

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.037

# 隔沟调亏灌溉对冬小麦旗叶生理特性与产量形成的影响

刘小飞 李彪 孟兆江 刘祖贵 张寄阳

(中国农业科学院农田灌溉研究所农业农村部作物需水与调控重点实验室, 新乡 453002)

**摘要:** 为了解垄栽模式下隔沟调亏灌溉对冬小麦生理生化特性以及产量形成过程的影响及其机理, 在移动式防雨棚测坑内进行了试验。试验设置 5 个处理, 即 T1(常规畦灌): 全生育期计划湿润层土壤含水率控制在 65% ~ 75% 田间持水率(FC); T2(隔沟交替灌溉, AFI): 全生育期 1/2 交替灌, 当土壤含水率下降至(55% ~ 65%) FC 区间内, 即灌水至 95% FC; T3、T4、T5 为隔沟调亏灌溉处理: 分别在返青-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期将土壤含水率控制在(55% ~ 65%) FC, 其余生育阶段按 T2 处理控制土壤含水率。测定冬小麦花后旗叶光合特性指标、脯氨酸含量、可溶性糖含量和产量构成等指标。试验结果表明, 常规畦灌方式下冬小麦旗叶具有最高的净光合速率、蒸腾速率, 但隔沟交替灌溉处理和隔沟调亏灌溉方式下的各个处理表现出较高的叶片水分利用效率, 其中 T3 在开花期和灌浆期的日均叶片水分利用效率均为各处理中的最大值。各处理的籽粒产量由大到小依次为: T1、T2、T3、T4、T5, 与 T1 相比, T2 与 T3 分别减产 1.98% ( $P > 0.05$ ) 和 5.68% ( $P < 0.05$ ), 但分别节水 10.01% ( $P < 0.01$ ) 和 16.91% ( $P < 0.01$ ), 产量水分利用效率分别提高 9.04% ( $P < 0.05$ ) 和 15.82% ( $P < 0.01$ )。本试验条件下, 隔沟调亏灌溉方式在返青-拔节期施加适当的水分调亏((55% ~ 65%) FC) 是兼顾节水、稳产的最佳处理。

**关键词:** 冬小麦; 调亏灌溉; 控制性交替灌溉; 生理特性; 产量

中图分类号: S275; S512.1<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)09-0320-09

## Effects of Regulated Deficit Irrigation under Furrow Irrigation on Physiological Characteristics of Flag Leaf after Anthesis and Yield Formation of Winter Wheat

LIU Xiaofei LI Biao MENG Zhaojiang LIU Zugui ZHANG Jiyang

(Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

**Abstract:** A pond-based experiment with winter wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) was conducted under rainproof shelter during the growing seasons of 2016—2017 to investigate the effects of regulated deficit irrigation under alternate furrow irrigation on physio-biochemical characteristics and yield of winter wheat. Five experimental treatments were included, conventional border irrigation (T1, the soil water content in planned moisture layer was controlled at 65% ~ 75% field capacity (FC) throughout growing season), alternate furrow irrigation (T2, two root-zones were alternatively irrigated during the consecutive irrigation, the soil water content with values of (55% ~ 65%) FC and 95% FC were considered as the lower limit and the upper limit for irrigation, respectively), T3, T4 and T5 were defined as alternative furrow-regulated deficit irrigation (the soil water content in planned moisture layer was controlled at (55% ~ 65%) FC at the beginning of returning green-stem elongation, stem elongation-ear emergence, and ear emergence-maturity period), respectively. When the soil water content at the soil layer of a given treatment fell below the lower limit of the target range during the water-deficit treatment period, it was replenished to 95% FC. Three treatments (T3, T4 and T5) received irrigation water at the T2 level during the unstressed stages. The photosynthetic characteristics, proline and soluble sugar content of flag leaf after anthesis and wheat yield components and so on were measured. The results

收稿日期: 2019-06-17 修回日期: 2019-07-17

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(U1404528)、国家现代农业小麦产业技术体系建设项目(CARS-3-1-30)、中央级科研院所基本科研业务费专项(FIRI2017-02)、公益性行业(农业)科研专项(201503130)和中国农业科学院协同创新项目

**作者简介:** 刘小飞(1976—),男,副研究员,博士,主要从事作物灌溉原理研究,E-mail: lxffiri@163.com

**通信作者:** 孟兆江(1958—),男,研究员,博士,主要从事作物灌溉原理与节水技术研究,E-mail: zhaojiang\_meng@aliyun.com

indicated that the net photosynthetic rate and transpiration rate of the border irrigation were higher than those of alternate furrow irrigation and alternate furrow-regulated deficit irrigation treatments, but the higher leaf water use efficiency under the alternate furrow irrigation was demonstrated. Alternate furrow irrigation treatment and alternate furrow-regulated deficit irrigation treatments had a lower yield than that of the border irrigation, but it didn't reach a significant level ( $P > 0.05$ ) for T1 and T2. The yields of T2 and T3 were decreased by an average of 1.98% ( $P > 0.05$ ) and 5.68% ( $P < 0.05$ ) respectively, but their water consumptions were decreased by an average of 10.01% ( $P < 0.01$ ) and 16.91% ( $P < 0.01$ ) respectively, and their WUE were increased by 9.04% ( $P < 0.05$ ) and 15.82% ( $P < 0.01$ ) respectively. The present results suggested that alternate furrow-regulated deficit irrigation applying suitable water deficit (55% ~ 65%) FC during returning green stage under alternate furrow irrigation was the better irrigation model to save water and achieve high grain yield in winter wheat.

