

水肥耦合对丘陵半干旱区春小麦产量的影响

杜尧东¹, 刘作新²

(1 广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080; 2 中国科学院 沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 在旱棚控制供水条件下, 对丘陵半干旱区氮(N)、磷(P)、水(W)及其耦合作用的产量效应进行了 3 年定位试验. 结果表明, 供水不足时, 水分是影响春小麦产量的主导因素; 而供水充足时, N 肥对产量的影响作用更敏感. N、P、W 3 个单因素对春小麦均有明显的增产作用, 而且符合报酬递减率. N、W 之间存在正耦合效应, 供水不足时, 过多施用 N 肥易加剧作物的干旱胁迫作用; N、P 之间表现为负交互效应, 低 P 高 N 同样能取得较高产量; P、W 之间表现为负交互作用, 缺水时增施 P 肥可提高春小麦的抗旱能力. 通过计算机模拟寻优, 得出了丘陵半干旱区春小麦水肥管理优化方案.

关键词: 水肥耦合; 丘陵半干旱区; 褐土; 春小麦; 产量

中图分类号: S512.12

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2003)01-0008-05

水、肥是作物生产的物质条件, 也是最容易人为调控的 2 个因素. 因此, 人们对水分与作物、肥料与作物之间的相互关系进行了大量研究. 由于土壤水分和养分常常密切而复杂地联系在一起, 因此, 水分和养分的协同关系早就引起国外学者的重视^[1]. 20 世纪 90 年代以来, 我国学者着重对黄土高原和华北平原农田水肥耦合效应进行了研究, 提出了不同类型旱地优化水肥管理方案^[2,3]. 我国北方丘陵半干旱区地处东北林区向内蒙古草原及华北平原的过渡地带, 为典型的生态脆弱区. 该区不仅是未来我国重要的粮食和畜牧产品基地之一, 亦是华北及其以南地区的北方门户和生态屏障. 因此, 自“七五”以来, 该地区一直被列为国家旱农重点攻关试验示范区. 但以前的研究主要集中在农田的水分状况或肥料效应^[4,5], 对水肥之间的耦合效应研究较少. 而在干旱半干旱地区, 水分不足和土地瘠薄是提高作物产量和水分利用效率的主要限制因素, 因此水肥协同关系的研究意义更为重要. 本文旨在通过分析丘陵半干旱区春小麦水肥耦合条件下的产量效应, 提出优化的水肥管理方案, 为该类型区提高肥料利用率和水分生产效率, 实现春小麦稳定高产提供科学依据和技术指导.

1 材料与方法

试验于 1997~1999 年在辽宁省西部的喀左县农业示范场进行. 地理纬度 41°05'N, 119°43'E, 属典型的丘陵半干旱区. 年平均降水量 481 mm, 其中春小

麦生育期间降水量只有 180.1 mm, 远远不能满足春小麦生长发育的需要. 年平均气温 8.3℃, 最高(7 月)为 24.1℃, 最低(1 月)为 -10.5℃. 土壤为褐土, 质地为中-重壤土, 耕层土壤密度 1.15 g·cm⁻³, 有机质 18.4 g·kg⁻¹, 碱解氮 40.5 mg·kg⁻¹, 速效磷 14.0 mg·kg⁻¹.

试验采用氮(N)、磷(P)、水(W)三因素五水平 312-D 最优饱和设计^[6], 共 12 个处理, 3 次重复, 随机排列, 各试验因子编码水平及施肥、灌水量列于表 1. 1997、1998 年试验在旱棚控制降雨条件下进行, 1999 年末控制降雨, 春小麦生育期间的 175.9 mm 降雨计入实际供水量. 春小麦品种为辽春 10 号, 3 月下旬播种, 7 月上中旬收获. 水量分别在播种后、拔节期、抽穗期和灌浆期分 4 次平均灌入. 磷肥做基肥 1 次施入, 氮肥分基肥与拔节期追肥 2 次施入.

