

葛道阔, 曹宏鑫, 杨余旺, 等. 干旱胁迫下油菜栽培模拟优化决策系统(Rape-CSODS)的订正及其检验[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(1): 56-62.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.01.008

## 干旱胁迫下油菜栽培模拟优化决策系统(Rape-CSODS)的订正及其检验

葛道阔<sup>1</sup>, 曹宏鑫<sup>1</sup>, 杨余旺<sup>2</sup>, 张文宇<sup>1</sup>, 张伟欣<sup>1</sup>, 夏吉安<sup>2</sup>, 林 玥<sup>1</sup>, 刘 洪<sup>1</sup>

(1.江苏省农业科学院农业信息研究所, 江苏 南京 210014; 2.南京理工大学计算机科学与工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 利用江苏省兴化市、安徽省天长市 2014—2017 年大田和盆栽油菜的水分胁迫控制试验资料, 明确了受干旱胁迫影响的 4 类变量(油菜净光合速率、叶面积系数、比叶面积和物质分配系数), 进而建立了上述变量的变化百分比与不同土壤相对湿度差(干旱胁迫下油菜田土壤相对湿度与水分适宜的油菜田土壤相对湿度的差值)之间的统计方程式; 利用上述方程式对油菜栽培模拟优化决策系统(Rape-CSODS)中相关机理模型进行了改进; 以干旱胁迫下油菜全生育期和最终产量的模拟结果为例, 检验了 Rape-CSODS 的改进效果。结果显示, 在模型改进前油菜生育期模拟值的标准根均方差(NRMSE)、绝对平均误差(MAE)和一致性系数(IoA)分别为 0.010 29、2.130 00 和 0.999 97, 模型改进后分别为 0.004 89、1.000 00 和 0.999 99, 相关系数从 0.71 提高到 0.88; 模型改进前油菜产量模拟值的 NRMSE、MAE 和 IoA 分别为 0.105 61、20.610 00 和 0.997 50, 模型改进后分别为 0.042 40、7.437 50 和 0.999 50, 相关系数从 0.52 提高到 0.95。表明经改进的 Rape-CSODS 对油菜干旱有较好的模拟能力, 能应用于区域化油菜生产。

**关键词:** 油菜; 干旱胁迫; 土壤相对湿度; 模拟模型

**中图分类号:** S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)01-0056-07

## Modification and verification of Rape-CSODS under drought stress

GE Dao-kuo<sup>1</sup>, CAO Hong-xin<sup>1</sup>, YANG Yu-wang<sup>2</sup>, ZHANG Wen-yu<sup>1</sup>, ZHANG Wei-xin<sup>1</sup>, XIA Ji-an<sup>2</sup>, LIN Yue<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Department of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Based on the data of water stress control of field and potted rape in Xinghua city, Jiangsu province and Tianchang city, Anhui province, the four types of variables (net photosynthetic rate, leaf area index, specific leaf area and dry matter partition coefficient) affected by drought stress were identified, and the statistical equations were established between the above variables of percentage change and the soil relative humidity difference (difference of relative soil moisture between rape field under drought stress and rape field under water suitable condition). The related mechanism model of rape cultivation simulation optimization decision system (Rape-CSODS) was improved by using the above equation. The improvement effect of Rape-CSODS was tested by using the simulation results of the growth duration and the final yield of rape during drought stress. The results showed that the normalized root mean square error (NRMSE), mean absolute error (MAE)

and index of agreement (IoA) of the simulated values of rape growth period were 0.010 29, 2.130 00 and 0.999 97, respectively, before the model improvement, the NRMSE, MAE and IoA were 0.004 89, 1.000 00 and 0.999 99, respectively, after the model improvement, and the correlation coefficient increased from 0.71 to 0.88.

收稿日期: 2017-11-02

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX(13)3054 ]; 国家自然科学基金项目(31471415)

作者简介: 葛道阔(1965-), 男, 江苏南京人, 研究员, 主要从事作物生长模型、数字农业与农业气象研究。(E-mail) gedakuo@163.com

The *NRMSE*, *MAE* and *IoA* of rape yield simulation value were 0.105 61, 20.610 00 and 0.997 50, respectively, before the model improvement, the *NRMSE*, *MAE* and *IoA* were 0.042 40, 7.437 50 and 0.999 50, respectively, after the model improvement, and the correlation coefficient increased from 0.52 to 0.95. Indicating that the improved Rape-CSODS has good simulation ability for rape drought and can be applied to regional rape production.

