

## 旱后复水对冬小麦旗叶生理特性及籽粒产量的影响

崔嘉欣, 宁慧峰, 宋妮, 张莹莹, 刘小飞, 申孝军\*

(中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点开放实验室, 河南 新乡 453002)

**摘要:**【目的】探索冬小麦旗叶生理特性等指标对不同水分调控的响应过程。【方法】通过防雨棚测坑试验,研究了不同水分处理(抽穗扬花期设置充分供水(CK)、轻度和重度水分胁迫,灌浆成熟期恢复正常供水)对冬小麦旗叶脯氨酸质量分数、可溶性糖质量分数、叶绿素质量分数和丙二醛质量分数及籽粒产量等指标的影响。【结果】抽穗扬花期轻度亏水处理(T1)在复水后第1天旗叶的脯氨酸质量分数高于CK、叶绿素质量分数低于CK但两者均未达到显著水平,复水后第11天可溶性糖质量分数低于CK且差异显著,丙二醛质量分数高于CK但差异不显著,与CK相比,籽粒产量降低了4.3%,且差异不显著;抽穗扬花期重度亏水的处理(T2处理)在复水后第16天的旗叶脯氨酸质量分数和可溶性糖质量分数均低于CK水平,且差异不显著,与CK相比,穗粒数和籽粒产量分别降低了10.6%和13.6%,差异显著( $p < 0.05$ ),千粒质量和有效穗数与CK的差异均不显著。【结论】在抽穗扬花期轻度干旱胁迫灌浆期恢复正常供水,可在保证产量不明显降低的前提下有效提高灌溉水利用效率;抽穗扬花期重度干旱胁迫,会对冬小麦叶片主要生理指标产生较大负面影响,进而影响冬小麦籽粒产量的形成。

**关键词:**冬小麦; 干旱胁迫; 复水; 旗叶生理特性; 产量

中图分类号:S274.1

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.20180344

崔嘉欣, 宁慧峰, 宋妮, 等. 旱后复水对冬小麦旗叶生理特性及籽粒产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 8-13, 55.

### 0 引言

华北地区冬小麦生育期内降水量不足,加之降水过程与冬小麦生长需水过程不同步,从而导致冬小麦生育期内会遭遇不同程度的干旱胁迫,受旱后及时灌溉是抵御旱灾保证小麦高产稳产的主要措施之一。由于该地区农业水资源不足,在冬小麦生育期内尤为突出,进而影响了冬小麦优质高产潜力的发挥,水资源不足已成为该区域冬小麦减产的主要原因之一。作物旱后复水可减少前期干旱对作物生长和产量的负面影响。探索冬小麦植株生理特性等指标对不同水分调控的响应过程,研究冬小麦植株生理生化特性及产量构成指标对旱后复水的响应,对挖掘冬小麦节水潜力显得尤为重要。

遭受干旱胁迫的作物,在复水后能快速恢复生长,产生补偿效应、甚至超补偿效应,在一定程度上可以将前期因干旱造成的负面影响降至最低<sup>[1-3]</sup>。以往对冬小麦干旱胁迫复水的研究,多侧重于抗旱性、生长补偿效应、形态变化和产量的增减,以及干旱过程及干旱胁迫对植株形态、生理生化及产量指标的影响机理<sup>[4-6]</sup>。但有关旱后复水对作物生理特性以及后续生长特性影响的系统研究还相对较少<sup>[7-8]</sup>,对冬小麦旱后复水的研究多采取盆栽、桶栽等,由于盆栽环境的限制,多数试验局限于非生育关键期的苗期和拔节期,而对生育后期籽粒产量形成关键期的研究不够充分,并且干旱复水试验均设置在相同生育期,使研究结果存在一定的局限性。因此,迫切需要对复水条件下作物生理指标的补偿机制、补偿效应及其评价等方面进行

收稿日期:2018-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51309227; 51409249); 公益性行业科研专项(201503130); 中央级科研院所基本业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所)资助项目(FIRI2016-02)

