

灌浆期干旱及复水对冬小麦旗叶蔗糖积累 和产量构成的影响

张翠翠^{1,2}, 邓西平^{1,2}, 陈 炜^{2,3}

(1 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业
国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

[摘 要] **【目的】**研究不同水分胁迫处理对不同小麦品种旗叶蔗糖积累及关键酶活性与产量构成的影响。**【方法】**在盆栽条件下, 选用旱地品种长武 134、长旱 58 及水地品种西农 9871 3 个小麦品种为供试材料, 于开花前、后分别给予轻度(LS)、中度(MS)水分胁迫处理, 研究其对小麦旗叶净光合速率、蔗糖含量、磷酸蔗糖合成酶(SPS)活性及产量构成因素的影响。**【结果】**花前轻度和中度胁迫后, 灌浆期复水能在一定时间内使旱地品种长武 134 和长旱 58 的旗叶净光合速率、SPS 活性均有不同程度的提高, 胁迫程度越重, 补偿效应越明显。花前轻度胁迫后灌浆期复水可使 3 个供试小麦品种的收获指数显著提高, 长旱 58、长武 134 和西农 9871 的收获指数分别较对照提高 14.1%、15.3% 和 17.1%, 且使 2 个旱地小麦品种的千粒质量较对照有所提高; 中度胁迫下 3 个小麦品种的穗粒数均显著降低。灌浆期水分胁迫处理可有效地诱导旗叶 SPS 活性上升, 提高蔗糖含量, 随着水分胁迫程度的加剧, 灌浆后期的净光合速率、SPS 活性显著降低, 且水地品种的下降幅度大于旱地品种; 与对照相比, 灌浆期中度胁迫使 3 个小麦品种的千粒质量均显著下降。**【结论】**灌浆期给予一定程度的水分胁迫及早后复水, 均有利于不同冬小麦品种蔗糖含量、SPS 活性及产量的提高, 且水分胁迫加剧时, 旱地品种受水分胁迫的影响较水地品种小。

[关键词] 小麦; 干旱与复水; 蔗糖积累; 产量构成; 小麦灌浆期

[中图分类号] S512.1⁺10.71

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2011)06-0068-07

Effect of sucrose accumulation and yield components on winter wheat flag leaf under drought or re-water during filing stage

ZHANG Cui-cui^{1,2}, DENG Xi-ping^{1,2}, CHEN Wei^{2,3}

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 State Key Laboratory of
Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: **【Objective】**Effect of sucrose accumulation and yield components on wheat flag leaf of different drought tolerant cultivars under drought or re-water during filing stage was studied. **【Method】**Changhan 58, Changwu 134 and Xinong 9871 were selected as experimental materials and sucrose accumulation, and sucrose phosphate syntheses (SPS) activity and yield components were studied under different water stress conditions. **【Result】**Net photosynthetic rate, sucrose content and SPS activity of flag leaf of drought-tolerant variety were enhanced at different levels during re-water stage after light stress or moderate stress treatment. The stress was more severe, and the compensate effects were better. But the effects on drought-sensitive cultivar weren't apparent during re-water period after moderate stress. Harvest Indexes were largely enhanced after re-watering under light stress, the harvest index of Changhan 58, Changwu 134 and

* [收稿日期] 2010-12-24

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118604); 国际科技合作计划项目(2010DFA91930)

[作者简介] 张翠翠(1984—), 女, 内蒙古乌市人, 在读硕士, 主要从事植物水分生理生态研究。E-mail: zccmei125@163.com

[通信作者] 邓西平(1959—), 男, 陕西西安人, 研究员, 博士生导师, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: dengxiping@ms.iswc.ac

Xinong 9871 exceeded the CK by 14.1%,15.3%,17.1%,respectively. Sucrose phosphate syntheses (SPS) activity and the supply of sucrose capability were enhanced largely during earlier grain filling stage, but reduced at great degree in late grain filling stage. The number of spike was mainly affected under stress accruing before flowering period and 1000-grain weight decreased largely under moderate stress treatment during grain filling stage. 【Conclusion】 Sucrose accumulation, SPS activity and yield components of different wheat cultivars were enhanced by varying degree under light stress of water before anthesis or later, and the effect of water stress on drought-sensitive cultivar was lower than that of the drought-tolerant ones.

