

黄淮豫东平原冬小麦节水高产水肥耦合 数学模型研究*

孟兆江 刘安能 吴海卿 杨传福

(中国农业科学院农田灌溉研究所)

贾大林 司徒淞

(中国农科院) (中国水稻研究所)

摘要 在人工控制试验条件下,采用二次通用旋转组合设计,对影响冬小麦产量的N、P和水三因素的综合效应进行了研究。结果表明,水肥配合存在阈值反应,这个阈值是:N 90~240 kg/hm², P₂O₅ 56.25~221.25 kg/hm²,灌溉定额 1500~3750 m³/hm²。低于阈值下限水平, N、P 无明显增产效应,水分利用效率(WUE, water use efficiency)低;高于阈值上限,水肥互作效应呈减小趋势;在阈值范围内,水肥互作增产效应显著。增加N、P投入和适宜限量供水是提高水份利用效率的重要途径。通过对所建数学模型的计算机模拟,提出了不同决策目标和水文年型的水肥优化方案。

关键词 冬小麦 节水高产 水肥耦合 数学模型 阈值

豫东平原位于黄淮平原东南部,属半湿润易旱季风气候区。多年平均降水 711.9 mm, 年际降水差异大,最大降水 1189.9 mm,最小降水 322.7 mm;年内降水分布不均,6~8月降水集中,占全年 56%,冬春少雨雪,分别占全年的 5.9%和 18.4%,年潜在蒸发量 1717 mm,为同期降水的 2.5倍。冬小麦生育期降水 200~260 mm,仅能满足小麦需水量的 40%~60%。土壤有两合土、沙质土和淤土,其中以沙质土为主,占 68%,沙质土保肥保水能力差。水资源不足,土壤贫瘠,土壤水分和养分是农业生产的主要限制因子。因此,研究它们之间的相互关系及其对作物生长发育和产量的影响,对如何在水分受限制的条件下,合理使用水肥,提高水分利用效率和作物产量具有重要意义。另一方面,在作物水肥关系研究中,已有研究多限于产量单项目标的追求。本项研究根据豫东平原的生态和生产条件,从节水农业系统出发,在建立产量模型的同时,也建立了经济效益、水分利用效率和氮素生产效率等多种模型,寻求综合目标下的水肥优化方案,以为豫东平原冬小麦节水节肥高产高效栽培提供科学依据。

1 试验方法

水肥耦合试验在商丘试验区水池铺试验场移动式防雨棚水泥测坑内进行。测坑深 1 m。

收稿日期: 1997-08-29 1997-11-28 修订

* 国家“八五”科技攻关项目(85060107)

孟兆江,助理研究员,河南省新乡市东牧村 中国农科院农田灌溉研究所, 453003

选取施磷量、施氮量和灌溉定额三个因素, 采用三因子五水平二次通用旋转组合设计^[11](表 1), 共 20 个小区, 小区面积 2.25 m^2 , 随机排列。试验测坑土质为粉砂壤土, 有机质 0.5% , 全氮 8.09% , 碱解氮 34.02 mg/kg , 速效磷 4.8 mg/kg 。试验用氮肥为尿素和磷酸二铵, 其中 60% 底施, 40% 追施, 于返青期施入; 磷肥采用磷酸二铵和过磷酸钙, 全部底施; 灌水方式为地下塑料硬管输水和地面橡胶管灌溉, 水表计量。所有小区平均基施农家肥 $45 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。小麦品种为当地推广良种豫麦 21。土壤水分采用中子仪和土钻法分层测定。

表 1 水肥耦合试验因子水平及编码(时间: 1992~ 1995 年)

Tab. 1 Test index of water-fertilizer interaction

因 素	因子水平 编 码					变化间距
	- 1.682	- 1	0	+ 1	+ 1.682	
X_1 ($\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	0	56.25	138.75	221.25	247.50	82.5
X_2 ($\text{N}/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	39	90.0	165	240	291	75.0
X_3 ($\text{水}/\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	750	1500	2625	3750	4500 m	1125