作者简介:崔嘉欣(1989-),女,硕士,主要从事灌溉理论与新技术的研究。E-mail: 973078710@qq.com

通信作者:申孝军(1980-),男,副研究员,主要从事灌溉理论与新技术的研究。E-mail: xjshen2016@gmail.com

深入研究<sup>[9-10]</sup>。

冬小麦旗叶生理性状的优劣对冬小麦籽粒的形成及干物质的积累具有重要作用,千粒质量是决定冬小麦籽粒产量的重要因子之一<sup>[11-13]</sup>。本研究以冬小麦为研究对象,通过防雨棚测坑试验,重点研究冬小麦旗叶生理生化及产量构成指标对抽穗扬花期不同程度干旱胁迫、灌浆成熟期恢复正常供水后的响应特征,对于探索水分供应对冬小麦旗叶生理生化指标调控机理,完善作物高效用水生理调控理论,促进冬小麦生产的优质高效可持续发展具有重要的理论与现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2014年10月15日—2015年6月1日在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水试验场地,位于(113.89°E,35.32°N,海拔73.2 m)大型防雨棚下测坑中进行。测坑上口面积为2 m×3.33 m,测坑底部设有反滤层和排水管,坑内土面距坑口10 cm。坑内土层深1.5 m,土壤(均质土壤、各层体积质量相同)质地为粉砂壤土,0~100 cm土层平均干体积密度为1.35 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为24%(土壤质量含水率),土壤有机质质量分数为0.97%。试验区多年平均降雨量为610 mm,平均气温13.5 °C,>0 °C积温5 070 °C,年累积日照时间2 497 h,无霜期220 d。前茬夏玉米收获后整地播种。

### 1.2 试验设计

供试冬小麦品种为“郑麦366”,2014年10月15日播种,2015年6月1日收获。播量为150 kg/hm<sup>2</sup>,种植行距为20 cm,播前基施复合肥(N、P、K质量比为20:15:5)750 kg/hm<sup>2</sup>为底肥,拔节初期追施尿素(纯氮量≥46%)300 kg/hm<sup>2</sup>。冬小麦生育期划分为苗期(播种—越冬)、越冬期、返青期、拔节期、抽穗扬花期和灌浆成熟期6个生育阶段。抽穗扬花期设置充分供水(CK)、轻度亏水(T1)和重度亏水(T2处理)3个灌水水平,轻度亏水和重度亏水处理的灌水下限分别比充分供水处理低10%和20%,进入灌浆期后各处理同时恢复供水,试验设计见表1。全生育期CK返青—拔节期、抽穗扬花期和灌浆成熟期3个生育时期,计划湿润层(返青和拔节期取60 cm,抽穗期取80 cm,灌浆成熟期取100 cm)的灌水控制下限分别为70%、80%和70%田间持水率(FC),当计划湿润层平均土壤含水率接近或略低于设计灌水下限时进行灌水,灌水定额均为75 mm。各处理重复3次,共9个小区,各小区顺序排列。

灌溉用水为自来水,灌溉方式为地面灌溉,灌水量采用水表计量。除水分处理外,其他栽培、田间管理措施等与当地高产农田相同。

表1 试验设计

处理	返青—拔节期	抽穗—扬花期	灌浆—成熟期
全生育期充分供水对照(CK)	70	80	70
抽穗扬花期轻度亏水(T1处理)	70	70	70
抽穗扬花期重度亏水(T2处理)	70	60	70

注 表中数据为测坑计划湿润层平均土壤含水率与田间持水率的比值(%)。

### 1.3 观测项目与方法

#### 1.3.1 土壤含水率

在冬小麦生育期内每隔5~10 d用CPN-503中子土壤水分仪(美国)、取土烘干法分层(0~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm)观测0~100 cm不同层次的土壤含水率,土壤表层(0~20 cm)用取土烘干法观测,20~100 cm土层用中子土壤水分仪结合取土烘干法观测,灌水前后加测。3个测坑监测结果的平均值代表该处理的平均土壤含水率。在冬小麦不同生育时期利用烘干法对中子土壤水分仪进行标定。