**Key words:** winter wheat; regulated deficit irrigation; controlled alternate furrow irrigation; physiological characteristics; yield

## 0 引言

开花期和灌浆期, 是小麦生殖生长和籽粒形成的关键时期, 也是决定小麦粒质量和产量形成的重要阶段<sup>[1]</sup>。旗叶是小麦主要的光合产物制造器官, 对籽粒产量的贡献巨大<sup>[2]</sup>; 土壤水分对小麦旗叶的光合特性以及产量形成有调控作用<sup>[3]</sup>, 因此研究旗叶光合作用、蒸腾作用等植物气体交换参数和脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质对不同生育期水分胁迫的响应, 对于深入探讨作物抗旱节水机理具有重要意义。有试验结果表明, 随着土壤水分胁迫加剧, 小麦旗叶净光合速率(Net photosynthesis rate,  $P_n$ )、蒸腾速率(Transpiration rate,  $T_r$ )等都呈降低的趋势<sup>[4]</sup>。水分胁迫会导致灌浆期光合速率下降, 阻碍花后光合产物的合成以及花前光合产物向籽粒的运输, 从而引起减产<sup>[5]</sup>, 而适度水分亏缺虽然会造成轻微的减产, 但可以提高水分利用效率<sup>[6-8]</sup>。

调亏灌溉基本思路是, 在某些生育期施加一定的水分亏缺, 抑制营养生长, 促进生殖生长<sup>[9-10]</sup>。隔沟交替灌溉则是通过控制某些区域交替出现干燥和湿润, 使不同区域或部位的根系交替经受一定程度的干旱锻炼, 减少棵间无效蒸发和奢侈蒸腾, 以不牺牲作物的光合产物积累而达到节水的目的<sup>[11-12]</sup>。调亏灌溉适用对象较为广泛, 无论宽行作物还是密植作物均可在不同时段内进行水分亏缺, 但其并未考虑水分在作物根系空间上的作用; 隔沟交替灌溉的研究主要集中在宽行作物, 将之运用到密植作物小麦上的研究鲜有报道。已有研究认为小麦垄作栽培能够突出边际优势, 提高田间透光率和光能利用率, 从而实现增产<sup>[13-14]</sup>。基于此, 本文进行冬小麦“隔沟调亏灌溉”试验研究, 将“调亏灌溉(RDI)”与“隔沟交替灌溉(AFI)”集成于一体, 利用作物生长时间和生长空间上水分调控的协同效应, 调控植株叶片气孔导度, 减少水分散失, 实现节水、优质高效

的目标。选择冬小麦产量形成的关键期——开花期和灌浆期, 研究不同水分调控方式对冬小麦的生理特性和产量形成的影响, 为构建冬小麦调亏灌溉的田间运行方式——隔沟调亏灌溉模式提供理论依据与技术参数。

## 1 试验材料和试验方案

### 1.1 试验地概况

试验于2016年10月—2017年6月在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场移动式防雨棚下进行, 返青—灌浆期下雨时关闭防雨棚隔绝降水, 雨后开启。试验场位于黄淮海平原河南省新乡市东北郊, 东经113°53′、北纬35°19′, 属典型的暖温带半湿润半干旱地区。年平均降雨量580 mm, 年平均气温13.5℃, 年平均积温5 070℃, 年均日照时数2 497 h, 无霜期220 d, 年均潜在蒸散量2 000 mm。试验用土壤类型为潮土, 质地为轻沙壤土, 垄上(0~20 cm)土壤平均容重为1.25 g/cm<sup>3</sup>, 20~100 cm土壤平均容重为1.38 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水率24% (质量含水率), 土壤pH值8.8; 基础养分含量(均为质量比)为: 有机质18.85 g/kg、全氮1.10 g/kg、全磷2.22 g/kg、全钾19.80 g/kg、碱解氮15.61 mg/kg、速效磷72.00 mg/kg、速效钾101 mg/kg。

### 1.2 试验方案

以冬小麦(*Triticum aestivum* L.)为试验材料, 品种为“新麦26”, 由河南省新乡市农业科学院小麦研究所提供。采用控制条件下测坑试验, 每个小区3垄4沟, 测坑面积8 m<sup>2</sup> (2.4 m × 3.33 m), 深1.8 m, 土层底部设置有20 cm厚的沙石过滤层, 坑四周及底部通过混凝土防渗结构与周边土体隔离, 可有效防止垂向与侧向的水分交换。垄栽沟灌方式的垄沟规格为: 垄高20 cm, 垄宽50 cm, 沟底宽20 cm, 坡度1:1 (图1a)。于2016年10月1日足墒播种, 2017年5月27日收获。种植模式平作行间距为15 cm,

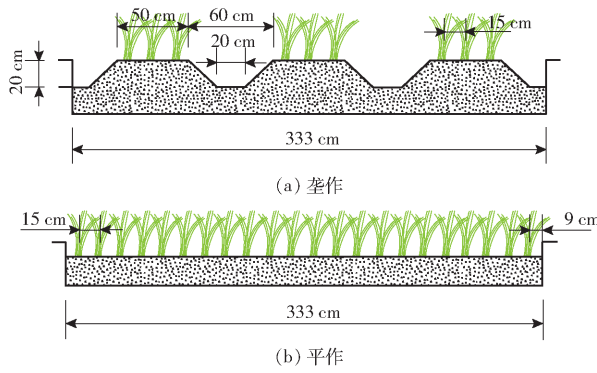


图1 冬小麦垄作和平作栽培示意图

Fig. 1 Schematics of ridge culture and convention planting for winter wheat

基本苗约为 300 万株/hm<sup>2</sup> (图 1b); 垄作作为一垄三行, 垄上小麦行距为 15 cm, 基本苗约为 150 万株/hm<sup>2</sup>。播种前按 560 kg/hm<sup>2</sup> 基施复合肥 (含 N 质量分数 15%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 质量分数 15%, K<sub>2</sub>O 质量分数 15%), 并

在拔节中期 (4月4日) 按 300 kg/hm<sup>2</sup> 追施尿素 (含 N 质量分数 46%)。垄栽沟灌方式肥料施于沟内, 畦灌方式撒施, 并在施肥后立即灌水。

灌水方式分为隔沟交替灌和畦灌 2 种, 其中隔沟交替灌方式根据垄上土壤相对含水率 (土壤含水率占田间持水率的百分比, 返青-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期对应的计划湿润层深度分别取 40、60、80 cm) 控制水分, 从返青期开始水分处理, 考虑到华北地区 5 月多风, 冬小麦生育后期灌水易倒伏, 故在 4 月 29 日 (开花末期) 复水后不再灌水。试验设计方案见表 1。试验共 5 个处理, 重复 3 次, 占用测坑 15 个。调亏阶段灌水按设计水平 (低于下限灌至上限, 其中隔沟交替灌取 1/2 灌水量), 其余阶段由灌水下限灌至 95% FC, FC 为田间持水率, 各生育期灌水量见表 2。

