

APSIM 模型中胡麻干物质分配与器官生长 模型构建及其精度检验

李 玥¹, 武 凌², 高珍妮¹, 牛俊义³

(1. 甘肃农业大学信息科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学网络信息中心, 甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 胡麻器官生长与干物质分配的准确模拟是预测胡麻产量的关键模型。利用 2012–2013 年定西和榆中试验站胡麻不同播种方式(残膜直播、覆盖新膜播种、揭残膜后直接播种), 种植密度(3×10^6 (D1)、 4.5×10^6 (D2)、 6×10^6 (D3)、 7.5×10^6 (D4)、 9×10^6 (D5)、 1.05×10^7 (D6)、 1.2×10^7 (D7) 粒·hm⁻²)和氮磷水平的试验, 采用关键遗传参数叶片生物量、蒴果生物量、收获指数增长率、最大收获指数、籽粒含油量、碳水化合物含油率、籽粒水分含量等确定各器官物质分配比例, 基于农业生产系统模型(APSIM)构建胡麻干物质分配与器官生长模拟模型, 2014–2015 年试验数据用于模型验证。结果表明, 定西试验区不同肥料、播种方式的地上部总干重模拟结果分别为: *RMSE* 值平均 1.7652 g·plant⁻¹, *R*² 平均 0.8649, 不同播种方式模拟 *RMSE* 值平均 1.8928 g·plant⁻¹, *R*² 平均 0.8453; 不同种植密度、氮磷处理水平的地上部总干重平均 *RMSE* 值分别为 1.5344 g·plant⁻¹、1.9371 g·plant⁻¹, 平均 *R*² 分别为 0.9135、0.8267, 各器官干重茎、叶、果的平均 *RMSE* 值分别为 1.7751、2.6371、1.9785 g·plant⁻¹, *R*² 分别为 0.9344、0.8077、0.9118。检验结果表明, 模型可较好模拟胡麻地上部总干重和地上部各器官干重的变化动态。

关键词: 胡麻; 干物质分配; 器官生长; 农业生产系统模型(APSIM); 生长模拟

中图分类号: S565.9 **文献标志码:** A

Modeling of dry matter distribution and organ growth of flax using APSIM and validation

LI Yue¹, WU Ling², GAO Zhen-Ni¹, NIU Jun-Yi³

(1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Network and Information Center, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

FAbstract: In order to accurately predict yield of flax seed, we simulated the dry matter distribution and organ growth by using experiments data of various sowing methods (with residual film, with new film, and seeding after removing the residual film), planting density (3×10^6 (D1)、 4.5×10^6 (D2)、 6×10^6 (D3)、 7.5×10^6 (D4)、 9×10^6 (D5)、 1.05×10^7 (D6)、 1.2×10^7 (D7) plant·hm⁻²) and nitrogen and phosphorus levels in Dingxi and Yuzhong in 2012–2013 based on APSIM. The distribution proportion of matter of each organ was determined using key cultivar parameters such as leaf biomass, pod biomass, growth rate of harvest index, the maximum harvest index, oil content of seeds, oil content of carbohydrate, and moisture content of seeds. The model was validated using observed value in 2014–2015. The results showed that the average *RMSE* and *R*² value of total dry matter above ground were 1.7652 g per plant and 0.8649, respectively, the average *RMSE* and *R*² value with different sowing methods were 1.8928 and 0.8453, respectively. They were 1.5344 g per plant and 0.9135 for different density, and 1.9371 g per plant and 0.8267 for nitrogen and phosphorus levels, respectively. The *RMSE* values of stem, leaf and pod were 1.7751, 2.6371, 1.9785 g per plant and the *R*² value were 0.9344, 0.8077, and 0.9118, respectively. The valida-

tion showed that the model can properly mimic the dynamic change of total dry weight of flax plant and dry weight of organs above ground.

Keywords: flax; dry matter distribution; organ growth; APSIM; simulation model

农业生产实践中,光合产物运输和分配是决定产量高低和品质好坏的一个重要因素^[1]。在作物生长模拟研究中,植株器官生长与干物质分配的准确模拟是研究作物各器官生长、产量与品质形成模型的基础。然而,由于干物质分配机理较为复杂且研究较少,干物质分配模拟研究的薄弱一直是作物生长模型的重要限制因子之一^[2-3]。

目前,国外关于作物干物质分配的模型研究有:描述性异速生长模型^[2-3]、功能平衡模型^[3-6]、运输-阻力法模型^[3,6-7]、考虑和不考虑优先分配的潜在需求函数法^[3,8]、库源理论^[6,9]等,模型较复杂,机理性强,大多采用分配系数方法进行模拟。Michael、米晓洁等运用源库理论研究水稻生长季氮素对植株各器官干物质分配的影响^[10-11], Petersen 等^[12]采用分配系数法模拟油菜干物质分配, Wolswinkel 等^[13-14]基于作物库强模拟干物质分配, CERES-BARLEY 模型^[15]和春大麦模型 PIXGRO^[16]中均采用各发育阶段相对固定的分配系数方法,通过水肥亏缺因子改变分配系数值来间接反映器官生长和产量形成^[6]。国内不同领域学者对多种作物干物质分配模型做了相应研究。邹薇^[6]建立了高产大麦群体物质分配指数与生理发育时间、每日光合有效辐射累积量及生物学参数之间的关系模型,通过水肥丰缺因子的修订得到实际条件下大麦物质分配指数动态;张亚杰^[3]、王新^[14]、汤亮等^[17]都是通过干物质分配指数与生理发育时间(PDT)的动态关系构建作物干物质分配与产量形成模拟模型;刘铁梅等^[18]采用分配指数法计算干物质在各器官间的分配,从而准确模拟各器官干重的变化动态。根据 APSIM(Agricultural Production System Simulator)^[19]官方网站公布的论文发表信息,2017 年 APSIM 模型的主要研究领域有:非洲西部作物模型改进评价——以高粱模拟模型为例^[20],北埃塞俄比亚未来气候变化下小麦产品的挑战与机遇^[21],灌溉模式下小麦产量、生物量与水分生产率效应评价^[22],巴西南部大豆作物模拟模型及其品质性状研究^[23],雨养小麦国内外产量区域差分析^[24],半干旱地区玉米产量对种植密度、水分及氮供应的响应模拟^[25]等等。国内学者应用 APSIM 模型对作物产量的模拟也做了大量研究:何亮等^[26]研究了不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全

局敏感性分析,戴彤等^[27]对基于 APSIM 模型的气候变化对西南春玉米产量影响作了研究,蒲菲堉^[28]作了基于 APSIM 的内蒙古春小麦产量的时空分布特征及其气候变化的响应研究等。综上所述,国内外学者对作物干物质分配的模型研究以及应用 APSIM 模型对各类作物及产量模拟作了大量研究,但基于 APSIM 模型的胡麻生长与产量模拟模型研究尚鲜见报道。

