

桔梗苗期生长发育对盐胁迫的响应及耐盐阈值分析

陈悦, 王秀萍, 李赵嘉*, 孟然, 冯薇, 吴哲, 鲁雪林

河北省农林科学院滨海农业研究所, 河北 唐山

收稿日期: 2026年9月25日; 录用日期: 2026年10月23日; 发布日期: 2026年10月30日

摘要

为了探究苗期桔梗生长发育对滨海盐渍土复合盐胁迫的响应, 明确其耐盐阈值及适应性生理机制, 本研究以滨海原生盐渍土为基质, 通过梯度配比设置土壤实际含盐量为0.11% (CK)、0.21%、0.32%和0.40%的土壤处理, 开展45天盆栽胁迫试验, 系统测定桔梗幼苗的生长及生理指标, 并建立回归模型。结果表明, 盐胁迫显著抑制桔梗幼苗株高、地上部与地下部生物量($P < 0.05$)。低盐胁迫下地下部鲜质量和根冠比分别较CK显著提升25.0%和8.9% ($P < 0.05$), 但盐分 $\geq 0.32\%$ 时, 生长抑制效应显著加剧。盐胁迫下桔梗苗期总叶绿素含量随盐浓度升高显著下降($P < 0.05$), 叶片质膜透性、丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量显著上升($P < 0.05$), 可溶性蛋白含量在0.32%盐浓度下达到峰值, 较CK提升35.1%, 随后显著下降。相关性分析显示, 地上部干质量与土壤含盐量呈极显著负相关, 可作为桔梗耐盐性评价的核心指标。基于二次回归模型, 以地上干质量降幅25%为适宜种植临界值, 降幅50%为临界标准, 确定桔梗幼苗在滨海复合盐渍土中适宜种植临界含盐量为0.20%, 耐盐阈值为0.29%。本研究结果可为滨海盐碱地桔梗规范化栽培提供理论依据与技术参数。

关键词

盐胁迫, 桔梗, 生长指标, 生理指标, 耐盐阈值

Response of *Platycodon grandiflorus* Seedling Growth and Development to Salt Stress and Analysis of Salt Tolerance Threshold

Yue Chen, Xiuping Wang, Zhaojia Li*, Ran Meng, Wei Feng, Zhe Wu, Xuelin Lu

Institute of Coastal Agriculture, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Tangshan Hebei

*通讯作者。

文章引用: 陈悦, 王秀萍, 李赵嘉, 孟然, 冯薇, 吴哲, 鲁雪林. 桔梗苗期生长发育对盐胁迫的响应及耐盐阈值分析[J]. 农业科学, 2026, 16(10): 1598-1606. DOI: 10.12677/hjas.2026.1610190

Received: September 25, 2026; accepted: October 23, 2026; published: October 30, 2026

Abstract

To explore the response of *Platycodon grandiflorus* seedling growth and development to compound salt stress in coastal saline soil, and to clarify its salt tolerance threshold and adaptive physiological mechanism, a 45-day pot experiment was conducted using natural coastal saline soil as the growth substrate. Four soil salt content treatments (0.11% for CK, 0.21%, 0.32% and 0.40%) were established via gradient mixing. Growth and physiological indicators of *Platycodon grandiflorus* seedlings were determined systematically, and a quadratic regression model was constructed. The results showed that salt stress significantly inhibited the plant height, aboveground and underground biomass of *Platycodon grandiflorus* seedlings ($P < 0.05$). Under low salt stress, underground fresh weight and root-shoot ratio increased significantly by 25.0% and 8.9% compared with CK ($P < 0.05$). Growth inhibition was markedly aggravated when soil salt content was $\geq 0.32\%$. The total chlorophyll content of *Platycodon grandiflorus* seedlings decreased significantly with the increase of salt concentration under salt stress ($P < 0.05$), while the leaf plasma membrane permeability, malondialdehyde (MDA) and proline (Pro) contents increased significantly ($P < 0.05$). Soluble protein content reached the maximum at the salt concentration of 0.32%, being 35.1% higher than CK, followed by a significant decline. Correlation analysis showed that aboveground dry weight was extremely significantly negatively correlated with soil salt content, which could be used as the core index for the evaluation of *Platycodon grandiflorus* salt tolerance. Based on the quadratic regression model, taking a 25% decrease in aboveground dry weight as the critical limit for suitable cultivation and a 50% decrease as the salt tolerance critical standard, the critical soil salinity for suitable cultivation and salt tolerance threshold of *Platycodon grandiflorus* seedlings in coastal composite saline soil were determined as 0.20% and 0.29%, respectively. The results of this study can provide a theoretical basis and technical parameters for the standardized cultivation of *Platycodon grandiflorus* in coastal saline-alkali land.

