文章编号:1000-7601(2022)02-0205-08

# 一种干热风对冬小麦千粒重影响的评估方法

成 林<sup>1,2</sup>,张志红<sup>1,2</sup>,胡程达<sup>1,2</sup>

(1.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,河南郑州 450003;2.河南省气象科学研究所,河南郑州 450003)

摘 要:为科学评估干热风灾害对冬小麦千粒重的影响,助力农业防灾减灾,采用叶片光合作用和干物质积累 概念模型,于2010—2011、2011—2012 年和2013—2014 年在郑州农业气象试验站开展干热风控制试验研究。通过 分析不同强度灾害与冬小麦叶片光合速率受胁迫程度的关系,对灾害影响下的光合作用速率进行修订,从而实现干 热风灾害对千粒重影响的定量评估。结果表明:不同程度干热风使小麦叶片光合作用速率降低了 0.66% ~ 36.62%, 日最高气温是造成胁迫最关键的气象因子;评估模型在正常年份、干热风典型年和试验条件下对千粒重的估算准确 率均在 95%以上,相对误差均小于 4.5%;通过计算理想千粒重与实测千粒重的差值,评估得到,近年来代表站点灌浆 前中期和临近收获期 1~2 d 轻干热风造成的千粒重损失为 1~2 g,减产率为 0~5%;其他时期不同程度干热风造成 的千粒重损失为 1~7 g 不等,严重的减产率达 12%~18%。综上,该评估方法有一定的适用推广性,能够相对真实 地、动态地评估灌浆不同时期干热风对小麦千粒重的影响。

关键词:干热风;干粒重;小麦灌浆期;光合;动态评估 中图分类号:S424;S512 文献标志码:A

## A method for evaluating impact of dry-hot wind on 1000-kernel weight of winter wheat

CHENG Lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhihong<sup>1,2</sup>, HU Chengda<sup>1,2</sup>

(1. CMA · Henan Agrometeorological Support and Applied Technique Key Laboratory, Zhengzhou, Henan 450003, China;
 2. Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: In order to estimate scientifically the influence of dry-hot wind on 1000-kernel weight of winter wheat and assist in agricultural disaster prevention and mitigation, conceptual models of leaf photosynthesis and dry matter accumulation was adopted, and dry-hot wind control tests were carried out at Zhengzhou Agrometeorological Experimental Station in years of 2010-2011, 2011-2012 and 2013-2014. To evaluate quantitatively the impact of dry-hot wind on 1000-kernel weight, the relationship between different intensity of the hazard and stress degree of photosynthetic rate of winter wheat leaves was analyzed and the photosynthesis rate influenced by dry-hot wind was revised. The results showed that the rate of leaf photosynthesis was reduced by 0.66% ~36.62% under different degrees of the hazard. Daily maximum temperature was the most critical factor causing the stress. In normal years, typical years of dry-hot wind and under field experimental conditions, the average accuracy of simulated 1000-kernel weight by the evaluation model was higher than 95%, and the relative error was less than 4.5%. By calculating the difference between a hypothetic ideal 1000-kernel weight and the measured value during the recent years at representative stations, the analysis indicated that the loss of 1000-kernel weight was about 1~2 g and the loss of the final yield was  $0 \sim 5\%$  when the light hazard of dry-hot wind lasted  $1 \sim 2$  days during the early middle stage of grain filling or approaching harvesting. In other stages, the loss of 1000-kernel weight was  $1 \sim 7$  g, and the yield reduction rate reached to 12%~18% under serious hazard condition. This method for evaluating the impact of dry-hot wind has a certain applicability, as it can objectively and dynamically assess the effects of dry-hot wind on grain weight during the different grain filling stages.

Keywords: dry-hot wind; 1000-kernel weight; wheat; grain filling stage; photosynthesis; dynamic assessment

干热风是一种气温较高、空气相对湿度较低、 同时伴有一定风力的农业灾害性天气,对我国北方 冬小麦灌浆有严重危害[1]。在冬小麦漫长的生长 过程中,往往持续几天的干热风天气,就可强烈破 坏植株的水分平衡和光合系统,导致冬小麦灌浆进 程受阻,粒重大幅降低,例如1992年山东胶州地区 出现的干热风灾害使冬小麦千粒重较上年下降了 14.1 g<sup>[2]</sup>;1994 年的干热风天气使张掖全区小麦较 上年减产 10% 左右<sup>[3]</sup>: 2004、2007、2013、2017 等年 份,我国冬小麦主产区河南、河北和山东等地均有 较大范围的干热风灾害发生。受气候变化影响,河 套平原、西北地区等麦区干热风灾害随气候干暖化 危害加重[4-5],华北麦区干热风频率、天数和范围在 2000年以后也呈增加趋势[6-8],因此开展干热风灾 害定量评估、客观认识灾害的真实影响是发展现代 农业科学防灾减灾的必然需求[9],对于小麦生产稳 定发展具有极为重要的意义。