本课题组自 2008 年以来一直从事胡麻生产的系统研究,在针对不同种植密度及施肥水平对胡麻产量、水分利用效率影响的系统研究基础上,2013 年获批国家自然科学基金项目(31360315)开展了对胡麻生长模型的研究。本研究在胡麻陇亚杂 1 号生育期模拟^[29]和胡麻叶面积指数模型^[30]以及胡麻光合生产模型^[31]的研究基础上,对不同年份、地区设置了不同肥料、播种方式、种植密度和氮磷水平的试验,充分考虑胡麻在不同生长发育阶段的器官生长特征,利用 APSIM 模型构建胡麻干物质分配与器官生长模拟模型,并在不同年份下进行验证,以期为进一步构建胡麻产量形成模型^[32]以及胡麻生长模型 APSIM-Oilseed flax 奠定基础。目前,胡麻生长模型 5 个子模型基本完成构建,希望通过模型整合、胡麻生长模型 APSIM-Oilseed flax 的正常运行为胡麻作物品种选择、播种时间安排以及施肥措施等方面制定有效的管理措施,为应用模型指导胡麻生产及制定生产决策提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验 I:试验于 2012—2015 年在甘肃省定西市西巩驿镇(104°37'12"E, 35°34'48"N)进行。试验区属旱地。试验设肥料单因素随机区组设计:不施肥作对照(CK)、施用油渣分别设 40 kg(Y1)、80 kg(Y2)、60 kg(Y3)三个水平;施用磷酸二铵分别设 6 kg(R1)、12 kg(R2)、18 kg(R3)三个水平;施用复合肥分别设 10 kg(F1)、20 kg(F2)、30 kg(F3)3 个水平,共 10 个处理,3 次重复,品种选用定亚 22 号。

试验 II:试验设播种方式单因素随机区组设计。(T1)残膜直播;(T2)残膜覆至春天,播种前揭残膜,覆盖新膜播种;(T3)残膜覆至春天,播种前揭残膜后直接播种。各小区氮、磷、钾施肥量分别为

112.5 kg · hm⁻²、75 kg · hm⁻²、52.5 kg · hm⁻², 品种选用陇亚 10 号。

试验Ⅲ: 试验设种植密度单因素随机区组设计。种植密度设 7 个处理, 3 次重复: 3×10⁶ (D1)、4.5×10⁶ (D2)、6×10⁶ (D3)、7.5×10⁶ (D4)、9×10⁶ (D5)、1.05×10⁷ (D6)、1.2×10⁷ (D7) 粒 · hm⁻²; 每穴播种子粒数对应种植密度分别为 6、9、12、15、18、21、24 粒。品种选用陇亚 10 号。

试验Ⅳ: 试验于 2012–2015 年在甘肃省兰州市榆中县育种繁殖场 (103°49′15″E ~ 104°34′40″E, 35°34′20″E ~ 36°26′20″E) 进行。试验区属水地。试验设氮、磷二因素随机区组设计。氮设 3 个水平: N0 (0 kg · hm⁻²), N1 (75 kg · hm⁻²), N2 (150 kg · hm⁻²); 磷设 4 个水平: P0 (0 kg · hm⁻²), P1 (75 kg · hm⁻²), P2 (150 kg · hm⁻²)。共 9 个处理, 重复 3 次, 各小区均施钾肥 52.5 kg · hm⁻²。各小区灌溉定额均为 2.7×10³ m³ · hm⁻² (分茎期灌 1.2×10³ m³ · hm⁻²、现蕾期灌 1.5×10³ m³ · hm⁻²)。品种选用陇亚杂 1 号。

定西地区地处黄河中游黄土高原沟壑区, 海拔高度 1 793 m, 年均气温 7℃, 年日照时数 2 500 h, 无霜期 146 d, 年降水量 300 ~ 400 mm, 年均蒸发量 1 524.8 mm。供试土壤为黑垆土。榆中地区地处黄河中游黄土高原沟壑区, 海拔高度 1 793 m, 年均气温 6.7℃, ≥10℃ 积温 2 350℃ · d, 年日照时数 2 563 h, 无霜期 146 d, 年降水量 300 ~ 400 mm, 年均蒸发量 1 341 mm, 年辐射量 1 310 MJ · m⁻²。供试土壤为砂壤土。

1.2 模型输入参数测定

观测项目包括胡麻生育时期, 各生育时期各器官根、茎、叶、果的干物质量、叶面积, 收获时测定产量构成要素及产量, 播种前和收获后分别测定土壤理化性状, 及土壤水分动态。

(1) 物候期: 分别记录苗期、现蕾期、盛花期、子实期和成熟期。

(2) 叶面积和干物质量: 在苗期、现蕾期、盛花期, 子实期和成熟期进行取样和测定。叶面积每小区定株 10 株进行叶面积的连续观测; 生物量每小区随机取样 10 株, 分别测定茎、叶和蒴果的干鲜重量。

(3) 产量: 成熟期按小区进行实产测定。

(4) 气象站点设置在定西市李家堡镇甘肃农业大学旱农试验站, 运行模型所需的气象资料由甘肃省气象局提供, 包括降雨、辐射、地温和气温 (包括平均温、最高温和最低温) 等。

采用 SPSS 22.0 统计分析软件进行数据整理和分析。

1.3 模型检验方法

根据 2014–2015 年试验 I ~ IV 测量数据对模型进行检验, 检验方法使用统计指标^[33–34] 均方根误差 RMSE、决定系数 R² 和平均绝对误差 MAE、模型效率 E, RMSE 和 MAE 越小、R² 和 E 越接近 1, 模型测量值与预测值间误差越小, 拟合效果越好。R² 和 E 用于评价模型的预测能力, RE、RMSE 用于显示模型预测中的误差。

2 结果与分析

2.1 模型构建

胡麻干物质分配与器官生长模型是胡麻生长发育模型 APSIM – Oilseed flax 的子模型之一。APSIM 模型中已建立的作物模块有鹰嘴豆、绿豆、大豆、柱花草、花生、蚕豆、紫花苜蓿、加拿大油菜、小麦等, 本模型 APSIM – Oilseed flax 通过借鉴 APSIM–canola^[35–37] 加拿大油菜模型原理, 结合胡麻生长发育生理生态过程进行构建。APSIM 模型通过嵌入气候模块、土壤模块、作物模块和管理模块, 采用 VB.NET 建模语言动态模拟胡麻物质分配。模型输入参数包括气象、土壤、作物与品种遗传参数等, 输出数据为分配到各器官 (根、顶端–籽粒、蒴果、叶、茎) 的生物量。

