

陈雨焯, 王培娟, 张源达, 等. 基于 3 种遥感指数的东北春玉米干旱识别对比. 应用气象学报, 2022, 33(4): 466-476.
DOI: 10.11898/1001-7313.20220407

基于 3 种遥感指数的东北春玉米干旱识别对比

陈雨焯 王培娟* 张源达 杨建莹

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要

以东北春玉米为研究对象, 探究利用植被光合特性的日光诱导叶绿素荧光 (solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF) 指数、近红外-短波红外波段构建的归一化差值水分指数 (normalized difference water index, NDWI) 和可见光-近红外波段构建的归一化差值植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 识别东北春玉米干旱的准确度和敏感度。研究发现: SIF 指数、NDWI 和 NDVI 对干旱识别准确度均超过 80%, 其中重度干旱准确度超过 94%, 且在春玉米苗期表现最佳; 3 种指数对比可知, SIF 指数在春玉米干旱识别的准确度和敏感度方面均最佳, 分别为 89.27% 和 81.65%, NDWI 敏感度次之, NDVI 最差。表明基于光合特性的 SIF 指数在识别东北春玉米干旱方面优于基于地物光谱特性所构建的植被指数。

关键词: 日光诱导叶绿素荧光指数; 归一化差值水分指数; 归一化差值植被指数; 春玉米; 干旱敏感性

引 言

干旱是指由于长时间无降水或降水量偏少造成的水分供求失衡, 进而导致农作物受灾减产的现象^[1], 是全球范围内最复杂、最常见的自然灾害之一^[2], 也是对中国影响最大的自然灾害之一。20 世纪 80 年代以来, 我国频繁发生大范围干旱^[3], 1980 年以来发生重旱的频率是 1980 年以前的 3 倍以上, 且三季连旱、连年干旱呈增加趋势^[4-5], 给农业生产和国民经济带来巨大损失。

玉米是中国第一大粮食作物, 其生育期内耗水较多, 且对水分胁迫较为敏感^[6]。东北地区是我国北方春播玉米的主产区^[7], 目前玉米播种面积超过 $6 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 产量近 $4 \times 10^7 \text{ t}$, 约占全国玉米产量的 30%^[8]。因此, 东北春玉米种植区是我国重要的玉米产区, 也是重要的商品粮基地^[9-10]。20 世纪 90 年代以来, 东北地区干旱频发^[11], 预计到 21 世纪中期, 东北春玉米缺水率仍呈增加趋势^[12], 干旱已成为制约东北春玉米生产的关键因素^[13], 严重影响春

玉米的生长发育和产量品质形成, 进而危及国家粮食安全。因此, 在东北地区开展春玉米干旱研究, 筛选识别春玉米干旱准确度和敏感度较高的指标, 对该地区干旱状况进行监测评估, 对农业防灾减灾及中国的粮食安全意义重大。

常用的农业干旱监测主要包括基于气象数据的农业干旱监测和基于卫星遥感信息的干旱监测。近年遥感技术以其客观、及时、经济、监测范围宽广、尺度精细、数据连续等优点^[14], 弥补了地面站点的不足, 提高了干旱监测的精准性和时效性, 已被证明是农业干旱监测中最具前景的技术手段^[15]。目前已有研究多利用归一化差值植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)^[16]、条件植被指数 (vegetation condition index, VCI)^[17]、增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI)^[18]、归一化差值水分指数 (normalized difference water index, NDWI)^[19-20]、日光诱导叶绿素荧光 (solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF) 指数^[21-23] 等遥感指数对作物是否遭受干旱影响及干旱严重程度进行分析, 也有研究对各种指数识别干旱的能力进行

2022-04-19 收到, 2022-05-30 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(32171916, 31771672), 中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目(2020Z005)

* 通信作者, 邮箱: wangpj@cma.gov.cn

对比,如Cao等^[24]以SPEI(standardized precipitation evapotranspiration index)为参考,讨论SIF指数、NDVI和EVI监测美国玉米带干旱的敏感性,表明发生干旱的情况下,SIF指数和GPP(gross primary productivity)的一致性优于植被指数;史晓亮等^[25]基于不同尺度的SPEI,研究SIF指数、NDVI和EVI等监测我国西南地区植被干旱状况的差异性,发现SIF指数和不同尺度气象干旱指数的相关性均高于NDVI和EVI;陈鑫等^[26]基于SPEI和降水量等数据,对SIF指数、NDVI和EVI监测山东省冬小麦对干旱的响应进行研究,发现SIF指数对植物的生理变化足够敏感,能更及时地捕捉干旱发展的时空动态,这是由于干旱可以通过引起叶片气孔关闭和新陈代谢功能损坏限制作物的光合作用,从而导致作物受旱减产^[27]。

人们对各种遥感指数识别作物干旱能力进行了大量对比,但在对比研究中,NDVI和EVI均是基于植被在可见光-近红外波段的地物波谱特性构建的植被指数,在干旱监测机理方面具有相似性,而NDWI是基于近红外-短波红外波段的地物波谱特性构建的植被指数,由于短波红外波段对水分的强吸收特性^[28],决定了NDWI与NDVI和EVI在植被干旱监测机理方面存在差异;除此之外,各研究多用遥感干旱指数和气象干旱指数(如SPI和SPEI、土壤湿度等)之间的相关性评估植被对干旱的响应,但农业灾害的形成通常受多种因素综合影响,用降水量、土壤湿度等单一要素很难准确描述作物受灾的程度^[29],且以农业实际灾情数据为基础,探讨不同遥感指数对干旱响应程度的研究还鲜有报道。因此,本文以东北地区为研究区域,以该区域易于发生季节性干旱的春玉米为研究对象,基于研究区域春玉米实际灾情数据,对比农业干旱监测机理存在显著差异的3种指数SIF指数、NDWI和NDVI,分析它们对春玉米干旱识别的准确度及提前预判干旱发生的能力,寻找能够快速表征东北春玉米干旱的最佳敏感性指标,为制定具有针对性的抗旱措施、科学安排灌溉策略,以最大程度降低农业干旱造成的损失提供技术保障。