#### 1.3.2 旗叶生理生化指标的测定

灌浆期灌水后第1、11、16和21天,随机选择长势一致、具有代表性的小麦植株,取其无病虫害、无损伤的旗叶10片,用于测定旗叶生理生化指标。田间样品采集后放入自封袋密封,置于液氮罐保鲜,并及时送入实验室进行生理生化指标测定。脯氨酸质量分数用酸性茚三酮显色法<sup>[14]</sup>测定,可溶性糖质量分数用蒽酮法<sup>[15]</sup>测定,叶绿素质量分数用丙酮和乙醇浸提法<sup>[16]</sup>测定,丙二醛质量分数用硫代巴比妥酸法<sup>[17]</sup>测定。

### 1.3.3 收获考种及产量测定

小麦收获时各试验测坑随机取30株进行考种,测定有效穗数、穗粒数、千粒质量等指标。收获时各小区单打单收计产,用脱粒机脱粒,经自然风干后称质量,以实收产量测算各处理产量。

水分利用效率计算式为:

$$WUE = Y/ET_c, \quad (1)$$

式中: $WUE$ 为水分利用效率( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $Y$ 为籽粒产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $ET_c$ 为冬小麦全生育期耗水量( $\text{mm}$ )。

耗水量计算式为:

$$ET_c = R + I + \Delta W, \quad (2)$$

式中: $R$ 为降水量( $\text{mm}$ ); $I$ 为灌水量( $\text{mm}$ ); $\Delta W$ 为土壤贮水量的变化量( $\text{mm}$ )。

$\Delta W$ 计算式为:

$$\Delta W = W_i - W_{i+1}, \quad (3)$$

式中: $W_i$ 和  $W_{i+1}$ 分别为时段初和时段末的土壤贮水量( $\text{mm}$ )。

土壤贮水量  $W$  计算式为:

$$W = 10 \cdot \theta \cdot \gamma \cdot H, \quad (4)$$

式中: $W$ 为土壤贮水量( $\text{mm}$ ); $\theta$ 为土壤质量含水率(%); $\gamma$ 为土壤干体积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $H$ 为计划湿润层深度( $\text{cm}$ )。

### 1.3.4 数据分析

利用Excel 2010软件进行数据处理,利用DPS软件进行统计分析和显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 旱后复水对旗叶脯氨酸质量分数的影响

表2给出了复水后不同处理冬小麦旗叶脯氨酸质量分数的变化过程。从表2可以看出,CK和T2处理的脯氨酸质量分数随着复水后生育进程的推进,呈先升高后降低的趋势,T1处理的脯氨酸质量分数呈先降低后升高再降低的趋势。与CK相比,复水后第1天,T1和T2处理的旗叶脯氨酸质量分数分别提高了49.9%和225.2%,但T1处理与CK差异不显著,T2处理与CK差异显著;复水后第11天,T1处理的脯氨酸质量分数降低了36.1%,T2处理的脯氨酸质量分数提高了93.0%,T1处理与CK差异不显著,T2处理与CK差异显著;在复水后第16天,T1处理的脯氨酸质量分数提高了5.0%,T2处理的脯氨酸质量分数降低了19.9%,T1处理和T2处理与CK差异不显著;在复水后第21天T1和T2处理的脯氨酸质量分数分别降低了28.5%和12.0%,而且T1处理和T2处理与CK差异不显著。说明,抽穗扬花期不同程度干旱胁迫(T1处理和T2处理)灌浆期复水后均能使冬小麦旗叶脯氨酸质量分数恢复到CK水平。但重度亏水T2处理恢复至CK水平时间较长,滞后于T1处理恢复至CK水平的时间。

