第32卷第5期2020年10月

2020, 32 (5): 11-26

Vol.32, No.5 Oct., 2020

# 中国黄淮海冬麦区关键生育期——干热风关联特征及 其时空变化分析\*

张璐云<sup>1</sup>, 王 帅<sup>1</sup>, 肖风劲<sup>2</sup>, 王文晴<sup>1</sup>, 陈 晋<sup>1,3,4</sup>, 崔喜红<sup>1,3,4</sup>\*

(1. 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院,北京100875; 2. 中国气象局国家气候中心,北京,100081; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京100875; 4. 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心,北京100875)

摘要:【目的】结合冬小麦的生育期,分析其在不同生育期內遭遇干热风的时空变化特征。【方法】文章利用黄淮海冬麦区地面气象台站记录的逐日气温资料、农业气象台站记录的地面物候资料以及土壤水分数据,提取出 1993—2016 年各气象站点发生在抽穗扬花期、灌浆前期以及灌浆后期的干热风日。设计干热风强度指标 k,使用核密度分析方法,分析冬小麦在不同生育期內遭遇干热风的时空变化规律。最后结合 RCP4.5 和 RCP8.5 的排放情景下模拟的温度数据,分别预测黄淮海冬麦区在 2030 年、2050 年干热风发生强度的可能趋势。【结果】(1) 1993—2016 年不同生育期内轻、中、重度年累积干热风日均呈增加趋势,其中尤以中度干热风的增加趋势最为显著。(2) 重度干热风发生在灌浆后期的比例明显大于轻、中度干热风。随着干热风严重程度的增加,其在生育期内分布比例的年际差异逐渐增大。(3) 不同生育期内干热风多发区的空间范围变化规律一致,均存在向东、向南扩大的趋势。河北、河南以及山东的交界地区始终是干热风的严重威胁区。(4) 预测结果表明,在 2030 年、2050 年研究区干热风发生强度有增强趋势、多发区范围略有扩大。【结论】1993—2016 年不同生育期内干热风灾害总体表现为增加趋势。预计在 2030 年、2050 年干热风灾害发生强度及影响范围会进一步增强和扩大。应加强对干热风的预警和防御,并在干热风发生后及时采取补救措施。

关键词:气候变化;干热风;冬小麦;关键生育期;时空特征

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20200502

# 0 引言

黄淮海地区是我国冬小麦主产区,冬小麦播种面积和产量约占全国的70%左右<sup>[1]</sup>, 其产量对保障国家粮食安全具有十分重要的意义。干热风是指在小麦扬花灌浆期间出现 的高温、低湿并伴有一定风力的灾害性天气。每年5月中下旬至6月上中旬,北方冷空

收稿日期: 2020-09-22

第一作者简介: 张璐云 (1997—), 硕士研究生。研究方向: 生态遥感。Email: 654534540@qq.com ※ 通信作者简介: 崔喜红 (1975—), 副教授。研究方向: 生态遥感。Email: cuixihong@bnu.edu.cn

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup>基金项目:国家重点研发计划项目"区域尺度气候变化对小麦生产系统的综合影响评价研究"(2017YFD0300201)

气南下,黄淮海地区处在高空槽后脊前的西北气流控制中,低空和地面处在两条锋带之间的反气旋区内,天气晴朗,气温高,空气干燥<sup>[2-3]</sup>,易发生干热风灾害性天气<sup>[4]</sup>。此时冬小麦正值扬花灌浆关键物候期,干热风会使小麦水分代谢失衡,降低小麦光合速率和灌浆速率,进而导致千粒重下降,减产严重。据不完全统计,干热风危害轻的年份,减产 10% 以下,危害重的年份减产 10%~20%,甚至达到 20% 以上<sup>[5]</sup>。

近年来,在气候变暖趋势不断加剧的背景下,干热风发生的频率、强度和空间影响 范围都发生了一定的变化。赵俊芳等分析了50年来黄淮海冬小麦高温低湿型干热风年 平均发生日数与过程次数的时空分布特征,发现中国黄淮海地区冬小麦干热风灾害在1961— 2010年总体呈减少趋势[6]。钱锦霞等分析了1961—2010年黄淮海地区冬小麦生长 后期干热风的发生规律,结果表明:黄淮海大部分区域发生各级干热风均有减少趋 势 [7]。成林等统计分析了河南省高温低湿型干热风灾害的成灾范围和发生频率的变化特 征。结果表明:在 20 世纪 90 年代以后各等级干热风的发生范围与天数均趋于增加 [8]。 邬定荣等分析了近50年以来华北平原各站点的高温低湿型与雨后青枯型干热风日数及其 区域分异规律。结果表明:华北平原干热风日数总体上呈现中部高南北低的分布趋势, 且大部分区域干热风日数呈明显的递减趋势[9]。上述研究虽然对黄淮海冬麦区干热风的 时空分布及其变化趋势进行了有益探讨[10-11],但由于各研究的分析年代和研究区域的差 异,结论并不一致。更为重要的是均未将干热风的发生与冬小麦的生育期结合起来,很 难真正反映出冬小麦在遭遇干热风后受灾风险的变化情况。事实上,干热风对小麦的危 害不仅取决于干热风的发生频率和强度,也与小麦所处的生育阶段密切相关[12-13]。在抽 穗扬花期,干热风会使花药破裂而无法授粉,进而造成不实小穗数增加和穗粒数减少; 在灌浆前期、冬小麦籽粒含水量快速增加并逐渐进入乳熟期、干热风会使小麦灌浆速度 减慢甚至停止灌浆、严重影响淀粉粒形成、造成冬小麦籽实瘦秕、千粒重降低和产量下 降;灌浆后期是小麦干物质积累的重要阶段,干热风会使小麦灌浆期缩短,出现"高温 逼熟"和"青秕"的现象[2],会大大降低干物质的积累。已有研究发现:灌浆期发生 的干热风对小麦的危害大于抽穗扬花期[2]。而干热风发生在灌浆的不同时期,其危害程 度亦有不同。成林等人的研究结果表明:发生在小麦灌浆后期和中期的重度干热风以及 发生在灌浆中期的轻度干热风可分别使小麦千粒重降低 5.4 g, 3.64 g 和 1.78 g, 降幅达 14.5%, 9.7% 和 4.8% [12]。因此, 将干热风的发生与冬小麦关键生育期结合, 进一步探 讨冬小麦在抽穗扬花和灌浆等生育期内干热风的时空变化特征,能够更准确地评估冬小 麦受灾风险的变化情况,对分阶段积极应对全球气候变化带来的影响,以及实现冬小麦 高产稳产,确保国家粮食安全都具有重要意义。

