



灌浆期干旱胁迫对小麦西农 106 部分生理指标、产量及品质的影响

张礼宁,于子雯,郭金良,南 瑞,姚雅鑫,李 嵩,孙凤丽,张 超,奚亚军

(西北农林科技大学 农学院,陕西杨凌 712100)

摘 要 为了解小麦品种‘西农 106’灌浆期的抗旱性,以小麦品种‘周麦 18’为对照,通过盆栽称重控水模拟干旱环境,比较分析正常供水、中度干旱胁迫和重度干旱胁迫处理下小麦的旗叶面积、SPAD 值、荧光、抗氧化酶活性等抗旱生理指标及产量和品质的差异。结果表明,与正常供水处理相比,在重度干旱处理下两个品种的旗叶面积、SPAD 值、荧光参数(F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP)均显著降低,其中‘西农 106’的 Φ_{PSII} 和 qP 降低幅度更小;在重度干旱处理下,两个品种旗叶 MDA 含量、抗氧化酶活性、可溶性糖含量和可溶性蛋白含量均显著升高。重度干旱胁迫后,‘周麦 18’和‘西农 106’的千粒质量和产量均显著下降,其中千粒质量降幅分别为 41.96% 和 35.33%,产量降幅分别为 40.43% 和 42.53%。重度干旱胁迫显著降低小麦籽粒淀粉含量和吸水率,显著提高籽粒蛋白含量、湿面筋含量、体积质量、稳定时间和沉降值。中度干旱胁迫对两个品种生理、产量和品质的影响较小,以上指标变化基本上表现不显著。综合来看,在荧光特性和产量性状方面‘西农 106’品种表现出较好的抗旱性。

关键词 小麦;西农 106;干旱胁迫;灌浆期;生理指标;产量;品质

中国是一个水资源短缺、干旱频发的国家^[1],干旱对小麦生产和国家粮食安全影响很大^[2-3]。在小麦灌浆期,籽粒要经历一个物质充实的过程,因而该时期小麦的生理代谢机能对产量和品质形成具有决定性作用^[4]。在中国北方地区,小麦开花灌浆期往往会受到高温干旱胁迫,容易引起小麦功能叶片早衰、生长周期变短,导致籽粒灌浆不足^[5]。研究表明,干旱胁迫后小麦叶片光合色素含量降低,叶片伸展生长受到抑制,使光合面积减小^[5],不利于光合作用^[6]。叶绿素荧光特性是植物光合作用的基础^[7]。小麦叶片光系统 II(PS II)原初光能转化效率和实际光化学效率均会随干旱胁迫的加剧而下降^[8],光化学淬灭系数和非光化学淬灭系数也均随之不同程度降低^[9]。干旱胁迫下,小麦正常的生理代谢受到影响,植株体内活性氧累积,光氧化作用增强,对小麦的细胞结构和生理代谢产生危害;同时,光氧化产物丙二醛含量增加,会对细胞及组织产生毒害效应。干旱胁迫

也会促使超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶等细胞保护酶活性增强,抑制植株体内过氧化作用,减少活性氧等物质对植株体的伤害^[10-11]。另外,干旱胁迫通过渗透调节等过程降低细胞渗透势,提高植物对土壤水分缺乏的适应能力。因此,干旱胁迫下小麦生理代谢会受到不利影响,但也存在适应性主动调节,从而减少干旱胁迫的负效应^[12-14]。目前,有关干旱胁迫效应的研究已经很多,且观点基本一致,但不同作物品种的抗旱性不同,因而了解小麦品种的抗旱特点对其推广种植具有重要指导意义。‘西农 106’是 2020 年通过陕西省审定的冬小麦品种,在关中灌区进行示范种植,但目前对其抗旱性缺乏具体的试验分析。本研究通过盆栽试验比较分析了灌浆期干旱胁迫下小麦品种‘西农 106’和‘周麦 18’的荧光特性等生理指标及籽粒产量和品质的差异,以期了解‘西农 106’的灌浆期抗旱特点,为其进一步推广种植提供理论依据。

收稿日期:2023-02-09 修回日期:2023-03-24

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2022NY-172);陕西省种质资源保护与利用计划项目(20171010000004)。

第一作者:张礼宁,女,硕士研究生,研究方向为小麦生物学与遗传育种。E-mail:1161863038@qq.com

通信作者:奚亚军,男,教授,博士生导师,研究方向为小麦生物学与遗传育种。E-mail:xiyajun11@126.com

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试小麦品种‘西农 106’于 2020 年通过陕西省审定,目前主要在关中地区推广种植;‘周麦 18’为黄淮南片小麦区试对照品种,适应性较强,具有抗寒性、抗倒伏、耐旱、耐渍、抗干热风、耐后期高温等特性。两个品种的种子均由农业农村部西北地区小麦生物学与遗传育种重点实验室提供。

1.2 试验设计

试验于 2021 年 10 月—2022 年 3 月在西北农林科技大学南校区玻璃温室内进行。小麦采用盆栽方法种植。试验所用塑料盆(直径 30 cm,高度 26 cm)底部带孔,每盆装土 4.5 kg。土壤来自大田耕层土,属于壤质土,中等肥力,有机质、速效氮、全氮、速效磷和速效钾含量分别为 15.51 g·kg⁻¹、71.32 mg·kg⁻¹、2.24 g·kg⁻¹、22.39 mg·kg⁻¹ 和 269.63 mg·kg⁻¹,pH 8.01,田间最大持水量 21.1%。

