河套灌区春小麦节水高产农艺措施优化

李晓娟, 关雯雯, 张永平, 王立雪

(内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 在前期研究确立的节水灌溉模式基础上, 通过四因素五水平二次回归正交设计试验, 以基本苗数、种肥磷量、追氮肥量和灌水量四项主要农艺措施为决策变量, 以产量和水分利用效率为目标函数, 分别建立了内蒙古河套灌区主要农艺措施与春小麦产量和水分利用效率的二次多项式回归模型。分析表明, 四项农艺措施对产量影响大小顺序为播种密度 > 种肥磷量 > 施氮量 > 灌水量; 对水分利用效率的决定作用表现为灌水量 > 播种密度 > 施氮量 > 种肥磷量。通过频数寻优, 定量化地提出了河套灌区春小麦实现节水与高产统一的农艺措施优化组合方案, 即基本苗数 $667.5 \sim 717.1$ 万株· hm^{-2} , 种肥磷量 (P_2O_5) $147.0 \sim 175.5$ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 拔节期追施氮量 (纯 N) $164.5 \sim 186.6$ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 拔节期和抽穗期灌水量定额分别为 $909.7 \sim 963.0$ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 可实现目标产量大于 7500 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 水分利用效率 1.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。

关键词: 春小麦; 农艺措施; 河套灌区; 节水高产

中图分类号: S512.1+2 **文献标志码:** A

Optimized agronomic measures for water-saving and high-yielding of spring wheat in Hetao irrigation district

LI Xiao-juan, GUAN Wen-wen, ZHANG Yong-ping, WANG Li-xue

(Agricultural College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: Based on quadratic regression orthogonal design of four factors method, This study established a quadratic polynomial regression model for major agronomic practices of spring wheat in Inner Mongolia Hetao irrigation district. The results showed that effects of four agronomic measures on yield were in the order of sowing density > amount of phosphorus fertilizer > nitrogen rate > irrigation quantity, and those on water use efficiency were irrigation quantity > sowing density > nitrogen rate > amount of phosphorus fertilizer. The optimizing combination agronomic measures for spring wheat in Hetao irrigation district are proposed as follows: seedling density $6.675 \sim 7.171 \times 10^4$ plants· hm^{-2} , phosphorus rate (P_2O_5) $147.0 \sim 175.5$ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, nitrogen rate (pure N) of jointing stage $164.5 \sim 186.6$ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, irrigation amount at jointing and heading stage $909.7 \sim 963.0$ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. Collectively, these combined measures can achieve the target yield of spring wheat over 7500 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and water use efficiency above 1.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Keywords: spring wheat; agronomic measures; hetao irrigation district; water-saving and high-yielding

内蒙古河套灌区气候干旱少雨, 且水资源短缺, 发展节水农业已成为当务之急。春小麦是河套灌区的主要粮食作物之一, 在粮食生产中占有举足轻重的地位。传统的小麦高产栽培技术采用充分灌溉制度, 生育期间灌水 4~5 次, 灌溉定额 3 450~4 050 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ [1]; 伴随着多次、大量灌水, 化肥的投入量也在逐年增加[2-3]。在高水肥投入条件下, 小麦生

产中水肥利用率低、损失量大, 由此导致地下水硝态氮含量超标、土壤板结等一系列生态环境问题[4]。针对上述问题, 我们研究初步确立了“河套灌区春小麦高产节水灌溉模式”, 即在秋季浇足底墒水基础上, 生育期灌 2 次水产量达到 6750 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上, WUE 达到 1.5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 实现了节水与高产的统一[5]。

收稿日期: 2014-05-01

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(200903007); 国家“十二五”科技支撑计划重点项目(2011BAD29B03)

作者简介: 李晓娟(1986—), 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要从事作物节水高产生理的研究。

通信作者: 张永平(1970—), 男, 内蒙古包头人, 教授, 主要从事作物高产高效栽培研究工作。E-mail: cauzyp@sohu.com。

目前,国内外关于施肥、灌水、种植密度等农艺措施对小麦产量影响的研究已有大量报道^[6-11],但大多局限于充分灌溉条件下的单因素试验研究,节水条件下不同农艺措施对小麦产量及水分利用效率综合影响的研究尚未见报道。本研究旨在前期确立的春小麦节水高产灌溉模式基础上,深入分析施氮量、施磷量、种植密度及灌水定额对节水春小麦产量和水分利用效率的综合效应,量化地提出春小麦实现节水高产的优化农艺措施组合,为建立河套灌区春小麦节水高产栽培技术体系提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2012年和2013年分别在内蒙古巴彦淖尔市水利科学研究所曙光实验站和五原县农业技术推广中心进行,试验区位于巴彦淖尔市境内,属大陆性干旱、半干旱气候,大气干燥,降水稀少,蒸发强烈,年降水量为136~225 mm,年蒸发量为1 992~3 305 mm,无霜期117~150 d。曙光实验站土壤基础肥力为:有机质26.08 g·kg⁻¹,碱解氮34.17

