

# 辽西半干旱区春小麦氮磷水耦合产量效应研究

尹光华<sup>1,2</sup>, 刘作新<sup>1</sup>, 李桂芳<sup>1</sup>, 梁海军<sup>1,2</sup>, 蔡崇光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了探讨春小麦水肥耦合作用, 采用 312- D 最优饱和设计, 于 2000~ 2003 年在辽西半干旱区开展了水肥耦合对春小麦产量效应的田间试验研究。结果表明: 在该试验条件下水分对产量的作用最大, 磷肥次之, 氮肥最小; 水肥耦合的产量效应是: 中水中肥效应最高, 高水高肥次之, 低水低肥最低; 水肥交互耦合效应大小顺序是: 氮水耦合 > 氮磷耦合 > 磷水耦合。产量超过 4000 kg/hm<sup>2</sup> 的水肥管理方案为: 施氮量 240.1~ 361.2 kg/hm<sup>2</sup>, 施磷量 103.1~ 152.6 kg/hm<sup>2</sup>, 灌水量 337.5~ 450.0 mm。获得最高产量 4610 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量为 315.1 kg/hm<sup>2</sup>, 施磷量 111.1 kg/hm<sup>2</sup>, 灌水量 354.6 mm。

**关键词:** 春小麦; 水肥耦合; 数学模型; 产量效应; 优化方案

**中图分类号:** S512.062; S512.071

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)01-0041-05

## 0 引言

水肥是半干旱区作物产量的两大限制因子<sup>[1]</sup>。但是, 在作物生产中对水肥资源的利用不够合理, 不仅浪费了水肥资源<sup>[2,3]</sup>, 而且严重威胁环境<sup>[4-6]</sup>。因而, 对水肥施用技术的研究受到重视<sup>[1,4,7,16]</sup>。已有的研究大多数集中于水肥单因子与作物产量关系方面<sup>[1,2,4,7,8,11,12]</sup>, 对水肥单因子的产量效应关系研究的较为清楚。然而, 作物生长发育和产量的形成是水肥多因子交互作用的结果, 其关系要比单因子作用复杂得多。为了探讨水肥多因子的产量效应和增产机理, 越来越多的研究工作得以开展<sup>[9,10,13-16]</sup>。本研究采用旱棚控制试验与小区田间试验相结合的方法, 于 1997~ 1998 年开展了旱棚控制试验, 1999~ 2003 年开展了田间小区试验, 对半干旱区春小麦水肥耦合效应进行了较系统的研究。旱棚控制试验和 1999 年的田间小区试验结果已做报道<sup>[15,16]</sup>。本文通过分析田间小区试验结果(2000~ 2003), 深入研究水肥耦合效应, 为半干旱区春小麦生产中水肥管理提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

试验设在辽宁省西部的喀左县示范繁殖场。试验区海拔 450 m, 年均气温 8.5℃, 10 月积温 3350~ 3550℃, 年总辐射量 587.7 kJ/cm<sup>2</sup>, 日照时数 2869.7 h, 多年平均降水量 485.1 mm, 干燥度 1.2 以上。试验区年平均降水量 415.3 mm (2000~ 2003), 作物生育期降水量 165.5 mm。土壤属褐土, 耕层土壤容重 1.16 mg/m<sup>3</sup>, 有机质含量 18.4 g/kg, 全氮 1.12 g/kg, 全磷 2.1 g/kg, 速效氮 40.5 mg/kg, 速效磷 14.0 mg/kg。

收稿日期: 2004-08-09 修订日期: 2004-11-19

基金项目: 国家 863 计划节水农业重大专项阜新示范区(2002AA 2Z4321); 辽宁省“十五”重中之重项目(2001212001)

作者简介: 尹光华(1972-), 男, 博士, 主要从事节水农业方面的研究。沈阳 辽宁省沈阳市文化路 72 号 中国科学院沈阳应用生态研究所, 110016, Email: ygh006@163.com

通讯作者: 刘作新(1954-), 男, 博士, 研究员, 博导, 主要从事土壤物理和节水农业研究。沈阳辽宁省沈阳市文化路 72 号 中国科学院沈阳应用生态研究所, 110016, Email: liuzuoxin@iae.ac.cn