表 1 试验设计

Tab. 1 Design of experiment

处理	内容	水分控制下限	备注
T1	常规地面灌, 全生育期保持适宜水分, 畦灌	(65% ~ 75%) FC	当土壤水分下降至 (65% ~ 75%) FC 区间内, 即灌至 95% FC
T2	1/2 隔沟交替灌, 垄沟灌	(55% ~ 65%) FC	当土壤水分下降至 (55% ~ 65%) FC 区间内, 即灌至 95% FC, 1/2 灌水量
T3	调亏-隔沟复合灌: 返青-拔节期调亏, 垄沟灌	(55% ~ 65%) FC	返青-拔节期水分控制在 (55% ~ 65%) FC, 其余阶段同 T2
T4	调亏-隔沟复合灌: 拔节-抽穗期调亏, 垄沟灌	(55% ~ 65%) FC	拔节-抽穗期水分控制在 (55% ~ 65%) FC, 其余阶段同 T2
T5	调亏-隔沟复合灌: 抽穗-灌浆期调亏, 垄沟灌	(55% ~ 65%) FC	抽穗-灌浆期水分控制在 (55% ~ 65%) FC, 其余阶段同 T2

表 2 各生育期灌水量

Tab. 2 Irrigation amount in different growth stages

处理	返青水				拔节水		扬花水		灌水总量
	02-17	02-24	03-11	03-26	04-04	04-08	04-18	04-29	
T1	18.8	28.8	35.0	46.3	33.8	25.0	61.3	46.3	295.3
T2	0	33.8	30.0	41.3	42.5	0	56.3	47.5	251.4
T3	0	0	22.5	42.5	38.8	0	55.0	43.8	202.6
T4	0	21.3	27.5	0	26.3	15.0	62.5	32.5	185.1
T5	0	28.8	20.0	48.8	45.0	0	0	36.3	178.9

### 1.3 观测项目与方法

#### 1.3.1 土壤含水率和灌水量

在冬小麦全生育期每隔 2 d 用德国 IMKO 公司制造的 TRIME-T3 TDR 型剖面土壤水分测量系统, 观测垄上土壤含水率, 观测点位于垄上冬小麦行间, 每个处理观测 3 个点, 取其平均值用于分析。返青期之前只在生育期始末段用土钻法取土测定土壤含水率, 返青-灌浆期 (2 月 16 日-4 月 29 日) 开始每隔 5 d 取土测定 1 次, 0~100 cm 土层每隔 20 cm 取一钻, 同时对 TRIME 的测定结果进行标定, 当土壤含水率达到灌水下限时, 用取土法加测。灌水量由灌水定额计算公式确定<sup>[15]</sup>, 计算公式为

$$M = 10H\rho(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

式中  $M$ ——灌水量, mm

$H$ ——该时段土壤计划湿润层的深度, cm

$\rho$ ——计划湿润层内土壤容重, g/cm<sup>3</sup>

$\theta_i$ ——目标含水率 (田间持水率乘以目标相对含水率)

$\theta_j$ ——灌溉前土壤含水率

#### 1.3.2 农田耗水量和产量水分利用效率的计算

冬小麦耗水量采用水量平衡方程计算<sup>[16]</sup>, 即

$$ET_c = P + M + K - F - S + \Delta W \quad (2)$$

式中  $ET_c$ ——冬小麦耗水量, mm

$P$ ——有效降水量, mm

$K$ ——地下水补给量, mm

$F$ ——地表径流, mm

$S$ ——深层渗漏量, mm

$\Delta W$ ——全生育期始末段土壤含水量变化量, mm

试验在防雨棚下的有底测坑中进行,因此, $K$ 、 $F$ 、 $S$ 都为0, $P$ 为返青期前和灌浆期后降水量,根据气象站资料查得为70 mm。根据各处理产量和耗水量计算水分利用效率,计算式为

$$WUE = Y/ET_c \quad (3)$$

式中  $WUE$ ——产量水分利用效率,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$Y$ ——产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

### 1.3.3 旗叶光合特性

从冬小麦开花后0 d开始每隔7 d测定一次旗叶光合特性。采用美国LI-COR公司生产的LI-6400XT型便携式光合作用测量系统测定,光强由系统自带的人工光源LED提供,为 $1\,500\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;各处理在垄两边行各选取2株,中间行取1株挂牌标记,每次测定选在晴好天气的09:00—11:00进行;分别测定旗叶的光合速率、蒸腾速率等,重复5次,取其平均值。并于4月26日(开花期)、5月12日(灌浆期)测定日变化,测定时间分别为08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00,测定参数包括净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ ),并计算叶片水分利用效率(Leaf water use efficiency,  $LWUE$ ),  $LWUE = P_n/T_r$ 。

### 1.3.4 脯氨酸和可溶性糖含量测定

于冬小麦开花后0 d开始每隔7 d选取长势一致、具有代表性的小麦旗叶鲜样,用于测定冬小麦叶片的脯氨酸和可溶性糖含量。脯氨酸含量用酸性茚三酮显色法<sup>[17]</sup>,可溶性糖含量用蒽酮法<sup>[18]</sup>。

### 1.3.5 产量和产量构成因素

成熟期(2017年5月27日),各小区全部收获、考种并测其有效穗数、穗粒数,采用电子天平测量千粒质量,小区冬小麦产量以实收产量来计算,并折算为公顷产量;所有指标均为3次重复。

### 1.3.6 数据处理与分析

采用Excel 2013进行数据处理,SAS 9.2统计软件进行方差分析,采用LSD法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生育期水分调控对冬小麦花后旗叶光合特性的影响

#### 2.1.1 冬小麦花后旗叶净光合速率、蒸腾速率的变化

从表3可以看出,开花末期复水后,各处理旗叶净光合速率( $P_n$ )均呈现较明显的补偿效应,并在花后14 d达到峰值,之后各处理旗叶 $P_n$ 急剧下降。花后0~28 d,畦灌T1相对于其他处理具有更高的净光合速率,表明充足的水分有利于小麦的光合作用。T5的 $P_n$ 始终显著小于其他处理( $P < 0.05$ ),说明隔沟调亏灌溉下冬小麦抽穗-灌浆期的水分胁迫对生

