

杜杰,谢安琦,夏清,等. 水分胁迫和复水对谷子生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(17):71-78.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.17.009

水分胁迫和复水对谷子生理特性的影响

杜杰,谢安琦,夏清,智慧,王文霞

(吕梁学院生物与食品工程系,山西吕梁 033000)

摘要:为阐明优质谷子品种对干旱胁迫及复水的生理响应机制,以晋谷 21 号为材料,通过盆栽试验,设置正常对照(CK)与干旱胁迫及复水处理(T1),分别测定干旱胁迫结束及复水 5、10 d 后谷子的氮含量、光合参数、叶绿素含量、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性及氮代谢酶活性等生理指标。结果显示,干旱胁迫结束后,与 CK 相比,T1 处理下叶片氮含量和叶绿素相对含量(SPAD 值)分别显著下降 38.11%、12.32% ($P < 0.05$);净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)分别显著降低 22.86%、32.55% ($P < 0.05$);氮同化关键酶谷氨酰胺合成酶(GS)和硝酸还原酶(NR)活性也受到显著抑制。同时,胁迫导致抗氧化酶超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性分别显著升高 34.92%、49.51%、62.73% ($P < 0.05$),丙二醛(MDA)含量显著增加 52.82% ($P < 0.05$),可溶性糖和游离脯氨酸含量显著积累,而可溶性蛋白含量则显著降低。复水处理有效促进了谷子各项生理指标的恢复,复水 10 d 后,叶片 SPAD 值、 P_n 、 G_s 、MDA 含量、可溶性蛋白及脯氨酸含量均恢复至 CK 水平,抗氧化酶活性也与对照水平无显著差异。此外,复水植株在成熟期表现出叶片和茎秆氮含量的显著“超补偿”积累效应,且可溶性糖含量仍显著高于 CK。研究结果揭示了谷子通过协同调控光合作用、氮代谢、抗氧化系统及渗透调节等多重生理途径以响应水分胁迫与复水过程,特别是复水后的氮素超量补偿机制。

关键词:谷子;水分胁迫;复水;光合作用;抗氧化酶;渗透调节物质

中图分类号:S515.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)17-0071-07

谷子(*Setaria italica* L.)作为一种重要的 C_4 禾谷类作物,因其固有的抗逆特性,尤其是显著的耐旱性,已成为全球干旱与半干旱农业生态系统的关键作物之一^[1-2]。然而,在当前气候变化背景下,日益频发且加剧的水分亏缺,仍不可避免地抑制其生长发育、降低光合效率,并最终影响产量及营养品质^[3-5]。因此,深入解析谷子响应干旱胁迫及其复水后恢复的复杂生理生化机制,对于制定提升其生产力与稳定性的策略至关重要。水分亏缺首先通过减少植物对水分的吸收而损害植物功能,导致气孔关闭。这虽有助于植物保存水分,但也限制了 CO_2 的有效输入,从而抑制光合碳同化^[6-7]。持续胁迫可进一步诱发非气孔限制,包括光合机构损伤和叶绿素降解,显著影响生物量的积累^[8]。同时,

干旱胁迫常引发细胞内氧化还原稳态失衡,导致活性氧(ROS)过量产生,进而对细胞膜脂、蛋白质和核酸等生物大分子造成氧化损伤^[9]。为应对此胁迫,植物进化形成了一系列的抗氧化防御系统,包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等关键酶类,以及非酶促抗氧化剂,协同清除 ROS 并减轻氧化损伤^[10]。此外,脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质的积累,在维持细胞渗透势平衡和保护细胞结构完整性方面发挥着关键作用^[11]。氮素代谢与植物生长及胁迫响应密切相关,不仅通过参与叶绿素和 Rubisco 酶的合成直接影响光合能力,还是构成蛋白质和多种代谢酶的关键组分^[12]。已有研究表明,干旱胁迫会干扰氮的吸收、同化及在植株体内的分配,从而进一步加剧胁迫造成的不利影响^[13]。尽管前人已对谷子响应水分亏缺的生理特性进行了一系列研究^[5,8-9],但对其在后续复水阶段的动态生理响应及恢复机制仍缺乏系统深入的研究。复水过程启动了一系列复杂的生理恢复过程,其恢复程度与速率是决定植物存活和最终产量的关键因素^[14]。部分植物物种在逆境解除后,其生长或特定代谢物的积累甚至表现出显著的补偿或“超补偿”现象^[15]。然而,在谷子

收稿日期:2025-03-12

基金项目:吕梁市高层次科技人才计划(编号:2023RC20);山西省高等学校科技创新项目(编号:2023L377);山西省青年科学基金(编号:202203021222320)。

作者简介:杜杰(1991—),男,山西吕梁人,博士,讲师,主要从事作物高产与抗逆理论与技术研究。E-mail:dujie1881@163.com。

通信作者:王文霞,博士,讲师,主要从事作物高产栽培理论与技术研究。E-mail:15797688640@163.com。

中关于氮素动态及其在恢复过程中与碳代谢和抗氧化系统的相互作用机制尚未完全探明。光合功能的协同恢复、氮同化途径的有效激活以及抗氧化和渗透调节系统的动态调整对植物的逆境恢复力至关重要,而谷子这类耐旱 C_4 作物所采用的具体策略值得更深入的研究。因此,本研究旨在全面探究优质谷子品种晋谷 21 号对严重水分胁迫及后续复水过程的生理生化响应。