## 1.2 试验设计

采用氮(N)、磷(P)、水(W)3 因子 5 水平 312- D 最优饱和设计<sup>[17]</sup>, 12 个处理组合, 3 次重复, 共 36 个小区, 随机区组排列。小区面积 2 m × 2 m, 小区四周砌砖作隔离墙, 并贴油毡纸和沥青。墙高 160 cm (地上部分高 10 cm, 地下部分高 150 cm), 内侧由上向下水泥抹面至 60 cm 处, 以防止水分和养分侧渗。小麦品种为辽春 10 号。磷肥全部作底肥, 氮肥按基肥与追肥 1:1 施用。播种后 1~ 2 d 内灌水 60 mm, 其余水量在拔节期、孕穗期、灌浆期 3 次等量灌入。试验设计见表 1。

表 1 试验设计表

Table 1 Experiment design

处理	编码水平			物料用量		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	N /kg·hm <sup>-2</sup>	P /kg·hm <sup>-2</sup>	W /mm
1	0	0	2	225	90	450
2	0	0	-2	225	90	60
3	-1.414	-1.414	1	66	27	352.5
4	1.414	-1.414	1	384	27	352.5
5	-1.414	1.414	1	66	153	352.5
6	1.414	1.414	1	384	153	352.5
7	2	0	-1	450	90	157.5
8	-2	0	-1	0	90	157.5
9	0	2	-1	225	180	157.5
10	0	-2	-1	225	0	157.5
11	0	0	0	225	90	255
12	-2	-2	-2	0	0	60

## 1.3 测定项目与方法

全氮采用凯氏法, 全磷用硫酸-高氯酸消化-钼锑抗比色法, 速效氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 用 ZnSO<sub>4</sub>-FeSO<sub>4</sub> 还原直接蒸馏法(mg/100 g 土), 速效磷用 Olsen 法(mg/100 g 土), 有机质用丘林法(即 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 氧化法)。

## 2 结果与分析

### 2.1 回归模型建立

将 2000~ 2003 年春小麦产量平均, 以二次最优设计回归数学模型进行回归模拟<sup>[17]</sup>, 得到产量(Y)与 N(X<sub>1</sub>), P(X<sub>2</sub>), W(X<sub>3</sub>)3 因子的数学回归模型

$$Y = 4373.4702 + 130.9495X_1 + 200.9255X_2 +$$

$$310.6125X_3 - 281.0037X_1^2 - 238.3853X_2^2 - 170.501X_3^2 + 79.1875X_1X_2 + 94.4244X_1X_3 - 14.2245X_2X_3 \quad (1)$$

模型中  $X_1, X_2, X_3$  分别为施氮量(N)、施磷量(P)及灌水量(W)的编码值。对模型(1)进行显著性检验： $F_{回} = 153.8 > F_{0.01}(10, 20) = 3.37$ , 差异极显著, 说明回归模型能够很好地反映实际情况。经分析, 理论产量  $Y$  与实际产量  $y$  的直线正相关系数  $R^2 = 0.9513$ , 达到极显著水平, 说明理论产量与实际产量的拟合程度良好。对回归系数进行  $t$  检验得:  $t_0 = 44.361^{**}$ ,  $t_1 = 5.313^{**}$ ,  $t_2 = 8.152^{**}$ ,  $t_3 = 12.602^{**}$ ,  $t_4 = -11.634^{**}$ ,  $t_5 = -9.869^{**}$ ,  $t_6 = -5.641^{**}$ ,  $t_7 = 3.213^{**}$ ,  $t_8 = 3.831^{**}$ ,  $t_9 = -0.577$  ( $t_{0.05} = 2.086, t_{0.01} = 2.845$ )。除了交互项  $X_2X_3$  的系数不显著外, 其余系数均达到极显著水平。说明氮、磷、水单因子, 氮与磷交互作用、氮与水交互作用对产量的影响极显著, 只有磷与水的交互作用对产量的影响不显著。

### 2.2 因子效应分析

#### 1) 主因子效应

由于模型(1)中应用的是无量纲线性编码代换, 偏回归系数已标准化。因此, 直接用模型中偏回归系数绝对值大小判断因子的重要程度, 系数正负号表示因子的作用方向。模型(1)中一次项  $X_1, X_2, X_3$  的系数均为正值, 说明氮、磷、水都有增产效应, 大小顺序是: 水 > 磷 > 氮; 交互项系数  $X_1X_2$  和  $X_1X_3$  为正值, 说明氮与磷耦合, 氮与水耦合有协同作用, 对产量的增加具有相互促进作用。系数  $X_2X_3$  为负值, 说明磷与水耦合具有相互替代作用, 多施磷肥能够节约灌水, 灌水量的增大有利于磷肥的经济利用。二次项系数均为负值, 说明过多的灌水施肥既浪费资源, 又降低增产效果。