育后期的光合作用影响较大,复水后的补偿效应并不明显。

表3 净光合速率变化

Tab.3 Variation of net photosynthesis rate

处理	花后时间/d				
	0	7	14	21	28
T1	18.61 <sup>aA</sup>	21.15 <sup>aA</sup>	24.23 <sup>aA</sup>	20.10 <sup>aA</sup>	12.73 <sup>aA</sup>
T2	17.89 <sup>bAB</sup>	20.12 <sup>bAB</sup>	23.28 <sup>bAB</sup>	18.61 <sup>bB</sup>	11.02 <sup>bB</sup>
T3	17.31 <sup>bcB</sup>	19.52 <sup>bb</sup>	22.32 <sup>bcB</sup>	16.50 <sup>cC</sup>	11.50 <sup>bAB</sup>
T4	17.10 <sup>cB</sup>	18.12 <sup>cCD</sup>	22.05 <sup>cCD</sup>	14.51 <sup>dD</sup>	8.62 <sup>cC</sup>
T5	14.24 <sup>dC</sup>	17.10 <sup>dD</sup>	19.16 <sup>dD</sup>	13.53 <sup>cD</sup>	4.75 <sup>dD</sup>

注:不同小写字母和大写字母分别表示同一列数值经多重比较,在0.05水平和0.01水平上的差异显著性,下同。

由表4可知,各处理冬小麦旗叶蒸腾速率( $T_r$ )整体变化趋势与 $P_n$ 一致,均表现为先增加后减小,花后14 d出现峰值,T1和T2的旗叶 $T_r$ 在0~28 d要高于其他处理,并在14 d和28 d达显著水平( $P < 0.05$ )。T5的旗叶 $T_r$ 小于其他处理,并在7~28 d达显著水平( $P < 0.05$ ),表明隔沟调亏灌溉下冬小麦抽穗-灌浆期的水分胁迫对生育后期旗叶蒸腾速率有较大影响。

表4 蒸腾速率变化

Tab.4 Variation of transpiration rate

处理	花后时间/d				
	0	7	14	21	28
T1	6.12 <sup>aA</sup>	6.61 <sup>aA</sup>	8.43 <sup>aA</sup>	7.02 <sup>aA</sup>	5.20 <sup>aA</sup>
T2	5.51 <sup>bA</sup>	6.02 <sup>bA</sup>	7.98 <sup>aA</sup>	6.20 <sup>bAB</sup>	4.81 <sup>aAB</sup>
T3	5.38 <sup>bA</sup>	5.49 <sup>cAB</sup>	6.92 <sup>bBC</sup>	5.01 <sup>cC</sup>	4.04 <sup>bBC</sup>
T4	4.84 <sup>cAB</sup>	5.94 <sup>bcA</sup>	6.91 <sup>bBC</sup>	5.81 <sup>bBC</sup>	4.24 <sup>bB</sup>
T5	4.50 <sup>cB</sup>	5.03 <sup>dB</sup>	6.04 <sup>cC</sup>	3.53 <sup>dD</sup>	3.15 <sup>cC</sup>

### 2.1.2 冬小麦旗叶净光合速率、蒸腾速率及水分利用效率日变化

由图2a、2b可以看出,T3、T4和T5的旗叶 $P_n$ 日变化曲线在开花期均呈现“双峰”形,表现出明显的光合“午休”现象;而在灌浆期,T3和T4呈现微弱的“多峰”变化,T5为“单峰”形。各处理开花期旗叶日均净光合速率( $\bar{P}_n$ )高于灌浆期,但各处理之间存在差异(表5)。开花期,T1和T2的旗叶 $\bar{P}_n$ 之间并无显著差异( $P > 0.05$ ),但均显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),说明隔沟调亏灌溉下各生育期的水分胁迫对旗叶开花期的光合作用有一定程度的影响。灌浆期,T2、T3、T4间的旗叶 $\bar{P}_n$ 无显著差异( $P > 0.05$ ),T5的旗叶 $\bar{P}_n$ 显著小于其他处理( $P < 0.05$ )。小麦旗叶的 $T_r$ 日变化曲线与 $P_n$ 曲线基本一致(图2c、

2d),略有不同的是,T3和T4的旗叶 $T_r$ 日变化曲线在灌浆期呈现“双峰”形。由表5可知,各处理灌浆期的旗叶日均蒸腾速率( $\bar{T}_r$ )均高于开花期,这可能与灌浆期气温升高,蒸腾作用增强有关。在开花期和灌浆期,T1的旗叶 $\bar{T}_r$ 都显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),T3、T4和T5的旗叶 $\bar{T}_r$ 相对于T2均有不同程度的减小,说明隔沟调亏灌溉下各生育期的水分胁迫均能在一定程度上降低冬小麦旗叶的蒸腾速率。

从图2e、2f可以看出,各处理的叶片水分利用效率(LWUE)日变化曲线和 $P_n$ 、 $T_r$ 曲线有所不同,并没有明显的“双峰”出现。冬小麦各处理开花期旗叶日均水分利用效率(LWUE)高于灌浆期(表5)。

