

滴灌冬小麦地上部干物质积累与分配模型

比拉力·艾力 孙婷 王冀川* 张迪 张建芳 石元强

(塔里木大学 植物科学学院,新疆 阿拉尔 843300)

摘要 为构建新疆维吾尔自治区南疆滴灌冬小麦地上部干物质积累规律及其分配模型,通过分析氮素调控的小区试验数据,采用统计模型技术建立基于相对生长度日(RDDT)的冬小麦群体和个体地上部相对干物质积累(RDMA)动态和基于分配指数的各器官物质分配动态的模拟模型,运用水分调控试验数据对模型进行检验。结果表明:滴灌冬小麦返青后干物质积累(DMA)呈典型的“S”型曲线变化趋势,增加水和氮供应量明显促进群体和个体干物质积累量,且灌水效应大于施氮效应,说明在塔里木盆地西北边缘的极端干旱地区保证水分供应的基础上适当增施氮肥是促进小麦生长的关键。各处理DMA的变异系数群体为3.45%~5.19%,个体为2.03%~3.91%,表明群体效应大于个体效应。筛选并构建基于归一化的返青后以RDDT为变量的滴灌冬小麦群、个体RDMA预测模型(MMF): $GRDMA_i = (0.0012 + 1.0032RDDT^{4.1936}) / (0.0129 + RDDT^{4.1936})$ 和 $SRDMA_i = (0.0012 + 1.0113RDDT^{4.6911}) / (0.0189 + RDDT^{4.6911})$,模拟准确度在0.9884~1.0274;以及地上部各器官干物质的分配指数模型,模拟准确度为0.9775~1.0354,表明基于RDDT和分配指数的冬小麦群、个体干物质积累和分配模型具有较好的预测性和实用性。

关键词 滴灌; 冬小麦; 干物质积累; 分配指数; 模型

中图分类号 S512.1

文章编号 1007-4333(2019)12-0033-11

文献标志码 A

Study on the accumulation and distribution model of winter wheat above ground dry matter under drip irrigation

Bilali Aili, SUN Ting, WANG Jichuan*, ZHANG Di, ZHANG Jianfang, SHI Yuanqiang

(College of Plant Science, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract The aim of this study was to study the law of aboveground dry matter accumulation and its distribution model of drip irrigation winter wheat in Southern Xinjiang Uighur Autonomous Region. Simulation models of relative dry matter accumulation (RDMA) in winter wheat population and individual aboveground parts based on relative growth degree day (RDDT) and distribution dynamics of organs based on distribution index were established by using statistical model technology based on the experimental data of nitrogen regulation in plots. The model was tested by the experimental data of water regulation. The result showed that: After reviving, the dry matter accumulation (DMA) of winter wheat under drip irrigation showed a typical “S” curve trend. Increasing water and nitrogen supply obviously promoted dry matter accumulation of populations and individuals, and the irrigation effect was greater than nitrogen application effect indicating that proper nitrogen application on the basis of ensuring water supply in extreme arid areas in the Northwest margin of Tarim Basin was the key to promote wheat growth. The variation coefficients of each treatment were 3.45% – 5.19% in populations and 2.03% – 3.91% in individuals, indicating that the population effect was greater than the individual effect. The effect of irrigation water treatment on group and individual DMA was greater than that of nitrogen

收稿日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260303);塔里木大学校长基金项目(TDZKGG201702);少数民族聚居团场科技特派员科技帮扶三年行动专项(2013AA002);国家大学生创新创业训练计划项目(201610757001);塔里木大学大学生创新创业训练计划项目(2017059)

第一作者: 比拉力·艾力,硕士研究生,E-mail:1030319445@qq.com

通讯作者: 王冀川,教授,主要从事作物生理与模型技术研究,E-mail:wjcwzy@126.com

application, which indicated that ensuring water supply was the first priority in extreme arid areas. Based on the normalized RDDT, the prediction model (MMF) for winter wheat group and individual RDMA after reviving under drip irrigation; $GRDMA_i = (0.0012 + 1.0032RDDT^{4.1936}) / (0.0129 + RDDT^{4.1936})$ and $SRDMA_i = (0.0012 + 1.0113RDDT^{4.6911}) / (0.0189 + RDDT^{4.6911})$, and distribution index model of dry matter in various organs of the above-ground part were established, whose simulation accuracy being 0.9885 - 1.02704 and 0.9775 - 1.0354, respectively. These results showed that the model of dry matter accumulation and distribution in winter wheat populations and individuals based on RDDT and distribution index had good predictability and practicability.

Keywords drip irrigation; winter wheat; dry matter accumulation; partitioning index; model

小麦是新疆主要的粮食作物, 种植面积在 112 万 hm^2 以上, 是我国第八大麦区, 单产和总产全国排名第六^[1]。由于研究基础比较薄弱, 严重制约了新疆小麦光热资源的高效利用和产量潜力的发挥, 研究干旱区小麦物质生产与分配的动态规律、揭示高产高效生产机制, 定量化描述生产过程, 是当前大力发展滴灌水肥一体化、智能管理决策信息化实现的基本要求, 也是提升新疆小麦生产水平的根本保障。

干物质积累与分配直接影响作物产量和经济效益, 是作物生长模拟研究重要的部分之一。对作物群体干物质积累可用基于辐射利用效率的光合作用数值模型^[2-4]来描述, 但辐射利用率参数受环境因子的影响较大, 难以确保模型的可靠性和预测性, 而通过建立生长过程与物质积累间的数学模型具有参数简单易得的优点, 成为目前描述作物干物质积累的主要模型; 针对作物干物质分配的模拟主要有基于“源库”调节理论的模型^[5]、基于功能平衡理论的模型^[6]和基于分配系数或分配指数的模型^[7]等, 其中, 基于分配指数的模型假定作物不同器官的生长速率或相对生长速率之间的比例是定值或者是作物生育阶段的函数^[8], 因此模型参数容易获取, 实用性较强。目前, 人们对作物干物质积累的研究较多, 并建立了以 Logistic 方程为主的作物干物质积累模型^[9], 但数值模型各参数受品种、生态条件、农艺措施等的影响较大, 难以实现应用的普适性, 若建立归一化的作物生长的时间和生长量的预测模型, 则能兼顾预测的准确性及普适性^[10], 这种方法已在许多作物上^[11-15]的研究中得到应用, 但针对南疆特定干旱区滴灌冬小麦上的研究鲜有报道。

