

Study on Physiological Mechanism and Yield Compensation Effect of Different Genotypes of Wheat in Response to Drought Stress

Zhenru An

Puyang County Liyuan Township Agricultural Service Center, Puyang, Henan, 457175, China

Abstract

Drought is the primary environmental factor limiting stable and high wheat yields, with significant differences observed among wheat genotypes in drought tolerance and yield compensation strategies. Investigating their physiological response mechanisms and compensatory effects is crucial for breeding drought-resistant high-yield varieties and developing control measures. This study analyzes key physiological processes under drought conditions, including photosynthetic regulation, osmotic regulation, antioxidant defense, and root architecture changes in typical wheat genotypes. It further explores the yield compensation capabilities of different genotypes during growth recovery, tiller compensation, and grain filling stages after drought alleviation. The findings demonstrate that genotype differences determine physiological response strategies and compensatory potential, with drought-resistant varieties exhibiting superior homeostatic regulation and functional recovery capacity. These results provide new theoretical foundations for wheat production in arid regions.

Keywords

wheat genotype; drought stress; physiological mechanism; antioxidant system; yield compensation effect

不同基因型小麦应对干旱胁迫的生理机制与产量补偿效应研究

安振如

濮阳县梨园乡农业服务中心, 中国 · 河南 濮阳 457175

摘 要

干旱是限制小麦稳产高产的主要环境因子, 不同基因型小麦在耐旱能力与产量补偿策略方面呈现显著差异。研究其生理响应机制与补偿效应, 对于选育耐旱高效品种与构建调控措施具有重要意义。本文围绕典型小麦基因型在干旱条件下的光合调节、渗透调节、抗氧化防御及根系构型变化等关键生理过程进行分析, 并探讨干旱缓解后不同基因型在生长恢复、分蘖补偿及籽粒灌浆阶段的产量补偿能力。研究表明, 基因型差异决定生理响应策略与补偿潜力, 耐旱型品种具有更高的稳态调控能力和更强的功能恢复能力, 为干旱区小麦生产提供了新的理论依据。

关键词

小麦基因型; 干旱胁迫; 生理机制; 抗氧化系统; 产量补偿效应

1 引言

干旱胁迫是全球农业面临的主要生态挑战, 尤其在气候变化背景下, 降水时空分布的不稳定性显著增强, 使作物生长周期内的水分供应出现更高不确定性。小麦作为重要粮食作物, 其生育进程中多个关键阶段对水分高度敏感, 胁迫持续时间及发生时期均会影响产量构成要素。不同基因型小麦在干旱条件下表现出的抗性差异, 是由其自身遗传特征、代谢调控模式及根—冠协同能力共同决定的。近年来, 关于

小麦耐旱机制的研究不断深化, 但不同基因型间的生理响应规律、补偿能力及产量稳定机制仍需系统分析。探讨其差异性可为优良品种选育与干旱管理策略提供理论支撑, 并对粮食安全具有现实意义。

2 不同基因型小麦应对干旱胁迫的光合调节机制

2.1 光合机构的结构稳定性与功能保持

干旱胁迫常导致叶片失水, 引起气孔关闭, 使 CO_2 同化受限。不同基因型小麦在光合机构结构稳定性方面表现出明显差异。耐旱型品种通常具有较厚的角质层、较高的叶片保水能力及较强的细胞壁机械性, 使光合器官在水分亏缺过