mg·kg⁻¹,速效磷48.40 mg·kg⁻¹,速效钾187.00 mg·kg⁻¹,pH值7.90。五原县农业推广中心土壤基础肥力为:有机质22.98 g·kg⁻¹,碱解氮70.56 mg·kg⁻¹,速效磷21.57 mg·kg⁻¹,速效钾134.56 mg·kg⁻¹,pH值7.92。

1.2 试验设计

2012年:试验设施氮量(N)、种肥磷量(P)、基本苗数(D)、灌水定额(I)4个因素,每个因素5个水平,采用四因素五水平二次回归正交设计(1/2)方案,17个处理组合,其编码水平及实际值见表1和表2。供试小麦品种为当地主推良种永良4号。采用随机区组排列,重复3次,共51个试验小区,每小区面积为21 m²,行距15 cm。磷肥按处理水平作为底肥随播种一次性施入,氮肥在拔节期结合灌水追施。灌水分别在拔节期和抽穗期进行,其它管理措施同普通小麦大田。

2013年:与2012年试验设计基本相同。只是将基本苗“0”水平的实际值在2012年对应数值基础上增加75万·hm⁻²,其他编码水平的实际值依此推算。

表1 四因素五水平二次回归正交设计(1/2)方案(2012年)

Table 1 The quadratic regression orthogonal design of four factors and five levels(2012)

施氮量(N) Nitrogen rate(N)		施磷量(P) The amount of phosphorus(P)		基本苗数(D) Basic seedling density(D)		灌水定额(I) Irrigation quantity(I)	
编码值 Code value	实际值 Actual value (纯 N, kg·hm ⁻²)	编码值 Code value	实际值 Actual value (P ₂ O ₅ , kg·hm ⁻²)	编码值 Code value	实际值 Actual value (10 ⁴ ·hm ⁻²)	编码值 Code value	实际值 Actual value (m ³ ·hm ⁻²)
-1.3640	48	-1.3748	46.5	-1.3640	396	-1.3897	588
-1	75	-1	75	-1	450	-1	675
0	150	0	150	0	600	0	900
1	225	1	225	1	750	1	1125
1.3897	253.5	1.4032	255	1.3897	808.5	1.3897	1212

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤水分含量 在小麦播种前、各个生育时期及收获后,用时域反射仪(TDR)连续观测各试验处理小区的土壤含水率变化,每隔20 cm土层读数一次,观测深度1.6 m。收获后在田间挖土壤剖面,每隔20 cm土层用环刀取样,测定土壤容重,采用农田水分平衡方程计算不同处理的耗水状况。

$$ETa = P + I - \Delta W$$

式中,ETa为小麦生育期耗水量(mm),包括植株蒸腾量与植株间地表蒸发量;P为生育期内降水量(mm);I为生育期内灌溉量(mm);ΔW为小麦生育期内的土壤贮水变化量,即播种前土壤贮水量与收获后土壤贮水量的差值。土壤贮水量 $W = 0.1rvh$,

式中W为不同深度土层的贮水量(mm);r为土壤含水量(%);v为土壤平均容重(g·cm⁻³);h为土层深度(cm);0.1为换算系数。

1.3.2 考种及测产 小麦成熟时,在全部试验小区选取典型2m²×2样点,单独收获,晒干脱粒测产。同时在各试验处理小区选取具有代表性的50 cm典型样段带回室内,进行考种。考种指标有穗长、穗宽、有效小穗数、不孕小穗数等穗部性状及穗数、穗粒数、千粒重等产量构成因子。

1.4 数据统计分析

所有试验数据均采用Excel(2003)和SPSS(19)软件进行统计分析。

表 2 四因素五水平二次回归正交设计(1/2)编码与实际值对照(2012 年)

Table 2 Comparison of coded values and actual values of quadratic regression orthogonal design(1/2)(2012)

