

水分和氮肥对冬小麦产量的影响及其调控技术*

赵国强 朱自玺 邓天宏 方文松 侯建新

(河南省气象科学研究所, 郑州 450003)

提 要

通过对冬小麦进行不同水分等级和不同施氮量的控制试验, 利用数理统计和数学分析方法, 从水分利用效率和经济效益角度, 分析了水分和氮素对冬小麦产量的影响及其相互作用的关系, 提出了河南省冬小麦砂壤土的水肥配置模式, 经生产检验, 这种模式是可行的。

关键词: 冬小麦 水肥效应 水分利用效率

引 言

水和肥在作物生长和产量的形成过程中都是必不可少的因素, 但是过去研究土壤水分和灌溉, 常常将肥力控制在一定的水平来研究耗水量与产量的关系^[1]; 而研究肥料也往往将土壤水分保持一定的范围来研究施肥对作物产量的影响^[3,4]. 这种单控式的研究虽然在某种程度上可以揭示水或肥对作物的影响, 但很难全面反映水肥对作物的共同作用及相互影响^[2]. 本文根据3年的田间试验资料, 将水肥结合起来, 分析了水、肥对作物产量的影响及其相互关系.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于1994~1996年在郑州南郊试验地进行, 供试品种为温麦4号. 土壤为砂壤土, 土壤有机质含量 9.2 g/kg, 全氮 8.7 g/kg, 全磷 1.15 g/kg, 速效氮 32.6 mg/kg, 速效磷 11.2 mg/kg, 速效钾 64.6 mg/kg. 土壤容重(1.30 m 土层平均) 1.49 g/cm³, 田间持水量 19.7%, 凋萎湿度为 4.3%.

1.2 试验设计

(1)水分处理 试验是在人为控制水分条件下进行的. 场内设有大型活动式防雨棚, 用来防止自然降水对土壤湿度的影响. 试验地内每个小区面积为 11 m², 周围设有隔离层, 防止水分在水平方向上的运动. 试验共设置3种不同的水分处理, 土壤湿度分别控制

* 本文得到中国气象局重点项目“持续农业与农田水分利用效率”资助。

1997-07-10 收到, 1998-09-08 收到再改稿。

在占田间持水量的 45%~60%、60%~80% 和 >80%, 另设自然降水区作为对照(ck), 每个水分等级有 3 个重复. 每个小区内安装有中子仪测管, 每旬初用 503 DR 型中子仪测定一次土壤湿度, 测定深度为 200 cm, 每 20 cm 为一测定层. 试验区地下水位为 12~13 m. 采用条播方式.

(2) 氮肥处理 在每个水分等级下均进行 4 个肥力等级试验, 即每公顷施纯氮 75 kg、150 kg、225 kg、300 kg, 另设有不施肥区作为对照. 磷、钾补充到充分状况.

1.3 观测项目

距试验场 50 m 的郑州国家气候基准站进行逐日的气象观测; 每旬进行一次土壤湿度、作物干物重、叶面积的测定; 同时观测作物发育状况, 后期测定灌浆速度. 收获后进行考种分析.

1994 年冬小麦全生育期降水 153.5 mm, 属降水偏少年型; 1995 年冬小麦全生育期降水 178.4 mm, 也属降水偏少年型.

2 数据处理及结果分析

2.1 不同水肥条件下耗水量对产量的影响

(1) 耗水量的计算 根据试验地的情况, 将农田水分平衡方程简化为

$$P + I - ET = W_2 - W_1 \quad (1)$$

式中: P 为某阶段的有效降水量(mm), I 为某阶段的灌水量(mm), ET 为某阶段的耗水量(mm), W_1 为某阶段开始时的土壤贮水量(mm), W_2 为某阶段结束时的土壤贮水量(mm). 根据式(1)有

$$ET = W_1 + P + I - W_2 \quad (2)$$

利用式(2)计算小麦各水分等级处理的耗水量在表 1 中给出.

