

植物逆境响应中的生理调节机制及环境适应特征

方雨欣

闽西职业技术学院, 福建 龙岩 364021

[摘要] 植物遭遇干旱、盐渍、低温和高温等逆境时, 水分平衡、离子稳态、光合作用及细胞氧化还原状态均会发生变化。为维持基本生命活动, 植物可通过气孔调节、渗透调节、抗氧化防御、离子选择性运输和代谢重构形成多层次生理响应。结合马铃薯、水稻、西葫芦和苹果等公开试验数据, 分析逆境条件下脯氨酸、丙二醛、抗氧化酶、叶绿素及 Na^+/K^+ 平衡的变化规律。结果表明, 短期适度胁迫主要诱导防御系统增强, 持续或强度过高则造成膜脂过氧化和光合能力下降, 不同基因型在根系、生化防御及离子调控方面表现出明显适应差异。

[关键词] 植物逆境; 生理调节; 抗氧化防御; 环境适应

DOI: 10. 64635/ja. 2026. 1475

中图分类号: Q945. 78

文献标识码: A

Physiological Regulation Mechanisms and Environmental Adaptation Characteristics in Plant Stress Responses

Fang Yuxin

Minxi Vocational and Technical College, Longyan, Fujian 364021, China

Abstract: When plants encounter stresses such as drought, salinity, low temperature, and high temperature, their water balance, ion homeostasis, photosynthesis, and cellular redox status all change. To maintain basic life activities, plants can form multi-level physiological responses through stomatal regulation, osmotic adjustment, antioxidant defense, selective ion transport, and metabolic reconstruction. Based on publicly available experimental data on potato, rice, zucchini, and apple, this paper analyzes the variation patterns of proline, malondialdehyde, antioxidant enzymes, chlorophyll, and Na^+/K^+ balance under stress conditions. The results show that short-term moderate stress mainly induces the enhancement of defense systems, whereas prolonged or excessive stress causes membrane lipid peroxidation and a decline in photosynthetic capacity. Different genotypes show significant adaptive differences in root systems, biochemical defense, and ion regulation.

Keywords: plant stress; physiological regulation; antioxidant defense; environmental adaptation

引言

植物固着于特定生境, 其生长过程持续受到土壤水分、盐分、温度和辐射等环境因子影响。干旱会降低土壤水势并限制根系吸水, 盐胁迫同时产生渗透胁迫和离子毒害, 低温和高温则直接影响膜流动性、酶活性及光合作用。当环境变化超过正常生理调节范围时, 植物体内水分运输、能量分配和氧化还原平衡首先受到影响, 并进一步表现为生长减缓、叶片失绿、膜结构损伤及产量下降。

植物逆境耐受并不是由某一种保护物质决定。相关研究认为, 干旱适应涉及根—冠信号、气孔调节、碳同化、渗透调节和生长分配等不同层次^[6]。另有研究将非生物逆境响应概括为胁迫感知、信号转导和生理输出相互衔接的调控体系^[8]。因此, 对植物环境适应能力的判断需要同时关注水分状态、光合效率、膜稳定性、抗氧化酶活性及代谢物积累。

1 植物逆境响应的生理基础

1.1 水分与离子稳态变化

水势变化是多种逆境产生生理效应的重要起点。干旱条件下, 土壤水势下降, 根系吸水能力降低, 叶片膨压减小。植物首先通过气孔关闭减少蒸腾, 同时增加根系吸收能力, 并重新调整地上部与地下部生物量分配。

盐胁迫早期同样表现为生理性缺水。根际盐浓度升高以后, 外部水势下降, 即使土壤含有一定水分, 根细胞也难以正常吸收。随着胁迫持续, Na^+ 和 Cl^- 在组织中积累, 进一步产生离子毒害和 K^+ 营养失衡。相关研究将盐胁迫作用划分为快速发生的渗透阶段和较慢出现的离子积累阶段^[7]。

耐盐植物通常能够限制 Na^+ 向地上部运输, 同时维持较高 K^+ 水平。2026 年对 276 份水稻种质开展的试验表明, 在 $125 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 处理 6d 后, 高耐

盐综合评价材料的地上部 Na^+ 含量显著低于敏感材料, 根系形态、离子平衡和渗透调节均表现出明显优势^[3]。不同水稻亚种主成分累计贡献率分别达到 82.587%、80.117% 和 88.700%, 反映耐盐性属于多性状共同作用的综合表型。

1.2 光合系统及膜结构响应

逆境对叶片光合系统的影响通常早于明显外观损伤。水分亏缺引起气孔关闭后, CO_2 进入叶片的速度下降, 净光合速率随之降低。胁迫进一步增强时, 叶绿体膜结构、光系统 II 和碳同化酶也会受到影响, 此时限制因素由气孔因素逐渐扩展到非气孔因素。

细胞膜是判断逆境伤害程度的重要对象。活性氧过量积累会攻击膜脂中的不饱和脂肪酸, 形成丙二醛等脂质过氧化产物。相对电导率升高意味着膜选择透过性下降, 常被用于反映细胞膜受损程度。

