

黄泽宏, 刘健华, 贾紫桐, 等. 近 550 年中国东部旱涝格局时空演变规律及未来预估[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 1-12. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.001

HUANG Zehong, LIU Jianhua, JIA Zitong, et al. Spatiotemporal evolution of drought-flood patterns in Eastern China over past 550 years and future projections[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 1-12. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.001

近 550 年中国东部旱涝格局时空演变规律及未来预估

黄泽宏¹, 刘健华², 贾紫桐¹, 王易初¹, 殷国栋³, 宋儒霖³, 刘昌明¹, 付永硕¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 3. 水电水利规划设计总院有限公司, 北京 100120)

摘要:【目的】我国东部地区旱涝变率大、灾害风险高, 但基于长时间历史数据的东部旱涝格局变化规律尚不清晰。为揭示中国东部地区长期旱涝格局的演变规律及其未来变化趋势, 【方法】基于我国 1470—2020 年的长序列气象数据, 重构旱涝分布级数, 结合小波分析和功率谱分析, 识别旱涝变化的主导周期与阶段特征, 并使用长短时记忆网络模型预测了东部地区 2030—2100 年旱涝演变趋势。【结果】结果显示: 1470—2020 年间中国东部经历了两个偏早期和一个偏涝期, 旱涝情势具有平均 20 年、50 年和 180 年的变化周期, “北涝南旱”与“北旱南涝”的气候格局以平均 200 年为周期交替。空间分析显示, 近 50 年来华北、东北西南部等地旱涝波动性高, 年际方差阈值较大, 气候系统不稳定; 而南方大部波动性较低, 旱涝变化较为平稳。机器学习预测结果表明, 21 世纪中叶后东部气候格局将由偏旱向偏涝转变, “北涝南旱”事件自 20 世纪末期发生频率逐渐增高, 并在 2036 年左右出现阶段性高发, 随后频率逐渐下降。而“北旱南涝”事件在此后逐渐增强, 并在 21 世纪中叶达到阶段性高发, 之后逐渐减少。【结论】结果表明: 中国东部旱涝情势和南北旱涝格局存在长期周期性和阶段性交替规律, 未来气候系统可能呈现由偏旱向偏涝的转折趋势。结果深化了对中国东部旱涝时空演变机制的理解, 可为水资源优化配置、洪旱灾害风险评估及防御体系构建提供科学支撑, 对保障区域水安全具有重要意义。

关键词: 旱涝变化; 南北旱涝; 小波分析; 长时间尺度; LSTM 模型

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.001

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P338.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0001-12



收稿日期: 2025-09-21; 修回日期: 2025-10-27; 录用日期: 2025-10-29; 网络出版日期: 2025-11-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42430504); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2243300004); 创新引智基地(111计划)“流域水安全与综合管理创新基地”(B18006)

作者简介: 黄泽宏(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事全球变化、碳循环研究。E-mail: zehonghuang@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 付永硕(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事全球变化生态学研究。E-mail: yfu@bnu.edu.cn

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

Spatiotemporal evolution of drought-flood patterns in Eastern China over past 550 years and future projections

HUANG Zehong¹, LIU Jianhua², JIA Zitong¹, WANG Yichu¹, YIN Guodong³,
SONG Rulin³, LIU Changming¹, FU Yongshuo¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China; 3. China Renewable Energy Engineering Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: [Objective] The eastern region of China exhibits high drought-flood variability and faces significant disaster risks. However, the evolution of drought-flood patterns based on long-term historical data remains unclear. The aim is to reveal the long-term evolution and future trends of drought-flood patterns in eastern China. [Methods] Based on long-term meteorological data from 1470 to 2020 in China, a drought-flood level series was reconstructed. Wavelet analysis and power spectrum analysis were applied to identify the dominant cycles and stage characteristics, and a long short-term memory (LSTM) model was employed to predict the drought-flood evolution trends in eastern China from 2030 to 2100. [Results] The result showed that between 1470 and 2020, eastern China experienced two predominantly dry periods and one predominantly wet period. The drought-flood conditions exhibited variation cycles averaging 20, 50, and 180 years. The “wet north-dry south” and “dry north-wet south” climate patterns alternated with an average cycle of 200 years. Spatial analysis showed that over the past 50 years, regions such as North China and the southwestern part of Northeast China have high drought-flood variability, with large interannual variance thresholds, indicating an unstable climate system. In contrast, most southern regions exhibited low variability and more stable drought-flood variations. Machine learning prediction result indicated that after the mid-21st century, the climate pattern of eastern China would shift from predominantly dry to predominantly wet. Since the late 20th century, the frequency of “wet north-dry south” events had gradually increased, reaching a phase of high occurrence around 2036, followed by a gradual decline. In contrast, “dry north-wet south” events were expected to gradually intensify afterward, reaching a phase of high occurrence in the mid-21st century before gradually decreasing. [Conclusion] The result indicate that drought-flood conditions and north-south drought-flood patterns in eastern China exhibit long-term periodicity and alternating phases. In the future, the climate system may show a transitional trend from predominantly dry to predominantly wet conditions. These findings deepen the understanding of the spatiotemporal evolution mechanisms of drought and flood in eastern China and provide scientific support for optimizing water resource allocation, assessing drought and flood disaster risks, and constructing defense systems. This is of great significance for ensuring regional water security.

Keywords: drought-flood variation; north-south drought-flood patterns; wavelet analysis; long time scale; LSTM model

0 引言

全球气候变暖的背景下, 区域气候稳定性显著下降, 干旱、暴雨、高温热浪等极端天气事件发生频率增加^[1-2], 导致我国水安全面临严峻的保障压力和挑战^[3]。中国地处东亚热带季风与副热带季风的交汇区, 受西风环流与青藏高原季风共同影响, 降水不仅季节分布不均, 而且年际波动剧烈, 这使我国成为旱涝灾害高发地区^[4-5], 尤其在我国的东部地区, 降水季节性很强且存在显著年代际变化, 旱涝频繁且波动大^[6], 并在南北方呈现明显的格局差异。

近 20 年是 20 世纪初以来中国最暖的时期^[7], 在全球变暖背景下, 极端降水事件的频率与强度均有所上升。多项研究表明, 近 10 年来我国北方大部分地区降水量增加, 洪涝灾害发生频次上升, 北方洪灾损

失逐年扩大^[8]。与此同时, 南方部分流域旱涝转换加剧, 降水时空分布更加极端。近年的观测结果指出, 中国的旱涝格局可能由过去的“南涝北旱”逐渐向“南旱北涝”转变^[9-12]。这种格局演变反映了区域气候系统在全球增暖背景下的响应与重构, 也为东部地区的水资源管理带来更大的不确定性。因此, 准确理解和预测中国东部地区旱涝演变特征, 对于认识季风气候的区域响应规律、提升洪旱灾害防御能力以及优化水资源配置具有重要意义, 有助于构建气候风险预警体系, 为优化区域引调水模式提供科学依据, 保障我国水资源安全。

