

万历和崇祯大旱的空间特征与强度研究： 重建和模拟的对比*

赵小红 邵晓华 魏学琼

南京信息工程大学地理科学学院，江苏南京 210044

摘 要 万历大旱和崇祯大旱是明末弱季风时期发生的极端干旱事件，对当时的自然和社会环境造成了严重影响，甚至可能是王朝更迭的重要触发因素。鉴于现有研究对 2 次大旱的空间特征与强度对比分析较少，本研究利用了文献资料重建的干湿等级数据集、代用指标重建的夏季降水数据集、15 个树轮和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 等代用指标记录，以及 5 个气候模式数据。为提升数据在区域尺度上的适用性和准确性，对模式数据进行了降尺度与偏差订正处理。利用以上不同类型的数据对比分析了 2 次大旱的空间特征和严重程度。文献资料表明 2 次大旱均是“南涝北旱”，代用指标则说明了万历大旱为“南涝北旱”，崇祯大旱为“南北同旱”。CESM-LME、MIROC-ES2L 和 MRI-ESM2-0 模式数据距平结果显示 2 次大旱发生时北方是共同的干旱区域（基准期为 1601—1630 年）。虽然不同来源的数据展现出 2 次大旱很可能有不同的空间特征，但都指示了华北地区是 2 次大旱受灾最严重的地区。文献资料中崇祯大旱时期华北地区“严重干旱”的区域面积大于万历大旱期间，代用指标中崇祯大旱的干旱信号比万历大旱更强烈，崇祯大旱时期 5—9 月份降水距平更偏负 20~50 mm，因此崇祯大旱比万历大旱更严重。

关键词 崇祯大旱 万历大旱 空间特征 干旱强度

第一作者简介 赵小红，女，1999 年生，南京信息工程大学硕士研究生，主要从事全球变化与区域响应工作。E-mail: 202312100056@nuist.edu.cn。

通讯作者简介 邵晓华，女，1978 年生，博士，副教授，主要从事全球变化与区域响应工作。E-mail: xiaohua.shao@nuist.edu.cn。

中图分类号: P467; P942 文献标志码: A

Investigating the Wanli and Chongzhen megadroughts in monsoon China: insights from data-model comparisons

ZHAO Xiaohong SHAO Xiaohua WEI Xueqiong

School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract The Wanli and Chongzhen megadroughts were extreme drought events that occurred during the weak monsoon period of the late Ming Dynasty, causing serious impacts on the natural and social environment at that time, and may even be important triggering factors for dynastic changes. Given the scarcity of comparative analyses on the spatial characteristics and intensity of the two megadroughts, this study integrates documentary-based dry-wet grade reconstructions, proxy-derived summer precipitation series, 15 tree-ring and stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records, and five climate-model outputs. To enhance the regional

* 国家自然科学基金项目(编号: 42172205)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42172205)]

收稿日期: 2025-10-04 改回日期: 2026-04-09

applicability and accuracy of the model data, downscaling and bias correction were performed. Based on these datasets, the spatial patterns and severity of the two megadroughts were comparatively analyzed. Literature data shows that both megadroughts were “north-south droughts”, with the North China region being drier. The proxy may indicate that the Wanli Megadrought was a “southern flood and northern drought”, and the Chongzhen Megadrought was a “north-south drought”. Anomaly outputs from the CESM-LME, MIROC-ES2L and MRI-ESM2-0 models identify northern China as a consistently drought-affected region during both megadroughts, using the 1601 ~ 1630 period as the baseline. Although data from different sources suggest that the two megadroughts may have different spatial characteristics, both indicate that North China is the region most severely affected by the two megadroughts. In the literature, there were more areas of severe drought in North China during the Chongzhen Megadrought period than during the Wanli Megadrought period. The drought signal in the proxy indicators for the Chongzhen Megadrought is more intense than that for the Wanli Megadrought. During the Chongzhen Megadrought, the May – September precipitation anomaly was 20 ~ 50 mm more negative. Therefore, the Chongzhen Megadrought was more severe than the Wanli Megadrought.

Key words Chongzhen Megadrought, Wanli Megadrought, spatial characteristics, drought intensity

About the first author ZHAO Xiaohong, born in 1999, is a master's candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. She majors in global change and regional response. E-mail: 202312100056@nuist.edu.cn.

About the corresponding author SHAO Xiaohua, born in 1978, is a Ph.D. and associate professor in Nanjing University of Information Science and Technology. She is engaged in global change and regional response. E-mail: xiaohua.shao@nuist.edu.cn.

0 引言

气候变化与人类社会的相互作用是全球变化的一个重要研究领域 (Chen *et al.*, 2024a), 已有研究表明气候变化是推动历史社会转型的关键驱动因素之一 (Wang *et al.*, 2015; Tan *et al.*, 2024)。作为以农业文明为主导的古代中国, 其社会经济发展对气候变化表现出高度敏感性, 其中极端干旱事件对农业生产、经济发展乃至社会变迁的影响尤为显著, 甚至影响到政权和文明的存亡 (Hao *et al.*, 2024)。

明末弱季风时期 (the Late Ming Weak Monsoon Period, LMWMP, 1580—1660 A.D.) (A.D. 表示公元, 下同) 作为小冰期中极端气候频发的一个时期 (Zhang *et al.*, 2008), 其显著特征是中国东部地区极端干旱事件发生频率较明朝其他时期显著增加 (Zheng *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2021), 学术界普遍认为这一时期的气候异常与王朝更迭存在密切关联 (Zhang *et al.*, 2008; Cook *et al.*, 2010; Degroot *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2022), 万历大旱 (1585—1590 A.D.) 和崇祯大旱 (1637—1643

A.D.) 便发生在明末弱季风时期 (Zhang *et al.*, 2011; Ren *et al.*, 2024; Yue *et al.*, 2024)。对于万历大旱的空间特征研究, 学者们基于不同类型的数据库进行了分析。Liu 等 (2018) 通过对比华北与江淮地区干湿指数, 提出华北地区在万历大旱期间的受灾程度明显高于江淮地区。Tian 等 (2022, 2024) 系统整理历史文献中的干旱记录, 进一步证实华北区域是该次大旱的核心重灾区。Ren 等 (2024) 则运用树木年轮稳定氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 重建了中国黄土高原西南部 1556—2015 年 7—9 月份 PDSI (Palmer Drought Severity Index) 的历史变化, 并与其他代用指标进行对比, 其研究不仅验证了华北地区在万历大旱期间遭受极端干旱的结论, 还提出万历大旱在持续时间和严重程度上与崇祯大旱相当, 均持续了 6~7 年。然而也有学者认为与万历大旱相比, 崇祯大旱的干旱程度更为严重 (Cheng *et al.*, 2010), 崇祯大旱引起的粮食产量下降产生链式反应, 导致了农民起义、社会秩序崩溃与王朝更迭等一系列问题 (Zheng *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2010; Fang *et al.*, 2024)。虽然这些学者认

为崇祯大旱是近 500 年来最为严重的干旱事件，但对于此次大旱的空间特征仍存在不同看法，有的学者认为中国南北方均受到了严重影响（Cheng *et al.*, 2010），有的学者提出华北和江淮地区是这次大旱的重灾区（Zheng *et al.*, 2006；Fang *et al.*, 2024）。总的来看，现有研究大多局限于特定区域，结果分析多基于单一信息载体，缺少 2 次大旱的强度与空间特征对比分析与多指标集合研究，且对中国东部地区整体干旱特征的系统性分析较少。

基于 IPCC 第 6 次评估报告指出的全球持续变暖背景下极端气候事件日益异常化和突发化的趋势，本研究拟综合利用代用指标记录、历史文献资料数据集和 5 个降尺度与偏差订正后的模式模拟结果，对明末弱季风期间的 2 次极端大旱事件进行对比分析。通过系统探究 2 次大旱事件的空间特征，深化对万历大旱和崇祯大旱空间结构的认识，揭示极端干旱事件的空间特征。

1 数据来源与研究方法

1.1 代用指标记录

代用指标具有记录较连续、空间分布广、能够提供过去气候要素变化的特点，是研究过去降水变化的重要载体（程海等，2019；廖昌蕊和杨保，

2024）。因此本研究总共选取了 15 条位于中国东部（105°~135°E，18°~55°N）的时间分辨率为年或年际分辨率的古气候代用指标记录数据，包括 8 条树轮数据记录、6 条石笋数据记录、1 条湖泊沉积物数据记录。具体数据信息见表 1，各站点位置见图 1。

