



万子玮,张碧清,方圣.低钾胁迫对芝麻光合作用及叶片蔗糖代谢的影响[J].江西农业大学学报,2026,48(1):32-40.
WANG Z W,ZHANG B Q,FANG S.Effects of low potassium stress on leaf photosynthesis and sucrose metabolism in sesame seedling stage[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2026,48(1):32-40.

低钾胁迫对芝麻光合作用 及叶片蔗糖代谢的影响

万子玮^{1,2},张碧清¹,方 圣^{1*}

(1.江西农业大学 农学院/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室,江西 南昌 330045;2.华中农业大学 植物科学技术学院,湖北 武汉 430070)

摘要:【目的】旨在探究芝麻光合作用和叶片蔗糖代谢对低钾胁迫的响应机制。【方法】以低钾敏感型中芝9号(ZZ9)和耐低钾型WZM6为试验材料,采用营养液水培法,设置低钾和适钾处理,对芝麻苗期叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(rubisco)活性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、蔗糖含量、淀粉含量、蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性、蔗糖酸性转化酶(SAI)活性和蔗糖合成酶(SuSy)活性进行测定和分析。【结果】与适钾处理相比,低钾胁迫下,ZZ9品种的 P_n 、 G_s 、Rubisco活性、SPS活性、SuSy活性和可溶性蛋白含量显著下降,降幅分别为22.0%、18.2%、40.0%、24.0%、7.9%和25.5%;叶片可溶性糖含量、蔗糖含量、淀粉含量和SAI活性显著升高,增幅分别为110.0%、61.2%、38.1%和8.1%。WZM6品种在低钾胁迫下,叶片光合能力和蔗糖代谢相关指标变幅较小。此外,低钾敏感型ZZ9比耐低钾型WZM6的各项生理指标的胁迫系数的绝对值高,表明受低钾胁迫影响更大。【结论】低钾胁迫通过减弱光合作用、阻碍光合产物的运输及干扰蔗糖代谢途径影响芝麻苗期的生长发育。在品种ZZ9中,蔗糖代谢酶活性、光合能力和渗透调节物质对钾营养水平更加敏感,而在品种WZM6中,低钾胁迫对这些指标影响较小。

关键词:低钾胁迫;芝麻;苗期;光合特性;蔗糖代谢;胁迫系数

中图分类号:S565.3 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2026)01-0032-09

CSTR:32399.14.aauj.2026004



Effects of low potassium stress on leaf photosynthesis and sucrose metabolism in sesame seedling stage

WANG Ziwei^{1,2},ZHANG Biqing¹,FANG Sheng^{1*}

(1.School of Agriculture, Jiangxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Nanchang 330045, China; 2.College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

收稿日期:2025-09-06 修回日期:2025-10-25 接受日期:2025-11-01

基金项目:国家自然科学基金项目(32560512、32060438)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32560512,32060438)

作者简介:万子玮,硕士生,orcid.org/0009-0003-8431-0419,1853897782@qq.com;*通信作者:方圣,副教授,博士,主要从事作物栽培生理研究,orcid.org/0000-0002-5575-549X,Mozsheng@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Abstract: [Objective] To explore the response mechanisms of photosynthesis and leaf sucrose metabolism in sesame to low potassium (K) stress. [Method] The hydroponic experiment was conducted with the low-K sensitive cultivar Zhongzhi No. 9 (ZZ9) and low-K tolerant WZM6 selected as the materials. The leaf net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductivity (G_s), and the activities of 1,5-ribulose diphosphate carboxylase (Rubisco), sucrose phosphate synthase (SPS), sucrose acid invertase (SAI), sucrose synthase (SuSy) as well as the content of soluble sugar, soluble protein, sucrose, starch of sesame seedlings were analyzed in response to low K and normal K conditions. [Result] Compared with the normal K treatment, the P_n , G_s , and activities of Rubisco, SPS, SuSy and soluble protein content of the ZZ9 cultivar significantly decreased by 22.0%, 18.2%, 40.0%, 24.0%, 7.9% and 25.5% respectively; while the contents of soluble sugar, sucrose, starch and SAI activity in leaves significantly increased by 110.0%, 61.2%, 38.1% and 8.1% respectively. The WZM6 cultivar showed smaller variations in leaf photosynthetic capacity and sucrose metabolism-related indicators under low K stress. Additionally, the absolute values of the stress coefficients of various physiological indicators of the low K-sensitive ZZ9 cultivar were higher than those of the low K-tolerant WZM6 cultivar, indicating that ZZ9 was more severely affected by low K stress. [Conclusion] Low K stress affects the growth and development of sesame seedlings by weakening photosynthesis, hindering the transport of photosynthetic products and interfering with the carbon metabolism pathway. The activities of sucrose metabolic enzymes, photosynthetic capacity and osmotic adjustment substances are more sensitive to K nutrition levels in ZZ9, while these indicators were minor changed by low-K stress in WZM6.