干旱和洪涝灾害在地域和时间上具有显著差异^[13-14]。近年来, 针对中国旱涝变化的长期演变规律, 已有大量研究从历史文献、气象观测及数值分析

等角度进行了探索。1981 年, 中国气象局发布了《中国近 500 年旱涝分布图集》, 首次利用旱涝等级法将旱涝程度分为五级, 构建了 1470—1979 年中国 120 个站点的旱涝分布图集^[15], 为长时间序列的旱涝变化研究提供了重要支持^[16]。在此基础上, 张先恭^[17]利用旱涝等级序列资料, 计算逐年干旱指数, 将中国东部地区的干湿变化划分为三个阶段: 1479—1691 年为干旱期, 1692—1890 年为多雨期, 1891 年起逐渐进入干旱期, 提出中国干湿变化约呈 400 年大循环。郑景云等^[18]基于历史文献, 使用各级旱涝发生比率差指标, 重建了中国东部过去 2000 年的温度变化, 并在百年尺度上分析了东部地区的冷暖波动。此外, 针对旱涝空间变化的研究逐渐增多, WANG 等^[19]对中国北方的旱涝灾害分布特征进行了总结, 揭示了中国北方极端干旱和极端洪涝发生概率增大, 旱涝高危区面积明显扩大, 旱涝高危区由中部、北部向南部转移。ZHANG 等^[20]基于观测和模型模拟发现中国的极端旱涝和旱涝交替事件均呈显著上升趋势, 并且北部和东部地区更易发生旱涝和旱涝急转现象。胡子瑛等^[21]利用 1960—2014 年北方各省的逐月降雨数据, 采用 SPI 指数等方法研究中国北方的干旱趋势, 发现 1960—2014 年间北方地区整体趋于干旱。这些研究揭示了在气候变暖背景下, 中国东部及北方地区旱涝风险具有显著的空间演化特征与增强趋势。

进入 21 世纪以来, 我国东部地区旱涝分配不均的现象愈加频繁出现^[22-24], 而现有研究多聚焦于全国或大流域尺度的旱涝变化特征^[24-25], 对于中国东部地区“北涝南旱”和“北旱南涝”两种典型格局的长期演变过程和交替机制研究仍较为缺乏。此外, 多数研究时间跨度较短, 往往仅基于近百年的气象观测资料, 难以揭示跨百年乃至多世纪的周期变化规律。方法上, 大量工作仍依赖于简单的线性回归分析方法^[26-27], 得到中国旱涝情况周期性变化结果的精度有待进一步提高。随着数据驱动方法的发展, 近年来多尺度分析与机器学习被广泛应用于气候变化研究^[28-29], 为识别复杂气候系统的非线性特征和长期趋势提供了新思路。

针对上述不足, 本研究利用我国东部地区 1470—2020 年旱涝等级数据, 系统重建了近 550 年的旱涝格局演变数据集, 结合小波分析与功率谱分析等多尺度方法, 探讨了中国东部旱涝情势, 南北旱涝格局的长期演变, 周期性交替规律。采用空间插值和年际方差指标, 量化了中国东部地区旱涝波动性的空间分布特征, 并创新性地融合机器学习模型, 对截至

21 世纪末的旱涝情势进行建模与预测, 以期为深入理解中国东部旱涝时空演变机制与区域风险分布, 提升极端气候事件的预测能力, 提供新的理论依据和科学支撑。

1 研究区概况、数据和方法

1.1 研究区域

我国按照地理位置、自然地理、人文地理的特点, 划分为四大地理区域, 即北方地区、南方地区、西北地区和青藏地区。本研究聚焦中国南方和北方地区, 秦岭、淮河一线是其分界线。中国南方地区气候温暖湿润, 具有丰富的水资源, 适宜农业和水产养殖。北方地区是中华文明的重要发源地之一, 南北方地区在我国的经济发展和文化建设上起着至关重要的作用^[30-31]。因此, 本研究以中国东部(南方和北方)为研究区探究其旱涝变化情况, 研究区如图 1 所示。

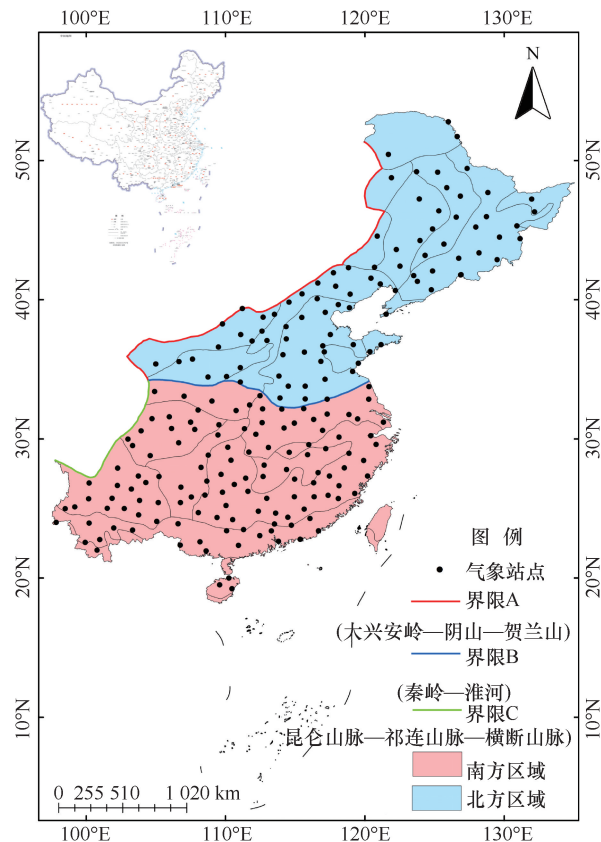


图 1 研究区及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of study area and meteorological stations

1.2 数据来源

本研究所用的 1470—2020 年共 551 年的旱涝数据由两部分构成。1470—1970 年的旱涝等级数据源自张家诚等^[32]基于《中国近五百年旱涝分布图集》整理计算求得; 同时, 1470—1970 年旱涝格局的分区

信息使用许协江等^[33]利用中国东部 100 个典型站点的旱涝等级数据所划分的区域格局。1970—2020 年的旱涝等级数据则基于美国国家气候数据中心 (NCDC) 提供的气象观测资料, 选取中国东部地区 216 个气象站点, 按照 1.3.3 的南北旱涝格局判定方法进行旱涝等级判定, 形成现代时期的旱涝格局数据。最终构建了覆盖 1470—2020 年、时间跨度 551 年、具有较高空间代表性的中国东部旱涝等级与格局数据集。本研究首先对数据进行了缺失数据处理、异常数据筛选等质量控制, 并采用水文气象领域检验降水和径流记录均质性的常用双质量曲线法^[34], 对本研究中各气象站点降雨数据序列的均质性进行评估, 所用资料已经被前人充分论证过科学依据及可靠性^[15]。

1.3 研究方法

1.3.1 旱涝序列重建方法

本研究遵循中国气象局制定的历史旱涝重建标准, 采用五等级分类法对中国历史时期的旱涝变化序列进行了重建^[15]。五等级分类法将不同站点的历史记载中描述的旱涝程度或器测时期的降水量分为 5 个等级, 分别是: 1 级—涝, 2 级—偏涝, 3 级—正常, 4 级—偏旱, 5 级—旱, 这五个等级代表了一定范围内的区域降水异常程度。按照公式划分各个站点的旱涝等级 (见表 1), 并对各个站点使用算术平均法, 将各个站点的旱涝等级相加后求平均值, 以便直观、简明地分析中国东部的旱涝时间波动特征, 最终得到研究时段内全国及南北方的旱涝等级^[35]。

