

冬小麦产量形成过程模型及群体优化设计方法

张竹琴 周顺利 乔嘉 赵姣 廖树华*

(中国农业大学 农学与生物技术学院 / 农业部作物栽培与耕作学重点开放实验室,北京 100193)

摘要 为满足冬小麦生产管理这一要求,需研究冬小麦群体设计及产量形成过程模型构建的技术方法。本文根据冬小麦阶段生长发育特点,以均匀设计与栽培优化相结合的动态试验方法为基础,深入研究不同发育阶段干物质积累量对冬小麦产量及其性状的影响,利用逐步回归和经验判别相结合的方法,论述了基于干物质积累动态的冬小麦产量形成模型的构建过程;根据非线性优化理论,提出了以产量为目标的群体优化设计方法。按上述方法,用冬小麦品种“石家庄8号”在吴桥2年(2007-10—2009-06)的田间试验资料进行分析,结果表明:产量形成过程各模型(包括冬前茎数、拔节茎数、单位穗数、穗粒数和产量)的复相关系数介于0.92~0.97之间,进行群体优化设计后得出最优产量目标为9 165.00 kg/hm²的群体动态指标,所提出的群体设计方法可以满足生产决策中对群体设计的要求,试验方法可用于多因素、多水平作物生产模型的试验研究。

关键词 冬小麦; 干物质; 产量模型; 群体优化设计

中图分类号 S 512.1

文章编号 1007-4333(2010)06-0013-07

文献标志码 A

Studies on design methods for winter wheat optimal population based on model of grain yield formation process

ZHANG Zhu-qin, ZHOU Shun-li, QIAO Jia, ZHAO Jiao, LIAO Shu-hua*

(Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, Ministry of Agriculture/

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

Abstract The processes of crop population growth and dry matter accumulation in crop production are important. Crop yield and yield traits are closely related to dry matter accumulation. To design optimal population of winter wheat, the model of yield formation need to be further studied. The test method is based on a combination of uniform design and cultivation optimization with dynamic approach. The relations of dry matter accumulation and grain yield traits were completely analyzed at different growth stages of winter wheat. Using the method of combining stepwise regression and experiential judgement, the constructing process of yield formation model about winter wheat which was based on dry matter accumulation was discussed. According to non-linear optimization theory, the method of optimal population design aiming at yield was proposed. Using the experimental data of Shijiazhuang 8 from 2007-10 to 2009-06 in Wujiao, the following results were gained: Multiple correlation coefficients of yield formation model ranged from 0.92 - 0.97. Through the optimal population design the optimal yield target of 9 165.00 kg/hm² and relevant dynamic population indicators were obtained. The results showed that the method of population design proposed could meet the needs of production decision. So the methods of experimental design were efficient.

Key words winter wheat; dry matter; grain yield Model; optimal population design

收稿日期: 2010-04-06

基金项目: 国家支撑计划项目(2006BAD29B04); 国家 863 计划项目(2006AA10A303-1)

第一作者: 张竹琴, 硕士研究生, E-mail: zhangzhuqing66@163.com

通讯作者: 廖树华, 副教授, 主要从事作物栽培信息化研究, E-mail: sergzl@public.bta.net.cn

作物产量(经济产量)为生物产量与经济系数的乘积。经济系数的高低仅表明生物产量转运到经济产品器官中的比例,并不表明经济产量的高低^[1]。通常,经济产量的高低与最终生物产量高低成一定比例,其大小决定于生物量的积累过程。作物生产系统是一复杂系统,在实际生产决策中,加强作物生物量累积动态与产量关系的研究更有利于从总体上把握作物生产过程,应对多变的自然、技术和社会经济环境。因此,研究作物生物量累积与产量性状的关系对指导生产具有重要意义。

目前,有关小麦生长模型的研究已非常广泛,从单一性模型如干物质积累动态模型^[2]、发育模型^[3-4],到综合性的模拟模型如 CERES-Wheat 模型^[5-6]、WCSODS^[7]等等。由于建模目的不同,模型应用存在较大差异。关于冬小麦生物量累积过程与产量性状的关系已有学者进行了研究^[8-11],对其他作物也有类似的研究,如玉米^[12-13]、水稻^[14]、油菜^[15]、紫花苜蓿^[16]等。然而,关于冬小麦整个生育期各个阶段干物质积累与产量性状定量关系的研究还较少,而且缺乏基于干物质积累过程模型的冬小麦群体优化设计方法研究。