Keywords: low potassium stress; sesame; seedling stage; photosynthetic traits; sucrose metabolism; stress coefficient

【研究意义】芝麻(*Sesamum indicum* L.)是我国重要的油料作物,籽粒中含有丰富的蛋白质、维生素及矿物质等,具有重要的营养价值和经济价值^[1]。芝麻对钾肥需求较高,每生产 100 g 籽粒需吸收 K_2O 5.0~10.2 g^[2]。我国现有钾矿资源匮乏,加上长期以来农业生产不断发展,氮磷化肥施用日益增多,化学钾肥未受到重视,土壤钾素含量处于不断下降的状态,氮钾、磷钾失去平衡,导致生产力水平逐渐退化。钾肥施用能提高土壤水溶性钾和速效钾含量,并向缓效钾方向转化,从而有效维持和提高土壤供钾水平^[3]。【前人研究进展】钾是植物生长发育的营养和品质元素^[4],在蛋白质的合成、渗透调节、物质转运、调控酶活性和抗逆性等方面具有重要作用^[5]。低钾胁迫会破坏植物光合器官,增加气孔阻力,降低光合酶活性,从而影响植物的生长发育^[6-7]。蔗糖和淀粉在植物的能量储存、运输和代谢中具有重要作用,蔗糖是光合产物的主要运输形式,淀粉是光合产物主要储存形式,当植物光合作用受到干扰时,两者相互转化,满足植物能量需求^[8]。前人研究表明,缺钾使叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(rubisco)活性显著下降^[9],淀粉和蔗糖含量升高^[10]。低钾胁迫会造成植物细胞渗透压失衡和脱水,可溶性糖和可溶性蛋白可以维持植物细胞渗透压以保护植物细胞完整性^[11],不同植物存在不同渗透调节机制。在应对低钾胁迫时,花生通过增加可溶性蛋白含量以维持植物细胞的渗透压^[12],而玉米通过可溶性糖含量的增加来保护其细胞的完整性^[7]。植物蔗糖代谢的过程主要受到这些酶活性的影响,rubisco 是卡尔文循环的限速酶,蔗糖磷酸合成酶(SPS)催化蔗糖的合成,蔗糖酸性转化酶(SAI)负责不可逆的蔗糖水解,蔗糖合成酶(SuSy)负责可逆的蔗糖代谢(合成与水解)^[13]。钾能够调控这些酶的活性^[14],缺钾使冬小麦^[15]和棉花^[16]叶片 SPS 和 SuSy 活性下降;缺钾的大豆^[10]叶片 SAI 活性升高,而 SPS 活性下降。以上研究表明,低钾胁迫影响植物的光合作用及蔗糖代谢过程。

【本研究切入点】当前关于低钾胁迫影响芝麻苗期的光合作用及蔗糖代谢的研究鲜有报道,而且不同作物不同钾敏感型品种会对低钾环境做出不同的适应性策略。【拟解决的关键问题】本研究以前期试验筛选出的低钾敏感型中芝 9 号(ZZ9)和耐低钾型 WZM6 为供试材料,采用营养液水培法,设置低钾和适钾处理,研究低钾胁迫对芝麻苗期光合作用和蔗糖代谢的影响,分析不同钾敏感型品种光合作用及蔗糖代谢对低钾环境响应的差异,为制定钾高效栽培措施和提升芝麻耐低钾能力提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2024年9月在江西农业大学科技大楼进行,以低钾敏感型ZZ9和耐低钾型WZM6为供试材料,采用水培法对芝麻幼苗进行培养试验。在试验开始前,先用5% NaClO对芝麻种子进行消杀20 min,纯水清洗3次,然后放入洁净的石英砂中发芽(埋藏深度1 cm左右,石英砂用纯水冲洗)。在芝麻一对真叶展开后,选择生长状况良好一致的幼苗,移植到长×宽×高为40 cm×26 cm×15 cm的周转箱中。在箱子周围和底部覆盖一层黑色塑料袋,以保持根系处于黑暗环境,并用海绵条将幼苗固定在定植篮上。水培箱盛有14 L由去离子水配制成的改良Hoagland营养液^[17],每3天更换一次培养液。设置低钾和适钾处理,分别为添加0.2 mmol/L KCl和2 mmol/L KCl,用NaOH或HCl将培养液pH调至6.5。采用上述培养方法,每个品种每组重复3箱,每箱24株,培养过程中芝麻幼苗无病虫害症状,处理20 d后收获取样。

1.2 测定内容和方法

1.2.1 叶片光合特性的测定

选择天气晴朗无风的一天,在09:30—11:00选取各处理长势一致的第3对真叶,用LI-6400XT便携式光合测定系统测定各处理间 P_n 和 G_s 。测定时仪器使用开放式气路, CO_2 浓度为380 $\mu\text{mol/L}$,选择红蓝光源叶室(2 cm×5.5 cm),设定光量子密度(PAR)为1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,所测参数均重复3次。

1.2.2 蔗糖代谢相关物质及酶活性的测定

选取各处理中6株长势一致的芝麻幼苗,收集其第3对真叶,清洗并切成两半,然后将一半的叶片样本储存在-80 °C的环境中,用于测定蔗糖代谢相关酶的活性,另外一半叶片105 °C杀青后,在70 °C下烘干,用于蔗糖代谢相关物质的测定。参考Zhao等^[18]的方法,测定芝麻叶片中可溶性糖、蔗糖、淀粉含量。根据Du等^[19]的方法,分别测定蔗糖代谢相关酶的活性,包括SPS、SuSy和SAI。Rubisco则采用紫外分光光度法^[20]测定。