Key words: wheat; drought and re-water; sucrose accumulation; yield components; grain stage

作物高产不仅需要功能叶有较强的光合能力,而且要求叶片中的光合产物能够有效地运输与分配^[1]。小麦叶片的光合产物主要以蔗糖的形式存在并对外输出,一般认为,控制叶片中蔗糖合成的酶是磷酸蔗糖合成酶(SPS)。我国北方小麦在整个生育期内常会遇到不同程度的干旱,导致小麦体内生理代谢紊乱、植株早衰,对产量产生不利影响。作物在一定程度的水分亏缺下复水存在补偿与超补偿效应,山仑等^[2]研究表明,在作物的一定生育阶段给予一定程度的水分亏缺,能使禾谷类作物在节约大量用水的同时获得较高产量,提高水分利用效率。王磊等^[3]对不同倍性小麦材料的研究表明,经干旱胁迫复水后,普通小麦的净光合速率恢复最快,并表现出较强的旱后超补偿效应。郝树荣^[4]研究发现,在非胁迫水稻株高停止生长时,复水处理穗节仍在继续伸长,穗长的明显提高使产量的补偿成为可能。蔗糖代谢与水分胁迫处理时间的长短和胁迫程度有关,适度的水分亏缺能够诱导 SPS 活性提高,进而增加蔗糖的积累^[5-9]。但目前关于灌浆期水分胁迫与复水对不同抗旱型小麦品种的旗叶 SPS 活性影响的研究报道较少。为此,本试验采用盆栽控水方式,以旱地小麦品种长武 134、长旱 58 及水地品种西农 9871 为试材,探讨不同水分胁迫条件对 3 个小麦品种旗叶蔗糖积累及其关键酶活性变化和产量构成因素的影响,以期对小麦抗旱生理机制研究及非充分灌溉的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与处理

盆栽试验选用旱地品种长武 134、长旱 58 和水地品种西农 9871 3 个小麦品种,盆土采用当地耕层 0~20 cm 土壤。土壤类型为关中壤土,风干土壤含水量为 2.01%,土壤田间持水量为 28%。盆栽使用直径 29 cm,深度 27 cm 的塑料桶。每盆装干土 12 kg,按照每 kg 干土施 P_2O_5 0.2 g、N 素 0.25 g 的

标准,每盆施尿素 6.0 g、磷酸二氢钾 4.0 g,装盆前将土与肥料充分混匀。小麦种子用体积分数为 5% $CuSO_4$ 消毒,28 °C 催芽,于 2009-10-26 日播种,每桶 12 穴,每穴 2 粒,三叶一心期定苗,每盆 12 株。

1.2 试验设计

试验在防雨棚下进行。从播种到拔节期前,所有盆栽小麦均充分供水,自拔节期开始控水,于开花期开始变水处理,至灌浆期土壤含水量达到处理所需要求为止,每个品种设 5 个处理: T_1 (对照),整个生育期充分供水,土壤含水量保持为田间持水量的 70%~75%; T_2 ,开花前轻度水分胁迫(土壤含水量为田间持水量的 60%~65%),于灌浆期复水; T_3 ,开花前中度水分胁迫(土壤含水量为田间持水量的 50%~55%),灌浆期复水; T_4 ,开花前正常供水,灌浆期轻度水分胁迫; T_5 ,开花前正常供水,灌浆期中度水分胁迫。每个处理 9 次重复。水分处理期间,每天通过称质量按控水标准补充灌水。为了减少小麦无效分蘖对试验的影响,在拔节前剪去分蘖,只留主茎。

1.3 挂牌与取样

于小麦开花期挂牌标记同一天开花的麦穗,分别于开花后 0,6,12,18,24 和 30 d 取生长状况一致的旗叶,其中一部分经液氮速冻 30 min 后,放入 -80 °C 超低温冰柜中保存,用于酶活性测定;另一部分放入鼓风干燥箱中 105 °C 杀青 30 min 后,于 80 °C 烘干至恒质量用于蔗糖含量测定。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 旗叶净光合速率 选择同一天开花、旗叶大小均匀的植株,分别于小麦花后 0,6,12,18 和 24 d,采用美国 LI-COR 公司的 Li-6400 便携式光合仪,于上午 09:00—11:00 测定旗叶净光合速率(P_n),每个处理重复 5 次。

1.4.2 蔗糖含量 称取旗叶干样 0.2 g 于 12 mL 离心管中,加入 5 mL 体积分数 80% 乙醇溶液,搅拌均匀,80 °C 水浴提取 30 min,1 500×g 离心 10 min,

将上清液转入 25 mL 容量瓶中,残渣重复提取 2 次,合并上清液,并定容至刻度,即为蔗糖提取液。

蔗糖含量参照张志良等^[10]的间苯二酚法测定。吸取 0.2 mL 上述蔗糖提取液,加入 200 μ L 2 mol/L NaOH 混匀,沸水浴 10 min,分解除去果糖、葡萄糖等还原糖。加入 2 mL 体积分数 30% HCl 混匀,80 $^{\circ}$ C 保温 10 min,加入 1 mL 体积分数 1% 间苯二酚,混匀后 80 $^{\circ}$ C 再次保温 10 min,冷却后在 480 nm 波长下比色测定吸光度值,根据标准曲线计算蔗糖含量。

