

冬小麦群体参数优化设计方法

赵姣 廖树华 王璞*

(中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193)

摘要 为探讨冬小麦生产中合理群体结构的构建方法,在2009/2011和2012/2013年冬小麦生长季,利用3个田间试验建立不同冬小麦群体,分析冬小麦群体动态变化特征对产量的影响,并提出冬小麦群体参数优化设计的方法。研究表明:产量的形成与干物质最大积累速率、干物质快速增长的延续点及叶面积指数(LAI)动态变化特征参数相关,所建立的关系模型达到极显著水平($P < 0.01$),对模型进一步用独立样本进行配对 t 检验,模拟值与实际值差异不显著($P > 0.05$);冬小麦参数设计中,不同时期的干物质积累、LAI变化和群体生长特征参数的范围以及产量与群体的关系构成约束条件;该方法能定量描述冬小麦群体最优的生长动态过程,且灵活方便。本方法能为作物生产管理中合理群体结构的构建提供理论分析手段。

关键词 冬小麦;群体参数;产量;设计方法

中图分类号 S 512

文章编号 1007-4333(2014)06-0041-08

文献标志码 A

Design method of optimizing winter wheat population character parameters

ZHAO Jiao, LIAO Shu-hua, WANG Pu*

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To study the method of building a reasonable population structure in winter wheat production, field experiments were designed to obtain different wheat populations in winter wheat growing seasons from 2009 to 2011, 2012 to 2013. The relationship between winter wheat yield and population dynamic change characteristics was analyzed, and design method of winter wheat population parameters was established. The grain yield of winter wheat was closely related to characteristic parameters such as dry matter maximum accumulation rate, inflection points in the curve for dry matter accumulation rate in grain filling stage and leaf area index (LAI) character parameters. Paired-sample t -test was used to validate the model established, and no significant difference was observed between the simulated and observed values. In the process of parameter design, the constraint conditions were constituted by the reasonable scope of dry matter accumulation and LAI in different growing periods, parameters range and yield formation model. The method is flexible and can quantitatively describe the dynamic process of population growth. It can provide a theoretical guidance for the population building in production management.

Key words winter wheat; population parameters; yield; design method

干物质积累和叶面积指数(Leaf area index, LAI)是反映作物群体质量的重要指标^[1],建立合理的群体结构是提高作物产量的有效途径。干物质积累及LAI的动态变化过程均能用模型来描述,不同的参数组合代表不同的生长过程,最终影响产量的

高低。如何定量描述产量的形成与群体的动态变化关系,并在此基础上建立群体参数优化的方法,对农业生产上群体设计至关重要。

许多学者对作物生长过程中群体动态变化过程的定量描述开展了广泛研究。Logistic模型^[2]及在

收稿日期:2014-02-26

基金项目:公益性行业科研专项(201203031);国家“973”计划项目(2009CB118602)

第一作者:赵姣,博士研究生,E-mail:zhaojiao277@163.com

通讯作者:王璞,教授,博士生导师,主要从事玉米高产和抗逆的研究,E-mail:wangpu@cau.edu.cn

此基础上的扩充模型均能较好地反映作物干物质的积累过程^[3-5]和 LAI 的动态变化^[6-9],多种模型比较结果表明,Rational 模型能更好地描述 LAI 的动态变化关系^[10-11]。为深入探讨作物产量的形成规律,有必要定量分析作物状态变化对产量的影响,同时设计符合最优产量的参数组合,为实际的农业生产作指导。乔嘉等^[12]以夏玉米为研究对象,分析干物质积累过程对产量的影响,建立单株产量与其 Logistic 模型参数的关系。本课题组的前期研究已建立基于积温的冬小麦干物质积累过程特征参数与产量及产量构成因素的关系^[13]。目前,冬小麦群体动态变化对产量的影响及群体参数的优化设计还未见报道。

本研究在产量与冬小麦干物质积累特征关系的基础上^[13],引入 LAI 变化特征,对模型进行优化,得到群体动态变化特征对冬小麦产量形成的影响模型,通过模型参数优化分析后,设计出形成目标产量的群体参数指标,为群体的优化设计提供理论分析方法。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究通过 3 个田间试验,构建不同生长条件下冬小麦的群体生长过程,为建立产量形成与群体动态变化的关系提供数据支持。

