

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.035

# 水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响

丛鑫<sup>1</sup> 张立志<sup>2</sup> 徐征和<sup>1</sup> 庞桂斌<sup>1</sup> 冯严明<sup>1</sup> 赵登良<sup>1</sup>

(1. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022; 2. 山东省水利科学研究院, 济南 250014)

**摘要:** 为探索冬小麦最佳的水肥管理制度, 采用田间试验方法, 在低水 I1 (60%  $ET_c$ , 300.0 mm)、中水 I2 (75%  $ET_c$ , 370.0 mm)、高水 I3 ( $ET_c$ , 495.0 mm) 3 种灌溉下, 设置低氮 N1 (180.0 kg/hm<sup>2</sup>)、中氮 N2 (255.0 kg/hm<sup>2</sup>)、高氮 N3 (330.0 kg/hm<sup>2</sup>) 3 种施氮水平, 测定不同生育期小麦土壤含水率、地上干物质累积量与最终产量指标, 并计算农田耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力、经济效益等指标, 分析水肥耦合对各指标的影响。结果表明, 灌溉量对农田耗水量影响显著, 农田耗水量随灌溉定额的增加而增加; 适当的水肥配比可获得较高的地上干物质累积量、产量和经济效益, 过量的水肥投入并不会使产量和经济效益持续增加; 产量、水分利用效率、氮肥偏生产力、经济效益与灌溉量、施氮量的相关性显著, 建立了各指标与灌溉量、施氮量的二次回归方程, 计算得到各指标最大值对应的水氮量分别为 410.0 mm、260.0 kg/hm<sup>2</sup>、370.0 mm、260.0 kg/hm<sup>2</sup>、410.0 mm、180.0 kg/hm<sup>2</sup>、400.0 mm、250.0 kg/hm<sup>2</sup>; 通过回归与空间分析得出, 灌溉量为 359.8 ~ 428.9 mm (72.6%  $ET_c$  ~ 87.5%  $ET_c$ )、氮肥量为 225.4 ~ 280.9 kg/hm<sup>2</sup> 时, 冬小麦产量、水分利用效率和经济效益可同时达到最大值的 95% 以上。本研究可为研究区及其他环境相似地区的水肥制度优化与管理提供参考。

**关键词:** 冬小麦; 水氮互作; 耗水量; 产量; 水肥利用效率; 经济效益

中图分类号: S365; S512.1<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)03-0315-10

OSID:



## Effects of Irrigation and Nitrogen Interaction on Water and Fertilizer Use Efficiency and Economic Benefits of Winter Wheat

CONG Xin<sup>1</sup> ZHANG Lizhi<sup>2</sup> XU Zhenghe<sup>1</sup> PANG Guibin<sup>1</sup> FENG Yanming<sup>1</sup> ZHAO Dengliang<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Ji'nan 250022, China

2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250014, China)

**Abstract:** To find out the optimized water and fertilizer management, field experiments were conducted to investigate the coupling effects of different amounts of water and fertilizers on water consumption, dry matter accumulation on the ground, wheat yield, water use efficiency, nitrogen partial fertilizer productivity as well as economic benefits. Experiments included three levels of irrigation, i. e. 60%  $ET_c$  (I1, 300.0 mm), 75%  $ET_c$  (I2, 370.0 mm) and  $ET_c$  (I3, 495.0 mm), and three levels of nitrogen, i. e. 180.0 kg/hm<sup>2</sup> (N1), 255.0 kg/hm<sup>2</sup> (N2) and 330.0 kg/hm<sup>2</sup> (N3). The irrigation had a significant effect on the water consumption, and water consumption was increased with the increase of irrigation quota. Only appropriate water and fertilizer ratio can obtain higher dry matter accumulation on the ground, yield and economic benefits, and excessive water and fertilizer input would not increase sustainable output and income. Yield, water use efficiency, nitrogen partial fertilizer productivity and economic benefits had significant correlation with water and fertilizer. The quadratic regression equations of each index and water and fertilizer were established and the corresponding water and fertilizer amount of the maximum value of each index was 410.0 mm, 260.0 kg/hm<sup>2</sup>, 370.0 mm, 260.0 kg/hm<sup>2</sup>, 410.0 mm, 180.0 kg/hm<sup>2</sup>, 400.0 mm, 250.0 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. By regression and spatial analysis, it was concluded that the yield, water use efficiency and economic benefits reached no less than 95% of their maximum values simultaneously when the irrigation quantity was 359.8 ~ 428.9 mm (72.6%  $ET_c$  ~

收稿日期: 2020-06-05 修回日期: 2020-07-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800601-02)和山东省水利科研项目(SDSLKY201803)

作者简介: 丛鑫(1994—), 女, 博士生, 主要从事水资源高效利用研究, E-mail: congxin1994@126.com

通信作者: 徐征和(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事农田水利研究, E-mail: xu4045@126.com

87.5%  $ET_c$ ) and the nitrogen application was 225.4 ~ 280.9 kg/hm<sup>2</sup>, which can provide a scientific basis for irrigation and fertilization optimization in study area and other regions with similar environments.

**Key words:** winter wheat; water and nitrogen interaction; water consumption; yield; water and fertilizer utilization efficiency; economic benefits

## 0 引言

小麦作为世界第二大粮食作物,其产量和品质对保障国家粮食安全具有重要作用。灌溉和施肥是影响小麦生长发育和最终产量的两个相互耦合的重要因素<sup>[1-2]</sup>。在农业生产中,农民试图依靠水肥来提高作物产量,但过量的水肥并不能显著提高作物产量,而且造成水肥利用效率低、经济效益降低,甚至污染环境<sup>[3]</sup>。因此,综合考虑灌溉和氮肥的协同影响、优化灌溉量和施氮量是实现农业可持续发展的关键。

研究者通过大量试验研究了水氮运筹下的作物产量、水肥利用效率与经济效益效应,探索最佳的水氮配比。薛丽华等<sup>[4]</sup>在新疆地区研究了水氮耦合对冬小麦的影响,结果表明,灌溉量为 3 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、施氮量为 270 kg/hm<sup>2</sup>是其试验条件下冬小麦产量最高的水氮高效运筹模式;宋明丹等<sup>[5]</sup>在陕西地区研究不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应,结果表明,施氮量为 210 kg/hm<sup>2</sup>时冬小麦可以获得较高的干物质和产量;周加森等<sup>[6]</sup>在河北省实施水肥一体化微喷灌下冬小麦田间试验,推荐减氮 20% (减后施氮量 192 kg/hm<sup>2</sup>) 下冬小麦水氮利用效率最高;郑春风等<sup>[7]</sup>在河南省通过大田试验研究了减施氮对冬小麦经济效益的影响,结果表明,将普通尿素习惯施用量减少 10% ~ 20% (减后施用量 180 kg/hm<sup>2</sup>) 及等量控释尿素减少 20% 不仅不会造成冬小麦大幅度减产,反而提高了冬小麦经济效益。