选择均一饱满的小麦种子,于 2021 年 10 月 8 日播种并放在室外,三叶期每盆留苗 6 株,并于低温春化结束后移入温室内,正常水分管理。室内光照 16 h/黑暗 8 h,平均光子通量密度为 800 μmol·m⁻²·s⁻¹,相对湿度为 40%~60%。试验设置:正常水分供应(NW)、中度干旱胁迫(MS)和重度干旱胁迫(SS)3 个处理,每处理设 6 个重复。NW 处理在小麦整个生育期土壤含水量保持在田间持水量的 75%。干旱处理生育前中期水分保持正常供应,从开花期结束开始称重控水,在 MS 和 SS 处理的土壤含水量分别达到田间持水量的 60%和 35%时计时,并保持相应水分条件 14 d。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 旗叶生长状况 从开花期开始记录小麦单株旗叶的生长状况,记录各处理一半以上的单株旗叶叶尖变黄和旗叶黄化面积达到 95%的日期,计算各个处理旗叶的生长时间。

1.3.2 旗叶光合指标 干旱胁迫 14 d 后,每盆选取 5 个主茎,用系数法^[15]测定旗叶面积,用 SPAD-502 型叶绿素计(Minolta Camera,日本)测定旗叶 SPAD 值;用 FluorPen FP110 手持式叶绿素荧光仪(Photon Systems Instruments,Brno,Czech Republic)测定旗叶的最大荧光(F_m)、固定

荧光(F_o)并计算 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m),并测定 PS II 实际光化学效率(Φ_{PSII})、光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(qN)。

1.3.3 旗叶生理指标 干旱胁迫结束时,每个处理选取长势一致的旗叶 3 片,液氮速冻,并保存在 -80 °C 冰箱。采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[16];采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[17];采用过氧化氢还原法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[17];采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量^[17]。可溶性糖含量测定采用硫酸蒽酮法^[15];可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝染色法^[15];脯氨酸含量测定采用茚三酮法^[15]。

1.3.4 产量性状和抗旱指数 小麦完熟后,调查各处理每盆小麦的穗数和穗粒数,再进行收获计产,折算成籽粒含水率为 13%时的千粒质量和产量,计算产量抗旱指数^[18]。

1.3.5 品质性状 用 DA7250 型近红外漫反射谷物品质分析仪(Perton,瑞典)测定小麦籽粒的蛋白含量、湿面筋含量、淀粉含量、稳定时间、沉降值、吸水率、体积质量等指标。

1.4 数据处理

使用 Excel 2021 及 SPSS Statistics 26 进行数据计算、单因素方差检验;Origin 2021 进行部分运算及拟合作图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对小麦旗叶生长状况的影响

干旱胁迫对两个小麦品种的旗叶生长均产生明显影响。由于温室条件适宜,两个品种生育前中期植株生长较快,均于 2 月 12 日进入开花期。进入灌浆期后,干旱胁迫明显加快了小麦旗叶衰老黄化进程。在 MS 处理下,‘周麦 18’从开花到成熟和开花到叶尖变黄的时间分别比 NW 处理缩短了 5 d 和 4 d,‘西农 106’分别缩短了 6 d 和 5 d。在 SS 处理下,‘周麦 18’和‘西农 106’从开花期到成熟期经历了 23 d,相比 NW 处理缩短了 14 d,而旗叶从开花到叶尖变黄的时间比 NW 处理缩短了 10 d(表 1)。这表明干旱胁迫越严重,对小麦叶片衰老黄化的促进作用越大。

2.2 干旱胁迫对小麦旗叶光合指标的影响

2.2.1 对旗叶叶面积和 SPAD 值的影响 随着干旱胁迫程度的增大,‘周麦 18’和‘西农 106’的旗叶面积和 SPAD 值均下降,但程度不同。与

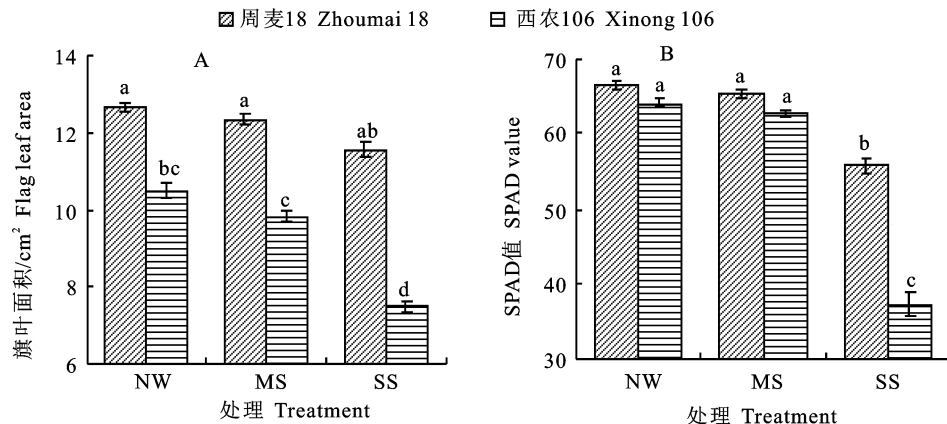
NW 处理相比,‘西农 106’的旗叶面积在 MS 处理下虽有下降,但变化不显著,而在 SS 处理下显著下降,降幅 28.50%;两个干旱处理虽然导致‘周麦 18’的旗叶面积下降,但都影响不显著(图 1-A)。在 MS 处理下,两个品种的旗叶 SPAD 值

