

利用作物模型提取小麦干热风灾损方法探讨

朱玉洁^{1,2}, 杨霏云¹, 刘伟昌³, 姜 燕⁴

(1. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2. 中国气象局发展研究中心, 北京 100081;
3. 河南省气象科学研究所, 郑州 450003; 4. 中国气象局应急减灾与公共服务司, 北京 100081)

摘 要: 如何将干热风灾害对小麦造成的产量损失从全部产量损失中提取出来, 是目前小麦干热风研究的一个难点。根据小麦生物学特性以及产量结构与干热风发生规律的关系, 构建了小麦作物模型, 并利用河南省1981—2004年气象资料与小麦产量资料对模型进行了分析与验证。结果表明: 利用作物模型方法得到的小麦产量损失与传统方法得到的产量损失相近, 两者的标准均方根误差 (*NRMSE*) 为0.36, 平均准确率为68.69%, 决定系数 (R^2) 为0.81。这表明利用小麦作物模型来提取干热风灾损是可行的, 可以用于干热风非典型年份的灾害产量损失计算。

关键词: 小麦; 干热风; 作物模型; 灾损提取

中图分类号: S42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-7148(2013)02-0010-05

引 言

小麦干热风是我国北方普遍发生的一种农业气象灾害, 分高温低湿型和雨后猛晴型, 前者称干热风, 后者称青枯。一般会减产 5 % ~ 10 %, 危害严重年份减产可达 20 % 以上^[1]。黄淮海平原是全国冬小麦的主产区, 也是全国干热风危害最严重的地区, 这一地区几乎每年均有干热风日出现。据研究, 仅河南省年平均发生干热风日数为 0.5 ~ 3.9 天, 平均干热风发生次数为 0.4 ~ 0.9 次, 即发生几率为 10 年 4 遇至 10 年 9 遇^[2]。

国外很早就开展了干热风相关研究, 如前苏联于 20 世纪 20 年代开始研究其指标、成因、地理分布、防御措施等。国内开展干热风研究已有几十年的历史, 研究成果也非常丰富。如 20 世纪 70 年代曾开展全国范围的协作研究; 80 年代以后, 针对小麦干热风气象指标、生理机制、预报方法、气候区划以及防御措施等研究陆续展开。2007 年霍治国等制定了“小麦干热风灾害等级”的气象行业标准, 对于规范干热风指标及灾害等级起到了有效的作用。

上述小麦干热风相关研究, 主要集中在干热风的危害特点、类型与指标、气候特征、形成原因、对全球气候变暖的响应、防御技术与应对策略等 6 个方面, 对于干热风灾害的影响评估相关研究并不多见。除干热风以外, 小麦整个生育期还常遭遇渍害、冻害、春旱、病虫害等多种自然灾害的袭击。如何提取与区分不同灾害对小麦产量造成的损失, 是干热风研究的一个难点。

传统的干热风灾损提取方法, 一般是假定干热风典型年份的产量损失全部是由干热风灾害引起的, 于是利用当年的趋势产量减去干热风典型年份产量得到干热风灾损。而事实上, 仅发生干热风而没有其他灾害对小麦造成影响仅是一种理想状态, 而作物模型方法则可以有效解决以上问题。后者是利用非干热风年份多年平均气象数据与干热风典型年份气象数据分别驱动模型, 通过计算两者之差, 得到干热风发生典型年份小麦的产量损失。由于模型中增加了干热风致灾因子对小麦产量形成的影响函数, 并没有设置其他灾害的影响函数, 这就保证了模型计算出的干热风典型年份产量仅是干热风灾害的

收稿日期: 2012-09-29; 修订日期: 2013-02-13

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006026); 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室研究基金课题“干热风风险
评估技术研究”(AMF200906)资助

作者简介: 朱玉洁(1977-), 女, 河北保定人, 高级工程师, 博士, 主要从事作物模型、生态模型研究. E-mail: zhuyuj@cma.gov.cn