表 1 旱涝等级判别标准

Table 1 Classification criteria for drought and flood levels

旱涝等级	旱涝类型	降雨量判别标准
1	涝	$R_i > (\bar{R} + 1.17\sigma)$
2	偏涝	$(\bar{R} + 0.33\sigma) \leq R_i \leq (\bar{R} + 1.17\sigma)$
3	正常	$(\bar{R} - 0.33\sigma) \leq R_i \leq (\bar{R} + 0.33\sigma)$
4	偏旱	$(\bar{R} - 1.17\sigma) \leq R_i \leq (\bar{R} - 0.33\sigma)$
5	旱	$R_i \leq (\bar{R} - 1.17\sigma)$

注: \bar{R} 表示观测站点多年平均降水量; R_i 表示观测站点逐年降水量; σ 表示标准差。

为了更清晰地揭示旱涝变化的长期规律, 本研究采用滑动平均法对旱涝等级序列进行平滑处理。该方法通过逐期更新数据来计算移动平均值, 从而减弱偶然波动的影响, 突出序列的主要趋势^[36]。综合考虑旱涝变化的时间尺度差异, 选取 10 年滑动平均用于反映年代际波动, 50 年滑动平均用于揭示百年尺度的长期趋势。

1.3.2 数据序列分析方法

本研究采用 Morlet 小波分析和功率谱分析分别对气候变化周期进行时域和频域分析。小波分析具有较强的局部辨识能力, 能够清晰识别时间序列的主频信号, 并在长时间尺度上揭示气候变化的多重周期、趋势及主周期, 其结果以二维图形呈现^[37-38]。然而, 小波分析的移动性可能引入多余信息, 影响结果判断^[35]。因此, 本研究结合功率谱分析, 其主要通过傅里叶变换将时间序列总能量分解为不同频率分量, 并依据频率波动的方差贡献确定主要周期^[39]。尽管功率谱分析结果更加明确, 但其单一的尺度变换可能导致部分边缘信号丢失。相较之下, 小波分析可在多尺度上分析, 弥补了功率谱分析的不足, 将两者结合的时域分析已经被广泛用于分析气候周期性变化情况^[38]。

1.3.3 南北旱涝格局判定方法

参考许协江和张先恭对旱涝格局的定义^[33], 将中国东部划分为 6 种旱涝型, 分别为: (1) 各区全涝; (2) 南北涝长江旱; (3) 北旱南涝; (4) 北涝南旱; (5) 南北旱长江涝; (6) 各区全旱。依据 1.3.1 的旱涝等级判别标准, 评估中国东部 216 个站点的旱涝等级, 再根据每个测站点的位置和评定的旱涝等级, 以秦岭、淮河为界将南北地区站点的旱涝等级分别进行年尺度的算术平均, 最终得到南北地区的旱涝等级。当北方区域旱涝等级小于 3, 且同年南方区域旱涝等级大于 3 时, 将此年称为“北涝南旱”年; 当北方区域旱涝等级大于 3, 且同年南方区域旱涝等级小于 3 时, 将此年称为“北旱南涝”年。

1.3.4 基于长短时记忆网络的未来 70 年旱涝情势预测方法

长短时记忆网络 (LSTM) 是一种深度学习中的重要循环神经网络 (RNN) 变体, 旨在克服传统 RNN 在长时依赖建模中的梯度消失问题。LSTM 通过在网络结构中引入细胞状态来存储长期信息, 并在每个记忆单元中设置输入门、遗忘门和输出门以动态调节信息的输入、遗忘与输出, 从而实现对时间序列特征的有效筛选与保留。这种“门控机制”的协同工作使 LSTM 能够在长时间序列分析中保持较高的稳定性与精度^[40]。

本研究利用 LSTM 模型对 1470—2020 年中国东部旱涝序列进行建模与预测, 以揭示未来旱涝格局的演变趋势。输入变量包括年尺度旱涝系数及南北方旱涝格局, 输出变量为下一年的旱涝系数与旱涝格局。模型采用分类预测技术方法, 将气候类型划分为

3 类: 正常型(非典型南北旱涝)、北旱南涝和北涝南旱, 避免重复预测带来的误差, 并提高模型的预测稳定性。模型的超参数通过贝叶斯优化方法进行调整, 包括时间步长、隐藏单元数、迭代次数、样本数、学习率、丢失率, 以确保模型在训练集和验证集上都能取得最佳性能。模型验证采用 10 折交叉验证, 并使用均方误差 MSE [式(1)]、准确度 $Accuracy$ [式(2)] 和 R^2 [式(3)] 来评估模型准确性, 最终以 1470—2020 年间中国东部的旱涝系数和三类旱涝格局为输入, 预估了 2030—2100 年的旱涝变化特征, 超参数优化结果如表 2 所列。

表 2 LSTM 模型超参数调优结果

Table 2 Hyperparameter tuning results of LSTM model

参数名称	参数意义	调优参数值
look_back	过去的时间步数	32
units_lstm1	第一个隐藏层的单元数	128
units_lstm2	第二个隐藏层的单元数	128
epochs	迭代次数	300
batch_size	每个小批次的样本数	16
learning_rate	学习率	0.001
dropout_rate_1	第一层 Dropout 丢失率	0.1
dropout_rate_2	第二层 Dropout 丢失率	0.3

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

式中, m 为样本总个数; y_i 为第 i 个数据的真实值; \hat{y}_i 为第 i 个数据的预测值; TP 为真正例; TN 为真负例; FP 为假正例; FN 为假负例。

2 结果分析

2.1 旱涝时间变化特征

本研究采用五等级分类法对中国东部 1470—2020 年的旱涝等级进行了重建, 如图 2 所示。基于图 2 可知, 中国东部旱涝等级均值为 2.96, 表明整体气候偏湿润。从多年代际尺度来看, 在过

去近 550 年中, 中国东部经历了两个偏旱时期和一个偏涝时期: 15 世纪中期至 17 世纪末期旱涝等级较高, 气候偏旱; 18 世纪初至 20 世纪初旱涝等级总体较低, 气候偏涝; 20 世纪上半叶以后, 旱涝等级再度回升, 气候又转为偏旱。

在 15 世纪中期至 17 世纪末期, 中国东部气候整体呈多年代际波动的偏旱状态, 但也出现了短期湿润局势。1550 年至 1580 年期间, 区域平均旱涝等级达到最低值, 整个东部地区呈湿润状态, 而 1630 年至 1650 年期间, 区域平均旱涝等级达到最高值, 呈现干旱状态; 18 世纪的年际和年代际变率不明显, 气候条件相对平稳湿润。19 世纪初至 20 世纪初, 中国东部的旱涝等级表现出显著的年际和年代际波动, 旱涝变化频率呈明显增加趋势, 反映了降水变化过程的不稳定性。从 20 世纪 30 年代开始, 中国东部整体在年代际波动中转向干旱, 但也出现了两个短暂的年际尺度偏涝时期, 分别发生在 19 世纪 20 年代初和 19 世纪 50 年代初。东部地区每 50 年的绝对偏差曲线显示, 15 世纪中期至 16 世纪中期和 18 世纪初至 20 世纪中期旱涝变率较大, 而 16 世纪中期至 18 世纪中期则相对平稳。

