

霍治国, 尚莹, 邬定荣, 等. 中国小麦干热风灾害研究进展. 应用气象学报, 2019, 30(2): 129-141.

DOI: 10.11898/1001-7313.20190201

中国小麦干热风灾害研究进展

霍治国¹⁾²⁾* 尚莹¹⁾ 邬定荣¹⁾ 吴立³⁾ 范雨娴⁴⁾
王培娟¹⁾ 杨建莹¹⁾ 王纯枝⁵⁾

¹⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081)

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)

³⁾(福建省气象服务中心, 福州 350001) ⁴⁾(湖南省益阳市气象局, 益阳 413000)

⁵⁾(国家气象中心, 北京 100081)

摘 要

小麦干热风灾害是危害我国北方麦区的主要农业气象灾害之一。基于已有研究成果和实际灾情, 从干热风的概念、分类及研究方法出发, 对小麦干热风灾害的危害机理、气象环境成因、致灾指标、时空分布、监测预报及防御措施等方面进行了系统归纳阐述, 并对未来小麦干热风灾害研究方向进行展望。我国小麦干热风灾害主要分为高温低湿型、雨后青枯型及旱风型 3 种, 形成的气象环境成因主要受干热风天气系统、气候变暖、土壤墒情的影响, 致灾指标主要分为形态学、气象学、综合指数指标。小麦干热风灾害的危害总体呈东西两边重、中间轻的分布格局, 主要发生在黄淮海平原、河西走廊和新疆 3 个地区。气候变暖背景下, 大部分地区的干热风年日数在 20 世纪 80—90 年代出现突变, 近 30 年呈明显加重扩大趋势。基于土壤墒情影响的小麦干热风灾害等级指标构建、小麦干热风过程的灾害监测预警方法、气候变化背景下小麦干热风灾害时空分布新变化及其气象环境成因等是今后研究的重点方向。

关键词: 小麦干热风; 指标; 灾害影响

引 言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 4 次、第 5 次报告指出, 全球变暖影响农业生态系统, 造成作物生产不稳定性增强, 农业灾害频发。气候变化造成极端气候事件愈强愈多^[1-3], 农业气象灾害格局发生改变^[4], 对我国农业生产及粮食安全造成显著影响^[5-9]。仅 2016 年因农业气象灾害导致的农作物受灾面积就达 $2.62 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国农作物种植面积的 15.7%。我国是粮食生产大国, 小麦是仅次于水稻的第二大粮食作物。据农业农村部种植业管理司统计显示, 2016 年我国小麦产量达 $1.29 \times 10^8 \text{ t}$, 占粮食总量的 20.9%。干热风是影响我国小麦产量的

主要农业气象灾害之一, 一般年份会造成减产 5%~10%, 严重年份减产 20%~30%^[10]。如 1982 年我国北方 13 个省(市、区)小麦受干热风灾害严重危害, 受灾面积达 $1.44 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占小麦种植面积的 70.9%, 导致小麦减产 $1.84 \times 10^9 \sim 3.68 \times 10^9 \text{ kg}$ ^[11]。

我国自 20 世纪 50 年代后期开始对干热风进行研究, 小麦干热风灾害研究成果多集中于 70 年代末至 80 年代初, 以北方小麦干热风科研协作组为代表, 在小麦干热风气象指标、危害机理、分布规律、气候区划、环流特征及防御措施等方面取得重要研究成果。20 世纪 80 年代末至 21 世纪初, 有关小麦干热风气象指标及环流特征的研究进一步发展。近 20 年来, 研究多集中于小麦干热风灾害的区域时空变化。随着遥感技术、地面监测仪器、天气预报模式

2018-11-19 收到, 2018-12-29 收到再改稿。

资助项目: 中国气象科学研究院科技发展基金(2018KJ012), “十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD20B02)

* 邮箱: huozg@cma.gov.cn

的发展,近10年小麦干热风的监测预报技术有了较大进步。但在气候变暖背景下,小麦干热风灾害发生格局呈扩大加重态势,已有的干热风气象指标已不能满足业务需求,针对干热风灾害的深入研究亟待加强。

本文综合多方面研究成果,对小麦干热风灾害的概念、分类、致灾指标、危害机理、气象环境成因、时空分布、监测预报、预测及防御等方面进行梳理整合,以期为我国小麦种植布局调整、防灾减灾提供科学依据。

1 概念与分类

1.1 概念

1.1.1 干热风

干热风是一种高温低湿并伴有一定风力的农业灾害性天气,通常发生在作物生长旺盛期,高温、低湿导致作物生理干旱,风力则加剧干旱程度。干热风天气一般在4—8月对我国小麦、棉花^[12]、玉米^[13]、水稻^[14]、油菜^[15]、柑橘^[16]、葡萄、桑树、茶树^[17]等作物产生危害,约2~4年出现1次严重的干热风年。如湖南省娄底地区在1981年6月、1985年5月、1988年5月发生3次干热风灾害,共造成柑橘损失 2.84×10^4 t,经济损失约3200多万元^[16]。新疆哈密垦区在2001—2002年共发生2次干热风灾害,造成棉花减产达10%~15%^[18]。国外干热风主要发生在俄罗斯欧洲部分的南部和东南部及中亚沙漠东部到西伯利亚森林草原地带、乌克兰、美国的南部和中西部、日本的西南温带、北非的撒哈拉一带以及中东和澳大利亚^[10]。

1.1.2 小麦干热风

小麦干热风是指在小麦扬花灌浆期间出现的一种高温低湿并伴有一定风力的灾害性天气。它可使小麦水分代谢失衡,严重影响小麦各种生理功能,千粒重明显下降,导致显著减产。危害轻年造成小麦减产5%~10%,千粒重下降1~3 g;危害重年导致小麦减产20%~30%或30%以上,千粒重下降4~5 g及以上。2000—2005年青海省诺木洪地区有无干热风年份的春小麦千粒重对比表明,出现干热风年份春小麦千粒重比无干热风年份春小麦千粒重低1.47~4.03 g^[19]。1971—2010年内蒙包头市因干热风天气过程导致小麦减产共有11年,平均减产18%,最高减产38%,最低减产1%^[20]。据2017年

小麦干热风灾情实地调查记录,2017年5月25—30日河南省商丘睢阳区出现一次干热风过程,导致小麦干尖炸芒、干枯逼熟,千粒重减少2~3 g,与前一年相比降低5%。

1.2 分类

基于干热风发生时气象要素不同组合对小麦影响与危害结果的差异,我国小麦干热风灾害分为高温低湿型、雨后青枯型及早风型3种。

1.2.1 高温低湿型

高温低湿型在小麦扬花灌浆过程中均有可能发生,通常发生在小麦开花后20 d前后至蜡熟期,是我国北方麦区干热风发生的主要类型。干热风发生时,温度突升,空气湿度骤降,伴有一定风速。高温低湿型干热风特点为发生地域广,常造成小麦大面积干枯逼熟死亡,产量下降明显。河南省商丘地区此类干热风占总干热风类型发生的80%~90%^[21]。1982年5月初起河北省1个月内出现6次干热风,导致9个地区小麦受灾 6.67×10^5 hm²^[22]。2014年5月26—30日华北中南部、黄淮大部出现轻至重度干热风天气,部分地区麦田受灾,冬小麦灌浆速率下降,造成减产。

