

基于干旱荧光监测指数的海河流域干旱监测研究

赵安周¹ 韩晓冉¹ 刘宪锋² 张 未¹ 王雅慧¹ 李慕义³

(1. 河北工程大学矿业与测绘工程学院, 邯郸 056038; 2. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119;

3. 宿迁学院建筑工程学院, 宿迁 223800)

摘要: 海河流域是我国重要的农业生产区, 及时准确掌握干旱时空特征对农业水资源管理及粮食安全具有重要意义。基于日光诱导叶绿素荧光(Sun-induced chlorophyll fluorescence, SIF)、地表温度(Land surface temperature, LST)、降水量以及土壤湿度(Soil moisture, SM)数据, 构建了综合考虑植被长势、温度、降水量以及土壤含水率的海河流域干旱荧光监测指数(Drought fluorescence monitoring index, DFMI), 同时利用已有干旱指数和站点土壤含水率对其精度进行了评价, 并利用趋势分析和游程理论等方法分析了2001—2021年该流域DFMI时空演变特征及其干旱频率、干旱历时和干旱强度等特征变量的空间分布。结果表明: DFMI与SM、自适应帕尔默干旱指数(Self-calibrating Palmer drought severity index, scPDSI)、标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)(1个月(SPEI01)、3个月(SPEI03)、6个月(SPEI06)、9个月(SPEI09)、12个月(SPEI12))的相关系数分别为0.58、0.64、0.73、0.52、0.44、0.47和0.49。与12个站点土壤含水率相关性均通过了0.05显著性水平检验, 表明DFMI适用于流域干旱监测。2001—2021年海河流域DFMI年均值呈显著上升趋势, 上升速率为0.0097/a($p < 0.05$)。秋季上升速率最大(0.0131/a, $p < 0.05$), 春季最小(0.0077/a, $p < 0.05$)。海河流域年DFMI呈现显著上升趋势($p < 0.05$)面积占比达99.18%, 春季、夏季、秋季、冬季DFMI呈显著上升趋势面积占比分别为38.36%、63.42%、58.96%和50.26%, 主要分布在流域西北部。2001—2021年海河流域干旱频次高发区域(30~37次)主要集中在流域南部, 平均干旱历时高值区(5~10.2个月)主要集中在流域北部, 干旱强度高值区(0.30~0.37)分布在流域中部和东南部。研究结果可为流域水资源管理及其防旱抗旱提供科学依据。

关键词: 干旱监测; DFMI; 时空演变; 干旱特征; 海河流域

中图分类号: P407

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)03-0458-09

OSID:



Drought Monitoring in Haihe River Basin Based on Drought Fluorescence Monitoring Index

ZHAO Anzhou¹ HAN Xiaoran¹ LIU Xianfeng² ZHANG Wei¹ WANG Yahui¹ LI Mui³

(1. School of Mining and Geomatics, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

2. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

3. School of Civil Engineering and Architecture, Suqian University, Suqian 223800, China)

Abstract: The Haihe River Basin is a crucial agricultural production region in China, and understanding the temporal and spatial characteristics of drought is vital for managing agricultural water resources and ensuring food security. Drought fluorescence monitoring index (DFMI) for the Haihe River Basin was constructed based on the sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF), land surface temperature (LST), precipitation, and soil moisture (SM). This index comprehensively integrated vegetation growth, temperature, precipitation, and soil moisture content to monitor drought conditions. At the same time, the accuracy of the DFMI was evaluated by using existing drought indices and soil moisture data from monitoring stations. Additionally, trend analysis and run theory were employed to analyze the temporal and spatial evolution characteristics of the DFMI in the Haihe River Basin from 2001 to 2021, as well as the spatial distribution of variables such as drought frequency, drought duration, and drought intensity. Results indicated that the correlation coefficients between DFMI and SM, self-calibrating Palmer drought

收稿日期: 2024-09-20 修回日期: 2024-11-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42171212)、河北省自然科学基金项目(D2022402030)和宿迁市科技计划资助项目(K202355)

作者简介: 赵安周(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事植被对干旱的响应研究, E-mail: zhaoanzhou@hebeu.edu.cn

severity index (scPDSI), standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) (SPEI01, SPEI03, SPEI06, SPEI09, SPEI12) were 0.58, 0.64, 0.73, 0.52, 0.44, 0.47 and 0.49, respectively. The correlation between DFMI and SM at 12 sites passed the 0.05 significance level test, indicating that DFMI was suitable for drought monitoring in the Haihe River Basin. The annual mean value of DFMI in the Haihe River Basin exhibited a significant increasing trend from 2001 to 2021, with an increase rate of 0.009 7/a ($p < 0.05$). The highest increase rate was observed in autumn (0.013 1/a, $p < 0.05$), and the lowest in spring (0.007 7/a, $p < 0.05$). The annual DFMI in Haihe River Basin showed a significant upward trend ($p < 0.05$), with 99.18% of the area exhibiting this trend. In spring, summer, autumn, and winter, the area showed a significant upward trend in DFMI accounted for 38.36%, 63.42%, 58.96%, and 50.26%, respectively, with most of these areas located in the northwest of the basin. From 2001 to 2021, areas with high drought frequency (30 to 37 times) were mainly concentrated in the southern part of the Haihe River Basin. Regions with high average drought duration (5 to 10.2 months) were found in the northern part, and areas with high drought intensity (0.30 to 0.37) were found in the central and southeastern parts of the basin. These findings can provide scientific evidence for water resource management and drought prevention and mitigation in the basin.

Key words: drought monitoring; drought fluorescence monitoring index; space-time evolution; drought characteristics; Haihe River Basin

0 引言

干旱是全球发生频次最高的自然灾害之一。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第六次报告(the Sixth Assessment Report,AR6)指出近 10 年全球地表温度较 1850—1900 年已升高 1.19℃^[1],气温快速升高加剧了区域间水循环,导致干旱事件发生频率和强度显著增加^[2-3]。因此,及时准确地监测干旱状况对于防旱抗旱工作至关重要。