处理序号 Number	处理编号 Treatment	设计矩阵 Design matrix				施肥量 Fertilizer rate		基本苗数 Seedling density /(10 ⁴ ·hm ⁻²)	灌水定额 Irrigation quantity /(m ³ ·hm ⁻²)
		N	P	D	I	施氮量 N Nitrogen rate(N) /(kg·hm ⁻²)	施磷量 P ₂ O ₅ The amount of phosphoru /(kg·hm ⁻²)		
1	N ₄ P ₄ D ₄ I ₄	1	1	1	1	225	225	750	1125
2	N ₄ P ₄ D ₂ I ₂	1	1	-1	-1	225	225	450	675
3	N ₄ P ₂ D ₄ I ₂	1	-1	1	-1	225	75	750	675
4	N ₄ P ₂ D ₂ I ₄	1	-1	-1	1	225	75	450	1125
5	N ₂ P ₄ D ₄ I ₂	-1	1	1	-1	75	225	750	675
6	N ₂ P ₄ D ₂ I ₄	-1	1	-1	1	75	225	450	1125
7	N ₂ P ₂ D ₄ I ₄	-1	-1	1	1	75	75	750	1125
8	N ₂ P ₂ D ₂ I ₂	-1	-1	-1	-1	75	75	450	675
9	N ₁ P ₃ D ₃ I ₃	-1.3640	0	0	0	48	150	600	900
10	N ₅ P ₃ D ₃ I ₃	1.3897	0	0	0	253.5	150	600	900
11	N ₃ P ₁ D ₃ I ₃	0	-1.3748	0	0	150	46.5	600	900
12	N ₃ P ₃ D ₃ I ₃	0	1.4032	0	0	150	255	600	900
13	N ₃ P ₃ D ₁ I ₃	0	0	-1.3640	0	150	150	396	900
14	N ₃ P ₃ D ₃ I ₃	0	0	1.3897	0	150	150	808.5	900
15	N ₃ P ₃ D ₃ I ₁	0	0	0	-1.3897	150	150	600	588
16	N ₃ P ₃ D ₃ I ₅	0	0	0	1.3897	150	150	600	1212
17	N ₃ P ₃ D ₃ I ₃	0	0	0	0	150	150	600	900

2 结果与分析

2.1 不同农艺措施对节水春小麦产量及其构成因素的影响

不同农艺措施处理下,春小麦的经济产量表现出明显差异(表 3、表 4)。两个年度小麦经济产量均以中等基本苗、中量施肥和灌水处理(17 小区)表现最高,其他处理的经济产量明显低于该处理。

由表 3、表 4 可见,2012 年随基本苗数增加单位面积穗数呈线性增加,2013 年当基本苗数达到一定值后,穗数表现为下降趋势,这是由于 2013 年设计的基本苗数较高所致。当施氮量、施磷量和灌水定额较少时,穗数均随施肥和灌水量增加而明显增大,当施氮量、施磷量和灌水定额超过一定量后,穗数开始降低。可见,节水条件下控制基本苗、施氮量、施磷量和灌水量在合理范围之内,是获得较高穗数的保证。在本试验节水灌溉条件下,春小麦的穗粒数随着基本苗数的增大而显著减少;增加施氮量、施磷量和灌水量,穗粒数均表现为增多趋势。不同施氮量和施磷量处理下,千粒重均以中量施肥处理较高。说明土壤供肥状况良好,保证了籽粒形成和发育的营养要求,有利于千粒重提高,肥量过高或过低,千粒重降低。随着基本苗数和灌水量增加,千粒重均

呈降低趋势。有效小穗数随着密度的增大逐渐减少,而无效小穗数随着密度的增大逐渐增多;穗长和穗宽随着施氮量、施磷量的增大逐渐增大,随着基本苗数的增大却逐渐降低。灌水处理间比较,以中水处理下的穗长和穗宽最大。

相关分析表明,不同农艺措施处理下单位面积穗数与经济产量呈显著正相关。说明通过增加基本苗数提高穗数是节水条件下春小麦获得高产的关键措施。

2.2 节水春小麦综合农艺措施与产量的关系

以施氮量(X_1)、种肥磷量(X_2)、基本苗数(X_3)、灌水量(X_4)四项农艺措施为决策变量,产量结果为目标函数,通过多元线性回归分析建立了节水春小麦综合农艺栽培措施与产量关系的数学模型:

$$Y = 513.7 + 8.06X_1 + 12.00X_2 - 0.26X_3 + 12.27X_4 - 8.36X_2X_3 - 18.71X_2X_4 + 12.06X_3X_4 - 6.85X_1^2 - 9.67X_2^2 - 20.32X_3^2 - 5.74X_4^2 \quad (2012 \text{ 年})$$

$$Y = 530.9 + 8.06X_1 + 0.52X_2 + 4.86X_3 + 6.72X_4 - 6.56X_2X_3 - 3.66X_2X_4 - 3.39X_3X_4 - 14.54X_1^2 - 10.42X_2^2 - 16.63X_3^2 - 16.33X_4^2 \quad (2013 \text{ 年})$$