利用试验 I ~ IV 2012–2013 年的实测数据构建模型。

2.1.1 模型整合方法 在建立了土壤、气象、品种数据库后, 根据田间试验的数据, 建立可模拟植物生长过程的作物模型, 包括三个文件: 管理文件 (.man)、控制文件 (.con) 和参数文件 (.par), 通过运行控制文件提交给 APSIM 系统。作物模型运行文件是有关播期、灌溉、施肥、收获期等模块的组合。APSIM 功能结构图如图 1 所示。当模型初始参数模拟校正完成以后, 就可以通过编写这三个文件 (控制文件、参数文件或管理文件) 进行任意的模拟。模拟的准确性除了跟给定的初始参数有关以外, 还与用户编写的三个文件有着密切关系。本模型程序算法框图如图 2 所示。

利用 APSIM 中的 “Canola.apsim” 模型开始创建新模型, 将新模型保存为 “APSIM – Oilseed flax.apsim”, 设置模型气象文件起始、结束日期为 “1/1/2012–31/12/2015” 并导入气象数据, 建立本地土壤数据并添加到 toolbox 的 Soils 模块中, 将前述编写的胡麻作物模块添加到工具箱 toolbox, 如图 3 右下角图标所示。同时, 设置模型模拟的初始水分值、初始氮肥, 并按图 3 设置胡麻干物质分配模型的 APSIM

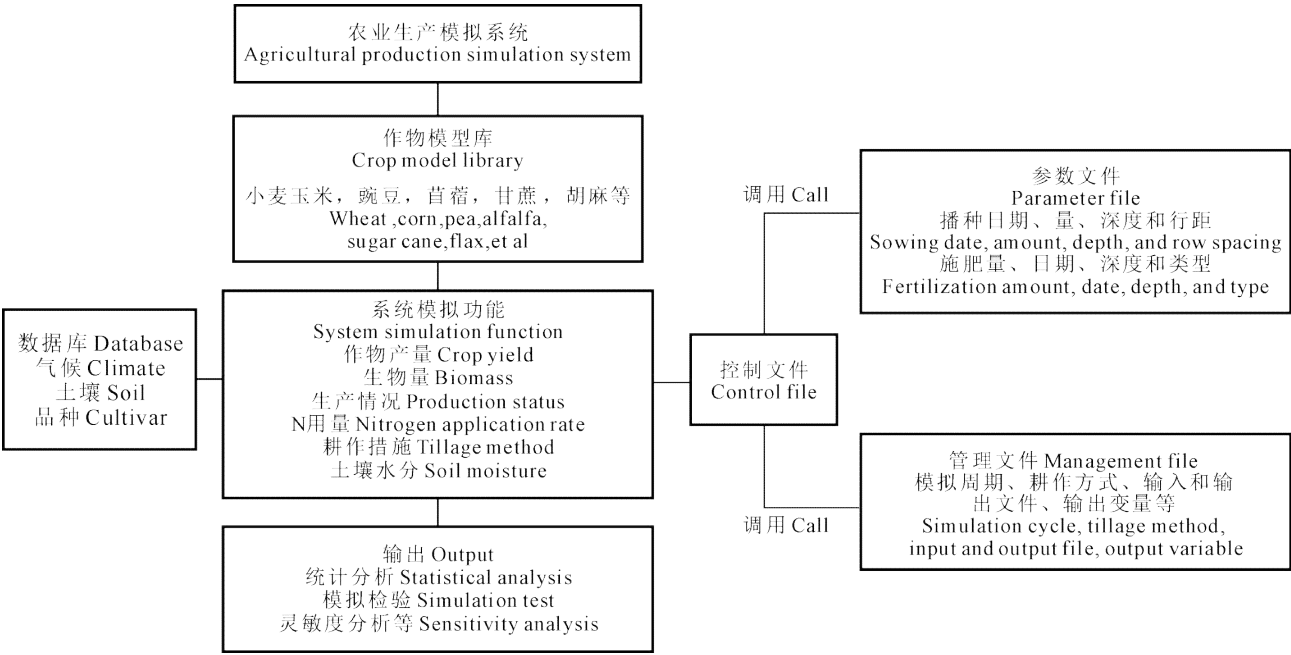


图 1 APSIM 结构功能图

Fig.1 Structure and function of APSIM

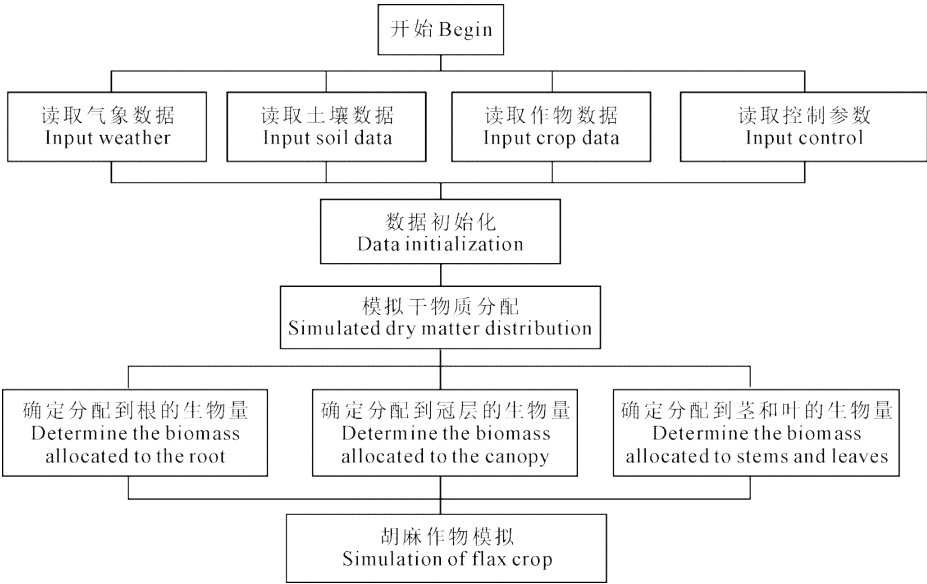


图 2 本模型程序算法框图

Fig.2 Chart of programming and algorithm of the model

运行作物管理模块参数。本模型的输出通过设置输出文件中的输出变量,选择需要输出的变量后运行模型即可得到模拟结果,输出变量设置如图 4 所示。

本研究构建的综合胡麻生长模型可作为一个独立模块插入到 APSIM 平台,进而进行模拟。APSIM–Oilseed flax 模型中胡麻生长的各子模型以及本模型中各器官干物质分配模块之间则通过代码进行衔接。以下代码通过在胡麻物质分配程序模块中包含头文件实现了本模型与胡麻物候期、叶面积及光合生产各子模型的衔接。

```
#include "PhenologyModel.h"
#include "LeafModel.h"
```

```
#include "PhotosynthesisModel.h"
```

以下代码则实现了籽粒分配程序模块与胡麻籽粕、胡麻油分配之间的衔接。

```
#include "OilPart.h"
#include "MealPart.h"
```

2.1.2 模型原理 胡麻作物按器官分为 4 个组成部分:根、顶端、叶、茎,叶仅包含叶片,茎从功能上定义为包含植物茎秆、叶鞘和叶柄,顶端分为籽粒和蒴果,籽粒分为胡麻籽粕和胡麻油。