【作者简介】安振如(1980—), 男, 中国河南濮阳人, 高级农艺师, 从事农业植物栽培研究。

程中仍维持相对完整的组织结构。这类品种在类囊体膜稳定性、叶绿体形态完整度及光系统Ⅱ保护机制方面表现更优，能够减少高光条件下的光抑制风险。

2.2 光合速率及气体交换参数的调控

干旱胁迫抑制蒸腾作用，导致叶片气孔关闭，使 CO_2 扩散受限，尽管细胞间隙 CO_2 浓度可能因代谢受抑而短暂升高，但光合速率仍因生化过程受限而下降。耐旱型小麦在 Rubisco 酶活性、电子传递能力及碳同化效率方面表现更佳，使其在胁迫条件下依旧保持较高的净光合速率。同时，这类基因型能够灵活调控气孔密度、气孔导度及气孔开闭节律，实现对水分蒸腾的精细化控制，从而提升水分利用效率（WUE）。此外，耐旱型品种的细胞渗透调节能力与叶片保水特性有助于维持较高叶肉导度，使 CO_2 在叶肉细胞内的扩散过程不至于严重受阻。敏感型品种则因光合生化限制严重，光合速率下降更为明显。

2.3 光化学效率与能量分配调节

光化学阶段对干旱极为敏感，电子传递链受到抑制后光能利用效率会迅速降低。耐旱基因型小麦通常具有更稳定的光系统Ⅱ结构，其最大光化学效率指标 Fv/Fm 下降幅度较小，表明其光化学反应中心受损程度较低。此外，耐旱型基因型可通过提高非光化学猝灭（NPQ）能力，将无法用于光合作用的多余能量以热的形式释放，避免光能在叶绿体内累积造成氧化损伤。这类品种在光能分配上更具灵活性，可促进光化学与热耗散之间的动态平衡，增强抗逆性。相反，敏感型品种由于能量分配调节能力弱，NPQ 水平上升缓慢，当光能超过利用能力时易发生光抑制与光系统Ⅱ受损，导致光合能力进一步下降。

3 干旱胁迫下不同基因型小麦的渗透调节与抗氧化防御

3.1 渗透调节物质的积累特征

干旱胁迫导致细胞水势显著下降，植物必须通过渗透调节维持细胞吸水能力与代谢稳定。耐旱型小麦在胁迫早期即可快速积累脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖以及甜菜碱等渗透调节物质，这些物质不仅降低细胞渗透势、促进吸水，还通过稳定蛋白质结构与细胞膜体系减轻胁迫损伤。此外，脯氨酸和可溶性糖类具有自由基清除作用，可减少干旱条件下产生的氧化压力。相较之下，敏感型品种在渗透调节物质合成速度和积累量上明显不足，细胞膨压下降更为迅速，使生长过程受到较强抑制。从整体表现看，渗透调节能力的差异是不同基因型在干旱条件下维持细胞稳定性的关键因素[1]。

3.2 抗氧化酶系统的活性差异

干旱会诱导植物体内活性氧（ROS）过量生成，如超氧阴离子、过氧化氢等，加剧膜脂过氧化并破坏细胞结构。耐旱型小麦通常具备更高效的抗氧化酶系统，其过氧化物歧化酶（SOD）可迅速将超氧阴离子转化为过氧化氢，而过

氧化氢酶（CAT）与过氧化物酶（POD）能进一步分解有害过氧化物，从而显著提升 ROS 清除能力。此类基因型在胁迫下丙二醛（MDA）含量升幅较低，表明细胞膜受到的氧化损伤较轻。相反，敏感型材料由于酶活性提升不足，ROS 积累速度远超清除能力，MDA 水平显著升高，反映出细胞膜系统受到严重破坏。抗氧化体系的效率直接决定不同基因型在干旱下的生理稳定性。

3.3 膜脂稳定性及细胞完整性的维持

细胞膜是干旱胁迫下最易受损的结构，其稳定性取决于膜脂组成与离子平衡调节能力。耐旱型小麦通常含有较高比例的不饱和脂肪酸，使膜结构具有更好的柔韧性与流动性，在低水势条件下不易发生结构破裂。同时，耐旱基因型能够有效调控跨膜离子运输，减少 K^+ 、 Ca^{2+} 等重要离子的泄漏，维持细胞内稳态。此外，其膜保护蛋白与抗逆相关酶类在胁迫期间保持较高活性，有助于减轻膜脂过氧化过程，增强细胞完整性。敏感型品种由于膜脂不饱和度较低、离子调节能力弱，易出现渗透失衡和膜结构破坏。由此可见，膜脂组成与离子稳态调节能力是不同基因型应对干旱胁迫的重要分化特征 [2]。