1 研究区域概况

东北地区地处中高纬度(38°43′N~53°33′N, 117°47′E~135°05′E),包括黑龙江、吉林、辽宁三省

以及内蒙古自治区东四盟地区。该地区土地肥沃,地势平坦,主要生产玉米、水稻等粮食作物,以及大豆、花生等经济作物,是我国北方春播玉米主产区和重要的商品粮基地,更是气候变化敏感区。东北地区属温带季风性气候,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨,自西北至东南年降水量由不足400 mm升至1000 mm,从半干旱区逐渐过渡到半湿润区和湿润区,且年降水量的70%~80%集中在6—8月,雨热与春玉米生长发育同步,是典型的雨养农业区^[30-31]。由于降水时空分布不均匀,易发生季节性干旱。近半个多世纪的气象数据显示,东北地区气温升高,降水量减少,是干旱发生频率较高的地区之一^[32]。

2 数据来源及处理

2.1 卫星遥感数据

研究所用遥感数据包括MODIS土地覆盖类型产品MCD12Q1、地表反射率产品MOD09A1、全球叶绿素荧光数据集GOSIF。

MCD12Q1是全球空间分辨率为500 m的逐年尺度土地利用数据集,数据来源于美国地球资源观测中心。本研究获取了2000—2019年研究区域逐年MCD12Q1产品,选择国际地圈生物圈计划的全球植被分类方案,对其进行转投影、拼接、裁剪等处理,提取得到东北地区逐年的农业用地区域。随着时间变化和人类活动影响,东北春玉米种植区在不同年份有所调整,因此选择2000—2019年研究区域的农业用地区域,统计没有变化的栅格像元^[33],得到研究区域多年农业用地区域。结合中国科学院地理研究所发布的1 km中国土地利用数据,掩膜掉水田区域,得到东北春玉米种植区(图1)。

MOD09A1是8 d合成的地表反射率产品,空间分辨率为500 m。本研究获取了研究区域2000—2020年5—9月的MOD09A1产品,对其进行转投影、拼接、剪裁等预处理,并提取B1(红光)波段、B2(近红外)波段和B7(短波红外)波段,计算得到研究所需的NDVI和NDWI^[34-35]。

叶绿素荧光数据集(GOSIF)是基于离散的OCO-2 SIF数据、中分辨率光谱成像仪(MODIS)植被数据和气象再分析数据,利用机器学习算法得到的全球范围时间分辨率为8 d、空间分辨率为0.05°的SIF数据,本研究收集了研究区域2000—2020年5—9月的GOSIF数据,对其进行掩膜、数据单位换

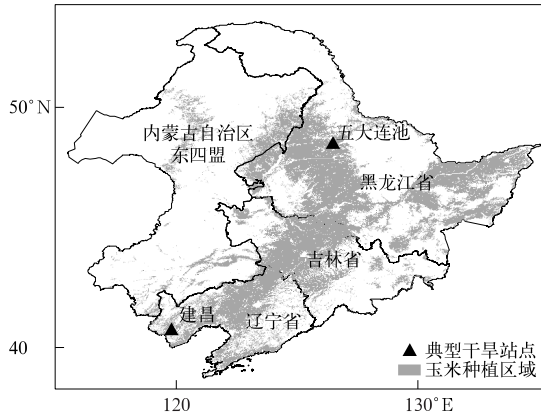


图1 研究区域及典型站点分布
Fig.1 Study area and typical stations

算等预处理,得到研究区域春玉米生长季的叶绿素荧光数据集。

本文插图中所涉及的中国国界及省界基于审图号为GS(2020)4619号标准地图制作,底图无修改。

2.2 春玉米实际灾情数据

春玉米实际灾情数据选择中国农业气象灾害数据集。根据东北春玉米生长发育情况,结合卫星遥感数据可获取时间范围,筛选灾害类型为干旱、灾害发生时段为2000—2013年5—9月、受灾作物为春玉米或所有作物、受灾地点为东北地区的所有数据,共得到62个农业气象站177条春玉米干旱灾害记录作为本研究的实际灾情样本,其中轻度、中度、重度干旱样本量分别为59,79,39。

3 研究方法

3.1 遥感指数时间序列数据集的构建

研究所用的遥感指数包括SIF指数、NDWI和NDVI。基于筛选得到的62个站点177条春玉米干旱灾害记录,根据春玉米干旱灾害发生的时间(时段)、地点(区域),以有灾害记录的每个农业气象试验站点所在县/区为研究单元,对3种指数进行分区掩膜处理,剔除无效数据后,得到2000—2020年每个研究单元3种指数在5—9月每1个时相(第121天,第129天,第137天,…)的时间序列数据集^[36]。利用箱线法确定各数据集的四分位区间^[37-38]。由于箱线法未对数据做任何限制性要求,不要求数据必须服从正态分布或近似服从正态分布,以四分位数和四分位距为基础,给出数据分布的中心位置、散布范围和形状,具有一定的鲁棒性,可以代表无旱样本的分布特性。基于箱线图的四分位区间,形成3种

指数各研究单元的时间序列无旱数据集。

3.2 干旱识别准确度与敏感度评价方法

基于3种指数时间序列数据集,对于每个研究单元,将中国农业气象灾害数据集中干旱灾害记录年份的像元序列值与指数时间序列数据集进行对比,若灾害记录日期的像元值小于指数时间序列数据集对应日期的下四分位区间,则认为该指数识别出干旱发生^[22]。若指数识别的干旱发生日期不晚于灾情记录日期,则认为该指数可以准确识别春玉米发生干旱,用指数准确识别干旱灾害的记录数占干旱总样本量的百分比表示指数的准确度。若指数识别的干旱发生日期早于灾情记录日期,则认为指数可以提前于灾害记录识别干旱发生,指数对春玉米干旱识别更敏感;反之,则认为指数对春玉米干旱识别具有滞后效应。用指数提前于灾害记录识别干旱灾害的记录数占指数准确识别干旱灾害记录数的百分比表示指数的敏感度。计算3种指数提前(滞后)识别干旱发生日期与灾害记录日期之差,得到3种指数的敏感度和提前(滞后)日数差,筛选得到春玉米干旱识别的最敏感指数。