1.2.3 可溶性蛋白含量的测定

快速称取0.2 g叶片,于液氮中速冻后研磨成细粉,采用考马斯亮蓝法^[21]测定芝麻中可溶性蛋白含量。

1.3 数据处理和统计分析

利用SPSS 25.0软件进行双因素方差分析。应用Origin 2021(OriginLab, MA, USA)进行数据处理和图形绘制,并计算各指标平均值与胁迫系数(CS), $CS=(HK-LK)/HK\times 100\%$ 。HK为适钾处理的某指标数值,LK为低钾处理的相应指标数值。CS为正值时,代表该项指标受低钾环境影响而降低;CS为负值时,代表该项指标受低钾环境影响而升高。胁迫系数的绝对值越大则代表受胁迫的程度越大,反之则越小^[22]。

2 结果与分析

2.1 低钾胁迫对芝麻苗期叶片生理生化特性的影响

低钾胁迫显著影响芝麻叶片蔗糖代谢相关物质和酶活性以及光合特性(表1)。叶片可溶性糖、可溶性蛋白、蔗糖、SPS、SAI、 G_s 存在品种间差异,而淀粉、SuSy和 P_n 不受品种影响。双因素方差分析结果表明,叶片可溶性糖、可溶性蛋白、蔗糖、淀粉、SuSy、SAI及 P_n 受钾水平和品种交互作用的显著影响。

2.2 低钾胁迫对芝麻苗期叶片光合特性的影响

由图1可知,适钾处理下芝麻苗期叶片的 P_n 和 G_s 均较高,低钾处理后不同品种芝麻的 P_n 和 G_s 均不同程度地下降,低钾敏感型ZZ9和耐低钾型WZM6的叶片 P_n 分别下降22.0%和10.5%, G_s 分别下降18.2%和14.5%。

2.3 低钾胁迫对芝麻苗期叶片Rubisco活性的影响

在适钾处理下,耐低钾型WZM6的Rubisco活性较强,在遭受低钾胁迫后,低钾敏感型ZZ9叶片的Rubisco活性显著下降40.0%,而耐低钾型WZM6叶片的Rubisco活性下降12.8%(图2)。

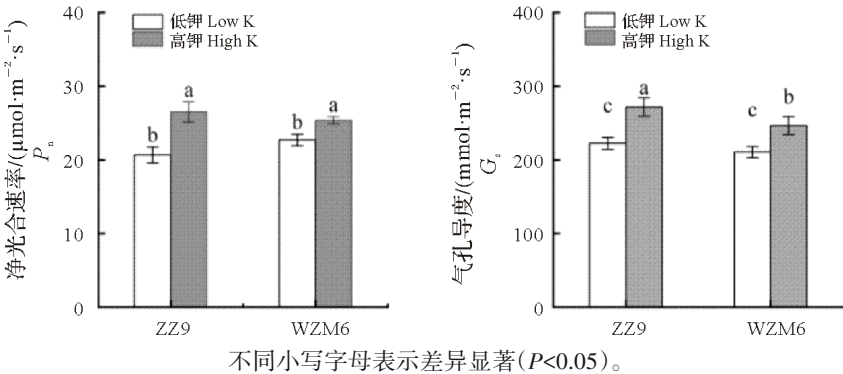
表1 品种(C)、钾(K)及其互作(C×K)对芝麻叶片蔗糖代谢相关性状的显著影响

Tab.1 Two-way ANOVA showing the significant effects of cultivar(C),potassium(K)and their interactions(C×K)on sucrose metabolism related traits in sesame leaf

因素 Factors	品种 F_C	钾 F_K	品种与钾交互 $F_{C \times K}$
可溶性糖/(mg·g ⁻¹) Soluble sugar	45.3**	3111.3**	265.0**
可溶性蛋白/(mg·g ⁻¹) Soluble protein	12.4*	69.6**	23.8**
蔗糖/(mg·g ⁻¹) Sucrose	94.8**	159.1**	45.9**
淀粉/(mg·g ⁻¹) Starch	0	110.8**	5.4*
蔗糖磷酸合成酶/(μg·min ⁻¹ ·g ⁻¹) SPS	16.3**	49.3**	2.2
蔗糖合成酶/(μg·min ⁻¹ ·g ⁻¹) SuSy	2.7	9.8*	5.9*
蔗糖酸性转化酶/(μg·min ⁻¹ ·g ⁻¹) SAI	10.1*	17.0**	8.2*
1,5-二磷酸核酮糖羧化酶/(nmol·min ⁻¹ ·g ⁻¹) Rubisco	75.9**	93.3**	20.8**
净光合速率/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹) P_n	0.5	46.0**	6.4*
气孔导度/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹) G_s	9.5*	50.3**	1.3

SPS:蔗糖磷酸合成酶;SuSy:蔗糖合成酶;SAI:蔗糖酸性转化酶;Rubisco:1,5-二磷酸核酮糖羧化酶; P_n :净光合速率; G_s :气孔导度。*和**分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 概率水平上差异显著。

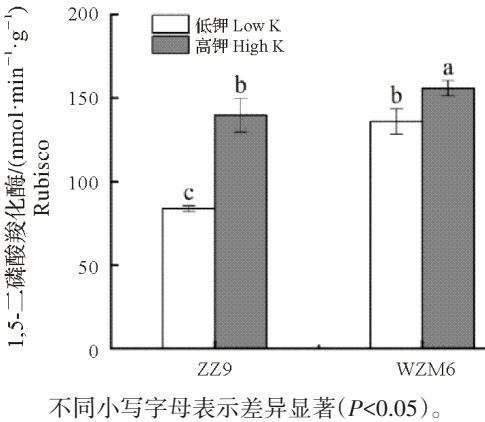
SPS: Sucrose phosphate synthase; SuSy: Sucrose synthase; SAI: Sucrose acid invertase; Rubisco: The activities of 1,5-ribulose diphosphate carboxylase; P_n : Net photosynthetic rate; G_s : Stomatal conductance.* and ** Indicates significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ probability level respectively.