上述研究只对个别指标进行了水氮模式下的寻优,在最优模式探索中,很难做到平衡水肥效率、产量和经济效益的多重目标。基于冬小麦生产、经济效益和环境效益来确定水肥管理多目标优化的研究较为匮乏。本文研究不同灌溉和施氮肥制度对冬小麦产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和经济效益的影响,描述和量化产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和经济效益对灌溉量和施氮量的响应,以冬小麦的多重目标为基础,通过空间分析确定适宜的灌溉量和施氮量,以期达到高产、节水、节肥的目的。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

2018—2019 年在山东省济南市长清区山东省

灌溉试验中心站(36°34'N,116°50'E)利用水肥渗漏研究池进行试验。渗漏池下的廊道装有渗漏液收集装置。研究区域气象参数每 5 min 由试验中心站附近的自动气象站收集一次,年降雨量 654.7 mm,夏季降雨量占全年的 62%,年平均潜在蒸散量 1 399.70 mm,年平均气温 14.3℃(2008—2018 年),生长季的降雨量与气温如图 1 所示。研究区土壤质地为壤土,土壤容重在 1.40 ~ 1.67 g/cm<sup>3</sup>之间,总孔隙度在 48.7% ~ 54.2% 之间。种植制度为冬小麦—夏玉米一年两熟制。每个渗漏池的长、宽、高分别为 2.0、3.33、1.2 m,池内土壤取自附近农田。2018 年播种前,各池内土壤理化性质基本一致。0 ~ 20 cm 耕层土壤养分含量为有机质质量比 10.89 g/kg,全氮质量比 1.07 g/kg,速效磷质量比 22.26 mg/kg,速效钾质量比 83.98 mg/kg。

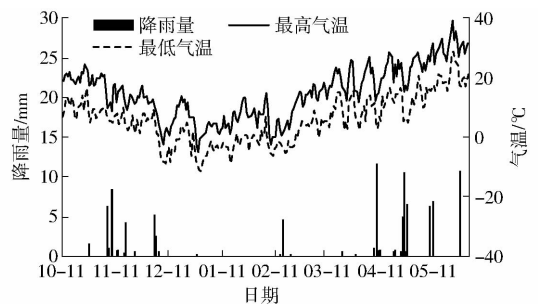


图 1 试验区冬小麦生育期间逐日气温和降雨量

Fig. 1 Daily rainfall and temperature during winter wheat growing season

### 1.2 试验设计

试验设计 3 个微喷灌溉水平与 3 个施氮水平。3 个灌溉水平基于当地冬小麦长期计算的参考作物需水量 ( $ET_c$ ),设计整个生育期灌溉水量为 I1 (60%  $ET_c$ , 300.0 mm)、I2 (75%  $ET_c$ , 370.0 mm)、I3 ( $ET_c$ , 495.0 mm),小麦生育期降雨量 100 mm,具体灌溉量见表 1。每个渗漏池安装相同规格的微喷灌管道与水表来控制灌溉量。3 个施氮水平在当地农民普施氮肥 (330.0 kg/hm<sup>2</sup>) 的基础上,设计 N1 (180.0 kg/hm<sup>2</sup>, 优化 45%)、N2 (255.0 kg/hm<sup>2</sup>, 优化 23%)、N3 (330.0 kg/hm<sup>2</sup>)。磷、钾肥施用量均为 150.0 kg/hm<sup>2</sup>,均底施;氮肥底施 50%,追施 50%。供试冬小麦品种为“山农 28 号”,于 2018 年 10 月 16 日,采用播种机播种,播种量 130.0 kg/hm<sup>2</sup>,每个小区种植 5 行,行距 20 cm。冬小麦于 2019 年 6 月 1 日收获。其他田间管理采用与当地田间相同的标准,以确保小麦

在整个生长季生长良好。

表1 冬小麦生育期各阶段灌溉量

Tab.1 Irrigation for each stage of winter wheat

处理	growing seasons				mm
	生育期				
	播种期 (10月16日)	返青-拔节期 (3月15日)	抽穗期 (4月12日)	灌浆期 (5月5日)	
I1	35	90	75	0	
I2	35	90	75	70	
I3	35	90	150	120	

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 土壤含水率

在土壤深度为20、40、60、80、100 cm处安装中子探针来实时监测冬小麦全生育期土壤含水率变化。计算100 cm内的体积含水率,并将其转换为质量含水率。

#### 1.3.2 地上干物质累积量

在小麦每次浇水前后与收获时,随机取代表性的植株3株,用剪刀沿土壤表面将冬小麦整个植株剪下,相应装袋编好序号,带回实验室后将所有样品用清水洗净、晾干,对应编号装入纸袋,在105℃干燥箱中杀青30 min,降温至70℃干燥至质量恒定后用电子天平称量,即为地上干物质累积量( $G_B$ , kg/hm<sup>2</sup>)。

#### 1.3.3 产量与构成因素

收获时,从每个地块随机抽取1个1 m<sup>2</sup>样本由人工剪穗。记录每平方米的有效穗数,然后从中随机选取20穗,量取有效穗长( $E_L$ , cm),手工脱粒得到单穗粒数。最后用固定脱粒机对样方小麦进行脱粒,脱粒风干后随机数出1 000粒小麦,以获得小麦千粒质量。则小麦理论产量为

$$Y = E_p S_c T_{KN} \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中  $Y$ ——小麦理论产量, kg/hm<sup>2</sup>

