doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.034

基于不同底墒的最优水肥调控方案研究

许卫娜[1,2]　杨宝平[1,2]　丁瑞霞[1,2]　聂俊峰[1,2]　韩清芳[1,2]　贾志宽[1,2]

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
2. 农业农村部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了探讨不同底墒条件下的水肥运筹,在大型半自动控制防雨池栽条件下,通过设置不同底墒、生育期补水量及施氮量,研究了各试验因子主效应及互作效应。结果表明,各试验因子对冬小麦产量的影响顺序由大到小依次为底墒、施氮量、补水量,对水分利用效率的影响顺序由大到小依次为底墒、补水量、施氮量;底墒、施氮量、补水量与冬小麦产量、水分利用效率的耦合分别存在显著的负效应和正效应;在底墒充足条件下,施氮量能充分发挥底墒的增产作用,提高水分利用效率。通过优化分析,得出各指标可接受区域(大于等于 0.95 最大值)的重叠区域所对应的水氮范围分别为:90 ~ 100 mm 和 104.5 ~ 224.5 kg/hm^2(底墒 450 mm),94.3 ~ 100 mm 和 105.8 ~ 186.4 kg/hm^2(底墒 350 mm)。底墒为 650 mm 时,冬小麦产量最大,水分利用效率较高,所对应的水氮范围分别为 71 ~ 100 mm 和 141.2 ~ 264.8 kg/hm^2。

关键词: 冬小麦; 底墒; 补水量; 施氮量; 空间分析

中图分类号: S512.1$^+$1; S363　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0327-10　　**OSID**:

Water and Nitrogen Inputs Optimization Based on Different Soil Water Storage at Planting

XU Weina[1,2]　YANG Baoping[1,2]　DING Ruixia[1,2]　NIE Junfeng[1,2]　HAN Qingfang[1,2]　JIA Zhikuan[1,2]

(1. *Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Crop Physi-ecology and Tillage Science in Northwest Loess Plateau*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to explore the nitrogen rate and water management, the multivariate regression analysis was applied to explore how levels of available soil water storage at planting (W_B), supplemental water during the growing period (R) and nitrogen rate (N) affected yields of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and water use efficiency (WUE) in a mobile rain-proof shed between 2013 and 2015. The results showed that effects of all factors on yields of winter wheat followed the sequence of W_B, N and R. Likewise, effects of all factors on WUE followed the sequence of W_B, R and N. The coupling of all factors on yield and WUE had significant negative and positive effects, respectively; in adequate W_B, nitrogen rate could fully exploit the role of W_B on yield-increasing, and improve WUE. Acceptable yield and WUE were defined as greater than or equal to 0.95 of the maximum predicted response within the range of the treatments. Overlap of acceptable zones of grain yields and WUE were respectively 90 ~ 100 mm and 104.5 ~ 224.5 kg/hm^2 (W_B = 450 mm), 94.3 ~ 100 mm and 105.8 ~ 186.4 kg/hm^2 (W_B = 350 mm). At W_B = 650 mm, overlap of acceptable zone of the maximum grain yield and the high WUE was 71 ~ 100 mm and 141.2 ~ 264.8 kg/hm^2.

Key words: winter wheat (*Triticum aestivum* L.); soil water storage at planting; supplemental water; nitrogen rates; spatial analysis

收稿日期: 2020-09-14　修回日期: 2020-10-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA100504、2013AA102902)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD09B03、2011BAD29B09)

作者简介: 许卫娜(1980—),女,研究实习员,主要从事作物生理生态研究,E-mail: xunana0921@163.com

通信作者: 贾志宽(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事旱区农业资源管理与开发研究,E-mail: jiazhk@126.com

0 引言

水资源短缺已成为制约我国北方地区农业可持续发展的瓶颈。干旱半干旱区是典型的旱作农业区,该地区自然降水少、年际变率大,且季节分布不均匀,60% 的降水主要分布在 7—9 月。而冬小麦生育期正逢少雨季节,土壤表层经常处于干旱状态,降水不能满足植物生长需要,须靠播种前土层丰富的蓄水量维持较高的产量,这严重限制了肥料的吸收利用。大量的肥料投入促进了作物产量的提高,但由于利用率低下带来了严重的环境问题[1-2]。如何利用播前土壤蓄水量确定肥料的投入是确保该区域粮食稳产、高效的主要措施。

肥和水是作物生长不可缺少的两个主要因素,其相互促进、相互制约[3-4]。研究发现,施肥的增产效果与土壤水分状况密切相关,不同供水条件下的施肥效果有很大差别[3,5-9]。在水分适宜范围内,高湿度土壤形成的产量高、氮素利用率高[10];在干旱条件下,小麦对施肥的效应高度依赖于生育期土壤的有效水含量[11]。

在旱地农业中,如何有效地提高降水-土壤水-作物水-光合作用-干物质积累-经济产量间的转化效率,并创建有利于农业可持续发展的农田生态环境,是我国农业生产长期需要研究解决的问题。作物水分利用效率与产量是作物生产追求的两大目标。以兼顾这两大指标为目标确定作物水肥优化耦合区域,学者们进行了大量的研究[12-18]。LIU 等[19]和 FU 等[20]利用弹性系数得出作物获得最大产量和水分利用效率的水肥投入量。对两个或两个以上指标进行综合评价,在理论上可以通过对各指标的多元回归联合求解获得兼顾各指标的最优水肥组合,但是由于指标间的相互制约作用,该极值往往难以求出,而且由于试验处理有限,潜在最优处理有可能在所设处理之外,因此得出的最优处理的代表性较差。然而,利用空间分析方法[21]对各指标多元回归方程所得三维曲面进行水平投影,寻找各指标可接受区域(例如,大于等于 0.95 最大值)的重叠区,即可得到兼顾各指标的最优组合范围。在干旱半干旱区,应有效利用播前 0 ~ 200 cm 土层的土壤水分含量(底墒)进行肥水运筹,以推动水资源严重短缺区域发展提质增效的适水农业[22]。

本研究在大型防雨池栽条件下,播前精准设置不同底墒、生育期补水量、施氮量,运用多元回归分析不同水肥条件与产量、水分利用效率的关系,并结合空间分析方法对小麦各指标进行综合评价,以期确定兼顾作物产量和水分利用效率的最优水肥方案,为优化该地区冬小麦绿色高效生产的水肥精准投入提供理论依据与技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料和设计

试验于 2013—2015 年在西北农林科技大学旱区节水农业研究院大型作物控水监测试验场启闭式防雨棚下进行。该试验场位于陕西省杨凌区(北纬 34°18′,东经 108°4′,海拔 466.7 m),属暖温带半湿润易旱气候区,试验年的气候变化见表 1。试验小区为面积 6.7 m^2(3.15 m × 2.13 m)的水泥池,池深 3 m,每池四周为 17 cm 厚水泥墙,用以防止水分水平交换。池中土壤为深 2.5 m 垆土原状土柱(原位土),分层填入。池底部设有滤层(0.5 m 厚沙子和石子)和排水管,以防池底积水。遇雨雪盖棚,全年防雨水进入。0 ~ 60 cm 土层土壤基础养分见表 2。