较 NW 处理均略降,变化不显著;而在 SS 处理下,两个品种的 SPAD 值均显著下降,‘周麦 18’和‘西农 106’的降幅分别为 16.20%和 41.79%(图 1-B)。这说明干旱胁迫会减少小麦功能叶片的光合面积和光合色素含量。

表 1 灌浆期干旱胁迫对小麦旗叶颜色的影响

Table 1 Effects of drought stress on color of wheat flag leaves during grain filling period

品种 Cultivar	处理 Treatment	开花期 Flowering stage	叶尖变黄 Yellow tip of leaves	叶片全黄(成熟期) Completely yellow leaves (maturity stage)
周麦 18 Zhoumai 18	NW	02-12	03-10	03-21
	MS	02-12	03-06	03-16
	SS	02-12	02-28	03-07
西农 106 Xinong 106	NW	02-12	03-10	03-21
	MS	02-12	03-05	03-15
	SS	02-12	02-28	03-07



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同

Different lowercase letters on the column indicate significant differences among different treatments at 0.05 level, the same below

图 1 灌浆期干旱胁迫对小麦旗叶面积和 SPAD 值的影响

Fig. 1 Effects of drought stress on flag leaf area and SPAD value of wheat at grain filling stage

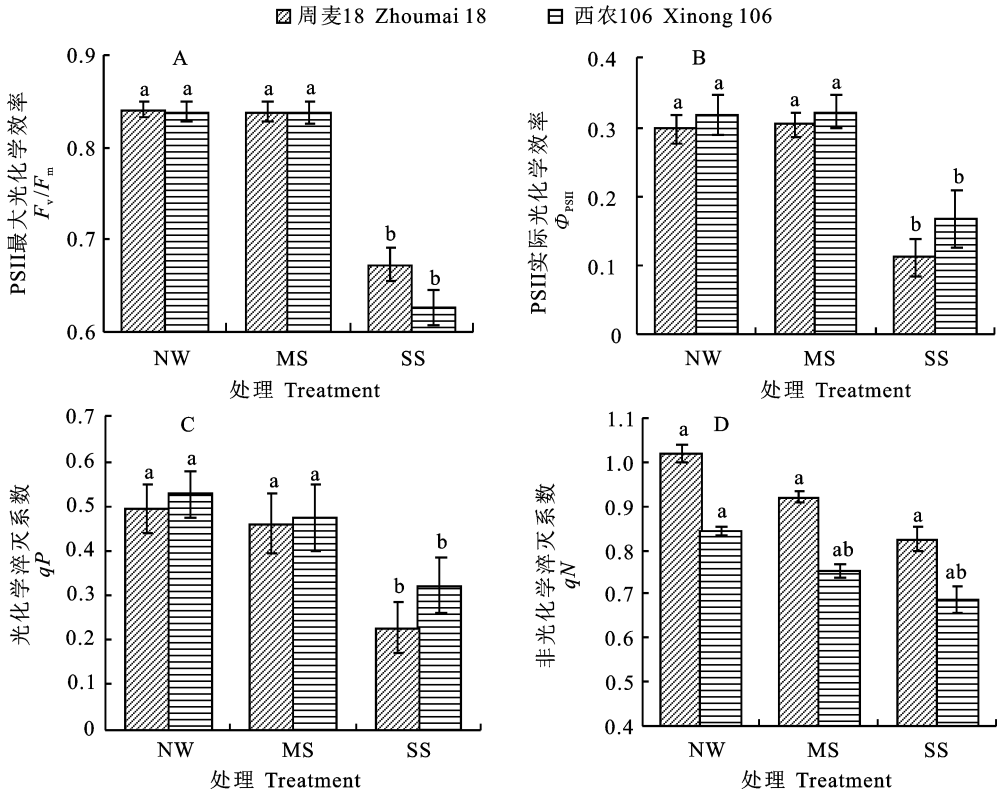
2.2.2 对旗叶荧光特性的影响 与 NW 处理相比,在 MS 处理下‘周麦 18’和‘西农 106’的旗叶的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 qP 和 qN 变化均不显著;在 SS 处理下两个品种的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均显著下降(图 2-A,2-B,2-C),其中‘周麦 18’的降幅分别为 20.02%、62.66%和 53.80%,‘西农 106’降幅分别为 19.78%、63.37%和 38.45%,而两个品种 qN 变化均依然不明显(图 2-D)。这表明严重的干旱胁迫会抑制小麦旗叶的光能转化。

2.3 干旱胁迫对小麦旗叶抗氧化特性和渗透调节的影响

2.3.1 对旗叶丙二醛(MDA)含量的影响 与 NW 处理相比,干旱胁迫均导致两个小麦品种旗叶 MDA 含量不同程度升高,但 MS 处理影响不显著,而 SS 处理影响显著(图 3-A)。在 SS 处理下,‘周麦 18’和‘西农 106’的 MDA 含量分别较

NW 处理分别提高 242.71%和 151.21%。这表明重度干旱胁迫会引起小麦叶片的膜脂过氧化程度增加;两个品种相比,干旱胁迫后‘西农 106’膜脂过氧化受影响水平较小。