表2 干旱复水后冬小麦脯氨酸、可溶性糖、叶绿素、丙二醛质量分数

指标	处理	复水后时间/d			
		1	11	16	21
脯氨酸质量分数/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	CK	40.30b	80.30b	56.96a	55.30a
	T1	60.43b	51.34b	59.79a	39.52a
	T2	131.1a	155.01a	45.61a	48.65a
可溶性糖质量分数/%	CK	0.51c	1.89a	2.11b	0.23b
	T1	0.73b	1.24b	2.97a	0.32ab
	T2	1.01a	1.53b	1.77b	0.67a
叶绿素质量分数/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	CK	4.54a	4.27a	3.94b	2.04b
	T1	4.40a	4.48a	4.22a	3.32a
	T2	4.11b	4.05b	3.43c	2.79ab
丙二醛质量分数/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	CK	2.81c	3.01b	4.04b	9.94b
	T1	4.03b	3.3b	3.88b	10.67b
	T2	6.03a	4.68a	4.82a	13.23a

注 表中各列不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

## 2.2 旱后复水对旗叶可溶性糖质量分数的影响

由表2可知,各处理旗叶可溶性糖质量分数在复水后均随着生育进程推进呈先升高后降低的趋势,可溶性糖质量分数最高值均出现在复水后第16天,最低值则都在复水后第21天。与CK相比,在复水后第1天,T1和T2处理的可溶性糖质量分数分别提高了44.3%和98.1%,差异显著;在复水后第11天,T1和T2处理的可溶性糖质量分数比分别降低了34.4%和19.2%,差异显著;在复水后第16天,T1处理的可溶性糖质量分数提高了40.9%,T2处理的可溶性糖质量分数降低了16.1%,其中T1处理与CK差异显著,而T2处理与CK差异不显著;在复水后第21天,T1和T2处理的可溶性糖质量分数分别提高了41.9%和192.1%,其中T2处理与CK差异达显著水平,而T1处理与CK的差异不显著。说明抽穗扬花期不同程度干旱胁迫,灌浆期复水后冬小麦旗叶可溶性糖质量分数均有不同程度升高,亏水补偿效应明显。

## 2.3 旱后复水对旗叶叶绿素质量分数的影响

由表2可知,CK和T2处理的叶绿素质量分数随着冬小麦生育进程的推进呈下降趋势。T1处理的叶绿素质量分数先小幅上升后逐渐降低。与CK相比,复水后第1天,T1和T2处理的叶绿素质量分数分别降低了3.1%和9.5%,但T1处理与CK差异不显著,T2处理与CK之间的差异达到了显著水平;在复水后第11天,T1处理的叶绿素质量分数提高了5.0%,T2处理的叶绿素质量分数降低了5.2%,其中T2处理与CK之间的差异达到了显著水平,而T1处理与CK之间差异不显著;在复水后第16天,T1处理的叶绿素质量分数提高了7.1%,T2处理的叶绿素质量分数降低了12.9%,各处理之间的差异均达到了显著水平;在复水后第21天,T1和T2处理的叶绿素质量分数分别提高62.6%和37%,其中T1处理与CK差异显著,T2处理与CK差异不显著。抽穗扬花期水分胁迫程度的不同,导致灌浆期复水后冬小麦旗叶叶绿素质量分数的不同,其中,抽穗扬花期轻度亏水处理(T1)的叶绿素质量分数在复水后迅速恢复至CK水平,从复水后第11天开始一直高于CK;抽穗扬花期重度亏水处理(T2处理)在灌浆期复水后叶片叶绿素质量分数未能迅速恢复至CK水平,直到第21天时叶绿素质量分数才高于CK,且差异不显著。