我国研究学者从上世纪70年代中期开始关注 干热风灾害机理和影响评估[10],目前在干热风灾害 气象等级指标、气候区划[11-12]、防御措施[13]等方面 的研究已相对成熟,但干热风灾害定量评估的研究 成果仍较为匮乏目方法各异,目前主要有三类研究 方法,即:(1)数理统计法,通过统计方法分离冬小 麦抽穗~成熟期气象产量,并建立干热风产量灾损 的统计模型,计算发现在重度干热风危害下,黄淮 海地区冬小麦减产率在 21.52%~39.80% 之 间[14-15];(2)田间试验法,利用不同的控制装置模拟 或观测干热风灾害,着重评估干热风对叶片光合速 率、蒸腾速率及气孔导度等生理指标的影响[16-17]: (3)作物模型法,目前国际通用的几种作物模型均 无干热风灾害影响模拟模块,朱玉洁等<sup>[18]</sup>利用小麦 生物学特性自建作物模型,增加了温、湿、风致灾因 子对小麦产量形成的影响函数,可为干热风非典型 年份灾损影响评估提供依据。这些研究均为开展 干热风灾害影响评估提供了科学的技术支撑,但与 干旱等其他农业气象灾害评估研究相比,专门讨论 冬小麦灌浆不同时期、不同强度干热风灾害对千粒 重的定量评估研究还较少,不利于科学研判灾害影 响规律,并影响防灾减损决策部署,更缺乏开展灾 损定量评估的模型和工具,远不能满足现代农业防 灾减灾、保证粮食安全生产的需求<sup>[19]</sup>。

本文拟在前人研究基础上,利用叶片光合作用 和干物质积累概念模型,模拟冬小麦粒重的日增长 过程,结合田间试验结果,构建干热风对粒重的影 响评估模型,将田间试验与概念模型两种方法结 合,实现灌浆不同时期干热风对千粒重影响的动态 评估,为科学认识农业气象灾害的影响,合理规划 防灾减灾措施提供参考。

## 1 研究数据与方法

## 1.1 数据来源

本文所用 1981—2017 年冬小麦大田观测资料、 2011—2017 年光合有效辐射资料源于郑州农业气 象试验站(34°43'N,103°39'E),大田连续观测品种 为'郑麦 366',观测内容包括发育期、各发育期叶面 积指数、有效茎密度、千粒重等;光合有效辐射利用 PQS1 光量子传感器(Kipp&Zonen 公司,荷兰)进行 连续观测,观测波长范围(400~700 nm)±4 nm。传 感器安装在作物观测田块梯度塔 3 m 高度处,仪器 灵敏度为4~10  $\mu$ V/光量子密度( $\mu$ mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), 利用转换系数4.55  $\mu$ mol·J<sup>-1</sup>,将观测的光量子通量 密度转换为辐射能量密度<sup>[20]</sup>。

郑州、新乡、许昌、林州代表站的气象资料和冬 小麦观测资料源于各农业气象观测站。

### 1.2 冬小麦粒重的形成模拟

1.2.1 光在群体内的分布 光在冬小麦群体内的 分布服从指数递减规律,到达冠层某一层深度处的 光合有效辐射可利用门司-佐伯定律<sup>[21]</sup>计算,即:

 $PAR_{L} = PARCAN \times exp(-k \times LAI_{L})$  (1) 式中,  $PAR_{L}$  为冠层某一层深度处的光合有效辐射 (J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), *PARCAN* 为到达冠层顶部的光合有 效辐射(J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), k 为消光系数, 取 0.85(无量 纲),  $LAI_{L}$  是冠层顶至冠层 L 深度处的累积叶面积 指数。

1.2.2 瞬时光合作用速率 根据作物系统模拟原理,假定小麦冠层由上、中、下3层大叶构成,某一层次单位面积叶片的瞬时光合速率可以用负指数模型来描述:

 $F_{\rm G} = PLMX \times \left[1 - \exp(-\varepsilon \times PAR_L/PLMX)\right]$ (2)

式中, $F_{c}$ 为单位面积叶片的瞬时光合速率(kg・hm<sup>-2</sup>・h<sup>-1</sup>);*PLMX* 是单叶最大光合速率(kg・hm<sup>-2</sup>・h<sup>-1</sup>),参考取值 40 kg・hm<sup>-2</sup>・h<sup>-1</sup>; $\varepsilon$  是光转换因 子,即吸收光的初始利用效率,对于小麦可取值 0.45 kg・hm<sup>-2</sup>・h<sup>-1</sup>/(J・m<sup>-2</sup>・s<sup>-1</sup>)。群体的瞬时光合作 用速率  $P_{c}(kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1})$ 利用高斯三点积分法进

行加权求和[22]:

 $P_{c} = \sum (F_{c}(i) \times WT(i)) \times LAI \quad (3)$ 式中,*i* 为层数,*WT* 为高斯积分三点法的权重值 (表1)。

1.2.3 净同化物积累 单位面积冬小麦群体的逐 日净同化量可以概念化表达为:

 $A_{d} = P_{G} \times (1 - B_{r}) \times C_{w} \times L_{D} \times (1 - r_{e})$  (4) 式中, $A_{d}$  为单位面积冬小麦群体的逐日净同化量 (kg · hm<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>), $B_{r}$  为呼吸消耗系数(无量纲),参 考取值 0.2; $C_{w}$  为同化物转换系数,参考值为 0.5; $L_{D}$ 为日长(h), $r_{e}$  为生物消耗系数,取 3%<sup>[23]</sup>。

1.2.4 千物质向籽粒的分配 冬小麦群体通过光 合作用产生的同化物,最初主要为葡萄糖和氨基 酸,通过一系列转换形成植株的干物质,群体干物 质的日增长量可以表达为:

 $TD = \zeta \times 0.95 \times A_d / (1 - 0.05)$  (5) 式中, TD 为群体干物质的日增量(kg·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>); ζ 是 CO<sub>2</sub> 与碳水化合物(CH<sub>2</sub>O)的转换系数, 是 CH<sub>2</sub>O 分子量与 CO<sub>2</sub> 分子量的比值, 为 0.682; 0.95 是碳水 化合物转换成干物质的系数; 0.05 为干物质中矿物 质的含量<sup>[24]</sup>。干物质向籽粒的分配用(6) 式计算:

WT = TD × Gr × (1 + W) (6) 式中,Gr 为分配系数(0.2),W 为籽粒含水率,取 12%,为便于分析,将 WT 转换为千粒重:

$$Ker = \sum WT \times U/(S_v \times N_o)$$
(7)

式中,*Ker* 为冬小麦千粒重(g), $S_v$  为每平方米有效茎数, $N_o$  为单穗粒数,U 为单位换算系数(无量纲)。最终千粒重为 *Ker* 开花后至成熟天数的积累。

## 1.3 干热风对千粒重的影响

1.3.1 千热风灾害控制试验 外界环境条件变化 可使叶片光合速率发生改变,从而影响最终粒重的 形成。干热风灾害控制试验于 2010—2011、2011— 2012 年和 2013—2014 年在郑州农业气象试验站 (34°43′N,103°39′E)进行<sup>[25]</sup>。供试冬小麦品种均 为'郑麦 366',为当地主栽品种,半冬性,平作直播, 土壤质地为砂壤土。试验地小麦均于上年度 10 月 14 日播种,2010—2011、2011—2012 年和 2013— 2014 年度冬小麦开花日期分别为4 月 26 日、4 月 24 日和4月 21 日,成熟日期分别为5 月 29 日、6 月 2 日和5 月 29 日、3 个试验年度冬小麦全生育期均无 明显病虫害及农业气象灾害发生,冬小麦灌浆期0~ 50 cm 深度土壤相对湿度与大田保持—致,变化范 围为 50%~57%。处理时期均在小麦开花后 12、17 d 和 27 d 进行,记为灌浆前期(T1)、中期(T2)和后 期(T3)。

试验利用简易气候箱人工模拟干热风天气条件。气候箱的每个重复处理由长 200 cm,宽 150 cm,高 180 cm 的不锈钢房型支架组成,支架外罩为透光良好的 PVC 塑料薄膜,前两个试验年度箱内利用 2 根 2 000 W 的红外加热灯管为热源,利用温控 仪调节箱内温度,以排气风扇为风源,风速基本恒定。最后一个试验年度利用风量型热风机控制温度及风速。由于空气湿度无法控制,试验处理均选择在相对湿度较小的晴天麦地进行,处理从上午 10:00开始,11:00—15:00 气温维持较高水平,以后逐渐降低,17:00 以后,撤去气候箱,温湿度与当时大田一致,至此,计为一个干热风日。处理的同时,用温湿度自记表测定箱内和箱外小麦冠层高度处的温湿度,并用手持轻便风速表测量箱内外风速。

参照中国气象局 2007 年发布的气象行业标准 《小麦干热风灾害等级》(QX/T82—2007)<sup>[26]</sup>(表 2),每时期试验控制设轻度和重度两个灾害等级, 将人工气候箱外无干热风且水肥管理相同的地块 设为对照(CK),均设定 3 个重复。

利用 LI-6400 便携光合作用测定系统(LI-COR 公司,美国)在试验控制及对照地块随机选择 10 片 长势一致的小麦旗叶,在干热风控制后次日和干热 风控制 8 d 后 10:00 进行光合作用速率(*Pn*)测定。 收获后进行产量及构成因素测定。

1.3.2 模型修订 基于田间试验,可测定不同时 期、不同强度干热风对小麦叶片光合速率的胁迫程 度,用 S<sub>o</sub>(%)表示:

$$S_{\rm p} = \frac{|n_{\rm b} - n_{\rm a}|}{n_{\rm a}} \times 100\% \quad (n_{\rm b} < n_{\rm a}) \qquad (8)$$

式中, $S_p$ 为干热风对小麦叶片光合速率的胁迫程度 (%); $n_b$ 为干热风灾害胁迫后的观测值, $n_a$ 为无胁 迫的对照值。 $S_p$ 值越大表明灾害胁迫越强;若 $n_b$  >  $n_a$ ,表明胁迫对作物无明显负影响,则(8)式不适用。

表 1 高斯积分三点法的权重值

Table 1 Gauss integration weights for three-point method

权重 Weight	i = 1	<i>i</i> = 2	<i>i</i> = 3
WT(i)	0.27778	0.44444	0.27778

#### 表 2 黄淮海地区冬小麦干热风灾害等级指标

 Table 2
 Disaster grades of dry-hot wind for winter

wheat in Huanghuaihai Plain

等级 Creade	日最高气温 Daily maximum	14:00相对湿度 Relative humidity	14:00 风速 Wind speed at
Grade	temperature∕℃	at 14:00/%	$14:00/(m \cdot s^{-1})$
轻 Light	≥32	≤30	≥3
重 Heavy	≥35	≤25	≥3

假定小麦群体上、中、下3层受的影响基本相同,则 受灾后(2)式叶片的瞬时光合速率修订为 $F_{c} \times (1 - S_{p})$ 。试验站不具备呼吸消耗测定条件,故暂未 修订。