1.4.3 SPS 酶液活性 (1)酶液的制备。酶液的制备参考王文静^[11]的方法,并略有改进。称取鲜叶 0.5 g 左右,放入预先冷藏的研钵中,加入 3 mL Hepes-NaOH(pH 7.5)提取缓冲液(含 50 mmol/L Hepes-NaOH,5 mmol/L EDTA,1 mmol/L DTT,2 mmol/L KCl,质量分数 1% PVP-40),冰浴研磨至匀浆,每次加 1 mL,润洗 3 次,最后定容至 8 mL,4 $^{\circ}$ C 下 12 000 $\times g$ 离心 20 min,取上清液即为酶液。

(2)酶活性的测定。参照於新建^[12]和 Wardlaw 等^[13]的方法进行酶活性的测定。取 50 μ L 上述酶液,加入 50 μ L Hepes-NaOH(pH 7.5)缓冲液、20 μ L 50 mmol/L $MgCl_2$ 、20 μ L 100 mmol/L UDPG 和 20 μ L 100 mmol/L 6-磷酸果糖,30 $^{\circ}$ C 水浴 30 min 后,加 200 μ L 2 mol/L NaOH 沸水浴 10 min 终止反应,加 1.5 mL 体积分数 30% HCl 和 0.5 mL 质量分数 1% 间苯二酚,摇匀并于 80 $^{\circ}$ C 水浴 10 min,冷却后于 480 nm 处比色测定吸光度值,根据蔗糖标准曲线计算蔗糖含量。用单位鲜质量植物材料每小时催化生成的蔗糖质量(mg)表示 SPS 活性(mg/(g $\cdot$ h))。

1.4.4 产量及构成因素 (1)籽粒产量。称取单盆(12 株)小麦籽粒干质量;(2)地上生物量。称取单

盆(12 株)植株地上部分的干质量;(3)穗粒数、小穗数。统计单株小麦结实籽粒个数;(4)千粒质量。随机称取同品种小麦百颗籽粒干质量,换算千粒质量;(5)收获指数=籽粒产量/地上生物量。

1.5 数据统计与分析

使用 SPSS13.0 软件对数据进行方差分析,采用 Duncan's 新复极差检测法进行多重比较,运用 Origin 8.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水分处理对小麦旗叶净光合速率和蔗糖积累的影响

2.1.1 净光合速率 小麦旗叶光合作用的强弱反映了小麦蔗糖供应能力的大小。由图 1 可以看出,不同水分处理下不同小麦品种对水分亏缺的响应存在差异。旱地品种长旱 58 和长武 134 的净光合速率呈先升后降趋势,峰值均出现在花后 6 d;水地品种西农 9871 的净光合速率一直呈降低趋势,这些差异的存在主要与品种的自身特性有关。与对照(T_1 处理)相比,3 个小麦品种 T_2 、 T_4 处理的净光合速率均在花后 12 d 超出对照,其中长武 134 T_4 处理超出最多,为 7.5%,达到了极显著水平($P<0.01$)。总体来看,品种间净光合速率的差异不显著($P>0.05$),说明灌浆期复水一定时间后,供试小麦的光合作用能够恢复到对照水平,甚至出现了超补偿效应,且旱地小麦的补偿效应更为明显。 T_3 处理在整个灌浆过程中的净光合速率均接近对照,且品种间的差异不显著。对 T_5 处理而言,自花后 12 d,随着灌浆进程的推进,净光合速率的降幅增大,且 2 个抗旱型小麦品种的下降幅度要小于水地品种,表明水地品种也能够承受一定程度的水分胁迫,但胁迫程度加重时,旱地品种仍能维持较高的净光合速率。