出苗当天,植物部分的生物量(和氮)被初始化为:根 $0.01\text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$,叶 $0.003\text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$,茎 $0.0016\text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$,蒴果 $0\text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$,胡麻籽粕 $0\text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$,胡麻油 $0\text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$,日生物产量在不同发育

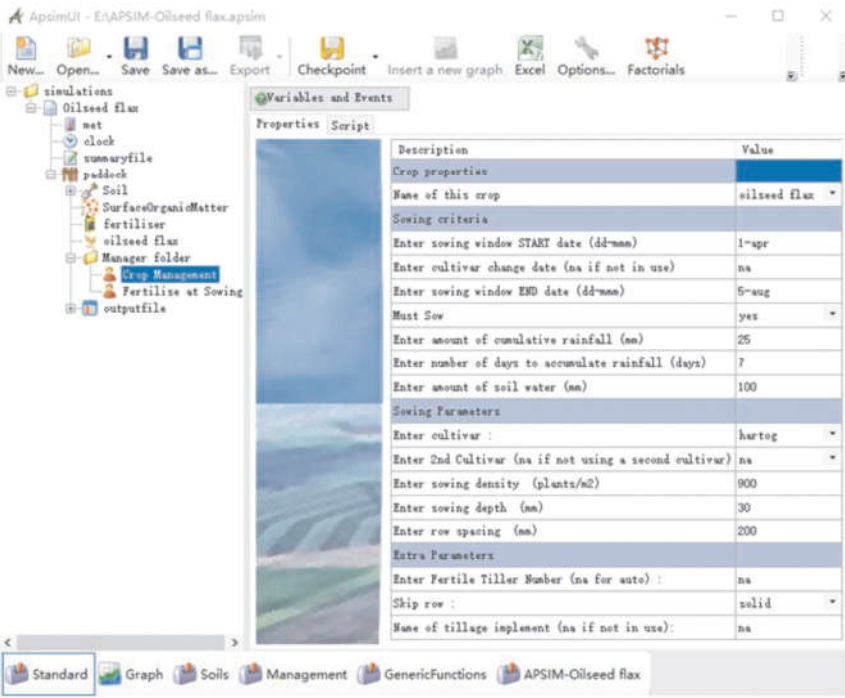


图 3 APSIM-Oilseed flax 作物管理模块参数输入

Fig.3 Inputs of parameters of crop management in APSIM-Oilseed flax

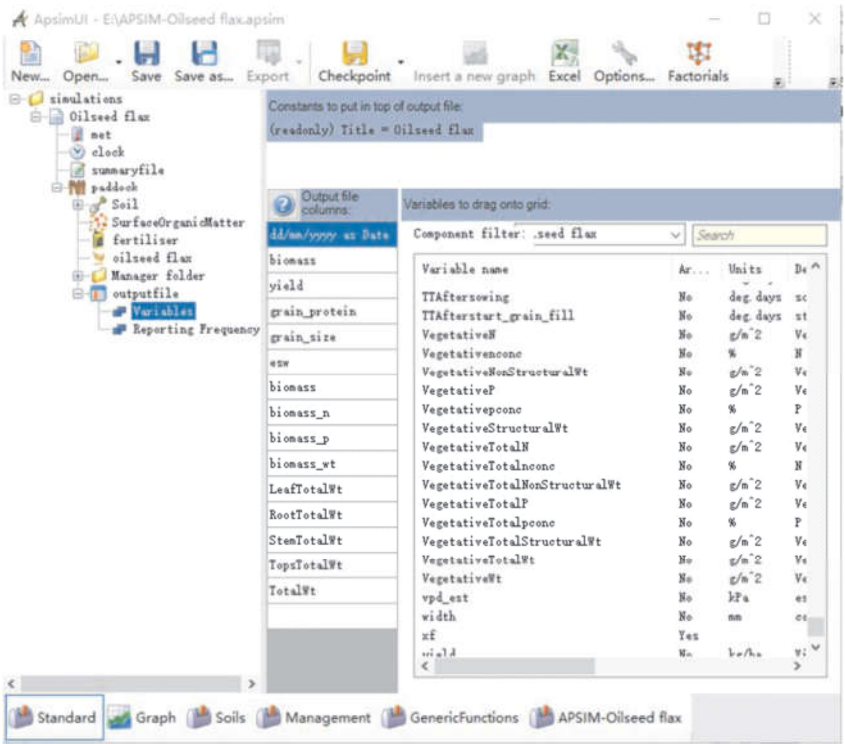


图 4 APSIM-Oilseed flax 作物输出参数设置

Fig.4 Settings of output variables in APSIM-Oilseed flax

阶段按不同比率分配给不同器官。根生物量通过地上部生物量的根冠比计算,地上部生物量按层次分配给不同器官,分配的优先顺序为顶端(基于蒴果与籽粒的需求)、叶(按生育生物量的比例)、最后是茎。再运移发生在灌浆期,当生物累计量不能满足顶端需求,分配给茎和蒴果的生物量将用于满足顶端蒴果和籽粒需求。即如果生物产量受到限制,则所有器官都不能得到生物量的满足。

出苗~开花期间,生物量产量分配给叶片,剩余

的分配给茎。当分配给叶片的同化物总量多于叶面积增长的需求(叶片有最大厚度),则剩余部分分配给茎。同样的,如果分配给叶片的同化物太少而不能使叶面积潜在增长,则叶面积的增长减弱。

开花~开始灌浆期间,采用同样的程序确定叶片生物量,剩余的同化物分配给茎和蒴果,分配比率由参数蒴果生物量确定。

开始灌浆~成熟期间,生物量分配给籽粒、蒴果和茎,籽粒的分配率取决于籽粒需求,蒴果壳占籽

粒需求的一小部分,由参数蒴果生物量确定。如果籽粒的需求量低于供应量,则剩余的生物量分配给叶片(由参数叶片生物量确定)和茎。若灌浆期籽粒吸收需求低,则会引起叶面积的生长。

籽粒需求的碳水化合物(生物量)由品种遗传参数收获指数 HI 日增长率驱动,任意一天分配给籽粒的生物量需求由 HI 计算,即籽粒生物量/顶端生物量。每天收获指数都会按收获指数日增长率增加,直到达到最大值。在油料作物品种中,有一个籽粒干物质合成的能量成本,是籽粒碳水化合物的标准,必须考虑额外的吸收需求,由参数籽粒含油量和碳水化合物含油率指定,利用这些计算用于产生含油量和植物部分累积油量的能量。能量并不包含在植物部分生物量总重量中,而是当计算籽粒对碳水化合物的需求时必须考虑。籽粒湿重通过参数籽粒水分含量计算(可变因素=产量-水分)。株高(mm)是每株植物茎重的函数,随品种的不同而不同。