通讯作者: 杨霏云(1972-), 女, 内蒙集宁人, 高级工程师, 主要从事农业气象灾害监测评估预警研究. E-mail: yangfy@cma.gov.cn

影响,从而剔除了其他灾种对小麦产量造成的影响。

本文正是对上述作物模型提取小麦干热风灾损思路的一种尝试。将某一种类的农业气象灾害对小麦产量造成的影响,从最终产量中提取出来,对于综合评价各类农业气象灾害的不同影响并有针对性地监测、预警与评估具有重要的意义。

1 小麦作物模型的构建

本研究借鉴已有的小麦、玉米、水稻、紫花苜蓿等作物模型^[3-10],以及干旱区景观模拟器 MALS^[11]等生态模型,根据小麦作物生物学特性、产量结构与干热风发生规律的关系^[12-15],构建了小麦作物模型。模型包括对光合作用、同化物分配、干物质积累和产量形成等主要生理过程的模拟,并考虑了干热风致灾因子如温度、湿度和风速对小麦产量形成的影响。干热风主要影响冬小麦灌浆,尤其对正处于灌浆中后期的冬小麦影响最大,发生在冬小麦抽穗前时对产量影响很小,发生在籽粒蜡熟后对千粒重的形成也构不成威胁。故文中仅选取冬小麦抽穗后 5 d(灌浆中期开始)至乳熟后 5 d(蜡熟期)的时段计算温度、湿度、降水及风速对干热风的影响。

1.1 主要模块描述

1.1.1 光合作用

采用 Monsi-Saeki 方法计算单叶光合作用强度。Monsi-Saeki 曾对光强在群体内自上而下的衰减与叶面积的关系作过详细的探讨。本文假定群体内的叶片分布为一均匀介质,根据门司公式,光在群体内的分布采取如下形式:

$$I = I_0 \times \exp(-K \times LAI) \tag{1}$$

式中, I 为叶面积深度处的平均水平光强, I_0 为冠层上方的水平自然光强, K 为群体的消光系数, LAI 为叶面积指数, I/I_0 为透光率(%)。

单叶光合作用强度随着光强的增加而不断增加,当光强达到一定程度后,光合作用趋于稳定。单叶光合作用强度与叶片接受的光强呈直角双曲线关系。Monsi-Saeki 用下式描述单叶光合作用强度:

$$P = \frac{a \cdot PAR \cdot P_{\max}}{a \cdot PAR + P_{\max}} \tag{2}$$

式中, P 为单叶光合作用强度($\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), PAR 为叶面的光合有效辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), a 和 $P_{\max}$ 是光合作用参数。参数 a 为光 - 光合作用曲线初始斜率,即:

$$\left. \frac{dP}{dPAR} \right|_{PAR \rightarrow 0} = a$$

它表示叶片在弱光条件下的光合能力。参数 a 的变化较小,可以认为是一常数,对 C3 植物的成熟叶片来说, a 通常近似地为 $13 \text{ gCO}_2 \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。参数 $P_{\max}$ 为光饱和点下的最大光合作用强度,即

$$\lim_{PAR \rightarrow \infty} \frac{a \cdot P_{\max} \cdot PAR}{a \cdot PAR + P_{\max}} = P_{\max}$$

不同种类的作物, a 、 $P_{\max}$ 的取值不同。

采用高亮之^[6]、冯立平^[7] 等推导的群体光合积分公式计算小麦群体的逐日光合量:

$$PGd = \frac{P_{\max} \times DL}{K} \cdot$$

$$\ln \left[\frac{P_{\max} + a \times 0.47 \times K \times (1 - r) \times (Q/DL)}{P_{\max} + a \times K \times (1 - r) \times (Q/DL) \times \exp(-K \times LAI) \times 0.47} \right] \tag{3}$$