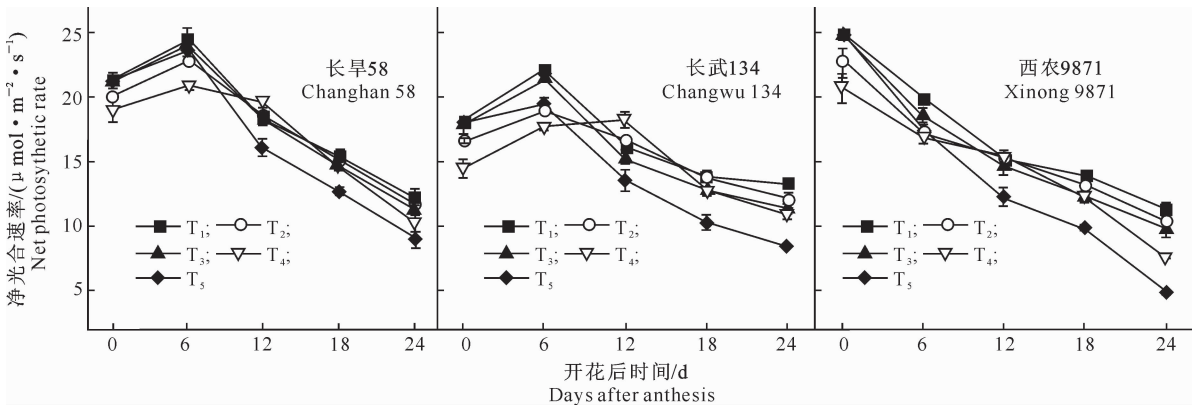


图 1 不同水分处理下小麦花后旗叶净光合速率的变化

Fig. 1 Changes of photosynthetic rate in flag leaves after anthesis under different water stress treatments

2.1.2 蔗糖含量 蔗糖是小麦叶片内光合产物的主要存在和运输形式。由图 2 可以看出,3 个小麦品种旗叶的蔗糖含量均呈单峰曲线变化,且峰值均出现在花后 6 d,但不同小麦品种对不同水分条件的响应有所不同。与对照 T_1 处理相比,2 个抗旱品种 T_2 、 T_4 处理花后 6 d 的蔗糖含量均极显著高于对照 ($P<0.01$),且随着花前胁迫程度的加大,旗叶蔗糖含量逐渐增加,表明在一定程度的水分胁迫后,复水补偿效应与胁迫程度呈正比变化;花后 0~12 d(0 d 除外)时, T_3 、 T_5 处理的蔗糖含量均显著高于对照 ($P<0.05$),但花后 18 d 后, T_5 处理又极显著低于对照 ($P<0.01$),表明灌浆期水分胁迫在一定程度

上提高了灌浆前期旗叶的蔗糖含量,但随着胁迫程度的加重,其又显著降低了灌浆中后期的蔗糖含量,这可能是由于花后胁迫处理加快了旗叶的衰老速度,进而极大地降低了旗叶的叶绿素含量,从而使光合速率大幅度下降。与对照 T_1 相比,水地品种 T_2 、 T_3 处理花后 6 d 旗叶的蔗糖积累均不同程度地高于对照,18 d 时, T_3 处理显著低于对照 ($P<0.05$),而 T_4 、 T_5 处理旗叶的蔗糖含量在整个灌浆过程中几乎均低于对照,表明无论在花前还是花后,水地品种均能承受一定程度的干旱胁迫,但随着胁迫程度的加重,其补偿效应及恢复能力逐渐降低。

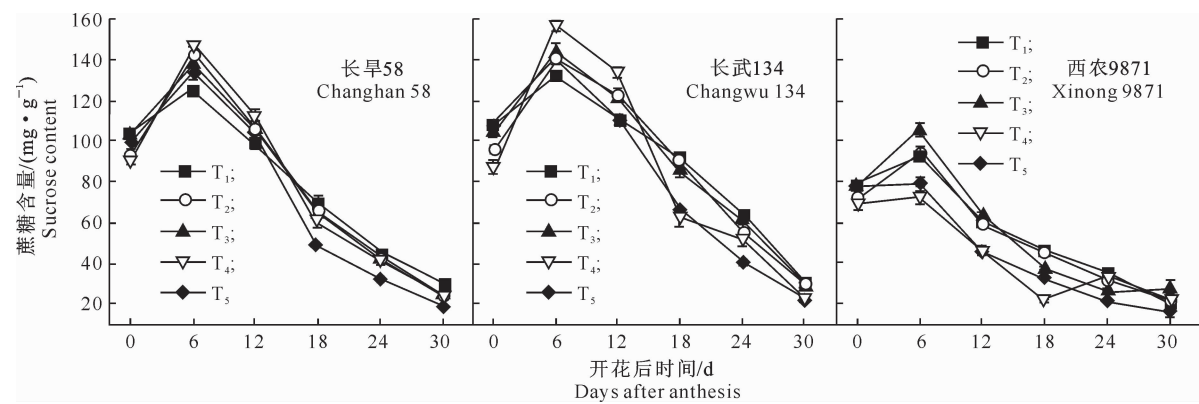


图 2 不同水分处理下小麦花后旗叶蔗糖含量的变化

Fig. 2 Changes of sucrose content in flag leaves after anthesis under different water stress treatments