国内外学者构建出上百种干旱指数监测干旱情况。其中基于单一变量构建的干旱指数会受限于数据的分布不均及插值方法的不确定性,难以准确反映干旱的空间分布^[4]。随着空间信息技术发展,诸多遥感反演数据为干旱精准监测和空间分布特征研究提供了可靠数据源。常用的遥感干旱指数包括基于归一化差值植被指数(Normalized difference vegetation index,NDVI)、土壤湿度(Soil moisture,SM)、地表温度(Land surface temperature,LST)以及日光诱导叶绿素荧光(Sun-induced chlorophyll fluorescence,SIF)等数据构建的植被状态指数(Vegetation condition index,VCI)^[5]、土壤湿度状态指数(Soil moisture condition index,SMCI)^[6]、温度状态指数(Temperature condition index,TCI)^[7]和荧光条件指数(Fluorescence condition index,FCI)^[8]等。基于单一变量构建的干旱指数无法反映干旱发生的复杂过程。因此,也有学者基于多源遥感数据集构建了如集成 VCI 和 TCI 优势的植被健康指数(Vegetation health index,VHI)^[9]以及基于 NDVI、实际蒸散量(Evapotranspiration,ET)与潜在蒸散量

(Potential evapotranspiration,PET)比值构建的干旱严重程度指数(Drought severity index,DSI)等综合干旱监测指数。尽管多变量干旱指数在全球或区域干旱监测中表现出色,但 NDVI 和增强型植被指数(Enhanced vegetation index,EVI)等传统植被指数主要用来描述植被“绿度”等结构功能特征,难以准确量化植被光合作用对干旱的响应^[10]。此外,受植被调节机制影响,其结构功能特征通常在受到一段时间的干旱胁迫后才会发生显著变化,因此基于传统植被指数构建的综合干旱监测指数在捕捉植被对干旱响应方面存在明显的时间滞后性,不利于干旱过程实时监测^[11]。

相较于传统植被指数,SIF 信号对水分条件变化敏感,可以直接表征植被光合作用速率,因此能更快速准确地监测干旱对植被活动的影响^[12]。但目前利用综合干旱指数对植被健康状况进行监测多依赖绿度信息,对 SIF 考虑不足。因此需进一步研究将 SIF 与 LST、降水量、SM 等要素相互结合来及时准确监测干旱事件。

海河流域位于中国东部偏北,是中国干旱最为频发的地区之一^[13]。虽然已有学者对该流域干旱进行了监测,但多是基于单一变量构建的干旱指数或基于传统植被指数构建的综合干旱指数,缺少基于 SIF 构建的综合干旱指数对该流域干旱进行监测。鉴于此,本文构建综合考虑 SIF、LST、降水量和 SM 等多要素的海河流域新型干旱荧光监测指数(Drought fluorescence monitoring index,DFMI),并利用传统遥感干旱指数和站点土壤含水率对 DFMI 的适用性进行评价;在此基础上,探讨海河流域干旱时空演变特征以及干旱特征变量的空间分布,以期为

流域防旱抗旱及生态保护提供理论依据。

1 数据与处理方法

1.1 研究区概况

海河流域位于 35°~43°N、112°~120°E 之间, 涵盖北京市、天津市、河北省大部分地区及山东省、山西省、河南省、内蒙古自治区部分地区及辽宁省部分地区, 总面积约 $3.19 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[14] (图 1a)。该流域是中国七大流域之一, 地势呈西北高、东南低的分布态势^[15], 高程在 -97~3 059 m 之间 (图 1b)。气候类型属半湿润半干旱的温带东亚季风气候区, 年均气温 1.5~14.0℃, 年均降水量约 500 mm, 相对湿度 50%~70%^[16], 潜在蒸发量 1 100 mm^[17]。主要土地利用类型包括草地、耕地和建设用地^[18], 占流域总面积的 89% 以上。作为我国重要的农业生产基地, 海河流域干旱频发, 重旱易发区呈现扩大的趋势^[19], 2014 年夏秋连旱造成华北平原 130 多万公顷农作物受到影响^[20], 2016 年河北省南部冬小麦受到干旱严重威胁^[21], 极大地影响了该流域农业和社会经济发展, 因此有必要对该流域干旱事件进行及时有效的监测。

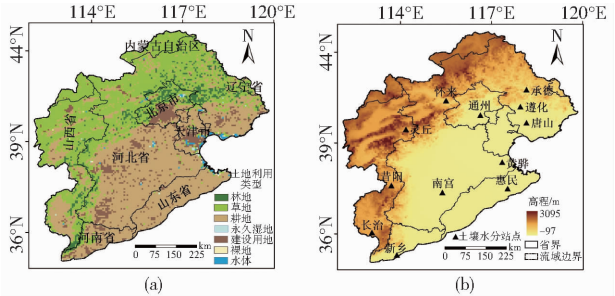


图 1 海河流域土地利用类型及高程

Fig.1 Spatial distributions of land use and elevation in Haihe River Basin

1.2 研究数据

中分辨率成像光谱仪 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 产品数据集主要包括土地利用类型、NDVI、LST、ET 和 PET 数据, 来源于美国国家航空航天局 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>), 其中 ET/PET 数据由 8 d 数据合成和转换, 并依据每月天数进行加权计算而成。全球太阳诱导叶绿素荧光数据集 (Global OCO-2 SIF data, GOSIF) 整合了 OCO-2SIF 观测数据、MODIS 遥感产品数据和气象再分析数据^[22] (http://data.globalecology.unh.edu/data/GOSIF_v2), 该数据已在全球范围内 91 个通量站进行了验证^[23], 具有较高精度。SM 数据来源于阿姆斯特丹全球土地蒸发数据集^[24] (<https://www.gleam.eu>)。scPDSI 数据来源于英国东英格利亚大学气候研究所提供的

干旱指数全球网格数据集 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/>); SPEI 数据^[25] 来源于全球 SPEI 数据集 (<https://spei.csic.es/>), 本文利用该数据集分析 1 个月 (SPEI01)、3 个月 (SPEI03)、6 个月 (SPEI06)、9 个月 (SPEI09)、12 个月 (SPEI12) SPEI 和 DFMI 的相关性。降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>)。数据详情如表 1 所示。

表 1 研究数据
Tab.1 Research data

名称	产品	年份	时间分辨率	空间分辨率
土地利用类型	MCD12Q1	2021	年	500 m
NDVI	MOD13C2	2001—2021	月	0.05°
LST	MOD11C3	2001—2021	月	0.05°
ET/PET	MOD16A2GF	2001—2021	8 d	500 m
GOSIF		2001—2021	8 d	0.05°
SM		2001—2021	月	0.25°
scPDSI		2001—2021	月	0.5°
SPEI		2001—2021	月	0.5°
降水数据		2001—2021	月	500 m

为了与 GOSIF 等遥感数据保持一致, 将所有数据坐标统一为 WGS_1984, 利用双线性插值将空间分辨率统一至 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。

