

大麦籽粒蛋白质含量预测模型

徐寿军^{1,2}, 杨恒山¹, 范富¹, 王云¹, 许如根², 庄恒扬²

(¹内蒙古民族大学农学院, 内蒙古通辽 028042; ²扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏扬州 225009)

摘要: 【目的】构建大麦蛋白质含量预测模型, 为建立大麦生产管理决策支持系统奠定基础。【方法】通过定量分析不同品种和氮肥处理大麦氮素吸收、积累、分配和转移的变化过程, 建立了大麦花前氮素积累及分配和花后氮素吸收转移动态模型。模型利用抽穗期植株临界含氮量来表达氮素最大积累量, 引入叶片潜在分配指数和茎鞘潜在分配指数 2 个品种遗传参数来区别不同品种在器官间的氮素分配差异, 采用 Richards 方程来描述大麦花前氮素积累动态变化; 采用指数函数方程来描述叶片氮的转移量随叶面积指数的动态变化以及籽粒从土壤中吸收的氮量随干物重的动态变化; 采用非线性函数方程描述茎鞘和穗部的氮浓度随生理发育时间的动态变化。利用独立的观测资料对所构建的模型进行了检验。【结果】利用不同品种、氮肥、播期和种植地域试验数据检验模型, 结果表明, 大麦籽粒蛋白质含量模拟值与观测值的绝对预测误差为 0.04%~1.27%, RMSE 为 0.20%~0.72%。精度良好。【结论】模型将经验性与机理性有机结合, 具有较好的可靠性。

关键词: 大麦; 氮积累; 蛋白质; 模拟

A Model for Predicting Grain Protein Content in Barley

XU Shou-jun^{1,2}, YANG Heng-shan¹, FAN Fu¹, WANG Yun¹, XU Ru-gen², ZHUANG Heng-yang²

(¹College of Agronomy, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028042, Inner Mongolia; ²Key Laboratory for Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, College of Agronomy, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu)

Abstract: 【Objective】Modelling grain protein composition in barley is of significant importance for establishing production management decision support system. 【Method】Based on time-course observations on the nitrogen accumulation, assignment, absorption and remobilization under various nitrogen rate regimes with different cultivars, a dynamic model was developed to simulate the nitrogen accumulation and assignment before anthesis and the nitrogen absorption and remobilization model after anthesis in barley. The critical nitrogen content in heading period was used to calculate the biggest accumulation quantity of nitrogen. The latent distribution index of leaf and stem, which was the variety heredity parameter, were used to distinguish the difference in nitrogen assignment in different varieties. The dynamic content of the nitrogen accumulation before anthesis could be described with a Richards model. The dynamic content of the nitrogen remobilization in leaf with leaf area index (LAI) could be described with a power model, and the nitrogen absorption of grain from soil with dry weight could be described with a power model. The dynamic content of nitrogen density in stem and spike with physiological development time(PDT) could be described with a nonlinear model. The model was validated with independent experiment data. 【Result】The results showed that the absolute prediction error ranges for grain protein contents were 0.04%-1.27%, and RMSEs were 0.20%-0.72%. 【Conclusion】The present model with empirical and mechanism appears to provide a reliable prediction.