因此,本研究采用盆栽人工控水方法模拟实际生产中的穗分化期干旱环境,旨在探究优质谷子穗分化期干旱胁迫和复水对生理代谢的调控机制。本研究通过综合分析光合性能参数和叶绿素含量、抗氧化酶活性、MDA 含量和渗透调节物质含量、氮素积累规律及关键氮代谢酶活性等指标,以期揭示谷子应对干旱胁迫及其高效恢复的关键适应机制,包括潜在的补偿性生理响应,从而为选育综合抗性更优的谷子品种和优化农田水分管理措施提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料选用优质谷子品种晋谷 21 号,该品种由山西农业大学经济作物研究所提供。试验于 2023 年 5—10 月在吕梁学院农业试验基地 (110.55°E 、 37.42°N) 进行。该区域年均降水量为 480 mm,年均气温 8.9°C ,无霜期约 140 d,属典型温带大陆性季风气候。试验采用盆栽法,选用长、宽、高分别为 30、25、22 cm 的盆钵,每盆装填 12 kg 过筛土壤。于 5 月 21 日,待土壤墒情适宜后,每盆点播 15 粒饱满的种子。幼苗生长至 3 叶期时进行间苗,至 6 叶期时每盆选留 6 株生长均势一致的植株,该留苗密度折合大田种植密度为 37.5 万株/ hm^2 。试验氮肥施用水平按照 150 kg/hm^2 折算,每盆提前施用 4 g 复合肥 (N 、 P_2O_5 、 K_2O 含量均为 15%) 作基肥,所有植株的水肥施用和病虫害防治均按高产田标准进行管理。试验土壤 pH 值 7.46,有机质含量 14.37 g/kg 、全氮含量 0.67 g/kg 、有效氮含量 47 mg/kg 、有效磷含量 14.1 mg/kg 、有效钾含量 169.2 mg/kg 。

1.2 试验设计

试验设置了正常供水 (CK) 和严重水分胁迫与复水 (T1) 2 个处理。正常供水处理的谷子土壤在整个生长期都保持湿润。在严重水分胁迫下,当 T1

植株即将生长至穗分化期时,对 T1 植株的土壤施加渐进式水分胁迫,每天傍晚测量 T1 处理组的土壤含水量(使用 TZS-2X 土壤水分仪测量土壤水分,测定范围为 0~100%,浙江拓普科技有限公司)。随着水分胁迫的加剧,T1 植株的叶片开始枯萎、卷曲,土壤表面变得结块、龟裂。当土壤水分含量小于 15% (达到严重水分胁迫标准) 后,水分胁迫持续 2 d。水分胁迫结束后,T1 植株重新浇水至土壤含水量到 $(75 \pm 5)\%$ 。按照随机区组设计,每个处理组设置 3 个生物学重复,每个重复 15 桶。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株氮含量测定 根据微量凯氏定氮法测定氮含量。将稻株的茎、叶和穗通过高速粉碎机 (RH-600A 型,浙江荣浩实业贸易有限公司) 粉碎成粉末,每次取 0.5 g 样品,用硫酸和催化剂进行加热消化。使用 FOSS 氮测定仪 (FOSS Kjeltac 8400, Foss Analytical Instruments, 丹麦) 进行分析。

1.3.2 SPAD 值测定 水分胁迫处理结束后对叶片 SPAD 值进行测定:每个处理组提前选定 5 株生长一致的植株挂牌标记,用手持式 SPAD-502 (SPAD-502 Plus, 浙江拓普科技有限公司) 测量倒 2 叶 SPAD 值,测量时避开叶片中脉。

1.3.3 光合参数测定 水分胁迫处理结束后测定植株光合参数,每个处理组均提前选定 5 株长势一致的植株挂牌。在晴朗天气条件下,于 09:00—11:00,利用 CI-340 手持式光合测定仪 (CID Bio-Science, Inc., 美国) 对植株倒数第 2 片功能叶中部区域进行光合参数测定。测定指标包括净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r) 以及胞间 CO_2 浓度,并计算其算术平均值。

1.3.3 抗氧化酶活性及丙二醛含量 采用李合生的方法^[16]测定超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性和丙二醛 (MDA) 含量。

1.3.4 渗透调节物质和氮代谢相关酶活性 分别在水分胁迫结束后、复水 5 d 和 10 d 后,取主茎上二叶的 0.5 g 样品,每个处理组设置 3 个生物重复。样品储存于液氮中,并放入 -80°C 的超低温冰箱 (MDF-782, 松下电器有限公司, 日本) 待测。采用试剂盒 (苏州研犀生物科技有限公司) 对样品中的渗透调节物质及氮代谢关键酶活性进行测定。具体测定指标包括:游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量以及硝酸还原酶 (NR)、谷氨酰胺合酶 (GS)

和谷氨酸脱氢酶(GDH)活性。

1.4 数据分析

使用 SPSS 20.0 和 Excel 2021 分析数据的显著性差异和绘图; $P < 0.05$ 代表测定结果存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫和复水对谷子氮含量和 SPAD 值的影响

由图 1 可知,在抽穗期,与 CK 相比,T1 显著改变了叶片中氮含量。T1 的叶片氮含量较 CK 显著下降 38.11% ($P < 0.05$)。这表明在抽穗期遭遇水分胁迫后,叶片的氮素积累受到了明显抑制。同