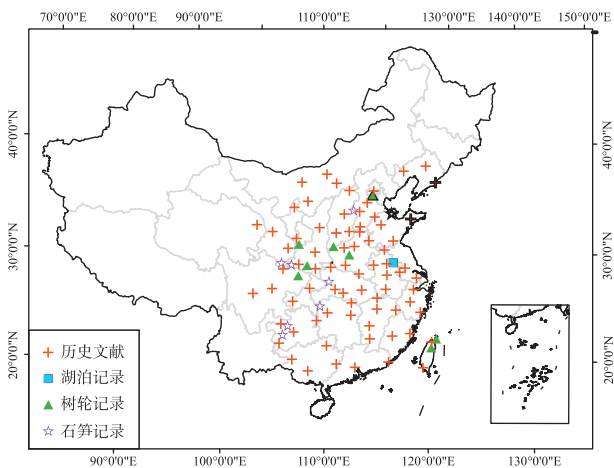


图 1 中国东部地区与代用指标记录数据点分布

Fig. 1 Eastern China and distribution of proxy indicator data points

历史文献作为一类特殊的代用指标，为重建历史干旱事件提供了关键证据。本研究选取了 Hao 等（2023）通过历史文献资料重建的空间分辨率

表 1 代用指标记录
Table 1 Proxy records

序号	地点	纬度 /°N	经度 /°E	时间范围	分辨率	类型	测年方法	气候信号	参考文献
1	华北中部	33~41	108~115	1470—2002 A. D.	1 年	树轮 $\delta^{18}\text{O}$	年轮	夏季降水	Yi <i>et al.</i> , 2012
2	西秦岭	32~35	102~107	1470—2010 A. D.	1 年	树轮 $\delta^{18}\text{O}$	年轮	5—9 月份降水距平	Yang <i>et al.</i> , 2016
3	台湾	24.5	121.4	1190—2007 A. D.	1 年	树轮 $\delta^{18}\text{O}$	年轮	夏季降水	Liu <i>et al.</i> , 2017b
4	陕县	34.81	111.15	800—2010 A. D.	1 年	树轮 $\delta^{18}\text{O}$	年轮	黄河流量	Li <i>et al.</i> , 2019
5	黄河中游	33~34	108~113	1570—2012 A. D.	1 年	树轮 $\delta^{18}\text{O}$	年轮	黄河流量	Chen <i>et al.</i> , 2020
6	台湾	25.3	122.01	1259—2006 A. D.	1 年	树轮 $\delta^{18}\text{O}$	年轮	3—8 月份降水量	Sun <i>et al.</i> , 2021
7	北京	39.56	116.2	1550—2022 A. D.	1 年	树轮 $\delta^{18}\text{O}$	年轮	年降水量	Chen <i>et al.</i> , 2024b
8	大巴山	32	107	1560—2023 A. D.	1 年	树轮 $\delta^{18}\text{O}$	年轮	4—11 月份水量平衡	Yue <i>et al.</i> , 2024
9	莲花洞	29.15	109.55	1341 B. C.—2011 A. D.	1.5 年	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$	夏季降水	Yin <i>et al.</i> , 2014
10	珍珠洞	38.25	113.7	90—2010 A. D.	1~2 年	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	^{230}Th , ^{238}U	夏季降水	Yin <i>et al.</i> , 2017
11	五鹿洞	26.3	105.5	1357 B. C.—1916 A. D.	2~3 年	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	^{230}Th , ^{238}U	夏季降水	Zhao <i>et al.</i> , 2020
12	大鱼洞	33.08	106.18	1249—1983 A. D.	2~3 年	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	^{230}Th , ^{238}U , ^{232}Th	夏季降水	Tan <i>et al.</i> , 2009
13	曲家洞	37.7	118.4	1556—1713 A. D.	1~3 年	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	^{230}Th , ^{238}U	夏季降水	Zhao <i>et al.</i> , 2021
14	犀牛洞	31.52	110.57	1165—1848 A. D.	1~2 年	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	^{230}Th , ^{238}U	夏季降水	Zhao <i>et al.</i> , 2021
15	女山湖	32.99	118.12	240—2013 A. D.	1~2 年	湖泊沉积物 a^*/L^*	^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{226}Ra	年降水量	Jiang <i>et al.</i> , 2021

为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、时间分辨率为 1 年的中国东部 1500—2000 年旱涝 (D/F) 等级数据集。研究论文将历史文献资料逐年划分旱涝等级, 其中 1 级表示严重干旱、2 级表示干旱、3 级为正常、4 级表示洪涝、5 级表示严重洪涝。

数据中还包括了由 Shi 等 (2018) 基于树轮宽度和中国历史资料重建的 1470—2013 年亚洲夏季降雨量数据集 (RAP), 水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。

1.2 模式数据

模式资料具有空间分布均匀的特点, 且先前的学者认为模式能够模拟出观测资料所反映的中国东部降水空间分布特征 (彭友兵等, 2019), Tang (2021) 计算出 MRI-ESM2-0 对华南地区极端降水指数的模拟平均误差仅为 9.76%, 说明其对华南地区降水具有较强的模拟能力。学者们对 CMIP6 中的模式模拟中国东部降水情况进行技巧评分, 得分越接近 1 表明降水模拟情况越好, 模式 MRI-ESM2-0、MIROC-ES2L 以及 ACCESS-ESM1-5 得分约 0.7~0.8, 说明模式对中国东部降水模拟情况较好 (王予等, 2021; 赵丹等, 2022)。曹博文等 (2023) 分析了 CESM-LME 中国东部夏季降水与观测数据的 EOF 前 3 个主模态, 显示两者结果一致。基于上述评估结果, 本研究选用了上述 4 个模式数据, 以及 HadCM3B-M2.1 模式数据。模式信息见表 2。

1.3 观测数据

为验证气候模式对降水空间分布的模拟能力, 以及利用观测数据对模式数据进行偏差订正, 选用了由英国东英吉利大学开发、英国国家大气科学中心 (National Centre for Atmospheric Science, NCAS) 制作的 1901—2021 年 CRU 数据集, 该数据集时间分辨率为月, 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

1.4 模式降尺度与偏差订正

等距离累计分布函数 (EDCDFm) 能有效捕捉气候要素极值, 提高模式降尺度后的准确度和模型模拟的精度 (Wang *et al.*, 2019; 周嘉月等, 2023), 因此本研究选用等距离累计分布函数 (EDCDFm) 用于提高模式分辨率与精确度。先利用线性插值将模式数据插值到 0.5° 空间分辨率, 再分别将各个模式的月降水量基于 CRU 对应格点序列的累计分布函数 (CDF) 进行偏差校正。

2 结果

2.1 模拟结果验证

泰勒图能够显示不同模式模拟结果与观测/再分析资料的对应程度 (Taylor, 2001), 而中国东部位于季风气候区, 降水集中在 5—9 月份, 降水量超过年降水量的 55% (Wang and Ding, 2008; Liu *et al.*, 2009), 因此本研究选用泰勒图分析了降尺度与偏差订正后的 5 个模式对 1919—1948 年 5—9 月份中国东部降水模拟能力 (图 2)。偏差订正后模式 HadCM3B-M2.1 与 CESM-LME 相关系数在 0.2 左右, 另外 3 个模式相关系数大于 0.6, 标准差较接近 1。此外, 还运用了柱状图来对比模式数据与观测数据的 30 年月均降水数据 (图 3), 模式和观测数据均显示类似的季节变化, 各模式与观测值相比, MRI-ESM2-0 最大偏差为 28 mm, MIROC-ES2L 与 ACCESS-ESM1-5 最大偏差为 21 mm, HadCM3B-M2.1 最大偏差为 54 mm, CESM-LME 最大偏差约 80 mm, 因此模式 MRI-ESM2-0、MIROC-ES2L 以及 ACCESS-ESM1-5 较接近观测值。

2.2 数据评价

石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的指示意义存在争议, 即其主要反

表 2 模式数据基本信息
Table 2 Basic information of model data

模式名	国家	分辨率 (经向网格数×纬向网格数)	强迫因子
ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	192×145	太阳活动、火山活动、温室气体、臭氧、气溶胶、土地利用 (Mackallah <i>et al.</i> , 2022)
CESM-LME	美国	144×96	太阳活动、火山活动、温室气体、臭氧、气溶胶、土地利用、轨道参数 (Otto-Bliesner <i>et al.</i> , 2016)
HadCM3B-M2.1	英国	720×180	温室气体、轨道参数、淡水强迫、冰盖边界条件 (Armstrong <i>et al.</i> , 2019)
MIROC-ES2L	日本	128×64	太阳活动、火山活动、土地利用、大气成分等相关 (Hajima <i>et al.</i> , 2020)
MRI-ESM2-0	日本	320×160	太阳活动、火山活动、温室气体、臭氧和气溶胶 (Yukimoto <i>et al.</i> , 2019)

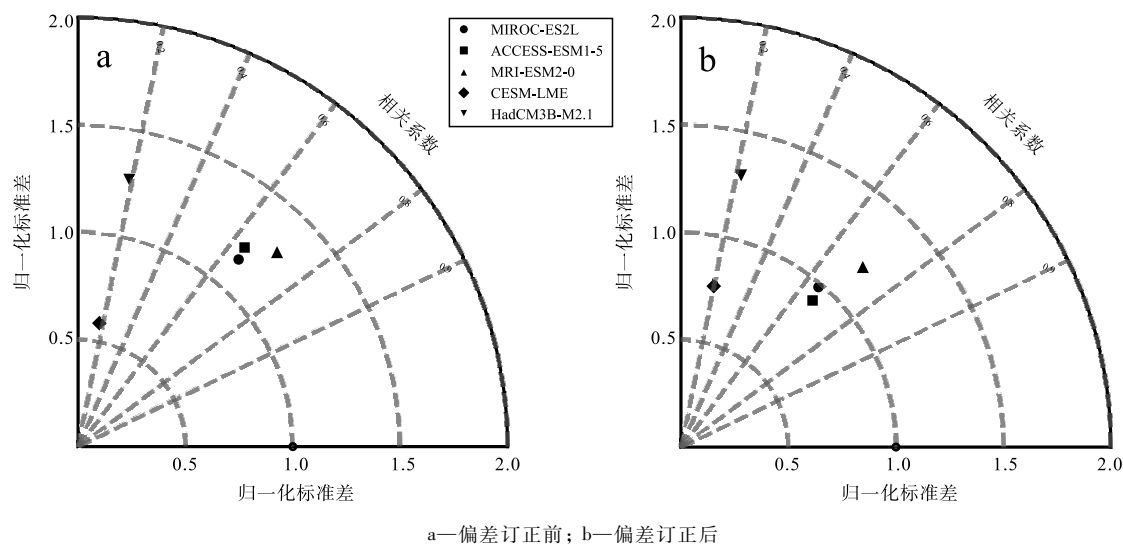


图 2 1919—1948 年中国东部 5—9 月份降水泰勒图

Fig. 2 Taylor diagram of May to September precipitation in eastern China from 1919 to 1948

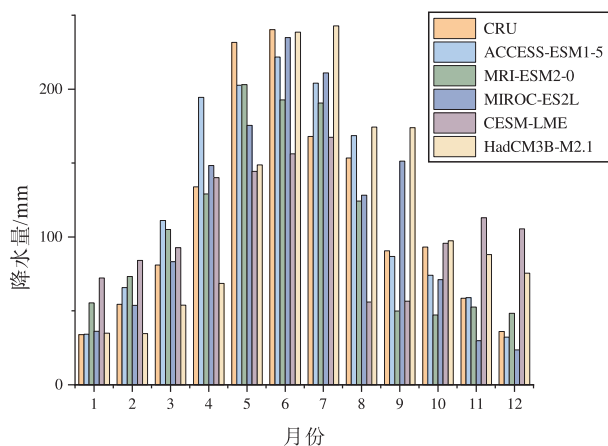


图 3 1919—1948 年中国东部月平均降水的观测与模式模拟对比

Fig. 3 Observations and model simulations of monthly mean precipitation in eastern China from 1919 to 1948

