

干旱胁迫对沙葱光合和生理指标的影响

张东¹, 旭花², 刘建文², 张凤兰¹, 张晓艳¹,
曹镇宇¹, 高嘉琦¹, 李佳乐¹, 杨忠仁¹

(1. 内蒙古农业大学园艺与植物保护学院 呼和浩特 010011; 2. 内蒙古阿拉善盟气象局 内蒙古阿拉善盟 750306)

摘要:为明确沙生蔬菜——沙葱(*Allium mongolicum* Regel)对干旱胁迫的光合响应机制及生理适应策略,为干旱半干旱地区沙葱节水栽培提供理论依据,以3年生沙葱实生苗为试材,采用盆栽控水法,设置4个干旱处理梯度:对照(土壤相对含水率78.00%,CK)、轻度胁迫(土壤相对含水率65.00%,LS)、中度胁迫(土壤相对含水率45.00%,MS)和重度胁迫(土壤相对含水率25.00%,SS),分析不同干旱胁迫对沙葱生长、光合特性及生理指标的影响。结果表明,与CK相比,LS处理根长显著降低了19.78%,株高稍高于CK;核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco)、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)、丙酮酸磷酸双激酶(PPDK)和NAD-苹果酸酶(NAD-ME)的活性分别提高了17.00%、12.98%、11.97%和87.12%;叶片和根中的可溶性糖含量则分别增加了24.17%和78.30%。而MS和SS处理沙葱生长受到抑制,其中,MS处理根长和株高较CK分别显著降低了27.24%和15.94%;SS处理根长和株高较CK分别显著降低了29.36%和21.19%,光系统II反应中心电子传递效率(ETR)较CK显著降低38.68%,PS II(光系统II)调节性能量耗散的量子产量[Y(NPQ)]较高。这些结果表明沙葱在MS和SS处理下不适宜生长,而LS处理通过提高叶片PEPC活性来维持代谢平衡,并将可溶性糖(果糖、蔗糖)向根部转运,从而增强根系对干旱胁迫的适应能力。综上,LS处理下沙葱表现为主动适应性,可在节水环境下的沙葱生产中推广应用。

关键词:沙葱;干旱胁迫;光合作用;生理指标

中图分类号:S633.9

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)06-201-07

Effects of drought stress on photosynthetic and physiological indices of *Allium mongolicum*

Zhang Dong¹, Xu Hua², Liu Jianwen², Zhang Fenglan¹, Zhang Xiaoyan¹, Cao Zhenyu¹, Gao Jiaqi¹, Li Jiale¹, Yang Zhongren¹

(1. College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Alxa League Meteorological Bureau, Alxa 750306, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to clarify the photosynthetic response mechanism and physiological adaptation strategy of *Allium mongolicum*, a sandy vegetable, in response to drought stress and to provide a theoretical basis for the water-saving cultivation of this species in arid and semi-arid areas, three-year-old seedlings of this species were used as test materials. Four drought treatment gradients were set up by pot culture and water control method, with soil relative water contents of 78.00% (CK), 65.00% (LS), 45.00% (MS) and 25.00% (SS), respectively. The results showed that compared with CK, the LS treatment significantly reduced root length by 19.78%, while plant height was slightly higher than that of CK. The activities of Rubisco, PEPC, PPDK, and NAD-ME increased by 17.00%, 12.98%, 11.97%, and 87.12%, respectively. Soluble sugar contents in leaves and roots increased by 24.17% and 78.30%, respectively. In contrast, the growth of *A. mongolicum* was inhibited under MS and SS treatments. Specifically, under SS treatment, root length and plant height decreased by 29.36% and 21.19%, respectively, compared with CK; the ETR of the photosystem II reaction center was lower than that of CK, and the quantum yield of regulated energy dissipation at PS II (Y(NPQ)) was 38.68% the highest. These results indicate that *A. mongolicum* is not suitable for growth under MS and SS treatments. Under LS treatment,

收稿日期:2025-10-16;修回日期:2025-12-30

基金项目:内蒙古自然科学基金(2025QN03014、2024LHMS03058);内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2025YFHH0171);阿拉善盟科技计划项目(AMKJ2025-10);内蒙古农业大学高层次及优秀博士人才引进科研启动项目(NDYB2023-49)

作者简介:张东,男,讲师,研究方向为园艺植物逆境生理和采后生物学。E-mail:zhang_dong163@163.com

通信作者:杨忠仁,男,教授,研究方向为蔬菜种质保存与育种。E-mail:yangzhongren_200@163.com

however, the plant maintains metabolic balance by increasing leaf PEPC activity and transports soluble sugars (fructose, sucrose) to the roots, thereby enhancing the adaptability of the root system to drought stress. In summary, under LS treatment, *A. mongolicum* exhibits active adaptability, making it suitable for promotion and application in water-saving production systems.