$E_p$ ——每平方米的有效穗数, 穗/m<sup>2</sup>

$S_c$ ——单穗粒数, 粒

$T_{KN}$ ——千粒质量, g

#### 1.3.4 农田耗水量和水分利用效率

土壤蓄水量计算公式为

$$W = h\rho\omega \times 10/100 \quad (2)$$

式中  $W$ ——土壤蓄水量, mm

$h$ ——土层深度, cm

$\rho$ ——土壤容重, g/cm<sup>3</sup>

$\omega$ ——土壤含水率, %

农田耗水量的计算基于土壤水分平衡公式<sup>[8]</sup>,

即

$$ET = P + U + I - D - R - \Delta W \quad (3)$$

式中  $ET$ ——农田耗水量, mm

$P$ ——降雨量, mm

$U$ ——与地下水的交换量, mm

$I$ ——灌溉量, mm

$D$ ——深层渗漏量, mm

$R$ ——地表径流量, mm

$\Delta W$ ——生育期前后土壤蓄水量变化量, mm

试验渗漏池为有底侧坑且试验期间并未产生地表径流,因此  $U$  和  $R$  可以忽略,方程简化为

$$ET = P + I - D - \Delta W \quad (4)$$

阶段耗水量计算公式为

$$ET_i = P_i + I_i - D_i - (S_{WSi+1} - S_{WSi}) \quad (5)$$

式中  $ET_i$ ——阶段耗水量, mm

$P_i$ ——某个生育期降雨量, mm

$I_i$ ——某个生育期灌溉量, mm

$D_i$ ——某个生育期深层渗漏量, mm

$S_{WSi+1}$ ——某个生育期末的土壤蓄水量, mm

$S_{WSi}$ ——某生育期初的土壤蓄水量, mm

耗水模系数( $E_{cp}$ )计算公式为

$$E_{cp} = ET_i / ET \times 100\% \quad (6)$$

耗水强度计算公式为

$$ET_d = ET_i / d \quad (7)$$

式中  $ET_d$ ——耗水强度, mm/d

$d$ ——生育阶段时间, d

水分利用效率( $WUE$ )计算公式<sup>[9]</sup>为

$$WUE = Y / ET \quad (8)$$

#### 1.3.5 氮肥偏生产力

氮肥偏生产力计算公式为

$$NPFP = Y / N \quad (9)$$

式中  $NPFP$ ——氮肥偏生产力, kg/kg

$N$ ——施氮量, kg/hm<sup>2</sup>

#### 1.3.6 经济效益

经济效益计算公式为

$$E_B = Y_R - I_W - N_W - O_W \quad (10)$$

式中  $E_B$ ——经济效益, 元/hm<sup>2</sup>

$Y_R$ ——冬小麦产量收入, 元/hm<sup>2</sup>

$I_W$ ——灌溉水分投入, 元/hm<sup>2</sup>

$N_W$ ——施氮投入, 元/hm<sup>2</sup>

$O_W$ ——其他投入, 元/hm<sup>2</sup>

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 与 SPSS 进行数据分析,表中每个指标值均为3个处理的均值,采用 ANOVA 与 LSD(0.05 显著水平)对数据进行方差分析和多重检验。采用 Matlab 进行数据拟合与绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 生育期内冬小麦耗水规律

由图2(图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同)可知,水氮互作下冬小麦 $ET$ 和 $ET_d$ 之间存在明显的差异( $P < 0.05$ )。I1耗水量在358~369 mm范围内,I2耗水量在396~406 mm范围内,I3耗水量在439~450 mm范围内。说明同一施肥处理下,作物 $ET$ 随灌溉量的增加而增加,与I3比较,I1和I2分别节水18.5%和9.8%左右。而同一灌溉处理下,受施肥影响不显著,这说明在冬小麦生长发育过程中,灌水对作物 $ET$ 的影响较大。以抽穗-收获期为例:在N1施肥条件下,I3比I2和I1处理的 $ET$ 分别高11.21%和48.93%;在N2施肥条件下,I3比I2和I1处理的 $ET$ 分别高10.50%和58.34%;在N3施肥条件下,I3比I2和I1处理的 $ET$ 分别高9.87%和64.28%。

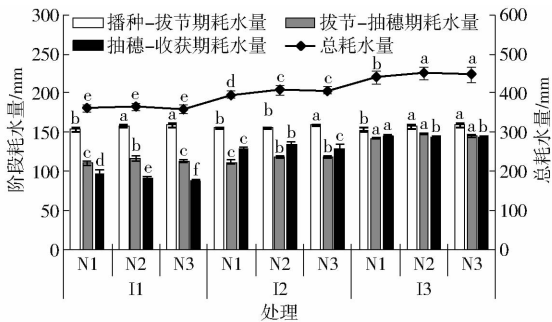


图2 水氮互作对冬小麦耗水规律的影响

Fig.2 Effect of different water and fertilizer treatments on water consumption of winter wheat

从各生育阶段看,9种水氮处理耗水量的差异出现在中后期,主要是抽穗-收获期差异显著。这是因为在小麦拔节期后开始实施不同灌溉量,可见加大灌溉定额会降低生育前期(播种-拔节期)和中期(拔节-抽穗期)耗水比例,加大生育后期(抽穗-收获期)耗水比例,这有利于提高作物产量。

表2为各处理3个生育阶段的阶段 $E_{cp}$ 与 $ET_d$ 。可以看出,所有处理的阶段 $E_{cp}$ 均表现为播种-拔节期最高,抽穗-收获期最低;所有处理的 $ET_d$ 均表现为拔节-抽穗期最高,播种-拔节期最低。

播种-拔节期,小麦株体小,水分消耗以地表蒸发为主, $ET_d$ 远低于生育中期和后期的 $ET_d$ ;但该生育阶段占全生育期的70%, $E_{cp}$ 显著高于其他生育期。在该生育阶段只存在氮的处理,不存在水分处理,从表2可看出,氮对 $E_{cp}$ 与 $ET_d$ 的影响并不显著。

拔节-抽穗期,小麦进入需水关键期, $ET_d$ 较播种-拔节期显著增大,I3N2最高可达5.30 mm/d,最低I1N1也有3.93 mm/d;在相同施氮条件下,不同

表2 不同水肥处理下各生育期耗水模数和耗水强度

Tab.2  $E_{cp}$  and  $ET_d$  under different nitrogen and irrigation treatments

处理	播种-拔节期		拔节-抽穗期		抽穗-收获期		
	$E_{cp}/$ %	$ET_d/$ (mm·d <sup>-1</sup> )	$E_{cp}/$ %	$ET_d/$ (mm·d <sup>-1</sup> )	$E_{cp}/$ %	$ET_d/$ (mm·d <sup>-1</sup> )	
I1	N1	42.51 <sup>b</sup>	1.10 <sup>b</sup>	30.50 <sup>d</sup>	3.93 <sup>d</sup>	26.99 <sup>c</sup>	2.56 <sup>c</sup>
	N2	43.10 <sup>a</sup>	1.13 <sup>a</sup>	32.01 <sup>c</sup>	4.17 <sup>c</sup>	24.89 <sup>d</sup>	2.39 <sup>c</sup>
	N3	44.27 <sup>a</sup>	1.14 <sup>a</sup>	31.50 <sup>c</sup>	4.03 <sup>d</sup>	24.23 <sup>d</sup>	2.28 <sup>c</sup>
I2	N1	39.22 <sup>c</sup>	1.12 <sup>b</sup>	28.14 <sup>f</sup>	3.97 <sup>d</sup>	32.64 <sup>a</sup>	3.40 <sup>b</sup>
	N2	38.10 <sup>d</sup>	1.12 <sup>b</sup>	28.90 <sup>e</sup>	4.20 <sup>c</sup>	33.00 <sup>a</sup>	3.54 <sup>b</sup>
	N3	39.00 <sup>c</sup>	1.14 <sup>a</sup>	29.15 <sup>e</sup>	4.23 <sup>c</sup>	31.85 <sup>b</sup>	3.40 <sup>b</sup>
I3	N1	34.80 <sup>f</sup>	1.10 <sup>b</sup>	32.21 <sup>b</sup>	5.06 <sup>b</sup>	32.99 <sup>a</sup>	3.81 <sup>a</sup>
	N2	35.02 <sup>f</sup>	1.13 <sup>a</sup>	32.98 <sup>a</sup>	5.30 <sup>a</sup>	31.98 <sup>b</sup>	3.79 <sup>a</sup>
	N3	35.60 <sup>e</sup>	1.15 <sup>a</sup>	32.50 <sup>a</sup>	5.18 <sup>ab</sup>	31.90 <sup>b</sup>	3.75 <sup>a</sup>