(1) 分配到根的生物量。日可用生物量的一部分被分配给根系,分配系数取决于生育时期函数,独立于土壤气候因素,分配给根系的生物量是个整体(结构部分),不能再运移到其它部分,见式(1)。

$$\Delta Q_{\text{root}} = \Delta Q \times R_{\text{Root: Shoot}} \quad (1)$$

式中, ΔQ_{root} 是根生物量日增量, $R_{\text{Root: Shoot}}$ 是生物量根冠比,是植株根系与地上部分干重(或鲜重)的比值。

(2) 分配到顶端的生物量(蒴果、胡麻籽粕、胡麻油)。根系分配结束后,剩余可用生物量的全部或部分根据顶端需求分配给顶端(蒴果、胡麻籽粕、胡麻油),蒴果需求量分为籽粒需求和蒴果壳需求量。直接分配给蒴果或籽粒的生物量为结构部分不能再运移,但是再运移提供的生物量将积累成非结构生物量,因而蒴果的非结构生物量可以再运移到籽粒。

$$\Delta Q_{\text{heat}} = \min(\Delta Q, D_{\text{grain}} + D_{\text{pod}}) \quad (2)$$

$$\Delta Q_{\text{grain}} = \frac{D_{\text{g}}}{D_{\text{head}}} \Delta Q_{\text{heat}} \quad (3)$$

$$\Delta Q_{\text{pod}} = \frac{D_{\text{p}}}{D_{\text{head}}} \Delta Q_{\text{heat}} \quad (4)$$

式中, ΔQ_{heat} 为顶端日可用生物量, D_{head} 、 D_{grain} 、 D_{pod} 分别为顶端、籽粒和蒴果需求, ΔQ_{grain} 、 ΔQ_{pod} 分别为籽粒和蒴果生物量增量。

籽粒生物量需求在开花后计算:

$$D_{\text{g}} = N_{\text{g}} R_{\text{p}} h_{\text{g}}(T_{\text{mean}}) f_{\text{N}} \quad (5)$$

式中, N_{g} 是籽粒数目, R_{p} 为潜在灌浆率(开花 ~ 开

始灌浆取 $0.0010 \text{ grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 灌浆期取 $0.0020 \text{ grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), $h_{\text{g}}(T_{\text{mean}})$ 是影响灌浆率(0-1)的日均温函数, f_{N} 为灌浆氮因子:

$$f_{\text{N}} = \frac{h_{\text{N,poten}}}{h_{\text{N,min}}} h_{\text{N,grain}} \sum_{\text{stem,leaf}} \frac{C_{\text{N}} - C_{\text{N,min}}}{C_{\text{N,crit}} \times f_{\text{c,N}} - C_{\text{N,min}}} \quad (0 \leq f_{\text{N,fill}} \leq 1) \quad (6)$$

式中, $h_{\text{N,poten}}$ 是潜在灌浆率,取值 $0.000055 \text{ g} \cdot \text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, $h_{\text{N,min}}$ 为最小灌浆率,取值 $0.000015 \text{ g} \cdot \text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, $h_{\text{N,grain}}$ 籽粒氮亏缺效应乘子,取值 1, C_{N} 是茎秆或叶片部分氮浓度, $C_{\text{N,crit}}$ 、 $C_{\text{N,min}}$ 是茎叶部分临界与最小氮浓度, $f_{\text{c,N}}$ 是 CO_2 因子,取值 1。

最终,籽粒需求受最大籽粒克重(D_{gm})的限制:

$$D_{\text{g}} = \min(D_{\text{g}}, D_{\text{gm}})$$

$$D_{\text{gm}} = N_{\text{g}} S_{\text{gm}} - Q_{\text{meal}} (D_{\text{gm}} \geq 0)$$

式中, N_{g} 是籽粒数; Q_{meal} 是籽粒干重; S_{gm} 为最大籽粒克重,系品种遗传参数,取值 0.04 g 。

蒴果的生物量需求通过籽粒需求或日生物累积量计算:

$$D_{\text{p}} = \begin{cases} D_{\text{g}} h_{\text{p}}(S) & D_{\text{g}} > 0 \\ \Delta Q h_{\text{p}}(S) & D_{\text{g}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $h_{\text{p}}(S)$ 是生育时期函数,也是蒴果壳需求 D_{p} 占籽粒需求 D_{g} 或日生物累积量 ΔQ 的比例。

(3) 分配到叶片的生物量。顶端生物量分配结束后,基于阶段性功能将剩余生物量分配给叶片,如式(8)。

$$\Delta Q_{\text{leaf}} = (\Delta Q - Q_{\text{head}}) \times F_{\text{leaf}} \quad (8)$$

式中, ΔQ_{leaf} 为叶片生物量日增量, F_{leaf} 为可用生物量分配到叶片的分配指数,即某日叶片地上部干重/植株地上部总干重。

(4) 分配到茎的生物量。直到灌浆期,65% 的生物量分配给结构生物量,35% 分配给非结构生物量,即,非结构生物量都分配给了茎秆。

$$\Delta Q_{\text{stem}} = \Delta Q - \Delta Q_{\text{head}} - \Delta Q_{\text{leaf}} \quad (9)$$

$$\Delta Q_{\text{stem,STRU}} = \Delta Q_{\text{stem}} \times h_{\text{STRU}} \quad (10)$$

$$\Delta Q_{\text{stem,UNSTRU}} = \Delta Q_{\text{stem}} \times (1 - h_{\text{STRU}}) \quad (11)$$

式中, ΔQ_{stem} 是茎秆生物量日增量, $\Delta Q_{\text{stem,STRU}}$ 是茎秆的结构生物量, $\Delta Q_{\text{stem,UNSTRU}}$ 是茎秆的非结构生物量, h_{STRU} 是结构生物量分配到茎秆的分配指数,其值依赖于发育阶段,灌浆期前取值 0.65,灌浆后取值 0。

(5) 生物量运移。如果籽粒对碳水化合物的需求不能满足日生物量生产分配需求,则会从植物其它部分转移来满足籽粒需求,APSIM 作物模块允许不超过叶片重量的叶片转移量、茎重的茎转移量和出现在灌浆开始蒴果壳重量的蒴果转移量的生物

