下汛期干旱传播时间几乎不变,而枯水期变幅较大,空间上小得石站在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下分别增加 1 月和 2 月,屏山站在各气候情景下均减少 1 月,石鼓站仅近期(2030—2059 年)在各气候情景下减少 1 月。

**c.** 金沙江流域未来干旱传播率增大,汛期增幅较小(2.50%~9.83%),枯水期增幅较大(5.82%~11.72%);空间上小得石站干旱传播率增幅最大,石鼓站次之,屏山站最小,且石鼓和小得石站近期增幅较大,屏山站远期(2060—2089 年)增幅较大;干旱传播率增幅在不同气候情景间差异较小。

参考文献:

[ 1 ] 董蓉蓉,栗晓玲,屈艳萍,等. 2022 年长江流域不同类型干旱时空响应关系[J]. 水资源保护,2024,40(3):61-70. ( DONG Rongrong, SU Xiaoling, QU Yanping, et al. Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 ( 3 ) : 61-70. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 瞿德业,杨明月,刘婷婷,等. 基于 SPEI 的洮河流域气象干旱时空特征分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(5):32-40. ( QU Deyue, YANG Mingyue, LIU Tingting, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(5):32-40. ( in Chinese ) )

[ 3 ] MA Feng, YUAN Xing, LIU Xinyue. Intensification of drought propagation over the Yangtze River Basin under climate warming[J]. International Journal of Climatology, 2023,43(12):5640-5661.

[ 4 ] DAI Meng, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Propagation characteristics and mechanism from meteorological to agricultural drought in various seasons [J]. Journal of Hydrology,2022,610:127897.

[ 5 ] 杨少康,刘冀,张特,等. 汉江上游气象-水文干旱特征变量响应概率研究[J]. 水资源保护,2023,39(5):143-151. ( YANG Shaokang, LIU Ji, ZHANG Te, et al. Study on meteorological-hydrological drought characteristic variable response probability in upper reaches of the Hanjiang River Basin [ J ]. Water Resources Protection, 2023, 39 ( 5 ) :143-151. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):1-9. ( WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2023,51(1):1-9. ( in Chinese ) )

[ 7 ] ZHOU Zhaoqiang, SHI Haiyun, FU Qiang, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Pearl River Basin [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2021,126(4):e2020JD033959.

[ 8 ] MERESA H, MURPHY C, DONEGAN S E. Propagation and characteristics of hydrometeorological drought under changing climate in Irish Catchments [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128 ( 10 ) : e2022JD038025.

[ 9 ] XU Yang, ZHANG Xuan, WANG Xiao, et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: a case study in northern China [ J ]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124147.

[ 10 ] LI Ronghui, CHEN Nengcheng, ZHANG Xiang, et al. Quantitative analysis of agricultural drought propagation process in the Yangtze River Basin by using cross wavelet analysis and spatial autocorrelation [ J ]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 280: 107809.

[ 11 ] ZHU Ye, LIU Yi, WANG Wen, et al. A global perspective on the probability of propagation of drought: from meteorological to soil moisture [ J ]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126907.

[ 12 ] JEHANZAIB M, ALI S, KIM M J, et al. Modeling hydrological non-stationarity to analyze environmental impacts on drought propagation [ J ]. Atmospheric Research, 2023, 286: 106699.

[ 13 ] JIANG Tianliang, SU Xiaoling, ZHANG Gengxi, et al. Estimating propagation probability from meteorological to ecological droughts using a hybrid machine learning copula method [ J ]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27(2):559-576.

[ 14 ] LIU Xuebang, PENG Jian, LIU Yanxu, et al. The Three Gorges Dam has weakened the drought propagation process in the Yangtze River Basin [ J ]. Journal of Hydrology, 2024, 632: 130875.

[ 15 ] HUANG Shengzhi, LI Pei, HUANG Qiang, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors [ J ]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 184-195.

[ 16 ] 薛联青,白青月,刘远洪. 人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律[J]. 水资源保护, 2023, 39 ( 1 ) : 57-62. ( XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities [ J ]. Water Resources Protection, 2023, 39 ( 1 ) : 57-62. ( in Chinese ) )

[ 17 ] SUGIHARA G, MAY R, YE Hao, et al. Detecting causality in complex ecosystems [ J ]. Science, 2012, 338 ( 6106 ) : 496-500.

