

基于大气-土壤-植被系统干旱发生发展过程的综合干旱指标构建与应用*

段居琦^{1,2} 张强¹ 何雨峰³ 周广胜⁴ 王有民¹ 肖风劲¹

DUAN Juqi^{1,2} ZHANG Qiang¹ HE Yufeng³ ZHOU Guangsheng⁴ WANG Youmin¹ XIAO Fengjin¹

1. 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京, 100081
2. 中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州, 450008
3. 马里兰大学帕克分校地球系统科学交叉学科中心, 马里兰, 20742, 美国
4. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

1. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China*

2. *CMA/Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450008, China*

3. *Earth System Science Interdisciplinary Center, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA*

4. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2020-05-08 收稿, 2020-11-22 改回.

段居琦, 张强, 何雨峰, 周广胜, 王有民, 肖风劲. 2021. 基于大气-土壤-植被系统干旱发生发展过程的综合干旱指标构建与应用. 气象学报, 79(2): 229-239

Duan Juqi, Zhang Qiang, He Yufeng, Zhou Guangsheng, Wang Youmin, Xiao Fengjin. 2021. Construction and application of the combined drought index based on the development process of drought in the atmosphere-soil-vegetation system. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(2):229-239

Abstract An appropriate drought index and high-resolution data are the basis of accurate and precise drought monitoring. In this study, we constructed a Combined Drought Index (hereafter CDI) based on the response relationships between meteorological drought (SPEI), soil drought (SMP) and vegetation drought (LAIP) using integrated multisource data of China National Meteorological Observatory, Soil Moisture of CMA Land Data Assimilation System with $0.0625^{\circ} \times 0.0625^{\circ}$ resolution and MODIS LAI with $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ resolution. The monitor results of CDI were assessment at station scale and regional scale with $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ resolution in Northeast China. The results show that CDI overcomes the shortcomings of single meteorological drought index, which cannot accurately reflect agricultural drought. The misjudgment that attributes the vegetation growth variation caused by other disasters to drought based on single vegetation growth index is corrected. The CDI can reflect the effects of irrigation on drought and monitor the occurrence and development of drought and its impact on crops and other vegetation growth. The above results indicate that CDI classification monitoring results have a clear biophysical significance, a fine spatial resolution and a strong practical guidance. It has application potentials in the monitoring, assessment and prediction of drought occurrence and development and drought impact on agriculture and other green vegetations.

Key words Drought monitor and assessment, Combined drought index, Drought index, Atmosphere-soil-plant system, Multisource data

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502402)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506019)、国家自然科学基金青年科学基金项目(31501214)、中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金课题(AMF201701)。

作者简介: 段居琦, 主要从事生态与农业气候、气象灾害监测评估研究。E-mail: duanjq@cma.gov.cn

通信作者: 张强, 主要从事干旱灾害监测与风险评估研究。E-mail: Zhq62@cma.gov.cn

摘要 适宜的干旱指标和高分辨率数据是准确监测干旱的基础。本研究从气象干旱和土壤干旱以及植被对干旱的响应出发,整合中国国家气象观测站、中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)土壤湿度(0.0625°×0.0625°)和MODIS叶面积指数(500 m×500 m)等多源数据信息,构建了基于气象干旱指数(标准化降水蒸散指数)、土壤干旱指数(土壤湿度百分位)和植被干旱指数(叶面积指数百分位)的综合干旱指数,并在中国东北地区开展了典型站点和区域10 km×10 km空间分辨率干旱监测试验。结果表明,综合干旱指数克服了单一气象干旱指数不能准确反映农业旱情及单一植被长势指数会将其他灾害引起的植被长势变差误判为干旱的不足,能够反映灌溉对干旱的影响,实现对大气-土壤-植被系统干旱发生、发展及其影响的监测。

关键词 干旱监测评估, 综合干旱指标, 干旱指标, 大气-土壤-植被系统, 多源数据

中图法分类号 P49 S166

1 引言

干旱是降水异常减少引起的自然灾害,广泛影响自然和社会经济各部门(Vicente-Serrano, et al, 2012; Hao, et al, 2017)。农业是对气候条件强依赖的领域。中国地处东亚季风气候区,年际降水波动大,干旱灾害频发(Zhang, et al, 2015; Su, et al, 2018),农业干旱受灾超过2443万hm²/a,因旱灾造成的粮食损失高达300亿kg/a(张强等, 2018)。全球变化背景下,20世纪60年代以来中国北方旱作农业区(西北地区除外)干旱呈增加趋势(Zou, et al, 2005),未来干旱化将进一步加剧农业干旱风险(Huang, et al, 2018)。因此,开展干旱监测、预警,准确及时地反映干旱发生、发展及其对农业的影响,可为中国干旱灾害防御和风险管理决策提供基础信息。

监测指标是准确监测干旱的基础。为提高气象干旱监测水平,研究人员已发展了多种干旱指标,如标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)(Vicente-Serrano, et al, 2010)、综合干旱指数(CI)(Zou, et al, 2005; 邹旭恺等, 2008)、气象综合干旱指数(MCI)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2017)、降水量百分位数(Svoboda, et al, 2002)等,是气象干旱监测中的常用指标。但是从农业对干旱响应角度来说,上述气象干旱指标缺乏对植被本身需水状态和土壤供水情况的考虑,同时作物生产环境存在空间变异,因此常导致依此判定的农业旱情偏差较大,特别是在灌溉农业区(黄中艳等, 2013; Zhang, et al, 2019)。为监测农业干旱,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局/中国国家标准化管理委员会(2016)、Jackson等(1988)发展了作物水分亏缺指数、土壤湿度、作物形态指标等为代表的农业干旱指数。作物水分亏缺指数从作物生理水分平衡角度出发,科学性高,

但在大范围应用时,计算干旱指数的生物物理参数准确获取难度较大,影响了监测结果的准确性(赵晨等, 2001)。土壤湿度指标只反映作物生长的根系环境条件,不足以反映不同作物对干旱的响应情况。作物长势形态是植株受旱后生理生化过程变化的直接反映和直观指标,具有较好的指示作用,但其对前期气象干旱和土壤干旱响应存在滞后性,并且引起植被长势变差的气候灾害多种多样(Chen, et al, 2019; Li, et al, 2019),大范围应用时需要辨别致灾因子。因此,有必要在单一指标的基础上,从气象干旱和土壤干旱以及植被对干旱的响应出发,整合生物环境信息与地面气象观测数据构建综合干旱指标(Sepulcre-Canto, et al, 2012; Hao, et al, 2016; Zhang, et al, 2019),以便较好地监测干旱发生、发展及其对农业的影响。