Key words: barley; nitrogen accumulation; protein; simulation

0 引言

【研究意义】大麦含多种蛋白质和氨基酸, 有较

高的营养价值, 是酿造啤酒不可缺少的原料。当前, 人们已不再仅仅停留于对大麦高产的追求, 开始向高产优质并举的方向发展, 关于大麦品质的研究已成为

收稿日期: 2009-02-19; 接受日期: 2009-06-26

基金项目: 国家“863”计划项目(2001AA245041; 2003(138))、内蒙古民族大学博士科研启动基金

作者简介: 徐寿军(1969-), 男, 内蒙古赤峰人, 编审, 博士, 研究方向为作物生长模拟及信息技术。E-mail: shoujun-xu@163.com

目前大麦研究的热点之一^[1-11]。大麦的品质尤其是啤酒大麦的酿造品质指标很多,其中蛋白质含量是较为重要的指标。在啤酒的酿造过程中,蛋白质含量对大麦的制麦工艺、麦芽的糖化、啤酒的发酵以及成品啤酒的泡沫、香味、生物稳定性等指标都有很大影响。在啤酒生产实践中,国际上公认的啤酒大麦蛋白质含量为 10.5%~13.5%^[12]。因此,构建大麦蛋白质含量预测模型,可定量描述并动态预测不同生长条件下大麦蛋白质含量指标,从而指导大麦生产,进一步提高啤酒大麦的品质。【前人研究进展】目前,国内外已建立多个小麦蛋白质形成预测模型^[13-16]。这些模型有的运用籽粒最大氮含量来计算籽粒中的氮积累,有的通过计算植株吸收的总氮量与籽粒产量来确定籽粒蛋白质含量,但对于综合植株氮吸收动态与土壤氮供应的互作关系还有待于进一步研究。同时,缺乏对花后营养器官氮向籽粒再运转过程的研究。【本研究切入点】大麦与小麦的蛋白质积累过程既有共性,又有区别。迄今为止,关于小麦蛋白质形成的模拟研究已进行得较为系统和深入,而关于大麦蛋白质含量的模拟研究却很少。【拟解决的关键问题】本研究在探明干物质积累与氮素积累关系的基础上,建立大麦花前氮素积累的动态模型;构建籽粒吸氮及叶片、茎鞘氮素向籽粒转移模型,为建立大麦生产管理决策支持系统奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验 1: 品种×氮肥处理。2004—2005 年在扬州大学实验农场进行,土壤类型为砂壤土,地力中等偏上,土壤全氮含量 1.12 g·kg⁻¹,碱解氮 151.3 mg·kg⁻¹,速效磷 22.34 mg·kg⁻¹,速效钾 72.09 mg·kg⁻¹,有机质 24.87 g·kg⁻¹。供试品种为江苏地区种植的有代表性的扬饲麦 3、港啤、扬农啤 2 和 Frankin。试验设 4 个氮肥处理(N₁, N₂, N₃, N₄),施氮量分别为 0、75、150 和 225 kg·hm⁻²。肥料分 2 次施入,基肥在播种时施入,追肥在拔节时施用,基追比为 7:3。磷、钾肥作为基肥一次性施用,磷肥(过磷酸钙) 375 kg·hm⁻²,钾肥(氯化钾) 120 kg·hm⁻²。试验为裂区设计,施氮处理为主区,品种为副区,3 次重复,小区面积 15 m²,10 月 30 日适时播种,栽培管理同大田。

试验 2: 品种×播期处理。2004—2005 年在扬州大学实验农场进行。土壤养分基本状况同试验 1。供试品种为扬饲麦 3、港啤、扬农啤 2 和 Frankin。设 5

个播期,分别于 10 月 15 日,10 月 25 日,11 月 5 日,11 月 15 日,11 月 25 日播种。施纯氮 150 kg·hm⁻²,分 2 次施用,基追比为 7:3。磷、钾肥处理同试验 1。试验为随机区组设计,3 次重复,小区面积 15 m²。栽培管理措施同大田。

试验 3: 品种×氮肥处理。2005—2006 年在扬州大学实验农场进行。土壤全氮含量 1.32 g·kg⁻¹,碱解氮 158.2 mg·kg⁻¹,速效磷 39.02 mg·kg⁻¹,速效钾 62.50 mg·kg⁻¹,有机质 24.15 g·kg⁻¹。供试品种为扬饲麦 3 号、港啤号、扬农啤 2 号和 Frankin。试验设 0、60、120 和 180 kg·hm⁻² 共 4 个氮肥处理,分别表示为 N₁, N₂, N₃ 和 N₄。氮肥分 2 次施入,基肥在播种时施入,追肥在拔节时施用,基追比为 7:3。磷、钾肥施用同试验 1。试验为裂区设计,施肥处理为主区,品种为副区,3 次重复,小区面积 15 m²,11 月 2 日适时播种,栽培管理同大田。

试验 4: 品种×播期处理。2005—2006 年在扬州大学实验农场进行。土壤养分基本状况同试验 3。供试品种为扬饲麦 3、港啤、扬农啤 2 和 Frankin。设 4 个播期,分别于 10 月 20 日,11 月 2 日,11 月 17 日,12 月 2 日播种。施纯氮 150 kg·hm⁻²,分 2 次施用,基追比为 7:3。磷、钾肥处理同试验 3。试验为随机区组设计,3 次重复,小区面积 15 m²。栽培管理措施同大田。

试验 5: 品种×氮肥处理。2004—2006 年在连云港市灌云县五图河农场进行。土壤全氮含量 1.21 g·kg⁻¹,碱解氮 119.00 mg·kg⁻¹,速效磷 31.82 mg·kg⁻¹,速效钾 398.70 mg·kg⁻¹,有机质 22.64 g·kg⁻¹。供试品种为扬饲麦 3 号、港啤、扬农啤 2 号和 Frankin。试验设 90、180 kg·hm⁻² 共 2 个氮肥处理,分别表示为低氮和高氮。肥料分 2 次施入,基肥在播种时施入,追肥在拔节时施用,基追比为 7:3。磷、钾肥作为基肥一次性施用,磷、钾肥施用量与方法同试验 1。试验为裂区设计,施肥处理为主区,品种为副区,2 次重复,小区面积 20 m²,11 月 4 日适时播种,栽培管理同大田。

1.2 测定项目

1.2.1 植株各器官干物重及养分含量的测定 每品种每处理选长势相同的大麦挂牌标记,分别在冬前、越冬、拔节、抽穗期以及花后 7、14、21、28、35、42 d 和成熟期取生长状态一致的植株 20 株,按不同部位(抽穗前分茎鞘和叶片,抽穗后分绿叶、枯叶、茎秆、穗、籽粒等部分)分开,测量绿叶面积,计数每