2.2 旱涝周期变化特征

1470—2020 年中国东部旱涝等级的小波分析结果如图 3 所示, 包括小波能量谱、小波实部以及功率

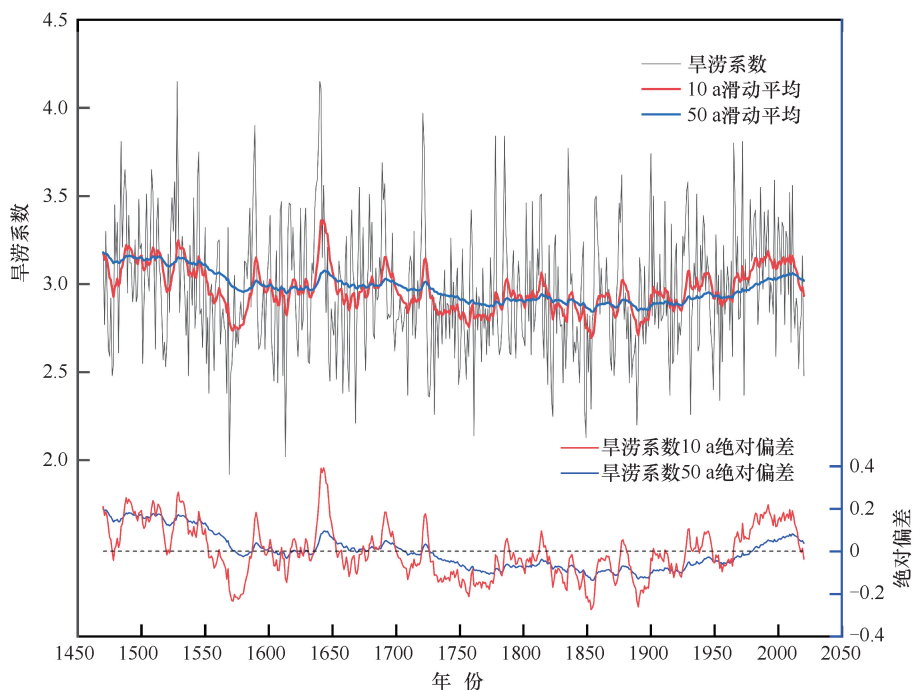


图 2 1470—2020 年中国东部旱涝等级的波动变化特征

Fig. 2 Characteristics of fluctuating changes in drought and flood levels in eastern China (1470—2020)

谱密度分布, 揭示了不同时间尺度的旱涝周期的时间变化特征与主导阶段。图 3(a) 显示了小波能量谱的分布图, 黑色等值线表示通过信度 95% 的置信区间, 网格部分表示边缘效应影响区; 色标数值越大表明该周期信号越显著, 可以看出平均在 20 a、50 a 和 180 a 存在较强的小波功率, 说明中国东部旱涝变化在几十年到百年尺度上都具有明显的周期性特征。图 3(b) 显示了小波实部的分布图, 红色区域表示偏旱主导期, 蓝色区域表示偏涝主导期, 颜色深浅反映干湿程度的强弱, 与图 3(a) 相比, 实部不仅反映能量高低, 还揭示了气候波动的相位特征。结果显示, 在 20 a 尺度上, 旱涝交替较为频繁; 在 50 a 尺度上, 18 世纪中期以前的周期性较为明显; 在 180 a 尺度上, 15 世纪末至 17 世纪末整体以偏旱为主, 18 世纪初至 20 世纪初以偏涝为主, 20 世纪以后再度转为偏旱, 值得注意的是, 不同时间尺度的旱涝震荡存在叠加效应, 短周期振荡在长期背景下会形成局部干湿波动, 例如在偏旱阶段中仍可能出现局部的偏涝信号。

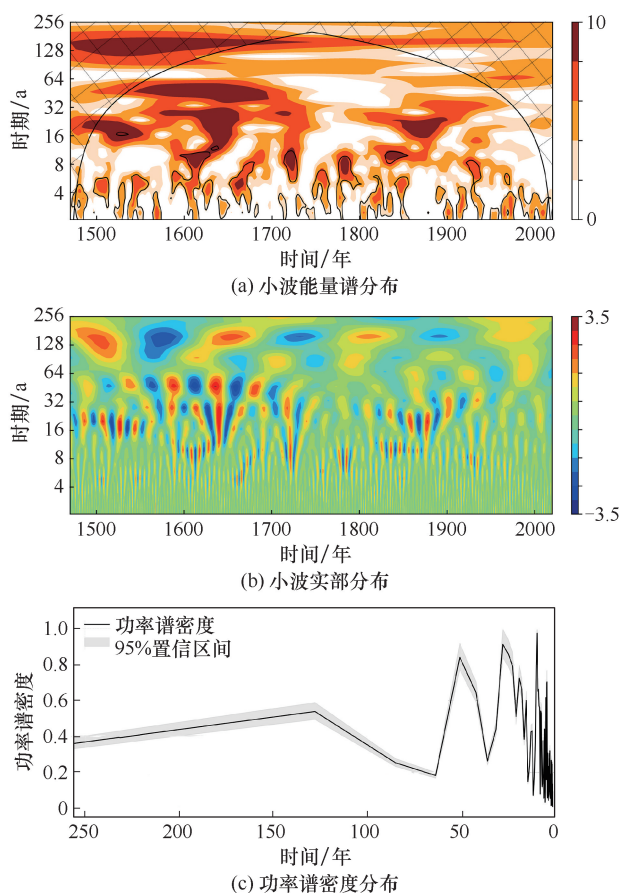


图 3 1470—2020 年中国东部旱涝周期变化特征小波分析及功率谱分析

Fig. 3 Wavelet analysis and power spectral analysis of drought and flood cycles in eastern China (1470—2020)

图 3(c) 为功率谱密度分布图, 阴影部分表示 95% 置信区间。与图 3(a) 结果对比可知, 在 20 a、50 a 及 180 a 尺度上, 功率谱密度均保持较高水平, 进一步验证了上述三种主要振荡周期的显著性。综上所述, 中国东部旱涝变化具有显著的干湿交替和多尺度振荡特征。

2.3 “北涝南旱”“北旱南涝”现象统计分析

本研究根据南北旱涝判定方法, 计算了 1470—2020 年共 551 年的南北方旱涝格局, 统计出发生“北涝南旱”和“北旱南涝”的具体年份, 并按十年为单位绘制了气候格局变化频率图, 如图 4 所示。考虑到旱涝事件具有显著的年际波动性, 为更准确地提取其长期变化规律, 本研究采用多项式拟合方法对南北旱涝格局时间序列进行平滑处理。拟合结果显示, “北涝南旱”和“北旱南涝”的决定系数 (R^2) 分别为 0.51 和 0.43, 表明曲线能够较好地反映两类气候格局的总体演变趋势和长期变化特征。通过观察图 4 旱涝格局的变化趋势, 发现“北涝南旱”和“北旱南涝”在中国东部地区具有明显的周期性变化趋势和负相关关系。具体而言, 这两种格局呈现平均 200 a 的周期性, 每 100 年左右交替出现阶段性高发, 例如, 1600—1700 年为“北涝南旱”高发期, 并在约 1700 年达到峰值, 1700—1800 年则为“北旱南涝”高发期, 并在约 1800 年达到峰值。从长期统计来看, “北旱南涝”事件的平均发生次数略高于“北涝南旱”, 表明前者在历史演变中具有相对更高的发生频率。