2.3.2 对旗叶细胞抗氧化酶活性的影响 干旱胁迫均促进两个品种旗叶的 SOD、POD、CAT 活性升高,其中,MS 处理只对 POD 活性影响显著,SS 处理对 3 种酶活性均影响显著。相比 NW 处理,在 SS 处理下,‘周麦 18’和‘西农 106’的 SOD 活性分别升高 40.76%和 57.17%(图 3-B),CAT 活性分别升高 82.11%和 89.62%(图 3-D),POD 活性分别升高 66.82%和 50.66%(图 3-C)。以上结果说明,重度干旱诱导小麦抗氧化酶活性增强,有利于有效清除体内活性氧类物质,减轻膜脂过氧化程度。



F_v/F_m , PSII最大光化学效率; Φ_{PSII} , PSII实际光化学效率; qP , 光化学淬灭系数; qN , 非光化学淬灭系数

F_v/F_m , Maximum photochemical efficiency of PSII; Φ_{PSII} , Actual photochemical efficiency of PSII; qP , Photochemical quenching coefficient; qN , Non-photochemical quenching coefficient

图 2 灌浆期干旱胁迫对小麦旗叶荧光特性的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on fluorescence characteristics of flag leaves of wheat at grain filling stage

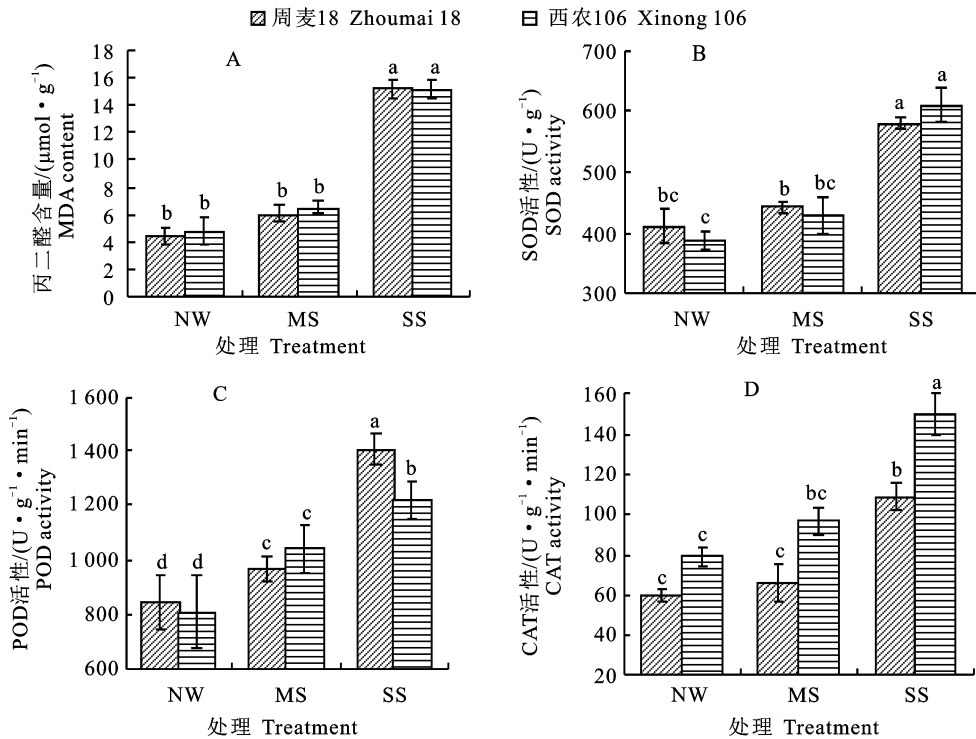


图 3 灌浆期干旱胁迫对小麦旗叶丙二醛含量和抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on malondialdehyde content and antioxidant enzyme activity in flag leaves of wheat at grain filling stage

2.3.3 对旗叶可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量的影响 与 NW 处理相比,在 MS 处理下‘周麦 18’和‘西农 106’的旗叶可溶性糖和脯氨酸含量变化较小,只有‘西农 106’的可溶性蛋白含量显著增加;在 SS 处理下,两个品种的可溶性糖和可溶性蛋白含量均显著增加,其中可溶性糖含量增幅分别为 38.99% 和 35.49%(图 4-A),可溶性蛋白含量增幅分别为 22.26% 和 17.84%(图 4-B)。在 3 种水分处理间两个品种的旗叶细胞内脯氨酸含量均差异不显著(图 4-C)。这表明,干旱胁迫对小麦叶片渗透调节有一定的影响,且干旱胁迫越严重,影响越大。

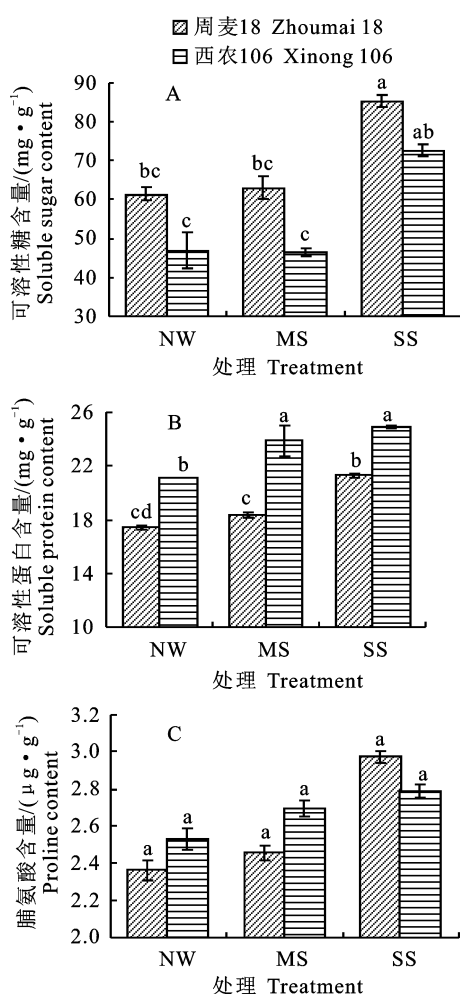


图 4 灌浆期干旱胁迫对小麦旗叶可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量的影响

Fig. 4 Effects of drought stress on soluble sugar, soluble protein and proline contents in flag leaves of wheat at grain filling stage