穗粒数。烘干后测各部分器官干物重及含氮量。含氮量用凯氏定氮-半微量蒸馏法测定^[17]。

1.2.2 产量的测定 大麦成熟后,每小区收获长势均匀的大麦 2 m²,计株数、穗数,人工脱粒,测产。

1.2.3 品质的测定 大麦籽粒收获储存 1 个月后进行品质测定。粗蛋白含量用凯氏定氮-半微量蒸馏法测定^[17]。

在各试验开始前,取试验田的土壤样品,测试土壤的主要养分含量(全氮、碱解氮、速效磷、速效钾和有机质)^[17]。所需的日最低温度、日最高温度、日照时数等气象数据均由扬州市和连云港市灌云县气象部门提供。

1.3 模型的建立及检验

运用试验 1 和 2 的数据构建模型,其中试验 1 中的 0 和 150 kg·hm⁻² 氮素处理数据用来确定大麦最小含氮量和临界含氮量模型,225 kg·hm⁻² 氮素处理数据用来确定品种遗传参数;试验 2 的数据用来确定大麦氮素积累、分配、转移及籽粒增重模型。运用试验 3、4、5 所获数据检验模型,采用根均方差 *RMSE* (root mean square error),对模拟值与观测值之间的符合度进行分析,*RMSE* 的值越小,表明模拟值与实际观测值的一致性越好,模型越可靠^[18]。同时,绘制模拟值与观测值之间的 1:1 关系图,直观地展示模拟值与观测值的拟合度和可靠性^[18]。

2 结果与分析

2.1 模型的描述

2.1.1 抽穗前植株体对氮素的积累与分配模型

2.1.1.1 抽穗前植株体对氮素的积累模型 本试验结果表明,从出苗到抽穗,大麦植株体对氮素的积累量与同期干物质的积累密切相关,是一个由慢到快再逐渐减缓的过程(图 1),可由公式(1)来描述。

$$NUP_{PDT} = \frac{TCNP_{head} \times DW_{head}}{(1 + 0.0693 \times e^{-11.618 \times DW_{PDT}})^{30.262}} \quad (1)$$

$$TCNP_{head} = 4 \times 10^{-5} PDT^3 + 0.0052 PDT^2 - 0.2132 PDT + 3.5724 \quad (2)$$

式中, NUP_{PDT} 为大麦植株体在某 PDT 时的氮素积累量 ($g \cdot m^{-2} \cdot PDT^{-1}$), PDT 为生理发育时间^[18]。 $TCNP_{head}$ 为大麦地上部植株体抽穗期临界含氮量。 DW_{head} 为抽穗时大麦的干物质积累量 ($g \cdot m^{-2} \cdot PDT^{-1}$),由大麦干物质生产模型计算。

2.1.1.2 抽穗前植株体对氮素的分配模型

(1) 叶片氮素分配指数模型

本研究结果表明,大麦叶(包括枯叶)氮素分配指数随生育进程逐渐降低(图 2),公式如下。

$$NPILE_{PDT} = \frac{LEAF_{max}}{(1 + 0.0342 \times e^{0.1466 \times PDT})^{1.0408}} \quad (PDT \leq 18.4) \quad (3)$$

式中, $NPILE_{PDT}$ 为某 PDT 时的叶片氮素分配指数, $LEAF_{max}$ 为大麦叶片潜在分配指数,是品种遗传参数,18.4 为大麦抽穗期生理发育时间。

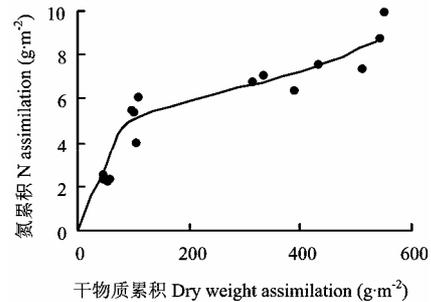


图 1 开花前植株体氮素积累量与干物重的关系

Fig. 1 Relationship between the amount of nitrogen assimilated before anthesis and dry weight

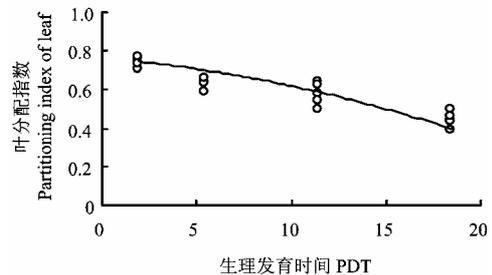


图 2 大麦叶片氮素分配指数随生理发育时间的动态变化

Fig. 2 Change in leaf partitioning index of nitrogen with PDT in barley

(2) 茎鞘氮素分配指数模型

本研究结果显示,大麦茎鞘氮素分配指数随 PDT 呈逐渐上升趋势(图 3),公式如下。

$$NPIST_{PDT} = \frac{STEM_{max}}{(1 + 0.506 \times e^{-0.133 \times PDT})^{0.377}} \quad (PDT \leq 18.4) \quad (4)$$