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

灌溉之间 $E_{cp}$ 与 $ET_d$ 表现出显著差异,I3大于I1和I2,说明该阶段是冬小麦灌水施肥关键时期,该阶段灌溉定额对冬小麦的用水需求具有显著的影响。

抽穗-收获期是冬小麦产量形成的关键时期, $ET_d$ 也较大,同样表现出随灌溉定额的增加而显著增加。

冬小麦生育期耗水主要来源于降雨、灌溉水和农田土壤蓄水。从表3可以看到,降雨量占总耗水量的比例随灌水量的增加逐渐降低,其中I1N3降雨量占总耗水量的比例最高,为27.93%,I3N2处理降雨量占总耗水量的比例最低,为22.26%。灌溉水占总耗水量的比例随灌水量的增加呈递增趋势,I3处理下比例高达89.93%。土壤蓄水消耗量所占比例随着灌水量的增加呈先增后减的趋势,而相同灌溉水量条件下均以N2处理最高,且与N1处理差异达到显著水平。说明适量的增加灌溉定额与增施氮肥有助于冬小麦对土壤蓄水的吸收利用。渗漏量所占比例绝对值随灌溉定额的增加逐渐增加,I3较I2和I1所占比例显著增加,造成水分大量流失。

### 2.2 地上干物质累积量和产量

不同生育期下小麦 $G_B$ 在不同灌溉和施氮水平之间存在差异(图3,图中ns表示无显著性差异( $P > 0.05$ ),\*表示显著性差异( $P < 0.05$ ),\*\*表示极显著性差异( $P < 0.01$ ),下同)。在返青期(图3a),就氮肥施用量而言,N2和N3下的 $G_B$ 相差不大,但显著高于N1下的 $G_B$ ,这是因为本试验是在抽穗后进行水分处理,此时水分对 $G_B$ 未产生显著性影响。在抽穗期(图3b), $G_B$ 随灌溉水平的变化极显著。I1和I2处理下的 $G_B$ 与相同氮处理的I3变化相似,但高于I3处理。说明此时灌溉定额过大,影响了干物质的累积。在灌浆期(图3c),在I1灌溉水

表3 不同水肥处理下冬小麦耗水结构

Tab.3 Composition of water consumption from different water sources under different nitrogen and irrigation treatments

处理		P		I		ΔW		D	
		总量/mm	比例/%	总量/mm	比例/%	总量/mm	比例/%	总量/mm	比例/%
I1	N1	100.0	27.74	200.0	55.50	62.49	17.34	-2.1	-0.58
	N2	100.0	27.43	200.0	54.85	66.49	18.24	-1.9	-0.53
	N3	100.0	27.93	200.0	55.86	59.93	16.74	-1.9	-0.53
I2	N1	100.0	25.33	270.0	68.38	44.33	11.23	-19.5	-4.94
	N2	100.0	24.60	270.0	66.43	47.37	11.65	-10.9	-2.68
	N3	100.0	24.62	270.0	66.50	47.37	11.67	-11.3	-2.78
I3	N1	100.0	22.77	395.0	89.93	2.34	0.53	-58.1	-13.23
	N2	100.0	22.25	395.0	87.91	6.23	1.39	-51.9	-11.55
	N3	100.0	22.40	395.0	88.50	5.92	1.33	-54.6	-12.23

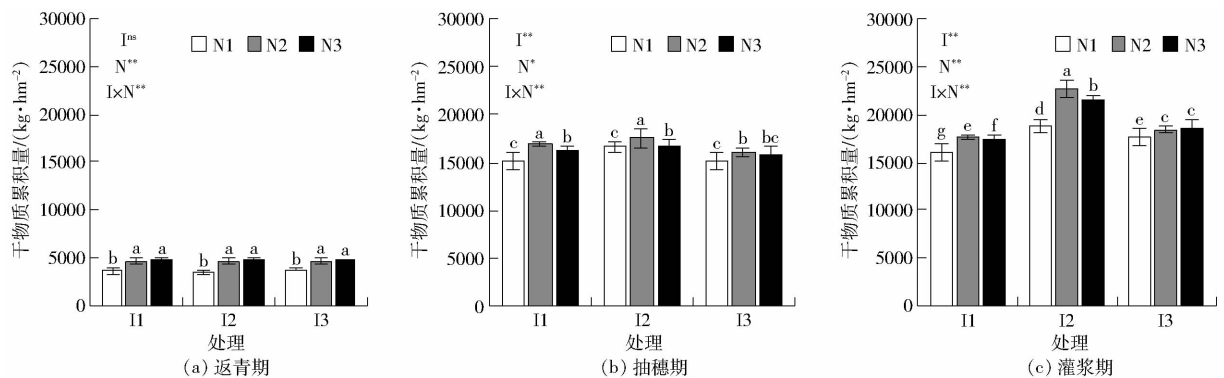


图3 不同灌溉与施氮量下的冬小麦干物质动态累积规律

Fig.3 Dynamic accumulation of dry matter in winter wheat under different irrigation and nitrogen applications

平下,N1、N2和N3处理的 $G_B$ 显著低于其他两个灌溉水平处理;在I2灌溉水平下,N1、N2和N3的 $G_B$ 差异显著,由大到小依次为N2、N3、N1。在I3灌溉水平下,N2和N3的 $G_B$ 没有显著差异,但显著高于N1处理(图3c)。最终,N1、N2和N3在I2下的总 $G_B$ 分别比I1与I3高6.3%、22.9%、15.0%和16.9%、28.6%、22.8%。N2处理较N1使 $G_B$ 增加4.3%~20.6%,N3处理较N1使 $G_B$ 增加5.6%~14.3%。综上,在一定范围内,适当提高水氮施用量有助于地上干物质质量累积,过量则会产生抑制作用。

灌溉与施氮量水平对所有产量构成因素都有显著影响(表4),但灌溉与施氮量的交互作用对 $S_c$ 并未构成显著影响。从产量构成因素来看,灌溉量相同时, $E_p$ 由大到小均表现为N2、N3、N1,但在I1、I3灌水水平下N1与N3处理中 $E_p$ 未表现出显著性差异( $P > 0.05$ ); $S_c$ 与 $E_L$ 由大到小也表现为N2、N3、N1,I1、I3下的N2与N3处理间差异不显著,I2下N1与N3处理间差异不显著; $T_{KN}$ 由大到小表现为N2、N3、N1,在3个施氮量处理间有着显著性差异。3个施氮量水平下,I2下各指标显著高于其他两个处理,I1与I3处理间各指标差异不显著,表明适量灌溉可以提高产量因素,过量灌溉

起到抑制作用。

产量( $Y$ )受灌溉与施氮量影响显著( $P < 0.01$ ),在同等灌溉量下各施氮处理均随施氮量的增加先增加后降低,N2处理下产量最高,比N1与N3处理分别高3.6%、2.3%(I1),14.8%、9.3%(I2),12.1%、8.6%(I3),这说明产量与施氮量并不是一直呈现正相关,过量施氮反而会造成产量减少;在相同施氮量下,I2下的产量较I1下产量有明显的提高,N2下提高比例高达25%,但I3下产量反而较I2有所下降。总体分析,小麦产量受单一变量影响时,随灌水量或施肥量的增加,表现为先增加后降低的趋势,这也与 $G_B$ 的变化一致。因此,只有适当的灌溉和施氮才有利于小麦产量的提高。