1.1.1 田间试验设计

试验 I 于 2009 年 10 月 11 日—2010 年 6 月 16 日在河北吴桥试验站进行。耕层土壤基础养分为有机质 16.07 g/kg、全氮 1.10 g/kg、速效磷 33.20 mg/kg 和速效钾 142.75 mg/kg。品种为石麦 15,播种行距为 0.2 m,设基本苗、水、氮、磷和钾 5 个试验因素,各因素均设 5 水平,以均匀设计方法^[14-15]为基础,越冬前选用 $U_{10}(5^5)$ 均匀设计表,拔节和开花期用 $U_{10}(5^2)$ 均匀设计表,根据冬小麦生产管理的阶段性,结合田间群体大小,设定动态水肥方案^[16]。按吴桥地区栽培模式,设处理 11 和 12 为 2 个对照,共 12 个处理(表 1),每个处理 3 次重复。

表 1 试验 I 处理组合

Table 1 Treatments designed in experiment I

| 处理 Treatment | 基本苗/($10^4/\text{hm}^2$) Basic seedling number | 施肥量/(kg/hm^2) Fertilizers applied | | | 灌溉/(m^3/hm^2) Irrigation | |
|-----------------|---|---|------------------------|----------------------|--|--------------|
| | | N | P_2O_5 | K_2O | 拔节期 Jointing | 开花期 Anthesis |
| A1 | 150 | 45+60 | 90 | 180 | 360 | 240 |
| A2 | 150 | 135+30 | 180 | 135 | 480 | 120 |
| A3 | 225 | 0+120 | 45 | 90 | 120 | 480 |
| A4 | 225 | 90+30 | 180 | 45 | 0 | 120 |
| A5 | 300 | 180+90 | 45 | 0 | 480 | 360 |
| A6 | 300 | 0+120 | 135 | 180 | 240 | 480 |
| A7 | 375 | 90+0 | 0 | 135 | 240 | 0 |
| A8 | 375 | 180+90 | 135 | 90 | 0 | 360 |
| A9 | 450 | 45+60 | 0 | 45 | 120 | 240 |
| A10 | 450 | 135+0 | 90 | 0 | 360 | 0 |
| A11 | 300 | 83+138 | 83 | 75 | 750 | 750 |
| A12 | 300 | 83+104 | 83 | 113 | 750 | 750 |

注:N 肥的施用量为底肥+拔节肥, P_2O_5 和 K_2O 全部用作底肥。

Note: Nitrogen fertilizers include basal and topdressed fertilizers. Phosphate and potassium fertilizers are all applied as basal fertilizers.

试验 II 于 2010 年 10 月 14 日—2011 年 6 月 15 日在相同地点不同田块进行,土壤耕层含有机质 11.43 g/kg、全氮 1.04 g/kg、速效磷 33.20 mg/kg

和速效钾 128.48 mg/kg。品种为石麦 15,试验 II 设计方法与试验 I 相同,但各因素的设置略有不同。共设 12 个处理(表 2),每个处理 3 次重复。

表 2 试验 II 处理组合

Table 2 Treatments designed in experiment II

| 处理 Treatment | 基本苗/ (plant/m ²) Basic seedling number | 施肥/(kg/hm ²) Fertilization | | | 灌溉/(m ³ /hm ²) Irrigation | | |
|-----------------|---|---|--|-------------------------------|---|---|----------------|
| | | N ^① | P ₂ O ₅ ^② | K ₂ O ^② | 冬前 Pre-wintering | 返青-拔节 ^③ Regreening-jointing | 开花 Anthesis |
| B1 | 300 | 45+60 | 90 | 180 | 450 | 750(03/31) | 600 |
| B2 | 300 | 135+30 | 180 | 135 | 600 | 750(03/19) | 900 |
| B3 | 375 | 0+120 | 45 | 90 | 900 | 750(04/06) | 750 |
| B4 | 375 | 90+30 | 180 | 45 | 300 | 750(03/25) | 450 |
| B5 | 450 | 180+90 | 45 | 0 | 450 | 750(03/13) | 0 |
| B6 | 450 | 0+120 | 135 | 180 | 750 | 750(04/06) | 450 |
| B7 | 525 | 90+0 | 0 | 135 | 900 | 750(03/25) | 900 |
| B8 | 525 | 180+90 | 135 | 90 | 300 | 750(03/13) | 750 |
| B9 | 600 | 45+60 | 0 | 45 | 600 | 750(03/31) | 0 |
| B10 | 600 | 135+0 | 90 | 0 | 750 | 750(03/19) | 600 |
| B11 | 450 | 83+104 | 83 | 113 | 750 | 750(04/06) | 750 |
| B12 | 450 | 83+0 | 83 | 75 | 750 | 750(04/06) | 750 |

注：①底肥+追肥，氮肥的追施时间为返青-拔节期，追肥与灌溉同步。②底肥。③括号内数字表示浇水日期(月/日)。表 3 同。

Note: ①basal plus top-dressing, N is top-dressed together with irrigation at regreening to jointing stage. ②basal fertilizers. ③numbers in brackets represent irrigation dates, m/d. The same as table 3.