4 结果与分析

4.1 春玉米干旱样本描述

4.1.1 干旱样本空间分布特征

东北地区62个站点177条春玉米干旱灾害记录的受旱站点及各站点干旱频次的空间分布如图2

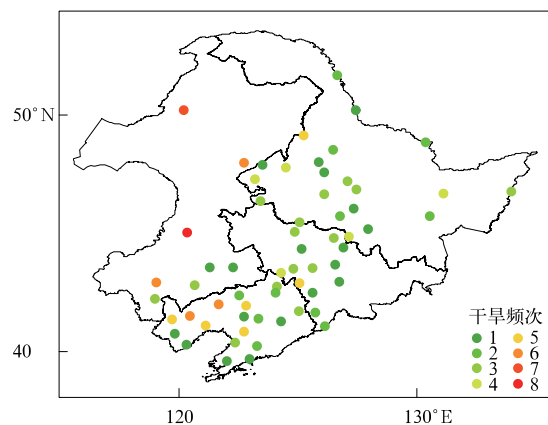


图2 2000—2013年5—9月东北春玉米干旱样本站点及干旱频次分布
Fig.2 Distribution of drought sample sites and drought frequency for spring maize in Northeast China from May to Sep during 2000—2013

所示。由图 2 可见,春玉米干旱灾害除大兴安岭北部及漠河地区、吉林延边地区、黑龙江牡丹江地区外,在东北全域均有分布,且在东北南部受旱区域相对集中。从受旱频次看,干旱频次较高的区域也集中在辽宁西部、内蒙古自治区东四盟的西部和南部,受旱次数在 5 次以上;黑龙江和吉林中部的松嫩平原受旱次数相对较少,以 1~3 次为主。

4.1.2 干旱样本时间分布特征

根据春玉米生育期,将春玉米干旱灾害记录划分为播种期、苗期、拔节-孕穗期、抽穗-开花期、灌浆-成熟期 5 个发育阶段^[39],统计各发育阶段干旱样本量,表明东北春玉米干旱主要发生在苗期,占干旱总样本量的 40%。春玉米苗期是以长根、分化茎叶为主的营养生长阶段,根系发育较快,但地上部茎、叶的增长比较缓慢,是决定亩株数的基础。苗期发生干旱,会抑制春玉米的生长速率,叶片发黄,发育期显著延迟。拔节-孕穗期、抽穗-开花期和灌浆-成熟期干旱样本量相差较小,均在 20%左右。拔节-孕穗期是春玉米营养生长与生殖生长并进期,干旱使叶片干卷萎蔫,进行光合作用的绿叶面积减少,株高增长缓慢,雌穗和雄穗发育受阻;抽穗-开花期和灌

浆-成熟期是春玉米的生殖生长期,干旱会造成花粉生命力下降,影响授粉,形成稀粒棒或空棒,进而导致减产。春玉米播种期干旱记录最少,仅为 3%。由于本研究是基于植被波谱特性和光合能力构建的遥感指数进行干旱识别,播种期内春玉米植株尚未出土,遥感指数无法在该发育时段内识别春玉米是否发生干旱,因此,春玉米播种期并不是本研究关注的主要时段。

4.2 干旱识别准确度评价

4.2.1 干旱样本总体准确度

计算 SIF 指数、NDWI 和 NDVI 识别春玉米干旱的准确度,各指数对春玉米不同等级干旱的总体识别准确度如图 3 所示。由图 3 可以看到,3 种指数在识别春玉米干旱方面均表现良好,识别准确度均超过 80%。SIF 指数表现最佳,识别准确度总体达到 89.27%;NDWI 和 NDVI 识别准确度分别为 83.62%和 84.18%。对于不同等级的干旱,3 种指数对重度干旱的识别准确率均较高,超过 94%,SIF 指数对轻、中、重 3 个干旱等级的识别准确度均高于 NDVI 和 NDWI,NDWI 对中度、重度干旱的识别准确度略高于 NDVI。

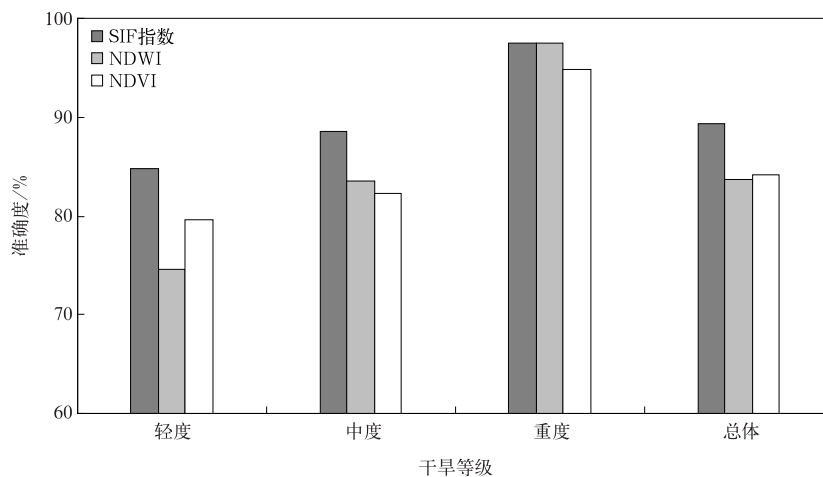


图 3 SIF 指数、NDWI 和 NDVI 识别春玉米不同等级干旱准确度对比

Fig. 3 Accuracy of SIF index, NDWI and NDVI in identifying different drought grades for spring maize

4.2.2 春玉米各发育阶段准确度

计算 SIF 指数、NDWI 和 NDVI 在春玉米不同发育阶段的干旱识别准确度,结果如表 1 所示。由表 1 可见,3 种指数对春玉米苗期干旱的识别准确度最高,均超过 90%;抽穗-开花期次之,干旱识别准确度为 83.00%~96.77%;拔节-孕穗期和灌浆-

成熟期最差,但干旱识别准确度仍超过 66.67%。除苗期外,3 种指数在其余 3 个发育阶段均表现出对重度干旱的识别准确度最高,SIF 指数在拔节-孕穗期、抽穗-开花期和灌浆-成熟期对重度干旱的识别准确度均达到 100%,对轻度和中度干旱的识别准确度也均超过 75%;NDVI 和 NDWI 在春玉米除

表 1 SIF 指数、NDWI 和 NDVI 识别春玉米不同发育阶段不同等级干旱准确度
Table 1 Accuracy of SIF index, NDWI and NDVI in identifying different drought grades at different developmental stages of spring maize