2.1.3 磷酸蔗糖合成酶 (SPS) 活性 SPS 在小麦叶片光合产物向蔗糖的转化过程中起着关键性的调节作用,其活性的高低反映了源供应能力的大小。

不同水分处理对长旱 58、长武 134 和西农 9871 小麦叶片 SPS 活性的影响如图 3 所示。

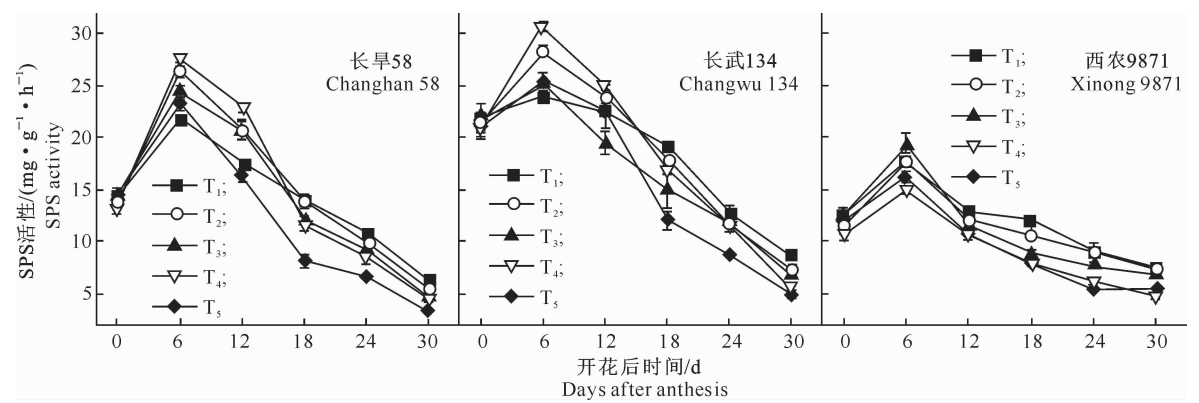


图 3 不同水分处理下小麦花后旗叶 SPS 活性的变化

Fig. 3 Changes of SPS activity in flag leaves after anthesis under different water stress treatments

由图 3 可知,花后旗叶 SPS 活性的变化规律与蔗糖含量的变化规律相似。3 个品种的 SPS 活性也均呈单峰曲线变化,峰值均出现在花后 6 d。与对照 T_1 相比,2 个旱地品种 T_2 和 T_4 处理旗叶的 SPS 活

性在花后 6 d 均显著高于对照 ($P<0.05$),其中 $T_2<T_4$ 处理,且这 2 个处理旗叶 SPS 活性在灌浆期中后期仍保持在较高水平,表明灌浆期复水能够显著提高旗叶的 SPS 活性,且花前胁迫程度越强,

其后期补偿效应越大,这也与蔗糖含量的变化规律相一致,且复水处理明显延缓了旗叶 SPS 活性的下降。与对照相比,T₃、T₅ 处理显著提高了花后 0~6 d 旱地小麦品种旗叶的 SPS 活性($P<0.05$),但随着水分胁迫时间的进一步延长,T₅ 处理旗叶的 SPS 活性又显著低于对照处理,表明灌浆期水分胁迫能够使旱地小麦旗叶前期的 SPS 活性显著提高,但胁迫程度加剧时,又显著降低了中后期旗叶的 SPS 活性,且以轻度胁迫受影响的程度较小,这同王维等^[14]的研究结果一致。对水地小麦品种西农 9871 而言,与对照 T₁ 相比,T₂ 处理旗叶的 SPS 活性于花后 6 d 高于对照,但差异未达到显著水平;T₃ 处理旗叶的 SPS 活性显著高于对照($P<0.05$);T₄、T₅ 处理旗叶的 SPS 活性在整个灌浆过程中均低于对照,且随着灌浆的进行降低幅度逐渐加大($P<0.01$)。表明无论是花前还是花后,轻度水分胁迫均能够在一定程度上提高水地小麦旗叶的 SPS 活性,且胁迫发生在花后时其提高幅度较大,但随着胁迫程度的加剧,补偿效应逐渐变差。