1.3 研究方法

1.3.1 DFMI 构建

鉴于 SIF 较传统植被指数在干旱监测中的优势, 基于 VCI 和 VHI 构建原理^[17], 将 VCI 公式中 NDVI 替换为 SIF 得到 FCI, 将 VHI 公式中 VCI 替换为 FCI 得到荧光健康指数 (Fluorescence health index, FHI)^[7]; 综合 TCI、降水状况指数 (Precipitation condition index, PCI)^[5]、SMCI 和 FCI, 建立 2001—2021 年海河流域月尺度 DFMI^[7]。

具体的干旱等级分类参考文献[7]。采用熵权法^[18]确定 VHI、FHI 和 DFMI 权重。

1.3.2 干旱特征变量识别

游程理论^[19]是一种广泛应用于气候事件识别的方法, 通过连续的低于平均水平的 DFMI 值判定干旱事件, 并且能够识别干旱事件的持续时间、频次和强度等特征。该方法能够有效反映长期干旱事件的累积影响。因此, 本文基于逐月栅格 DFMI 值, 利用游程理论进行干旱事件识别和干旱特征变量提取, 选择干旱频次 (统计时段内总共发生的干旱次数)、平均干旱历时 (统计时段内平均每发生一次干旱的历时, 单位为月) 和平均干旱强度 (统计时段内平均每发生一次干旱的强度) 分析海河流域干旱特征变量。

此外,采用 Pearson 分析干旱指数与 SPEI、SM 间的相关性,各栅格点检验相应的显著性^[20]。利用 Theil-Sen's^[21] 监测 DFMI 变化趋势,使用 Mann - Kendall (MK) 方法^[22] 检验时间序列趋势变化,分析其变化趋势的显著性。

2 结果与分析

2.1 DFMI 适用性评价

2.1.1 DFMI 与已有干旱指数相关性

2001—2021 年月 DFMI 与 SM、SPEI 和 scPDSI 的相关性如图 2 (图中 * 表示显著 ($p < 0.05$)) 所示。总体来看,DFMI 与 SM、scPDSI 和 SPEI (SPEI01、SPEI03、SPEI06、SPEI09 和 SPEI12) 的相关系数分别为 0.58、0.64、0.73、0.52、0.44、0.47 和 0.49,均通过了 0.05 显著性水平检验。其相关系数高于基于单变量 (TCI、PCI、VCI 和 FCI) 和双变量 (VHI 和 FHI) 构建的干旱指数与 SM、SPEI、scPDSI 的相关系数。

2.1.2 DFMI 与站点土壤含水率相关性

为进一步验证 DFMI 在海河流域的适用性,选取 2001—2010 年海河流域 12 个站点月土壤含水率验证本文所构建的 DFMI 精度 (图 3、4)。从图 3 可以看出,12 个站点的土壤含水率与 DFMI 的相关系

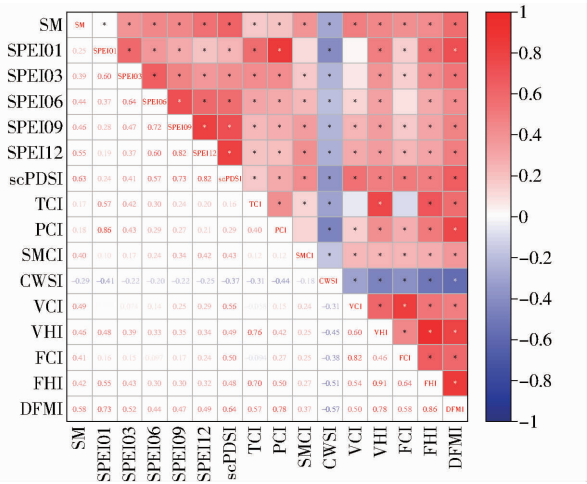


图 2 2001—2021 年月 DFMI 与已有干旱指数的相关系数

Fig. 2 Pearson correlation coefficients between monthly DFMI and drought index from 2001 to 2021

数在 0.42 ~ 0.69 之间,均通过了 0.05 显著性水平检验,其中昔阳站和怀来站的相关性最高 ($r = 0.69$),承德站的相关性最低 ($r = 0.42$)。从不同月份来看 (图 4),海河流域 DFMI 与土壤含水率的相关系数在 0.31 ~ 0.61 之间,均通过了 0.05 显著性水平检验,其中 11 月的相关性最高 ($r = 0.61$),4 月的相关性最低 ($r = 0.31$)。以上分析结果表明,本文