遥感指数	发育阶段	准确度/%			总体
		轻度干旱	中度干旱	重度干旱	
SIF 指数	苗期	100.00	94.44	94.45	95.77
	拔节-孕穗期	78.95	81.82	100.00	81.82
	抽穗-开花期	100.00	92.31	100.00	96.77
	灌浆-成熟期	78.57	76.47	100.00	80.56
NDWI	苗期	88.24	88.89	100.00	91.55
	拔节-孕穗期	73.68	72.73	100.00	75.76
	抽穗-开花期	85.71	76.92	90.91	83.87
	灌浆-成熟期	64.29	82.35	100.00	77.78
NDVI	苗期	100.00	94.44	94.45	95.77
	拔节-孕穗期	73.68	45.45	100.00	66.67
	抽穗-开花期	85.71	76.92	90.91	83.00
	灌浆-成熟期	64.29	82.35	100.00	77.00

苗期外的 3 个发育阶段均对重度干旱识别准确度较高,但对轻度、中度干旱的识别准确度表现略差,除拔节-孕穗期 NDVI 对春玉米中度干旱识别的准确度低于 50%外,其余发育阶段对春玉米轻度和中度干旱识别准确度均大于 64%。

对比分析 3 种指数的干旱识别能力,SIF 指数在春玉米 4 个发育阶段各等级干旱识别准确度均优于 NDWI 和 NDVI,表现出较高的干旱识别优势,表明基于植被光合能力的指数在识别干旱时要优于基于地物波谱特性构建的指数;NDWI 和 NDVI 在春玉米不同发育阶段的干旱识别准确度差异较大,NDVI 在苗期表现较好,NDWI 则在拔节-孕穗期、抽穗-开花期和灌浆-成熟期略有优势,原因是春玉米生长后期植被覆盖度较高,NDVI 达到饱和,不能

很好地反映作物的干旱情况。

4.3 干旱识别敏感度评价

4.3.1 基于干旱样本集合的遥感指数敏感度

计算 SIF 指数、NDWI 和 NDVI 提前(滞后)识别干旱发生日期与灾害记录日期之差,得到 3 种指数识别灾害样本的提前(滞后)时间,统计 3 种指数识别春玉米干旱的敏感度,各指数对春玉米不同干旱程度的总体识别敏感度如图 4 所示。由图 4 可见,3 种指数对春玉米干旱识别的敏感度差异较大,SIF 指数对干旱识别的敏感度最高,达到 81.65%,NDVI 对干旱识别的敏感度较低,只有 59.73%,NDWI 表现介于两种指数之间,敏感度为 77.03%。从不同等级干旱看,SIF 指数、NDWI 和 NDVI 均对重度干旱识别的敏感度最高,分别达到 86.84%,

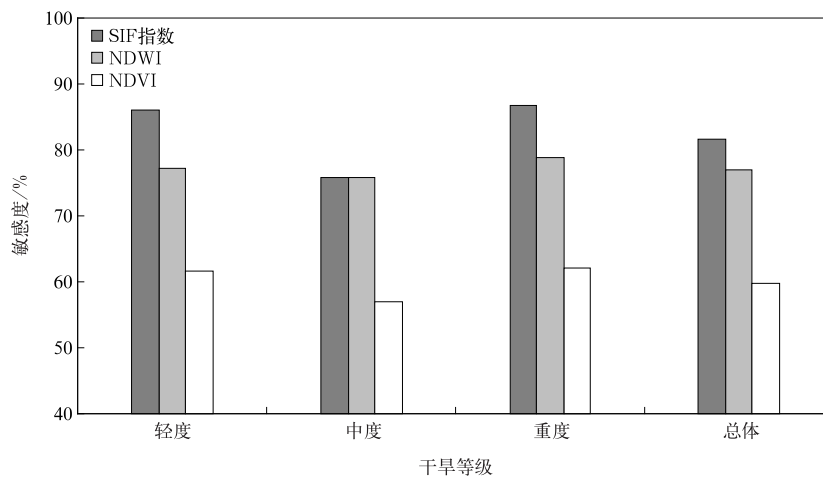


图 4 SIF 指数、NDWI 和 NDVI 识别春玉米不同等级干旱敏感度对比

Fig. 4 Sensitivity of SIF index, NDWI and NDVI in identifying different drought grades for spring maize

78.95%和 62.16%;SIF 指数对轻、中、重 3 个干旱等级的识别敏感度均高于 NDVI 和 NDWI,NDWI 次之,NDVI 最低。表明基于植被光合能力的指数识别干旱的敏感度优于基于地物波谱特性构建的指数,基于对水分强吸收的短波红外波段构建的 NDWI 在识别春玉米干旱方面也优于基于可见光-近红外波段构建的 NDVI 指数。

计算 3 种指数提前(滞后)识别干旱发生日期与

灾害记录日期之差,得到 3 种指数识别灾害样本的提前(滞后)时间,统计提前(滞后)日数差,如图 5 所示。

由图 5a 可以看到,SIF 指数的箱线图整体偏向向下,即提前预判干旱发生的日数大于其他两种指数,敏感度较高;NDVI 的箱线图基本上以横轴为中心,整体表现出上下对称的结构特点,表明 NDVI 识别到干旱发生时间与灾害记录时间相近;NDWI 的箱