映局地降水量还是大尺度水汽源与输送路径的变化 (Liu *et al.*, 2017a; Xue *et al.*, 2025)。为确证其局地水文指示意义, 本研究进行了严格筛选: 首先, 依据数据源对 $\delta^{18}\text{O}$ 的定义进行收集; 其次, 优先选择那些在其原始文献中, 通过结合 $\delta^{13}\text{C}$ 、微量元素比值 (如 Mg/Ca 、 Sr/Ca) 等多指标分析 (Wu *et al.*, 2025), 证实 $\delta^{18}\text{O}$ 与局地水文过程明确相关的记录。本研究所用的莲花洞、大鱼洞、万象洞记录显示 $\delta^{18}\text{O}$ 与生长速率变化高度一致; 黑洞记录中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Mg/Ca 强耦合; 曲家洞、犀牛洞等记录中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 、 Mg/Ca 强耦合。这些多指标的一致性

共同支持了所选石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录可用于分析局地降水变化, 当石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数值偏正时, 说明季风降水偏少, 反之则说明季风降水偏多 (Wang *et al.*, 2008)。

树轮宽度对气候的响应具有地域特异性, 简单套用重建模型可能夸大历史干湿周期的长度 (Liu *et al.*, 2019)。针对此, 本研究筛选的树轮数据均位于研究关注的季风区内, 确保其气候响应关系具有区域代表性。同时, 这些记录在 2 次大旱的表现与已知史实吻合, 未出现对干湿信号的明显夸大, 故认为其适用于本研究。

历史记载存在时空分布不均、记录不连续、主观性强, 以及定量化方法影响结果等问题 (郑景云等, 2014)。尽管个人笔记等记载具有直接性, 但也存在“感觉误差” (葛全胜和张丕远, 1990)。本研究使用的历史气候重建数据集以《中国近五百年旱涝分布图集》为基础, 通过对原始文献资料进行科学的时空插值, 在克服上述不足的同时, 最大限度地保留了历史信息的真实性, 因此予以采用。

模式数据的不确定性主要源于外强迫因子设置、空间分辨率等因素。本研究按以下两步标准筛选用于核心分析的模式: 首先, 依据物理机制完备性进行初筛。多项研究指出, 在百年至千年尺度上, 太阳活动与火山活动是驱动东亚季风降水变化的主要自然外强迫因子 (孙炜毅等, 2022)。因

此, 未包含这 2 种关键强迫的模式 HadCM3B-M2.1 具有较大的不确定性。其次, 基于模拟性能进行优选。通过计算各模式模拟结果与观测数据之间的月降水平均值、绘制泰勒图, 并对比降水距平的空间特征发现, MRI-ESM2-0 与 MIROC-ES2L 2 个模式在再现降水平均值及空间分布方面表现最优, 与重建数据的吻合度最高。因此, 文中利用模式分析空间特征以及降水值将以 MRI-ESM2-0 与 MIROC-ES2L 的结果为准。同时, 保留了模式 ACCESS-ESM1-5、CESM-LME 及 HadCM3B-M2.1 的数据。这主要出于 2 点考虑: 一是用于多模式交叉验证, 量化结果的不确定性范围, 特别是在讨论极端事件时, 多源数据对比可为厘清争议提供参考; 二是通过对比不同强迫组合下的模拟差异, 为理解模式不确定性来源、提高模拟能力提供参考。

为降低模式的不确定性, 本研究对模式进行了降尺度与偏差订正, 从泰勒图的分析结果来看, 对改进模式的不确定性有一定作用, 但空间特征上模式分析结果仍然相差较大, 所以本研究也尝试通过计算模式集合平均来降低模式的不确定性, 提高模式与重建数据的匹配度, 但从计算结果(图 4)来看, 模式的集合平均也未能达到理想的效果, 所以还是保留了各个模式间单独的计算结果。

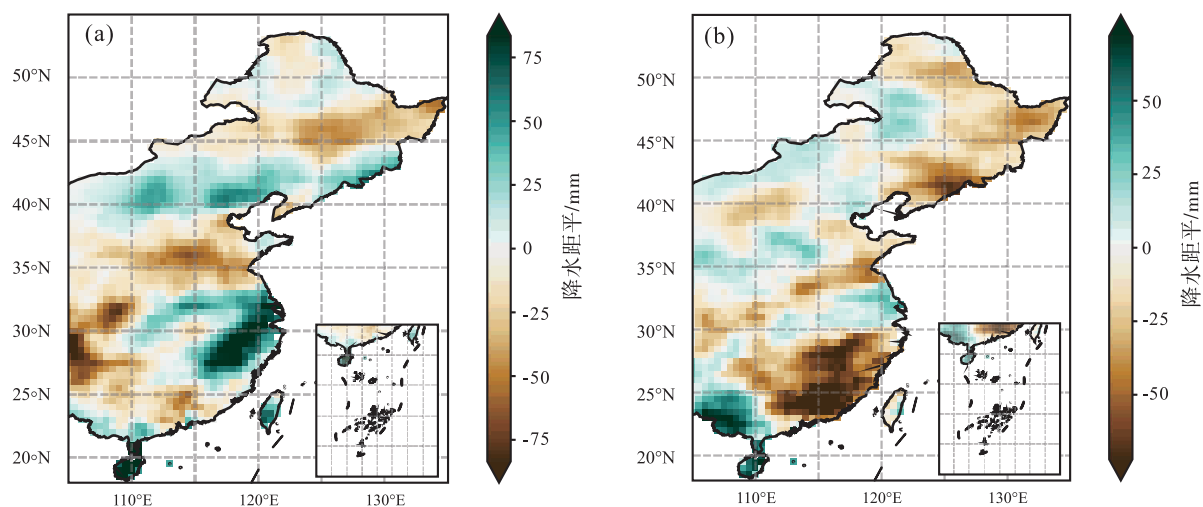
2.3 万历大旱和崇祯大旱的重建数据对比

本研究收集的代用指标如图 5 所示, 参考先前的学者对中国东部南北方的划分 (Liu *et al.*, 2018;

王健等, 2019; Yue *et al.*, 2024), 本研究以 33°N 作为南北分界线。通过对中国东部石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据的对比分析(图 5-A), 发现万历大旱时除珍珠洞外北方石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 较平均值偏正, 南方石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负, 崇祯大旱时无论南北石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 较平均值均偏正, 说明万历大旱降水空间格局为“南涝北旱”, 而崇祯大旱则表现为南北一致较早。此外, 女山湖的湖泊沉积记录也显示出华中地区万历大旱振幅较崇祯大旱振幅偏小, 说明崇祯大旱时华中地区干旱程度更明显。树轮数据重建的降水数据中(图 5-B), 2 次大旱南北方均有显著的降水波动, 数值明显下降, 出现低谷期, 振幅约为年代际振幅的 1~2 倍, 表现出明显的干旱特征。

将代用指标数据记录的干湿情况在地图上进行标注(图 6), 万历大旱呈现出显著的“南涝北旱”空间分布特征(图 6-a), 具体表现为长江流域以北地区普遍偏干, 而以南地区则相对偏湿。崇祯大旱的干旱范围更广(图 6-b), 几乎涉及到整个中国东部地区。从代用指标重建结果来看, 虽然 2 次大旱的树轮重建降水数据差异较小, 但崇祯大旱时石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 更为偏正约 1‰ , 湖泊沉积物的红度值明显增大。这些证据表明, 与万历大旱相比, 崇祯大旱不仅影响范围更广, 且干旱程度更为严峻。

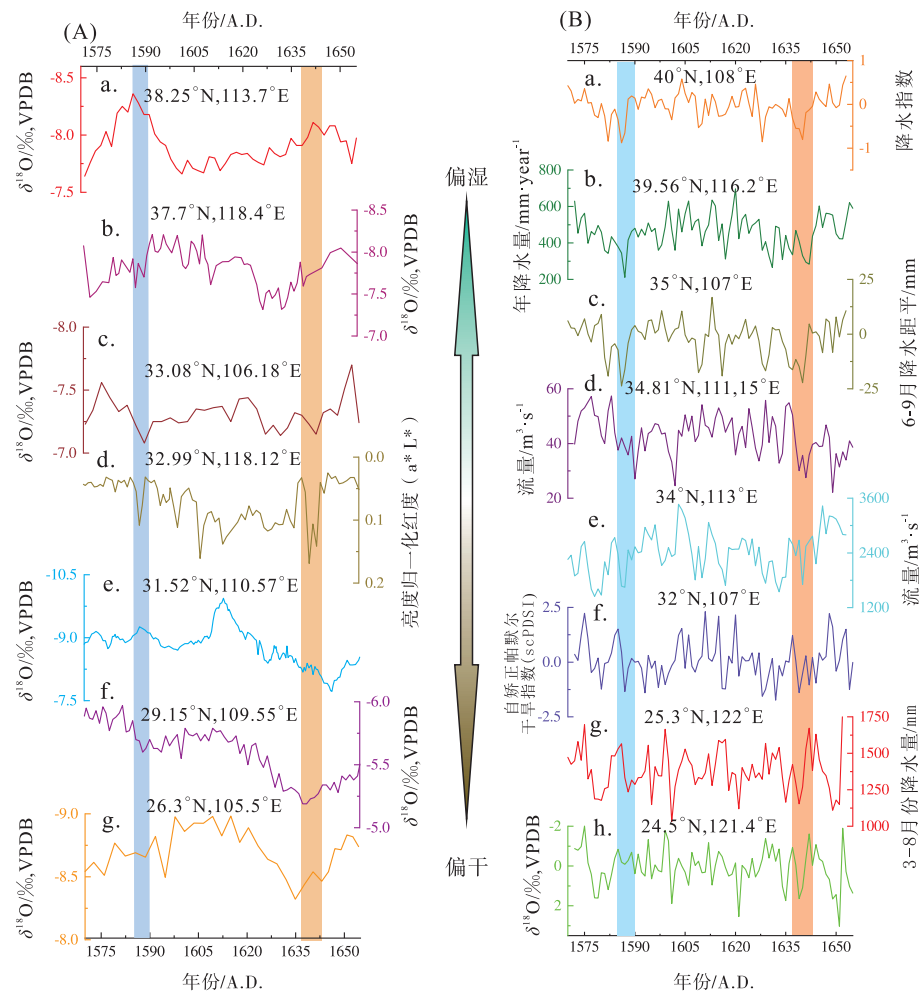
用 D/F 等级数据计算了 2 次大旱的干湿等级平均(图 7-a, 7-b), 图中万历大旱华北地区平均干湿等级在 1.5 及以下(图 7-a), 而北方平均干湿等级在 2~1.5 之间, 南方干湿等级整体在 2.5 及



a—万历大旱; b—崇祯大旱。均值为 1601—1630 年 5—9 月份降水均值

图 4 利用模式集合平均计算 2 次大旱 5—9 月份降水距平

Fig. 4 Precipitation anomalies from May to September for two megadroughts calculated using model ensemble mean