计算干旱指标的数据是决定干旱监测精准度的另一因素。研究初期,气象站点观测数据是干旱指数计算的主要信息来源(McKee, et al, 1993)。20世纪90年代以后,随着遥感技术发展(范锦龙等, 2014),基于卫星遥感土壤湿度、植被长势、冠气温差等信息的干旱监测指标逐渐得到应用,极大地提高了干旱监测结果的空间范围和分辨率(周磊等, 2015)。同时,陆面模式因其对陆面要素历史的反演优势,使得模式输出信息为回算干旱历史提供了重要的数据支撑(Li, et al, 2015)。陆面模式与遥感信息结合的数据同化技术兼具遥感监测和模型模拟优点,减小了陆面模式模拟结果的不确定性,提升了观测数据的时、空分辨率(Shi, et al, 2011),弥补了卫星遥感对一些关键环境变量监测的不足,如一般卫星仅能监测地表土壤湿度,无法监测深层土壤湿度,使得陆面同化资料在干旱监测研究中具有较大的应用价值(Xia, et al, 2019)。

东北地区是中国粮食主产区,粮食生产受到不同时间尺度的干旱灾害威胁(蔡菁菁等, 2013),

干旱脆弱性强、风险高。因此,本研究以东北地区为研究对象,拟在水分胁迫导致作物长势变差和产量降低的科学认识基础上(白莉萍等, 2004; 姜鹏等, 2013; 黄岩等, 2019),以气象干旱、土壤干旱和植被干旱存在传导和响应关系为依据(Xu, et al, 2019; Bae, et al, 2019),整合中国国家气象观测站、中国气象局陆面数据同化系统土壤相对湿度和MODIS叶面积指数等多源数据信息,构建反映干旱及其对农业影响的综合监测指标,并在站点和区域尺度上验证监测效果,以期提升干旱发生、发展及其对农业影响监测评估能力提供技术方案。

2 研究方法

2.1 综合干旱指数构建

以表征气象干旱的标准化降水蒸散指数(SPEI)(Vicente-Serrano, et al, 2010; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2017)、表征土壤干旱的土壤湿度百分位(SMP)和表征植被干旱的叶面积指数百分位(LAIP)(Kogan, 1995)为基础,构建综合干旱指数(CDI)。具体方法如下:

(a) 标准化降水蒸散指数

90 d时间尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI-90)计算参考国家标准《气象干旱等级》(GB/T 20481—2017)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2017),将标准中使用的月尺度资料精细到日尺度观测数据,使用逐日滚动90 d累计降水和蒸散差作为计算标准化降水蒸散指数的基础。考虑到气温资料观测站点多且容易获得,有利于实时干旱监测业务应用,标准化降水蒸散指数中的潜在蒸散量计算采用桑斯维特方法。

(b) 土壤湿度百分位

百分位数法是一种构建干旱指数的方法,具有较广泛的应用。Kogan(1995)使用百分位数法构建了基于植被指数的干旱监测指标,美国干旱监测系统使用土壤湿度的百分位作为干旱监测指标(Svoboda, et al, 2002)。本研究以土壤相对湿度为基础,土壤湿度百分位的计算方法如下

$$SMP_i = \frac{SM_i - SM_{i_{\min}}}{SM_{i_{\max}} - SM_{i_{\min}}} \times 100 \quad (1)$$

式中, SMP_i 为某站第*i*天的土壤相对湿度百分位, SM_i 为某站第*i*天的土壤相对湿度, $SM_{i_{\min}}$ 为某站多年第*i*天的土壤相对湿度最小值, $SM_{i_{\max}}$ 为某站多年

第*i*天的土壤相对湿度最大值。

(c) 叶面积指数百分位

以植被叶面积指数为基础,叶面积指数百分位的计算方法如下(Kogan, 1995)

$$LAIP_i = \frac{LAI_i - LAI_{i_{\min}}}{LAI_{i_{\max}} - LAI_{i_{\min}}} \times 100 \quad (2)$$

式中, $LAIP_i$ 为某站第*i*天的叶面积指数百分位, LAI_i 为某站第*i*天的叶面积指数, $LAI_{i_{\min}}$ 为某站多年第*i*天的叶面积指数最小值, $LAI_{i_{\max}}$ 为某站多年第*i*天的叶面积指数最大值。

(d) 综合干旱指数(CDI)

构建综合干旱指数的基本依据是水分胁迫将导致作物产量降低,并且,气象、土壤、作物干旱等不同类型干旱指标存在响应关系。在此前提下,干旱影响作物产量形成的过程包括降水胁迫(阶段1:气象干旱)引起土壤水分胁迫(阶段2:土壤干旱),进而导致作物长势变差(阶段3:植被干旱)和产量降低等3个阶段。因此,构建综合干旱指数识别干旱发生、发展的各阶段,可为发布准确的干旱监测、预警信息及采取针对性的应对措施提供依据。

综合干旱指数针对不同干旱发展阶段采用三级预警标准:轻旱、中旱和重旱。轻旱代表降水偏少,气象干旱开始出现,仅用标准化降水蒸散指数表征;中旱代表气象干旱进一步发展,影响土壤水分平衡,导致土壤水分偏低,用标准化降水蒸散指数和土壤湿度百分位共同表征;重旱代表随着气象干旱发展,土壤水分胁迫增强,作物生长受到实质性影响,植被长势变差,用标准化降水蒸散指数、土壤湿度百分位和叶面积指数百分位共同表征。重旱的表征方式,限定了监测到的作物长势变差是由干旱胁迫引起的,排除了其他气象灾害的影响。国家标准《气象干旱等级》(GB/T 20481—2017)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2017)将-1作为中旱阈值,标准化降水蒸散指数低于-1时为气象干旱中旱以上等级;Svoboda等(2002)将土壤湿度百分位20%作为中旱阈值,当百分位低于20%时为土壤干旱中旱以上等级。因此,在分级判别旱情时,采用-1、20%和20%作为气象干旱标准化降水蒸散指数、土壤干旱土壤湿度百分位和植被干旱叶面积指数百分位的致灾阈值,综合干旱指数的分级标准如表1。