其中, Y 为产量, $X_i = 1, 2, 3, 4$ 分别为施氮量、施磷量、基本苗数、灌水量 4 项农艺措施的编码值。

表3 不同农艺措施处理下节水春小麦的产量及其构成因素(2012年)

Table 3 The yield and its component factors of water-saving spring wheat under different agronomic measures (2012)

处理 Treatment	穗长 Spike length /cm	穗宽 Spike width /cm	有效小穗 Effective spikelet per spike	无效小穗 Ineffective spikelet per spike	千粒重 Grain weight /g	穗粒数 Grain number per spike	穗数 Spike number / $(10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$	经济产量 Economic output / $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
1	7.9	1.2	9.9	1.9	41.8 c	24.3 de	877.5 ab	7254.0 c
2	8.4	1.4	10.9	2.3	42.3 c	27.7 bc	837.4 b	7772.1 b
3	7.9	1.3	10.9	3.0	41.3 c	25.4 d	833.1 b	6525.0 e
4	8.0	1.5	11.1	1.8	37.4 e	29.3 b	832.2 b	7192.8 cd
5	7.3	1.4	11.0	2.2	41.9 c	27.3 c	855.0 b	6985.5 d
6	7.9	1.3	12.0	1.9	40.4 d	31.2 a	812.5 b	7032.0 cd
7	7.8	1.3	11.0	2.7	42.9 a	25.5 cd	891.0 ab	7632.0 b
8	6.6	1.4	9.1	2.6	41.6 cd	26.6 cd	848.9 b	6525.0 e
9	7.2	1.2	11.2	3.0	40.4 d	25.1 d	840.0 b	7102.5 cd
10	7.2	1.4	9.7	2.5	42.5 c	27.1 cd	866.2 ab	7719.0 b
11	7.1	1.2	9.6	2.7	40.6 d	24.5 de	843.5 b	6985.5 d
12	6.8	1.2	9.2	3.5	40.9 d	26.9 cd	869.2 ab	7672.5 b
13	8.2	1.4	12.1	1.4	43.0 a	32.1 a	690.0 c	7009.9 d
14	7.1	1.3	9.7	3.1	41.1 d	22.1 e	915.3 a	7047.6 cd
15	8.1	1.1	9.0	2.5	43.7 a	23.2 e	829.5 b	7254.0 c
16	7.0	1.3	9.9	2.9	41.7 c	27.2 cd	847.5 b	7630.5 b
17	8.5	1.4	11.7	1.9	42.8 b	26.9 cd	865.9 ab	8128.5 a
R	0.289	0.064	0.062	-0.073	0.219	0.148	0.716*	—

注: R 为各产量性状指标与经济产量的相关系数,“*”表示相关达到显著水平($P < 0.05$);同列数据中不同小写字母表示差异达到显著水平。下同。

Note: R, correlation coefficient of yield characters and WUE; *, significant level ($P < 0.05$). Different lowercase letters in the same column mean significant difference. The same below.

表4 不同农艺措施处理下节水春小麦的产量及其构成因素(2013年)

Table 4 The yield and its component factors of water-saving spring wheat under different agronomic measures(2013)

