doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.007

基于 CMFD 2.0 和 SPEI 的江苏省 1951—2024 年气象干旱事件时空演变特征

陈　上[1]　陈　哲[1]　邱丽欣[2]　林　昕[3]　陈先冠[4]　白慧卿[5]　余　振[1]　冯利平[2]

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;
2. 智慧农场技术与系统全国重点实验室, 哈尔滨 150000; 3. 龙岩市气象局, 龙岩 364000;
4. 福建农林大学农学院, 福州 350002; 5. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 干旱是江苏省最主要的气象灾害之一,准确评估区域干旱时空演变特征对农业水资源管理和防灾减灾具有重要意义。基于第二代中国区域高时空分辨率气象驱动数据集(CMFD 2.0)、江苏省内 13 个常规气象站以及 3 个太阳辐射观测站逐日气象数据,采用 FAO56 Penman - Monteith(P - M)模型和 Priestley - Taylor(P - T)模型估算参考作物蒸散量(ET_0),评估 CMFD 2.0 产品在江苏省的适用性,分析 CMFD 2.0 产品结合 P - T 模型估算 ET_0 精度,并评估 CMFD 2.0 降水产品误差在月尺度标准化降水蒸散指数(SPEI)计算以及干旱事件识别中的传递,最后结合改进的 Mann - Kendall 方法从年际变化、季节分异和空间格局 3 个维度分析江苏省气象干旱频率、历时和强度的时空演变特征。结果表明,CMFD 2.0 日尺度最高气温、最低气温、太阳辐射及月尺度降水产品具有较高精度,决定系数(R^2)为 0.987、0.950、0.871 及 0.960,均方根误差(RMSE)为 1.30℃、2.17℃、2.95 MJ/(m^2·d)和 18.18 mm,但日尺度降水产品精度相对较差(R^2 = 0.648,RMSE 为 6.16 mm)。基于 CMFD 2.0 驱动 P - T 模型估算的 ET_0 与基于站点实测气象数据驱动 P - M 模型估算的 ET_0 具有良好一致性(R^2 = 0.88,RMSE 为 0.81 mm/d)。基于 CMFD 计算的 $SPEI_{cmfd}$ 与站点 $SPEI_{sta}$ 结果高度一致(R^2 = 0.942,RMSE 为 0.24),干旱等级识别总体分类精度(OA)为 87.72%,Kappa 为 0.760,误差主要集中于相邻等级,整体不影响区域干旱监测可靠性。江苏省 1951—2024 年平均 SPEI 无显著变化趋势,但季节差异明显,春季 SPEI 呈显著下降趋势,平均变化率为 -0.083/(10a),其余季节平均 SPEI 变化趋势均不显著。各等级干旱发生频率由大到小为轻旱(15.6%)、中旱(9.5%)、重旱(3.8%)、特旱(2.1%),2 月发生干旱频率最高(36.0%),10 月发生干旱频率最低(30.7%)。干旱次数和累计历时呈北高南低的空间格局,干旱强度表现出更复杂的局地差异,苏北地区为干旱敏感区,而苏南地区干旱更多表现为低频、高烈度事件。在季节上,全省春季干旱发生频率空间差异最大(2.7% ~ 60.2%),夏季空间差异最小(23.9% ~ 43.2%)。春、秋和冬季干旱频率呈单一纬度梯度,在研究时段内以上升趋势为主,其中春季上升趋势达显著水平的面积占比为 52.7%,而夏季干旱频率以下降趋势为主。干旱历时和强度均呈北部上升以及南部下降的变化特征,苏北地区干旱风险较高,需加强监测预警。

关键词: 气象干旱; 标准化降水蒸散指数; 参考作物蒸散量; CMFD 2.0; 江苏省

中图分类号: P49; S166　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)22-0082-14　　**OSID**:

Spatiotemporal Evolution of Meteorological Drought Events in Jiangsu Province from 1951 to 2024 Based on CMFD 2.0 and SPEI

Chen Shang[1]　Chen Zhe[1]　Qiu Lixin[2]　Lin Xin[3]　Chen Xianguan[4]　Bai Huiqing[5]　Yu Zhen[1]　Feng Liping[2]

(1. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC - FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*
2. *National Key Laboratory of Smart Farm Technologies and Systems, Harbin* 150000, *China*
3. *Longyan Meteorological Bureau, Longyan* 364000, *China*
4. *College of Agriculture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou* 350002, *China*
5. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*)

收稿日期: 2026 - 08 - 14　修回日期: 2026 - 08 - 28

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(25KJB170012)、江苏省科技厅碳达峰碳中和专项(BE2023400)、福建省灾害天气重点实验室开放课题(2024KFKT03)和南京信息工程大学人才启动经费项目(2023r101)

作者简介: 陈上(1991—),男,讲师,博士,主要从事干旱监测与影响评估研究,E-mail: ching@nuist.edu.cn

通信作者: 邱丽欣(1999—),女,助理研究员,主要从事智慧农业研究,E-mail: qiulixin2021@163.com

Abstract: Drought is one of the most severe agro-meteorological hazards in Jiangsu Province, China. Accurate characterization of its spatiotemporal evolution is essential for agricultural water resources management and drought risk mitigation. Using the second-generation China Meteorological Forcing Dataset (CMFD 2.0) and daily meteorological observations from 13 normal weather stations and three solar radiation stations in Jiangsu Province, reference evapotranspiration (ET_0) was estimated by using the FAO－56 Penman－Monteith (P－M) and Priestley－Taylor (P－T) models. The applicability of CMFD 2.0 in Jiangsu Province was evaluated, and the accuracy of ET_0 estimated by coupling CMFD 2.0 with the P－T model was assessed. Monthly standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) values were then calculated by using the estimated ET_0 and CMFD 2.0 precipitation data. Combined with the modified Mann－Kendall test, the spatiotemporal evolution of meteorological drought frequency, duration, and intensity in Jiangsu Province was analyzed from the perspectives of interannual variability, seasonal differences, and spatial patterns. The results showed that the CMFD 2.0 air temperature and solar radiation datasets exhibited high accuracy, with coefficients of determination (R^2) of 0.987, 0.950, 0.871, and 0.960 for daily maximum temperature, daily minimum temperature, daily solar radiation, and monthly precipitation, respectively. The corresponding root mean square errors (RMSEs) were 1.30℃, 2.17℃, 2.95 MJ/(m^2·d), and 18.18 mm. In contrast, the daily precipitation dataset showed relatively lower accuracy (R^2 = 0.648, RMSE = 6.16 mm). The ET_0 estimated by using the CMFD 2.0-driven P－T model agreed well with that estimated using the station-observation-driven P－M model (R^2 = 0.88, RMSE = 0.81 mm/d). The SPEI derived from CMFD agreed well with that derived from station observations (R^2 = 0.942, RMSE = 0.24). The overall accuracy (OA) and Kappa coefficient for drought category classification were 87.72% and 0.760, respectively. Most classification errors occurred between adjacent drought categories, suggesting that they did not substantially affect the reliability of regional drought monitoring. The annual mean SPEI showed no significant trend during 1951—2024, whereas significant seasonal differences were observed. Spring SPEI exhibited a significant decreasing trend at a rate of −0.083 decade^{-1}, while no significant trends were detected in the other seasons. The occurrence frequencies of mild, moderate, severe, and extreme droughts were 15.6%, 9.5%, 3.8%, and 2.1%, respectively. Drought occurred most frequently in February (36.0%) and least frequently in October (30.7%). Drought occurrence and cumulative duration exhibited a clear spatial pattern of being higher in northern Jiangsu and lower in southern Jiangsu, whereas drought intensity showed more complex local variations. Northern Jiangsu was identified as the most drought-prone region, while droughts in southern Jiangsu were characterized by lower frequency but higher severity. Among the four seasons, spring showed the largest spatial variation in drought frequency (2.7% ~ 60.2%), whereas summer exhibited the smallest variation (23.9% ~ 43.2%). Drought frequency in spring, autumn, and winter generally increased during the study period, with 52.7% of the study area showing a significant increasing trend in spring, while drought frequency in summer was dominated by a decreasing trend. Both drought duration and drought intensity increased in northern Jiangsu but decreased in southern Jiangsu, indicating that northern Jiangsu faced a higher drought risk and required strengthened drought monitoring and early warning.

Key words: meteorological drought; standardized precipitation evapotranspiration index; reference evapotranspiration; CMFD 2.0; Jiangsu Province

0　引言

干旱是一种发展速度慢、持续时间长、影响范围广的自然灾害之一。全球气候变化背景下干旱事件发生频率和强度增加,中纬度地区气候暖干化趋势明显,对农业生产、水资源供给和生态系统稳定构成严重威胁[1-2]。中国地处东亚季风区,降水时空分布极不均匀,干旱灾害频繁发生[3-4]。据统计,中国年均农业干旱受灾面积约 2×10^7 hm^2,造成粮食损失占各类气象灾害损失的 55% 以上[5]。因此,准确监测和评估区域干旱时空演变规律,对于农业防灾减灾和水资源科学管理具有重要的现实意义。

干旱指数是定量表征干旱程度及描述旱情演变的重要工具。然而,干旱的形成与发展不仅受降水、气温等气象条件影响,还与水文过程、土壤含水率、作物生长状况及农田灌溉条件等密切相关,因此构建兼具准确性与普适性的干旱指数仍具有较大难度。为实现干旱监测与评价,国内外学者已提出百余种干旱指数[6]。McKee 等[7]于 1993 年提出标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI),因计算简便、仅需降水数据且具有多时间尺度特征而被世界气象组织推荐为通用干旱监测指标。然