Key words: *Allium mongolicum*; Drought stress; Photosynthesis; Physiological indicator

干旱作为一种由长期水分亏缺引发的极端环境胁迫,已成为制约区域经济发展、破坏生态系统稳定并威胁人类健康的关键环境问题^[1]。受全球气候变暖加剧的影响,陆地水循环过程紊乱,导致全球范围内农业干旱与水文干旱事件的发生频率、强度及持续时间均显著上升,据预测,未来干旱胁迫的严峻性将进一步加剧,对陆地生态系统及农业生产构成更大威胁^[2]。在干旱胁迫下,植物光合系统首当其冲受到抑制,导致光能捕获、传递与转化过程失衡;为维持基本生长发育与产量形成,植物需从细胞结构、分子调控及生理生化代谢等多个层面启动协同响应机制,以缓解胁迫损伤^[3]。已有研究表明,干旱导致植物光合效率下降主要受气孔限制与非气孔限制2类因素调控:其中,气孔限制主要是气孔导度下降导致胞间CO₂供应不足,进而抑制碳同化过程;非气孔限制则与叶绿体结构被破坏、核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco)活性降低及1,5-双磷酸核糖(RuBP)再生效率降低等光合机构内在功能损伤密切相关^[4]。光合作用作为植物物质积累与能量代谢的核心过程,是作物产量形成的生理基础,其效率直接决定植物生长速率与生物量积累^[5]。在光能分配过程中,叶片吸收的光能除用于驱动光合作用(光化学反应)外,剩余部分主要通过叶绿素荧光发射或热能耗散2种途径释放^[6]。叶绿素荧光参数能实时反映光合机构的功能状态,已成为无损研究植物光合作用机制及胁迫响应的重要探针,其中最大光化学效率(F_v/F_m)可表征光合系统II(PSII)的潜在活性,非光化学猝灭(NPQ)则反映植物的光保护能力,二者均为评估胁迫损伤程度的关键指标^[7]。然而,传统叶绿素荧光测量需长达30 min以上的暗适应过程,极大地限制了其在野外大规模、快速动态监测中的应用;近年来,以连续监测型调制叶绿素荧光仪(MONI-PAM)为代表的新型脉冲调幅荧光监测系统有效突破这一局限,可在无需暗适应的条件下实现光合荧光参数的快速、精准测定,为干旱胁迫下植物光合动态研究提供了技术支撑^[8]。

沙葱(*Allium mongolicum* Regel),又名蒙古韭,是石蒜科葱属多年生草本植物,主要自然分布于半荒漠带固定沙地、干旱草原及荒漠草甸等干旱半干

旱沙生环境中^[9],兼具药食同源特性与重要生态价值。作为食材,其富含多种氨基酸、维生素及矿物质等营养成分,风味独特;作为生态修复物种,其发达的须根系可增强土壤的固沙能力、改善沙区微环境,是干旱沙区生态系统稳定的重要维持者。近年来,随着对沙葱食用、药用及生态应用价值的深度挖掘,市场需求持续增长,加之过度采挖与极端干旱等环境胁迫导致野生沙葱资源量急剧下降,已无法满足产业化发展需求,因此开展沙葱人工驯化与规模化种植成为必然趋势。目前,已有研究初步揭示了沙葱的抗旱潜力,马全林等^[10]通过生境调查与适应性分析发现,沙葱对大气干旱与土壤干旱均表现出较强的耐受性,可在年降水量低于40 mm的极端干旱区域自然分布;严子柱等^[11]借助叶片组织切片技术进一步证实,沙葱叶片具有肉质化、角质层增厚等典型抗旱结构特征,这些结构特性是其在极端干旱荒漠区得以存活与繁衍的重要基础。然而,受限于沙葱叶片呈圆柱状的特殊形态结构,传统基于扁平叶片设计的光合参数测定方法难以直接应用,导致目前针对沙葱光合作用特性,尤其是干旱胁迫下光合系统响应机制的研究仍较为匮乏。因此,本研究以沙葱为研究对象,借助脉冲调幅荧光仪(MONI-PAM)测定干旱胁迫下沙葱的叶绿素荧光参数,并结合关键光合生理指标分析,系统揭示干旱胁迫对沙葱光合系统功能的影响机制。以期沙葱人工种植中的水分管理策略优化及抗旱品种选育提供理论支撑,同时丰富干旱半干旱地区沙生植物光合适应机制的研究内容。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2024年6—10月在内蒙古农业大学教学园区进行。试验材料为3年生沙葱(沙珍C-1)实生苗,由内蒙古农业大学选育。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计。挑选大小、长势均匀的3年生沙葱苗移栽于塑料花盆(高20 cm,直径22 cm)中,每盆填充7 kg培养基质,基质为细沙:营养土=5:3(V/V),每盆定植壮苗8株,放在人工培养室统一管理。植株生长30 d时开始进行胁迫处理,