时,与 CK 相比,T1 的茎部氮含量增加 2.38%,穗部氮含量降低 2.52%。在成熟期,不同处理间氮含量在叶片和茎部表现出显著差异。与 CK 相比,T1 显著提升了叶片和茎部的氮含量,增幅分别达 47.92% 和 15.09% ($P < 0.05$)。在穗部,T1 的氮含量较 CK 降低了 7.19%。叶片 SPAD 值作为反映叶绿素相对含量的指标,在复水当天,与 CK 相比,水分胁迫导致 T1 的叶片 SPAD 值显著降低了 12.32% ($P < 0.05$)。复水处理显著促进了叶片 SPAD 值的恢复。复水 5 d 时,T1 的 SPAD 值与同期 CK 相比,仍显著低 9.39% ($P < 0.05$)。复水 10 d 时,T1 的 SPAD 值已恢复至同期 CK 水平。

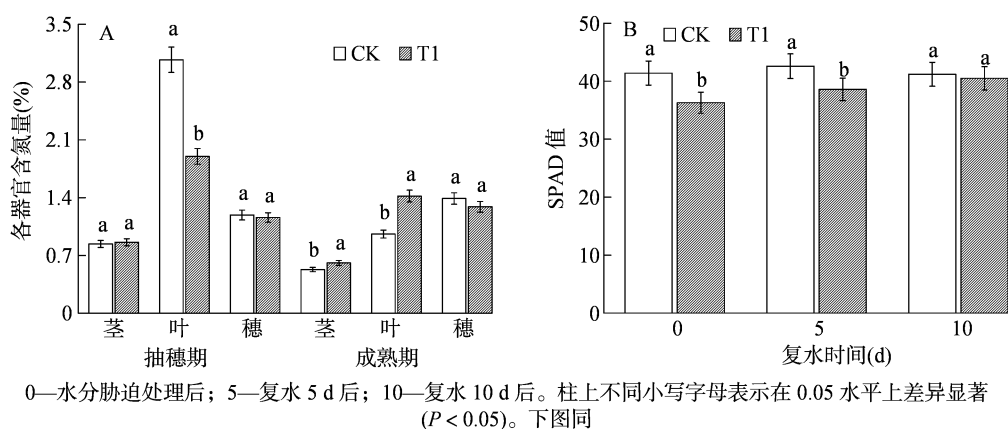


图1 水分胁迫和复水对谷子氮含量和 SPAD 值的影响

2.2 水分胁迫和复水对谷子光合作用的影响

由图 2 可知,严重水分胁迫对植株叶片的光合作用产生了显著的抑制效应。与 CK 相比,T1 的 P_n 、 T_r 、 G_s 以及胞间 CO_2 浓度均呈现显著下降,其降幅分别为 22.86%、21.43%、32.55% 和 22.82% ($P < 0.05$)。这表明水分胁迫通过显著限制叶片的气体交换能力,从而对光合作用过程造成了抑制。复水后,T1 的光合参数均呈现恢复趋势。至复水 5 d 时,T1 的 P_n 、 T_r 、 G_s 和胞间 CO_2 浓度虽较 0 d 时有所回升,但与同期 CK 相比,仍分别显著低 7.69%、13.56%、12.14% 和 13.66% ($P < 0.05$)。至复水 10 d 时,T1 处理的 P_n 、 G_s 及胞间 CO_2 浓度均已恢复至与同期 CK 无显著差异的水平,表明叶片的光合功能已基本恢复至对照水平。

2.3 水分胁迫和复水对谷子抗氧化酶和丙二醛含量的影响

由图 3 可知,严重水分胁迫显著提高了植株叶片的抗氧化酶活性。与 CK 相比,T1 的 SOD、POD 及 CAT 活性分别显著增加了 34.92%、49.51% 和

62.73% ($P < 0.05$)。复水后,T1 中抗氧化酶的活性逐渐下降。至复水 5 d 时,T1 的 SOD、POD 及 CAT 活性虽较 0 d 有所降低,但与同期 CK 相比,仍分别显著高出 14.16%、19.05% 和 16.12% ($P < 0.05$)。至复水 10 d 时,T1 的 SOD、POD 及 CAT 活性与同期 CK 相比已无显著差异。丙二醛含量是衡量叶片膜脂过氧化程度的关键指标。胁迫处理结束时,T1 的 MDA 含量较 CK 显著升高 52.82% ($P < 0.05$),反映出植株在胁迫下遭受了明显的氧化损伤。复水处理有效缓解了该氧化损伤,T1 的 MDA 含量随复水时间的延长而持续降低。至复水 5 d 时,T1 的 MDA 含量虽已显著下降,但与同期 CK 相比仍高出 30.88% ($P < 0.05$)。至复水 10 d 时,T1 的 MDA 含量与同期 CK 相比已无显著差异,表明膜脂过氧化程度已恢复至对照水平。

2.4 水分胁迫和复水对谷子渗透调节物质的影响

由图 4 可知,水分胁迫和复水对叶片中渗透调节物质含量产生了显著影响。复水当天,与 CK 相比,T1 的可溶性蛋白含量降低了 28.33% ($P < 0.05$)。