2 结果与分析

2.1 春小麦产量回归模型

对产量与 N(X₁)、P(X₂)和 W(X₃)三因素进行回归模拟, 得到 1997、1998 和 1999 年春小麦产量回归模型分别为:

$$Y = 3146.27 + 69.55X_1 + 161.18X_2 + 498.66X_3 - 53.01X_1^2 - 156.24X_2^2 + 30.58X_3^2 - 84.38X_1X_2 + 239.69X_1X_3 - 16.95X_2X_3;$$

$$Y = 3436.52 + 48.66X_1 + 264.78X_2 + 406.39X_3 - 125.60X_1^2 - 85.37X_2^2 - 76.95X_3^2 - 26.64X_1X_2 + 25.81X_1X_3 - 38.67X_2X_3;$$

表 1 试验因子及编码水平结构矩阵

Tab. 1 Structural matrix of experiment factors and coded levels

处理 treatments	试验设计矩阵 ¹⁾ experiment design matrix			物料用量 ²⁾ material quantity			
	X_1	X_2	X_3	$N/(kg\cdot hm^{-2})$	$P/(kg\cdot hm^{-2})$	W_1/mm	W_2/mm
1	0	0	2	225	90	255	360
2	0	0	-2	225	90	45	45
3	-1.414	-1.414	1	66	27	202.5	281.25
4	1.414	-1.414	1	384	27	202.5	281.25
5	-1.414	1.414	1	66	153	202.5	281.25
6	1.414	1.414	1	384	153	202.5	281.25
7	2	0	-1	450	90	97.5	123.75
8	-2	0	-1	0	90	97.5	123.75
9	0	2	-1	225	180	97.5	123.75
10	0	-2	-1	225	0	97.5	123.75
11	0	0	0	225	90	150	202.5
12	-2	-2	-2	0	0	45	45

1) X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 N、P、W 的因子水平编码; 2) W_1 为 1997 年的供水量, W_2 为 1998、1999 年的供水量

$$Y = 5\,519.03 + 545.28X_1 + 249.47X_2 + 492.19X_3 - 381.17X_1^2 - 179.67X_2^2 + 167.31X_3^2 - 10.42X_1X_2 - 235.97X_1X_3 - 146.37X_2X_3$$

统计检验表明, 3 年回归模型的 F 值分别为 19.19、15.21 和 54.94, 均达极显著水平, 能反映产量与 N、P、W 的关系。

表 2 中各项回归系数的 t 检验结果表明, 一次项回归系数 $P(X_2)$ 和 $W(X_3)$ 3 年均达显著水平, N

(X_1) 在 1999 年也达显著水平, 二次项 X_1^2 有 2 年(1998、1999 年)、 X_2^2 有 2 年(1997、1999 年)、 X_3^2 有 1 年(1999 年)达显著水平, 表明 N、P、W 对春小麦产量均有较大影响。在交互项中, X_1X_3 有 2 年(1997、1999 年)达极显著水平, X_2X_3 有 1 年(1999 年)达显著水平, 而 X_1X_2 3 年都未达显著水平, 说明 N、W 的交互作用最强, N、P 的交互作用最弱, P、W 交互作用居中。

表 2 产量模型回归系数 t 检验

Tab. 2 t -test results of regression coefficients in yield models

年份 year	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
1997	9.237 **	0.816	1.893 *	5.856 **	-0.635	-2.323 *	0.293	-0.991	2.815 **	-0.199
1998	15.211 **	0.606	3.295 **	5.058 **	-1.595 *	-1.084	-0.781	-0.332	0.321	-0.481
1999	18.548 **	7.330 **	3.354 **	6.616 **	-5.230 **	-3.058 **	-1.834 *	-0.140	-3.172 **	-1.968 *

2.2 试验因素效应分析

2.2.1 主因素效应 从产量模型回归系数可以看出, 3 年中一次项系数 $N(X_1)$ 、 $P(X_2)$ 、 $W(X_3)$ 均为正值, 表明三因素都有明显的增产作用, 但不同年份, 其影响顺序有所不同。在旱棚控制降雨的 1997 和 1998 年, 由于供水量偏低, 各因素对产量影响的顺序为 $W(X_3) > P(X_2) > N(X_1)$, 水分对产量的影响处于主导地位, 其次是 P 和 N。而在未控制降雨的 1999 年, 由于自然降雨的作用, 春小麦实际供水量有所提高, 各因素对产量影响的顺序变为 $N > W > P$, 此时 N 对产量的影响更为敏感。

2.2.2 单因素效应 除 1997 年由于灌水量偏低, 产量模型中 W 二次项 X_3^2 的系数为正值外, 3 年产量模

型中 N、P 二次项 X_1^2 、 X_2^2 以及 1998、1999 年模型中 W 二次项 X_3^2 的系数均为负值, 说明春小麦产量随着 N、P 施用量和灌水量的增加呈现出一条开口向下的抛物线变化, N、P 和 W 的投入符合报酬递减率。