设4个处理,分别是正常供水(对照,CK)、轻度胁迫(LS)、中度胁迫(MS)和重度胁迫(SS),土壤相对含水量(SRWC)分别为 $78.00\% \pm 3.42\%$ 、 $65.00\% \pm 1.56\%$ 、 $45.00\% \pm 1.89\%$ 、 $25.00\% \pm 2.46\%$ 。每个处理3盆,3次重复。采用称质量法控制土壤水分含量^[12],各处理均于每天18:00补充水分至相应土壤含水量,在第10天时安装叶绿素荧光测定装置(每1h读取1次数据),观察外侧功能叶中部荧光参数变化情况,15d后当不同干旱胁迫处理的植株叶片

受害程度出现明显差异时结束试验,同时读取当天记录数据,并将同盆植株叶、根分离,液氮速冻,-80℃冰箱贮存,用于C₄光合酶活性和糖类含量指标测定。试验结束时不同处理沙葱植株如图1所示。

1.3 测定方法

1.3.1 形态指标的测定 试验结束时,将不同处理的沙葱植株样品洗净,沥干水分,使用直尺测量沙葱根长(从根茎基部到最长根尖长度)和株高(茎盘

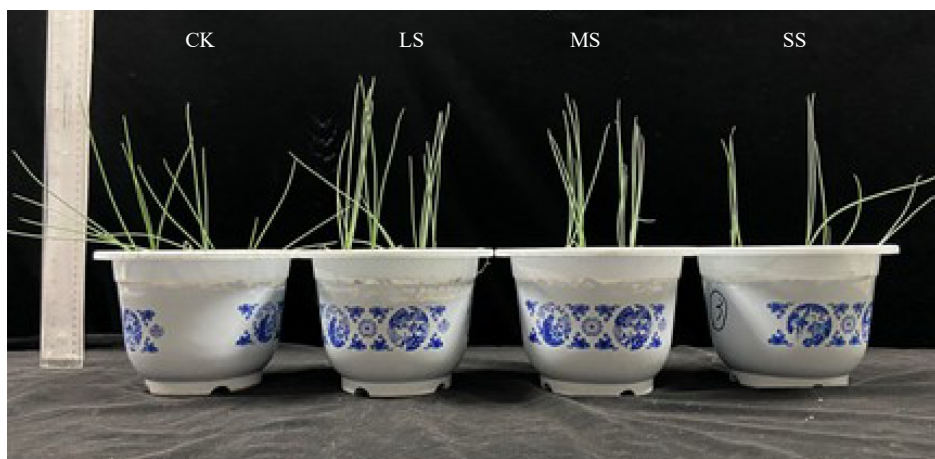


图1 干旱胁迫处理后沙葱外部形态

Fig. 1 The external morphology of *Allium mongolicum* under different drought stress

到叶片顶端的长度);将地上部分和地下部分烘干后分别称质量,计算根冠比^[13]。

1.3.2 叶绿素荧光参数测定 参考Pan等^[14]和Yuan等^[15]的方法,利用多通道连续监测荧光仪(MONI-PAM,德国Heinz Walz GmbH)测量沙葱植株成熟叶的初始荧光值(F_0)、最大荧光值(F_m)、稳态荧光(F_s)、光下最小荧光值(F_0')、光下最大荧光值(F_m')、电子传递速率(ETR)、光系统II(PSII)有效量子产量 $Y(II)$ 和光合有效辐射(PAR)。通过公式^[16-17]计算其他的荧光参数来估计植物的胁迫反应,计算方法如下:

$$\text{PSII最大光化学效率 } F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m; \quad (1)$$

