

基于高光谱响应与模拟模型的冬小麦变量追氮研究*

蒋阿宁^{1,2}, 黄文江¹, 王纪华¹, 刘克礼², 赵春江¹, 刘良云¹

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 2. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古呼和浩特 010019)

摘要: 为给小麦变量施氮提供依据, 利用冬小麦起身期和拔节期冠层光谱数据, 选用反映冬小麦长势信息的优化土壤调节植被指数 *OSAVI* (Optimization of soil-adjusted vegetation index) 与 CERES-Wheat 模型相结合进行变量施肥管理(变量区), 以相邻地块常规非变量(均一)施肥区(对照区)为对照, 对变量追氮模型的可行性进行探讨, 并对变量追肥处理的实际效果进行分析。结果表明, CERES-Wheat 模型能较好地反映冬小麦的生长状况, 在冬小麦产量预测中, 目标产量与实测产量具有良好的 consistency。变量施肥区的产量、籽粒蛋白含量及经济效益均优于对照区, 同时变量施肥区的籽粒产量和蛋白质含量的空间变异较对照均有所降低, 说明基于高光谱响应与模拟模型的冬小麦变量追氮技术具有一定的理论意义和实用价值。

关键词: 冬小麦; 植被指数; 变量施肥; CERES-wheat 模型

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2007)03-0518-05

Studies of Variable Nitrogen Application in Winter Wheat Based on Spectral Index and Simulation Models

JIANG A-ning^{1,2}, HUANG Wen-jiang¹, WANG Ji-hua¹, LIU Ke-li², ZHAO Chur-jiang¹, LIU Liang-yun¹

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agricultural, Beijing 100097, China;

2. Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China)

Abstract: The aim of this study was to develop the time-specific and time-critical method of variable nitrogen application to overcome the limitations of traditional field sampling methods. Experiments with uniform (CK) and variable rate of nitrogen fertilization were carried out during 2005 ~ 2006 on the experimental farm in Beijing (40°10'N, 116°26'E). CERES-Wheat models and spectral index was combined to determine the amount of nitrogen fertilizer recommended for variable rate management. There were significantly linear correlations between the leaf area index (LAI) measured and grain yield with the simulated ones. The result showed that the CERES-Wheat model can be used to predict the state and biophysical variables of wheat. The grain yield and grain protein content were measured among the CK and variable rate fertilizer treatments. It indicated that variable rate fertilization increased grain yield and grain protein content, and it did reduce the variability of them. Economical benefits of fertilization in variable rate application were better than those in CK.

Key words: Winter wheat; *OSAVI*; Variable nitrogen application; CERES-Wheat models; Economical benefits

施用氮肥是小麦生产中的重要措施, 适量施氮能提高小麦籽粒产量、蛋白质含量, 并改善加工

品质^[1-3], 但过量或不合理施氮不仅不能达到高产优质的目的, 还会降低氮肥利用率, 增加氮肥损

* 收稿日期: 2006-11-29 修回日期: 2007-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40471093, 40571118); 北京市自然科学基金项目 (4052014, 6062019); 国家 973 项目 (2005CB121103); 农业部“引进国际先进农业科学技术”专项基金项目 (2006-G63)。