[ 18 ] ZHOU Zhaoqiang, DING Yibo, FU Qiang, et al. Insights

- from CMIP6 SSP scenarios for future characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Pearl River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 899: 165618.
- [19] ZHAO Yiyang, MA Enze, ZHOU Zhaoqiang, et al. Detecting the non-separable causality in soil moisture-precipitation coupling with convergent cross-mapping[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60 ( 3 ): e2023WR034616.
- [20] SHI Haiyun, ZHAO Yiyang, LIU Suning, et al. A new perspective on drought propagation: causality [ J ]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49 ( 2 ): e2021GL096758.
- [21] SHIAU J T. Causality-based drought propagation analyses among meteorological drought, hydrologic drought, and water shortage [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2023, 888: 164216.
- [22] 吴桂炀,陈杰,陈启会,等. 金沙江流域近 50 年气象水文干旱时空变化特征[J]. *人民长江*, 2019, 50(11): 84-90. ( WU Guiyang, CHEN Jie, CHEN Qihui, et al. Spatiotemporal variation of hydro-meteorological drought in Jinsha River Basin in recent 50 years[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(11): 84-90. (in Chinese) ).
- [23] 田丰,杨建华,刘雷震,等. 地理学视角的干旱传播概念、特征与影响因素研究进展[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(1): 173-184. ( TIAN Feng, YANG Jianhua, LIU Leizhen, et al. Progress of research on the conception, characteristic, and influencing factors of drought propagation from the perspective of geographic sciences [J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(1): 173-184. (in Chinese) ).
- [24] 张丹,梁瀚续,何小聪,等. 基于 CMIP6 的金沙江流域径流及水文干旱预估[J]. *水资源保护*, 2023, 39(6): 53-62. ( ZHANG Dan, LIANG Hanxu, HE Xiaocong, et al. Estimation of runoff and hydrological drought in the Jinsha River Basin based on CMIP6 [ J ]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6): 53-62. (in Chinese) ).
- [25] 杨肖丽,马慧君,吴凡,等. 基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 40-49. ( YANG Xiaoli, MA Huijun, WU Fan, et al. Spatiotemporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6 [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 40-49. (in Chinese) ).
- [26] 鞠艳,张珂,李炳锋,等. 金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 104-110. ( JU Yan, ZHANG Ke, LI Bingfeng, et al. Spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration and its influencing factors in the Jinsha River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 104-110. (in Chinese) ).
- [27] LANGE S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(7): 3055-3070.
- [28] MÜLLER SCHMIED H, EISNER S, FRANZ D, et al. Sensitivity of simulated global-scale freshwater fluxes and storages to input data, hydrological model structure, human water use and calibration[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(9): 3511-3538.
- [29] MÜLLER SCHMIED H, CÁCERES D, EISNER S, et al. The global water resources and use model WaterGAP v2. 2d: model description and evaluation [ J ]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(2): 1037-1079.
- [30] LIANG Hanxu, ZHANG Dan, WANG Wensheng, et al. Quantifying future water and energy security in the source area of the western route of China's South-to-North water diversion project within the context of climatic and societal changes[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 47: 101443.
- [31] LIANG Hanxu, ZHANG Dan, WANG Wensheng, et al. Evaluating future water security in the upper Yangtze River Basin under a changing environment [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2023, 889: 164101.
- [32] ZHOU Zhaoqiang, DING Yibo, ZHAO Yiyang, et al. A new perspective for assessing hydro-meteorological drought relationships at large scale based on causality analysis [ J ]. *Environmental Research Letters*, 2023, 18 ( 10 ): 104046.
- [33] SUGIHARA G, DEYLE E R, YE Hao. Reply to baskerville and cobey: misconceptions about causation with synchrony and seasonal drivers [ J ]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(12): E2272-E2274.
- [34] YE Hao, DEYLE E R, GILARRANZ L J, et al. Distinguishing time-delayed causal interactions using convergent cross mapping [ J ]. *Scientific Reports*, 2015, 5 ( 1 ): 14750.
- [35] ZHAO Yiyang, ZHU Tingju, ZHOU Zhaoqiang, et al. Detecting nonlinear information about drought propagation time and rate with nonlinear dynamic system and chaos theory [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129810.
- [36] ZHANG Lu, ZHANG Zengxin, PENG Zhenhua, et al. Linkages between meteorological and hydrological drought in the Jinsha River Basin under a changing environment [ J ]. *Water*, 2023, 15(20): 3644.
- [37] ZHANG Xuan, HAO Zengchao, SINGH V P, et al. Drought propagation under global warming: characteristics, approaches, processes, and controlling factors [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 156021.
- [38] WANG Huimin, CHEN Jie, XU Chongyu, et al. A framework to quantify the uncertainty contribution of GCMs over multiple sources in hydrological impacts of climate change [ J ]. *Earth's Future*, 2020, 8 ( 8 ): e2020EF001602.

(收稿日期: 2024-07-09 编辑: 施业)