

黄淮海平原植被日光诱导叶绿素荧光对骤旱的响应

陈治仲^{1,2} 陈 上^{1,2} 线子仪² 周 聪² 肖 薇^{1,2}

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044;

2. 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)

摘要: 为探明黄淮海平原骤旱的时空分布及其对植被光合作用的影响, 基于 ERA5 气候再分析资料和 SMCI1.0 土壤湿度数据集, 分析了黄淮海地区 2001—2020 年气候要素时空变化特征, 识别了骤旱事件并研究其演变规律和主要气象影响因子, 对比星载日光诱导叶绿素荧光 (Solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)、标准化差异植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 以及增强植被指数 (Enhanced vegetation index, EVI) 对骤旱的响应, 探究了不同类型植被光合作用对骤旱的敏感性。结果表明: 黄淮海地区 2001—2020 年整体呈暖湿化趋势, 北部地区增温明显。黄淮海北部和东南部地区骤旱频发, 大部分地区发生超过 20 次骤旱, 累计受旱时长超过 90 候, 且骤旱多发生于秋季。黄淮海地区年骤旱次数和累计骤旱时长整体呈上升趋势, 增加速率分别为 0.6 次/(10a) 和 2.2 候/(10a), 且呈上升趋势的格点主要位于骤旱频发区。研究区骤旱次数与气温 (显著正相关)、风速 (负相关) 以及降水量 (负相关) 的相关性较高。相较于 NDVI 和 EVI, SIF 随土壤水分的变化更加同步, 适用于骤旱监测。黄淮海地区灌木植被 SIF 对骤旱最敏感, 但存在较大的不确定性, 农田、森林和草地等植被类型光合作用对骤旱的响应逐渐降低, 但不同植被 SIF 与骤旱次数的最大相关系数均较为接近。

关键词: 日光诱导叶绿素荧光; 骤旱; 时空变化; 光合作用; 黄淮海平原

中图分类号: P49; S166

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)10-0327-12

OSID:



Response of Solar-induced Chlorophyll Fluorescence to Flash Drought in Huang – Huai – Hai Plain

CHEN Zhizhong^{1,2} CHEN Shang^{1,2} XIAN Ziyi² ZHOU Cong² XIAO Wei^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC – FEMD),

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Aiming to study the temporal and spatial distribution of flash drought in the Huang – Huai – Hai Plain and its impacts on vegetation photosynthesis, the spatiotemporal variations of climate variables and flash drought events of the Huang – Huai – Hai Plain in 2001—2020 were firstly identified based on the reanalysis datasets of ERA5 and SMCI1.0. Daily soil moisture data for each layer were used to calculate the pentad-averaged (5 d) values and further converted into soil moisture percentile. A flash drought event was recognized when the soil moisture percentile declined from 40% to 20% within four pentads. In this way, temporal-spatial distributions were analyzed for the times and duration of flash drought in the Huang – Huai – Hai Plain. Meanwhile, solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF), normalized difference vegetation index (NDVI) and enhanced vegetation index (EVI) were used to represent growth statues of vegetation. Variations in SIF, NDVI, and EVI were compared along with the dynamics of soil moisture changes. The correlation coefficient between SIF and the times of flash droughts was also used to study the photosynthesis of different vegetation types responding to flash drought. The results indicated a warming and humidifying environment of the Huang – Huai – Hai Plain in 2001—

收稿日期: 2023-12-12 修回日期: 2024-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42021004)、江苏省农业气象重点实验室开放基金项目 (JKLAM2305)、江苏省自然科学基金杰出青年基金项目 (BK20220055)、江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金 (前沿基础) 项目 (BK20220020)、江苏省“333 人才”领军型团队项目 (BRA2022023) 和南京信息工程大学人才启动经费项目 (2023r101)

作者简介: 陈治仲 (1994—), 男, 硕士生, 主要从事陆地碳水循环与气候变化研究, E-mail: 20211233001@nuist.edu.cn

通信作者: 肖薇 (1982—), 女, 教授, 博士, 主要从事陆地碳水循环与气候变化研究, E-mail: wei.xiao@nuist.edu.cn

2020. Flash drought was more severe in the northwest and southeast of this region. Most areas experienced more than 20 times of flash drought events with a cumulative duration exceeding 90 pentads in 2001—2020. Meanwhile, increasing trends were found for both times and duration of flash drought for most areas in the Huang—Huai—Hai Plain, with rising rates of 0.6 times per 10 a and 2.2 pentads per 10 a, respectively. Notably, the areas with increasing trends were mainly located in the areas with frequent flash drought events. Temperature (significant positive correlation), wind speed (negative correlation), and precipitation (negative correlation) were the three most related meteorological variables with flash drought. Compared with the NDVI and the EVI, SIF varied more synchronously with soil moisture during flash drought events. Furthermore, responses of photosynthesis to flash drought were different among the four vegetation types. Shrubland photosynthesis had the highest sensitivity to flash drought, followed by farmland, forest, and grassland. However, the largest correlation coefficients were similar among the four vegetation types in the Huang—Huai—Hai Plain.

Key words: solar-induced chlorophyll fluorescence; flash drought; temporal-spatial variation; photosynthesis; Huang—Huai—Hai Plain

0 引言

极端气候事件可能导致植被生产力下降和物种多样性减少^[1]。在各种极端气候事件中,干旱因其影响范围广、破坏性强等特点引起了社会各界的广泛关注。近年来,全球广泛报道一种发生速度显著快于传统干旱的新型干旱,即“骤发干旱”(简称骤旱)^[2]。区别于常规干旱事件的形成,骤旱可在数周内迅速从非旱状态转为严重干旱,因此可对农业生产和社会经济发展产生严重影响^[3-4]。在全球气候变暖背景下,高温热浪过程中伴生的强辐射和潜在蒸散需求是诱导骤旱发生的有利条件,骤旱可成为未来全球干旱的新常态^[5]。因此,及时、准确地量化骤旱对植被光合作用的影响,对于合理规划水资源、保障粮食生产以及生态系统防灾减灾具有重要意义。

干旱胁迫可以通过改变植被光合作用和呼吸等生理功能来影响碳循环。传统的干旱监测评估主要基于气象站点数据计算的干旱指数开展^[6-7]。然而,干旱作为一种持续时间长、影响范围广的极端气候事件,站点尺度的研究成果进行空间升尺度时往往引入一系列误差^[8]。近年来,随着卫星对地观测技术的发展,基于遥感反演的区域尺度陆地植被状况被广泛用于监测和评估干旱对生态系统的影响^[9]。JI等^[10]在监测美国平原干旱过程中发现,标准化差异植被指数(Normalized difference vegetation index,NDVI)会随着植被对干旱事件的响应而出现波动,证明NDVI可用于干旱事件监测。ZHOU等^[11]发现引入蓝光波段从而构建的增强植被指数(Enhanced vegetation index,EVI)能够降低大气气溶胶和土壤背景对监测信号的影响,植被长势的监测敏感性也得到同步提升。然而,上述遥感植被指数主要用于描述植被“绿度”等结构功能特

征^[12],难以直接用于量化干旱对植被光合作用的影响。此外,植被结构往往在受到一段时间的干旱胁迫后才会发生明显改变,因此传统植被指数对干旱的响应具有明显的滞时效应^[13]。对于骤旱这种快速发生的干旱,传统遥感植被指数的监测评估能力有待进一步研究。