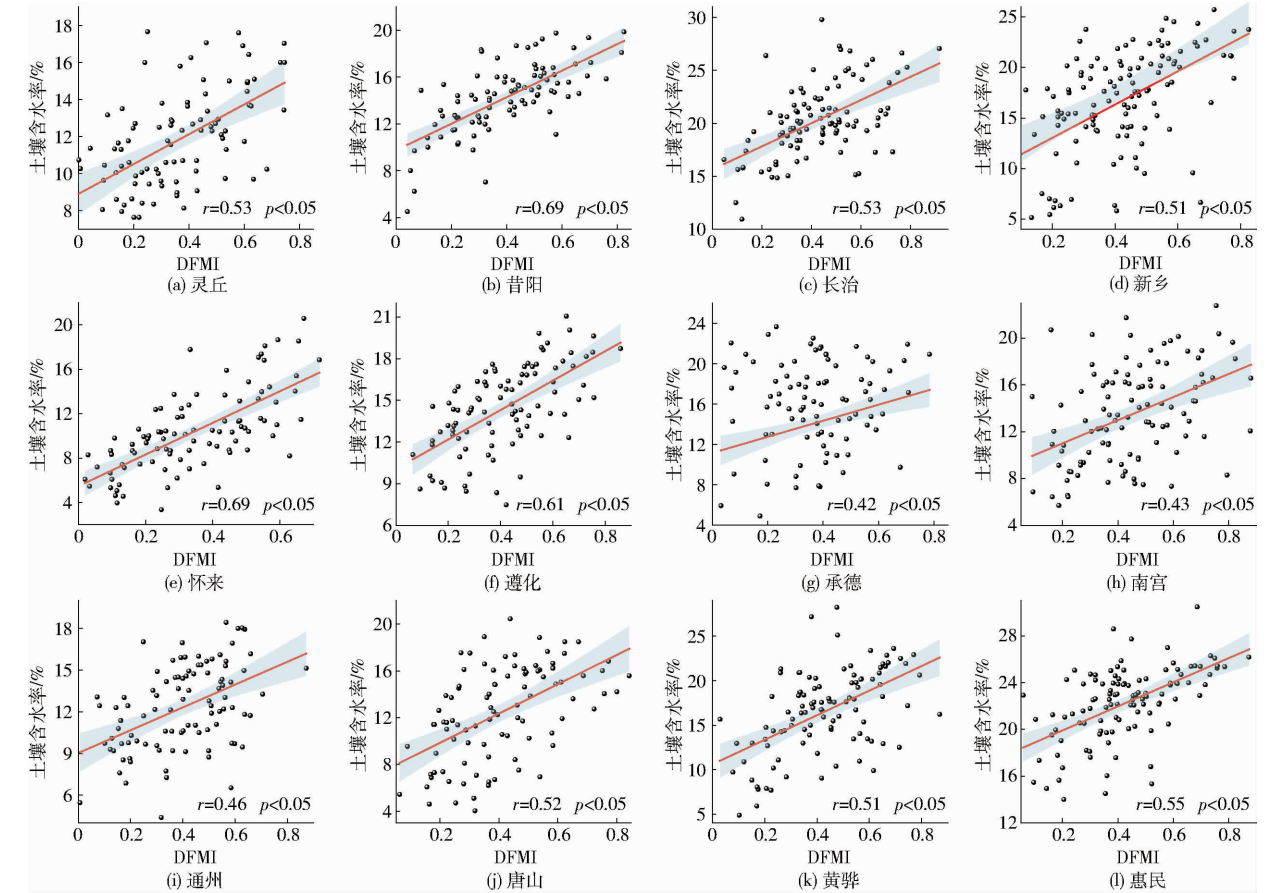


图 3 2001—2010 年月 DFMI 与土壤含水率的相关性

Fig. 3 Correlation between monthly DFMI and SM at 12 sites from 2001 to 2010

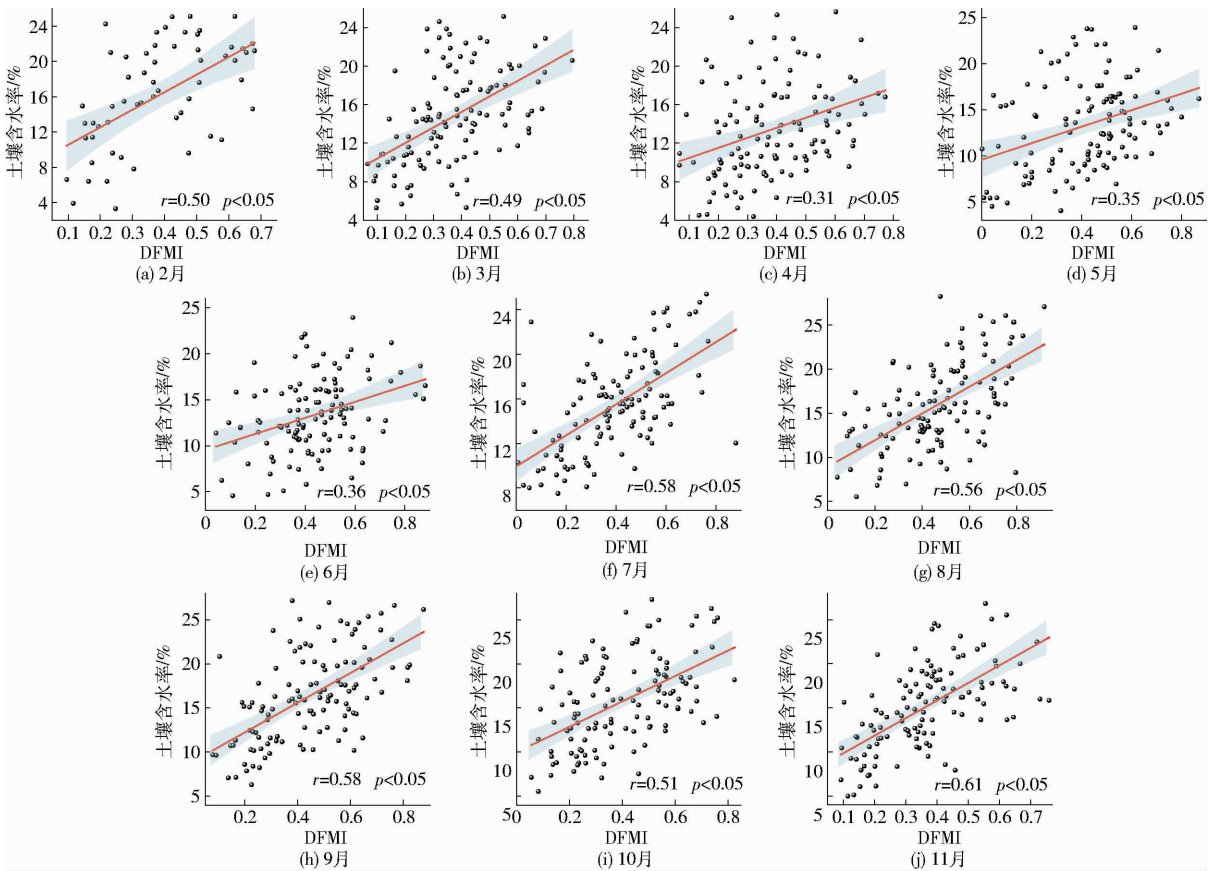


图4 DFMI与土壤含水率的相关性

Fig.4 Correlation between DFMI and SM in different months

所构建的 DFMI 能够从时间和空间维度捕捉海河流域土壤含水率的变化。

2.2 海河流域干旱时空演变趋势

2.2.1 海河流域干旱时间变化趋势

2001—2021 年海河流域 DFMI 时间变化如图 5 所示。从图中可以看出,21 年来海河流域 DFMI 年均值整体呈显著上升趋势,上升速率为 0.009 7/a ($p < 0.05$),最高值出现在 2021 年 (DFMI 为 0.647 2),最低值出现在 2002 年 (DFMI 为 0.283 1)。从季节尺度来看,春季、夏季、秋季和冬季 DFMI 均呈显著上升趋势,其中秋季上升速率最大 (0.013 1/a, $p < 0.05$),春季上升速率最小 (0.007 7/a, $p < 0.05$)。综上,无论是年际尺度还是季节尺度,2001—2021 年海河流域 DFMI 均呈现显著上升趋势,表明近 21 年来该流域干旱程度有所缓解。