Keywords

Salt Stress, *Platycodon grandifloras*, Growth Indicators, Physiological Indicators, Salt Tolerance Threshold

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桔梗(*Platycodon grandiflorus* (Jacq.) A. DC.)为桔梗科桔梗属的多年生草本植物,在我国东北、华北、华东等地区广泛分布[1][2]。桔梗根部富含皂苷类、黄酮类、多糖以及酚酸等多种活性成分,具有宣肺化痰、利咽排脓、抗炎、抗氧化等多种药理活性,是传统中药和东亚地区常见药食同源植物之一,在我国已有悠久的历史[3][4]。近年来,随着现代药理学和植物化学研究的深入,桔梗在医药、保健食品及功能性原料等领域的应用价值日益受到重视,市场需求持续增长,人工种植面积亦不断扩大。然而,在桔梗规模化栽培过程中,土壤盐渍化问题逐渐凸显,成为限制其产量提升与品质稳定的重要环境因子。尤其是在我国部分滨海及内陆盐碱地区,土壤含盐量较高,严重制约了桔梗的正常生长与有效成分积累。因此,深入探讨桔梗在盐胁迫环境下的生理响应及其适应机制,对推动其在高盐地区的规范化种植具有

重要意义。有研究表明,盐胁迫对桔梗从种子萌发到幼苗生长的多个阶段均产生显著抑制效应。例如,随着盐浓度升高,桔梗种子的发芽率、发芽势及胚根伸长均受到明显抑制,幼苗的地上与地下部生物量积累亦显著降低,表明盐分胁迫不仅影响桔梗早期建成,也制约其营养生长和物质合成[5][6]。此外,盐分干扰还会引起桔梗叶片叶绿素含量下降、光合性能减弱,以及抗氧化系统失衡等一系列生理代谢紊乱,从而进一步限制其生长潜力与药材品质形成[7][8]。目前,关于桔梗耐盐性的研究多集中于室内实验利用单一 NaCl 模拟盐胁迫条件,侧重于分析模拟盐胁迫下植株生长的毒性效应及其部分生理响应[9]。然而,在自然环境中,特别是滨海盐渍土,通常为多种盐离子并存的复合盐碱环境,其离子组成、渗透势及 pH 值等均与实验室单一盐胁迫存在本质差异,因而单一盐分处理所获结论在实际应用中具有一定局限性。此外,关于桔梗在真实滨海原生盐碱土环境下的耐受能力及其适应机制尚未系统揭示,尤其是其耐盐阈值及关键生理指标的变化规律尚不明确,导致在盐渍土区域推广桔梗栽培时缺乏可靠的理论依据与技术参数支持。本研究以唐山市曹妃甸区滨海原生盐碱土为基质,通过梯度盐分设计,开展为期 45 天的桔梗盆栽胁迫实验。基于幼苗生长表型、生理代谢及氧化损伤等指标,结合相关性分析与回归模型,系统评估其耐盐阈值及适应性指标,构建桔梗耐盐性综合评价模型。研究结果为滨海盐渍区药用植物栽培模式优化提供理论支撑与技术参数。

2. 材料和方法

2.1. 供试植物

供试桔梗种子为籽粒饱满、大小均匀、无机械损伤的常规品种。种子经浸种催芽后,点播于 36 孔育苗穴盘,温室常规育苗;待幼苗生长至三叶一心期时,选取长势一致、健壮无病虫害的幼苗用于试验。