**Key words:** rape; drought stress; relative soil moisture; simulation model

近年来,中国作物栽培模拟优化决策系统系列模型(CCSODS)在中国水稻、小麦和玉米主产区均得到广泛应用,为作物生产提供了有效的辅助决策。尤其在水稻有机种植和抛秧移栽栽培方案、小麦营养胁迫和施肥管理以及玉米品种和播种方式选择等方面的研究及应用,使 CCSODS 向普适化方向发展<sup>[1-9]</sup>。而气候变化造成的极端天气发生频率增加使上述作物更易遭受光温胁迫、水分胁迫等,是 CCSODS 急需解决的问题。一般采用单个胁迫影响因子订正的方法,考虑某种胁迫影响改进原模型,进一步拓展和增强 CCSODS 应用性和预测性<sup>[10-15]</sup>。作为其中主要作物模型之一的油菜栽培模拟优化决策系统(Rape-CSODS)秉承了其开放性和通用性的特点,其在不同区域、不同层面的应用研究,尤其在油菜渍害影响模拟研究和功能-结构油菜模型研究方面有明显进展<sup>[16-20]</sup>。然而,中国冬油菜主产区季节性干旱较为严重,部分区域降水量年际变化大,干旱发生频率有逐年增高的趋势,往往是油菜产量的主要限制因子。因此,利用油菜大田和盆栽的水分胁迫控制试验资料,在干旱胁迫条件下订正和应用 Rape-CSODS,对增强系统的应用性,开展研究区域油菜生长季干旱监测预警和调控以及大田生产数字化管理具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

1.1.1 油菜干旱敏感性大田试验 试验于 2014–2017 年布置在长江中下游典型冬油菜主产区,地点为江苏省兴化市和安徽省天长市,供试油菜品种为秦优 10 号。于活动防雨棚中进行,试验小区面积 4 m×8 m,每小区内设置 3 个重复,重复之间间隔 0.12 m,小区之间间隔 1.0 m,小区四周设保护行并布设 1.2 m 深水分水平运动隔离薄膜。视天气情况适时开、关防雨装置。处理开始前 20~30 d,预备控制,一旦土壤相对湿度低于 65%时,即进行小水量间歇性灌溉,控制土壤相对湿度小于 70%;处理开

始前 5~8 d,准控制,遇有降水即开启防雨装置。土层水分控制深度要求达到油菜主根入土深度的 80%。试验设置 4 个发育期(出苗-现蕾、现蕾-始花、始花-终花、终花-成熟)、4 种干旱土壤相对湿度类型(30%~40%、40%~50%、50%~60%和 60%~70%)处理,设自然干旱对照(自然降水,足墒出苗后不再进行任何水分处理)和土壤适宜水分对照。

1.1.2 油菜干旱胁迫盆栽控制试验 试验于 2014–2016 年在兴化市进行,供试油菜品种为秦优 10 号。盆栽容器为高 30 cm、直径 35 cm 的塑料桶。盆栽试验在顶部透明防雨、四周通风透光的全封闭网室中进行。盆栽用土取自油菜干旱敏感性大田试验田块耕作层表土(中壤土,最大持水量 21.43%,肥力中等),每桶装风干土 18.1 kg,移栽前浇水沉实。试验土壤水分处理分 4 个生育时期(出苗-现蕾、现蕾-始花、始花-终花、终花-成熟),4 个土壤水分水平为对照(土壤相对湿度 70.0%~75.0%)、轻旱(土壤相对湿度 57.5%~65.0%)、中旱(土壤相对湿度 45.0%~52.5%)、重旱(土壤相对湿度 32.5%~40.0%)和特旱(土壤相对湿度 20.0%~27.5%)。精准控制盆栽土壤水分含量,采用土壤水分测定仪测定法与称质量法并行测定的方式,并剔除油菜植株每日鲜质量变化的影响,确定每桶每日补水量。

### 1.2 测定项目

处理期间测定油菜叶片净光合速率( $P_n$ )、叶水势、土壤质量含水量、土壤体积含水量、土壤水势等。于主要生育期及水分处理结束时及时取样,测定各器官(茎、叶、黄叶、角果、根)鲜质量和干物质量、茎枝数、叶面积指数(LAI)、比叶面积(SLA)等,成熟后测产和测定产量结构。

### 1.3 油菜生长模型 Rape-CSODS 改进的检验方法

Rape-CSODS 模型中虽然有关于大田土壤水分对油菜生长发育的影响模块,但该模块是建立在针对油菜生长发育过程的一般经验描述基础之上,模拟效果常存在偏差。本研究利用 2014–2017 年在江苏省兴化市、安徽省天长市进行的试验数据,建立