处理 Treatment	穗长 Spike length /cm	穗宽 Spike width /cm	有效小穗 Effective spikelet per spike	无效小穗 Ineffective spikelet per spike	千粒重 Grain weight /g	穗粒数 Grain number per spike	穗数 Spike number / $(10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$	经济产量 Economic output / $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
1	9.6	1.9	12.7	1.8	42.9 ab	27.4 bc	774.0 ab	7285.5 cd
2	9.1	1.9	13.6	1.8	43.0 ab	30.5 ab	658.7 d	6969.0 d
3	9.2	1.9	13.5	2.0	43.6 ab	26.1 c	777.0 ab	7485.0 c
4	9.4	2.1	13.9	1.4	40.4 b	31.5 ab	672.0 d	7120.7 d
5	9.0	1.7	14.3	1.3	43.3 ab	32.0 a	748.5 b	7137.0 d
6	9.5	2.1	13.8	2.2	42.9 ab	31.3 ab	646.2 d	6946.2 d
7	9.0	2.0	13.2	1.8	43.9 a	28.5 bc	754.5 b	7478.5 c
8	9.5	2.1	13.7	2.2	42.8 ab	25.7 c	669.0 d	6548.7 e
9	9.0	1.9	12.5	2.0	43.1 ab	27.3 bc	724.5 bc	7254.0 cd
10	9.5	2.0	12.9	1.6	41.0 b	28.3 bc	743.7 b	7731.0 bc
11	9.2	1.9	12.8	1.9	43.0 ab	27.8 bc	744.0 b	7468.5 c
12	9.3	1.9	12.6	2.4	43.6 ab	28.8 b	793.5 a	7737.7 bc
13	9.8	2.0	14.2	1.8	43.8 a	32.9 a	652.0 d	7792.5 b
14	8.7	1.9	13.0	2.2	41.9 ab	27.9 bc	800.2 a	7092.3 d
15	9.2	1.9	12.5	1.8	42.5 ab	27.8 bc	706.5 c	7252.7 cd
16	8.9	1.9	13.1	1.9	41.5 ab	29.1 b	729.0 bc	7615.4 bc
17	9.4	2.1	13.7	1.8	43.7 ab	28.2 bc	790.5 a	8191.2 a
18	8.4	1.6	12.2	1.5	40.3 b	24.8 c	645.7 d	6187.8f
R	0.444	0.378	0.141	-0.095	0.444	0.298	0.575*	—

由单因素效应曲线的斜率可知,四项农艺措施对产量影响大小顺序为:播种密度 > 种肥磷量 > 施氮量 > 灌水量。对上述方程采用产量决策频数分析,求得节水春小麦实现目标产量的优化农艺措施组合方案(表 5),即在拔节期和抽穗期灌 2 水模式

下,基本苗数控制在 667.5 ~ 717.1 万株·hm⁻²,种肥磷量(P₂O₅)140.4 ~ 177.9 kg·hm⁻²,拔节期追施氮量(纯 N)164.5 ~ 187.8 kg·hm⁻²,拔节期和抽穗期灌水定额均为 909.7 ~ 979.7 m³·hm⁻²,可实现目标产量 7 500 kg·hm⁻²以上。

表 5 节水春小麦实现目标产量的优化农艺措施组合

Table 5 The optimized combination of agronomic measures to achieve target yield of water-saving spring wheat

年份 Years	目标产量 Target yield /(kg·hm ⁻²)	施氮量 Nitrogen rate (纯 N, kg·hm ⁻²)	种肥磷量 The amount of phosphorus (P ₂ O ₅ , kg·hm ⁻²)	基本苗数 Seeding density (10 ⁴ ·hm ⁻²)	灌水定额 Irrigation quantity /(m ³ ·hm ⁻²)
2012	≥7500	169.7 ~ 187.8	156.7 ~ 177.9	684.3 ~ 717.1	909.7 ~ 979.7
2013	≥7500	164.5 ~ 181.4	140.4 ~ 160.5	667.5 ~ 710.4	923.4 ~ 972.0

2.3 不同农艺措施对节水春小麦水分利用的影响

两个试验年度,不同农艺措施对小麦水分利用的影响表现出相似的变化趋势(表 6、表 7)。总体来看,当施氮量、施磷量和基本苗数较低时,水分利用效率(WUE)均随施肥和基本苗数的增加而明显增大,当施氮量、施磷量和基本苗数超过一定量后,WUE 开始下降。在本试验节水灌溉模式下,随着灌

水定额的增加,WUE 呈明显下降趋势。相关分析表明,不同农艺措施处理下 WUE 与总耗水量、灌水量均呈显著负相关,灌水量与土壤水消耗量呈显著负相关。说明随着灌水量的增加,对土壤水的消耗量减少,生育期总耗水量显著增加,WUE 明显下降。进一步证明,土壤水是决定春小麦水分利用效率高低的因素。

表 6 不同农艺措施下节水春小麦耗水组成及其水分利用效率(2012 年)

Table 6 The water consumption and water use efficiency of water-saving spring wheat under different agronomic measures (2012)