表 1 综合干旱指数分级标准及意义
Table 1 Grades of CDI and their implications

等级	定义			干旱特征、农业形势及行动建议 C: 特征; S: 形势; A: 行动
	SPEI-90	SMP(%)	LAIP(%)	
轻旱	<-1			C: 监测到气象干旱; S: 农业干旱可能发生; A: 关注形势发展, 准备采取措施
中旱	<-1	<20		C: 气象干旱进一步引起土壤干旱; S: 农业干旱极可能发生; A: 采取降低干旱暴露度的积极策略
重旱	<-1	<20	<20	C: 气象和土壤干旱影响作物生长; S: 干旱影响产量形成; A: 加强响应, 关注干旱形势发展

2.2 综合干旱指数干旱监测结果评估与应用

根据各代表站干旱指数与玉米产量距平的相关考察综合干旱指数监测结果对玉米产量的影响。干旱指数和产量距平计算方法如下

$$I_D = n_1 \times 1 + n_2 \times 2 + n_3 \times 3 \quad (3)$$

式中, I_D 为玉米生育期内综合干旱指数的干旱综合强度; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为玉米生育期内轻旱、中旱和重旱等级次数。该综合干旱强度计算方法考虑了不同等级干旱发生的频次及其影响大小。

$$\text{产量距平} = \text{当年产量} - 5\text{年平均产量} \quad (4)$$

分析干旱综合强度与产量距平关系时, 剔除作物生长季 4—9 月累计降水量超过 1961—2020 年 1 个标准差的洪涝年份, 以减少洪涝造成的产量变化对分析结果的影响。

分气候区绘制选取的典型站综合干旱指数发生等级与产量关系, 根据此关系评估综合干旱指数对干旱发生发展及玉米产量影响的监测效果, 进行站点综合干旱指数监测结果与产量关系的进一步分析。

采用最邻近插值算法得到的 10 km×10 km 空间分辨率综合干旱指数, 进行东北区域 2009 年夏季一次干旱过程监测试验, 监测频率为 1 次/(8 d)。

2.3 数据来源

研究区域为中国东北地区, 属温带湿润、半湿润大陆性季风气候, 自西向东年降水量为 300 mm 到 1000 mm; 最冷月(1 月)平均气温 15.5℃, 最暖月(7 月)平均气温 22.6℃。东北地区是中国重要的粮食产区, 主要粮食作物为玉米、水稻、大豆等, 主要作物生长季为 4—9 月。

研究数据包括常规气象、土壤湿度和植被叶面积指数等。气象数据为中国气象局在东北地区的 178 个气象观测站降水、气温日值(1961—2016 年);

土壤相对湿度来自中国气象局陆面数据同化系统, 时间分辨率为天、空间分辨率为 0.0625°×0.0625°的 0—10 cm 数据(2008—2016 年), 该数据集利用多种来源地面、卫星等观测资料, 采用多重网格变分同化(STMAS)、最优插值(OI)、概率密度函数匹配(CDF)、物理反演、地形校正等技术研制而成, 在中国区域质量优于国际同类产品, 且时、空分辨率高; 遥感数据为中分辨率成像光谱仪(MODIS)叶面积指数 1 次/(8 d)、500 m×500 m 空间尺度数据(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。根据上述数据计算相应的标准化降水蒸散指数、土壤湿度百分位和叶面积指数百分位后, 采用 R 语言中的最邻近插值算法(nearest neighbor, ngb)统一插值到 10 km×10 km 空间分辨率, 根据表 1 中的分级标准进行联合逐级判别确定综合干旱指数。

以年降雨量 600 mm 作为湿润和半湿润地区分界线, 依托中国气象局农业气象观测站网, 选取长岭、榆树、新民和建昌作为温带半湿润到半干旱地区的代表站, 海城和瓦房店作为温带湿润地区的代表站, 使用这 6 个农业气象观测站的玉米产量(2008—2012 年)作为干旱对农业影响监测效果的评价依据(图 1)。

3 结果分析

3.1 标准化降水蒸散指数、土壤湿度百分位、叶面积指数百分位和综合干旱指数的发展与响应关系

本研究对 6 个采样站 2009 年标准化降水蒸散指数、土壤湿度百分位、叶面积指数百分位和综合干旱指数的发展与响应关系进行了分析(图略)。以吉林省长岭站(图 2)为例: 当标准化降水蒸散指数(图 2a)大于等于-1 时, 综合干旱指数(图 2d)显示无旱(如 2009 年 3 月和 4 月 23 日到 5 月 17 日),

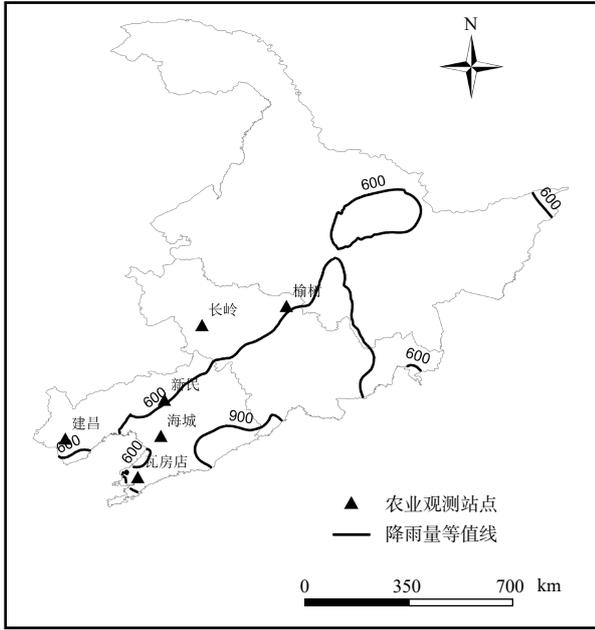


图 1 研究区域及采样站点

Fig. 1 Study area and experimental stations

小于-1时,显示轻旱(如2009年6月),此时土壤墒情良好,植被生长未受到明显影响;当标准化降水蒸散指数小于-1,土壤湿度百分位小于20%时,综

合干旱指数显示中旱(如2009年7月上、中旬),此时土壤墒情下降明显,但植被生长还未受到明显影响;当标准化降水蒸散指数小于-1,土壤湿度百分位小于20%,叶面积指数百分位小于20%时,综合干旱指数显示重旱(如2009年8月上、中旬),此时土壤墒情下降明显,植被生长受到影响。