试验 III 于 2012 年 10 月 18 日—2013 年 6 月 15 日在相同地点不同田块进行。土壤耕层基础养分分为有机质 8.21 g/kg、全氮 1.30 g/kg、速效磷 26.53

mg/kg 和速效钾 152.60 mg/kg。试验 III 设计方法与试验 I 相同，但各因素的设置略有不同。共设 12 个处理(表 3)，每个处理 3 次重复。

表 3 试验 III 处理组合

Table 3 Treatments designed in experiment III

| 处理 Treatment | 基本苗/(plant/m ²) Basic seedling number | 施肥/(kg/hm ²) Fertilizers applied | | | 灌溉/(m ³ /hm ²) Irrigation | |
|-----------------|---|--|--|-------------------------------|--|-----------------|
| | | N ^① | P ₂ O ₅ ^② | K ₂ O ^② | 返青-拔节期 ^③ Regreening-jointing | 开花期 Anthesis |
| C1 | 300 | 45+120 | 90 | 180 | 750(03/21) | 450 |
| C2 | 300 | 135+60 | 180 | 135 | 750(04/02) | 750 |
| C3 | 375 | 0+30 | 45 | 90 | 750(03/15) | 600 |
| C4 | 375 | 90+30 | 180 | 45 | 750(04/08) | 900 |
| C5 | 450 | 180+120 | 45 | 0 | 750(03/27) | 0 |
| C6 | 450 | 0+0 | 135 | 180 | 750(03/27) | 900 |
| C7 | 525 | 90+90 | 0 | 135 | 750(04/08) | 450 |
| C8 | 525 | 180+90 | 135 | 90 | 750(03/15) | 0 |
| C9 | 600 | 45+60 | 0 | 45 | 750(03/21) | 750 |
| C10 | 600 | 135+0 | 90 | 0 | 750(04/02) | 600 |
| C11 | 600 | 83+104 | 83 | 113 | 750(04/08) | 750 |
| C12 | 600 | 83+0 | 83 | 75 | 750(04/08) | 750 |

1.1.2 调查及测定项目

于越冬前、起身期、拔节期、孕穗期、开花期、花后 10 d、花后 20 d 和成熟期,每小区取一行 0.5 m 长(0.1 m²)的植株,数总株数,从中选取 10 株有代表性的植株,量取叶面积,用长宽系数法计算叶面积,最后得到 LAI。同时,将样段内所有植株剪去根装入纸袋,105 ℃ 杀青 0.5 h,80 ℃ 烘干至恒重,计算单位土地面积上的植株干物重(kg/hm²);于越冬前数 3 行 1 m 长(0.6 m²)的总茎数;于成熟期选取具代表性 4 m² 样方测产,折算产量(含水量 13%)。于小区内选取具代表性的 3 行 1 m 长(0.6 m²)调查穗数,并从中选取 30 株调查穗粒数,每小区测产的样品中取 500 粒籽粒烘干称重,3 次重复,计算得到千粒重(含水量为 13%)。

气象数据来源于试验点所在气象站。

1.2 产量形成与冬小麦群体动态变化特征的关系构建方法

1.2.1 冬小麦群体动态变化特征

由于冬小麦越冬期间地上部分停止生长,其群体动态变化在整个生长阶段是不连续的,因此,将冬小麦群体动态变化特征分为冬前和冬后 2 个阶段来考虑。干物质积累特征冬前用单株干物重和冬前茎描述,冬后用 Logistic 曲线来描述;LAI 特征冬前用单株叶面积来表示,冬后用 Rational 生长曲线来描述。