A—洞穴石笋与湖泊记录: a. 珍珠洞、b. 曲家洞、c. 大鱼洞、d. 女山湖、e. 犀牛洞、f. 莲花洞、g. 五鹿洞; B—树轮记录: a. 华北中部、b. 北京、c. 西秦岭、d. 陕县、e. 黄河中游、f. 大巴山、g. 台湾、h. 台湾。蓝色柱代表万历大旱 (1585—1590 A.D.), 橙色柱代表崇祯大旱 (1637—1643 A.D.), 图中的经纬度数值表示数据点位置, 从上往下表示为从北往南排列, 华北中部PI、树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 代表夏季降水, 女山湖 a^*/L^* 、北京数据代表年降水量, 台湾数据代表3—8月份降水量, 西秦岭数据代表5—9月份降水距平, 陕县与黄河中游数据代表黄河流量, 大巴山数据代表4—11月份的水量平衡

图 5 代用指标记录的万历和崇祯大旱干湿情况

Fig. 5 Wet and dry conditions of Wanli and Chongzhen megadroughts recorded by proxy indicators

以上, 南方沿海地区干湿等级可以达到 3.5, 表明万历大旱时南方整体偏湿润。崇祯大旱的平均干湿等级显示中国东部呈现出“南涝北旱”的空间格局(图 7-b), 北方显示等级在 2 及以下, 降水整体偏少, 干旱中心也位于华北地区, 干湿等级在 1.5 以下; 南方干湿等级在 3 及以上, 等级最大的区域位于东南沿海地区, 平均干湿等级在 4 及以上。

利用 RAP 计算 2 次大旱夏季降水距平(图 7-c, 7-d), 万历大旱夏季降水距平(图 7-c) 显示东北地区降水距平偏正 20 mm, 其余区域夏季降水

距平偏负约 20~60 mm, 华北地区作为干旱中心偏负约 60 mm 左右。崇祯大旱夏季降水距平表明(图 7-d) 中国东部大部分区域降水距平偏负, 整体偏负范围在 25~60 mm, 东北与南方沿海地区降水距平偏正, 南方沿海作为湿润中心, 降水偏正约 40 mm。

前面利用数据集获取了 2 次大旱的干湿空间分布, 而为对比 2 次大旱干旱强度, 计算了中国东部 2 次大旱干湿等级与夏季降水均值时间序列(图 8)。RAP(图 8-a) 显示万历大旱与崇祯大旱最低降水量相同约 320 mm, 但崇祯大旱期间最大

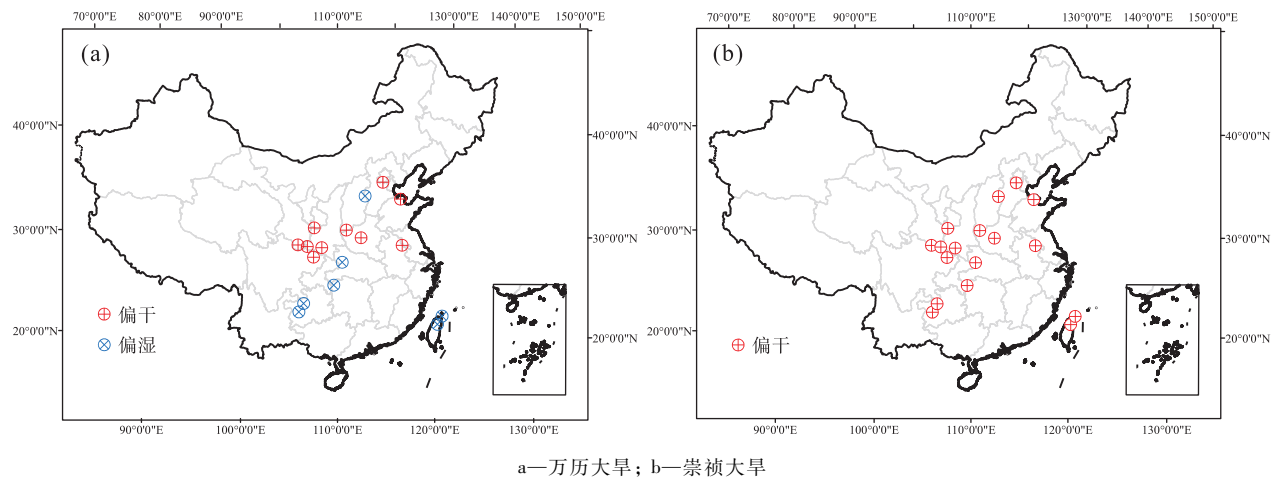


图 6 代用指标记录的万历和崇祯大旱干湿空间特征

Fig. 6 Spatial characteristics of wetness and dryness during Wanli and Chongzhen megadroughts recorded by proxy indicators

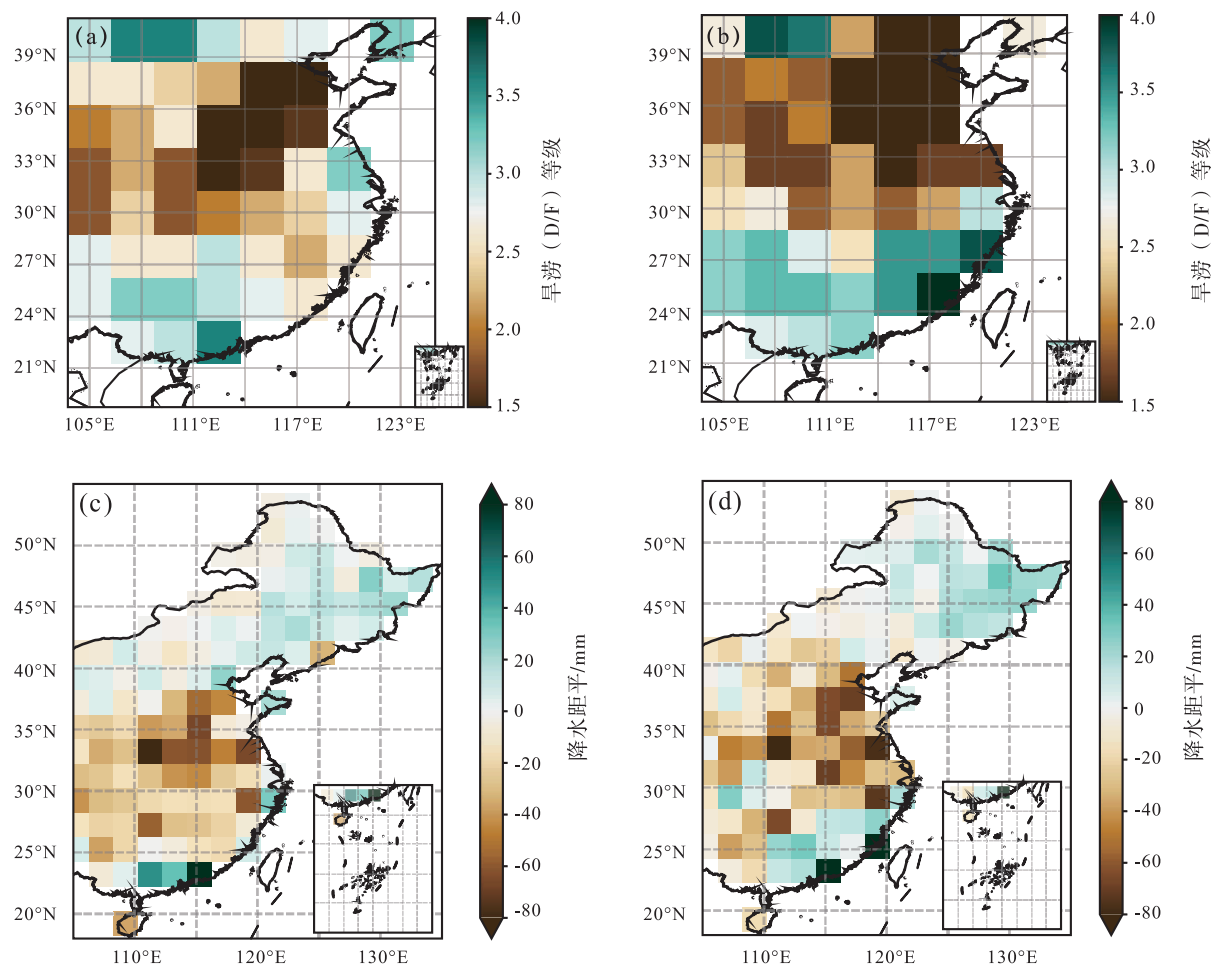
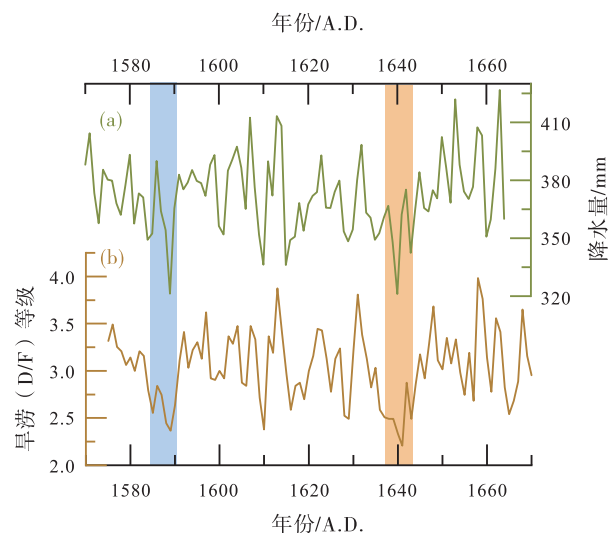


图 7 旱涝 (D/F) 等级与 RAP 中万历和崇祯大旱的干旱空间特征

Fig. 7 Spatial characteristics of Wanli and Chongzhen megadroughts recorded in D/F grades and RAP

夏季降水量为 375 mm, 低于万历大旱的夏季最大降水量 389 mm。同时, D/F 等级序列(图 8-b)显示万历大旱时最低等级为 2.4, 崇祯大旱最低等级为 2.2。



a—RAP; b—D/F 等级。蓝色柱代表万历大旱 (1585—1590 A.D.), 橙色柱代表崇祯大旱 (1637—1643 A.D.), D/F 等级越低, 表示干旱越严重