植被冠层截获的光能主要以光合作用、热耗散以及荧光的形式消耗。日光诱导叶绿素荧光(Solar-induced chlorophyll fluorescence,SIF)是植被叶绿素在自然光照射条件下吸收短波辐射后以长波形式释放出的未被用于植被光合作用的部分能量。这部分能量包括植被生理、代谢特性等信息,比传统植被指数更加直观准确地评估实际光合作用的状态^[14-15]。近年来,随着多个碳卫星项目的实施,为监测区域尺度植被生长和评估环境胁迫对植被光合作用的影响提供了一种新的途径^[16-17]。有研究表明,SIF较传统遥感植被指数能更加及时地监测植被对干旱的响应^[18]。然而,基于SIF研究骤旱条件下不同植被光合作用对干旱的响应还需进一步探索。

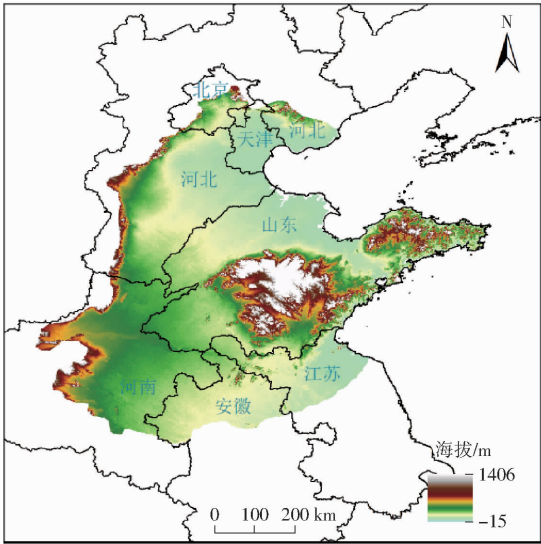
鉴于此,本文利用国家青藏高原科学数据中心土壤水分产品识别黄淮海平原2001—2020年的骤旱事件,并利用表征植被光合作用的指标(SIF)分析研究区不同类型植被光合作用对骤旱的响应特征,分析黄淮海区域骤旱事件的时空特征及主要气象驱动因子,研究SIF、NDVI以及EVI对骤旱的响应,分析不同类型植被光合作用对骤旱的敏感性。探寻黄淮海地区骤旱的发生规律以及明确SIF对骤旱的监测能力,为研究区干旱防灾减灾提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄淮海平原主要由黄河、淮河与海河及其支流冲击而形成,行政范围包括北京市、天津市的部分区

域,山东省全部区域,河南省、河北省、安徽省以及江苏省部分区域(图 1)。黄淮海平原海拔为 $-15 \sim 1\,406\text{ m}$,年均气温为 $8 \sim 15^{\circ}\text{C}$,最冷月平均气温为 $-7 \sim 2^{\circ}\text{C}$,年降水量为 $500 \sim 1\,000\text{ mm}$,生态多样性。



黄淮海平原土地利用类型以农田为主,鲁中南的泰山、沂蒙山以及胶东半岛昆嵛山等山地丘陵区覆盖大量森林,整体上地势平坦,是我国粮食主要产区之一。

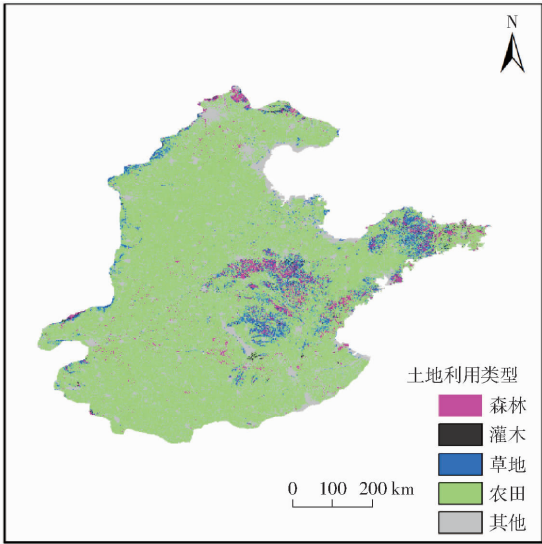


图 1 研究区海拔及土地利用类型

Fig.1 Altitude and land use types of study area

1.2 数据来源

1.2.1 土壤含水率数据

土壤湿度数据集 SMCI1.0 (Soil moisture of China by in situ data, version 1.0) 来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>), 包含全国 2000—2020 年逐日 1 m 深土层(以 10 cm 为间隔)高时空分辨率($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$)或($1\text{ km} \times 1\text{ km}$)土壤含水率。该数据集以中国气象局提供的 1 648 个土壤墒情站观测的 10 层土壤含水率作为基准,使用 ERA5_Land 气象强迫数据、叶面积指数、土地覆盖类型、地形和土壤特性作为协变量,通过机器学习训练相关预测模型进而获得。本文选取 2001—2020 年空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 土壤湿度数据集进行研究。

1.2.2 植被分类数据

植被分类数据来源于中国多时期土地利用遥感监测数据集 CNLUCC (<https://www.resdc.cn/DOI>)。该数据集是以美国陆地卫星 Landsat 遥感影像作为主要信息源,通过人工目视解译构建的中国国家尺度 1980—2020 年多时期土地利用专题数据库。土地利用类型主要分为 6 个一级分类、25 个二级分类,包括林地、草地、农田、水域、建筑以及未利用土地等类型。为兼顾前后研究时段,选取 2010 年土地分类结果代表黄淮海地区 2001—2020 年的土地利用情况。结合本文研究时段,最终选取森林、灌木、草地、农田和其他用地等共计 5 种土地利用类型(表 1)。整体来看,黄淮海平原土地利用以农田为

主,草地、森林以及灌木面积占比均未超过 5%。为匹配 SMCI1.0 数据集,将黄淮海地区植被分类产品重取样至空间分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。

表 1 黄淮海平原 2010 年不同类型土地利用面积占比
Tab.1 Proportion of different land types in Huang-Huai-Hai Plain in 2010

植被类型	像元数量	占比/%
森林	11 139	2.84
灌木	2 588	0.67
草地	16 746	4.27
农田	279 335	71.30
其他用地	81 936	20.92

1.2.3 遥感数据

当前用于反演 SIF 的卫星主要包括 GOME-2、TanSat、OCO-2、OCO-3 以及 TROPOMI 等。然而,以上卫星产品难于兼顾观测结果的高时、空分辨率。因此,本研究选用 LI 等^[19]开发的全球更高空间(0.05°)和时间分辨率(8 d)的 SIF 数据集 GOSIF (<http://globalecology.unh.edu>)。该数据集基于美国航天局(NASA)2014 年发射的碳轨道观测卫星(Orbiting carbon observatory-2,OCO-2)反演的离散 SIF 数据,通过机器学习方法集成 MODIS 数据以及 MERRA-2 气象数据而生成。当前,该数据集已提供全球 2000—2022 年 8 d 尺度、月尺度以及年尺度的 SIF 产品,被广泛用于生态系统初级生产力估算和干旱评估等研究^[17,20]。为匹配 SMCI1.0 数据集,将 GOSIF 数据集重取样至空间分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。

NDVI 与 EVI 数据均来源于 NASA 的 MOD13A3 数据集 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。该数据集包含 2000 年至今的半月尺度 NDVI 和 EVI 反演结果,空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。本研究选取 2001—2020 年半月尺度数据,并将其重采样至 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间栅格数据集。

1.2.4 气候数据

气候数据来源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 全球气候第五代大气再分析数据集 ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>)。该数据集提供 1940 年 1 月 1 日至今的逐日空气温度、露点温度、总降水量、表面气压、太阳辐射等气象变量数据。本研究选取 2001—2020 年降水量 (P)、相对湿度 (RH)、最低气温 ($T_{\min}$)、最高气温 ($T_{\max}$)、风速 (U_2)、太阳辐射 (R_s) 共 6 个气候变量,并进一步将其插值为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间栅格数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 骤旱事件识别