2.2. 供试基质

试验用土取自河北省唐山市曹妃甸区典型滨海盐碱地。依据土壤 Na^+ 含量,将原土分为高盐渍土(Na^+ 含量: $2.35\% \pm 0.03\%$)与低盐渍土(Na^+ 含量: $0.10\% \pm 0.01\%$)两类。经自然风干、粉碎过筛后,按质量比混合配制预设含盐量梯度为 0.10%、0.20%、0.30% 及 0.40% 的试验土壤。土壤样品按 1:5 土水比制备浸提液,采用电导率仪测定浸提液电导率(EC)。考虑温度对电导率测定结果的影响,根据实际测定温度查取相应温度校正系数,并按下式对实测电导率进行校正:

$$EC_c = EC_t \times K_t$$

式中, EC_c 为温度校正后的电导率, EC_t 为温度 t 条件下测得的电导率, K_t 为温度 t 对应的校正系数。根据校正后的电导率 EC_c 为查电导率与土壤含盐量对应表,获得土壤含盐量,并换算为质量百分数(%)。各处理实测土壤含盐量分别为 $0.11\% \pm 0.02\%$ 、 $0.21\% \pm 0.01\%$ 、 $0.32\% \pm 0.03\%$ 和 $0.40\% \pm 0.02\%$ 。

2.3. 试验设计

试验于河北省农林科学院滨海农业研究所农业综合试验基地的可调控遮雨棚内开展。采用口径 29 cm、高 35 cm 的塑料盆栽,每盆装干土 10.0 ± 0.2 kg,每盐分梯度设 5 次重复($n = 5$),待桔梗幼苗生长至三叶一心期,按单盆 5 株的密度移栽。生长指标测定时,盆体嵌置于下沉式种植槽中以缓冲昼夜温差变化。为维持土壤盐分稳定,盆底放置渗液回收盘,每日将渗出液回灌原盆,避免盐分淋溶损失,试验周期为 45 天。

2.4. 指标测定

2.4.1. 生长指标

盐胁迫处理 45 天后,进行破坏性采样与测定。利用直尺测量法测定幼苗由茎基点到生长点的长度为

株高，并将植株在根茎相连处分开，分为地上部和地下部，用 0.01 g 的电子分析天平分别称量各部分的鲜质量并记录，后将样品放入烘箱中，105℃杀青 30 分钟以钝化酶活性，后将温度调整至 80℃持续烘干至恒重称取各部分干质量，并计算根冠比。每盆 5 株分别测定，计算其平均值作为该盆的一个生物学重复数据。

2.4.2. 生理指标

分别采集每盆 5 株植株的叶片并混合，作为该盆的混合叶片样品，用于各项生理指标测定。采用乙醇浸提法测定叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量；电导率法测定叶片质膜相对透性；硫代巴比妥酸(TBA)显色法测定丙二醛(MDA)含量；考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白含量；采用酸性茚三酮比色法测定脯氨酸(Pro)含量。各项生理指标的测定方法均参照李合生[10]的方法，并根据实际试验条件作适当调整。

2.5. 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据整理与图表绘制。采用 SPSS 23.0 软件进行统计分析。不同盐分处理间的差异采用单因素方差分析(one-way ANOVA)，并采用 Duncan 新复极差法进行多重比较，显著性水平设为 $P < 0.05$ 。Pearson 法进行相关性分析以评估土壤含盐量与各指标间的关联性，构建二次多项式回归模型，计算桔梗适宜种植临界含盐量及耐盐阈值。

3. 结果与分析

3.1. 盐胁迫对桔梗生长的影响

如表 1 所示，盐胁迫显著抑制了桔梗幼苗的生长。随着土壤盐浓度升高，株高、地上部鲜质量、地上部干质量及地下部干质量均呈现显著的下降趋势($P < 0.05$)。但在土壤含盐量为 0.21%的条件下，地下部鲜质量与根冠比分别较 CK 显著增加 25.0%与 8.9% ($P < 0.05$)，表明轻度盐胁迫可能诱导了光合产物向根系的分配调整，增强根系吸收能力。当盐分大于等于 0.32%时，所有生长指标均急剧下降，其中 0.40% 处理下株高较 CK 下降 25.9%，地上干质量下降 80.3%，地下干质量下降 91.3%，生长受到严重抑制。

Table 1. Effects of salt stress on the growth indicators of *Platycodon grandiflorus*
表 1. 盐胁迫对桔梗生长指标的影响