处理 Treatment	耗水组成 Water composition/(m ³ ·hm ⁻²)			总耗水量 Total water consumption /(m ³ ·hm ⁻²)	经济产量 Economic yield /(kg·hm ⁻²)	WUE /(kg·m ⁻³)
	土壤水 Soil water	降水 Precipitation	灌水 Irrigation			
1	196.9	1923.0	2250.0	4369.9 de	7254.0	1.66 b
2	1847.0	1923.0	1350.0	5120.0 b	7772.1	1.52 d
3	994.5	1923.0	1350.0	4267.5 de	6525.0	1.53 d
4	449.6	1923.0	2250.0	4622.6 cd	7192.8	1.56 cd
5	1134.3	1923.0	1350.0	4407.3 de	6985.5	1.59 c
6	1053.8	1923.0	2250.0	5226.8 ab	7032.0	1.35 f
7	1130.1	1923.0	2250.0	5303.1 ab	7632.0	1.44 e
8	937.7	1923.0	1350.0	4210.7 e	6525.0	1.55 cd
9	959.9	1923.0	1800.0	4682.9 c	7102.5	1.52 d
10	722.8	1923.0	1800.0	4445.8 d	7719.0	1.74 ab
11	887.8	1923.0	1800.0	4610.8 cd	6985.5	1.52 d
12	668.7	1923.0	1800.0	4391.7 de	7672.5	1.75 ab
13	373.3	1923.0	1800.0	4096.3 e	7009.9	1.71 b
14	963.1	1923.0	1800.0	4686.1 c	7047.6	1.50 d
15	952.8	1923.0	1176.0	4051.8 e	7254.0	1.79 a
16	1041.4	1923.0	2424.0	5388.4 a	7630.5	1.42 e
17	839.1	1923.0	1800.0	4562.1 cd	8128.5	1.78 a
R	-0.443	—	-0.380	-0.742**	0.315	

2.4 不同农艺措施与节水春小麦水分利用效率的关系

以施氮量(X_1)、种肥磷量(X_2)、播种密度(X_3)、灌水量(X_4)四项农艺措施为决策变量,水分利用效率(WUE)为目标函数,通过多元线性回归分

析建立了春小麦综合农艺措施与水分利用效率的数学模型:

$$WUE = 1.731 + 0.055X_1 + 0.03X_2 - 0.003X_3 - 0.059X_4 + 0.065X_2X_3 - 0.002X_2X_4 + 0.019X_3X_4 - 0.049X_1^2 - 0.045X_2^2 - 0.06X_3^2 - 0.06X_4^2 \quad (2012 \text{ 年})$$

$$WUE = 1.745 + 0.034X_1 + 0.021X_2 + 0.005X_3 - 0.033X_4 + 0.025X_2X_3 + 0.003X_2X_4 + 0.003X_3X_4 - 0.027X_1^2 - 0.099X_2^2 - 0.082X_3^2 - 0.083X_4^2 \quad (2013 \text{年})$$

其中, $X_i = 1, 2, 3, 4$ 分别为施氮量、种肥磷量、基本苗数、灌水量 4 项农艺措施的编码值。

由单因素效应曲线的斜率可知, 四项农艺措施对水分利用效率的决定作用表现为灌水量 > 播种密

度 > 施氮量 > 灌水量。对上述两个年度的回归方程, 采用水分利用效率决策频数分析, 得出春小麦获得高 WUE 的优化农艺措施组合方案(表 8), 即在节水栽培模式下, 基本苗数控制在 661.0 ~ 788.5 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$, 种肥磷量 (P_2O_5) 147.0 ~ 175.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 追施氮量(纯 N) 150.9 ~ 186.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 灌水定额 801.0 ~ 963.0 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, WUE 可达到 1.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。

表 7 不同农艺措施下节水春小麦耗水组成及其水分利用效率(2013 年)

Table 7 The water consumption and water use efficiency of water-saving spring wheat under different agronomic measures (2013)

