

# 基于动态模拟的冬小麦水分胁迫敏感性研究

贺 鹏<sup>1</sup>, 王鹏新<sup>1</sup>, 解 毅<sup>1</sup>, 张树誉<sup>2</sup>, 刘峻明<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 陕西省气象局, 西安 710014)

**摘要:** 以关中平原为研究区域, 在对农业技术转移决策支持系统(DSSAT)中的 CERES - Wheat 模型进行标定基础上, 模拟冬小麦整个生育期以日为步长的实际蒸散量和潜在蒸散量, 采用 Jensen 模型研究冬小麦不同生育时期对水分胁迫的敏感性。结果表明, 无论旱作样点还是灌溉样点, 冬小麦在同一生育时期对水分胁迫的敏感性相同, 且拔节期的敏感性最强, 抽穗~灌浆期次之, 返青期和乳熟期依次递减。灌溉样点在拔节期和抽穗~灌浆期的水分胁迫敏感系数分别为 0.589 与 0.342, 对水分胁迫的敏感性相差较大, 而旱作样点在两生育时期的水分胁迫敏感系数分别为 0.405 与 0.383, 对水分胁迫的敏感性相差较小, 由于灌溉样点在拔节期发生水分胁迫现象可以通过及时灌溉以缓解缺水情况, 因而会减弱其后抽穗~灌浆期的水分胁迫敏感性。根据水分胁迫敏感性, 对不同生育时期缺水采取不同措施, 较好地实现抗旱防旱资源的合理利用。

**关键词:** 冬小麦; CERES - Wheat 模型; 水分胁迫; 敏感系数

**中图分类号:** S512.1      **文献标志码:** A

## Analysis on the sensitivity to water stress of winter wheat based on a dynamicsimulation model

HE Peng<sup>1</sup>, WANG Peng-xin<sup>1</sup>, XIE Yi<sup>1</sup>, ZHANG Shu-yu<sup>2</sup>, LIU Jun-ming<sup>1</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an, Shaanxi 710014, China)

**Abstract:** Using the calibrated CERES - Wheat model under the DSSAT shell, daily actual evapotranspiration and potential evapotranspiration during the growth stages of winter wheat were simulated in the Guangzhong plain of Shaanxi Province, China. Sensitivity coefficients of water stress of winter wheat at different growth stages were calculated by the Jensen model. The results indicated that the sensitivity coefficients of water stress on winter wheat were the same at the same growth stage in both irrigated and rainfed areas. The sensitivity coefficients of winter wheat were the largest at the jointing stage, and were gradually decreased at the heading-filling stage, turning green stage and dough stage. The sensitivity coefficients at the jointing stage and heading-filling stage were 0.589 and 0.342 in the irrigated areas, respectively, indicating that the water stress at these two stages had different impacts on wheat yield. Nevertheless, those were 0.405 and 0.383 in the rainfed areas, suggesting that the water stress at these two stages had similar impacts on wheat yield. Because the irrigated areas were often irrigated at the jointing stage in order to relieve the lack of water, the sensitivity of water stress on winter wheat was weakened, and the difference in the sensitivity coefficients of winter wheat between the jointing stage and the heading-filling stage was small. Based on the sensitivity coefficients of water stress, specific measurements should be taken on winter wheat according to the water-deficit conditions at each growth stage to ensure rational use of drought-related resources.

**Keywords:** winter wheat; CERES - Wheat model; water stress; sensitivity coefficient

干旱是全球影响最为广泛的自然灾害之一, 具有出现频率高、持续时间长、波及范围广的特点。干

收稿日期: 2015-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371390)和国家科技支撑计划项目(2012BAD20B0103)资助

作者简介: 贺 鹏(1989—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向为土壤及冬小麦水分信息的动态模拟。

E-mail: yueniaodexue@126.com

通信作者: 王鹏新(1965—), 男, 陕西礼泉人, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究。

E-mail: wangpx@cau.edu.cn

旱的频繁发生和长期持续会给社会经济,特别是农业生产带来巨大的损失,因此监测和预防农业干旱已成为当前干旱研究的重要课题之一。农业干旱不仅与降水量有密切关系,而且与农作物本身及其所处的生育阶段密切相关<sup>[1-2]</sup>。在作物类型和品种相同时,水分胁迫对作物产量的影响取决于水分胁迫所发生的生育时期,因此评价干旱对作物产量的影响,仅考虑全生育期的总耗水量与产量形成的关系是不够的,应该以不同生育时期水分盈亏与产量关系为基础进行分析。王仰仁等<sup>[3]</sup>提出了水分敏感指数累积函数的概念,并验证用生长曲线拟合的水分敏感指数累积函数,能较好地描述不同生育时期水分与冬小麦产量的函数关系。蔺海明等<sup>[4]</sup>对干旱区不同补灌条件下小麦产量和水分效应以及生理特性进行了研究,得出小麦不同时期补灌产量顺序为拔节+孕穗期>孕穗期>拔节期。房全孝等<sup>[5]</sup>利用根系水质模型模拟分析禹城和栾城小麦-玉米两熟制下作物产量、农田蒸散和灌溉需水量多年的变化特征,表明栾城和禹城的冬小麦水分敏感期为孕穗期,并以作物水分胁迫指数为基础制定该区域节水灌溉制度。Jensen 模型在研究作物不同生育时期发生水分胁迫对产量的影响方面具有广泛的应用<sup>[6-7]</sup>,学者们利用逻辑斯蒂函数<sup>[8]</sup>、引入水肥生产函数<sup>[9]</sup>和遗传算法<sup>[10]</sup>等方法对 Jensen 模型进行优化,确定作物不同生育期对水分胁迫的敏感程度。综合国内外现有 Jensen 模型的研究成果,发现冬小麦从拔节期到灌浆期为冬小麦主要需水时期,也是冬小麦对水分胁迫敏感时期,在该阶段发生水分胁迫对冬小麦产量有较大影响,而冬小麦在其它生育时期出现水分胁迫对产量的影响相对较小。