表 1 不同水分处理下不同品种小麦产量的变化				
Table 1 Change of yield of different wheat cultivars under different treatments				
品种 Cultivar	处理 Treatment	产量/(g·盆 ⁻¹) Grainyield	地上生物量/(g·盆 ⁻¹) Biomass above	收获指数 Harvest index
长旱 58 Changhan 58	T ₁	29.46±0.51 aA	60.724±1.272 aA	0.486±0.018 a
	T ₂	29.03±0.88 aA	52.337±1.403 bB	0.555±0.021 a
	T ₃	29.42±0.79 aA	58.996±1.162 aA	0.499±0.020 a
	T ₄	22.54±0.76 bB	46.180±1.085 cC	0.523±0.028 a
	T ₅	24.72±1.39 bB	51.995±1.767 bB	0.477±0.036 a
长武 134 Changwu 134	T ₁	27.14±0.66 aA	66.057±0.718 aA	0.419±0.010 ab
	T ₂	26.10±0.64 abA	54.731±0.951 bB	0.479±0.020 a
	T ₃	27.16±1.67 aA	64.680±0.715 aA	0.413±0.036 ab
	T ₄	19.56±0.52 cB	52.205±0.697 bB	0.374±0.005 b
	T ₅	23.60±0.50 bAB	52.657±0.283 bB	0.449±0.011 a
西农 9871 Xinong 9871	T ₁	24.92±0.75 aA	56.364±2.693 a	0.409±0.010 ab
	T ₂	18.70±0.02 cBC	46.204±1.766 ab	0.479±0.020 a
	T ₃	22.40±0.49 bAB	51.955±2.901 a	0.413±0.036 ab
	T ₄	16.86±0.41 cC	40.279±1.284 b	0.375±0.005 b
	T ₅	18.69±0.22 cBC	45.239±1.983 b	0.409±0.011 ab

注:同列数据后标不同大(小)写字母分别表达 1%(5%)差异显著水平。下表同。
Note: The different capital or small letters behind the date in the same column mean difference significance at 1% or 5% level. The same below.

由表 1 可以看出,在不同水分胁迫处理下,长旱 58 收获指数的差异不显著;除处理 T₄ 外,长武 134 其余各处理间差异也不显著;而水地品种西农 9871 T₃、T₄、T₅ 处理的收获指数较对照均显著降低;3 个品种均以 T₂ 处理的收获指数最高,分别较各自对照高 14.1%,15.3%和 17.1%。表明无论在花前还是花后,适度水分胁迫均能提高不同抗旱型小麦的收获指数,且花前轻度胁迫处理的收获指数提高最

2.2 不同水分处理对冬小麦产量及其构成因素的影响

2.2.1 产 量 由表 1 可知,不同水分处理对不同耐旱型小麦籽粒产量的影响有所不同。与对照 T₁ 相比,长旱 58 和长武 134 2 个旱地品种 T₂、T₃ 处理的籽粒产量下降不明显,而 T₄、T₅ 处理籽粒产量显著下降,分别较其对照降低了 23.5%和 27.9%。对水地品种而言,与对照 T₁ 处理相比,T₂、T₃、T₄、T₅ 处理均导致籽粒产量显著下降,其中以 T₄ 处理的籽粒产量下降最多,为 32.3%($P<0.01$)。抗旱性不同的 3 个小麦品种在不同水分处理下,其地上生物量的变化情况差异不明显,且均以 T₃ 处理的降幅最小,T₄ 处理的降幅最大,分别较其对照降低 23.9%,20.9%和 28.5%($P<0.01$)。上述研究结果表明,无论胁迫发生在花前还是花后,轻度胁迫对冬小麦产量影响较小,但随着花前胁迫程度的加重,灌浆期复水仍无法弥补产量的降低,且水地品种下降幅度要大于旱地品种。

大,但随着水分胁迫的增加,水地小麦品种的收获指数显著降低。
2.2.2 产量构成因素 小麦的籽粒产量是由千粒质量、穗数和穗粒数 3 部分构成的,不同抗旱型小麦在不同水分处理下其产量构成因素的变化有所差异。由表 2 可知,在 T₂、T₃ 处理条件下,长旱 58 和长武 134 的千粒质量、小穗数、穗粒数与其对照 T₁ 处理相比均无显著差异,但 T₂ 处理的千粒质量均

高于对照。2 个旱地品种的小穗数和穗粒数在 T₄ 处理条件下分别较对照显著($P<0.05$)或极显著下降($P<0.01$)。水地品种西农 9871 在 T₃ 处理下各产量构成因素下降不显著,但 T₂ 处理的穗粒数与对照相比显著降低,T₄ 处理的千粒质量、小穗数、穗粒数均显著降低($P<0.05$)。在 T₅ 处理条件下,3 个品种的千粒质量均显著下降($P<0.05$),而小穗数和穗粒数下降不显著。上述结果表明,开花前后

轻度水分胁迫对 2 个旱地小麦品种产量构成因素的影响不大,水地品种花后水分胁迫处理对其产量构成因素的影响小于花前胁迫。随着胁迫程度的加重,3 个小麦品种花前胁迫对小麦的成穗影响较大,灌浆期复水后也无法弥补小穗数和穗粒数的下降,而花后胁迫主要导致光合速率的大幅度下降,进而影响籽粒灌浆速率和饱满度,显著降低籽粒的千粒质量,且其对水地小麦品种的影响大于旱地小麦。

