

东北地区长期干旱演变特征及对主要粮食作物产量的影响

周照强¹, 王萍¹, 石博¹, 史海匀²

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 南方科技大学环境科学与工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要:针对东北地区长期干旱演变对粮食安全的潜在威胁,利用标准化降水蒸散发指数,结合 Savitzky-Golay 平滑滤波方法,评估了1901—2021年东北地区的气象干旱特征,对比了近期(1992—2021年)与历史长期(1901—1991年)气象干旱特征,结合1995—2021年东北地区玉米、水稻、小麦3种主要粮食作物的产量,探究了东北地区气象干旱与粮食作物产量之间的关系。结果表明:东北地区呈现干湿交替的变化特征,近期呈现干旱化趋势的地区明显增多,气候变暖导致蒸散发的增加可能是影响东北地区干旱化趋势的主要因素;东北地区农田植被对气象干旱的响应呈现由西南向东北逐渐增强的趋势,东北地区的干湿情况对水稻单位面积产量产生了负面影响,而对玉米和小麦单位面积产量产生了积极的影响。

关键词:气象干旱;粮食产量;干湿交替;气候变暖;东北地区

中图分类号:S271

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)05-0123-09

Evolution characteristics of long-term drought in Northeast China and their impact on yield of major grain crops// ZHOU Zhaoqiang¹, WANG Ping¹, SHI Bo¹, SHI Haiyun² (1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To address the issue of long-term drought evolution characteristics in Northeast China and its potential threats to food security, this study utilized the standardized precipitation evapotranspiration index, combined with the Savitzky-Golay smoothing filter method, to assess the meteorological drought characteristics from 1901 to 2021. It compared the meteorological drought characteristics in recent period (1992-2021) with those in the historical long-term period (1901-1991), and explored the relationship between meteorological drought and major grain crop yields in Northeast China by integrating the yields of the three major grain crops including maize, rice, and wheat, from 1995 to 2021. The results showed that Northeast China exhibits alternating dry and wet conditions. In recent years, the areas showing a trend of aridification have significantly increased. The increase in evapotranspiration due to climate warming is likely the main factor affecting aridification trend in Northeast China. The response of farmland vegetation to meteorological drought in Northeast China presents a trend of gradually increasing from the southwest to the northeast. The dry and wet conditions in Northeast China negatively impact the per-unit-area yield of rice, but have a positive effect on the per-unit-area yields of maize and wheat.

Key words: meteorological drought; crop yield; alternating dry and wet conditions; climate warming; Northeast China

变化环境下,全球水循环过程发生明显的变化,导致各种极端水文事件(如洪涝、干旱、高温、热浪等)频发^[1-4],严重威胁农业、生态安全及社会经济可持续发展^[5-6]。与其他类型灾害相比,干旱是最常见的自然灾害之一。干旱通常发展缓慢,但是影响范围比较广,对农业、生态和人类社会活动的影响很

大^[7-10]。近年来东北地区的干旱呈现频率增加、强度加剧的趋势^[11-14],作为我国重要的粮食生产基地,其干旱化趋势的加剧可能对粮食安全构成威胁,因此,深入探究东北地区干旱的时空演变特征及其对作物产量的影响至关重要。

一般来说,干旱分为气象干旱,水文干旱,农业

基金项目:国家自然科学基金项目(52409012);黑龙江省博士后面上项目(LBH-Z24007);新时代龙江优秀硕士、博士学位论文立项项目

作者简介:周照强(1994—),男,副教授,博士,主要从事干旱传播研究。E-mail:zhouzq@neau.edu.cn

通信作者:史海匀(1986—),男,研究员,博士,主要从事极端水文事件研究。E-mail:shihy@sustech.edu.cn

干旱和社会经济干旱 4 种类型^[15-16], 气象干旱是其他类型干旱的导火索^[17], 许多干旱指数被用来评价气象干旱^[18-20]。例如:余锐等^[9]利用标准化降水指数(SPI)评估了广东省气象干旱的特征;胡玉乾等^[21]利用非平稳干旱指数评估了淮河流域的气象干旱特征;栗晓玲等^[22]利用综合干旱指数评估了关中地区的水文气象特征;宋玉鑫等^[23]利用标准化降水蒸散发指数(SPEI)分析了新疆多时间尺度干湿变化特征;关不了等^[24]利用 SPEI 评估了海河流域干旱时空演变及其与气候因子的关系。标准化气象干旱指数由于其计算简单且具有多时间尺度的特征被广泛应用, 标准化气象干旱指数包括 SPI、SPEI 和帕默尔干旱指数(PDSI)^[25-27]。PDSI 缺乏多时间尺度特征, SPI 虽然具有多时间尺度的特征, 但其只考虑了降水, 未考虑气候变暖的因素。SPEI 对 SPI 进行了改进, 它在计算中包括了温度, 因此, SPEI 在干旱研究中具有一定的优势, 并得到了广泛的应用^[28-29]。

随着人口数量的不断增长, 人类对粮食安全的需求越来越迫切, 干旱是制约粮食安全的主要因素之一, 众多学者围绕干旱和作物产量关系开展了大量研究。例如:孙爽等^[5]评估了华北平原不同等级农业干旱对冬小麦产量的影响;Krishnamurthy 等^[30]基于卫星测量的土壤湿度数据预测了全球与干旱相关的粮食安全变化;Webber 等^[31]量化了各种气候驱动因素对欧洲玉米和冬小麦历史和未来产量变化的贡献;李毅等^[32]利用作物模型评估了气象干旱和农业干旱对黄土高原春小麦的影响。尽管已经采用了一些方法以缓解干旱对粮食作物的影响, 例如改良作物品种、节水灌溉、优化种植制度等^[33-35], 但为保证我国的粮食安全, 仍需深入研究干旱对东北地区农业的影响。