本研究以‘邯鄯 5316’为材料, 开展田间小区试验, 设置不同灌水定额及不同施氮量处理, 观测不同群体小麦干物质积累特征, 采用数学模型技术, 建立基于归一化法的干物质积累与分配普适性模型, 旨在为研制综合性滴灌小麦生长模拟系统奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 田间试验

试验于 2015—2017 年在塔里木大学农学实验站网室中进行, 该试验点位于塔里木盆地西北边缘, $40^{\circ}33'N$, $81^{\circ}16'E$, 海拔 1 012.2 m, 年平均气温 $11.2^{\circ}C$, 年均降水量 45.7 mm, 年均蒸发量 1 988.4 mm, 年均相对湿度在 55% 以下, 属典型暖温带内陆型极端干旱气候。试验地土质为沙壤土, 0~40 cm 土层土壤体积质量为 $1.32 g/cm^3$, 地下水位 8.0 m 左右。试验选用‘邯鄯 5316’, 按 15 cm 等行距播种, 滴灌小区每 4 行在第 2~3 行铺设 1 条滴灌带, 1 管 4 行模式, 种植密度为 533 万株/ hm^2 。全期滴水 7 次, 起身后滴灌头水, 以后每隔 7~10 d 滴水 1 次, 蜡熟初期滴灌最后一水; 小区面积 30.03 m^2 , 各重复 3 次。试验田在播前统一施基肥重过磷酸钙 300 kg/hm^2 , 硫酸钾 75 kg/hm^2 , 其他田间管理同大田。

试验 I: 2015-10-01 播种, 设置不同灌水量试验, 在 2015-11-10 统一冬灌 900 m^3/hm^2 的基础上, 次年起身期以后设置 3 个滴水量水平: 1 800 m^3/hm^2 (W_1)、3 000 m^3/hm^2 (W_2) 和 5 400 m^3/hm^2 (W_3), 按照 0.16 : 0.16 : 0.17 : 0.17 : 0.17 : 0.17 : 0.17 的比例在拔节初期、拔节中期、孕穗期、扬花期、籽粒形成期、灌浆期和蜡熟期滴灌(表 1)。

试验 II: 2016-10-05 播种, 设置 4 个施氮定额: 无氮 N_0 (0 kg/hm^2)、少氮 N_1 (138 kg/hm^2)、中氮 N_2 (207 m^3/hm^2)、高氮 N_3 (276 m^3/hm^2), 各处理施氮 4 次, 将施氮量换算成尿素按 0.4 : 0.2 : 0.3 : 0.1 的比例在拔节初期、拔节中期、扬花期、籽粒形成期用文丘里施肥器施入(表 1)。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 干物质积累(DMA)

出苗后每隔 7~10 d 定点观察株高、叶片数, 取 0.55 m 双行内的总茎数(A), 并随机取完整植株

表 1 各处理不同时期滴水量($\text{m}^2/\text{区}$)与滴施尿素量($\text{kg}/\text{区}$)分配表
Table 1 Distribution table of dropping water quantity (m^2/plot) and urea quantity (kg/plot) in different periods of treatments

试验 Test	处理 Treatment	拔节初期 Early jointing stage	拔节中期 Middle stage of jointing	孕穗期 Booting stage	扬花期 Flowering stage	籽粒形成期 Grain formation stage	灌浆期 Full filling stage	定额 Quota
I	W ₁	0.86	0.86	0.92	0.92	0.92	0.92	5.41
	W ₂	1.44	1.44	1.53	1.53	1.53	1.53	9.01
	W ₃	2.59	2.59	2.76	2.76	2.76	2.76	16.22
II	N ₀	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	N ₁	0.36	0.18	0.00	0.27	0.09	0.00	0.90
	N ₂	0.54	0.27	0.00	0.41	0.14	0.00	1.35
	N ₃	0.72	0.36	0.00	0.54	0.18	0.00	1.80

5 株, 观察植株性状后分器官称鲜质量, 然后放入 105 °C 烘箱中杀青 15 min, 80 °C 烘 48 h 至恒温后称干质量(B)。群体干物质积累(DMA), kg/hm^2 , 按照 $[(10\ 000\ \text{m}^2 \times A)/(0.55\ \text{m} \times 0.15\ \text{m} \times 2)]/1\ 000 \times (B/5)$ 计算。

1.2.2 数据归一化处理与动态模型

模型主要以小麦返青以后的数据进行模拟, 建立返青后天数(D)的表观 DMA 动态模型, 以归一化生长度日(DDT, 完成某一生育阶段所经历的累积有效积温值, 小麦发育的基点温度为 0 °C)和归一化干物质建立相对 DMA 动态模型。应用 2016—2017 年氮素试验数据, 计算各时期 DMA 占出苗-成熟期间最大干物质积累量(DMA_{max})的比值得到相对 DMA(RDMA), 计算各时期生长度日占出苗-成熟积累的总 DDT 的比值得到相对 DDT(RDDT_i), 用 Curve Expert 1.40 软件对数据(D 与 DMA、RDDT 与 RDMA)进行拟合得到干物质积累动态模型, 并进行比较。

1.2.3 分配指数模型

对各处理不同地上部器官干质量数据进行分析, 建立 D 与各器官干质量(DMA_i)的动态模型, 以某时期器官干质量占同一时期地上部总干质量的比值定义为分配指数(R_i)^[16], 建立 RDDT 与 R_i 的动态模型。

1.3 模型检验

以 2015—2016 年的水分试验数据对模型进行检验。采用回归估计标准误差(RMSE)和相对

误差(RE)对模拟值和观测值的符合度进行统计分析^[17]。RMSE 和 RE 值越小, 说明模拟值与观测值的一致性越好, 即模型的模拟结果越准确、可靠。同时, 对模拟值(y)和观测值(x)进行比较, 得到线性方程 $y=kx$, 系数 k 与 1 的接近程度表明了模拟结果的准确度, 用 t 测验对该线性方程与 1:1 直线的决定系数 R² 进行相关显著性检验^[18]。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{OBS}_i - \text{SIM}_i)^2 / n} \quad (1)$$

$$\text{RE} = (\text{RMSE} / \overline{\text{OBS}_i}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: OBS_i 为实际观测达到某个生育时期的天数, SIM_i 为相应的模拟值, n 为样本容量, $\overline{\text{OBS}_i}$ 为实际观测值的平均值。