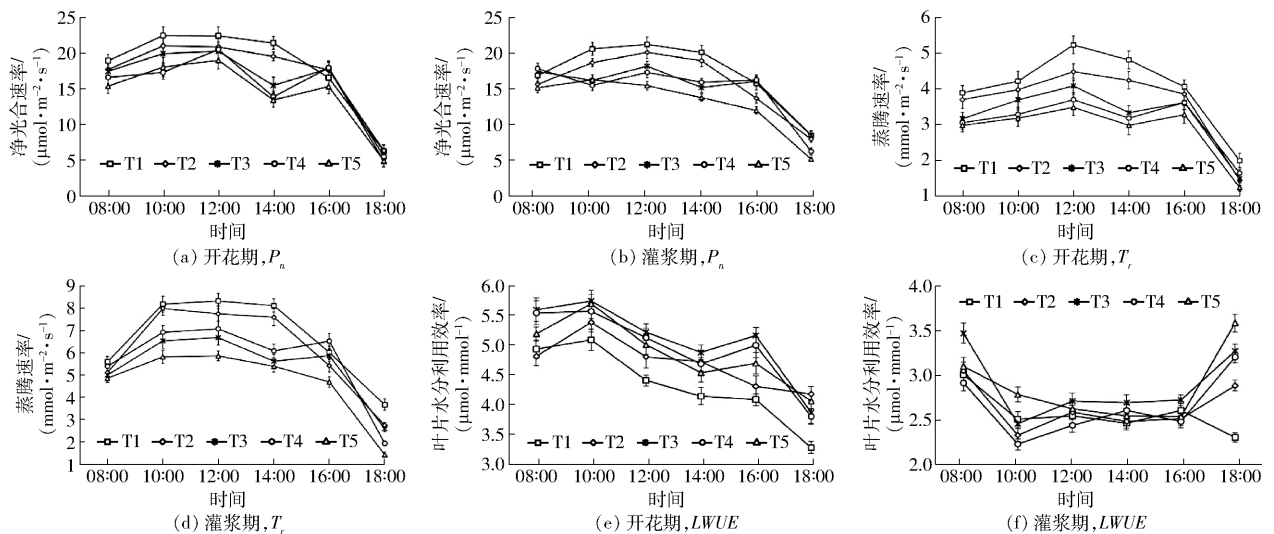


图2 冬小麦开花期(2017-04-27)和灌浆期(2017-05-12)旗叶净光合速率、蒸腾速率和叶片水分利用效率变化曲线  
Fig. 2 Diurnal variations of net photosynthesis rate, transpiration rate and flag leaf water use efficiency under different treatments at flowering stage (2017-04-27) and filling stage (2017-05-12)

表5 不同处理对冬小麦花后旗叶日均净光合速率( $\bar{P}_n$ )、日均蒸腾速率( $\bar{T}_r$ )和日均叶片水分利用效率( $\bar{LWUE}$ )的影响  
Tab.5 Effects of different treatments on daily average net photosynthesis rate ( $\bar{P}_n$ ), daily average transpiration rate ( $\bar{T}_r$ ) and daily average flag leaf water use efficiency ( $\bar{LWUE}$ ) after anthesis of winter wheat

处理	开花期			灌浆期		
	$\bar{P}_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\bar{T}_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\bar{LWUE}/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$	$\bar{P}_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\bar{T}_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\bar{LWUE}/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$
T1	18.20 <sup>aA</sup>	4.07 <sup>aA</sup>	4.35 <sup>cC</sup>	17.13 <sup>aA</sup>	6.66 <sup>aA</sup>	2.57 <sup>bB</sup>
T2	17.38 <sup>aAB</sup>	3.64 <sup>bAB</sup>	4.70 <sup>bB</sup>	15.80 <sup>bAB</sup>	6.04 <sup>bAB</sup>	2.64 <sup>bB</sup>
T3	16.15 <sup>bAB</sup>	3.19 <sup>cBC</sup>	5.07 <sup>aA</sup>	15.22 <sup>bBC</sup>	5.39 <sup>cBC</sup>	2.91 <sup>aA</sup>
T4	15.44 <sup>bB</sup>	3.10 <sup>cC</sup>	4.98 <sup>aA</sup>	14.81 <sup>bBC</sup>	5.65 <sup>bC</sup>	2.65 <sup>bB</sup>
T5	14.42 <sup>cB</sup>	2.88 <sup>cC</sup>	4.94 <sup>aA</sup>	12.92 <sup>cC</sup>	4.68 <sup>dC</sup>	2.86 <sup>aA</sup>

## 2.2 不同生育期水分调控对冬小麦开花后旗叶渗透调节物质的影响

渗透调节是植物适应水分胁迫的重要生理机制,通常将脯氨酸含量的变化作为表征植物体内渗透调节能力的指标<sup>[19]</sup>。由表6可以看出,除T5外各处理的旗叶脯氨酸含量均在灌水之前(开花后第7天)达到峰值,复水之后,旗叶脯氨酸含量呈下降

趋势,而T5的旗叶脯氨酸含量仍然不断积累,至开花后14d达到峰值。水分胁迫处理的旗叶脯氨酸含量普遍高于充分供水处理(T1、T2),T3、T4、T5的脯氨酸含量均值分别比T2高13.14%、27.44%、61.92%,显示出隔沟调亏灌溉方式下各生育期的水分胁迫有利于小麦旗叶脯氨酸积累。

可溶性糖含量反映植物叶片的碳、氮代谢活性,

表6 不同处理下冬小麦旗叶脯氨酸含量(质量比)变化

Tab.6 Variation of proline contents in flag leaf of winter wheat under different treatments

 $\mu\text{g/g}$ 

处理	开花后时间/d					均值
	0	7	14	21	28	
T1	49.77 <sup>dC</sup>	125.87 <sup>dC</sup>	94.71 <sup>dC</sup>	135.01 <sup>abAB</sup>	63.08 <sup>cC</sup>	93.68
T2	76.71 <sup>cB</sup>	150.00 <sup>cC</sup>	114.70 <sup>cdC</sup>	128.24 <sup>bcAB</sup>	111.14 <sup>bB</sup>	116.16
T3	101.59 <sup>bA</sup>	190.23 <sup>bB</sup>	125.35 <sup>cC</sup>	114.17 <sup>cB</sup>	126.07 <sup>bB</sup>	131.42
T4	112.09 <sup>abA</sup>	201.79 <sup>bB</sup>	164.54 <sup>bB</sup>	147.31 <sup>aA</sup>	115.26 <sup>bB</sup>	148.04
T5	120.15 <sup>aA</sup>	234.08 <sup>aA</sup>	260.16 <sup>aA</sup>	146.78 <sup>aA</sup>	179.68 <sup>aA</sup>	188.09

在植物的生命周期中具有重要作用<sup>[20]</sup>。从表7可以看出,开花末期灌水后各处理的旗叶可溶性糖含量均出现轻微降低的趋势,随后逐渐增加,在开花后21 d达到峰值,之后急剧减小。T5在开花后14 d的

旗叶可溶性糖含量显著低于其他处理( $P < 0.05$ ),在开花后21 d则表现出最大值,并与其他处理的差异达极显著水平( $P < 0.01$ ),说明旗叶可溶性糖含量与土壤含水率间的关系存在不确定性。

表7 不同处理下冬小麦旗叶可溶性糖含量(质量比)变化

Tab.7 Variation of soluble sugar contents in flag leaf of winter wheat under different treatments