N、P、W 边际产量 ($\partial y / \partial x_i, i = 1, 2, 3$) 变化规律的分析表明, 1997、1998、1999 年的 N 边际产量分别为: $Y_{N'} = -106.02X + 69.553$ 、 $Y_{N'} = -251.2X + 48.657$ 、 $Y_{N'} = -763.54X + 545.285$ (图 1a); P 边际产量分别为 $Y_{P'} = -312.48X + 161.177$ 、 $Y_{P'} = -170.75X + 264.783$ 、 $Y_{P'} = -359.34X + 249.469$ (图 1b)。除 1997 年 W 外, 各因素随着因素水平的增加, 边际产量均呈现递减的趋势, 在较高水平时, 其增产报酬率降低, 投入成本增大。N 边际产量的斜率 1999

年远较 1997、1998 年为大,说明随着灌水量的增加,N 对春小麦产量的影响程度增大.而随着灌水量的增

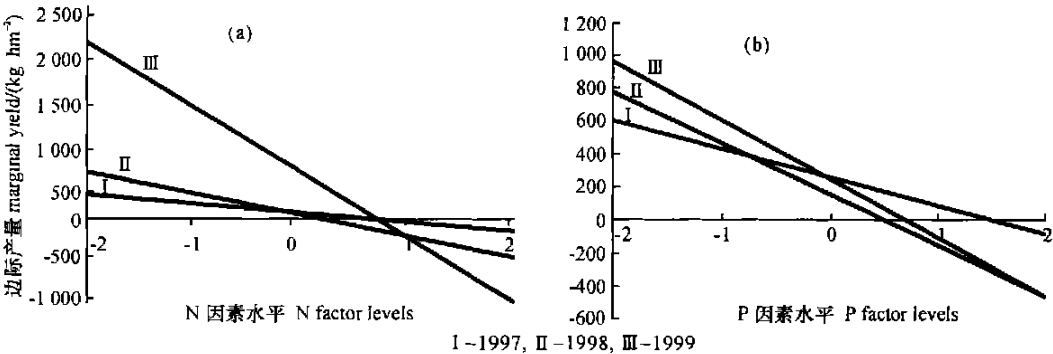


图 1 N、P 因素的边际产量
Fig. 1 Marginal yields of N and P

2.2.3 因素间耦合效应分析 由产量模型可知,1997 和 1998 年 N、W 交互项 X_1X_3 的系数为正值,表明 N、W 之间具有重要正交互效应,二者可以相互促进,水分是发挥 N 肥肥效的重要条件;而 1999 年 N、W 交互项 X_1X_3 系数为负值,说明当水分满足作物生长发育的需要时,N 因子对作物产量的影响十分敏感,成为影响产量的主导因素.

当磷肥固定于 0 水平时,春小麦最高产量点为 N 与 W 均为+2 的水平,而最低点却不在 N 和 W 均为-2 的水平,而是在 N、W 分别为+2、-2 的水平(图 2a).随着实际供水量增加,N 对春小麦产量的影响更敏感,高 W 高 N 会导致产量降低(图 2b).

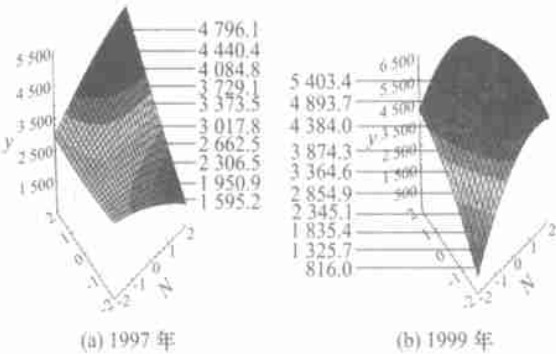


图 2 N、W 两因素间的交互耦合作用(P 取 0 水平)
Fig. 2 Interaction between N and W(P=0)

3 年中 N、P 交互项 X_1X_2 的系数均为负值,表明 N、P 之间存在负交互效应.图 3a 表明,当灌水量固定于 0 水平时,春小麦产量最低点为 N 和 P 施用量为低水平,只有 N、P 两因素合理配合,方能取得较高产量(1997 年).而当 N 施用为低水平,而 P 施用为高水平时,春小麦产量很低;当 P 施用量为低水平,N 用量为高水平时,也能取得较高的产量(图 3b).