#### 1.4 评估模型的应用

干热风天气出现时,利用粒重估算模型,可假 设叶片光合速率未受影响,从而可模拟一个无灾害 影响的千粒重,称为"理想千粒重",理想千粒重与 实际千粒重的差值,即为千粒重的损失量,未知实 际千粒重时可用模拟千粒重代替,该损失量占理想 千粒重的百分比,即减产率。

## 2 结果与分析

## 2.1 干热风对冬小麦光合速率的影响

干热风控制试验记录和气象条件及对应的  $S_p$ 值见表 3。从表中可以看出,干热风对光合速率的 胁迫,随着气温的升高明显增大,二者显著相关(R=0.7047); $S_p$ 与相对湿度的相关系数为-0.2005,与 风速的相关性更小,均未通过显著性检验,但不能 否定其对光合速率的协同影响。

表 3 中  $S_p$ 与  $T_{max}$ 、U 和  $f_{10}$ 的量化关系可以用多 元线性拟合方程(9)表达,方程拟合相关系数  $R = 0.7466_{\circ}$ 

$S_{\rm p} = 10.7 + 4.05 (T_{\rm max})$	-32) - 0.528(30 - U)	)
$-0.997(f_{10} - 3)$	(9	)

根据试验处理结果,灌浆前期发生轻度干热风

#### 表 3 不同干热风处理对叶片光合作用速率的胁迫程度

 Table 3
 Stress of different treatments of dry-hot wind

on	photosynthetic	rate of	leaves
----	----------------	---------	--------

日最高气温 Daily maximum temperature T /℃	14:00 相对湿度 Relative humidity at 14:00 U/%	14:00 风速 Wind speed at 14:00 f <sub>10</sub>	胁迫程度 Stress degree
I <sub>max</sub> / C		/(m•s¹)	3 <sub>p</sub> / 70
32.6	15	4.9	8.98
32.8	29	3.6	0.66
32.9	18	3.8	9.69
32.9	27	4.9	15.94
34.2	25	3.1	15.38
34.3	25	5.0	20.18
34.7	19	5.0	3.98
35.2	16	4.9	19.41
36.8	29	3.5	34.89
37.2	21	4.9	11.87
37.8	25	4.1	39.08
38.2	20	5.0	36.62
38.4	18	5.0	19.33

注:*T*<sub>max</sub>为日最高气温,*U*为14:00 空气相对湿度,*f*<sub>10</sub>为14:00 风速,*S*<sub>n</sub>为胁迫程度,下同。

Note:  $T_{\text{max}}$  is daily maximum temperature, U is relative humidity at 14:00,  $f_{10}$  is wind speed at 14:00,  $S_{\text{p}}$  is stress degree, the same below.

时,灾后 8 d 叶片光合作用已不受胁迫,表明叶片功 能基本恢复正常。而灌浆前期重干热风后 8 d,两个 年度平均 S<sub>p</sub>由 15.6%降为 8.27%,相当于初次受损 率的 50%左右(表4),随后叶片功能开始衰退,模拟 时不再考虑植株自我修复情况。灌浆中后期出现 干热风,随着叶片进一步衰老发黄,灾害的影响不 可逆转<sup>[27]</sup>。

### 2.2 千粒重模拟验证

2.2.1 正常年份的千粒重模拟验证 利用 1981— 2017 年郑州地区资料完整且未出现干热风年份的 冬小麦千粒重对上述计算方程进行检验。其中, 2010 年以前无 PAR 观测资料的年份,利用光合有效 辐射与太阳总辐射的转换关系估算<sup>[28]</sup>,太阳总辐射 利用 FAO 推荐的方法<sup>[29]</sup>推算;2011—2017 年利用 PAR 实测资料。小麦冠层内不同层次 LAI 取业务观 测值。

利用(1)至(8)式,对郑州地区冬小麦千粒重进 行模拟,结果见图 1。图中虚线为 1:1线,22 对样 本的散点图线性趋势线截距 0.7118,相关系数 R<sup>2</sup> = 0.8024,观测值与模拟值的均方差为 2.32,模拟千粒

表 4 灌浆前期干热风处理后叶片光合作用速率的 S<sub>n</sub>值

Table 4  $S_p$  value of leaf photosynthetic rate after dry-hot wind treatments in early stage of grain filling

年份 Year	处理时间/d Time of treatment	轻干热风 Light degree of dry-hot wind	重干热风 Heavy degree of dry-hot wind
2011—2012	T1	0.66	11.87
	T1+8	/	4.04
2013—2014	T1	3.98	19.33
	T1+8	/	12.50
	T1	2.32	15.60
十均	T1+8	/	8.27

注:T1 表示灌浆前期;"/"表示(8)式不适用,无对应值。

Note: T1 represents early grain filling stage; "/" represents formula (8) is not applicable and has no corresponding value.