作者简介: 蒋阿宁 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感农业应用研究。

通讯作者: 黄文江 (1974-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农业信息技术研究。

失,污染环境^[4]。随着 3S(GIS、RS、GPS)技术的发展,作物模拟模型已被广泛应用。其中 Maas^[5]利用植被指数 *NDVI*(Normalized difference vegetation index)估算了有效光合辐射和叶面积指数,用于作物模型。同时提出了用遥感信息对模拟过程进行重新初始化和参数化的方法,以提高模型精度。Lal 等^[6]将作物生长模型与 GIS 技术结合,分析了区域生产力,并提出优化的生产措施。Paz 等^[7]利用 CERES-Maize 模型和地理特征实现对玉米的变量施肥,并对其经济效益和生态效益进行分析。NAINE^[8]等利用 CERES-Wheat 模型进行产量预测。目前作物模拟主要应用于全球气候变化影响评价、不同种植制度的营养物质循环和区域农业资源分析等领域^[9-12],但是利用 CERES-Wheat 模型与光谱数据结合进行冬小麦变量追肥的研究鲜有报道。本研究根据当地气象、土壤等数据,利用 CERES-Wheat 模型模拟冬小麦的目标产量,并与光谱数据相结合,构建了冬小麦的变量追肥模型,并对模型进行了验证,同时对变量施肥的实际效果进行了评价,以期模拟模型与适时观测光谱数据相结合进行田间施肥管理奠定理论基础。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试小麦品种为京冬 8 号。

1.2 方 法

1.2.1 试验设计 试验于 2005~2006 年在国家农业信息化工程技术研究中心精准农业试验基地进行。该基地位于北京市昌平区小汤山镇,北纬 40°10',东经 116°26'。2005 年 9 月 26 日和 9 月 27 日播种,播种量 330~345 kg/ha。根据当地气象与土壤数据等运行 CERES-Wheat 模型获得所选品种的目标产量,应用冬小麦变量追肥计算公式(1~5),获得每个变量施肥小区的追氮量,(共 20 个小区,分别记做:Z-01、Z-02、Z-03……Z-20,以下简称变量区),一个对照处理(20 个小区,分别记为:CK-01、CK-02、CK-03……CK-20,各小区追氮量为 20 个变量施肥小区的平均追氮量,以下简称对照区),对其他营养元素不做变量施肥处理。变量追肥于 2006 年 4 月 14 日(拔节期)进行,按各小区所用肥量,分别称量装袋,人工撒施。随机区组排列,其它条件完全相同。小区面积 3 m×3 m。收获时间 2006 年 6 月 20 日。

1.2.2 测定项目 小麦冠层光谱反射率采用 ASD Fieldspec FR2500 光谱仪,其采样间隔 1.4 nm(350~1 000 nm 区间)和 2 nm(1 000~2 500 nm 区间)。在天气晴朗、无风或风速很小的 10:00~14:00 时测量,视场角 25 距地表 1.30 m 处垂直测定,在视场范围内重复 20 次,取其平均值,各小区测定前后,校正参考板。

6 月 20 日选择各小区内 2 m² 面积,收获至网袋,风干后脱粒测产。

籽粒蛋白质含量的测定用近红外(NIR)谷物分析仪(Instalab-610, Australia)测定。

1.2.3 小麦变量追氮量的计算 以 Lukina 等^[13]的算法为基础,参考 2002 年本基地试验数据确定方程系数^[14],利用 2004~2005 年试验数据订正,采用 CERES-Wheat 模型预测目标产量,步骤如下(单位为 kg):

A. 基于地物光谱数据计算优化土壤调节植被指数(*OSAVI*),所用波长为 670 nm 和 800 nm,计算公式:

$$OSAVI = [(1 + 0.16) \times (R_{800} - R_{670})] / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$$

式中 R_{800} 和 R_{670} 分别为 800 和 670 nm 光谱反射率。

B. 目标产量(*PGY*):基于本地气象、土壤数据等,由 CERES-Wheat 生长模型模拟冬小麦变量追氮的目标产量。

C. 冬小麦一生氮素总需求量(kg/ha): $N = 0.0576 PGY - 131.08$ ($R^2 = 0.6491$) (3)

D. 用冬小麦 Feek5(拔节期) *OSAVI* 的测定值($OSAVI_{IS}$)计算已吸收氮量(*PFNU*, kg/ha)

$$PFNU = 206.89 OSAVI_{IS} - 120.4$$

$$(R^2 = 0.7915) \quad (4)$$

E. 确定追氮量(尿素 kg/ha):追肥量 = (总需求量 - *PFNU*)/0.46/0.5 (5)

1.2.4 模型简介 CERES-Wheat 模型是农业技术转移决策支持系统(Decision Support System for Agrotechnology Transfer, DSSAT)中作物生长模型的模块之一,包括土壤水分平衡、N 素平衡、小麦物候期和生长发育等,可模拟和预测不同气候、土壤、品种和肥水管理方案的小麦生长发育和产量形成。模型用 7 个遗传参数描述小麦品种的特征。使用时,首先要确定新品种的遗传参数,然后设定播期、播量、肥水运筹和环境条件进行模拟试验和分析。