将不同生育阶段 >0 ℃ 的积温 G_{GDDi} (从播种开始至不同生育时期的积温)进行归一化处理,得到相对积温 $R_{GDDi} = (G_{GDDi}/G_{GDDH})$,其中 G_{GDDH} 为收获时累积的 >0 ℃ 的有效积温(℃)。 R_{GDDi} 的取值为 0~1, $i=1, 2, \dots, 8$, 表示取样时的生长状态点,1 为返青期,2 为起身期,3 为拔节期,4 为孕穗期,5 为开花期,6 为花后 10 d,7 为花后 20 d,8 为成熟期。同理,将 LAI 和播种—成熟的天数分别进行归一化处理,将最大叶面积指数和播种至成熟天数分别定为 1,得到相对 LAI(L_R) (取值 0~1)和相对时间 R_{GD_i} (取值 0~1)。

利用 Curve Expert 1.34 软件对冬后干物质积累与相对积温(R_{GDDi})之间的关系进行拟合,得到最优化的 Logistic 方程 $y = a/(1 + be^{-cx})$,其中 y 为干物质积累量, x 为 R_{GDDi} ,得到方程参数分别为 a 、 b 、 c ,在此基础上得到干物质增长最大速率 $ac/4$ 出现时的相对积温 $x = \ln b/c$,以及干物质积累速率曲线

上的 2 个拐点对应的相对积温值 $x_1 = (\ln b - 1.317)/c$ 与 $x_2 = (\ln b + 1.317)/c$ [17]。同时,将冬后相对 LAI 和相对时间之间的关系进行拟合,得到最优化的 Rational 方程 $y' = (a' + b'x')/(1 + c'x' + d'x'^2)$,其中 y' 为 L_R , x' 为 R_{GD_i} ,获取方程特征参数 a' 、 b' 、 c' 和 d' 。

1.2.2 产量形成与群体动态变化特征模型的构建及检验方法

在干物质积累过程特征参数与产量模型优化的基础上 [13],用 SPSS 17.0 软件分析干物质积累特征参数、LAI 动态变化特征参数与产量之间的关系,建立产量与群体动态变化过程特征的关系模型。并采用配对 t 检验进行模型检验,分析模型模拟值与观测值间的一致性,该一致性越好,模型的模拟结果越准确、可靠。

建模数据来自试验 II 和 III,模型独立样本检验数据来自试验 I。

1.3 冬小麦群体参数优化方法

根据非线性规划理论,其模型一般形式可以表示为:

$$\text{Max } f(x) \quad (1)$$

$$g_j(x) \geq 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$h_k(x) = 0, k = 1, 2, \dots, l \quad (3)$$

式中,(1)为目标函数,(2)和(3)为约束函数。

结合冬小麦生长特点及参数的生物学意义,以产量为目标,群体动态变化特征参数为中间变量,其目标函数为 $\text{Max } Y(a, b, c, a', b', c', d')$ 。在构建设计方法中,约束条件主要有:1)产量与群体动态变化参数的关系约束,冬前茎与基本苗、冬前有效积温的关系,穗数、穗粒数、千粒重与干物质积累特征参数的关系约束,这类约束是等式约束;2)不同生育时期干物质积累量的变化范围约束,由试验中的栽培条件决定,其中 $W_i = a/(1 + be^{-cx_i})$, W 为干物质积累量(t/hm²), x_i 为 R_{GDDi} ;3)不同生育时期 LAI 的变化范围约束,由试验中的栽培条件决定,其中 $L_i = (a' + b'x'_i)/(1 + c'x'_i + d'x'^2_i)$, L 为 L_R , x'_i 为 R_{GD_i} , i 分别代表不同的生长时期;4)参数自身需满足的范围约束。

用 Microsoft Excel 2003 的规划求解进行分析,得出目标函数的最优值,同时也获得群体动态变化参数 a 、 b 、 c 、 a' 、 b' 、 c' 和 d' 等。

2 结果与分析

2.1 产量形成与群体动态变化特征参数关系模型及检验

2.1.1 冬小麦群体动态变化特征参数

冬小麦冬后干物质积累特征参数见文献[13]。对于 LAI 的动态变化特征(表 4)，每个试验及处理的 Rational 曲线拟合的 r 值都大于 0.9，说明 Rational 曲线可用于描述越冬后小麦 LAI 动态变

化过程。不同处理下群体 LAI 变化不同，因而有不同的参数组合。当 $x=1$ 时， $y'=(a'+b')/(1+c'+d')$ ， $(a'+b')/(1+c'+d')$ 即为收获期的冬小麦群体的 LAI，方程只有 1 个峰值，且当 $x \rightarrow \infty$ 时， $y' \rightarrow 0$ 。Rational 方程 $y'=(a'+b'x')/(1+c'x'+d'x'^2)$ 同时可以变为 $y'=[1/(c_1+d_1x')] - [1/(c_2+d_2x')]$ ，前部分代表新生叶面积的累积量，后一部分代表叶面积衰亡的累积量，从这个角度更能解释叶面积的增长规律。