本文采用 SPEI 干旱指数研究 1901—2021 年东北地区干旱的时空变化特征, 对比近期(1992—2021 年)和历史长期(1901—1991 年)干旱特征, 以揭示气候变暖背景下东北地区气象干旱的变化及其与作物产量的关系, 以期全面了解寒区农作物产量对气候变化的响应提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文研究区为东北地区, 地理位置为 38°43'N~53°33'N、118°53'E~135°05'E, 包括黑龙江、吉林和辽宁的全部地区(图 1)。研究区东部、北部和西部是山脉, 中部是平原, 受地形影响, 东北地区较同纬度其他地区地势略高。研究区受东亚季风影响, 夏季温暖湿

润, 冬季寒冷干燥, 年平均气温为-4.2~10.9℃, 沿纬度递减, 年降水量由东南向西北递减。作物生长季集中在 5—9 月。东北地区是我国重要的粮食生产基地之一, 2024 年东北三省的粮食总产量约为 1.477 亿 t, 黑龙江、吉林和辽宁粮食产量分别为 8 000 万、4266 万、2500.3 万 t。东北三省的粮食总产量约占全国的 25%, 对保障国家粮食安全具有重要意义。

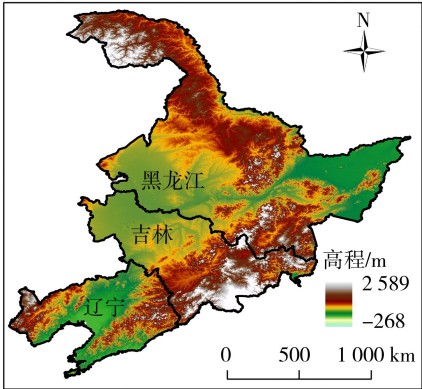


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

SPEI 数据基于英国东安格里亚大学气候研究中心提供的全球基础气象数据集(降水和蒸发量)获得, 该数据集(<https://digital.csic.es/handle/10261/202305>)为 NC(network common data form)格式的栅格数据文件, 空间分辨率为 0.5°×0.5°, 时间分辨率为 1 月, 时间序列为 1901—2021 年。1995—2021 年 3 种主要粮食作物(水稻, 玉米和小麦)单位面积产量数据均来自国家统计局(<https://data.stats.gov.cn/index.htm>)和各省统计年鉴。作物产量数据在空间上以省为单位, 时间上以年尺度进行统计和分析。归一化植被指数(NDVI)数据来源于国家青藏高原数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)的全球 GIMMS NDVI3g v1 数据集(1981—2015 年), 空间分辨率为 8 km×8 km, 时间分辨率为 15 d。为了确保不同数据集空间分辨率的一致性, 采用双线性插值方法将空间分辨率调整为 0.5°×0.5°。2020 年土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54>)。

2 研究方法

本文利用 Vicente-Serrano 等^[36]提出的 SPEI 分析气象干旱的变化特征。该指数用降水量与蒸发量的差值表示水分的盈亏, 对差值进行正态化处理, 得到标准化的 SPEI 值。根据 SPEI 值将干旱划分为无旱、轻度干旱、中度干旱、重度干旱、极端干旱 5 个等级, 对应的 SPEI 值分别为>-0.5~0.5、>-1.0~

-0.5、>-1.5~-1.0、>-2.0~-1.5、≤-2.0。

在分析干旱的变化趋势时,本文采用 Savitzky-Golay 平滑滤波。该方法通过局部多项式拟合来平滑数据,常用于信号处理或时间序列去噪。它的优势是在平滑噪声的同时,能较好地保留数据的原始趋势。考虑到 ENSO 事件的典型时长为 18~24 月,本文滑动窗口选择为 21 月。

为反映月尺度下的干旱特征,本文仅分析 1 月尺度的干旱指数(SPEI1),计算 SPEI1 与水稻、小麦和玉米 3 种粮食作物产量和 NDVI 之间的相关系数,以反映不同粮食作物对干旱变化的响应程度。

3 结果与分析

3.1 东北地区干旱特征

按省级行政区分析东北地区气象干旱的时间变化特征,结果如图 2 所示。由图 2 可知,1901—2021 年东北地区的气象干旱呈现干湿交替的变化特征,共经历了 9 个阶段,其中,干旱化阶段(SPEI 呈现减小趋势)包括 1914—1925 年、1939—1954 年、1966—1982 年、1996—2012 年,湿润化阶段(SPEI 呈现增大趋势)包括 1901—1913 年、1926—1938 年、1955—1965 年、1983—1995 年、2013—2021 年。根据干旱等级划分和图 2 中的阴影部分,东北地区共出现过 12 次干旱事件,其中轻度、中度、重度干旱事件分别为 2、7、3 次。

黑龙江、吉林和辽宁气象干旱的整体特征相似,也呈现干湿交替的变化特征,干旱化阶段和湿润化阶段的时间与东北地区整体略有差异但基本一致。

从干旱事件的角度看,黑龙江干旱事件的强度更大、持续时间更长,而吉林和辽宁发生的干旱事件比黑龙江少,且持续时间短。这可能是由于东北地区受东亚季风的影响,降水量由东南向西北逐渐减少,导致黑龙江的干旱特征更为明显。

3.2 气候变化下干旱特征的变化

由图 2 可以看出,近期(1992—2021 年)东北地区的干旱化趋势比历史长期(1901—1991 年)更为明显。为了进一步探究气候变化对东北地区干旱特征影响,对比分析了近期和历史长期气象干旱的发生频率,图 3 和图 4 分别为东北地区近期和历史长期干旱倾向率和干旱频率空间分布。