1.2.5 资料来源 运行模型需输入作物、气象与土壤数据。其中,作物数据来自 2005~2006 年国家农业信息化工程技术研究中心精准农业试验基地的变量施肥试验。试验地土壤类型为潮土,土壤中硝态氮含量 3.00~15.04 mg/kg,全氮含量 0.094%~0.098%,有机质含量 1.53%~1.58%,有效磷含量 2.20~21.18 mg/kg,速效钾含量 106.96~132.77 mg/kg;气象数据来自基地的 DAVIS 自动气象站。

1.2.6 品种参数调试 用 CERES-Wheat 模型的 Genotype 模块^[15]逐项确定所选小麦品种的春化作用特性参数、光周期特性参数、灌浆期特性参数、籽粒特性参数、潜在灌浆速率参数、花期潜在单茎穗重参数及出叶间隔特性参数。

2 结果与分析

2.1 CERES-Wheat 模型中叶面积指数(LAI)模型验证

叶面积指数(LAI)是各生育时期群体质量的重要指标。应用 CERES-Wheat 模型对变量施肥区冬小麦 LAI 进行模拟,模拟值与实测值具有较好的一致性(图 1)。图 2 是冬小麦开花期 LAI 模拟值与实测值的相关关系,相关系数 $r=0.9385$,达到极显著线性关系,说明 CERES-Wheat 模型能较好地反映冬小麦的生长状况,能为基于遥感数据的变量施肥模型提供良好的数据支持。

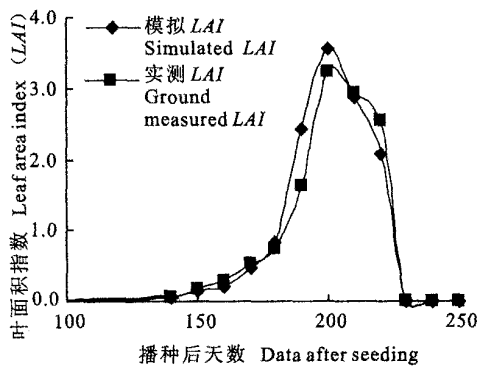


图 1 冬小麦 LAI 的实测值与模拟值的对比分析
Fig. 1 Comparison of LAI between simulated and ground measured

2.2 CERES-Wheat 模型预测目标产量的可行性分析

目标产量预测是变量施肥技术中的一个重要组成部分,是确定最终总吸氮量的关键步骤。从图 3 可以看出,各小区实测产量和目标产量具有

较好的一致性。对实测产量与目标产量做线性相关分析(图 4),达到极显著线性相关($r=0.9572$),CERES-Wheat 模型显示了良好的模拟能力,说明利用 CERES-Wheat 模型预测冬小麦变量施肥决策中的目标产量是可行的。

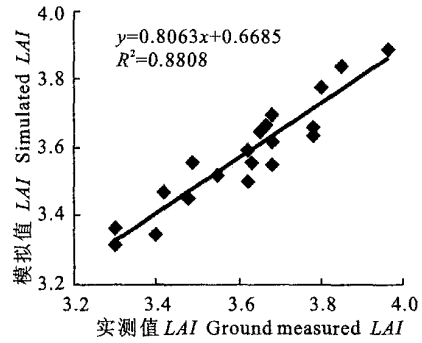


图 2 开花期 LAI 实测值与模拟值的相关性
Fig. 2 Relationship between simulated LAI and ground measured LAI at flowering stage