表 1 各水分等级处理与耗水量

水分处理	水分等级	耗水量(mm)
Eck	NCK	230
E1	45%~60%	273
E2	60%~80%	351
E3	>80%	541

(2) 不同水肥条件下耗水量对产量的影响 为了分析不同水肥条件下耗水量对产量的影响, 我们将各种水肥条件下, 即 Eck、E1、E2、E3 的耗水量及纯氮量为 0、75、150、225、300 kg/hm² 与小麦产量绘制成三维立体图(图 1). 从图中可以看出, 各个曲面有相似的变化趋势, 即在相同的施氮量情况下, 产量随耗水量的增加而增加, 但产量增加量^[2](即 $Y_{i+1} - Y_i$, $i = \text{ck}, 1, 2, 3$ 为试验处理序号)却不一样(见表 2). 无论哪种施肥情况, 均以 $Y_2 - Y_1$ 最大, 亦即在施氮量为 0 时, E1 处理较 Eck 增产 954 kg/hm², E2 较 E1 增产 1313 kg/hm², E3 较 E2 增产 967 kg/hm², 其比值为 1 : 1.38 : 1.01. 为说明耗水量的增加量对产量增加量的影响, 我们定义了相对水分利用效率(kg/m³), 即 $(Y_{i+1} - Y_i) / (ET_{i+1} - ET_i) \times 10$, Y_i

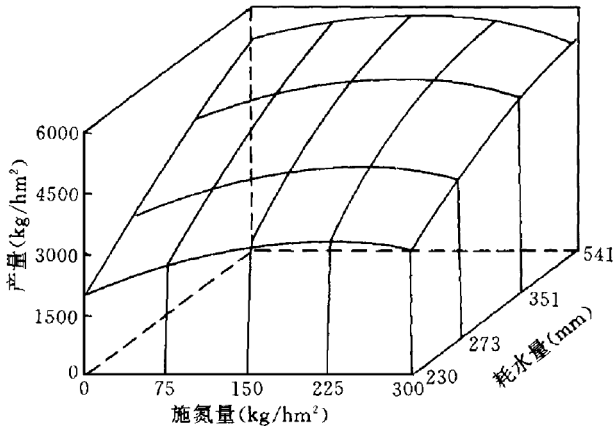


图1 冬小麦耗水量和氮肥与产量的关系

表2 冬小麦不同水分处理的氮肥与产量(kg/hm²)的关系

水分处理	施氮量(kg/hm ²)				
	0	75	150	225	300
Eck	1923	2757	3231	3351	3119
E1	2877	3662	4094	4172	3899
E2	4190	4901	5258	5262	4914
E3	5157	5685	5862	5687	5757
产量增加量	施氮量(kg/hm ²)				
	0	75	150	225	300
Y1-Yck	954	905	863	821	780
Y2-Y1	1313	1239	1164	1090	1015
Y3-Y2	967	784	604	425	243

为产量(kg/hm²), ET_i 为耗水量(mm), $i=ck, 1, 2, 3$ 为试验处理号, 10 为 1 公顷耗水量毫米换算为立方米的系数. 从表 2 中可以看出, 相对水分利用效率的比值为 1 : 0.76 : 0.23, 反映了随着耗水量的增加, 水分对产量的贡献却变小. 同理可知, 当每公顷施氮量为 75、150、225 和 300 kg 时, 其产量增加量的比值分别为 1 : 1.37 : 0.87、1 : 1.35 : 0.70、1 : 1.33 : 0.52、1 : 1.30 : 0.31, 相对水分利用效率的比值为 1 : 0.75 : 0.20、1 : 0.74 : 0.16、1 : 0.73 : 0.12、1 : 0.72 : 0.07. 这反映了由于耗水量的增加而引起的产量的增加量是随着施氮量的增加而递减的. 从比值的变化来看, 无论是产量增加量的比值, 还是相对水分利用效率的比值, E2 随着施氮量的增加, 其比值变化最小, 产量增加量的比值从 1.38 减小到 1.30, 相对水分利用效率从 0.76 减至 0.72; E3 的变化最大, 产量增加量的比值从 1.01 减至 0.31, 相对水分利用效率则从 0.23 减至 0.07, 说明在耗水量大时, 增加施氮量并不能达到增产的目的, 而水分利用效率却急剧下降.