而,SPI 仅考虑降水单一因子,忽略了温度升高通过蒸散增强对水分平衡的影响,在增温显著区域可能系统性低估干旱严重程度[8]。为此,Vicente-Serrano 等[9]在 SPI 框架基础上提出了标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),通过引入参考作物蒸散量(ET_0)以兼顾降水和温度的变化信息,进而能够更灵敏地反映气候变暖背景下区域干旱演变特征。近年来,SPEI 已在中国不同气候区的干旱研究中得到应用验证[10-11]。FAO-56 Penman-Monteith(P-M)模型[12]被广泛认为是估算 ET_0 标准方法,但需风速、相对湿度等较为完备的气象要素,在长时间序列历史资料中常因要素缺测而难以直接应用。Priestley-Taylor(P-T)模型[13]基于辐射-能量平衡原理,仅需净辐射和温度 2 个变量,结构简单且不依赖经验参数。Sentelhas 等[14]在全球对比研究中指出,在湿润半湿润地区 P-T 模型 RMSE 为 0.70~1.10 mm/d。采用 P-T 模型代替 P-M 模型,可在保证一定精度前提下降低对气象要素完备性的要求,提高长时间序列干旱监测的可操作性。

应用干旱指数开展区域干旱监测对气象数据分辨率和覆盖时长有较高要求。然而,气象观测站点通常分布稀疏,且部分站点存在建站时间晚、观测不连续等问题,基于站点插值的格网化气象数据难以精细刻画干旱的空间差异。中国区域高时空分辨率气象驱动数据集(China meteorological forcing dataset, CMFD)融合了全国气象站点观测、GLDAS 再分析和遥感辐射产品,空间分辨率 0.1°、时间分辨率 3 h,覆盖时段已从 1979—2018 年扩展至 1951—2024 年(V2.0 版本)[15]。CMFD 数据集在一定程度上缓解了我国长时间序列高分辨率地表气象要素资料匮乏的问题。然而,由于该数据集属于基于数值模式构建再分析数据,其精度验证是开展数据应用的必要前提,也是科学研究和业务应用持续关注的重点。目前,已有较多研究对 CMFD 再分析资料在我国不同区域和不同时间尺度上的适用性进行评估。Rao 等[16]对比 CMFD、ERA5 以及 TRMM 等 11 套降水产品在中国的精度,发现 CMFD 在华东地区表现优异。谭秋阳等[17]利用雅江年楚河流域 5 个气象站点的观测数据评估 CMFD 的气温和降水产品,发现降水偏差小于 20%,气温相关系数大于 0.98。高黎明等[18]评估了 ERA-Interim 及 CMFD 的温度、降水、太阳辐射等气象要素在新疆额尔齐斯河流域及周边区域 8 个气象站的适用性,发现在日尺度上 CMFD 的多个气象要素产品表现均优于 ERA-Interim。

然而,当前开展的 CMFD 产品验证研究主要围绕温度和降水要素。究其原因,我国太阳辐射观测站点数量极为有限。全国具备长序列辐射观测的国家级台站不足 100 个,远少于气温和降水站(>2 400 个),江苏省仅有南京、淮安和南通 3 个辐射观测站。在 P-T 模型中,净辐射(R_n)约贡献蒸散能量的 80%,太阳短波辐射(R_s)误差将直接传递至 ET_0 估算结果。江苏省地处东亚季风区,受梅雨云系、夏季对流和人为气溶胶的共同影响,太阳辐射年际和季节变率显著,CMFD 短波辐射产品在该区域可能存在区域性系统偏差。若辐射验证缺失,ET_0 估算至 SPEI 计算的误差传导链将无法量化评估,从而削弱长时间序列干旱监测结果的可信度。

本研究基于 CMFD 2.0 长时间序列数据(1951—2024 年)以及江苏省 13 个常规气象站和 3 个太阳辐射观测站的逐日实测资料,验证 CMFD 2.0 最高气温、最低气温、降水和太阳辐射等要素精度和 PT 模型 ET_0 估算可靠性,构建逐月 SPEI 序列,综合运用游程理论、Mann-Kendall 趋势检验和空间统计分析等方法,从年际变化、季节分异、空间格局和干旱事件特征(频率、历时、强度)等多个维度揭示江苏省干旱时空演变规律,以期为区域农业干旱监测预警和水资源管理提供科学依据。

1 材料方法

1.1 研究区概况

江苏省(30°45′~35°20′N,116°18′~121°57′E)位于中国东部沿海、长江和淮河下游地区,总面积约 1.072×10^5 km^2,是我国重要的粮食主产区和经济发达地区。全省地势总体低平,平原面积约占全省总面积的 86%,地形以苏北平原、里下河平原和长江三角洲平原为主,西南部和北部局部地区分布有低山丘陵(图 1)。江苏省跨暖温带和亚热带 2 个气候带,属于典型的季风气候过渡区,受地理位置和季风环流共同影响,区域降水和热量条件存在明显梯度差异,为研究季风气候过渡区气象干旱的时空演变特征提供典型研究区域。

1.2 数据来源

1.2.1 CMFD 2.0 数据集

气象再分析资料来源于 CMFD 2.0,数据获取自国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)[19]。该数据集以 ERA5 再分析资料和全国地面气象站观测资料为基础,通过多源数据融合与人工智能方法,提高了气温、降水量和太阳辐射等气象要素在中国区域的适用性。数据覆盖范围为 15°~55°N(70°~140°E),包括中国及周边陆地区域。

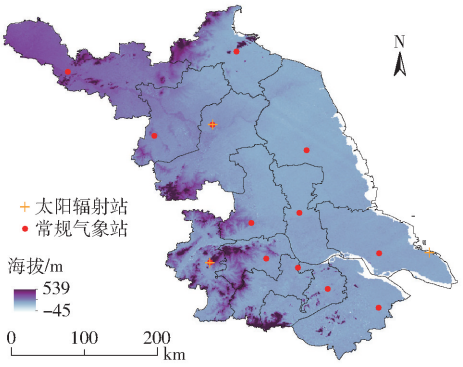


图 1　研究区范围及气象站分布

Fig. 1　Study area and distribution of weather stations

CMFD 2.0 提供近地面气温、气压、比湿、风速、向下短波辐射通量、向下长波辐射通量和降水量共 7 个基础气象要素。

1.2.2　站点气象数据

自中国气象数据网(https://data.cma.cn)获取江苏省 13 个常规气象站以及 3 个太阳辐射观测站逐日观测资料,其中太阳辐射观测站在常规站基础上额外观测太阳辐射。常规站数据起止时段为 1991 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日,太阳辐射观测站数据起止时段以及观测要素见表 1。常规站逐日最高气温(T_{max})、最低气温(T_{min})和降水量(R_d)数据主要用于评估 CMFD 2.0 日尺度 T_{max}、T_{min}、R_d 以及月尺度降水量(R_m)的精度。3 个太阳辐射观测站数据主要用于评估 CMFD 2.0 数据集太阳辐射产品精度,进而结合 T_{max}、T_{min}、R_m 驱动 P-T 模型估算 ET_0 以及 SPEI 指数。进一步结合风速(W_s)和相对湿度(R_h)观测数据驱动 P-M 模型估算 ET_0,从而评估 CMFD 和 P-T 模型在江苏省 ET_0 估算中的表现。

表 1　选用的太阳辐射观测站基本信息

Tab. 1　Basic information for solar radiation observation stations used

站点名称	数据起始日期	数据结束日期	观测变量
淮安	2001 年 1 月 1 日	2017 年 3 月 31 日	逐日最高气温、最低气
南京	1959 年 1 月 1 日	2017 年 3 月 31 日	温、降水量、太阳辐射、
南通	1992 年 1 月 1 日	2017 年 3 月 31 日	风速、相对湿度

1.3　研究方法

1.3.1　SPEI 指数计算

(1)ET_0 估算

ET_0 为在水分供应充足条件下特定参考作物表面的蒸散量,可用于表征区域大气蒸发需求。当前,ET_0 估算主要有 P-T 和 P-M 等方法。其中,P-M 被广泛认为是计算 ET_0 的标准方法,计算式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \dfrac{900\gamma U_2(e_s - e_a)}{T_{ave} + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中　Δ——饱和水汽压曲线斜率,kPa/℃

R_n——地表净辐射,MJ/(m²·d)

G——土壤热通量,MJ/(m²·d)

U_2——2 m 处平均风速,m/s

γ——干湿表常数,kPa/℃

T_{ave}——2 m 处平均温度,℃

e_s——饱和水汽压,kPa

e_a——实际水汽压,kPa

由于 3 个太阳辐射观测站气象变量数量最全,因此在这 3 个站点开展 2 类模型对 ET_0 估算精度评估。由于 P-M 模型需要大量输入数据,P-T 模式同样被广泛用于 ET_0 估算。P-T 模型基于湿润下垫面且空气平流较弱的假设,通过引入经验系数对 Penman 模型进行简化,仅需地表净辐射和气温数据即可完成计算,计算式为

$$ET_0 = \frac{\alpha}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G) \quad (2)$$

式中　α——Priestley-Taylor 经验系数,取 1.26

λ——水汽化潜热,取 2.45 MJ/kg

(2)SPEI 指数

本研究主要关注月尺度干旱事件。通过计算 R_m 与月累计 ET_0 差值得到月尺度水分盈亏量(D),并采用三参数 log-logistic 概率分布对 D 数据序列进行拟合,即

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\chi}{D - \varphi}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad (3)$$

式中　χ——尺度参数

β——形状参数

φ——位置参数

根据 D 的累计概率 P,采用标准正态分布反函数近似算法将累计概率转换为 SPEI,计算式为

$$SPEI = -\left(\omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3}\right) \quad (4)$$

其中　$\omega = \sqrt{-2\ln P}$

c_0、c_1、c_2、d_1、d_2 和 d_3 为经验常数,分别取 2.515 517、0.802 853、0.010 328、1.432 788、0.189 269 和 0.001 308。当 $P > 0.5$ 时,以 $1 - P$ 代替 P 进行计算,并对计算结果取相反数。基于 SPEI 的旱情等级划分标准见表 2。

为定量评估 CMFD 降水量误差对 SPEI 及干旱识别结果的影响,在 3 个辐射观测站分别构建 2 条 SPEI 序列:①以站点实测降水量为输入、以站点 P-M 模型 ET_0 为蒸散项(记为 $SPEI_{sta}$)。②以 CMFD 降