农业技术转移决策支持系统(DSSAT)支持下的 CERES 系列作物生长模型是当今世界范围内应用最为广泛的作物生长模型之一<sup>[11]</sup>。江敏等<sup>[12]</sup>收集我国大面积种植冬小麦区域的气象数据和作物品种资料数据并采用 CERES - Wheat 模型进行了全国范围内的验证研究,结果表明,该模型在我国北方地区的模拟效果较好,但在比较湿润的长江流域,模拟结果不符合生产实际。刘骁月等<sup>[13]</sup>在陕西关中平原实地标定 CERES - Wheat 模型的基础上,较好地模拟了该地区冬小麦的产量、LAI、开花和成熟日期,并在此基础上构建了基于生物量距平的干旱监测模型。

本文将 Jensen 模型与 CERES - Wheat 模型相结合,应用动态模拟的地表水分平衡数据研究关中平原不同生境下冬小麦不同生育时期水分胁迫对冬小

麦生长和发育,尤其是对产量的影响,以期确定不同生育时期冬小麦对水分胁迫的敏感性,为区域农业干旱监测、农田水分管理和可持续发展奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕西省中部的关中平原位于渭河流域,地势平坦,土壤肥沃,土地利用率高。但该地区地处亚洲夏季风区边缘,年均温度 6℃~13℃,属于生态环境脆弱地带,年降水量在 500~800 mm,并存在明显的波动性,因而干旱是该区域内普遍而重大的气象灾害之一<sup>[14-15]</sup>。关中平原种植模式主要为冬小麦与夏玉米轮作模式。冬小麦播种时间一般为 10 月上、中旬,播种后 5~6 d 出苗,至次年 3 月上旬进入返青期,3 月下旬及 4 月中上旬为拔节期,4 月下旬进入抽穗期,乳熟期则一般为 5 月中、下旬<sup>[16]</sup>。本文在研究区域选取了 11 个研究样点(图 1),自西向东依次为:凤翔县城西、宝鸡市陈仓区北、岐山县蒲村镇、眉县常兴镇、扶风县城北、乾县石牛乡、三原县鲁桥镇、蓝田县史家寨乡、蒲城县城北、渭南市临渭区蔺店镇和合阳县王村镇,其中眉县常兴镇、扶风县城北、三原县鲁桥镇和渭南市临渭区蔺店镇为灌溉样点,其余为旱作样点。

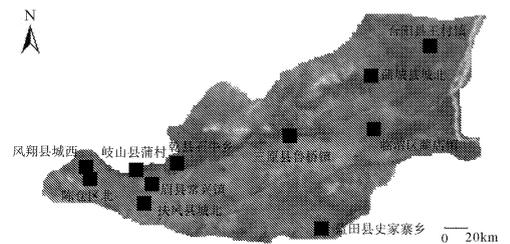


图 1 研究区域及样点分布

Fig. 1 Study area and the distribution of sampling sites

### 1.2 CERES - Wheat 模型的标定

CERES - Wheat 模型的输入数据主要包括气象数据、土壤数据、田间管理数据和作物品种遗传特性参数。模型所需的气象数据由逐日最高气温、最低气温、降水量和太阳辐射值组成,其中太阳辐射值通过日照时数计算生成<sup>[17]</sup>。土壤数据主要包括采样深度、土壤分层含水量、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、pH 值等。土壤数据通过采样点进行相应土壤理化试验获取,按模型规定的格式统一编排,作为模型的输入。田间管理数据主要包括田间样点的编号名称、地理坐标、冬小麦品种、播种日期、施肥日期和施肥量、灌溉日期和灌溉量等,主要通过调查询问获取,并按模型规定的格式统一编排,作为模型的输

入。

冬小麦的遗传特性参数控制着小麦的生长发育进程,直接关系到植株形态的发育与作物产量的形成,因此模型在应用前需对这些参数进行标定。结合本文的研究重点,将 CERES - Wheat 模型的标定分为 5 个步骤:检验模拟的开花期和成熟期时间与实测的开花期和成熟期时间是否吻合;检验模拟的冬小麦生育期总天数与实际情况是否吻合;检验模拟的冬小麦 LAI 曲线与实际是否吻合,以及 LAI 最大值出现日期是否接近;采用相对误差法检验模拟的最终产量是否正确;采用相对误差法检验模拟的土壤分层含水量是否正确。