表 1 2013—2015 年的气候变化

Tab. 1 Weather data change during 2013—2015

月份	2013—2014 年				2014—2015 年			
	T_{max}/℃	T_{min}/℃	R_{ad}/(MJ·m^{-2}·d^{-1})	P_n/mm	T_{max}/℃	T_{min}/℃	R_{ad}/(MJ·m^{-2}·d^{-1})	P_n/mm
7	36.6	18.2	16.4	108.9	39.8	19.1	24.1	22.9
8	37.5	15.9	18.5	32.0	36.0	15.1	16.5	108.6
9	26.8	16.6	13.7	68.4	22.8	15.8	11.0	215.1
10	30.4	4.7	11.3	33.7	20.1	10.3	10.5	55.9
11	20.9	-5.3	8.2	16.0	11.6	2.7	8.6	21.9
12	14.3	-9.5	8.2	0	6.0	-3.8	11.5	0.2
1	10.0	-7.0	9.7	0	5.5	-3.3	8.0	6.4
2	18.2	-6.7	6.8	28.0	8.9	-1.1	11.1	1.9
3	25.5	-0.7	14.1	28.7	14.1	5.0	13.0	55.1
4	26.9	5.3	14.3	142.0	20.4	9.2	17.0	119.6
5	32.1	5.1	20.0	38.4	26.8	14.3	19.6	31.6
6	34.0	16.0	20.1	51.3	28.0	18.1	16.3	107.1

注:T_{max}为最高温度;T_{min}为最低温度;R_{ad}为太阳辐射;P_n 为降雨量。

表 2　供试土壤基础养分

Tab. 2　Basic nutrient of tested soil

土层深度/cm	有机质质量比/(g·kg^{-1})	全氮质量比/(g·kg^{-1})	碱解氮质量比/(mg·kg^{-1})	速效磷质量比/(mg·kg^{-1})	速效钾质量比/(mg·kg^{-1})	pH 值
0 ~ 20	10.004	0.728	54.061	9.388	130.124	8.38
20 ~ 40	9.158	0.707	43.146	8.719	125.121	8.26
40 ~ 60	7.088	0.687	37.706	7.602	116.153	8.15

试验采用裂-裂-区设计,2 次重复。土壤底墒(WB)为主区处理,3 个土壤底墒分别为 350、450、650 mm,即在每年八月和九月灌溉 100、200、350 mm,进行人工造墒,播种前再测墒补灌调整至试验设计底墒。施氮量(N)为副区处理,4 个施氮量,即 0 kg/hm^2(N0)、105 kg/hm^2(N105)、210 kg/hm^2(N210)、315 kg/hm^2(N315)。播种前基施纯磷 126 kg/hm^{2}和纯钾 31 kg/hm^2。所有肥料于播前整地时一次性均匀撒施于地表然后深翻土壤(20 ~ 25 cm),氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 16%),钾肥为硫酸钾(含 K_2O 45%)。生育期间补水量(R)为副副区处理,4 个补水量,即 0 mm(R0)、56.3 mm(R1)、78.1 mm(R2)、100 mm(R3),具体补水量见表 3,用水表计量,池内每小区又分成 4 个微区进行均匀微滴灌补水,以减少侧渗(漏),确保入渗率。

表 3　补水量方案

Tab. 3　Supplemental water scheme　　mm

处理	生育期补水量			累计补水量
	拔节期	抽穗期	灌浆期	
R0	0	0	0	0
R1	18.8	12.5	25.0	56.3
R2	21.8	18.8	37.5	78.1
R3	25.0	25.0	50.0	100.0

底墒依据中国北方半湿润偏旱区 30 年冬小麦播种期的 0 ~ 200 cm 土壤蓄水量变化状况进行设置;补水量按照中国北方旱作麦区 30 年小麦返青后(2 月—成熟)不同降雨年型分别模拟控制;施氮量依据唐拴虎等[23]的研究,施氮量与降水量呈二次函数关系,降水偏少地区施纯氮量为 75 kg/hm^{2}最佳,降水较多的地区要获得小麦最高产量,应以高肥纯氮(112.5 ~ 150 kg/hm^2)最佳。参照以上研究结果并结合当地实际情况,确定试验方案。

以冬小麦长旱 58(半冬性旱地国审品种)为供试材料,于每年 10 月中旬播种,播种量 135 kg/hm^2,行距 25 cm,人工开沟点播,株距 1.5 cm,深度 5 ~ 7 cm,播后用水平尺测平,以利于后期均匀补水。出苗三叶期后定苗,于每年 6 月上旬收获。

1.2　测定指标和方法

冬小麦播种前、收获后各处理小区测定土层 0 ~ 200 cm 的土壤含水率。0 ~ 30 cm 用常规土钻取土烘干法测定,40 ~ 200 cm 用 TDR 时域反射计(TRIME - FM 型,德国 IMKO 公司)测定,间隔 10 cm。

成熟时分区测产,每处理选取无明显缺苗断垄的 3 个 1 m^{2}进行收获,同时每小区选取有代表性的 30 株冬小麦按常规法进行室内单株考种分析。土壤蓄水量计算式为

$$W = \sum W_i D_i H_i \times 10/100$$

式中　W——土壤蓄水量,mm

W_i——第 i 层土壤质量含水率,%

D_i——第 i 层土壤容重,g/cm^3

H_i——第 i 层土层厚度,cm

作物耗水量计算式为

$$ET = R + \Delta W$$

式中　ET——作物生育期内耗水量,mm

R——生育期内补水量,mm

ΔW——播前期与收获期 0 ~ 200 cm 土壤蓄水量差值,mm

水分利用效率计算式为

$$WUE = \frac{Y}{ET}$$

式中　WUE——水分利用效率,kg/(hm^2·mm)

Y——冬小麦产量,kg/hm^2

1.3　数据分析

试验数据采用 SPSS 17.0 软件进行方差(ANOVA)分析,采用 LSD 法进行显著性检验。

2　结果与分析

2.1　水肥对产量和水分利用效率的影响

根据各处理产量、水分利用效率结果进行回归模拟,建立两年产量、水分利用效率与底墒、施氮量和补水量的模型。

2013—2014 年模型为

$$Y = -7\,089.939\,2 + 22.114\,8W_B + 5.830\,7N + 9.283\,9R + 0.006\,5W_BN - 0.005\,6W_BR - 0.007\,7NR - 0.007\,5W_B^2 - 0.026\,4N^2 + 0.021\,0R^2$$