图 6 为海河流域不同等级干旱面积百分比时间变化曲线。从图中可以看出,2001—2021 年期间,海河流域无旱 (D0) 百分比呈现显著上升趋势,其上升速率为 2.21%/a ($p < 0.05$)。轻旱 (D1)、中旱 (D2)、重旱 (D3) 和特旱 (D4) 面积百分比均呈现显著下降趋势,其中中旱面积百分比下降速率最大 ($-0.82\%/a$, $p < 0.05$),进一步表明 2001—2021 年

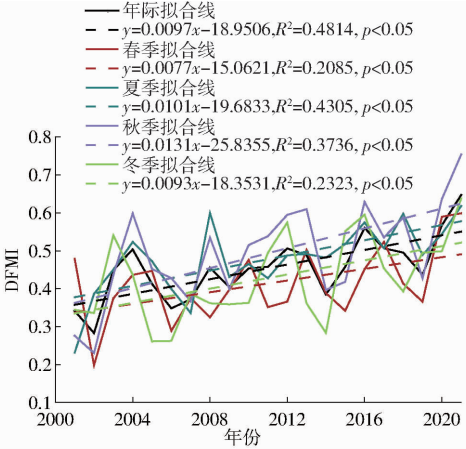


图5 2001—2021 年 DFMI 年际和季节变化曲线

Fig.5 Annual and seasonal change curves of DFMI from 2001 to 2021

海河流域干旱程度呈减轻趋势。

2.2.2 海河流域干旱空间变化特征

2001—2021 年海河流域年际和季节 DFMI 空间变化趋势如图 7 所示。从图中可以看出,海河流域年际 DFMI 呈上升和下降趋势面积占比分别为 99.18% 和 0.82%,其中 83.39% 区域呈显著上升趋势,上升速率较快的区域主要分布在流域西北部地区 (图 7a、7f)。在季节尺度上,春季 DFMI 呈显著上升和显著下降面积占比分别为 38.36% 和 0.02%,

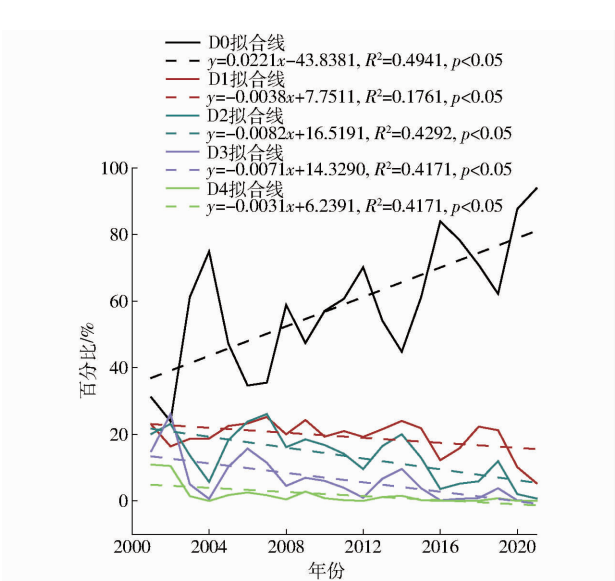


图 6 不同级别干旱影响面积百分比变化曲线

Fig.6 Annual change curves of drought-affected areas at different levels

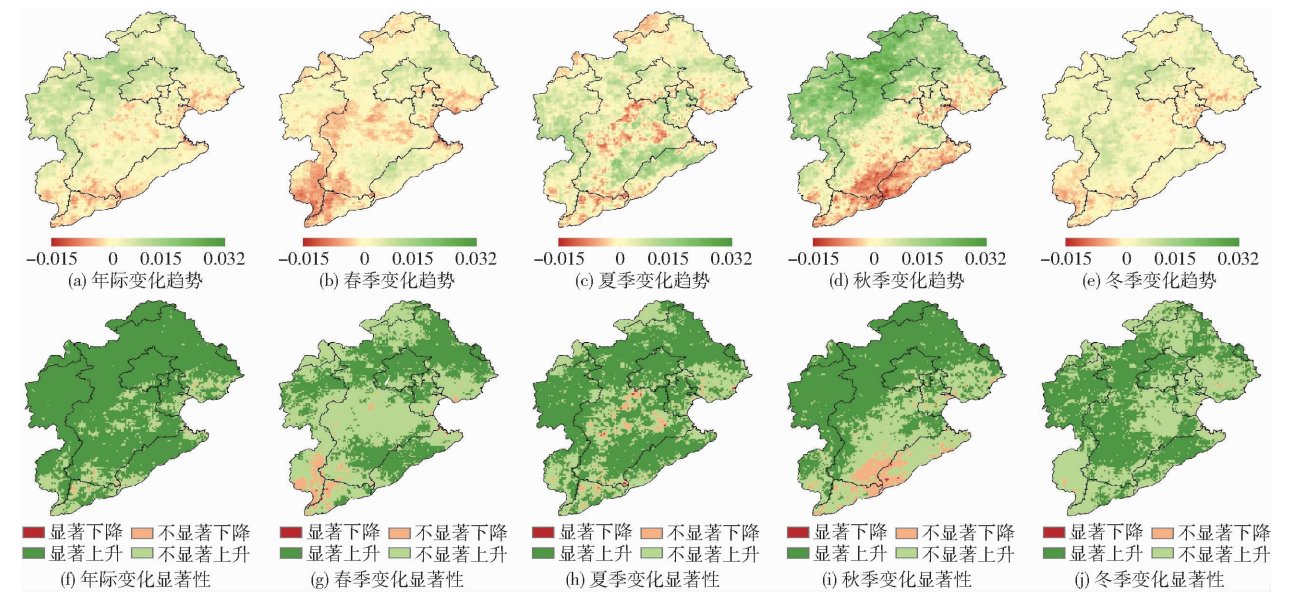


图 7 2001—2021 年 DFMI 变化趋势及显著性检验

Fig.7 Annual and seasonal change trends and significance of DFMI from 2001 to 2021

3 月—2002 年 3 月,平均干旱强度达到 0.262 8,总持续时间为 13 个月,这与周根富等^[23]和赵丽萍^[24]的研究结论基本一致。

2.3.2 干旱特征变量

2001—2021 年海河流域干旱历时、干旱频次和平均干旱强度空间分布如图 8 所示。从图中可以看出,2001—2021 年海河流域干旱频次在 3 ~ 37 次之间,平均干旱发生频次为 23 次。干旱频次较高区域(30 ~ 37 次)主要分布在流域南部;干旱频次较低区域(3 ~ 15 次)主要分布在流域北部(图 8a)。从干旱历时来看,2001—2021 年海河流域平均干旱历时为 2 ~ 10.2 个月,平均干旱历时高值区(5 ~ 10.2 个月)主要集中在流域北部,低值区(2 ~ 2.5 个月)主要分布在流域东南部(图 8b)。流域大部分区域多年平均干旱