 $\mu\text{g/g}$ 

处理	开花后时间/d					均值
	0	7	14	21	28	
T1	17.12 <sup>bB</sup>	20.03 <sup>bB</sup>	20.12 <sup>aA</sup>	25.98 <sup>cC</sup>	9.68 <sup>aA</sup>	18.45
T2	17.08 <sup>bB</sup>	21.74 <sup>abAB</sup>	21.57 <sup>aA</sup>	27.96 <sup>bB</sup>	6.98 <sup>bcB</sup>	19.07
T3	21.30 <sup>aA</sup>	21.30 <sup>abAB</sup>	19.13 <sup>bAB</sup>	26.10 <sup>bcBC</sup>	6.09 <sup>cB</sup>	18.84
T4	22.98 <sup>aA</sup>	21.97 <sup>abAB</sup>	21.07 <sup>aA</sup>	28.02 <sup>bB</sup>	8.39 <sup>abAB</sup>	20.49
T5	18.73 <sup>bB</sup>	22.74 <sup>aA</sup>	16.83 <sup>cB</sup>	31.66 <sup>aA</sup>	8.42 <sup>abAB</sup>	19.68

### 2.3 不同生育期水分调控对冬小麦产量及其构成的影响

不同灌溉方式下冬小麦的产量结构有所不同。由表8可知,T1的穗粒数、千粒质量和产量均高于其他处理,其中穗粒数与其他处理有显著差异( $P < 0.05$ )。T2的有效穗数高于其他处理,说明隔沟交替灌溉能增加冬小麦有效穗数。由于小麦的最终产量由有效穗数、穗粒数、千粒质量共同决定,所以总体来看,T2和T1的产量并无显著差异( $P > 0.05$ )。T3、T4、T5的有效穗数和穗粒数相较于T2均有不同程度的减少,其中T4、T5与T2之间呈极显著差异( $P < 0.01$ )。T5的千粒质量小于其他处理,且达极显著水平( $P < 0.01$ ),表明隔沟调亏灌溉下抽穗-灌浆期的水分胁迫会严重影响小麦千粒质量。

从最终的产量看,各处理由大到小依次为T1、T2、T3、T4、T5,其中T1、T2产量显著高于其他处理

( $P < 0.05$ );从产量水平水分利用效率看,各处理由大到小依次为T3、T2、T4、T1、T5,其中,T3与T1、T4、T5的差异达极显著水平( $P < 0.01$ ),说明隔沟调亏灌溉下返青-拔节期适度的水分胁迫对提高WUE有利。T2和T3的产量分别较T1降低1.98% ( $P > 0.05$ )和5.68% ( $P < 0.05$ ),但分别节水10.01% ( $P < 0.01$ )和16.91% ( $P < 0.01$ ),WUE分别提高9.04% ( $P < 0.05$ )和15.82% ( $P < 0.01$ ),说明隔沟调亏灌溉下返青-拔节期进行适当的水分胁迫能较大程度上节水并提高冬小麦的水分利用效率。

## 3 讨论

### 3.1 不同生育期水分调控对冬小麦花后旗叶光合特性的影响

有关不同生育期水分胁迫对小麦旗叶光合特性的影响已有较多研究,张其德等<sup>[21]</sup>认为拔节期灌水

表8 不同处理下冬小麦产量及其构成因素

Tab.8 Yield and its components of winter wheat under different treatments

处理	有效穗数/ (穗· $\text{hm}^{-2}$ )	穗粒数/ (粒·穗 $^{-1}$ )	千粒质量/ g	籽粒产量/ ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	耗水量/ mm	水分利用效率/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
T1	5.86 × 10 <sup>6abAB</sup>	34.60 <sup>aA</sup>	44.05 <sup>aA</sup>	8 107.36 <sup>aA</sup>	458.75 <sup>aA</sup>	1.77 <sup>cCD</sup>
T2	5.96 × 10 <sup>6aA</sup>	33.12 <sup>bAB</sup>	43.78 <sup>aA</sup>	7 947.23 <sup>abA</sup>	412.82 <sup>bB</sup>	1.93 <sup>bAB</sup>
T3	5.75 × 10 <sup>6bcBC</sup>	32.52 <sup>bBC</sup>	43.20 <sup>aA</sup>	7 646.56 <sup>bA</sup>	381.19 <sup>bcC</sup>	2.05 <sup>aA</sup>
T4	5.62 × 10 <sup>6cb</sup>	31.06 <sup>cCD</sup>	43.12 <sup>aA</sup>	7 043.38 <sup>cB</sup>	373.95 <sup>cC</sup>	1.88 <sup>bBC</sup>
T5	5.70 × 10 <sup>6cBC</sup>	30.78 <sup>cD</sup>	38.86 <sup>bB</sup>	6 276.65 <sup>dC</sup>	371.83 <sup>cC</sup>	1.69 <sup>cD</sup>

有利于小麦生育后期维持良好的光合作用;盛钰等<sup>[22]</sup>的研究表明拔节期的水分胁迫对灌浆期光合作用的影响甚至要大于灌浆期的水分胁迫;谭念童等<sup>[23]</sup>的研究认为拔节-灌浆期是影响小麦光合作用十分重要的时期。这些结论都是在大田畦灌方式下得出的,关于隔沟交替灌溉和隔沟调亏灌溉对冬小麦旗叶光合特性的影响未见报道。本研究结果表明,尽管水分胁迫影响到旗叶光合作用,但复水后的光合补偿效应以及蒸腾速率的减小,提高了  $LWUE$ 。T3 和 T4 的旗叶  $P_n$  和  $T_r$  日变化曲线在开花期和灌浆期均出现“双峰”或者“多峰”变化特征,这是作物适应高温天气的自我保护机制<sup>[24]</sup>,能够最大程度保证小麦的灌浆进程,使产量不至于大幅度降低。T5 的旗叶  $P_n$  和  $T_r$  在大部分时间点上的值均小于其他处理,说明隔沟调亏灌溉下抽穗-灌浆期的水分胁迫严重削弱了小麦的光合作用,光合系统可能受到伤害,即使在开花末期复水也难以补偿,最终千粒质量、产量等各项指标均显著低于其他处理( $P < 0.05$ )。