$$\text{非光化学淬灭系数 } NPQ = (F_m - F_m')/F_m'; \quad (2)$$

$$\text{光化学淬灭系数 } qP = (F_m - F_s)/(F_m' - F_0'); \quad (3)$$

$$\text{稳态作用光下 PSII有效光量子产量 } F_v'/F_m' = (F_m' - F_0')/F_m'; \quad (4)$$

$$\text{PSII有效量子产量 } Y(II) = (F_m' - F_s)/F_m'; \quad (5)$$

$$\text{PSII调节性能量耗散的量子产量 } Y(NPQ) = 1 - Y(II) - 1/[NPQ + 1 + qP \times F_0'/F_s \times (F_m/F_0 - 1)]; \quad (6)$$

$$\text{非调节性能量耗散的量子产量 } Y(NO) = 1/[NPQ + 1 + qP \times F_0'/F_s \times (F_m/F_0 - 1)]. \quad (7)$$

1.3.3 C₄光合酶活性和糖类含量的测定 取0.1g新鲜叶片,在冰上迅速剪碎并装进预冷的研磨管中,加入1mL酶提取液,放入低温研磨机中研磨(60Hz,20min),研磨完成后放在低温离心机离心(4℃,12000r·min⁻¹,30min),上清液即为酶活性待测液。参照苏州格锐思生物科技有限公司生产的试剂盒(G0602W、G0606W、G0611W、G1214W、G0820W、G0821W、G0818W、G0819W)说明书分别测定核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(rubisco)、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)、丙酮酸磷酸双激酶(PPDK)、乙醇酸氧化酶(GO)、NADP-苹果酸脱氢酶(NADP-MDH)、NAD-苹果酸脱氢酶(NAD-MDH)、NADP-苹果酸酶(NADP-ME)、NAD-苹果酸酶(NAD-ME)活性。每个指标3次重复。

参照苏州格锐思生物科技有限公司生产的试剂盒说明书分别测定沙葱根和叶片中果糖(G0505F)、蔗糖(G0506F)、还原性糖(G0502F)和可溶性糖(G0501F)含量。每个指标3次重复。

1.4 数据分析

采用Excel 2013整理试验数据;采用SPSS 21.0软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对沙葱形态指标的影响

如表 1 所示,随干旱胁迫程度的加剧,沙葱根长逐渐降低。与 CK 相比,LS、MS 和 SS 处理的根长分别显著降低了 19.78%、27.24%和 29.36%。LS 处理株高稍高于 CK,但与 CK 差异不显著;MS 和 SS 处理株高较 CK 分别显著降低了 15.94%和 21.19%。随干旱胁迫程度的加剧,根冠比呈逐渐增大趋势,其中 MS 和 SS 处理较 CK 分别显著增加了 84.76%和 95.24%。

表 1 不同干旱胁迫对沙葱形态指标的影响
Table 1 Effects of different drought stresses on morphological indicators and root-shoot ratio of *A. mongolicum*

处理 Treatment	根长 Root length/cm	株高 Plant height/cm	根冠比 Root-shoot ratio
CK	12.74±2.71 a	17.13±0.71 a	1.05±0.32 b
LS	10.22±1.44 b	17.18±1.32 a	1.33±0.65 b
MS	9.27±0.44 b	14.40±1.59 b	1.94±0.86 a
SS	9.00±0.97 b	13.50±1.49 b	2.05±0.40 a

注:同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

2.2 干旱胁迫对沙葱叶片荧光参数的影响

由表 2 可知,随着干旱胁迫程度的加剧,沙葱叶片 F_o 、 F_m 、 F_o' 、 F_m' 均呈先升高后降低的趋势。与 CK 相比,LS 和 MS 处理沙葱叶片 F_o 、 F_m 、 F_o' 和 F_m' 均显著高于 CK,而 SS 处理沙葱叶片 F_m 和 F_m' 均显著低于 CK。随着干旱胁迫程度的加剧,沙葱叶片 PAR 逐渐降低的趋势,ETR 呈先降低后升高再降低

趋势。其中 LS、MS 和 SS 处理 PAR 分别较 CK 显著降低了 13.07%、15.79%、48.64%,LS、MS 和 SS 处理 ETR 分别较 CK 显著降低了 22.38%、14.58%、38.68%。各干旱胁迫处理沙葱的 qP 与 CK 差异均不显著。4 个处理中,SS 处理的 F_v/F_m 和 $Y(II)$ 均最低,均显著低于 CK,说明光系统 II 反应中心受到伤害。LS 处理的 NPQ 显著高于 CK,说明沙葱可通过增加热耗散来避免干旱胁迫对光合系统的伤害,从而减轻自身在干旱胁迫下的光抑制。