#### 2) 单因子效应

采用降维法, 对模型(1)中的 2 因子固定在零水平, 另外一个因子做变量, 得到一组试验因子的一元二次产量回归子模型:

$$Y_N = 4373.4702 + 130.9495X_1 - 281.0037X_1^2 \quad (2)$$

$$Y_P = 4373.4702 + 200.9255X_2 - 238.3853X_2^2 \quad (3)$$

$$Y_W = 4373.4702 + 310.6125X_3 - 170.501X_3^2 \quad (4)$$

根据子模型(2)、(3)、(4), 做氮、磷、水对产量的主效应图(图1)。

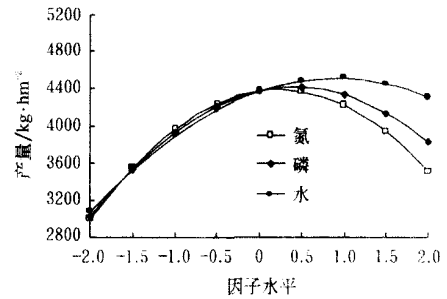
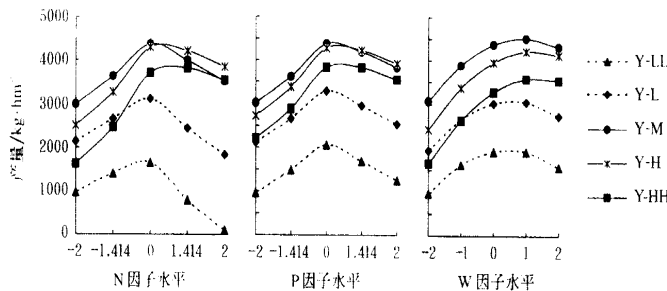


图1 试验因子的主效应

Fig. 1 Main effect of experimental factors

由图1可以看出: 产量随着氮、磷、水投入量的增加均呈抛物线趋势变化; 在试验设计范围内, 存在产量最高点, 产量最高点的因子编码值分别为  $N = +0.233, P = +0.421, W = +0.911$ ; 在产量最高点以前, 产量随水肥投入量的增加剧烈递增; 超过产量最高点后, 产量随水肥投入量的增加缓慢递减, 递增和递减幅度大小顺序为: 氮 > 磷 > 水。

同样, 采用降维法可得到 N、P 因子固定在 -2、-1.414、+1.414、+2 水平, W 因子固定在 -2、-1、+1、+2 水平时的另外 4 组回归一元二次子模型, 结合零水平的一元二次子模型, 共 5 组回归子模型, 作氮、磷、水 3 因子的产量变化曲线图(图2)。由图2看出: 氮、磷、水 3 因子在试验设计水平范围内均存在产量最高点。在产量最高点以前, 水肥投入量中等以上水平的处理, 产量随水肥投入量的增加剧烈增加, 超过产量最高点以后, 产量随着水肥投入量的增加缓慢下降。而灌水施肥较低的处理, 其变化趋势相反; 2 因子的耦合效应是, 中水中肥耦合(Y-M) > 丰水丰肥耦合(Y-H) > 高水高肥耦合(Y-HH) > 欠水欠肥耦合(Y-L) > 低水低肥耦合(Y-LL); 生产实际中, 要取得较高产量效应, 水肥耦合的适宜编码值大致范围是: 氮(0, +1.414)、磷(0, +1.414)、水(0, +1)。



注: Y-LL 表示最低水平(N、P、W 均为-2水平); Y-L 表示较低水平(N、P 为-1.414, W 为-1水平); Y-M 表示中等水平(N、P、W 均为0水平); Y-H 表示较高水平(N、P 为+1.414, W 为+1水平); Y-HH 表示最高水平(N、P、W 均为+2水平)