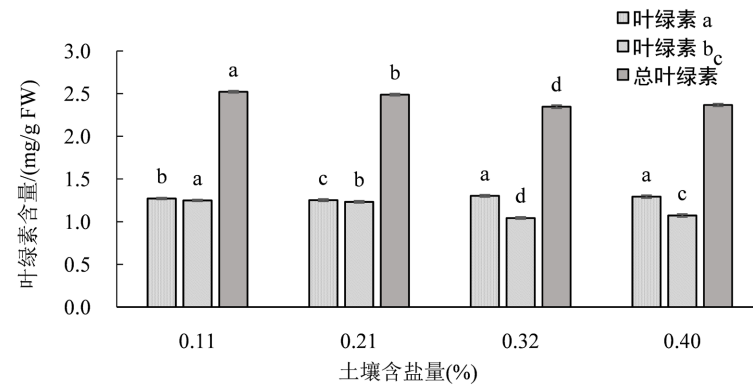
土壤含盐量 (%)	株高(cm)	地上部鲜质量 (g)	地下部鲜质量 (g)	地上部干质量 (g)	地下干质量 (g)	根冠比
0.11	49.24 ± 0.22a	6.5 ± 0.1a	5.56 ± 0.03a	1.47 ± 0.01a	2.31 ± 0.04a	1.57 ± 0.03b
0.21	47.63 ± 0.24b	6.04 ± 0.1b	6.96 ± 0.06b	1.14 ± 0.02b	1.96 ± 0.01b	1.71 ± 0.03a
0.32	39.29 ± 0.32c	3.09 ± 0.05c	3.45 ± 0.04c	0.57 ± 0.02c	0.56 ± 0.02c	1.00 ± 0.04c
0.40	36.49 ± 0.16d	1.69 ± 0.02d	1.73 ± 0.01d	0.29 ± 0.01d	0.20 ± 0.01d	0.68 ± 0.05d

注：数据为平均值 ± 标准差，n = 5。不同小写字母表示同一指标不同土壤含盐量处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

3.2. 盐胁迫对桔梗幼苗生理指标的影响

3.2.1. 对桔梗叶绿素含量的影响

如图 1 所示，总叶绿素含量随土壤含盐量的升高而显著降低($P < 0.05$)。其中，叶绿素 b 对盐分更为敏感，持续下降；而叶绿素 a 在土壤含盐量为 0.21%胁迫下，较对照显著降低了 1.6% ($P < 0.05$)，而在 0.32%和 0.40%盐浓度胁迫下较对照显著小幅提升了 2.4%和 1.6% ($P < 0.05$)，导致叶绿素 a/b 比值升高。



注：误差线表示标准差(SD)，下同。

Figure 1. Chlorophyll content of *Platycodon grandiflorus* under different soil salt contents

图 1. 不同含盐量土壤环境下桔梗的叶绿素含量

3.2.2. 对桔梗幼苗叶片细胞稳定性的影响

盐胁迫下，桔梗幼苗叶片的质膜透性和丙二醛含量均随土壤含盐量的升高而总体呈增长趋势(图 2)。其中，在土壤含盐量 0.21%的胁迫下，叶片的质膜透性和丙二醛含量较对照无显著变化；当含盐量增大到 0.32%时，叶片的质膜透性和丙二醛含量较对照显著增加($P < 0.05$)，在含盐量增大到 0.40%时，叶片的质膜透性和丙二醛含量达到最大，分别较 CK 增加了 58.97%和 42.28%。由此可见，质膜透性与土壤含盐量呈正相关，土壤含盐量越高，桔梗幼苗叶片的质膜透性越大。

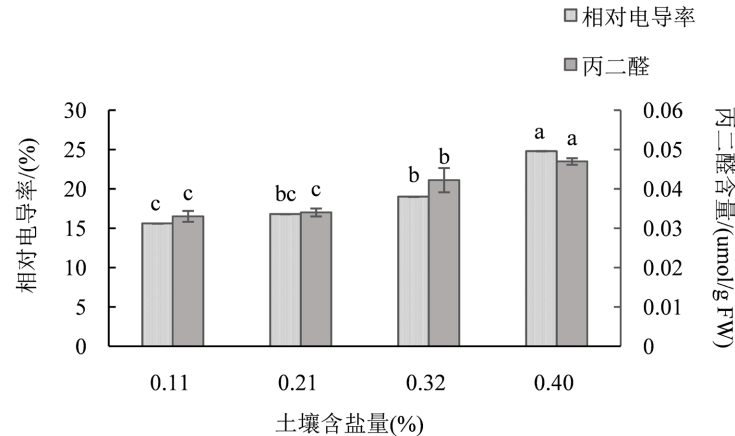


Figure 2. Effects of soils with different salt soil contents on the cell membrane permeability of *Platycodon grandiflorus* seedlings