本文在计算模拟产量与实际产量的相对误差时,以相对误差在 10% 以内为合理。由于产量数据涉及不同样点和不同年份,利用平均相对误差即相对误差绝对值之和的平均值来检验不同样点所有年份、不同年份所有样点的产量模拟精度,并以平均相对误差在 10% 以内为合理。以田间试验测量的土壤水分数据分层情况为主,并结合 CERES - Wheat 模型模拟土壤水分数据分层情况,制定本文的土壤水分数据分层结果:0 ~ 20、20 ~ 50、50 ~ 80、80 ~ 120 cm 和 120 ~ 200 cm。利用相对误差和平均相对误差检验不同样点、不同年份和不同土壤层次的模拟结果是否正确,以相对误差和平均相对误差在 10% 以内为合理。

### 1.3 作物水分胁迫敏感系数的估算方法

(1) Jensen 模型冬小麦产量与各生育时期水分胁迫的关系可通过其实际利用的土壤水分与理想的土壤水分条件的相对比值指数以连乘积的形式表达,即 Jensen 模型:

$$\frac{Y_{act}}{Y_{pot}} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{W_{act}}{W_{pot}} \right)_i^{\lambda_i} \quad (1)$$

式中,  $Y_{act}$  为冬小麦的实际产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $Y_{pot}$  为冬小麦不受供水限制的潜在产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $n$  为冬小麦整个生长期中所包含的生育时期个数,将冬小麦主要生育时期划分为返青期、拔节期、抽穗 ~ 灌浆期和乳熟期,即  $n = 4$ ;  $W_{act}$  为某一生育时期冬小麦实际利用的水分 ( $\text{mm}$ ),一般是指该生育时期的实际蒸散量;  $W_{pot}$  为某一生育时期冬小麦不受土壤供水限制时利用的水分 ( $\text{mm}$ ),可用该生育时期的潜在蒸散量代替;  $\lambda_i$  为第  $i$  个生育时期水分胁迫敏感系数,较大的  $\lambda_i$  表示该生育时期水分胁迫敏感性强,说明在该生育期缺水会对冬小麦生长有较大影响。

当  $n = 4$  时,对式(1)进行数学展开和变换:

$$\ln \frac{Y_{act}}{Y_{pot}} = \lambda_1 \ln \left( \frac{W_{act}}{W_{pot}} \right)_1 + \lambda_2 \ln \left( \frac{W_{act}}{W_{pot}} \right)_2 + \lambda_3 \ln \left( \frac{W_{act}}{W_{pot}} \right)_3 + \lambda_4 \ln \left( \frac{W_{act}}{W_{pot}} \right)_4 \quad (2)$$

在各个地面调查样点,分别应用 CERES - Wheat 模型模拟的冬小麦主要生育时期的潜在蒸散量、实际蒸散量、实际产量和潜在产量,并带入式(2),构成多元线性回归方程组:

$$\sum_{j=1}^k \left( \ln \frac{Y_{act}}{Y_{pot}} \right)_j = \sum_{j=1}^k \left( \lambda_1 \times \left( \ln \frac{W_{act}}{W_{pot}} \right)_1 + \lambda_2 \times \left( \ln \frac{W_{act}}{W_{pot}} \right)_2 + \lambda_3 \times \left( \ln \frac{W_{act}}{W_{pot}} \right)_3 + \lambda_4 \times \left( \ln \frac{W_{act}}{W_{pot}} \right)_4 \right)_j \quad (3)$$

式中,  $k$  代表多元线性回归方程组个数,即模拟的冬小麦生长年的个数。用最小二乘法对上述多元线性回归方程进行最优化求解,得到每个样点的  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$ ,即冬小麦返青期、拔节期、抽穗 ~ 灌浆期和乳熟期对水分胁迫敏感系数。利用  $F$  检验判别该多元线性回归方程的显著性。

对  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  进行归一化处理:

$$\gamma_i = \lambda_i / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

式中,  $\gamma_i$  为归一化的敏感系数,用于分析不同生育时期水分胁迫对冬小麦生产的影响。

(2) 水分胁迫敏感系数的估算样点实测土壤和田间管理数据仅包含 2007—2014 年的数据,对于建立 Jensen 模型,单样本点数据量较小,模型模拟精度较低,检验误差大,故将地面调查样点分为旱作样点和灌溉样点。在 CERES - Wheat 模型中输入气象、土壤和田间管理数据计算旱作样点和灌溉样点的潜在蒸散量、实际蒸散量、实际产量和潜在产量,并将其代入 Jensen 模型,计算旱作样点和灌溉样点冬小麦 4 个生育时期对水分胁迫的敏感系数。

以各样点 2009—2010 年实测的土壤和田间管理数据作为 CERES - Wheat 模型的输入数据,应用 1975—2014 年各样点气象数据作为模型输入的气象数据,模拟各样点 1975—2014 年的潜在蒸散量、实际蒸散量、实际产量和潜在产量,并将其带入 Jensen 模型,计算各样点冬小麦 4 个生育时期对水分胁迫的敏感系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 CERES - Wheat 模型的标定

基于 2007—2014 年的地面调查数据,采用“试错法”并根据样点灌溉能力、地理位置等特点对 CERES - Wheat 模型中的遗传特性参数进行调试,使

模型模拟的生育时期、LAI、产量和土壤分层含水量与相应实测数据吻合度达到最佳,实现 CERES - Wheat 模型的“本地化”。以关中平原两个灌溉样点(扶风县城北和眉县常兴镇)和两个旱作样点(宝鸡市陈仓区北和乾县石牛乡)为例,利用 CERES - Wheat 模型模拟 4 个样点 2007—2014 年的 LAI、产量及土壤分层含水量。