2 结果与分析

2.1 干物质积累与分配指数模型构建

2.1.1 不同氮素处理下滴灌小麦干物质积累(DMA)动态

由图 1 可知, 冬小麦地上 DMA 动态随生育进程呈“S”型曲线变化, 表现出“慢-快-慢”的积累动态, 各处理曲线的变化趋势基本一致。随施氮量增加, 单株干物质积累(SDMA)和群体干物质积累(GDMA)均增加。不同氮素处理对群、个体影响程度不同, 对从群、个体 DMA 变化的变异系数(CV)上看, 个体 CV 的变化幅度为 2.03%, < 群体的 3.45%。

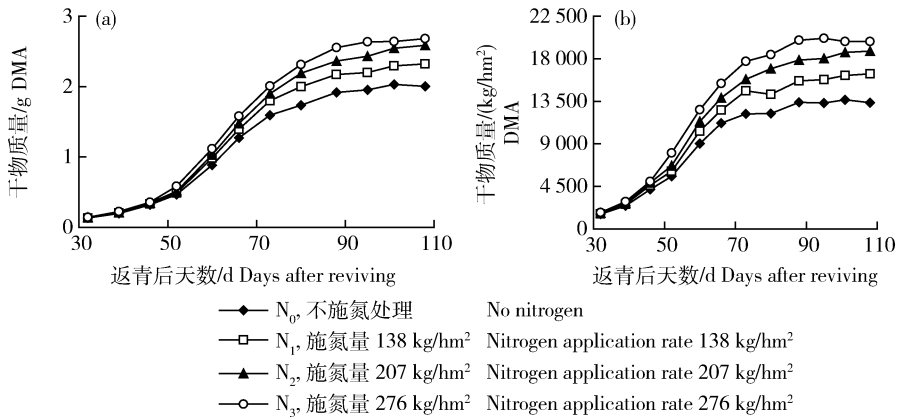


图2同。The same in Fig. 2.

图1 不同施氮量处理滴灌冬小麦单株(a)和群体(b)地上部干物质积累动态

Fig. 1 Aboveground DMA dynamics of winter wheat single plant (a) and population (b) in different nitrogen application treatments

2.1.2 冬小麦干物质积累归一化模型构建

冬小麦 DMA 动态与栽培因素(水肥、密度和播期等)和气候有关,其群、个体 DMA 变化不同,为建立适于南疆滴灌冬小麦 DMA 普适性动态预测模型,可以将返青后生长期日归一化,转换成相对生长度日(RDDT);将群、个体 DMA 归一化,转换成相对 DMA,分别以 GRDMA 和 SRDMA 表示,则可以消除气候、栽培因素等的 DMA 差异,所建立的归一化模型可以更好地模拟小麦群体的干物质积累动态(图 2)。

利用 Curve Expert 1.40 软件对 $RDDT_i$ 与 $RDMA_i$ 之间关系进行模拟,得到决定系数 $R^2 > 0.98$ 的拟合方程见表 2 和表 3。

可见,MMF (morgan-mercer-flodin) 方程拟合效果最好,即为群、个体 RDMA 动态预测模型:

$$GRDMA_i = \frac{0.0945 \times 0.0129 + 1.0032 RDDT^{4.1936}}{0.0129 + RDDT^{4.1936}}, R^2 = 0.9958$$

$$SRDMA_i = \frac{0.0646 \times 0.0189 + 1.0113 RDDT^{4.6911}}{0.0189 + RDDT^{4.6911}}, R^2 = 0.9982$$

式中:群、个体的初始相对干物质积累量(返青期)为 0.0945 和 0.0646,相对最大干物质积累量为 1.0032 和 1.0113。

2.1.3 各器官干物质分配指数模型

地上部分各器官的分配指数为各器官干物质质量占地上部总干物质的比例。对试验 II 资料分析,滴灌冬小麦各器官干物质分配指数与 RDDT 的关

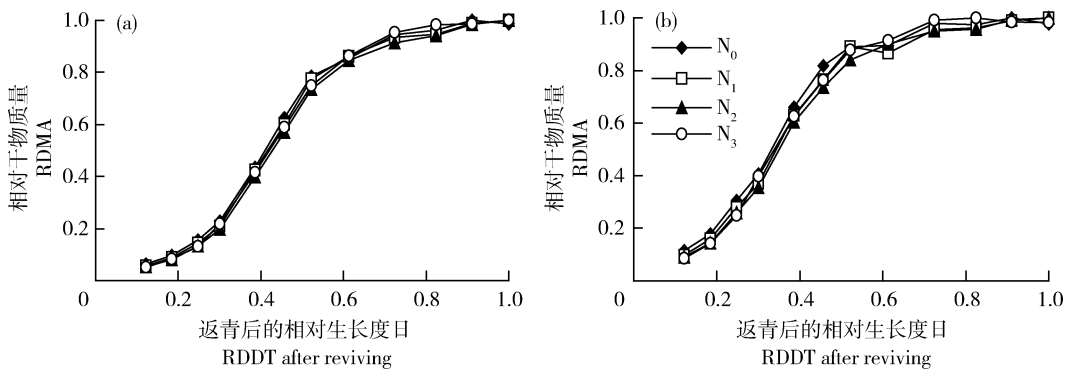


图2 冬小麦地上部单株(a)和群体(b)相对干物质积累(RDMA)动态

Fig. 2 RDMA dynamics in the upper part of winter wheat single plant (a) and population (b)

表 2 不同氮素处理小麦 SRDMA 模拟方程参数

Table 2 Simulation equation parameters of SRDMA of winter wheat single plant in different N treatments