8月底至9月初,标准化降水蒸散指数小于-2.0,根据《气象干旱等级》属于特旱。此时由于持续的气象干旱,人们灌溉浇水抗旱,使土壤湿度上升,植被生长恢复,土壤湿度百分位和叶面积指数百分位高于20%,综合干旱指数判定结果为轻旱,即土壤墒情尚可,作物生长没有受到明显影响,给出了比用单一的标准化降水蒸散指数更切合地表土壤和植被旱情的判定结果。

3.2 基于综合干旱指数的干旱发展及其对农业影响监测站点结果评估

在东北温带半湿润和半干旱气候区,综合干旱指数监测到的干旱强度与玉米产量以负相关为主。4个试验站中,长岭、榆树和建昌为负相关,其中建昌相关系数为-0.99,达显著水平;新民呈弱的正相关。在东北温带湿润气候区的2个试验站海

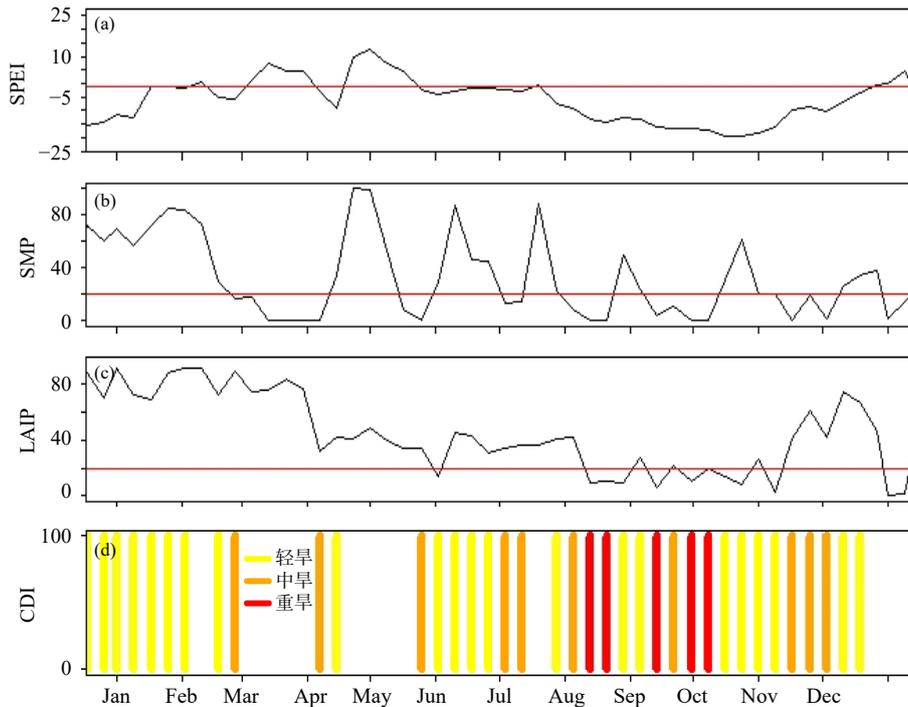


图 2 2009年长岭站标准化降水蒸散指数(a)、土壤湿度百分位(b)、叶面积指数百分位(c)和综合干旱指数(d)的发展与响应关系

Fig. 2 Development and response relationships between SPEI (a), SMP (b), LAIP (c) and CDI (d) at Changling station

城、瓦房店,综合干旱指数监测结果与产量距平为正相关,但没有达到显著水平(表2)。

在东北温带半湿润和半干旱气候区的4个试验站点,2009年长岭、榆树和建昌3个站点在玉米抽雄、乳熟期的8月呈中旱至重旱等级,玉米产量比其他非干旱年份明显下降(图3a、b和d);建昌站在春玉米乳熟灌浆期的8月下旬至9月中旬连续近20 d重旱,导致产量显著降低。2010年新民、建昌玉米产量出现降低(图3c、d),但综合干旱指数并未监测到玉米生长季内出现中旱以上等

级干旱;气象灾害分析表明,新民、建昌在2010年玉米生长季降水异常偏多,日照时数偏少(图略),造成洪涝灾害和寡照天气,是引起作物产量降低的主要原因。榆树站2008年6月17日综合干旱指数监测到重旱,这一时期玉米处于七叶至拔节的生育前期,未造成明显减产。在上述4站其他年份产量稳定,没有监测到综合干旱指数重旱等级(图3)。

在干旱灾害相对较少的东北温带湿润气候区的海城、瓦房店2个试验站点,2008—2012年玉米

表2 6个试验站综合干旱指数强度与产量距平相关关系

Table 2 Correlations between drought comprehensive intensity of CDI and yield anomaly at six experimental sites