作物设计模型研究对于推进作物栽培管理技术从指标化和模式化向定量化和信息化方向发展具有重要的现实意义^[17-18]。本研究基于“分段控制、逐步逼近”的优化思想^[19],结合小麦生物学特性,对各生

育时期的干物质积累与产量性状的关系进行深入的分析,探讨构建冬小麦生产管理决策中群体关系模型及基于这些模型的群体优化设计方法,旨在为小麦高产高效栽培提供定量化的科学分析手段。

1 材料与方法

1.1 材料及试验设计

试验于 2007-10—2009-06 在河北省沧州市吴桥试验站进行,试验设计过程参照夏兴英^[20]的动态试验设计思想,即以均匀设计方法^[21](uniform experimental design)为基础,根据作物的发育进程分阶段进行动态设计,并与当地的节水优化栽培模式^[22]相结合,得出最终实施方案。供试品种为石家庄 8 号,2 年试验的基础地力测定数据如下:2007 年:全氮 0.62 g/kg,有机质 7.6 g/kg,速效磷 11.34 mg/kg,速效钾 121.32 mg/kg;2008 年:全氮 0.51 g/kg,有机质 4.8 g/kg,速效磷 6.45 mg/kg,速效钾 108.17 mg/kg。

2007—2008 年试验的系统实施方案如下:

试验因素为 5 个,即水、氮、磷、钾和播量(密度),各因素设 5 水平。本试验设置 5 个补水量;磷、钾肥做底肥结合整地一次性施入,锌肥用量 30 kg/hm²;播量根据生产实际和品种特点来确定。小区面积为 56 m²,各处理不设重复,共 12 个小区(表 1)。

表 1 2007—2008 年 12 个小区的冬小麦试验方案

Table 1 Test scheme of winter wheat in 2007—2008 for 12 blots

因素	小 区											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	C	O
基本苗/(10 ⁴ /hm ²)	225	225	375	375	450	450	600	600	750	750	600	600
底氮肥/(kg/hm ²)	75	150	300	0	75	225	300	0	150	225	345	300
底钾肥 K ₂ O/(kg/hm ²)	135	225	45	180	270	45	180	270	135	225	150	225
播前底墒水/(m ³ /hm ²)	450	750	300	750	300	600	0	600	0	450	750	750
底磷肥 P ₂ O ₅ /(kg/hm ²)	300	240	180	120	60	300	240	180	120	60	345	240
起身氮肥 N/(kg/hm ²)	60	120	30	120	30	90	0	90	0	60	225	0
起身水/(m ³ /hm ²)	600	300	750	450	0	750	450	0	600	300	750	750
拔节水/(m ³ /hm ²)	600	450	0	750	600	300	0	750	450	300	0	0

注:C表示传统高产管理方案,O表示优化节水栽培方案。

2008—2009 年试验系统实施方案如下:

试验因素为 5 个,即水、氮、磷钾配比、播期和播量(密度),各因素设 5 水平。本试验设置 5 个补水

量;磷、钾肥做底肥结合整地一次性施入,锌肥用量 30 kg/hm²;播量根据生产实际和品种特点来确定。小区面积为 52 m²,3 次重复,共 34 个小区(表 2)。

表 2 2008—2009 年 12 个小区的冬小麦试验方案
Table 2 Test scheme of winter wheat in 2008—2009 for 12 blots

因素	小区											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	C	O
播期(2008-10)	8	8	12	12	16	16	20	20	24	24	12	12
基本苗/($10^4/\text{hm}^2$)	525	413	750	300	413	638	750	300	525	638	525	525
底氮肥/(kg/hm^2)	60	180	0	120	240	0	120	240	60	180	90	158
播前底墒水/(m^3/hm^2)	450	750	300	750	300	600	450	600	450	450	750	750
底磷钾比	16:8	8:8	0:8	8:0	0:0	16:8	8:8	0:8	8:0	0:0	8:0	12:8
起身氮肥 N/(kg/hm^2)	60	120	30	120	30	90	0	90	0	60	225	0
起身水/(m^3/hm^2)	360	120	480	240	0	480	90	0	360	120	750	750
灌浆补水日期(2009-05)	7	13	4	13	4	10	1	10	1	7	—	—
灌浆水/(m^3/hm^2)	360	120	480	240	0	480	240	0	360	120	750	750