从土壤含水率的变化速率和持续时间定义骤旱事件。考虑到土壤含水率在不同地区和不同深度上都具有明显的季节性和地域性差异,为了提高时空分析的可比性,将土壤含水率转换为土壤水分百分位数^[21]。研究表明,土壤含水率低于 40% 分位数时开始出现由正常转干的现象,当土壤含水率进一步降至 20% 分位数时会对植物正常生长产生影响^[22]。WANG 等^[23]建立了基于土壤含水率变化速率的骤旱事件判别方法,即土壤含水率在 4 候 (1 候为 5 d) 内由 40% 分位数降至 20% 分位数时骤旱开始,并认为土壤含水率再次恢复至 20% 分位数时则此次骤旱事件结束。本研究基于上述定义,对黄淮海地区 2001—2020 年骤旱事件进行识别,并统计骤旱次数和累计历时,主要步骤包括:①将逐日土壤含水率数据加权平均至地下深 1 m 土柱的土壤含水率,并进一步计算至候平均值。②以候为单位,将全年拆分为 73 个时间序列,并根据春 (3—5 月)、夏 (6—8 月)、秋 (9—11 月) 以及冬 (12 月—次年 2 月) 对 73 个时间序列进行季节划分。根据 YUAN 等^[24]的研究结果,选择标准正态分布作为各候土壤含水率的概率分布函数,进而计算土壤水分分位数。③将计算得到的逐年 73 候土壤水分百分位数按时序重新排列为长时序序列,并进行骤旱识别。当土壤含水率在 4 候内从 40% 分位数降至 20% 分位数以下,则认为骤旱开始;当土壤含水率恢复至 20% 分位数以上并持续 2 候则认为旱情解除。

1.3.2 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^[25-26]。逐像元计算黄淮海地区 2001—2020 年骤旱次数及历时的变化特征,进而分析研究区骤旱的时空演变。Mann-Kendall 趋势检验中的标准化统计量 Z 值大于 0 时为上升趋势,小于 0 时为下降趋势,其绝对值越大表明变化趋势越显著。当 $|Z|$ 值大于 1.96 和 2.58 时,则可认为时间序列的趋势性通过了置信度为 95% 和 99% 的显著性检验。基于斜率 β 和 Z 的干旱变化趋势及显著性划分见表 2。

表 2 骤旱趋势划分
Tab.2 Classification of flash drought trends

项目	$ Z \leq 1.96$	$1.96 < Z \leq 2.58$	$ Z > 2.58$
$\beta > 0.001$	轻微加重	显著加重	极显著加重
$-0.001 < \beta \leq 0.001$	基本稳定	基本稳定	基本稳定
$\beta \leq -0.001$	轻微缓解	显著缓解	极显著缓解

1.3.3 统计分析

相关系数是度量变量之间相关性程度的重要工具,其中皮尔逊相关系数被广泛应用评估干旱对植被生长的影响^[17]。本研究拟在研究区逐格点计算植被 SIF 与骤旱次数的相关系数,进而分析黄淮海地区植被光合作用对骤旱的响应程度。由于植被长势在生长季内通常呈现周期性变化,为剔除植被物候变化对结果的影响,在春 (3—5 月)、夏 (6—8 月)、秋 (9—11 月)、冬 (12 月—次年 2 月) 4 个季节分别计算 SIF 与骤旱次数的相关系数,并筛选 4 个相关系数中的最大值 ($r_{\max}$) 表征该格点 SIF 对骤旱的响应潜力。

为比较不同类型植被光合作用受骤旱的影响程度,根据研究区土地利用类型 (图 1) 对计算的相关系数进行提取并分析。为对比不同遥感植被指数在骤旱监测中的表现,随机挑选黄淮海地区一次骤旱事件,分析骤旱过程中 SIF、NDVI 以及 EVI 距平与土壤水分百分位数变化动态。此外,选取河南省清丰县 (35.88°N , 115.09°E) 2017 年 7 月的骤旱事件,进一步分析骤旱前后时段 SIF、EVI 和 NDVI 与土壤水分变化动态的同步情况。

2 结果与分析

2.1 黄淮海地区气候要素时空变化

黄淮海平原 2001—2020 年总体呈现 P 、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 U_2 增加,而 RH 和 R_s 下降的变化趋势 (图 2)。其中,呈增加趋势的 4 个变量在 2007—2016 年均呈先降低后上升的趋势。多年平均 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别在 $18.3 \sim 20.3^\circ\text{C}$ 和 $7.0 \sim 11.9^\circ\text{C}$ 之间波动,总体呈上

升趋势且 $T_{\max}$ 升幅大于 $T_{\min}$ 。 P 年际波动较大但整体呈上升趋势, 增加速率为 $1.25\text{ mm}/(10\text{a})$ 。 RH 整体呈下降趋势, 下降速率为 $1.1\text{ \%}/(10\text{a})$ 。 U_2 在 $2.0\sim 2.7\text{ m/s}$ 之间波动, 整体呈小幅上升趋势。 R_s 波动范围为 $14.8\sim 15.8\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 研究时段内黄淮海太阳辐射整体呈下降趋势。

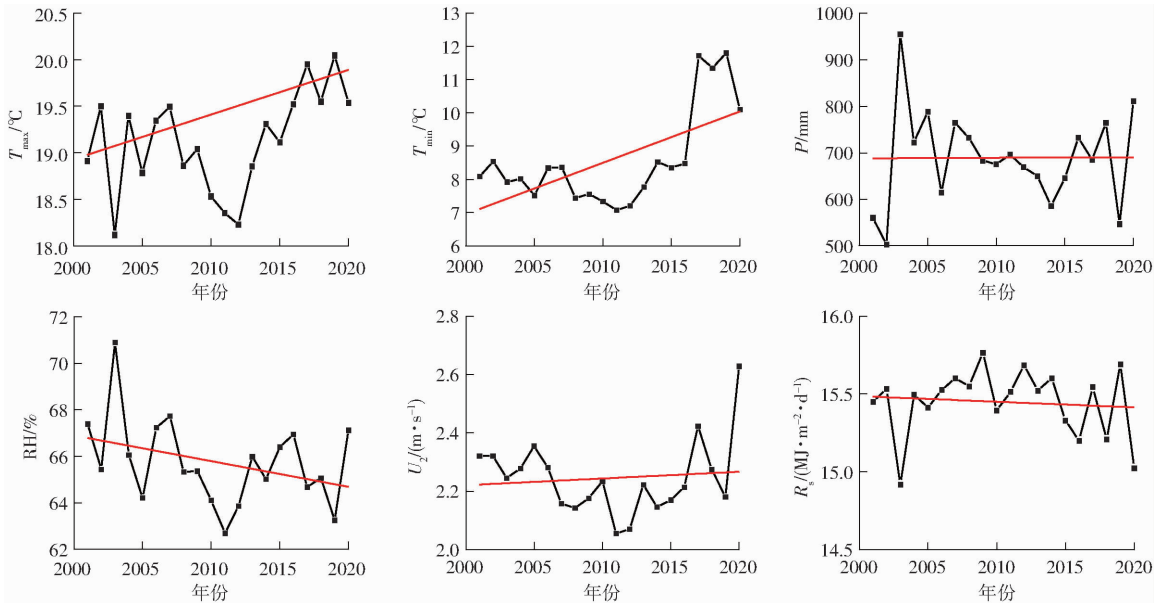


图 2 黄淮海平原 2001—2020 年气候要素时间变化特征

Fig. 2 Temporal variations of climatic elements in Huang-Huai-Hai Plain from 2001 to 2020

从空间上来看(图 3)黄淮海地区增温明显, 且 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 同步增加, 增温速率自东南向西北呈上升趋势。胶东半岛地区增温速率最低, $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 增加速率分别为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 和 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$; 京津地区增温速率最高, $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 增加速率高达 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 。对于 P , 鲁东胶东半岛、鲁西南以及豫东北地区呈下降趋势, 部分格点下降速率高达 $148\text{ mm}/(10\text{a})$, 其余大部分地区呈上升趋势。黄淮海大部分地区 RH 呈下降趋势, 仅黄淮海南部的苏北、皖东北地区相对湿度有所增加 ($2.3\text{ \%}/(10\text{a})$)。