2.1.1 LAI 的模拟结果与分析 从模拟的总生育期天数和 LAI 结果(图 2)可知,宝鸡市陈仓区北、扶

风县城北、眉县常兴镇和乾县石牛乡冬小麦的整个生育天数分别在 244 ~ 251、238 ~ 245、242 ~ 249 d 和 243 ~ 250 d 之间。陈仓区北、扶风县城北、眉县常兴镇和乾县石牛乡冬小麦分别在播种后 199 ~ 204、197 ~ 201、188 ~ 193 d 和 195 ~ 200 d LAI 达到最大值。结合样点实测冬小麦 LAI 数据、生育时期和收获日期对模拟结果进行验证,可以得出标定的 CERES - Wheat 模型能够较准确地模拟冬小麦整个生育期的 LAI 变化状况。

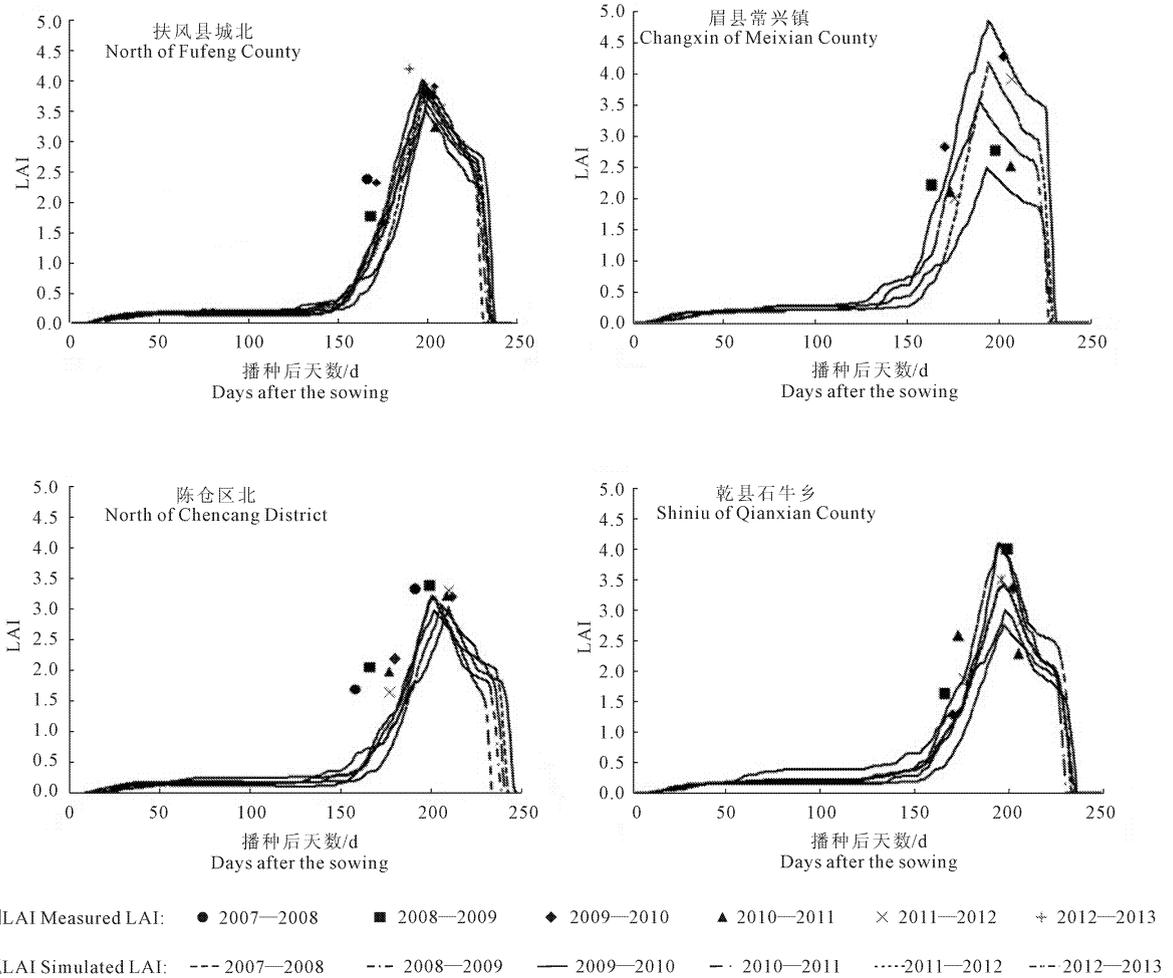


图 2 4 个样点应用 CERES - Wheat 模型模拟的 LAI 模拟值及实测值

Fig.2 The simulated LAI values by the CERES - Wheat model and the measured ones of the four sampling sites

2.1.2 产量的模拟结果与分析 从产量的模拟结果(表 1)可知,所有样点模拟产量和实测产量的平均相对误差为 8.79%,在误差允许范围内,模拟效果较好。所选样点中扶风县城北模拟产量和实测产量的平均相对误差最大,为 10.35%,眉县常兴镇模拟产量和实测产量的平均相对误差最小,为 6.17%,陈仓区北为 8.91%,乾县石牛乡为 8.63%,旱作样点模拟产量与实测产量的相对误差较接近,灌溉样点的相对误差变化较大。从不同年份模拟结果看,