表 2 不同水分处理对 3 个供试小麦产量构成的影响

Table 2 Effect of yield components of different wheat cultivars under different treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	千粒质量/g TKW	小穗数 Number of spikelets	穗粒数 Number of spike
长旱 58 Changhan58	T ₁	51.490±0.541 a	21.194±0.474 a	55.444±2.804 a
	T ₂	51.656±0.353 a	20.083±0.800 a	47.777±2.541 ab
	T ₃	50.624±1.271 a	20.555±0.293 a	52.555±1.281 ab
	T ₄	50.138±1.024 a	18.027±0.940 b	45.556±1.083 b
	T ₅	48.416±0.205 b	19.694±0.924 ab	50.333±2.645 ab
长武 134 Changwu134	T ₁	51.994±0.527 a	19.833±0.267 a	54.444±0.801 aA
	T ₂	52.264±0.498 a	19.138±0.457 a	50.777±1.175 abA
	T ₃	51.778±0.616 a	19.278±0.605 a	52.111±2.562 abA
	T ₄	51.270±0.085 a	15.972±0.367 b	37.000±1.018 cB
	T ₅	49.486±0.283 b	17.750±1.121 ab	49.222±2.270 aAB
西农 9871 Xinong9871	T ₁	41.704±0.723 a	15.722±0.320 a	50.556±1.898 a
	T ₂	40.170±1.598 ab	14.189±1.832 a	44.778±2.310 b
	T ₃	40.380±0.263 ab	14.780±1.510 a	49.556±1.182 a
	T ₄	38.470±0.282 b	13.667±0.048 b	42.111±2.837 b
	T ₅	38.782±0.317 b	14.844±1.155 a	48.667±1.763 a

3 结论与讨论

禾谷类作物经济产量的 70%~90%来自于开花到成熟期积累的光合产物,旗叶是主要的光合器官,光合产物主要以蔗糖形式向外运输,因此旗叶蔗糖含量的高低可以直接反映其光合产物向籽粒的供应能力。李永庚等^[15]对小麦旗叶光合速率、蔗糖含量和 SPS 活性的研究表明,开花后三者的变化趋势一致,说明 SPS 在小麦叶片光合产物向蔗糖转化的过程中起着关键的调节作用。房全孝等^[16]的研究表明,干旱处理促进了旗叶灌浆前期的 SPS 活性,同时也导致灌浆后期旗叶衰老加速,SPS 活性急剧下降。陈晓远等^[17]研究了灌浆期复水对冬小麦生长的影响,结果表明前期受到不同程度干旱胁迫的植株在灌浆期恢复供水后,其株高、单株叶面积、生物量及产量等指标都超过相应的对照处理,表现出了明显的补偿生长效应。郭相平等^[18]研究发现,苗期玉米经旱后复水处理,其叶片的净光合速率逐渐得到恢复,最终达到了对照水平。本研究结果表明:(1)开花前轻度、中度胁迫后于灌浆期复水,长旱 58 和长武 134 2 个抗旱品种的旗叶净光合速率、蔗糖

含量及 SPS 活性均有不同程度的提高,峰值均出现在花后 6 d;而水地品种西农 9871 的净光合速率一直呈现降低趋势,且其净光合速率、蔗糖含量及 SPS 活性在灌浆期复水后的提高幅度低于旱地品种。供试 3 个小麦品种花前轻度胁迫处理的产量与对照相近,千粒质量高于对照,但均未达到显著水平;长旱 58、长武 134 和西农 9871 的收获指数显著提高($P<0.05$),分别较对照提高 14.1%,15.3%和 17.1%。可见冬小麦在花前经受一定程度的水分胁迫处理,能够减少营养器官的生长冗余,从而使花后光合产物分配更加合理,而水地品种的收获指数提高得最大,说明水地小麦品种同样能够承受一定程度的水分胁迫,这主要是由品种自身的特性决定的。本研究发现,花前中度胁迫复水后,供试 3 个小麦品种的小穗数及穗粒数显著降低,这主要是因为复水后源端蔗糖供应能力虽显著提高,但由于籽粒库容的限制,使光合产物运输受阻,最终导致产量下降。

(2)灌浆前期一定程度的水分胁迫对 3 个品种的净光合速率影响不大,却可有效地诱导旗叶 SPS 活性的上升,提高蔗糖的供应能力。但随着水分胁迫程度的加剧,灌浆后期 SPS 活性又显著降低,且

水地品种的降低幅度大于旱地品种,这与 Yang 等^[19]的研究结果一致。灌浆期轻度干旱胁迫对旱地小麦品种的产量及构成因素影响较小,但却显著降低了水地品种的产量;中度水分胁迫显著降低了 3 个小麦品种籽粒的千粒质量,但品种间差异不显著。这主要是由于灌浆后期光合速率大幅度降低,进而影响了灌浆速率,使蔗糖供应能力降低所致。