量运移。

2.2 参数校正

位于北半球的研究区与位于南半球的澳洲大陆相比,地理位置、环境基质、气候格局、土壤特征均有显著差异,所以模型在进行模拟前,需要进行大量试验和科学的方法对模型参数进行校准和反复调整。模型至少需要两年的试验数据^[33]。研究中利用 2012–2013 年的大田试验数据对模型进行参数校准,以使实测值与模拟值间的差值尽可能小。运用本地化的 APSIM 模型参数模拟胡麻生长,并以 2014–2015 年的大田试验对该模型进行验证。校准的胡麻栽培品种参数包括根冠比、盛花前期分配给叶片干物质、成熟期分配给蒴果生物量、籽粒填充期收获指数增加速率、最大收获指数等。参数校正过程:首先调查收集研究区作物性状介绍与试验资料,作为估计作物品种资料遗传参数的基本依据;其次,输入 APSIM 输入数据(气象、土壤、作物等参数),通过调整表 1 参数使得 APSIM 的模拟结果与实际测量的生物量、产量等输出参数基本相等。由于实际测量中,APSIM 的 39 个输入数据无法全部获取,而且由于获取方法等的限制使得模型输入存在一定误差,所以调参是一个反复繁杂的过程,并不能满足实测值与模拟值完全相等,只能尽量缩小差值。为了减少调参过程的复杂性,采用基于神经网络的投影寻踪自回归 BPPPAR (projection pursuit auto-regression based on error back propagation) 模型^[34],用 RAGA (real coded accelerating genetic algorithm) 优化投影指标函数^[34],通过计算机编程实现该 BPPPAR 模型,进行遗传特性品种参数调整(表 1)。

2.3 模型检验

2.3.1 地上部总干重 利用 2014–2015 年试验 I ~ IV 的测定数据对模型进行检验。采用 *RMSE* 对模拟值和测定值之间的拟合度进行统计分析,采用决定系数 *R*² 反映模拟值与实际值的相关程度。采用本模

型对试验 I ~ II 不同肥料、不同播种方式的地上部总干重进行了模拟,模拟值与测定值 1 : 1 直方图如图 5 所示。可以看出,模型模拟结果与实测值拟合较好,模型对不同肥料、不同播种方式处理的模拟较准确,不同肥料模拟的 *RMSE* 值介于 0.0251 ~ 2.2465,平均 1.7652 g · plant⁻¹, *R*² 介于 0.6251 ~ 0.9973,平均 0.8649,不同播种方式模拟的 *RMSE* 值介于 0.0640~2.3367,平均 1.8928 g · plant⁻¹, *R*² 介于 0.5934~0.9897,平均 0.8453;0.6509<*MAE*<1.9790 g · plant⁻¹,0.6800<*E*<0.9102。

采用本模型对试验 III ~ IV 不同种植密度、不同氮磷处理水平的地上部总干重进行模拟,其平均 *RMSE* 值分别为 1.5344、1.9371 g · plant⁻¹,平均 *R*² 分别为 0.9135、0.8267,0.7592<*MAE*<2.1721 g · plant⁻¹,0.7158<*E*<0.9328。表明本模型可较好模拟胡麻地上部总干重的变化动态。

2.3.2 地上部各器官干重 进一步利用本模型对试验 I ~ II 不同肥料、不同播种方式的地上部各器官干重进行了模拟,各器官干重模拟结果见图 6,模拟值与测定值 1 : 1 直方图如图 7 所示。可以看出,模型模拟结果与实测值拟合较好,模型对不同肥料、

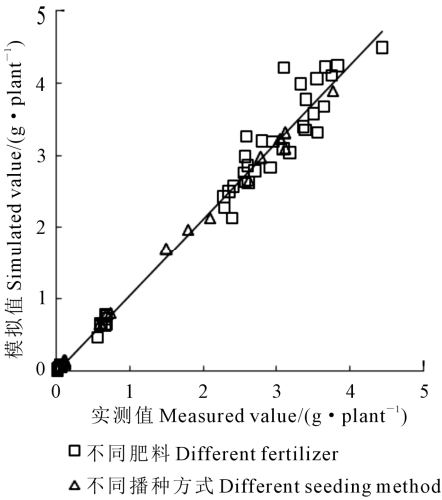


图 5 不同肥料不同播种方式胡麻地上部总干重模拟值与实测值 1 : 1 直方图
Fig.5 Comparison of measured and simulated total dry matter above ground with various sowing methods and fertilizers

表 1 胡麻干物质分配与器官生长模型参数

Table 1 Model parameters of flax dry matter distribution and organ growth

试验区 Experiment site	根冠比(随生育时期变化) Root : Shoot ratio (specified for each growth stage)	盛花前期分配给叶片生物量 Leaf biomass before flowering/%	成熟期分配给蒴果生物量 Pod biomass at maturity/%	收获指数增加速率 Increase rate of harvest index per day	最大收获指数 Maximum harvest index	籽粒含油率 Oil content of grain/%	碳水化合物含油率 Oil content of carbohydh rate/%	籽粒水分含量 Water content of seeds/%	成熟期株高 Stem height at maturity/mm
定西 Dingxi	0.05~0.3	0.35	0.75	0.014	0.5	41	9.8	5.3	740
榆中 Yuzhong	0.05~0.3	0.35	0.75	0.014	0.5	42	9.8	5.3	600

不同播种方式处理的模拟较准确,不同肥料模拟的 $RMSE$ 值介于 $0.0377 \sim 1.9947$, 平均 $1.3381 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$, R^2 介于 $0.6547 \sim 0.9923$, 平均 0.8872 , 不同播种方式模拟的 $RMSE$ 值介于 $0.0436 \sim 2.1754$, 平均 $1.5743 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$, R^2 介于 $0.6239 \sim 0.9954$, 平均 0.8428 ; $0.5906 < MAE < 2.0917 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$, $0.7495 < E < 0.9536$ 。

采用本模型对试验Ⅲ~Ⅳ不同种植密度、不同氮磷处理水平的地上部各器官干重进行模拟,茎、叶、果的平均 $RMSE$ 值分别为 1.7751 、 2.6371 、 1.9785 g

$\cdot \text{plant}^{-1}$, R^2 分别为 0.9344 、 0.8077 、 0.9118 , $0.4745 < MAE < 1.8813 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$, $0.7917 < E < 0.8955$, 表明本模型可较好模拟胡麻地上部各器官干重的变化动态。

3 讨 论

作物一生中所积累的同化物质(生物学产量),如何有效地转化为收获的产品(经济学产量),除受同化器官数量(主要指叶面积)以及净光合产物积累效率影响外,在很大程度上决定于同化物向经济