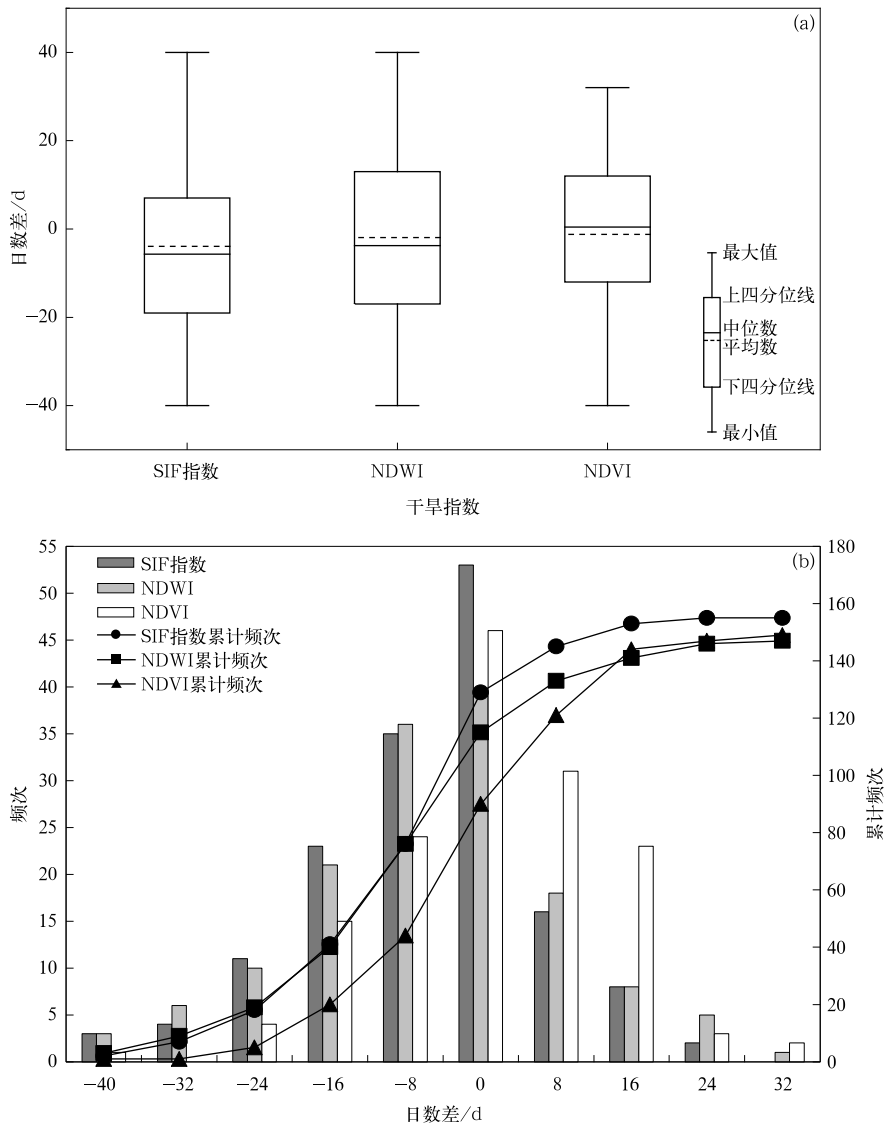


图 5 SIF 指数、NDWI 和 NDVI 识别春玉米干旱敏感度对比

(a)判定干旱发生与灾害记录日数差,

(b)判定干旱发生与灾害记录日数差频次和累计频次

Fig. 5 Sensitivity in identifying drought for spring maize by SIF index, NDWI and NDVI

(a)difference between drought occurrence date and determined disaster record date,

(b)the difference frequency and cumulative frequency between drought occurrence date and determined disaster record date

线图表现介于两者之间,中位数、平均数及下四分位线相对于 NDVI 均偏下。因此,SIF 指数对于春玉米干旱识别的敏感度更高,可以更早感知到干旱。

由图 5b 可以看到,SIF 指数和 NDWI 识别干旱发生日期与灾害记录日期之差的频次较大值主要分布于 $-16 \text{ d} \sim 0$,且均在日数差为 0 时频次达到峰值,而 NDVI 虽然也在日数差为 0 时达到峰值,但其较大值分布在 $0 \sim 16 \text{ d}$;由累计频次折线图也可以看到,SIF 指数和 NDWI 在日数差为 $-16 \text{ d} \sim 0$ 时曲线斜率增长最快,且 SIF 指数曲线的斜率增长快于 NDWI,它们均在日数差大于 0 后增长缓慢;NDVI 在日数差

小于 0 时曲线斜率增长缓慢,在日数差为 $0 \sim 16 \text{ d}$ 时斜率增长最快,这说明 SIF 指数和 NDWI 识别干旱的敏感度较高,且 SIF 指数的敏感度要优于 NDWI,NDVI 识别干旱的敏感度较差。

4.3.2 典型站点干旱识别敏感度

选取建昌站和五大连池站作为典型站点(两站点分布见图 1),基于 3 种指数时间序列数据集,将中国农业气象灾害数据集中干旱灾害记录发生年份的像元序列值与指标时间序列数据集进行对比,分析 3 种指数识别干旱敏感度,结果如图 6 所示。

