

文章编号: 1005-0906(2007)01-0103-04

风沙半干旱区春玉米水肥耦合 产量效应研究初报

尹光华^{1,2}, 陈温福¹, 刘作新², 舒乔生², 张自坤²

(1. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110161; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要: 采用 312-D 最优饱和设计, 开展了春玉米水肥耦合作用田间试验研究。结果表明, 在试验年施氮量对产量影响最大, 灌溉量次之, 施磷量最小。两因子耦合的产量效应类型不同, 氮与磷耦合以及磷与水耦合为相互替代作用, 而氮与水耦合为相互促进作用, 且耦合作用效应大小顺序为氮与磷耦合 > 磷与水耦合 > 氮与水耦合。获得最高产量 9 374.0 kg/hm² 的施氮量为 281.7 kg/hm²、施磷量为 127.1 kg/hm²、灌溉量为 75.2 mm。获得最高利润 6 023.5 元/hm² 的施氮量为 211.2 kg/hm²、施磷量为 110.5 kg/hm²、灌溉量为 24.1 mm。

关键词: 春玉米; 水肥耦合; 数学模型; 产量效应**中图分类号:** S513.062**文献标识码:** A

Initial Research on Yield Effect of Nitrogen, Phosphorus and Water Coupling on Spring Maize in Semi-arid of Blown Soil

YIN Guang-hua^{1,2}, CHEN Wen-fu¹, LIU Zuo-xin², SHU Qiao-sheng², ZHANG Zi-kun²(1. *Agronomy College of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161;**2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)*

Abstract: With 312-D optimized saturation design, field experiment was conducted to study yield effect of water and fertilizer coupling on spring maize. Results showed that nitrogen quantity was the chief factor to affect spring maize yield, irrigation quantity was the second factor, phosphorus quantity was the third. The type of interaction between nitrogen and phosphorus, phosphorus and water was substitutive for increasing yield, but that was positive between nitrogen and water. The effect order of interactions was nitrogen and phosphorus coupling > phosphorus and water coupling > nitrogen and water coupling. Amounts for highest yield 9 374.0 kg/ha were nitrogen 281.7 kg/ha, phosphorus 127.1 kg/ha and water 75.2 mm. And amounts for highest profit 6 023.5 yuan/ha were nitrogen 211.2 kg/ha, phosphorus 110.5 kg/ha and water 24.1 mm

Key words: Spring maize; Water and fertilizer coupling; Mathematics model; Yield effects

灌溉和施肥是影响半干旱区作物产量的主要因素。农业生产中水肥应用研究一直受到人们的重视。已有的研究多集中于水、肥单因素与产量关系的研究。但作物对水分和养分的传输、吸收往往同时进行, 而且水分和养分对作物生长发育起着交互影响。

近来的研究加强了水分和养分配合应用对作物产量的影响。本研究以辽宁西部风沙半干旱区春玉米为研究对象开展水肥耦合产量效应研究, 为春玉米生产水肥管理提供理论依据和技术参考。

1 供试材料及方法

1.1 试验区概况

试验设在阜新蒙古族自治县。全县年均日气温 7.2℃, 作物生育期平均气温 20.2℃, ≥10℃积温 3 298.3℃·d, 无霜期 144 d, 生理辐射量 284.3 kJ/cm², 年日照时数 2 865.5 h, 生育期日照时数 1 295.8 h。年均降水量 500 mm, 蒸发量 1 847.6 mm, 干燥度

收稿日期: 2006-05-20**基金项目:** 国家 863 计划节水农业重大专项(2002AA2Z4321); 国家粮食丰产科技工程“玉米旱作节水与保护性耕作技术研究”专题(2004BA520A01-5)**作者简介:** 尹光华(1972-), 男, 副研究员, 博士后, 主要从事作物节水栽培研究。E-mail: ygh006@163.com

Tel: 024-83970365 13940513969

约 3.7。

1.2 试验设计

试验设氮、磷、水 3 个因子,采用 312-D 最优饱和设计,共 12 个处理组合(表 1),重复 3 次,随机排

列。小区面积 36 m²。氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥用磷酸钙(含 P₂O₅ 13%)。氮肥按基肥与追肥为 1:1 施用,磷肥全部作基肥,灌浆期沟灌。