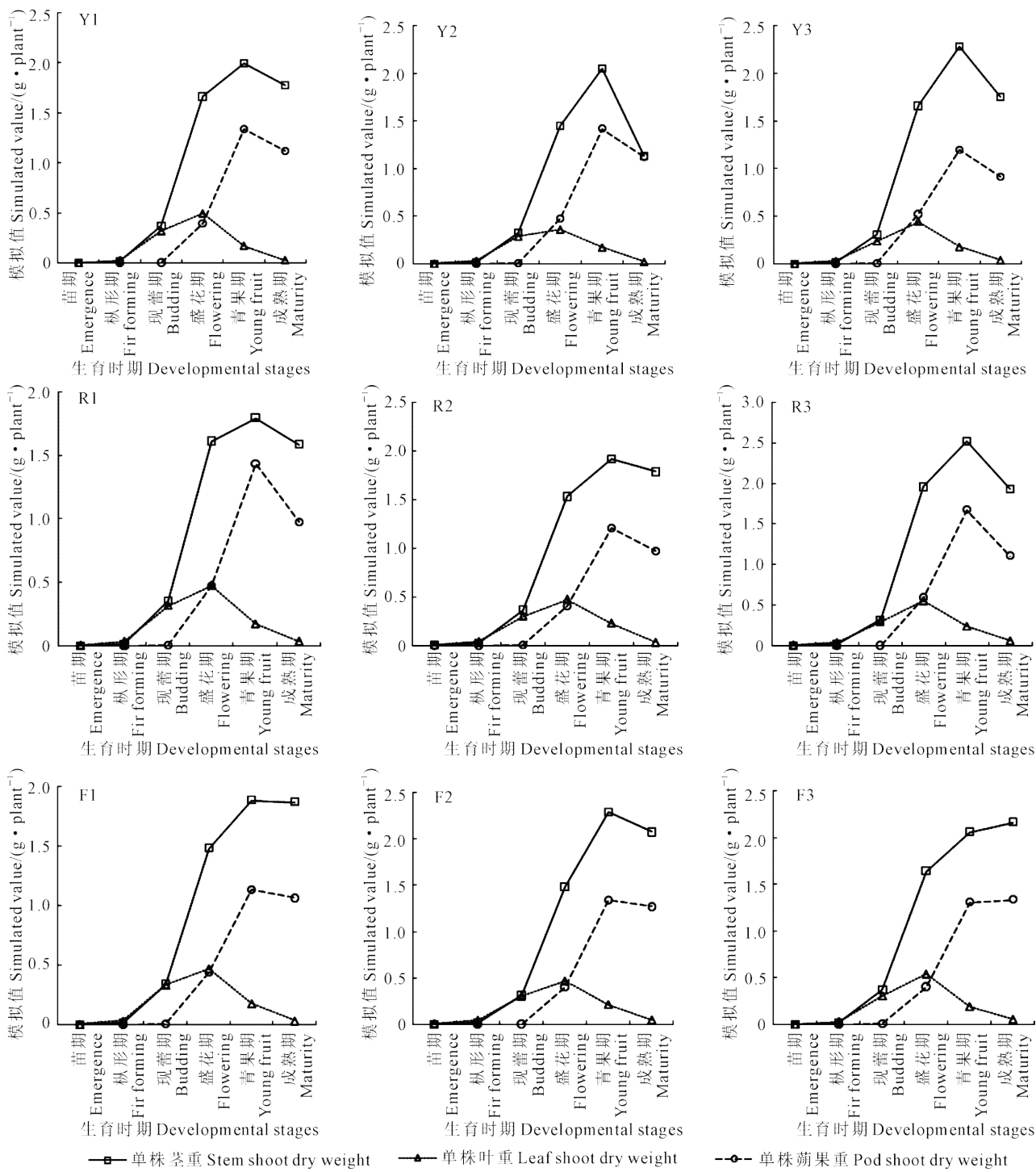


图 6 不同肥料胡麻地上部各器官干重模拟结果

Fig.6 Simulated results of organ weight above ground with various fertilizers

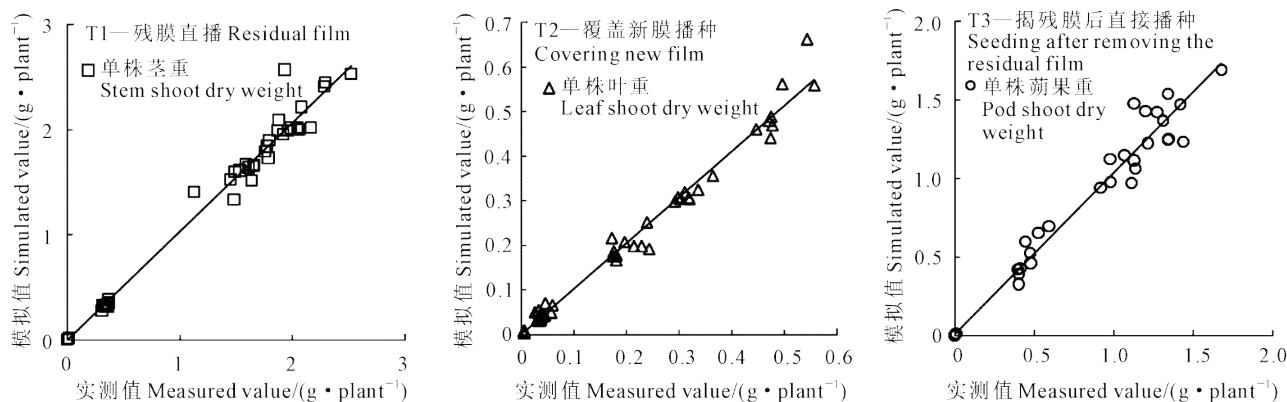


图 7 不同播种方式胡麻地上部各器官干重模拟值与实测值 1:1 直方图

Fig.7 Comparison between simulated and measured organ dryweights with different sowing methods

器官运输与分配的速率和数量。同化物运输分配既受内在因素所控制,也受外界因素所调节^[1]。

(1)影响因素之一是温度,本模型采用影响灌浆率的日均温函数 $h_g(T_{\text{mean}})$,能够较客观地反映温度影响,是本模型优点之一。最适温度在 22~25℃ 之间,高于或低于此温度都会降低运输速度,低温抑制运输(低温降低呼吸速率,提供的能量少;低温增加筛管汁液的黏度影响汁液流动速度),高温阻碍运输(叶片呼吸过高,消耗养分过多,可供运输的物质减少;高温时筛管内很快形成胼胝质,堵塞筛孔),温度除了影响运输的快慢,也影响运输的方向:有机物向温度较高的方向运输较多一点,昼夜温差对有机物的运输分配有显著影响;夜温较高,昼夜温差小,有机物向子粒分配降低;昼夜温差大,有利于果实、种子有机物的累积。(2)影响因素之二为矿质元素,本模型通过灌浆氮因子 f_N 、籽粒氮亏缺效应乘子 $h_{N,\text{grain}}$ 、 C_N (茎秆或叶片部分氮浓度)、 $C_{N,\text{crit}}$ 和 $C_{N,\text{min}}$ (临界与最小氮浓度)来表述,较好地模拟了氮素影响,也是本模型的另一个优点。氮素对同化物运输的影响有两个方面,一是在其它元素平衡时,单一增施氮素会抑制同化物的外运,二是缺氮也会使叶片运出的同化物减少。增施氮素会抑制同化物的外运,特别是抑制同化物向生殖器官和贮藏器官的运输;此外,供氮使枝条和根的生长加强,它们也成为光合产物的积极需求者,而使生殖器官和贮藏器官不能得到应有的光合产物。但是,由于资料来源的限制,本文对胡麻物质分配模型的构建和检验缺少对以下因素的考虑,许多试验表明,磷(P)、钾(K)、硼(B)这些元素都对有机物的运输分配有影响,还有光、水分等也会造成同化物在各器官中的分配发生变化,这些因素都会影响模型的模拟精