表 2 SPEI 干旱等级分类

Tab. 2 Classification of drought levels for SPEI

干旱分类	干旱等级	SPEI
无旱	0	(-0.5, 0.5]
轻旱	1	(-1.0, -0.5]
中旱	2	(-1.5, -1.0]
重旱	3	(-2.0, -1.5]
特旱	4	≤-2.0

水量为输入、采用与①相同的 ET_0(记为 $SPEI_{cmfd}$)。由于 2 条序列仅降水量输入不同、ET_0 完全一致,二者的差异即可直接归因于 CMFD 降水量误差的传导。结合不同 SPEI 干旱等级阈值识别干旱事件,并计算总体分类精度(OA)和 Kappa 系数(k)评估基于 $SPEI_{cmfd}$ 的干旱识别结果可靠性。基于 3 个太阳辐射观测站评估 2 类 SPEI 在不同等级干旱事件识别中的差异,并筛选最旱(年均 SPEI 最小)年份比较 SPEI 序列的一致性。

1.3.2 干旱事件识别

采用游程理论识别并表征月尺度气象干旱事件。游程是指时间序列 X_t 中连续低于或高于给定阈值的 1 组相邻观测值。当 SPEI 首次低于 -1 时,判定干旱事件开始;此后,当 SPEI 恢复至 0 以上时,判定该次干旱事件结束。干旱频率定义为研究时段内 SPEI≤-0.5 的月份数占总月份数比值;单次干旱事件历时定义为从干旱开始至干旱结束所经历的连续月份数;干旱强度定义为事件持续期内各月 SPEI 绝对值均值。

1.3.3 趋势检验

Mann-Kendall(M-K)趋势分析法是一种适用于非正态分布数据的非参数统计检验方法,已被广泛应用于长时间序列数据变化趋势的显著性检验。对于统计量 Z,大于 0 时为上升趋势,小于 0 时为下降趋势。当$|Z|$大于 1.96 和 2.58 时,则可认为时间序列趋势性通过置信度为 95% 和 99% 的显著性检验。由于年尺度分析可能掩盖季节内部波动,按气象部门习惯的分法划分四季,即春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12—2 月。

2 结果分析

2.1 CMFD 2.0 数据集在江苏省适用性评估

选取江苏省 13 个常规气象站日尺度观测数据作为参考,对日尺度 T_{max}、T_{min}、R_d 及月尺度 R_m 进行精度评价(图 2)。总体来看,CMFD 对研究区气温变量具有较高的模拟精度,其中日最高气温拟合效果最佳、日最低气温次之,日降水量模拟误差相对较大,而在月尺度上一致性明显提高。对于日最高气温,散点总体分布在 1∶1线附近,拟合斜率近似为 1,R^2达到 0.987,RMSE 为 1.30℃,但拟合截距为负,说明较观测值整体存在一定低估。日最低气温较日最高气温散点离散程度有所增加,但拟合斜率仍接近于 1,R^2达到 0.950,RMSE 为 2.17℃,较观测值存

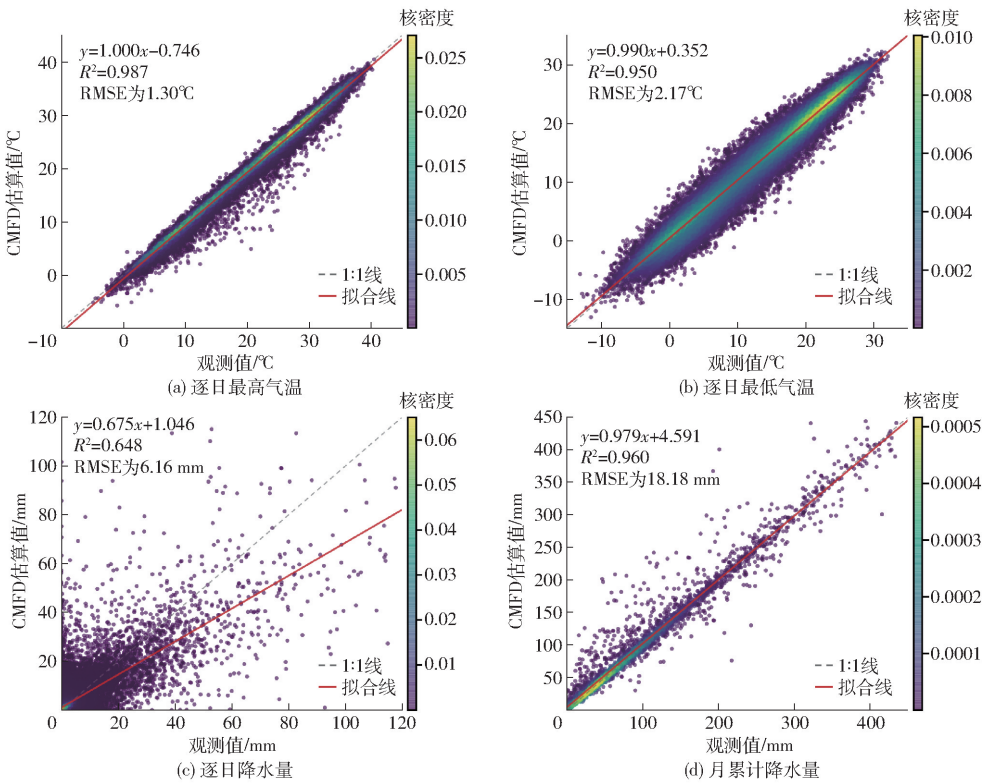


图 2 CMFD 气温和降水产品精度评估

Fig. 2 Accuracy assessment of CMFD temperature and precipitation products

在一定高估。与气温相比，CMFD 日降水量精度相对较低，且随着观测降水量增加，CMFD 估算值与 1∶1 线之间偏离程度逐渐增大，拟合斜率仅为 0.675，R^2 为 0.648，RMSE 为 6.16 mm。当日降水量累计至月尺度后，CMFD 降水量拟合性能明显提高，拟合斜率提高至 0.979，R^2 提高至 0.960。

CMFD 太阳辐射与站点观测值总体具有较好的一致性（图 3）。3 个太阳辐射观测站 R^2 为 0.877、0.882 和 0.852，RMSE 为 2.95、2.41、3.27 MJ/（m^2·d），总体 R^2 和 RMSE 为 0.871 和 2.95 MJ/（m^2·d）。其中，淮安地区拟合精度相对较高，而南通地区拟合精度最低。3 个地区拟合斜率为 0.933、0.935 和 0.977，均小于 1，表明 CMFD 太阳辐射变化幅度总体存在一定程度的压缩。南京和淮安在较低辐射条件下表现出一定高估，而随着太阳辐射增强，偏差逐渐减小，淮安高值区还表现出轻微低估。南通拟合斜率最接近 1，但正截距较大，整体表现出一定的高估。

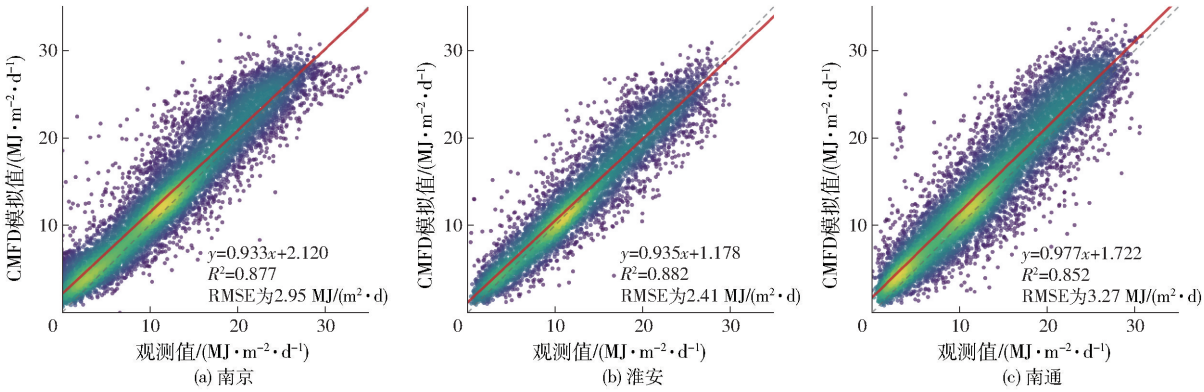


图 3　CMFD 太阳辐射产品精度评估

Fig. 3　Accuracy assessment of CMFD solar radiation products

2.2　P－T 模型估算参考作物蒸散量精度评价

以站点观测气象要素驱动 P－M 模型计算的 ET_0 作为标准值，对基于 CMFD 数据驱动的 P－T 模型估算结果进行验证（图 4）。整体而言，基于 CMFD 和 Priestley－Taylor 模型对 ET_0 存在高估，但与 P－M 模型估算结果具有较好的线性相关关系，R^2 为 0.872，RMSE 为 0.81 mm/d。低蒸散量区间（ET_0 <2.0 mm/d）的样本密集，散点高度集中于 1∶1 线附近。随着 ET_0 增大，2 类 ET_0 估算值的离散程度有所增加。当日蒸散量大于 4.5 mm 时估算误差有所增大，但总体仍保持较好的线性关系。

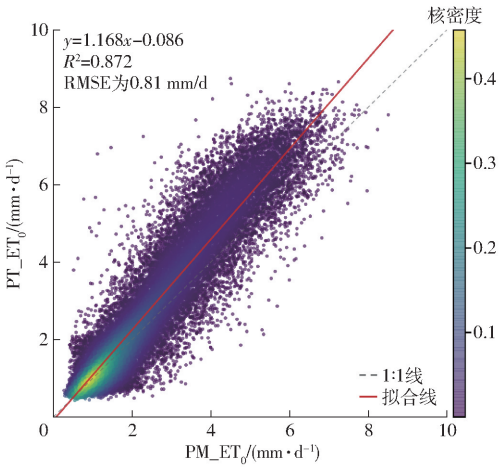


图 4　Priestley－Taylor 和 Penman－Monteith 方法估算 ET_0 对比

Fig. 4　Comparison of ET_0 estimated with Priestley－Taylor and Penman－Monteith methods