水分影响油菜生育进程、光合作用、干物质分配以及叶面积增长过程等方面的关系式,以此改进 Rape-CSODS 模型。采用 Janssen 等<sup>[21]</sup>提出的检验模拟值与实测值的标准化方法,选取绝对平均误差(MAE)、标准根均方差(NRMSE)和一致性系数(IoA)对水分订正前后模型的预测性与精准度进行综合评价与测试。MAE 和 NRMSE 越小、IoA 越大,则表明模拟误差越小,预测性越好,精准度越高。

$$MAE = \frac{\sum |P_i - O_i|}{N} \quad (1)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} / \bar{O} \quad (2)$$

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [|P'_i| - |O'_i|]^2} \quad (3)$$

式1、式2、式3中, $N$ 为样本数, $P_i$ 和 $O_i$ 分别为预测值和观测值, $\bar{O}$ 为观测值的平均值, $P'_i = P_i - \bar{O}$ , $O'_i = O_i - \bar{O}$ 。用线性方程的决定系数( $R^2$ )检验模型模拟值与实测值的相关性, $R^2$ 越接近1,说明模拟值与实测值的相关性越好。

#### 1.4 干旱胁迫下油菜生长模型相关变量的测定与建模

1.4.1 油菜净光合速率( $P_n$ )的测定与建模 比较干旱试验中不同水分处理观测的净光合速率( $P_{ni}$ ),发现水分适宜时 $P_{ni}$ 为最大值 $P_{nmax}$ ,可以认为 $P_{nmax}$ 与不同干旱水平下 $P_{ni}$ 的差值即为水分亏缺导致的 $P_{ni}$ 损失。以干旱条件下净光合速率相对于适宜条件下最大净光合速率的变率 $[\Delta f(P_{ni})]$ 与实测土壤湿度与适宜土壤相对湿度的差值( $\Delta sm_i$ )求相关(图1),拟合为方程(4)。结果显示,随着土壤干旱程度加剧, $P_{ni}$ 的变化方向与土壤相对湿度的变化方向一致,且两者间呈线性关系。因此,干旱条件下油菜的光合速率( $P_{ni}$ )可表达为式5。

$$\Delta f(P_{ni}) = -1.201 \cdot \Delta sm_i + 91.526 \quad (4)$$

$$P_{ni} = \Delta f(P_{ni}) / 100 + 1 \quad (5)$$

1.4.2 油菜叶面积系数与比叶面积的测定与建模 与干旱胁迫下油菜净光合速率测定及拟合方法类似,以油菜叶面积系数相对于适宜条件下油菜叶面积系数的变率 $[\Delta f(LAI_i)]$ 与实测土壤相对湿度与适宜土壤相对湿度的差值( $\Delta sm_i$ )求相关。由图2可见,随着土壤干旱加剧, $\Delta f(LAI_i)$ 呈曲线下下降趋

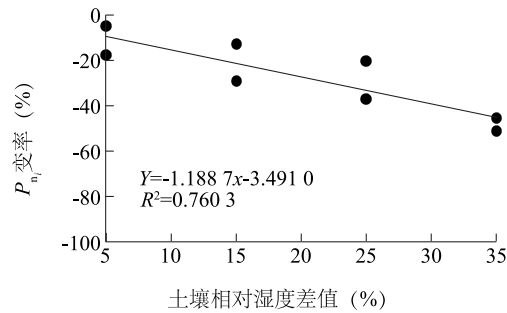


图1 开花期土壤相对湿度对油菜叶片净光合速率( $P_{ni}$ )的影响

Fig.1 Effect of relative soil moisture on net photosynthetic rate ( $P_{ni}$ ) of rape leaves at the flowering stage

势,可拟合为一元二次方程(式6) $[r = 0.950^{**}, r(6, 0.001) = 0.9249]$ 。方程相关系数( $r$ )达到0.001显著水平,拟合度高。因此,干旱胁迫下油菜叶面积系数 $LAI_i$ 可表达为式7。

$$\Delta f(LAI_i) = -0.0075 \cdot (\Delta sm_i)^2 + 0.121 \cdot \Delta sm_i - 1.0325 \quad (6)$$