($t_0=9.0^{**}$, $t_1=7.0^{**}$, $t_2=4.4^{**}$, $t_3=2.2^{*}$, $t_4=3.3^{**}$, $t_5=1.2$, $t_6=0.9$, $t_7=2.4^{*}$, $t_8=10.2^{*}$, $t_9=0.8$) (1)

$$WUE=-102.854\,8+0.451\,6W_B+0.028\,8N+0.119\,4R+0.000\,03W_BN-0.000\,2W_BR-0.000\,03NR-0.000\,4W_B^2-0.000\,1N^2-0.000\,1R^2$$

($t_0=13.9^{**}$, $t_1=15.1^{**}$, $t_2=2.4^{*}$, $t_3=2.6^{*}$, $t_4=2.2^{*}$, $t_5=3.8^{**}$, $t_6=0.5$, $t_7=13.9^{**}$, $t_8=6.7^{**}$, $t_9=0.1$) (2)

2014—2015 年模型为

$$Y=-7\,068.433\,1+21.036\,9W_B+9.087\,4N+12.120\,7R+0.003\,8W_BN-0.006\,0W_BR-0.004\,3NR-0.005\,8W_B^2-0.033\,5N^2+0.021\,9R^2$$

($t_0=5.8^{**}$, $t_1=4.3^{**}$, $t_2=4.4^{**}$, $t_3=2.3^{*}$, $t_4=2.2^{*}$, $t_5=0.7$, $t_6=0.8$, $t_7=1.4^{*}$, $t_8=9.2^{**}$, $t_9=0.3$) (3)

$$WUE=-107.337\,8+0.464\,3W_B+0.027\,4N+0.123\,5R+0.000\,03W_BN-0.000\,2W_BR-0.000\,04NR-0.000\,4W_B^2-0.000\,1N^2-0.000\,1R^2$$

($t_0=20.2^{**}$, $t_1=21.8^{**}$, $t_2=3.1^{**}$, $t_3=4.5^{**}$, $t_4=2.1^{*}$, $t_5=5.4^{**}$, $t_6=0.8$, $t_7=20.4^{**}$, $t_8=7.3^{**}$, $t_9=0.8$) (4)

式中 W_B——底墒,mm N——施氮量,kg/hm^2

$t_0\sim t_9$——各方程回归系数 t 检验值

其中,* 表示差异显著,** 表示差异极显著。经检验:2013—2014 年度,方差检验量 F 分别为 514.932 7**、57.261 1**,拟合优度分别为 0.985 8**、0.901 9**;2014—2015 年度,方差检验量 F 分别为 227.179 5**、56.869 4**,拟合优度分别为 0.968 8**、0.908 9**。模型系数差异极显著,该模型能反映产量、水分利用效率的变化过程。

通过优化设计,剔除不显著项后,只有常数项、底墒、施氮量和补水量的系数有变化,而且变化很小。所以,本研究选用剔除不显著项后的模型。

2013—2014 年模型为

$$Y=-7\,046.186\,2+22.805\,3W_B+7.348\,4N+9.308\,2R+0.005\,1W_BN-0.007\,5W_B^2-0.026\,4N^2$$ (5)

$$WUE=-99.898\,7+0.451\,6W_B+0.027\,3N+0.099\,4R+0.000\,03W_BN-0.000\,2W_BR-0.000\,4W_B^2-0.000\,1N^2$$ (6)

2014—2015 年模型为

$$Y=-6\,756.292\,6+21.355\,4W_B+10.679\,1N+9.636\,1R+0.005\,1W_BN-0.006\,5W_B^2-0.033\,5N^2$$ (7)

$$WUE=-106.886\,9+0.464\,3W_B+0.025\,2N+0.104\,0R+0.000\,03W_BN-0.000\,2W_BR-0.000\,4W_B^2-0.000\,1N^2$$ (8)

2.1.1 底墒、施氮量、补水量的主因子效应

根据式(5)~(8)回归系数和 t 值可知,各试验因素均有明显的增产作用,对产量影响由大到小依次为底墒、施氮量、补水量,对水分利用效率影响由大到小依次为底墒、补水量、施氮量。底墒和施氮量的交互项系数为正值,说明底墒和施氮量间存在相互促进作用,底墒和补水量的交互项系数为负值,说明底墒与补水量间存在互相替代作用。底墒、施氮量二次项系数均为负值,可知在设计范围内产量、水分利用效率随着底墒和施氮量的增加而增加,最后将呈逐渐降低的趋势,过多水肥投入,不仅增加生产成本,而且会使产量和水分利用效率降低。

2.1.2 底墒、施氮量、补水量的单因子效应

由图 1a、1b(图中试验因子水平为各实验值与最大实际值之比,下同)可看出,产量随施氮量的增加呈抛物线变化,存在产量最高点,继续增加施氮量产量降低;随着土壤底墒和补水量的增加,产量显著增加。由图 1c、1d 可知,水分利用效率随土壤底墒、施氮量的增加呈抛物线变化,存在水分利用效率最大点,继续增加底墒、施氮量水分利用效率降低。随着补水量的增加,水分利用效率提高。

2.1.3 底墒、施氮量、补水量的单因子边际效应

图 2 表明,底墒、施氮量两因子的边际产量、边际水分利用效率效应随投入量的增加呈递减趋势,且施氮量边际产量效应的递减大于底墒,底墒边际水分利用效率的递减大于施氮量;而补水量因子的边际产量、边际水分利用效率效应随着补水量的增大几乎不变,说明补水量对边际产量、边际水分利用效率几乎无影响。边际效应曲线分别与 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、边际水分利用效率为正效应,亦说明随着投入量的增加,边际产量、边际水分利用效率的累加值增大。超过最适宜投入量后,边际产量、边际水分利用效率为负效应,进一步表明再增加投入量,边际产量、边际水分利用效率的累加值减小。

2.1.4 底墒、施氮量、补水量的交互效应

根据式(1)~(4)回归系数和 t 值可知,两两因子间都表现出交互作用,其对产量影响由大到小依次为底墒与施氮量的交互作用、底墒与补水量的交互作用、施氮量与补水量的交互作用;其对水分利用效率影响由大到小依次为底墒与补水量的交互作用、底墒与施氮量的交互作用、施氮量与补水量的交互作用。其中,底墒和施氮量的交互项系数为正值,