2007—2008、2008—2009、2009—2010、2010—2011、2011—2012、2012—2013 年和 2013—2014 年冬小麦生长年模拟产量和实测产量的平均相对误差分别为 9.24%、11.79%、7.14%、8.64%、7.33%、8.97% 和 8.74%,除 2008—2009 年冬小麦生长年平均相对误差大于 10%,其余均在合理范围内。综合上述模拟结果可知标定的 CERES - Wheat 模型模拟产量精度较高。

表 1 CERES - Wheat 模型模拟的冬小麦单产与实测单产的相对误差/%

Table 1 Relative errors between the simulated yields by CERES - Wheat model and the measured ones

样本点 Sampling site	冬小麦生长年 Crop year of winter wheat						
	2007—2008	2008—2009	2009—2010	2010—2011	2011—2012	2012—2013	2013—2014
扶风县城北 North of Fufeng County	9.18	19.39	-10.12	-4.80	-11.26	-7.89	9.82
眉县常兴镇 Changxing of Meixian County	—	-4.79	0.40	11.11	-8.36	—	—
陈仓区北 North of Chencang District	-9.29	11.80	-9.79	7.21	-6.46	—	—
乾县石牛乡 Shiniu of Qianxian County	—	-11.19	-8.23	-11.44	3.24	10.05	7.65

注:—表示在该冬小麦生长年未展开地面试验或未进行测产。

Note: — indicates that the field experiments were not carried out or the yields were not measured in the sampling sites in the years of winter wheat growth.

2.1.3 土壤含水量的模拟结果与分析 由土壤分层含水量模拟结果(表 2)可知,0~20、20~50、50~80、80~120 cm 和 120~200 cm 土壤含水量模拟值与实测值的平均相对误差分别为 10.71%、10.10%、7.42%、5.14%和 5.38%,平均相对误差基本在误差允许范围内。模拟的 80~200 cm 土壤含水量平均相对误差明显小于土壤表层土壤含水量平均相对误差。由于土壤表层受蒸散、降水、灌溉和下渗等因素的影响较强,土壤表层含水量变化较大,故在模拟结果中表层土壤含水量相对误差较大,随着土壤层次的向下延伸,上述因素的影响作用减弱,土壤含水量趋于稳定,土壤含水量模拟值与实测值的相对误差减小。4 个观测样点土壤含水量模拟值与实测值的平均相对误差分别为 7.40%、11.76%、6.58%和 6.46%,除眉县样点模拟误差较大外,其余观测样点土壤含水量模拟值与实测值的平均相对误差均在误差允许范围内。综合上述结果可知 CERES - Wheat 模型对土壤剖面含水量的模拟结果和野外试验实地测量结果在变化趋势和具体数值上均相符。

## 2.2 冬小麦不同生育时期的水分胁迫敏感性分析

在标定 CERES - Wheat 模型基础上,利用 Jensen 模型分别计算旱作样点和灌溉样点冬小麦返青期、拔节期、抽穗~灌浆期和乳熟期水分胁迫敏感系数(表 3)。结果为,旱作样点与灌溉样点构建的多元线性回归方程均通过  $F$  检验;无论是旱作样点还是灌溉样点,冬小麦在同一生育期对水分胁迫的敏感性相同且拔节期敏感性最大,抽穗~灌浆期次之,返青期和乳熟期依次递减。灌溉样点在拔节期和抽穗~灌浆期对水分胁迫的敏感性相差较大,而旱作样点敏感性相差较小。由于灌溉样点在拔节期发生水分胁迫可通过及时灌溉以缓解缺水情况,会减弱其后抽穗~灌浆期的水分胁迫敏感性,所以灌溉样点

抽穗~灌浆期水分胁迫敏感系数与拔节期相差较大。旱作样点构建的多元线性回归方程的显著性明显高于灌溉样点,其主要原因是灌溉样点在出现水分胁迫时可及时进行灌溉,以缓解水分胁迫对冬小麦的作用,降低冬小麦在该生育期对水分胁迫的敏感性,进而导致在灌溉样点 Jensen 模型的模拟精度低于旱作样点。

以各样点 2009—2010 年实测土壤、田间管理数据及 1975—2014 年各样点气象数据为基础,利用 CERES - Wheat 模型连续模拟功能并结合 Jensen 模型,计算各个样点不同生育时期的水分胁迫敏感系数(表 4)。各个样点构建的多元线性回归方程均通过  $F$  检验且拔节期、抽穗~灌浆期、返青期和乳熟期水分胁迫敏感系数依次减弱。旱作样点构建的多元线性回归方程的显著性高于灌溉样点。旱作样点在拔节期和抽穗~灌浆期水分胁迫敏感系数差异较小,灌溉样点在拔节期和抽穗~灌浆期水分胁迫敏感系数差异较大。这与整体研究旱作样点和灌溉样点在不同生育时期敏感系数的结果一致。

## 3 讨论

冬小麦不同生育时期对水分胁迫的敏感性存在明显差别,即不同生育时期发生水分胁迫对最终产量影响有显著差异。在返青期前后冬小麦的叶、茎、根等器官增长较为缓慢且干物质质量积累不大,对于水分的需求量较小。由于作物的补偿生长效应<sup>[18]</sup>,在返青期前后发生水分胁迫,随后生育期恢复正常灌溉,其水分亏缺对株高、最终的分蘖、叶面积及干物质累积量的影响不大,所以返青期水分胁迫敏感性较小。敏感系数最大值出现在拔节期,说明该生育期是关中平原冬小麦对水分胁迫反应最为敏感的时期。在拔节期冬小麦的叶、茎、根等器官同时并进,