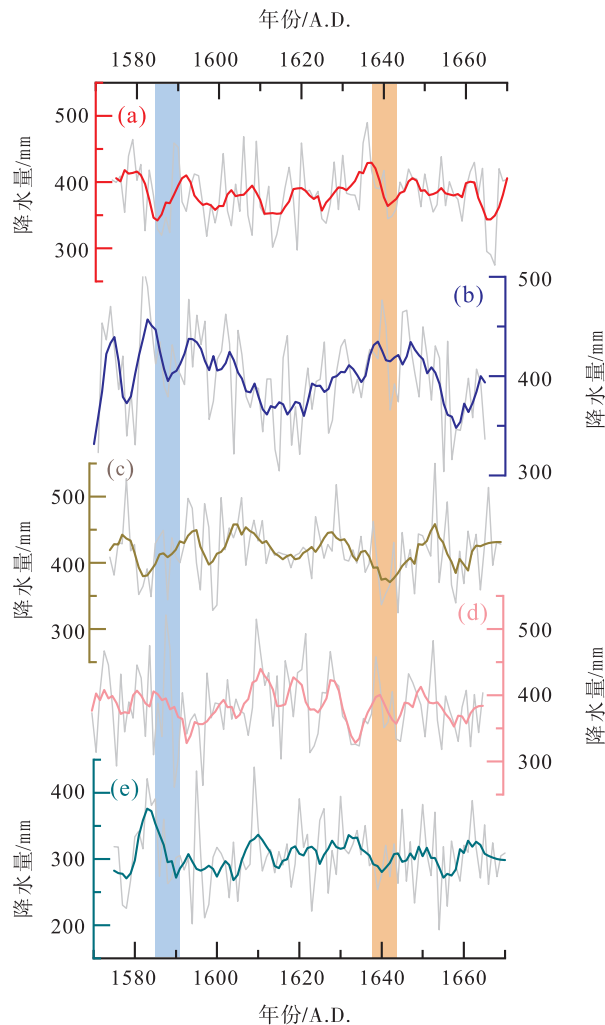
图 8 1570—1670 年中国东部 D/F 等级均值与 RAP 均值
Fig. 8 Mean D/F grades and RAP value in eastern China from 1570 to 1670

2.4 万历大旱和崇祯大旱的模式数据对比

北方是 2 次大旱的共同影响区, 因此利用模式数据计算了中国北方 5—9 月份降水时间序列, 为获得年代际信号对其进行了 11 年平滑处理, 图 9 中 5 个模式均显示万历大旱处在降水量的低谷期或下降期, 而崇祯大旱时 5 个模式显示结果不一致, ACCESS-ESM1-5 与 MRI-ESM2-0 显示崇祯大旱处在降水增加的阶段, 另 3 个模式显示崇祯大旱处于降水减少的时期。

因降水年际振荡在模式数据中存在不确定性, 而年代际振荡相对可信一些 (郑景云等, 2016; Katzenberger and Levermann, 2024), 图 9 显示万历大旱发生在 1583—1592 A.D., 崇祯大旱发生在 1636—1645 A.D., 以年代际时间尺度计算 2 次大旱 5—9 月份降水距平, 分析 2 次大旱的空间特征。

对万历大旱 5—9 月份降水量作降水距平 (图 10), 结果显示 5 个模式降水距平的空间特征相差较大, ACCESS-ESM1-5 显示中国东部呈现出“南北旱中间涝”的降水空间格局, CESM-LME 显

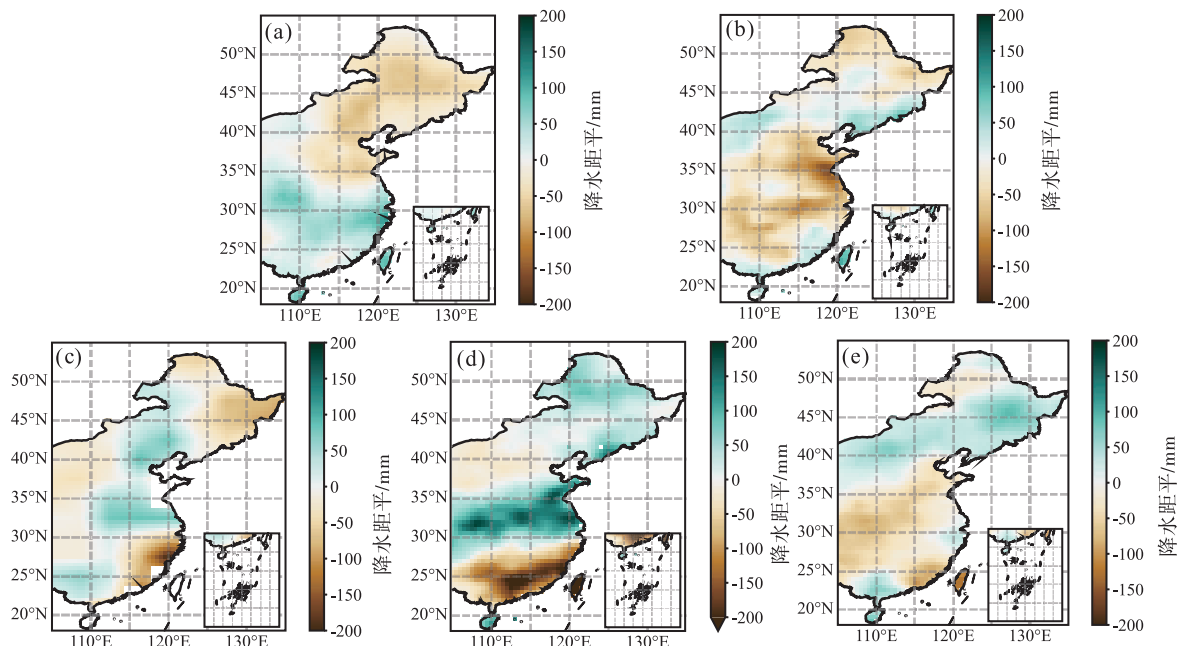


a—HadCM3B-M2.1; b—ACCESS-ESM1-5; c—MIROC-ES2L; d—MRI-ESM2-0; e—CESM-LME。灰色线代表原始数据, 彩色曲线代表 11 年平滑后的记录, 蓝色柱代表万历大旱 (1585—1590 A.D.), 橙色柱代表崇祯大旱 (1637—1643 A.D.)

图 9 中国北方 5—9 月份降水时间序列
Fig. 9 Time series of May–September precipitation over northern China

示 37°N 以北降水距平偏正, 南方降水距平整体偏负, 干旱中心在华南降水距平偏负约 75 mm, HadCM3B-M2.1 的距平结果表明华南地区作为干旱中心, 降水偏负约 100 mm, MIROC-ES2L 的距平结果显示以 35°N 为分界线, 呈现出明显的“南涝北旱”, 华北地区降水偏负约 50 mm, MRI-ESM2-0 计算结果显示中国东部地区降水距平整体偏负, 华北地区偏负约 100 mm。

崇祯大旱 5—9 月份降水距平结果表明 (图 11), ACCESS-ESM1-5 与 HadCM3B-M2.1 的距平均表现为“南旱北涝”的空间特征, ACCESS-



a—MIROC-ES2L; b—MRI-ESM2-0; c—HadCM3B-M2.1; d—ACCESS-ESM1-5; e—CESM-LME。

绿色表示降水距平偏正、棕色表示降水距平偏负，均值为 1601—1630 年 5—9 月份降水均值

图 10 万历大旱 5—9 月份降水距平

Fig. 10 Precipitation anomalies from May to September during Wanli Megadrought

ESM1-5 显示华南地区作为干旱中心偏负约 200 mm，HadCM3B-M2.1 计算结果显示华南地区偏负约 100 mm，CESM-LME 距平表明干旱范围更广，干旱中心位于南方，降水距平偏负约 150 mm，MIROC-ES2L 距平结果整体呈现出“南涝北旱”的空间特征，南方地区除华南沿海降水偏负约 50 mm 外，其余地区降水距平均偏正，北方降水距平偏负约 70 mm，MRI-ESM2-0 距平结果显示中国东部整体降水距平偏负，干旱中心降水距平偏负约 80 mm。

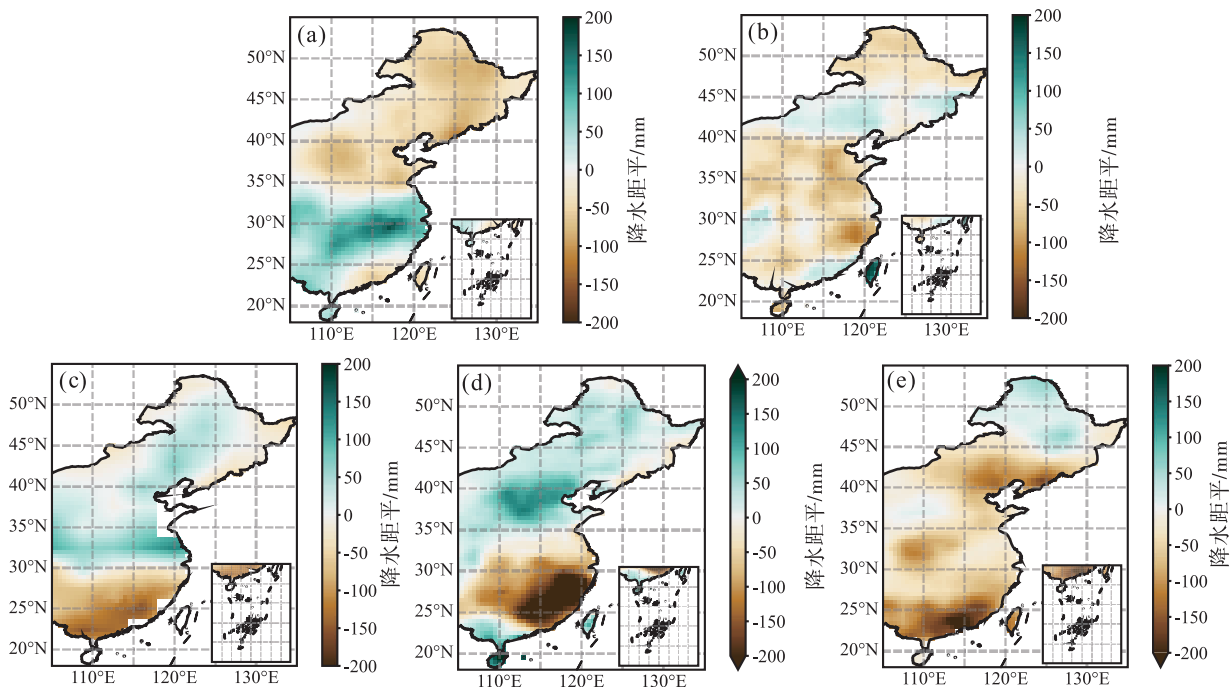
3 讨论

3.1 2 次大旱的空间特征

Ren 等 (2024) 结合树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 与其他代用指标记录，表明万历大旱时中国北方为此次事件的主要干旱区域。代用指标也进一步确认了万历大旱时 (图 5-a)，中国东部降水呈现出“南涝北旱”的空间特征。干湿等级数据所反映的干旱范围与代用指标较为一致，均表明北方为主旱区 (图 6-a)，南方受干旱影响相对较小。基于历史资料分析的多项研究一致认为，万历大旱具有北方灾情重、南方