$$LAI_i = \Delta f(LAI_i) / 100 + 1 \quad (7)$$

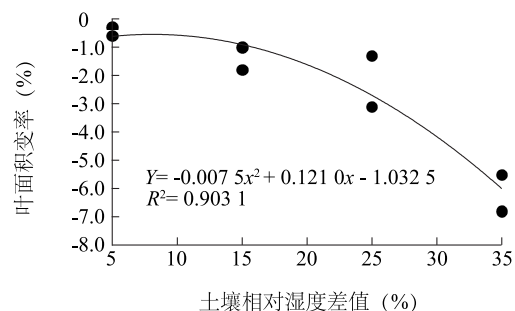


图2 土壤相对湿度对油菜叶面积系数的影响

Fig.2 Effect of relative soil moisture on leaf area coefficient of rape

同时,由图3可以看出,干旱胁迫下,随着土壤相对湿度差的增加,油菜比叶面积呈直线上升趋势。土壤相对湿度差( $\Delta sm_i$ )增加,会导致比叶面积( $SLA_i$ )增加,使叶片变薄,这是胁迫条件下植物通过调整自身叶片生理结构,部分弥补胁迫导致光合产物的不足<sup>[22-23]</sup>,这也可能是油菜叶片生长对干旱逆境的适应。干旱对油菜比叶面积变率 $\Delta f(SLA_i)$ 的影响可拟合为一元一次方程(式8) $[r = 0.761^{**}, r(6, 0.05) = 0.7067]$ 。方程相关系数 $r$ 达到0.05显著水平,拟合度较高。干旱胁迫下油菜比叶面积( $SLA_i$ )则可表达为式9。

$$\Delta f(SLA_i) = -0.0721 \cdot \Delta sm_i + 1.0453 \quad (8)$$

$$SLA_i = \Delta f(SLA_i) / 100 + 1 \quad (9)$$

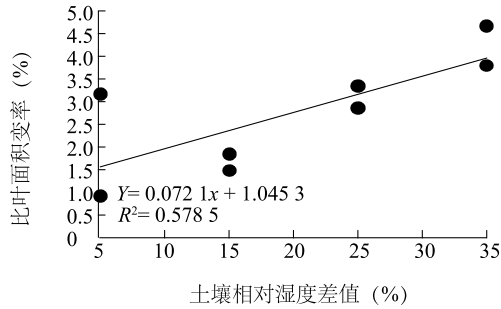


图3 土壤相对湿度对油菜比叶面积的影响

Fig.3 Effect of relative soil moisture on specific leaf area of rape

1.4.3 油菜干物质分配系数的测定与建模 同样地,分别建立了干旱胁迫条件下油菜叶、茎、角果和根器官的干物质分配系数(某器官干物质质量占总干质量的比例)变率与土壤湿度差( $\Delta sm_i$ )间的定量关系。土壤相对湿度降低造成的作物干旱胁迫,可能导致前期油菜营养生长阶段茎枝分配指数上升,叶片分配指数下降,进而导致后期油菜生殖生长阶段茎枝和根的分配指数上升,贮存器官的分配指数下降,光合产物的分配呈现此消彼长的状况<sup>[23-24]</sup>(图4)。由此分别建立干旱影响油菜干物质分配的关系式:

$$\Delta f(PCL_i) = -0.1742 \cdot \Delta sm_i - 1.9097 \quad (10)$$

$$PCL_i = \Delta f(PCL_i) / 100 + 1 \quad (11)$$

$$\Delta f(PCS_i) = 0.0892 \cdot \Delta sm_i + 1.7036 \quad (12)$$

$$PCS_i = \Delta f(PCS_i) / 100 + 1 \quad (13)$$

$$\Delta f(PCP_i) = -0.0882 \cdot \Delta sm_i - 2.8638 \quad (14)$$

$$PCP_i = \Delta f(PCP_i) / 100 + 1 \quad (15)$$

$$\Delta f(PCR_i) = 0.2028 \cdot \Delta sm_i + 1.6444 \quad (16)$$

$$PCR_i = \Delta f(PCR_i) / 100 + 1 \quad (17)$$

式中, $\Delta f(PCL_i)$ 、 $\Delta f(PCS_i)$ 、 $\Delta f(PCP_i)$ 和 $\Delta f(PCR_i)$ 分别为干旱条件下叶、茎、角果和根干物质分配系数与适宜条件下油菜对应器官分配系数的变率, $PCL_i$ 、 $PCS_i$ 、 $PCP_i$ 、 $PCR_i$ 分别为干旱胁迫条件下油菜叶、茎、角果和根器官的分配系数,分别拟合为一元一次方程(式10、式12、式14和式16), $r$ 分别为0.7977<sup>\*\*</sup>、0.8365<sup>\*\*</sup>、0.7301<sup>\*\*</sup>、0.7627<sup>\*\*</sup>, $r(6, 0.05) = 0.7067$ , $r(6, 0.01) = 0.8343$ 。各方程相关系数 $r$ 达到0.01或0.05显著水平,拟合度较高。因此,干旱胁迫下油菜叶、茎、角果和根器官的分配系数可分别表达为式11、式13、式15和式17。在上述各式通过统计显著性检验的基础上,进一步计算油菜地上部的分配系数( $PC_g$ )和叶干质量占地上部干质量的分配系数( $PC_L$ ),以完成叶面积模型改进部分的运算。