1.2 测定项目及方法

地上部干物重：分别于越冬前、拔节期、抽穗期、花后 10 d、花后 20 d 和收获期取样，每小区取一行 0.5 m 长（折合 0.1 m^2 面积）的植株，105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 0.5 h，70 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重。

群体指标（基本苗、冬前茎、拔节茎等）：取 3 行，每行 1 m 长的茎数（折合 0.6 m^2 面积）。

测产及考种：成熟期每小区取一行 0.5 m 长（折合 0.1 m^2 面积）的植株，按单株分蘖多少分类，根据所占比例取出其中的 20 株，进行室内考种，同时每小区另取 4 m^2 实收测产。

1.3 数据统计分析

SPSS 11.5 软件。

2 结果与分析

2.1 基于干物质积累过程的冬小麦产量形成模型的建立

冬小麦产量形成是循序渐进、逐步形成的，从基本苗、冬前茎、拔节茎、单位（666.7 m^2 ，下同）穗数、穗粒数到千粒重，完成产量形成过程。这一过程中，生物量是基础，不同生育时期生物量累加，逐步形成小麦产量性状，并最终影响产量。根据冬小麦产量形成的这一规律，建立了冬前茎数、拔节茎数、单位穗数、穗粒数和产量 5 个动态关系模型。由于千粒重与产量同时形成，故不包括千粒重模型。

模型动态关系为：

$$Y_i = F(Y_{i-1}, W_i, V_i, U_i) \quad (1)$$

式中： Y_i 为第 i 阶段的目标变量， W_i 、 U_i 、 V_i 为第 i 阶段的生长变量。具体含义如下：

U_1 为基本苗， $10^4/666.7 \text{ m}^2$ ； W_1 为冬前干物重， $\text{kg}/666.7 \text{ m}^2$ ； Y_1 为冬前茎数， $10^4/666.7 \text{ m}^2$ ； W_2 为拔节期干物重， $\text{kg}/666.7 \text{ m}^2$ ； Y_2 为拔节茎数， $10^4/666.7 \text{ m}^2$ ； W_3 为抽穗期干物重， $\text{kg}/666.7 \text{ m}^2$ ； Y_3 为单位穗数， $10^4/666.7 \text{ m}^2$ ； W_4 为花后 10 d 干物重， $\text{kg}/666.7 \text{ m}^2$ ； Y_4 为穗粒数，个； W_5 为花后 20 d 干物重， $\text{kg}/666.7 \text{ m}^2$ ； Y_5 为产量， $\text{kg}/666.7 \text{ m}^2$ ； W_6 为收获期干物重， $\text{kg}/666.7 \text{ m}^2$ ； V_1 为冬前活动积温， $^{\circ}\text{C}$ ； V_2 为抽穗-开花时间长，d。

2 年试验中，小麦植株取样时间稍有偏差，需要校正相关数据，包括冬前干物重、冬后干物重（起身期、拔节期、抽穗期），以及冬前茎数。以第 2 年的数据为准，对第 1 年的数据进行校正。具体方法如下：

冬前干物重的校正是根据单位活动积温的干物质增长量来进行。

冬后不同时期干物重数据的校正是根据起身期后每天干物质增长量进行。

冬前茎数的校正为根据单位活动积温的冬前茎数增长量来进行。

进行分析时，由于模型所考虑的因素较多，对相关因素的影响机制还很难直接判断，本研究采用统计分析与作物生物学机制相结合的方法来建立模型。首先，根据冬小麦生长规律，确定与目标变量相关性较大的因子，通过逐步回归法从逻辑上筛选出最优因子，即与目标因子相关性较大的因子；然后，

根据冬小麦的生长发育规律判断其合理性,使建立的模型更具有生物学意义。

建立模型如下(其中 R 为复相关系数, F 为显著性检验统计量, α 为显著性水平, n 为建模实际所用样本数, Std. Error 为标准误):

1) 冬前茎数目标数学模型

$$Y_1 = -51.5859 + 0.8593U_1 + 0.5329W_1 + 0.1738V_1 - 0.00095W_1^2$$

$$(R = 0.9479, F = 70.9407, \alpha = 1.9 \times 10^{-15}, n = 37, \text{Std. Error} = 5.10) \quad (2)$$