2.3 干旱胁迫对沙葱 C_4 光合酶活性的影响

由表 3 可知,随着干旱胁迫程度的加剧,Rubisco、PPDK、PEPC 和 NAD-ME 活性均呈先升高后降低的趋势,其中 LS 处理 PPDK 和 NAD-ME 活性均最高,较 CK 分别增加了 11.97%和 87.12%;MS 处理 Rubisco 和 PEPC 活性均最高,较 CK 分别显著增加了 49.80%和 20.40%。而 NADP-ME 和 NAD-MDH 活性均随干旱胁迫程度的加剧呈逐渐降低趋势,其中 LS 处理 NADP-ME 和 NAD-MDH 活性较 CK 分别降低了 15.31%和 20.10%,MS 处理较 CK 分别显著降低了 21.50%和 31.30%,SS 处理较 CK 分别显著降低了 27.50%和 43.50%;GO 活性随干旱胁迫程度的加剧呈先降低后升高趋势,且 LS、MS 和 SS 处理均显著低于 CK,分别较 CK 降低了 40.50%、25.10%和 18.80%。

2.4 干旱胁迫对沙葱糖类含量的影响

由表 4 可知,干旱胁迫处理叶片果糖和还原性糖含量均较 CK 显著降低,而叶片蔗糖和可溶性糖含量均随干旱胁迫加剧持续升高。其中,LS 处理叶片中可溶性糖、蔗糖含量较 CK 分别增加了 24.17%、19.23%;MS 处理叶片可溶性糖、蔗糖含量均显著高于 CK,分别较 CK 增加了 160.77%,

表 2 不同干旱胁迫对沙葱叶绿素荧光参数的影响
Table 2 Effects of different drought stresses on chlorophyll fluorescence parameters of *A. mongolicum*

处理 Treatment	F_o	F_m	F_o'	F_m'	PAR	F_v/F_m
CK	23.50±0.58 d	194.00±2.83 c	26.50±3.42 c	179.50±24.28 b	137.75±4.11 a	0.88±0.003 a
LS	70.25±2.63 a	374.00±1.63 a	61.75±5.56 a	263.50±16.65 a	119.75±1.50 b	0.81±0.007 b
MS	39.25±0.96 b	312.00±9.11 b	39.50±11.09 b	293.25±11.20 a	116.00±2.83 b	0.87±0.006 a
SS	32.00±2.58 c	139.50±11.9 d	35.50±5.45 bc	111.75±3.86 c	70.75±1.50 c	0.77±0.021 c
处理 Treatment	ETR	qP	NPQ	$Y(II)$	$Y(NO)$	$Y(NPQ)$
CK	49.38±7.62 a	0.999±0.000 4 a	0.13±0.12 bc	0.85±0.02 a	0.132±0.012 7 b	0.017±0.009 b
LS	38.33±2.16 b	0.995±0.000 2 a	0.42±0.19 a	0.76±0.04 b	0.168±0.015 2 b	0.070±0.034 a
MS	42.18±1.58 b	1.001±0.000 3 a	0.06±0.05 c	0.87±0.03 a	0.126±0.033 2 b	0.008±0.007 b
SS	20.28±1.39 c	1.000±0.000 6 a	0.25±0.12 b	0.68±0.04 c	0.254±0.045 0 a	0.063±0.028 a

表 3 不同干旱胁迫对沙葱叶 C₄光合酶活性的影响
Table 3 Effects of different drought stresses on activites of C₄ photosynthetic enzymes of *A. mongolicum* leaves (nmol·g⁻¹·min⁻¹)

处理 Treatment	Rubisco 活性 Rubisco activity	PPDK 活性 PPDK activity	PEPC 活性 PEPC activity	NADP-ME 活性 NADP-ME activity
CK	29.17±1.67 bc	254.42±5.46 a	333.66±10.76 b	497.97±29.61 a
LS	34.13±1.23 b	284.88±11.19 a	376.96±10.27 ab	421.73±25.12 b
MS	43.70±2.05 a	202.81±12.30 b	401.82±22.85 a	390.67±17.23 bc
SS	23.74±1.83 c	120.01±14.77 c	371.44±10.24 ab	361.02±12.55 c
处理 Treatment	NAD-ME 活性 NAD-ME activity	NAD-MDH 活性 NAD-MDH activity	NADP-MDH 活性 NADP-MDH activity	GO 活性 GO activity
CK	140.89±20.13 b	5.65±0.51 a	114.45±6.77 a	531.97±16.24 a
LS	263.64±32.60 a	4.47±0.30 ab	85.63±4.3 b	316.41±6.41 c
MS	189.00±8.07 ab	3.88±0.14 bc	118.62±7.97 a	398.66±18.48 b
SS	21.20±6.12 c	3.19±0.21 c	73.48±8.83 b	432.02±12.78 b