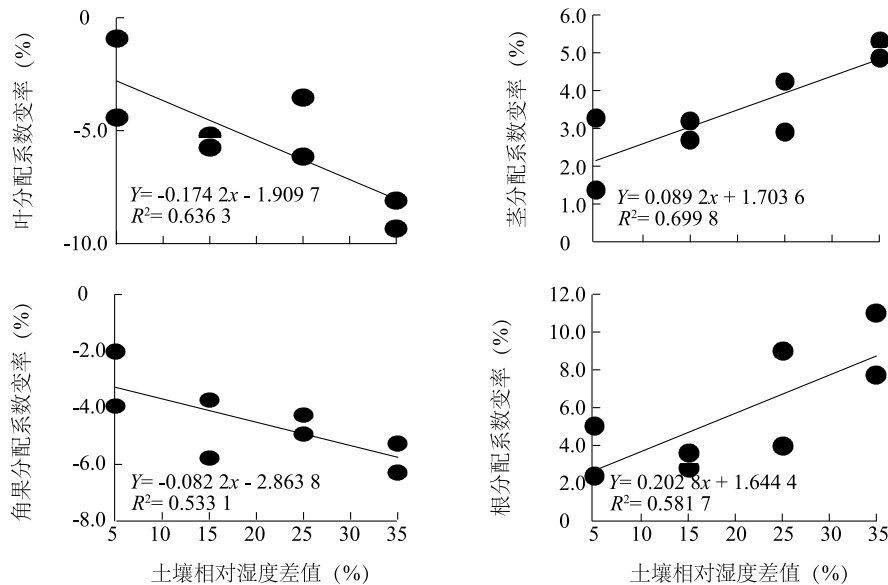


图4 结实期土壤相对湿度对油菜叶、茎、角果和根器官的干物质分配系数的影响

Fig.4 Effect of relative soil moisture on dry matter partition coefficient of rape leaves, stems, horns and root organs at seed-setting stage



## 2 结果

### 2.1 干旱胁迫下油菜生长模型的改进

2.1.1 油菜发育期模型的改进 在 Rape-CSODS 中,借鉴稻麦“钟模型”原理<sup>[25-26]</sup>,建立了油菜发育期基本模型<sup>[27]</sup>,重点考虑了影响油菜发育进程的主要环境因子,即温度和光照。Rape-CSODS 的油菜发育期模型中有关生育阶段划分,每个阶段所需温度和光照最适值,界限值的具体取值以及油菜春化模型的调用等参见文献[27]。田间试验中发现,土壤水分对发育进程也有延缓或促进作用。采用干旱胁迫因子对油菜发育期基本模型中的环境因子影响函数进行订正:

$$dPj/dt = 1/DSj = f(DSj) \cdot f(Ej) \quad (18)$$

$$f(Ej) = (Tebj)^{pj} \cdot (Teuj)^{qj} \cdot (Pej)^{Gj} \cdot f(Eci) \cdot f(Ewi) \quad (19)$$

式中,  $f(Ej)$  为环境因子影响函数,包括温度、光周期效应和栽培措施等影响效应,采用指数幂乘积的形式建立方程;  $Tebj$ 、 $Teuj$  为温度效应因子,  $Pej$  为光周期效应因子,  $pj$ 、 $qj$  和  $Gj$  分别为上述 3 个因子的指数,为温度和光周期反应特性遗传系数。在江苏兴化、安徽天长的大田油菜水分控制试验中发现,干旱胁迫对油菜发育进程,尤其是播种至抽薹阶段有较大影响,故对 Rape-CSODS 中环境因子影响函数式(19)增加土壤干旱胁迫订正项  $f(E_{wi})$ 。通过油菜生育期差  $\Delta f(D_i)$  (干旱胁迫下的生育期  $f(D_i)$  与适宜水分下的生育期  $f(D_0)$  之差)和土壤相对湿度差 ( $\Delta sm_i$ ) 关系,构建土壤水分影响油菜生育期进程的关系式(式 20) [ $r=0.0872^{**}$ ,  $r(6,0.01)=0.8343$ ]。方程相关系数  $r$  达到 0.01 显著水平,拟合度较高。因此,干旱胁迫下油菜发育期可用式 21 表达。