冬小麦有冬前分蘖和春季分蘖(拔节期)2个高峰期^[23]。因此,把冬前茎数作为冬前的目标变量。影响因素主要是:基本苗、冬前干物重、冬前活动积温。结果表明,冬前茎数除受基本苗、冬前活动积温这两个基本因素影响之外,还受其它因素影响,冬前干物质积累量是这些因素综合作用的结果。

2) 拔节茎数目标数学模型

$$Y_2 = -55.8655 + 1.8313U_1 + 2.4461W_1 + 1.1762(W_2 - W_1) - 1.9504Y_1 - 0.0209U_1W_1 - 0.01163W_1(W_2 - W_1) - 0.01485(W_2 - W_1)Y_1 - 0.00329(W_2 - W_1)^2$$

$$(R = 0.9277, F = 23.9426, \alpha = 3.15 \times 10^{-11}, n = 40, \text{Std. Error} = 7.81) \quad (3)$$

拔节茎数是春季最大茎数,以此作为拔节期的目标变量,影响因素主要是:基本苗、冬前茎数、冬前干物重、冬前-拔节新增干物重。结果表明,拔节茎数是以冬前群体数量(基本苗、冬前茎数、冬前干物重)为基础,其它影响因素的综合作用可以通过冬前-拔节新增干物重来反映。

3) 单位穗数目标数学模型

$$Y_3 = 10.8898 + 0.06363W_4 + 0.002231Y_1Y_2 + 0.000786Y_1(W_4 - W_2) - 0.00081Y_1W_4 - 0.00051Y_2(W_4 - W_2) + 0.003264Y_2U_1$$

$$(R = 0.9185, F = 31.5145, \alpha = 1.01 \times 10^{-12}, n = 42, \text{Std. Error} = 2.27) \quad (4)$$

单位穗数是群体发展的最终表现,它既反映抽穗后群体的大小,又是产量构成因素^[8]。因此,以亩穗数作为该阶段的目标变量,影响因素主要是:基本苗、冬前茎数、拔节茎数、花后 10 d 干物重、拔节-花后 10 d 新增干物重。结果表明,单位穗数以拔节期群体数量为基础,其他影响因素的综合作用可以通过拔节-花后 10 d 新增干物重来表现。同时可以看

出单位穗数与籽粒建成期(花后 10 d)的干物重有密切关系。

4) 穗粒数目标数学模型

$$Y_4 = -5.8758 + 1.5315Y_3 + 0.06853(W_5 - W_3) - 0.05759W_3 - 0.02398V_2(W_5 - W_3) + 0.022241V_2W_3 + 0.002173Y_3(W_5 - W_3) - 0.000061(W_5 - W_3)W_3 - 0.0305Y_3^2 - (W_5 - W_3)^2 \cdot 0.000027$$

$$(R = 0.9261, F = 11.3974, \alpha = 1.35 \times 10^{-15}, n = 27, \text{Std. Error} = 1.24) \quad (5)$$

穗粒数是产量的构成因素,以此作为该阶段的目标变量,影响因素主要是:单位穗数、抽穗-开花时间长、抽穗期干物重、抽穗-花后 20 d 新增干物重。结果表明,抽穗至开花时间间隔与穗粒数的形成有一定关系。

5) 产量目标数学模型

$$Y_5 = 3519.345 - 59.0082U_1 - 2.5074W_5 + 2.8582U_1Y_3 + 0.02207U_1(W_6 - W_5) + 0.06373Y_4(W_6 - W_5) + 0.1935Y_4W_5 - 0.08377Y_3W_5 - 0.00289(W_6 - W_5)W_5 - 3.2765Y_4^2 - 0.7468Y_3^2 - 0.0014(W_6 - W_5)^2 - 0.1754U_1V_1 + 0.10506Y_3V_1$$

$$(R = 0.9695, F = 26.5054, \alpha = 1.99 \times 10^{-10}, n = 36, \text{Std. Error} = 62.48) \quad (6)$$

产量的影响因素主要是:基本苗、单位穗数、穗粒数、冬前活动积温、花后 20 d 干物重、花后 20 d 收获期新增干物重。结果表明,产量除直接受产量构成因素,即单位穗数、穗粒数、千粒重(在此表现为花后 20 d 至收获期新增干物重)影响外,还要受到基本苗和冬前活动积温的间接影响。基本苗是小麦群体发展的起点,也是调节合理群体结构的基础,无疑会影响到最终产量。同时有研究表明,冬前积温与小麦籽粒产量有一定的关系^[24]。