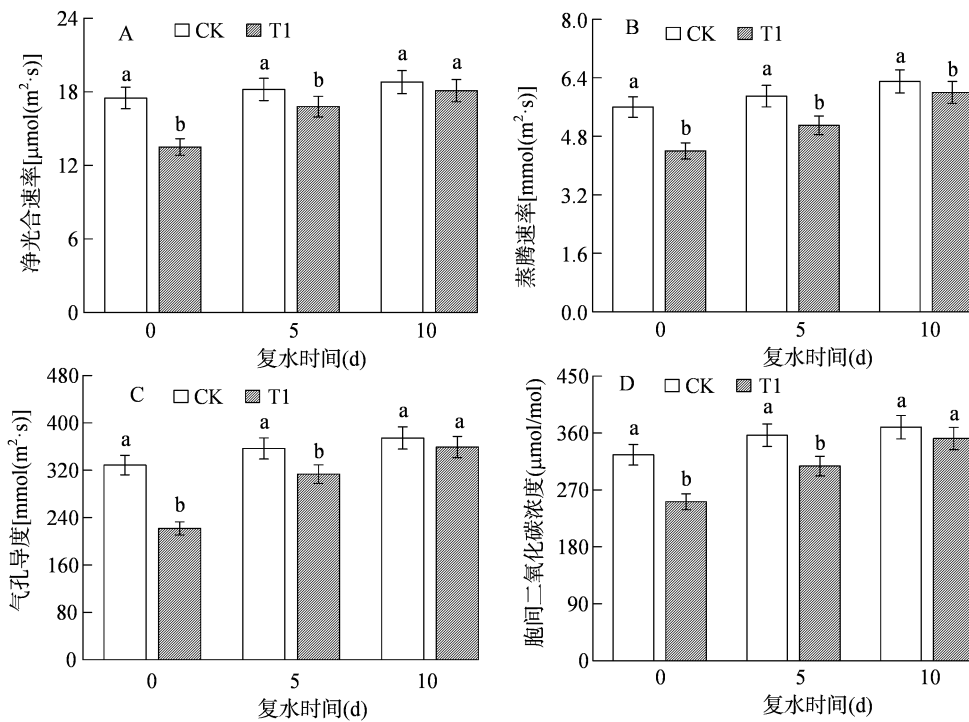


图2 水分胁迫和复水对谷子光合作用的影响

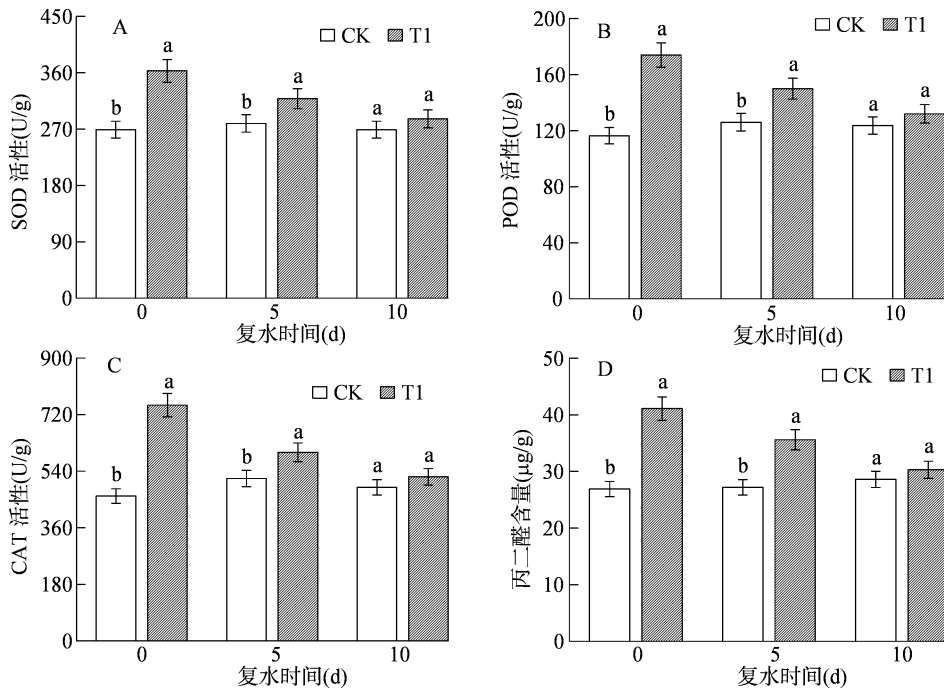


图3 水分胁迫和复水对谷子抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

复水后, T1 组蛋白含量逐渐恢复。与 0 d 自身相比, 5 d 时其含量回升了 32.49%, 此时仍较 CK 同期低 16.05% ($P < 0.05$)。至 10 d 时, T1 组蛋白含量已与 CK 无显著差异, 表明蛋白质代谢已基本恢复正常。与之相反, T1 组的可溶性糖和游离脯氨酸在 0 d 时较 CK 显著积累, 增幅分别达 48.51% 和

52.58% ($P < 0.05$), 体现了其渗透保护作用。复水后可溶性糖和游离脯氨酸呈持续下降趋势。5 d 时, 其含量较 CK 同期分别高 20.12%、26.11% ($P < 0.05$)。至 10 d 时, T1 组脯氨酸含量已降至与 CK 无显著差异的水平, 而可溶性糖仍比同期 CK 显著增加 13.87% ($P < 0.05$)。