### 2.3 水分利用效率和氮肥偏生产力

冬小麦水分利用效率、氮肥偏生产力受到灌溉与施肥的显著性影响(图4、5)。水分利用效率在15.53~20.52 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)之间,I2N2处理最高,I3N1处理最低。在同一灌溉水平下,I1下3种施氮水平下的 $WUE$ 没有明显差异,可能因为灌溉水平偏低无法协同氮肥利用;I2、I3下3种施氮水平的 $WUE$ 随着施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势,这说明适量的增施氮肥可以提高产量从而提高 $WUE$ 。同一施氮水平下,I2和I3由于灌溉使得产量

表4 冬小麦产量组分受灌溉、施肥的影响

Tab.4 Yield component factors of winter wheat as affected by irrigation and nitrogen

处理	$E_p/(\text{穗}\cdot\text{m}^{-2})$	$S_G/\text{粒}$	$E_L/\text{cm}$	$T_{KN}/\text{g}$	$Y/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	
I1	N1	(384 ± 4.1) <sup>d</sup>	(31.3 ± 0.3) <sup>d</sup>	(6.34 ± 0.05) <sup>f</sup>	(51.12 ± 0.03) <sup>g</sup>	(6450.07 ± 121.93) <sup>d</sup>
	N2	(392 ± 2.3) <sup>cd</sup>	(32.2 ± 0.6) <sup>c</sup>	(6.47 ± 0.02) <sup>e</sup>	(52.75 ± 0.04) <sup>e</sup>	(6684.88 ± 20.70) <sup>cd</sup>
	N3	(385 ± 4.5) <sup>d</sup>	(31.9 ± 0.4) <sup>cd</sup>	(6.42 ± 0.03) <sup>e</sup>	(52.52 ± 0.04) <sup>d</sup>	(6537.08 ± 78.80) <sup>d</sup>
I2	N1	(400 ± 5.2) <sup>c</sup>	(33.5 ± 0.4) <sup>b</sup>	(7.04 ± 0.03) <sup>b</sup>	(53.15 ± 0.05) <sup>b</sup>	(7276.02 ± 317.48) <sup>bc</sup>
	N2	(432 ± 12.1) <sup>a</sup>	(35.2 ± 0.2) <sup>a</sup>	(7.27 ± 0.02) <sup>a</sup>	(54.75 ± 0.03) <sup>a</sup>	(8351.29 ± 336.73) <sup>a</sup>
	N3	(421 ± 4.9) <sup>b</sup>	(34.0 ± 1.4) <sup>b</sup>	(7.09 ± 0.04) <sup>b</sup>	(52.66 ± 0.01) <sup>c</sup>	(7640.55 ± 214.68) <sup>b</sup>
I3	N1	(396 ± 6.3) <sup>cd</sup>	(32.4 ± 0.4) <sup>c</sup>	(6.58 ± 0.04) <sup>d</sup>	(52.35 ± 0.05) <sup>e</sup>	(6829.72 ± 40.27) <sup>cd</sup>
	N2	(412 ± 4.3) <sup>b</sup>	(34.4 ± 0.2) <sup>b</sup>	(6.98 ± 0.04) <sup>c</sup>	(52.81 ± 0.17) <sup>c</sup>	(7657.79 ± 199.10) <sup>b</sup>
	N3	(400 ± 2.5) <sup>c</sup>	(33.5 ± 0.4) <sup>b</sup>	(6.95 ± 0.02) <sup>c</sup>	(52.10 ± 0.09) <sup>f</sup>	(7052.36 ± 99.22) <sup>c</sup>
变量来源	I	68.762 <sup>**</sup>	81.431 <sup>**</sup>	1039.718 <sup>**</sup>	924.707 <sup>**</sup>	87.44 <sup>**</sup>
	N	25.516 <sup>**</sup>	31.137 <sup>**</sup>	130.369 <sup>**</sup>	739.892 <sup>**</sup>	32.306 <sup>**</sup>
	I × N	4.43 <sup>*</sup>	1.873	24.684 <sup>**</sup>	232.739 <sup>**</sup>	3.993 <sup>*</sup>

注: \* 表示显著性差异 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著性差异 ( $P < 0.01$ )。

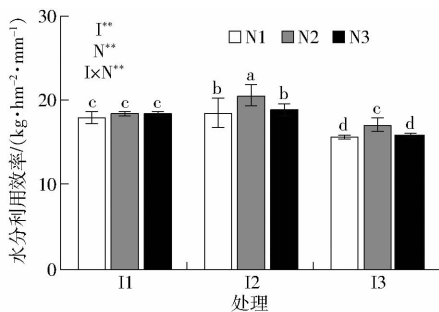


图4 不同灌溉与施氮量下冬小麦水分利用效率

Fig.4 WUE for winter wheat under different irrigation and nitrogen application conditions

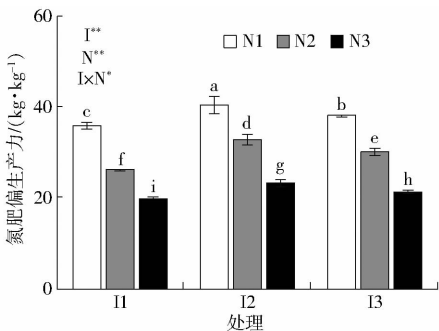


图5 不同灌溉与施氮量下冬小麦氮肥偏生产力

Fig.5 NPPF for winter wheat under different irrigation and nitrogen application conditions

高于 I1,但相关研究表明高灌溉使得作物耗水效率提高,这成为限制 I3 水分利用效率提高的关键因素。总体上,相同施氮不同灌水水平下 WUE 由大到小依次为 I2、I1、I3。

氮肥偏生产力范围为 19.81 ~ 40.43 kg/kg, I2N1 处理最高, I1N3 处理最低。在同一灌溉水平下, NPPF 随施氮量的增加而降低,由大到小依次为 N1、N2、N3;在同一施氮水平下,不同灌溉下 NPPF 表现出明显的差异性,由大到小均为 I2、I3、I1,这说明适当的灌溉可以提高氮肥的利用效率。

## 2.4 经济效益

根据各处理的投入与收益,分析了各处理的经济效益(表5)。从表5可以看出, I2N2 处理经济效益最高,较同等灌溉量下 N1 与 N3 收益分别高 2073.09、1856.13 元/hm<sup>2</sup>,较同等施氮量下的 I1 与 I3 收益分别高 3316.10、2150.7 元/hm<sup>2</sup>,说明 I2N2 水肥配施可以提高小麦产最、增加其纯收益。I3N3 处理的投入最高,水与肥的投入较 I2N2 高 917.5 元/hm<sup>2</sup>,但是水肥投入的提高并没有提高产量,并导致其经济效益显著降低。综上说明在试验设计的水肥3个水平下,适量提高水肥投入有利于经济效益的提高,实际生产中,农民可降低水肥的投入,会带来更可观的经济效益。