为进一步分析模型的效果,本研究进行了独立样本的模型检验,其检验过程如下:

独立样本选择,先将所有样本利用逐步回归分析法进行初步分析,根据各回归模型的拟合效果,选择其对应误差大的一组样本(根据 t -检验要求,至少 3 个以上),这样更有利于对模型进行总体评价。然后,将这组样本作为模型验证的独立样本,用统计方法分析模型对这组样本的总体拟合效果。

在实际田间取样过程中,对试验小区而言,样本

选择具有一定的随机性。因此，模型中的回归因子是随机变量，其函数也是随机变量。另外，回归模型的随机性与因变量观测值的随机性都产生于同一试

验小区，试验条件一致。进行模型独立样本检验时，采用配对数据 t 统计检验方法(表 3)。

表 3 独立样本模拟值与实测值的配对 t -检验分析结果

Table 3 The results of paired-samples t -test between predicted value and measured value

冬前茎数/ ($10^4/\text{hm}^2$)		拔节茎数/ ($10^4/\text{hm}^2$)		单位穗数/ ($10^4/\text{hm}^2$)		穗粒数		产量/ (kg/hm^2)	
实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值
616.50	594.00	1 785.00	2 115.60	472.50	596.40	33	27.95	7 061.10	9 808.50
1 183.50	1 335.30	2 613.30	2 080.50	474.00	590.85	25	29.65	10 184.70	6 524.40
1 716.75	1 736.55	2 175.00	1 853.10	814.95	708.60	29	26.03	8 388.90	8 066.70
1 196.40	1 217.25	2 043.30	1 712.70			20	26.37	5 091.60	8 599.20
715.05	710.10	1 900.05	1 556.25			23	26.08	4 980.90	8 381.70
$\alpha=0.344$		$\alpha=0.180$		$\alpha=0.614$		$\alpha=0.613$		$\alpha=0.459$	

注： α 表示显著性水平。

上表可以看，所有模型的检验水平 α 值均大于 0.05，上述模型对独立样本数据的拟合结果与观测值在统计意义上没有达到显著差异，即模型是有效的，说明在回归因子区间内模型反映了该品种的产量形成规律，回归模型可以满足冬小麦品种石家庄 8 号的群体设计的要求。

2.2 冬小麦群体动态指标优化设计模型的构建

上述所建立的模型为非线性模型，根据非线性规划理论，其模型一般形式可以表示^[25]为：

$$\begin{aligned} & \text{Max } f(x) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} g_i(x) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, l \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $x \in R^n$ ， $f(x)$ 为目标函数， $g_i(x)$ ， $h_j(x)$ 为约束函数。结合冬小麦生长特点，群体动态指标优化设计模型具体构建过程如下：

以上述产量形成过程关系模型为基础，模型以产量作为最终目标，以群体状态指标作为中间变量。

在构建设计模型过程中，约束条件可以分为以下 4 类：

1) 干物质积累变量与冬前茎数、拔节茎数、亩穗数等群体状态变量的关系约束，这类模型约束是等式约束，上式(2)、(3)、(4)、(5)和(6)形成了群体设计模型的基本关系约束；

2) 不可控制条件约束，这部分信息主要根据气

象条件和播期预先设定，如冬前活动积温等，本模型中有两个变量，形成如下约束：

$$V_1 = 516, V_2 = 4 \quad (8)$$

3) 不同生育时期干物质积累量的变化关系约束，反映的是相邻阶段干物质积累量的比例关系范围。具体参数值要根据当地的生产技术条件而定，根据本文试验条件，形成如下约束：

$$\begin{aligned} & 4U_1 \geq W_1 \geq 0.6U_1, 6.5W_1 \geq W_2 \geq 2W_1, \\ & 3.5W_2 \geq W_3 \geq 1.8W, 2.11W_3 \geq W_4 \geq 1.2W_3, \\ & 1.86W_4 \geq W_5 \geq 1.02W_4, 1.02W_5 \geq W_6 \geq 1.7W_5 \end{aligned} \quad (9)$$

4) 作物生长规律约束，如不同生育时期干物质积累变量大小的自然关系约束、品种的自然属性，具体情况根据试验数据确定。依据吴桥两年对品种石家庄 8 号试验结果，总结出的约束关系为：

$$\begin{aligned} & 55 \geq U_1 \geq 15, 90 \geq Y_1 \geq 20, 175 \geq Y_2 \geq 70, \\ & 55 \geq Y_3 \geq 30, 35 \geq Y_4 \geq 20, \\ & 0.57W_6 \geq Y_5 \geq 0.24W_6, W_{i+1} \geq W_i \geq 0, \\ & i = 1, 2, \dots, 5 \end{aligned} \quad (10)$$