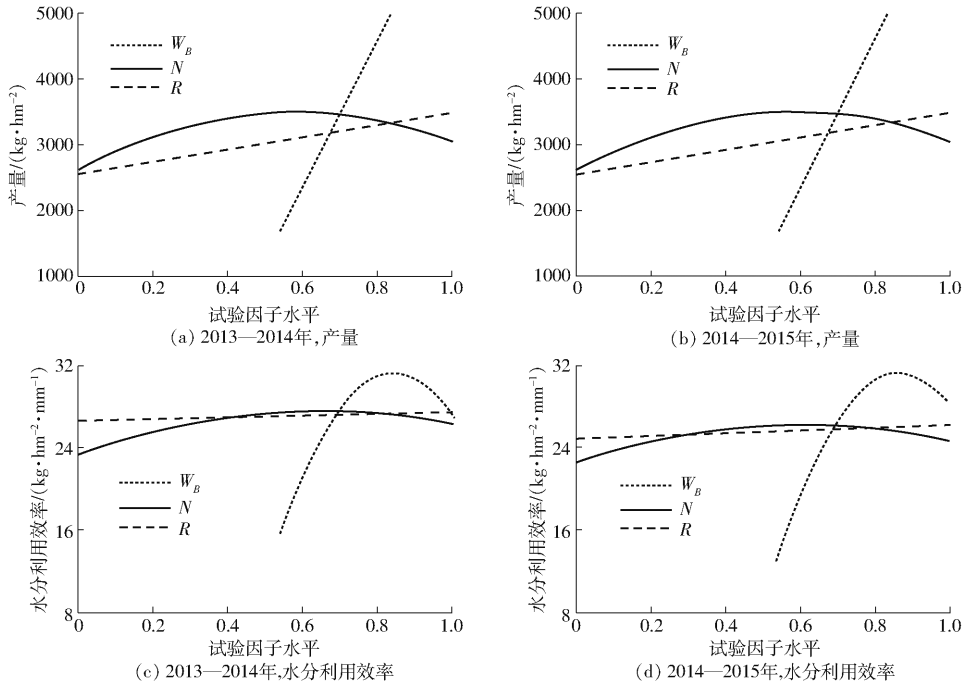


图 1　试验因子的主要效应

Fig. 1　Main effect of experimental factors

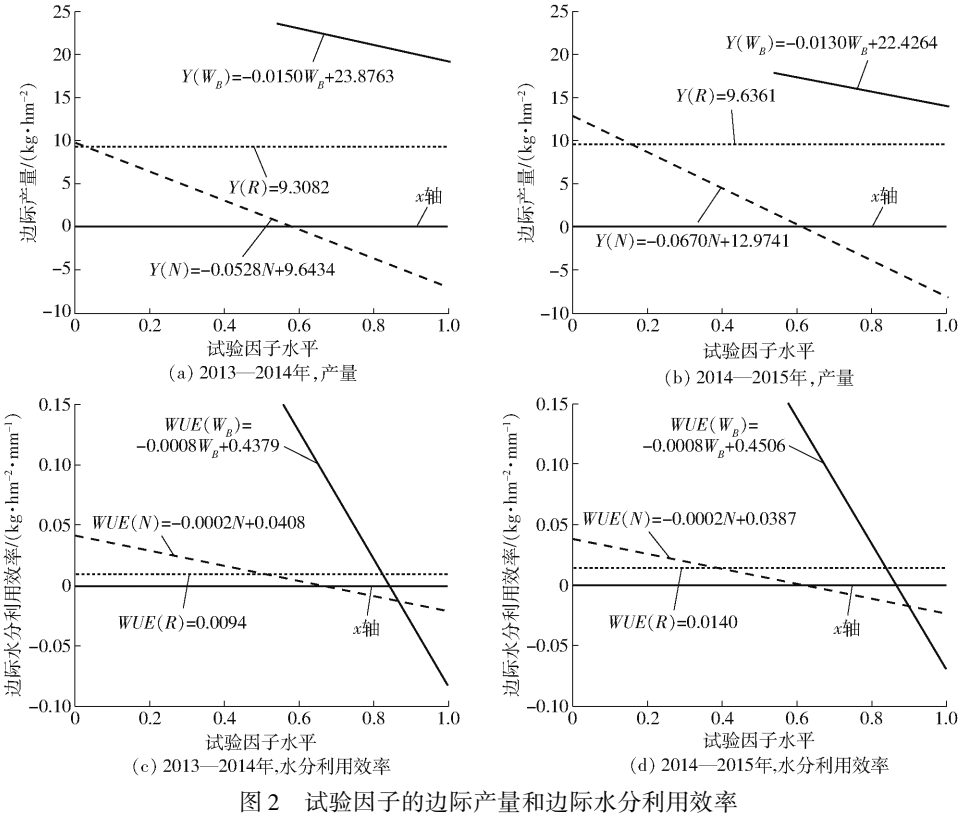


图 2　试验因子的边际产量和边际水分利用效率

Fig. 2　Marginal yield and marginal WUE of experiment factors

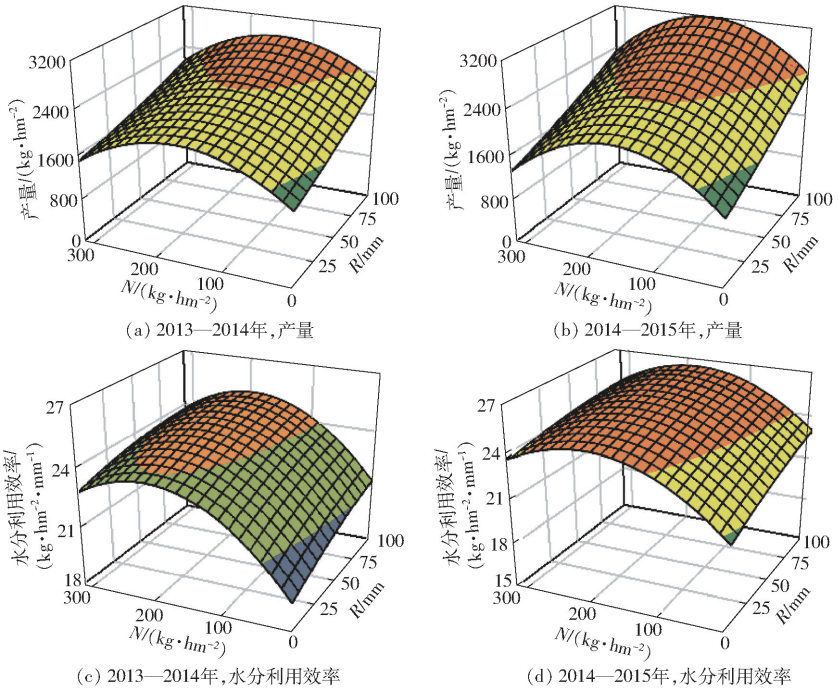
说明底墒与施氮量具有明显的相互促进作用。

(1)施氮量和补水量的交互效应

由图 3 可看出,当补水量固定,产量、水分利用效率随着施氮量的增加有提高的趋势,但超过一定施氮量后产量、水分利用效率有所降低,产量、水分利用效率具有最高点。同理,施氮量固定时,产量随补水量的增加而增加;而水分利用效率随着补水量的增加有提高的趋势,但超过一定补水量后水分利用效率降低。但是,随着补水量的增加,产量、水分利用效率达到最高点的施氮量有所不同。在补水量较低时,较高的施氮量才可以使产量、水分利用效率达到最高点。继续增加施氮量,则产量、水分利用效