度,这部分研究也将是今后进一步探索的内容。

4 结 论

本研究参考 APSIM 对油菜^[35-37]的模拟研究,综合胡麻生长自身特点及充分考虑影响干物质分配的内部因素和外部因素,建立了基于生理生态过程的胡麻器官生长与干物质分配模拟模型,为胡麻产量与品质形成模型奠定基础。本研究对胡麻器官生长与干物质分配的模拟充分考虑胡麻不同生长发育阶段器官生长特征,通过关键遗传参数叶片生物量、蒴果生物量、收获指数增长率、最大收获指数、籽粒含油量、碳水化合物含油率、籽粒水分含量等确定各器官物质分配比例,利用 APSIM 已有的研究基础构建胡麻干物质分配与器官生长模拟模型。检验结果表明,模型具有较好的模拟效果和较强的适用性。所以,本模型的准确模拟可为胡麻的产量与品质形成提供准确参数。

参 考 文 献:

- [1] 李合生.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2012:87.
- [2] Marcelis L F M. Simulation of biomass allocation in greenhouse crops: A review [J]. Acta Horticulturae, 1996,328:49-67.
- [3] 张亚杰.直播油菜生长模拟模型的研究[D].武汉:华中农业大学,2013.
- [4] Hunt H, Morgan J, Read J. Simulating growth and root-shoot partitioning in prairie grasses under elevated atmospheric CO₂ and water stress[J]. Annals of Botany, 1998,81(4):489-501
- [5] Levin S, Mooney H, Field C. The dependence of plant root: Shoot ratios on internal nitrogen concentration [J]. Ann Bot, 1989,64(1):71-75.
- [6] 邹薇.基于过程的大麦生长发育模拟模型[D].南京:南京农业大学,2009.
- [7] Thornley J. Respiration, growth and maintenance in plants[J]. Nature, 1970,227(5255):304-305.

- [8] Marcelis L F M. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber[J]. *Annals of Botany*, 1994, 74(1): 43-52.
- [9] Heuvelink E. Effect of fruit load on drymatter Partitioning in tomato. *Seientia Hortieulturae*, 1997, 69: 51-59.
- [10] Michael D. Modelling concepts for the phenotypic plasticity of dry matte rand nitrogen partitioning in rice[J]. *Agricultural Systems*, 1996, 52(213): 383-397.
- [11] 米晓洁. 氮素对日光温室独本菊‘神马’干物质与分配影响的模拟研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [12] Petersen C, Jorgensen U, Svendsen H, et al. Parameter assessment for simulation of biomass production and nitrogen uptake in winter rape[J]. *Eur J Agron*, 1995, 4(1): 77-89
- [13] Wolswinkel P. Phloem unloading and turgor-sensitive transport: Factors involved in sink control of assimilate partitioning[J]. *Physiological Plantarum*, 1985, 65(3): 331-339.
- [14] 王新, 马富裕, 刁明, 等. 加工番茄地上部干物质分配与产量预测模拟模型[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 171-179.
- [15] Travasso M I, Magrin G O. Utility of CERES-Barley under Argentine conditions[J]. *Field Crops Research*, 1998, 57: 329-333.
- [16] Adiku S G K, Reichstein M, Lohila A, et al. PIXGRO: A model for simulating the ecosystem CO₂ exchange and growth of spring barley[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190: 260-276.
- [17] 汤亮, 朱艳, 鞠昌华, 等. 油菜地上部干物质分配与产量形成模拟模型[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 526-530.
- [18] 刘铁梅. 小麦光合生产与物质分配的模拟模型[D]. 南京: 南京农业大学, 2000.
- [19] APSIM has been developed by the Agricultural Production Systems Research Unit (APSRU). *Agricultural Production System Simulator* [EB/OL]. [2017-9-16] <http://www.apsim.info>.
- [20] Akinseye F M, Adam M, Agele S O, et al. Assessing crop model improvements through comparison of sorghum simulation models: A case study of West African varieties[J]. *Field Crop Research*. 2017, 201: 19-31.
- [21] Araya A, Kisekka I, Girma A, et al. The challenges and opportunities for wheat production under future climate in Northern Ethiopia[J]. *Journal Agricultural Science*. 2017, 155, 379-393.
- [22] Araya A, Kisekka I, Prasad P V V, et al. Assessing wheat Yield, Biomass, and Water Productivity Responses to Growth stage based irrigation water allocation[J]. *Transactions of the ASABE*. 2017, 60: 107-121.
- [23] Battisti R, Sentelhas P C, Boote K J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil[J]. *Field Crop. Research*. 2017, 200: 28-37.
- [24] Gobbett D L, Hochman Z, Horan H, et al. Yield gap analysis of rainfed wheat demonstrates local to global relevance[J]. *Journal Agricultural Science*. 2017, 155: 282-299.
- [25] Magaia E, Famba S, Wesstrom I, et al. Modelling maize yield response to plant density and water and nitrogen supply in a semi-arid region[J]. *Field Crop Research*. 2017, 205: 170-181.
- [26] 何亮, 赵刚, 于强, 等. 不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 148-157.
- [27] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. 基于 APSIM 模型的气候变化对西南春玉米产量影响研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 155-165.
- [28] 蒲菲培. 基于 APSIM 的内蒙古春小麦产量的时空分布特征及其对气候变化的响应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [29] 李玥, 牛俊义, 吴兵, 等. 基于 APSIM 的胡麻陇亚杂 1 号的生育时期模拟模型[J]. *核农学报*, 2015, 29(5): 0972-0979.
- [30] 李玥, 牛俊义, 谢亚萍, 等. 基于 APSIM 的油用亚麻叶面积指数模型构建[J]. *中国油料作物学报*, 2015, 37(3): 329-335.
- [31] 李玥, 武凌, 高珍妮, 等. 胡麻光合生产与干物质积累模拟模型[J]. *草业学报*, 2018, 27(3): 57-66.
- [32] 李玥, 吴兵, 刘栋, 等. 胡麻产量形成模拟模型研究[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9): 1246-1253.
- [33] 李玥, 牛俊义, 郭丽琢, 等. AquaCrop 模型在西北胡麻生物量及产量模拟中的应用和验证[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(1): 93-103.
- [34] 付强. 数据处理方法及其农业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [35] Robertson M J, Holland J F, Kirkegaard J A, et al. Simulating growth and development of canola in Australia[C]//10th International Rapeseed Congress, Canberra, Australia: ACT, 1999, 26-29.
- [36] Farré M J, Robertson G H, Walton, et al. Simulating response of canola to sowing date in Western Australia[C]//10th Australian Agronomy Conference, Hobart, Tasmania, 2000.
- [37] Robertson M J, Holland J, Cawley S, et al. Phenology of canola cultivars in the northern region and implications for frost risk[C]//10th Australian Agronomy Conference, Hobart, Tasmania, 2001.