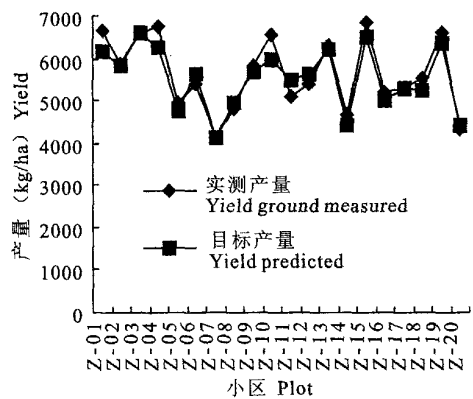


图 3 变量区目标产量与实测产量的比较
Fig. 3 Comparison between simulated and ground measured of variable-rate treatment

2.3 冬小麦拔节期冠层光谱指数与作物氮素营养的关系

通过检测植物冠层光谱反射特性可以了解作物的氮素营养状况^[16],因此我们对冬小麦拔节期作物的吸氮量与 OSAVI 测定值进行回归分析(图 5)。结果显示,决定系数 $R^2=0.7579$,说明用拔节期的 OSAVI 测定值可以很好地预测此时期冬小麦总的吸氮量。

2.4 变量施肥对冬小麦产量的影响

表 1 显示,变量施肥的产量高于对照区,变异系数降低。表明变量追肥后,小区各植株均得到合适的氮供应,形成较为一致的群体长势,为光合作用提供了一个良好的基础,使更多干物质的积累成为可能,最终导致产量高于对照区。对照区由于施肥量均一,并没有把各个小区的长势差异充

分考虑进去,最终各小区产量的差别仍比较明显。

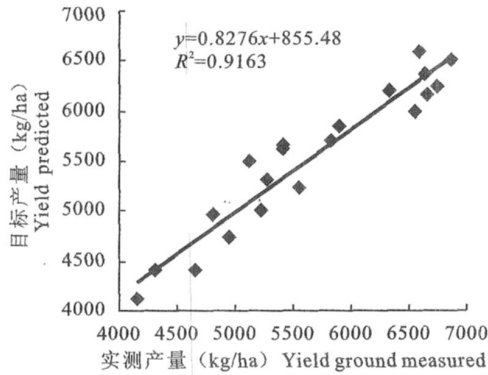


图 4 变量区目标产量与实测产量的相关性
Fig. 4 Relationship between yields of simulated and ground measured one in variable-rate treatment

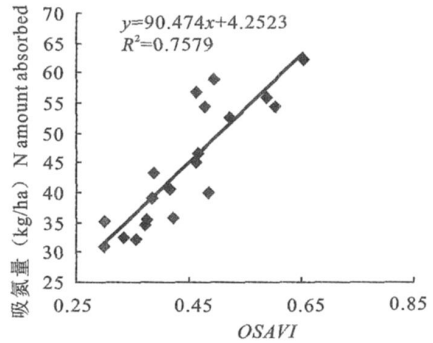


图 5 拔节期 OSAVI 与吸氮量之间的关系
Fig. 5 Relationship between OSAVI and N amount absorbed at elongation stage

表 1 变量区与对照区的产量、标准差和变异系数

Table 1 Mean, standard deviation and coefficient of variable-rate and uniform fertilization treatments

处理 Treatment	平均产量(kg/ ha) Yield	标准差 SD	变异系数(%) CV	最大值(kg/ ha) Maximum	最小值(kg/ ha) Minimum
变量区 Variable-rate	4 473.09	576.55	12.89	5 187.14	3 396.78
对照区 CK	4 029.46	688.26	17.08	5 048.59	2 737.45

表 2 变量区与对照区的籽粒蛋白质含量的差异

Table 2 Statistics of grain protein content in variable-rate and uniform fertilization treatments