率下降。

由图 3 也可看出,补水量与施氮量两因子同时变化对产量、水分利用效率的影响比单因子影响更为敏感和剧烈。如 2013—2014 年,在不补水不施肥的条件下(R = 0 mm,N = 0 kg/hm^2),产量、水分利用效率最低,产量仅为 1 343.0 kg/hm^2,水分利用效率为 19.4 kg/(hm^2·mm),随着补水量和施氮量的同时增加,产量、水分利用效率提高较快,当补水量和施氮量增加到 R = 100 mm、N = 151.2 kg/hm^{2}时,产量达到最高点,为 2 833.3 kg/hm^2;当补水量和施氮量增加到 R = 100 mm、N = 186.5 kg/hm^{2}时,水分利用效率达到最高点,为 25.2 kg/(hm^2·mm)。



(a) 2013—2014年,产量 (b) 2014—2015年,产量

(c) 2013—2014年,水分利用效率 (d) 2014—2015年,水分利用效率

图 3 施氮量与补水量交互作用的产量、水分利用效率效应

Fig. 3 Yield and WUE effects of interaction with nitrogen rate and supplemental water

(2)底墒与施氮量的交互效应

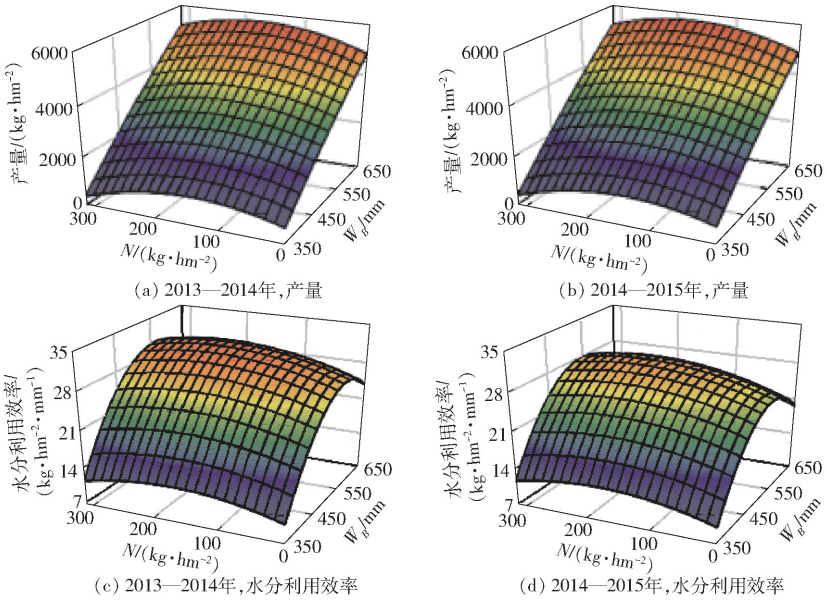
由图 4 可看出,当底墒固定,产量、水分利用效率随着施氮量的增加有提高的趋势,但超过一定施氮量后产量、水分利用效率有所降低,产量、水分利用效率具有最高点。同样,施氮量固定时,产量随底墒的增加而增加,水分利用效率随着底墒的增加有提高的趋势,但超过一定底墒水平后水分利用效率有所降低,有水分利用效率最高点。但是,随着底墒的增加,产量、水分利用效率达到最高点的施氮量不同。底墒较低时,产量随施氮量的增加幅度较大,水分利用效率随施氮量的增加幅度较小。当底墒最低(W_B = 350 mm)时,施氮量 N 由 0 kg/hm^{2}增加至 144.7 kg/hm^2,产量增幅为 213.0%;施氮量 N 由 0 kg/hm^{2}增加至 86.5 kg/hm^2,水分利用效率增幅为 6.5%。当底墒 W_B = 650 mm 时,施氮量 N 由 0 kg/hm^{2}增加至 170.2 kg/hm^2,产量增幅为 18.9%;施氮量 N 由 0 kg/hm^{2}增加至 131.5 kg/hm^2,水分利用效率增幅为 22.4%。当施氮量较低时,较高的底墒可以达到产量、水分利用效率最高点。

由图 4 也可看出,底墒与施氮量两因子同时变化对产量、水分利用效率的影响比单因子影响更为敏感和剧烈。在低底墒不施肥的条件下(W_B = 350 mm,N = 0 kg/hm^2),产量最低,仅为 294.9 kg/hm^2,水分利用效率仅为 11.6 kg/(hm^2·mm),随着底墒和施氮量的同时增加,产量、水分利用效率迅速提高,当底墒和施氮量增加到 W_B = 650 mm、N = 170.2 kg/hm^{2}时,产量达到最高点,为 5 458.1 kg/hm^2;当底墒和施氮量增加到 W_B = 550 mm、N = 202.5 kg/hm^{2}时,水分利用效率达到最高点,为 30.1 kg/(hm^2·mm)。

(3)底墒与补水量的交互效应

由图 5 可看出,无论底墒如何,产量均随补水量的增加而增加。当底墒固定在较低水平,水分利用效率随着补水量的增加而增加,当底墒固定在较高水平,水分利用效率随着补水量的增加而减少。同理,无论补水多少,产量均随底墒的增加而增加。当补水量固定时,水分利用效率随底墒的增加有提高的趋势,但超过一定底墒水平后水分利用效率有所降低,有水分利用效率最高点。但是,随着底墒的增加,水分利用效率达到最高点的补水量不同。