表 4 冬小麦植株 LAI 动态变化的 Rational 方程参数
Table 4 Parameters of rational model on LAI in winter wheat

| 处理 Treatments | 方程参数 Equation parameters | | | | r | 处理 Treatments | 方程参数 Equation parameters | | | | r |
|------------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|------------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|
| | a' | b' | c' | d' | | | a' | b' | c' | d' | |
| B1 | 0.028 | -0.021 | -2.371 | 1.421 | 0.971 | C1 | 0.037 | -0.030 | -2.303 | 1.342 | 0.945 |
| B2 | 0.023 | -0.015 | -2.409 | 1.466 | 0.974 | C2 | 0.039 | -0.032 | -2.325 | 1.367 | 0.948 |
| B3 | 0.055 | -0.052 | -2.301 | 1.338 | 0.979 | C3 | 0.038 | -0.030 | -2.328 | 1.372 | 0.953 |
| B4 | 0.024 | -0.017 | -2.389 | 1.442 | 0.970 | C4 | 0.036 | -0.029 | -2.317 | 1.356 | 0.961 |
| B5 | 0.026 | -0.019 | -2.393 | 1.447 | 0.974 | C5 | 0.052 | -0.048 | -2.270 | 1.303 | 0.964 |
| B6 | 0.041 | -0.035 | -2.354 | 1.402 | 0.968 | C6 | 0.014 | -0.003 | -2.411 | 1.469 | 0.956 |
| B7 | 0.016 | -0.009 | -2.429 | 1.489 | 0.976 | C7 | 0.027 | -0.018 | -2.334 | 1.379 | 0.934 |
| B8 | 0.043 | -0.037 | -2.323 | 1.364 | 0.964 | C8 | 0.035 | -0.023 | -2.358 | 1.411 | 0.931 |
| B9 | 0.039 | -0.035 | -2.366 | 1.413 | 0.985 | C9 | 0.017 | -0.006 | -2.378 | 1.431 | 0.945 |
| B10 | 0.036 | -0.030 | -2.356 | 1.403 | 0.961 | C10 | 0.027 | -0.017 | -2.367 | 1.418 | 0.953 |
| B11 | 0.023 | -0.014 | -2.392 | 1.447 | 0.957 | C11 | 0.021 | -0.012 | -2.385 | 1.437 | 0.966 |
| B12 | 0.034 | -0.027 | -2.383 | 1.436 | 0.969 | C12 | 0.040 | -0.032 | -2.372 | 1.425 | 0.962 |

2.1.2 产量形成与群体动态变化特征的关系模型

将各处理的群体动态变化特征与产量 Y (kg/hm^2) 之间作逐步回归分析，得到模型(4)。

$$Y = 89.936 \times (ac/4) + 14\ 633.895 \times x_2 + 25\ 701.599b' + 1\ 906.812c'd' \quad (r=0.9, s=510.6) \quad (4)$$

将模型变换形式：

$$Y = 89.936 \times (ac/4) + 14\ 633.895 \times (\ln b + 1.317)/c + 25\ 701.599b' + 1\ 906.812c'd' \quad (5)$$

从(4)和(5)式可以看出，石麦 15 产量的形成与群体动态变化参数有一定的相关性，与干物质积累的特征参数 $ac/4$ 、 x_2 ，以及 LAI 特征参数 b' 、 c'

和 d' 关系密切。产量的形成与干物质最大积累速率关系密切，且干物质快速积累的延续点离收获期越近，能为产量的提高提供更多物质基础，有利于产量的提高。另外，在保证物质积累高效的基础上，LAI 动态变化特征是对产量形成过程的优化。

2.1.3 模型检验

首先用建模的数据进行产量模拟值与观测值比较， t 检验显著水平 P 为 0.966，大于 0.05，差异不显著(图 1(a))。其次，用独立样本(试验 I)的数据来验证模型的效果，将模型的模拟值与观测值进行配对 t 检验， t 检验显著水平 P 为 0.142，大于 0.05，差异不显著(图 1(b))。