## 2.5 水氮管理对产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和经济效益的互作效应

根据获得的数据,分别建立了4个模型来预测产量、水分利用效率、偏肥生产力和经济效益随灌溉量和施氮量的变化。图6为灌溉量和施氮量与冬小麦产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和经济效益的关系,其回归方程分别为

$$Y = -17554.18 + 90.97I + 54.69N + 0.0032IN - 0.1114I^2 - 0.1067N^2 \quad (R^2 = 0.946)$$

$$WUE = -23.07 + 0.1543I + 0.1104N - 0.000009437IN - 0.0002044I^2 - 0.000204N^2 \quad (R^2 = 0.995)$$

$$NPPF = -15.21 + 0.3729I - 0.1142N - 0.00001191IN - 0.0004491I^2 + 0.00001570N^2 \quad (R^2 = 0.930)$$

$$E_B = -46441.54 + 195.14I + 116.41N + 0.007049IN - 0.2452I^2 - 0.2348N^2 \quad (R^2 = 0.942)$$

预测值与实测值间显著相关,因此,4个模型

表 5 冬小麦经济效益分析

Tab. 5 Economic benefit analysis of winter wheat as affected by irrigation and nitrogen

元/hm<sup>2</sup>

处理		水费用	肥料费用	其他费用	总投入成本	产量收益	经济效益
I1	N1	1 000.00	2 524.50	6 500.00	10 024.50	14 190.16	4 165.66
	N2	1 000.00	2 817.00	6 500.00	10 317.00	14 706.74	4 389.74
	N3	1 000.00	3 109.50	6 500.00	10 609.50	14 381.57	3 772.07
I2	N1	1 350.00	2 524.50	6 500.00	10 374.50	16 007.25	5 632.75
	N2	1 350.00	2 817.00	6 500.00	10 667.00	18 372.84	7 705.84
	N3	1 350.00	3 109.50	6 500.00	10 959.50	16 809.21	5 849.71
I3	N1	1 975.00	2 524.50	6 500.00	10 999.50	15 025.39	4 025.89
	N2	1 975.00	2 817.00	6 500.00	11 292.00	16 847.14	5 555.14
	N3	1 975.00	3 109.50	6 500.00	11 584.50	15 515.19	3 930.69

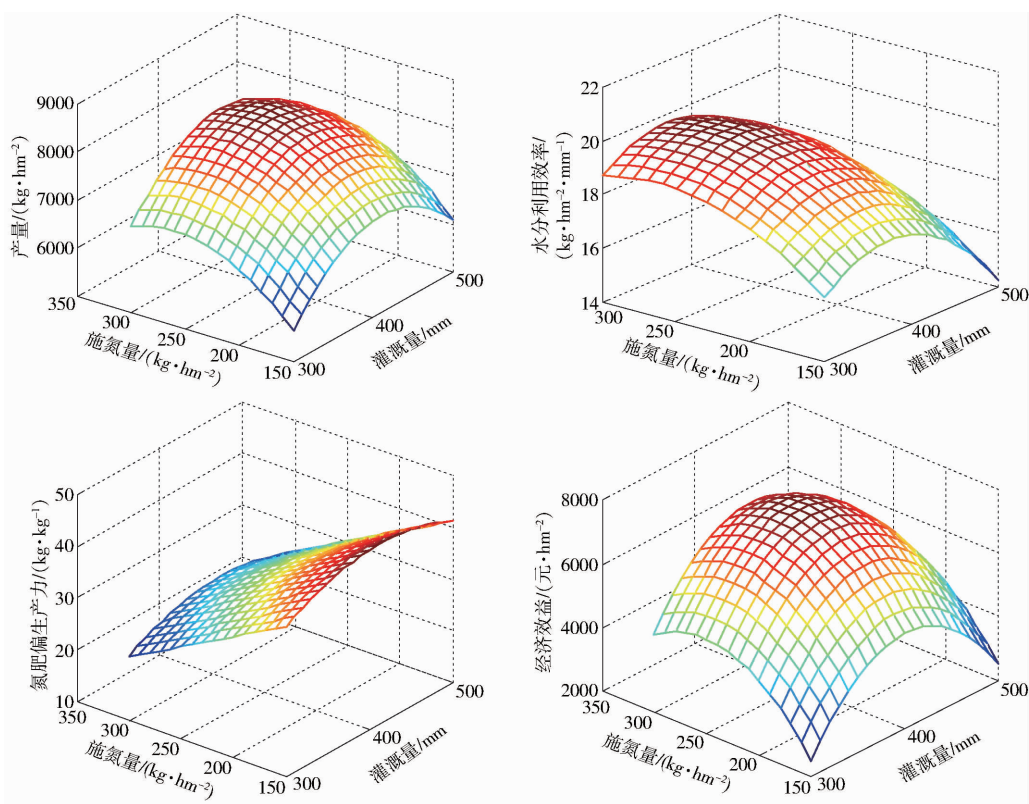


图 6 水氮施用量与小麦产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和经济效益的关系

Fig. 6 Relationships of yield, WUE, NPPF and  $E_B$  with irrigation amounts and N fertilizer application rates

能够预测各指标在水氮互作下的变化。

由各指标与水氮施用量建立的二元二次回归方程计算出各指标最大化下的相应水氮变量值(表 6)。Y、WUE、NPPF 和  $E_B$  达到最大值时的灌溉量和施氮量分别为 410.0 mm、260.0 kg/hm<sup>2</sup>,

370.0 mm、260.0 kg/hm<sup>2</sup>, 410.0 mm、180.0 kg/hm<sup>2</sup>, 400.0 mm、250.0 kg/hm<sup>2</sup>。由表 6 可以看出, NPPF 实现最大值时, 氮肥的施用量较少, 而 WUE 若想达到最大, 灌溉量需较小; 水肥投入量偏少时, 无法实现 Y 的最大化与  $E_B$  的最优化。由此可以看出, 生产

表 6 最大产量、水分利用效率、偏肥生产力和经济效益及其相应的灌溉量和施氮量

Tab. 6 Maximum yield, WUE, NPPF,  $E_B$  and their corresponding irrigation and N fertilizer application rates

灌溉量/mm	施氮量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	偏肥生产力/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	经济效益/ (元·hm <sup>-2</sup> )
410.0	260.0	8 355.94	19.71	32.28	7 496.57
370.0	260.0	8 160.72	20.01	31.50	7 267.08
410.0	180.0	7 632.85	18.37	41.25	6 217.77
400.0	250.0	8 325.21	19.82	33.32	7 517.96