随着底墒和补水量的同时增加,产量迅速提高,且在补水量和底墒最高时,产量可达最高。在补水量较低时,较高的底墒条件才可以达到水分利用效

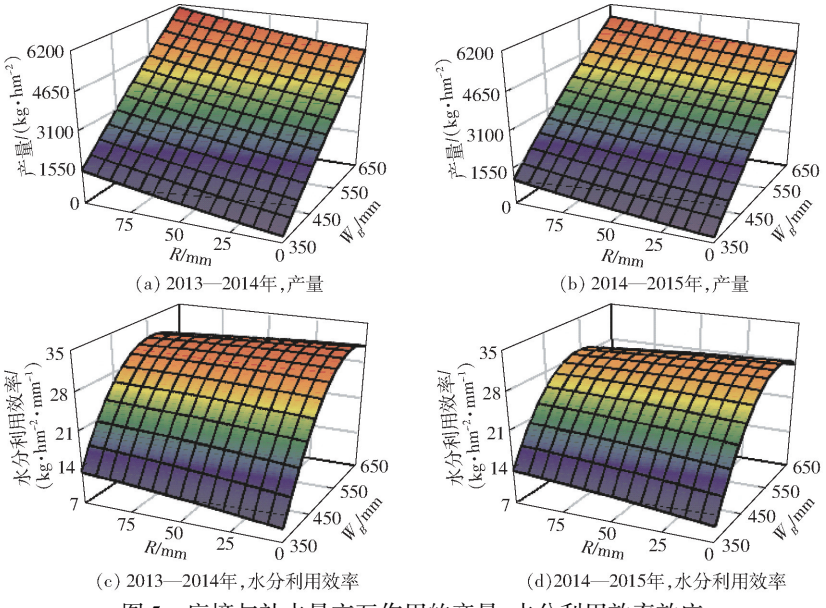


(a) 2013—2014年，产量　(b) 2014—2015年，产量

(c) 2013—2014年，水分利用效率　(d) 2014—2015年，水分利用效率

图 4　底墒与施氮量交互作用的产量、水分利用效率效应

Fig. 4　Yield and WUE effects of interaction with W_B and nitrogen rate



(a) 2013—2014年，产量　(b) 2014—2015年，产量

(c) 2013—2014年，水分利用效率　(d)2014—2015年，水分利用效率

图 5　底墒与补水量交互作用的产量、水分利用效率效应

Fig. 5　Yield and WUE effects of interaction with W_B and supplemental water

率最高点。如 2013—2014 年，当补水量最低（R = 0 mm）时，达到水分利用效率最高点的底墒为 W_B = 572.5 mm，最大水分利用效率为 29.9 kg/(hm²·mm)，底墒继续增加，则水分利用效率开始下降，当底墒达到最大值，即 W_B = 650 mm 时，水分利用效率下降到 27.4 kg/(hm²·mm)。当补水量提高时，在较低的底墒条件下水分利用效率就能达到最高点，如 R = 56.3 mm 时，W_B = 558.5 mm，水分利用效率就能达到最高点，为 29.5 kg/(hm²·mm)。同理，当底墒较低时，较多的补水可以达到水分利用效率最高点。由图 5 也可看出，底墒与补水量两因子同时变化对水分利用效率的影响比单因子影响更为敏感和剧烈。在低底墒不补水的条件下（W_B = 350 mm，R = 0 mm），水分利用效率为 10.0 kg/(hm²·mm)，随着底墒和补水量的同时增加，水分利用效率迅速增大，当底墒和补水量为 W_B = 585 mm、R = 0 mm 时，水分利用效率达到最高点，为 29.8 kg/(hm²·mm)。

上述分析也说明，在旱区冬小麦生产管理中，肥料的施用量应依据土壤底墒和补水量而定，同样，补水量应依据施氮量来确定。底墒、施氮量、补水量不足达不到高产，底墒、施氮量、补水量过多不仅浪费水肥资源，而且会降低产量。只有合理的肥、水配合，才能发挥出最佳交互耦合作用，获得最高产量的同时，实现水肥资源高效利用。

2.2　水肥耦合区域

通过空间分析方法对各指标多元回归方程所得

三维曲面进行水平投影,寻找各指标可接受区域(大于等于 0.95 最大值)的重叠区,即可得到兼顾各指标的最优组合范围。将产量、水分利用效率两项指标 95% 最大值的等值线投影后得到综合分析图(图 6 中阴影区域表示产量和水分利用效率同时大于等于 0.95 最大值的可接受区域),由图 6 可知,产量、WUE 同时达到大于等于 0.95 最大值的补水施肥区间,在底墒为 650 mm 时,两种因素的可接受区域没有重叠区(图 6a、6b)。在底墒为 450 mm 时,重叠区域为补水量 90 ~ 100 mm 和施氮量 104.5 ~ 224.5 kg/hm^2(图 6c、6d)。在底墒为 350 mm 时,重叠区域为补水量 94.3 ~ 100 mm 和施氮量 105.8 ~ 186.4 kg/hm^2(图 6e、6f)。在底墒为 650 mm,产量达到大于等于 0.95 最大值,水分利用效率大于等于 0.85 最大值所对应的水氮范围分别为 71 ~ 100 mm 和 141.2 ~ 264.8 kg/hm^2。