4 不同基因型小麦的根系响应特征与水分吸收策略

4.1 根系结构差异与土壤探测能力

根系结构是作物耐旱性的重要物质基础，不同基因型小麦在根系深度、分布范围及根系形态上呈现显著差异。耐旱型基因型通常具有更深层的根系延展能力，其主根能够快速向下扎根，侧根分布广泛，根长密度较高，从而提高深层土壤水分获取能力。同时，耐旱型材料的根毛数量丰富、长度更大，使根系与土壤界面的接触面积明显增加，有利于增强水分吸收效率。在干旱发生后，这类基因型能够依靠深层根系持续吸收残余水分，维持植株蒸腾和细胞膨压，减轻生长受限程度。相较之下，敏感型基因型根系主要集中在表层土壤，根系分布浅、根长密度低，在土壤水分下降时迅速受到限制，难以获得足够的水分补给，导致叶片萎蔫加剧、光合速率下降，生长受到显著抑制。由此可见，根系结构差异直接决定植株的土壤探测能力，是判断基因型耐旱性的重要指标之一 [3]。

4.2 根系生理代谢的调控

干旱胁迫不仅影响根系结构的生长，还会改变其生理代谢活动。耐旱型小麦根系通常在干旱条件下保持较高的呼吸代谢水平，使 ATP 供应更为稳定，从而保障主动吸水和离子运输的正常进行。在胁迫状态下，耐旱基因型能够迅速提升脱落酸（ABA）含量，通过促进气孔关闭减少蒸腾耗水，并调控根冠之间的协调关系。同时，其生长素（IAA）、细胞分裂素（CTK）等激素分布更具优势，使根系能够在逆境下保持较强活力，促进新根生成和根尖延伸。此外，耐旱型

根系具有更强的渗透调节能力,通过积累脯氨酸、可溶性糖等物质维持细胞水势稳定,使根组织在低水势环境中仍具吸水能力。相反,敏感型基因型由于能量供应不足与激素调控能力弱,在干旱条件下根系呼吸速率下降明显,导致吸水能力迅速衰退,整个植株抗旱性随之降低。可见,根系代谢调控是耐旱小麦能否在胁迫中维持生理平衡的关键机制[4]。

4.3 根际微环境与土壤互作的差异

根际微环境是作物根系与土壤发生相互作用的重要区域,不同基因型小麦在根际调控能力上存在显著差异。耐旱型品种能够通过分泌有机酸、酚类物质及多糖等根系分泌物改善根际土壤结构,促进团粒形成,增强土壤保水能力。同时,这类分泌物能够为根际微生物提供碳源,使固氮菌、解磷菌等有益微生物数量增加,从而提升土壤中氮、磷等有效养分的可利用性。微生物群落结构的优化还能促进植物—微生物互利互作,提高植株在干旱环境中的营养吸收效率。此外,耐旱基因型的根系具有更强的调节氧化还原状态能力,使根际环境保持适宜的生化条件,有利于根系生长与功能发挥[5]。

5 干旱缓解后的生长恢复能力与产量补偿效应

5.1 生长恢复速度与叶片功能重建

干旱解除后,小麦植株要实现正常生长,关键在于尽快恢复光合体系与水分运输结构的功能。耐旱基因型通常在逆境下损伤程度较轻,其叶绿体超微结构破坏较少,叶片质膜完整性保持较好,使恢复过程更迅速。在干旱缓解后的数天内,这类品种能够快速提高叶绿素含量和叶绿素 a/b 比值,增强光能吸收与传递能力。同时, Rubisco、PEPC 等关键光合酶活性恢复速度更快,有助于提高 CO₂ 同化效率,使净光合速率显著提升。此外,耐旱型小麦在水分重新供应后可通过根系活力增强、导管再生速度加快来恢复水分运输通道,使叶片蒸腾和气孔调节能力重新稳定。相较之下,敏感型基因型在光系统结构受损后恢复周期明显更长;酶活性恢复也较缓慢,使其生长速率难以在短期内反弹。