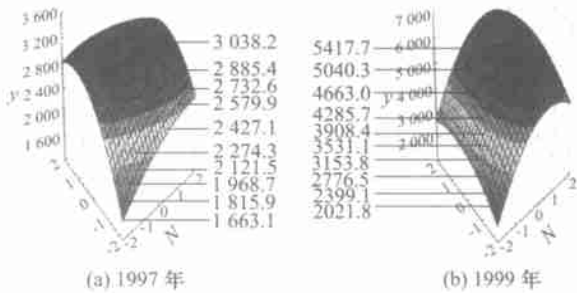


图 3 N、P 两因素间的交互耦合作用(W 取 0 水平)
Fig. 3 Interaction between N and P (W=0)

3 年中 P、W 交互项 X_2X_3 的系数均为负值,说明 P、W 之间存在负的交互作用,两者之间具有一定的相互替代作用,缺水时增施 P 肥可提高春小麦的抗旱能力,而提高供水量可提高土壤中 P 素的有效性.但从图 4 可以看出,随着 N 肥用量的提高,且当土壤水分过度缺乏时,这种替代效应不明显.

2.3 不同产量水平的水肥管理优化方案

以 3 年春小麦产量回归模型为基础,通过计算机模拟寻优,并对水肥因素取值频率分布进行分析,选出产量在 $3\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上和 $4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的水肥管理优化方案分别为: N $200.3\sim277.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、P $106.7\sim134.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、W $264.7\sim303.3\text{ mm}$ 和 N $275.3\sim331.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、P $93.6\sim124.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、W $378.4\sim435.1\text{ mm}$.产量 $4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上水肥管理优化方案的计算步骤列于表 3. 对比分析 2 个产量水平的 N、P、W 投入量可以看出,供水不足时,宜适当提高 P 肥的施用,增强作物的抗旱能力来获得较高产量;但在供水充足时,宜适当增加 N 肥的施用,以充分发挥水肥之间的互馈协同作用,实现增产增收.

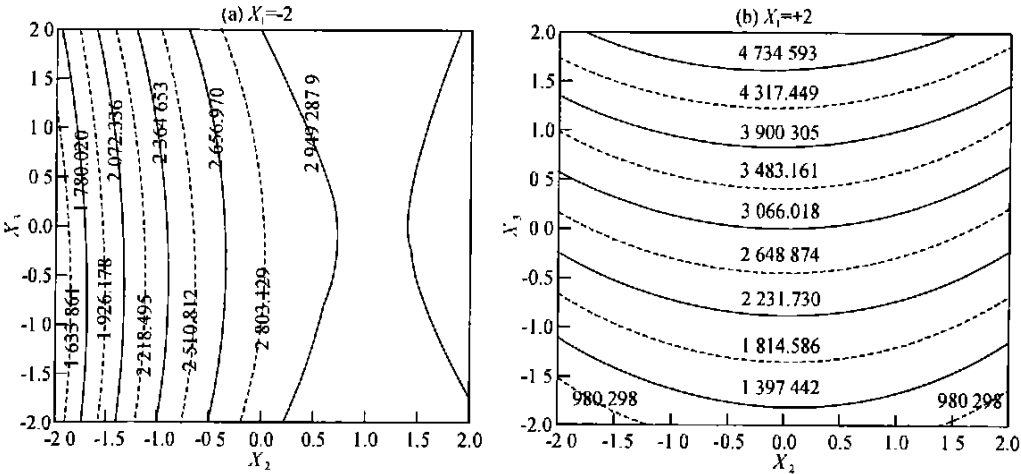


图 4 不同 N 水平下 P(X_2)、W(X_3) 交互耦合效应等产线(1997)

Fig. 4 Equal yield lines of interaction between P(X_2) and W(X_3) under different N levels

表 3 产量4 500 kg·hm⁻²以上水肥管理优化方案

Tab. 3 The optimum managements of water and fertilizer for the yield more than 4 500 kg·hm⁻²