处理 Treatment	耗水组成 Water composition/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$			总耗水量 Total water consumption $\text{/(m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	经济产量 Economic yield $\text{/(kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	WUE $\text{/(kg} \cdot \text{m}^{-3})$
	土壤水 Soil water	降水 Precipitation	灌水 Irrigation			
1	1122.2	1152.6	2250.0	4524.8 de	7285.5	1.61 d
2	2126.8	1152.6	1350.0	4629.4 d	6969.0	1.51 e
3	2864.9	1152.6	1350.0	5367.5 ab	7485.0	1.40 e
4	1506.9	1152.6	2250.0	4909.5 c	7120.7	1.45 f
5	2268.1	1152.6	1350.0	4770.7 cd	7137.0	1.50 e
6	1340.8	1152.6	2250.0	4743.4 cd	6946.2	1.46 f
7	2122.1	1152.6	2250.0	5524.6 a	7478.5	1.35 f
8	2298.5	1152.6	1350.0	4801.1 c	6548.7	1.36 f
9	1433.9	1152.6	1800.0	4386.5 e	7254.0	1.65 c
10	1497.9	1152.6	1800.0	4450.5 de	7731.0	1.74 ab
11	1552.5	1152.6	1800.0	4505.1 de	7468.5	1.66 c
12	2352.3	1152.6	1800.0	5304.9 b	7737.7	1.46 f
13	1918.7	1152.6	1800.0	4871.3 c	7792.5	1.60 d
14	1526.1	1152.6	1800.0	4478.7 de	7092.3	1.58 d
15	1773.6	1152.6	1176.0	4102.2 f	7252.7	1.77 a
16	1847.1	1152.6	2424.0	5423.7 ab	7615.4	1.40 e
17	1763.1	1152.6	1800.0	4715.6 cd	8191.2	1.74 b
R	-0.522	—	-0.219	0.793**	0.399	

表 8 节水春小麦高水分利用效率的优化农艺措施组合

Table 8 The optimized combination of agronomic measures to achieve high water use efficiency of water-saving spring wheat

年份 Years	水分利用效率 WUE $\text{/(kg} \cdot \text{m}^{-3})$	施氮量 Nitrogen rate (纯 N, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	种肥磷量 The amount of phosphorus (P_2O_5 , $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	基本苗数 Seeding density ($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌水定额 Irrigation quantity $\text{/(m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$
2012	≥ 1.6	150.9 ~ 179.3	158.3 ~ 175.5	688.9 ~ 722.5	801.0 ~ 954.7
2013	≥ 1.6	163.0 ~ 186.6	147.0 ~ 161.9	661.0 ~ 788.5	911.5 ~ 963.0

综上所述, 两个年度节水栽培春小麦获得高产和高 WUE 的优化农艺措施方案存在明显交集。因此, 综合分析认为, 河套灌区春小麦节水与高产统一的优化农艺措施方案为: 基本苗数 667.5 ~ 717.1 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$, 种肥磷量 (P_2O_5) 147.0 ~ 175.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 拔节期追施氮量(纯 N) 164.5 ~ 186.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 拔节期和抽穗期灌水定额分别为 909.7 ~ 963.0 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 经济产量可达到 7 500 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上, 水分利用效率 1.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。

3 结论与讨论

黄河流域水资源日趋紧缺, 迫使春小麦生产必须走节水高产之路。关于小麦水分关系以及对水分胁迫的响应与适应机理已有大量研究, 但节水与高产的统一仍然是研究的难点^[12-14]。综合国内外的研究表明, 适当减少灌溉次数、控制灌水量并不明显降低产量, 且有利于提高小麦的水分利用效率^[4-6, 13-15], 我们在严重缺水的河套灌区经过几年的研究, 初步提出了“春小麦高产栽培节水灌溉模

式”,即在秋季浇足底墒水基础上,将全生育期灌水次数减为 2 次,经济产量仍达 $6\ 750\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,实现了节水与高产的统一^[5,13]。

限水灌溉是一项限制性措施,必然对小麦的生长发育产生一定的负效应,但通过发挥农艺措施(种植密度、灌水和施肥等)的调节和补偿作用可达到既降低耗水又获得高产^[4,14]。研究表明,冬小麦节水高产必须通过建立大群体、小叶形、高光效、低耗水的群体结构来实现,其中,发挥高密度和增施磷肥的补偿效应是获得节水高产的关键^[16]。本试验在前期研究确立的“河套灌区春小麦高产节水灌溉模式”基础上,分别建立了春小麦经济产量、水分利用效率与基本苗数、种肥磷量、追氮肥量和灌水量四项农艺措施的二次多项式回归方程。由回归系数可以看出,播种密度和种肥磷量是决定节水春小麦产量高低的关键因素,这与前人的研究结论基本一致。本研究通过目标产量和水分利用效率决策频数分析,提出河套灌区春小麦节水与高产统一的优化农艺措施方案为:基本苗数 $667.5\sim 717.1$ 万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,种肥磷量(P_2O_5) $147.0\sim 175.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,拔节期追施氮量(纯 N) $164.5\sim 186.6\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,拔节期和抽穗期灌水定额分别为 $909.7\sim 963.0\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,经济产量可达到 $7\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,水分利用效率 $1.6\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。