$$\Delta f(D_i) = 0.1106 \cdot \Delta sm_i + 0.1004 \quad (20)$$

$$f(E_{wi}) = [\Delta f(D_i) + f(D_0)] / f(D_0) \quad (21)$$

由图 5 可以看出,土壤相对湿度的降低显著减缓油菜播种至抽薹阶段的发育速度,导致薹期推迟。水分控制试验结果还显示,干旱胁迫对油菜其他生育阶段发育速度的影响似乎不明显。

2.1.2 油菜叶面积模型的改进 土壤水分的多寡均加剧油菜叶片不同程度和形式的衰老。土壤干旱条件下  $LAI$  采用干物质分配法计算<sup>[13-14]</sup>:

$$LAI_{i+1} = LAI_i + \Delta W \cdot PC_g \cdot PC_l \cdot SLA_i - L_s \cdot LAI_i \quad (22)$$

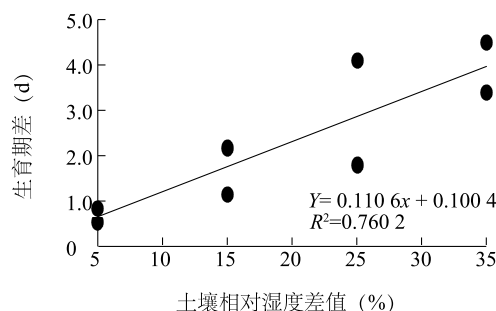


图 5 播种至抽薹阶段油菜生育期差与土壤相对湿度的相关性

Fig.5 Correlation between days of rape development and relative soil moisture at sowing-bolting stage

式中,  $PC_g$  为油菜地上部的分配系数,  $PC_l$  为叶片干质量占地上部干质量的比例;  $L_s$  为绿叶的相对日衰老速率,随发育阶段而变化,并经干旱胁迫影响订正<sup>[6]</sup>;  $SLA_i$  为出苗后第  $i$  d 的比叶面积,  $\Delta W$  为第  $i+1$  d 的干物质累积量。

2.1.3 油菜群体光合生产与干物质积累模型的改进 油菜的产量形成主要取决于干物质积累及其对角果籽粒的分配<sup>[28]</sup>。油菜植株干物质积累量模型如下:

$$W(t) = W(t-1) + \Delta W(t) \quad (23)$$

上式中,  $\Delta W(t)$  第  $t$  d 净光合日变化量,其求算关系式如下:

$$\Delta W(t) = \beta \cdot PCG \cdot \min(WF, NF) - R \quad (24)$$

式中,  $\beta$  为  $CO_2$  与碳水化合物之间的转换系数,  $PCG$  为冠层光合作用强度 [ $g/(m^2 \cdot h)$ ],  $WF$ 、 $NF$  为水分和氮素等因子,  $R$  为群体呼吸消耗。通过干旱胁迫下油菜生长模型相关变量的测定部分建立的叶面积指数  $LAI$ 、光合速率  $P_n$  和消光系数  $K$  等关系式,对  $PCG$  进行订正。

### 2.2 干旱胁迫下油菜生长模型的检验结果

对于干旱胁迫下油菜全生育期和最终产量模拟的准确性是模型改进效果的重要表征,故将模型改进前、后的全生育期和最终产量的模拟值分别对应实测值相比较,对结果进行验证。如图 6 所示,在模型改进前油菜生育期模拟值的标准根均方差 (NRMSE)、绝对平均误差 (MAE) 和一致性系数 (IoA) 分别为 0.01029、2.13000 和 0.99997,模型改进后分别为 0.00489、1.00000 和 0.99999,其中绝对平均误差由 2.13000 d 降低到 1.00000 d,相关系数从 0.71 提高到 0.88,表明油菜发育期模型经水分

影响改进后,模拟精度明显提高;由图7可见,模型改进前油菜产量模拟值的  $NRMSE$ 、 $MAE$  和  $IoA$  分别为0.105 61、20.610 00和0.997 50,模型改进后分别为0.042 40、7.437 50和0.999 50。绝对平均误差由20.610 00 kg降低到7.437 50 kg,尤其是,原模型由