## 2.4 旱后复水对旗叶丙二醛质量分数的影响

由表2可以看出,CK的丙二醛质量分数随生育进程的推进呈升高趋势,T1和T2处理的丙二醛质量分数呈先降低再升高的趋势。与CK相比,复水后第1天,T1和T2处理的丙二醛质量分数分别提高了43.7%和115.1%,差异显著;复水后第11天,T1和T2处理的丙二醛质量分数分别升高了9.6%和55.5%,但T1处理与CK差异不显著;在复水后第16天,T1处理的丙二醛质量分数降低了3.9%,T2处理的丙二醛质量分数升高了19.3%,且T1处理与CK之间的差异不显著,但T2处理与CK之间的差异显著;在复水后第21天,T1和T2处理的丙二醛质量分数分别升高了7.3%和33.0%,但T1处理与CK之间差异不显著,T2处理与CK之间的差异显著。在第1天至第16天,T1、T2处理丙二醛与CK的差距明显减小;轻度亏水处理(T1)的丙二醛质量分数能较快恢复至CK水平,重度亏水处理(T2处理)的丙二醛质量分数除第16天外,其余的未能恢复至CK水平。复水后亏水处理丙二醛质量分数差异幅度的减小,能使前期受旱的小麦叶片维持必要的生理活性,减缓叶片的衰老进程。

## 2.5 旱后复水对冬小麦产量构成、籽粒产量及水分利用效率的影响

从表3可以看出,与CK相比,T1和T2处理的有效穗数分别降低了3.3%和6.6%,差异不显著;T1与T2处理的穗粒数分别降低了7.7%和10.6%,差异显著;T1处理的千粒质量提高了1.4%,T2处理的千粒质量降低了1.9%,与CK之间的差异均不显著;T1和T2处理的籽粒产量分别降低了4.3%和13.6%,但T1处理与CK之间的差异不显著,T2处理与CK之间的差异显著。可见,抽穗扬花期轻度水分胁迫,灌浆期复水能够修复前期水分胁迫对作物造成的损害,在维持作物正常生长和籽粒产量形成的前提下,促进灌溉水的高效利用。T2处理的产量构成指标均低于CK,说明抽穗扬花期重度亏水,会对冬小麦生产产生较大的负面影响,即使灌浆期恢复正常供水,也不能弥补前期重度水分胁迫对冬小麦产量形成造成的负面影响。

表3 冬小麦产量构成因素

处理	有效穗数/(10 <sup>4</sup> 头·hm <sup>2</sup> )	穗粒数/粒	千粒质量/g	籽粒产量/(kg·hm <sup>2</sup> )	耗水量/mm	水分利用效率/(kg·m <sup>-3</sup> )
CK	610a	36.88a	37.93a	7 917.5a	508.72	1.56
T1	590a	34.05b	38.46a	7 575.8a	433.98	1.75
T2	570a	32.98b	37.23 a	6 839.0b	468.74	1.46

由表3可知,各处理的水分利用效率T1处理>CK>T2处理,与CK相比,T1处理的水分利用效率提高了12.2%,T2处理的水分利用效率降低了6.3%。表明抽穗扬花期轻度水分胁迫复水后能提高冬小麦的水分利用效率,重度水分胁迫即使复水后水分利用效率仍降低。

### 3 讨论

农田土壤水分与作物的生长发育、生理生化特性及产量形成密切相关。作物受到干旱胁迫时,为了适应逆境生长,植株通过调节叶片气孔开度的大小,减小水分散失速度,进而降低植株蒸腾速度,导致叶片细胞的渗透物质质量分数和膜脂过氧化产物(MDA)质量分数升高,叶绿素质量分数降低<sup>[18-22]</sup>;恢复供水后,叶片的一些生理生化指标会得到不同程度恢复,表现出作物亏水补偿或超补偿效应<sup>[23-28]</sup>。作物的补偿效应不仅体现在生长方面,还体现在生理生化方面<sup>[29-32]</sup>。