图 1 正常年份冬小麦千粒重实测值与模拟值的相关性 Fig.1 Relavence of measured and simulated value of 1000-kernel weight in normal years

重的平均准确率为95.80%,相对误差4.23%。说明 实测值与模拟值一致性较好,基本能够满足开展千 粒重影响分析需求。

2.2.2 基于灾害控制试验的千粒重验证 利用(1) ~(9)式计算 2010—2011、2011—2012 年和 2013— 2014 年干热风灾害试验条件下的千粒重值,具体结 果见表 5。12 组样本千粒重的平均模拟准确率为 97.8%, RMSE = 0.9622,绝对误差 0.76 g,相对误差 1.54%。其中,2011—2012 年灌浆后期重干热风处 理模拟的千粒重准确率相对较低,为 90.09%,主要 原因是该年份 5 月 21 日冬小麦已接近成熟,小麦遭 受重度干热风后,植株加速衰老,籽粒干物质出现 "倒灌"现象,光合速率的降低已不是千粒重大幅下 降的主要因素。

2.2.3 千热风年份的千粒重模拟验证 实际大田 生产中,干热风日往往随机连续、或者不连续出现。 当出现多个干热风日时,认为后一次干热风的影响 叠加在前一次影响之上,利用(1)~(9)式即可模拟 得到该年份的千粒重值。考虑早期作物品种和栽 培管理方法的差异,重点将 1990 年以后灌浆期出现 干热风天气,且无明显连阴雨、大风倒伏等灾害的 年份作为干热风典型年,千粒重验证结果见表 6。 在 5 个观测资料齐全的典型年份中,模拟千粒重的 平均准确率为 96.8%, *RMSE* = 1.2162,绝对误差 1.41 g,相对误差 3.16%。由于 *PAR*采用了估算值,表 6 中的平均模拟准确率略低于表 5,误差略高于田间 试验的情况,但模拟结果仍有较高的准确率,表明 干热风对千粒重影响评估模型的简化和假设基本 适用,可以模拟大田干热风随机出现的情况。

## 2.3 干热风对冬小麦千粒重的影响评估与应用

2.3.1 影响评估 表 5 和表 6 均反映出灌浆的不同 时期、干热风日的具体气象条件均对千粒重有不同 影响。表 5 中 2010—2011、2011—2012 年和 2013— 2014 年各控制试验的理想千粒重分别为 39.45、 38.34、38.91 g,由此计算得出 3 个试验年份灌浆期 前 1 天的轻干热风千粒重损失为 1~2 g,减产率 2.0%~5.0%,灌浆前期和后期重干热风、或灌浆中 期不同程度干热风造成的千粒重损失为 2~7 g 不 等,严重的减产 17.6%。

表6中,1999-2000、2003-2004年和2007-

Table 5 Verification of 1000-kernel weight based on dry-hot wind experiments									
年度 Year	试验日期 Date of treatment (m-d)	T <sub>max</sub> ∕℃	U /%	$f_{10} \\ /(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	灾害等级 Disaster grade	实测千粒重 Measured 1000-kernel weight/g	模拟千粒重 Simulated 1000-kernel weight/g	准确率 Accuracy /%	理想千粒重 Ideal 1000-kernel weight/g
	05-08	32.6	15	4.9	轻 Light	37.72	37.03	98.17	
2010-2011	05-13	32.9	27	4.9	轻 Light	35.56	35.20	98.99	39.18
	05-23	33.3	21	4.9	轻 Light	37.15	36.40	97.98	
	05-06	32.8	29	3.6	轻 Light	36.45	36.42	99.92	
	05-06	37.2	21	4.9	重 Heavy	34.57	33.39	96.58	
2011-2012	05-11	32.9	18	3.8	轻 Light	35.56	35.85	99.18	36.70
	05-11	35.2	16	4.9	重 Heavy	33.70	34.10	98.81	
	05-21	38.3	19	4.9	重 Heavy	31.59	34.72	90.09	
	05-03	34.7	19	5.0	轻 Light	37.89	37.61	99.26	
2013—2014	05-03	38.4	18	5.0	重 Heavy	35.39	34.21	96.67	29 77
	05-08	34.3	25	5.0	轻 Light	35.82	34.96	97.60	38.77
	05-08	38.2	20	5.0	重 Heavy	32.06	32.05	99.97	

表 5 基于干热风试验的千粒重模拟验证

表 6 郑州地区干热风典型年份千粒重模拟验证

Table 6 Verification of 1000-kernel weight for typical years of dry-hot wind in Zhengzhou

年度 Years	日期 Date (m-d)	$T_{ m max}$ /°C	U /%	$f_{10}$ /(m·s <sup>-1</sup> )	灾害等级 Disaster grade	实测千粒重 Measured 1000-kernel weight/g	模拟千粒重 Simulated 1000-kernel weight/g	准确率 Accuracy /%	理想千粒重 Ideal 1000-kernel weight/g
100/1005	05-08	35.2	23	3.3	重 Heavy	41.4	41.56	00.61	43.07
1994—1995	05-22	32.7	16	3.0	轻 Light	41.4	41.50	<i>))</i> .01	43.77
1999—2000	05-19	32.9	11	3.0	轻 Light	45.65	44.99	98.55	46.43
2002 2004	05 - 17	32.3	15	3.5	轻 Light	41.05	42.13	97.37	42.44
2003—2004	05-24	34.5	27	3.3	轻 Light				
2007-2008	05-20	33.1	21	3.2	轻 Light	38.82	38.34	98.76	39.05
	04-30	33.6	24	3.0	轻 Light				
2016—2017	05-10	34.5	14	3.2	轻 Light	46.14	41.47	89.88	46.24
	05-18	35.9	24	4.3	重 Heavy				
	05-19	32.4	28	3.7	轻 Light				
	05 - 28	38.0	23	5.0	重 Heavy				