2026 年苹果砧穗组合持续干旱试验显示, 随处理时间延长, 叶绿素含量较对照下降 21.21% ~ 44.97%, 相对电导率提高 144.62% ~ 168.91%, 丙二醛提高 93.51% ~ 128.51%^[5]。这些指标的同步变化说明, 长期干旱会由最初的水分调节逐步发展为膜系统和光合器官损伤。

2 逆境条件下的主要生理调节机制

2.1 渗透调节与细胞保水

植物受到水分或盐分胁迫后, 会积累脯氨酸、可溶性糖、甜菜碱及部分可溶性蛋白。这些物质能够降低细胞渗透势, 在外界水势下降时维持一定膨压, 同时保护蛋白质和膜结构。

脯氨酸是应用较多的逆境响应指标。其含量快速增加通常意味着植物正在进行主动渗透调节。对马铃薯进行 4、8、12 和 16 d 干旱处理的研究发现, 随胁迫持续, 叶片脯氨酸最终较对照提高 378.99%, 而丙二醛增加 630.51%^[1]。脯氨酸大量积累体现保护反应增强, MDA 更大幅度升高则说明持续胁迫已经超过部分防御能力。

2.2 活性氧清除及抗氧化防御

正常代谢过程中植物会持续产生超氧阴离子、过氧化氢等活性氧。逆境条件下电子传递链受到干扰, 活性氧生成速度明显增加。低水平活性氧能够参与逆境信号传递, 持续过量积累则会氧化脂质、蛋白质和核酸。

超氧化物歧化酶 (SOD) 通常位于酶促抗氧化防御前端, 可将超氧阴离子转化为 H_2O_2 , 过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 进一步参与 H_2O_2 清除。

抗坏血酸、谷胱甘肽等非酶抗氧化物质则构成另一层防御。

马铃薯 16 d 干旱试验中, SOD 和 CAT 活性分别较对照提高 121.24% 和 212.17%, POD 活性在胁迫 8 d 以后明显升高^[1]。该结果体现了植物抗氧化系统随胁迫逐步启动的特征, 同时也说明保护酶活性增强不能完全阻止长期干旱引起的膜脂过氧化。

2.3 激素信号与代谢协调

脱落酸是植物水分逆境调节中的重要信号分子。根系感知土壤干旱后, ABA 合成和运输发生变化, 叶片保卫细胞通过离子通道调节改变膨压, 最终引起气孔关闭。与此同时, ABA 还能调节部分逆境响应基因表达。

活性氧、 Ca^{2+} 、蛋白激酶和植物激素之间存在相互联系。逆境信号最终作用于渗透调节、抗氧化、离子运输和生长过程, 使植物能够把有限资源优先配置于生存和维持基本代谢。

这种调节也具有明显成本。长期关闭气孔虽然减少水分损失, 却限制 CO_2 吸收。持续合成渗透调节物和抗氧化物质需要消耗碳源和能量。因此, 耐逆能力并非无限强化防御, 而是在生长与保护之间重新分配资源。

3 不同逆境条件下的适应特征

3.1 干旱与复合胁迫响应

干旱响应通常具有明显时间阶段性。短期水分亏缺主要表现为气孔关闭、脯氨酸和可溶性糖积累以及抗氧化酶活性提高。随着胁迫延长, 膜脂过氧化增强、叶绿素降解, 最终出现生长抑制和衰老。

复合逆境的生理效应并不等于两个单一胁迫简单相加。低温会降低膜流动性和酶反应速率, 干旱则限制水分供应, 两者同时发生时, 光合电子传递和活性氧清除均可能受到影响。

相关研究在干旱—低温复合胁迫下对西葫芦幼苗开展试验后发现, 0.05% 黄腐酸钾处理后, 相较单纯复合胁迫, 叶面积、鲜重和干重分别增加 13.89%、16.20% 和 17.43%, 脯氨酸提高 19.43%, SOD、POD 和 CAT 分别提高 13.48%、7.13% 和 16.28%, MDA 降低 14.37%, 净光合速率提高 17.95%^[4]。这组指标说明, 环境适应能力与渗透调节、活性氧清除和光合保护同步改善有关。

3.2 盐胁迫下的离子调节

耐盐植物除需要完成普通水分胁迫下的渗透调节外, 还必须保持细胞离子稳态。 Na^+ 过量进入细胞后

会竞争 K^+ 结合位点, 并干扰蛋白合成和酶活性。限制 Na^+ 吸收、减少向地上部运输、促进液泡区隔以及维持较高 K^+/Na^+ 比, 是典型耐盐策略。

研究表明, 耐盐材料在根总数量、根尖数量、根总长度和根表面积等方面显著优于敏感材料, 同时维持较低地上部 Na^+ 水平。籼稻和 AUS 耐盐材料的可溶性糖高于粳稻, 籼稻的脯氨酸含量也更高^[3]。这说明不同遗传类型即使获得相似耐盐结果, 也可能采用不同的生理调节组合。