图2 试验因子的产量效应

Fig. 2 Yield effect of experimental factors



### 3) 单因子边际效应

对回归子模型 (2)、(3)、(4) 求一阶导数, 得到各试验因子的边际效应方程, 并根据边际效应方程作对应的边际产量效应图(图 3)。

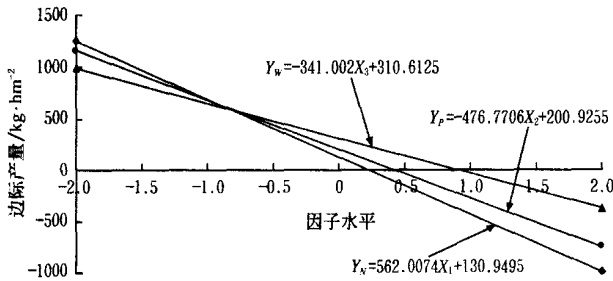


图 3 试验因子边际产量

Fig 3 Marginal yield of experiment factors

图 3 表明, 氮、磷、水 3 因子的边际产量效应随投入量的增加均呈递减趋势, 递减率的大小顺序为: 氮 > 磷 > 水。边际效应方程分别与 x 轴相交之处为最适宜投入量。在最适宜投入量之前, 边际产量为正效应, 说明随着投入量的增加, 边际产量的累加值增大。超过最适宜投入量后, 边际产量为负效应, 说明再增加投入量, 边际产量的累加值减小。

### 4) 交互效应分析

令氮、磷、水 3 个因子中的 1 个因子的编码值为零, 得到其余 2 个因子的二元二次方程。由模型(1)可知, 两两因子间都表现出交互作用, 其强弱顺序为: 氮与水交互作用 > 氮与磷交互作用 > 磷与水交互作用。其中, 氮与水交互作用, 氮与磷交互作用均达到极显著水平, 而磷与水耦合效应不显著, 不做分析。

氮与水的交互效应。固定磷因子为零水平, 得到氮与水耦合作用的产量效应方程

$$Y = 4373.4702 + 130.9495X_1 + 310.6125X_3 - 281.0037X_1^2 - 170.501X_3^2 + 94.4244X_1X_3 \quad (5)$$

根据方程(5)作氮、水因子间的交互效应图(图 4)。

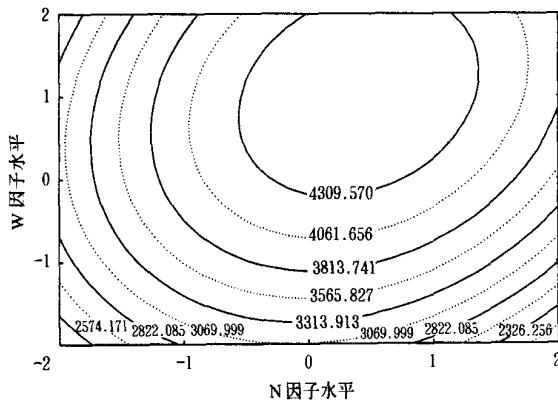


图 4 氮与水交互作用的产量效应(磷为零水平)

Fig 4 Yield effect of interaction with nitrogen and water (P = 0)

由图 4 看出, 当灌水量固定, 产量随着施氮量的增加先增加后降低, 有产量最高点。同样, 施氮量固定时,

产量随灌水量的增加也是先增加后降低。但是, 随着灌水量的增加, 产量达到最高点的施氮量不同。在灌水量较低和过高时, 较低的施氮量就可以使春小麦达到产量最高点。当灌水量最低 (W = - 2) 时, 达到产量最高点的施氮量为 N = - 0.103, 最高产量仅为 3073.2 kg/hm<sup>2</sup>, 继续增加施氮量, 则产量下降, 当施氮量达到最大值, 即 N = + 2 时, 产量下降到 1830.4 kg/hm<sup>2</sup>。当灌水量提高时, 只有在较高的施氮量条件下产量才能够达到最高点, 如 W = 0 时, N = + 0.233, 产量才能达到最高点, 为 4388.6 kg/hm<sup>2</sup>。同样, 当施氮量较低或过高时, 较少的灌水就可以达到产量最高点。当不施用氮肥时, 达到产量最高点的灌水量为 W = + 0.357, 产量仅为 3009.3 kg/hm<sup>2</sup>, 继续增加灌水量, 则产量下降, 当灌水量达到最大, W = + 2 时, 产量下降到 2549.1 kg/hm<sup>2</sup>。而当灌水量较高时, 只有在较高施氮量条件下, 产量才能够达到最高点, 如 W = 0.911 时, N = + 0.386, 产量最高, 为 4485.9 kg/hm<sup>2</sup>。