The different lowercase letter indicated significant difference ($P<0.05$).

图1 低钾胁迫对芝麻苗期叶片净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)的影响

Fig.1 Effects of low potassium stress on the net photosynthetic rate(P_n)and stomatal conductance(G_s)of sesame seedling leaves



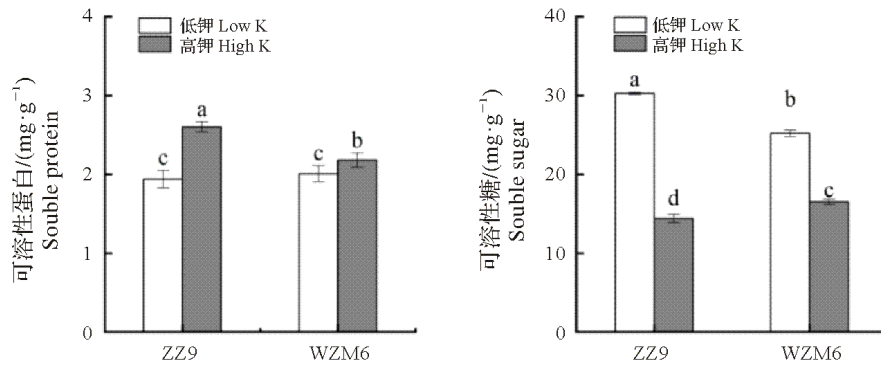
The different lowercase letter indicated significant difference ($P<0.05$).

图2 低钾胁迫对芝麻苗期叶片1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco)活性的影响

Fig.2 Effects of low potassium stress on the activity of 1,5-diphosphate carboxylase(Rubisco)in the leaves of sesame seedlings

2.4 低钾胁迫对芝麻苗期叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

与适钾处理相比,低钾处理下 2 个品种的可溶性糖含量均升高,可溶性蛋白含量均下降,处理间均达到显著差异水平(图 3)。相较于耐低钾型 WZM6,低钾处理下低钾敏感型 ZZ9 的可溶性糖含量增幅(110.0%)更高,而可溶性蛋白的降幅(25.5%)更高。



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

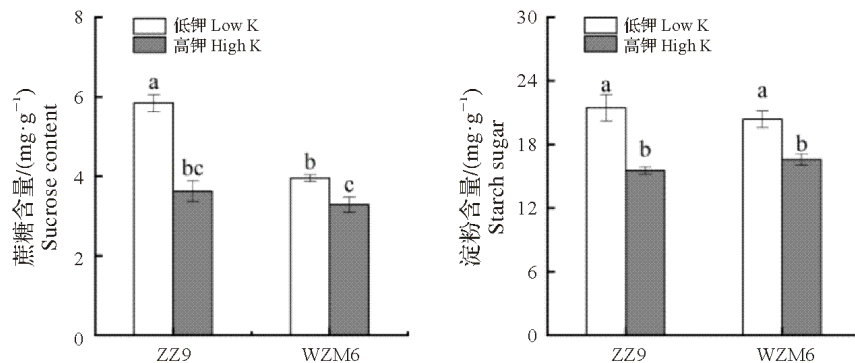
The different lowercase letter indicated significant difference($P < 0.05$).

图 3 低钾胁迫对芝麻苗期叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

Fig.3 Effects of low potassium stress on the contents of soluble protein and soluble sugar in the leaves of sesame seedlings

2.5 低钾胁迫对芝麻苗期叶片蔗糖和淀粉含量的影响

与适钾处理相比,低钾处理下 2 个品种蔗糖和淀粉含量均显著升高(图 4)。相较于耐低钾型 WZM6,低钾处理下低钾敏感型 ZZ9 的蔗糖(61.2%)和淀粉(38.1%)含量增幅更高。



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

The different lowercase letter indicated significant difference($P < 0.05$).

图 4 低钾胁迫对芝麻苗期叶片蔗糖和淀粉含量的影响

Fig.4 Effects of low potassium stress on sucrose and starch contents in leaves of sesame seedlings

2.6 低钾胁迫对芝麻苗期叶片蔗糖代谢相关酶活性的影响

由图 5 可知,适钾处理下芝麻苗期叶片的 SPS 和 SuSy 活性较高,而 SAI 活性较低,低钾处理后芝麻叶片的 SPS、SuSy 和 SAI 活性均呈现不同程度变化,其中耐低钾型 WZM6 叶片 SPS 活性总体变化较小,SuSy 和 SAI 活性无显著变化,而低钾敏感型 ZZ9 叶片的 SPS、SuSy 和 SAI 活性总体上变化显著。与适钾处理相比,低钾胁迫下低钾敏感型 ZZ9 叶片的 SPS 和 SuSy 活性分别下降 24.0% 和 7.9%,SAI 活性增加 8.1%。