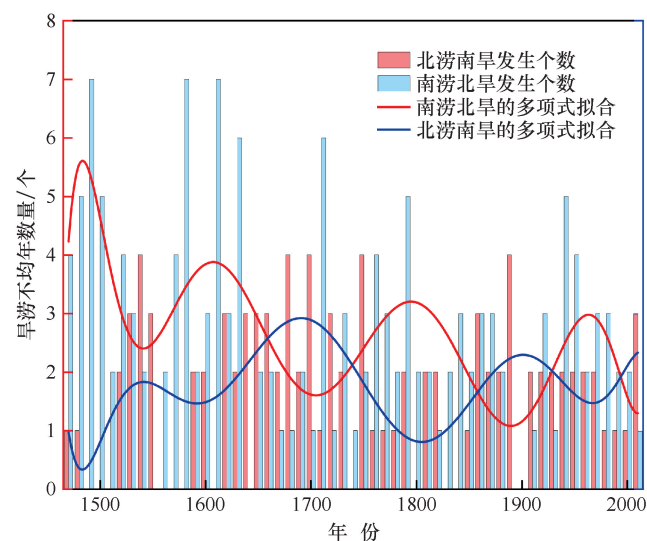


图 4 “北涝南旱”“北旱南涝”气候格局变化频率

Fig. 4 Frequency of changes in “wet north-dry south” and “dry north-wet south” climate patterns

基于 1470—2020 年中国东部的旱涝系数变化趋势和“北涝南旱”“北旱南涝”气候格局, 进一步进行旱涝趋势分析, 结果如图 5 所示。根据旱涝系数的长期变化特征, 并参考张先恭关于中国东部干湿分期的研究成果^[15], 结合旱涝系数多年滑动平均序列的转折特征, 确定了各阶段的分界点, 将 1470—2020 年划分为三个旱涝阶段: 1470—1691 年为早期, 1692—1890 年为涝期, 1891 年之后为旱期。分析十年间的“北涝南旱”“北旱南涝”分布频次与平均旱涝系数可知, 从短期来看, 东部气候偏旱时更易形成“北旱南涝”格局, 而气候偏涝时则更易形成“北涝南旱”格局。

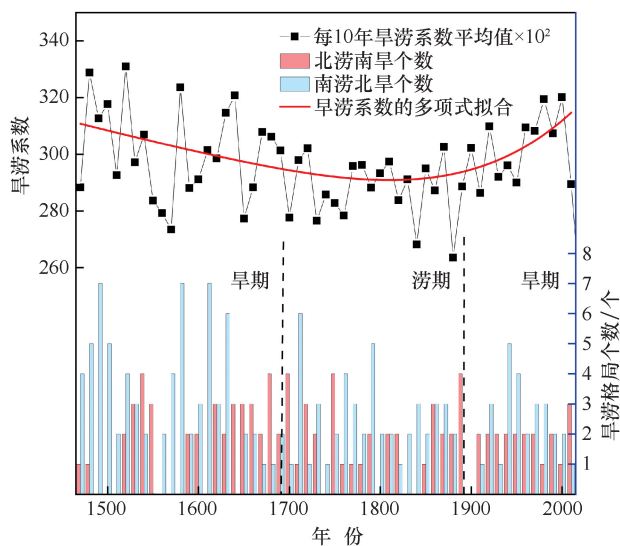


图 5 旱涝分布综合趋势

Fig. 5 Composite trend of drought and flood distribution

2.4 旱涝变化空间波动分析

本研究对南北旱涝波动性进行了空间分析, 统计 1970—2020 年 210 个气象站点的旱涝系数, 以各站点旱涝等级的年际方差表示波动性, 采用反距离加权插值法生成空间分布图, 将方差按照从大到小进行排列, 选取前 10% 的站点作为重点波动站点, 如图 6 所示。

结果显示, 旱涝波动性较高区域主要分布在华北平原北部及中部地区, 包括北京、天津、河北、山东中部等地, 部分站点的旱涝等级年际方差值超过 2.0, 反映出这些区域旱涝交替频繁、年际变化剧烈。其次, 东北地区西南部, 如辽宁西部、吉林中南部等地, 也呈现出聚集性的旱涝波动性偏高情况, 局部站点方差值在 1.8 左右, 说明该区域气候系统亦具有较强的不稳定性。相较而言, 南方区域整体旱涝波动性较低, 尤其在四川南部、贵州、广西、广东、福建等

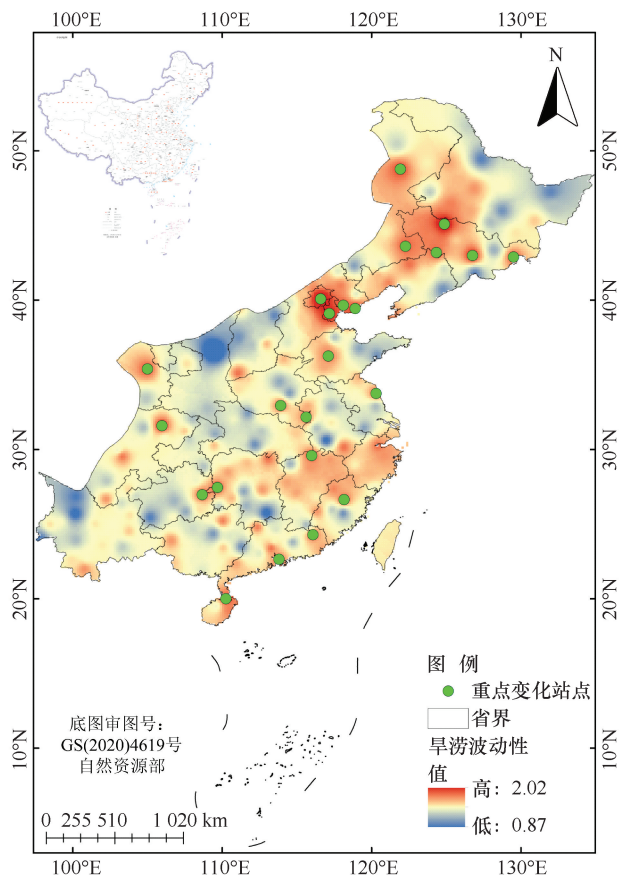


图 6 旱涝波动空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought-flood variability

地, 多数站点的年际方差值低于 1.2, 表明旱涝等级变化相对平稳, 气候表现出一定的持续性和稳定性。总体来看, 全国旱涝波动性在空间上呈现出“北高南低”的明显区域分异格局。

2.5 基于长短时记忆网络的未来近 70 年旱涝情况预测

分析模型预测结果可知, 1470—2020 年旱涝系数的十折交叉验证均方误差为 0.019, R^2 为 0.64, 符合精度要求。将 2030—2100 年的旱涝系数进行 10 年和 50 年滑动平均, 如图 7 所示。结果显示, 2030—2058 年中国东部整体偏旱, 但在 2034—2037 年存在短暂的湿润期, 2052 年之后旱涝等级呈明显下降趋势, 表明在 21 世纪中叶, 中国东部气候整体开始由偏旱向偏涝转换。

此外, 本研究还预测了“北涝南旱”和“北旱南涝”两类气候格局(见表 3), 并以准确率评估预测性能。1470—2020 年十折交叉验证结果显示, “北涝南旱”事件的准确率为 0.758, “北旱南涝”事件的准确率为 0.733, 均达到较高水平。