### 3.2 不同生育期水分调控对冬小麦开花后旗叶渗透调节物质的影响

在水分供给不足情况下,提高冬小麦抗性成为保证冬小麦稳产高产的重要途径<sup>[25]</sup>。其中渗透调节作为表征抗性强弱的重要生理机制,受到越来越多的学者关注<sup>[26-27]</sup>。渗透调节物质主要分两大类:以脯氨酸、可溶性糖为主的有机物和以  $K^+$  为主的无机物<sup>[28]</sup>。本研究中,从可溶性糖和脯氨酸含量的变化,可以看出脯氨酸含量能够反映出冬小麦受胁迫程度,可能是植物抵抗干旱逆境的活性物质,与已有研究一致<sup>[26,29]</sup>。而可溶性糖含量的变化趋势似乎更加复杂。惠海滨等<sup>[30]</sup>的研究认为水分供应不足易造成可溶性糖在源叶累积,灌水过多对可溶性糖增加起负作用,这与本研究的结果有所不同。本研究认为,冬小麦旗叶可溶性糖的含量并不能完全反映出作物受胁迫程度,除与土壤含水率有关外,可

能还与冬小麦生育期和灌水方式有关,有待进一步研究。

### 3.3 不同生育期水分调控对冬小麦产量构成的影响

不同生育阶段水分胁迫对冬小麦产量及其构成因素都有很大的影响<sup>[31-32]</sup>。已有研究表明,冬小麦返青期轻度和中度的水分胁迫对产量的影响并不显著<sup>[33]</sup>,但拔节期和抽穗-灌浆期的水分胁迫会降低冬小麦灌浆速率和缩短灌浆时间,从而降低产量<sup>[34-35]</sup>。本研究结果表明,隔沟交替灌溉与常规畦灌相比各项产量指标间并无显著差异,甚至有效穗数略有增加,说明垄作栽培能显著提高冬小麦有效穗数,从而弥补了土地利用率低的缺点。隔沟调亏灌溉下各生育期的水分胁迫均会对最终产量造成影响,影响程度从小到大依次为:返青-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期。返青-拔节期的水分胁迫虽然会降低有效穗数和穗粒数,但复水之后对小麦千粒质量并不会造成影响,而且表现出最高的产量水分利用效率。

## 4 结论

(1) 隔沟交替灌溉和隔沟调亏灌溉虽然一定程度上降低了旗叶光合作用,但较高的叶片水分利用效率能最大程度保证灌浆进程,使产量不至于大幅度降低。

(2) 冬小麦旗叶脯氨酸积累量能够反映出作物受胁迫程度,但旗叶可溶性糖含量的变化趋势似乎更加复杂,除与土壤含水率有关外,可能还与小麦生育期有关,有待进一步研究。

(3) 冬小麦在底墒充足的情况下,隔沟调亏灌溉下返青-拔节期适当的水分胁迫并不会引起大幅减产,而且能显著提高  $WUE$ 。因此,从节水高效的角度考虑,调亏灌溉和隔沟交替灌溉相结合是可行的,隔沟调亏灌溉下返青-拔节期适当的水分胁迫(55% ~ 65% FC)是节水保粮的适宜选择。

## 参 考 文 献

- [1] 牟红梅,何建强,邢建军,等. 小麦灌浆过程籽粒水分变化的核磁共振检测[J]. 农业工程学报,2016,32(8):98-104. MOU Hongmei, HE Jianqiang, XING Jianjun, et al. Water changes in wheat spike during grain filling stage investigated by nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8):98-104. (in Chinese)
- [2] 张黎萍,荆奇,戴廷波,等. 温度和光照强度对不同品质类型小麦旗叶光合特性和衰老的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(2):311-316. ZHANG Liping, JING Qi, DAI Tingbo, et al. Effects of temperature and illumination on flag leaf photosynthetic characteristics and senescence of wheat cultivars with different grain quality[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2):311-316. (in Chinese)
- [3] 董浩,毕军,夏光利,等. 灌溉和种植方式对冬小麦生育后期旗叶光合特性及产量的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(8):2259-2266. DONG Hao, BI Jun, XIA Guangli, et al. Effects of irrigation and planting patterns on photosynthetic characteristics of flag leaf and yield at late growth stages of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8):2259-2266. (in

Chinese)