由图 4 还可以看出, 灌水量与施氮量 2 因子同时变化对产量的影响比单因子影响更为敏感和剧烈。在灌水最低, 氮肥量为零的条件下 (N = - 2, W = - 2), 产量最低, 仅为 2062.0 kg/hm<sup>2</sup>, 随着灌水量和施氮量的同时增加, 产量迅速提高, 当灌水量和施氮量增加到 N = + 0.405, W = + 1.023 时, 产量达到最高点, 为 4558.9 kg/hm<sup>2</sup>。之后, 随着灌水量、施氮量的继续增加, 产量则迅速降低, 到灌水量、施肥量最大, 即 N = + 2, W = + 2 时, 产量降到最低值, 仅为 3828.3 kg/hm<sup>2</sup>。

上述分析说明, 在春小麦生产中, 氮肥的施用量要依据土壤含水率而定, 同样, 灌水量的多少要依据施氮量的高低确定。施氮量和灌水量不足达不到高产, 施氮量和灌水量过多不仅浪费水肥资源, 而且会降低产量。只有合理的氮、水耦合, 才能发挥出最佳交互耦合作用, 获得最高产量, 实现水肥资源高效利用。

氮、磷交互耦合作用与氮、水交互耦合作用类似, 不再进行分析。

## 2.3 数学模型寻优

### 1) 最高产量的优化方案

获得最高产量的条件是回归模型对各因子的一阶偏导数为零。用模型(1)分别对 X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub> 求偏导数, 并令其等于零, 经运算整理得出

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial X_1} = 130.9495 - 562.0074X_1 + 79.1875X_2 + 94.4244X_3 = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial X_2} = 200.9255 + 79.1875X_1 - 476.7706X_2 - 14.2245X_3 = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial X_3} = 310.6125 + 94.4244X_1 - 14.2245X_2 - 341.002X_3 = 0 \quad (8)$$

解方程组得: X<sub>1</sub> = + 0.471, X<sub>2</sub> = + 0.469, X<sub>3</sub> = + 1.022 时, 即获得最高产量 4610 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量

为 315.1 kg/hm<sup>2</sup>、施磷量 111.1 kg/hm<sup>2</sup>、灌水量 354.6 mm。

## 2) 试验因子的最优组合方案

利用产量模型(1),进行计算机模拟,寻求不同产量目标的最优水肥管理方案,结果见表 2。

表 2 春小麦水肥管理优化方案

Table 2 Optimization scheme of water and fertilizers on spring wheat

目标产量 /kg·hm <sup>-2</sup>	组合数	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>	
		施氮量 /kg·hm <sup>-2</sup>		施磷量 /kg·hm <sup>-2</sup>		灌水量 mm	
3000	52	255.1~338.4		92.9~131.7		289.8~358.5	
3750	22	295.1~389.7		112.0~155.0		328.6~413.2	
4000	10	240.1~361.2		103.1~152.6		337.5~450.0	
4610	1	315.1		111.1		354.6	

## 3 结 论

1) 在半干旱区,水肥单因子对产量的影响显著,该地区影响顺序为,水>磷>氮。试验区降水量少,而春小麦生育期降水量更少,一般为 100~200 mm,严重地影响其生长发育,因而水分是影响该区春小麦产量的决定性因素。增施磷肥能够增强作物的抗旱性<sup>[18]</sup>,而且当地肥料的施用重氮轻磷,随着时间的延长,土壤中磷素含量严重亏缺,而土壤中的氮素相对于磷素要丰富,所以当磷肥施用量增加时,对产量影响大于施氮的影响。

2) 水肥耦合的产量效应明显,作用的大小顺序为:中水中肥效应最高,高水高肥效应次之,低水低肥效应最低;水肥间交互效应的大小顺序是:氮与水耦合>氮与磷耦合>磷与水耦合。其中,氮与磷耦合,氮与水耦合均为相互促进作用,磷与水耦合为相互替代作用;氮、磷、水 3 因子的边际产量均递减,递减顺序为:氮>磷>水。

3) 不同产量目标的数学模型寻优结果是,产量超过 4000 kg/hm<sup>2</sup>的水肥优化管理方案为,施氮量 240.1~361.2 kg/hm<sup>2</sup>,施磷量 103.1~152.6 kg/hm<sup>2</sup>,灌水量 337.5~450.0 mm。获得最高产量 4610 kg/hm<sup>2</sup>的施氮量 315.1 kg/hm<sup>2</sup>、施磷量 111.1 kg/hm<sup>2</sup>、灌水量 354.6 mm。

4) 在春小麦生产中,氮肥的施用量要依据土壤含水率而定,同样,灌水量的多少要依据施氮量的高低确定。合理的氮、水配合,才能发挥最佳交互耦合作用,获得最高产量,实现水肥资源的高效利用。

### [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- 41.  
[2] Karasov C G. Irrigation efficiency in water delivery [J].