名称 Name	方程 Equation	参数 Parameter				标准差 SR	决定系数 R ²
		a	b	c	d		
MMF 模型 MMF model	$y=(ab+cx^d)/(b+x^d)$	0.064 6	0.018 9	1.011 3	4.691 1	0.015 8	0.998 2**
Logistic 模型 Logistic model	$y=a/(1+be^{-cx})$	0.984 5	77.078 8	10.451 5		0.017 8	0.997 8**
Richards 模型 Richards model	$y=a/(1+e^{b-cx})^{1/d}$	0.985 4	4.219 5	10.287 3	0.960 5	0.010 8	0.997 8**
有理函数 Rational function	$y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$	-0.111 5	0.934 4	-1.701 8	1.561 6	0.040 2	0.989 0**
正弦拟合 Sine fitting	$y=a+b\cos(cx+d)$	0.480 9	0.539 3	3.564 1	3.240 9	0.045 4	0.985 7**
多项式拟合 Polynomial fitting	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	-0.102 2	0.540 5	3.257 1	-2.743 3	0.050 3	0.982 5**

注：模型中 x 为 RDDT_{*t*}, y 为 SRDMA_{*t*}。 ** 表示在 0.01 水平下显著,下同。

Note: In the model, x and y denote RDDT_{*t*} and SRDMA_{*t*}, respectively. ** Significant at 0.01 level. The same below.

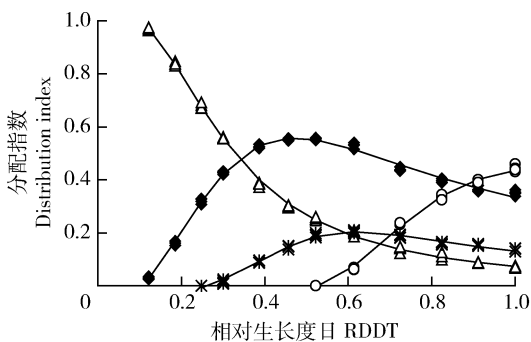
表 3 不同氮素处理小麦 GRDMA 模拟方程参数

Table 3 Simulation equation parameters of GRDMA of winter wheat population in different N treatments

名称 Name	方程 Equation	参数 Parameter				标准差 SR	决定系数 R ²
		a	b	c	d		
MMF 模型 MMF model	$y=(ab+cx^d)/(b+x^d)$	0.094 5	0.012 9	1.003 2	4.193 6	0.022 7	0.995 8**
Logistic 模型 Logistic model	$y=a/(1+be^{-cx})$	0.981 4	37.219 3	10.733 2		0.023 6	0.995 2**
Richards 模型 Richards model	$y=a/(1+e^{b-cx})^{1/d}$	0.982 5	3.413 8	10.452 8	0.926 6	0.023 8	0.995 2**
有理函数 Rational function	$y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$	-0.150 4	1.603 7	-1.265 0	1.783 4	0.039 8	0.986 8**
正弦拟合 Sine fitting	$y=a+b\cos(cx+d)$	-0.204 7	1.223 8	1.933 1	-1.601 1	0.048 8	0.980 3**

注：模型中 x 为 RDDT_{*t*}, y 为 GRDMA_{*t*}。

Note: In the model, x and y denote RDDT_{*t*} and GRDMA_{*t*}, respectively.



△ 实测叶片分配指数 Measured leaf distribution index
 ◆ 实测茎分配指数 Measured stem distribution index
 * 实测颖轴分配指数 Measured glume and cob distribution index
 ○ 实测籽粒分配指数 Measured grain distribution index
 — 拟合分配指数 Fitting distribution index

图 3 地上部各器官干物质分配指数动态

Fig. 3 Dynamics of aboveground dry matter distribution index of various organs

系见图 3,拟合方程见表 4,较密切的相关系数表明其分配指数受氮肥等因素的影响较小。

2.2 模型拟合结果与检验

2.2.1 总干物质的模拟结果

2015—2016 年开展不同滴水量试验,测得地上部总干质量动态见图 4。可见,返青后 52 d 以前,各处理间 DMA 差异不大,此后各处理随灌水量增加,干物质积累差异变大,尤其是 W₁ 处理显著低于其他处理,W₂ 和 W₃ 处理间差异较小。对从群、个体 DMA 变化的 CV 上看,个体 CV 的变化幅度为 3.91%,群体为 5.19%,明显小于群体,即灌水量对群体 DMA 影响要大于个体。

利用试验 I 的观测数据,将 2016 年实测值所对应的生长度日代入已构建的群、个体地上部总干质量模型,得到对应的 RDMA 动态值,再与返青-成熟

表4 不同器官干物质分配指数模型

Table 4 Dry matter distribution index model of different organs

器官 Organ	模型名称 Model name	方程 Equation	方程参数 Equation parameter				标准差 SR	决定系数 R^2
			a	b	c	d		
叶片 Leaf	二次倒数模型 Two reciprocal model	$y=1/(a+bx+cx^2)$	1,028 1	-1,761 1	14,432 1		0.010 3	0.998 9**
茎秆 Stem	有理函数 Rational function	$y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$	-0,167 5	1,532 1	-2,782 9	5,873 3	0.012 0	0.994 4**
颖片+穗轴 Glume+cob	有理函数 Rational function	$y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$	-0,064 8	0,246 7	-3,058 5	3,454 2	0.007 6	0.988 7**
籽粒 Grain	MMF模型 MMF model	$y=(ab+cx^d)/(b+x^d)$	-0,047 8	0,081 0	0,474 7	7,558 7	0.011 4	0.996 0**