鉴于此,文章以黄淮海冬麦区为主要研究区,采用 2019 年最新发布的《小麦干热风灾害等级》国家标准(QT 82-2019)<sup>[5]</sup>,提取了 1993—2016 年发生的干热风日,并结合冬小麦关键生育期信息,统计分析了升温背景下冬小麦不同生育期内干热风发生的时空变化特征。此外,考虑气候变暖趋势,通过在站点尺度上将现有日最高温数据与未来不同排放情景(RCP4.5,RCP8.5)下模拟出的日最高温数据进行匹配,以预测未来研究区中不同区域遭遇干热风风险的变化。研究结果能够对冬小麦干热风的防灾减灾提供一定

2020年10月-

科学依据,可直接服务于当地农业生产管理。

# 1 研究区域与数据

#### 1.1 研究区概况及数据来源

该文研究区主要为黄淮海冬麦区,包括河南、山东、湖北、安徽、江苏省的全部区域以及陕西、山西、河北省的部分区域(图1)。逐日气象数据来源于中国气象局(http://www.nmic.cn/),包括各个地面气象台站(简称气象站)记录的气温、相对湿度、风向风速等数据集(1951—2016年)。物候数据来源于农业气象台站(简称农气站)人工观测记录的冬小麦关键生育期数据集(1993—2016年)。

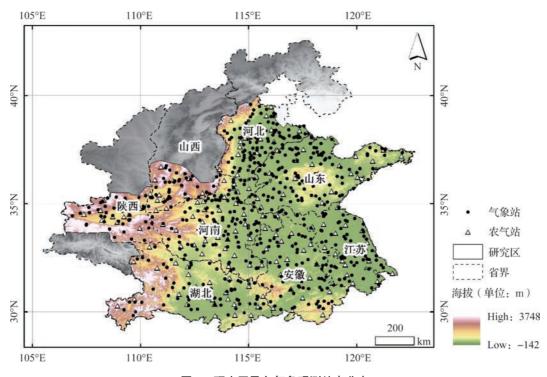


图 1 研究区及各气象观测站点分布

Fig.1 The study area and locations of meteorological and agrometeorological stations

土壤湿度数据采用的是欧空局发布的长时间序列(1978 至今)的土壤湿度产品(ESA CCI SM)<sup>[14-16]</sup>。ESA CCI 土壤水分数据产品包括主动数据集、被动数据集和主被动融合数据集 3 种产品。主动数据集来自 AMI-WS 和 ASCAT(Metop-A 和 Metop-B),被动数据集来自 SMMR、SSM/I、TMI、AMSR-E、WindSat、AMSR 2 和 SMOS,融合数据集合并了以上 10 个主动和被动数据集。该系列数据自发布以来就受到了广泛关注,并在全球多个地区进行了有效性验证与应用<sup>[17]</sup>。相关研究表明,主动数据集更适用于植被密集地区,被动数据集更适用于干旱、半干旱地区,融合数据集更适合大尺度地区的应用研究<sup>[18]</sup>。因研究区覆盖黄淮海区域,范围较大,因此使用普适性更强的融合数据。采用

v04.4 版本数据,时间为1993—2016年,时间分辨率为日,空间分辨率为0.25°×0.25°。 提取干热风日过程中,可在影像上提取出气象站点对应的栅格值即土壤湿度用于后续计算。

模拟 2030 年、2050 年研究区在两种排放情景下(RCP4.5、RCP8.5)的逐日最高温度时,使用意大利国际理论物理中心研发的区域气候模式 RegCM4<sup>[19]</sup> 动力降尺度模拟输出的逐日最高气温<sup>[20]</sup>。RegCM4 动力降尺度模拟试验分别由 CMIP5 中的 4 个全球气候模式(CSIRO-Mk3.6.0、EC-EARTH、HadGEM2-ES 和 MPI-ESM-MR)的 历 史 试验结果进行驱动,积分时长为 1979—2005 年。模拟的区域为区域气候降尺度协同试验中的东亚区域(CORDEX-EA),水平分辨率为 25 km,垂直层为 18 层,大气层顶气压为 10 hPa<sup>[21-22]</sup>。最后从模拟数据中提取出气象站点的逐日最高温用于后续计算。