5.2 生殖生长阶段的补偿方式

干旱发生在小麦分蘖、拔节或抽穗前后,往往会影响成穗数、小穗形成及开花授粉过程,造成早期产量构成要素下降。然而耐旱基因型具有较强的生殖阶段补偿能力。当环境条件改善后,这类品种能够通过调节花器官发育与籽粒灌浆速率来部分弥补前期损失。一方面,耐旱基因型在花后具有更强的同化物积累能力,光合恢复快,使碳源供应充足,可提高结实率,减少籽粒退化。另一方面,这类品种的灌浆速率与籽粒灌浆持续时间延长,使籽粒重量增加,提升产量稳定性。在干旱后补偿期间,植株体内激素比例如 ABA、

IAA、GA 等亦表现出有利于籽粒灌浆的调节趋势,增强灌浆驱动力。此外,一些耐旱材料能增加功能叶的保持时间,提高叶片光合贡献,使籽粒灌浆期间同化物供给量充足。相比之下,敏感型材料受到早期干旱影响后,花器官受损恢复较弱,灌浆能力有限,补偿空间较小。由此可见,生殖阶段的补偿方式是耐旱基因型在干旱后维持产量的重要策略。

5.3 产量稳定性与综合抗逆能力分析

产量补偿的核心在于作物能否在干湿交替环境中保持生理稳态与能量分配合理性。耐旱基因型之所以具有更高的产量稳定性,是因为其具备优异的水分利用效率(WUE)、光能转化效率(LUE)以及抗氧化系统调控能力。在干旱条件下,这些品种能够通过增强 SOD、CAT、POD 等抗氧化酶活性减少膜脂过氧化,使细胞结构维持稳定,为恢复生长奠定基础。在干旱过后,其体内同化物重新分配能力较强,可优先保证生殖器官的供能需求,使产量构成不被严重破坏。相比之下,敏感基因型由于恢复慢、氧化损伤重、根系活力低,使其难以通过后期补偿机制弥补早期损失。综合来看,产量稳定性体现的是基因型在多胁迫条件下的整体抗逆力,其形成依赖于光合效率、抗氧化能力及水分管理能力的协同作用,是耐旱育种的重要评价指标。

6 结语

不同基因型小麦在干旱胁迫下表现出各具特色的生理与代谢调控机制,其抗旱能力和产量补偿水平受光合调节、渗透保护、抗氧化体系、根系结构及生长恢复机制等多重因素影响。耐旱型品种通常具有更强的稳态调节能力,在胁迫解除后能够快速恢复生理功能,展现更强的产量补偿潜力。系统分析不同基因型的差异可为耐旱育种提供明确方向,为干旱频发地区的小麦生产提供科学依据。未来研究可结合分子生物学与田间管理技术,从基因表达调控、根际生态优化及资源高效利用等方面进一步探索,提高小麦在不同生态环境下的稳定产量能力。

参考文献

- [1] 孟雨.干旱胁迫对小麦生长的影响及品种抗旱性鉴定方法研究[D].河南农业大学,2022.
- [2] 曹俊梅,芦静,周安定,等.水分胁迫对新疆不同小麦品种幼苗生理特性的影响[J].新疆农业科学,2014,51(07):1190-1196.
- [3] 卢丹丹.小麦TaBRI1-B响应碱性盐和渗透胁迫的作用与机制[D].山东大学,2023.
- [4] 李子涵,谢一卓,吾丽努尔·库买买提哈孜,等.施用黄腐酸钾对干旱胁迫春小麦生长与产量形成的影响[J].新疆农业大学学报,2025,48(03):254-262.
- [5] 郭好娟.tae-miR9661在小麦应对干旱胁迫过程中的功能分析[D].河南农业大学,2023.