于不能从机理上反映不同程度的干旱胁迫,干旱条件下往往模拟产量偏高,导致实测产量和模拟产量相关系数偏低,仅为0.52,经改进二者相关系数提高到0.95,同步性、准确性得到提升。

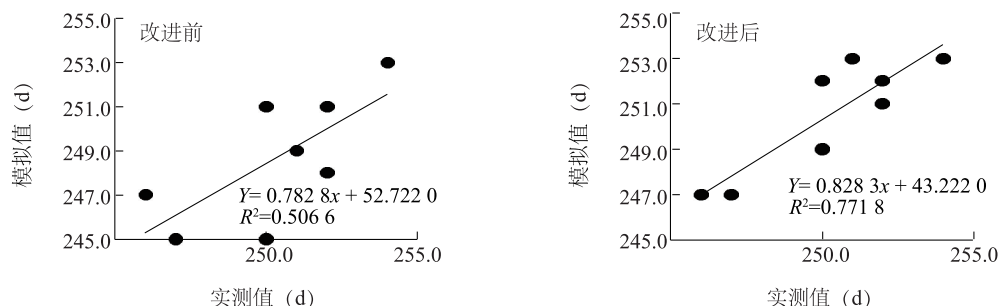


图6 模型改进前和改进后油菜发育期模拟值对比

Fig.6 Comparison of simulated values of rape growth period before and after the model improvement

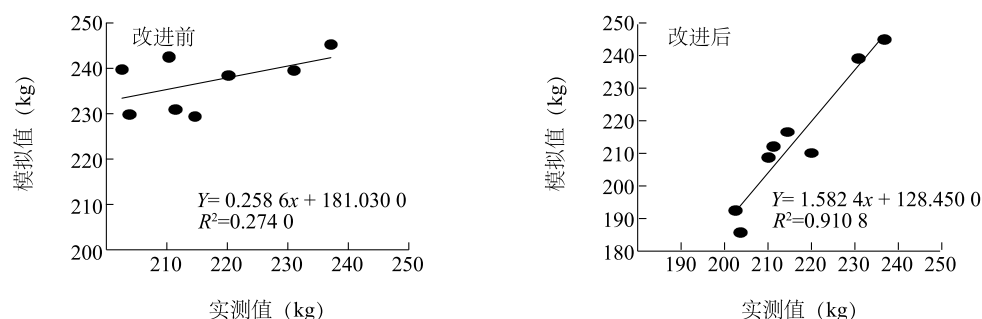


图7 模型改进前和改进后油菜产量模拟值对比

Fig.7 Comparison of simulated values of rape yield before and after the model improvement

### 3 结论

国内外包含主要粮油作物且在生产上已有广泛应用的作物生长系列模型并不多见,主要有 CERES、WOFOST 等,一些在中国开展的对比研究结果表明,其对生育期以及一些产量性状模拟方面往往逊色于 CCSODS<sup>[29-30]</sup>,且这些国外系列模型均不含优化模型以及与专家经验相结合模块,直接影响了其在中国作物栽培实践中因地制宜的应用效果。因此,本研究选用 CCSODS 系列模型中油菜栽培模拟优化决策系统(Rape-CSODS),在油菜主产区正常气候条件下业已推广应用的基础上,利用研究区域内代表性站点多年的大田和盆栽油菜水分控制试验数据及相关文献资料,重点分析了显著反映油菜水分胁迫产量效应的各主要生理生态过程,明确受干

旱胁迫影响明显的若干变量,并建立这些变量的变化百分比(变率)与不同土壤相对湿度差之间的统计方程式,通过相关性检验确定统计显著性,利用建立的方程式对 Rape-CSODS 中相关机理模型进行订正。模拟验证结果表明,对油菜生长模型的改进效果良好,因此在研究区域运用经订正改进的 Rape-CSODS 开展油菜生长季干旱监测预警与调控较为可行。需要指出的是,尽管 Rape-CSODS 属于机理性和广适性作物模型系统,但受限于冬油菜干旱生理、生态基础性研究的深度和广度以及品种之间的特异性和栽培的地域性差异,加之本研究中干旱胁迫影响订正部分是建立在经验模型或半经验模型之上,因此其他冬油菜种植区用户在使用该模型之前,有必要根据当地实际资料,调试、计算模型参数和系数。