为了探究冬小麦不同生育期內遭遇干热风灾害的时空变化特征,该研究根据干热风发生的时间以及冬小麦生长发育的特征,将农气站记录的抽穗期、乳熟期和成熟期3个关键生育期所包含的生长过程划分为3个生育阶段:抽穗扬花期,灌浆前期和灌浆后期。其中抽穗扬花期是指冬小麦从抽穗期开始经历的抽穗、开花和授粉过程,该阶段一般持续10 d 左右<sup>[23]</sup>(该文取10天)。灌浆前期用抽穗扬花期结束至乳熟期结束表示,对应于灌浆开始的水分增加期和乳熟期。灌浆后期用乳熟期结束至成熟期结束来表示,包含面团期和蜡熟期等干物质积累的重要阶段<sup>[23]</sup>。

#### 1.2 小麦干热风灾害等级

该文中干热风的定义及小麦干热风灾害等级的确定均采用 2019 年最新发布的小麦干热风灾害等级国家气象行业标准(QX/T 82-2019)<sup>[5]</sup>。新标准相比于 2007 年发布的旧标准(QX/T 82-2007),考虑到了土壤墒情对小麦干热风的影响,并在灾害分级中增加了中度指标,使得新标准在小麦干热风灾害等级评估预警中的针对性和准确率均有提高。我国小麦干热风灾害类型主要分为高温低湿型、雨后青枯型和旱风型 3 种。其中高温低湿型是华北、黄淮及陕西关中冬麦区干热风的主要类型<sup>[5]</sup>,在小麦开花灌浆阶段均可发生,且发生范围广,会造成小麦大面积干枯逼熟死亡,严重威胁小麦产量。因此,针对黄淮海冬麦区常发生的高温低湿型干热风,该文利用现有的气象和物候观测数据以及土壤湿度产品,提取了 1993—2016 年冬小麦不同生育期内发生的干热风日,并探讨其时空变化规律。研究中采用的干热风日等级指标见表 1,其中 14 时空气相对湿度和 14 时风速分别采用逐日气象数据记录的平均相对湿度和平均风速。

表 1 黄淮海地区冬麦区高温低湿型干热风灾害等级指标
Table 1 High temperature and low humidity type dry-hot wind disaster level indicators in the winter wheat area of the Huang-Huai-Hai region

							0		
20 cm 土壤相对 湿度(%)	轻度			中度			重度		
	日最高气 温(℃)	14 时空 气相对湿 度(%)	14 时风 速 ( m/s )	日最高气 温(℃)	14 时空 气相对湿 度(%)	14 时风 速 ( m/s )	日最高气 温(℃)	14 时空 气相对湿 度(%)	14 时风 速 ( m/s )
<60	≥ 31	≤ 30	≥ 3	≥ 32	≤ 25	≥ 3	≥ 35	≤ 25	≥ 3
≥ 60	≥ 33	≤ 30	≥ 3	≥ 35	≤ 25	≥ 3	≥ 36	≤ 25	≥ 3

### 2 研究方法

#### 2.1 关键生育期提取方法

研究区中气象站数量较多且分布均匀(630个),但不含冬小麦物候期记录,而农气站数量相对较少(156个),但含有冬小麦生育期记录。由于冬小麦关键生育期主要受到积温的控制,且积温与经、纬度和高程之间具有较好的相关性<sup>[24]</sup>,因此,该研究利用156个农气站记录的冬小麦生育期数据,逐年(1993—2016年)建立冬小麦关键生育期与经度、纬度及高程之间的回归模型。通过该模型估计研究区内各气象站所在位置处冬小麦逐年的关键生育期。

#### 2.2 基于线性回归的趋势分析

统计 1993—2016 年各站点每年的累积干热风日,利用线性回归方法分别拟合其年际变化趋势,并检验统计显著性。

$$y = \alpha t + \beta \tag{1}$$

式 (1) 中,t 为年份,y 为年累积小麦干热风日。 $\alpha$  为回归方程的斜率, $\beta$  为方程的截距,可由最小二乘法估计得到。 $\alpha$  值的正负分别表示干热风增加或减小的趋势。

#### 2.3 干热风发生强度指标 k

为了将轻、中、重 3 种程度的干热风结合起来,综合表示不同生育期内干热风带来的影响程度,该文定义了干热风发生强度指标 k,该指标可表示为:

$$k = a_1 \cdot d_1 + a_2 \cdot d_2 + a_3 \cdot d_3 \tag{2}$$

式(2)中,k表示某个生育期内干热风的发生强度, $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 分别表示该生育期内轻、中、重度干热风的发生天数, $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 分别表示发生一次轻、中、重度干热风的相对影响程度。根据小麦干热风灾害等级中不同程度干热风对小麦产量的影响, $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  的值分别取 3、5 和  $7^{[5]}$ 。

#### 2.4 核密度分析

核密度分析用于分析空间聚集趋势,该方法以某个样本点为中心,搜索一定半径区域内点的个数,考虑距离权重计算其密度之和,公式为:

$$f(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^{n} S\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$
 (3)

式(3)中,S 为核密度方程,h 为搜索半径,n 为搜索区内的点数,d 为数据的维数,x- $x_i$  为待估计点 x 到样本点  $x_i$  处的距离。该文利用核密度方法研究了 3 个年代(1993—2000 年,2001—2010 年,2011—2016 年)的年均干热风发生强度聚集性的变化情况。年代际变化是气候系统中分析气候变率的一种时间尺度,以每 10 年为一个年代。分析年代际气候变率的时空结构对于认识过去气候变化特征、估计未来气候变化趋势具有重要意义 [25]。

#### 2.5 未来趋势预测

李森等人的研究表明,最高气温是形成干热风的主要限制因素<sup>[26]</sup>,这一点从 2019 年最新发布的小麦干热风灾害等级国家气象行业标准(QX/T 82-2019)中也有充分体现