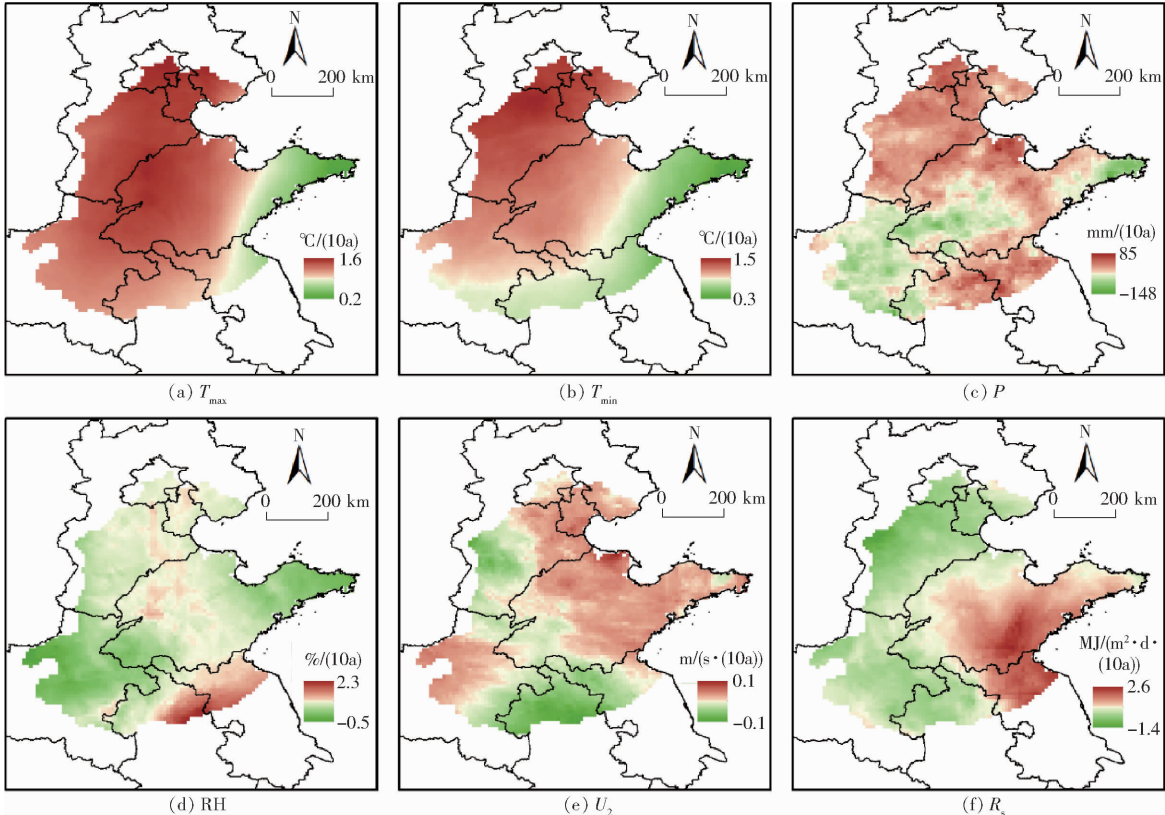


图 3 黄淮海平原 2001—2020 年气候要素空间变化

Fig. 3 Spatial variations of climatic variables in Huang-Huai-Hai Plain from 2001 to 2020

黄淮海沿海和豫东地区 U_2 呈增加趋势,其余地区 U_2 呈下降趋势。对于 R_s ,黄淮海东南部地区有上升趋势,其余地区呈下降趋势。

2.2 黄淮海地区骤旱时空变化特征

黄淮海地区 2001—2020 年骤旱事件的发生呈现明显的空间差异(图 4)。从发生次数来看,研究区骤旱多发生于东南部和西北部,而鲁东、豫东以及皖北地区骤旱相对较少(图 4a)。其中,苏北、豫北

以及冀南的骤旱大面积连发,整体上骤旱发生次数多于 20 次,部分格点骤旱发生次数大于 40 次。此外,结合研究区土地利用类型(图 1)可发现黄淮海平原农田区域是骤旱的频发区,森林和草地区域骤旱发生频率相对较低。骤旱总历时的空间分布与次数较为相似(图 4b)。黄淮海地区东南部和西北部的累计骤旱历时较长,大部分格点累计骤旱超过 60 候,部分格点骤旱超过 120 候,而鲁东和豫东的累计

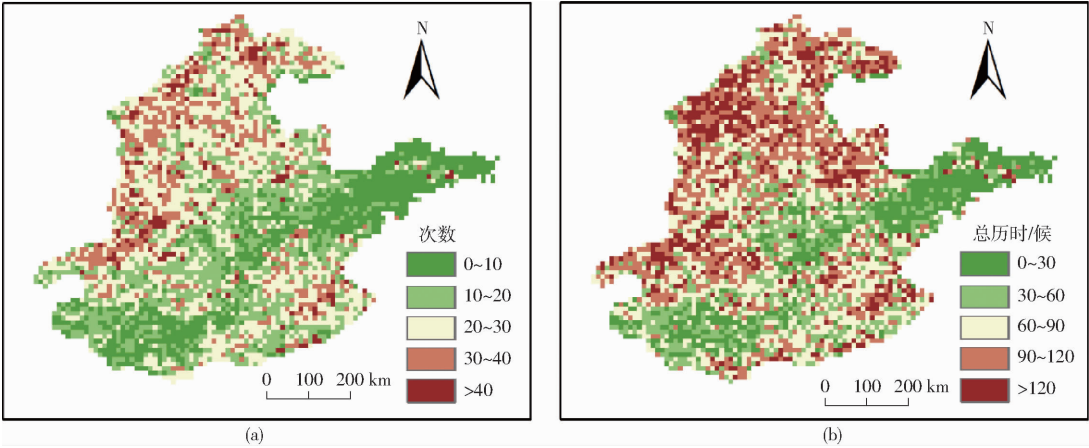


图 4 黄淮海平原 2001—2020 年骤旱事件发生次数及总历时

Fig. 4 Times and total duration of flash drought events in Huang - Huai - Hai Plain in 2001—2020

骤旱历时相对较短。

黄淮海地区骤旱的发生次数及空间分布在不同季节亦存在差异(图 5)。黄淮海地区春季的骤旱次数最少,大部分格点骤旱的发生次数为 1~2 次,少部分地区发生 3 次以上,骤旱最多发生次数为 9 次(图 5a)。夏季,苏北、豫北以及冀南地区骤旱事件

的发生次数及范围均有所增加,骤旱最多发生次数为 11 次(图 5b)。秋季,骤旱次数及影响范围进一步增大,黄淮海北部、西部以及东南部地区发生大面积骤旱事件(图 5c)。冬季,黄淮海地区骤旱的发生情况有所减弱。其中,黄淮海东南部地区骤旱逐渐北移,旱情有所缓解(图 5d)。