Technology, 1982, 2: 62- 74

- [3] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1- 6  
[4] Terry A Howell. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture[J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 281 - 289.  
[5] Ünük, Özenirler G, Yurteri C. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey[J]. European Journal of Soil Science, 1999, 50 (4): 609- 620  
[6] Andrew N S, William J, Gburek G Folmar, et al. Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania [J]. Agricultural Water Management, 1999, 41(2): 77- 89.  
[7] González Montaner J H, Maddoni G A, D'Napoli M R. Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa [J]. Field Crops Research, 1997, 51(3): 241- 252  
[8] Sylvain Pellerin, Alain Mollier, Daniel Pléet. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of maize adventitious nodal roots[J]. Agronomy Journal, 2000, 92: 690- 697.  
[9] Clay D E, Engel R E, Long D S, et al. Nitrogen and water stress interact to influence carbon-13 discrimination in wheat [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65: 1823- 1828  
[10] Brůčka H, Payne W A, Sattelmacher B. Effects of phosphorus and water supply on yield, transpirational water-use efficiency, and carbon isotope discrimination of pearl millet[J]. Crop Science, 2000, 40: 20- 125  
[11] Ziaei A N, Sepaskhah A R. Model for simulation of winter wheat yield under dryland and irrigated conditions [J]. Agricultural Water Management, 2003, 58(1): 1- 17.  
[12] Balás J, Németh I, Hoffmann S. Effect of nitrogen fertilization on the yield of winter wheat and n-leaching [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2004, 50 (1): 85- 90  
[13] 孟兆江, 刘安能, 吴海卿, 等. 黄淮豫东平原冬小麦节水高产水肥耦合数学模型研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14 (1): 86- 90  
[14] 金 轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 旱地农田肥水耦合效应及其模式研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(5): 104- 106  
[15] 刘作新, 郑昭佩, 王 建. 辽西半干旱区小麦、玉米水肥耦合效应研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 540- 544  
[16] 李法云, 宋丽, 官春云, 等. 辽西半干旱区农田水肥耦合作用对春小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 535- 39.  
[17] 丁希泉. 农业应用回归设计[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1986, 188- 51.  
[18] 张岁歧, 山 仑. 磷素营养对春小麦抗旱性的影响. 应用与环境生物学报, 1998, 4(2): 115—119

## Effect of nitrogen, phosphorus and water coupling on spring wheat yield in semi-arid areas of western Liaoning Province

Yin Guanghua<sup>1,2</sup>, Liu Zuoxin<sup>1</sup>, Li Guifang<sup>1</sup>, Liang Haijun<sup>1,2</sup>, Cai Chongguang<sup>1</sup>

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract** To seek for effect of water and fertilizer coupling on spring wheat, with 312-D optimized saturation design, field experiments were conducted in the western Liaoning Province during 2000~ 2003 to study effect of water and fertilizer coupling on spring wheat yield. Results showed that irrigation quantity was the chiefly factor to affect spring wheat yield, phosphorus quantity was the secondly factor, nitrogen quantity was the thirdly factor. Yield effect was the highest in the condition of middle level water and fertilizer, but which was the lowest in low level water and low fertilizer, and which was between the two in high level water and high fertilizer. The effect order of interaction is: nitrogen and water coupling > nitrogen and phosphorus coupling > nitrogen and water coupling. When spring wheat yield accessed 4000 kg/hm<sup>2</sup>, amounts of water and fertilizer were nitrogen 240.1~ 361.2 kg/hm<sup>2</sup>, phosphorus 103.1~ 152.6 kg/hm<sup>2</sup>, water 337.5~ 450.0 mm. Amounts for highest yield 4610 kg/hm<sup>2</sup> were nitrogen 315.1 kg/hm<sup>2</sup>, phosphorus 111.1 kg/hm<sup>2</sup> and water 354.6 mm.

**Key words:** spring wheat; water and fertilizer coupling; mathematics model; yield effects; optimization scheme

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.

Yin Guanghua, Liu Zuoxin, Li Guifang, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and water coupling on spring wheat yield in semi-arid areas of western Liaoning Province[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 41- 45. (in Chinese with English abstract)