(表1)。因此,在预测未来趋势时,通过将预测的未来日最高温与往年作比较,认为与往年发生干热风日的情形越接近时则发生干热风的概率越大。具体分析方法如下。

将 1993—2016 年各气象站的多年逐日最高气温数据作为当前的基准气温数据集(记为 Temp0),将 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下预测的 2030 年以及 2050 年逐日最高气温数据作为未来的气温数据集(记为 Temp1)。以站点 i 在未来年份的逐日气温数据( $Temp1_i$ )为研究对象,计算  $Temp1_i$  与其第 j 年的逐日气温数据( $Temp0_{ij}$ )的差异性,差异性可表示为:

$$Dif(Temp1_{i}, Temp0_{ij}) = \frac{RMSE(Temp1_{i}, Temp0_{ij})}{r(Temp1_{i}, Temp0_{ii})}$$
(4)

式(4)中,Dif 表示第 i 个站点预测气温数据与往年逐日气温数据之间的差异,RMSE 为均方根误差,r 为相关系数。针对站点 i 的未来气温数据集  $Temp1_i$ ,从基准气温数据集  $Temp0_{ij}$  中找到年份  $j_{min}$ ,使得 Dif ( $Temp1_i$ ,  $Temp0_{ij}$ ) 取最小值,则基准气温数据集中  $j_{min}$  年站点干热风的严重程度在一定程度上可以表示未来气温数据集中 i 站点的干热风风险大小。 $j_{min}$  可由公式(5)得到:

$$j_{\min} = argmin(Dif(Temp1_i, Temp0_{ii}))$$
 (5)

# 3 结果分析

#### 3.1 干热风的时间变化特征

#### 3.1.1 累积干热风日的年际变化趋势

图 2显示 1993—2016 年 630 个气象站点关键生育期(抽穗扬花期、灌浆前期、灌浆后期)的多年平均开始日期。整体上看,同一生育期,南方早于北方,具有明显的纬度地带性,与已有研究结论相同<sup>[27]</sup>。

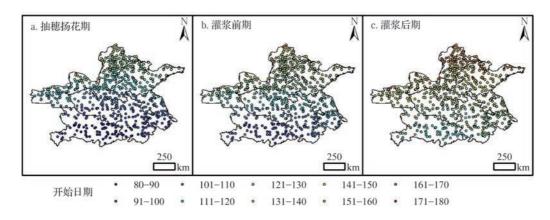
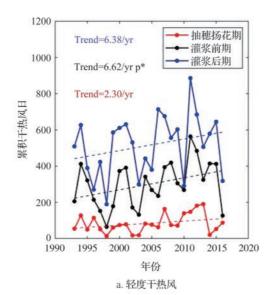


图 2 1993—2016 年不同生育期平均开始日期 Fig.2 Average start julian dates of different growth stages from 1993 to 2016

图 3 显示的是不同生育期内累积干热风日的年际变化趋势。整体上看,各生育期内发生的轻、中、重 3 种程度的干热风日均呈增加趋势,尤以中度干热风日增速最快(图 3b)。

#### 2020年10月-

从干热风发生的时期看,发生在灌浆后期的干热风日最多,灌浆前期次之,而抽穗扬花期最少(图3)。对于轻度干热风,其在灌浆前期增速最大,在抽穗扬花期增速最小(图3a);而对于中、重度干热风,均为在灌浆后期增速最大,抽穗扬花期增速最小(图3b~c)。由此可见,冬小麦在灌浆阶段遭遇干热风的频率和强度都在增加,进一步加大了小麦受灾的风险。



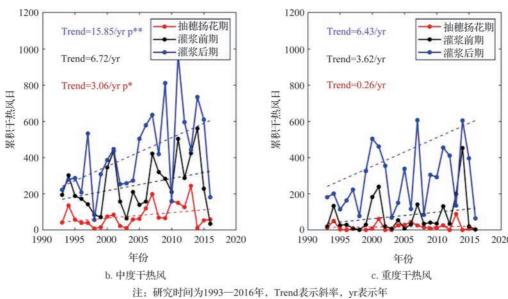


图 3 1993—2016 年不同生育期内年累积干热风日(轻度、中度、重度)的年际变化趋势 Fig.3 Interannual trends in cumulative days of dry-hot wind (light, middle, heavy) during different growth stages from 1993 to 2016

由于不同气象站点干热风日的年际变化趋势可能存在一定的空间差异,该研究进一步从站点尺度上分析了不同等级干热风日的年际变化趋势(图4)。从图4a~f可以看出,轻、中度干热风的年际变化趋势在站点尺度上具有相同的空间分布特征,均表现为:在

抽穗扬花阶段,研究区北部站点发生的轻、中度干热风日年际变化呈现增加与减少趋势并存的特征,而研究区南部站点则无明显年际变化趋势(图 4a, 4d);在灌浆前期和灌浆后期,轻、中度干热风日在研究区北部站点多呈增加趋势,而在中南部站点增加趋势与减少趋势并存(图 4b、c、e、f)。结合研究区尺度上的年际变化规律可知(图 4a~b),研究区中部站点干热风天数的增加效应大于减少效应,反映在研究区尺度上表现为较明显的增加趋势(图 3a~b)。对于重度干热风,累积干热风日呈现出年际变化趋势的站点数量从抽穗扬花期到灌浆前期直至灌浆后期逐渐增加,在空间上表现为从研究区北部向中部扩展的特征。其中,大部分站点在抽穗扬花期未观察到明显的年际变化趋势(图 4g),而在灌浆前期与灌浆后期,研究区北部及中北部的大部分站点均呈增加趋势(图 4h~i)。对轻、中、重 3 种程度的干热风日来说,中度干热风日增加的趋势相比轻、重度更为显著,且发生的站点数也相对更多。