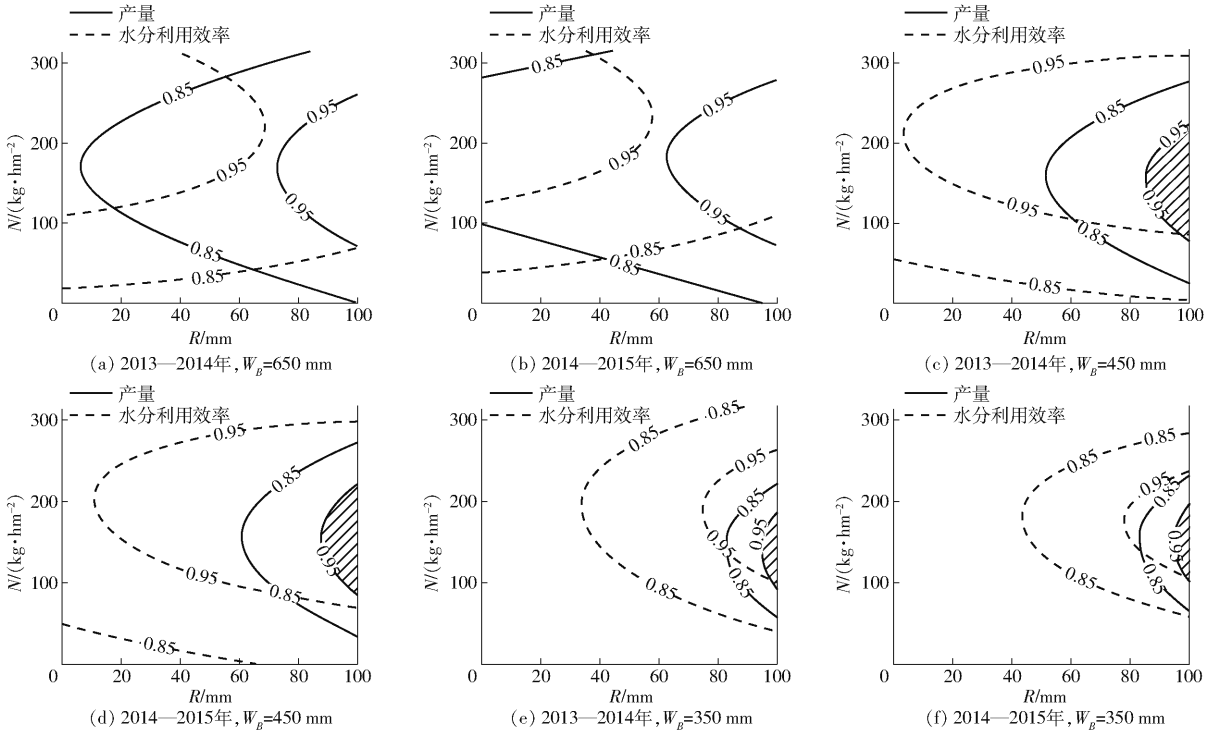


图 6 产量、水分利用效率的综合评价

Fig. 6 Comprehensive evaluation of grain yield and WUE

3 讨论

产量与水分利用效率是决定冬小麦经济效益的首要指标,提高产量与水分利用效率是实现高产高效的基础。水肥是影响冬小麦产量及水分利用效率的重要因素,“以肥调水”对提高作物的产量及水分利用效率有极其重要的作用[24-25]。研究表明,底墒是影响冬小麦产量和水分利用效率的主要因素[26],这与本研究结果一致。已有研究亦表明,施肥对提高冬小麦产量的影响大于灌溉[27]。适量施肥明显提高产量和水分利用效率,而施肥过量则会降低产量和水分利用效率[12,28-30]。施肥促进了作物的根系发育,增加了对土壤水分的吸收利用,形成了更多的经济产量[31],这与本试验结果相一致。多数研究指出,改善水分条件可以协调产量构成因素,提高产量[32-33];在高湿度条件下水分利用效率随着灌溉量的增加而降低[34],在干旱条件下,水分利用效率随着灌溉量的增加而增加[35],这也与本试验条件下中低底墒的研究结果相一致。

研究认为灌水量与施氮量的交互作用显著,而且以高水高肥对作物增产作用明显[12,36]。本研究结果表明,水肥耦合尤其底墒与施肥交互作用对旱作冬小麦产量的影响达到了显著水平。无论何种底墒,施肥均能增加作物的产量和水分利用效率,但当施氮量超过一定量时,产量和水分利用效率降低。随着底墒的增加,产量和水分利用效率达到最大时所用的施氮量不同,这与文献[37]研究结果一致。本试验结果亦表明,当补水量一定时,产量和水分利用效率随施氮量的增加呈开口向下的抛物线状,可能是过低或过高的肥料均不利于植株对水分的吸收和利用,从而造成减产;当施氮量一定时,随着补水量的增加,产量增加,底墒较高时水分利用效率降低,底墒较低时水分利用效率增加。

肥料的合理用量在很大程度上取决于土壤水分供应。LEGGETT 等[38]提出根据作物生长期间降雨量确定施氮量的建议,党建忠等[39]提出根据土壤底

墒和地力配方施肥技术。上述研究将施氮量与降雨量或播前土壤储水联系起来，但未将降雨量和播前土壤储水结合，而且未考虑降雨的入渗率。李生秀等[31]提出要较为准确地估计施氮量，可以有效水量（播前土壤储水量加上作物生长期间降雨的入渗水量）的利用效率、土壤养分丰缺程度或当前产量水平为依据，计算达到预定产量时的施氮量，但都是大田试验，没有明确播前底墒状况，无法准确计算、控制生育期降雨量（补水量），有些虽考虑底墒，但不包含 3 种年型的底墒设置。本研究模拟更为接近大田环境条件，在中低肥力土壤上，依据播前土壤有效底墒，通过设置能够充分代表整个旱区的底墒水平，由移动式大棚严格控制生育期降雨量（依据 30 年生育期平均降雨量保证率的 60% 采用精准补灌的方式补入，即补水量），结果表明，根据底墒状况和生育期降雨对旱地小麦进行量水配方施肥，能使降水与施肥有机结合，以肥调水，以水促肥，肥水相济，充分发挥降水的生产潜力和施肥的经济效益，实现绿色发展。

运用空间分析方法确定的水肥耦合优化区域是兼顾最大产量和最高水分利用效率两大目标而确定的，直接反映了最优的水肥投入量，推动农业适水发展与绿色高效节水，为旱区实际生产中的以水生产、量水施肥以及旱区冬小麦水肥调控提供了参考。

4　结论

（1）分别建立了旱区冬小麦产量、水分利用效率与底墒、施氮量和补水量的三元二次回归模型，并进行了系数检验，通过系数检验排除不显著项，重新建立的回归模型达到极显著水平。

（2）对产量、水分利用效率回归模型分别进行单因素效应分析、单因素边际效应分析以及各因素耦合效应分析，得到 3 个因素对产量影响顺序由大到小依次为底墒、施氮量、补水量，对水分利用效率影响顺序由大到小依次为底墒、补水量、施氮量。随施氮量的增加，产量、水分利用效率呈抛物线变化，存在产量最高点，继续增加施氮量则产量降低；产量随土壤底墒增加而增加，水分利用效率呈抛物线变化，存在水分利用效率最大点，继续增加底墒则水分利用效率降低。产量、水分利用效率随补水量的增加而提高。各耦合效应对产量的影响顺序由大到小依次为底墒与施氮量的交互作用、底墒与补水量的交互作用、施氮量与补水量的交互作用，对水分利用效率影响顺序由大到小依次为底墒与补水量的交互作用、底墒与施氮量的交互作用、施氮量与补水量的交互作用。其中，底墒和施氮量的交互项系数为正值，说明底墒与施氮量具有明显的相互促进作用。

（3）在旱作区冬小麦生产管理中，测定播前底墒，根据气象资料预测计算而设置补水量，通过水肥优化区域确定合理的施氮量、补水量优化方案为：在底墒为 650 mm 时，两种因素可接受区域没有重叠区；在底墒为 450 mm 时，补水量 90 ~ 100 mm 和施氮量 104.5 ~ 224.5 kg/hm^2。在底墒为 350 mm 时，补水量 94.3 ~ 100 mm 和施氮量 105.8 ~ 186.4 kg/hm^{2}较为科学。在底墒为 650 mm 时，产量达到大于等于 0.95 最大值，水分利用效率大于等于 0.85 最大值所对应的水氮范围分别为 71 ~ 100 mm 和 141.2 ~ 264.8 kg/hm^2。

参　考　文　献

[1] CHEN J Y, TANIGUCHI M, LIU G Q, et al. Nitrate pollution of groundwater in the Yellow River delta, China[J]. Hydrogeol Journal, 2007, 15(8): 1605 – 1614.

[2] MA J Z, DING Z Y, WEI G X, et al. Sources of water pollution and evolution of water quality in the Wuwei Basin of Shiyang River, Northwest China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2): 1168 – 1177.

[3] BENBI D K. Efficiency of nitrogen use by dry-land wheat in a sub-humid region in relation to optimizing the amount of available water[J]. Journal of Agricultural Science, 1990, 115(1): 7 – 10.