上述式子(3)~(6)、(8)~(10)形成了冬小麦石家庄 8 号群体设计模型的约束条件，若以产量为目标，其目标函数为：

$$\text{Max } Y_5 \quad (11)$$

对上式(2)~(6)和(8)~(11)所构成的群体

设计模型用 Microsoft Excel 2003 的“规划求解”功能进行分析,得出目标函数的最优值 $Y_5 = 9\ 165.00$

kg/hm^2 ,此时各个生育阶段的干物质积累量以及群体状态指标见表 4。

表 4 石家庄 8 号各生育阶段群体指标最优值

Table 4 Optimal population indexes for Shijiazhuang 8 in each growth stage

生育时期	群体指标	指标值	干物重/(kg/hm^2)
出苗期	基本苗/($10^4/\text{hm}^2$)	322.65	—
冬前	冬前茎数/($10^4/\text{hm}^2$)	1 350.00	1 078.95
拔节期	拔节茎数/($10^4/\text{hm}^2$)	2 376.00	4 228.95
抽穗期	穗数/($10^4/\text{hm}^2$)	638.55	8 878.95
花后 10 d	—	—	10 828.95
花后 20 d	穗粒数	29.00	13 828.95
收获期	单位产量/(kg/hm^2)	9 165.00	16 078.95

3 讨 论

1) 本项研究目的是要解决生产决策中的冬小麦群体优化设计问题,为此要研究相关模型构建思想、方法。通过具体的冬小麦生产试验,论述从田间试验、数据获取、模型建立到最终进行群体优化设计的整套技术思想方法。本项研究以田间试验为基础,基于统计分析方法,深入分析了冬小麦产量形成过程,就干物质累积对产量形成的影响进行了系统分析,分阶段建立了以群体状态指标为目标变量的产量形成动态模型,各模型相关系数都达到了 0.9 以上。而后,基于非线性优化理论研究了以产量形成模型为基础的群体优化设计方法,得出本文试验条件下的最优目标产量以及群体动态指标值,结果基本符合冬小麦的生长规律。上述设计模型以统计分析方法为基础、并结合作物生物学机制以及环境条件来考虑,旨在提高模型的精度和适用性。研究结果是在一定试验条件下得出的,就同一品种而言,需要根据当地的生产条件对约束关系式(9)相关参数值作相应调整。如果生产条件有利于本阶段生物量累积,可将下限参数值调大些或不调;生产条件不利,则需要将上限参数值下调,调整幅度依赖于对生产条件的判断。就不同品种而言,可以采用本文所述方法重新进行田间试验、建模,上述参数同样要根据该品种的试验资料来确定。本项研究根据试验条件设计出的产量水平值为 $9\ 165.00\ \text{kg}/\text{hm}^2$,若将目标函数 $\text{Max } Y_5$ 改为 $\text{Min}(Y_5 - Y_0)^2$,则利用设计模型可以找出给定产量水平 Y_0 ($Y_0 \leq 9\ 165\ \text{kg}/\text{hm}^2$)

的群体指标,模型可以根据生产条件及对产量的要求设计出相应的群体指标,并满足品种实际生产水平对群体设计的要求。

2) 与以往研究相比^[26],本研究提出的方法具有以下 2 个特点:一是定量化,比较深入地研究了冬小麦不同生长阶段的干物质积累量与产量及产量性状的定量关系模型;二是灵活性,以上建立的模型,就同一品种而言,可用于指导该品种在其它生产技术条件下的管理决策,对不同的地域需依据当地的气候、土壤肥力和生产技术等条件对约束关系式(9)的参数进行修正。本研究所提的群体设计思想方法同样适用于其他小麦品种。

3) 在小麦生产中要提高产量,必须使小麦在生长过程中有一个发展较为合理的群体结构^[27],本试验主要侧重于群体设计模型构建及优化方法的研究,对群体指标的实现过程还要有其他栽培管理模型的支持。本试验确定的群体指标是对产量目标的细化,可以作为制定栽培管理方案的依据,例如可以根据各阶段生物量的要求,更精确地确定施肥量及各阶段施肥的比例,具体决策过程由于篇幅关系不再讨论。