影响轻的典型特征，是中国东部一次重大干旱事件 (Bi *et al.*, 2020; Tian *et al.*, 2024)。张德二 (2023) 则在《中国历史极端气候事件复原研究》(后简称《复原研究》) 中指出，万历大旱早期主旱区集中于河北、山西及河南地区，呈现典型的“南涝北旱”格局；干旱后期则转为“南北皆旱”，华北与江淮地区均出现大范围干旱。模式距平结果未得到统一的空间分布特征，其中 MIROC-ES2L 模式的分析结果与代用指标及历史记载较为吻合，均支持“南涝北旱”的空间型，MRI-ESM2-0 分析结果显示东部地区降水距平整体偏负，华北地区降水距平最为偏负，彭友兵等 (2019) 基于 CESM-LME 对中国东部持续性干旱事件的分析，也提出万历大旱呈现“南北同旱”的分布特征，以上分析均一致认为北方地区为干旱核心区。

王健等 (2019) 对比中国东部石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录，提出在崇祯大旱期间偏北地区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 显著偏重，而偏南地区变化不明显，指示其空间格局为“南涝北旱”。然而，代用指标记录显示中国东部呈现“南北同旱”的特征 (图 5-b)。D/F 等级与 RAP 数据均表明干旱集中影响华北与江淮地区，尤其华北地区灾情显著 (图 6-b, 6-d)。Zheng 等



a—MIROC-ES2L; b—MRI-ESM2-0; c—HadCM3B-M2.1; d—ACCESS-ESM1-5; e—CESM-LME.

绿色表示降水距平偏正、棕色表示降水距平偏负，均值为 1601—1630 年 5—9 月份降水均值

图 11 崇祯大旱 5—9 月份降水距平

Fig. 11 Precipitation anomalies from May to September during Chongzhen Megadrought

(2006) 通过建立中国东部降水指数集并分析各地区降水变率，同样指出北方为崇祯大旱主要受灾区域。刘倩等 (2014) 则认为干旱早期主要影响华北与江淮地区，后期旱区主要分布在长江中游，但 Liu 等 (2018) 基于历史文献的系统研究提出该事件存在南北差异，表现为“南涝北旱”。MIROC-ES2L 的干湿空间特征 (图 10) 与干湿等级平均值 (图 6-b) 较为一致，干旱中心位于华北，大部分北方区域显示明显干旱，南方则降水偏多，整体呈现“南涝北旱”型。由此可见，崇祯大旱发生时，模式与重建的数据显示北方依旧为主要旱区，实际影响的范围可能波及到江淮地区，模式数据显示崇祯大旱时南方偏湿，但重建数据显示南方部分地区偏干。

3.2 2 次大旱的强度对比

尽管树轮数据指示 2 次大旱的干旱程度较为接近，但石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示崇祯大旱较万历大旱偏正约 1‰，表明其干旱程度可能更为严峻。历史文献中对 2 次事件严重程度的记载亦存在差异，Tian 等 (2024) 对历史旱情记载进行整理发现，万历大旱期间华北地区共有超过 225 个县发生夏旱，其

中华北多地连续 3~4 年遭受夏旱，严重影响了农业生产。另据《复原研究》统计，万历大旱中最严重的 1586 年共有 222 个县受旱，而崇祯大旱中最严重的 1640 年受旱县数高达 512 个，远多于万历时期 (张德二, 2023)。同时，崇祯大旱的干旱等级较万历大旱低 0.2，亦指示其干旱程度更为严重。RAP 重建结果显示 2 次事件均属极端干旱 (图 6)，但崇祯大旱的旱区范围更为广泛，万历大旱主要集中于华北地区，而崇祯大旱则进一步扩展至华北及江淮大部分地区，且降水距平较万历大旱偏负约 20 mm。《复原研究》中记载大旱时民众不仅以土拌树叶充饥，万历大旱期间有零星地区出现“人相食”现象，而崇祯大旱时发展为华北及江淮等多处地区均记录到食人事件 (张德二, 2023)，这些记录也从另一个侧面说明了崇祯大旱较万历大旱更严重，亦隐喻了崇祯大旱时社会秩序与道德体系的崩溃 (Gao *et al.*, 2024)。此外，据《复原研究》估算，万历大旱主旱区山西临汾最低年降水量为 186 mm，约为正常年份的 1/3；而崇祯大旱河南沁阳年降水量仅 96 mm，相当于正常年份的 20% (张德二, 2023)。在模式结果方面，除 MRI-

ESM2-0 显示崇祯大旱降水负距平略弱于万历大旱外, 其余 4 个模式均表明崇祯大旱的干旱强度更大。其中 CESM-LME 模拟的降水负距平差异最为显著, 崇祯大旱较万历大旱偏负约 75 mm; 其他模式的结果则显示这一差异在 25~50 mm 之间。

3.3 数据分析结果差异较大的原因

中国东部地区作为季风气候区, 其降水量与夏季风强弱密切相关, 而夏季风的变化受到外强迫调控 (Liu *et al.*, 2011)。不同气候模式外部强迫因子存在差异, 太阳辐射、火山爆发、温室气体, 以及人类活动等外强迫因子会对大气环流造成影响, 而不同模式或不同强迫数据集对这些因子的选取不同, 导致定量响应差异很大 (Zanchettin *et al.*, 2016)。同时, 不同的对流参数化方案、云微物理方案, 以及与边界层耦合的实现方式, 会显著改变模式对降水的模拟 (Prein *et al.*, 2015; Maher *et al.*, 2018)。分辨率也是导致模式分析出现较大差异的原因之一, 在高分辨率模式中误差显著降低, 同一机构开发的高分辨率模式表现通常优于其低分辨率版本, 凸显了分辨率提升对改善模式性能的重要作用 (Chen *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2025)。另外, 全球模式在大尺度上表现较好 (Fernández-Donado *et al.*, 2013), 但在区域尺度上具有局限性 (Zhou *et al.*, 2019), 特别是中国季风区还受到青藏高原的影响 (Jiang *et al.*, 2016; Agyekum *et al.*, 2018)。

重建数据中, 石笋时间标尺不一致 (谭明, 2005)、树轮数据对夏季降水敏感 (Cook *et al.*, 2010; Tian *et al.*, 2025), 而历史文献的记载常记录社会可感知的极端旱涝现象, 其对事件强度的敏感性更高, 但也可能存在人为夸大或记载缺失等问题 (郑景云等, 2014)。这些机制差异共同造成了大旱在不同资料中的幅度、起止时间、空间影响范围存在不一致。

4 结论

本研究基于模式数据、历史文献记录及代用指标数据, 系统分析了万历大旱与崇祯大旱的降水空间格局和强度特征。主要研究结论如下:

1) 空间特征分析表明, 华北地区是 2 次大旱事件的共同影响区域, 万历大旱主要呈现为“南涝北旱”的空间格局, 而崇祯大旱主旱区位于华

北, 但重建数据显示实际影响范围更广泛, 可能扩展到江淮甚至华南地区, 即崇祯大旱影响范围更广。

2) 强度对比分析表明, 崇祯大旱降水距平较万历大旱更偏负, 模式最大偏负约 50 mm, 重建的夏季降水表明崇祯大旱降水距平较万历大旱偏负约 20 mm, 历史文献中崇祯大旱干旱等级均值较万历大旱低 0.2, 石笋对比也显示崇祯大旱较万历大旱更偏正 1‰。

3) 对比分析结果显示, 基于模式数据、历史文献和代用指标数据的 3 类证据均表明, 崇祯大旱在干旱空间范围和干旱强度上均较万历大旱更为严重。

致谢 真诚地感谢《古地理学报》两位匿名审稿专家提出的建设性意见和建议, 感谢编辑部老师的悉心编辑。

参考文献 (References)

- 曹博文, 严蜜, 刘征宇, 刘健, 宁亮, 温琴, 孙炜毅, 刘雅雯, 曾程, 李汉文, 孔心唯. 2023. 过去千年东亚季风环流与内部变率对中国东部年代际降水分型的影响研究. 第四纪研究, 43(4): 1076-1088. [Cao B W, Yan M, Liu Z Y, Liu J, Ning L, Wen Q, Sun W Y, Liu Y W, Zeng C, Li H W, Kong X W. 2023. A study on the relationship between the summer rainfall pattern and the East Asian monsoon circulation and internal variability in Eastern China at decadal scale over the past millennium. Quaternary Sciences, 43(4): 1076-1088]
- 程海, 张海伟, 赵景耀, 宁有丰, 李瀚瑛, Kathayat G. 2019. 中国石笋古气候研究的回顾与展望. 中国科学: 地球科学, 49(10): 1565-1589. [Cheng H, Zhang H W, Zhao J Y, Ning Y F, Li H Y, Kathayat G. 2019. Chinese stalagmite paleoclimate researches: A review and perspective. Science China Earth Sciences, 49(10): 1565-1589]
- 葛全胜, 张丕远. 1990. 历史文献中气候信息的评价. 地理学报, 45(1): 22-30. [Ge Q S, Zhang P Y. 1990. The evaluation on climatic information in the historical literatures. Acta Geographica Sinica, 45(1): 22-30]
- 廖昌蕊, 杨保. 2024. 树轮稳定碳同位素研究进展. 第四纪研究, 44(4): 1044-1061. [Liao C R, Yang B. 2024. Review of tree-ring stable carbon isotopes. Quaternary Sciences, 44(4): 1044-1061]
- 刘倩, 李钢, 杨新军. 2014. 明末 1637—1643 年极端干旱事件研究. 西北大学学报(自然科学版), 44(5): 833-837. [Liu Q, Li G, Yang X J. 2014. The extreme drought event at the end of Ming Dynasty during 1637—1643 AD. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 44(5): 833-837]
- 彭友兵, 程海, 陈凯, 黄少鹏. 2019. 过去千年中国东部持续性严重干旱事件的模拟研究. 第四纪研究, 39(2): 282-293. [Peng Y B,