1.2.2 雨后青枯型

雨后青枯型又称雨后热枯型、雨后枯熟型或青干,一般发生在乳熟后期,即小麦成熟前10 d左右,在一次降水过后天气放晴,温度突升,湿度骤降,引起小麦青枯早熟,多出现在黄淮海、宁夏以及青海地区。有时连阴雨天气过后,高温低湿天气也可造成小麦青枯早熟。雨后气温回升越快,温度越高,青枯发生越早,危害越重。如1967年5月末山西临汾盆地、万荣县、长治盆地、晋中介休等平川地带出现雨后青枯型干热风,天气表现为雨后暴热,导致小麦青干,千粒重比1965年降低15%~25%,祁县全县 2.0×10^3 hm²小麦未成熟即青干枯死^[23]。但有时雨后湿度并不低,无风同样可造成青枯,导致严重经济损失。据2017年小麦干热风灾情实地调查记录,2017年5月30日河南省禹州出现雨后猛晴天气,日最高气温在32℃左右,14:00(北京时,下同)相对湿度约为40%,14:00风速为1 m/s,小麦出现青枯症状。

1.2.3 早风型

早风型又称热风型,多在干旱年份发生,主要发生在新疆地区及西北黄土高原的多风地带。表现为在小麦扬花灌浆期,风速大、湿度低,配合一定的高

温。旱风型对小麦危害与高温低湿型相似,同时大风加剧了大气干燥程度,促使农田蒸散作用加强,造成小麦叶片卷缩成绳状,或叶片撕裂破碎。如2004年6月12—15日新疆奎屯河流域出现旱风型干热风,40℃以上高温连续出现,4~6级大风持续4h,导致小麦芒变干,黄熟期缩短5d,千粒重降低,减产10%~15%^[24]。

1.3 研究方法

目前小麦干热风灾害研究主要有模拟试验与数值模拟两种方法,主要开展干热风对小麦生理机能、灾害损失等影响的定量研究。

1.3.1 模拟试验方法

模拟试验方法是指在农场试验田^[25]、模拟箱^[26]等环境中模拟干热风灾害过程,通过人工控制小麦在不同生育时段下的气象环境、受灾时长等条件,研究干热风与小麦受灾症状、千粒重、产量的相关关系,揭示灾害对小麦生理生化过程及产量损失的影响。如王邦锡等^[27]在1971年制作简易木条玻璃箱,以电热丝做热源、排气电风扇做风源的模拟干热风装置研究春小麦在干热风条件下的生理变化。2011—2012年,成林等^[28]于河南省郑州农业气象试验站,利用简易气候箱模拟干热风发生气象条件,定量探究干热风过程对冬小麦不同灌浆时段及千粒重的影响。赵风华等^[29]自制干热风便携模拟装置,在2012年5月15日于位于山东省的中国科学院禹城综合试验场进行干热风对冬小麦胁迫试验,探究干热风对灌浆期冬小麦旗叶光合蒸腾的影响。

模拟试验方法具有较强的可控性,剔除多因子干扰影响,可在小麦生长过程中定量测定干热风灾害对其各项生理功能、产量构成因素等的影响^[30],是最早用于干热风灾害过程定量影响的研究方法。但模拟装置无法完全还原干热风过程的天气条件,同时试验周期长,对模拟装置及模拟过程也有很高的要求。

1.3.2 数值模拟方法

数值模拟方法分为两类:一类利用作物生长模型模拟计算干热风对小麦产量影响;另一类基于气象模式模拟干热风过程要素特征^[31],探究干热风的发生机制和物理特性等。如朱玉洁等^[32]以河南省5个地区的9个典型干热风年份为例,利用作物模型提取小麦干热风灾害损失并与实际灾损值进行比较,二者的标准均方根误差为0.36,平均准确率为68.69%,决定系数为0.81。王姝等^[33]基于陕西省

杨凌地区2010—2012年的气象数据,比对得出中尺度气象模式(WRF)对干热风过程的温度、湿度、风速气象要素场模拟较为准确,相对误差范围分别为-13.55%~8.41%,2.87%~28.33%, -12.41%~12.62%;北京大学陆面模式(PKULM)对植物的感热、潜热通量模拟优于中尺度气象模式(WRF)。

数值模拟方法随着近几十年作物模型及数值模式的不断发展逐渐被采用,该方法节省人力物力,高效便捷。但目前小麦生长模型在参数选取等对模型结果影响方面还存在不确定性^[34];在作物模型中单独提取干热风灾害对小麦造成的损失也是干热风研究的难点;模式参数化方案在定量植物生化过程及模式精度等方面有待细化^[31]。

2 危害机理

干热风出现在小麦不同生育时段,对小麦造成的损伤、产量影响差异明显,出现在小麦灌浆期对小麦的影响超过出现在小麦开花期。当干热风出现在小麦开花期会使花药破裂从而无法授粉,增加了不实小穗数^[35],穗粒数减少。而出现在小麦灌浆期会明显影响产量,其中灌浆中后期影响大于灌浆初期。试验测定结果表明:在小麦灌浆后期重度、灌浆中期重度、灌浆中期轻度干热风分别导致千粒重降低5.4g,3.64g和1.78g,降幅达14.5%,9.7%和4.8%^[28]。

2.1 高温低湿型

2.1.1 蒸腾加剧、旗叶损伤、根系活力减弱

干热风天气过程会不同程度地对小麦旗叶造成蒸腾胁迫、损伤旗叶,增加根系伤流量、减弱根系吸水能力。在干热风胁迫下,小麦植株蒸腾强度比平时高30%~50%,最高可达66.7%^[36],造成叶温升高,呼吸作用加强,增加消耗,阻碍小麦正常生理活动。从旗叶损伤症状上看,受危害的小麦初始阶段旗叶凋萎,1~2d后青枯变脆^[20],连续几日则衰老凋亡^[37]。从根系伤流量增加情况看,在轻、重干热风试验处理下,小麦根系伤流量的胁迫量分别为15.5%,40.1%;处理后次日10:00根系伤流量测定结果表明:轻度、重度干热风处理,小麦根系伤流量分别为0.00505g/h,0.00560g/h,均高于无干热风条件下小麦的根系伤流量0.00475g/h^[38]。

2.1.2 灌浆期缩短及干物质累积降低

干热风会降低小麦灌浆速度,缩短灌浆日期,减

少干物质累积,导致小麦千粒重下降。以河南省干热风典型年为例,1979年5月24—30日干热风过程致使小麦灌浆期缩短5 d,千粒重较前一年下降15.1 g^[39]。2000年5月18—21日河南省新乡出现干热风,导致小麦提前5~7 d进入成熟期^[40]。小麦日灌浆速度主要受干热风日数和日最高气温影响,低湿和风则会加重日灌浆速度下降^[41]。高温通过对小麦蛋白质和淀粉粒胁迫,造成蛋白质合成速度降低,淀粉充实不良^[42],减少干物质累积,其中当灌浆期温度超过30℃,总淀粉含量下降,温度达到40℃时,总淀粉含量最低^[43]。

2.1.3 叶绿素含量减少及光合速率下降

干热风可损伤小麦细胞膜系统,降低叶绿素含量,导致小麦光合速率下降。当出现在小麦灌浆结束期,小麦叶片叶绿素含量可减少80%以上^[44-45],温度越高对叶绿素破坏速度越快。日最高气温在32℃以下,小麦叶绿素含量无明显变化,日最高气温高于32℃时,叶绿素含量急剧下降,34℃为叶绿素半致死温度^[46]。北方小麦干热风科研协作组曾于1980年在河南省郑州市进行干热风测定试验,干热风天气条件下,平均每天叶绿素含量下降19.11%,干热风第3天,小麦叶绿素含量降低57%以上;而在无干热风条件下,叶绿素含量平均每天下降仅为6.67%^[11]。