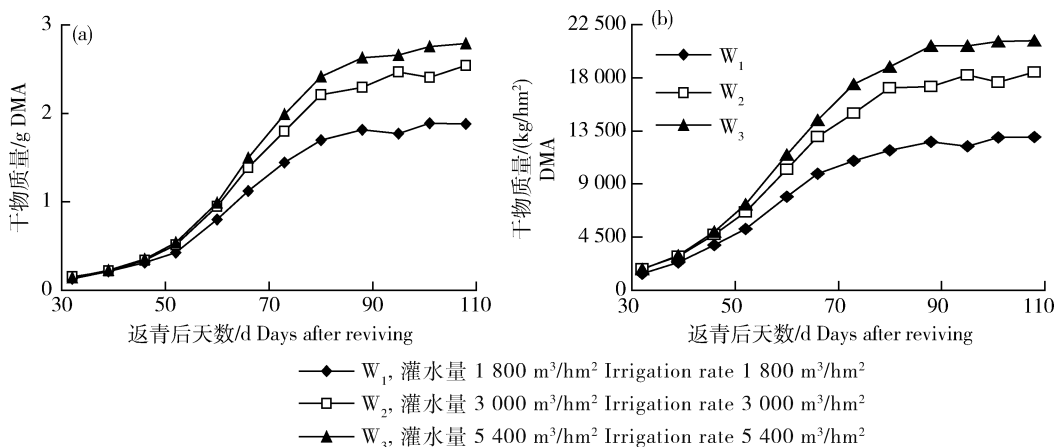


图4 不同滴灌量处理冬小麦地上部单株(a)和群体(b)干物质积累(DMA)动态

Fig. 4 Aboveground DMA dynamics of winter wheat single plant (a) and population (b) in different drip irrigation treatments

期间测得的最大实测值相乘,即可得到2016年群、个体地上部DMA_i的实际拟合值,与实测值比较,结果见图5。可以看出,模拟值与观测值拟合的回归方程为 $y=ax$ 的参数a(模拟准确度^[19]) 在0.9884~1.0274, R^2 (模拟精确度^[19]) 在0.9860~0.9971,均接近1,表明模型的拟合性能较好。

经统计误差分析,不同水分处理群体总干物质积累观察值和模拟值的RMSE为256.40~902.28 kg/hm², RE为2.96%~6.65%,不同水分处理个体总干物质积累观察值和模拟值的RMSE为0.04~0.09 g, RE为3.79%~5.44%,其中群体DMA模拟的RE均小于个体,且随灌水量增加, RMSE和RE增加,说明模型对个体拟合效果高于群体,对较少水量灌溉处理拟合精度大于多水灌溉处理(图5)。

2.2.2 各器官干物质分配指数的模拟结果

表4中建立的各器官分配指数模型,对试验I所观测的不同水分处理下各器官的分配指数进行比较,结果见图6。可见,各器官的DMA分配指数的模拟准确度在0.9775~1.0354,模拟精确度在0.9885~0.9993,均接近1,达极显著水平,表明模型的拟合性能较好。从RE大小上看,叶片<茎<籽粒<颖轴,说明模型对叶片DMA分配指数模拟更精确,而对颖轴模拟的精确度较小,这可能与穗发育更易受到气候、环境条件影响、造成同化物运转速率改变有关^[20]。

2.2.3 地上部分各器官干物质积累的模拟结果

应用表4中模型进行各器官分配指数模拟,其值再与构建的群、个体地上部总干质量模拟模型得到的不同相对生长期日下的总干质量拟合值相乘,

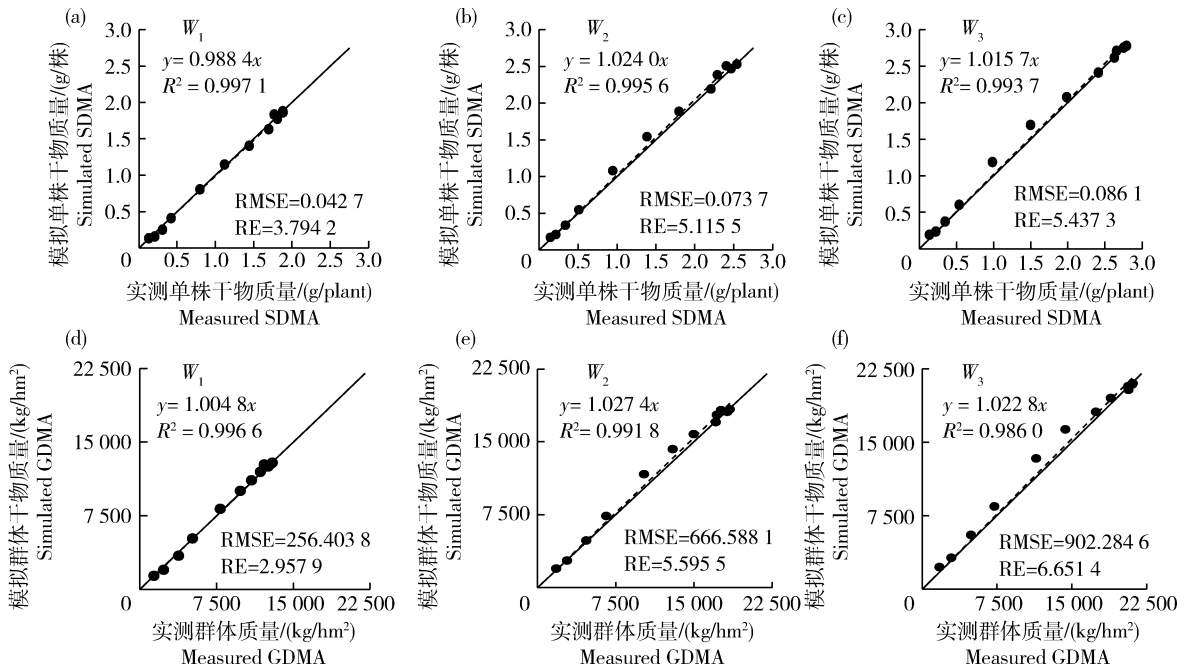


图 5 生育期不同滴水量处理冬小麦地上部干物质积累 (DMA) 模拟值与实测值比较

Fig. 5 Comparison of simulated and measured values of aboveground DMA of winter wheat treated with different irrigation amounts during growth period