式中, $NPIST_{PDT}$ 为某 PDT 时大麦茎鞘氮素分配指数, $STEM_{max}$ 为大麦茎鞘潜在分配指数,是品种遗传参数。

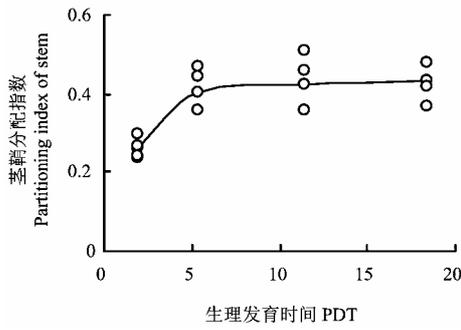


图3 大麦茎鞘氮素分配指数随生理发育时间的动态变化
Fig. 3 Change in stem partitioning index of nitrogen with PDT in barley

(3) 穗部氮素分配指数模型

由于在拔节期（药隔形成期）以前，大麦的穗（生长锥）很小，可以忽略不计，所以在本研究中，穗（生长锥）的氮素分配从拔节期（药隔形成期）开始，公式如下。

$$NPISP_{PDT} = 1 - NPIST_{PDT} - NPILE_{PDT} \quad (8.5 \leq PDT \leq 18.4) \quad (5)$$

式中， $NPISP_{PDT}$ 为某 PDT 时大麦穗部氮素分配指数，8.5 为大麦顶端发育到药隔形成期（拔节期）的生理发育时间。

(4) 各器官氮素分配的模拟

大麦各器官花前的氮素积累，是大麦植株体花前氮素总积累量与各器官氮素分配指数的乘积。

$$NALE_{PDT} = NPILE_{PDT} \times NUP_{PDT} \quad (6)$$

$$NAST_{PDT} = NPIST_{PDT} \times NUP_{PDT} \quad (7)$$

$$NASP_{PDT} = NPISP_{PDT} \times NUP_{PDT} \quad (8)$$

式中， $NPILE_{PDT}$ 、 $NPIST_{PDT}$ 、 $NPISP_{PDT}$ 分别为叶片、茎鞘、穗在某 PDT 时的氮素分配指数， $NALE_{PDT}$ 、 $NAST_{PDT}$ 、 $NASP_{PDT}$ 分别为叶片、茎鞘、穗在某 PDT 时的氮素积累量。

2.1.2 抽穗后各器官氮素转移模型

2.1.2.1 花后绿叶氮素转移模型 本研究结果表明，随着叶面积指数的下降，绿叶中的氮积累量也逐渐降低（图4）。二者关系可以用指数方程来描述。

$$NUPLE_{PDT} = 0.5520 \times \text{EXP} (0.4625 \times LAI_{PDT}) \quad (PDT > 18.4) \quad (9)$$

式中， $NUPLE_{PDT}$ 为大麦花后某 PDT 时叶的氮积累量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)， LAI_{PDT} 为大麦花后某 PDT 时的叶面积指数。则大麦花后叶向籽粒转移的氮量如下。

$$TNLE_{PDT} = NUPLE_{head} - NUPLE_{PDT} \quad (10)$$

式中， $TNLE_{PDT}$ 为某 PDT 时大麦叶向籽粒转移的氮量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)， $NUPLE_{head}$ 为抽穗期大麦叶片的氮积累量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)，可在大麦花前氮素积累与分配的模拟模型中计算。

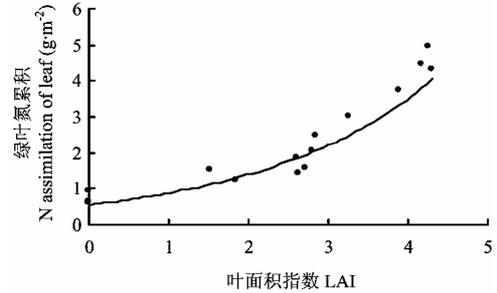


图4 大麦花后叶片氮素积累量与叶面积指数的关系
Fig. 4 Relationship between the amount of N assimilated in leaf after anthesis and LAI in barley