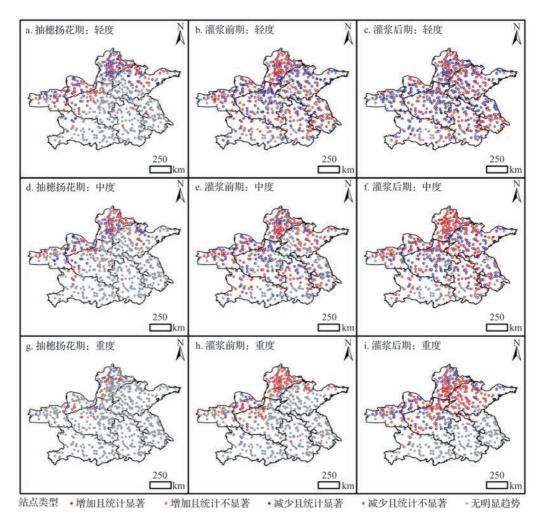


图 4 1993—2016 各气象站点不同生育期内干热风日(轻度、中度、重度)的年际变化趋势 Fig.4 Interannual trends of cumulative days of dry-hot wind (light, middle, heavy) during different growth stages at different meteorological stations from 1993 to 2016

#### 3.1.2 不同生育期阶段分布比例的年际变化

不同生育期内小麦干热风分布比例的年际变化如图 5 所示。可以看出:轻、中、重度干热风在不同生育期内均有发生,但所占比例有所不同。发生在灌浆后期的干热风占比最多,灌浆前期次之,抽穗扬花期最少。从年际变化上看,轻、中度干热风在不同生育期阶段所占比例的年际变化较小(图 5a~b),其中发生在抽穗扬花期的比例约为 9%,发生在灌浆前期的比例约为 33%,发生在灌浆后期的比例约为 58%。相较于轻、中度干热风,重度干热风在不同生育期阶段所占比例的年际差异较大(图 5c),其中抽穗扬花期所占平均比例为 5%,灌浆前期所占平均比例为 17%,灌浆后期所占平均比例为 78%。

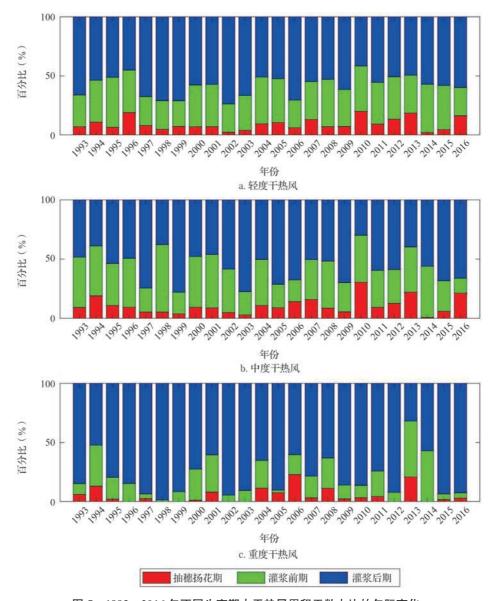


图 5 1993—2016 年不同生育期内干热风累积天数占比的年际变化 Fig.5 Interannual trends in the distribution proportion of dry-hot wind (light, middle, heavy) during different growth stages from 1993 to 2016

图 6 从空间上显示出各气象站点干热风日在不同生育期阶段内分布比例的年代际变化特征。可以看出研究区南部干热风多发生在灌浆前期,北部多发生在灌浆后期。特别是重度干热风,在研究区中北部集中发生在灌浆后期的特点更为明显,且逐渐向东南扩展。从年代际变化来看,研究区中部轻、中、重度干热风发生在灌浆后期的比例增加,研究区南部发生在灌浆前期的比例增加。

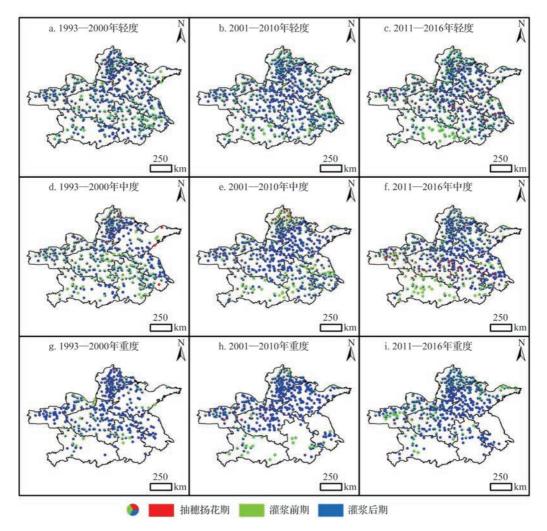


图 6 1993—2016 年各气象站点不同生育期内干热风所占比例的年代际变化 Fig.6 Trends in distribution proportion of dry-hot wind (light, middle, heavy) during different growth stages at different meteorological stations from 1993 to 2016

#### 3.1.3 干热风多发季年际变化特征

为了分析冬小麦在抽穗灌浆阶段受到干热风影响的时间范围的变化,该文定义了干热风的多发季来表示每年干热风集中发生的时间范围。干热风多发季越长,表明该年受干热风影响的时间越长。首先按照时间顺序对每年发生的干热风日期进行排列,然后分别选择当年干热风发生日期中第 20% 天和第 80% 天作为该年干热风多发季的开始日期