- Cheng H, Chen K, Huang S P. 2019. Modeling study of severe persistent drought events over Eastern China during the last millennium. *Quaternary Sciences*, 39(2): 282–293]
- 孙伟毅, 刘健, 严蜜, 宁亮. 2022. 全新世亚洲季风百年—千年尺度变化的模拟研究进展. *地学前缘*, 29(5): 342–354. [Sun W Y, Liu J, Yan M, Ning L. 2022. Centennial to millennial variability of the Asian monsoon during the Holocene: progress in simulation studies. *Earth Science Frontiers*, 29(5): 342–354]
- 谭明. 2005. 石笋微层气候学的几个重要问题. *第四纪研究*, 25(2): 164–169. [Tan M. 2005. Significant issues of stalagmite layer-climatology. *Quaternary Sciences*, 25(2): 164–169]
- 王健, 程海, 赵景耀, 李瀚瑛, 宁有丰, 张美良, 朱晓燕. 2019. 小冰期多尺度气候波动: 贵州董哥洞高分辨率石笋记录. *第四纪研究*, 39(3): 775–785. [Wang J, Cheng H, Zhao J Y, Li H Y, Ning Y F, Zhang M L, Zhu X Y. 2019. Climate variability during the Little Ice Age characterized by a high-resolution stalagmite record from Dongge Cave, Guizhou. *Quaternary Sciences*, 39(3): 775–785]
- 王予, 李惠心, 王会军, 孙博, 陈活泼. 2021. CMIP6 全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与 CMIP5 的比较. *气象学报*, 79(3): 369–386. [Wang Y, Li H X, Wang H J, Sun B, Chen H P. 2021. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(3): 369–386]
- 张德二. 2023. 中国历史极端气候事件复原研究. 北京: 商务印书馆, 31–75. [Zhang D E. 2023. Study on the Recovery of Historical Extreme Climate Events in China. Beijing: The Commercial Press, 31–75]
- 赵丹, 张丽霞, 周天军. 2022. CMIP6 模式对中国东部地区水循环的模拟能力评估. *大气科学*, 46(3): 557–572. [Zhao D, Zhang L X, Zhou T J. 2022. Performance assessment of CMIP6 model in simulating the water cycle over East China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 46(3): 557–572]
- 郑景云, 葛全胜, 郝志新, 刘浩龙, 满志敏, 侯甬坚, 方修琦. 2014. 历史文献中的气象记录与气候变化定量重建方法. *第四纪研究*, 34(6): 1186–1196. [Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X, Liu H L, Man Z M, Hou Y J, Fang X Q. 2014. Paleoclimatology proxy recorded in historical documents and method for reconstruction on climate change. *Quaternary Sciences*, 34(6): 1186–1196]
- 郑景云, 吴茂伟, 郝志新, 张学珍. 2016. 中国东部夏季降水的年代际变化格局: 观测与 CESM 控制试验模拟结果的对比. *地理研究*, 35(1): 14–24. [Zheng J Y, Wu M W, Hao Z X, Zhang X Z. 2016. Spatial pattern of decadal variation of summer precipitation in Eastern China: comparison of observation and CESM control simulation. *Geographical Research*, 35(1): 14–24]
- 周嘉月, 卢麾, 阳坤, 江锐捷, 杨媛, 汪伟, 张学君. 2023. 基于 CMIP6 的中高温升情景对中国未来径流的预估. *中国科学: 地球科学*, 53(3): 505–524. [Zhou J Y, Lu H, Yang K, Jiang R J, Yang Y, Wang W, Zhang X J. 2023. Projection of China's future run off based on the CMIP6 mid-high warming scenarios. *Science China Earth Sciences*, 53(3): 505–524]
- Agyekum J, Annor T, Lamptey B, Quansah E, Agyeman R Y K. 2018. Evaluation of CMIP5 global climate models over the Volta Basin: precipitation. *Advances in Meteorology*, 2018: 4853681.
- Armstrong E, Hopcroft P O, Valdes P J. 2019. A simulated Northern Hemisphere terrestrial climate dataset for the past 60,000 years. *Scientific Data*, 6: 265.
- Bi S B, Bi S J, Chen C C, Lu Y, Nkuzimana A, Li Y P. 2020. Analysis of the spatiotemporal characteristics of drought disasters in North China during the Ming and Qing dynasties. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1): 2509–2539.
- Chen F, Opala-Owczarek M, Owczarek P, Chen Y P. 2020. Summer monsoon season streamflow variations in the middle Yellow River since 1570 CE inferred from tree rings of *Pinus Tabulaeformis*. *Atmosphere*, 11(7): 717.
- Chen F, Martín H, Zhao X E, Roig F, Zhang H L, Wang S J, Yue W P, Chen Y P. 2022. Abnormally low precipitation-induced ecological imbalance contributed to the fall of the Ming dynasty: new evidence from tree rings. *Climatic Change*, 173(1): 13.
- Chen F, Wang T, Zhao X E, Esper J, Ljungqvist F C, Büntgen U, Linderholm H W, Meko D, Xu H N, Yue W P, Wang S J, Yuan Y J, Zheng J Y, Pan W, Roig F, Hadad M, Hu M, Wei J C, Chen F H. 2024a. Coupled Pacific Rim megadroughts contributed to the fall of the Ming Dynasty's capital in 1644 CE. *Science Bulletin*, 69: 3106–3114.
- Chen J Q, Liu B, Martinez-Villalobos C, Wang B, Zhang Z S. 2025. Understanding the biases in daily extreme precipitation climatology in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 52: e2024GL114507.
- Chen S Y, Su Y, Chen X D, Yang L E. 2024b. The spatio-temporal evolution of the Chongzhen drought(1627–1644) in China and its impact on famine. *Climate of the Past*, 20: 2287–2307.
- Cheng H, Edwards R L, Haug G H. 2010. Comment on “On linking climate to Chinese dynastic change: spatial and temporal variations of monsoonal rain”. *Chinese Science Bulletin*, 55: 3734–3737.
- Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, D'Arrigo R D, Jacoby G C, Wright W E. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science*, 328(5977): 486–489.
- Degroot D, Anchukaitis K, Bauch M, Burnham J, Carnegie F, Cui J X, de Luna K, Guzowski P, Hambrecht G, Huhtamaa H, Izdebski A, Klee-mann K, Moesswilde E, Neupane N, Newfield T, Pei Q, Xoplaki E, Zappia N. 2021. Towards a rigorous understanding of societal responses to climate change. *Nature*, 591(7851): 539–550.
- Fang X Q, Su Y, Zheng J Y, Xiao L B, Wei Z D, Yin J. 2024. The social impacts of climate change in China over the past 2000 years. Beijing: Science Press, 309.
- Fernández-Donado L, González-Rouco J F, Raible C C, Ammann C M, Barriopedro D, García-Bustamante E, Jungclauss J H, Lorenz S J, Luterbacher J, Phipps S J, Servonnat J, Swingedouw D, Tett S F B, Wagner S, Yiou P, Zorita E. 2013. Large-scale temperature response to external forcing in simulations and reconstructions of the last millennium. *Climate of the Past*, 9: 393–421.
- Gao X, An R, Gao G, Li P W. 2024. The famine of the Ming dynasty in Shaanxi Province, China. *Regional Environmental Change*, 24(1): 35.
- Hajima T, Watanabe M, Yamamoto A, Tatebe H, Noguchi M A, Abe M, Ohgaito R, Ito A, Yamazaki D, Okajima H, Ito A, Takata K, Ogochi