2.1.2.2 花后茎鞘氮素转移模型 开花后，大麦茎鞘氮素转移与其氮浓度的降低密切相关（图5）。

$$NCST_{PDT} = \frac{4.029 \times NCST_{head}}{(1 + 0.673 \times e^{0.023 \times PDT})^{2.053}} \quad (11)$$

$$NCST_{head} = \frac{NUPST_{head}}{DMST_{head}} \quad (12)$$

式中， $NCST_{PDT}$ 为花后大麦在某 PDT 时茎鞘的氮浓度， $NCST_{head}$ 为抽穗期大麦茎鞘氮浓度， $NUPST_{head}$ 为抽穗时茎鞘氮素积累量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)， $DMST_{head}$ 为抽穗时茎鞘干物质积累量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。则茎鞘氮转移的计算如下。

$$TNST_{PDT} = NUPST_{head} - NUPST_{PDT} \quad (13)$$

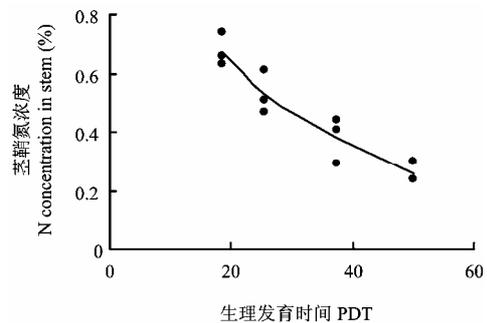


图5 大麦花后茎鞘氮浓度随生理发育时间的动态变化
Fig. 5 Change in N concentration of stem after anthesis with PDT in barley

$$NUPST_{PDT} = DWST_{PDT} \times NCST_{PDT} \quad (14)$$

式中, $TNST_{PDT}$ 为某 PDT 时茎鞘向籽粒转移的氮量 ($g \cdot m^{-2}$), $NUPST_{PDT}$ 为某 PDT 时茎鞘的氮积累量 ($g \cdot m^{-2}$), $DWST_{PDT}$ 为某 PDT 时茎鞘干物重 ($g \cdot m^{-2}$)。

2.1.2.3 花后穗氮素转移模型 花后大麦穗氮素转移与其氮浓度的降低有关 (图 6)。

$$NCSP_{PDT} = \frac{2.318 \times NCSP_{head}}{(1 + 0.421 \times e^{0.052 \times PDT})^{1.106}} \quad (15)$$

$$NCSP_{head} = \frac{NUPSP_{head}}{DWSP_{head}} \quad (16)$$

式中, $NCSP_{PDT}$ 为花后大麦在某 PDT 时穗氮浓度, $NCSP_{head}$ 为抽穗期大麦穗氮浓度, $NUPSP_{head}$ 为抽穗时穗氮素积累量 ($g \cdot m^{-2}$), $DWSP_{head}$ 为抽穗时穗干物质积累量 ($g \cdot m^{-2}$), 则穗氮转移的计算如下。

$$TNSP_{PDT} = NUPSP_{head} - NUPSP_{PDT} \quad (17)$$

$$NUPSP_{PDT} = DWSP_{PDT} \times NCSP_{PDT} \quad (18)$$

式中, $TNSP_{PDT}$ 为某 PDT 时穗向籽粒转移的氮量 ($g \cdot m^{-2}$), $NUPSP_{PDT}$ 为某 PDT 时穗的氮积累量 ($g \cdot m^{-2}$), $DWSP_{PDT}$ 为某 PDT 时的穗干物重 ($g \cdot m^{-2}$)。

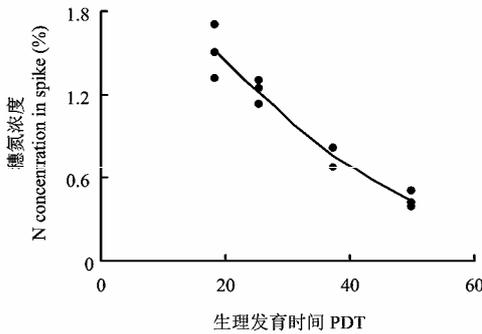


图 6 大麦花后穗氮浓度随生理发育时间的动态变化
Fig. 6 Change in N concentration of spike after anthesis with PDT in barley

2.1.2.4 花后氮素吸收模型 根据相关资料和本研究结果, 籽粒花后吸氮量随其干物重的增加呈指数增加 (图 7), 二者关系如下。

$$NUPGR_{PDT} = 0.5504 \times \text{EXP} (0.0034 \times DWGR_{PDT}) \quad (19)$$

式中, $NUPGR_{PDT}$ 为某 PDT 时籽粒从土壤中吸收的氮量 ($g \cdot m^{-2}$), $DWGR_{PDT}$ 为某 PDT 时籽粒的干物重 ($g \cdot m^{-2}$), 可由大麦干物质积累与分配模型计算得到。

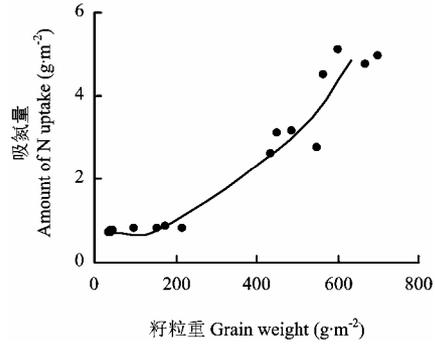


图 7 大麦花后氮素吸收与籽粒重的关系
Fig. 7 Relationship between the amount of N uptake after anthesis and grain weight in barley