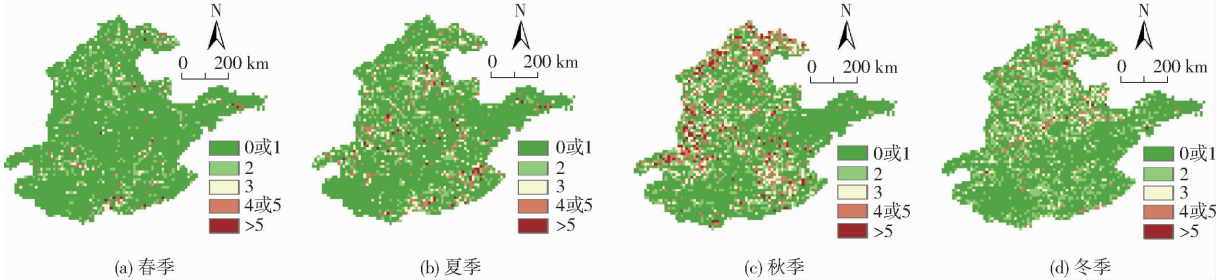


图 5 黄淮海平原 2001—2020 年春季、夏季、秋季及冬季骤旱次数

Fig. 5 Number of flash droughts in spring, summer, autumn and winter in Huang - Huai - hai Plain from 2001 to 2020

黄淮海地区骤旱次数及总历时在 2001—2020 年呈上升趋势,但存在明显的空间差异(图 6)。在研究时段内,骤旱次数平均变化速率为 0.60 次/(10a)(图 6a)。其中,呈增加趋势的格点占研究区总面积的 26.02%,主要分布于黄淮海北部和西部。此外,仅有零星格点骤旱次数呈下降趋势,而黄淮海东部以及南部骤旱次数无明显变化趋势。骤旱历时变化速率达 2.2 候/(10a)(图 6b)。与骤旱次数变化的空间分布相似,骤旱历时呈增加趋势的区域亦集中

于黄淮海西部和北部地区。然而,骤旱历时呈增加趋势的面积占比更大,达到 45.18%。

图 7(图中 * 表示 $P < 0.05$)为黄淮海平原 2001—2020 年逐年骤旱次数(TFD)与各气象因子之间的相关性。骤旱次数与 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 呈显著正相关,相关系数分别为 0.47 和 0.64。然而,骤旱次数与 P 、 RH 、 U_2 、 R_s 为负相关关系,但均未通过显著性检验。其中, P 和 U_2 与骤旱次数之间的相关系数相对较高,分别为 -0.32 和 -0.36。整体而言,气温、

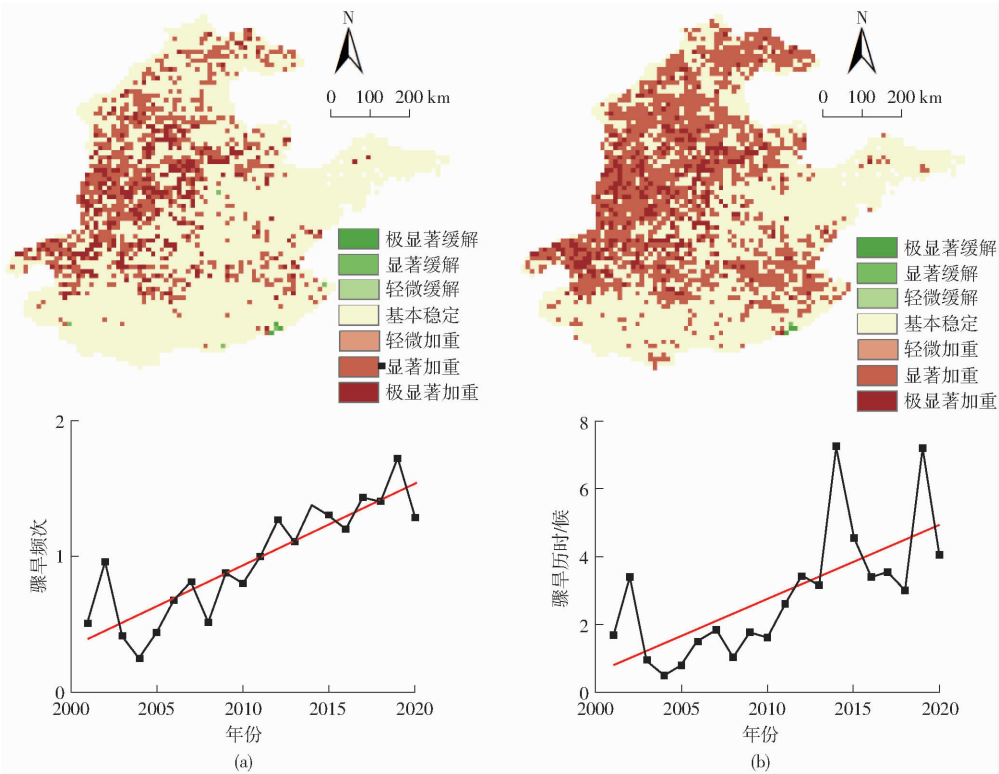


图 6 黄淮海平原 2001—2020 年骤旱次数及历时趋势特征

Fig. 6 Trends of times and duration of flash drought events in Huang - Huai - Hai Plain in 2001—2020



图 7 黄淮海平原 2001—2020 年骤旱次数与气象因子的相关系数

Fig. 7 Correlation of flash drought times with meteorological factors in Huang - Huai - Hai Plain in 2001—2020

风速和降水量是影响黄淮海地区骤旱发生的主要气象因子。

2.3 不同植被对骤旱的响应

图 8 为黄淮海平原 2017 年 7—9 月土壤水分百分位数 (SW)、SIF、NDVI 以及 EVI 距平的变化动态。在研究时段内,黄淮海地区西部呈现了一次完整的土壤水分迅速下降随后恢复的变化过程,而南部地区的旱情逐渐解除。7 月 29 日,黄淮海东部胶东半岛、东南部、西部以及北部出现了较为严重的旱情,土壤水分百分位数低于 20%。在同时期的

上述区域,SIF 呈现明显的负距平;NDVI 以正距平为主,负距平最大的位置与土壤含水率低值区域存在偏差;EVI 呈负距平的区域面积较 NDVI 更大,但同样负距平最大的位置偏离土壤水分亏缺区域。8 月 13 日,黄淮海西部旱情加重,但东南部旱情有所减轻。对比该时段的 SIF、NDVI 以及 EVI 可发现,黄淮海西部 SIF 呈负距平的面积进一步增加,而东南部负距平格点向正距平格点过渡。然而,黄淮海东部以及西南部 NDVI 呈负距平的格点逐渐增加。EVI 呈负距平格点的数量进一步增加,其分布与前一时段土壤水分的分布较为相似。8 月 28 日,黄淮海中部旱情加剧而南部的旱情进一步缓解。此时,黄淮海中部的 SIF、NDVI 以及 EVI 负距平均有所增大。随着南部旱情的缓解,SIF 由负距平转为正距平的格点进一步增加,NDVI 和 EVI 在东南部出现正距平,但在西南部距平仍为负值。黄淮海旱情于 9 月 12 日逐渐消退,仅北部地区存在零星旱情。此时,SIF 在整个研究区内呈正距平,而南部距平高于北部地区;NDVI 正负距平极值均出现在该时段;EVI 距平的空间分布与 NDVI 相似,均能较好匹配前一时段土壤水分的空间格局,表明 EVI 可对土壤水分有较好的响应,但存在明显滞后性。