2.7 不同钾敏感型芝麻苗期性状指标胁迫系数分析

低钾胁迫对芝麻苗期各项生理指标影响差异显著,低钾敏感型 ZZ9 比耐低钾型 WZM6 的各项生理指标的 CS 的绝对值大(图 6),其中 P_n 、 G_s 、Rubisco 活性和可溶性蛋白受低钾环境的胁迫程度分别为 22.0%、18.2%、40.0% 和 25.5%,而可溶性糖、蔗糖和淀粉的胁迫系数分别为 -110.0%、-61.2% 和 -38.1%。在植物蔗糖代谢关键酶活性中,耐低钾型 WZM6 的 SPS、SuSy 和 SAI 受低钾环境的胁迫程度分别为 18.5%、1.0% 和 -1.5%。

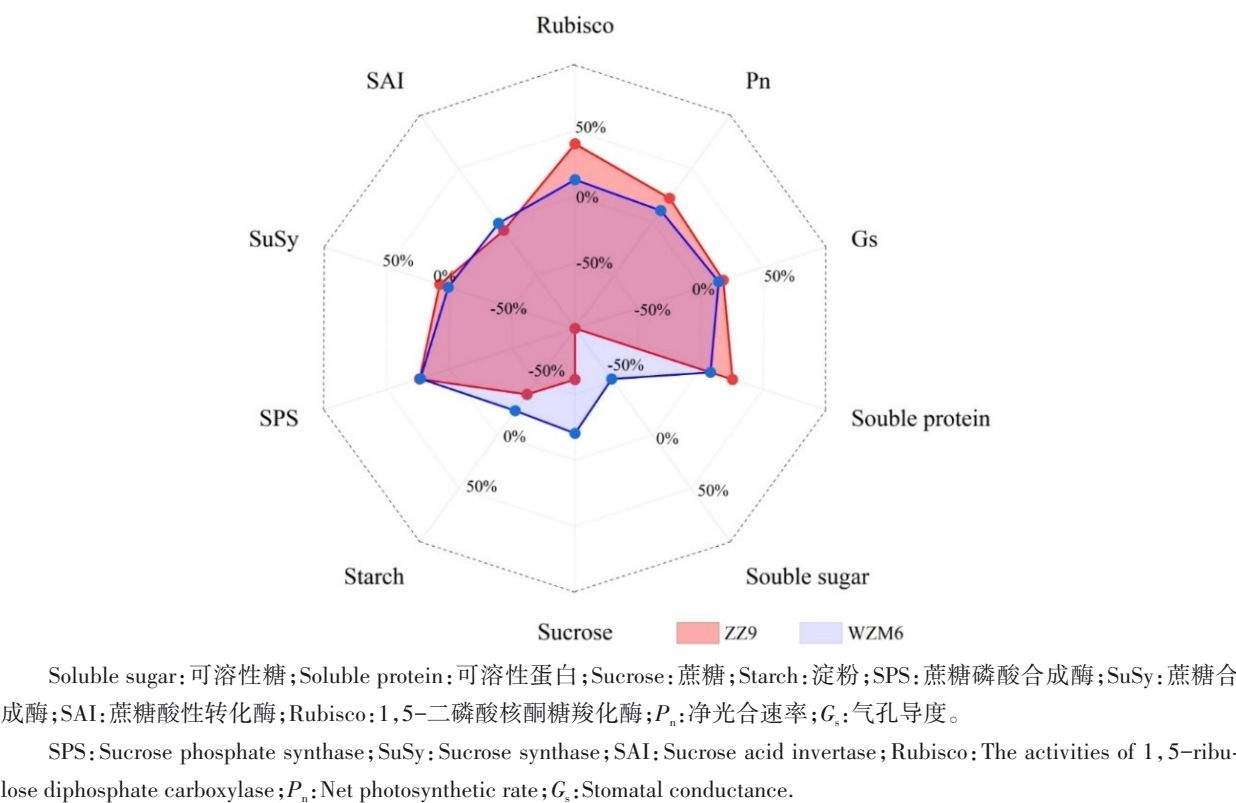
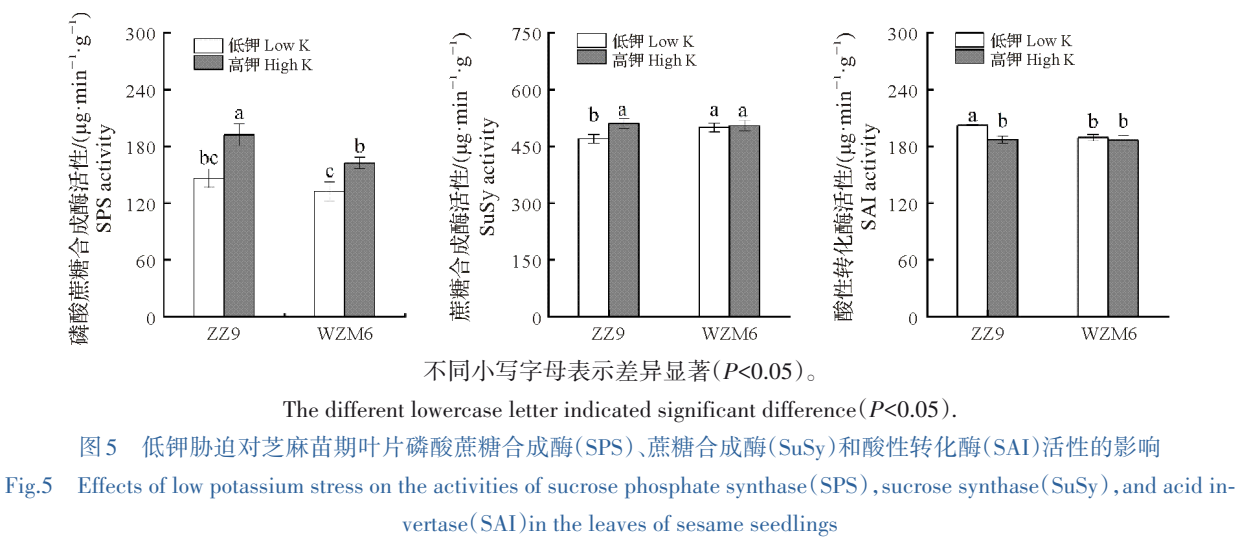