2.1.3 籽粒蛋白质积累模型

$$GN_{PDT} = (TNLE_{PDT} + TNST_{PDT} + TNSP_{PDT} + NUPGR_{PDT}) \times F(T_{mean}) \quad (20)$$

$$PC_{PDT} = \frac{GN_{PDT}}{DWGR_{PDT}} \times 6.25 \quad (21)$$

式中, GN_{PDT} 为某 PDT 时籽粒氮积累量 ($g \cdot m^{-2}$), $DWGR_{PDT}$ 为某 PDT 时籽粒干物重 ($g \cdot m^{-2}$), PC_{PDT} 为某 PDT 时籽粒蛋白质含量。

籽粒蛋白质形成过程中, 除受品种自身遗传因素影响外, 还受到温度等外界环境条件的影响。当温度小于籽粒灌浆的最适温度时, 温度值越高, 越有利于籽粒灌浆; 当温度大于或等于籽粒灌浆的最适温度时, 温度值越低, 越有利于籽粒灌浆。 $F(T_{mean})$ 为温度影响因子, 取值在 0~1 之间。当日均温越接近最适温度, $F(T_{mean})$ 的值越接近 1。

$$F(T_{mean}) = \begin{cases} \frac{T_{mean} - T_b}{T_o - T_b} & T_{mean} < T_o \\ \frac{T_m - T_{mena}}{T_m - T_o} & T_{mean} \geq T_o \end{cases} \quad (22)$$

式中, T_{mean} 为大麦在灌浆期间的日平均温度, T_b 为大麦籽粒灌浆的基点温度, 取值 15°C, T_m 为最高温度, 取值 35°C, T_o 为大麦籽粒灌浆的最适温度。本研究中, 取值为 25°C^[7]。

2.2 模型的检验

根据试验 1 中适播期下 225 kg·hm⁻² 氮素处理的试验数据, 确定无肥水因素限制条件下, 扬饲麦 3、扬农啤 2、港啤和 Frankin 4 个大麦品种叶片的潜在分配指数分别为 0.642、0.627、0.688 和 0.615, 茎鞘潜在分配指数分别为 0.507、0.428、0.514 和 0.479。运用

2005—2006 年扬州地区不同播期和氮肥处理试验数据对大麦成熟期籽粒蛋白质含量预测模型进行检验(图 8), 其模拟值与观测值的绝对预测误差为 0.04%~1.13%, *RMSE* 为 0.52%~0.72%。运用 2004—2006 年连云港地区不同年份不同氮肥处理的试验数据, 对大麦成熟期籽粒蛋白质含量模型进行检验(图 9), 其模拟值与观测值的绝对预测误差为 0.13%~1.27%, *RMSE* 为 0.20%~0.44%。模型表现出较好的预测性。

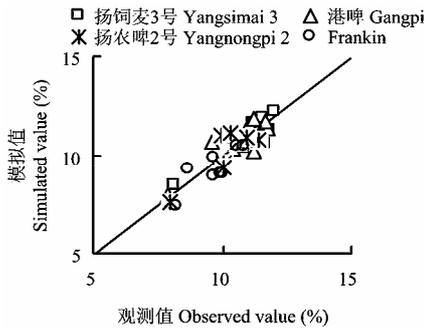


图 8 扬州地区成熟期大麦籽粒蛋白质含量模拟值与观测值比较

Fig. 8 Comparison of simulated and observed values of grain protein contents in different N application rates and various sowing dates of barley in Yangzhou area

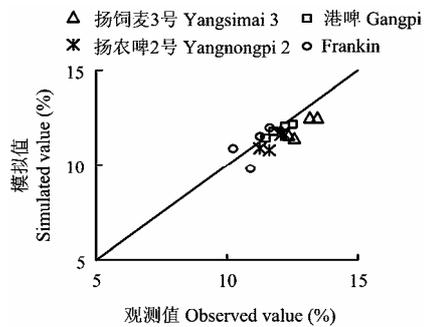


图 9 连云港地区成熟期大麦籽粒蛋白质含量模拟值与观测值比较

Fig. 9 Comparison of simulated and observed values of grain protein contents at maturity stage in different N application rates of barley in Lianyungang area

3 讨论

3.1 关于花前氮素积累模型

关于作物花前氮素积累预测, 由于花前作物植株体内的氮素可以看作是通过吸收土壤中的氮素而积累起来的, 所以大多数模型都是用负指数方程来描述其氮素吸收速率的总体变化模式。也有模型把花前氮素积累分为因叶面积不断增加的氮需求量与非叶片组织干物质积累的氮需求量两部分。关于氮素在叶片和茎鞘间的分配指数, 大多数模型都忽略了品种间的差异, 认为不同品种氮素在各器官间的分配指数是相同的, 这无疑降低了预测模型的精确度。