#### 2020年10月-

200

190

180

170

160

150

140

130

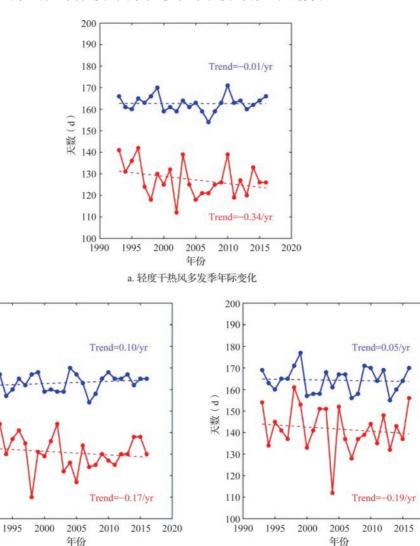
120

110

100

1990

和结束日期。从图 7 可以看出:轻、中、重度干热风的开始时间均有较为明显的提前趋势,而结束时间除了重度干热风有略微提前趋势,轻、中度干热风均有略微推迟趋势。 这表明研究区内 3 种不同程度的干热风多发季长度均有延长趋势。



→ 开始时间 → 结束时间注: 研究时间为1993—2016年, Trend表示斜率, yr表示年

c. 季度干热风多发季年际变化

图 7 干热风多发季起始时间的年际变化特征

Fig.7 Interannual variation characteristics of the onset and the end of dry-hot windy season

#### 3.2 干热风强度的空间分布特征及其变化

b. 中度干热风多发季年际变化

为了分析干热风发生强度的聚集性及其影响范围,分别计算了每年各个生育期阶段内的干热风强度指标 k。图 8 是 3 个年代(1993—2000 年,2001—2010 年,2011—2016年)中各生育期阶段内干热风年平均 k 值的核密度图。整体而言,干热风在不同生育期

内的年代际变化规律较为相似。在抽穗扬花期、灌浆前期以及灌浆后期,干热风影响的空间范围不断向东、向南扩大,且高发区的严重程度也在不断增强(图 8),河北省、山东省、河南省 3 省的交界地区始终是干热风的多发区,这与现有研究结果一致<sup>[4]</sup>。

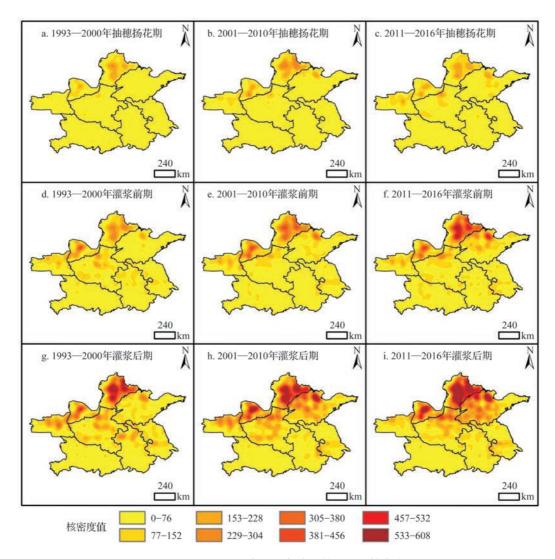


图 8 1993—2016 年不同年代干热风 k 值核密度

Fig.8 Kernel density map of cumulative days during different growth stages from 1993 to 2016

#### 3.3 干热风未来趋势分析

采用空间换时间的思路,根据式 (4)(5),某一站点未来发生干热风的强度,可用站点本身与之最匹配年份发生干热风的 k 值代表,1993—2016年干热风年平均 k 值核密度图见图  $9a\sim c$ 。RCP4.5 以及 RCP8.5 情境下,干热风年平均 k 值的核密度可由图  $9d\sim c$  表示。2030年以及 2050年,不同情景下研究区干热风的多发区范围略有增大、发生强度略有增强。同一情境下,2050年发生强度大于 2030年。同一年份,RCP8.5 场景下发生强度略大于 RCP4.5 (图  $9d\sim f$ )。

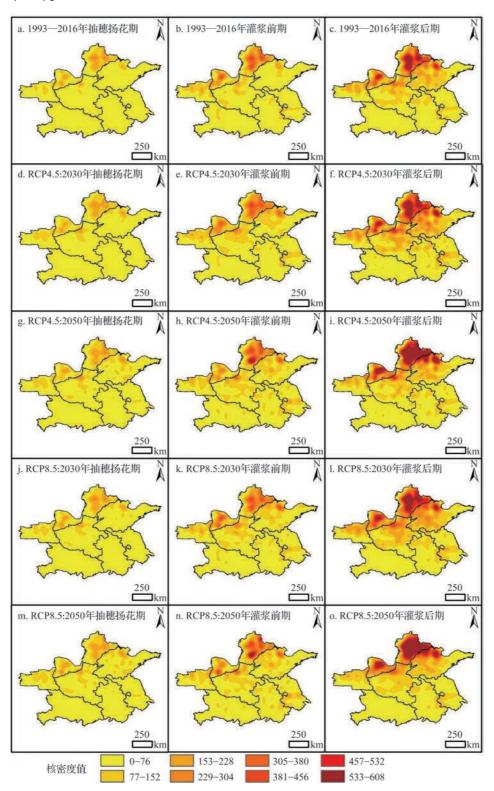


图 9 RCP4.5、RCP8.5 情景下及多年平均(1993—2016 年)干热风 k 值核密度 Fig.9 Kernel density map of dry-hot-wind k values for RCP4.5,RCP8.5 scenarios and multi-year average from 1993 to 2016)