2 结果分析

2.1 数学模型的建立和统计分析

依据二次通用旋转组合设计原理, 将目标函数结果运算, 求得四个目标函数的数学模型, 并以产量模型为主进行分析, 产量模型为

$$Y = 6487.209 + 242.6355X_1 + 310.5735X_2 + 400.9305X_3 + 19.518X_1X_2 - 13.9695X_1X_3 + 236.157X_2X_3 - 11.9325X_1^2 - 20.3055X_2^2 - 33.609X_3^2 \quad (1)$$

对产量函数模型进行方差分析, 结果 $F_1 = 3.5749 < F_{0.05}(5, 5)$ 失拟项不显著, 表明其它因素对试验结果影响很小; $F_2 = 33.68 > F_{0.01}(9, 10)$, 回归项极显著, 说明回归方程与实际情况的拟合性很好, 用以预报具有较高可靠性。

对方程各项回归系数的检验结果表明: 施磷量(X_1), 施氮量(X_2), 灌水量(X_3)一次项回归系数均达极显著水平, 说明三因素对产量均有显著影响, 其中以灌水量对产量影响最大。在交互项中, 施氮量和灌水量(X_2X_3)的回归系数达极显著水平, 说明氮肥与灌水量间有明显交互作用。其余各项回归系数也都达到不同程度显著水平。

2.2 数学模型的解析和寻优

2.2.1 主因子效应

主因子分析旨在探明各因素对产量影响的主次地位。因素水平经无量纲线性编码代换, 偏回归系数已标准化, 可直接依其 (b_i) 绝对值大小判断因素的重要程度, 其正负号表示因素的作用方向。综合考虑 1、2 次项偏回归系数和 t 值, 试验因素对产量影响大小的顺序是: 灌水量 > 施 N 量 > 施磷量。

2.2.2 单因子效应

目标函数是各因子共同作用的结果。对模型(1)采用“降维”法可解析出单因子在其它控制因子居一定水平时的效应, 相当于做多组单因子试验。

将控制因子固定在 0 水平, 得一组考察因子与产量函数的一元回归子模型:

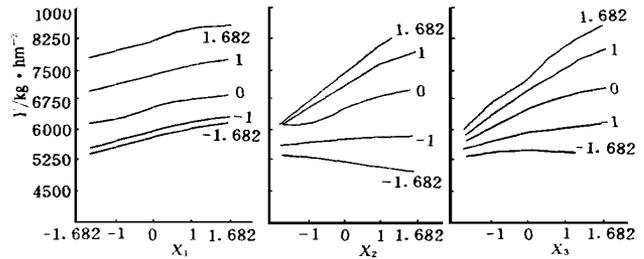
$$Y_1 = 6487.5 + 242.70X_1 - 12.00X_1^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 6487.5 + 310.5X_2 - 20.25X_2^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 6487.5 + 400.95X_3 - 33.60X_3^2 \quad (4)$$

同法可得控制因子固定在-1.682、-1、1和1.682水平时的四组回归子模型。将五组降维结果按考察因子(磷、氮、水)分别作出图1a、b、c,可直观地看出各考察因子在控制因子固定于不同水平时效应变化规律。