与CK相比,不同程度的亏水处理复水后,脯氨酸质量分数均能恢复到CK水平,甚至表现出超补偿效应,但重度亏水处理(T2处理)恢复历时明显长于轻度亏水处理(T1)。复水后各处理的可溶性糖质量分数均有不同程度的下降,T1处理恢复至CK水平,但T2处理未恢复至CK水平,而且历时较长,与时振振等<sup>[33]</sup>的研究结果相近,但在恢复程度和补偿效应程度上存在不同。除了试验条件、试验品种的不同等因素外,还与亏水时期、亏水程度有关。由于本试验亏水程度分别为70%FC和60%FC,时振振等<sup>[33]</sup>研究亏水程度分别为55%FC、45%FC,与其相比本试验亏水程度较轻;亏水时期本试验为抽穗扬花期,时振振等<sup>[33]</sup>研究为孕穗至开花,本试验亏水时间比时振振等<sup>[33]</sup>研究的亏水时间短,这可能是研究结果不尽相同的原因。就旗叶叶绿素质量分数而言,轻度亏水处理(T1)复水后上升较快,迅速恢复至CK水平,在复水后11天已超过CK水平,表现出亏水超补偿效应,T2处理的旗叶叶绿素质量分数在复水后虽然有所提高,但在恢复供水后21天内一直低于CK。就旗叶丙二醛质量分数而言,T1处理恢复供水后,很快下降至几乎与CK相当的水平,T2处理虽有所下降,但始终未能恢复至CK水平。复水后可溶性糖质量分数、丙二醛质量分数的恢复时间滞后于脯氨酸质量分数、叶绿素质量分数,重度亏水处理的恢复时间滞后于轻度亏水处理。

在产量构成方面,抽穗扬花期水分胁迫严重影响小麦扬花授粉,造成结实能力降低,穗粒数减少;而灌浆期复水能提高千粒质量,弥补穗粒数减少造成的产量损失。这与前人的研究结果<sup>[34-36]</sup>基本相似。与CK相比,T1处理的穗粒数低于CK,达到了显著水平( $p<0.05$ ),其他各项产量构成指标CK基本相当,且呈无显著差异;说明抽穗扬花期轻度亏水,灌浆期复水后对冬小麦籽粒产量形成不会造成明显的负面影响。T2处理的穗粒数、产量均低于CK,处理间的差异均达到了显著水平( $p<0.05$ )。表明作物旱后复水虽具有亏水补偿效应,但重度亏水后复水无法弥补穗粒数的减少和产量的下降。因此,在抽穗扬花期轻度干旱胁迫、灌浆成熟期恢复正常供水,不会对冬小麦主要生理指标和产量产生不可逆转的负面影响,而且在保证产量不明显降低的前提下有利于灌溉水资源的高效利用。但抽穗扬花期重度干旱胁迫,对冬小麦主要生理指标影响较大,进而严重影响冬小麦生长发育,即使灌浆期成熟期恢复正常供水也不能消除前期干旱对其生理指标的影响,同时会对产量构成不可弥补的负面影响。

### 4 结论

1)抽穗期扬花期轻度亏水灌浆期恢复供水处理,复水后冬小麦旗叶叶片的生理生化指标能够快速恢复至CK水平,籽粒产量与CK无显著差异,丙二醛表现出补偿效应,脯氨酸、可溶性糖和叶绿素均表现出补偿效应,抽穗期扬花期轻度亏水灌浆期恢复供水处理,对冬小麦水分利用效率有一定程度的提高。

2)抽穗期扬花期重度亏水灌浆期恢复供水处理,复水后冬小麦旗叶叶片的生理生化指标不能迅速恢复至CK水平,产量构成指标低于CK,穗粒数、产量和CK之间均达到了显著水平( $p<0.05$ ),虽有一定程度的亏水补偿效应,但穗粒数和产量仍显著低于CK水平,抽穗期扬花期重度亏水灌浆期恢复供水处理,会降低冬小麦的水分利用效率。