进一步选取河南省清丰县 2017 年 7 月的一次骤旱,对比分析 SIF、NDVI 以及 EVI 在骤旱前后的

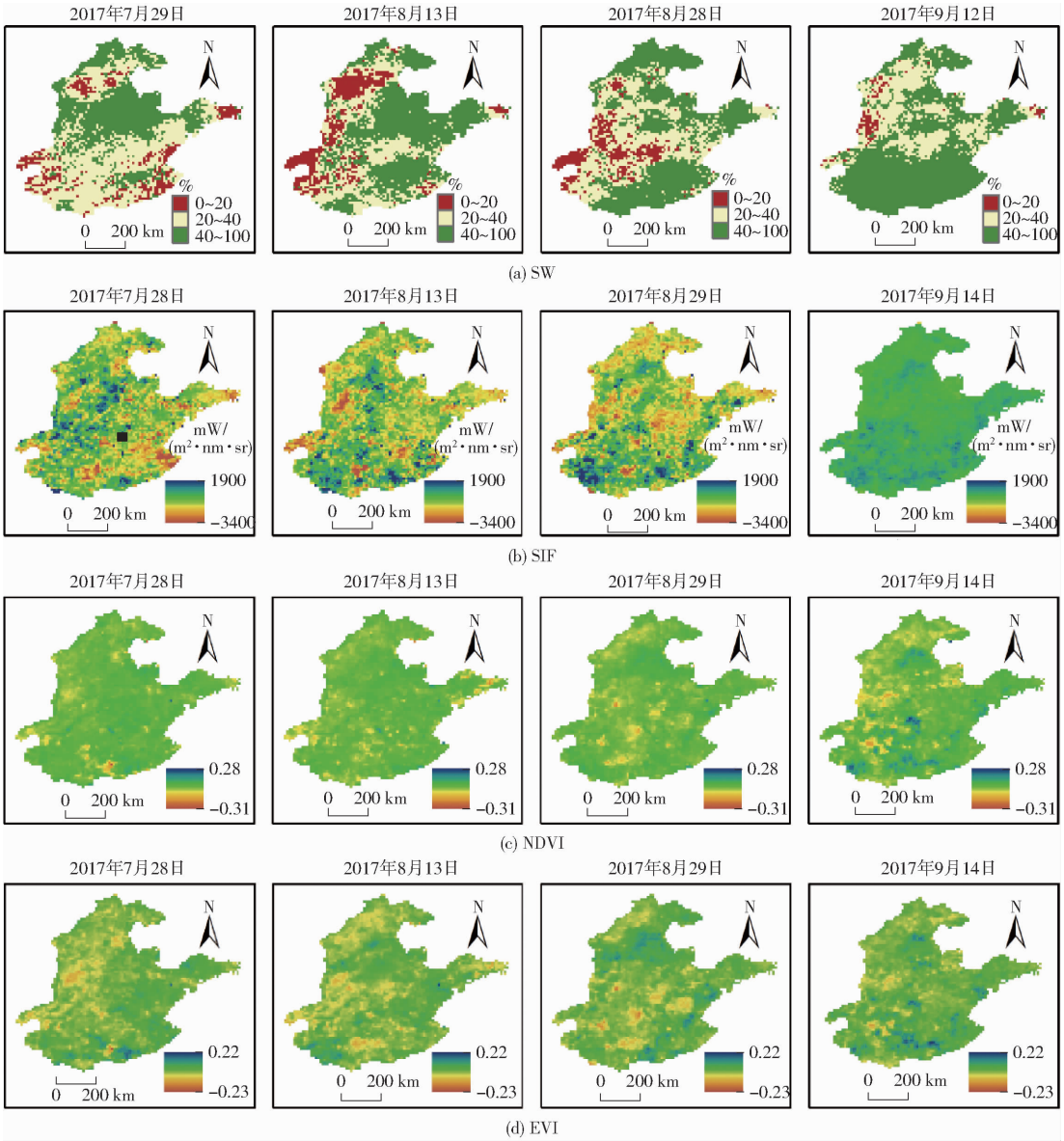


图 8 黄淮海平原 2017 年 7—9 月土壤水分百分位数及 SIF、NDVI、EVI 距平动态变化
Fig. 8 Dynamics of soil moisture and anomaly of different remote-sensing vegetation index for flash drought occurred in Huang-Huai-Hai Plain from July to September in 2017

变化动态(图 9)。整体来看,土壤水分百分位数自第 202 天在 2 候内从高于 40% 分位数降至 20% 分位数下,并在第 237 天连续 2 候高于 20% 分位数,经历了一次完整的骤旱事件。在土壤水分百分位数下降初期,NDVI、EVI 距平为正且基本保持稳定,而 SIF 距平随土壤水分的下降持续降低。土壤水分自第 217 天开始持续上升,而在该时段 NDVI、EVI 距平由正转负且持续下降,表明这 2 个植被指数对干旱的响应存在滞后性。其中,EVI 下降幅度超过 NDVI,表明 EVI 较 NDVI 对干旱更加敏感。与之相比,SIF 距平迅速由负转正,与土壤水分的变化较为同步。

黄淮海地区不同植被类型 SIF 与骤旱次数之间最大相关系数存在差异(图 10,相关系数取绝对

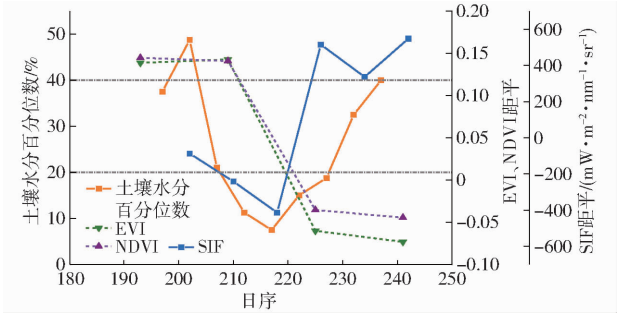


图 9 清丰县 2017 年 7 月骤旱前后 SIF、NDVI、EVI 距平动态变化曲线
Fig. 9 Dynamics of anomaly of different remote-sensing vegetation index for flash drought occurred in Qingfeng Country in July in 2017

值)。其中,灌木 SIF 与骤旱次数的相关系数较高,最大值为 0.43;农田和森林的 SIF 与骤旱次数的相

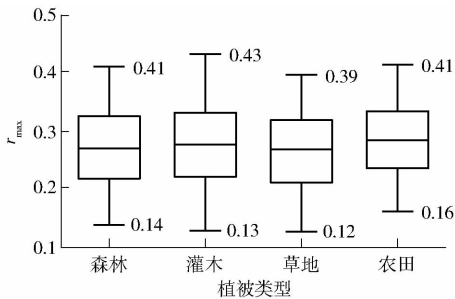


图 10 黄淮海平原不同类型植被 SIF 与骤旱次数的最大相关系数

Fig. 10 Maximum correlation coefficient between SIF and times of flash drought event of different vegetation types in Huang – Huai – Hai Plain

关性次之,最大相关系数均为 0.41。然而,农田 SIF 与骤旱次数最大相关系数的极小值略高于森林。草地 SIF 与骤旱次数的相关性最弱,最大相关系数为 0.12~0.39。上述结果表明,黄淮海地区灌木植被光合作用对骤旱最敏感,农田和森林次之,草地光合作用对骤旱最不敏感。

3 讨论

在全球气候变暖背景下,近年来我国北方地区干旱频发,对陆地植被生态系统产生了不可忽视的影响^[27]。其中,黄淮海地区是受气候变化影响较为明显的地区之一。有研究表明,黄淮海地区热量资源增加^[28],而降水发生了明显的年际变化,部分地区出现了阶段性异常降水,导致植被生长季内干旱有增加趋势^[29]。当高温热浪与降水短缺叠加时,可导致一种爆发速度快、发生强度高的干旱形式——骤旱。本研究根据 YUAN 等^[24]的骤旱定义及土壤水分再分析数据,对黄淮海平原 2001—2020 年逐年及不同季节骤旱进行了识别。研究结果表明,黄淮海地区骤旱事件发生次数及累计旱情持续时间呈上升趋势,这一结论与前人的研究结果一致^[30]。在未来气候持续增暖的背景下,骤旱的发生可能愈加频繁^[5]。通过分季节统计发现,黄淮海地区秋季骤旱发生次数明显多于其余季节。黄淮海平原是我国最大的夏玉米种植区^[31],秋季骤旱对当地玉米生产的影响还需进一步研究。然而,本研究通过传统季节划分方法识别骤旱,可能导致部分跨越季节划分节点的骤旱事件未被识别。