中很难同时获得所有指标的最大化。

进一步分析发现,冬小麦  $Y$ 、 $WUE$  和  $E_b$  的可接受值分别有 90%、85% 和 80% 的重叠,但重叠值与最大值偏离太远。因此,本研究制定大于等于 95% 的最大值认为是可以接受的。但  $NFPF$  与其他 3 个指标呈现相反的趋势,与其他指标的重叠不超过 80%。考虑 95% 置信区间,得出灌溉量为 359.8 ~ 428.9 mm,施氮量为 225.4 ~ 280.9 kg/hm<sup>2</sup>,此时  $Y$ 、 $WUE$  和  $E_b$  可同时达到其最大值的 95% 以上。

### 3 讨论

华北平原是地下水严重超采区,冬小麦是华北平原的主要高耗水作物,在当前华北平原缺水严重现状下,探索冬小麦最佳的水肥管理制度,可为华北平原冬小麦节水节肥生产提供理论与技术参考。

从耗水特性来看,冬小麦  $ET_c$  及  $ET$  在在同一施肥处理下随灌溉定额的增加而明显增加,受灌水影响显著,这与彭致功等<sup>[10]</sup> 和栗丽等<sup>[11]</sup> 的研究结果一致。本研究结果表明,随着灌溉定额的增加,降雨量和土壤蓄水量占冬小麦总耗水量的比例呈降低趋势,灌溉量和渗漏量占总耗水量的比例呈增加趋势,与张笑培等<sup>[12]</sup> 的研究结果基本一致。且试验结果表明,通过减少灌溉量可有效地调节冬小麦对土壤蓄水的吸收利用,而生育前期控水、后期适当地增加灌溉量可以有效地减少冬小麦生育前期的耗水,增加后期耗水,这有助于提高产量,达到节水增产的效果。

小麦产量、水肥利用效率与经济效益是衡量小麦高产性和高效性的主要指标,适宜的水氮运筹能提高作物水肥利用效率,增加产量与经济效益。本文研究了灌溉-氮素供给对冬小麦产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和经济效益的影响。通过灌溉量-施氮量投入优化模型,确定不同水氮条件下冬小麦产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和经济效益综合效益最大化的灌溉量和施氮量,为冬小麦种植田间管理提供科学依据。

提高产量是灌溉施肥管理的主要目的之一<sup>[13]</sup>。冬小麦干物质和产量的形成密切相关,本试验中冬小麦成熟期干物质积累量和产量随水氮变化相一致,最高的处理均是 I2N2,分别达到 22 693.5、8 351.29 kg/hm<sup>2</sup>,较其他处理提高 5.5% ~ 41.1% 和 9.1% ~ 29.5%。因此,适宜的水氮配施更有助于产量的提高,这与李晶晶等<sup>[14]</sup> 研究发现“过量的水与肥都不利于小麦产量的增加”的结果相一致。同时,本研究发现,I2 处理较 I1 处理在抽穗灌浆期的灌溉更为重要,使得干物

质积累量与产量有了大幅的提高,但高定额的灌溉(I3)反而降低了干物质积累量与产量,这在秦姗姗等<sup>[15]</sup> 的研究中也得到了证明,抽穗灌浆水对小麦产量有重要作用,当降水不足会严重影响冬小麦产量,适当灌水可增加冬小麦产量,过大灌水量无助于小麦产量的提高。

本文研究结果表明,I3 下冬小麦水分利用效率较 I1、I2 水分利用效率明显降低,这与已有研究<sup>[16]</sup> 结果“在一定的范围内,过量的灌水会降低作物水分利用效率”相一致。随着施氮量的增加,在 I1 条件下,水分利用效率未表现出明显差异;在 I2、I3 条件下,水分利用效率随施氮量的增加先增加后降低。说明在本试验条件下,一定范围内增施氮肥能够提高冬小麦的水分利用效率,这也与文献<sup>[17-18]</sup> 的缺氮会降低水分利用效率的规律相一致。这是因为当氮肥超过合理范围时,分配到生殖器官的光合产物比例下降,导致产量下降,进而降低水分利用效率<sup>[19]</sup>。

氮肥偏生产力随着施氮量的增加而减小,而不同灌水定额之间由大到小依次为 I2、I3、I1,这与文献<sup>[20-21]</sup> 结论相近。氮肥偏生产力均以 I2 最高,其他作物也发现了类似的结果,包括冬枣<sup>[22]</sup>、马铃薯<sup>[23]</sup> 和番茄<sup>[24]</sup>。综上,适宜的灌溉量才可提高氮肥偏生产力,若灌溉量过多,土壤水分和空气的比例逐渐变小,影响到作物根系的生长特性,进而影响偏生产力、水分利用效率与产量<sup>[25]</sup>。

诸多研究人员通过多变量回归和空间分析结合,建立了水和肥料投入与作物产量和水肥利用效率之间的关系<sup>[26-27]</sup>。研究表明,当灌溉量和施氮量高于最适水平并不能提高各指标值,在某些情况下反而会产生相反的效果。当产量达到最大值,灌溉量和施氮量均高于最佳的灌溉施氮水平,这说明过量的水肥不仅会影响经济收益,而且会造成水肥淋失污染地下水。因此,确定灌溉施肥策略十分必要。本研究考虑 95% 置信区间,建立了水氮投入与冬小麦产量、水分利用效率和经济效益的关系。灌溉量 359.8 ~ 428.9 mm、施氮量 225.4 ~ 280.9 kg/hm<sup>2</sup> 能使冬小麦的产量、水分利用效率和经济效益均达到大于等于最大值的 95%。

### 4 结论

(1) 水氮互作效应对冬小麦耗水规律存在影响,其中灌水对耗水量  $ET$ 、耗水模数  $E_p$  和耗水强度  $ET_d$  的影响显著,施肥对其影响不显著。耗水量随灌溉定额的增加而增加,增加灌溉定额会增大作物生育后期耗水比例,有利于提高作物产量;同



时,适量增加灌溉定额与增施氮肥有助于冬小麦对土壤蓄水的吸收利用。

(2)地上干物质累积量与产量随水氮的变化表现出一致性,均随灌溉量或施氮量的增加呈先增加后降低的趋势。因此,只有适当的灌溉和施氮才有利于冬小麦最终产量的提高。

(3)冬小麦水分利用效率随着灌溉量与施氮量的增加呈先增后减的趋势;氮肥偏生产力随着施氮

量的增加而减小,随着灌溉量的增加呈先增后降的趋势;经济效益表现出随灌溉量与施氮量的增加先增加、后减小的趋势。

(4)在试验条件下,灌溉量为 359.8 ~ 428.9 mm (72.6%  $ET_c$  ~ 87.5%  $ET_c$ ) 与施氮量为 225.4 ~ 280.9 kg/hm<sup>2</sup> 的水氮耦合模式可在保证高产量、高经济效益的同时提高水肥利用效率,从而实现高产、节水、节肥的目标。