本研究建立了大麦花前氮素积累与干物质积累的函数关系, 利用抽穗期植株临界含氮量来表达氮素最大积累量, 以改善模拟效果。引入了叶片潜在分配指数和茎鞘潜在分配指数 2 个品种遗传参数来区别不同品种在器官间的氮素分配差异。模型简化了开花前氮素在大麦体内运转分配的复杂过程, 仅以干物质的变化来体现氮素积累的变化, 从而避免了繁琐的计算。

3.2 关于籽粒蛋白质含量预测模型

目前, 关于麦类作物籽粒蛋白质含量预测模型, 主要有 2 种类型, 一是用经验方程来预测, 二是用机理模型来描述。在 Aggarwal 等^[19]建立的小麦模型 WTGROWS 中, 假定在开花后不久氮素吸收即停止, 籽粒生长所需氮素全部来自营养器官的转移。CERES 模型对开花后氮素的吸收和转移, 主要采用经验方程描述, 假定小麦开花后根系吸氮能力随生育期进程线性下降, 吸收的氮素全部补充营养器官亏缺性需要, 籽粒氮素潜在积累速率是温度和热时间的函数, 实际积累速率则受地上部氮素状况调节。ORYZA 模型在开花后的土壤吸氮量仍然取作物潜在需氮量和土壤供氮量两者中的最小值。在潘洁等^[20]建立的小麦蛋白质含量机理模型中, 花后氮的吸收动态模型是通过与籽粒重及植株开花期氮积累量对花后氮吸收影响因子的负指数关系来建立的。在李卫国等^[21]建立的应用于遥感系统的小麦籽粒蛋白质预测模型中, 认为籽粒中氮的总积累量, 来源于花前存贮氮的运转和花后植株对氮的再吸收运转, 花后植株对氮的再吸收运转与花前群体叶面积指数和地上部生物量呈相应的函数关系。

本研究假定在大麦籽粒灌浆过程中, 其氮素来源包括营养器官转移的氮素和从土壤中吸收的氮素。营养器官转移的氮, 包括绿叶、茎鞘和穗转移的氮。从土壤中吸收的氮, 全部用来供应籽粒蛋白质的形成。氮素供应不足时, 则从营养器官中获取较多的氮。在此基础上建立了大麦花后氮素吸收转移模型。模型以抽穗期干物重和氮浓度为基础来计算各器官的氮转移

量, 其中叶片氮的积累与叶面积指数呈指数关系; 茎鞘和穗部的氮浓度变化与生理发育时间呈非线性函数关系; 籽粒从土壤中吸收的氮量则随干物重呈指数增加。模型综合反映了籽粒氮素积累、营养器官氮素输出以及与温度效应之间的关系, 将经验性与机理性有机结合, 增强了模型的实用性。

土壤水分和营养状况(如速效氮含量)对作物对氮素的吸收、运转和积累都有一定影响。因试验条件所限, 本研究没有考虑水分和土壤速效氮含量的影响, 将在今后的研究中加以补充和完善。模型也须在更多品种和更大地理范围内接受检验。

4 结论

本研究在综合分析籽粒氮素积累、营养器官氮素输出以及二者之间的关系的基础上, 构建了大麦蛋白质含量预测模型; 不同品种、氮肥、播期和种植地域试验数据检验结果表明, 大麦籽粒蛋白质含量模拟值与观测值的绝对预测误差为 0.04%~1.27%, *RMSE* 为 0.20%~0.72%。模型显示出较强的机理性以及较好的可靠性和实用性。