2.3　CMFD 降水量产品误差在 SPEI 计算及干旱事件识别中的传递效应

2.3.1　降水量误差对 SPEI 计算结果的影响

基于 CMFD 气象数据和站点观测数据计算得到的 SPEI 结果如图 5 所示。整体而言，$SPEI_{cmfd}$ 与 $SPEI_{sta}$ 具有较高的一致性，$SPEI_{cmfd}$ 为 －2.58～2.32，$SPEI_{sta}$ 为 －2.77～2.30。散点总体紧密分布于 1∶1 线附近，不存在明显的系统性偏移，拟合斜率为 0.972，RMSE 为 0.24。相较于正常及轻度干湿状态，SPEI 绝对值较大时散点离散程度有所增加，表

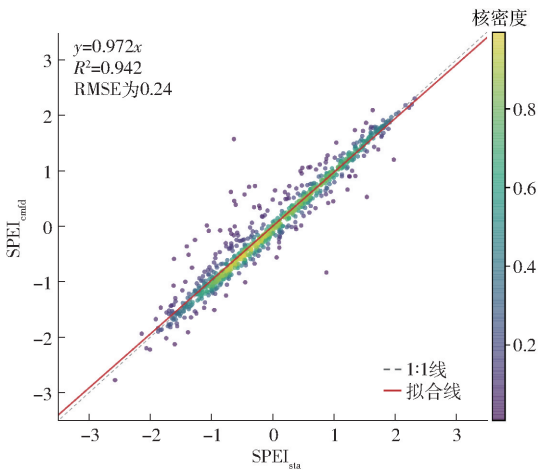


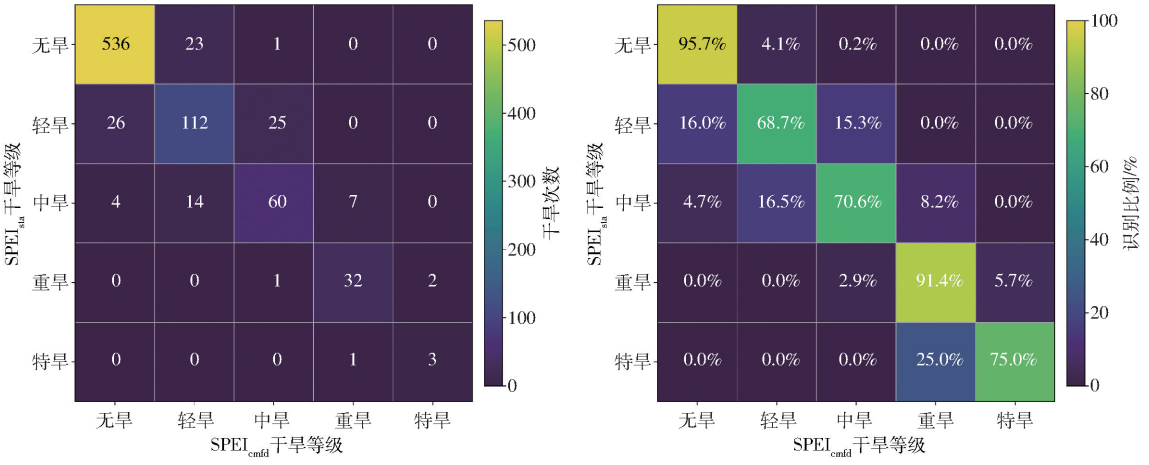
图 5　基于 CMFD 与站点降水数据的 SPEI 对比

Fig. 5　Comparison of SPEI derived from CMFD and station-observed precipitation data

明 CMFD 对极端干湿事件的表征仍存在一定不确定性。此外,$SPEI_{cmfd}$ 与 $SPEI_{sta}$ R^2 为 0.942,远高于日尺度降水(R^2 为 0.648),与月尺度降水结果(R^2 为 0.960)较为接近。

2.3.2 降水量误差对干旱事件识别的影响

基于 $SPEI_{cmfd}$ 的干旱识别与基于 $SPEI_{sta}$ 的干旱识别结果见图 6。整体来看,绝大多数干旱事件样本集中在主对角线上,其中无旱、轻旱、中旱、重旱和特旱的一致识别次数为 536、112、60、32 和 3,总体分类精度达 87.7%,Kappa 系数为 0.762,说明 CMFD 计算的 SPEI 对各等级干旱均具有较好的识别能力,在扣除随机一致性影响后,2 种 SPEI 对干旱等级判别仍具有较高的一致性。偏离主对角线的样本主要分布在相邻等级之间,例如无旱与轻旱(26 次)、轻旱与中旱(25 次)、中旱与重旱(7 次)之间存在一定混淆,而跨越 2 个及以上等级的误判极少。然而,各等级干旱识别精度存在一定差异。无旱识别率最高(95.7%),说明 CMFD 能够准确识别正常水分条件,仅有 4.1% 的无旱事件被误判为轻旱,0.2% 被误判为中旱。轻旱识别率为 68.7%,约 16.0% 的轻旱事件被识别为无旱,15.3% 被识别为中旱,表明轻旱主要与相邻等级发生混淆。中旱识别率为 70.6%,有 16.5% 和 8.2% 的事件被识别为轻旱和重旱,说明中旱处于干旱等级过渡阶段,其边界识别相对困难。重旱识别率达到 91.4%,仅有 2.9% 和 5.7% 的事件被误判为中旱和特旱,说明 CMFD 对较严重干旱具有较高的识别稳定性。特旱识别率为 75.0%,另有 25.0% 的事件被识别为重旱,但由于特旱样本数量仅 4 次,识别率易受样本数量影响,因此结果具有一定的不确定性。



(a) 干旱次数 (b) 识别比例

图 6 基于 CMFD 与站点观测降水数据计算的 SPEI 干旱等级混淆矩阵及识别精度

Fig. 6 Confusion matrices and classification accuracy of SPEI drought categories derived from CMFD and station-observed precipitation data

2.3.3 典型年份验证

$SPEI_{sta}$ 和 $SPEI_{cmfd}$ 月际变化具有较高一致性,不同地区及年份 R^2 为 0.836 ~ 0.991,总体分类精度 OA 为 75% ~ 100%(图 7)。其中,2011 年南京和 2013 年淮安表现最佳,R^2 达到 0.991 和 0.990,OA 均为 100%,表明 $SPEI_{cmfd}$ 能够准确再现全年干湿变化过程及干旱等级。1994 年、2013 年南京、1992 年南通和 2011 年淮安 OA 均达到 92%,2 类 SPEI 变化趋势总体一致,仅部分月份在干旱强度上存在一定偏差。2005 年和 2014 年南通虽 R^2 达到 0.969 和 0.971,但 OA 为 83% 和 75%,表明 2 类 SPEI 具有较高的连续数值一致性,但在接近干旱等级阈值的月份仍可能产生等级差异。总体而言,$SPEI_{cmfd}$ 能够较好地识别典型年份干旱发生、发展和缓解过程,且误差主要表现为相邻干旱等级之间轻微偏差,说明 CMFD 数据能够满足研究区月尺度干旱过程识别及后续时空演变分析的需求。

基于 $SPEI_{cmfd}$ 与 $SPEI_{sta}$ 的江苏省 3 个太阳辐射站干旱等级频率分布见图 8,结果表明 CMFD 数据能较好保持站点 SPEI 所反映的干旱等级结构。3 个地区均表现为无旱频率最高、轻旱次之、中旱和重旱发生频率较低、特旱最少的分布特征。南京地区 2 类 SPEI 识别无旱频率约为 65.2% 和 64.9%,各等级差异总体较小。南通无旱频率均约为 65.7%,轻旱、中旱和重旱频率亦较为接近,表现出较高的一致性。相比之下,淮安地区差异相对明显,其中 $SPEI_{cmfd}$ 识别无旱频率较 $SPEI_{sta}$ 提高 3.3 个百分点,轻旱频率降低 7 个百分点,而中旱频率有所增加。总体来看,2 类 SPEI 差异主要集中于轻旱和中旱等相邻等级,而重旱及特旱频率差异较小,说明 $SPEI_{cmfd}$ 等级偏差主要来源于临界阈值附近事件的等级转换,并未明显改变研究区整体干旱频率结构。