### 参 考 文 献

- [1] 陈凯丽, 赵经华, 付秋萍, 等. 不同水氮处理对滴灌冬小麦生长、产量和耗水特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4):125-132.  
CHEN Kaili, ZHAO Jinghua, FU Qiuping, et al. The effects of different water and nitrogen treatments on the growth, yield and water consumption characteristics of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4):125-132. (in Chinese)
- [2] 王磊, 董树亭, 刘鹏, 等. 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3):301-308.  
WANG Lei, DONG Shuting, LIU Peng, et al. Effects of water and nitrogen interaction on physiological and photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3):301-308. (in Chinese)
- [3] 杜娟娟, 李粉婵. 不同灌水及施肥措施对冬小麦生长及产量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(9):30-34.  
DU Juanjuan, LI Fenchan. Experimental study on the growth and yield of winter wheat under different irrigations and nitrogen applications[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(9):30-34. (in Chinese)
- [4] 薛丽华, 赵连佳, 孙诗仁. 水氮耦合对滴灌冬小麦光合特性、产量及水氮利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(30):12-19.  
XUE Lihua, ZHAO Lianjia, SUN Shiren. Effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic characteristics, yield and water and nitrogen use efficiency of winter wheat under drip irrigation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(30):12-19. (in Chinese)
- [5] 宋明丹, 李正鹏, 冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2):119-126.  
SONG Mingdan, LI Zhengpeng, FENG Hao. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2):119-126. (in Chinese)
- [6] 周加森, 马阳, 吴敏, 等. 不同水肥措施下的冬小麦水氮利用和生物效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9):36-41.  
ZHOU Jiasen, MA Yang, WU Min, et al. Water and nitrogen utilization and biological effects of winter wheat under different water and fertilizer measures[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9):36-41. (in Chinese)
- [7] 郑春风, 任伟, 车军, 等. 氮肥减量施用对冬小麦产量及经济效益的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(1):56-60.  
ZHENG Chunfeng, REN Wei, CHE Jun, et al. Effects of nitrogen reduction application on yield and economic benefit in winter wheat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(1):56-60. (in Chinese)
- [8] OLIVER M M H, HEWA G A, PEZZANITI D. Bio-fouling of subsurface type drip emitters applying reclaimed water under medium soil thermal variation[J]. Agriculture Water Management, 2014, 133:12-23.
- [9] 江晓东, 李增嘉, 侯连涛, 等. 少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水、肥利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7):20-24.  
JIANG Xiaodong, LI Zengjia, HOU Liantao, et al. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7):20-24. (in Chinese)
- [10] 彭致功, 张宝忠, 刘钰, 等. 华北典型区冬小麦区域耗水模拟与灌溉制度优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11):238-246.  
PENG Zhigong, ZHANG Baozhong, LIU Yu, et al. Simulation for regional water consumption and optimization of irrigation schedule for winter wheat in North China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):238-246. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20171129&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171129&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.029. (in Chinese)
- [11] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):291-296.  
LI Li, HONG Jianping, WANG Hongting, et al. Effects of nitrogen and irrigation interaction on water consumption characteristics and use efficiency in winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6):291-296. (in Chinese)

- [12] 张笑培, 王和洲, 周新国, 等. 拔节期水氮处理对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12):19-26.  
ZHANG Xiaopei, WANG Hezhou, ZHOU Xinguo, et al. Combined impact of irrigation and nitrogen application at the jointing stage on water consumption and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 19-26. (in Chinese)
- [13] HOU M M, SHAO X H, LI Y Y. Effects of water and  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizer coupling on the growth, N uptake, quality and yield of flue-cured tobaccos: a two-year lysimeter experiment[J]. Research on Crop, 2013, 14(3):950-959.
- [14] 李晶晶, 尹钧, 李武超, 等. 不同水氮运筹对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(5):27-33.  
LI Jingjing, YIN Jun, LI Wuchao, et al. Effects of different irrigation and nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(5):27-33. (in Chinese)
- [15] 秦姗姗, 侯宗建, 吴忠东, 等. 水氮耦合对冬小麦氮素吸收及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5):440-447.  
QIN Shanshan, HOU Zongjian, WU Zhongdong, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen absorption and yield of winter wheat[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(5):440-447. (in Chinese)
- [16] 黄玲, 杨文平, 胡喜巧, 等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):168-174.  
HUANG Ling, YANG Wenping, HU Xiqiao, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water consumption characteristics and nitrogen utilization of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2):168-174. (in Chinese)
- [17] SHANGUAN Z P, SHAO M G, DYCKMANS J. Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat[J]. Journal of Plant Physiology, 2000, 156(1):46-51.
- [18] YAO H S, ZHANG Y L, YI X P, et al. Plant density alters nitrogen partitioning among photosynthetic components, leaf photosynthetic capacity and photosynthetic nitrogen use efficiency in field-grown cotton[J]. Field Crops Research, 2015, 184(7):39-49.
- [19] WANG X, SHI Y, GUO Z J, et al. Water use and soil nitrate nitrogen changes under supplemental irrigation with nitrogen application rate in wheat field[J]. Field Crops Research, 2015, 183:117-125.
- [20] 史桂清, 白倩倩, 郭程瑾, 等. 节水条件下供氮水平对冬小麦氮素吸收利用特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(5):608-614.  
SHI Guiqing, BAI Qianqian, GUO Chengjin, et al. Effect of nitrogen application level on acquisition and utilization of N under the water-saving cultivation conditions in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(5):608-614. (in Chinese)
- [21] 刘明, 张忠学, 郑恩楠, 等. 不同水氮管理模式下玉米光合特征和水氮利用效率试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12):27-34.  
LIU Ming, ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, et al. Photosynthesis, water and nitrogen use efficiency of maize as impacted by different combinations of water and nitrogen applications[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12):27-34. (in Chinese)
- [22] DAI Z, FEI L, HUANG D, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water and nitrogen use efficiency of surge-root irrigated jujube in a semiarid region[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213(5):146-154.
- [23] CANTORE V, WASSAR F, YAMAC S S, et al. Yield and water use efficiency of early potato grown under different irrigation regimes[J]. International Journal of Plant Production, 2014, 8(3):409-428.
- [24] GIULIANI M M, CARUCCI F, NARDELLA E, et al. Combined effects of deficit irrigation and strobilurin application on gas exchange, yield and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 233(3):149-158.
- [25] ABUARAB M, MOSTAFA E, IBRAHIM M. Effect of air injection under subsurface drip irrigation on yield and water use efficiency of corn in a sandy clay loam soil[J]. Journal of Advanced Research, 2013, 4(6):493-499.
- [26] 张智, 李曼宁, 杨志, 等. 基于多指标协同的草莓水肥耦合综合调控[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2):267-276.  
ZHANG Zhi, LI Manning, YANG Zhi, et al. Comprehensive regulation of water and fertilizer coupling based on multi-index collaboration of strawberry[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):267-276. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2002029&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2002029&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.029. (in Chinese)
- [27] 李仙岳, 丁宗江, 闫建文, 等. 沙区降解膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):261-270.  
LI Xianyue, DING Zongjiang, YAN Jianwen, et al. Interaction effect and model of water and nitrogen under degradable film mulching in drip irrigated sandy farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):261-270. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180731&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180731&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.031. (in Chinese)