4 结 论

本项研究提出的群体设计方法可以满足生产决策中对群体设计的要求,模型所基于的试验方法因素多、处理少,效率较高。本项研究采用逐步回归和经验判别相结合的方法,逐步回归是建立多因素模型的有效方法,利用专业知识进行判别使模型结构

更为合理。就同一品种(石家庄8号)而言,所建模型可用于指导该品种在其他生产技术条件下的管理决策。对不同品种,需要依本研究方法重新确定相关模型参数。本项研究方法,也可用于分析其他作物的群体优化设计问题。

吴桥实验站鲁来清和王润正同志在田间试验中予以帮助,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 董钻,沈秀瑛.作物栽培学总论[M].北京:中国农业出版社,2000:71-72
- [2] 刘铁梅,曹卫星,罗卫红,等.小麦物质生产与积累的模拟模型[J].麦类作物学报,200,21(3):26-31
- [3] 陈华,张立中,方娟.小麦发育动态模拟模型的初步研究[J].中国农业气象,1995,16(1):1-4
- [4] 冯利平,高亮之,金之庆,等.小麦发育动态模拟模型的研究[J].作物学报,1997,23(4):418-424
- [5] Ritchie J T, Otter S. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model[C] // ARS Wheat Yield Project, ARS-38, Natl Tech Info Serv, Missouri: Springfield, 1985: 159-175
- [6] Hunt L A, Pararajasingham S. CROPSIM-WHEAT: A model describing the growth and development of wheat [J]. Can J Plant Sci, 1995, 75: 619-632
- [7] 曹宏鑫,董玉红,孙立荣,等.作物模拟技术在小麦栽培中应用的研究[J].中国农业科学,2003,36(3):342-348
- [8] 王前和,李佐坤.小麦干物质积累与穗粒重形成的研究[J].华中农业大学学报,1987,6(3):215-216
- [9] 朱新开,郭文善,范琦,等.小麦不同产量群体干物质积累指标差异研究[J].天津农学院学报,2004,11(3):10-15
- [10] 武金岗,高苹,汤志成,等.冬小麦产量形成的干物质模式[J].气象,1997,23(3):64-74
- [11] 郑秀琴,冯利平,刘荣花.冬小麦产量形成模拟模型研究[J].作物学报,2006,32(2):260-266
- [12] 尹红征,吕冰清,郑国清,等.玉米产量形成模拟模型研究[J].华北农学报,2004,19(3):73-76
- [13] 丁山,郭去,宋军,等.玉米主要性状与产量的回归模型及相关分析[J].西南农业学报,2008,21(5):1226-1230
- [14] 林瑞余,梁义元,蔡碧琼,等.不同水稻产量形成过程的干物质积累与分配特性[J].植物生理科学,2006,22(2):185-190
- [15] 汤亮,朱艳,孙小芳,等.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
- [16] 朱玉洁,冯利平,易鹏,等.紫花苜蓿光合生产与干物质积累模拟模型研究[J].作物学报,2007,33(10):1682-1687
- [17] 朱艳,曹卫星,戴廷波,等.小麦目标产量设计及适宜品种选择的动态知识模型[J].应用生态学报,2004,15(2):231-236
- [18] 朱艳,曹卫星,王邵华,等.小麦栽培管理知识模型系统的设计与实现[J].南京农业大学学报,2002,25(3):12-16
- [19] 黄金龙.小麦生产系统研究[M].北京:北京农业大学出版社,1994:32-33
- [20] 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
- [21] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M].北京:科学出版社,1994
- [22] 李建民,周殿玺,王璞,等.冬小麦水肥高效利用栽培技术原理[M].北京:中国农业大学出版社,2000
- [23] 于振文.作物栽培学各论[M].北京:中国农业出版社,2003:35-45
- [24] 肖凯,秦武发,李章龙.冀中地区冬小麦播期、密度与产量关系的研究[J].耕作与栽培,1993,5(4):24
- [25] 马振华.运筹学与最优化理论卷[M].北京:清华大学出版社,1998:87-103
- [26] 李瑛,阎殿海,安成立,等.小麦优质高产栽培数学模型研究[J].西北农业学报,2008,17(2):86-89
- [27] 姜宪琪,冯刚,曹菊.小麦高产群体栽培技术模型研究[J].麦类作物,1997,17(3):33-35