根据春玉米干旱灾情记录,建昌站在 2009 年第

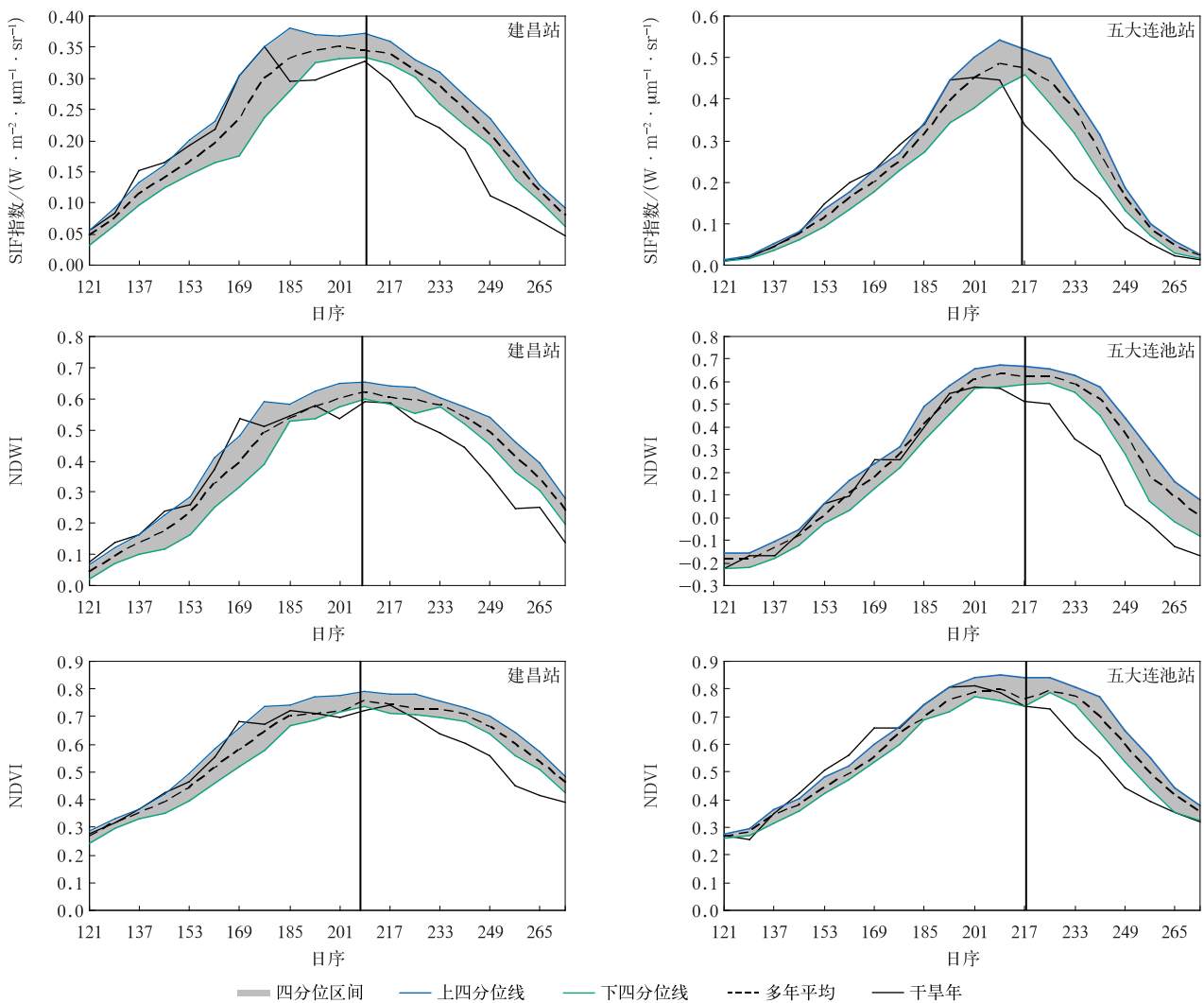


图 6 典型站点 SIF 指数、NDWI 和 NDVI 识别干旱敏感度

Fig. 6 Drought sensitivity identified by SIF index, NDWI and NDVI at typical stations

209 天发生重旱,由图 6 可知,3 种指数均能识别干旱发生,但 SIF 指数在提前 2~3 个时间间隔(即 16

$\sim 24 \text{ d}$)曲线已经下降到多年平均区间以下,而 NDVI 和 NDWI 虽然也提前于灾害记录时间识别干旱

发生,但均提前1~2个时间间隔,说明该站点SIF指数对干旱的预判要早于NDVI和NDWI;五大连池站在2007年第217天发生中旱,由图6可知3种指数也均能识别干旱发生,SIF指数和NDWI均提前于灾害记录时间约1个时间间隔识别干旱发生,而NDVI识别干旱发生时间和灾害记录时间相近,说明该站点SIF指数和NDWI对干旱发生的预判要早于NDVI。

基于上述对典型站点春玉米干旱研究可知,SIF指数、NDVI和NDWI均能识别春玉米干旱发生,SIF指数相较于NDWI和NDVI,识别干旱的敏感度更高,能够提前于灾害记录时间识别到干旱的发生。

5 结 论

本文基于植被光合特性、近红外-短波红外波段、可见光-近红外波段构建的SIF指数、NDWI和NDVI在识别农业干旱机理方面的差异,对比3种指数识别东北春玉米干旱的准确度及敏感度,得出以下主要结论:

1) 3种指数识别春玉米干旱的准确度均较高,其中SIF指数的准确度最高,达89.27%;3种指数对重度干旱的识别准确度均高于轻度和中度干旱,超过94%,且SIF指数的准确度最高,NDWI次之,NDVI略差,但仍达到94.87%。

2) 从春玉米发育阶段看,3种指数对春玉米苗期干旱的识别准确度最高,均超过90%;抽穗-开花期次之,拔节-孕穗期和灌浆-成熟期最差;SIF指数在春玉米4个发育阶段的干旱识别准确度均优于NDWI和NDVI。

3) 3种指数对春玉米干旱识别的敏感度差异较大,SIF指数对干旱识别的敏感度最高,可在春玉米干旱灾害记录前0~16d识别出干旱;NDWI次之,提前识别日数集中在0~8d;NDVI的敏感度略低,一般滞后于灾情记录0~16d。3种指数对重度干旱的识别敏感度均高于轻度和中度干旱。

参 考 文 献

- [1] 陈晓玲,赵红梅,田礼乔. 环境遥感模型与应用. 武汉:武汉大学出版社,2008:188-189.
Chen X L,Zhao H M,Tian L Q. Remote Sensing of Environment: Models and Applications. Wuhan: Wuhan University Press,2008:188-189.
- [2] 高涛涛,殷淑燕,王水霞. 基于SPEI指数的秦岭南北地区干旱时空变化特征. 干旱区地理,2018,41(4):761-770.
Gao T T,Yin S Y,Wang S X. Spatial and temporal variations of drought in northern and southern regions of Qinling Mountains based on standardized precipitation evapotranspiration index. *Arid Land Geography*,2018,41(4):761-770.
- [3] 宋艳玲,王建林,田靳峰,等. 气象干旱指数在东北春玉米干旱监测中的改进. 应用气象学报,2019,30(1):25-34.
Song Y L,Wang J L,Tian J F,et al. The spring maize drought index in Northeast China based on meteorological drought index. *J Appl Meteor Sci*,2019,30(1):25-34.
- [4] 倪深海,顾颖,彭岳津,等. 近七十年中国干旱灾害时空格局及演变. 自然灾害学报,2019,28(6):176-181.
Ni S H,Gu Y,Peng Y J,et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of drought disaster in China in recent seventy years. *J Nat Disaster*,2019,28(6):176-181.
- [5] 蔡福,米娜,明惠青,等. WOFOST模型蒸散过程改进对玉米干旱模拟影响. 应用气象学报,2021,32(1):52-64.
Cai F,Mi N,Ming H Q,et al. Effects of improving evapotranspiration parameterization scheme on WOFOST model performance in simulating maize drought stress process. *J Appl Meteor Sci*,2021,32(1):52-64.
- [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. 农业工程学报,2019,35(18):189-199.
Wu X,Wang P J,Gong Y D,et al. Analysis of drought identification and spatio-temporal characteristics for summer corn in Huang-Huai-Hai plain in year of 1961—2015. *Transactions of the CSAE*,2019,35(18):189-199.
- [7] 王婧瑄,郭建平,李蕊. 春玉米积温稳定性及在发育期预报中的应用. 应用气象学报,2019,30(5):577-585.
Wang J X,Guo J P,Li R. Accumulated temperature stability of spring maize and its application to growth period forecast. *J Appl Meteor Sci*,2019,30(5):577-585.
- [8] 赵俊芳,杨晓光,刘志娟. 气候变暖对东北三省春玉米严重低温冷害及种植布局的影响. 生态学报,2009,29(12):6544-6551.
Zhao J F,Yang X G,Liu Z J. Influence of climate warming on serious low temperature and cold damage and cultivation pattern of spring maize in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*,2009,29(12):6544-6551.
- [9] 葛东,魏新光,景竹然,等. 基于SPEI指数的东北玉米种植区春玉米生长季干旱演变特征. 水利与建筑工程学报,2020,18(4):41-47.
Ge D,Wei X G,Jing Z R,et al. Characteristics of drought evolution in spring maize growing season in Northeast maize planting area based on SPEI. *J Water Resour Archit Eng*,2020,18(4):41-47.
- [10] 王培娟,霍治国,杨建堂,等. 基于热量指数的东北春玉米冷害指标. 应用气象学报,2019,30(1):13-24.
Wang P J,Huo Z G,Yang J Y,et al. Indicators of chilling