20 世纪 90 年代,对内蒙古河套灌区充分灌溉条件下春小麦高产优化栽培措施的研究早有报道^[17-18]。安玉麟等研究提出的充分灌溉春小麦高产优化栽培措施为:播种量 $330\sim 360\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施氮量 $225\sim 300\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施磷量 $135\sim 150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[17]。刘克礼等得出的农艺措施优化组合方案为密度 $537.0\sim 553.5$ 万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,种肥磷量 $93.0\sim 97.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,追氮肥量 $156.0\sim 165.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[18]。与本试验节水栽培条件下得出的高产优化方案相比,充分灌溉条件下的施氮量较高,而种植密度和施磷量较低。进一步证明,通过适当增加基本苗增加穗数,从而扩大群体库容并增加种子根数目,改善根群分布,进而增施磷肥促进根群发育和养分吸收,提高生育后期对深层土壤水的利用。同时通过拔节前控水控制叶面积,从而改善群体结构,在高密度下实现源库协调和群体高光效、低耗水的统一,这是小麦节水高产栽培的基本技术原理^[16,19]。

本试验结果表明,在优化种植密度、施肥量和灌水量条件下,河套平原灌区春小麦的经济产量超过 $7\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,水分利用效率可达 $1.6\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,远高于目前现有报道的数值范围。说明小麦节水仍有潜力,小麦增产空间很大。河套灌区春小麦节水、

高产多因素组合数学模型的建立,为实现北方灌区春小麦模式化、数量化栽培提供了切实可行的途径。由于整个河套灌区各地的小气候、土壤条件不同,可耗水资源多少各异,以及年际间降水、蒸发量、地下水变化及其分布的差异,因此本研究提出的春小麦节水高产优化农艺措施方案的适应性和持续性尚待进一步验证。

参 考 文 献:

- [1] 罗其有,陶 陶,宫连英,等. 黄河流域农业水资源优化配置[J]. 干旱区资源与环境,1994,8(2):1-6.
- [2] 中国农业学院土壤肥料研究所. 中国肥料[M]. 上海:上海科学技术出版社,1994.
- [3] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴[Z]. 北京:中国统计出版社,2009.
- [4] 兰林旺,周殿玺. 小麦节水高产研究[M]. 北京:中国农业大学出版社,1995.
- [5] 张永平,谢 岷,井 涛,等. 内蒙古河套灌区春小麦高产节水灌溉制度研究[J]. 麦类作物学报,2013,33(1):96-102.
- [6] Condon A G. The effect of variation in soil water availability, vapory pressure deficit and nitrogen nutrition on carbon isotope discrimination in wheat water use efficiency[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1992,43(5):935-947.
- [7] Caviglia O P. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat[J]. Field Crops Research, 2001, 69:259-266.
- [8] Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China, Agric[J]. Water management,2002,55:203-216.
- [9] 沈荣开,王 康,张瑜芳,等. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究[J]. 农业工程学报,2001,17(5):35-38.
- [10] 任 魏,姚克敏,于 强. 水分调控对冬小麦同化物分配与水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(4):92-94.
- [11] 李世娟,周殿玺,诸叶平,等. 水分和氮肥运筹对小麦氮素吸收分配的影响[J]. 华北农学报,2002,17(1):69-75.
- [12] Elhdaie B. Variation in water use efficiency and its components in wheat. 2. pot and field experiments[J]. Crop Sci., 1995,35(6):1617-1626.
- [13] 霍清枝. 内蒙古河套灌区作物高产非充分灌溉模式的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
- [14] 李建民,周殿玺. 冬小麦水肥高效利用栽培技术原理[M]. 北京:中国农业大学出版社,2000.
- [15] 李秧秧,上官周平,刘文兆. 冬小麦不同生育期灌水组合下产量、耗水量和水分利用效率关系的探讨[J]. 地理科学进展,1998,17(增刊):18-25.
- [16] 张永平. 冬小麦节水高产栽培群体源性能特征及其调控机制[D]. 北京:中国农业大学,2004.
- [17] 安玉麟,张玉贵. 内蒙古河套灌区春小麦高产栽培优化农艺措施及数学模型的研究[J]. 华北农学报,1992,7(2):1-8.
- [18] 刘克礼,高聚林,张永平,等. 内蒙古西部平原灌区春小麦综合栽培措施与产量关系模型的研究[J]. 麦类作物学报,2003,23(3):90-96.
- [19] 张永平,王志敏,王 璞,等. 冬小麦节水高产栽培群体光合特征[J]. 中国农业科学,2003,36(10):1143-1149.