显著上升区域主要位于流域北部(图 7b、7g)。夏季 DFMI 呈显著上升和显著下降面积占比达 63.42% 和 0.12%,其中显著上升区域主要分布在流域中部和西北部地区(图 7c、7h)。秋季和冬季 DFMI 呈显著上升面积占比分别达 58.96% 和 50.26%,主要分布在流域西北部地区(图 7d、7e、7i、7j)。春季和秋季 DFMI 减小区域主要分布在流域东南部地区,这些区域主要为耕地,因此需要关注和防范耕地干旱风险加剧。

2.3 海河流域干旱事件识别和干旱特征变量

2.3.1 干旱事件识别

基于 DFMI 对海河流域干旱事件的识别结果如表 2 所示。从表中可以看出,2001—2021 年期间持续 1 个月以上的干旱事件有 19 次,持续 3 个月及以上的干旱事件有 7 次,其中 2001—2008 年发生了 6 次严重干旱事件,最严重的一次发生在 2001 年

强度在 0.25 ~ 0.37 之间,平均干旱强度高值区(0.30 ~ 0.37)集中在流域中部和东南部,低值区(0.25 ~ 0.26)分布在流域东北部(图 8c)。

总体来看,随着干旱持续时间增加,干旱事件频次降低,并且随着干旱历时和强度增加,极端长历时干旱事件更易发生。流域内干旱特征空间分布存在明显的空间异质性,流域北部干旱特征表现为次数少、历时长和强度大;流域南部干旱特征表现为次数多、历时短和强度小。

3 讨论

鉴于 SIF 在干旱监测方面的显著优势,本文基于 GOSIF、LST、SM 和降水量数据构建了 2001—2021 年海河流域月尺度 DFMI,并对其在海河流域

表 2 基于 DFMI 的海河流域干旱事件识别结果

Tab.2 Drought event in Haihe River Basin
based on DFMI

起止日期	持续时间/月	平均干旱强度
2001 年 3 月—2002 年 3 月	13	0.262 8
2002 年 7 月—2002 年 11 月	5	0.229 7
2003 年 7 月—2003 年 8 月	2	0.375 6
2005 年 3 月—2005 年 4 月	2	0.325 8
2005 年 9 月—2006 年 4 月	8	0.287 8
2006 年 9 月—2007 年 2 月	6	0.261 2
2007 年 6 月—2007 年 9 月	4	0.358 7
2007 年 11 月—2008 年 3 月	5	0.319 5
2008 年 11 月—2009 年 1 月	3	0.309 7
2009 年 6 月—2009 年 8 月	3	0.374 4
2010 年 11 月—2011 年 1 月	3	0.281 2
2011 年 3 月—2011 年 4 月	2	0.296 4
2012 年 1 月—2012 年 3 月	3	0.363 9
2013 年 11 月—2014 年 1 月	3	0.306 1
2014 年 7 月—2014 年 8 月	2	0.330 2
2014 年 10 月—2015 年 1 月	4	0.292 2
2015 年 7 月—2015 年 8 月	2	0.344 4
2018 年 2 月—2018 年 3 月	2	0.394 2
2019 年 6 月—2019 年 7 月	2	0.350 9

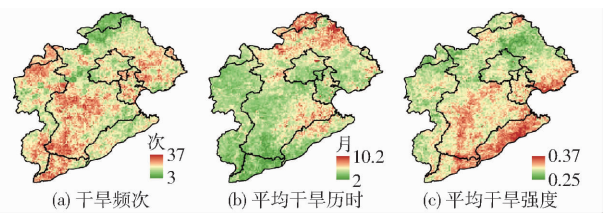


图 8 2001—2021 年海河流域干旱特征变量空间分布

Fig.8 Spatial distributions of drought characteristic variables in Haihe River Basin from 2001 to 2021

的适用性及其时空演变特征进行了分析。本文构建的 DFMI 与不同时间尺度的 SPEI (除 SPEI01 与 PCI) 和 scPDSI 的相关性均最高 (图 2), 这一现象表明 DFMI 能够较好地监测海河流域气象干旱。相较于 SPEI 或基于 NDVI、LST 和降水量构建的归一化旱情综合指数^[24-26], DFMI 在时间和空间上与站点土壤含水率均达到显著相关 ($p < 0.05$), 表明 DFMI 较其他单变量和双变量构建的干旱指数可以更好地表征土壤湿度变化, 能准确反映该流域农业干旱情况。此外, 作物缺水指数 (Crop water scarcity index, CWSI) 被认为是最好的作物水分胁迫指数^[27], DFMI 和 CWSI 之间存在显著负相关 ($r = -0.57$), 进一步表明该指数在监测植物水分胁迫方面更为敏感, 可以作为农业干旱监测的指数。

从 DFMI 时空演变来看, 21 年来海河流域干旱情况呈减轻趋势, 干旱风险程度较低, 整个区域的水分条件持续变好。特别是 2014 年以后, 海河流域干旱面积比例逐渐下降, 植被覆盖度变化总体呈上升趋势^[28]。降水增加等气象条件的改善缓解了干旱的发

生^[29], 这与赵安周等^[30]、马梓策等^[31]以及冯平等^[19]的研究结果类似。从干旱特征空间分布来看, 由于植被类型和降水量双重影响, 干旱高频区集中在流域中部耕地区以及南部地区。HE 等^[32]和相恺政等^[12]利用 SPEI 和 SSMI 指数分析了海河流域干旱事件, 发现农业干旱发生频率南部多于北部, 平原多于山区, 这与本文的结果一致。因此, 有必要加强对流域中南部耕地区域的作物长势监测, 为农业干旱早期预警及农业部门防旱抗旱措施制定提供理论支撑^[33]。随着干旱持续时间增加, 干旱频次降低, 并且随着干旱历时和强度增大, 高值区域逐渐从流域中南部耕地区向东北部过渡, 原因可能是海河流域年平均气温呈显著上升趋势, 且北部升温幅度大于南部^[34]。