2008 年冬小麦生长季干热风主要出现在灌浆中期, 但气温不高,程度较轻,累积发生日数1~2 d,造成 的千粒重损失在0.23~1.39 g,减产率0.6%~3.3%。 1994—1995 年冬小麦灌浆前期重干热风与灌浆中 期轻干热风影响叠加,产量损失5.8%;2016—2017 年冬小麦生长季郑州地区出现5个干热风日,覆盖 冬小麦灌浆的各个时期,但由于观测地段灾前采取 了灌溉措施抵御干热风的影响,计算得理想千粒重 与实际千粒重的损失仅0.1 g。采取措施可以减轻 干热风灾害的影响,但不能掩盖灾害的存在,若不 采取措施,利用模型计算得出:2016—2017 年冬小 麦生长季郑州地区千粒重损失约4.8 g。

2.3.2 模型应用 (9)式中的各项系数是进行干热 风对千粒重影响模拟的关键。(9)式中干热风天气 对叶片光合速率胁迫的关系模型是基于'郑麦 366' (半冬性)一个品种构建的,但从郑州地区干热风典 型年模拟情况看,与该作物品种特性相似的其他品 种,在已知作物长势(叶面积、群体密度、穗粒数等) 的条件下也可试用。因此利用稳定种植半冬性品 种、田间耕作管理习惯与郑州相似,灌浆期无明显 连阴雨、病虫害等灾害,且有作物观测资料的新乡、 许昌、林州农业气象观测站资料,模拟分析近年来 干热风对千粒重的影响。结果见表7。

由表7可以看出,不同站点、不同干热风典型年 千粒重的模拟准确率保持在90%以上,平均准确率 为94.68%,说明构建的模型有一定的适用推广性, 能够相对客观地反映不同灌浆时期干热风对千粒 重的影响,可以满足灾害评估业务服务需求。3个 代表站共6个典型年的千粒重损失达0.26~5.84g, 造成的产量损失在0.6%~12.4%之间,其中,林州站 2013—2014年和2016—2017年产量损失分别为 6.2%和12.4%;许昌和新乡站2016—2017年冬小麦 生长季因干热风造成的减产率也达7.5%和6.6%。 其他典型年份对产量损失的估算在合理范围内。

地点 Site	年度 Year	干热风日 (灾害等级)(m-d) Date of dry-hot wind (disaster grade)	模拟千粒重/g Simulated 1000-kernel weight	实测千粒重/g Measured 1000-kernel weight	准确率/% Accuracy	理想千粒重/g Ideal 1000-kernel weight	千粒重损失/g Loss of 1000-kernel weight
	2012—2013	05-11(轻 Light) 05-12(重 Heavy)	39.73	41.95	93.9	44.29	2.34
新乡 Xinxiang	2016—2017	05-10(轻 Light) 05-18(重 Heavy) 05-25(轻 Light) 05-26(轻 Light) 05-27(重 Heavy) 05-28(重 Heavy) 05-29(轻 Light)	41.63	43.70	95.03	46.78	3.08
2006- 许昌 Xuchang 2016-	2006—2007	05-16(轻 Light) 05-17(重 Heavy) 05-28(重 Heavy)	43.25	46.23	93.11	46.49	0.26
	2016—2017	05-25(轻 Light) 05-27(重 Heavy) 05-28(重 Heavy)	41.32	39.03	94.46	42.21	3.18
	2013—2014	05-21(轻 Light) 05-26(轻 Light)	42.83	42.28	98.72	45.08	2.80
林州 Linzhou	2016—2017	05-10(轻 Light) 05-11(轻 Light) 05-12(轻 Light) 05-17(重 Heavy) 05-18(重 Heavy) 05-19(重 Heavy) 05-20(轻 Light) 05-27(重 Heavy) 05-28(重 Heavy)	39.59	41.36	95.53	47.20	5.84

表 7 干热风对千粒重的影响评估模型应用

Table 7 Application of evaluation model for the impact of dry-hot wind on 1000-kernel weight

## 3 讨 论

农业气象灾害影响定量评估是农业防灾减灾中的重要工作。利用统计方法通过大样本资料进

行灾害评估,有一定的区域代表性<sup>[30]</sup>,但一般不考 虑灾害对作物的影响机理;利用灾害控制试验可以 较细致地分析灾害的影响机制、减产率等<sup>[31]</sup>,但区 域代表性与应用性不强。本文结合概念模型与统 计模型二者优势,兼顾灾害影响机制和作物长势, 较好地模拟了不同长势麦田的冬小麦千粒重,在此 基础上,考虑干热风灾害天气对光合作用的影响, 对概念模型进行修订,从而实现了干热风对千粒重 的定量影响评估,较单一方法构建的评估模型具有 更强的科学性和针对性。当大田发生大范围干热 风灾害时,往往缺乏相同长势、相同管理和地力条 件的未受灾田块作为对照样本,这时通过大田简单 取样,获取密度等基本资料,利用评估模型即可简 便估算干热风对千粒重的影响,从而推算对产量的 影响程度,有一定的实用性。

根据代表站点的评估结果,20世纪90年代以 后干热风造成的产量损失在0.5%~18%,整体规律 为灌浆中期出现重干热风的影响较大,某些年份灌 浆前期轻干热风影响不明显。赵俊芳等<sup>[15]</sup>对华北 地区典型站点20世纪80—90年代的研究发现重干 热风平均减产率在25%以上,且抽穗~开花期重干 热风危害指数较其他时期偏大,这与研究时段、研 究区域、研究方法和减产率的算法差异有关,也与 本研究区灌浆前期重干热风样本较少有关。本文 利用已知的穗密度和穗粒数资料,基于田间试验资 料修订干热风胁迫下的光合速率,从而计算灾害影 响的千粒重,与前人通过修改作物生长模型中的日 平均气象资料修订干热风影响相比,模拟准确率进 一步提升。