近年来,随着卫星对地观测技术的提升,星载 SIF 数据已被众多研究证明具有可靠的干旱监测评估能力^[17]。SIF 作为植被光合作用过程中能量耗散的途径之一,包含植被光合作用强度以及环境胁迫因子双重信息^[32–33]。由于当前 SIF 观测资料的时空分辨率普遍较低,基于原始观测和多源数据融合

的 SIF 重构资料被广泛用于植被长势监测与受旱评估。本研究使用的 GOSIF 产品具有相对较高的时(8 d)、空(0.05°×0.05°)分辨率,已被广泛用于干旱监测。WANG 等^[34]基于 GOSIF 等数据分析了美国 2012 年中部大平原大旱,发现 SIF 对短期干旱反应更敏感。SUN 等^[35]利用 GOSIF 评估了美国德克萨斯州 2011 年干旱,指出 SIF 与植被根区土壤水分显著相关。本研究对比了 SIF、NDVI 以及 EVI 在骤旱期间的变化动态,发现 SIF 对骤旱事件的响应比 NDVI 与 EVI 更迅速,而 NDVI 与 EVI 在骤旱事件结束后仍保持一段时间的较低水平,这一结论与 YOSHIDA 等^[36]的研究一致。LIU 等^[13]发现,当小麦在短期内受到干旱事件胁迫时,NDVI 仍保持较高水平,这可能是由于传统植被指数主要基于植被光学结构构建,而干旱胁迫持续一定时间和达到一定程度后才会对植被冠层结构产生影响^[37]。因此,SIF 数据相较于传统植被指数对骤旱的监测更具有优势。

此外,不同类型植被光合作用对骤旱的响应存在差异,灌木 SIF 与骤旱次数的最大相关系数较农田、草地和森林具有最高的上限和最低的下限,表明黄淮海地区灌木的光合作用对骤旱最敏感,但同时具有较强的空间变异性。然而,黄淮海地区灌木的分布面积较小(0.67%,表 1),故该结论还需进一步验证。农田植被 SIF 与骤旱的最大相关系数仅次于灌木,表明作物对骤旱较为敏感。研究区农业生产以冬小麦-夏玉米轮作为主,两类作物的根系相对较浅,且木质部的储水能力较弱^[38],主要以土壤表层水维持生存,因此容易受干旱的影响^[18]。森林根系通常较为发达,能在干旱时段利用深层土壤水分,从而缓解旱情对光合作用的影响^[39]。然而,黄淮海地区森林主要分布于鲁中以及鲁东的山地丘陵地区(图 1),该地区土壤瘠薄,厚度较浅且以砂土为主,持水能力较弱^[40]。因此,研究区森林光合作用易于受到骤旱的影响。整体而言,灌木、农田、森林以及草地 SIF 与骤旱次数的最大相关系数均较为接近(0.39~0.43)。孔冬冬等^[41]研究表明,在多年平均积温高于 3 000℃地区,不同植被类型对干旱敏感性差异较小,且差异性随积温的增加进一步下降。因此,黄淮海地区不同植被对骤旱响应的敏感性较为相似。

目前,研究骤旱事件主要通过站点监测、数值模拟与再分析数据以及遥感监测数据等进行研究^[3]。其中,再分析数据利用全球资料同化系统和多源观测数据生成,具有时间序列长、空间分辨率高等优势,因此在骤旱研究中得到广泛应

用^[8,42]。本研究仅选择了 SMCII.0 土壤湿度产品来识别黄淮海地区的骤旱事件,单一数据源可能会引入一定程度的不确定性,在下一步的研究中考虑构建多源土壤水分融合产品对骤旱事件进行识别分析。此外,当前骤旱的识别主要基于 5 d 土壤含水率变化速率,而本研究使用的遥感植被指数的时间分辨率较低(SIF 为 8 d,NDVI 和 EVI 为 15 d),存在一定时间不匹配。随着高时空分辨率的荧光观测卫星(如 TROPOMI 等)发射计划的陆续开展以及累计观测时间的增长,SIF 将有助于提升干旱影响植被光合作用的机理认识以及干旱防灾减灾措施的实施。

4 结 论

(1)黄淮海平原 2001—2020 年整体呈暖湿化趋势。最高气温和最低气温同步呈上升趋势,增加速率均大于 0.4℃/(10a)。其中,黄淮海北部地区气温增加速率最大约为 1.5℃/(10a);胶东半岛增温速率最小,约为 0.2℃/(10a)。此外,降水量呈小

幅上升趋势,增加速率约为 1.25 mm/(10a)。然而,胶东半岛东部以及黄淮海西部的豫东地区降水量呈下降趋势。

(2)黄淮海平原骤旱次数和历时在研究时段内均呈上升趋势,增加速率分别为 0.6 次/(10a)和 2.2 候/(10a)。骤旱次数和历时呈显著增长趋势的格点主要分布在黄淮海的北部及西部,面积占比分别为 26.02% 和 45.18%。此外,黄淮海地区骤旱多发于秋季,而春季骤旱事件相对较少。温度、风速以及降水量是影响骤旱次数的主要气象因子,其中温度与骤旱次数呈显著正相关,风速以及降水量与骤旱次数呈负相关。

(3)EVI、NDVI 距平的变化相较于土壤水分百分位数的变化存在明显的滞后性,而 SIF 能够及时地对土壤水分的变化进行响应,适用于监测骤旱这类土壤水分迅速下降的短急干旱事件。此外,黄淮海地区灌木、农田、森林、草地 SIF 对骤旱次数响应的敏感性逐渐降低,但无明显差异,最大相关系数分别为 0.43、0.41、0.41、0.39。

参 考 文 献

[1] REICHSTEIN M, BAHN M, CIAIS P, et al. Climate extremes and the carbon cycle[J]. *Nature*, 2013, 500(7462): 287–295.

[2] 袁星,王钰森,张苗,等. 关于骤旱研究的一些思考[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 1086–1095.

YUAN Xing, WANG Yumiao, ZHANG Miao, et al. A few thoughts on the study of flash drought[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(6): 1086–1095. (in Chinese)

[3] OTKIN J A, ANDERSON M C, HAIN C, et al. Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 218–219: 230–242.

[4] YUAN X, MA Z, PAN M, et al. Microwave remote sensing of short-term droughts during crop growing seasons[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(11): 4394–4401.

[5] YUAN X, WANG Y, JI P, et al. A global transition to flash droughts under climate change[J]. *Science*, 2023, 380(6641): 187–191.

[6] 吴霞,王培娟,公衍铎,等. 1961—2015 年黄淮海平原夏玉米干旱识别及时空特征分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 189–199.

WU Xia, WANG Peijuan, GONG Yanduo, et al. Analysis of drought identification and spatio-temporal characteristics for summer corn in Huang-Huai-Hai Plain in year of 1961—2015[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(18): 189–199. (in Chinese)

[7] 檀艳静,胡程达,史桂芬. 黄淮海区域参考作物蒸散量的时空变化特征及影响因素[J]. *干旱气象*, 2020, 38(5): 794–803.

TAN Yanjing, HU Chengda, SHI Guifen. Spatio-temporal variation characteristics of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in Huang-Huai-Hai Region[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, 38(5): 794–803. (in Chinese)

[8] 陈昌春,张余庆,王峻晔,等. 骤发干旱研究进展与展望[J]. *南水北调与水利科技*, 2020, 18(1): 26–33.

CHEN Changchun, ZHANG Yuqing, WANG Junye, et al. Flash drought: progress and prospect[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(1): 26–33. (in Chinese)

[9] 赵龙才,李粉玲,常庆瑞. 农作物遥感识别与单产估算研究综述[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(2): 1–19.