干热风出现在小麦灌浆中期对光合作用抑制程度大于出现在灌浆前期。通常在灌浆中期干热风条件下光合速率胁迫量为9.7%~20.2%^[39]。

2.2 雨后青枯型

雨后青枯型干热风的危害机理与高温低湿型有很大差异。降水前后气温呈现明显的高、低、高“V”字型变化趋势,是造成小麦青枯的主要原因,高低温差越大,小麦青枯程度越重,降水时段和降水量仅是造成小麦青枯的间接原因。河南省小麦青枯研究协作组于1986年利用温室和网室模拟雨后青枯型气象条件变化,证实了青枯型干热风的危害成因^[47]。雨后高温或雨后天气转晴,导致小麦蒸腾加剧,小麦灌浆中后期根系衰老,蒸腾强度平均可增加28%,根系吸水能力平均下降16%^[48]。吸水满足不了蒸腾消耗,导致小麦植株细胞生理失水而受害^[49]。

雨后青枯型干热风发生时气象环境剧烈变化,使有害的氮代谢产物在植株内累积,麦株枯萎。植株内氮含量高导致植株无法正常落黄,外表即表现为青枯,小麦灌浆停止。河南省农业科学院测定的

数据表明:自然落黄的小麦旗叶在灌浆中期、后期含氮量为2.5%及低于0.9%,而青枯的小麦旗叶在灌浆中期、后期含氮量分别为3.5%,2%^[50]。

3 气象环境成因

3.1 天气系统

干热风是一种大范围的灾害性天气,形成于特定的大尺度环流背景下。干热风的出现与500 hPa和700 hPa环流场及850 hPa温度场关系密切;各高度环流场、850 hPa干暖区强度差异造成干热风轻重程度不同^[51];干热风持续时间受大气环流形势移动速度影响,当系统移动缓慢,干热风维持时间较长^[24]。鉴于干热风天气条件的区域差异性,通常将我国北方麦区划分为黄淮海地区、西北地区分别进行干热风天气系统的研究。

3.1.1 黄淮海地区

黄淮海地区出现的干热风大多是由于北方冷空气南下,高空至地面为下沉气流,绝热增温使近地面变干变热^[52]。此时也正值北方雨季来临前,天气晴朗、少雨,东亚大槽强度减弱,主体东移,在120°E附近仍有小槽,黄淮海地区处槽后厚而广的西北气流之下^[53-54]。

从热力、动力角度看,干热风产生有两种典型机制:一种为西北干空气局地加热作用,另一种为南风越山气流的焚风效应^[33]。从波型上分析,500 hPa高度场平均距平图中,贝加尔湖附近呈现高压脊与干热风出现有显著关系^[55],可分为两槽一脊型、西北气流型、一槽一脊型及东亚大槽型4种类型。据山西省长治地区1977—2006年出现的干热风天气500 hPa环流形势统计,两槽一脊型发生占比最高为63%,其次为西北气流型发生几率为23%,一槽一脊型及东亚大槽型较少出现,分别为10%,4%^[56]。对1959—1978年黄淮海地区78次干热风天气在700 hPa高空图上直接影响系统进行归类分析,700 hPa系统可分为西北气流型、高压脊型以及高压后部型3种类型^[10]。

3.1.2 西北地区

西北麦区主要包括蒙、甘、宁春麦区及新疆冬、春麦区。蒙、甘、宁春麦区干热风发生当日700 hPa环流形势可分为乌拉尔山高脊型、蒙古暖脊型以及贝加尔湖阻高型^[57-58]。新疆干热风天气受500 hPa暖高压脊控制,可划分为5种类型,即北大西洋东部

及西南欧长槽型、欧洲脊东移与青藏高原脊叠加型、沙特-伊朗副热带高压与青藏高原结合北突型、青藏-新疆长脊型、沙特-伊朗副热带高压和北支锋区脊在中亚叠加型^[58]。

3.2 气候变暖

干热风对气候变化响应极其敏感,干热风灾害年代际变化与我国温度变化具有一致性。1950—2015 年我国温度增幅约 $0.25^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ^[59],以 1987 年为界,前期为冷期,我国温度小幅度波动;后期为暖期,我国温度明显上升,1990—2009 年近 20 年,我国气温增幅约为 $0.45^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ^[60]。而我国多数干热风经常发生地区,在 20 世纪 80—90 年代存在突变,即 20 世纪 80—90 年代前期干热风日数总体呈下降趋势,80—90 年代后期呈上升趋势且强度不断加强^[61-63]。

20 世纪 90 年代以来,气候变暖及极端干旱导致小麦干热风灾害发生频次、强度增加,发生区域扩大,危害加重。

1961—2010 年黄淮海地区干热风发生频次总体表现为波动下降趋势^[64-65],风速显著减弱是灾害整体趋势下降的主要原因之一^[66]。其中在 20 世纪 90 年代干热风发生频次达到最低,但从 90 年代末开始,干热风发生频次呈明显增加且程度加重趋势。如河南干热风发生台站数从 1997 年起以每年 2.01% 比例递增^[67];山东省滨州市干热风年平均日数,90 年代为 1.1 d,2001—2009 年明显增加,达 2.6 d^[68]。

在西北地区,宁夏 1961—2014 年以 1992 年为突变点,干热风平均年发生站数由 21 增加至 45,发生频次由每年 0.8 日次上升到每年 2.2 日次^[69]。气温升高是造成宁夏 20 世纪 90 年代后期以来干热风次数显著增加的主要原因^[69]。青海高原干热风发生站次 90 年代较 80 年代偏多 7 站次,较 2001—2010 年偏少 6.2 站次;干热风发生区域扩大,如湟源、贵南等在 1961—2009 年几乎未发生过干热风的地区,仅 2010 年就出现了两次^[70]。

20 世纪 80 年代后期以来,我国小麦干热风年代际变化存在周期性特征。如对京津冀地区 1971—2001 年重度干热风发生总站数进行 Morlet 小波分析,发现重度干热风发生总站数具有 10 年左右周期^[71];基于功率谱分析方法,河南省 1967—1996 年干热风发生日数存在准 6 年和准 3 年周期性^[72];甘肃省干热风次数自 1980 年起存在 6 年准

周期性且呈不断增强趋势^[71-73];淮北地区 20 世纪 80 年代起平均 5~8 年出现 1 次重度干热风天气过程,大范围轻度干热风年型以 3~4 年为周期居多^[63]。

气候变暖导致区域小麦干热风年代际变化差异显著。1971—2005 年河北省重度干热风发生总日数年代际变化明显,1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2005 年 3 个阶段重度干热风总日数平均分别为 2.7 d,1.8 d,4.2 d;但重度干热风平均总日数与干热风平均总日数没有明显的对应关系,20 世纪 80 年代后期至 90 年代,河北省干热风发生总日数平均为 35 年间的最少阶段^[55]。青海省 1961—2010 年干热风平均站次数变化,20 世纪 80 年代较 70 年代偏少 1.1 站次,较 90 年代偏少 7 站次,90 年代站次数又较 2001—2010 年偏少 6.2 站次^[70]。甘肃省干热风次数在 1961—1975 年相对较多,1976—1989 年相对较少,1990—2006 年迅速增多^[73]。

3.3 土壤墒情

土壤墒情可影响小麦干热风的发生与危害程度。一方面,土壤墒情可改变地表间的热通量和动量交换,从而影响小麦立地环境的温度和降水^[74-75]。另一方面,土壤墒情的变化可影响小麦的干旱胁迫,当土壤墒情上升一定程度,小麦受胁迫情况得以缓解,反之土壤墒情降低一定程度,小麦受胁迫程度加剧^[76]。当温度由 30°C 升至 $34\sim 36^{\circ}\text{C}$ 时,植物的耗水量会突增 60%^[77];当耕作层有效水分储存量少于 10 mm,干旱胁迫使小麦根系干物质累积下降、加速衰亡,降低产量^[78-79]。1965 年 7 月下旬甘肃省酒泉、张掖两市出现干热风过程,灌溉地区小麦平均减产 $30\sim 37.5\text{ kg}/\text{hm}^2$,未灌溉地区小麦平均减产 $60\sim 75\text{ kg}/\text{hm}^2$,灌溉明显减轻了干热风的危害程度。