在相同的水分条件下, 产量随施氮量增加而增加, 而后下降, 但其增幅均呈下降趋势, 即在耗水量不超过 351 mm 时, 产量最大值出现在施氮量 225 kg/hm², 而后产量随施氮

量增加而呈负增长;在耗水量超过 351 mm 时,产量最大值出现在施氮量 150 kg/hm²,其后产量随施氮量增加而呈下降趋势,说明在干旱情况下,可以适当通过增加施氮量来提高产量,但不宜超过 255 kg/hm²,主要原因是土壤水分条件较差,土壤溶氮量较小,作物不能全部吸收.同样在较湿润的土壤,反而应控制施氮量,这是由于施氮量增加,会导致作物生长旺盛,田间郁蔽,极易发生倒伏,从而使产量下降.

2.2 经济耗水量和经济施肥量的计算

(1)水肥效应方程 根据两年的试验资料,建立水肥效应方程^[2]:

$$Y = b_0 + b_1N + b_2ET + b_3N \cdot ET + b_4N^2 + b_5ET^2 \quad (3)$$

式中: b_0, b_1, \dots, b_5 为回归系数,其值分别为 -5598.2、16.008、42.885、-0.01117、-0.03187、-0.04271, Y 为小麦产量(kg/hm²), N 为纯氮量(kg/hm²), ET 为小麦耗水量(mm),相关系数为 0.956.经检验,样本 $n=20$, $F=75.94$, $F_{0.01}=4.70$, $F>F_{0.01}$,回归效果显著.

(2)判断效应曲面形状及求极值 对方程(3)来说,可求对 N 和 ET 的一阶偏导和二阶偏导.若令 $A = \frac{\partial^2 Y}{\partial N^2}$,则 $A = 2b_4$; $B = \frac{\partial^2 Y}{\partial N \partial ET}$,则 $B = b_3$; $C = \frac{\partial^2 Y}{\partial ET^2}$,则 $C = 2b_5$.由于 $(B^2 - AC) < 0$,即 $(b_3^2 - 4b_4b_5) < 0$,临界产量是极值点,又 $A < 0, C < 0$,即 $2b_4 < 0, 2b_5 < 0$,故临界产量是极大值点,即最高产量点,所以效应曲面为凸形.据此可求出极值点:令 $\frac{\partial Y}{\partial N} = 0, \frac{\partial Y}{\partial ET} = 0$,可求得在 $N=162$ kg/hm²、 $ET=486.3$ mm 时, $Y_{\max}=6016$ kg/hm².

(3)水分与氮素的最佳搭配 求不同产量水平的最佳资源配合用量,实质是求扩展线(即最佳配比线)与等产线的交点^[4,5].

已知方程(3)的扩展线方程为:

$$\frac{b_2 + b_3 \cdot N + 2b_5 \cdot ET}{b_1 + b_3 \cdot ET + 2b_4 \cdot N} = \frac{P_2}{P_1} \quad (4)$$

式中: P_1, P_2 分别为两种资源氮(N)和水(ET)的价格,式(4)整理后可得 N 的表达式:

$$N = \frac{P_1 b_2 - P_2 b_1 + ET \cdot (2P_1 b_5 - P_2 b_3)}{2P_2 b_4 - P_1 b_3} \quad (5)$$

利用式(5)可求得扩展线,为了计算方便,令:

$$A = P_1 b_2 - P_2 b_1 \quad (6)$$

$$B = 2P_2 b_4 - P_1 b_3 \quad (7)$$

$$C = 2P_1 b_5 - P_2 b_3 \quad (8)$$

故式(5)又可写成

$$N = \frac{A}{B} + \frac{C}{B} \cdot ET \quad (9)$$

将式(9)代入式(3),得到扩展线与等产线交点方程,经数学变换,可得方程:

$$Z \cdot ET^2 + Q \cdot ET - W = 0 \quad (10)$$

式(10)中:

$$W = Y - (b_0 + b_1 \frac{A}{B} + b_4 \frac{A^2}{B^2})$$

$$Q = b_1 \frac{C}{B} + b_2 + b_3 \frac{A}{B} + 2b_4 \frac{A \cdot C}{B^2}$$

$$Z = b_3 \frac{C}{B} + b_4 \frac{C^2}{B^2} + b_5$$

求解式(10)得:

$$ET = \frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 + 4ZW}}{2Z}$$

式(10)有两个根,说明扩展线与每条等产线都有两个交点.但在经济学中,一般只考虑趋向原点部分的交点,只有这部分的交点才代表资源的最小成本组合,所以

$$ET = \frac{-Q + \sqrt{Q^2 + 4ZW}}{2Z} \quad (11)$$

如果 $P_1 = 1.80$ 元/kg, $P_2 = 3.75$ 元/mm · hm², 可求得最佳耗水量为 449.5 mm.

利用式(9)求得冬小麦水肥的最佳施用量配比线:

$$N = -78.45 + 0.5145ET \quad (12)$$

由式(12)求得最佳施氮量为 153 kg/hm².

(4)不同水分处理及施氮量下的水分利用效率 根据试验结果,计算了在不同水分条件下及在不同施氮条件下的水分利用效率如表3所示,从表3可以看出,无论在何种水分条件下,均以施氮量 150~225 kg/hm² 的水分利用效率最大;不论哪种施氮量,均以水分处理为 60%~80% 的水分利用效率最高.这说明水肥只有合理搭配,即施氮量 150~225 kg/hm²,水分控制在占田间持水量的 60%~80%时,水分才能充分利用,其利用效率才能达到最大.

表3 不同水分处理及施氮量下的冬小麦水分利用效率(kg/m³)

水分处理	施氮量(kg/hm ²)				
	0	75	150	225	300
Eck	0.961	1.168	1.516	1.486	1.370
E1	1.072	1.253	1.417	1.463	1.385
E2	1.195	1.415	1.542	1.583	1.481
E3	0.942	1.050	1.123	1.083	0.842

(5)经济效益分析 我们知道,无论水过多或氮过多,都会增大投入,因此必须从经济效益的观点出发,分析其效益情况,从而达到最佳的经济效益.为此建立效益函数:

$$E = Y \cdot p_w - N \cdot p_1 - ET \cdot p_2 - E_e \quad (13)$$

式中: E 为效益函数, Y 为产量(kg/hm²), p_w 为小麦价格(元/kg), N 为施氮量(kg/hm²), p_1 为氮的价格(元/kg), ET 为耗水量(mm), p_2 为水价(元/mm · hm²), E_e 为其它支出(元/hm²).利用式(13)计算了不同水分处理及施氮量下的小麦经济效益如表4所示.从表4可以看出,无论在何种水分条件下,施氮量在 150~225 kg/hm² 时,经济效益最好;无论在何种施氮量情况下,均以水分处理在 60%~80% 的情况下经济效益最高.另外,从产量最高值 6016 kg/hm²,计算其经济效益为 5872 元/hm²;从最佳水分与氮素搭配的产量 6013 kg/hm²,计算经济效益为 5963 元/hm².说明最高产量产生的经济效益未必最高,水分与氮素只有最佳搭配,才能产生最高的经济效益^[5].

表 4 不同水分处理及施氮量下的小麦经济效益(元/hm²)

水分处理	施氮量(kg/hm ²)				
	0	75	150	225	300
Eck	171.90	1439.40	2110.20	2179.20	1648.95
E1	1617.45	2305.80	3415.20	3412.80	2813.70
E2	3555.90	4629.60	5101.50	4974.15	4247.55
E3	3737.10	4499.70	4665.60	4232.25	3197.10

2.3 水肥调控模型

(1)水分控制 由于在农业生产上水分的控制很难保证维持在一定的范围,但根据郑州地区的气候特点,即夏季降水集中,土壤贮存有较多的底墒,结合小麦全生育期的降水和耗水量,大致可以这样划分灌溉模式^[1](以下每次灌水量均为 90 mm):①降水正常年型(190~230 mm 左右),灌 1~2 水(灌浆期,拔节期);②降水偏少年型(150~190 mm),灌 2~3 水(灌浆期,拔节期,播种期);③降水偏多年型(210~300 mm),灌 1 水(灌浆期)或不灌。