# 4 结论与讨论

#### 4.1 结论

- (1)1993—2016年轻、中、重度干热风在不同生育期内的年累积发生天数均呈增加趋势,且中度干热风的增加趋势最为显著。重度干热风发生在灌浆后期的比例明显大于轻、中度干热风。每年的干热风多发季节略有延长趋势。
- (2)在抽穗扬花期、灌浆前期和灌浆后期,干热风多发区的空间范围变化一致。影响范围均存在向东、向南扩大的趋势。河北、河南以及山东的交界地区始终是干热风的严重威胁区。
- (3)在日均温升高的背景下,站点干热风的发生强度以及多发区范围会继续增强。 到 2030年、2050年,相比于多年平均状态,研究区干热风的发生强度均有增强,且多 发区范围略有扩大。

#### 4.2 讨论

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次报告指出,全球变暖会影响农业生态系 统,造成农业灾害频发,农业气象灾害格局发生改变,使得作物生产不稳定性增强,对 我国农业生产及粮食安全造成显著影响 [28]。干热风作为影响我国小麦产量的主要农业气 象灾害之一、探索其时空变化规律可对冬小麦干热风的防灾减灾提供科学依据。已有研 究认为干热风的发生总体上有减少的趋势[6-10],与该文结论不同,主要原因是分析年代 不同。已有研究多分析 20 世纪 60 年代以来近 50 年总体变化趋势,没有考虑气象要素变 化的年代际差异。研究发现 20 世纪 90 年代以后,气温变化明显加剧 [29]。在此背景下, 该研究发现,1993—2016年冬小麦各生育期内干热风的天数和影响范围都有增加趋势。 该结论与成林等人的研究结论一致,他们的研究结果表明,1961-2007年,河南省冬小 麦生长后期干热风灾害发生范围和天数整体趋于减弱,然而20世纪90年代末期之后干 热风发生范围与天数均有增加趋势「8」。由此可见,考虑年代际差异来分析干热风的变化 特征更有助于掌握其对冬小麦的影响规律,以便采取应对措施。此外,与已有研究相比, 该文还具有以下特点:(1)研究区为黄淮海地区, 空间范围较大, 不局限于单一地区或省 份,结论适用范围更广;(2)采用2019年发布的《小麦干热风灾害等级》新标准,充分 考虑了土壤墒情等多方因素影响,等级划分更严谨,结果更为可靠;(3)结合冬小麦关键 生育期,探索干热风灾害的时空变化特征,有利于提出针对性的预防方案;(4)对2030 年、2050年可能发生的干热风灾害情况进行预测,可为相关研究及决策的提供参考。

根据该文对于不同生育期内干热风时空变化特征的分析,在全球变暖的持续影响下,随着 20 世纪 90 年代以后气温变化加剧,冬小麦各生育期内的干热风天数增加,尤其在灌浆后期的增加速度最快。天气状况的变化结合冬小麦所处的特殊生育阶段可能会增加干热风带来的负面影响,对冬小麦的生长发育造成严重危害。因此,对于黄淮海冬麦区而言,冬小麦的生产中应该加强对干热风灾害的预警和防范。另外,由于重度干热风更易发生在灌浆后期,严重威胁小麦产量,而其所占比例的年际变化波动又比较大,

#### 2020年10月

在生产实践中需要更加关注发生在灌浆后期的重度干热风。一旦发现,应及时采取相关的生物、化学防控措施,减少干热风对小麦产量的影响。

由于冬小麦关键生育期数据从 1993 年开始才有完善的人工观测记录,因此对 1993 年以前冬小麦各生育期干热风发生的变化趋势没有进行分析,这是该文研究的局限。但从结果来看,并不影响对干热风发生变化特征的了解。该文结果有助于针对冬小麦特定生育期采取相应措施。