ZHAO Longcai, LI Fenling, CHANG Qingrui. Review on crop type identification and yield forecasting using remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(2): 1–19. (in Chinese)

[10] JI L, PETERS A J. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(1): 85–98.

[11] ZHOU L, TIAN Y, MYNENI R B, et al. Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade[J]. *Nature*, 2014, 509(7498): 86–90.

[12] FLACK-PRAIN S, MEIR P, MALHI Y, et al. The importance of physiological, structural and trait responses to drought stress in driving spatial and temporal variation in GPP across Amazon forests[J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(22): 4463–4484.

[13] LIU L, YANG X, ZHOU H, et al. Evaluating the utility of solar-induced chlorophyll fluorescence for drought monitoring by

- comparison with NDVI derived from wheat canopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1208 – 1217.
- [14] 刘雷震, 武建军, 周洪奎, 等. 叶绿素荧光及其在水分胁迫监测中的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(9): 2780 – 2787.
- LIU Leizhen, WU Jianjun, ZHOU Hongkui, et al. Chlorophyll fluorescence and its progress in detecting water stress[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(9): 2780 – 2787. (in Chinese)
- [15] 张永江, 赵春江, 刘良云, 等. 被动荧光探测水分胁迫对玉米叶片影响的初步研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 39 – 43.
- ZHANG Yongjiang, ZHAO Chunjiang, LIU Liangyun, et al. Preliminary study on the effects of water stress on maize leaf physiological status through passive chlorophyll fluorescence detection[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(9): 39 – 43. (in Chinese)
- [16] GUANTER L, ALONSO L, GÓMEZ-CHOVA L, et al. Estimation of solar-induced vegetation fluorescence from space measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(8): 1 – 5.
- [17] 曹银轩, 黄卓, 徐喜娟, 等. 黄土高原植被日光诱导叶绿素荧光对气象干旱的响应[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 457 – 466.
- CAO Yinxuan, HUANG Zhuo, XU Xijuan, et al. Responses of solar-induced chlorophyll fluorescence to meteorological drought across the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(2): 457 – 466. (in Chinese)
- [18] 齐晓雯, 苗晨, 王鹤松. 基于日光诱导叶绿素荧光探测植被光合对气象干旱的响应[J]. *中国农业气象*, 2023, 44(2): 133 – 143.
- QI Xiaowen, MIAO Chen, WANG Hesong. Detecting response of vegetation photosynthesis to meteorological drought based on solar-induced chlorophyll fluorescence[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(2): 133 – 143. (in Chinese)
- [19] LI X, XIAO J. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO – 2, modis, and reanalysis data[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 517.
- [20] PENG Q, JIA B, LAI X, et al. Increasing gross primary productivity under soil warming and wetting on the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(2): 024021.
- [21] 朱烨, 刘懿, 王文, 等. 基于土壤含水率的骤发干旱和缓慢干旱时空特征分析[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(2): 114 – 122.
- ZHU Ye, LIU Yi, WANG Wen, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of flash drought and slowly-evolving drought using soil moisture percentile[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(2): 114 – 122. (in Chinese)
- [22] MO K C, LETTENMAIER D P. Precipitation deficit flash droughts over the United States[J]. *Hydrometeorology*, 2016, 17(4): 1169 – 1184.
- [23] WANG L, YUAN X, XIE Z, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1 – 7.
- [24] YUAN X, WANG L, WU P, et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1 – 8.
- [25] 侯青青, 裴婷婷, 陈英, 等. 1986—2019 年黄土高原干旱变化特征及趋势[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 649 – 660.
- HOU Qingqing, PEI Tingting, CHEN Ying, et al. Variations of drought and its trend in the Loess Plateau from 1986 to 2019 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 649 – 660. (in Chinese)
- [26] 任涛涛, 李双双, 段克勤, 等. 黄土高原热浪型和缺水型骤旱时空变化特征及其影响因素[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(3): 360 – 370.
- REN Taotao, LI Shuangshuang, DUAN Keqin, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of heat wave and precipitation deficit flash drought in the Loess Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(3): 360 – 370. (in Chinese)
- [27] MYHRE G, ALTERSKJAER K, STJERN C W, et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1 – 10.
- [28] 陆伟婷, 于欢, 曹胜男, 等. 近 20 年黄淮海地区气候变暖对夏玉米生育进程及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(16): 3132 – 3145.
- LU Weiting, YU Huan, CAO Shengnan, et al. Effects of climate warming on growth process and yield of summer maize in Huang – Huai – Hai Plain in last 20 years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(16): 3132 – 3145. (in Chinese)
- [29] 赵秀兰, 徐玲玲, 张艳红, 等. 未来黄淮海地区夏玉米光温水资源适宜度及灾害风险演变特征[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(3): 88 – 103.
- ZHAO Xiulan, XU Lingling, ZHANG Yanhong, et al. Evolution characteristics of future light, temperature, and water suitability and disaster risk for summer maize in Huang – Huai – Hai region[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2023, 43(3): 88 – 103. (in Chinese)
- [30] 张翔, 陈能成, 胡楚丽, 等. 1983—2015 年我国农业区域三类骤旱时空分布特征分析[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 1048 – 1057.
- ZHANG Xiang, CHEN Nengcheng, HU Chuli, et al. Spatio-temporal distribution of three kinds of flash droughts over agricultural land in China from 1983 to 2015[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(10): 1048 – 1057. (in Chinese)
- [31] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农业统计资料 1949—2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.

[32] LI X, XIAO J, HE B, et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence is strongly correlated with terrestrial photosynthesis for a wide variety of biomes: first global analysis based on OCO-2 and flux tower observations[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(9): 3990-4008.

[33] YANG X, TANG J, MUSTARD J F, et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(8): 2977-2987.

[34] WANG S, HUANG C, ZHANG L, et al. Monitoring and assessing the 2012 drought in the great plains: analyzing satellite-retrieved solar-induced chlorophyll fluorescence, drought indices, and gross primary production[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 61.

[35] SUN Y, FU R, DICKINSON R, et al. Drought onset mechanisms revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence: insights from two contrasting extreme events[J]. *Biogeosciences*, 2015, 120(11): 2427-2440.

[36] YOSHIDA Y, JOINER J, TUCKER C, et al. The 2010 Russian drought impact on satellite measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence: insights from modeling and comparisons with parameters derived from satellite reflectances[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 163-177.

[37] 周蕾, 迟永刚, 刘啸添, 等. 日光诱导叶绿素荧光对亚热带常绿针叶林物候的追踪[J]. *生态学报*, 2020, 40(12): 4114-4125.

ZHOU Lei, CHI Yonggang, LIU Xiaotian, et al. Land surface phenology tracked by remotely sensed sun-induced chlorophyll fluorescence in subtropical evergreen coniferous forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(12): 4114-4125. (in Chinese)

[38] CRAINE J M, OCHEL TREE T W, NIPPERT J B, et al. Global diversity of drought tolerance and grassland climate-change resilience[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 63-67.

[39] DAVIDSON E A, VERCHOT L V, CATTÂNIO J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53-69.

[40] 王月海. 山东干旱瘠薄山地造林新技术试验[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2): 60-64.

WANG Yuehai. New techniques of afforestation on the dry and barren land in the mountainous region of Shandong Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(2): 60-64. (in Chinese)

[41] 孔冬冬, 张强, 顾西辉, 等. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析[J]. *生态学报*, 2016, 36(24): 7908-7918.

KONG Dongdong, ZHANG Qiang, GU Xihui, et al. Vegetation responses to drought at different time scales in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 7908-7918. (in Chinese)

[42] FORD T W, MCROBERTS D B, QUIRING S M, et al. On the utility of in situ soil moisture observations for flash drought early warning in Oklahoma, USA[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(22): 9790-9798.