图 2. 不同含盐量土壤对桔梗幼苗叶片细胞膜稳定性相关指标的影响

3.3. 桔梗幼苗耐盐指标选择

基于 Pearson 相关性分析，系统评估了土壤盐分梯度与桔梗幼苗生长及生理指标的关联性(表 2)。结果表明：株高($r = -0.966$, $P < 0.05$)、地上鲜质量($r = -0.967$, $P < 0.05$)、地上干质量($r = -0.991$, $P < 0.01$)、地下干质量($r = -0.965$, $P < 0.05$)均与土壤含盐量呈显著相关。其中，地上干质量与盐分浓度的相关性最强($|r| > 0.99$)，且达到极显著水平($P < 0.01$)，表明其可作为桔梗耐盐性评价的敏感性指标。因此，本研究确定地上干质量下降率是桔梗幼苗耐盐性鉴定的核心参数。

Table 2. Correlation analysis of soil salt content and various growth and physiological indicators of *Platycodon grandiflorus* seedlings

表 2. 土壤含盐量与桔梗幼苗各项生长与生理指标的相关性分析

指标	土壤含盐量	显著性
株高	-0.966	*
地上部鲜质量	-0.967	*
地下部鲜质量	-0.840	
地上部干质量	-0.991	**
地下部干质量	-0.965*	
根冠比	-0.903	
叶绿素 a	0.640	
叶绿素 b	-0.874	
质膜透性	0.929	
丙二醛含量	0.944	
脯氨酸含量	0.917	
可溶性蛋白含量	0.888	

注：*表示显著相关($P < 0.05$)，**表示极显著相关($P < 0.01$)。

3.4. 桔梗幼苗耐盐阈值确定

基于二次多项式回归分析，桔梗幼苗地上部干质量(y, g/株)与土壤含盐量(x, %)呈现显著非线性关系 ($F = 38.24, P < 0.01$) (图 3)。回归方程为： $y = -1.3386x^2 - 3.5214x + 1.8897$ ($R^2 = 0.9915$)。参考药用植物耐盐性评价通用标准，以对照(CK, 0.11%)地上干质量降低 25% (1.10 g/株)为适宜种植临界值，降低 50% (0.735 g/株)为耐盐临界阈值，代入方程计算得：适宜种植临界含盐量为 0.20%，耐盐阈值为 0.29%。

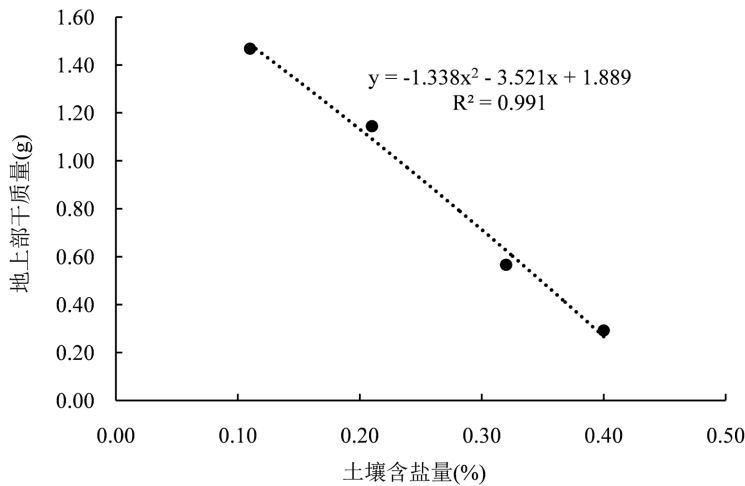


Figure 3. Regression between aboveground dry weight of *Platycodon grandiflorus* seedlings and soil salt content