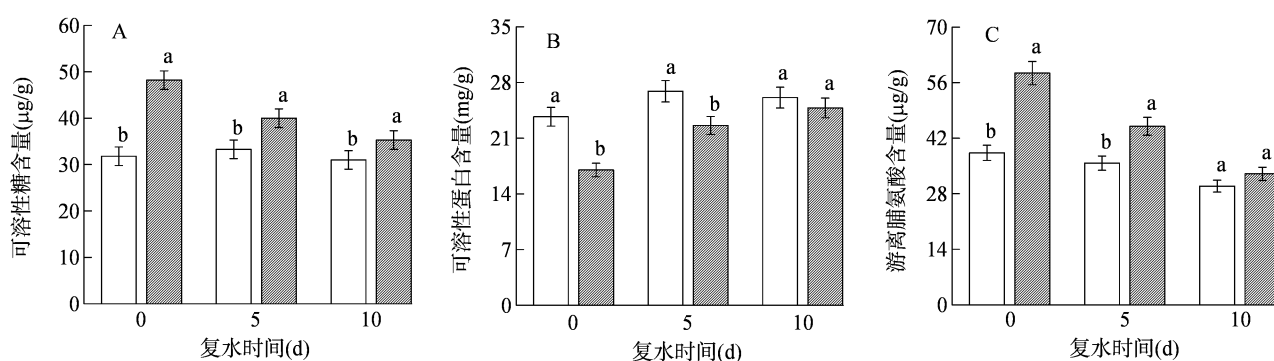


图4 水分胁迫和复水对谷子渗透调节物质的影响

2.5 水分胁迫和复水对谷子氮代谢酶活性的影响

由图5可知,水分胁迫和复水对谷子的氮代谢酶活性产生了显著影响。干旱胁迫结束后,T1的NR和GS活性受到显著抑制。与CK相比,T1的NR和GS活性分别显著降低了28.13%和21.41% ($P < 0.05$)。复水处理有效促进了这2种氮同化酶活性的恢复。复水5d时,T1的NR和GS活性较0d时分别增加了16.69%和14.40%。复水10d后,T1的NR和GS活性进一步恢复,其NR和GS

活性与同期CK相比差异不显著,表明植株的氮代谢相关酶活性已基本恢复至对照水平。与NR和GS活性变化趋势相反,在复水当天,与CK相比,T1的GDH活性显著升高,增幅高达46.23% ($P < 0.05$)。复水后,T1处理的GDH活性呈现逐渐下降的趋势,但仍持续高于CK。复水5d时,T1的GDH活性虽较0d时下降了21.32%,但仍显著高于同期CK 21.60% ($P < 0.05$)。在复水10d时,T1的GDH活性仍较同期CK高出9.89%,差异不显著。

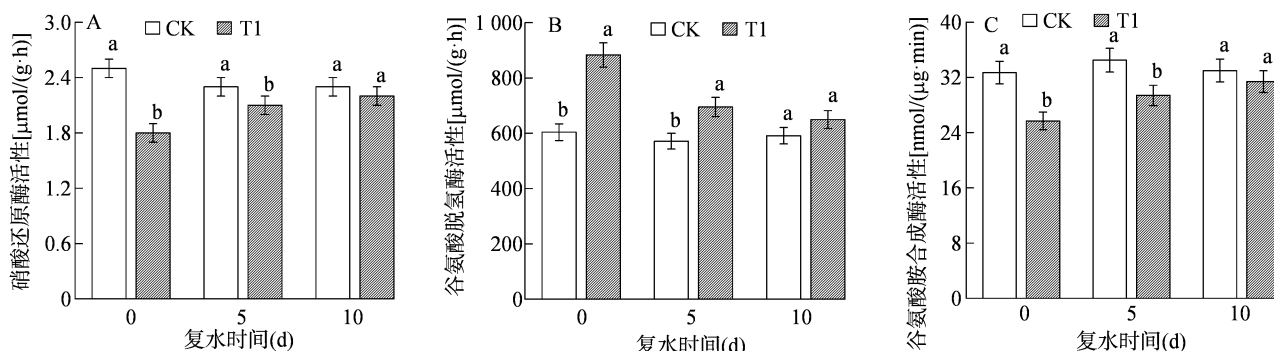


图5 水分胁迫和复水对谷子氮代谢酶活性的影响

3 讨论与结论

3.1 水分胁迫和复水对谷子光合作用的影响

水分胁迫显著抑制植物的光合作用,这是其影响作物生长和产量的首要环节。本研究结果表明,严重水分胁迫显著降低了谷子叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 和胞间 CO_2 浓度,这与宋贺等的观测结果^[17]相符。干旱胁迫下光合作用迅速下降,主要源于叶片气孔限制。在水分亏缺时,植物为减少水分蒸散而主动调控气孔开度,导致 G_s 急剧下降。这一过程直接限制了大气 CO_2 进入叶肉细胞的速率,进而引起胞间 CO_2 浓度降低,成为制约 P_n 的主要因素^[18]。同时, G_s 的降低也伴随 T_r 的减小,这是植物在缺水逆境下重要的水分保持方式,但也清晰反映了碳同化效

率的显著下降。随着胁迫程度的加剧及持续时间的延长,非气孔限制因素对光合作用的抑制作用逐渐增强。本研究发现,水分胁迫下谷子叶绿素含量显著降低,叶绿素是光能捕获和转换的核心色素,其含量的减少直接影响了叶片的光合效率,是光合机构受损的直观证据。复水处理显著促进了胁迫下植株光合系统的恢复。本研究中,复水后各光合参数均表现出明显的恢复趋势。这可能是复水引起土壤水分条件的改善,使根系吸水能力增强,叶片水势回升,从而促使气孔逐渐开放, G_s 的回升直接增加了 CO_2 的有效供应,极大缓解了气孔限制,为 P_n 的恢复创造了有利条件^[19]。光合机构自身功能的修复是非气孔限制得以解除、光合作用能否完全恢复的关键评价标准^[20]。本研究观察到,在复水