2.4 干旱胁迫对小麦产量和品质的影响

2.4.1 对产量性状及抗旱指数的影响 与 NW 处理相比,干旱胁迫处理对两个品种穗数和穗粒

数影响较小,变化均不明显;但干旱胁迫对千粒质量和产量的影响相对较大(表 2)。在 MS 处理下,‘周麦 18’和‘西农 106’的千粒质量和产量较 NW 处理虽有降低,但变化均不显著;SS 处理下千粒质量和产量均显著降低,其中千粒质量降幅分别为 41.96% 和 35.33%,产量降幅分别为 40.43% 和 42.53%。这说明中度干旱胁迫对两个品种的产量及其构成影响较小,重度干旱胁迫对其产量和千粒质量均产生负效应。两个品种的抗旱指数比较接近,‘西农 106’在两种干旱处理下的抗旱指数略高于‘周麦 18’,说明两个品种灌浆期均具有较强的抗旱能力。

2.4.2 对小麦籽粒品质的影响 与 NW 处理相比,MS 处理对小麦籽粒蛋白质、沉降值等 7 个品质指标影响均不显著,而 SS 处理影响均显著。其中,SS 处理下两个品种的籽粒蛋白含量、湿面筋含量、沉淀值和稳定时间均显著上升,而籽粒淀粉含量、体积质量和吸水率均显著下降(表 3)。这表明灌浆期中度干旱胁迫对两个品种的籽粒品质影响不明显,但重度干旱胁迫影响较大。

3 讨论

在小麦灌浆过程中,花后功能叶片的光合作用是籽粒中同化物的主要来源^[19-21]。小麦旗叶是生育后期主要光合器官,其面积、SPAD 值及持绿时间常被作为小麦光合能力的重要指标。研究表明,延缓叶片衰老、延长绿色叶面积持续期,尤其是维持灌浆期旗叶生理功能,对小麦籽粒产量尤为重要^[22]。本试验中,重度干旱胁迫后,两个小麦品种旗叶从开花到叶尖变黄和完全变黄的时间大大缩短,旗叶叶面积和 SPAD 值较正常供水处理均显著下降,说明小麦旗叶衰老在重度干旱时会加快,其功能明显受影响。

干旱胁迫对植物的光合作用的影响是多方面的,不仅会直接引发光合机构的异常,也会影响光合电子传递^[23]。叶绿素荧光是植物体内发出的天然探针^[24-25],干旱条件下光合作用可以通过叶绿素荧光参数的变化来反映^[26]。本试验结果显示,两个品种在重度干旱下旗叶荧光参数 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 显著下降,表明干旱胁迫抑制了光合作用的原初反应,影响光合电子传递过程。重度干旱也导致小麦叶片 qP 显著降低,对 qN 影响不明显,说明干旱胁迫使 PS II 的电子传递活性变小^[27],PS II 中心所接收的多余激发不能以热形

表 2 灌浆期干旱胁迫对小麦产量性状及抗旱指数的影响($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Effects of drought stress on wheat yield traits and drought resistance index during grain filling period

处理 Treatment	品种 Cultivar	每盆有效穗数 Effective ears per pot	穗粒数 Number of grains per ear	千粒质量/g 1 000-grain mass	每盆产量/g Yield per pot	抗旱指数 DI
NW	周麦 18 Zhoumai 18	6.7±1.70 a	29.2±4.04 ab	56.67±2.08 ab	10.25±2.89 a	
	西农 106 Xinong 106	8.2±1.86 a	24.0±3.45 cd	62.25±4.67 a	11.65±3.35 a	
MS	周麦 18 Zhoumai 18	6.7±1.25 a	30.8±3.13 a	51.56±2.91 b	10.38±1.46 a	1.08±0.48 a
	西农 106 Xinong 106	8.2±1.83 a	25.7±2.33 bc	59.93±5.43 a	11.64±2.17 a	1.14±0.45 a
SS	周麦 18 Zhoumai 18	7.0±1.00 a	28.7±3.33 ab	32.89±3.93 d	6.10±0.55 b	0.64±0.28 a
	西农 106 Xinong 106	8.7±1.49 a	21.0±2.61 d	40.26±8.23 c	6.70±1.66 b	0.69±0.34 a

注:同列数据后不同小写字母表示不同品种和不同处理间差异显著($P < 0.05$)。表 3 同。

Note: Different lowercase letters after the data within the same column indicate significant differences between different varieties and different treatments ($P < 0.05$). The same as table 3.