式中, PGd 为群体光合作用强度($\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), Q 为逐日太阳总辐射量($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), DL 为日长(h), r 为群体反射率(%),其他变量与参数意义同上文。

1.1.2 干物质积累

采用高琼 MALS 模型中^[11] 推导的逐日干物质积累公式计算小麦群体的逐日干物质积累量:

$$Ad = PGd \times (1 - Br) \times Cwd \times DL \times r_{\text{else}} \tag{4}$$

式中, Ad 为日同化干物质质量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); Br 为呼吸消耗系数(无量纲); Cwd 为干物质转换系数(无量纲); r_{else} 为小麦生物量消耗损失系数,代表除温度、湿度、风速等影响外的其他因素对小麦干物质积累造成的消耗损失,可描述不同土壤质地、田间管理和耕作制度造成的小麦生长发育的差异。

1.1.3 同化物分配与产量形成

小麦产量形成是干物质积累分配给籽粒的结果。小麦籽粒中干物质的来源主要有两个方面,一是抽穗前茎、叶、鞘等器官贮存的营养物质,二是抽穗后茎、叶、鞘、颖、芒等绿色部分的光合产物。在产量形成中将这两部分用一个分配系数 Gr 来描述:

$$Pro = (1 + W) \times (\int Ad) \times Gr \times U \tag{5}$$

式中, Pro 为小麦产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), W 为小麦籽粒含水量(%), $\int Ad$ 为日同化干物质对小麦生长季的积分, Gr 为小麦籽粒分配比例(无量纲), U 为单位换算系数(无量纲)。

1.1.4 干热风影响

干热风对小麦造成的危害是温、湿、风 3 个气象要素综合作用的结果。针对我国小麦干热风危害状况,本模型考虑了温度、相对湿度和风速对小麦不同

阶段生长发育的影响。

温度对小麦生长发育和产量形成的影响,是通过温度对光合作用和对叶片生长的影响来实现的。

温度是通过影响光饱和点下的最大光合作用强度 $P_{\max}$ 来影响小麦光合作用的。 $P_{\max}$ 与温度等环境条件有关,温度对它的影响呈二次曲线形式:

$$P_{\max} = \begin{cases} 0 & Tave \leq 0 \text{ or } Tave \geq 35 \\ 0.4571 \times Tave - 0.01306 \times Tave^2 & 0 < Tave < 35 \end{cases} \quad (6)$$

湿度对小麦生长发育和产量形成的影响,可通过相对湿度影响因子 Frh 和降水影响因子 Fp 对干物质积累进行订正来确定。

$$Frh = \begin{cases} 1 & RH \geq 30 \\ FrhL & 25 < RH < 30 \\ FrhH & RH \leq 25 \end{cases} \quad (7)$$

式中, RH 为日平均相对湿度(%) ; $FrhH$ 为相对湿度最大影响比例,用来描述重干热风日对小麦的影响(%) ; $FrhL$ 为相对湿度较小影响比例,用来描述轻干热风日对小麦的影响(%) 。

风速对小麦生长发育和产量形成的影响,可通过风速影响因子 $Fwind$ 对干物质积累进行订正来确定。

$$Fwind = \begin{cases} FwindH & wind \geq 3 \\ FwindL & 2 < wind < 3 \\ 1 & wind \leq 2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $FwindH$ 为风速最大影响因子,描述大风对小麦生长的最大影响比例(%) ; $FwindL$ 为风速较小影响因子,描述中等风对小麦生长的影响比例(%) ; $wind$ 为逐日风速(m/s) 。

1.2 主要模型参数

模型共有 14 个参数,各项意义及取值见表 1。

2 模型验证与结果分析

2.1 资料来源

本文选用的资料为 1981—2004 年河南省 8 个站的气象资料和小麦产量资料,站点选择尽量考虑了覆盖河南省各个方位。气象资料包括上述各站历年的日总辐射、降水、平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和风速等,小麦产量资料包括上述各站历年的小麦品种、单产和田间管理等资料。