References

- [1] von Bothmer R, van Hintum T, Helmut K. *Diversity in Barley*. Amsterlands: Elsevier Science B V, 2003: 77-94.
- [2] 徐绍英, 阎新甫, 朱 军, 许永汉, 徐新宇. 啤酒大麦糖化力及其有关酿造品质性状的胚和胚乳遗传效应分析. 作物学报, 1999, 25(1): 25-31.
Xu S Y, Yan X F, Zhu J, Xu Y H, Xu X Y. Analysis of embryo and endosperm genetic effects on diastatic power and associated malting quality traits of malting barley. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(1): 25-31. (in Chinese)
- [3] 拾方坚, 郭 孝, 田玉山. 饲用大麦品种生物产量、粗蛋白和氨基酸含量的动态研究. 中国农业科学, 1994, 27(2): 38-44.
Shi F J, Guo X, Tian Y S. A dynamic study on biomass, crude protein and amino acid contents of feeding barley varieties. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27(2): 38-44. (in Chinese)
- [4] 许 明, 封超年, 李长亚, 郭文善, 朱新开, 彭永欣. 氮肥对啤酒大麦籽粒品质的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2004, 25(6): 34-39.
Xu M, Feng C N, Li C Y, Guo W S, Zhu X K, Peng Y X. Effect of nitrogen on grain of malt barley. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2004, 25(6): 34-39. (in Chinese)
- [5] 赵檀方. 不同栽培因素对啤酒大麦籽粒产量和品质的影响. 山东农业大学学报, 1990, 21(4): 41-44.
Zhao T F. Effect of various cultural factors on the grain yield and quality of beer-barley. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1990, 21(4): 41-44. (in Chinese)
- [6] 齐军苍, 张 莉, 幕自新, 曹连莆. 大麦籽粒形成期不同器官氮素变化规律的研究. 石河子大学学报, 1998, 2(3): 177-182.
Qi J C, Zhang L, Mu Z X, Cao L P. A study on changing trends of nitrogen in different organs during grain filling period. *Journal of Shihezi University*, 1998, 2(3): 177-182. (in Chinese)
- [7] 谢志新. 氮肥用量对大麦氮代谢和籽粒品质的效应. 浙江农业大学学报, 1989, 15(1): 1-7.
Xie Z X. Effect of nitrogen fertilizer rates on nitrogen metabolism and grain quality in winter barley. *Acta Agriculturae Universitatis Zhejiangensis*, 1989, 15(1): 1-7. (in Chinese)
- [8] 胡志桥, 郭天文, 赖丽芳, 王成保. 施肥对河西绿洲灌区啤酒大麦产量和品质的影响. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1028-1030.
Hu Z Q, Guo T W, Lai L F, Wang C B. Effect of potassium application on yield and quality of beer barley in the Hexi Oasis irrigated region of Gansu Province. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(6): 1028-1030. (in Chinese)
- [9] 郑丕尧, 李建民. 春大麦生育规律及其应用的研究 III 籽粒的氮素积累和含氮量变化. 北京农业大学学报, 1988, 14(1): 5-11.
Zheng P Y, Li J M. Studies on rules of growth development and its application in spring barley. III. The nitrogen accumulation and the changes of nitrogen contents in grains. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis*, 1988, 14 (1): 5-12. (in Chinese)
- [10] 陈锦新, 陈叶平, 陈培玉, 蔡仁祥, 张国平. 大麦籽粒产量和氮积累的农艺因素效应. 大麦科学, 1998, (2): 5-8.
Chen J X, Chen Y P, Chen P Y, Cai R X, Zhang G P. The effect of some agronomic factors on grain yield and nitrogen accumulation in barley. *Barley Science*, 1998, (2): 5-8. (in Chinese)
- [11] 王新其, 李 军, 金小妹. 氮肥效应对直播大麦产量及若干生育指标的影响. 上海农学院学报, 1994, 12(1): 56-60.
Wang X Q, Li J, Jin X M. Effect of nitrogen fertilizer on the yield and growing & developing target of direct-seeding barley. *Journal of Shanghai Agricultural College*, 1994, 12(1): 56-60. (in Chinese)
- [12] 卢良恕. 中国大麦学. 北京: 中国农业出版社, 1995: 490.
Lu L S. *China Barley Science*. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 490. (in Chinese)
- [13] Makowski D, Wallach D, Meynard J M. Models of yield, grain protein and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 377-385.
- [14] Jamieson P D, Stone P J, Semenov M A. Towards modelling quality

- in wheat—from grain nitrogen concentration to protein composition. *Aspects of Applied Biology*, 2001, 64: 111-126.
- [15] Martre P, Porter J R, Jamieson P D. Modeling grain nitrogen accumulation and protein composition to understand the sink-source regulations of nitrogen remobilization for wheat. *Plant Physiology*, 2003, 133: 1959-1967.
- [16] Pierre M, Peter D, Jamieson D. Modeling protein content and composition in relation to crop nitrogen dynamics for wheat. *European Journal of Agronomy*, 2006, 4: 1-17.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 263-268.
- Bao S D. *Soil Agricultural Chemistry Analysis (3rd Edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 263-268. (in Chinese)
- [18] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理. 北京: 华文出版社, 2000: 34-145.
- Cao W X, Luo W H. *Crops System Simulation and Intelligent Management*. Beijing: Huawen Press, 2000: 34-145. (in Chinese)
- [19] Aggarwal P K, Naveen Kalra, Singh A K, Sinha S K. Analyzing the limitations set by climate factors, genotype, water and nitrogen availability on productivity of wheat I. The model description, parameterization and validation. *Field Crops Research*, 1994, 38: 73-91.
- [20] Pan J, Zhu Y, Jiang D, Dai T B, Li Y X, Cao W X. Modeling plant nitrogen uptake and grain nitrogen accumulation in wheat. *Field Crops Research*, 2006, 97: 322-336.
- [21] 李卫国, 王纪华, 赵春江, 刘良云, 宋晓宇, 童庆禧. 基于NDVI和氮素积累的冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型. *遥感学报*, 2008, 12(3): 506-514.
- Li W G, Wang J H, Zhao C J, Liu L Y, Song X Y, Tong Q X. A model based predicting protein content in winter wheat grain land-sat TM image and nitrogen accumulation. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 506-514. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)