- [4] 胡程达,刘荣花,王秀萍,等. 干旱对冬小麦光合、渗透调节物质和抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农业气象,2015,36(5):602-611.  
HU Chengda, LIU Ronghua, WANG Xiuping, et al. Effects of drought stress on photosynthetic, osmotic adjustment substance and antioxidase activities of winter wheat level[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2015,36(5):602-611. (in Chinese)
- [5] ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, WANG Zhimin. Photosynthetic diurnal variation characteristics of leaf and non-leaf organs in winter wheat under different irrigation regimes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5):1312-1322.
- [6] 张喜英,由懋正,王新元. 不同时期水分调亏及不同调亏程度对冬小麦产量的影响[J]. 华北农学报,1999,14(2):79-83.  
ZHANG Xiying, YOU Maozheng, WANG Xinyuan. Effects of water deficits on winter wheat yield during its different development stage [J]. Acta Agricultural Boreali-Sinica, 1999,14(2):79-83. (in Chinese)
- [7] DU T, KANG S, SUN J, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(1):66-74.
- [8] LIU Enke, MEI Xurong, YAN Changrong, et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes[J]. Agricultural Water Management, 2016, 167:75-85.
- [9] 孟兆江,段爱旺,高阳,等. 调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(12):203-212.  
MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, GAO Yang. et al. Effect of regulated deficit irrigation on uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium for winter wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):203-212. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161225&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161225&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.025. (in Chinese)
- [10] 孟兆江,段爱旺,王晓森,等. 调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(4):99-104.  
MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, WANG Xiaosen, et al. Effect of regulated deficit irrigation on growth relation of root and shoot in cotton[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):99-104. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160414&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160414&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.014. (in Chinese)
- [11] 孙景生,康绍忠,蔡焕杰,等. 交替隔沟灌溉提高农田水分利用效率的节水机理[J]. 水利学报,2002,33(3):64-68.  
SUN Jingsheng, KANG Shaozhong, CAI Huanjie, et al. Water saving mechanism for promoting water use efficiency by using alternate furrow irrigation techniques[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,33(3):64-68. (in Chinese)
- [12] 李红峥,曹红霞,郭莉杰,等. 沟灌方式和灌水量对温室番茄综合品质与产量的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(21):4179-4191.  
LI Hongzheng, CAO Hongxia, GUO Lijie, et al. Effect of furrow irrigation pattern and irrigation amount on comprehensive quality and yield of greenhouse tomato [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(21):4179-4191. (in Chinese)
- [13] WANG F, WANG X, SAYRE K. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China[J]. Field Crops Research, 2004, 87(1):35-42.
- [14] 马忠明,连彩云,张立勤. 垄作沟灌栽培对土壤水热效应和春小麦产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2012,31(1):120-123.  
MA Zhongming, LIAN Caiyun, ZHANG Liqin. Influences of raised bed planting on soil water, temperature and yield of spring wheat in Hexi oasis area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(1):120-123. (in Chinese)
- [15] 山仑,康绍忠,吴普特. 中国节水农业[M]. 北京:中国农业出版社,2004:229-230.
- [16] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997:39-40.
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:258-260.
- [18] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2010:110-113.
- [19] SHAO H, CHEN X, CHU L, et al. Investigation on the relationship of proline with wheat anti-drought under soil water deficits [J]. Colloids & Surfaces B: Biointerfaces, 2006, 53(1):113-119.
- [20] 田永超,朱艳,曹卫星. 利用叶色特征监测小麦叶片的碳氮状况[J]. 植物生态学报,2005,29(3):457-460.  
TIAN Yongchao, ZHU Yan, CAO Weixing. Monitoring leaf carbon and nitrogen status in wheat with leaf color characteristics [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(3):457-460. (in Chinese)
- [21] 张其德,刘合芹,张建华,等. 限水灌溉对冬小麦旗叶某些光合特性的影响[J]. 作物学报,2000,26(6):869-873.  
ZHANG Qide, LIU Heqin, ZHANG Jianhua, et al. Effects of limited irrigation on some photosynthetic functions of flag leaves in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2000,26(6):869-873. (in Chinese)
- [22] 盛钰,赵成义,贾宏涛. 水分胁迫对冬小麦光合及生物学特性的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(1):193-196.  
SHENG Yu, ZHAO Chengyi, JIA Hongtao. Effect of water stress on photosynthetic and biology character of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1):193-196. (in Chinese)
- [23] 谭念童,林琪,姜雯,等. 限量灌溉对旱地小麦旗叶光合特性日变化和产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(4):805-811.  
TAN Niantong, LIN Qi, JIANG Wen, et al. Effect of limited irrigation on diurnal variation in flag-leaf photosynthesis and yield



- of dryland wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4):805 - 811. (in Chinese)
- [24] 韩凤山,赵明,赵松山. 小麦午睡原因的研究 I. 大田生态因子与午睡的关系[J]. 作物学报,1984,10(2):137 - 143.  
HAN Fengshan,ZHAO Ming,ZHAO Songshan. Study on the causes for photosynthetic decrease of wheat at the middle day( I ) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1984, 10(2):137 - 143. (in Chinese)
- [25] WANG X, VIGNJEVIC M, LIU F, et al. Drought priming at vegetative growth stages improves tolerance to drought and heat stresses occurring during grain filling in spring wheat[J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 75(3):677 - 687.
- [26] SOLAROVA E, HOLKOVA L, BRADACOVA M, et al. Osmotic adjustment and activity of stress-related genes in wheats of different origin exposed to water stress[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2016, 63(4):532 - 541.
- [27] BLUM A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production [J]. *Plant Cell & Environment*, 2017, 40(1):4 - 10.
- [28] 陈成升,谢志霞,刘小京. 等渗盐分、干旱胁迫下冬小麦叶片部分渗透调节物质的动态变化[J]. 植物研究,2009, 29(6):708 - 713.  
CHEN Chengsheng, XIE Zhixia, LIU Xiaojing. Dynamic transformation of the substances of osmotic adjustment in winter wheat under iso-osmotic salt and drought stresses[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2009,29(6):708 - 713 (in Chinese)
- [29] IQBAL M J, MAQSOOD Y, ABDIN Z U, et al. SSR markers associated with proline in drought tolerant wheat germplasm[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2016, 178(5):1042 - 1052.
- [30] 惠海滨,林琪,刘义国,等. 灌水对超高产麦田小麦灌浆期旗叶和籽粒糖含量与产量的影响[J]. 麦类作物学报,2011, 31(5):887 - 893.  
HUI Haibin, LIN Qi, LIU Yiguo, et al. Effect of irrigation on sugar content in flag leaf and grain, and yield of super-high-yield wheat at grain-filling stage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011,31(5):887 - 893. (in Chinese)
- [31] 姚宁,宋利兵,刘健,等. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 中国农业科学,2015, 48(12):2379 - 2389.  
YAO Ning, SONG Libing, LIU Jian, et al. Effects of water stress at different growth stages on the development and yields of winter wheat in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12):2379 - 2389. (in Chinese)
- [32] 黄玲,高阳,邱新强,等. 灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(14): 99 - 108.  
HUANG Ling, GAO Yang, QIU Xinqiang, et al. Effects of irrigation amount and stage on yield and water consumption of different winter wheat cultivars[J]. *Transactions of the CSAE*,2013, 29(14):99 - 108. (in Chinese)
- [33] 孟兆江,贾大林,刘安能,等. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2003,19(4): 66 - 69.  
MENG Zhaojiang, JIA Dalin, LIU Anneng, et al. Effect of regulated deficit irrigation on physiological mechanism and water use efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(4):66 - 69. (in Chinese)
- [34] 王书吉,康绍忠,李涛. 基于节水高产优质目标的冬小麦适宜水分亏缺模式[J]. 农业工程学报,2015,31(12):111 - 118.  
WANG Shuji, KANG Shaozhong, LI Tao. Suitable water deficit mode for winter wheat basing objective of water saving as well as high yield and quality[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12):111 - 118. (in Chinese)
- [35] 褚鹏飞,王东,张永丽,等. 灌水时期和灌水量对小麦耗水特性、籽粒产量及蛋白质组分含量的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(4):1306 - 1315.  
CHU Pengfei, WANG Dong, ZHANG Yongli, et al. Effects of irrigation stage and amount on water consumption characteristics, grain yield and content of protein components of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(4):1306 - 1315. (in Chinese)