处理 Treatment	均值(%) Mean	标准差 SD	变异系数 CV(%)	最大值(%) Maximum	最小值(%) Minimum
变量区 Variable-rate	17.71	0.63	3.58	19.11	16.20
对照区 CK	16.32	0.59	3.59	17.50	15.12

表 3 冬小麦变量施肥经济效益分析

Table 3 Economical benefits of variable-rate N fertilization

处理 Treatment	肥料投入(yuan/ ha) Fertilizer cost			产量收入(yuan/ ha) Gross revenue	纯收入(yuan/ ha) Net revenue	产投比 Yield-cost ratio
	尿素 Urea	磷酸二铵 Diammonium phosphate	合计 Total			
变量区 Variable-rate	392	450	842	6 710	5 868	7.97
对照区 CK	392	450	842	6 044	5 202	7.18

注:各种肥料的单价按照 2005 年实际购买价计算,尿素:2 000 元/吨;磷酸二铵:2 000 元/吨;小麦售价按照:1 500 元/吨计。

Note: The data is accounted with the prices in 2005. The prices of urea, (NH₄)₂HPO₄ and wheat are 2 000, 2 000 and 1 500 yuan/t, respectively.

2.5 变量施肥对冬小麦籽粒蛋白质含量的影响

统计分析结果(表 2)表明,变量区的籽粒蛋白质含量不但在数量上有所提高,并同时降低了空间的变异。说明通过 CERES-Wheat 模型与光谱数据相结合,对冬小麦进行变量追肥,不但考虑了各小区的长势差异,并把当地的气候和土壤等环境条件充分考虑进去,使变量区不但从产量上表现出优势,而且在品质指标(籽粒蛋白质含量)上也表现出了优势。

2.6 变量施肥经济效益分析

进一步分析(表 3)表明,变量施肥的产投比高于对照区,增加了农作物的经济效益。从纯收入来看,变量施肥处理每公顷比对照处理增收 665

元。

3 讨论

地球信息科学的发展为利用遥感技术监测农田作物长势提供了可能,也为作物生长模拟模型在区域上的应用提供了新的途径。本研究探讨了利用冠层高光谱响应与模拟模型相结合的冬小麦变量追氮的可行性,提出了利用光谱数据和 CERES-Wheat 作物生长模型相结合进行变量施肥的理论和方法,建立耦合模型,同时对变量施肥的结果作了分析和评价,为进一步的深入研究奠定了基础。在作物模拟模型与遥感相结合的应用研究方面,国内外学者做了很多的工作。其中王人潮

等研究了水稻叶面积指数及叶片含氮量与光谱变量的相关性,并将光谱参数引入水稻生长模拟模型^[19];Maas探讨了感信息与作物生长模型结合的方法^[20]。宇振荣等利用遥感信息估算了地面植物冠层温度与大气的温度之间的温差,进而计算该时间作物实际蒸腾和水分胁迫系数,将该系数代入作物生长模拟模型,建立遥感-作物生长复合模型,在3S技术的支持下,实现区域水平的作物产量差分析、产量估测和早期预警应用^[21]。在作物生长过程中应用遥感定量反演的生物量数据调整作物生长模型模拟的生物量,优化了农业投入,并可以提高作物产量的预测精度^[22]。虽然遥感信息与作物生长模式结合的研究取得一些成果,但由于开展该类研究的时间较短、研究目的各异以及使用的遥感数据和所用的模型的机理性程度不同等原因,目前在如何将遥感信息应用于模型所需的多个参数和初始条件,如何解决遥感信息和农学和生态学信息连接的时空匹配、信息转换模型与作物生长模型的链接,我们也正在尝试在地理信息技术(GIS)和遥感(RS)技术的支持下,对基于站点的作物模拟模型进行必要的改进,对作物生产进行大范围风格化模拟,并把低精度、低分辨率的数据进行内插,同时把站点数据进行外推,这样把所有的空间数据按网格的形式统一起来,建立模型模拟的统一比例尺和分辨率的空间数据库,为作物模型提供大范围、时间步长一致的数据,甚至建立仅需遥感信息的辐射传输模型,再由作物模型模拟出作物所需的养分数据。根据模拟结果进行精准变量施肥方面进行有益的探讨。