## 参考文献:

- [1] 陈晓远,罗远培.不同生育期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究[J].中国生态农业学报,2002,10(1):35-37.
- [2] 卜令铎,张仁和,韩苗苗,等.干旱复水激发玉米叶片补偿效应的生理机制[J].西北农业学报,2009,18(2):88-92.
- [3] 郝树荣,郭相平,张展羽.作物干旱胁迫及复水的补偿效应研究进展[J].水利水电科技进展,2009,29(1):81-84.
- [4] 闫永鑫,郝卫平,梅旭荣,等.拔节期水分胁迫-复水对冬小麦干物质积累和水分利用效率的影响[J].中国农业气象,2011,32(2):190-195,202.
- [5] 赵长星,程曦,王月福,等.不同生育时期干旱胁迫对花生生长发育和复水后补偿效应的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(6):627-632.
- [6] 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.
- [7] 刘桂茹,张荣芝,卢建祥,等.冬小麦抗旱性鉴定指标的研究[J].华北农学报,1996,11(4):84-88.
- [8] SYLVESTER-BRADLEY R, DAVIES DB, DYER C, et al. The value of nitrogen applied to wheat during early development[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,1997,47(2):173-180.
- [9] 刘展鹏,褚琳琳.作物干旱胁迫补偿效应研究进展[J].排灌机械工程学报,2016,34(9):804-808.
- [10] 周磊,甘毅,欧晓彬,等.作物缺水补偿节水的分子生理机制研究进展[J].中国生态农业学报,2011,19(1):217-225.
- [11] MONTAGU K D, WOO K C. Recovery of tree photosynthetic capacity from seasonal drought in the wet-dry tropics: the role of phyllode and canopy processes in *Acacia auriculiformis*[J]. Australian Journal of Plant Physiology,1999,26(2):135-145.
- [12] LIU X Y, LUO Y P. Present situation of study on after-effect of water stress on crop growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4):6-10.
- [13] 刘洪展,郑凤荣,赵世杰.不同衰老类型小麦品种在衰老过程中光合特性的变化[J].华北农学报,2006,21(3):13-15.
- [14] 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.
- [15] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [16] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [17] 赵世杰,史国安.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业科学技术出版社,2002.
- [18] 郭相平,郭枫,刘展鹏,等.水分胁迫及复水对玉米光合速率及可溶性糖的影响[J].玉米科学,2008,16(6):68-70.
- [19] 郭相平,张烈君,王琴,等.作物水分胁迫补偿效应研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(6):632-637.
- [20] 郭相平,张烈君,王琴,等.拔节孕穗期水分胁迫对水稻生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):125-129.
- [21] 王伟,蔡焕杰,王健,等.水分亏缺对冬小麦株高、叶绿素相对含量及产量的影响[J].灌溉排水学报,2009,28(1):41-44.
- [22] 刘义国,位国峰,商健,等.不同滴灌量对冬小麦旗叶衰老及产量的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(10):96-101.
- [23] 孙骏威,杨勇,蒋德安.水分亏缺下水稻的光化学和抗氧化应答[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2004,30(3):278-284.
- [24] 卢少云,郭振飞,彭新湘,等.水稻幼苗叶绿体保护系统对干旱的反应[J].热带亚热带植物学报,1999,7(1):47-52.
- [25] 王贺正,马均,李旭毅,等.水稻开花期抗旱性鉴定指标的筛选[J].作物学报,2005,31(11):1485-1489.
- [26] 李长明,刘保国,任昌福,等.水稻抗旱机理研究[J].西南农业大学学报,1993,15(5):410-413.
- [27] 马廷臣.全基因组表达分析不同耐旱性水稻根系对不同强度干旱胁迫反应研究[D].武汉:华中农业大学,2009.
- [28] 刘素军,孟丽丽,蒙美莲,等.马铃薯块茎形成期水分胁迫及胁迫后复水的生理响应研究[J].灌溉排水学报,2015,34(10):45-51.
- [29] 孙百良,杨晓杰,王瑶,等.复水对玉米干旱胁迫的缓解效应[J].基因组学与应用生物学,2015,34(12):2733-2737.
- [30] 刘丽平,欧阳竹,武兰芳,等.阶段性干旱及复水对小麦光合特性和产量的影响[J].生态学杂志,2012,31(11):2797-2803.
- [31] 甄博,郭相平,陆红飞,等.分蘖期旱涝交替胁迫对水稻生理指标的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(5):36-40.
- [32] 严平,梅雪英,操礼春,等.节水栽培对小麦产量构成及品质的影响[J].江苏农业科学,2004(6):32-35.
- [33] 时振振,李胜,马绍英,等.不同品种小麦抗氧化系统对水分胁迫的响应[J].草业学报,2015,24(7):68-78.
- [34] 杨林林,高阳,申孝军,等.播前和不同生育阶段灌溉对冬小麦农艺性状及产量的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(9):1-6.
- [35] 宣丽红,王丽,张孟妮,等.不同灌溉方式对冬小麦生长发育及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(10):15-19.
- [36] 曹成,汤广民.冬小麦受旱减产规律及产量与水关系模型研究[J].灌溉排水学报,2017,36(8):13-17.