站名	长岭	榆树	新民	建昌	海城	瓦房店
相关系数	-0.66	-0.54	0.19	-0.99*	0.95	0.16

注: *表示达到0.05显著水平。

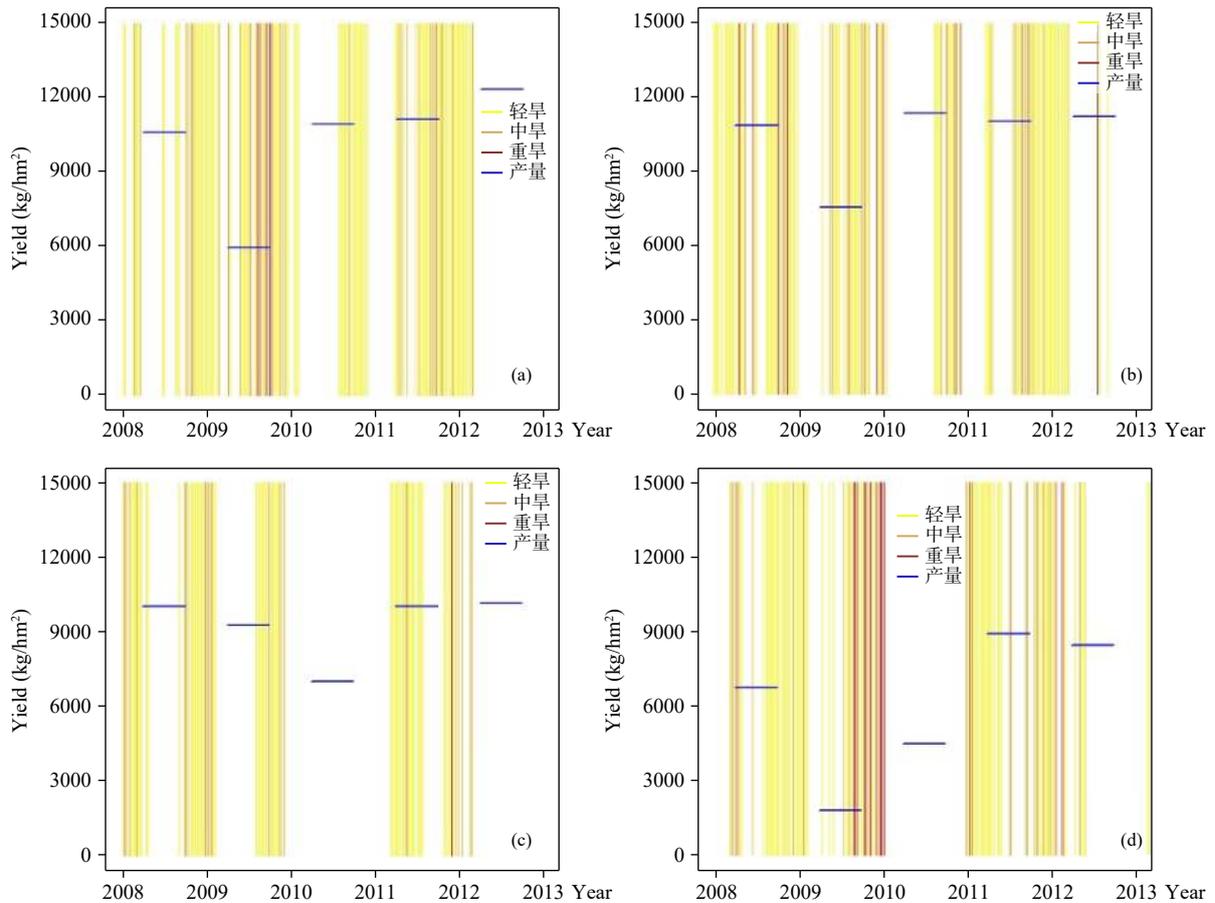


图3 东北半湿润、半干旱气候区试验站点基于综合干旱指数的干旱发生发展与玉米产量监测 (a.长岭, b.榆树, c.新民, d.建昌)

Fig. 3 Drought development and maize yield monitoring based on CDI at experimental stations in semi humid and semi-arid climate regions of Northeast China (a. Changling, b. Yushu, c. Xinmin, d. Jianchang)

主要生长季的4—9月,仅瓦房店2008年5月出现中旱,但并未造成春玉米明显减产;海城2010年受多雨和寡照天气影响玉米出现产量降低现象,其他

年份较少出现中旱以上等级干旱,玉米产量无显著差异(图4),其监测结果符合旱情记录(中国气象局,2009)。

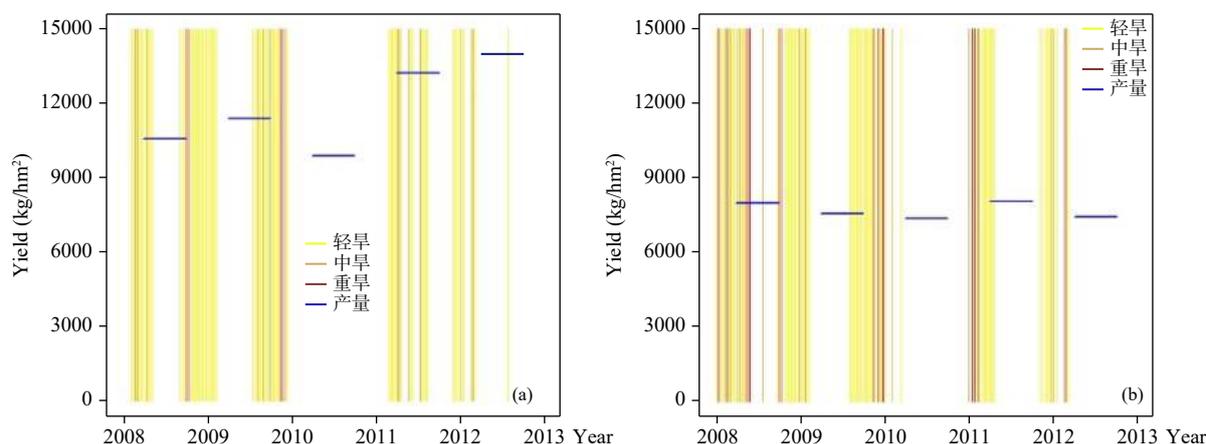


图4 东北湿润气候区试验站(a.海城, b.瓦房店)基于综合干旱指数的干旱发生、发展与玉米产量监测

Fig. 4 Drought development and maize yield monitoring based on CDI at experimental stations in humid climate region of Northeast China (a. Haicheng, b. Wafangdian)

3.3 基于综合干旱指数的干旱发展及其农业影响区域过程监测

根据基于综合干旱指数的1次/(8 d)监测结果(图5),2009年7月底至8月,辽宁、吉林等地出现了区域性干旱过程。其中,8月13日,辽宁西部、吉林西部出现重旱,干旱使植被长势变差;辽宁中部、吉林中部出现中旱,土壤墒情变差,但还没有对植被产生明显不利影响;吉林东部等地出现轻旱,水分收支不平衡,但土壤墒情尚可,对植被生长没有明显不利影响。监测结果与基于气象干旱指数的干旱事件报道一致(中国气象局,2009;肖风劲等,2009),并且进一步评估了不同干旱发展阶段对土壤、植被的影响。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究从气象干旱和土壤干旱以及植被对干旱的响应出发,整合中国国家气象观测站、中国气象局陆面数据同化系统土壤湿度(0.0625°×0.0625°)和MODIS叶面积指数(500 m×500 m)等多源数据信息,构建的基于气象干旱指数(标准化降水蒸散指数)、土壤干旱指数(土壤湿度百分位)和植被干旱指数(叶面积指数百分位)的综合干旱指数能够有效克服单一气象干旱指数不能准确反映农业旱

情和单一植被干旱指数会将其他灾害引起的植被长势变差误判为干旱的不足,反映灌溉对干旱的影响,使其能够监测评估干旱发生发展及其对农业的影响,实现了在东北区域10 km×10 km分辨率上的干旱分级监测,生物物理意义明确,指导实践作用强。本研究构建的综合干旱指数在干旱发生发展及其对农业乃至植被影响的监测、评估和预测中具有应用前景。