在进行干热风对千粒重的影响评估时,假设灌 浆前期叶片受干热风影响后其光合能力的修复呈 线性,出现多个干热风日(连续、不连续)时,认为叶 片的光合速率在前一次干热风影响下继续递减。 从不同情形下千粒重的模拟结果来看,这些假设可 以支撑最终的模拟结果,但这些假设的科学机制还 需进一步利用大量的田间试验数据进行验证。

## 4 结 论

1)利用叶片光合作用和干物质积累概念模型, 结合作物长势信息,可以较好地模拟冬小麦千粒 重;麦田出现干热风天气后,可利用干热风日的日 最高气温、14时相对湿度和风速拟合冬小麦叶片光 合速率受胁迫的程度,修订模型从而实现干热风对 千粒重的影响评估。

2)所构建的模型在正常年份、干热风试验条件 下和干热风典型年,对千粒重的估算准确率均在 95%以上,相对误差均小于5%,且模型在作物品种属 性相近的不同站点、不同干热风典型年千粒重的模拟 准确率在90%以上,说明构建的模型客观上能够反映 灌浆不同时期干热风对千粒重的影响,且有一定的适 用推广性,可以满足灾害评估业务服务需求。

3)综合模型对近年干热风典型年和代表站点 的评估结果表明:灌浆前中期和临近收获期1~2d 轻干热风造成的千粒重损失为1~2g,减产率为0~ 5%;其他时期不同天气条件的干热风造成的千粒重 损失在1~7g不等,严重的减产率达12%~18%。

## 参考文献:

- 霍治国,尚莹,邬定荣,等.中国小麦干热风灾害研究进展[J].应用 气象学报,2019,30(2):129-141.
   HUO Z G,SHANG Y, WU D R, et al. Review on disaster of hot dry wind for wheat in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(2):129-141.
- [2] 綦东菊,王晓静.干热风对小麦的危害及防御措施探讨[J].宁夏农 林科技,2011,52(2):33,58.
   QI D J, WANG X J. Shallow discuss on the harm of hot blast to the wheat and its defense measures[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2011,52(2):33,58.
- [3] 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
   [J].干旱地区农业研究,1997,15(3): 99-105.
   CAO L, DONG Y X. Climate characteristic analysis and forecast of dry-hot wind in central Hexi Corridor[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997,15(3): 99-105.
- [4] 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
  [J].中国农学通报,2013,29(18):50-56.
  QU Z J, ZHENG X H, LI X M.The Distribution characteristics and forecast of dry-hot-wind of winter wheat in Shaanxi Province from 1981 to 2010[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(18):50-56.
  [5] 邓振镛,张强,倾继祖,等.气候暖千化对中国北方干热风的影响
- [6] 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
   [J].气象科技,2007,35(5):699-702.
   SHIYS, YOUFC,WEIRJ,et al. Impact analysis of dry-hot wind on weight of thousand grain in Hebei Province[J].Meteorological Science and Technology, 2007,35(5):699-702.
- [7] 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[J].中国农业气象,2011,32(3):456-460,465.
   CHENG L, ZHANG Z H,CHANG J. Analysis on the change of dry-hot wind hazard for winter wheat in last 47 years in Henan Province[J].
   Chinese Journal of Agrometeorology, 2011,32(3):456-460,465.
- [8] 李彤霄,成林,马青荣,等.河南省干热风发生规律及其与小麦开花期的关系[J].湖北农业科学,2019,58(22):58-64.
  LI T X,CHENG L, MA Q R, et al. Occurrence regularity of dry-hot wind and relationship with winter wheat flowering period in Henan Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019,58(22):58-64.
- [9] 侯英雨,张蕾,吴门新,等.国家级现代农业气象业务技术进展[J]. 应用气象学报,2018,29(6):641-655.
   HOU Y Y, ZHANG L, WU M X, et al. Advances of modern agrometeorological service and technology in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2018,29(6):641-655.
- [10] 张志红,成林,李书岭,等.我国小麦干热风灾害研究进展[J].气象 与环境科学,2013,36(2):72-76.

ZHANG Z H, CHENG L, LI S L, et al. Research advances of the wheat dry hot wind disaster in China[J]. Meteorological and Environmental Sciences ,2013,36(2) ;72-76.

- [11] 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[J].自然灾害学报,2020,29(1):186-195.
  LI S,HAN L J, ZHANG L, et al. Spatial-temporal characteristics of dry-hot wind factors in Huang-Huai-Hai region[J].Journal of Natural Disasters, 2020, 29(1):186-195.
- [12] 李香颜,张金平,陈敏基于 GIS 的河南省冬小麦干热风风险评估 及区划[J].自然灾害学报,2017,26(3):63-70.
  LI X Y, ZHANG J P, CHEN M. Risk assessment and zoning of winter wheat dry-hot wind in Henan Province based on GIS technology[J]. Journal of Natural Disasters,2017,26(3):63-70.
- [13] 赵花荣,任三学,齐月,等.不同时期灌水对冬小麦干热风的防御效应[J].干旱地区农业研究,2019,37(4):58-65.
   ZHAO H R, REN S X, QI Y, et al. Defensive effect of irrigation at different stage on hot dry wind stress on winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019,37(4):58-65.
- [14] 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[J].应用气象学报,2004,15 (2):217-225.