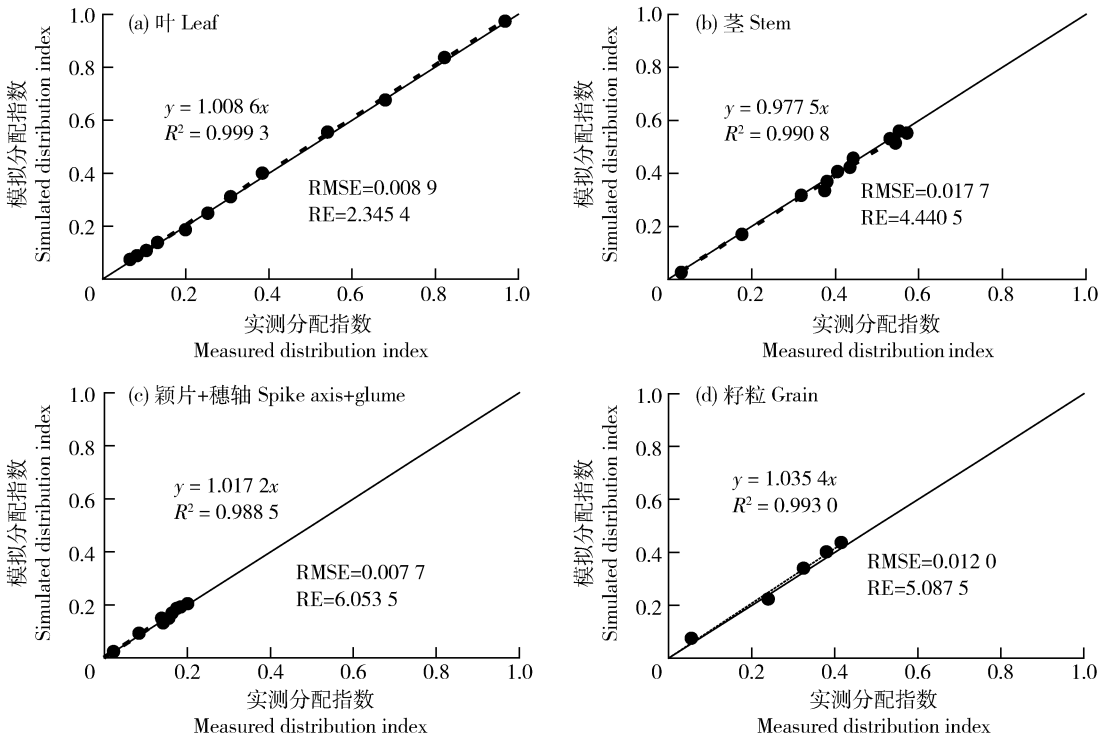


图 6 冬小麦各器官分配指数模拟值与实测值比较

Fig. 6 Comparison of the simulated and measured value of organ distribution indices in winter wheat

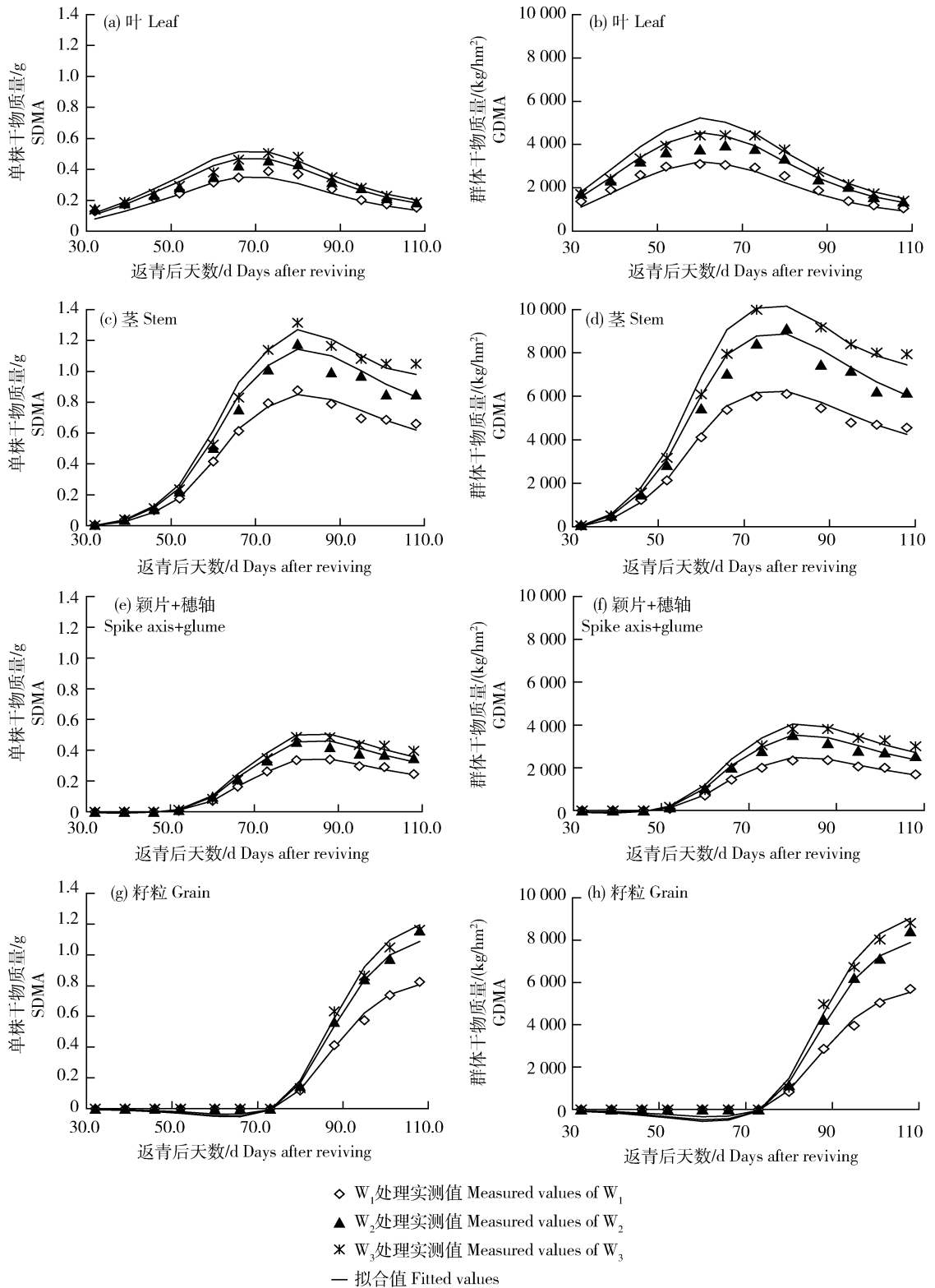


图7 各器官单株和群体干物质积累模拟值与实测值比较

Fig. 7 Comparison of simulated and measured value of DMA in individual plant and population of various organs