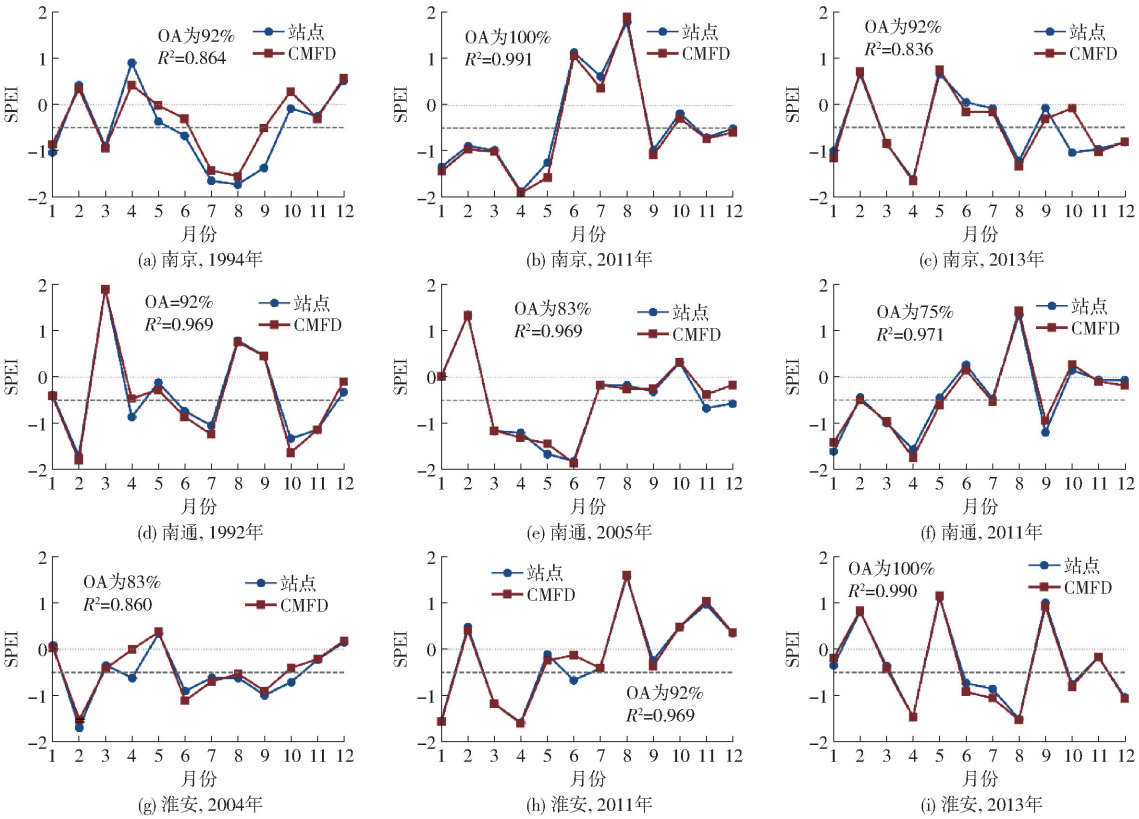


图 7　基于 CMFD 与站点观测降水数据计算的典型年份月尺度 SPEI 一致性验证

Fig. 7　Validation of consistency of monthly SPEI derived from CMFD and station-observed precipitation data in representative years

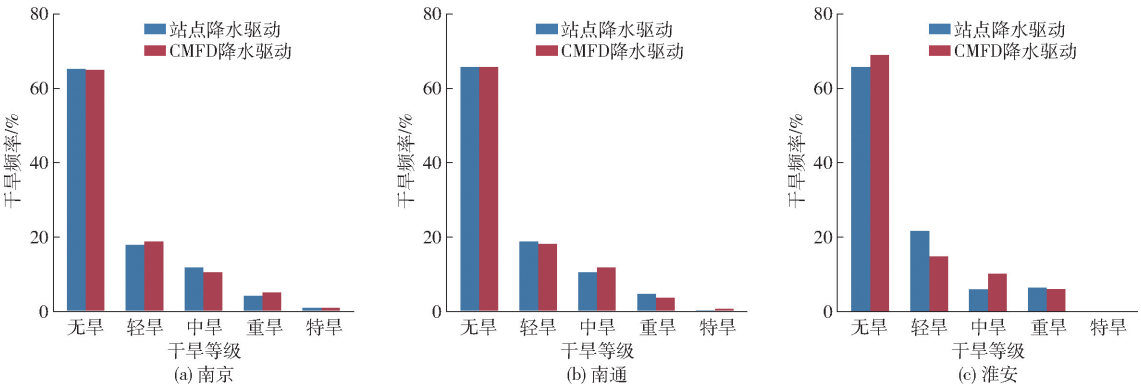


图 8　基于 $SPEI_{sta}$ 和 $SPEI_{cmfd}$ 的不同等级干旱事件识别结果

Fig. 8　Comparison of drought event identification at different severity levels based on $SPEI_{sta}$ and $SPEI_{cmfd}$

2.4　江苏省主要气象要素变化趋势

对 1951—2024 年 T_{max}、T_{min}、R_d、R_s、ET_0 及 D 进行趋势分析(图 9)。全省所有格点 T_{max} 和 T_{min} 均通过 0.05 显著性水平检验,表明近 74 年来江苏省整体增暖趋势明显,且空间变化具有较好的一致性。相比之下,R_d 变化表现出明显的空间异质性,苏北地区总体呈下降趋势,而中、南部部分地区则表现为增加趋势,但多数区域变化未达到显著水平。R_s 总体呈显著下降趋势(面积占比约为 93.2%),空间变化相对一致。ET_0 空间变化较单一气象要素更加复杂,除苏北东部以及苏南中部呈不显著上升趋势外,其余大部分地区呈下降趋势,其中江苏东南部以及西部下降趋势达到显著水平(面积占比约为 37.7%)。D 与 R_d 空间变化近似相反,苏北地区主要呈上升趋势,苏南地区主要呈下降趋势。

2.5　江苏省 1951—2024 年 SPEI 时间变化特征

基于 CMFD 气象数据和 P－T 模型估算的 ET_0,计算江苏省 1951—2024 年平均 SPEI(图 10)。研究时段内江苏省平均 SPEI 总体呈围绕 0 值上下波动的变化特征,线性拟合结果显示其长期变化趋势不显著,表明研究期间江苏省区域干湿状况未发生显著的长期变化,整体保持相对稳定。从年际变化来看,SPEI 在 －0.7 ~ 0.5 波动,多数年份为 －0.3 ~ 0.3,表明江苏省年尺度干湿状况以正常年份为主,

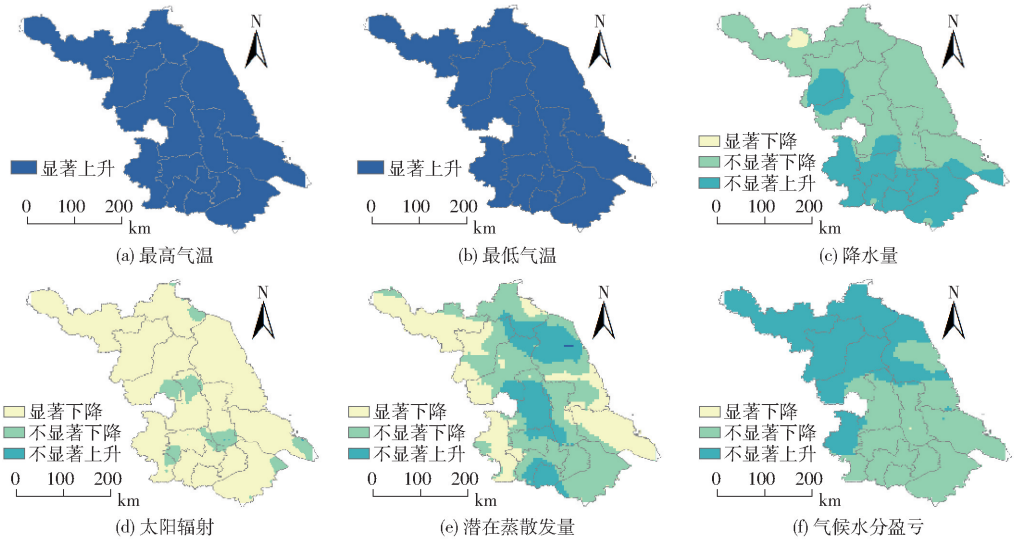


图 9 江苏省 1951—2024 年不同气象要素变化趋势

Fig. 9 Spatial trends of different meteorological variables in Jiangsu Province during 1951—2024

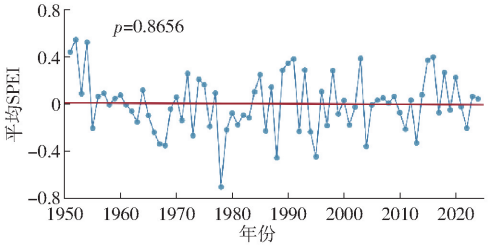


图 10 江苏省 1951—2024 年平均 SPEI 年际变化特征

Fig. 10 Interannual variations in mean SPEI of Jiangsu Province from 1951 to 2024

极端干湿事件发生频率相对较低。但不同年份间波动较为明显,反映出区域干湿变化具有较强的年际变率。进入 21 世纪后,SPEI 仍表现为干湿交替变化特征,未呈持续干化或持续湿润趋势。

江苏省 1951—2024 年春、夏、秋、冬平均 SPEI 变化趋势如图 11 所示。综合来看,江苏省 SPEI 变化具有明显的季节差异,春季是唯一表现出显著干化趋势的季节,而夏季和冬季均表现出不显著的湿润化倾向,秋季基本保持稳定。春季 SPEI 总体呈极显著下降趋势($p < 0.01$),SPEI 平均变化率为 $-0.083/(10a)$。夏季 SPEI 在 $-1.2 \sim 1.0$ 波动,部分年份出现明显干湿异常,研究期间干湿状况虽有一定湿润化倾向,SPEI 平均变化率为 $0.038/(10a)$。秋季 SPEI 变化趋势最不明显,SPEI 平均变化率为 $0.002/(10a)$。冬季 SPEI 呈轻微上升趋势,SPEI 平均变化率为 $0.024/(10a)$。

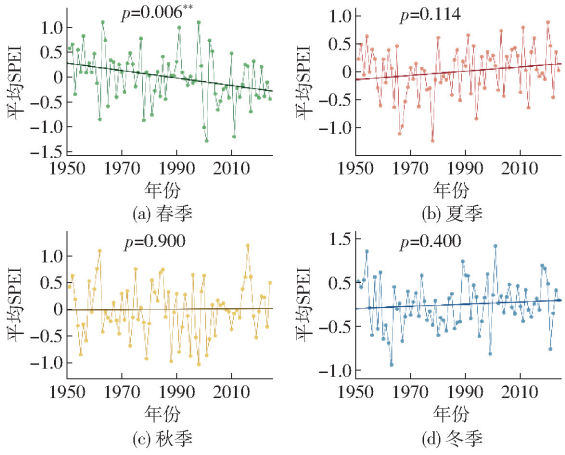


图 11 江苏省 1951—2024 年不同季节平均 SPEI 年际变化特征

Fig. 11 Interannual variations in seasonal mean SPEI of Jiangsu Province from 1951 to 2024