10 d 后, T1 处理叶片的叶绿素含量已恢复至接近 CK 水平, 这直接印证了光合色素系统得到有效修复, 叶片光能捕获能力显著提高。这种光合机构的修复与植物体内积极的渗透调节和保护机制密切相关。本研究结果表明, 复水 10 d 后 T1 植株中可溶性蛋白和游离脯氨酸含量逐渐恢复至接近 CK 水平。这些物质作为重要的渗透调节剂和细胞保护剂, 在逆境下积累有助于维持细胞膜的完整性和稳定性、保护关键酶的活性, 从而为光合系统在复水后的修复和正常运转提供了相对稳定的细胞内环境。尤为引人注目的是, 复水 10 d 后, T1 处理的可溶性糖含量仍较 CK 显著增加 13.87%。这种可溶性糖含量的过量积累既可以作为渗透调节物质协助维持细胞膨压和水分平衡, 也能为光合机构的修复以及胁迫后新生组织的生长提供充足的碳骨架和能量储备^[21]。此外, 积累的可溶性糖还可能作为信号分子, 调控与胁迫应答和恢复相关的基因表达, 从而增强植物从胁迫中恢复并适应后续环境变化的能力。

3.2 水分胁迫和复水对谷子抗氧化酶活性的影响

水分胁迫是诱导植物体内活性氧(ROS)过量产生的主要非生物胁迫之一, 进而导致细胞膜脂过氧化、蛋白质变性、核酸损伤等氧化胁迫症状^[22]。MDA 作为膜脂过氧化的主要产物, 其含量常被用作衡量植物遭受氧化胁迫程度的关键指标。为应对氧化损伤, 植物进化出了一套复杂的抗氧化防御系统。本研究结果表明, 严重水分胁迫显著激活了谷子叶片的抗氧化酶系统, 表现为 SOD、POD 及 CAT 活性相较于 CK 均显著增加。这是植物为清除过量 ROS、减轻氧化损伤而启动的主动防御响应^[18]。然而, 尽管抗氧化酶活性增强, T1 处理的 MDA 含量仍较 CK 显著升高, 表明在严重水分胁迫下 ROS 的产生速率可能已超出细胞内源抗氧化系统的清除能力, 导致谷子叶片遭受了显著的膜脂过氧化损伤^[23]。复水处理促进了受干旱胁迫谷子从氧化损伤中恢复。随着复水时间延长, 谷子叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性动态下调, MDA 含量也持续降低, 最终均恢复至接近 CK 水平。这表明叶片细胞膜脂过氧化程度得到有效缓解, 氧化损伤得以修复, 为光合作用的恢复创造了有利条件。该恢复过程与本研究观测到的光合参数随复水时间延长而逐步恢复的趋势一致, 不仅印证了植物整体生理活性的复苏, 也间接反映了氧化损伤减轻对光合机构功能

恢复的积极效应。复水后植株抗氧化酶活性下调的机制可能是多方面的^[24]。光合机构功能的恢复可减少因电子传递链失衡等途径产生的 ROS, 从而降低了细胞对高水平抗氧化酶的持续需求。同时, ROS 信号的传递与损伤修复机制也发挥关键作用。ROS 作为信号分子, 其浓度的下降可通过负反馈机制降低抗氧化酶基因的表达^[25]。因此, 复水后抗氧化酶活性的下调, 是植物在复水后生理平衡下一种精准的调控, 它与光合等代谢过程的恢复相互促进、协同作用, 共同构成了植物从水分胁迫损伤中高效恢复的关键生理基础。

3.3 水分胁迫和复水对谷子氮代谢的影响

水分胁迫对植物氮素积累及氮代谢关键酶活性具有显著影响。本研究结果表明, 抽穗期严重水分胁迫导致谷子叶片氮含量相较于 CK 显著下降, 这与 Zhang 等的研究结果^[26]一致。这可能是干旱条件下根系对氮素的吸收能力减弱以及向地上部的长距离运输受阻^[27]。与氮含量变化相对应, 水分胁迫显著改变了氮代谢关键酶的活性。胁迫结束后, T1 的 NR 和 GS 活性较 CK 显著降低。GS 作为铵态氮同化的关键酶, 其活性降低直接限制了植物将无机氮转化为有机氮的能力, 此现象在马铃薯干旱胁迫研究中已有报道^[28], 可能归因于干旱胁迫下光合作用受抑所致的 ATP 供应不足、酶蛋白合成受阻或氧化损伤^[29]。与 NR 和 GS 活性下降相反, 胁迫结束时 T1 的 GDH 活性却显著升高。GDH 在植物氮代谢中具双重功能, 既催化谷氨酸的氧化脱氨, 还催化 α -酮戊二酸的还原胺化^[30]。在严重胁迫条件下, 当植株中 GS/GOGAT 途径受阻时, GDH 活性增强可能有助于同化部分游离氨, 或参与氨基酸分解代谢以提供碳骨架和能量^[31]。复水处理促进了谷子氮代谢的快速恢复。复水期间, T1 的 NR 和 GS 活性呈逐渐恢复趋势。GS 活性的恢复是植物氮同化能力提高的关键标志, 为蛋白质再合成和叶绿素含量回升提供了氮源保障。相应地, GDH 活性在复水后则逐渐下降。这表明, 随着主要氮同化途径(GS/GOGAT)的恢复, 对 GDH 作为替代或应急途径的依赖性显著降低^[32]。值得注意的是, 复水后氮素在植株体内的积累与分配也发生改变。在成熟期, T1 的叶片和茎秆氮含量显著高于 CK, 呈现氮素积累的“超补偿”效应, 这可能与植株在胁迫解除后表现出更强的氮素吸收与同化能力有关^[33-34]。然而, 成熟期 T1 穗部氮含量较 CK 降低了 7.19%,

这可能归因于虽然营养器官表现出较强的氮积累能力,但氮素向籽粒的有效转运和分配可能仍受到一定程度的滞后影响和限制,这与乔焕焕等的研究结果^[28]相符。上述氮代谢的动态调节共同构成了谷子从水分胁迫中恢复的重要生理机制,但氮素向穗部的分配效率仍需进一步关注。