参考文献:

- [1] 霍中洋, 葛鑫, 张洪程, 等. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 449 - 454.
- [2] 朱新开, 郭文善, 周君良, 等. 氮素对不同类型专用小麦营养和加工品质调控效应[J]. 中国农业科学, 2003, 36(6): 640 - 645.
- [3] 王月福, 姜东, 于振文, 等. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5): 513 - 520.
- [4] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 16.
- [5] Mass J S. Use of remotely - sensed information in agricultural crop growth models[J]. Ecological Modeling, 1988, 41: 241 - 268.
- [6] Lab H, Hoogenboom G, Calilixie J P, *et al.* Using crop simulation models and GIS for regional productivity analysis[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(1): 17 - 184.
- [7] Paz J O, Batchelor W D, Babcock B A, *et al.* Model-based technique to determine variable rate nitrogen for corn[J]. Agricultural Systems, 1999, 61: 69 - 75.
- [8] Nain A S, Dadhwal V K, Singh T P. Use of CERES-Wheat model for wheat yield forecast in central Indo-Gangetic plain of India[J]. The Journal of Agricultural Science, 2004, 142: 59 - 70.
- [9] Reddy K R, Hodgs H F, Mckinion J M. Crop modeling and applicaticongs: a cotton example[J]. Advances in Agronomy, 1997, 59: 225 - 289.
- [10] Engel T, Hoogenboom G, Jones JW, *et al.* AEGIS/ WIN: a computer program for the application of crop simulation models across geographic areas[J]. Agronomy Journal, 1997, 89(6): 919 - 928.
- [11] 金之庆, 葛道阔, 高亮之, 等. 我国东部样带适应全球变化的若干粮食生产对策的模拟研究[J]. 中国农业科学, 1998, 31(1): 51 - 58.
- [12] Cavero J, Plant RE, Shennan C, *et al.* Modeling nitrogen cycling in tomato-safflower and tomato-wheat rotating[J]. Agricultural System, 1999, 60: 123 - 135.
- [13] Lukina EV, Freeman KW, Wynn KJ, *et al.* Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yields and plant nitrogen uptake[J]. Plant Nutrition, 2001, 24: 885 - 898.
- [14] 梁红霞, 赵春江, 黄文江, 等. 利用光谱指数进行冬小麦变量施肥的可行性及效益分析[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(5): 469 - 473.
- [15] Gordon Y, Tsuji, Goro Uehara, *et al.* DSSAT3 User, s Guide[M]. Hawaii: The University of Hawaii, 1994. 1 - 3.
- [16] Filella I, Serrano L, Serra, J, *et al.* Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis[J]. Crop Science, 1995, 35(5): 1400 - 1405.
- [17] 王人潮, 王珂. 水稻单产遥感估测建模研究[J]. 遥感学报, 1998, 2(2): 119 - 124.
- [18] Maas, S. J. Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models[J]. Ecological Modelling, 1988, 41: 247 - 268.
- [19] 宇振荣, Driessen P M. 基于遥感反演作物冠层温度的作物生长模拟和预报[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(增刊): 71 - 75.
- [20] Bouman B A M. Linking physical remote sensing models with growth simulation models, applied for sugar beet[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(14): 2565 - 2581.
- [21] Bouman B A M. Crop modeling and remote sensing for yield prediction. Netherlands[J]. Journal of Agricultural Science, 1995, 43: 143 - 161.
- [22] Mass S J. Within-season calibration of modeled wheat growth using remote sensing and field sampling[J]. Agronomy Journal, 1993, 85: 669 - 672.