- damage for spring maize based on heat index in Northeast China. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(1): 13-24.
- [11] 赵锦, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响 X. 气候变化对东北三省春玉米气候适宜性的影响. 中国农业科学, 2014, 47(16): 3143-3158.
Zhao J, Yang X G, Liu Z J, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China X. The possible impacts of climate change on climatic suitability of spring maize in the three provinces of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(16): 3143-3158.
- [12] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 IV. 未来气候变暖对东北三省春玉米种植北界的可能影响. 中国农业科学, 2010, 43(11): 2280-2291.
Liu Z J, Yang X G, Wang W F, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China IV. The possible impact of future climatic warming on the northern limits of spring maize in three provinces of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(11): 2280-2291.
- [13] 董秋婷, 李茂松, 刘江, 等. 近 50 年东北地区春玉米干旱的时空演变特征. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 52-59.
Dong Q T, Li M S, Liu J, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought of spring maize in Northeast China in recent 50 years. *J Nat Disaster*, 2011, 20(4): 52-59.
- [14] 殷飞, 金世佳. 遥感在农业旱情监测中的应用现状与展望. 干旱环境监测, 2015, 29(2): 87-92.
Yin F, Jin S J. Application status and prospect on agricultural drought monitoring based on remote sensing. *Arid Environ Monitor*, 2015, 29(2): 87-92.
- [15] 黄友昕, 刘修国, 沈永林, 等. 农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展. 农业工程学报, 2015, 31(16): 186-195.
Huang Y X, Liu X G, Shen Y L, et al. Advances in remote sensing derived agricultural drought monitoring indices and adaptability evaluation methods. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(16): 186-195.
- [16] 郭妮, 陈添宇, 雷建勤, 等. 用 NOAA 卫星可见光和红外资料估算甘肃省东部农田区土壤湿度. 应用气象学报, 1997, 8(2): 85-91.
Guo N, Chen T Y, Lei J Q, et al. Estimating farmland soil moisture in eastern Gansu Province using NOAA satellite data. *J Appl Meteor Sci*, 1997, 8(2): 85-91.
- [17] 王圆圆, 扎西央宗. 利用条件植被指数评价西藏植被对气象干旱的响应. 应用气象学报, 2016, 27(4): 435-444.
Wang Y Y, Zhaxi Yangzong. Assessing vegetation response to meteorological drought in Tibet autonomous region using vegetation condition index. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(4): 435-444.
- [18] 李文梅, 覃志豪, 李文娟, 等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 的比较分析. 遥感信息, 2010(6): 73-78.
Li W M, Qin Z H, Li W J, et al. Comparison and analysis of MODIS NDVI and MODIS EVI. *Remote Sens Inf*, 2010(6): 73-78.
- [19] Fensholt R, Sandholt I. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sens Environ*, 2003(87): 111-121.
- [20] 刘小磊, 覃志豪. NDWI 与 NDVI 指数在区域干旱监测中的比较分析——以 2003 年江西夏季干旱为例. 遥感技术与应用, 2007, 22(5): 608-612.
Liu X L, Qin Z H. Comparative analysis between NDWI and NDVI indices in regional drought monitoring. *Remote Sens Technol Appl*, 2007, 22(5): 608-612.
- [21] 李晓, 冯伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展. 西北植物学报, 2006, 26(10): 2186-2196.
Li X, Feng W, Zeng X C. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses. *Acta Bot Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(10): 2186-2196.
- [22] 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. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(9): 2780-2787.
Liu L Z, Wu J J, Zhou H K, et al. Chlorophyll fluorescence and its progress in detecting water stress. *Spectrosc Spect Anal*, 2017, 37(9): 2780-2787.
- [23] 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. 应用生态学报, 2022, 33(2): 457-466.
Cao Y X, Huang Z, Xu X J, et al. Responses of solar-induced chlorophyll fluorescence to meteorological drought across the Loess Plateau, China. *Chinese J Appl Ecology*, 2022, 33(2): 457-466.
- [24] Cao J J, An Q, Zhang X, et al. Is satellite Sun-induced chlorophyll fluorescence more indicative than vegetation indices under drought condition?. *Sci Total Environ*, 2021, 792: 148396.
- [25] 史晓亮, 吴梦月, 丁皓. SPEI 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析. 农业机械学报, 2020, 51(12): 184-192.
Shi X L, Wu M Y, Ding H. Difference analysis of SPEI and vegetation remote sensing information in drought monitoring in Southwest China. *Trans Chinese Soc Agric Mach*, 2020, 51(12): 184-192.
- [26] 陈鑫, 计璐艳, 于凯, 等. 日光诱导叶绿素荧光对山东省干旱的监测. 中国科技论文, 2021, 16(5): 564-570.
Chen X, Ji L Y, Yu K, et al. Monitoring of drought in Shandong Province by sun-induced chlorophyll fluorescence. *China Sciencepaper*, 2021, 16(5): 564-570.
- [27] 王培娟, 马玉平, 霍治国, 等. 土壤水分对冬小麦叶片光合速率影响模型构建. 应用气象学报, 2020, 31(2): 267-279.
Wang P J, Ma Y P, Huo Z G, et al. Construction of the model for soil moisture effects on leaf photosynthesis rate of winter wheat. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 267-279.
- [28] 刘二华, 周广胜, 周莉, 等. 夏玉米不同生育期叶片和冠层含水量的遥感反演. 应用气象学报, 2020, 31(1): 52-62.
Liu E H, Zhou G S, Zhou L, et al. Remote sensing inversion of leaf and canopy water content in different growth stages of summer maize. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(1): 52-62.