在土壤墒情好的年份,可减轻干热风的危害程度。实际生产中,由于土壤墒情好,曾观测到轻度干热风未对小麦造成明显影响的个例。1989 年、1992 年青海均出现干热风过程,由于土壤墒情好,干热风危害较轻。2017 年 5 月 27—28 日山东省莘县出现一次轻度干热风过程,由于该地区土壤墒情好,小麦无受害症状,当年也未造成减产。目前对土壤墒情可进行地面观测及高空遥感监测^[80]。姜亚珍等^[81]利用遥感资料监测 2010 年河北省干热风期间的土壤墒情,验证了可根据土壤墒情情况判定干热风严重程度。

4 致灾指标

4.1 小麦干热风灾害指标

小麦干热风灾害指标是判别干热风发生的标准,目前已有小麦干热风灾害指标主要分为3类,即形态学指标、气象学指标、综合指数指标。

4.1.1 形态学指标

形态学指标即依据干热风灾害后小麦植株形态变化,判别干热风轻重等级。干热风导致的小麦生理机能下降,在小麦的叶、穗、秆上呈现出症状变化。正常成熟的小麦外部形态呈现为金黄色。当小麦受高温低湿型干热风危害后,轻度表现为芒尖干枯,炸芒,颖壳发白,叶片卷曲凋萎;重度表现为严重炸芒,顶部小穗、颖壳和叶片大面积干枯,呈灰白色,叶片卷曲呈绳状,枯黄死亡。当小麦受雨后热枯型干热风危害后,穗下节由青绿色变为青灰色,顶部小穗枯萎、炸芒,颖壳和芒青枯干,颖壳闭合,粒离脐,穗下茎及茎节呈暗绿色^[58,82]。

形态学指标对判别干热风灾害的优点在于方法简单,无需器具,便于操作。但由于受人为主观性影响,造成判别结果存在差异。同时对判别时间有高度要求,即要在干热风过程结束后10 d内对小麦进行实地灾情调查。形态学指标不具备对干热风灾害实时监测能力,无法利用该指标对灾害进行预报。故该指标多用于灾后调查干热风灾害等级的辅助判别。

4.1.2 气象学指标

气象学指标是根据干热风灾害发生的气象因子同小麦生理变化及产量损失的关系所构建的指标,具有生物学和气象学双重意义。国内外学者对气象学指标的研究较为丰富。苏联学者从20世纪30年代起从农学、气象、气候、农业气象、植物生理各个学科对干热风指标进行研究,主要分为农业指标、气象指标及农业气象综合指标^[58],将温度、相对湿度、风速、蒸发率及饱和差等作为判别因子构建干热风的气象学指标,并将干热风分为轻、中、严重、很严重4个等级^[79]。

我国学者从20世纪50年代后期,借鉴苏联干热风指标研究思路,选用温度、相对湿度、风速3个气象因子,结合我国干热风危害特征,开展干热风指标研究。80年代初,以小麦灌浆速度下降值、减产程度反映受灾情况,筛选致灾因子,利用统计分析方

法构建指标。如北方小麦干热风科研协作组,在多个干热风发生地按照统一试验方案进行气象要素与小麦品种、逐日灌浆速度、蒸腾强度、伤流量、叶含水率、光合强度、土壤湿度及小麦千粒重的关系试验,利用多元回归分析方法,构建了我国第1个全国性的小麦干热风灾害气象学指标^[82]。

针对我国小麦干热风灾害发生的区域差异性,有学者对气象学指标进行了本地化改进。主要表现为致灾因子的重新组合、判别因子的多重选取。温度可选取日最高气温、14:00温度,湿度可选取14:00相对湿度、日最小相对湿度或14:00饱和差,风可选用风速、风力或风向。如河西走廊地区干热风发生特点风向为偏东,风速小且14:00通常为静风^[83],故选择风向作为当地干热风气象学指标判别因子。简魏民等^[84]统计饱和差和温度之间存在正相关关系,相关系数为0.87,故以饱和差综合代表新疆地区温度和湿度情况。牛晋源等^[85]以日蒸散量作为参考值,对干热风进行等级划分。屈振江等^[86]以陕西地区地势海拔500 m为界限进一步对干热风指标进行本地划分。

为便于全国小麦干热风灾害的时空比较及农业气象业务应用,在前人研究基础上,霍治国等^[87]于2007年以日最高气温、14:00相对湿度、14:00风速3个气象要素组合作为划分干热风等级的指标,起草了中华人民共和国气象行业标准《小麦干热风灾害等级》。

分生育时段指标是针对区域小麦不同生育时段对干热风灾害的敏感性差异所建立。刘静等^[88]将春小麦扬花灌浆期细分为抽穗扬花期、灌浆乳熟期及乳熟成熟期3个时段,利用分离产量、聚类分析方法确定了宁夏灌区干热风等级指标。

气象学指标以干热风过程出现的气象条件为客观依据,消除了形态学指标人为判别的主观性,可应用于灾害监测、灾后评估及灾害预测。分生育时段指标是在气象学指标的基础上进一步细分小麦的生育时段,提高了指标的针对性,但对大范围地区的适用性有待考证。

4.1.3 综合指数指标

综合指数指标是基于气象学指标中的日最高气温、14:00空气相对湿度、14:00风速3个因子,对干热风灾害影响效应的差异性采用加权求和方法构建的综合评价指数。综合指数值可直接划分干热风灾害等级,用于站点或区域对比。由于小麦灌浆速度

下降值同气温、相对湿度、风速具有明显的相关关系,干热风气象因子权重系数可通过气象因子回归系数得出。北方小麦干热风科研协作组、王春乙等^[89]均根据此方法分别构建干热风强度综合指数(Q_i)及干热风综合指数(D_{HW}):

$$D_{HW} = \sum_{i=N_1}^{N_2} I_i, \quad (1)$$

$$I_i = W_1 \frac{T_i - T_0}{T_0} + W_2 \frac{|R_i - R_0|}{R_0} + W_3 \frac{V_i - V_0}{V_0}. \quad (2)$$

其中, N_1 为干热风出现时段的始日, N_2 为干热风出现时段的终日。 T_i 为日最高气温, R_i 为14:00相对湿度, V_i 为14:00风速; W_1 为气温权重系数, W_2 为相对湿度权重系数, W_3 为风速权重系数; T_0 、 R_0 、 V_0 分别为冬小麦停止灌浆上限边界值, $T_i \geq T_0$ 、 $R_i \leq R_0$ 、 $V_i \geq V_0$ 同时成立时 D_{HW} 有效,否则 $D_{HW} = 0$ 。

由于干热风对小麦的危害程度取决于干热风出现的时间、强度及维持日数^[90],干热风综合指数可较好反映干热风过程的累积影响及不同因子影响的差异性,便于进行区域性联系、比较。但干热风强度综合指数的准确性对判别因子权重系数要求极高,而目前可追溯最近的权重系数为20世纪90年代初计算得出,适用性有待进一步考证。

4.2 小麦干热风过程及年型指标

在小麦扬花灌浆期间出现1个或以上干热风日的天气过程,称为小麦干热风过程。年内出现的所有小麦干热风过程综合导致的最终危害程度,称为小麦干热风年型。目前小麦干热风过程及年型指标研究主要是针对高温低湿型干热风,可分为两类。