2.6 江苏省干旱时间变化特征

2.6.1 不同干旱特征年际变化

江苏省 1951—2024 年干旱频率、干旱历时和干旱强度年际变化见图 12。总体来看,江苏省旱情呈频率增加、历时缩短以及强度减弱的演变格局,但长期线性变化趋势均未达到显著水平。干旱频率总体在 8% ~52% 波动,多数年份集中于 25% ~40%,整体呈不显著上升趋势。其中,20 世纪 70 年代末、90 年代中后期以及 21 世纪 10 年代中期出现相对高值;而 20 世纪 50 年代初和 21 世纪初个别年份低于 15%。高、低值年份交替出现,未形成持续性的高发或低发阶段。干旱历时主要集中于 1.0 ~2.1 月,少数年份超过 2.3 月,整体呈不显著下降趋势。其中,20 世纪 70 年代末达到研究期内较高水平,接近 3 月。干旱强度总体在 0.4 ~1.5 变化,多数年份集中在 0.9 ~1.3,整体呈不显著下降趋势。20 世纪 60 年代初、70 年代中后期、80 年代后期及 21 世纪初部分年份干旱强度相对较高,而 20 世纪 50 年代初及 21 世纪 10 年代中期个别年份出现明显低值。

2.6.2 不同等级干旱频率年内差异

江苏省 1951—2024 年轻旱、中旱、重旱和特旱发生频率在不同季节及月份分布见图 13。季节尺

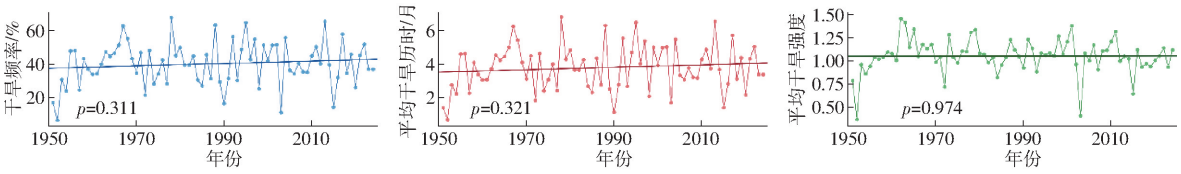


图 12　江苏省 1951—2024 年干旱频率、干旱历时和干旱强度

Fig. 12　Interannual variations in drought frequency, duration and intensity in Jiangsu Province from 1951 to 2024

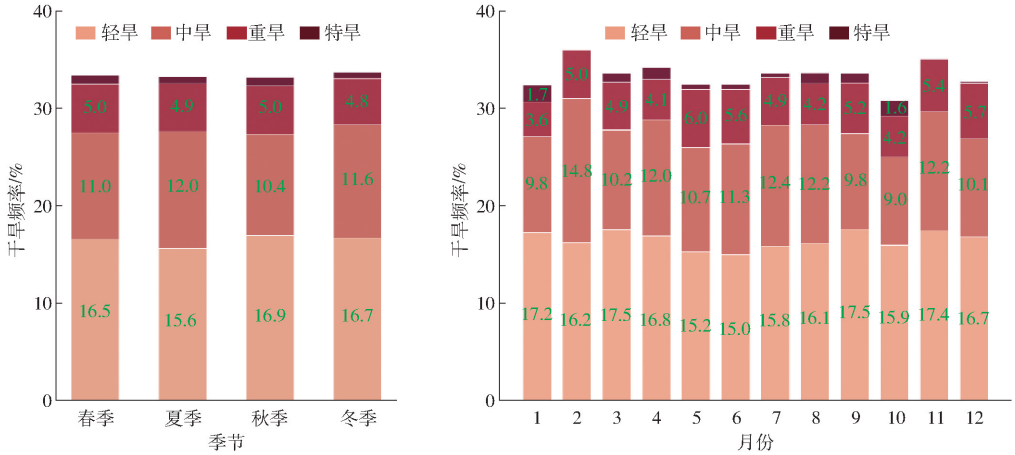


图 13　江苏省不同等级干旱频率季节和月份差异

Fig. 13　Seasonal and monthly differences in occurrence frequency of different drought categories in Jiangsu Province

度上，江苏省不同季节干旱均以轻旱（15.6%）和中旱（9.5%）为主，重旱（3.8%）和特旱（2.1%）发生频率相对较低。秋季轻旱频率最高（16.9%），夏季中旱频率最高（12.0%）。重旱频率在各季节间变化较小，为 4.8% ~5.0%。月尺度上，轻旱频率为 15.0% ~ 17.5%，3 月和 9 月最高；中旱频率为 9.0% ~ 14.8%，2 月最高；重旱频率为 3.6% ~ 6.0%，5 月最高；特旱总体发生较少，仅 1 月和 10 月相对较高。整体来看，2 月干旱总频率最高（36.0%），而 10 月干旱总频率最低（30.7%）。

2.7　江苏省干旱空间变化特征

2.7.1　不同干旱特征空间分布

江苏省 1951—2024 年干旱总次数、累计历时和平均强度的空间分布见图 14。总体来看，干旱次数和累计历时均呈明显的北高南低特征，干旱平均强度则表现出较强的局地差异。研究时段内江苏省干旱总次数为 101 ~238 次（图 14a），苏北特别是徐州地区为干旱高频区，苏中地区处于中等水平，苏南尤其太湖周边地区干旱次数相对较少。干旱累计历时空间分布与干旱次数基本一致，变化范围为 125 ~ 418 月（图 14b）。苏北大部分区域累计干旱历时较长，部分地区超过 350 月，南部沿江及东南部地区形成低值中心。干旱平均强度的空间分布呈更明显的斑块状和非连续性特征（图 14c），总体为 0.9 ~1.3。较高强度区主要分布于江苏北部及部分南部地区，苏中东部和沿海中部则出现相对较低的强度带。部分苏南地区虽干旱次数和累计历时较低，但平均强度相对较高，表明该区域干旱更多表现为低频、高烈度事件。

2.7.2　不同等级干旱发生频率及其变化趋势

江苏省 1951—2024 年春、夏、秋、冬干旱频率及其变化趋势见图 15。江苏省不同季节干旱频率具

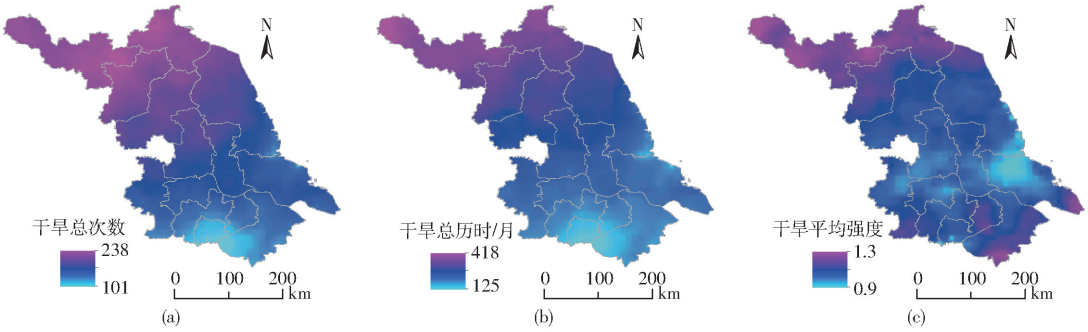


图 14　江苏省 1951—2024 年干旱次数、历时及强度空间分布

Fig. 14　Spatial distribution of frequency, duration and intensity of drought events in Jiangsu Province in 1951—2024

有明显的空间异质性,其中春、秋和冬季呈较清晰的西北高、东南低分布,而夏季空间格局呈斑块状分布。春季干旱频率为 2.7% ~60.2%,空间差异最大,高值区主要集中于江苏北部和西北部,部分地区干旱频率超过 50%。夏季干旱频率为 23.9% ~43.2%,区域差异小于其他季节。与春季相比,夏季并未呈单一的纬向梯度,高值区主要出现在西北部及南部局地。秋季干旱频率为 15.8% ~44.5%,总体表现为西北高、东南低,并伴有一定局地斑块特征。冬季干旱频率空间分布与春季相似,高值区主要集中于苏北,干旱频率为 10.4% ~47.9%。从变化趋势看,除春季外其余季节干旱频率均以不显著变化为主,但变化方向存在明显差异。春季干旱频率在全省大部分地区呈上升趋势,其中苏中南部和苏北局部达到显著上升水平(面积占比为 52.7%)。夏季干旱频率以下降趋势为主,显著下降区主要分布于苏中东部沿海以及西部干旱频率次高区域(面积占比为 12.5%)。秋季变化趋势空间差异较小,大部分地区表现为不显著上升,仅苏中局部地区上升趋势达到显著水平(面积占比为 1.7%)。冬季总体呈北部上升、南部下降分异特征,上升和下降趋势达到显著性面积占比为 0.8% 和 2.5%。