表 1 试验因子水平及编码值
Table 1 Testing factor level and coding value

处 理 Treatment	水平 Level			水肥用量 Dosage of water and fertilizer		
	X ₁ (N)	X ₂ (P ₂ O ₅)	X ₃ (水)	N(kg/hm ²)	P ₂ O ₅ (kg/hm ²)	水(mm)
1	0	0	2	225	135.00	90.0
2	0	0	-2	225	135.00	0.0
3	-1.414	-1.414	1	66	39.54	67.5
4	1.414	-1.414	1	384	39.54	67.5
5	-1.414	1.414	1	66	230.46	67.5
6	1.414	1.414	1	384	230.46	67.5
7	2	0	-1	450	135.00	22.5
8	-2	0	-1	0	135.00	22.5
9	0	2	-1	225	270.00	22.5
10	0	-2	-1	225	0.00	22.5
11	0	0	0	225	135.00	45.0
12	-2	-2	-2	0	0.00	0.0

2 结果与分析

2.1 产量模型的建立

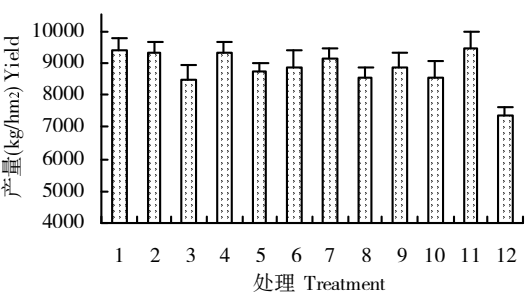


图 1 不同处理玉米产量结果
Fig.1 Corn yield of different treatments

利用产量结果,以二次最优设计进行回归模拟,得到产量(Y)与氮(X₁)、磷(X₂)、水(X₃)3 因子的回归模型。

$$Y=9337.4414+156.1791X_1+15.3359X_2+22.9499X_3-84.7375X_1X_2+13.5541X_1X_3-55.2639X_2X_3-326.6435X_1^2-355.3495X_2^2-12.3665X_3^2 \quad (1)$$

对模型(1)进行显著性检验: $F_{回}=6.699>F_{0.01(10,20)}=3.37$,差异极显著,说明回归模型能够很好地反映实际情况。分析理论产量 Y 与实际产量 y 的相关性,两者呈极显著直线正相关: $Y=1.6666y-6596.3(R^2=0.952)$,拟合程度良好,说明模型具有较高可靠性。

2.2 试验因子的产量效应分析

2.2.1 主因子效应分析

在模型(1)的构建过程中,应用的是无量纲线性编码代换,且各一次项系数与交互项、平方项的回归系数间都是不相关的,所得偏回归系数已标准化。因此,可以直接用模型中偏回归系数绝对值大小判断试验因子的重要程度,系数正负号表示因子作用方向。分析产量模型,其主效应表现为:

(1)一次项 X₁、X₂、X₃ 系数均为正值,说明在试验设计范围内,氮、磷、水单因子都有增产效应,且由系数绝对值大小判断出 3 因子对产量影响顺序为氮>水>磷。可见,在试验区自然降水条件下施氮量对产量影响居于第 1 位,灌溉居于第 2 位,而施磷量作用则最弱。

(2)交互项 X₁X₃ 系数为正值,说明氮水耦合对产量的增加具有相互促进作用,即高施氮量需要有高灌溉量配合才能够获得高产,反之亦然。X₁X₂ 和 X₂X₃ 系数均为负值,说明氮磷耦合以及磷水耦合对产量提高具有相互替代作用。