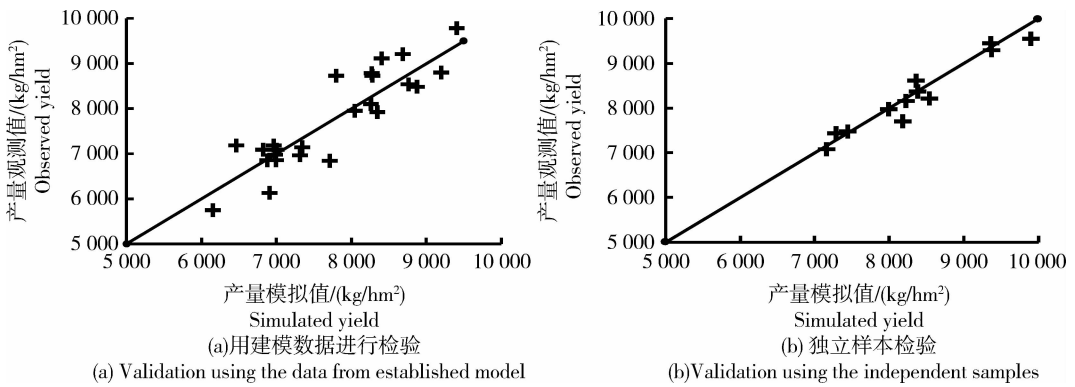


图1 冬小麦产量模拟值与观测值的关系

Fig. 1 Relationship of simulated value and observed value in winter wheat yield

2.2 冬小麦群体参数优化设计过程

以上述构建的产量与群体动态变化特征参数模型及以往的研究为基础,结合冬小麦生长特点及参数的生物学意义,在构建设计方法中,目标函数为 $\text{Max } Y(a, b, c, a', b', c', d')$,约束条件应满足(6)~(20)式。其中,(6)~(10)式为第①类约束;(11)和(12)为第②类约束,干物质是不断增加的过程,且不同生长时期的上下限由试验中的栽培条件决定;(13)~(14)为第③类约束,LAI在孕穗期达最大,返青—孕穗期是不断增加的,孕穗—成熟期是降低的;(15)~(20)为第④类约束。在第④类约束中,对于干物质积累特征参数, a 为干物质积累的最大值;最大积累速率出现的时间在拔节—灌浆后期,因此 $0.3 < \ln b/c < 1$;干物质快速积累的时间段为拔节初期—灌浆后期,因此 $0.3 < x_1 < x_2 < 1$ 。对于冬后LAI动态变化特征,在孕穗期,即 $x \in (0.82, 0.84)$,LAI基本上达到生育期内最大值,即 $(a' + 0.830b')/(1 + 0.830c' + 0.689d') \rightarrow 1$;收获期的LAI尽量小,因此 $(a' + b')/(1 + c' + d') \rightarrow 0$ 。

$$Y = 89.936 \times (ac/4) + 14\,633.895 \times x_2 + 25\,701.599 \times b' + 1\,906.812 \times c'd' \quad (6)$$

$$u_1 = -1\,523.481 + 1.214u_0 + 5.122v_1 \quad (7)$$

$$u_2 = 8.274a + 34.977c +$$

$$0.201u_1(0.000\,120bu_1(0.000\,056(x_2u_1)^2) \quad (8)$$

$$u_3 = 162.683(1.131 \times (ac/4)(0.572 \times (\ln b/c) \times u_2 + 0.005\,532au_2 + 0.000\,943(x_1u_2)^2) \quad (9)$$

$$u_4 = 73.291(2.638c + 1.170(ac/4)$$

$$(288.885AB(1.235(ac/4)B +$$

$$243.041AB^2 + 892.536A^3B(670.937A^3B^2) \quad (10)$$

$$W_i < W_{i+1}, W_{i\text{下限}} \leq W_i \leq W_{i\text{上限}} \quad (11)$$

$$0 < W_2 \leq 2, 2 \leq W_3 \leq 4, 5 \leq W_4 \leq 9, 9 \leq W_5 \leq 12,$$

$$12 \leq W_6 \leq 16, 16 \leq W_7 \leq 19, 19 \leq W_8 \leq 23 \quad (12)$$

$$L_i < L_{i+1}, i=1, 2, 3, 4 \quad L_i > L_{i+1}, i=4, 5, 6, 7, 8$$

$$L_{i\text{下限}} \leq L_i \leq L_{i\text{上限}} \quad (13)$$

$$0 < L_2 \leq 0.3, 0.3 \leq L_3 \leq 0.8, 0.9 \leq L_4 \leq 1,$$

$$0.6 \leq L_5 \leq 0.9, 0.4 \leq L_6 \leq 0.6, 0.2 \leq L_7 \leq 0.4, 0 \leq L_8 \leq 0.1 \quad (14)$$