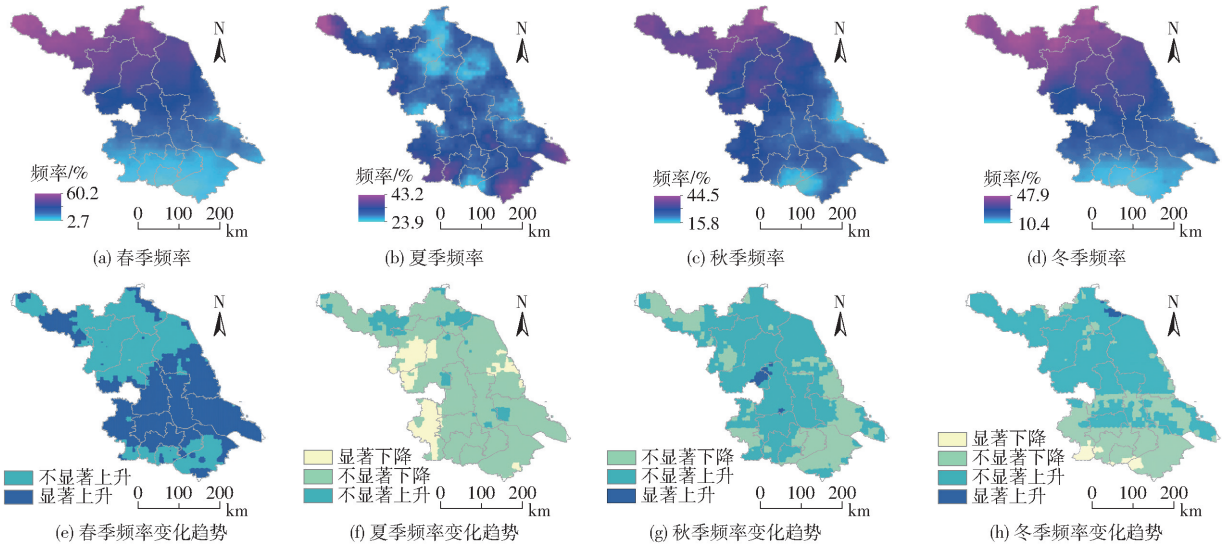


图 15 江苏省 1951—2024 年不同季节干旱频率空间分布及变化趋势

Fig. 15 Spatial distributions and temporal trends of seasonal drought frequency in Jiangsu Province during 1951—2024

2.7.3 不同干旱特征变化趋势

江苏省 1951—2024 年不同地区干旱频率、干旱历时和干旱强度的变化趋势及其显著性见图 16,3 个干旱特征在研究时段内的变化趋势均呈明显的空间异质性。干旱频率总体以不显著上升为主(面积占比为 69.1%),显著上升区仅零星分布于东部沿海以及西部沿湖局地(面积占比为 3.8%)。干旱历时大致呈北部上升、南部下降的空间格局,显著下降区(面积占比为 3.8%)主要出现在苏南及东南部部分地区,而显著上升区面积占比仅为 1.0%。干旱强度同样表现出北部增强、南部减弱的分异特征,苏北局地达到显著上升水平(面积占比为 2.4%),而苏中南部及苏南部分地区呈显著下降趋势(面积占比为 13.1%)。

3 讨论

开展长时间序列区域尺度干旱监测的基础在于高质量气象驱动数据和合理的 ET_0 估算方法。首先利用江苏省太阳辐射观测站资料对 CMFD 2.0 气温、降水和太阳辐射产品进行精度评价,并进一步验

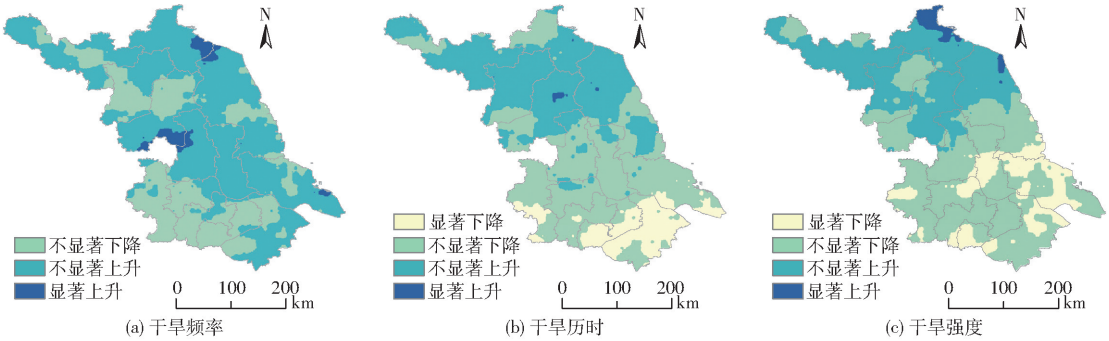


图 16 江苏省 1951—2024 年干旱频率、历时及强度变化趋势空间分布

Fig. 16 Spatial distributions of trends in drought frequency, duration and intensity in Jiangsu Province from 1951 to 2024

证 CMFD 驱动 P－T 模型估算 ET_0 的可靠性。结果表明，CMFD 2.0 能够较好地再现江苏省最高气温、最低气温及太阳辐射变化特征，而降水量产品精度相对较低，但总体能够满足区域尺度长期干旱监测需求。CMFD 通过融合地面气象观测、遥感产品及再分析资料，在空间连续性和时间完整性方面具有明显优势。He 等[19]指出，相较于单一再分析资料，CMFD 能够更准确地刻画中国区域近地面气象要素的时空变化特征，在陆面过程模拟、水文分析及生态环境研究中具有较好的应用前景[20]。本研究得到的 CMFD 气温和太阳辐射产品精度评价结果与已有研究基本一致，进一步说明 CMFD 在江苏地区具有较好的区域适用性。值得注意的是，降水产品误差明显高于气温和太阳辐射，这与降水受局地对流、地形及天气系统共同影响、空间变异性较强有关，也是目前多数格点降水量产品普遍存在的问题[21]。本研究进一步发现，这种误差具有明显的尺度效应。CMFD 对日降水量的刻画能力相对有限，特别是在较强降水条件下存在一定低估，而经过月尺度累计后，降水量与站点观测的一致性明显提高，表明日尺度降水发生时间错位及部分随机误差可在时间聚合过程中得到一定削弱。

由于 SPEI 基于降水量与潜在蒸散量之差构建气候水分平衡，降水量误差仍可能向干旱指数计算及等级识别过程传递。然而，本研究的进一步验证表明，该误差传递并未显著降低 $SPEI_{cmfd}$ 的总体可靠性，其与 $SPEI_{sta}$ 具有较高一致性，R^2 达 0.942，RMSE 仅为 0.24。在干旱等级识别方面，$SPEI_{cmfd}$ 总体分类精度达到 87.72%，Kappa 系数为 0.760，说明在排除随机一致性影响后，2 类 SPEI 的干旱等级判别仍保持较高一致性。混淆矩阵进一步表明，识别差异主要集中于无旱–轻旱、轻旱–中旱以及中旱–重旱等相邻等级之间，而跨越 2 个及以上等级的误判较少。这说明 CMFD 降水量误差向 SPEI 及干旱等级识别的传递主要表现为等级阈值附近的局部偏差，并未明显改变区域干旱发生及等级结构的总体判断。尽管 CMFD 日尺度降水量仍具有较大的不确定性，但月尺度聚合以及 SPEI 对气候水分盈亏的综合表征在一定程度上削弱随机降水量误差的影响，因此 CMFD 数据总体能够满足区域尺度干旱监测和时空演变分析的需求。但对于局地极端降水、短历时干旱过程以及接近干旱等级临界阈值的事件，仍需谨慎解释其识别结果[22]。未来可结合国家气象站观测资料及其他高分辨率降水产品开展多源交叉验证，以量化不同降水量数据源误差向 SPEI 及干旱等级识别传递的差异，进一步评估不同数据源对区域干旱监测结果的影响。

ET_0 是 SPEI 计算的重要组成部分，其估算精度直接影响区域干旱评价结果。P－M 模型被普遍认为是 ET_0 估算的标准方法，但其需要风速、相对湿度等较完整的气象资料，在长时间序列历史研究中往往难以满足数据需求。相比之下，P－T 模型仅依赖净辐射和气温等少量气象要素，具有数据需求少、计算过程简单等优势。本研究发现，CMFD 驱动的 P－T 模型与 P－M 模型估算结果具有较高一致性，说明江苏省湿润季风气候条件下，大气蒸散过程主要受可利用能量控制，P－T 模型能够较好地表征区域潜在蒸散需求。Su 等[23]发现在湿润和半湿润地区，P－T 模型能够较好地反映由可利用能量控制的蒸散过程，但在高温、强风及空气平流作用显著条件下，其估算结果仍存在一定偏差。需要指出的是，本研究所验证的是 CMFD 结合 P－T 模型在江苏地区的区域适用性，并不能说明 P－T 模型在所有气候区均具有相同精度。对于干旱半干旱地区或高温、大风等极端气候条件，空气动力项对蒸散发的贡献明显增强，P－T 模型可能低估实际蒸散需求，其适用性仍需进一步验证[24]。

江苏省 1951—2024 年平均 SPEI 未呈显著变化趋势，但春季 SPEI 表现出显著下降趋势，而夏、秋、冬季变化均未达到显著水平，表明江苏省气象干旱演变具有明显的季节差异。与此同时，春季干旱频率在全省大部分地区呈增加趋势，而夏季干旱频率则总体表现为下降趋势。研究表明，受降水和温度变化的共同驱动，中国整体呈春旱加剧、夏旱减弱的趋势格局，华东地区这一趋势尤为突出[25]。本文江苏省春季干旱频率整体呈上升趋势，其中超过 50% 格点上升趋势达到显著水平，而全省夏季干旱整体呈下降趋势，与上述全国尺度发现一致。在全球气候变暖背景下，江苏省干旱风险并未表现为全年持续加剧，而更多体现为季节内水分条件的重新分配，这与东亚季风区湿润地区近年来干旱演变特征基本一致。江苏省位于东亚季风区，春季正处于冬季风向夏季风转换阶段，大气环流和水汽输送具有较大的年际波动[26]。已有研究表明，西太平洋副热带高压位置及强度变化能够影响东亚季风水汽输送过程，从而导致长江中下游地区春季降水异常[27]。因此，本研究春季干旱增加可能与东亚季风系统及西太平洋副热带高压年际变化有关。然而，本研究主要基于 SPEI 分析江苏省气象干旱时空演变特征，并未进一步引入 ENSO、西太平洋副热带高压指数等环流因子开展归因分析[28]。拟在后续研究中采用 Niño 3.4、西太平洋副高面积指数、东亚夏季风指数