一类是根据高温低湿型干热风指标判定干热风日,用干热风天气过程中出现的干热风日等级日数组合确定过程等级,用过程等级组合确定年型的轻、重等级。如北方小麦干热风科研协作组确立了以干热风日数定过程,以过程定年型强度的干热风指标系统^[82]。基于此,霍治国等^[87]考虑气候变化的影响,对干热风天气过程等级指标及干热风年型等级指标稍作改进,当连续出现大于等于2d重干热风日,或在1次干热风天气过程中出现2d不连续重干热风日,或1个重日加2个以上轻日即为重干热风天气过程;除重干热风天气过程所包括的轻干热风日外,当连续出现大于等于2d轻干热风日,或1轻1重连续2d干热风日,或出现1d重干热风日即为轻干热风天气过程。当1年中有2次以上重干热

风过程,或2轻1重、或4次以上轻干热风过程,或过程中重干热风日连续4d以上,或轻干热风日连续7d以上即为重干热风年;当1年中有2次以上轻干热风过程,或1次重干热风过程,或轻干热风日连续大于等于4d即为轻干热风年。

另一类是通过构建干热风综合指数,采用指数阈值划分年型等级,以反映小麦受干热风日数和强度变化的综合影响。如王春乙等^[89]采用干热风综合指数(D_{HW})划分重干热风年($D_{HW} > 2.00$)、轻干热风年($1.20 \leq D_{HW} < 2.00$)、无干热风年型($D_{HW} < 1.20$),孔德胤等^[57]采用基于温度、湿度、风速3个要素建立的干热风危害指数(E),划分严重干热风年($E \geq 155$),中等偏重干热风年($100 \leq E \leq 154$),中等干热风年($45 \leq E \leq 99$),中等偏轻干热风年($20 \leq E \leq 44$),无干热风年($0 \leq E \leq 19$)。

5 时空分布

5.1 时间分布

干热风灾害主要发生于当地小麦收获前1个月,我国小麦干热风灾害一般是从5月上旬开始,由南向北、由东南向西北逐渐推迟,至7月中下旬大部终止,青海地区最晚可至8月,冬麦区早于春麦区;主要对黄淮海平原、新疆、河西走廊、河套地区的小麦造成危害。黄淮海地区冬小麦干热风主要发生在5月中下旬至6月上旬。河南省商丘地区1967—2006年5月下旬至6月上旬干热风的发生频率为60%~80%^[21]。河西走廊、宁夏平原春小麦干热风发生时段晚于黄淮海地区,早于河套地区,主要在6月中旬至7月下旬^[62]。甘肃省1961—2006年80个站6—7月干热风发生次数占全年总次数52%~76%^[73];青海地区1961—2010年7月、8月干热风发生次数分别占年总次数的50.1%、38.1%^[70]。内蒙古河套春麦区干热风通常发生在6月下旬至7月下旬^[57]。新疆冬、春麦区受干热风危害持续时间最长。南疆自5月中旬至7月中旬出现小麦干热风,北疆小麦干热风则多集中在6月中旬至7月出现^[58]。北疆阿勒泰地区1961—1995年65%的干热风主要发生在6—7月,其中福海、富蕴县达70%~75%^[91]。

5.2 空间分布

我国北方小麦干热风灾害的空间分布特征为东西两边重、中间轻。东部干热风重区主要集中在冬

小麦主产区的黄淮海平原。西部干热风重区多集中在新疆沙漠地带,河西走廊的敦煌、安西盆地。

黄淮海地区干热风日数总体呈中部高南北低的分布特征。干热风重区多分布于黄淮海平原东部,几乎每年都有干热风发生。以河南省为例,1967—1996年30个站每年出现干热风日数为0.5~3.9 d,干热风发生次数为0.4~0.9次/a^[72]。鲁西南菏泽地区1961—2013年的干热风日数共161 d,年平均发生3.04 d^[92]。京津冀地区干热风自南向北逐渐减轻,轻干热风重区出现在最南部的邯郸附近,1981—2005年轻干热风年平均日数为3.5 d^[71]。山西地区轻、重干热风日分布呈现从东到西、从北至南逐步递增的分布特点,1971—2013年长治、晋城东部为轻、重干热风发生日数少区,年平均日数分别为3 d,0.5 d左右;临汾南部、运城大部为轻、重干热风发生重区,年平均日数分别为6.5 d,2 d左右^[61]。淮北地区干热风发生规律基本上也呈南少北多、南轻北重的特点。1957—2010年淮北中北部埇桥区、砀山为干热风多发区,年平均日数超过2.3 d,淮南南部的泗县则为少发区,年平均日数不足2 d^[63]。

我国西部新疆、宁夏、青海、内蒙古河套等地为干热风多发区,干热风发生程度随海拔升高而降低,海拔1700~1800 m以上几乎无干热风出现,且盆地干热风重于山区干热风。新疆最重区出现在海平面以下的吐鲁番、鄯善盆地,塔里木盆地东部的铁干里克、若羌地区。1959—1978年吐鲁番地区年平均干热风日数为6~19 d,10年中干热风可能发生5~10次,且皆为重干热风年^[58]。新疆奎屯河流域南区农七师所属垦区海拔略高于北区乌苏以南农业区,1965—2004年南区的干热风程度轻于北区^[24]。甘肃省敦煌、鼎新、民勤、临泽、肃州、玉门镇、山丹、肃北、民乐各地海拔从1139.6 m至2271.5 m依次升高,1961—2006年6—7月各地的干热风平均次数从5.9至0.1依次下降,肃北、民乐海拔均高于1800 m,近45年几乎无干热风发生^[73]。青海高原干热风灾害具有明显的区域性,西部柴达木盆地与东部海东地区均为灾害高发区^[70]。

6 监测预报

小麦干热风监测预报是在结合实时或未来天气气候条件和小麦生育特性的基础上,参照小麦干热

风灾害指标,监测预报小麦是否受到危害,危害的时间、程度以及可采取的防御措施。目前对小麦干热风的监测主要有地面气象监测、高空遥感监测两种方法,预报方法可分为天气形势归类预报、统计预报及数值预报产品释用预报3类。按预报时效可分为中短期及长期预报两类,中短期预报侧重对干热风发生时间、日数、强度及干热风对小麦危害程度进行预报,长期预测则侧重对干热风年型进行预测。

6.1 干热风监测

地面气象监测多根据气象站实时监测的气象数据,基于小麦干热风灾害气象学指标判别干热风是否出现以及出现的干热风级别。遥感监测通过监测反演干热风灾害程度、范围等,具有大面积同步监测等优势。刘静等^[93]研究表明,可以利用EOS MODIS遥感资料大面积提取宁夏地区春小麦干热风受害程度。李颖等^[94]利用遥感监测2013年5月12—13日河南麦区出现的一次干热风过程,发现干热风灾害越重,遥感监测越明显。

6.2 天气形势归类预报

天气形势归类预报是从干热风天气过程环流背景场入手进行归类分析,赋予干热风预报天气学原理,从而达到预报目的。如王正旺等^[56]通过对1977—2006年长治地区出现的30次干热风天气过程天气形势进行聚类分析,归类得出4种500 hPa高空形势图,再以近地面850 hPa干暖区强度作为辅助判别干热风轻重程度,构建干热风预报模型,应用该模型对2009年山西省长治地区出现干热风过程进行预报,经实际发生情况检验,预报结果较好。

6.3 统计预报

统计预报是根据统计学方法建立干热风是否发生、危害程度同气象因子或大气环流、海温因子的关系模型进行预报。目前采用的方法主要包括相关分析^[92, 95]、聚类分析^[56]、回归分析^[96]、灰色系统理论^[86]等。其中,回归分析法使用较为广泛,多以筛选致灾因子,结合产量进行回归性分析构建预报模型。如张翠英等^[92, 95]基于1954—2001年山东省菏泽地区的气象资料,采用逐步回归法建立以旬为单位的干热风预报模型,逐年5月中、下旬及6月上旬的干热风发生拟合率分别为96%,71%及69%。曹玲等^[96]基于1956—1995年甘肃省张掖、高台、临泽、山丹的气象资料,通过复合因子选取建立了模糊多元回归方程,对1986—1994年河西走廊中部的干热风过程进行回代、1995年干热风过程进行预报,