$$a = W_{\text{max}} \quad (15)$$

$$0.3 < \ln b/c < 1 \quad (16)$$

$$0.3 < x_1 < x_2 < 1 \quad (17)$$

$$0.9 \leq (a' + 0.830b')/(1 + 0.830c' + 0.689d') \leq 1 \quad (19)$$

$$0 \leq (a' + b')/(1 + c' + d') \leq 0.1 \quad (20)$$

式中: Y 为产量(kg/hm^2), u_0 为基本苗($10^4/\text{hm}^2$), u_1 为冬前茎蘖数($10^4/\text{hm}^2$), v_1 为冬前有效积温($^\circ\text{C}$), u_2 为穗数($10^4/\text{hm}^2$), u_3 为穗粒数, u_4 为千粒重(g), $A = (1(x_2))/(1(x_1))$,反映干物质积累速率方程2个拐点比例特征关系, $B = 1\,000[(ac/4)/u_2/u_3][(x_2(x_1))/(1(x_1))]$,反映最大干物质积累速率对籽粒灌浆的影响特征。

在此约束条件下,用Microsoft Excel 2003的规划求解得出目标函数的最优值,同时得到群体动态变化特征参数 a, b, c, a', b', c' 和 d' 等指标(表5),通过参数结果获得产量和产量构成因素及其他群体生长指标(表6和图2)。

表 5 冬小麦群体参数设计结果

Table 5 Design results of population parameters in winter wheat

| 组别 Group | 群体特征参数名称 Name of population character parameter | 特征参数 Character parameter |
|----------------------------------|--|-----------------------------|
| 干物质积累 Dry matter accumulation | a | 23 |
| | b | 76.105 |
| | c | 5.990 |
| 叶面积指数 LAI | a' | 0.041 |
| | b' | -0.037 |
| | c' | -2.333 |
| | d' | 1.374 |

表 6 冬小麦群体生长指标优化设计结果

Table 6 Optimal design results of population growth in winter wheat

| 指标 Index | 结果 Results |
|--|------------|
| 籽粒产量/(kg/hm ²) Grain yield | 9 826 |
| 穗数/(10 ⁴ /hm ²) Spike number | 543 |
| 穗粒数 Grain number per spike | 39 |
| 千粒重/g Thousand-grain weight | 46.5 |
| 基本苗/(10 ⁴ /hm ²) Basic seeding number | 450 |
| 冬前茎/(10 ⁴ /hm ²) Total stem pre-wintering | 1 010 |

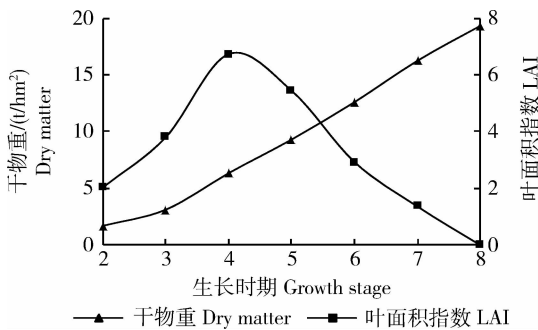


图 2 冬小麦干物质和 LAI 的最优动态变化过程
Fig. 2 Optimal dynamic change processes of the dry matter and LAI in winter wheat

3 讨论

定量分析作物生产过程中群体的动态变化是揭示作物产量形成和掌握高产群体调控指标的重要内容^[18]。Logistic 模型可用于分析水稻、小麦和玉米等作物的干物质积累动态变化特征^[3-5]，Rational

模型能较好地反映 LAI 的动态变化过程^[10-11]。在不同品种、栽培措施和气象条件下，模型参数差异较大，通用性不强，采用“归一化”的方法能消除年际间积温、播期、品种及密度等差异^[19]。本研究基于产量与干物质积累特征的模型，引入 LAI 变化特征参数，优化了模型，模型的相关系数提高到了 0.9 以上，且检验显著水平值大于 0.05，差异不显著。在此模型的基础上建立以产量为目标的群体参数优化设计方法，得出的参数结果基本符合冬小麦的生长规律。2009/2010、2010/2011 和 2012/2013 生长季冬小麦的产量分别为 8 265 kg/hm²、8 670 kg/hm² 和 6 828 kg/hm²，和优化目标产量有一定的差距。3 年的试验结果中，最高产量为 9 781 kg/hm²，穗数为 536 × 10⁴/hm²，穗粒数为 40，千粒重为 46 g，与该方法设计的最大目标产量的结果相近，但略低于该目标产量。因此，利用该方法设计的结果具有一定的有效性，且实现了产量的优化。另外，建模的数据来源于 1 个品种，因此，在今后的研究中需增加多个品种数据，以完善模型的稳定性和适应性。