与春季 SPEI 的相关及合成分析,并结合水汽输送收支诊断进一步揭示环流异常对江苏省干旱时空演变的驱动机制。

在旱情空间格局方面,本研究发现江苏省干旱频率和累计历时总体呈北高南低分布,干旱强度则表现出更加复杂的局地差异,苏北地区表现出干旱风险增加倾向,这一结果与前人基于气象干旱综合指数(CI)、SPI 以及 Copula 函数构建综合指数的江苏省干旱研究结论相印证[29-31]。不同干旱指标虽在计算方法上存在差异,但均能够识别苏北地区为干旱敏感区。然而,相比于仅考虑降水的 SPI 或 CI,SPEI 能够更加客观地反映气候变暖背景下蒸散增强对区域水分平衡的影响,可在一定程度上降低干旱事件被低估甚至遗漏的风险。然而,SPEI 仅能表征气象干旱特征,而气象干旱向农业干旱、水文干旱及生态干旱的发展过程具有明显的传播效应。已有研究表明,干旱传播受到土壤水分、植被覆盖、水文过程及人类活动等多种因素共同影响,不同区域传播时间和传播强度存在明显差异[32-33]。因此,本研究所得结果主要反映江苏省气候水分亏缺特征,并不能直接代表农业生产和水资源系统受到的实际干旱影响。未来可结合土壤水分、遥感植被指数及径流资料,进一步分析江苏省气象干旱向农业干旱和水文干旱的传播过程[34-35],提高区域干旱风险评价的综合性。

4 结论

(1)CMFD 2.0 数据集在江苏省具有较好的区域适用性。T_{max}、T_{min}、R_s及 R_m产品与站点观测数据具有较高一致性,其 R^2 达到0.987、0.950、0.871 和0.960,对应 RMSE 为 1.30℃、2.17℃、2.95 MJ/(m²·d)及 18.18 mm。R_d 估算精度相对较低(R^2 = 0.648,RMSE 为 6.16 mm)。基于 CMFD 驱动 P-T 模型估算的 ET_0与站点气象数据驱动 P-M 模型结果具有较好一致性(R^2 = 0.872,RMSE 为 0.81 mm/d)。基于 CMFD 计算的 SPEI 与站点结果高度一致(R^2 = 0.942,RMSE 为 0.24),干旱等级识别 OA 为 87.72%,Kappa 为 0.760,误差主要集中于相邻等级,整体不影响区域干旱监测可靠性。

(2)1951—2024 年江苏省 T_{max}和 T_{min}呈显著上升趋势,R_s 主要呈显著下降趋势(面积占比为 93.2%),R_d整体呈北增南减空间格局,ET_0主要呈下降趋势,而 D 变化趋势与 R_d大致相反。年平均 SPEI 未呈显著变化趋势,但季节变化特征明显。春季 SPEI 呈显著下降趋势,平均变化率为 -0.083/(10a),而夏、秋、冬季均未达到显著水平。江苏省干旱变化主要表现为季节尺度的重新分配,而非年尺度持续干化。不同等级干旱以轻旱(15.6%)和中旱(9.5%)为主,重旱和特旱发生频率为 3.8% 和 2.1%。各月干旱总频率为 30.7% ~36.0%,其中 2 月总频率最高,10 月总频率最低。

(3)江苏省气象干旱具有明显的空间异质性。干旱发生次数和累计历时总体呈北高南低分布,其中干旱发生次数为 101 ~238 次,累计历时为 125 ~418 月。平均干旱强度为 0.9 ~1.3,呈较强局地差异,部分苏南地区表现出低频、高强度特征。春季干旱频率空间差异最大(2.7% ~60.2%),且 52.7% 的区域呈显著增加趋势。夏季干旱频率空间差异最小(23.9% ~43.2%),总体以下降趋势为主。干旱历时和强度总体表现为北部增强、南部减弱,表明苏北地区未来干旱风险相对较高,应加强区域干旱监测与预警。

参 考 文 献

[1] Wu D, Chen J, Xiong L, et al. Assessing global drought conditions under climate change: a comparison of stationary and non-stationary approaches and identification of hotspot regions[J]. Journal of Hydrology, 2024, 640: 131663.

[2] Guo X, Yang Z, Jian S, et al. Drought amplifies warming-induced soil carbon loss in a decade-long experiment[J]. Nature Climate Change, 2026, 16(4): 485-493.

[3] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.

[4] Yang B, Qin C, Bräuning A, et al. Long-term decrease in Asian monsoon rainfall and abrupt climate change events over the past 6,700 years[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(30): e2102007118.

[5] 倪深海,吕娟,刘静楠,等. 变化环境下我国干旱灾害演变趋势分析[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(10):1-7.
Ni Shenhai, Lü Juan, Liu Jingnan, et al. Analysis on the evolution trend of drought disaster in China under changing environment[J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(10):1-7. (in Chinese)

[6] 宋艳玲. 全球干旱指数研究进展[J]. 应用气象学报,2022,33(5):513-526.
Song Yanling. Global research progress of drought indices[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022,33(5):513-526. (in Chinese)

[7] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993: 179-184.

[8] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(10): 3001-3023.

[9] 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.
[10] Li L, She D, Zheng H, et al. Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(7): 1513 – 1530.
[11] 曹博,张勃,马彬,等. 基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析[J]. 生态学报,2018,38(17):6258 – 6267.
Cao Bo,Zhang Bo,Ma Bin, et al. Spatial and temporal characteristics analysis of drought based on SPEI in the Middle and Lower Yangtze Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(17): 6258 – 6267. (in Chinese)
[12] Allen R G, Pereira L S, Raes D. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1988.
[13] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81 – 92.
[14] Sentelhas P C, Gillespie T J, Santos E A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in southern Ontario, Canada[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5): 635 – 644.
[15] 何杰,阳坤,李新,等. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1951—2024)v2.0[DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心(2025 – 09 – 16)[2026 – 04 – 15]. https://doi.org/10.11888/Atmos.tpdc.302088.
[16] Rao P, Wang F, Yuan X, et al. Evaluation and comparison of 11 sets of gridded precipitation products over the Qinghai – Tibet plateau[J]. Atmospheric Research, 2024, 302: 107315.
[17] 谭秋阳,徐宗学,赵彦军,等. CMFD 数据集在雅江年楚河流域的适用性分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(3):372 – 379.
Tan Qiuyang, Xu Zongxue, Zhao Yanjun, et al. Applicability of China meteorological forcing dataset to the Nianchu River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021,57(3):372 – 379. (in Chinese)
[18] 高黎明,张乐乐,沈永平,等. ERA – Interim 和 CMFD 气象驱动数据在新疆额尔齐斯河流域的适用性评价[J]. 冰川冻土,2022,44(1):179 – 187.
Gao Liming,Zhang Lele,Shen Yongping,et al. Evaluation of applicability of ERA – Interim and CMFD meteorological forcing data in the Irtysh River Basin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022,44(1):179 – 187. (in Chinese)
[19] He J, Yang K, Tang W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 25.
[20] Ji P, Yuan X, Shi C, et al. A long-term simulation of land surface conditions at high resolution over continental China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2023, 24(2): 285 – 314.
[21] Sun Q, Miao C, Duan Q, et al. A review of global precipitation data sets: data sources, estimation, and intercomparisons[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(1): 79 – 107.
[22] Lei N, Zhou Z, Zhuang Q, et al. Performance evaluation and improvement of CMFD's precipitation products over Shanghai City, China[J]. Earth and Space Science, 2023, 10(3): e2022EA002690.
[23] Su Q, Singh V P. Calibration-free Priestley – Taylor method for reference evapotranspiration estimation[J]. Water Resources Research, 2023, 59(3): e2022WR033198.
[24] Mcmahon T A, Peel M C, Lowe L, et al. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(4): 1331 – 1363.
[25] Chen H, Sun J. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2015, 28(13): 5430 – 5447.
[26] He C, Zhou T, Lin A, et al. Enhanced or weakened western north pacific subtropical high under global warming? [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 16771.
[27] Huang Z, Zhang W, Geng X, et al. Recent shift in the state of the western pacific subtropical high due to ENSO change[J]. Journal of Climate, 2020, 33(1): 229 – 241.
[28] Yeh S W, Cai W, Min S K, et al. ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(1): 185 – 206.
[29] 徐赫,徐菲菲,张佩,等. 基于 Copula 函数的江苏省干旱频率特征分析[J]. 气象科学,2026,46(3):249 – 258.
Xu He,Xu Feifei,Zhang Pei,et al. An analysis of drought frequency in Jiangsu during 1961—2023 based on Copula functions[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2026,46(3):249 – 258. (in Chinese)
[30] 包云轩,孟翠丽,申双和,等. 基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律[J]. 地理学报,2011,66(5):599 – 608.
Bao Yunxuan,Meng Cuili,Shen Shuanghe,et al. Temporal and spatial patterns of droughts for recent 50 years in Jiangsu based on meteorological drought composite index[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5):599 – 608. (in Chinese)
[31] Wang W, Wang J, Shao J, et al. The spatiotemporal variation characteristics and impacts of summer heatwaves, droughts, and compound drought and heatwave events in Jiangsu Province, China[J]. Water, 2024, 16(1): w16010089.
[32] Zhang X, Hao Z, 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.
[33] 姜浩,张寒博,刘诚斌,等. 基于温度–降水–植被综合干旱指数的长江流域干旱时空动态监测[J]. 农业机械学报,2025,56(8):95 – 106,119.
Jiang Hao, Zhang Hanbo, Liu Chengbin, et al. Spatiotemporal dynamic monitoring of drought in the Yangtze River Basin based on a temperature – precipitation – vegetation integrated drought index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 95 – 106, 119. (in Chinese)
[34] Nicolai-Shaw N, Zscheischler J, Hirschi M, et al. A drought event composite analysis using satellite remote-sensing based soil moisture[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 203: 216 – 225.
[35] 刘航铖,姚宁,喻绪创,等. 基于多源数据和 Stacking 集成学习的气象干旱监测模型[J]. 农业机械学报,2025,56(8):107 – 119.
Liu Hangcheng, Yao Ning, Yu Xuchuang, et al. Meteorological drought monitoring model based on multi-source data and Stacking ensemble learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(8):107 – 119. (in Chinese)