图6 不同钾敏感型芝麻苗期性状指标胁迫系数(CS)

Fig.6 Radar chart of stress coefficient (CS) of different potassium-sensitive sesame seedling trait indicators

3 讨论

钾是植物体内最丰富的无机离子,参与包括光合作用、碳水化合物代谢、蛋白质代谢等生理过程^[23]。苗期是研究作物生长发育对低钾胁迫响应的最佳时期,选择钾营养高效或耐低钾的基因型作物品种将是有效利用土壤钾素的重要措施^[23]。钾高效品种叶片生理代谢活跃,具有较高的钾吸收能力和转运速率,在供钾水平或叶钾含量较低时仍能维持较高的光合效率和碳同化量^[24]。本研究结果表明,低钾胁迫显著抑制了低钾敏感型 ZZ9 和耐低钾型 WZM6 芝麻苗期的叶片光合作用能力,表现为 P_n 、 G_s 和核酮糖-1,5-二磷酸脱羧化酶(rubisco)活性的显著下降,且低钾胁迫对低钾敏感型 ZZ9 的影响更为显著。这一结果与水稻^[6]、大豆^[9]和棉花^[25]等作物在低钾胁迫下的光合响应一致,说明钾在维持植物光合功能中具有普遍重要性。低钾胁迫下 G_s 的降低限制了 CO_2 的供应,这可能是导致 P_n 下降的原因之一(气孔限制)。此外,本研究中,低钾胁迫抑制了光合关键酶 Rubisco 的活性,加剧了光合作用的抑制(非气孔限制),耐低

钾型WZM6叶片的Rubisco活性下降幅度较小。在非生物胁迫下,植物细胞的渗透压会发生变化,通常植物体通过调节可溶性蛋白和可溶性糖等有机物来保护细胞结构^[26]。研究表明,低钾胁迫下芝麻叶片的可溶性糖含量显著升高,而可溶性蛋白含量显著下降,这说明芝麻在低钾胁迫下是通过提高可溶性糖含量维持其细胞结构稳定性。花生在低钾胁迫下则表现出可溶性蛋白含量的增加以维持其渗透势^[12]。关于低钾胁迫对植物叶片蛋白质含量的影响结论不统一,植株体内钾离子浓度与低分子量含氮化合物的合成有关^[27],不同作物对缺钾的敏感程度不同^[28]。

叶片蔗糖在Rubisco、磷酸蔗糖合成酶(SPS)、蔗糖合成酶(SuSy)等作用下合成并转移至其他器官,SuSy和SPS等调控蔗糖向蛋白质、油分积累的碳骨架(己糖)的降解转化^[29]。研究结果表明,低钾胁迫下芝麻叶片的SPS和SuSy活性降低,酸性转化酶(SAI)活性升高,表明蔗糖的合成途径受到了抑制,而蔗糖的水解途径增强,进而无法保障库器官充足的蔗糖供应,影响产量和品质^[30]。本研究中,低钾胁迫下芝麻叶片的蔗糖含量反而升高,这一研究结果与棉花^[16]和小麦^[15]等作物类似。钾离子梯度是韧皮部蔗糖运输的能量来源,低钾胁迫会直接抑制蔗糖从叶片运输到植物的其他部位^[31],说明芝麻叶片的蔗糖转运可能受到低钾胁迫的影响,滞留在叶片中,表现出蔗糖含量的升高,转运受阻的蔗糖就会被转化成淀粉储存在叶片当中,而本研究结果中芝麻叶片的淀粉含量也表现显著升高,这进一步印证了低钾胁迫阻碍芝麻光合产物的运输。钾是淀粉合成酶的活化剂,直接影响淀粉的生物合成。缺钾导致淀粉合成酶的活性增加^[32],淀粉含量增加,改变了光合产物在蔗糖与淀粉间的分配。低钾敏感型ZZ9的碳水化合物积累幅度和可溶性蛋白的降幅显著高于耐低钾型WZM6,其SPS、SuSy和Rubisco活性显著下降,SAI活性显著升高,表明低钾敏感型ZZ9在低钾环境下蔗糖代谢严重失调。