GOSIF 数据在干旱监测、植被物候和植被长势监测中具有重要意义^[35]。但该数据并不是直接的 SIF 观测数据, 其包含和光合有效辐射、蒸汽压亏缺量、气温相关的信息与 DFMI 存在着内在联系, 可能会给本研究结果带来一定的不确定性。同时构建过程中使用的 SM 和降水量数据的空间分辨率仍较粗糙, 最终可能影响 DFMI 的监测性能, 后续研究将进一步提高数据的空间分辨率, 以提高指数监测效果。在构建方法上, 本文利用熵权法从栅格单元上确定了各因子权重, 该方法能够有效解决指数间信息冗余的问题, 确保指数权重的客观性, 为多指数综合评价体系构建提供科学依据, 但也有研究指出该方法过度依赖原始数据质量^[17]。因此, 后续研究中, 可以进一步采用主成分分析、机器学习以及模糊加权^[36]等模型方法确定 DFMI 各因子权重系数, 从而更准确地监测流域干旱。

4 结论

(1) 海河流域 DFMI 与 SM、scPDSI、SPEI01、SPEI03、SPEI06、SPEI09、SPEI12、站点土壤含水率均呈现显著相关性, 表明 DFMI 能综合上述指数的优点, 对干旱事件识别效果更好, 更适用于海河流域干旱监测。

(2) 整体来看, 2001—2021 年海河流域干旱情况有所缓解, 其中年际 DFMI 和季节 DFMI 均呈显著上升趋势, 不同级别干旱所占比例均呈下降趋势。从空间分布来看, 海河流域年 DFMI 呈现显著上升趋势 ($p < 0.05$) 面积占比高达 99.18%, 春季、夏季、秋季、冬季 DFMI 呈显著上升趋势区域主要分布在流域西北部。

(3) 2001—2021 年海河流域干旱高发区主要集中在流域南部, 平均干旱历时高值区主要集中在流域北部, 干旱强度高值区分布在流域中部和东南部。

参 考 文 献

[1] 邓皓东,徐宝同,王庆明,等.长黄淮海流域雨强变化特征及气象因子影响分析[J/OL].水利水电技术(中英文),1-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.tv.20240616.1245.002.html>.
DENG Haodong,XU Baotong,WANG Qingming, et al. Characterization of rainfall intensity changes and meteorological factors influence in the Yangtze-Huang-Huai-Hai River basins[J/OL]. Water Resources and Hydropower Engineering,1-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.tv.20240616.1245.002.html>. (in Chinese)

[2] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.农业干旱监测研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(11):1835-1848.
LIU Xianfeng,ZHU Xiufang,PAN Yaozhong, et al. Agricultural drought monitoring: progress, challenges, and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 70(11): 1835-1848. (in Chinese)

[3] 姚宁,蒋昆昊,谢文馨,等.气候变化背景下山西省气象干旱时空演变特征[J].农业机械学报,2024,55(1):270-281.
YAO Ning,JIANG Kunhao,XIE Wenxin, et al. Temporal and spatial evolution of drought disasters in Shanxi Province under background of climate change[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 270-281. (in Chinese)

[4] 李仕峰.基于时滞效应的干旱指数构建及其在河南省的应用研究[D].北京:中国农业科学院,2023.
LI Shifeng. Construction of drought index based on time delay effect and its application in Henan Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2023. (in Chinese)

[5] 王思琪,张翔,陈能成,等.基于多种干旱指数的长江中下游五省干旱监测与对比[J].干旱气象,2019,37(2):209-217.
WANG Siqi,ZHANG Xiang,CHEN Nengcheng, et al. Monitoring and comparison of drought in five provinces of the middle and lower reaches of the Yangtze River based on the multiple drought indices[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(2): 209-217. (in Chinese)

[6] 袁淦,邢秀丽,居为民.中国遥感干旱指数时空特征及其对气候和地表覆盖变化的响应[J].生态学报,2023,43(16):6691-6705.
YUAN Shu,XING Xiuli,JU Weimin. Temporal and spatial patterns of remote sensing drought indices and their responses to climate and land use changes in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6691-6705. (in Chinese)

[7] LI Meng, CHU Ronghao, ISLAM A R M T. A new drought fluorescence monitoring index established for detecting drought evolution characteristics in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China during 2001—2020[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 4405613.

[8] 沙寅涛,刘戈,赵晓阳,等.2003—2022年黄河流域TCI、VCI、VHI、TVDI逐年1 km分辨率数据集[J].中国科学数据(中英文网络版),2024,9(2):166-180.
SHA Yintao,LIU Ge,ZHAO Xiaoyang, et al. A dataset of annual TCI, VCI, VHI and TVDI with the resolution of 1 km in the Yellow River Basin (2003—2022)[J]. China Scientific Data, 2024, 9(2): 166-180. (in Chinese)

[9] 刘心怡.蒙古高原典型生态系统水分利用效率的时空变化及其驱动机制研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2024.
LIU Xinyi. Spatiotemporal variations and driving mechanisms of water use efficiency in typical ecosystems of the Mongolian Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2024. (in Chinese)

[10] 陈治仲,陈上,缙子仪,等.黄淮海平原植被日光诱导叶绿素荧光对骤旱的响应[J].农业机械学报,2024,55(10):327-338.
CHEN Zhizhong,CHEN Shang,XIAN Ziyi, et al. Response of solar-induced chlorophyll fluorescence to flash drought in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 327-338. (in Chinese)

[11] SONG Lian, GUANTER L, GUAN Kaiyu, et al. Satellite sun-induced chlorophyll fluorescence detects early response of winter wheat to heat stress in the Indian Indo-Gangetic Plains[J]. Global Change Biology, 2018, 24: 4023-4037.

[12] 相恺政,赵安周,胡小枫,等.1980—2019年海河流域气象干旱和农业干旱变化及传播特征[J].水资源与水工程学报,2022,33(2):194-202.
XIANG Kaizheng,ZHAO Anzhou,HU Xiaofeng, et al. Variation and propagation characteristics of the meteorological and agricultural drought in the Haihe River Basin from 1980 to 2019[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(2): 194-202. (in Chinese)

[13] MARTINSEN G, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Joint optimization of water allocation and water quality management in Haihe River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 72-84.

[14] 于紫萍,宋永会,魏健,等.海河70年治理历程梳理分析[J].环境科学研究,2021,34(6):1347-1358.
YU Ziping,SONG Yonghui,WEI Jian, et al. 70 years' governance process of Haihe River[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(6): 1347-1358. (in Chinese)

[15] ZHAO Junfang, PENG Huiwen, YANG Jiaqi, et al. Response of winter wheat to different drought levels based on Google Earth Engine in the Huang-Huai-Hai Region, China[J]. Agricultural Water Management, 2024, 292: 108662.