历史拟合率达92%,预报准确率达89%。

干热风长期预报即年度预测。如孔德胤等^[57]基于已构建的干热风危害指数,选取7个海温环流因子作为预报因子,通过多元线性回归,构建了河套地区干热风危害指数预报方程,历史拟合率为94.4%。屈振江等^[86]利用1981—2010年陕西地区气象资料,应用灰色系统灾变方法,预测陕西省富平县未来发生重干热风年份。

6.4 数值预报产品释用预报

数值预报产品释用预报是基于已有数值预报产品,对输出温度场、湿度场、风场释用加工进而对于干热风预报。数值预报产品近年来得到较大发展,但对于干热风进行数值预报产品释用预报研究报道较少。吕学梅等^[97]通过比对完全预报法(PPM)与模式误差订正法(MEC)在MM5中尺度数值预报中的预报效果,对山东省临沂的干热风进行预报,准确率达80%,证明了MEC方法在干热风天气预报中较为可行。

7 防御措施

7.1 选用抗逆品种

选用早熟、抗逆品种可防御干热风。选用早熟品种可争取小麦早抽穗、早成熟躲避高温。如青海省贵德县三河地区为冬、春小麦混种区,7月上旬正值春小麦灌浆乳熟期,受干热风危害较重,冬小麦较春小麦早60d成熟,可有效减轻或避免干热风危害^[98]。据龚绍先^[99]和陆正铎等^[100]研究,耐盐、抗逆品种受干热风影响较小,矮秆、无芒、晚熟的品种受干热风影响较大,品种选择应因地制宜^[101]。

7.2 合理灌溉

合理灌溉、保持田间土壤水分适宜可增加大气湿度,有效抵御干热风导致的高温和低湿田间环境。如2010年5月19—20日天津市出现一次高温低湿型干热风过程,但由于16—18日天津市出现大范围降水,土壤墒情好,干热风对小麦未造成影响^[102]。在干热风来临前灌水的小麦产量比未灌水小麦产量高31%^[103]。麦田后期1次灌水后,地表温度可降低约3℃,小麦株间土壤相对湿度可增加4%~5%^[104]。

7.3 喷施生化制剂

对小麦种子进行生化制剂处理,可在一定程度上防御干热风的影响。如使用氯化钙闷种,溶液浓

度1%,拌种后5~6h进行播种,试验表明:该方法对抗干热风有一定的防御效果,穗粒数增加0.5~2粒^[51],一般增产3%~20%^[24]。

在小麦生育后期,干热风来临前适当喷施防控制剂或微肥,如草木灰水、磷酸二氢钾、石油助长剂、硼肥、锌肥等可改善小麦营养状态、调节新陈代谢能力、增加植株活力,从而有效抵御干热风对灌浆的危害^[105]。白黎军等^[106]对春小麦喷施植物生长调节剂(磷钾动力、天达、碧护、万代红4组)抵御干热风影响的试验结果表明:植物生长调节剂可有效抵御干热风对小麦灌浆的危害,可使小麦产量增加3.9%~15.0%,效果上万代红优于磷钾动力优于碧护。

7.4 改善农田小气候

植树造林、营造农田防护林、实行林粮间作,可改善农田小气候,减轻干热风的危害。中原冬小麦和泡桐间作有降温度、增湿度、削风速、减蒸发的作用^[105]。在平原地区实行林网化,可降低30%的风速,在干热风期间可降低0.3~0.7℃的日最高气温,提高3%~7%的相对湿度及3%左右的土壤湿度,有效降低干热风对小麦的危害^[51]。

8 讨论与展望

本文基于已有研究成果,从干热风灾害概念与分类出发,对于干热风的危害机理、气象环境成因、致灾指标、时空分布、监测预报、防御措施等方面进行总结阐述,系统评述了中国小麦干热风灾害研究新进展。总体上,我国小麦干热风灾害主要研究成果集中于20世纪80年代,尤其是在干热风的类型划分、危害机理、天气成因、致灾指标等方面取得的标志性成果,为后续研究奠定了坚实的基础。近30年来,干热风灾害环境成因、时空分布、监测预报、防御措施等方面研究成果较丰富,对于干热风危害机理等系统性研究成果偏少,有关干热风指标的研究进展缓慢。

近年来,受全国小麦种植布局、气候、灌溉、管理方式等变化的影响,小麦干热风部分研究成果已不能满足实际生产、业务服务的需求。农业气象业务上使用的《小麦干热风灾害等级》行业标准,由于未考虑土壤墒情对小麦干热风的影响、分级缺少中度指标,致使土壤墒情较好的麦区灾害评估预警等级偏高,难以开展中度灾害评估预警业务服务。干热风对小麦产量影响的量化评估,尚存在一定的不确

定性;已有研究表明:1981—2010年华北地区冬小麦开花、成熟期均有提前趋势^[107],因此,对干热风监测时段变化需进一步探讨,干热风遥感监测在识别精度、效果检验等方面仍有待深入研究。

今后针对小麦干热风灾害应重点开展如下研究:基于土壤墒情的影响,研究完善小麦干热风灾害等级指标;基于小麦干热风过程,研究灾害监测评估、预警预报方法、模型与业务应用技术;基于气候变化背景下全国小麦种植布局的变化,揭示小麦干热风灾害时空新变化及其气象环境成因,研究气候变化对小麦干热风的影响预估及适应对策。