表 2 CERES - Wheat 模型模拟土壤剖面分层含水量与实测含水量的相对误差/%

Table 2 Relative errors between the simulated water contents of soil profile by CERES - Wheat model and the measured ones

样本点 Sampling site	冬小麦生长期 Crop year of winter wheat	土壤剖面含水量相对误差/% Relative errors of the water contents of soil profile				
		0 ~ 20 cm	20 ~ 50 cm	50 ~ 80 cm	80 ~ 120 cm	120 ~ 200 cm
扶风县城北 North of Fufeng County	2007—2008	-11.39	-6.02	-11.24	0.57	14.98
	2008—2009	6.32	-5.00	-10.26	-7.59	13.84
	2009—2010	-8.17	-7.62	-0.51	3.41	-5.31
	2010—2011	-21.19	-14.22	-3.43	-0.52	-13.04
	2011—2012	8.30	-9.44	6.91	5.08	-7.73
	2012—2013	-2.30	-4.40	-11.47	-4.93	-1.67
	2013—2014	10.24	-8.65	6.54	-3.43	3.42
眉县常兴镇 Changxing of Meixian County	2008—2009	-22.22	-24.23	-16.57	5.96	-0.95
	2009—2010	9.06	-20.28	-5.34	-15.21	-2.03
	2010—2011	-21.45	-23.83	-3.98	-0.52	-13.04
	2011—2012	-22.92	-10.55	-8.43	-6.93	-1.75
陈仓区北 North of Chencang District	2007—2008	-4.84	-4.00	-9.62	-10.17	8.59
	2008—2009	-9.73	-10.00	-4.46	-12.03	-6.21
	2009—2010	10.42	-12.57	-6.70	-5.53	-2.90
	2010—2011	-5.21	-2.79	-7.80	11.76	-1.06
	2011—2012	-3.17	2.81	-4.61	2.84	-4.57
乾县石牛乡 Shiniu of Qianxian County	2008—2009	7.87	-8.99	-7.04	-3.19	3.78
	2009—2010	-11.17	-10.86	-4.88	-3.84	3.88
	2010—2011	4.76	-10.6	-8.16	-1.02	-1.04
	2011—2012	-11.95	-10.12	-9.17	-1.43	0.04
	2012—2013	11.63	6.06	-7.82	2.67	-4.23
2013—2014	11.23	9.24	-8.33	4.53	4.23	

表 3 不同类型样点在不同生育时期的水分胁迫敏感系数

Table 3 The sensitivity coefficients of water stress on winter wheat at different growth stages in the irrigated or rainfed sampling sites

样本点类型 Type of sampling site	返青期 Turning green	拔节期 Jointing	抽穗~灌浆期 Heading~filling	乳熟期 Milk stage	F 检验 F-value
旱作样点 Rainfed site	0.113	0.405	0.383	0.099	17.604
灌溉样点 Irrigated site	0.043	0.589	0.342	0.026	4.553

注 (Note):  $F_a(4, n-5) = 2.895, a = 0.05, n = 24$ ;  $F_a(4, n-5) = 2.612, a = 0.05, n = 44$ .

叶和茎的长度和体积成倍或几十倍增长,而根系迅速延伸,对深层土壤水分吸收利用越加明显,在该生育时期如果土壤水分供给不足都会造成根、茎、叶干物质以及整株干物质质量积累速率的降低,影响小麦最终的长势和产量。这与闫永奎等<sup>[19]</sup>研究的拔节期是冬小麦需水关键期相吻合。拔节期之后的抽穗~灌浆期,冬小麦由营养生长转向生殖生长,冬小麦通过光合作用产生的淀粉、蛋白质和积累的有机物质通过同化作用将它们储存在籽粒里,在抽穗~灌浆期发生水分胁迫会影响光合作用的效率和速度,减少淀粉、蛋白质和有机质的合成,灌浆期水分胁迫会造成冬小麦粒重明显降低,所以抽穗~灌浆期是

影响小麦生长发育的又一关键时期,这与肖俊夫等<sup>[20]</sup>的研究较为接近。肖俊夫认为冬小麦各生育期对耗水量敏感性顺序为抽穗、拔节、灌浆、苗期、返青和越冬,且拔节~抽穗期为冬小麦需水关键期。而本研究得出拔节期对于水分胁迫的敏感性大于抽穗~灌浆期且拔节、抽穗~灌浆期为冬小麦需水关键期,这是由于研究方法及其研究区域的不同,以及冬小麦生育时期划分的差异造成的。在关中平原,春旱发生的几率较大,且在灌溉区域通常在拔节期进行春灌,因此可认为我们模拟研究结果更具区域特色。在抽穗~灌浆后,小麦进入乳熟期,营养物质向籽粒运输的过程结束,植株逐渐枯萎,根系开始死亡,

表 4 不同生育时期的水分胁迫敏感系数

Table 4 The sensitivity coefficients of water stress on winter wheat at different growth stages