结合南北旱涝格局周期和未来预测结果表明, 未

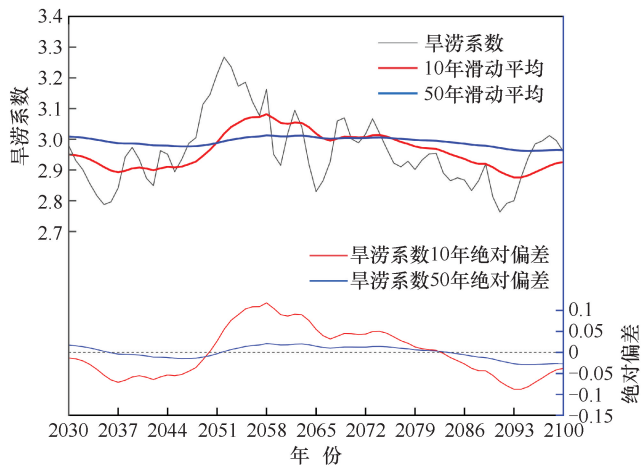


图 7 2030—2100 年旱涝系数分布

Fig. 7 Spatial distribution of drought-flood coefficients (2030—2100)

表 3 未来旱涝格局预测结果

Table 3 Prediction results of future drought-flood patterns

旱涝类型	发生年份
北旱南涝	2031、2039、2043、2044、2045、2046、2047、2048、2049、2050、2051、2053、2054、2068、2069、2071、2072、2089、2099
北涝南旱	2035、2036、2037、2057、2065、2075、2087、2092、2093

来 70 年“北旱南涝”事件的平均发生次数高于“北涝南旱”，并呈现与历史一致的周期性交替特征，约每百年出现一次阶段性高发期。具体而言，“北涝南旱”事件自 20 世纪末期发生频率逐渐增高，并在 2036 年左右出现阶段性高发，随后频率逐渐下降。而“北旱南涝”事件在此后逐渐增强，并在 21 世纪中叶(约 2043—2054 年)达到阶段性高发，之后逐渐减少。

3 讨论

本研究对中国东部旱涝情况从历史变化、周期性特征到未来趋势做了分析，发现在过去近 550 年中，中国东部气候整体呈现明显的长周期震荡特征，平均 180 年为一个长周期，包括两个偏旱期和一个偏涝期。本研究结果与前人在其他地区 and 全国气候周期的研究相吻合^[41-42]，都揭示了中国各地区在过去呈现旱-涝-旱的时期变化^[17]，显示了气候系统的复杂性与相关性。本研究不同之处在于进一步探讨了南北旱涝交替现象，即“北涝南旱”和“北旱南涝”格局演变特征，并发现南北旱涝格局的交替具有明显的周期性，平均以 200 年为一个周期。

中国东部的旱涝变化受多种大型气候因子的综合

调控^[43]，特别是东亚夏季风、太平洋年代际振荡(PDO)与北大西洋涛动(NAO)等共同作用，构成了区域气候周期变化的主要驱动机制^[44-45]。其中，东亚夏季风强度和路径直接影响水汽输送的效率和方向，是决定区域干湿格局的主导因子^[46-47]。此外，PDO 的影响则呈现明显的纬向差异性，已有研究表明，华北地区在 PDO 暖位相时普遍偏旱，冷位相时相对湿润；而长江中下游地区则表现出相反趋势，即暖位相时期降水偏多、涝象频发^[48-50]。以往研究发现，PDO 波动存在 20 年左右和 50 年左右的变化周期，这与中国东部整体的旱涝变化周期存在重合现象，说明 PDO 的相位周期变化显著影响着中国东部的旱涝变化^[51]。NAO 通过调节欧亚中高纬地区的环流结构，间接影响中国东部的的水分供给。当 NAO 处于正位相时，华北地区高空环流稳定、对流活动受抑，不利于降水形成，干旱事件发生频率增加^[52]。这些机理揭示了地区性气候因素与全球气候振荡之间的复杂且深刻的相互作用，为深入理解和预测该地区的气候变化提供了关键的视角。

关于南北旱涝格局变化，当前研究提出了厄尔尼诺现象对北旱南涝的早期信号作用，在厄尔尼诺发展年份及衰减年份，北旱南涝事件伴随极端降雨事件出现的概率增加^[53]，厄尔尼诺通过削弱沃克环流，调控青藏高原风场及中纬度亚洲波型，抑制印度夏季风，导致东亚异常正压气旋，使华北平原受下沉气流控制，降水减少^[54]，同时，在厄尔尼诺盛期和衰退期，印度洋海温变暖诱发西北太平洋异常反气旋，使副热带高压南移，削弱北方水汽输送，增强南方水汽输送，形成“北旱南涝”格局^[55]。而在厄尔尼诺衰退或拉尼娜发展阶段，西北太平洋异常气旋使副热带高压北移，增强印度夏季风对中国东部的的水汽输送，华北降水增加，南方因水汽减少降水偏少，转变为“北涝南旱”格局^[56-57]。

旱涝格局演变与水资源调配和水安全保障密切相关。在干旱地区，需通过跨区域引水等手段调配水资源，而在洪涝地区，则需加强水库建设等措施以缓解洪涝影响，最终确保水资源供需平衡和人民生命财产安全^[58]。本研究通过使用 LSTM 神经网络模型对未来近 70 年的旱涝情况进行预测，发现预计在 21 世纪中叶，中国东部气候格局将由偏旱向偏涝转变，这一结果与他人的研究结果相吻合，ZHANG 等^[59]在两种气候情景下发现 21 世纪 50 年代中国各地都将变得更加湿润，并且这种湿润状态将不断增强。XU 等^[60]基于 copula 函数评估了中国未来降雨量变化，发现在

2061 年后, 中国在 SSP126 和 SSP585 情景下, 降水量分别增加 12.0% 和 19.5%。未来预测结果还显示“北涝南旱”事件自 20 世纪末期发生频率逐渐增高, 并在 2036 年左右出现阶段性高发, 随后频率逐渐下降。而“北旱南涝”事件在此后逐渐增强, 并在 21 世纪中叶(2043—2054 年左右)达到阶段性高发, 之后逐渐减少。这一预测结果对于未来气候变化的评估和灾害防范具有重要意义, 可为区域水资源优化, 水库和水电站建设等提供一定的科学依据。本研究使用的 LSTM 神经网络模型存在一定的不确定性, 未来需加强对气候变化的监测并结合气候模型, 提高预测结果的准确性。另外, 本研究关注了中国东部地区的旱涝情况, 未对其他地区或全球范围内的气候变化进行比较分析, 未来的研究可以考虑扩大研究范围, 探讨不同地区之间气候变化的联系和差异, 并研究极端气候事件对区域水资源影响。

4 结论

本研究基于我国 1470—2020 年的长时间气象数据, 探究了中国东部地区旱涝格局的时空变化规律, 并预测了东部地区 2030—2100 年的旱涝演变趋势。其主要结论如下。

(1) 自 1470—2020 年, 中国东部旱涝等级均值为 2.96, 表明整体气候偏湿润。在过去近 550 年中, 经历了两个偏早期(15 世纪中期至 17 世纪末、20 世纪上半叶之后)和一个偏涝期(18 世纪初至 20 世纪初), 旱涝演变具有 20 年、50 年和 180 年三个变化周期, 并整体呈现 180 年的持续振荡特征。