本研究还通过胁迫系数分析进一步量化了不同钾敏感型芝麻对低钾胁迫的响应差异,低钾敏感型ZZ9的各项生理指标的胁迫系数绝对值均高于耐低钾型WZM6,表明低钾敏感型ZZ9在光合作用和蔗糖代谢方面受低钾胁迫严重影响。耐低钾型WZM6通过维持较高的与蔗糖代谢相关酶的活性和较低的碳水化合物积累,表现出更强的耐低钾能力。这种差异可能与品种间钾吸收效率、钾利用效率和渗透调节能力的遗传特性有关^[33]。

4 结 论

低钾胁迫下,芝麻苗期叶片的 P_n 、 G_s 、Rubisco活性、SPS活性、SuSy活性和可溶性蛋白含量均有所降低,而可溶性糖含量、蔗糖含量、淀粉含量和SAI活性均有所升高。低钾敏感型芝麻ZZ9叶片生理生化指标在不同钾水平条件下差异显著。低钾胁迫通过减弱光合作用、抑制蔗糖代谢关键酶活性和阻碍光合产物的运输影响芝麻苗期的生长发育。

参考文献 Reference:

- [1] 邵家威,祁国栋,张桂香,等.芝麻的营养与功能价值评价研究进展[J].粮油食品科技,2019,27(6):86-92.
SHAO J W, QI G D, ZHANG G X, et al. Research progress of evaluation of nutrition and functional value of sesame[J]. Science and technology of cereals, oils and foods, 2019, 27(6): 86-92.
- [2] FANG S, YANG H Y, DUAN L C, et al. Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in sesame by enhancing photosynthesis and hormonal regulation[J]. Plant physiology and biochemistry, 2023, 200: 107744.
- [3] 张佳佳,丁文成,艾超,等.优化施肥对萝卜产量和肥料利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(2):187-199.
ZHANG J J, DING W C, AI C, et al. Effects of optimum fertilization practices on yield and nutrient use efficiency of radish[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2019, 25(2): 187-199.
- [4] FANG S, YANG H Y, TAO Y, et al. Sesame (*Sesamum indicum* L.) growth properties and yield attributes are associated with potassium level in response to drought stress[J]. Journal of plant nutrition, 2024, 47(9): 1364-1377.
- [5] LIU K L, HAN T F, HUANG J, et al. Response of soil aggregate-associated potassium to long-term fertilization in red soil[J]. Geoderma, 2019, 352: 160-170.
- [6] 刘淑军,李冬初,韩天富,等.稻草和紫云英协同还田下钾肥施用量对水稻产量及土壤供钾能力的影响[J].植物营养

- 与肥料学报, 2024, 30(3): 482-492.
- LIU S J, LI D C, HAN T F, et al. Effects of potassium input on rice yield and soil potassium supply capacity under the cooperative returning of rice straw and Chinese milk vetch[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2024, 30(3): 482-492.
- [7] LI Y F, YIN M Q, LI L L, et al. Optimized potassium application rate increases foxtail millet grain yield by improving photosynthetic carbohydrate metabolism[J]. Frontiers in plant science, 2022, 13: 1044065.
- [8] HU W S, LU Z F, MENG F J, et al. Potassium modulates central carbon metabolism to participate in regulating CO₂ transport and assimilation in *Brassica napus* leaves[J]. Plant science, 2021, 307: 110891.
- [9] WANG X G, ZHAO X H, JIANG C J, et al. Effects of potassium deficiency on photosynthesis and photoprotection mechanisms in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) [J]. Journal of integrative agriculture, 2015, 14(5): 856-863.
- [10] LI M X, PAN S C, LI N B, et al. Ionic homeostasis, carbohydrate metabolism, and oxidative balance underlie wild soybean resistance to low potassium stress[J]. Physiologia plantarum, 2025, 177(3): 70281.
- [11] FANG S, YANG H Y, WEI G W, et al. Potassium application enhances drought tolerance in sesame by mitigating oxidative damage and regulating osmotic adjustment[J]. Frontiers in plant science, 2022, 13: 1096606.
- [12] LIU Y Y, SONG P H, ZHANG Y C, et al. Physiological mechanism of photosynthetic, nutrient, and yield responses of peanut cultivars with different tolerances under low K stress[J]. Agronomy, 2023, 13(1): 185.
- [13] DU Y L, ZHAO Q, CHEN L R, et al. Effect of drought stress during soybean R2-R6 growth stages on sucrose metabolism in leaf and seed[J]. International journal of molecular sciences, 2020, 21(2): 618.
- [14] ZAHOOR R, DONG H R, ABID M, et al. Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism[J]. Environmental and experimental botany, 2017, 137: 73-83.
- [15] 刘晓伟, 王伟伟, 张浩月, 等. 土壤缺钾对冬小麦碳氮代谢的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 981-989.
- LIU X W, WANG W W, ZHANG H Y, et al. Effect of soil potassium deficiency on carbon and nitrogen metabolism in winter wheat[J]. Journal of triticeae crops, 2020, 40(8): 981-989.
- [16] 胡伟. 钾对棉铃对位叶碳氮代谢及抗氧化代谢的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- HU W. Effects of potassium on carbon, nitrogen and antioxidant metabolism in leaves subtending the cotton boll [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [17] 何斌, 万泽华, 万子玮, 等. 黑芝麻苗期耐低钾性状的综合分析[J]. 江西农业大学学报, 2025, 47(5): 1235-1244.
- HE B, WAN Z H, WAN Z W, et al. Comprehensive analysis of low potassium tolerance traits of black sesame seedlings [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2025, 47(5): 1235-1244.
- [18] ZHAO L J, XIE J F, ZHANG H, et al. Enzymatic activity and chlorophyll fluorescence imaging of maize seedlings (*Zea mays* L.) after exposure to low doses of chlorsulfuron and cadmium [J]. Journal of integrative agriculture, 2018, 17(4): 826-836.
- [19] DU Y L, ZHAO Q, CHEN L R, et al. Effect of drought stress at reproductive stages on growth and nitrogen metabolism in soybean [J]. Agronomy, 2020, 10(2): 302.
- [20] WANG H M, CHEN Y L, HU W, et al. Carbohydrate metabolism in the subtending leaf cross-acclimates to waterlogging and elevated temperature stress and influences boll biomass in cotton (*Gossypium hirsutum*) [J]. Physiology plantarum, 2017, 164(3): 339-354.
- [21] XIA H Q, XU T, ZHANG J, et al. Drought-induced responses of nitrogen metabolism in *Ipomoea batatas* [J]. Plants, 2020, 9(10): 1341.
- [22] 杨佳蒨, 赵文青, 胡伟, 等. 棉花苗期耐低钾能力筛选指标研究及其与产量、品质的关系[J]. 棉花学报, 2014, 26(4): 301-309.
- YANG J S, ZHAO W Q, HU W, et al. Indicators of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivar screening for low-potassium tolerance in seedling stage and its relationship with yield and quality [J]. Cotton science, 2014, 26(4): 301-309.
- [23] 张梓然, 郑德益, 涂子豪, 等. 钾营养对花期干旱胁迫芝麻生长及叶片氮代谢的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(9): 1782-1789.
- ZHANG Z R, ZHENG D Y, TU Z H, et al. Effects of potassium on growth and leaf nitrogen metabolism of sesame under drought stress at flowering stage [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2024, 38(9): 1782-1789.
- [24] WANG L, CHEN F. Genotypic variation of potassium uptake and use efficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*) [J]. Journal of plant nutrition and soil science, 2012, 175(2): 303-308.
- [25] 郝艳淑. 棉花钾素高效的生理机制及其施肥效应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.