[16] 刘博,徐涛,徐强强,等.基于叶绿素荧光遥感的江西省稻田总初级生产力估算及其气象驱动因素研究[J].农业机械学报,2024,55(8):391-400.
LIU Bo,XU Tao,XU Qiangqiang, et al. Estimation of gross primary production of paddy field in Jiangxi Province based on remote sensing measured sun-induced chlorophyll fluorescence and its correlation with meteorological factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 391-400. (in Chinese)

[17] 安琦.日光诱导叶绿素荧光对干旱的指示能力研究[D].武汉:华中师范大学,2022.
AN Qi. Research on the capacity of satellite sun-induced chlorophyll fluorescence to drought stress[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[18] 王腾,李佳,付尧,等.基于层次分析-熵权法的内蒙古农牧交错带农业用水水平综合评价[J].水土保持学报,2023,

- 37(5):259–266.
- WANG Teng, LI Jia, FU Yao, et al. Comprehensive evaluation of agricultural water use level in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia based on analytic hierarchy process and entropy weight method[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 259–266. (in Chinese)
- [19] 冯平,任明雪,李建柱. 基于蒸散发的干旱指数在子牙河流域适用性及干旱时空变化特征分析[J]. 水资源保护,2024, 40(3):35–43.
- FENG Ping, REN Mingxue, LI Jianzhu. Applicability of evapotranspiration-based drought index and drought spatio-temporal characteristics in the Ziya River Basin[J]. Water Resources Protection,2024, 40(3): 35–43. (in Chinese)
- [20] 隆院男,黄崇荣,李正最,等. 基于 Copula 函数的湘江流域气象干旱向水文干旱传播特性[J]. 农业工程学报,2023, 39(21):66–78.
- LONG Yuannan, HUANG Chongrong, LI Zhengzui, et al. Characteristics of the transmission from meteorological drought to hydrological drought in the Xiangjiang River Basin of China using Copula function[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(21): 66–78. (in Chinese)
- [21] 贾一越,齐璇璇,黄蕊,等. 山西省植被覆盖度的时空变化及驱动因子[J]. 应用生态学报,2024,35(4):1073–1082.
- JIA Yiyue, QI Xuanxuan, HUANG Rui, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of vegetation coverage in Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4): 1073–1082. (in Chinese)
- [22] 王椰,史海静,姜艳敏,等. 基于 TVDI 的黄土高原干旱时空变化与其影响因素[J]. 农业机械学报,2023,54(7):184–195.
- WANG Ye, SHI Haijing, JIANG Yanmin, et al. Spatio-temporal variation of drought characteristics and its influencing factors in Loess Plateau based on TVDI[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 184–195. (in Chinese)
- [23] 周根富,解文静. 海河流域近 20 年气象干旱和水资源形势研究[J]. 自然资源情报,2022(2):28–32.
- ZHOU Genfu, XIE Wenjing. Study on meteorological drought and water resource situation in Haihe River Basin in the last 20 years[J]. Natural Resources Information, 2022(2): 28–32. (in Chinese)
- [24] 赵丽萍. 基于多源遥感数据的海河流域农业干旱变化特征[J]. 水利科技与经济,2021,27(4):77–82.
- ZHAO Liping. Change characteristics of agricultural drought in Haihe River Basin based on multi source remote sensing data [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2021,27(4): 77–82. (in Chinese)
- [25] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护,2020,36(3): 8–13.
- WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 8–13. (in Chinese)
- [26] WEI Jia, WANG Weiguang, HUANG Yin, et al. Drought variability and its connection with large-scale atmospheric circulations in Haihe River Basin[J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(1): 1–16.
- [27] 周义,索文姣. 基于 CWSI 的汾河流域干旱时空变化特征[J]. 干旱区研究,2024,41(2):191–199.
- ZHOU Yi, SUO Wenjiao. Spatialtemporal variation characteristics of drought in the Fenhe River Basin based on CWSI[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(2): 191–199. (in Chinese)
- [28] 刘少华,严登华,李传哲,等. 条件植被指数在海河流域干旱评价中的应用[J]. 水电能源科学,2015,33(11):1–4.
- LIU Shaohua, YAN Denghua, LI Chuazhe, et al. Application of vegetation condition index in drought estimation of Haihe Basin[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11): 1–4. (in Chinese)
- [29] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖. 2001—2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J]. 地理学报,2015,70(5):717–729.
- ZHAO Shuyi, GONG Zhaoning, LIU Xuying. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001—2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 717–729. (in Chinese)
- [30] 赵安周,张安兵,王冬利,等. 海河流域干旱时空变化及驱动因素分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2021,29(4): 859–872.
- ZHAO Anzhou, ZHANG Anbing, WANG Dongli, et al. Spatio-temporal variation characteristics of droughts and its driving factors in the Haihe River Basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(4): 859–872. (in Chinese)
- [31] 马梓策,孙鹏,张强,等. 基于 MODIS 数据的华北地区遥感干旱监测研究[J]. 地理科学,2022,42(1):152–162.
- MA Zice, SUN Peng, ZHANG Qiang, et al. Remote sensing drought monitoring of North China based on MODIS data[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 42(1): 152–162. (in Chinese)
- [32] HE Jun, YANG Xiaohua, LI Jianqiang, et al. Spatiotemporal variation of meteorological droughts based on the daily comprehensive drought index in the Haihe River basin, China[J]. Natural Hazards, 2015, 75: 199–217.
- [33] LING Minhua, GUO Xiaomin, SHI Xiaoliang, et al. Temporal and spatial evolution of drought in Haihe River Basin from 1960 to 2020[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108809.
- [34] 鲍振鑫,张建云,严小林,等. 基于四元驱动的海河流域河川径流变化归因定量识别[J]. 水科学进展,2021,32(2): 171–181.
- BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, YAN Xiaolin, et al. Quantitative assessment of the attribution of runoff change caused by four factors in the Haihe River Basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 171–181. (in Chinese)
- [35] QIU Ruonan, HAN Ge, MA Xin, et al. A comparison of OCO-2 SIF, MODIS GPP, and GOSIF data from gross primary production (GPP) estimation and seasonal cycles in North America[J]. Remote Sensing, 2020, 12(2): 258.
- [36] ZHANG Zhaoxu, XU Wei, SHI Zhenwei, et al. Establishment of a comprehensive drought monitoring index based on multisource remote sensing data and agricultural drought monitoring[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 2113–2126.