样本点类型 Type of sampling site	样本点 Sampling site	返青期 Turning green	拔节期 Jointing	抽穗 ~ 灌浆期 Heading ~ filling	乳熟期 Dough	F 检验 F value
灌溉样点 Irrigated site	扶风县城北 North of Fufeng County	0.183	0.501	0.196	0.120	8.093
	三原县鲁桥镇 Luqiao of Sanyuan County	0.096	0.671	0.233	0.000	4.722
	眉县常兴镇 Changxin of Meixian County	0.059	0.732	0.201	0.008	9.831
	临渭区蔺店镇 Lindian of Linwei District	0.176	0.499	0.219	0.106	6.450
旱作样点 Rainfed site	陈仓区北 North of Chencang District	0.116	0.412	0.364	0.108	25.678
	凤翔县城西 West of Fengxiang County	0.156	0.377	0.317	0.150	19.164
	乾县石牛乡 Shiniu of Qianxian County	0.161	0.487	0.322	0.030	25.665
	岐山县蒲村镇 Pucun of Qishan County	0.178	0.386	0.301	0.135	16.064
	蒲城县城北 North of Pucheng County	0.140	0.484	0.286	0.090	6.760
	蓝田县史家寨乡 Shijiazhai of Lantian County	0.142	0.510	0.496	-0.148	9.791
	合阳县王村镇 Wangcun of Heyang County	0.092	0.465	0.336	0.107	19.812

注 Note:  $F_{\alpha}(4, n-5) = 2.65$ ,  $\alpha = 0.05$ ,  $n = 39$ .

不再需要水分的补给,在乳熟后期后期灌水,会从老茎基部长出新的分蘖,消耗养分,导致千粒重的降低,因此在乳熟后期后期灌水对千粒重会产生明显抑制作用,这与杨小利等<sup>[21]</sup>在甘肃西峰和天水研究的冬小麦在返青到拔节期对水分胁迫的敏感性大于乳熟到成熟期的结论一致,即冬小麦在乳熟期水分胁迫敏感系数最小。

## 4 结 论

通过利用 2007—2014 年的地面调查数据对 DSSAT 支持下的 CERES - Wheat 模型进行了标定,实现了模型的“本地化”,并在此基础上利用 Jensen 模型计算了关中平原冬小麦不同生育时期的水分胁迫敏感系数。主要结论:无论是在旱作样点还是在旱作样点,冬小麦在拔节期、抽穗 ~ 灌浆期、返青期和乳熟期对水分胁迫的敏感性依次减弱,且旱作样点拔节期和抽穗 ~ 灌浆期的水分胁迫敏感系数相差较小而灌溉样点相差较大,这主要是由于关中平原春旱发生的几率较大,灌溉区域通常在拔节期进行春灌,会减弱其后抽穗 ~ 灌浆期冬小麦对水分胁迫敏感性。拔节期和抽穗 ~ 灌浆期水分胁迫敏感系数在水分胁迫敏感系数归一化处理所占比重较大,是需水关键时期,而在返青期和乳熟期所占比重小,发生水分胁迫时对产量影响较小。

在关中平原实际农业生产中可利用冬小麦在不同生育时期对水分胁迫敏感的程度,进行分时期的有效抗旱和田间管理。例如在水分胁迫下对产量影响较大的生育时期(如拔节期)出现干旱,需及时并有针对性地进行抗旱和防旱工作,而在对水分胁迫

不太敏感的生育时期(如乳熟期)出现干旱,要结合实际农业干旱程度,权衡相应投入和产出后进行抗旱,做到抗旱防旱资源的有效利用和统筹规划。

## 参 考 文 献:

- [1] Angus J F, van Herwaarden A F. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93 (2): 290-298.
- [2] Kumar A, Singh D P, Singh P. Influence of water stress on photosynthesis, transpiration, water-use efficiency and yield of Brassica juncea [J]. *Field Crops Research*, 1994, 37(2):95-101.
- [3] 王仰仁,雷志栋,杨诗秀.冬小麦水分敏感指数累积函数研究[J].*水利学报*,1997,5(5):28-35.
- [4] 蔺海明,牛俊义,秦舒浩.陇中半干旱区小麦和玉米补灌效应研究[J].*干旱地区农业研究*,2001,19(4):80-86.
- [5] 房全孝,王建林,于舜章.华北平原小麦—玉米两熟节水潜力与灌溉对策[J].*农业工程学报*,2011,27(7):37-44.
- [6] 冯绍元,罗遵兰,左海洋.河北省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J].*灌溉排水学报*,2005,24(4):58-61.
- [7] Wang K Q, Fu Q, Ji F, et al. Study on comparison of different methods to calculating sensitivity index of Jensen model [J]. *Journal of Northeast Agricultural University (English Edition)*, 2007, 14 (3): 278-282.
- [8] 王仰仁,周青云,解爱国,等.时段划分对冬小麦作物水模型影响的研究[J].*灌溉排水学报*,2010,29(5):6-10.
- [9] 周智伟,尚松浩,雷志栋.冬小麦水肥生产函数的 Jensen 模型和人工神经网络模型及其应用[J].*水科学进展*,2003,14(3):280-284.
- [10] 张 兵,袁寿其,李 红,等.基于遗传算法求解的冬小麦优化灌溉产量模型研究[J].*农业工程学报*,2006,22(8):12-15.
- [11] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3):235-265.