4.2 讨论

本研究从气象干旱和土壤干旱以及植被对干旱的响应出发,构建的基于气象干旱指数(标准化降水蒸散指数)、土壤干旱指数(土壤湿度百分位)和植被干旱指数(叶面积指数百分位)的综合干旱指数能够根据气象、土壤和植被干旱指标之间的响应和阈值判定干旱发生发展等级,并表征干旱发生发展及其对农业的影响。综合干旱指数能够克服单一气象干旱指数监测结果不能准确反映农业旱情的现象。标准化降水蒸散指数指示严重干旱时,并不必然发生土壤干旱和植被受灾。这种现象的可能解释是,随着气象干旱发展,人们意识到干旱可能对作物生长产生不利影响,进而采取了灌溉等应对措施。在这种情况下,单一气象干旱指标的监测结果并不能准确反映农业旱情(范锦龙等,2014)。综合干旱指数也能够克服单一植被叶面积指数百

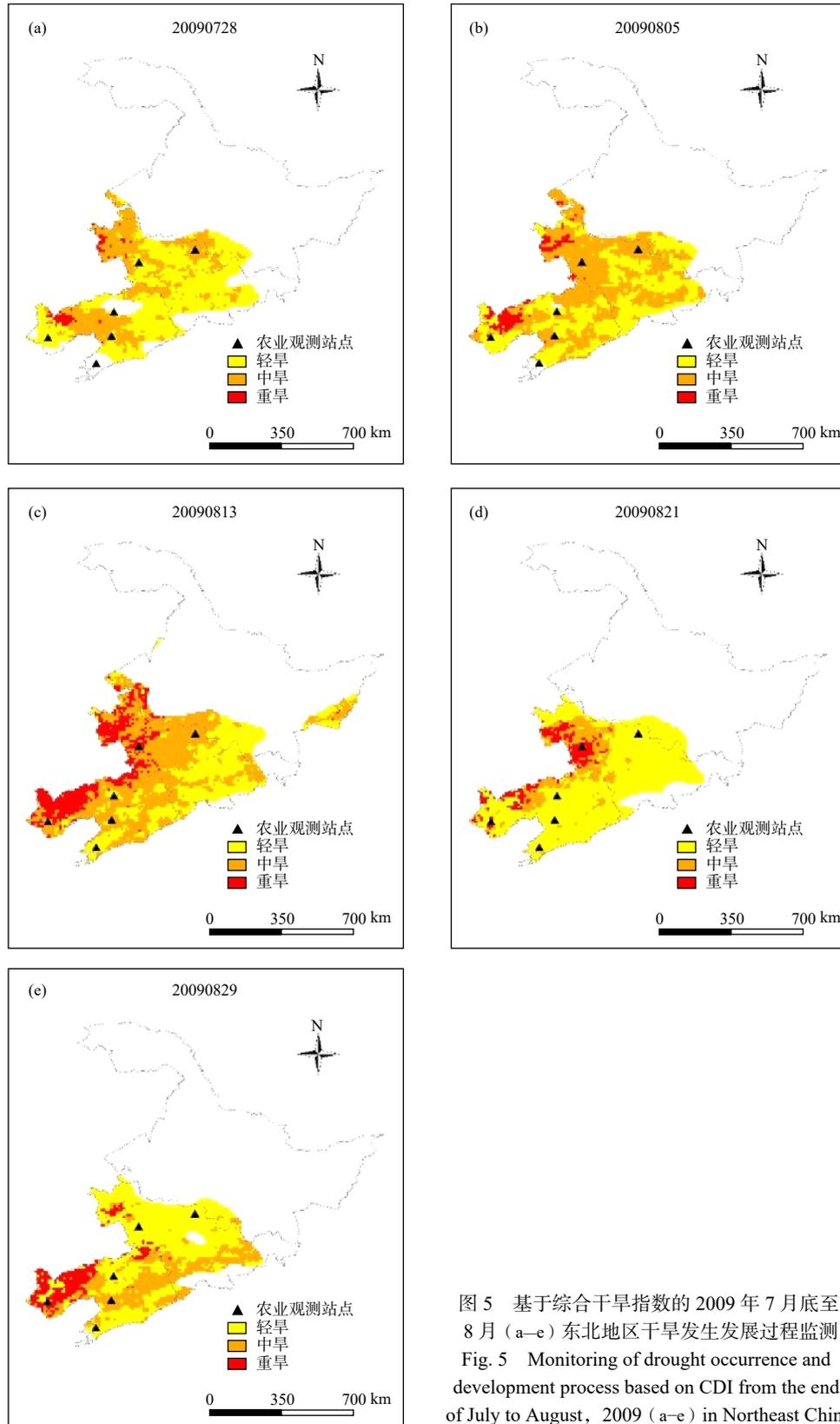


图5 基于综合干旱指数的2009年7月底至8月(a-e)东北地区干旱发生发展过程监测
 Fig. 5 Monitoring of drought occurrence and development process based on CDI from the end of July to August, 2009 (a-e) in Northeast China

分位将其他灾害引起的植被长势变差误判为旱灾的不足。有研究表明,除水分不足胁迫引起的干旱

使植被长势变差外,其他气候灾害也能引起叶面积指数降低,如降水过多引发的洪涝灾害造成作物长

势变差等(Li, et al, 2019)。将标准化降水蒸散指数、土壤湿度百分位与叶面积指数百分位结合,则约束了基于植被指数监测到的干旱主要是由于水分不足胁迫引起,使综合干旱指数的干旱监测结果较为可信。

在温带半湿润、半干旱气候区综合干旱指数监测的干旱造成玉米不同程度减产,干旱综合强度与玉米产量多呈负相关,验证了干旱造成作物长势变差和产量降低的研究结果(白莉萍等, 2004; 姜鹏等, 2013; 黄岩等, 2019)。但干旱发生时的玉米生育阶段和持续时间不同对产量影响程度不同,如2008年榆树站春玉米七叶至拔节期发生短时重旱没有对产量产生显著影响,2009年建昌站在春玉米乳熟灌浆期的8月下旬至9月中旬连续近20 d重旱导致产量显著降低。在湿润气候区,两个试验站(海城、瓦房店)综合干旱指数与产量距平呈正相关,一方面可能与作物干旱存在致灾阈值有关(陈家宙等, 2007; 李学文等, 2018; Ma, et al, 2018),当干旱程度没有达到致灾阈值时不会引起作物生长指标显著变化及产量降低,也不会造成干旱灾害损失,甚至一定时期适当的水分亏缺能够提高作物对干旱的适应能力,进而提高产量和水分利用效率(山仑等, 1991);另一方面,湿润气候区雨量充沛,在没有达到干旱致灾阈值的相对少雨时期,气温较高,日照时数较长,气候条件利于作物生长和产量提升。