由图 3(a)可知,辽宁和黑龙江北部地区呈现干旱化趋势;黑龙江中部和东部地区以及吉林呈现湿润化趋势,其中,黑龙江中部和东部地区趋势更为显著。由图 3(b)~(d)可知,黑龙江西南部、北部大兴安岭地区和东部地区中度干旱的发生频率较高,吉林与黑龙江接壤的地区以及辽宁中部中度干旱发生频率较高;黑龙江重度干旱发生频率较低,吉林中部、南部以及辽宁大部分地区重度干旱发生频率较高;极端干旱发生频率的空间分布特征与中度干旱和重度干旱不同,黑龙江大部分地区极端干旱频率较高,部分地区甚至超过了中旱和重旱发生的频率,吉林东北部和西北部极端干旱发生频率也较高,相比于黑龙江和吉林,辽宁极端干旱发生频率较低。

由图 4(a)可知,东北地区历史长期呈现湿润化趋势,黑龙江北部的大兴安岭地区湿润化趋势比较显著,吉林和辽宁湿润化趋势相对较弱。由

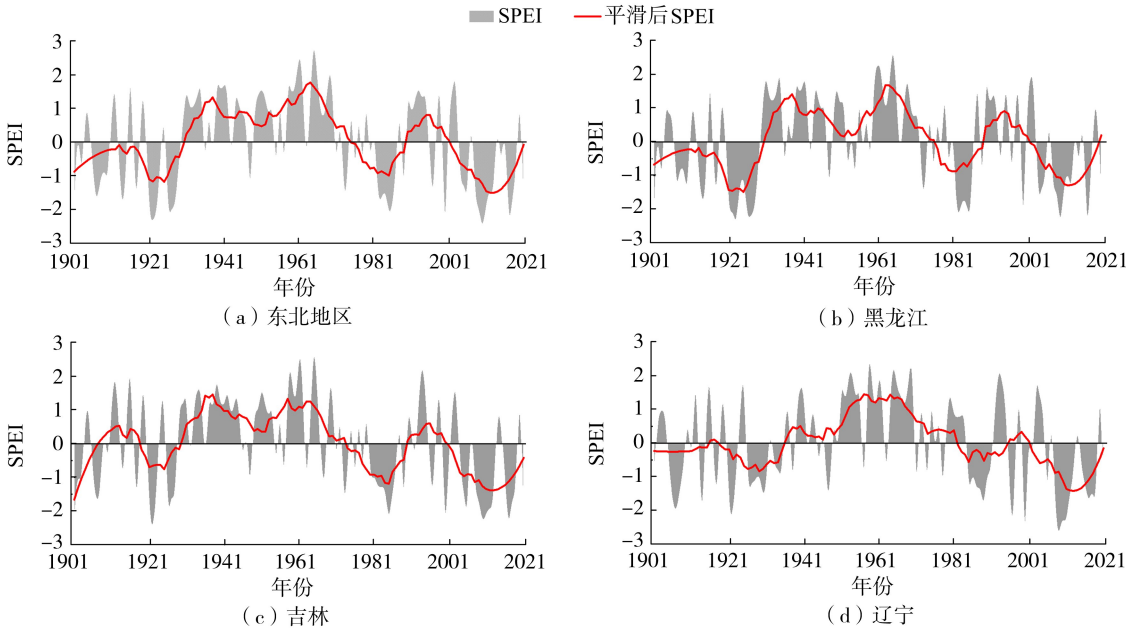
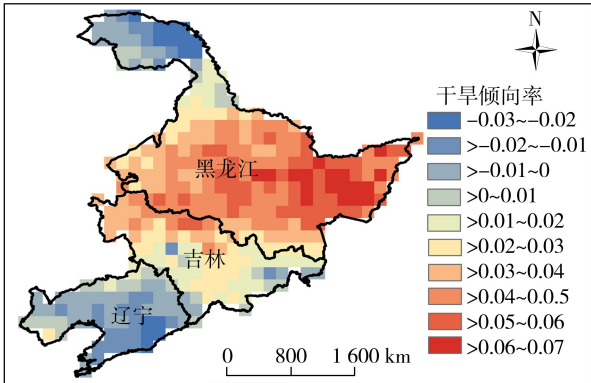
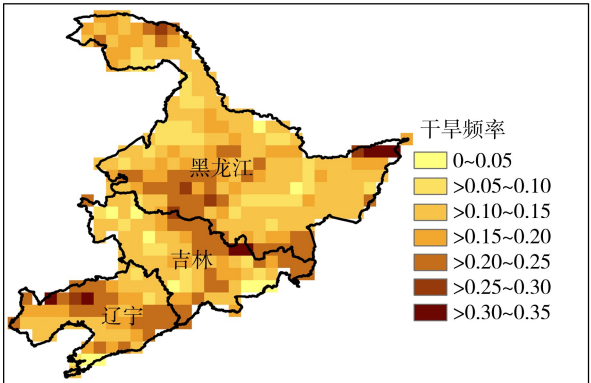


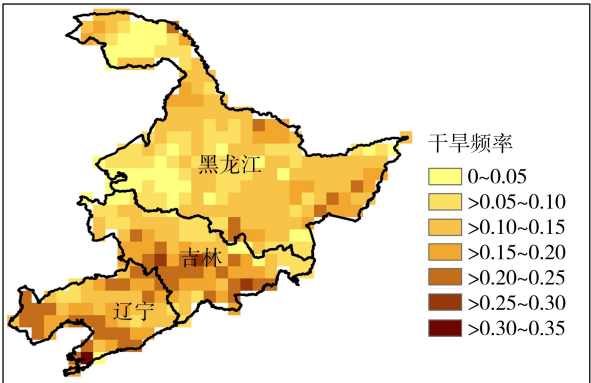
图 2 东北地区干旱变化趋势
Fig. 2 Trend of drought in Northeast China