- HAO Y S. Physiological mechanisms of high potassium efficiency and fertilization effects of cotton [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [26] 阳燕娟, 郭世荣, 李晶, 等. 嫁接对盐胁迫下西瓜幼苗生长和可溶性蛋白表达的影响[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(2): 54-60.
- YANG Y J, GUO S R, LI J, et al. Effects of grafting on the soluble protein expression in watermelon seedlings under salt stress[J]. Journal of Nanjing agricultural university, 2011, 34(2): 54-60.
- [27] GUAN K H, LI Y Y, ZHANG Y Y, et al. Transcriptomic and physiological insights into auxin-mediated root growth and potassium uptake in tobacco under low-potassium stress[J]. BMC plant biology, 2025, 25(1): 1-17.
- [28] KAYSAR M S, SARKER U K, MONIRA S, et al. Variations in root morphology and yield among rice varieties in response to potassium under subtropical conditions[J]. Sustainability, 2010, 15(11): 17.
- [29] FANG S, WAN Z H, SHEN T H, et al. Potassium attenuates drought damage by regulating sucrose metabolism and gene expression in sesame leaf[J]. Plant physiology and biochemistry, 2024, 209: 108547.
- [30] HU W S, LU Z F, MENG F J, et al. Potassium fertilization reduces silique canopy temperature variation in *Brassica napus* to enhance seed yield[J]. Industrial crops and products, 2021, 168: 113604.
- [31] GU H H, HE Z Y, LU Z F, et al. Growth and survival strategies of oilseed rape (*Brassica napus* L.) leaves under potassium deficiency stress: trade-offs in potassium ion distribution between vacuoles and chloroplasts[J]. The plant journal, 2025, 121(4): 70009.
- [32] GAJDANOWICZ P, MICHARD E, SANDMANN M, et al. Potassium (K^+) gradients serve as a mobile energy source in plant vascular tissues[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2011, 108(2): 864-869.
- [33] HU W, JIANG N, YANG J S, et al. Potassium (K) supply affects K accumulation and photosynthetic physiology in two cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars with different K sensitivities[J]. Field crops research, 2016, 196: 51-63.

(责任编辑: 张前锋)



第一作者简介: 万子玮, 硕士生, 2021—2025年就读于江西农业大学, 2025年至今就读于华中农业大学作物生理生态与栽培研究中心, 目前主要从事再生稻高产高效与生理生态研究, 发表论文1篇。本科期间获得1次校级一等奖学金、5次校级二等奖学金和1次校级三等奖学金, 2025年获研究生学业一等奖学金。



通信作者简介: 方圣, 副教授, 博士, 江西农业大学第十二批“未来之星”。主要从事作物生理生态与高产栽培技术等方面的教学与科研工作。近5年主持国家自然科学基金2项, 国家级一流课程1项, 江西省自然科学基金1项, 以第一/通讯作者发表高水平学术论文10余篇, 选育新品种2个。