[4] 上官周平, 刘文兆, 徐宣斌, 等. 旱作农田冬小麦水肥耦合增产效应[J]. 水土保持研究, 1999, 6(1):103 – 106.
SHANGGUAN Zhouping, LIU Wenzhao, XU Xuanbin, et al. Interactive effects of water and fertilizer on yield of winter wheat in dryland[J]. Research of Soil Water Conservation, 1999, 6(1): 103 – 106. (in Chinese)

[5] GUTIÉRREZ-BOEM F H, THOMAS G W. Phosphorus nutrition affects wheat response to water deficit[J]. Agronomy Journal, 1998, 90(2): 166 – 171.

[6] 李刚, 王亚萍, 李超, 等. 黄土塬区高底墒条件下养分差别对冬小麦产量的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 146 – 156.
LI Gang, WANG Yaping, LI Chao, et al. Effect of nutrient difference on yield of winter under the condition of high soil moisture in the Loess Tableland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 146 – 156. (in Chinese)

[7] 梅旭荣, 黄桂荣, 严昌荣, 等. 水分亏缺冬小麦近等基因系冠气温差与群体总耗水量的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(1):248 – 257.
MEI Xurong, HUANG Guirong, YAN Changrong, et al. Canopy-air temperature difference of winter wheatnear-isogenic lines and its relationship with total water consumption by winter wheat grown under water deficit conditions[J]. Acta Ecological Sinica, 2019, 39(1):248 – 257. (in Chinese)

[8] 王睿, 李鹏, 王文娥. 水肥一体化下不同滴灌带配置对玉米产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5):327 – 333.
WANG Rui, LI Peng, WANG Wene. Effects of different drip irrigation belts distributions on maize yield under water and fertilizer

integration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(5):327 - 333. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190537&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.037. (in Chinese)

[9] 章杰, 胡田田, 何琼,等. 灌水量及减氮模式对冬小麦产量及水氮利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 148 - 154,182.
ZHANG Jie, HU Tiantian, HE Qiong, et al. Effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer-reduction pattern on yield and utilization of water and nitrogen of winter wheat[J]. Agriculture Research in the Arid Areas,2020, 38(1):148 - 154,182. (in Chinese)

[10] MUSICK J T, LAMM F R. Preplant irrigation in the central and southern high plains—a review[J]. Transaction of the ASAE, 1990, 33(6): 1834 - 1842.

[11] LABIRI A N. Interaction of water stress and mineral nutrition on growth and yield[M]//Turner, N C. Adaptation of plants to water and high temperature stress. New York: Wiley Internation Science, 1980:38 - 136.

[12] 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.

[13] 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.
LIU Zuoxin, ZHENG Zhaopei, WANG Jian. Effect of interaction between water and fertilizer on wheat and maize in a semiarid region of Western Liaoning[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 540 - 544. (in Chinese)

[14] 吕殿青, 刘军, 李瑛,等. 旱地水肥交互效应与耦合模型研究[J]. 西北农业学报, 1995, 4(3):72 - 76.
LÜ Dianqing, LIU Jun, LI Ying, et al. The interaction between fertilizer and water and their coupled model[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 1995, 4(3): 72 - 76. (in Chinese)

[15] 孟兆江. 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.
MENG Zhaojiang. Mathematical models of water-fertilizer interaction for water-saving and high-yield winter wheat in east area of Henan Province[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(1): 86 - 90. (in Chinese)

[16] 王秀康,邢英英,张富仓. 膜下滴灌施肥番茄水肥供应量的优化研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):141 - 150.
WANG Xiukang, XING Yingying, ZHANG Fucang. Optimal amount of irrigation and fertilization under drip fertigation for tomato[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,47(1):141 - 150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160119&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.019. (in Chinese)

[17] 张忠学,张世伟,郭丹丹,等. 玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 206 - 214.
ZHANG Zhongxue, ZHANG Shiwei, GUO Dandan, et al. Coupling effects of different water and fertilizer conditions and optimization of water and fertilizer schemes on maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 206 - 214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170926&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.026. (in Chinese)

[18] 巫东堂, 李红梅, 焦晓燕,等. 旱地麦田水肥关系及对产量的影响试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5):39 - 42.
WU Dongtang, LI Hongmei, JIAO Xiaoyan, et al. Relationship between water and fertilizer for wheat and its effect on wheat yield in a rainfed field of the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 39 - 42. (in Chinese)

[19] LIU W Z, ZHANG X C. Optimizing water and fertilizer input using an elasticity index: a case study with maize in the Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2007, 100(2 - 3): 302 - 310.

[20] FU Q P, WANG Q J, SHEN X L, et al. Optimizing water and nitrogen inputs for winter wheat cropping system on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(2): 230 - 242.

[21] 邢英英, 张富仓, 吴立峰,等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1):110 - 121.
XING Yingying, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.1): 110 - 121. (in Chinese)

[22] 康绍忠. 贯彻落实国家节水行动方案 推动农业适水发展与绿色高效节水[J]. 中国水利, 2019(13): 1 - 6.
KANG Shaozhong. National water conservation in itiatiative for promoting water-adapted and green agriculture and highly-efficient water use[J]. China Water Resources, 2019(13): 1 - 6. (in Chinese)

[23] 唐拴虎, 杨改河, 申云霞. 旱地冬小麦产量与水分及施肥量关系的模拟研究[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(3): 69 - 73.
TANG Shuanhu, YANG Gaihe, SHEN Yunxia. Research on the simulation of relationships among yield, rainfall and fertilization of winter wheat in rainfed lands[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 1994, 12(3): 69 - 73. (in Chinese)

[24] 吴海卿, 杨传福, 孟兆江,等. 以肥调水提高水分利用效率的生物学机制研究[J]. 灌溉排水学报, 1998,17(4):6 - 10.
WU Haiqing, YANG Chuanfu, MENG Zhaojiang, et al. A study on biological mechanism of raising water use efficiency by suitable application of fertilizers[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1998, 17(4): 6 - 10. (in Chinese)

[25] 于亚军, 李军, 贾志宽,等. 不同水肥条件对宁南旱地谷子产量、WUE 及光合特性的影响[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2):87 - 90.
YU Yajun, LI Jun, JIA Zhikuan, et al. Effect of different water and fertilizer on yield, WUE and photosynthetic characteristics of millet in Southern Ningxia semi-arid area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(2): 87 - 90. (in Chinese)

[26] 梁连友, 李立科. 渭北旱地冬小麦生产中底墒肥关系及其对产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1995,13(2):7 - 13.
LIANG Lianyou, LI Like. The relationship between base moisture and fertility in rainfed wheat crop fields and its effect upon yield increase on Weibei rainfed highland[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 1995, 13(2): 7 - 13. (in Chinese)

(下转第 368 页)