(2) “北涝南旱”和“北旱南涝”格局交替变化平均以 200 年为一个周期, 并且每 100 年交替占据主导的现象, 两种气候格局具有明显的周期变化趋势和负相关关系。从十年尺度来看, 当中国东部气候整体偏旱时, 更易发生北旱南涝气候格局, 当中国东部气候整体偏涝时, 更易发生北涝南旱气候格局。

(3) 空间分析结果表明, 1970—2020 年期间, 华北平原北部及中部(如北京、天津、河北、山东中部)为旱涝波动性最强区域, 部分站点年际方差超过 2.0, 气候变率大、旱涝交替频繁; 东北西南部(如辽宁西部、吉林中南部)也呈现较高波动性。相比之下, 南方如四川南部、贵州、广西、广东、福建等地, 旱涝等级变化较为平稳, 年际方差普遍低于 1.2, 气候表现出较强的持续性与稳定性。全国范围内旱涝波动性整体呈现“北高南低”的空间格局。

(4) 基于长短时记忆网络模型预测, 预计 21 世

纪中叶之后, 中国东部气候格局由偏旱向偏涝转变, “北涝南旱”事件自 20 世纪末期发生频率逐渐增高, 并在 2036 年左右出现阶段性高发, 随后频率逐渐下降。而“北旱南涝”事件在此后逐渐增强, 并在 21 世纪中叶(2043—2054 年左右)达到阶段性高发, 之后逐渐减少。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- [2] 《第四次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第四次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2022. The Editorial Board of the Fourth National Assessment Report on Climate Change. Fourth National Assessment Report on Climate Change [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [3] 李亚, 汤钟, 黄焱涸, 等. 滨水低洼地区水安全韧性提升的策略与实践[J]. 水利发展研究, 2025, 25(2): 41-47. LI Y, TANG Z, HUANG Y Y, et al. Strategies and practices for enhancing water security resilience in waterfront low-lying areas[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(2): 41-47.
- [4] ZHENG J Y, GE Q S, LI M Q, et al. Drought/flood spatial patterns in centennial cold and warm periods of the past 2000 years over Eastern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(30): 2964-2971.
- [5] SU B D, HUANG J L, FISCHER T, et al. Drought losses in China might double between the 1.5 °C and 2.0 °C warming[J]. PNAS, 2018, 115(42): 10600-10605.
- [6] 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 730-743. HUANG R H, CAI R S, CHEN J L, et al. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 730-743.
- [7] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书[M]. 北京: 科学出版社, 2022. Climate Change Center of China Meteorological Administration. Blue Book on Climate Change in China [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [8] 李莹, 赵珊珊. 2001—2020 年中国洪涝灾害损失与致灾危险性研究[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(2): 154-165. LI Y, ZHAO S S. Floods losses and hazards in China from 2001 to 2020[J]. Climate Change Research, 2022, 18(2): 154-165.
- [9] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500-521. ZHANG Q, YAO Y B, LI Y H, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. Acta

- Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 500-521.
- [10] 韩兰英, 张强, 贾建英, 等. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 1-10.
HAN L Y, ZHANG Q, JIA J Y, et al. Drought severity, frequency, duration and regional differences in China [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5): 1-10.
- [11] 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 951-961.
MA Z G, FU C B, YANG Q, et al. Drying trend in northern China and its shift during 1951—2016[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 951-961.
- [12] DING Y H, WANG Z Y, SUN Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(9): 1139-1161.
- [13] AGHAKOUCHAK A, CHIANG F, HUNING L S, et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2020, 48: 519-548.
- [14] 岳艳琳. 气候变化下长江流域未来径流与旱涝变化特征研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
YUE Y L. The Changes of Future Runoff and Drought and Flood in the Yangtze River Basin under Climate Change [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [15] 中国气象局气象科学研究院. 中国近五百年来旱涝分布图集 [M]. 北京: 地图出版社, 1981.
Institute of Meteorological Science, China Meteorological Administration. Atlas of Drought and Flood Distribution in China over the Past 500 Years [M]. Beijing: Map Press, 1981.
- [16] 王绍武, 赵宗慈. 近五百年我国旱涝史料的分析[J]. 地理学报, 1979, 34(4): 329-341.
WANG S W, ZHAO Z C. An analyses of historical data of droughts and floods in last 500 years in China [J]. Acta Geographica Sinica, 1979, 34(4): 329-341.
- [17] 张先恭. 中国东半部近 500 年干旱指数的分析 [M] // 中央气象局气象科学研究院天气气候研究所. 全国气候变化学术讨论会文集. 北京: 科学出版社, 1981: 46-51.
ZHANG Xiangong. Analysis of drought index in eastern China over the past 500 years [M] // Institute of Weather and Climate Research, Academy of Meteorological Sciences, Central Meteorological Bureau. Proceedings of the National Symposium on Climate Change. Beijing: Science Press, 1981: 46-51.
- [18] 郑景云, 郝志新, 张学珍, 等. 中国东部过去 2000 年百年冷暖的旱涝格局[J]. 科学通报, 2014, 59(30): 2964-2971.
ZHENG J Y, HAO Z X, ZHANG X Z, et al. Drought/flood spatial patterns in centennial cold and warm periods of the past 2000 years over Eastern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(30): 2964-2971.
- [19] WANG Y, ZHANG Q. Distribution characteristics of drought and flood hazards in northern China against the background of climate warming [J]. Natural Hazards, 2024, 120(7): 5987-6009.
- [20] ZHANG Y Q, YOU Q L, ULLAH S, et al. Substantial increase in abrupt shifts between drought and flood events in China based on observations and model simulations [J]. Science of the Total Environment, 2023, 876: 162822.
- [21] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1908-1919.
HU Z Y, ZHOU J J, ZHANG L L, et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1908-1919.
- [22] 赵俊虎, 周杰, 叶天舒, 等. 2013 年夏季中国北涝南旱环境场及异常成因分析[J]. 气象科技进展, 2015, 5(5): 14-23.
ZHAO J H, ZHOU J, YE T S, et al. Preliminary studies on the environment field and cause of northern flood and southern drought during the summer of 2013 in China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2015, 5(5): 14-23.
- [23] 王澄海, 李健, 李小兰, 等. 近 50 a 中国降水变化的准周期性特征及未来的变化趋势[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 1-10.
WANG C H, LI J, LI X L, et al. Analysis on quasi-periodic characteristics of precipitation in recent 50 years and trend in next 20 years in China [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 1-10.
- [24] 姜江, 姜大膀, 林一骅. 中国干湿区变化与预估[J]. 大气科学, 2017, 41(1): 43-56.
JIANG J, JIANG D B, LIN Y H. Changes and projection of dry/wet areas over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(1): 43-56.
- [25] 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. Temporospatial characteristics of drought-flood abrupt alteration events in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(8): 13-23.
- [26] 曾春芬, 陈钰婕, 杨奇, 等. 长江上游重庆段近 20 a 降水时空变化特征[J]. 地球环境学报, 2024, 15(2): 342-356.
ZENG C F, CHEN Y J, YANG Q, et al. Spatiotemporal variation of precipitation and its environmental response in the Chongqing section of the upper reaches of the Yangtze River in the last 20 years [J]. Journal of Earth Environment, 2024, 15(2): 342-356.
- [27] 张明明. 2000—2015 年中国干旱半干旱区蒸散发时空变化及其影响因素分析 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
ZHANG M M. Analysis of the Temporal and Spatial Variation of Evapotranspiration and Its Driving Factors in Arid and Semi-Arid Region of China from 2000 to 2015 [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [28] DE BURGH-DAY C O, LEEUWENBURG T. Machine learning for