94.02%;SS 处理叶片可溶性糖、蔗糖含量均显著高于 CK,分别较 CK 增加了 212.89%,167.38%。
各干旱胁迫处理根中果糖、蔗糖和可溶性糖含量均显著高于 CK,其中 LS 处理较 CK 分别显著增加了 143.80%、115.16%和 78.30%;MS 处理果糖含量(w,后同)最高,为 1.418 mg·g⁻¹,较 CK 显著

增加了 308.65%。另外,随干旱胁迫加剧,根系蔗糖和可溶性糖含量均持续显著上升,且增幅均远大于叶片。

3 讨论与结论

叶片是植物的主要光合器官,叶绿素荧光检测

表 4 不同干旱胁迫对沙葱糖类含量的影响
Table 4 Effects of different drought stresses on carbohydrate contents of *A. mongolicum* (mg·g⁻¹)

部位 Part	处理 Treatment	w(果糖) Fructose content	w(蔗糖) Sucrose content	w(还原性糖) Reducing sugar content	w(可溶性糖) Soluble sugar content
叶 Leaf	CK	0.674±0.033 a	0.702±0.048 c	2.326±0.164 a	3.379±0.520 c
	LS	0.412±0.027 b	0.837±0.080 c	1.878±0.143 b	4.196±0.257 c
	MS	0.404±0.072 b	1.362±0.196 b	1.718±0.109 b	8.811±0.486 b
	SS	0.453±0.063 b	1.877±0.060 a	1.418±0.149 c	10.572±1.420 a
根 Root	CK	0.347±0.041 c	1.082±0.220 d	1.553±0.060 a	9.342±1.137 d
	LS	0.846±0.151 b	2.328±0.492 c	1.574±0.084 a	16.656±1.750 c
	MS	1.418±0.205 a	4.888±0.356 b	1.507±0.037 a	24.703±3.102 b
	SS	0.989±0.043 b	5.926±0.267 a	1.216±0.091 b	42.356±4.101 a

是一种非侵入性技术,测量叶绿素荧光参数,常用于记录植物在不同胁迫条件下的生理变化^[18]。叶绿素荧光指标能够直观体现植物光合潜力与光化学耗散特性,可明确 PSII 活性占比、捕光复合体光能捕获效能,以及光能在光合系统内的量子传递效率^[19]。叶片光合色素所捕获的光能主要通过光合电子传递、叶绿素荧光发射以及热耗散这 3 种途径进行消耗,而光合作用、热耗散途径将导致荧光参数也发生相应变化^[20],故而可通过观测叶绿素荧光参数的变化来对植物光合作用和热耗散的情况进行探究。叶绿素荧光参数中 PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)

是指开放的 PSII 反应中心捕获激发能的效率^[21],在适宜环境条件下,植物的 F_v/F_m 为 0.75~0.85,较高的 F_v/F_m 值则表明叶片光能转化效率更高,植株对环境变化的适应能力就更强^[22]。非光化学猝灭系数(NPQ)是指 PSII 天线色素所吸收的光能以热耗散的形式进行消耗掉的部分^[23]。干旱胁迫会影响植物的光合系统,从而改变叶绿素 a 荧光动力学特征^[24]。在本研究中,LS 处理沙葱叶片 $Y(II)$ 、ETR、 F_v/F_m 和 qP 均低于 CK,表明干旱胁迫迫使 PS II 光化学量子产量下降,光化学效率降低,PSII 反应中心的开放比例降低,干旱胁迫下光合机构光抑制

程度加剧,从而引起叶片的净光合速率下降。这与 Maroco 等^[25]研究一致,水分胁迫下,光合作用的光响应(F_v/F_m 和 $Y(II)$)显著降低。MS和SS处理沙葱叶片ETR均较CK显著降低,表明叶片光合电子传递受损。

热耗散可以防御过剩光能的破坏,提高植物的抗逆性,热耗散的程度可用荧光的NPQ来检测^[26]。本试验中,SS处理沙葱叶片的NPQ高于CK,说明在重度干旱胁迫发生时沙葱可能有较强的非光化学猝灭机制以耗散过剩的光能,把吸收的光能以热能的形式散失而不发生光化学反应,从而减少活性氧自由基的生成,对光合机构起一定保护作用。