本研究立足中国气象干旱监测业务发展现状及可用的高质量陆面模式同化土壤湿度、卫星遥感MODIS叶面积指数资料,发展了Sepulcre-Canto(2012)提出的综合干旱指数。研究中使用逐日计算90 d尺度的标准化降水蒸散指数代替标准化降水指数,考虑了温度变化对气象干旱评估结果的影响(Vicente-Serrano, et al, 2010);使用土壤湿度数据代替土壤水势,并引入中国气象局陆面数据同化系统资料代替水文模式直接输出结果,使综合干旱指数更通用,数据源质量更好(Shi, et al, 2011; 朱智等, 2014);使用叶面积指数代替光合有效辐射吸收比率,与现代气候模式输出预测要素保持一致(周文艳等, 2018),使综合干旱指数不仅可用于干旱监测,而且在干旱预测中也具有应用前景。构建综合干旱指数时使用的植被叶面积指数具有表征植被长势特征的普适性,使得该指数在干旱对植被长势

影响监测评估中也具有应用价值。

本研究受所使用的中国气象局陆面数据同化系统土壤湿度和MODIS叶面积指数时间序列长度的制约,可能对监测结果有一定影响。玉米作物受人为管理影响,在成熟收获后,叶面积指数会急剧下降(翟治芬等, 2012),在实际使用综合干旱指数时需要加以注意。本研究采用已有方法确定综合干旱指数各子指标干旱阈值,属于静态阈值,没有考虑植被对干旱响应过程的复杂性及自身的适应恢复能力(Chaves, et al, 2003; Ma, et al, 2018)。

参考文献

- 白莉萍, 隋方功, 孙朝晖等. 2004. 土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响. *生态学报*, 24(7): 1556-1560. Bai L P, Sui F G, Sun Z H, et al. 2004. Effects of soil water stress on morphological development and yield of maize. *Acta Ecol Sinica*, 24(7): 1556-1560 (in Chinese)
- 蔡菁菁, 王春乙, 张继权. 2013. 东北地区玉米不同生长阶段干旱冷害危险性评价. *气象学报*, 71(5): 976-986. Cai J J, Wang C Y, Zhang J Q. 2013. An assessment of the drought disaster and chilling injury hazard for maize in the various growth stages in Northeast China. *Acta Meteor Sinica*, 71(5): 976-986 (in Chinese)
- 陈家宙, 王石, 张丽丽等. 2007. 玉米对持续干旱的反应及红壤干旱阈值. *中国农业科学*, 40(3): 532-539. Chen J Z, Wang S, Zhang L L, et al. 2007. Response of maize to progressive drought and red soil's drought threshold. *Scientia Agric Sinica*, 40(3): 532-539 (in Chinese)
- 范锦龙, 张明伟, 曹广真等. 2014. 全球干旱卫星监测计划. *气象科技进展*, 4(5): 54-57. Fan J L, Zhang M W, Cao G Z, et al. 2014. Global drought monitoring initiative with satellite data. *Adv Meteor Sci Technol*, 4(5): 54-57 (in Chinese)
- 黄岩, 李晶, 王莹等. 2019. 不同生育期干旱对玉米生长及产量的影响模拟. *农业灾害研究*, 9(6): 47-49, 92. Huang Y, Li J, Wang Y, et al. 2019. Impact simulation of drought on maize growth and yield in different growth stages. *J Agric Catastrophol*, 9(6): 47-49, 92 (in Chinese)
- 黄中艳, 钟楚, 张明达等. 2013. 若干干旱指标在云南大旱年农业干旱监测评估中的适用性分析. *中国农业气象*, 34(2): 221-228. Huang Z Y, Zhong C, Zhang M D, et al. 2013. Applicability analysis for several drought indices to agricultural drought evaluation during the severe drought year in Yunnan. *Chinese J Agrometeorol*, 34(2): 221-228 (in Chinese)
- 姜鹏, 李曼华, 薛晓萍等. 2013. 不同时期干旱对玉米生长发育及产量的影响. *中国农学通报*, 29(36): 232-235. Jiang P, Li M H, Xue X P, et al. 2013. Effects of drought on the growth and yield of maize at different stage. *Chinese Agric Sci Bull*, 29(36): 232-235 (in Chinese)
- 李学文, 高超, 尹周祥等. 2018. 淮河流域上游地区夏玉米生长降水关键期内旱涝致灾降水阈值研究. *气象科学*, 38(4): 477-488. Li X W, Gao C, Yin Z X, et al. 2018. Study on precipitation thresholds of drought and flood