#### 参考文献

- [1]中华人民共和国农业农村部.中国农业统计资料.北京:中国农业出版社,2017.
- [2] 邓振镛,徐金芳,黄蕾诺,等.我国北方小麦干热风危害特征研究.安徽农业科学,2009,37(20):273-275.
- [3] 时凤云,徐文国,吴建河,等.濮阳近40年干热风特征和成因分析及防御.中国农学通报,2009,25(3):251-254.
- [4] 北方小麦干热风科研协作组. 小麦干热风. 北京: 气象出版社, 1988.
- [5] 中国气象局. 小麦干热风灾害等级: OX/T 82-2019, 2019.
- [6] 赵俊芳, 赵艳霞, 郭建平, 等. 过去 50 年黄淮海地区冬小麦干热风发生的时空演变规律. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2815-2825.
- [7] 钱锦霞, 郭建平. 黄淮海地区冬小麦干热风发生趋势探讨. 麦类作物学报, 2012, 32(5): 996-1000.
- [8]成林,张志红,常军.近47年来河南省冬小麦干热风灾害的变化分析.中国农业气象,2011,32(3):456-460,465.
- [9] 邬定荣, 刘建栋, 刘玲, 等. 近 50 年华北平原干热风时空分布特征. 自然灾害学报, 2012, 21(5): 167-172.
- [10] 戚尚恩, 杨太明, 孙有丰, 等. 淮北地区小麦干热风发生规律及防御对策. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 401-404.
- [11] 杨霏云,朱玉洁,刘伟昌.华北冬麦区干热风发生规律及风险区划.自然灾害学报,2013,22(3):112-121.
- [12] 成林, 张志红, 方文松. 干热风对冬小麦灌浆速率和千粒重的影响. 麦类作物学报, 2014, 34(2): 248-254.
- [13] 赵风华, 居辉, 欧阳竹. 干热风对灌浆期冬小麦旗叶光合蒸腾的影响. 华北农学报, 2013, 28(5): 144-148.
- [14] Gruber A, Dorigo WA, Crow W, et al. Triple Collocation-based Merging of Satellite Soil Moisture Retrievals. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(12): 6780-6792.
- [15] Gruber A, Scanlon T, Van der schalie R, et al. Evolution of the Esa Cci Soil Moisture Climate Data Records and Their Underlying Merging Methodology. Earth Syst. Sci. Data, 2019, 11(2): 717-739.
- [ 16 ] Dorigo W, Wagner W, Albergel C, et al. Esa Cci Soil Moisture for Improved Earth System Understanding: State-of-the Art and Future Directions. Remote Sensing of Environment, 2017, 203: 185-215.
- [ 17 ] Dorigo W, Gruber A, De jeu R, et al. Evaluation of the Esa Cci Soil Moisture Product Using Ground-based Observations. Remote Sensing of Environment, 2015, 162: 380–395.
- [ 18 ] An R, Zhang L, Wang Z, et al. Validation of the Esa Cci Soil Moisture Product in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 48: 28–36.
- [ 19 ] Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. Regcm4: Model Description and Preliminary Tests Over Multiple Cordex Domains. Climate Research, 2012, 52: 7–29.
- [20] Vuuren D, Edmonds J, Kainuma M, et al. The Representative Concentration Pathways: an Overview. Climatic Change. This Issue. Climatic Change, 2011, 109: 5–31.
- [21] Gao X, Wu J, Shi Y, et al. Future Changes in Thermal Comfort Conditions Over China Based on Multi-regcm4 Simulations. Null, 2018, 11(4): 291–299.
- [22] Han Z, Zhou B, Xu Y, et al. Projected Changes in Haze Pollution Potential in China: an Ensemble of Regional Climate Model Simulations. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(16): 10109-10123.
- [23] Large EC. Growth Stages in Cereals Illustration of the Feekes Scale. Plant Pathology, 1954, 3(4): 128–129.
- [24] Qiu B, Luo Y, Tang Z, et al. Winter Wheat Mapping Combining Variations Before and After Estimated Heading Dates. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 123: 35–46.
- [25] 杨修群,郭燕娟,徐桂玉,等. 年际和年代际气候变化的全球时空特征比较. 南京大学学报(自然科学版), 2002 (3): 308-317.
- [26] 李森, 韩丽娟, 张蕾, 等. 黄淮海地区干热风灾害致灾因子时空特征分析. 自然灾害学报, 2020, 29(1): 183-192.
- [27] 闫峰, 史培军, 武建军, 等. 基于 MODIS-EVI 数据的河北省冬小麦生育期特征. 生态学报, 2008(9): 4381-4387.
- [28] Report Working-Group I Contribution-to-the-IPCC-Fifth-Assessment. Climatic Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[29] 曹雯, 段春峰, 申双和. 1971—2010 年中国大陆潜在蒸散变化的年代际转折及其成因. 生态学报, 2015, 35(15): 5085-5094.

# Spatio-temporal correlation between dry-hot wind and winter wheat growth stage and its variation analysis in Huang-Huai-Hai region of China

Zhang Luyun<sup>1</sup>, Wang Shuai<sup>1</sup>, Xiao Fengjin<sup>2</sup>, Wang Wenqing<sup>1</sup>, Chen Jin<sup>1, 3, 4</sup>, Cui Xihong<sup>1, 3, 4</sup>\*

(1. Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Faculty of Geographical Science, Beijing 100875, China)

Abstract: [ Purpose ] To analyze the spatial and temporal variation patterns of dry-hot wind in key phenology stages of winter wheat. [ Method ] Firstly, we extracted the dry-hot wind days occurring in the heading-flowering, pre-filling and late-filling stage of winter wheat from 1993 to 2016. Secondly, the dry-hot wind intensity index k was designed, and the spatial and temporal variation patterns of dry-hot wind in the three growth stages of winter wheat were analyzed using the kernel density method. Finally, daily temperature estimated by RCP4.5 and RCP8.5 climate scenario simulations were used to predict the trends of dry-hot wind occurrence intensity in the winter wheat region of the Huang-Huai-Hai in 2030 and 2050. [ Result ] (1) From 1993 to 2016, the annual cumulative dry-hot wind days in mild, medium and severe degree showed an increasing trend in growth stages of winter wheat, with the most significant increase in medium degree dry-hot wind. (2) The proportion of severe dry-hot wind occurring in the late-filling stage was significantly greater than that of mild and medium dry-hot wind, and the interannual variation of dry-hot wind distributed in each growth stages gradually increased. (3) The dryhot wind prone areas showed a pattern of expansion to the east and south. The junction of Hebei, Henan and Shandong has been the area seriously threatened by dry-hot wind. (4) There is a trend of increasing the intensity and range of dry-hot wind occurrence in the south-central part of the study area in 2030 and 2050. [ Conclusion ] From 1993 to 2016, there is an increasing trend of dry-hot wind in heading-flowering, pre-filling and late-filling stage of winter wheat. It is predicted that the occurrence intensity and impact range of dry-hot wind are likely to increase in 2030 and 2050. Therefore, early warning and prevention of dry-hot wind should be strengthened, and remedial measures should be taken promptly after the occurrence of dry-hot wind.

Key words: climate change; dry-hot wind; winter wheat; key phenology stage; spatiotemporal analysis