图1a表明,不论其它因子固定在什么水平,小麦产量均随施磷量的增大而增加,且增加幅度基本一致,但当施磷量自身水平编码值增大至+1(即 P_2O_5 221.25 kg/hm²)时,增产幅度呈明显减小趋势。图1b显示,当控制因子处于低水平(-1.682和-1)时,产量随施氮量的增大而降低或无明显增产;当控制因子居较高水平(0,1和1.682)时,产量随施氮量的增大而显著增加,且增产幅度随控制因子固定水平的提高而增大,但当施氮量自身水平编码值增大至+1(N 240 kg/hm²)时,增产效应呈减小趋势。这说明在低磷和低土壤湿度时,增施氮肥不增产甚至减产,在磷和水分处于较高水平时增施氮肥增产显著。可以认为,与氮肥配合的磷、水阈值下限编码是-1,即施磷(P_2O_5)量为56.25 kg/hm²,灌水量为1500 m³/hm²,低于这个阈值下限水平,施氮素无增产效果甚至减产。这一点值得在生产实践中注意。由图1c效应曲线看出,当控制因子固定在低水平(-1.682)时,在一定范围(-1.682~0)内产量随浇水量增加略呈增加趋势,当灌水量编码值超过0水平时,产量呈下降趋势。随控制因子固定水平的提高(由编码值>-1始,即 P_2O_5 56.25 kg/hm²,N 90 kg/hm²),产量随灌水量增大而增加,且灌水效应愈来愈显著,但增产幅度随浇水量自身增大而变小。这说明在低磷、低氮水平,浇水增产不显著,如果过量浇水(2625 m³/hm²)甚至减产;在中、高磷、氮水平,在一定范围浇水增产效应显著,水分利用效率高,但当浇水量超出一定水平(本试验为1水平即3750 m³/hm²)时,增产幅度减小,水分利用效率降低。因此,欲提高水分利用效率,应注意培肥地力和提高氮、磷化肥的投入水平,同时注意限量供水。综上所述可以认为,N、P、水配合的阈值编码是-1~+1,即施氮(N)量为90~240 kg/hm²,施磷(P_2O_5)量为56.25~221.25 kg/hm²,灌水量为1500~3750 m³/hm²。低于阈值下限水平,N、P无明显增产效应,水分利用效率低;高于阈值上限水平,水肥互作增产效应呈减小趋势;在阈值范围,水肥互作增产效应显著。



a 施P量效应 b 施N量效应 c 灌水量效应

图1 单因子效应

Fig 1 Single-factor effect

2.2.3 双因子效应分析

本模型有三项两两相交的双因子组合。根据回归系数 t -测验结果和生产实践的需要,选择施氮量(X_2)与灌水量(X_3)建立双因子与目标函数的二元回归子模型。

$$Y = 6487.5 + 310.5X_2 + 400.95X_3 + 236.10X_2X_3 - 20.25X_2^2 - 33.60X_3^2$$

根据子模型作双因子效应分析三维图(图2)。曲面图上各点的高度代表氮、水一定水平

组合时的产量。当控制因子固定于某一水平时, 产量随另一因子水平的变化而变化。从图 2 看出, 在施氮量水平较低的情况下, 不同浇水量间产量差异不明显(变异系数最小), 随着施氮量水平的提高, 由编码值 0 开始, 浇水量对产量的影响越来越明显(变异系数逐步增大)。在低水量情况下, 不同施氮量间产量差异不明显(变异系数小), 随着浇水量的增加(也由编码值 0 开始), 施氮增产效果越来越明显(变异系数逐步增大)。这表明, 水分利用效率的提高需要编码值 0(纯 N 165 kg/hm²) 以上的中、高水平氮素环境, 氮素利用效率的提高同样需要编码值 0(灌水量 2625 m³/hm²) 以上的中高水平的水分环境, 这可视作 N、水配合的“临界值”。

2.2.4 数学模型寻优

根据已建立的产量数学模型, 在 -1.682 X_i 1.682 ($i = 1, 2, \dots, 5$) 范围, 取步长为 0.4205 进行计算机模拟^[21] ($9^3 = 729$), 寻求不同目标产量下的最优水肥组合方案。通过模拟求得 729 个组合方案, 其中产量 3750~5250 kg/hm² 有 7 个组合; 产量在 5250~6750 kg/hm² 有 522 个组合, 占模拟组合总数的 71.6%; 产量在 6750~7500 kg/hm² 有 140 个组合(占模拟组合总数的 19.2%); 产量 7500 kg/hm² 有 60 个组合(占模拟组合总数的 3.29%)。不同决策目标和水文年型的水肥优化方案如表 2。