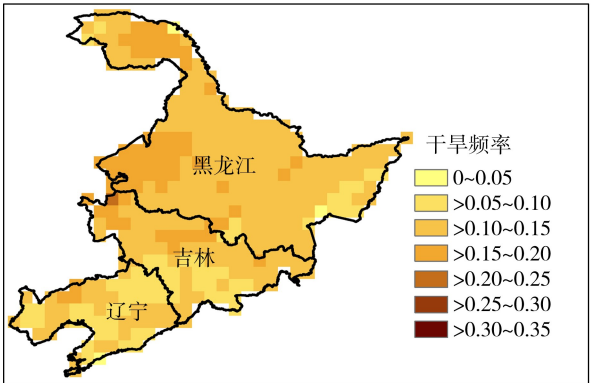
(a) 干旱倾向率



(b) 中度干旱频率



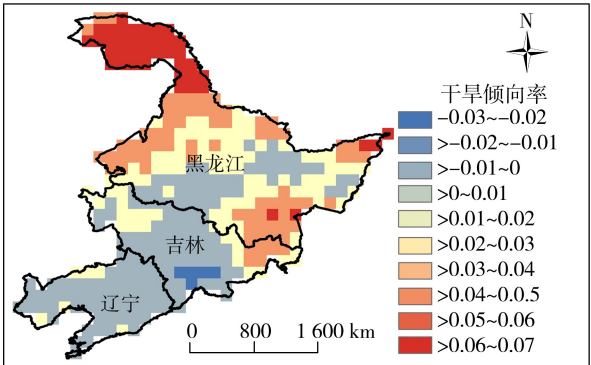
(c) 重度干旱频率



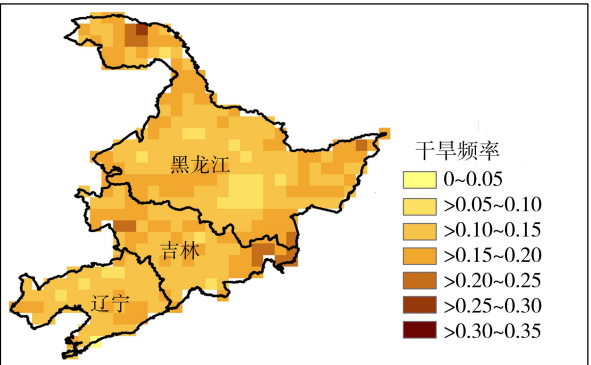
(d) 极端干旱频率

图 3 东北地区近期干旱倾向率和干旱频率空间分布

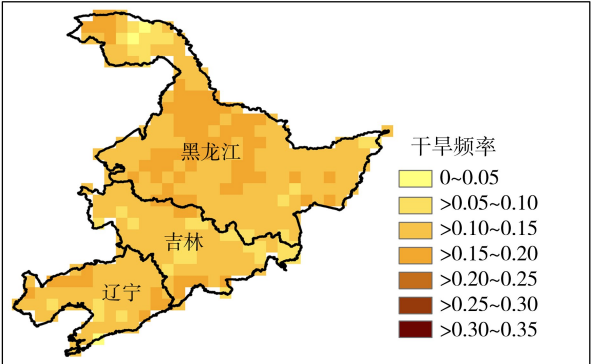
Fig. 3 Spatial distributions of drought tendency rate and drought frequencies in Northeast China in recent period



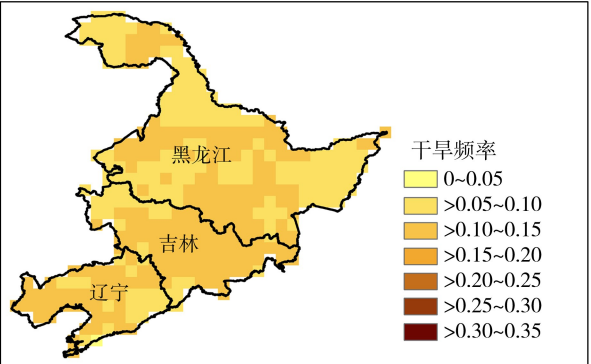
(a) 干旱倾向率



(b) 中度干旱频率



(c) 重度干旱频率



(d) 极端干旱频率

图 4 东北地区历史长期干旱倾向率和干旱频率空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of drought tendency rate and drought frequencies in Northeast China in historical long-term period

图 4(b)~(d)可知,黑龙江西南部、北部大兴安岭地区和东部地区以及吉林与黑龙江接壤的地区中度干旱发生频率较高;黑龙江中部和辽宁部分地区重度干旱发生频率较高,吉林重度干旱发生频率较低;黑龙江中部、东南部以及吉林和辽宁极端干旱发生频率较高。

对黑龙江、吉林和辽宁近期和历史长期重度干旱和极端干旱发生频率以及降水和蒸散发的变化特征进行统计,结果如图 5 所示。图 5(a)(b)表明,相比于历史长期,黑龙江近期重度干旱发生频率略有降低,但吉林和辽宁重度干旱发生频率增高,特别是辽宁的增加幅度较大;黑龙江和吉林近期极端干旱发生频率略有增高,辽宁极端干旱发生频率略有降低。图 5(c)(d)表明,相比于历史长期,黑龙江近期降水量变化不大,吉林和辽宁降水量略有减少;东北地区蒸散发表现出增加的趋势。因此,虽然降水量的减少是影响东北地区干旱变化的重要因素,但是气候变暖导致的蒸散发增加可能是影响东北地区干旱变化的主要因素。

总体而言,历史长期和近期东北地区不同等级干旱的变化趋势和空间分布存在明显差异。相比于历史长期,近期呈现干旱化趋势的地区明显增多,湿润化趋势也较为显著。此外,不同等级干旱的发生频率有所升高,特别是极端干旱的发生频率明显升高,空间分布范围明显增大。