2.2 数据分析

为了使模型验证数据具备足够的代表性,首先,根据 2007 年中国气象局发布的《小麦干热风灾害等级》以及陈怀亮等^[2] 2001 年的研究成果,将 1981—

2004 年河南省 8 个站干热风发生规律进行反演(采用的干热风指标见表 2,反演的 1981—2004 年河南省 8 站干热风发生情况见表 3)。然后,从表 3 中选择灾害相对较多灾情较重的 5 个站点共 9 个干热风典型年份作为模型验证之用(见表 4)。

表 1 小麦作物模型主要参数及其取值

参数	意义	单位	参考值
W	小麦籽粒含水量	%	12.5
Br	呼吸消耗系数	无	0.2
Cwd	干物质转换系数	无	0.5
Gr	小麦籽粒分配比例	无	0.2
$P_{\max}$	光饱和点下的最大光合作用强度	$\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	13
K	消光系数	无	0.85
a	光—光合作用曲线初始斜率	$\text{gCO}_2 \cdot \text{MJ}^{-1}$	13
r	小麦群体反射率	%	10
LAI	叶面积指数	无	3
$FrhH$	相对湿度最大影响比例	%	5
$FrhL$	相对湿度最小影响比例	%	1
$FwindH$	大风对小麦生长的最大影响比例	%	7
$FwindL$	中等风对小麦生长的影响比例	%	3
r_{else}	小麦生物量消耗损失系数	%	3

表 2 河南省小麦干热风发生的气象指标

指标	轻干热风日	重干热风日
14 时平均气温/℃	≥ 30.0	≥ 32.0
14 时相对湿度/%	≤ 30	≤ 25
14 时风速/(m/s)	≥ 2.0	≥ 3.0

注:数据来源于参考文献[2]。

表 3 1981—2004 年河南省 8 站干热风发生次数

序号	方位	站名	轻干热风日数	重干热风日数	总计
1	中部	许昌	1	27	28
2	北部	郑州	3	30	33
3		新乡	1	10	11
4	南部	固始	0	5	5
5		信阳	1	1	2
6	西部	三门峡	1	14	15
7	西南	南阳	3	12	15
8	东部	商丘	3	13	16

表 4 所选站点及干热风发生典型年份

站名	年份	轻干热风日	重干热风日
许昌	1988	0	3
	1990	0	3
	2000	0	2
郑州	1995	0	3
	2002	0	4
固始	2000	0	1
三门峡	1997	0	2
	2000	0	2
商丘	1981	0	3

2.3 模型验证与结果分析

在干热风发生的典型年份,通常假定小麦产量损失全部是由于干热风灾害造成的,故而多用趋势产量与实际产量之差来计算小麦因干热风造成的产量损失。本研究以河南省 5 个典型地区的 9 个干热风典型年份为例,将非干热风发生年份的平均气象数据(时间段是从播种到收获,而不是仅用出现干热风那几天的平均气象数据)作为常规数据驱动小麦作物模型,得到模拟趋势产量;将干热风典型年份气象数据驱动作物模型,得到干热风发生典型年份的模拟产量。由模拟趋势产量减去模拟产量,得到该年的干热风灾害损失模拟值。

将利用作物模型方法得到的小麦干热风灾害产量损失与传统方法计算的灾害损失进行了比较;采用标准均方根误差(*NRMSE*)及相对误差(*RE*)对模拟值与实际值之间的符合度进行统计分析,*NRMSE*和*RE*值越小,表明模拟值与实测值之间的一致性越好;对实测值和模拟值进行回归分析,计算斜率(*A*)、截距(*B*)和决定系数(*R*²)。各站点典型年份的趋势产量、实际产量、模拟的趋势产量、模拟的实际产量,以及实际灾害损失与模拟灾害损失的统计分析结果见表 5。并对作物模型方法与常规方法计算的小麦干热风产量灾害损失对比进行绘图(图略)和分析。