以上结果表明,一定程度的水分胁迫,无论发生在营养生长期还是生殖生长期,旱地小麦品种均能保持相对较高的酶活性,对蔗糖的合成和籽粒淀粉积累影响相对较小,因而这可能是抗旱型小麦节水、高产的生理调节机制。但由于本研究是通过人工模拟自然条件的盆栽试验进行的,因此有些结论还有待进一步在大田试验中进行验证。

[参考文献]

- [1] 樊廷录,马明生,王淑英,等. 限量灌溉不同品种冬小麦茎可溶性糖与产量和水分利用率的关系 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2428-2434.
Fan T L, Ma M S, Wang S Y, et al. A study on the relationship between stem soluble sugar with grain yield and water use efficiency in different winter wheat under limited irrigation condition [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(12): 2428-2434. (in Chinese)
- [2] 山 仑,邓西平,苏 佩,等. 作物对多变低水环境的适应与调节 [J]. 中国农业科技导报, 2000, 2(2): 66-69.
Shan L, Deng X P, Su P, et al. Adaptability of the crops to the low and variable water conditions [J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2000, 2(2): 66-69. (in Chinese)
- [3] 王 磊,张 彤,丁彦彦. 干旱和复水对不同倍性小麦生理生态的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1594-1600.
Wang L, Zhang T, Ding S Y. Effect of drought and rewatering on photosynthetic of wheat of differing ploidy [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1594-1600. (in Chinese)
- [4] 郝树荣. 作物干旱胁迫及复水的补偿效应研究 [D]. 江苏南京: 河海大学, 2008.
Hao S R. A study on the compensation effect of crop during drought or re-water [D]. Nanjing, Jiangsu: Hohai University, 2008. (in Chinese)
- [5] 张永平,王志敏,王 璞,等. 冬小麦节水高产栽培群体光合特征 [J]. 中国农业科学, 2003, 36(10): 1143-1149.
Zhang Y P, Wang Z M, Wang P, et al. Canopy photosynthetic characteristics of population of winter wheat in water-saving and high-yielding cultivation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(10): 1143-1149. (in Chinese)
- [6] 戴忠民,王振林,张 敏. 旱作与节水灌溉对小麦籽粒淀粉积累及相关酶活性变化的影响 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 687-694.

- Dai Z M, Wang Z L, Zhang M, et al. Starch accumulation and activities of enzymes involved in starch synthesis in grains of wheat grown under irrigation and rain-fed conditions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(3): 687-694. (in Chinese)
- [7] 侯晓琳. 水分胁迫对小麦蔗糖代谢关键酶活性及根系碳分配的影响 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
Hou X L. Effect of water stress on activities of key enzymes involved in sucrose metabolism and distribution of root carbon assimilation in wheat [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- [8] Chantal F, Jaleh G, Gabriel C. Drought effect on nitrate reductase and sucrose-phosphate synthesis activities in wheat (*Triticum durum* L.): Role of leaf internal CO₂ [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(11): 2983-2992.
- [9] 王月福,初欣平. 水分对冬小麦开花后光合产物积累运转的影响 [J]. 莱阳农学院学报, 1998, 15(2): 94-98.
Wang Y F, Chu X P. The effect of water on photosynthetic accumulation and transport of wheat after blooming [J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 1998, 15(2): 94-98 (in Chinese)
- [10] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
Zhang Z L, Qu W J. Plant physiology experimental instruction [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)
- [11] 王文静. 不同穗型冬小麦籽粒灌浆期源库强度及其与淀粉积累的关系 [J]. 作物学报, 2004, 30(9): 916-921.
Wang W J. The relationship between source-sink intensity and starch accumulation during grain filling period in two winter wheat cultivars with different spike types [J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(9): 916-921. (in Chinese)
- [12] 於新建. 植物生理学实验手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
Yu X J. Plant physiology laboratory manual [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985. (in Chinese)
- [13] Wardlaw I F, Willenbrink J. Carbohydrate storage and mobilization by the culms of wheat between heading and grain maturity: The relation to sucrose syntheses and sucrose-phosphate syntheses [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1994, 21: 255-271.
- [14] 王 维,蔡一霞,张建华,等. 适度土壤干旱对贪青小麦茎储藏碳水化合物向籽粒运转的调节 [J]. 作物学报, 2005, 31(3): 289-296.
Wang W, Cai Y X, Zhang J H, et al. Regulation of controlled soil drying on remobilization of stem-stored carbohydrate to grain in wheat grown under unfavorably-delayed senescence [J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(3): 289-296. (in Chinese)