- [29] 郭建平. 农业气象灾害监测预测技术研究进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 620-630.
Guo J P. Research progress on agricultural meteorological disaster monitoring and forecasting. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(5): 620-630.
- [30] 郭庆法, 王庆成, 王黎明. 中国玉米栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 2004: 31-42.
Guo Q F, Wang Q C, Wang L M. Maize Cultivation in China. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2004: 31-42.
- [31] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化情景下东北地区玉米产量变化模拟. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1448-1452.
Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, et al. Simulation of maize production under climate change scenario in Northeast China. *Chinese J Eco-Agr*, 2008, 16(6): 1448-1452.
- [32] 马建勇, 许吟隆, 潘婕. 东北地区农业气象灾害的趋势变化及其对粮食产量的影响. 中国农业气象, 2012, 33(2): 283-288.
Ma J Y, Xu Y L, Pan J. Analysis of agro-meteorological disasters tendency variation and the impacts on grain yield over Northeast China. *Chinese J Agrometeor*, 2012, 33(2): 283-288.
- [33] Ding Y, Xu J, Wang X, et al. Spatial and temporal effects of drought on Chinese vegetation under different coverage levels. *Sci Total Environ*, 2020, 716(6247): 137166.
- [34] 谢慧君, 张廷斌, 易桂花, 等. 川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应. 水土保持通报, 2020, 40(4): 286-294.
Xie H J, Zhang T B, Yi G H, et al. Dynamic characteristics of NDVI values and its response to climatic factors in Western Sichuan Plateau. *Bulletin Soil Water Conser*, 2020, 40(4): 286-294.
- [35] 刘欢, 刘荣高, 刘世阳. 干旱遥感监测方法及其应用发展. 地球信息科学学报, 2012, 14(2): 232-239.
Liu H, Liu R G, Liu S Y. Review of drought monitoring by remote sensing. *Int J Geogr Inf Sci*, 2012, 14(2): 232-239.
- [36] 周正明. 遥感光谱指数反演土壤水分及干旱时空分布研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2013.
Zhou Z M. Soil Moisture Retrieval Using Remote Sensing Spectral Indexes and Tempo-spatial Drought Analysis in East China Winter Sheat-planting Area. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2013.
- [37] Kowalski K, Okujeni A, Brell M, et al. Quantifying drought effects in central European grasslands through regression-based unmixing of intra-annual Sentinel-2 time series. *Remote Sens Environ*, 2022, 268: 112781.
- [38] Wang Y J, Fu B J, Liu Y X, et al. Response of vegetation to drought in the Tibetan Plateau: Elevation differentiation and the dominant factors. *Agr Forest Meteorol*, 2021, 306: 18468.
- [39] 张淑杰, 张玉书, 孙龙彧, 等. 东北地区玉米生育期干旱分布特征及其成因分析. 中国农业气象, 2013, 34(3): 350-357.
Zhang S J, Zhang Y S, Sun L Y, et al. Analysis of distributional characteristics and primary causes of maize drought in Northeast China. *Chinese J Agrometeor*, 2013, 34(3): 350-357.

Comparison of Drought Recognition of Spring Maize in Northeast China Based on 3 Remote Sensing Indices

Chen Yuye Wang Peijuan Zhang Yuanda Yang Jianying

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Drought is a complex and widespread natural disaster, which has brought serious environmental and social problems and caused huge economic losses to China. For nearly half a century, the trend of aridification in Northeast China has been very significant, the area of influence has increased, and the degree of drought has also intensified significantly. Drought index is the basis of judging the occurrence of drought events, evaluating the degree of drought, clarifying the spatiotemporal characteristics of drought, and formulating measures for drought prevention and mitigation. Numerous studies indicate that solar-induced chlorophyll fluorescence(SIF), normalized difference vegetation index(NDVI), enhanced vegetation index(EVI), and normalized difference water index(NDWI) can be used to identify agricultural drought, but the research on comparing the ability of SIF index, NDWI and NDVI for identifying agricultural drought has not been reported publicly. Taking spring maize in Northeast China as the research object, NDWI and NDVI are calculated using the surface reflectance data MOD09A1. Combined with SIF index, NDWI and NDVI, the time series dataset of remote sensing drought index is constructed, respectively, and the accuracy and sensitivity of these three indices for identifying the drought is further explored. It shows that the accuracy of three indices in indentifying maize drought are all higher than 80%, and the accuracy of SIF index is the highest, reaching 89.27%. The accuracy for identifying severe drought is higher than mild and moderate drought for three indices, all reaching more than 94%, and the accuracy of SIF index exceeds 95%. From the perspective of different developmental stages of spring maize, the monitoring accuracy is the highest at seedling stage, reaching more than 90%, and is the lowest at jointing-booting stage and grain filling-maturity stage. The drought identifying accuracies of SIF index during four developmental periods of spring maize are all better than those of NDWI and NDVI. The sensitivities of SIF index, NDWI and NDVI to the identification of maize drought are different, and the SIF index has the highest sensitivity to drought identification, followed by NDWI, and NDVI is slightly lower. In terms of drought grades, the identifying sensitivities of three indices to severe drought are all higher than those of mild and moderate drought. Above all, compared with NDWI and NDVI, SIF index has better accuracy and sensitivity in identifying the drought of spring maize in Northeast China, and can make timely and accurate response to maize drought in Northeast China. The results have important practical significance for accurately identifying and predicting drought of spring maize in Northeast China, and taking effective drought-resistant measures in a timely and objective manner to minimize the damage to crops.

Key words: SIF index; NDWI; NDVI; spring maize; drought sensitivity