(2)施氮量控制 对氮素的控制,结合当地的肥源情况,可以这样确定:①碳铵 450 kg/hm²;②尿素 150~225 kg/hm²,并配施一定的有机肥,即可满足小麦 6000 kg/hm² 产量水平的需要。

(3)生产验证 1996 年度按上述施肥模式,对灌水模式进行了验证.本年度小麦全生育期降水量仅为 140 mm,属于降水偏少年型,按照制定的灌溉模式,灌 2~3 水即可满足小麦生产需要.据实际应用,灌 2 水产量为 6046 kg/hm²,而灌 5 水的产量为 6336 kg/hm²,灌 1 水产量仅为 5382 kg/hm².由此可知,灌 5 水仅比灌 2 水的产量高 289 kg/hm²,而灌 2 水比灌 1 水产量高 665 kg/hm².灌 5 水的,平均每次灌水增产量为 96 kg/hm²,灌 2 水的为 664.5 kg/hm².由此可知,灌 2 水的增产效果明显。

对施肥模式也进行了验证,在灌 2 水的试验中,分别排有 75、150、300 kg/hm² 施氮量,当施氮量为 75 kg/hm²,产量为 5355 kg/hm²;施氮量为 150 kg/hm² 时,产量为 6046 kg/hm²;施氮量为 300 kg/hm² 时,产量为 6210 kg/hm².平均每公顷每增加 1 kg 氮量时,增加的产量分别为 138 kg/hm² 和 17 kg/hm².所以,施氮量为 150 kg/hm² 的增产作用更显著。

3 结论与讨论

(1)冬小麦田 1.30 m 砂壤土层的土壤湿度控制在占田间持水量 60%~80%,施氮量在 150~225 kg/hm² 时,氮肥作用效果最好,水分利用效率最大,获得的经济效益最佳。

(2)经生产检验,水肥调控模式在河南省砂壤土冬小麦生产中的应用是可行的.即使在降水偏少年型,根据土壤墒情灌 2 水、施氮量 150 kg/hm²,冬小麦也可获得较大的增产幅度。

(3)水肥之间的关系是十分复杂的,由于条件的限制,本研究仅考虑水分和氮素的搭

配问题,而磷、钾则补充到充足状况,对有机肥也未作更深入地研究。

(4)本试验仅考虑了全生育期的土壤水分状况,对各生育阶段则未作进一步的划分,这就忽略了各生育阶段水分对作物的影响差异。

参 考 文 献

- 1 朱自玺,赵国强,邓天宏.冬小麦优化灌溉模型及其应用.华北农学报,1995,10(4):26~31.
- 2 郑仁塘,刘云发.水肥综合作用对作物产量的影响及其定额的拟定.灌溉排水,1995,14(2):8~13.
- 3 张航,徐福得,赵明智.渭北旱塬春玉米高产农艺措施最佳组合方案的研究.干旱地区农业研究,1994,12(4):45~49.
- 4 崔文华,卢亚东.化肥和有机肥对作物产量和土壤养分影响的研究.土壤通报,1993,24(6):270~272.
- 5 李象山,张廷珠,王方云,等.土壤水分对氮肥肥效影响的试验.应用气象学报,1993,4(1):73~77.

THE INFLUENCES OF WATER AND NITROGENOUS FERTILIZER ON WINTER WHEAT YIELD AND THE CONTROLLING TECHNIQUE

Zhao Guoqiang Zhu Zixi Deng Tianhong Fang Wensong Hou Jianxin

(Henan Research Institute of Meteorological Science, Zhengzhou 450003)

Abstract

Based on the controlling experiments of soil water and nitrogenous fertilizer for winter wheat, the influences of soil water and nitrogen on winter wheat yield and the interaction between soil water and nitrogen are analyzed by means of mathematical statistics and mathematical analysis. The model of soil water and fertilizer for winter wheat is established for sandy loam. Through the testing in production, the model could be used in agricultural production.

Key word: Winter wheat Effect of water and fertilizer Water utility