参考文献

- [1] Hartmann D L, Tank A M G K, Rusticucci M. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535.
- [2] Alexander L V, Allen S K, Bindoff N L, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis // Contribution of Working Group I (WGI) to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Computational Geometry, 2013, 18(2): 95-123.
- [3] Lobell D B, Sibley A, Ortizmonasterio J I. Extreme heat effects on wheat senescence in India. *Nat Clim Change*, 2012, 2(3): 186-189.
- [4] 邓振镛, 张强, 倾继祖, 等. 气候暖干化对中国北方干热风的影响. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 664-671.
- [5] 吴霞, 王培娟, 陈鹏狮, 等. 黄淮海平原冬小麦最大可能蒸散的估算. *应用气象学报*, 2017, 28(6): 690-699.
- [6] 周广胜, 何奇瑾, 汲玉河. 适应气候变化的国际行动和农业措施研究进展. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 527-533.
- [7] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 1-11.
- [8] 王馥棠. 近十年来我国气候变暖影响研究的若干进展. *应用气象学报*, 2002, 13(6): 755-766.
- [9] 张宇, 王石立, 王馥棠. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究. *应用气象学报*, 2000, 11(3): 264-270.
- [10] 霍治国, 王石立. 农业和生物气象灾害. 北京: 气象出版社, 2009.
- [11] 郑大玮, 李茂松, 霍治国. 农业灾害与减灾对策. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [12] 阿布力孜, 开赛尔, 阿吉古丽, 等. 干热风对棉花生长发育的危害及对策建议. *农业科技通讯*, 2009(10): 68-69.
- [13] 苏翔, 马光锐. 俩农户抵御干热风危害玉米制种获高产的调查. *现代农业*, 2000(3): 17.
- [14] 黄润本, 黄伟峰, 沈雪苹, 等. 海南岛西南部干热风的研究. *热带地理*, 1982, 2(2): 25-30.
- [15] 何永梅. 干热风对油菜的危害与防控. *新农村*, 2016(4): 24.
- [16] 刘英才. 温州蜜柑开花座果期干热风害的防御. *农业科技通讯*, 1989(4): 16.
- [17] 张荣伦, 文振德. 干热风对云南大叶茶的影响. *茶业通报*, 1989(1): 14-15.
- [18] 贾瑞强, 赖军臣, 肖汉瑛, 等. 哈密垦区预防干热风减轻棉花蕾铃脱落的措施. *新疆农垦科技*, 2004(1): 7-9.
- [19] 祁贵明, 汪青春. 柴达木盆地干热风气象灾害分布规律及对气候变化的响应. *青海气象*, 2007, 3(2): 20-27.
- [20] 夏雪莲. 包头市小麦干热风统计及灾害情况. *内蒙古气象*, 2011(4): 53-54.
- [21] 王慧娟, 徐风梅. 干热风对商丘地区小麦生产的影响与对策. *现代农业科技*, 2011(10): 304.
- [22] 温克刚. 中国气象灾害大典. 河北卷. 北京: 气象出版社, 2008.
- [23] 刘庆桐. 中国气象灾害大典. 山西卷. 北京: 气象出版社, 2005.
- [24] 杨新海. 奎屯河流域干热风发生规律及防御措施. *新疆农垦科技*, 2008, 31(5): 60-61.
- [25] 张廷珠, 韩方池. 干热风天气麦田热量、水汽量的湍流交换及其对小麦灌浆速度影响的研究. *干旱地区农业研究*, 1995(3): 74-78.
- [26] 王邦锡, 杜元, 齐明起. 小麦在干热风条件下的生理变化-干热风的模拟装置. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1976(1): 97-100.
- [27] 王邦锡, 杜元, 齐明启, 等. 小麦在干热风条件下的生理变化 II——干热风对小麦灌浆期¹⁴C₂O₂同化作用和¹⁴C同化产物累积的影响. *植物学报*, 1978(1): 39-45.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 霍治国, 范雨娟, 杨建莹, 等. 中国农业洪涝灾害研究进展. *应用气象学报*, 2017, 28(6): 641-653.
- [31] Wang S, Zheng H, Liu S, et al. Numerical study on the stomatal responses to dry-hot wind episodes and its effects on land-atmosphere interactions. *Plos One*, 2016, 11(9): e0162852.
- [32] 朱玉洁, 杨霏云, 刘伟昌, 等. 利用作物模型提取小麦干热风灾损方法探讨. *气象与环境科学*, 2013, 36(2): 10-14.
- [33] 王姝, 刘树华, 郑辉, 等. 关中平原麦田干热风过程陆气交换特征的数值模拟. *地球物理学进展*, 2015, 30(4): 1481-1491.
- [34] 张红英, 李世娟, 诸叶平, 等. 小麦作物模型研究进展. *中国农业科技导报*, 2017, 19(1): 85-93.
- [35] 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): 9575-9577.
- [36] 苏士琦. 浅谈小麦倒伏与干热风危害. *安徽农学通报(下半月刊)*, 2009, 15(10): 154-155.
- [37] 王爱珍, 陈兰广. 干热风对鲁西北平原地区小麦高产丰收的影响. *吉林农业月刊*, 2017(9): 108.
- [38] 臧鑫, 刘海霞, 程玉红, 等. 河南省小麦干热风的危害与防治措施. *农业科技通讯*, 2013(9): 120-121.
- [39] 张志红, 成林, 李书岭, 等. 干热风天气对冬小麦生理的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 712-717.
- [40] 贾敬习. 新乡市小麦干热风的发生及防御研究. *现代农业科技*, 2008(21): 218-219.

- [41] 北方小麦干热风科研协作组. 干热风对小麦灌浆速度的影响. 气象, 1983, 9(5): 22-24.
- [42] Sofield I, Evans L T, Cook M G, et al. Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust J Plant Physiol*, 1977, 4(4): 785-797.
- [43] 刘萍, 郭文善, 浦汉春, 等. 灌浆期短暂高温对小麦淀粉形成的影响. 作物学报, 2006, 32(2): 182-188.
- [44] 杨国华, 董建力. 灌浆期高温胁迫对小麦叶绿素和粒重的影响. 甘肃农业科技, 2009(8): 3-5.
- [45] 王晨阳, 何英, 郭天财, 等. 灌浆期高温胁迫对强筋小麦旗叶叶绿素 a 荧光参数的影响. 麦类作物学报, 2005, 25(6): 87-90.
- [46] 北方十三省小麦干热风科研协作组. 小麦干热风伤害机理的研究. 作物学报, 1984, 10(2): 105-112.
- [47] 耿平, 金先春, 张锋, 等. 小麦后期青枯防御措施研究. 河南农业科学, 1988(3): 6-9.
- [48] 刘鹏飞, 王晋旭, 袁娟, 等. 小麦干热风及预防措施—以山西省晋城市小麦生产为例. 农民科技培训, 2010(4): 31-32.
- [49] 刘静, 马力文, 张晓煜, 等. 宁夏引黄灌区小麦青干指标的研究. 麦类作物学报, 2003, 23(2): 65-67.
- [50] 皇甫凌云. 小麦青枯病的发生与防治. 河南农业, 2012(5): 25-26.
- [51] 杨菁, 樊萍. 干热风的危害及其防御对策. 青海科技, 1997(1): 23-26.
- [52] 丁霞, 马晓群, 郝莹. 安徽省沿淮淮北干热风特征及其对冬小麦的影响. 安徽农业科学, 2005, 33(6): 977-978.
- [53] 时风云, 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.
- [54] 缪炳华. 淮北干热风天气过程的结构和环流背景. 气象, 1983, 9(5): 4-7.
- [55] 尤凤春, 郝立生, 史印山, 等. 河北省冬麦区干热风成因分析. 气象, 2007, 33(3): 95-100.
- [56] 王正旺, 苗爱梅, 李毓富, 等. 长治小麦干热风预报研究. 中国农业气象, 2010, 31(4): 600-606.
- [57] 孔德胤, 张喜林, 李金田, 等. 利用海温与环流因子制作干热风危害指数预报. 内蒙古气象, 2002(1): 11-13.
- [58] 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.
- [59] Ren G, Ding Y, Tang G. An overview of mainland China temperature change research. *J Meteorol Res-Proc*, 2017, 31(1): 3-16.
- [60] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 1951—2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 1-11.
- [61] 马雅丽, 栾青, 李伟伟, 等. 山西冬小麦干热风分布特征及对产量的影响. 山西农业科学, 2017, 45(7): 1134-1138.
- [62] 喇永昌, 李丽平, 张磊. 宁夏灌区春小麦干热风灾害的时空特征. 麦类作物学报, 2016, 36(4): 516-522.
- [63] 戚尚恩, 杨天明, 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.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 李红忠, 朱新玉, 史本林, 等. 黄淮海平原典型农区冬小麦干热风灾害的变化分析——以商丘为例. 地理研究, 2015, 34(3): 466-474.
- [67] 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.
- [68] 王明涛, 马焕香, 翟贵明, 等. 山东省滨州市干热风气候特征及对小麦千粒重的影响分析. 安徽农业科学, 2010, 38(23): 12898-12900.
- [69] 武万里, 韩世涛. 气候变暖对宁夏小麦干热风的影响. 宁夏农林科技, 2007(1): 64-66.
- [70] 胡玲, 汪青春, 刘宝康, 等. 青海高原干热风的分布特征及其对气候变化的响应. 气象, 2014, 40(4): 450-457.
- [71] 史印山, 尤凤春, 魏瑞江, 等. 河北省干热风对小麦千粒重影响分析. 气象科技, 2007, 35(5): 699-702.
- [72] 陈怀亮, 邹春辉, 付祥建, 等. 河南省小麦干热风发生规律分析. 自然资源学报, 2001, 16(1): 59-64.
- [73] 刘德祥, 孙兰东, 宁惠芳. 甘肃省干热风的气候特征及其对气候变化的响应. 冰川冻土, 2008, 30(1): 81-86.
- [74] 李演达, 吴统文, 刘向文. 初值对中国东部初夏土壤湿度可预报性影响. 应用气象学报, 2018(29): 423-435.
- [75] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 土壤湿度与气候变化关系的研究进展与展望. 地球科学进展, 1999, 14(3): 299-305.
- [76] 姜亚珍. MODIS 监测黄淮海平原冬小麦长势与土壤湿度. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [77] 李东升. 干热风天气对小麦的危害及防御对策. 河南农业, 2007(12): 16-17.
- [78] 杨永华. 旱涝和干热风对安徽省阜阳地区小麦生产的影响及预防措施. 农业灾害研究, 2014(2): 45-47.
- [79] Seemann J, Chirkov Y I, Lomas J, et al. *Agrometeorology*. New York: Springer-Verlag, 1979.
- [80] 王晓云, 郭文利, 奚文, 等. 利用“3S”技术进行北京地区土壤水分监测应用技术研究. 应用气象学报, 2002, 13(4): 422-429.
- [81] 姜亚珍, 张瑜洁, 孙琛, 等. 基于 TVDI 河北省干热风同期土壤湿度监测研究. 遥感技术与应用, 2014, 29(3): 442-450.
- [82] 北方小麦干热风科研协作组. 小麦干热风气象指标的研究. 中国农业科学, 1983, 16(4): 68-75.
- [83] 杨珍林. 我国北方小麦干热风区划的几个技术问题. 陕西气象, 1980(7): 6-11.
- [84] 简慰民, 申明华. 新疆干热风区划. 新疆农业科学, 1981(3): 21-24.
- [85] 牛晋源, 石兰璞, 王密风. 晋城小麦干热风灾害分析. 山西气象, 1996(3): 28-30.
- [86] 屈振江, 郑小华, 李星敏. 陕西省冬小麦干热风分布特征及预测研究. 中国农学通报, 2013, 29(18): 50-56.
- [87] 霍治国, 姜燕, 李世奎, 等. 小麦干热风灾害等级. 北京: 气象出版社, 2007.
- [88] 刘静, 马力文, 张晓煜, 等. 春小麦干热风灾害监测指标与损失评估模型方法探讨——以宁夏引黄灌区为例. 应用气象学报,