3.3 干旱对主要粮食作物产量的影响

图 6 为 1995—2021 年东北地区粮食作物总产

量和 3 种主要粮食作物产量的变化趋势,图中 k 为产量变化趋势的斜率,总的来说,东北地区粮食作物产量整体呈现增长趋势。辽宁和吉林单位面积产量较大,黑龙江单位面积产量较小,但除小麦外,黑龙江单位面积产量的增长趋势最显著。此外,2000—2010 年东北地区的粮食作物产量波动比较大,特别是 2000 年出现了较为严重的减产,这可能是由于 2000 年发生了比较严重的干旱事件(图 2)。

利用 2020 年土地利用数据提取了农田类型,计算 SPEI1 与农田植被 NDVI 间的相关系数,分析了干旱与农田植被的关系,结果如图 7 所示。由图 7 可知,辽宁农田植被对气象干旱的响应程度较低,黑龙江农田植被对气象干旱的响应程度较高。进一步统计各省农田植被对气象干旱的响应程度,结果如图 8 所示。由图 8 可知,黑龙江 SPEI1 与农田植被 NDVI 相关系数的均值为 0.7,辽宁和吉林分别为 0.61 和 0.58。总的来说,东北地区农田植被对气象干旱的响应呈现由西南向东北逐渐增强的变化趋势。

计算 SPEI1 与不同类型粮食作物产量间的相关系数,统计不同类型粮食作物产量对气象干旱的响应程度,结果如图 9 所示。各省单位面积粮食作物总产量与气象干旱均呈正相关关系。黑龙江小麦和玉米单位面积产量与气象干旱也呈正相关关系,但水稻单位面积产量与气象干旱呈负相关关系。辽宁水稻单位面积产量与气象干旱的响应关系与黑龙江相似,而吉林虽然呈正相关关系,但相关性很低。小

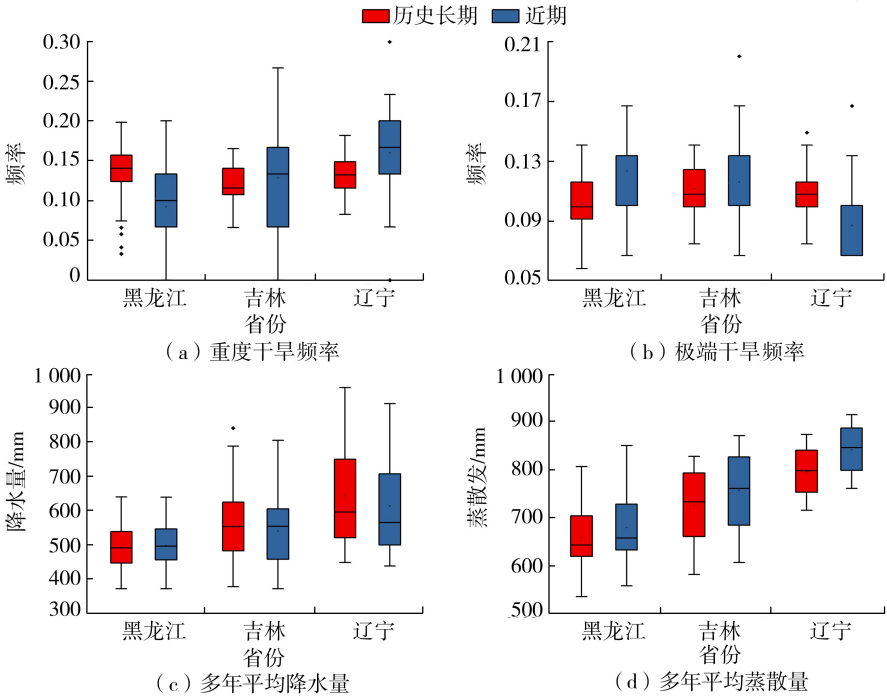


图 5 东北地区不同时期干旱频率、降水和蒸散发对比

Fig. 5 Comparison of drought frequency, precipitation, and evapotranspiration in Northeast China in different periods