本研究揭示了水分胁迫及复水对谷子关键生理过程的影响。研究结果表明,严重水分胁迫显著抑制了叶片光合作用、氮素积累及SPAD值,同时降低了NR和GS活性。相反,胁迫条件下GDH活性、抗氧化酶活性以及游离脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质含量则显著升高,并伴随MDA含量增加和可溶性蛋白含量下降。复水处理后,谷子叶片的光合参数、叶绿素水平、氮同化酶活性及受损的膜系统均基本恢复至对照水平,抗氧化酶活性和渗透调节物质含量回归至正常范围。综上所述,谷子通过整合抗氧化防御系统、渗透调节以及氮代谢调控等多重生理机制,以抵御水分胁迫并实现复水后的高效生理功能恢复。这些发现可为进一步解析作物抗旱生理机制及培育耐旱品种提供参考。

参考文献:

- [1] 侯思宇,刘超,马赞晓,等. 谷子基因组学研究进展[J]. 山西农业科学,2024,52(1):1-9.
- [2] Pan J W, Li Z, Wang Q G, et al. Comparative proteomic investigation of drought responses in foxtail millet[J]. BMC Plant Biology, 2018, 18(1):315.
- [3] Wang Y Q, Li L, Tang S, et al. Combined small RNA and degradome sequencing to identify miRNAs and their targets in response to drought in foxtail millet[J]. BMC Genetics, 2016, 17:57.
- [4] 刘园,刘布春,梅旭荣,等. 区域粮食产量因灾损失评估之北方五省灾情-产量模型再检验[J]. 中国农业气象,2023,44(11):1009-1021.
- [5] 任传友,姜卓群,苏小璇,等. 水分胁迫/复水对谷子光合特性及产量影响[J]. 应用气象学报,2021,32(4):456-467.
- [6] 魏学,张明雪,李博,等. 干旱地区谷子适宜土壤湿度下限动态指标[J]. 干旱区资源与环境,2023,37(11):117-122.
- [7] 李君亮,王士博,李亚军,等. CO₂浓度升高对干旱胁迫下谷子细胞结构和抗逆生理的影响[J]. 应用生态学报,2023,34(5):1281-1289.
- [8] 张明飞,迟悦,王慧颖,等. 干旱和复水对不同抗旱型谷子品种苗期生理指标的影响[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2023,39(9):39-42.
- [9] 孙泽鑫. 干旱胁迫对谷子拔节期和孕穗期光合特性、产量的影响及转录组-代谢组分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023:62-63.
- [10] Subbaiyan R, Ganesan A, Varadharajan V, et al. Formulation and validation of probioticated foxtail millet laddu as a source of antioxidant for biological system using response surface methodology[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2024, 55(1):647-661.
- [11] 吴遥,高日平,蔡琳琳,等. 苗前补灌对内蒙古黄土高原旱作区谷子生长及光合特性的影响[J]. 北方农业学报,2023,51(5):51-61.
- [12] Ratiya P B, Lunagaria M M, Sur K. Determination of crop water stress index for Kharif pearl millet in semi-arid environment[J]. Journal of Krishi Vigyan, 2022, 10(2):61-67.
- [13] Wen X X, Zhang D Q, Liao Y C, et al. Effects of water-collecting and-retaining techniques on photosynthetic rates, yield, and water use efficiency of millet grown in a semiarid region[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(7):1119-1128.
- [14] 冯树林,李博渊,吕国利,等. 紫穗槐幼苗不同生长阶段叶水势对干旱胁迫与复水的响应特征[J]. 草地学报,2020,28(5):1363-1371.
- [15] 刘文瑜,何斌,杨发荣,等. 不同品种藜麦幼苗对干旱胁迫和复水的生理响应[J]. 草业科学,2019,36(10):2656-2666.
- [16] 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,2000:164-260.
- [17] 宋贺,蒋延玲,许振柱,等. 玉米光合生理参数对全生育期干旱与拔节后干旱过程的响应[J]. 生态学报,2019,39(7):2405-2415.
- [18] 刘承,李佐同,杨克军,等. 水分胁迫及复水对不同耐旱性玉米生理特性的影响[J]. 植物生理学报,2015,51(5):702-708.
- [19] 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.
- [20] 严加坤,张宁宁,张岁岐. 谷子对干旱胁迫的生理生态响应[J]. 生态学报,2021,41(21):8612-8622.
- [21] 郭艳阳,刘佳,朱亚利,等. 玉米叶片光合和抗氧化酶活性对干旱胁迫的响应[J]. 植物生理学报,2018,54(12):1839-1846.
- [22] 杨海云,艾雪莹, Batool M, 等. 油菜响应水分胁迫的生理机制及栽培调控措施研究进展[J]. 华中农业大学学报,2021,40(2):6-16.
- [23] 周欢欢,傅卢成,马玲,等. 干旱胁迫及复水对‘波叶金桂’生理特性的影响[J]. 浙江农林大学学报,2019,36(4):687-696.
- [24] 侯丹平,谭金松,毕庆宇,等. 水分胁迫对节水抗旱稻产量形成和根系形态生理特性的影响[J]. 中国水稻科学,2021,35(1):27-37.
- [25] 王硕,贾潇倩,何璐,等. 作物对干旱胁迫的响应机制及提高作物抗旱能力的调控措施研究进展[J]. 中国农学通报,2022,38(29):31-44.
- [26] Zhang H, Zhao Y, Zhu J K. Thriving under stress: how plants balance growth and the stress response[J]. Developmental Cell, 2020, 55(5):529-543.
- [27] 臧军蕊,张钰婷,张英豪,等. 施氮对紫花苜蓿干旱复水后生长恢复能力的影响[J]. 草业科学,2024,41(3):620-627.
- [28] 乔焕焕,李红兵,郑太波,等. 干旱与复水对马铃薯块茎膨大期碳氮转运的影响[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(4):154-162.