表 5 干热风典型年份小麦产量的模拟值与观测值的对比

站名	年份	趋势产量/ (kg·hm ⁻²)	实际产量/ (kg·hm ⁻²)	模拟的 趋势产量 /(kg·hm ⁻²)	模拟的 实际产量 /(kg·hm ⁻²)	计算的灾损/(kg·hm ⁻²)		模拟准确率 /%	相对误差 /%
						常规方法	模型方法		
许昌	1988	3695.2	3645.0	3689.4	3651.0	50.2	38.4	76.49	23.51
	1990	3701.8	3237.0	3856.1	3254.0	464.8	602.1	70.46	29.54
	2000	6372.5	6165.0	6400.2	6189.0	207.5	211.2	98.22	1.78
郑州	1995	2234.7	1665.0	2354.1	1772.5	569.7	581.6	97.91	2.09
	2002	2312.3	1830.0	2499.2	1825.4	482.3	673.8	60.29	39.71
固始	2000	3010.1	2655.0	3008.2	2688.7	355.1	319.5	90.51	9.49
三门峡	1997	3915.8	3630.0	3899.2	3674.6	285.8	224.6	78.59	21.41
	2000	2937.6	2805.0	3000.5	2742.3	132.6	258.2	5.28	94.72
商丘	1981	4501.9	4125.0	4600.9	3999.5	376.9	601.4	40.44	59.56

由表 5 可见,常规气象数据模拟产量与趋势产量相近,平均略大于趋势产量;实际气象数据模拟产量与实际产量相近,平均略大于实际产量。这是由于模型中仅考虑了干热风对小麦产量造成的影响,而实际生产中,除干热风以外,可能还会发生不同程度的病虫害等灾害,故而模拟产量要比实际产量稍高一些。模型对典型年份小麦干热风造成的灾害损失的模拟效果很好,模拟值接近于 1:1 线,即模拟值与观察值间线性关系的斜率接近于 1。由统计分析结果可知,模拟灾损与实际灾损的标准均方根误差(*NRMSE*)为 0.36,平均准确率为 68.69%,平均相对误差为 31.31%,决定系数(*R*²)为 0.81。这说明小麦作物模型不仅具有较强的机理性,而且具有一定的预测性和适用性,利用此模型来提取小麦干热风产量灾害损失是可行的。

但是表 5 中个别年的误差比较大,如三门峡 2000 年误差大于 90%。这是由于本文常规方法计算的灾损是指“趋势产量与实际产量之差”。而仔细查看三门峡近几年实际产量数据,发现 2000 年并没有因为发生了重干热风就减产,相反,这一年的产

量要比没有发生干热风的 1999 年还要高,这就造成传统方法计算的灾损值结果较低;而模型计算时,由于加入了温、湿、风等因子的影响,干热风年份模拟产量必然比非干热风年份模拟产量低,从而造成模型模拟方法与传统灾损提取方法计算结果差别较大。这也是因为传统的评估方法本身就较难区分干热风与其他灾害的影响,也从另一个角度反映出作物模型方法提取干热风灾损的重要价值。

3 结论与讨论

本研究借鉴已有的作物模型,根据小麦作物生物学特性,以及产量结构与干热风的关系,构建了小麦作物模型。模型考虑了干热风致灾因子高温、低湿和大风对小麦产量形成的影响,因而能够较合理地模拟出干热风对小麦产量造成的损失,这为非干热风典型年份和多种灾害共同发生的年份提取干热风产量损失提供了一种切实可行的方法。模型各参数物理意义明确、操作性强,可用于小麦干热风灾害监测与风险评估。

但是干热风对冬小麦生长发育和产量形成造成

的影响模拟分析是一项复杂的系统工程,需要常年针对性的试验研究与模拟分析。文中仍有一些不足之处:如由于数据限制,模型验证和参数调试中应用的均为日平均数据,而实际上用 14 时数据重新调整模型公式和参数值,对于热风过程的模拟将会更科学;仍缺乏趋势产量计算方法对灾损结果影响的深入分析;对于热风致灾因子的描述仍是一种探索和尝试等,还有待随着条件的成熟进一步探索和修改完善。

参考文献

[1] 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[J]. 2004,15(2):217-225.