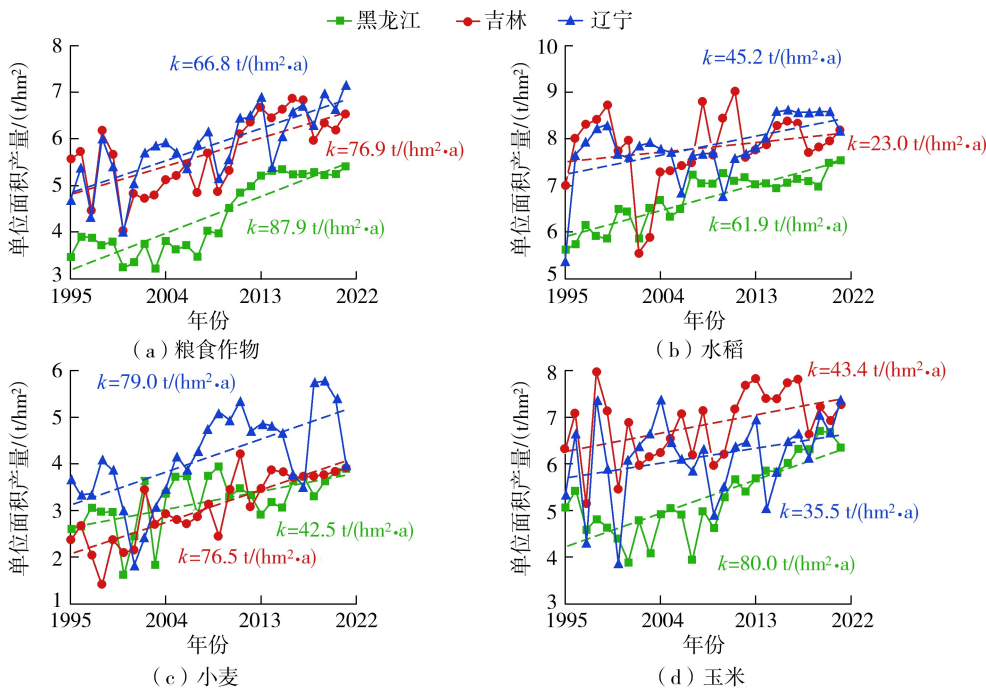


图 6 东北地区不同粮食作物产量趋势

Fig. 6 Trends of different grain yields in Northeast China

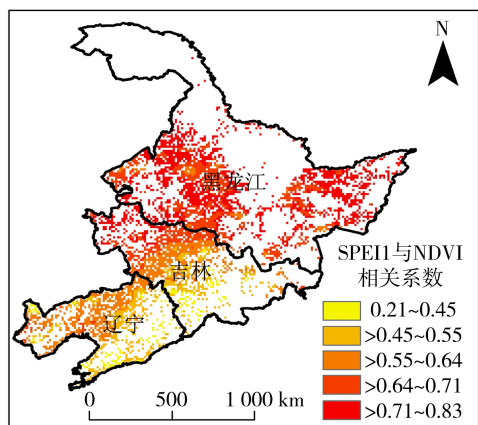


图 7 农业植被对气象干旱响应程度的空间分布

Fig. 7 Spatial response distribution of agricultural vegetation to meteorological drought

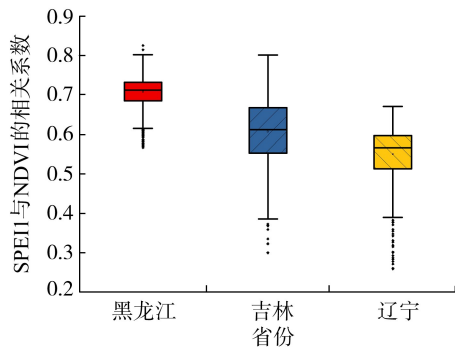


图 8 农田植被对气象干旱的响应程度

Fig. 8 Response of agricultural vegetation to meteorological drought

麦单位面积产量与气象干旱的响应关系在 3 个省都呈正相关关系,但在吉林相关性很低。玉米单位面

积产量与气象干旱的响应关系在 3 个省都呈正相关关系,且相关性较高,这可能是由于玉米是喜温耐旱作物,在全球气候变暖条件下,东北地区的干湿条件可能促进了玉米产量的增长^[37]。

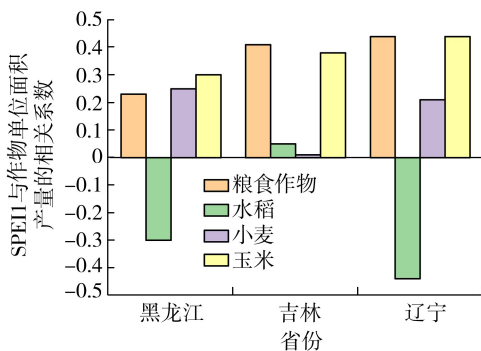


图 9 农田作物产量对气象干旱的响应程度

Fig. 9 Response of grain yield to meteorological drought

4 结 论

a. 黑龙江、吉林和辽宁气象干旱的整体特征相似,呈现干湿交替的变化特征,干旱化阶段和湿润化阶段的时间与东北地区整体的气象干旱略有差异但基本一致,黑龙江干旱特征更为明显。

b. 相比于历史长期,近期呈现干旱化趋势的地区明显增多,湿润化趋势也较为显著。不同等级干旱频率有所提升,特别是极端干旱的频率明显升高。

c. 虽然降水量减少是导致东北地区干旱化趋势的重要因素,但是气候变暖导致蒸散发的增加可能是影响东北地区干旱化的主要因素。

d. 东北地区粮食作物产量整体呈增长趋势,农田植被对气象干旱的响应呈现由西南向东北逐渐增强的趋势。东北地区的干湿情况对水稻单位面积产量产生了负面影响,但是对玉米和小麦单位面积产量产生了积极的影响。

参考文献:

[1] 杨肖丽,张佳乐,黄星怡,等. 气候变化和人类活动对长江流域极端径流的影响[J]. 水资源保护, 2025, 41 (4): 1-9. (YANG Xiaoli, ZHANG Jiale, HUANG Xingyi, et al. Impacts of climate change and human activities on extreme runoff in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 1-9. (in Chinese))

[2] 武传号,逯家宝,周君,等. 基于 CMIP6 多模式集合的中国洪水-热浪复合极端事件特征预测[J]. 水资源保护, 2025, 41 (3): 20-30. (WU Chuanhao, LU Jiabao, ZHOU Jun, et al. Characteristic projection of successive flood-heatwave extreme events in China based on CMIP6 multi-model ensembles [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (3): 20-30. (in Chinese))

[3] 王磊,曾思栋,阳林翰,等. 基于 CMIP6 的气候变化下汉江流域气象干旱特征研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5): 39-45. (WANG Lei, ZENG Sidong, YANG Linhan, et al. CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5): 39-45. (in Chinese))

[4] 郝增超,张璇,郝芳华,等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对[J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 46-52. (HAO Zengchao, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6): 46-52. (in Chinese))

[5] 孙爽,杨晓光,张镇涛,等. 华北平原不同等级干旱对冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37 (14): 69-78. (SUN Shuang, YANG Xiaoguang, ZHANG Zhentao, et al. Impacts of different grades of drought on winter wheat yield in North China Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37 (14): 69-78. (in Chinese))

[6] 崔水莲. 海河流域干旱缺水对生态环境的影响分析 (1965—1989 年) [J]. 华北水利水电大学学报 (社会科学版), 2021, 37 (1): 48-55. (CUI Shuilian. Analysis of the impact of drought and water shortage on the ecological environment in the Haihe River Basin (1965-1989) [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Social Science Edition), 2021, 37 (1): 48-55. (in Chinese))