## 参考文献:

- [1] 吴金书. 在稻麦生产中应用模拟优化决策系统[J]. 计算机与农业, 2000(9): 27-28.
- [2] 金之庆, 石春林, 葛道阔, 等. 基于 RCSODS 的直播油菜精确施氮模拟模型研究[J]. 作物学报, 2003, 29(3): 353-359.
- [3] 王晓燕, 龙庆海, 丁同华, 等. 沿海地区小麦计算机模拟优化决策系统(WCSODS)的应用探讨[J]. 上海农业科技, 2004(2): 43-44.
- [4] 郭九林, 张丽萍, 周振宇. 水稻计算机模拟优化决策系统(RCSODS)在抛秧稻上的应用与评价[J]. 农业网络信息, 2005(4): 56-59.
- [5] 马新明, 张娟娟, 刘合兵, 等. 小麦生长模型(WCSODS)在河南省的适应性评价研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1789-1795.
- [6] 席运官, 钦佩, 丁公辉, 等. 基于 RCSODS 的有机水稻栽培施肥管理与效果分析[J]. 上海农业学报, 2007, 23(2): 28-33.
- [7] 陈家金, 徐宗焕, 林晶, 等. 基于 RCSODS 的东南沿海水稻施肥量决策[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 71-74.
- [8] 马新明, 张娟娟, 刘合兵, 等. 基于氮素胁迫的 WCSODS 模型订正与检验[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 391-396.
- [9] 赵巧丽, 郑国清, 胡峰, 等. 基于 WCSODS 和 MCSODS 的后茬夏玉米品种选择[J]. 江苏农业科学, 2010(4): 82-83.
- [10] 曹宏鑫, 葛道阔, 赵锁劳, 等. 对计算机模拟在作物生长发育研究中应用的评价[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 183-187.
- [11] 葛道阔, 曹宏鑫, 张利华, 等. WCSODS 中小麦生育期模型在研究区域旱涝胁迫环境下的改进[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(4): 722-727.
- [12] 葛道阔, 曹宏鑫, 张利华, 等. 基于干旱涝渍胁迫的 WCSODS 模型订正与检验[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(3): 490-495.
- [13] 金之庆, 石春林. 江淮平原小麦渍害预警系统(WWWS)[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1458-1465.
- [14] 葛道阔, 曹宏鑫, 夏礼如, 等. 苏北农田林网对稻田小气候及油菜光合作用和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(5): 945-951.
- [15] 葛道阔, 曹宏鑫, 杨余旺, 等. 基于 WCSODS 的小麦旱涝灾损区域化监测与精细化评估[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(5): 1062-1068.
- [16] 岳延滨, 朱艳, 曹宏鑫. 基于几何参数模型和 OpenGL 的油菜角果可视化研究[J]. 江苏农业科学, 2011(1): 438-440.
- [17] 岳延滨, 朱艳, 曹宏鑫. 基于几何参数模型和 OpenGL 的油菜花朵可视化研究[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(2): 264-270.
- [18] 张文宇, 张伟欣, 葛道阔, 等. 基于生物量的油菜叶曲线模型[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(6): 1259-1266.
- [19] 曹宏鑫, 杨太明, 蒋跃林, 等. 花期渍害胁迫下冬油菜生长及产量模拟研究[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(1): 137-145.
- [20] 张伟欣, 曹宏鑫, 朱艳, 等. 基于生物量的油菜越冬前植株叶片空间形态结构模型[J]. 作物学报, 2015, 41(2): 318-328.
- [21] JANSSEN P H M, HEUBERGER P S C. Calibration of process-oriented models[J]. Ecological Modeling, 1995, 83: 55-66.
- [22] 苏本营, 宋艳霞, 陈圣宾, 等. 大豆幼苗对套作玉米遮荫环境的光合生理生态响应[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3298-3308.
- [23] 马玉平, 孙琳丽, 马晓群. 黄淮海地区夏玉米对干旱和涝渍的生理生态反应[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 85-93.
- [24] 谷艳芳, 丁圣彦, 高志英, 等. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1167-1173.
- [25] 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: 21-40.
- [26] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 等. 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS)[J]. 江苏农业学报, 2000, 16(2): 65-72.
- [27] 曹宏鑫, 张春雷, 李光明, 等. 油菜生长发育模拟模型研究[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1530-1536.
- [28] 官春云, 王国槐, 赵均田. 油菜生态特性研究 1. 油菜 (*Brassica napus* L.) 对温度和日长反应的初步研究[J]. 作物学报, 1985, 11(2): 115-120.
- [29] 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.
- [30] 石春林, 冯慧慧, 金之庆, 等. 水稻发育期模型的比较[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(3): 303-308.

(责任编辑:张震林)