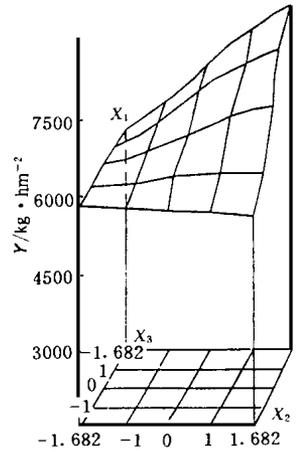


图 2 N、水双因子效应
Fig 2 Intereffection of N and water

表 2 不同决策目标和水文年型的水肥优化方案

Tab 2 Optimum design with different compositions of fertilizer and water

产量目标 /kg · hm ⁻²	N /kg · hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg · hm ⁻²	灌溉定额/m ³ · hm ⁻²			WUE /kg · m ⁻³ /元 · hm ⁻²	净收益
			湿润年	平均年	干旱年		
5250~6750	132.8~146.1	121.5~136.7	0	150.0	150~300	2.05~2.09	2571.0
6750~7500	207.3~223.2	144.5~173.7	202.5~435.0	1087.5~1320	1357.5~1593	1.68	2839.5
7500	254.6~270.0	170.6~209.9	804~1035	1689~1920	1959~2790	1.49	3097.5
最高产量	291.0	277.5	1320	2205	2475	1.32	3280.5
高产高效	291.0	69.3	1320	2205	2475	1.30	3448.5

注: 表中 WUE 为水分利用效率(water use efficiency), 是指作物消耗单位水分所达到的经济产量。

3 结论

1) 试验发现, N、P、水合理配合有一个阈值。这个阈值是: N 90~240 kg/hm², P₂O₅ 56.25~221.25 kg/hm², 灌溉定额 1500~3750 m³/hm²。低于这个阈值下限水平, N、P 无明显增产效应, 水分利用效率(WUE)低, 高于阈值上限水平, 水肥互作效应呈减小趋势; 在阈值范围, 水肥互作增产效应显著。

2) 在低 N、P 水平, 浇水增产效果不明显, 若灌溉定额超过 2625 m³/hm², 甚至呈减产趋势; 在中高 N、P 水平, 浇水增产效果显著, WUE 值高, 但当灌溉定额超出 3750 m³/hm² 时, 增产幅度减小, WUE 呈降低趋势。因此认为, 培肥地力和提高 N、P 肥料的投入水平, 同时注

意适宜的限量供水是提高 WUE 的重要途径。

3) 通过试验建立的数学模型, 达到显著水平, 说明模型与实际情况拟合性很好。经过计算机对模型进行模拟所提出的不同决策目标和水文年型的水肥优化方案, 可用于豫东平原冬小麦节水高产高效栽培, 对黄淮海平原水资源不足和土壤贫瘠地区也具适用性。

参 考 文 献

- 1 丁希泉 农业应用回归设计. 长春: 吉林科学技术出版社, 1986 123~ 187
- 2 陈国良 微机应用与农业系统模型 西安: 陕西科学技术出版社, 1985

Mathematical Model of Water-Fertilizer Interaction for Water-Saving and High-Yield Winter Wheat in East Area of Henan Province

Meng Zhaojiang Liu Anneng Wu Haiqing Yang Chuanfu

(Farmland Irrigation Research Institute, CAA S, Xinxiang)

Jia Dalin

Si Tusong

(Chinese Academy of Agricultural Science) (China National Rice Research Institute)

Abstract Under the condition of control test, by using the quadratic general spinning design, the comprehensive effects of N, P fertilizers and water on winter wheat yield were studied. The results showed that the threshold value existed in water-fertilizer interaction. The threshold value of application amount of N and P_2O_5 are 90~ 240 kg/hm² and 56.25~ 221.25 kg/hm² respectively, and irrigation quota is 1500 ~ 3750 m³/hm². If the application amount of N, P_2O_5 and water is below the threshold value respectively, the effect of N and P_2O_5 on winter wheat will be unremarkable, and the water use efficiency will be low. Otherwise, the effect of water-fertilizer interaction will be remarkable. It is a significant way for improving the water use efficiency to increase application of N and P fertilizers and limit the water use quantity suitably. A mathematical model of winter wheat yield was established based on the results of experiment and simulation, the optimal scheme of water-fertilizer interaction under various objectives was worked out.

Key words winter wheat, water-saving and high yield, water-fertilizer interaction, mathematical model, threshold value