干旱条件下,植物代谢过程的变化对光合作用的影响比气孔限制对光合作用的影响要复杂得多,干旱降低了碳同化及利用能力。Rubisco作为光合碳同化的关键酶,对净光合速率有决定性的影响^[27-28]。在 C_4 途径中,进入叶肉细胞的 CO_2 在细胞质中被催化为 HCO_3^- ,然后在PEPC的催化下,形成草酰乙酸,调节碳通量,进而调节碳氮平衡^[29]。本试验中,与CK相比,LS处理的Rubisco、PEPC、PPDK和NAD-ME活性分别提高了17.00%、12.98%、11.97%和87.12%;MS处理Rubisco和PEPC活性均显著高于CK,这与李君艳等^[30]的研究结果一致。然而,在SS处理中,除PEPC外, C_4 光合酶活性均低于CK,这也反映了 C_4 光合酶在沙葱抗旱机制中发挥着重要作用。

糖代谢作为植物代谢网络的核心环节,为生命活动提供必需的能量和碳骨架^[31]。研究表明,植物在应对环境胁迫时会主动调控糖代谢途径,通过积累可溶性糖维持细胞渗透平衡。这种适应性机制能够有效保持细胞膨压,防止原生质体脱水,从而减轻胁迫造成的损伤^[32]。糖作为植物生长的关键物质,在植物生理代谢中发挥着重要作用。植物体内的糖类主要包括单糖(葡萄糖、果糖)、双糖(蔗糖)和多糖(纤维素、淀粉)。其中葡萄糖和果糖是主要参与细胞能量供应的还原糖^[33]。研究表明,在水分亏缺下多花早熟禾中葡萄糖和果糖的积累被证实参与渗透调节^[34];同样,甘草叶中可溶性糖在干旱胁迫下参与渗透调节,且蔗糖、葡萄糖和果糖含量达到峰值时的胁迫程度存在差异^[35]。本研究发现,在干旱胁迫下,沙葱表现出可溶性糖积累现象,这与前人研究发现糖类物质的积累不仅为细胞提供保护性渗透调节物质,同时也为胁迫条件下的能量供应提供了保障这一结果一致^[36-37]。

综上,沙葱在轻度干旱胁迫(LS处理)下通过提高叶片PEPC活性来维持代谢平衡,并将可溶性糖(果糖、蔗糖)向根部转运,从而增强根系对干旱胁迫的适应能力,表现为主动适应性,可在节水环境下的沙葱生产中推广应用。

参考文献

- [1] Ault T R. On the essentials of drought in a changing climate[J]. Science, 2020, 368(6488): 256-260.
- [2] Yuan X, Wang Y M, Ji P, et al. A global transition to flash droughts under climate change[J]. Science, 2023, 380(6641): 187-191.
- [3] 代惠萍. 植物对非生物胁迫的生理响应机制[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2013.
- [4] 许大全. 气孔的不均匀关闭与光合作用的非气孔限制[J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(4): 246-252.
- [5] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982(33): 317-345.
- [6] David M K, Giles J, Olavi K, et al. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes[J]. Photosynthesis Research, 2004, 79(2): 209.
- [7] Li G L, Wu H X, Sun Y Q, et al. Response of chlorophyll fluorescence parameters to drought stress in sugar beet seedlings[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2013, 60(3): 337-342.
- [8] Porcar-castell A, Pfündel E, Korhonen J F J, et al. A new monitoring PAM fluorometer (MONI-PAM) to study the short- and long-term acclimation of photosystem II in field conditions[J]. Photosynthesis Research, 2008, 96(2): 173-179.
- [9] 张东, 张凤兰, 杨忠仁, 等. Ce^{3+} 和 La^{3+} 对人工老化沙葱种子活力及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(1): 87-94.
- [10] 马全林, 刘世增, 严子柱, 等. 沙葱的抗旱性特征[J]. 草业科学, 2008(6): 56-61.
- [11] 严子柱, 满多清, 李得禄. 沙葱(*Allium moogolicum*)解剖结构与抗旱性[J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 890-894.
- [12] Zhang D, Yang Z R, Song X Q, et al. TMT-based proteomic analysis of liquorice root in response to drought stress[J]. BMC Genomics, 2022, 23(1): 524-524.
- [13] 吴小芳, 吴彬, 龙海波, 等. 腐殖酸类营养型改良液对番茄幼苗生长的影响及防控根结线虫效果评价[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(11): 43-47.
- [14] Pan X X, Wu H, Hu M Y, et al. Global analysis of gene expression profiles in glutinous rice 89-1 (*Oryza sativa* L.) seedlings exposed to chilling stress[J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2021, 39(3): 1-14.
- [15] Yuan Y H, Shu S Y, Li S H, et al. Effects of exogenous Putrescine on chlorophyll fluorescence imaging and heat dissipation capacity in cucumber (*Cucumis sativus* L.) under salt stress[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2014, 33(4): 798-808.
- [16] Wu X Y, Shu S, Wang Y, et al. Exogenous putrescine alleviates photoinhibition caused by salt stress through cooperation with cyclic electron flow in cucumber[J]. Photosynth Research,