LIU J, MA L W, ZHANG X Y, et al. A method for monitoring dryhot wind of spring wheat and estimating its yield losses: an example in irrigated areas of Ningxia [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004, 15(2):217-225.

- [15] 赵俊芳,赵艳霞,郭建平,等.基于干热风危害指数的黄淮海地区冬 小麦干热风灾损评估[J].生态学报,2015,35(16):5287-5293.
  ZHAO J F,ZHAO Y X,GUO J P, et al. Assessment of the yield loss of winter wheat caused by dry-hot wind in Huanghuaihai Plain based on the hazard index of dry-hot wind[J]. Acta Ecologica Sinica,2015, 35(16):5287-5293.
- [16] 张廷珠,韩方池,吴乃元,等.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[J].干旱地区农业研究, 1995,13(3):74-78.

ZHANG T Z, HAN F C, WU N Y, et al. The turbulent exchange of quantites of heat and hot in wheat fields under dry and hot weather conditions and its effects upon wheat grain filling speed[J]. Agricultural Reseach in the Arid Areas, 1995, 13(3):74-78.

[17] 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[J].华北农学报,2013,28(5):144-148.

ZHAO F H, JU H, OUYANG Z. Effects of dry-hot wind on photosynthesis and transpiration of flag leaf of winter wheat at filling stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(5); 144-148.

- [18] 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[J].气象与环境科学,2013,36(2):10-14.
   ZHU Y J,YANG F Y,LIU W C, et al. Wheat yield loss extraction of dry hot wind disaster by using crop model[J]. Meteorological and Environmental Sciences,2013,36(2):10-14.
- [19] 王春乙,张继权,霍治国,等. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J].气象学报,2015,73(1):1-19.
   WANG C Y,ZHANG J Q,HUO Z G, et al. Prospects and progresses in the research of risk assessment of agro-meteorological disasters[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015,73(1):1-19.
- [20] 韩晓阳,刘文兆,朱元骏.长武塬区光合有效辐射的基本特征及气候学计算[J].干旱地区农业研究,2012,30(4):166-171.
   HAN X Y, LIU W Z, ZHU Y J.Basic characteristics of photosynthetically active radiation and its climatological calculation on Changwu ta-

bleland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(4) : 166-171.

[21] 申双和,景元书.农业气象学原理[M].北京:气象出版社,2017: 48-49.

SHEN S H, JIN Y S.Principles of Agrometeorology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2017;48-49.

[22] 曹卫星,罗卫红.作物系统模拟及智能管理[M].北京:华文出版 社,2000:76-79.

CAO W X,LUO W H. Crop system simulation and intelligent management[M]. Beijing: Chinese Publishing Press, 2000;76-79.

 [23] 朱永华.作物生长系统 CTM 模型参数的确定[J].甘肃科学学报, 1998,10(3):85-90.
 ZHU Y H. Determination of CTM model parameters of crop growth

system[J]. Journal of Gansu Sciences, 1998,10(3):85-90.

[24] 刘建栋,王馥棠,于强,等.华北地区冬小麦叶片光合作用模型在农业干旱预测中的应用研究[J].应用气象学报,2003,14(4): 469-478.

LIU J D, WANG F D, YU Q, et al. Application of the leaf photosynthesis model for forecasting effect of drought on winter wheat in north china plain [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14 (4):469-478.

- [25] 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
  [J].麦类作物学报,2014,34(2):248-254.
  CHENG L, ZHANG Z H, FANG W S. Effects of dry-hot wind on grain filling speed and 1000-kernel weight of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014,34(2):248-254.
  [26] 中国复杂目、本志工地风灾害等级, OX TE2 2007[S] 出版, 中国标
- [26] 中国气象局.小麦干热风灾害等级 QX-T82-2007[S].北京:中国标 准出版社,2007.
   China Meterological Administration. Disaster grade of dry-hot wind for

wheat QX-T82-2007[S]. Beijing: Standards Press of China,2007.

- [27] 张志红,成林,李书岭,等于热风天气对冬小麦生理的影响[J].生态学杂志,2015,34(3):712-717.
  ZHANG Z H, CHENG L, LI S L, et al. Dry-hot wind effects on physiology of winter wheat[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34 (3):712-717.
- [28] 白建辉.华北地区光合有效辐射的计算方法研究[J].气象与环境 学报,2009,25(2):1-8.
   BAI J H. The calculating method of photosynthetically active radiation for North China[J]. Journal of Meteorology and Environment,2009,25

(2):1-8.

[29] 夏兴生,朱秀芳,潘耀忠,等.中国大陆地区基于太阳辐射经验值计 算 *ET*<sub>0</sub>的适用性研究[J].干旱地区农业研究,2019,37(6): 221-230.

XIA X S, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Applicability of the empirical value of solar radiation in estimation of ET0 in Mainland China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019,37(6):221-230.

- [30] 许凯,徐翔宇,李爱花,等.基于概率统计方法的承德市农业旱灾风 险评估[J].农业工程学报,2013,29(14):139-146.
  XU K, XU X Y, LI A H, et al. Assessing agricultural drought disaster risk in Chengde city using stochastic method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(14):139-146.
- [31] 王春乙,张继权,张京红,等.综合农业气象灾害风险评估与区划研究[M].北京:气象出版社,2016:87-95.
   WANG C Y, ZHANG J Q, ZHANG J H, et al. Study on risk assessment and zoning of comprehensive agrometeorological disasters[M].

Beijing: China Meteorological Press, 2016:87-95.