(下转第55页)

and the efficiency of nitrogen fertilizer. **【Result】**Increasing nitrogen application increased the accumulations of dry matter and nitrogen significantly, but a shortage of soil water could reduce dry matter accumulation. Increasing the amount of irrigation water enhanced nitrogen harvest index. The yield, dry matter accumulation, nitrogen accumulation amount, nitrogen fertilizer utilization rate, nitrogen harvest index, the efficiency of nitrogen fertilizer, water use efficiency under the treatment of W400+N250 were higher than those under other treatments by 0.71%~45.28%, 1.07%~48.87%, 9.54%~70.61%, 2.63%~37.65%, 3.19%~10.38%, 0.84%~32.80%, 1.27%~43.24%, respectively. **【Conclusion】** Under drip irrigation coupled with film mulching, the optimal amount of irrigation for maize in western Heilongjiang was 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> and the nitrogen application was 250 kg/hm<sup>2</sup>.  
**Key words:** drip irrigation under film mulching; coupling of water and fertilizer; nitrogen utilization; yield; maize

责任编辑:白芳芳

---

(上接第13页)

## Physiological Development and Yield of Winter Wheat After Rehydration Following Water Stress at Heading and Flowing Stage

CUI Jiabin, NING Huifeng, SONG Ni, ZHANG Yingying, LIU Xiaofei, SHEN Xiaojun\*

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

**Abstract:****【Objective】** Letting a plant suffer water stress at certain stages does not necessarily lead to a fatal damage to yield and, in contrast, is a way to improve water use efficiency. The purpose of this paper is to present the results of an experimental study on the response of physiological traits and yield of winter wheat to rehydration after it suffered different degree of water deficiency at heading and flowering stage. **【Method】** The experiments were conducted in lysimeters with rain-shelf and the water stress was introduced during the heading and flowing stage via moderate (T1) or severe (T2) deficit irrigation, followed by a sufficient irrigation at the grain-filling stage. The control (CK) was sufficient irrigation during the heading and flowing stage with other treatments kept the same. In each treatment, we measured the physiological traits including proline mass fraction, soluble sugar mass fraction, chlorophyll mass fraction and MDA mass fraction in the flag leaf. **【Result】** Compared to CK, T1 increased the proline mass fraction but reduced the chlorophyll mass fraction first day after rehydration, although neither was significant. Eleven days after the rehydration, the soluble sugar mass fraction under T1 was significantly lower than that under CK, as opposed to MDA mass fraction that was insignificantly higher under water deficit irrigation than under CK. Compared to CK, water deficiency reduced the grain yield insignificantly by 4.3%. Under T2, both proline mass fraction and soluble sugar mass fraction 16 days after the rehydration were insignificantly lower than that under CK. Compared with CK, T2 reduced the grains per spike and the grain yield by 10.6% and 13.6%, respectively. Statistical analysis showed that the difference in grain number and yield per spike was significant ( $p < 0.05$ ) while the difference in the 1000-grain weight was not significant between CK and the treatments. **【Conclusion】** A moderate water stress at the heading and flowering stage coupled with a sufficient water supply in the grain filling period can effectively improve water efficiency without scarifying yield, while a severe water stress at the heading and flowering stage could cause a permanent damage to the plant thereby yield loss even followed by sufficient irrigation.

**Key words:** winter wheat; drought stress; rehydration; physiological characteristics of flag leaves; grain yield

责任编辑:白芳芳