- 2004, 15(2): 217-225.
- [89] 王春乙, 季贵树. 石家庄地区干热风年型指标分析及统计预测模型. 气象学报, 1991, 49(1): 104-107.
- [90] 史定珊. 冬小麦生产气象保障概论. 北京: 气象出版社, 1994.
- [91] 刘大锋, 李海华, 吴海镇. 阿勒泰地区干热风的时空特征及防御对策. 沙漠与绿洲气象, 2006, 29(3): 11-13.
- [92] 张翠英, 樊景豪, 张斌, 等. 鲁西南干热风发生规律及统计预测模型. 干旱气象, 2016, 34(1): 207-211.
- [93] 刘静, 张学艺, 马国飞, 等. 宁夏春小麦干热风危害的光谱特征分析. 农业工程学报, 2012, 28(22): 189-199.
- [94] 李颖, 韦原原, 刘荣花, 等. 河南麦区一次高温低湿型干热风灾害的遥感监测. 中国农业气象, 2014, 35(5): 593-599.
- [95] 张翠英. 菏泽市小麦干热风气候特征分析及预报. 山东气象, 2004, 24(2): 46-47.
- [96] 曹玲, 窦永祥. 河西走廊中部干热风气候特征分析及其预报方法. 干旱地区农业研究, 1997(3): 96-102.
- [97] 吕学梅, 吴君, 成兆金. 利用 MM5 输出产品进行小麦干热风预报. 中国农业气象, 2007, 28(增刊 I): 208-209.
- [98] 魏东升. 海南州麦区干热风的危害及防御措施. 青海农林科技, 2008(2): 41-42.
- [99] 龚绍先. 不同类型小麦品种对干热风抵抗能力的初步研究. 中国农业大学学报, 1981, 14(3): 89-98.
- [100] 陆正铎, 常守吉, 刘新正, 等. 不同小麦品种抗御干热风能力的研究. 北方农业学报, 1983(4): 20-25.
- [101] 袁冬贞. 干热风对小麦的危害及预防措施. 陕西农业科学, 2011, 57(6): 171-172.
- [102] 王晨, 谢蕴琳, 张岩, 等. 天津地区干热风气候对小麦的影响及防御措施. 天津农林科技, 2012(1): 24-25.
- [103] 陈学升. 干热风对农作物的影响及其防御. 农业科技与信息, 1995(7): 11.
- [104] 王家润, 李飒, 高虔, 等. 驻马店小麦干热风发生规律及其防御措施. 河南农业, 2012(17): 26.
- [105] 赵娜, 刘赞. 我国小麦干热风危害及其防御措施研究. 农业灾害研究, 2011(2): 68-73.
- [106] 白黎军, 汪仲良, 祁亚琴. 植物生长调节剂对小麦干热风御防试验初报. 甘肃农业科技, 2010(8): 35-36.
- [107] 邱美娟, 刘建栋, 邹定荣, 等. 华北冬小麦开花及成熟期变化特征分析. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 250-255.

Review on Disaster of Hot Dry Wind for Wheat in China

Huo Zhiguo¹⁾²⁾ Shang Ying¹⁾ Wu Dingrong¹⁾ Wu Li³⁾ Fan Yuxian⁴⁾
Wang Peijuan¹⁾ Yang Jianying¹⁾ Wang Chunzhi⁵⁾

¹⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

³⁾ (Fujian Meteorological Service Center, Fuzhou 350001)

⁴⁾ (Yiyang Meteorological Bureau of Hunan Province, Yiyang 413000)

⁵⁾ (National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

Hot dry wind (HDW) is one of the major agro-meteorological disasters which impact wheat production in North China. From the aspect of its definition, classification and research methods, recent progress are reviewed on its influencing mechanism, meteorological environmental causes, disaster index, spatial-temporal distribution, monitoring and forecasting measures, defensive and mitigation ways, and the future research direction is discussed. In China, HDW can be classified as three major kinds, including high temperature with low humidity, green-dry after rain, and dry wind. HDW can intensify transpiration, damage flag leaf, weaken root activity, shorten growth duration, and decrease accumulated dry matter, chlorophyll content and photosynthetic rate. Meteorological environment of HDW is mainly determined by dry hot-air weather system, influenced by climate warming and soil moisture. Disaster index of HDW can be divided into three kinds: Morphological, synoptic, and comprehensive index. The damage of HDW to wheat is heavy in both east and west parts while light in the central part of China. HDW mainly occurs in three areas, including the Huang-Huai-Hai Plain, Hexi Corridor and Xinjiang. The damage decreases with

elevation of altitude, and generally it has no impact in areas higher than 1700—1800 meters. One month before harvest is the main occurrence period of HDW. It starts from early May in China, and postpones to mid-late July from south to north and from southeast to northwest. For winter wheat, the disaster date is earlier than spring wheat. Presently, major monitoring and forecasting methods include ground meteorological monitoring, remote sensing monitoring, classification and forecast based on weather prediction, statistic forecast, and numerical prediction products. Temporal and spatial pattern of HDW in China is obviously affected by the change of wheat plantation layout, climate, irrigation and field management. Under historical climate warming condition, HDW days in most regions have a sudden change in the 1980s and 1990s. During the recent 30 years, HDW days and the degree of influence have increased obviously. Improvement of irrigation conditions obviously relieves its occurrence and influence. Future research directions include incorporating soil moisture into the existing HDW hazard grade index, researching and developing process-based disaster monitor and assessments, prediction and early warning methods, model simulations and business application technologies, investigating the change of spatial and temporal distribution of HDW and the formation of its meteorological environment under future climate change and wheat planting layout change.

Key words: hot dry wind for wheat; index; disaster effects