[7] 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))

[8] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6): 515-520. (in Chinese))

[9] 余锐,孙丽颖,焦场,等. 基于 SPI 的 1979—2020 年广东气象干旱的时空特征[J]. 广东气象, 2023, 45 (1): 19-22. (YU Rui, SUN Liying, JIAO Yang, et al. Standardized precipitation index-based spatiotemporal characteristics of meteorological droughts in Guangdong Province from 1979-2020 [J]. Guangdong Meteorology, 2023, 45 (1): 19-22. (in Chinese))

[10] 薛联青,王文壮,刘远洪,等. 黄河流域植被总初级生产力对持续性干旱水分亏缺的响应[J]. 水资源保护, 2024, 40 (3): 44-51. (XUE Lianqing, WANG Wenzhuang, LIU Yuanhong, et al. Response of gross primary productivity of vegetation to persistent drought-induced water deficit in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 44-51. (in Chinese))

[11] 陈雨烨,王培娟,张源达,等. 基于 SIF 的东北春玉米干旱动态阈值构建[J]. 农业工程学报, 2023, 39 (19): 103-110. (CHEN Yuye, WANG Peijuan, ZHANG Yuanda, et al. Constructing the drought dynamic threshold of spring maize in Northeast China using SIF index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39 (19): 103-110. (in Chinese))

[12] 曲美慧,涂钢,冯喜媛. 1961—2019 年东北地区作物生长不同阶段极端干期时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 2022, 31 (2): 242-251. (QU Meihui, TU Gang, FENG Xiyuan. Analysis of spatial and temporal variation characteristics of extreme dry spells for different crop growth stages in Northeast China from 1961 to 2019 [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31 (2): 242-251. (in Chinese))

[13] 赖雨瞳,徐影. CMIP6 全球气候模式对中国地区干旱模拟能力评估与预估[J]. 大气科学, 2024, 48 (6): 2157-2177. (LAI Yutong, XU Ying. Assessment of simulation capability and projection of drought over China based on CMIP6 global climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48 (6): 2157-2177. (in Chinese))

[14] 杨王华,刘志娟,巩敬锦,等. 东北地区未来春玉米干旱风险时空分布及对气候变化的响应[J]. 中国农业科学, 2024, 57 (12): 2336-2349. (YANG Wanghua, LIU Zhijuan, GONG Jingjin, et al. Drought risk for spring maize

- in the future and response to climate change in the Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57 (12): 2336-2349. (in Chinese))
- [15] ZHOU Zhaoqiang, WANG Ping, LI Linqi, et al. Recent development on drought propagation: a comprehensive review[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 645: 132196
- [16] 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
- [17] ZHOU Zhaoqiang, SHI Haiyun, FU Qiang, et al. Investigating the propagation from meteorological to hydrological drought by introducing the nonlinear dependence with directed information transfer index[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57 (8): e2021WR030028
- [18] 谢灵枫, 杨肖丽, 吴凡, 等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(1): 10-17. (XIE Lingfeng, YANG Xiaoli, WU Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(1): 10-17. (in Chinese))
- [19] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度和SPI的黄河流域干旱预测[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))
- [20] 薛联青, 张竞楠, 刘晓群, 等. 基于改进的综合气象干旱指数的洞庭湖流域干旱时空特征[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(1): 1-6. (XUE Lianqing, ZHANG Jingnan, LIU Xiaoqun, et al. Spatial and temporal patterns of droughts in Dongting Lake watershed based on improved meteorological drought composite index [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(1): 1-6. (in Chinese))
- [21] 胡玉乾, 胡磊, 孙鹏, 等. 基于非平稳的淮河流域干旱时空演变特征研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(1): 116-124. (HU Yuqian, HU Lei, SUN Peng, et al. Spatio-temporal evolution of drought events in Huaihe River Basin: a non-stationary standardized precipitation evapotranspiration index study[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(1): 116-124. (in Chinese))
- [22] 栗晓玲, 梁箴. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. *水资源保护*, 2019, 35(4): 17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(4): 17-23. (in Chinese))
- [23] 宋玉鑫, 马军霞, 左其亭, 等. 新疆多时间尺度干湿变化特征分析[J]. *水资源保护*, 2021, 37(2): 43-48. (SONG Yuxin, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Analysis on characteristics of dry-wet variation on multi-time scale in Xinjiang[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2): 43-48. (in Chinese))
- [24] 关不了, 姜珊, 赵勇, 等. 海河流域干旱时空演变及其与气候因子的关系[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 59-68. (GUAN Buliao, JIANG Shan, ZHAO Yong, et al. Spatial and temporal evolution of drought and its relationship with climate factors in the Haihe River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 59-68. (in Chinese))
- [25] 杨肖丽, 朱敏纳, 罗定, 等. 黄河流域气象干旱及其恢复动态分析[J]. *水资源保护*, 2025, 41(3): 127-133. (YANG Xiaoli, ZHU Minne, LUO Ding, et al. Dynamic analysis of meteorological drought and its recovery in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3): 127-133. (in Chinese))
- [26] 杜鸿, 曾思栋, 韦晓福, 等. 嘉陵江流域气象干旱向水文干旱传播特征研究[J]. *水资源保护*, 2025, 41(3): 134-143. (DU Hong, ZENG Sidong, WEI Xiaofu, et al. Study on propagation characteristics from meteorological drought to hydrological drought in the Jialing River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3): 134-143. (in Chinese))
- [27] 陶然, 张珂. 基于PDSI的1982—2015年我国气象干旱特征及时空变化分析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(5): 50-56. (in Chinese))
- [28] YAO Ning, LI Yi, LEI Tianjie, et al. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961-2013 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 73-89
- [29] 冯凯, 李彦彬, 王飞, 等. 基于改进三维识别方法的西北地区干旱事件分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 63-72. (FENG Kai, LI Yanbin, WANG Fei, et al. Analysis of drought events in Northwest China based on an improved three-dimensional identification method [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 63-72. (in Chinese))
- [30] KRISHNAMURTHY R P K, FISHER J B, CHOULARTON R J, et al. Anticipating drought-related food security changes[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(11): 956-964
- [31] WEBBER H, EWERT F, OLESEN J E, et al. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4249
- [32] 李毅, 张思远, 刘庆祝, 等. 基于DSSAT-CERES-Wheat的黄土高原西部春小麦干旱影响研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 338-348. (LI Yi, ZHANG Siyuan, LIU Qingzhu, et al. Effects of droughts and meteorology on