即得到各器官模拟干质量动态,并与不同水分处理各器官实测值进行比较,见图 7。其中,单株、群体的叶干质量的模拟结果与实测值间的 RMSE 为 0.031 0~0.037 1 g/株和 167.574 8~410.061 4 kg/hm²,预测的平均 RE 为 11.70%和 10.76%,1:1 直线之间的 R² 为 0.942 4~0.994 1 和 0.955 8~0.974 3,显著相关(P<0.01);单株、群体的茎干质量的模拟结果与实测值间的 RMSE 为 0.024 4~0.060 9 g/株和 187.069 7~448.022 1 kg/hm²,预测的平均 RE 为 7.25%和 7.27%,1:1 直线之间的 R² 为 0.982 6~0.994 2 和 0.978 2~0.994 6(P<0.01);单株、群体的颖轴干质量的模拟结果与实测值间的 RMSE 为 0.006 7~0.025 3 g/株和 71.783 1~231.381 9 kg/hm²,预测的平均 RE 为 6.55%和 7.23%,1:1 直线之间的 R² 为 0.982 3~0.997 2 和 0.975 5~0.994 6,显著相关(P<0.01);单株、群体的籽粒干质量的模拟结果与实测值间的 RMSE 为 0.022 1~0.042 7 g/株和 162.240 7~316.509 0 kg/hm²,预测的平均 RE 为 5.71%和 5.81%,1:1 直线之间的 R² 为 0.994 0~0.994 9 和 0.993 8~0.995 8,显著相关(P<0.01);可见,模型对地上部分各器官干质量的预测结果与实测结果符合度较高。

另外,从平均 RE 大小上看,个体略小于群体,随灌水量增加,各器官的 RE 增加,说明模拟 DMA 动态的效果个体高于群体,少水灌溉条件高于多水灌溉条件。

4 讨论

已有研究表明,冬小麦地上部干物质积累动态随生育进程呈逐渐增加的“S”型曲线变化,不同水、氮处理的变化趋势基本一致^[21]。试验表明,随小麦生育期的推进,小麦返青期以前 DMA 速度缓慢,拔节期之后迅速增长,成熟期达到最大,且随灌水量或施氮量增加,群、个体 DMA 均表现增加趋势,说明通过增施水、氮能有效调节群、个体的生产性能。群体较个体受施氮量的调控效应更大,说明群体 DMA 变化对氮素水平的反应更大,这可能与不同施氮量对群体生长指标(总茎数和 LAI 等)具有更大调控效应有关^[22]。另外,氮素处理 DMA 动态的平均 CV 为 2.74%,低于水分处理的 4.55%,说明滴灌小麦 DMA 的水分效应高于氮素效应,表明在南疆干旱区条件下,水分是影响小麦生长的首要因

素,在保证水分供应的基础上,增施氮肥是充分发挥水、氮效益,促进小麦生产性能并实现高产的关键^[23]。

一般认为作物干物质积累符合 Logistic 曲线^[8],且不同年份、不同农艺措施和不同品种等其 Logistic 拟合方程的参数不同。本研究表明,滴灌冬小麦返青后地上部干物质积累更符合 MMF 模型,并采用归一化法,构建了基于归一化生长期日和归一化 DMA 间关系的 RDMA 动态模型,可以消除品种、生态条件和农艺措施等造成的差异,形成具有较好预测功能的基础模型。

本研究建立了基于归一化的返青后 RDDT 为变量的滴灌冬小麦群、个体 RDMA 预测 MMF 方程: $GRDMA_i = (0.0012 + 1.0032RDDT^{4.1936}) / (0.0129 + RDDT^{4.1936})$, R² = 0.9958 和 $SRDMA_i = (0.0012 + 1.0113RDDT^{4.6911}) / (0.0189 + RDDT^{4.6911})$, R² = 0.9982,模拟准确度为 0.9884~1.0274,精确度为 0.9860**~0.9971**,具有较好的模拟效果。在此基础上,构建了地上部各器官干物质的分配指数模型,其群、个体各器官 DMA 的模拟精确度 0.9424**~0.9972**,表现出较好的拟合效果。在实际应用中,仅需测得不同麦田群、个体最大干物质和对应的生长期日(需要收集生育期内平均气温),通过 RDMA 拟合方程,即可还原不同群体 DMA 实际值,再通过分配指数方程,得到各器官 DMA 分配特征。

模型也存在一些不足,表现在对影响因子的效应考虑不够。小麦干物质积累与分配不仅受温度、水肥等因子影响,还受到光照、品种类型、极端逆境(旱、涝、热和盐碱等)等影响,这些因素可能对小麦 DMA 的分配指数、生育进程产生影响,今后应进一步开展各因素效应田间试验,采用析因法和函数法构建非线性条件模型,界定和调整参数,实现真正普适性预测模型构建。

参考文献 References

- [1] 王冀川,杨正华. 新疆小麦栽培研究与技术[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2015:3
Wang J C, Yang Z H. *Research and Technology of Wheat Cultivation in Xinjiang* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015 (in Chinese)
- [2] 郑有飞,万长建,缪启龙,张富存. 气候变化对小麦生产影响的