由于农田肥力或者年际间气候的差异，对于不同生产条件可以将参数的约束范围及群体生长动态变化范围的上下限进行调整。当生产条件适宜，可以将群体生长动态变化的下限上调或者不调；生产条件不宜可将上限下调，调整幅度依赖于对生产条件的判断。通过本研究的群体优化设计方法，能为栽培管理提供指导。在华北平原，大田试验中实现 9 000~9 826 kg/hm² 的水平已经达到，但是农户农田大部分产量水平仅在 7 500 kg/hm² 左右，通过缩小农民产量和试验产量的差距，能使粮食总产上一

个大台阶^[20],本研究能为缩小这种产量差提供技术分析手段。

与以往^[21]的研究相比,本研究提出的方法具有几个优点:第一,系统性,能定量描述达到目标产量时,整个生育过程中干物质及 LAI 的动态变化过程,以及其他的群体指标等;第二,灵活性和方便性,本设计方法能适用于不同生产技术条件以及生产中任何时间点,能进一步将不同的数据资料综合起来处理。另外,设计过程中利用的非线性优化理论相对成熟,提高了方法的可靠性和稳定性。

4 结 论

合理的群体结构是产量提高的基础,Rational 模型能较好地反映 LAI 的动态变化过程;产量形成与干物质积累、LAI 动态变化特征密切相关,并建立了其关系模型;在此基础上提出的冬小麦群体参数优化的设计方法,有利于从整体上把握冬小麦群体生长过程,可作为生产中冬小麦群体构建的理论分析方法。

参 考 文 献

[1] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海:上海科学技术出版社,2000:17-41

[2] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程[J]. 农业气象,1986,7(1):14-19

[3] Royo C, Blanco R. Growth analysis of five spring and five winter triticale genotypes[J]. Agron J,1999,91(2):305-311

[4] 彭世彰,李荣超,朱成立. 节水灌溉的水稻干物质增长模型研究[J]. 水利学报,2002(11):99-102

[5] 张利,隋新霞,王羽,等. 不同熟性小麦品种的干物质积累和分配规律[J]. 山东农业科学,2008(6):54-56

[6] 林忠辉,项月琴,莫兴国,等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(4):69-72

[7] 王声锋,段爱旺,徐建新. 冬小麦株高和叶面积指数变化动态分析及模拟模型[J]. 灌溉排水学报,2010,29(4):97-100

[8] 于强,姚克敏. 水稻叶面积指数的普适增长模型[J]. 中国农业气象,1995,16(2):6-8

[9] 涂修亮,胡秉民. 小麦叶面积指数变化的模拟[J]. 作物研究,1999,13(1):13-14

[10] 张宾,赵明,董志强,等. 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

[11] 李向岭,赵明,李从锋,等. 玉米叶面积系数动态特征及其积温模型的建立[J]. 作物学报,2011,37(2):321-330

[12] 乔嘉,朱金城,赵姣,等. 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

[13] 赵姣,郑志芳,方艳茹,等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J]. 作物学报,2013,39(2):300-308

[14] Fang K T, Lin D K J, Winker P, et al. Uniform design: Theory and application[J]. Technometrics, 2000, 42(3):237-248

[15] Fang K T. Theory, method and applications of the uniform design[J]. Int J Reliab Qual Saf Eng, 2002, 9(4):305-315

[16] 夏兴英,廖树华,梁振兴. 冬小麦生产动态试验优化设计及其调控决策模型研究[J]. 中国农业大学学报,2006,11(6):34-40

[17] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理,2005,24(1):112-115

[18] Yan D C, Zhu Y, Wang S H, et al. A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice [J]. Plant Prod Sci, 2006, 9(2):93-105

[19] 侯玉虹,陈传永,郭志强,等. 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,2009,16(6):90-95

[20] 刘建刚,王宏,石全红,等. 基于田块尺度的小麦产量差及生产限制因素解析[J]. 中国农业大学学报,2012,17(2):42-47

[21] 张竹琴,周顺利,乔嘉,等. 冬小麦产量形成过程模型及群体优化设计方法[J]. 中国农业大学学报,2010,15(6):13-19

责任编辑:袁文业