- disasters in the key period of precipitation for summer maize in the upper reaches of the Huaihe River. *J Meteor Sci*, 38(4): 477-488 (in Chinese)
- 山仑, 徐萌. 1991. 节水农业及其生理生态基础. *应用生态学报*, 2(1): 70-76. Shan L, Xu M. 1991. Water-saving agriculture and its physiological bases. *Chinese J Appl Ecol*, 2(1): 70-76 (in Chinese)
- 肖风劲, 赵东, 尹红等. 2009. 东北干旱严重 南方高温持续. *气象*, 35(11): 156-157. Xiao F J, Zhao D, Yin H, et al. 2009. Serious drought in Northeast of China continuous high temperature in South China. *Meteor Mon*, 35(11): 156-157 (in Chinese)
- 翟治芬, 胡玮, 严昌荣等. 2012. 中国玉米生育期变化及其影响因子研究. *中国农业科学*, 45(22): 4587-4603. Zhai Z F, Hu W, Yan C R, et al. 2012. Change of maize growth period and its impact factor in China. *Scientia Agric Sinica*, 45(22): 4587-4603 (in Chinese)
- 张强, 韩兰英, 王胜等. 2018. 影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征. *科学通报*, 63(23): 2378-2392. Zhang Q, Han L Y, Wang S, et al. 2018. The affected characteristic of key period's climate factor on the agricultural disaster loss caused by drought in the South China. *Chinese Sci Bull*, 63(23): 2378-2392 (in Chinese)
- 赵晨, 罗毅, 袁国富等. 2001. 作物水分胁迫指数与土壤含水量关系探讨. *中国生态农业学报*, 9(1): 34-36. Zhao C, Luo Y, Yuan G F, et al. 2001. Primary investigation on the relationship between the crop water stress index and the soil moisture. *Chinese J Eco-Agric*, 9(1): 34-36 (in Chinese)
- 中国气象局. 2009. 中国气象灾害年鉴 2009. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2009. China Meteorological Disaster Yearbook 2009. Beijing: Meteorology Press (in Chinese)
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2016. 农业干旱等级 (GB/T 32136-2015). 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. 2016. Grade of Agricultural Drought (GB/T 32136-2015). Beijing: China Standard Press (in Chinese)
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2017. 气象干旱等级 (GB/T 20481-2017). 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. 2017. Grades of Meteorological Drought (GB/T 20481-2017). Beijing: China Standard Press (in Chinese)
- 周磊, 武建军, 张洁. 2015. 以遥感为基础的干旱监测方法研究进展. *地理科学*, 35(5): 630-636. Zhou L, Wu J J, Zhang J. 2015. Remote sensing-based drought monitoring approach and research progress. *Scientia Geogr Sinica*, 35(5): 630-636 (in Chinese)
- 周文艳, 罗勇, 李伟平等. 2018. 陆面模式中不同植被辐射模式的对比. *科学通报*, 63(26): 2772-2784. Zhou W Y, Luo Y, Li W P, et al. 2018. Comparative studies of different radiation schemes within vegetation in land model. *Chinese Sci Bull*, 63(26): 2772-2784 (in Chinese)
- 朱智, 师春香. 2014. 中国气象局陆面同化系统和全球陆面同化系统对中国区域土壤湿度的模拟与评估. *科学技术与工程*, 14(32): 138-144. Zhu Z, Shi C X. 2014. Simulation and evaluation of CLDAS and GLDAS soil moisture data in China. *Sci Technol Eng*, 14(32): 138-144 (in Chinese)
- 邹旭恺, 张强. 2008. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. *应用气象学报*, 19(6): 679-687. Zou X K, Zhang Q. 2008. Preliminary studies on variations in droughts over China during past 50 years. *J Appl Meteor Sci*, 19(6): 679-687 (in Chinese)
- Bae H, Ji H, Lim Y J, et al. 2019. Characteristics of drought propagation in South Korea: Relationship between meteorological, agricultural, and hydrological droughts. *Nat Hazards*, 99(1): 1-16
- Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. 2003. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Funct Plant Biol*, 30(3): 239-264
- Chen H L, Liang Q H, Liang Z Y, et al. 2019. Remote-sensing disturbance detection index to identify spatio-temporal varying flood impact on crop production. *Agric Forest Meteor*, 269-270: 180-191
- Hao Z C, Hao F H, Singh V P, et al. 2016. A theoretical drought classification method for the multivariate drought index based on distribution properties of standardized drought indices. *Adv Water Res*, 92: 240-247
- Hao Z C, Yuan X, Xia Y L, et al. 2017. An overview of drought monitoring and prediction systems at regional and global scales. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(9): 1879-1896
- Huang J L, Zhai J Q, Jiang T, et al. 2018. Analysis of future drought characteristics in China using the regional climate model CCLM. *Climate Dyn*, 50(1-2): 507-525
- Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. 1988. A reexamination of the crop water stress index. *Irrig Sci*, 9(4): 309-317
- Kogan F N. 1995. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bull Amer Meteor Soc*, 76(5): 655-668
- Li M X, Ma Z G. 2015. Soil moisture drought detection and multi-temporal variability across China. *Sci China Earth Sci*, 58(10): 1798-1813
- Li Y, Guan K Y, Schnitkey G D, et al. 2019. Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States. *Glob Change Biol*, 25(7): 2325-2337
- Ma X Y, He Q J, Zhou G S. 2018. Sequence of changes in maize responding to soil water deficit and related critical thresholds. *Front Plant Sci*, 9: 511
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, California: American Meteorological Society, 179-184
- Sepulcre-Canto G, Horion S, Singleton A, et al. 2012. Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 12(11): 3519-3531
- Shi C X, Xie Z H, Qian H, et al. 2011. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data. *Sci China Earth Sci*, 54(9): 1430-1440
- Su B D, Huang J L, Fischer T, et al. 2018. Drought losses in China might

- double between the 1.5°C and 2.0°C warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115(42): 10600-10605
- Svoboda M, LeComte D, Hayes M, et al. 2002. The drought monitor. *Bull Amer Meteor Soc*, 83(8): 1181-1190
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J Climate*, 23(7): 1696-1718
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, et al. 2012. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interact*, 16(10): 1-27
- Xia Y L, Hao Z C, Shi C X, et al. 2019. Regional and global land data assimilation systems: Innovations, challenges, and prospects. *J Meteor Res*, 33(2): 159-189
- Xu Y, Zhang X, Wang X, et al. 2019. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: A case study in northern China. *J Hydrol*, 579: 124147
- Zhang L X, Zhou T J. 2015. Drought over East Asia: A review. *J Climate*, 28(8): 3375-3399
- Zhang Q, Yu H Q, Sun P, et al. 2019. Multisource data based agricultural drought monitoring and agricultural loss in China. *Glob Planet Change*, 172: 298-306
- Zou X K, Zhai P M, Zhang Q. 2005. Variations in droughts over China: 1951-2003. *Geophys Res Lett*, 32(4): L04707

欢迎订阅 2021 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年，是由中国气象局主管，中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊，主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创新性的论文；国内外大气科学发展动态的综合评述；新观点、新理论、新技术、新方法的介绍；研究工作简报及重要学术活动报道；优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百种重点学术期刊”奖；2013 年获“中国出版政府奖期刊奖提名奖”；2013、2015、2017 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”；2007—2011 年和 2015—2017 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助，2008、2011、2014、2017、2020 年被评为“中国精品科技期刊”；2003—2007、2009、2016、2019 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”；2012、2013、2014、2015 年获评“中国最具国际影响力学术期刊”；2016、2017、2018、2019、2020 年获评“中国国际影响力优秀学术期刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台，一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展，服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊，国内外公开发行。

2021 年全年共 6 期，定价 240 元/年。

邮发代号：2-368（国内） BM329（国际）

通讯地址：北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会《气象学报》编辑部

邮政编码：100081

联系电话：010-68406942，68408571（传真）

邮 箱：cmsqxxb@263.net, qxxb@cms1924.org

期刊主页：http://qxxb.ijournals.cn/qxxb_cn

开户银行：北京建行白石桥支行

户 名：中国气象学会

帐 号：11001028600059261046