- 数值模型研究[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(4): 645-651
- Zheng Y F, Wan C J, Miao Q L, Zhang F C. A study on effect of climate change on wheat growth with a numerical model [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1999, 22(4): 645-651 (in Chinese)
- [3] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 戴剑锋, 金亮, 徐国彬, 陈永山, 陈春宏, 卜崇兴, 徐刚. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1629-1635
- Ni J H, Luo W H, Li Y X, Dai J F, Jin L, Xu G B, Chen Y S, Chen C H, Bu C X, Xu G. Simulation of leaf area and dry matter production in greenhouse tomato[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1629-1635 (in Chinese)
- [4] 汤亮, 朱艳, 孙小芳, 曹卫星. 油菜光合作用与干物质积累的动态模拟模型[J]. 作物学报, 2007, 33(2): 189-195
- Tang L, Zhu Y, Sun X F, Cao W X. Dynamic simulation model for photosynthesis and dry matter accumulation in rapeseed [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(2): 189-195 (in Chinese)
- [5] Minchin P E, Thorpe M R, Farrar J F. A simple mechanistic model of phloem transport which explains sink priority[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44: 947-955
- [6] Hunt H W, Morgan J A, Read J J. Simulating growth and root-shoot partitioning in prairie grasses under elevated atmospheric CO₂ and water stress[J]. *Annals of Botany*, 1998, 81: 489-501
- [7] Gabrielle B, Denoroy P, Gosse G, Justes E, Andersen M N. Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape[J]. *Field Crops Research*, 1998, 57: 95-111
- [8] Rosati A, Badeck F W, Dejong T M. Estimating canopy light interception and absorption using leaf mass per unit leaf area in solanum melongena[J]. *Annals of Botany*, 2001, 88(1): 101-109
- [9] 乔嘉, 朱金城, 赵姣, 郑志芳, 王璞, 廖树华. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 32-38
- Qiao J, Zhu J C, Zhao J, Zheng Z F, Wang P, Liao S H. Study on the effect of dry matter accumulation process on maize yield based on Logistic model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(5): 32-38 (in Chinese)
- [10] 张宾, 赵明, 董志强, 李建强, 陈传永, 孙锐. 作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验[J]. 作物学报, 2007, 33(4): 612-619
- Zhang B, Zhao M, Dong Z Q, Li J Q, Chen C Y, Sun R. Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 612-619 (in Chinese)
- [11] 侯玉虹, 陈传永, 郭志强, 侯立白, 董志强, 赵明. 作物高产群体干物质积累动态模型的构建及生长特性分析[J]. 玉米科学, 2008, 16(6): 90-95
- Hou Y H, Chen C Y, Guo Z Q, Hou L B, Dong Z Q, Zhao M. Establishment of dry matter accumulation dynamic simulation model and analysis of growth characteristic for high-yielding population of spring maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 90-95 (in Chinese)
- [12] 李艳大, 汤亮, 陈青春, 张玉屏, 曹卫星, 朱艳. 水稻地上部干物质积累动态的定量模拟[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1504-1510
- Li Y D, Tang L, Chen Q C, Zhang Y P, Cao W X, Zhu Y. Drymatter accumulation in rice above ground part quantitative simulation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6): 1504-1510 (in Chinese)
- [13] 赵中华, 刘德章. 棉花群体干物质生产与分配的数学模型研究[J]. 棉花学报, 1997, 9(1): 42-47
- Zhao Z H, Liu D Z. Study on the mathematical model of cotton population dry matter production and its distribution[J]. *Acta Gossypii Sinica*, 1997, 9(1): 42-47 (in Chinese)
- [14] 张迪, 王冀川, 陈慧, 黄振江, 孙婷. 密度对夏玉米干物质积累的影响及其归一化模拟模型的建立[J]. 玉米科学, 2018, 26(5): 58-64+70
- Zhang D, Wang J C, Chen H, Huang Z J, Sun T. Effect of density on dry matter accumulation of summer maize and establishment of normalized simulation model[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(5): 58-64+70 (in Chinese)
- [15] 沈杰, 蔡艳, 何玉亭, 李启权, 杜宣延, 王昌全, 罗定棋. 基于归一化法的烤烟干物质积累建模与特征分析[J]. 作物学报, 2017, 43(3): 442-453
- Sheng J, Cai Y, He Y T, Li Q Q, Du X Y, Wang C Q, Luo D Q. Dynamic simulation of dry matter accumulation in flue-cured tobacco and analysis of its characteristics based on normalized method[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(3): 442-453 (in Chinese)
- [16] Wang J C, Gao S, Yuan J, Ma F Y. Simulation of dry matter accumulation, partitioning and yield prediction in processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2012, 6(1): 93-100
- [17] Delden A V, Kropff M J, Haverkort A J. Modeling temperature-and radiation-driven leaf area expansion in the contrasting crops potato and wheat[J]. *Field Crops Research*, 2001, 72(2): 119-141
- [18] 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Gai J J. *Statistical Methods for Experiments* [M]. Beijing:

- China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [19] 付雪丽,赵明,周宝元,崔国美,丁在松. 小麦、玉米粒重动态共性特征及其最佳模型的筛选与应用[J]. 作物学报, 2009, 35(2): 309-316
- Fu X L, Zhao M, Zhou B Y, Cui G M, Ding Z S. Optimal model for dynamic characteristics of grain weight commonly used in wheat and maize[J]. *Acta Agronomica sinica*, 2009, 35(2): 309-316 (in Chinese)
- [20] 李玉刚,宫明波,王瑞英,李振清,迟红梅,张继余,盖红梅. 孕穗期低温对冬小麦穗部及籽粒的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(7): 55-59
- Li Y G, Gong M B, Wang R Y, Li Z Q, Chi H M, Zhang J Y, Gai H M. Influences of low temperature at booting stage on spikes and grains of winter wheat[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(7): 55-59 (in Chinese)
- [21] 王玉杰,王永华,韩磊,张秋丽,胡卫丽,郭天财. 不同栽培管理模式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(5): 894-900
- Wang Y J, Wang Y H, Han L, Zhang Q L, Hu W L, Guo T C. Effect of different cultivation and management mode on the characteristics of accumulation and distribution of dry matter and the yield of winter wheat after anthesis[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(5): 894-900 (in Chinese)
- [22] 马巧荣. 种植密度与施氮量对垄沟覆膜栽培冬小麦个一群体关系影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010
- Ma Q R. The effect of planting density & N rate on the relationship of winter wheat individual plant-population under ridge with plastic film and furrow planting system [D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2010 (in Chinese)
- [23] 张松超,陈慧,黄振江,张迪,石元强,王冀川. 水氮耦合对滴灌春小麦干物质积累分配与运转规律的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(19): 38-42
- Zhang S C, Chen H, Huang Z J, Zhang D, Shi Y Q, Wang J C. Effects of water and nitrogen coupling on dry matter accumulation, distribution and transferring regularity of spring wheat under drip irrigation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(19): 38-42 (in Chinese)

责任编辑:吕晓梅