(3)二次项 X₁²、X₂²、X₃² 系数均为负值,说明产量随施氮量、施磷量和灌溉量增加均呈开口向下的抛物线趋势变化。

2.2.2 单因子效应分析

采用降维法,将产量模型中两个因子固定在零

水平,另外一个因子作变量,得到一组一元二次产量回归子模型。根据回归子模型作对应的单因子产量效应如图 2。

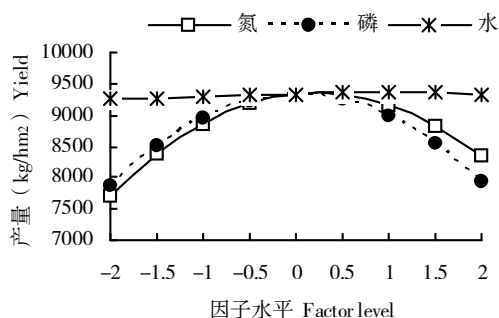


图 2 试验因子的产量效应

Fig.2 Yield effect of experimental factors

图 2 表明,产量随施氮量、施磷量或灌溉量的增加均呈开口向下的抛物线趋势变化,存在产量最高点。计算得到获最高产量的各单因子水平分别为 $X_1=0.2391$ 、 $X_2=0.0216$ 、 $X_3=0.9279$,对应的实际水肥用量为施氮量 251.9 kg/hm^2 、施磷量 136.5 kg/hm^2 、灌溉量 65.9 mm ,产量分别为 9356.1 、 9337.6 和 9348.1 kg/hm^2 。在产量最高点以前,产量随施肥量的增加而递增,超过高点后则递减,递增和递减幅度是施磷量大于施氮量。而随灌溉量的增加,在最高点以前产量缓慢递增,到最高点以后则缓慢下降。

2.2.3 交互效应分析

氮、磷、水 3 因子对产量的影响既具有单独作用,同时,由于 3 因子中任一因子对产量作用必然受另外两因子的影响,如灌溉量增加可提高施入土壤中氮素营养的有效性,促进植株对养分的吸收,有利于产量提高。在土壤墒情较差且灌溉量较低时,过量施氮会加剧土壤干旱,影响植株生长发育,导致减产。当灌溉量高时,磷肥的增产作用则不能充分发挥。所以,氮、磷、水对植株生长发育和最终产量形成既存在相互促进的正向互馈作用,也存在相互抑制的负向互馈作用。

(1)氮与磷耦合作用的产量效应。固定灌溉量因子为零水平,得到氮与磷耦合作用产量效应模型。当施磷量固定时,产量随施氮量的增加呈先增加后降低的变化趋势;当施氮量固定时,产量随着施磷量增加亦呈先增加后降低的变化趋势,均存在产量最高点。在施磷量较低时,需要较高施氮量配合才能得到较高产量;在施氮量较低时需要较高施磷量配合才可得到较高产量。说明对产量的提高,氮和磷一个因子施用量的不足可由另一因子施用量的增加来弥补

或替代,表现出明显的交互替代效应。

(2)氮与水耦合作用的产量效应。固定磷因子为零水平,得到氮与水耦合作用的产量效应模型。当灌溉量固定时,产量随施氮量增加呈先增加后降低的变化趋势;当施氮量固定时,产量随灌溉量增加呈缓慢的先增加后降低的变化趋势;在灌溉量较低或过高时,较低施氮量就可使产量达到最高点。可见,氮水耦合对产量的影响存在交互促进作用。施氮量对产量的影响明显大于灌溉量,可能是由于玉米生长前期降水量多,4 月中旬至 6 月下旬降水量为 242.8 mm ,占生育期降水量的 50.9% ,基本满足了植株生长发育对水分要求,因而灌水效应表现得不十分显著。在灌溉量和施氮量最低时产量最低,随灌溉量和施氮量的同时提高产量迅速增加,达到最高产量 9369.1 kg/hm^2 后,继续增加灌溉量和施氮量产量则迅速下降。可见,灌溉量和施氮量同时变化对产量影响更大。

(3)磷水耦合作用的产量效应与氮磷耦合作用效应相似。

2.2.4 最高产量灌溉施肥优化方案

由多元函数极值存在的必要条件可知,利用模型(1)获得产量极大值的条件是产量(Y)对氮(X_1)、磷(X_2)、水(X_3)3 因子一阶偏导数均为零。得三元一次偏导数方程组:

$$Y'_{X_1}=156.1791-653.287X_1-84.7375X_2+13.5541X_3=0$$

$$Y'_{X_2}=15.3359-84.7375X_1-710.699X_2-55.2639X_3=0$$

$$Y'_{X_3}=22.9499+13.5541X_1-55.2639X_2-24.7333X_3=0$$

解方程组得 $X_1=0.2820$ 、 $X_2=-0.1165$ 、 $X_3=1.3427$,其对应的水、肥实际用量为施氮量 281.7 kg/hm^2 、施磷量 127.1 kg/hm^2 、灌溉量 75.2 mm ,此时产量最高,达 9374.0 kg/hm^2 。