图 3. 桔梗幼苗地上干质量与土壤含盐量之间的回归关系

4. 讨论

4.1. 盐胁迫对桔梗幼苗生长的影响

植物幼苗期是感知和响应盐胁迫的关键窗口期,其根系分生组织尚未完全发育成熟,基础代谢调控网络也处于建立阶段,因此对盐胁迫较为敏感。在这一时期,盐分首先降低土壤溶液水势,使根系吸水受限并形成渗透胁迫;随着盐分持续累积, Na^+ 、 Cl^- 等离子的过量吸收及离子平衡失调可进一步造成离子毒性。植株由此启动资源再分配和渗透调节等适应性响应,以维持细胞水分状态和基本代谢[11]。本研究中,0.21%处理下地下部鲜质量和根冠比显著增加,提示轻度盐胁迫阶段可能存在向根系优先分配同化产物的补偿性调整,这与前人对油菜、燕麦等植物的研究结果一致[12][13]。随着土壤含盐量升高至 $\geq 0.32\%$,质膜透性和MDA含量明显升高,说明膜脂过氧化和细胞膜损伤加剧;与此同时,总叶绿素下降、地上部与地下部生物量显著减少。综合来看,桔梗幼苗对盐胁迫的响应可概括为“渗透胁迫-离子失衡/毒性-渗透调节与代偿-氧化损伤和膜系统受损-光合与物质积累受限-生长抑制”的连续过程。需要指出的是,本试验未直接测定植株体内 Na^+ 、 K^+ 等离子含量及活性氧水平,因此上述离子毒性与氧化胁迫之间的因果联系主要依据本研究指标的协同变化进行推断,仍需通过离子稳态和抗氧化系统指标进一步验证。

4.2. 盐胁迫对桔梗叶片叶绿素含量的影响

光合作用是植物能量与物质代谢的核心过程,叶绿素含量及其组分变化可反映光合机构在盐胁迫下的响应状态[14]-[16]。本研究中,0.21%低盐处理下叶绿素a较CK显著降低1.6%,叶绿素b和总叶绿素亦呈下降趋势,提示轻度盐胁迫已对光合色素体系产生影响。值得注意的是,在0.32%和0.40%高盐处理下,叶绿素a较CK分别小幅升高2.4%和1.6%,而叶绿素b持续下降、总叶绿素总体降低。该现象与高盐下生物量明显下降及膜损伤加重的整体趋势并不完全一致,因此不宜将叶绿素a的升高直接解释为光合能力增强或耐盐性提高。其原因可能涉及多方面因素:一是盐胁迫下叶绿素a与叶绿素b的降解速率或稳定性存在差异,从而导致色素组分比例发生改变;二是高盐造成叶片水分状态变化时,以鲜质量为基准的色素含量可能受到一定的浓缩效应影响;三是植株在胁迫不同阶段可能发生色素代谢的短期调节;此外,也不能排除生物学变异和测定误差对小幅变化的影响。由于本研究未同步测定叶片含水量、叶绿体超微结构、叶绿素代谢相关酶活性、净光合速率及PSII光化学效率等指标,上述解释目前均属于可能性分析。因而,高盐下叶绿素a小幅增加应视为本研究的初步发现,其生理意义及具体机制仍需通过后续多指标联合测定进一步验证。

4.3. 盐胁迫对桔梗幼苗叶片细胞膜透性的影响

植物质膜是维持细胞离子选择性运输与内环境稳态的重要屏障,MDA则是反映膜脂过氧化程度的常用指标[17]-[20]。从盐胁迫的一般过程看,土壤盐分升高首先降低外界水势,造成渗透胁迫并限制根系吸水;随着胁迫持续和盐分增加,过量盐离子可能进一步扰乱细胞离子平衡,形成离子毒性风险,并诱导活性氧积累,进而造成膜脂过氧化和膜结构受损。本研究虽未直接测定植株体内 Na^+ 、 K^+ 等离子含量及活性氧水平,因此不能直接证明离子毒性和活性氧积累的程度,但质膜透性与MDA的变化为氧化损伤提供了间接证据。0.21%处理下二者与CK差异不显著,说明轻度盐胁迫阶段膜系统尚能维持相对稳定;当土壤含盐量达到0.32%及以上时,质膜透性和MDA明显升高,且0.40%处理达到最高水平,表明膜脂过氧化及膜完整性损伤明显加重。与此同时,株高及地上、地下部生物量显著下降,说明当渗透调节和其他保护机制不足以抵消持续胁迫时,膜系统损伤可能成为生长受抑的重要生理环节。