4 植物环境适应能力的主要影响因素

4.1 胁迫强度与持续时间

植物生理响应应具有明显阈值特征。适度胁迫可以激活保护系统, SOD、POD、CAT 及渗透调节物质含量升高, 此阶段生理变化主要具有适应意义。胁迫持续增强以后, 活性氧产生速度超过清除能力, 膜损伤和光合下降逐渐占主导。

因此, 同一指标在不同胁迫阶段具有不同含义。MDA 持续增加多反映氧化损伤积累, 脯氨酸增加既可能代表较强主动调节, 也可能只是严重水分亏缺的伴随现象。评价植物抗逆能力需要同时考虑处理强度和持续时间。

4.2 物种、品种及器官差异

植物环境适应应具有显著遗传差异。即使处于相同逆境, 不同品种也会表现出不同根冠分配、渗透物质积累和酶活性变化。

根系是多数土壤逆境最先产生感知的器官。较大的根系表面积有利于维持水分和矿质吸收, 耐盐材料还可通过根系控制 Na^+ 吸收和向地上部运输。叶片则承担主要光合功能, 对气孔、水势和氧化损伤变化更加敏感。

苹果砧穗组合试验中, 不同组合的综合抗旱指数存在明显差异, 其中 XW 组合抗旱性最高, X5M7 最低, 两个主成分能够解释 85.66% 的指标信息^[5]。这说明材料抗逆性评价需要保留基因型和器官之间的差异, 单项平均数据容易掩盖真实适应特征。

4.3 多指标协同评价与适应策略

植物逆境响应存在明显的指标联动。水分亏缺首先影响气孔和叶片含水量, 随后改变光合作用, 活性氧增加后又启动抗氧化系统。盐胁迫在此基础上增加离子选择性运输和区隔过程。

抗逆评价因此更适合采用多个指标联合分析。叶片相对含水量可反映保水能力, 叶绿素和净光合速率反映碳同化状态, MDA 和相对电导率反映膜损伤,

SOD、POD 和 CAT 反映抗氧化能力, 脯氨酸和可溶性糖反映渗透调节。盐胁迫还应增加 Na^+ 、 K^+ 及 Na^+/K^+ 等指标。

主成分分析、隶属函数和综合评价指数能够压缩高度相关指标, 并减少单项生理参数评价产生的偏差。其价值不在于得到单一排名, 而在于辨别不同植物采用的适应策略, 例如根系维持型、渗透调节型、抗氧化型和离子排斥型。

5 结语

植物对干旱、盐渍和温度异常的适应建立在连续的生理调节基础上。水分亏缺和盐胁迫首先改变水势及离子平衡, 气孔关闭和生长减缓降低资源消耗, 脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质帮助维持细胞膨压, SOD、POD 和 CAT 共同限制活性氧积累。胁迫超过植物调节范围以后, MDA 和相对电导率持续升高, 叶绿素及光合能力下降, 生理状态由主动防御转向损伤积累。

不同物种和基因型并不存在完全一致的抗逆模式。耐旱材料可能依赖较强根系和水分保持能力, 耐盐材料还需要限制 Na^+ 积累并维持 K^+ 稳态, 复合胁迫则更依赖光合保护、渗透调节和抗氧化系统同步运行。植物环境适应能力的评价应避免使用单一指标, 以水分状态、光合作用、膜稳定性、抗氧化系统、渗透调节及离子平衡构建综合指标体系, 并结合胁迫强度和持续时间解释其动态变化。该思路能够更准确地区分适应性生理调节和不可逆损伤, 也可为抗逆种质筛选及逆境环境下植物生产管理提供生理依据。

[参考文献]

- [1] 梁丽娜, 刘雪, 唐勋, 等. 干旱胁迫对马铃薯叶片生理生化指标的影响 [J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(3): 1343-1348.
- [2] 赵晶晶, 周浓, 曹鸣宇. 非生物胁迫下植物体内丙酮醛代谢的研究进展 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(8): 1627-1637.
- [3] 陈敏, 焦紫岚, 乔承彬, 等. 不同亚种水稻种质资源对盐胁迫的形态生理响应及适应策略 [J]. 中国农业科学, 2026, 59(4): 705-722.
- [4] 孔繁荣, 李海平, 郭文忠, 等. 干旱低温复合胁迫下黄腐酸钾对西葫芦幼苗生长和生理生化特性的影响 [J]. 山东农业科学, 2024, 56(1): 74-80.
- [5] 金喜丽阁, 王朱莉, 张萍, 李文胜. 苹果砧穗组合幼苗对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价 [J]. 山东农业科学, 2026, 58(5): 75-84.
- [6] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding

- plant responses to drought—from genes to the whole plant[J]. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(3): 239-264.
- [7] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651-681.
- [8] Zhu J K. Abiotic stress signaling and responses in plants[J]. *Cell*, 2016, 167(2): 313-324.