2.2.5 经济高效施肥灌溉优化方案

取得最高利润的条件是水、肥投入量以经济最佳投入量为上限,即边际产值等于边际成本,边际利润等于零。设玉米产量 $Y (\text{kg/hm}^2)$,单价 1.1 元/kg ,氮肥(纯 N)单价 $q_1=3.91 \text{ 元/kg}$,磷肥(纯 P_2O_5)单价 $q_2=5.77 \text{ 元/kg}$,灌水单价(电费+用工费等) $q_3=0.3 \text{ 元/m}^3$ (1 mm 相当于灌溉量 $10 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),令:

$$Y'_{X_1}=156.1791-653.287X_1-84.7375X_2+13.5541X_3=3.91/$$

$$1.1 \times 112.5 \times (R+1)=399.8864 \times (R+1)$$

$$Y'_{X_2}=15.3359-84.7375X_1-710.699X_2-55.2639X_3=5.77/$$

$$1.1 \times 67.5 \times (R+1)=354.0682 \times (R+1)$$

$$Y'_{X_3}=22.9499+13.5541X_1-55.2639X_2-24.7333X_3=0.3/$$

$$1.1 \times 22.5 \times 10 \times (R+1)=61.3636 \times (R+1)$$

式中 R 为边际利润。当 $R=0$ 时的灌溉、施肥投入量可获得最高利润。解方程组得 $X_1=-0.345\ 3$ 、 $X_2=-0.363\ 0$ 、 $X_3=-0.931\ 2$, 对应实际灌溉施肥量为施氮量 $211.2\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、施磷量 $110.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、灌溉量 $24.1\ \text{mm}$, 利润为 $7\ 598.5\ \text{元}/\text{hm}^2$ 。此利润仅指玉米产值扣除施肥和灌溉的经费投入, 非纯利润。要得到纯利润还需扣除种子购置费 $450\ \text{元}/\text{hm}^2$ 、人工管理费 $675\ \text{元}/\text{hm}^2$ 、机耕费 $450\ \text{元}/\text{hm}^2$, 最终获得最高纯利润 $6\ 023.5\ \text{元}/\text{hm}^2$ 。

3 结 论

(1) 氮、磷、水对春玉米产量有重要影响, 其作用大小顺序为氮 > 水 > 磷。

(2) 在试验年生育期降水较多时, 氮、磷、水耦合作用的类型不同, 对产量效应也不同。其中, 氮与磷耦合以及磷与水耦合对产量的作用均为相互替代, 而氮与水耦合则为相互促进。交互作用的产量效应大小顺序为氮与磷耦合 > 磷与水耦合 > 氮与水耦合。只有合理的氮、磷、水耦合, 才能发挥最佳交互耦合效应, 获得最高产量。

(3) 水肥优化管理方案结果, 获得最高产量 $9\ 374.0\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 的施氮量为 $281.7\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、施磷量 $127.1\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、灌溉量 $75.2\ \text{mm}$ 。获得最高纯利润 $6\ 023.5\ \text{元}/\text{hm}^2$ 的施氮量为 $211.2\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、施磷量 $110.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、灌溉量 $24.1\ \text{mm}$ 。

(4) 研究结论与在同类地区春小麦多年试验结论有较大差异, 是因为水肥耦合对作物产量效应受降水年型的影响, 因而需要作不同降水年型玉米产量效应研究, 以便客观地揭示水肥耦合作用的玉米产量效应机理。

参考文献:

- [1] Gan Y T, Lafond G P, May W E. Grain yield and water use: Relative performance of winter vs. spring cereals in east-central Saskatchewan [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2000, 80: 533-541.
- [2] Belder P, Bouman B A M, Cabangon R, et al. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia [J]. Agricultural Water Management, 2004, 65: 193-210.
- [3] Wang W Y, Luo W, Wang Z R. Surge flow irrigation with sediment-laden water in northwestern China [J]. Agricultural Water Management, 2005, 75: 1-9.
- [4] 张效朴, 李伟波. 吉林黑土上肥料施用量对玉米产量及肥料利用率的影响 [J]. 玉米科学, 2000, 8(2): 70-74.
- [5] 魏自民, 赵 越, 周连仁. 不同施肥措施对风沙土区玉米产量影响数学模型的研究 [J]. 玉米科学, 2003, 11(2): 75-77.
- [6] Li Z Z, Li W D, Li W L. Dry-period irrigation and fertilizer application affect water use and yield of spring wheat in semi-arid regions [J]. Agricultural Water Management, 2004, 65(2): 133-143.
- [7] 尹光华, 刘作新, 李桂芳, 等. 辽西半干旱区春小麦氮磷水耦合产量效应研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 41-45.
- [8] 丁希泉. 农业应用回归设计 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1986.

(责任编辑: 张 英)