林部门调整种植结构,于香山北麓永大公路两侧压砂地进行大规模枣苗栽植,至 2013 年枣苗栽植规模扩大至  $4.5 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。大面积的枣树种植,使得研究区地表植被覆盖度增加,种植区域温度下降,热岛区域缩小,热岛效应有所缓解。

受其他条件限制,本文温度反演所采用的地表比辐射率参数均采用前人的观测数据和统计模型,可能影响研究区地面温度反演的精度。另外,研究只选取了 2004、2009 年和 2013 年三个时间点的数据进行分析,缺少逐年观测数据,因此,对时段内部的精细变化有待更深入研究。且对于地表温度的变化给区域生态环境所造成的影响仍需进一步的定量研究。

#### 参 考 文 献:

- [1] 王占军,蒋 齐,何建龙,等.宁夏环香山地区压砂地土壤微生物结构及功能多样性研究[J].水土保持通报,2013,33(6):58.
- [2] 王占军,蒋 齐,何建龙,等.宁夏环香山地区压砂地土壤肥力特征分析[J].水土保持学报,2010,24(2):201-204.
- [3] 李百云,魏天军.宁夏旱砂地枣瓜间作栽培技术研究[J].安徽农业科学,2010,38(12):6158-6160.
- [4] Li Z L, Becker F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data[J]. Remote Sensing of Environment, 1993,43(1):67-85.
- [5] Qin Z, Karnieli A. Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA - AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999,20(12):2367-2393.
- [6] 杜灵通,李国旗.基于 MODIS 数据的宁夏地表温度空间分布研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):191-195.
- [7] 杜灵通.基于 Landsat ETM+ 数据的银川城市热岛研究[J].测绘科学,2008,33(4):169-171.
- [8] 冯蜀青,殷青军,肖建设,等.基于温度植被旱情指数的青海高寒区干旱遥感动态监测研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(5):141-145.
- [9] 刘 霞,沙晋明.基于 ETM+ 影像的福州市部分城区的地表温度反演与分析[J].海洋技术,2010,29(3):87-92.
- [10] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel - Egypt border region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(18):3719-3746.
- [11] 覃志豪,Zhang M H, Karnieli A, et al. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J].地理学报,2001,56(4):456-466.
- [12] 覃志豪,LI W J, Zhang M H, et al. 单窗算法的大气参数估计方法[J].国土资源遥感,2003,15(2):37-43.
- [13] 张 勇,余 涛,顾行发,等. CBERS - 02 IRMSS 热红外数据地表温度反演及其在城市热岛效应定量分析中的应用[J].遥感学报,2006,10(5):789-797.
- [14] Schneider K, Mauser W. Processing and accuracy of Landsat Thematic Mapper data for lake surface temperature measurement[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996,17(11):2027-2041.
- [15] 丁 凤,徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J].地球信息科学,2006,8(3):125-130.
- [16] 黄聚聪,赵小锋,唐立娜,等.城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例[J].生态学报,2012,32(2):622-631.
- [17] 陈云浩,史培军,李晓兵.基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究[J].测绘学报,2002,31(2):139-144.
- [18] 江学顶,夏北成.珠江三角洲城市群热环境空间格局动态[J].生态学报,2007,27(4):1461-1470.
- [19] 贡 璐,吕光辉.基于景观的干旱区城市热岛效应变化研究——以乌鲁木齐市为例[J].中国沙漠,2009,29(5):982-988.
- [20] 孟 丹,李小娟,宫辉力,等.北京地区热力景观格局及典型城市景观的热环境效应[J].生态学报,2010,30(13):3491-3500.
- [21] Liu Jiuyan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang, et al. Study on spatial pattern of land - use change in China during 1995—2000[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2003, 4: 373-384, 420-422.
- [12] 江 敏,金之庆,葛道阔,等. CRERS - Wheat 模型在我国冬小麦主产区的适应性验证及订正[J].江苏农学院学报,1988,19(3):64-67.
- [13] 刘骁月,王鹏新,张树誉,等.基于作物模型模拟年际生物量变化的冬小麦干旱监测研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):212-218.
- [14] 张树誉,孙 威,王鹏新.条件植被温度指数干旱监测指标的等级划分[J].干旱区研究,2010,27(4):600-606.
- [15] 蒲金涌,张存杰,姚小英,等.干旱气候对陇东南主要农作物产量影响的评估[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):167-171.
- [16] 景毅刚,范建中,高茂盛.气候变暖对陕西冬小麦生育期的影响[J].麦类作物学报,2013,33(2):389-396.
- [17] 翁笃鸣.试论总辐射的气候学计算方法[J].气象学报,1964,34(3):304-315.
- [18] Aggarwal P K, Sinha S K. Response of droughted wheat to mild - season water application: recovery in leaf area and its effect on grain yield[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1987, 14(2):227-237.
- [19] 闫永奎,郝卫平,梅旭荣,等.拔节期水分胁迫—复水对冬小麦干物质积累和水分利用效率的影响[J].中国农业气象,2011,32(2):190-195.
- [20] 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等.不同灌水处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J].灌溉排水学报,2006,25(2):20-23.
- [21] 杨小利,刘庚山,杨兴国.甘肃黄土高原主要农作物水分胁迫敏感性[J].干旱地区农业研究,2006,24(4):90-93,203.

(上接第 219 页)