郑青焕,王建玉,李拴柱,等. 黄淮海中南片区小粒花生品种主要性状的综合分析[J]. 江苏农业科学,2025,53(17):78-83.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.17.010

黄淮海中南片区小粒花生品种主要性状的综合分析

郑青焕¹, 王建玉¹, 李拴柱¹, 杨玉华¹, 胡卫丽¹, 陈君², 宋江春¹

(1. 河南省花生产业技术体系南阳综合试验站/南阳市科学院,河南南阳 473000; 2. 南召县农村合作经济服务站,河南南召 474650)

摘要:为筛选优异的小粒花生种质资源、拓宽小粒花生遗传育种基础,以 2023 年黄淮海中南片区的 24 个小粒花生品种为材料,通过其丰产性、相关性、变异性和主成分分析,对参试品种进行综合评价。结果表明,质量性状中荚果表面质地的遗传多样性指数最高(0.725); 漯花 110 的产量最高,相比对照增产 20.07%; 主要性状的变异系数范围在 0.51%~91.67% 之间,其中亚油酸和油酸的变异系数较高,生育期的变异系数最低。荚果产量与饱果率、单株饱果数、单株生产力呈显著正相关关系($P < 0.05$),与侧枝长呈显著负相关关系;含油量与百果重、百仁重呈显著负相关关系,与蛋白质含量呈显著负相关关系;蛋白质含量与单株饱果数呈显著负相关关系。通过主成分分析,提取出的 4 个主成分能反映黄淮海花生小粒组 75.944% 的信息,分别命名为产量因子、粒重因子、油酸因子、生长势因子。通过建立综合评价模型计算得分,冀农花 46 号得分最高(0.92),其次是中育花 116 号(0.70)、徐花 32(0.62),农大 R671 得分最低(-0.80),综合得分较高的 3 个品种可以为黄淮海中南片小粒花生的选育提供理论依据和技术参考。

关键词:小粒花生;农艺性状;品质性状;遗传多样性;丰产性;相关系数;主成分分析;综合评价;黄淮海地区
中图分类号:S565.203.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)17-0078-06

花生是我国的主要油料作物和经济作物,在保障国家粮油安全方面具有重要的地位,同时花生耐旱涝,不会争夺主粮的优质土地。2023 年我国花生种植面积为 482 万 hm^2 ,同比增长 0.42%,花生产量达 1 923 万 t,同比增长 5.41%,产量占油料作物总产的 49.8%^[1]。黄淮海地区是我国最重要的花生产区,常年种植面积和产量约占全国的 60%^[2]。小粒花生早熟、籽小饱满、油脂和蛋白质含量高、适应性强、商品性好,深受加工企业青睐,因此是黄淮海

地区花生种植的首选。黄淮海地区有丰富的花生资源,育种家们选育出的豫花 37、豫花 22、宛花 2 号、花育 52 等是近年来河南省、山东省的主要品种。小粒花生的产量和品质会因不同年份气象条件和栽培技术而受到一定影响,因此,评价和鉴定现有资源对今后育种有重要意义^[3]。

国内很多学者通过变异分析、相关分析等对大量花生资源进行了相关研究。严鑫等对 232 份花生种质资源荚果和籽仁相关性状的遗传多样性进行分析,发现花生种质资源间存在丰富的遗传多样性,性状改良空间大^[4];苗建利等对 25 份小粒花生品种进行遗传多样性与综合评价,提取了 3 个有代表性的主成分,筛选出综合得分最高的济花 10 号^[5];殷冬梅等对 51 个我国主要花生品种的品质性状进行了综合评价,得出育种亲本选择时应考虑各个主成分之间的协调关系,才能选育出综合性状优

收稿日期:2024-08-16

基金项目:河南省现代农业产业技术体系建设专项(编号:HARS-22-05-Z2)。

作者简介:郑青焕(1989—),女,河南南阳人,硕士,助理研究员,主要从事花生遗传育种与栽培工作。E-mail:zhengqh2014@163.com。

通信作者:李拴柱,硕士,助理研究员,主要从事花生遗传育种与栽培研究。E-mail:lishuanzhu913@126.com。

[29] 邢佳伊,李丽,王超,等. 施氮水平和干旱锻炼后复水程度对小麦水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(5):52-61.

[30] 罗凤,卢永恩,杨猛,等. 氮胁迫对水稻营养生长期氮代谢及相关基因表达量的影响[J]. 华中农业大学学报,2012,31(1):16-22.

[31] 陈盖,温可馨,司冰. 盐胁迫下园林植物彩叶树响应菌根生长的比较转录组分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(22):19-28.

[32] 胡雯,周小慧,李勤奋,等. 旱季降雨格局变化对益智生长和碳氮代谢的影响[J]. 热带作物学报,2022,43(12):2597-2605.

[33] 周宇,端木德强. 豆科植物固氮根瘤衰老过程中的代谢调控研究进展[J]. 华中农业大学学报,2024,43(4):12-24.

[34] 龚茵茵,燕璐,林建中,等. 低等生物谷氨酸脱氢酶基因用于作物遗传改良的研究进展[J]. 生命科学研究,2021,25(1):31-38.