表 3 灌浆期干旱胁迫对小麦籽粒品质的影响($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Effects of drought stress on grain quality of wheat during grain filling period

处理 Treatment	品种 Cultivar	籽粒蛋白含量/% Grain protein content	湿面筋含量/% Wet gluten content	淀粉含量/% Starch content	稳定时间/min Stabilization time	沉降值/mL Sedimentation value	吸水率/% Water absorption rate	体积质量/ ($g \cdot cm^{-3}$) Volumic mass
NW	周麦 18 Zhoumai 18	12.54±0.36 bc	35.68±0.82 bc	57.91±0.55 b	3.18±0.50 d	42.77±2.99 d	63.42±1.13 a	770.39±6.92 c
	西农 106 Xinong 106	11.81±0.83 c	34.18±1.80 c	59.16±1.26 a	4.56±0.51 b	45.36±3.81 cd	63.53±1.29 a	810.68±10.23 a
MS	周麦 18 Zhoumai 18	12.77±0.46 b	36.56±0.86 b	57.73±0.71 b	2.78±0.38 d	41.89±1.85 d	64.41±0.86 a	761.99±9.04 c
	西农 106 Xinong 106	12.6±0.32 b	35.82±0.65 bc	58.26±0.55 ab	4.71±0.45 b	47.25±2.18 c	62.53±1.41a	806.76±9.25 a
SS	周麦 18 Zhoumai 18	14.53±0.66 a	41.03±1.44 a	54.47±0.91 c	3.85±0.50 c	51.53±2.87 b	59.75±1.28 b	732.63±8.45 d
	西农 106 Xinong 106	14.25±0.64 a	40.14±1.70 a	55.24±1.09 c	5.78±0.34 a	56.32±2.49 a	57.54±1.89 c	785.99±10.69 b

式耗散,对光合机构的保护能力变弱^[28]。因此,干旱胁迫下低光化学效率是作物光合作用受到限制的重要内因。

干旱胁迫下,冬小麦叶片活性氧积累,造成叶片细胞膜脂过氧化程度升高,进而对冬小麦生理代谢过程产生影响^[29]。本研究表明,相比正常供水处理,两个品种旗叶的 MDA 含量在中度干旱下略有升高,重度干旱下显著升高,说明干旱胁迫程度越重,叶片细胞膜脂过氧化程度越高。为了降低叶片细胞膜脂过氧化水平,干旱胁迫会诱导冬小麦叶片细胞抗氧化酶活性及渗透调节物质含量升高,减轻干旱带来的影响^[11,21]。本试验在重度干旱下两个品种叶片细胞的 SOD、POD 和 CAT 活性及可溶性糖和可溶性蛋白含量均较正常供水处理显著升高,而中度干旱胁迫影响较小,说明重度干旱胁迫下小麦通过提高抗氧化酶的活性和促进可溶性糖和可溶性蛋白的积累降低膜脂过氧化对细胞正常代谢产生的危害,有利于植株增强适应逆境的能力。

干旱胁迫是限制冬小麦产量提高的主要因素之一^[30]。于振文等^[31]认为,黄淮麦区灌浆期旱会加快小麦植株衰老,导致光合器官功能下降,缩短灌浆持续时间,降低粒质量,最终引起减产。本研究中,两个小麦品种的千粒质量对干旱胁迫反应比较敏感,在重度干旱条件下均显著降低,成为最终产量显著降低的主要原因。抗旱指数兼顾了品种的相对产量和绝对产量,是小麦抗旱性鉴定的综合指标之一^[32]。本试验中,两个品种的抗旱指数差异较小,但‘西农 106’的抗旱指数在两种干旱处理下均高于‘周麦 18’。干旱也会影响小麦的品质性状^[33]。重度干旱下两个品种的籽粒蛋白含量、湿面筋含量、稳定时间、沉降值、体积质量较正常供水处理均显著升高,淀粉含量和吸水率均显著降低,表明干旱对两个品种的营养和加工品质有一定的改善作用,但是小麦灌浆期要避免长时间的重度干旱,防止小麦严重减产。

总体来看,‘西农 106’和‘周麦 18’对中度干旱胁迫的反应较小,生理、产量和品质指标基本上

没有发生显著变化,而在重度干旱胁迫下,这些指标均较正常供水处理发生显著变化,说明两个品种在灌浆期均具有一定的抗旱性。‘西农 106’是陕西省关中地区示范推广品种之一,相比‘周麦 18’‘西农 106’的荧光特性表现较好,荧光参数 Φ_{PSII} 和 qP 在各水分处理下平均值较大且干旱胁迫下降程度小,说明该品种旗叶捕获的光能更多用于光化学反应,而转化为热能消耗的比例较低,可为暗反应碳同化积累的能量较多,灌浆后期最终光合速率较高。这与‘西农 106’在灌浆后期落黄性好、成熟后穗数和千粒质量高的特性相对应,也表明该品种具有较高抗旱性的原因。本试验采用盆栽方法,试验条件与大田环境有差别,其结果有待进一步检验。此外,本研究仅从灌浆期分析干旱胁迫对‘西农 106’的影响,今后需要进一步开展不同生育时期、不同生态环境的干旱胁迫效应的研究。

参考文献 Reference:

- [1] 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):101-105.
WANG H ZH, MA J, LI X Y, *et al.* Screening identification indexes of drought resistance at flowering stage in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(11): 101-105.
- [2] 李艳,王式功,马玉霞. 全球气候变暖对我国小麦的影响研究综述[J]. 环境研究与监测,2006,19(2):11-13.
LI Y, WANG SH G, MA Y X. Summarization influence of global warming on wheat growth in China [J]. *Environmental Research and Monitoring*, 2006, 19(2): 11-13.
- [3] 蔡剑,姜东. 气候变化对中国冬小麦生产的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(9):1726-1733.
CAI J, JIANG D. The effect of climate change on winter wheat production in China [J]. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 2011, 30(9): 1726-1733.
- [4] 胡阳阳,卢红芳,刘卫星,等. 灌浆期高温与干旱胁迫对小麦籽粒淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响[J]. 作物学报,2018,44(4):591-600.
HU Y Y, LU H F, LIU W X, *et al.* Effects of high temperature and water deficiency during grain filling on activities of key starch synthesis enzymes and starch accumulation in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(4): 591-600.
- [5] SHARP R E, VALERIY P, HEJLEK L G, *et al.* Root growth maintenance during water deficits; physiology to functional genomics [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(407): 2343-2351.
- [6] CHEN Y E, CUI J M, SU Y Q, *et al.* Influence of stripe rust infection on the photosynthetic characteristics and antioxidant system of susceptible and resistant wheat cultivars at the adult plant stage [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015(6):779.
- [7] 朱艳,田永超,马吉锋,等. 小麦叶片叶绿素荧光参数与反射光谱特征的关系[J]. 作物学报,2007,33(8):1286-1292.
ZHU Y, TIAN Y CH, MA J F, *et al.* Relationship between chlorophyll fluorescence parameters and spectral reflectance characteristics in wheat leaves [J]. *Journal of Crops*, 2007, 33(8): 1286-1292.
- [8] 吴甘霖,段仁燕,王志高,等. 干旱和复水对草莓叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报,2010,30(14):3941-3946.
WU G L, DUAN R Y, WANG ZH G, *et al.* Effects of drought stress and rehydration on chlorophyll fluorescence characteristics in *Fragaria × ananassa* Duch [J]. *Acta Ecology Sinica*, 2010, 30(14): 3941-3946.
- [9] 巩擎柱,吕金印,徐炳成,等. 水分胁迫和种植方式对小麦叶绿素荧光参数及水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(5):83-87,92.
GONG Q ZH, LÜ J Y, XU B CH, *et al.* Effects of water stress on chlorophyll fluorescence parameters and WUE of wheat under different planting models [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2006, 34(5): 83-87, 92.
- [10] 魏伟,赵欣平,吕辉,等. 三种抗氧化酶在小麦抗干旱逆境中的作用初探[J]. 四川大学学报(自然科学版),2003,40(6):1172-1175.
WEI W, ZHAO X P, LÜ H, *et al.* The study of the function of three antioxidant enzymes in wheat leaf under drought stress [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2003, 40(6): 1172-1175.
- [11] 冯佰利,高小丽,王长发,等. 干旱条件下不同温型小麦叶片衰老与活性氧代谢特性的研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(4):74-76.
FENG B L, GAO X L, WANG CH F, *et al.* Leaf senescence and active oxygen metabolism of different-type wheats under drought [J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2005, 13(4): 74-76.
- [12] 武仙山,吕小平,景蕊莲. 小麦灌浆期抗旱性鉴定指标的综合评价[J]. 麦类作物学报,2008,28(4):626-632.
WU X SH, CHANG X P, JING R L. Screening indexes for drought resistance of wheat at grain-filling stage [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(4): 626-632.
- [13] 蒋高明. 植物生理生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:116.
JIANG G M. *Plant Physiological Ecology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 116.
- [14] NIELSEN D C, VIGIL M F, BENJAMIN J G. The variable response of dryland corn yield to soil water content at planting [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(2):330-336.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:142-145.
GAO J F. *Plant Physiology Experiment Guide* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 142-145.
- [16] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2003:88.
ZOU Q. *Plant Physiology Experiment Guide* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003: 88.