[2] 陈怀亮,邹春辉,付祥建,等. 河南省小麦干热风发生规律分析[J]. 自然资源学报,2001,16(1):59-64.

[3] Thornley J H M. Mathematical models in plant physiology, in a quantitative approach to problems in plant and crop physiology [M]. London: Academic press, 1973:29-46.

[4] Thornley J M,Johnson I R. Plant and crop modeling [M]. Oxford, U. K:Clarendon Press,1990.

[5] F W T,彭宁德,弗里斯,等. 植物生长与作物生产的模拟[M]. 王馥棠,译. 北京:科学出版社,1988:40-77.

[6] 高亮之,金之庆,黄耀,等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统[M]. 北京:中国农业科技出版社,1992:86.

[7] 冯利平,高亮之,金之庆,等. 小麦发育期动态模拟模型的研究[J]. 作物学报,1997,23(4):418-424.

[8] 朱玉洁,冯利平,易鹏,等. 紫花苜蓿光合生产与干物质积累模拟模型研究[J]. 作物学报,2007,33(10):1682-1687.

[9] 朱玉洁,高琼,刘峻杉,等. 基于气孔导度和光合模型的植物功能类群合并问题[J]. 植物生态学报,2007,31(5):873-882.

[10] 潘学标. 作物模型原理[M]. 北京:气象出版社,2003:10-12.

[11] Gao Q,Reynolds J F. Historical shrub-grass transition in the northern Chihuahuan Desert: Modeling the effect of shifting rainfall seasonality and event size over a landscape gradient[J]. Global Change Biology,2003(9):1475-1493.

[12] 马青荣,崔智慧,黄跃青. 冬小麦干物质增长分配规律分析[J]. 气象与环境科学,2006(4):50-51.

[13] 刘伟昌,陈怀亮,余卫东,等. 基于气候适宜度指数的冬小麦动态产量预报技术研究[J]. 气象与环境科学,2008,31(2):21-24.

[14] 马体顺,马青荣,杨光仙,等. 气候生态因子对冬小麦千粒重的影响[J]. 气象与环境科学,2006(3):56-57.

[15] 尚红敏. 几种冬小麦产量预报方法介绍[J]. 气象与环境科学,1998(1):36-37.

Wheat Yield Loss Extraction of Dry Hot Wind Disaster by Using Crop Model

Zhu Yujie^{1,2}, Yang Feiyun¹, Liu Weichang³, Jiang Yan⁴

- (1. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China;
2. China Meteorological Administration Research Center for Strategic Development, Beijing 100081, China;
3. Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China;
4. China Meteorological Administration Department of Emergency Response, Disaster Mitigation and Public Services, Beijing 100081, China)

Abstract: How to extract the wheat yield losses of dry hot wind disaster from the total wheat yield loss is a difficulty of related researches. On the base of the wheat biological characteristics and the relation between yield composition and dry hot wind occurrence regulation, the wheat crop model was established. The meteorological data and yield data of year 1981 to 2004 of Henan province were put into the crop model for analysis and verification. Results show: The yield loss of crop model method is similar to that of normal calculation. The *NRMSE* is 0.36, the average accuracy rate is 68.69%, and the adjusted linear correlation coefficient (R^2) is 0.81. The results indicate that the use of wheat model to extract the hot wind disaster damage is possible. This method can be used to calculate the yield loss of atypical hot wind year.

Key words: wheat; dry hot wind; crop model; yield loss extraction