- numerical weather and climate modelling: A review[J]. *Geoscientific Model Development*, 2023, 16(22): 6433-6477.
- [29] GUO W X, HE N, BAN X, et al. Multi-scale variability of hydrothermal regime based on wavelet analysis — The middle reaches of the Yangtze River, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 841: 156598.
- [30] 樊杰, 赵浩, 郭锐. 我国区域发展差距变化的新趋势与应对策略[J]. *经济地理*, 2022, 42(1): 1-11.
FAN J, ZHAO H, GUO R. The new trend and coping strategies of regional development gap in China[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(1): 1-11.
- [31] 吴殿廷. 试论中国经济增长的南北差异[J]. *地理研究*, 2001, 20(2): 238-246.
WU D T. A study on North-South differences in economic growth[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(2): 238-246.
- [32] 张家诚, 张先恭, 许协江. 中国近五百年的旱涝 [C]. 国家气象局气象科学研究所. 气象科学技术集刊(气候与旱涝): 卷 4. 北京: 气象出版社, 1983: 1-16.
ZHANG J C, ZHANG X G, XU X J. Droughts and floods in China over the past five hundred years [C]. Institute of Meteorological Science, National Meteorological Administration. *Meteorological Science and Technology (Climate and Drought-Flood)*: Volume 4. Beijing: Weather Press, 1983: 1-16.
- [33] 许协江, 张先恭. 近五百年我国东部地区旱涝分布类型及未来趋势 [C]//国家气象局气象科学研究所. 气象科学技术集刊(气候与旱涝): 卷 4. 北京: 气象出版社, 1983: 47-54.
XU X J, ZHANG X G. Types of drought and flood distribution in eastern China over the past 500 years and future trends [C]. Institute of Meteorological Science, National Meteorological Administration. *Meteorological Science and Technology (Climate and Drought-Flood)*: Volume 4. Beijing: Weather Press, 1983: 47-54.
- [34] SU B D, JIANG T, JIN W B. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 83(1): 139-151.
- [35] 徐新创, 葛全胜, 郑景云, 等. 湖北省近 500 年区域干湿序列重建及其比较分析[J]. *地理研究*, 2010, 29(6): 1045-1055.
XU X C, GE Q S, ZHENG J Y, et al. Reconstruction and comparative analysis of dry/wet series in last 500 years in Hubei Province[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(6): 1045-1055.
- [36] WANG M Y, CHEN Y B, LI J Y, et al. Spatiotemporal evolution and driving force analysis of drought characteristics in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 113007.
- [37] GUO T T, ZHANG T P, LIM E, et al. A review of wavelet analysis and its applications: Challenges and opportunities[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 58869-58903.
- [38] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [39] FRANZKE C L E, BARBOSA S, BLENDER R, et al. The structure of climate variability across scales[J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, 58(2): e2019RG000657.
- [40] 张旭东, 杜家浩, 黄宇方, 等. 基于多尺度层级 LSTM 网络的时间序列预测分析[J]. *计算机科学*, 2019, 46(S11): 52-57.
ZHANG X D, DU J H, HUANG Y F, et al. Time series analysis based on MSH-LSTM[J]. *Computer Science*, 2019, 46(S11): 52-57.
- [41] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 752-760.
FU C B, MA Z G. Global change and regional aridification [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 752-760.
- [42] 尹志杰, 孙春鹏, 王容, 等. 我国“南涝北旱”格局变化初步分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2014, 24(1): 30-32.
YIN Z J, SUN C P, WANG R, et al. Preliminary analysis of the changes in the ‘Southern Flood and Northern Drought’ pattern in China [J]. *China Flood & Drought Management*, 2014, 24(01): 30-32+51.
- [43] YANG P, ZHANG S Q, XIA J, et al. Analysis of drought and flood alternation and its driving factors in the Yangtze River Basin under climate change[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 270: 106087.
- [44] 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J]. *大气科学*, 2006, 30(3): 464-474.
MA Z G, SHAO L J. Relationship between dry/wet variation and the Pacific decade oscillation (PDO) in northern China during the last 100 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(3): 464-474.
- [45] 符淙斌, 曾昭美. 最近 530 年冬季北大西洋涛动指数与中国东部夏季旱涝指数之联系[J]. *科学通报*, 2005, 50(14): 1512-1522.
FU C B, ZENG Z M. Linkage between the North Atlantic Oscillation Index in winter and the summer drought and flood index in eastern China over the last 530 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(14): 1512-1522.
- [46] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量[J]. *地理学报*, 1934(1): 1-27.
ZHU K Z. The enigma of southeast monsoon in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1934(1): 1-27.
- [47] SU Z K, HAO Z C, YUAN F F, et al. Spatiotemporal variability of extreme summer precipitation over the Yangtze River Basin and the associations with climate patterns[J]. *Water*, 2017, 9(11): 873.
- [48] 裴琳, 严中伟, 杨辉. 400 多年来中国东部旱涝型变化与太平洋年代际振荡关系[J]. *科学通报*, 2015, 60(1): 97-108.
PEI L, YAN Z W, YANG H. Multidecadal variability of dry/wet patterns in Eastern China and their relationship with the Pacific Decadal Oscillation in the last 413 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(1): 97-108.
- [49] YU L, FUREVIK T, OTTERÅ O H, et al. Modulation of the Pacific

- Decadal Oscillation on the summer precipitation over East China: A comparison of observations to 600-years control Run of Bergen Climate Model[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(1): 475-494.
- [50] MANTUA N J, HARE S R. The Pacific decadal oscillation [J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(1): 35-44.
- [51] QIAN C, ZHOU T J. Multidecadal variability of North China aridity and its relationship to PDO during 1900—2010 [J]. *Journal of Climate*, 27(3): 1210-1222.
- [52] HAO Z X, SUN D, WU M W, et al. Does El Niño play an early signal role for the south-flood north-drought pattern over Eastern China? [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(1): 217-227.
- [53] ZHOU T J, WU B, DONG L. Advances in research of ENSO changes and the associated impacts on Asian-Pacific climate[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 50(4): 405-422.
- [54] XIE S P, KOSAKA Y, DU Y, et al. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(4): 411-432.
- [55] ZHANG R H, MIN Q Y, SU J Z. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous western North Pacific anticyclone[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(6): 1124-1132.
- [56] UEDA H, KAMAE Y, HAYASAKI M, et al. Combined effects of recent Pacific cooling and Indian Ocean warming on the Asian monsoon[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8854.
- [57] ZHU Y L, WANG H J, MA J H, et al. Contribution of the phase transition of Pacific Decadal Oscillation to the late 1990s' shift in East China summer rainfall [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(17): 8817-8827.
- [58] KREIBICH H, VAN LOON A F, SCHRÖTER K, et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management [J]. *Nature*, 2022, 608(7921): 80-86.
- [59] ZHANG G X, GAN T Y, SU X L. Twenty-first century drought analysis across China under climate change[J]. *Climate Dynamics*, 2022, 59(5): 1665-1685.
- [60] XU Y, ZHANG X, HAO Z C, et al. Projections of future meteorological droughts in China under CMIP6 from a three-dimensional perspective[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 252: 106849.

(责任编辑 王璐)