- [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: 164-167.
LI H SH. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-167.
- [18] 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 中华人民共和国国家标准: GB/T 21127-2007 小麦[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. National Standard of the People's Republic of China: GB/T 21127-2007 Wheat [S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [19] 王振林, 贺明荣. 源库调节对灌溉与旱地小麦开花后光合产物生产和分配的影响[J]. 作物学报, 1999, 25(2): 162-168.
WANG ZH L, HE M R. Effects of source sink manipulation on production and distribution of photosynthate after flowering in irrigated and rainfed wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(2): 162-168.
- [20] 郭文善, 施劲松, 彭永欣, 等. 灌浆期高温对小麦光合产物运转的影响[J]. 核农学报, 1998, 12(1): 22-28.
GUO W SH, SHI J S, PENG Y X, *et al.* Effects of high temperature during grain filling period on the operation of photosynthetic products in wheat [J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 1998, 12(1): 22-28.
- [21] 吕金印, 山 仑, 高俊凤, 等. 干旱对小麦灌浆期旗叶光合等生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 77-81.
LÜ J Y, SHAN L, GAO J F, *et al.* Effects of drought on physiological characteristics such as flag leaf photosynthesis during wheat grain filling period [J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2003, 21(2): 77-81.
- [22] CHRISTOPHER J T, MANSCHADI A M, HAMMER G L, *et al.* Developmental and physiological traits associated with high yield and stay-green phenotype in wheat [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2008, 59(4): 354-364.
- [23] 张秋英, 李发东, 刘孟雨, 等. 不同水分条件下小麦旗叶叶绿素 a 荧光参数与子粒灌浆速率[J]. 华北农学报, 2003, 18(1): 26-28.
ZHANG Q Y, LI F D, LIU M Y, *et al.* Chlorophyll a fluorescence parameters of flag leaf of the wheat and seed grouting under different water treatments [J]. *Acta Agronomica Boreali-Sinica*, 2003, 18(1): 26-28.
- [24] 张其德, 蒋高明, 朱新广, 等. 12 个不同基因型冬小麦的光合能力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 532-536.
ZHANG Q D, JIANG G M, ZHU X G, *et al.* Photosynthetic capability of 12 genotypes of *Triticum aestivum* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(5): 532-536.
- [25] 徐惠风, 刘兴土, 沙 箬, 等. 遮荫条件下乌拉苔草叶片气孔阻力与脯氨酸、叶绿素含量的研究[J]. 土壤与作物, 2004, 20(3): 232-234.
XU H F, LIU X T, SHA L, *et al.* Study on the correlation between proline, chlorophyll and stomatal conductance under shade [J]. *Soil and Crops*, 2004, 20(3): 232-234.
- [26] 吴长艾, 孟庆伟, 邹 琦, 等. 小麦不同品种叶片对光氧化胁迫响应的比较研究[J]. 作物学报, 2003, 29(3): 339-344.
WU CH A, MENG Q W, ZOU Q, *et al.* Comparative study on the photooxidative response in different wheat cultivar leaves [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(3): 339-344.
- [27] NEIL R B. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 89-113.
- [28] 张雷明, 上官周平, 毛明策, 等. 长期施氮对旱地小麦灌浆期叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 695-698.
ZHANG L M, SHANGGUAN ZH P, MAO M CH, *et al.* Effects of long term application of nitrogen fertilizer on leaf chlorophyll fluorescence of upland winter wheat [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 695-698.
- [29] 张继波, 薛晓萍, 李 楠, 等. 干旱胁迫对冬小麦水分关键期的生理特性和物质生产影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 124-130.
ZHANG J B, XUE X P, LI N, *et al.* Effects of drought stress on physiological characteristics and dry matter production of winter wheat during water critical period [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2019, 13(3): 124-130.
- [30] 梁海燕, 刘迪迪, 张 娜, 等. 干旱胁迫对不同基因型小麦籽粒灌浆及内源激素的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(5): 41-47.
LIANG H Y, LIU D D, ZHANG N, *et al.* Effects of water stress on grain filling and endogenous hormone changes in wheat grains of different genotypes [J]. *Acta Agronomica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 24(5): 41-47.
- [31] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮海区冬小麦超高产栽培的理论与实践[J]. 作物学报, 2002, 28(5): 577-585.
YU ZH W, TIAN Q ZH, PAN Q M, *et al.* Theory and practice on cultivation of super high yield of winter wheat in the wheat fields of Yellow River districts [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(5): 577-585.
- [32] 张灿军, 冀天会, 杨子光, 等. 小麦抗旱性鉴定方法及评价指标研究 I 鉴定方法及评价指标[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9): 226-230.
ZHANG C J, JI T H, YANG Z G, *et al.* Study on resistance drought identify method and evaluation index of wheat I identify method and evaluation index [J]. *China Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(9): 226-230.
- [33] PLAUT Z, BUTOW B J, BLUMENTHAL C S, *et al.* Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature [J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(2): 185-198.

Effects of Drought Stress on Some Physiological Indexes, Yield and Quality of Wheat Variety Xinong 106 at Grain Filling Stage

ZHANG Lining, YU Ziwen, GUO Jinliang, NAN Rui, YAO Yaxin,
LI Song, SUN Fengli, ZHANG Chao and XI Yajun

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract ‘Xinong 106’ is a wheat variety approved in Shaanxi province. In order to accurately evaluate the drought resistance of this variety, ‘Zhoumai 18’ was used as the control, and the drought resistance performance of wheat under drought stress during grain filling period was simulated by pot weighing and water control method. The effects of drought stress on fluorescence characteristics, physiological characteristics and yield and quality of wheat were analyzed under normal NW, moderate drought MS and severe drought SS. The results showed that under severe drought, the leaf area and SPAD value of flag leaf decreased significantly, and the fluorescence parameters of flag leaf also decreased significantly. The Φ_{PSII} and qP of ‘Xinong 106’ decreased even less. Under severe drought, MDA content in flag leaves of the two cultivars increased significantly, and antioxidant enzyme activities, soluble sugar and soluble protein contents also increased significantly. The results showed that 1 000-grain mass and yield of ‘Zhoumai 18’ and ‘Xinong 106’ decreased by 41.96% and 35.33%, 40.43% and 42.53%, respectively, after severe drought stress. Severe drought stress also resulted in a significant decrease in grain starch content and water absorption, while a significant increase in grain protein content, wet gluten content, volumic mass, stabilization time and sedimentation value. The results showed that ‘Xinong 106’ varieties showed better drought resistance in terms of fluorescence characteristics and yield traits.

Key words Wheat; Xinong 106; Drought stress; Grain filling stage; Physiological indexes; Yield; Quality

Received 2023-02-09 **Returned** 2023-03-24

Foundation item Key Research and Development Project of Shaanxi Province (No. 2022NY-172); Germplasm Resources Protection and Utilization Plan Project of Shaanxi Province (No. 20171010000004).

First author ZHANG Lining, female, master student. Research area: biology and genetic breeding of wheat. E-mail: 1161863038@qq.com

Corresponding author XI Yajun, male, professor, doctoral supervisor. Research area: biology and genetic breeding of wheat. E-mail: xiyajun11@126.com

(责任编辑:成敏 Responsible editor: CHENG Min)