因子水平 factor levels ¹⁾	X_1		X_2		X_3	
	次数	频率	次数	频率	次数	频率
	times	frequencies	times	frequencies	times	frequencies
+ 2	10	0. 200	11	0. 220	12	0. 240
+ 1. 414(+ 1)	19	0. 386	14	0. 280	13	0. 260
0	17	0. 340	14	0. 280	11	0. 220
- 1. 414(- 1)	4	0. 080	7	0. 140	9	0. 180
- 2	0	0. 000	4	0. 080	5	0. 100
Σ	50	1. 000	50	1. 000	50	1. 000
$\bar{X}$	0. 70		0. 42		0. 36	
$S_{\bar{X}}$	0. 125		0. 172		0. 185	
置信域 confidence interval	0. 45 ~ 0. 95		0. 08 ~ 0. 76		0. 00 ~ 0. 72	
物量用量 material quantity	275. 3 ~ 331. 9 kg·hm ⁻²		93. 6 ~ 124. 2 kg·hm ⁻²		378. 4 ~ 435. 1 mm	

1) 括号内为 X_3 , 即 W 的因子水平

3 讨论

据 Bennett 等^[7]和徐萌、山仑^[8]的研究结果, 当水分供应不足时, 过多施用 N 肥易增加土壤溶液的浓度, 降低土壤总水势, 增加作物根系吸水的难度, 同时也易使作物形成较大的地上部蒸腾表面积, 增大作物蒸腾量和土壤耗水量, 加剧作物的水分胁迫作用, 从而降低作物产量。这与本研究的结果相吻合。

在试验的第3年, 低磷高氮处理同样取得了较高的产量, 可能是前 2 年连续高量施入磷肥后的残效作用所致^[5]。

据梁丽银^[9]研究, 施用磷肥能提高根干质量、根长度和根系比表面积, 促进根系向深层土壤下扎, 增加对深层土壤水分的利用, 提高作物的抗旱能力。因

此, 缺水时增施磷肥有助于春小麦增产。本试验也得出同样的结论。

丘陵半干旱区土壤多为发育在黄土母质上的各种褐土, 全钾含量在 2 0% 以上, 含钾较多, 不是春小麦的产量限制因素, 因此本研究未对钾的效应进行考察。

参考文献:

[1] VIETS F G. Fertilizers and the efficient use of water[J] . Adv Agron, 1962, 14: 223— 264.

[2] 李玉山. 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间试验[J] . 土壤学报, 1990, 27(1): 1— 7.

[3] 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[M] . 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 1— 50.

[4] 王仕新. 辽西半干旱地区春小麦农田水分循环特征的

[5] 沈善敏. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究: I 作物吸磷量、磷肥残效及土壤有效磷变化[J]. 应用生态学报, 1992, 3(2): 138— 143.

[6] 丁希泉. 农业应用回归设计[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1986. 22— 38.

[7] BENNETT J W, JONES J W, ZUR B. Interactive effects of nitrogen and water stress relation of field-grown corn leaves[J]. Agro J. 1986, 78: 273— 280.

[8] 徐 萌, 山 仑. 不同土壤水分条件下无机营养对小麦物质生产和水分利用的影响[J]. 西北植物学报, 1991, 11(4): 299— 308.

[9] 梁丽银. 土壤水分和氮磷营养对小麦根系生长及水分利用的调节[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 258— 264.

Effect of Water and Fertilizer Interaction on Spring Wheat
Yield in Hilly Semiarid Area

DU Yao-dong¹, LIU Zuo-xin²

(1 Guangzhou Institute of Tropical and Oceanic Meteorology, Guangzhou 510080, China;

2 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract:To study the effect of N(nitrogen), P(phosphorus), W(water) and their interaction on the spring wheat yield in hilly semiarid area , a site experiment was conducted in rain-shelter from 1997 to 1999. Results showed that as water supply was insufficient, water was the most important factor affecting the yield, whereas N was the most sensitive to yield in three factors when water supply was sufficient. The each single effect of N, P and W on yield increasing was statistically significant and coincided with the law of diminishing return. The positive interaction existed between N and W, and excessive N was prone to crop drought stress for the lack of water shortage. Negative interaction existed between N and P, and combination of low P with high N could also achieve higher yield. The negative interaction between P and W indicated that increasing P could enhance crop drought-resistant ability under the condition of water shortage. In accordance with spring wheat models, an optimum management of water and fertilizer was put forward by computer simulation optimizing .

Key words: water-fertilizer interaction; hilly semiarid area; cinnamon soil; spring wheat; yield

【责任编辑 周志红】