spring wheat in Western Loess Plateau based on DSSAT-CERES-Wheat Model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (6) : 338-348. (in Chinese))

[33] 孟雨,田文仲,温鹏飞,等. 基于不同发育阶段协同的小麦品种抗旱性综合评判[J]. 作物学报,2023,49(2): 570-582. (MENG Yu, TIAN Wenzhong, WEN Pengfei, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of wheat varieties based on synergy of different developmental stages[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49 (2) : 570-582. (in Chinese))

[34] 李兴华,汪吴凯,杨特武,等. 节水抗旱稻发展现状、优势及需解决的主要问题[J]. 华中农业大学学报,2022, 41(1): 84-91. (LI Xinghua, WANG Wukai, YANG Tewu, et al. Development status, advantages and main problems to be resolved of water-saving and drought-resistant rice [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41

(1):84-91. (in Chinese))

[35] 亢江飞,李林,方社法,等. 豫西地区大豆油葵间作抗旱保收的种植模式[J]. 大豆科技, 2021 (2) : 26-28. (KANG Jiangfei, LI Lin, FANG Shefa, et al. Planting pattern of soybean and oil sunflower intercropping in western Henan Province [J]. Soybean Science & Technology, 2021(2):26-28. (in Chinese))

[36] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23 (7) : 1696-1718

[37] ZHOU Zhaoqiang, SHI Haiyun, FU Qiang, et al. Assessing spatiotemporal characteristics of drought and its effects on climate-induced yield of maize in Northeast China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125097. (收稿日期: 2025 - 03 - 07 编辑: 施业)

(上接第 114 页)

[34] MOORE R J. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales [J]. Hydrological Sciences Journal, 1985, 30(2):273-297.

[35] PERRIN C, MICHEL C, ANDRÉASSIAN V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation [J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1/2/3/4) : 275-289.

[36] 邓鹏鑫,王银堂,胡庆芳,等. GR4J 模型在赣江流域日径流模拟中的应用 [J]. 水文, 2014, 34 (2) : 60-65. (DENG Pengxin, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Application of GR4J in daily runoff simulation for Ganjiang River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(2):60-65. (in Chinese))

[37] 白云鹏,郑爱民,王文川,等. 基于深度学习的山丘区中小河流洪水预报误差校正方法 [J]. 水文, 2025, 45 (1) : 37-44. (BAI Yunpeng, ZHENG Aimin, WANG Wenchuan, et al. Error correction method for flood forecasting of medium and small catchments in hilly areas based on deep learning [J]. Journal of China Hydrology, 2025, 45(1):37-44. (in Chinese))

[38] 张力,王红瑞,郭琲楠,等. 基于时序分解与机器学习的非平稳径流序列集成模型与应用 [J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 42-52. (ZHANG Li, WANG Hongrui, GUO Beinan, et al. Integrated model and application of non-stationary runoff based on time series decomposition and machine learning [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(1):42-52. (in Chinese))

[39] 石卓,史东华,姚成,等. 基于径流模数的 LSTM 模型在无资料嵌套流域的应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 51-57. (SHI Zhuo, SHI Donghua, YAO Cheng, et al. Application of runoff modulus-based LSTM in ungauged nested watersheds [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3) : 51-57. (in

Chinese))

[40] 徐冬梅,王亚琴,王文川. 基于 VMD-GRU 与非参数核密度估计的月径流区间预测方法及应用 [J]. 水电能源科学, 2022, 40 (6) : 1-5. (XU Dongmei, WANG Yaqin, WANG Wenchuan. Monthly runoff interval prediction method and application based on VMD-GRU and nonparametric kernel density estimation [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(6):1-5. (in Chinese))

[41] KANG Yan, XIANG Yue, ZHANG Zishang, et al. A novel physical process-ensemble learning model framework with residual error decomposition to upskill daily runoff prediction [J]. Journal of Hydrology, 2025, 651:132565.

[42] 巴欢欢,郭生练,钟逸轩,等. 考虑降水预报的三峡入库洪水集合概率预报方法比较 [J]. 水科学进展, 2019, 30 (2) : 186-197. (BA Huanhuan, GUO Shenglian, ZHONG Yixuan, et al. Comparative study on probabilistic ensemble flood forecasting considering precipitation forecasts for the Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2):186-197. (in Chinese))

[43] 刘成帅,解添宁,李文忠,等. 考虑径流过程量化的机器学习洪水预报模型 [J]. 水科学进展, 2024, 35 (3) : 420-429. (LIU Chengshuai, XIE Tianning, LI Wenzhong, et al. Machine learning-based flood forecasting models considering runoff process vectorization [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3):420-429. (in Chinese))

[44] 李步,田富强,李钰坤,等. 融合气象要素时空特征的深度学习水文模型 [J]. 水科学进展, 2022, 33 (6) : 904-913. (LI Bu, TIAN Fuqiang, LI Yukun, et al. Development of a spatiotemporal deep-learning-based hydrological model [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(6):904-913. (in Chinese)) (收稿日期: 2025 - 02 - 28 编辑: 施业)