- 2019, 141(3):303-314.
- [17] Janka E, Körner O, Rosenqvist E, et al. Using the quantum yield-sof photosystem II and the rate of net photosynthesis to monitor high irradiance and temperature stress in chrysanthemum (*Chrysanthemum grandiflora*) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2015(90):14-22.
- [18] Kałużewicz A, Bączek-kwinta R, Krzesiński W, et al. Effect of biostimulants on chlorophyll fluorescence parameters of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) under drought stress and re-watering[J]. Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus, 2018, 17(1):97-106.
- [19] Ismael M, Hildo L, Llanos L M, et al. Canopy chlorophyll fluorescence applied to stress detection using an easy-to-build micro-lidar[J]. Photosynthesis Research, 2019, 142(1):1-15.
- [20] 刘建锋, 杨文娟, 史胜青, 等. 崖柏与侧柏光合特性和叶绿素荧光参数的比较研究[J]. 西北植物学报, 2011, 31(10):2071-2077.
- [21] 王建华, 任士福, 史宝胜, 等. 遮阴对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(7):1811-1817.
- [22] 吕芳德, 徐德聪, 侯红波, 等. 5种红山茶叶绿素荧光特性的比较研究[J]. 经济林研究, 2003, 21(4):4-7.
- [23] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4):444-448.
- [24] Zivcak M, Kalaji H M, Shao H B, et al. Photosynthetic proton and electron transport in wheat leaves under prolonged moderate drought stress[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2014(137):107-115.
- [25] Maroco J P, Rodrigues M L, Lopes C, et al. Limitations to leaf photosynthesis in field-grown grapevine under drought: metabolic and modelling approaches[J]. Functional Plant Biology, 2002, 29(4):451-459.
- [26] 王伟, 王岩, 梁变变, 等. 初花期喷钼对 UV-B 辐射增强下紫花苜蓿光合及荧光特性的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(4):230-239.
- [27] Andersson I, Backlund A. Structure and function of Rubisco[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2008, 46(3):275-291.
- [28] Spreitzer R J, Salvucci M E. Rubisco: Structure, regulatory interactions, and possibilities for a better enzyme[J]. Annual Review of Plant Biology, 2002, 53(1):449-475.
- [29] O'leary B, Park J, Plaxton W C. The remarkable diversity of plant PEPC (phosphoenolpyruvate carboxylase): Recent insights into the physiological functions and post-translational controls of non-photosynthetic PEPCs[J]. Biochemical Journal, 2011, 436(1):15-34.
- [30] 李君艳, 姚得秀, 郭晓磊, 等. 花后干旱对冬小麦光合、抗氧化特性和 C₄ 光合酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(1):49-57.
- [31] 苏静, 祝令成, 刘茜, 等. 果实糖代谢与含量调控的研究进展[J]. 果树学报, 2022, 39(2):266-279.
- [32] Zhu J K. Abiotic stress signaling and responses in plants[J]. Cell, 2016, 167(2):313-324.
- [33] Campos F G, Barzotto G R, Figueiredo I M, et al. Hydrogen peroxide and vitexin in the signaling and defense responses of passiflora incarnata under drought stress[J]. Plants, 2025, 14(13):2078.
- [34] Yu J D, Zhang R, Li X X, et al. Sugar metabolism and transport in response to drought - rehydration in poa pratensis[J]. Agronomy, 2025, 15(2):320.
- [35] 张东, 刘艳, 张晗, 等. 甘草叶片渗透调节物质及蔗糖代谢相关酶对干旱胁迫的响应特性[J]. 西北植物学报, 2020, 40(5):819-827.
- [36] 曾思棋, 杨模华, 喻勋林, 等. 干旱胁迫与复水对福建青冈幼苗生长和生理特性的影响[J]. 生态科学, 2026, 45(1):78-89.
- [37] 覃兰丽, 黄金秋, 李燕婷, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗生理生长的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(7):127-134.