- K, Watanabe S, Kawamiya M. 2020. Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development*, 13: 2197–2244.
- Hao Z X, Zheng J Y, Ge Q S, Bai M X. 2023. A $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ gridded drought/flood grades dataset for Eastern China during the last millennium. *Scientific Data*, 10(1): 202.
- Hao Z X, Jiang M R, Yang H N, Xiong D Y, Zheng J Y. 2024. Reconstruction of ancient drought in Northwest China and societal responses: a case study of 1759. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2024: 1–23.
- Jiang D B, Tian Z P, Lang X M. 2016. Reliability of climate models for China through the IPCC third to fifth assessment reports. *International Journal of Climatology*, 36: 1114–1133.
- Jiang S W, Zhou X, Sachs J P, Luo W H, Tu L Y, Liu X Q, Zeng L Y, Peng S Z, Yan Q, Liu F, Zheng J Q, Zhang J Z, Shen Y N. 2021. Central Eastern China hydrological changes and ENSO-like variability over the past 1800 yr. *Geology*, 49(11): 1386–1390.
- Katzenberger A, Levermann A. 2024. Consistent increase in East Asian Summer Monsoon rainfall and its variability under climate change over China in CMIP6. *Earth System Dynamics*, 15(4): 1137–1151.
- Li J B, Xie S P, Cook E R, Chen F H, Shi J F, Zhang D D, Fang K Y, Gou X H, Li T, Peng J F, Shi S Y, Zhao Y S. 2019. Deciphering human contributions to Yellow River flow reductions and downstream drying using centuries-long tree ring records. *Geophysical Research Letters*, 46(2): 898–905.
- Li X R, Liu B, Wang B, Ren G Y, Martinez-Villalobos C, Chang M Y, Zhang Z S. 2025. Understanding the intricacies of model biases in storm-related extreme precipitation using CMIP6. *Geophysical Research Letters*, 52: e2025GL115365.
- Liu J, Wang B, Ding Q H, Kuang X Y, Soon W, Zorita E. 2009. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the last millennium: results from ECHO-G model. *Journal of Climate*, 22(9): 2356–2371.
- Liu J, Wang B, Wang H L, Kuang X Y, Ti R Y. 2011. Forced response of the East Asian summer rainfall over the past millennium: results from a coupled model simulation. *Climate Dynamics*, 36: 323–336.
- Liu J B, Chen S Q, Chen J H, Zhang Z P, Chen F H. 2017a. Chinese cave $\delta^{18}\text{O}$ records do not represent northern East Asian summer monsoon rainfall. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114.
- Liu Q, Li G, Kong D Y, Huang B B, Wang Y X. 2018. Climate, disasters, wars and the collapse of the Ming Dynasty. *Environmental Earth Sciences*, 77(2): 44.
- Liu Y, Cobb K M, Song H M, Li Q, Li C Y, Nakatsuka T, An Z S, Zhou W J, Cai Q F, Li J B, Leavitt S W, Sun C F, Mei R C, Shen C C, Chan M H, Sun J Y, Yan L B, Lei Y, Ma Y Y, Li X X, Chen D L, Linderholm H W. 2017b. Recent enhancement of central Pacific El Niño variability relative to last eight centuries. *Nature Communications*, 8(1): 15386.
- Liu Y, Song H M, Sun C F, Song Y, Cai Q F, Liu R S, Lei Y, Li Q. 2019. The 600–mm precipitation isoline distinguishes tree-ring-width responses to climate in China. *National Science Review*, 6: 359–368.
- Mackallah C, Chamberlain M A, Law R M, Dix M, Ziehn T, Bi D, Bodman R, Brown J R, Dobrohotoff P, Druken K, Evans B, Harman I N, Hayashida H, Holmes R, Kiss A E, Lenton A, Liu Y, Marsland S, Meissner K, Menviel L, O'Farrell S, Rashid H A, Ridzwan S, Savita A, Sribnovsky J, Sullivan A, Trenham C, Vohralik P F, Wang Y P, Williams G, Woodhouse M T, Yeung N. 2022. ACCESS datasets for CMIP6: methodology and idealised experiments. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 72: 93–116.
- Maher P, Vallis G K, Sherwood S C, Webb M J, Sansom P G. 2018. The impact of parameterized convection on climatological precipitation in atmospheric global climate models. *Geophysical Research Letters*, 45: 3728–3736.
- Otto-Bliesner B L, Brady E C, Fasullo J, Jahn A, Landrum L, Stevenson S, Rosenbloom N, Mai A, Strand G. 2016. Climate variability and change since 850 CE: an ensemble approach with the Community Earth System Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97: 735–754.
- Prein A F, Langhans W, Fosser G, Ferrone A, Ban N, Goergen K, Keller M, Tölle M, Gutjahr O, Feser F, Brisson E, Kollet S, Schmidli J, van Lipzig N P M, Leung R. 2015. A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53: 323–361.
- Ren M, Liu Y, Cai Q F, Li Q, Song H M, Sun C F. 2024. The collapse of the Ming Dynasty actually began with the Wanli megadrought: insights from a hydroclimate reconstruction based on tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ over the past 460 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 655: 112548.
- Shi H, Wang B, Cook E R, Liu J, Liu F. 2018. Asian summer precipitation over the past 544 years reconstructed by merging tree rings and historical documentary records. *Journal of Climate*, 31(19): 7845–7861.
- Sun C F, Liu Y, Li Q, Song H M, Cai Q F, Fang C X, Liu R S, Ren Y F. 2021. Tree rings reveal the impacts of the Northern Hemisphere temperature on precipitation reduction in the low latitudes of East Asia since 1259 CE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(7): e2020JD033603.
- Tan L C, Cai Y J, Cheng H, An Z S, Edwards R L. 2009. Summer monsoon precipitation variations in Central China over the past 750 years derived from a high-resolution absolute-dated stalagmite. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280(3–4): 432–439.
- Tan L C, Cheng H, Li D, Orozbaev R, Li Y Z, Xu H, Edwards R L, Song Y G, Ma L, Lin F Y, Sinha A, An Z S. 2024. Hydroclimatic changes on multiple timescales since 7800 y BP in the winter precipitation-dominated Central Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(14): e2321645121.
- Tang B, Hu W T, Duan A M. 2021. Assessment of extreme precipitation indices over IndoChina and South China in CMIP6 models. *Journal of Climate*, 34(18): 7507–7524.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7): 7183–7192.
- Tian F Y, Chen X D, Su Y. 2022. Comparative analysis of extreme drought events and social impacts in Henan Province during the middle Ming

- Dynasty. *Weather, Climate, and Society*, 14(3): 1009–1021.
- Tian F Y, Su Y, Gong Z J. 2024. How did ancient China prevent the transition from extreme drought to famine? Taking Wanli Drought of the Ming Dynasty as an example. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110: 104618.
- Tian Q H, Qie J Z, Zhang Y. 2025. A tree-ring-based summer moisture reconstruction for the Lüliang Mountains, North China. *Dendrochronologia*, 94: 126398.
- Wang B, Ding Q H. 2008. Global monsoon: dominant mode of annual variation in the tropics. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 44(3–4): 165–183.
- Wang S X, Li W J, Zhou Y, Yan F L, Wang F T, Liu W L. 2015. Space-time evolution of historical drought hazards in Eastern China. *Natural Hazards*, 77(3): 2027–2047.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, Kong X G, Shao X H, Chen S T, Wu J Y, Jiang X, Wang X F, An Z S. 2008. Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. *Nature*, 451: 1090–1093.
- Wang Y Q, Yang X L, Zhang M R, Zhang L Q, Yu X H, Ren L L, Liu Y, Jiang S H, Yuan F. 2019. Projected effects of climate change on future hydrological regimes in the Upper Yangtze River Basin, China. *Advances in Meteorology*, 2019: 1545746.
- Wu Y T, Cai Y J, Xiao F G, He M, Huang S Y, Zhai X K, Li R X, Xue G, Li H Y, Zong C L, Cheng H. 2025. The Holocene stalagmite trace element and Sr isotope records from Central China and the inferred hydroclimate changes. *Chemical Geology*, 697: 123123.
- Xue Y X, Wu Y, Chen C J, Fan T, Su H, Li H Y, Cheng H, Yin J J, Li J Y, Ning Y F, Li T Y. 2025. Stalagmite multi-proxy records reveal spatial complexity of precipitation and monsoon variability in China over past 60 years. *Quaternary Science Reviews*, 353: 109240.
- Yang F M, Wang N A, Shi F, Ljungqvist F C, Zhao S, Liu T. 2016. The spatial distribution of precipitation over the West Qinling region, China, AD 1470 – 2000. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 443: 278–285.
- Yi L, Yu H J, Ge J Y, Lai Z P, Xu X Y, Qin L, Peng S Z. 2012. Reconstructions of annual summer precipitation and temperature in North-Central China since 1470 AD based on drought/flood index and tree-ring records. *Climatic Change*, 110: 469–498.
- Yin J J, Yuan D X, Li H C, Cheng H, Li T Y, Edwards R L, Lin Y S, Qin J M, Tang W, Zhao Z Y, Mii H S. 2014. Variation in the Asian Monsoon intensity and dry-wet conditions since the Little Ice Age in Central China revealed by an aragonite stalagmite. *Climate of the Past*, 10(5): 1803–1816.
- Yin J J, Li H C, Rao Z G, Shen C C, Mii H S, Pillutla R K, Hu H M, Li Y X, Feng X H. 2017. Variations of monsoonal rain and vegetation during the past millennium in Tianguai Mountain, North China reflected by stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records from Zhenzhu Cave. *Quaternary International*, 447: 89–101.
- Yue W P, Chen F, Torbenson M C A, Zhao X E, Zheng Y H, Xu Y, Hu M, Wang S J, Hou T Y, Zhang H L, Chen Y P. 2024. Late Ming Dynasty weak monsoon induced a harmonized megadrought across North-to-South China. *Communications Earth & Environment*, 5: 439.
- Yukimoto S, Kawai H, Koshiro T, Oshima N, Yoshida K, Urakawa S, Tsujino H, Deushi M, Tanaka T, Hosaka M, Yabu S, Yoshimura H, Shindo E, Mizuta R, Obata A, Adachi Y, Ishii M. 2019. The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 97: 931–965.
- Zanchettin D, Khodri M, Timmreck C, Toohey M, Schmidt A, Gerber E P, Hegerl G, Robock A, Pausata F S R, Ball W T, Bauer S E, Bekki S, Dhomse S S, LeGrande A N, Mann G W, Marshall L, Mills M, Marchand M, Niemeier U, Poulain V, Rozanov E, Rubino A, Stenke A, Tsigaridis K, Tummon F. 2016. The Model Intercomparison Project on the climatic response to Volcanic forcing (VolMIP): experimental design and forcing input data for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9: 2701–2719.
- Zhang D D, Lee H F, Wang C, Li B S, Pei Q, Zhang J, An Y L. 2011. The causality analysis of climate change and large-scale human crisis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(42): 17296–17301.
- Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, Chen F H, Wang Y J, Yang X L, Liu J, Tan M, Wang X F, Liu J H, An C L, Dai Z B, Zhou J, Zhang D Z, Jia J H, Jin L Y, Johnson K R. 2008. A test of climate, Sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 322(5903): 940–942.
- Zhao J Y, Cheng H, Yang Y, Liu W, Zhang H W, Li X L, Li H Y, Ait-Brahim Y, Pérez-Mejías C, Qu X L. 2021. Role of the summer monsoon variability in the collapse of the Ming Dynasty: evidences from speleothem records. *Geophysical Research Letters*, 48(11): e2021GL093071.
- Zhao K, Wang Y J, Edwards R L, Cheng H, Kong X G, Liu D B, Shao Q F, Cui Y F, Huang C C, Ning Y F, Yang X L. 2020. Late Holocene monsoon precipitation changes in Southern China and their linkage to Northern Hemisphere temperature. *Quaternary Science Reviews*, 232: 106191.
- Zheng J Y, Wang W C, Ge Q S, Man Z M, Zhang P Y. 2006. Precipitation variability and extreme events in Eastern China during the past 1500 years. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17(3): 579.
- Zheng J Y, Xiao L B, Fang X Q, Hao Z X, Ge Q S, Li B B. 2014. How climate change impacted the collapse of the Ming dynasty. *Climatic Change*, 127(2): 169–182.
- Zhou X C, Jiang D B, Lang X M. 2019. A multi-model analysis of ‘Little Ice Age’ climate over China. *The Holocene*, 29: 592–605.

(责任编辑 李新坡)