4.4. 盐胁迫对桔梗幼苗叶片渗透调节物质的影响

渗透调节是植物缓冲盐胁迫早期水分亏缺的重要生理策略。土壤盐分升高导致外界水势降低,根系吸水受限,植株可通过积累脯氨酸等相容性溶质以及调节可溶性蛋白水平,降低细胞渗透势、维持水分平衡,并在一定程度上稳定蛋白质和膜结构[21]-[23]。本研究中,脯氨酸含量随盐度升高持续增加,表明桔梗幼苗的渗透调节反应随胁迫增强而被持续动员;可溶性蛋白则在 0.32%处理达到较高水平后于 0.40%处理下降,提示其保护性代偿可能存在一定限度。需要指出的是,脯氨酸等物质的积累既可能反映适应性调节,也可能反映胁迫程度加深,因此不能仅凭其含量升高判断耐盐能力增强。

4.5. 盐胁迫下桔梗幼苗的综合生理响应机制

综合各项指标变化可见,桔梗幼苗对盐胁迫表现出由适应性调节向生理损伤逐步转变的响应过程。盐分升高首先引发渗透胁迫,植株通过根冠分配调整、脯氨酸积累及可溶性蛋白变化进行适应性补偿;随着胁迫加重,离子稳态可能受到干扰并伴随氧化压力增强,表现为 MDA 积累和质膜透性升高,说明膜脂过氧化及膜完整性受损,同时叶绿素 b 和总叶绿素下降表明光合色素体系受到影响,最终导致株高及地上、地下部生物量显著降低。因此,桔梗幼苗的耐盐响应可概括为“渗透胁迫-适应性调节-可能的离子失衡-氧化损伤-膜与光合系统受损-生长抑制”的连续过程。需要指出的是,本研究未直接测定植株离子积累、活性氧及光合功能参数,因此部分中间环节仍属于基于现有指标的机制推断,后续仍需通过相关生理和生化指标加以验证。

4.6. 耐盐阈值确定与评价指标的意义

确定适宜种植临界值及耐盐阈值对于指导盐碱地作物布局与栽培管理具有直接实践价值。相关性分析是通过量化盐胁迫浓度与植物表型、生理指标之间的关联性,筛选出对盐分响应最敏感的指标,并结合回归模型的建立确定适宜种植临界值及耐盐阈值。在本研究中通过相关性分析,地上干质量被确定为桔梗耐盐性评价的核心指标,其敏感性高于株高或鲜质量指标。地上干质量综合反映了光合产物积累、物质分配及盐胁迫对代谢活动的整体抑制效应,其他指标如质膜透性、丙二醛和脯氨酸,虽对阐明耐盐机理具有重要价值,但作为单一评价指标可能存在波动或解释复杂性。同时,在其他研究中地上干质量也经常被筛选作为耐盐性评价的关键指标[24][25]。与先前基于单一 NaCl 模拟胁迫的研究相比,本研究基于滨海盐渍原土而非单一 NaCl 胁迫的实验设计,更贴近实际盐碱地环境,为桔梗种植临界值和耐盐阈值的确定提供了更高的生态效度,本研究结果更适用于滨海盐渍区桔梗的种植规划。

5. 结论

桔梗幼苗对盐胁迫呈明显的浓度依赖性和阶段性响应。0.21%低盐条件下,地下部鲜质量和根冠比增加,表明植株可能通过资源再分配和渗透调节进行适应性补偿;当土壤含盐量大于等于 0.32%时,质膜透性和 MDA 明显升高,叶绿素 b 和总叶绿素下降,株高及地上、地下部生物量显著降低,表明盐胁迫已由适应性调节逐渐转向氧化损伤和生长抑制。值得注意的是,高盐条件下叶绿素 a 出现小幅升高,但该变化与叶绿素 b、总叶绿素下降及整体生长受抑的趋势并不完全一致,因此尚不能视为光合能力增强。该现象可能与叶绿素组分差异性变化、叶片含水状态、胁迫阶段性调节或实验变异有关,后续需结合叶绿体结构、叶绿素代谢及光合功能指标进一步验证。

通过相关性分析及回归模型确定地上干质量为评价桔梗耐盐性的关键指标,并基于此得出桔梗在滨海复合盐渍土环境下的适宜种植临界含盐量为 0.20%,耐盐阈值为 0.29%。

基金项目

河北省重点研发计划中医药创新专项(23372505D)。

参考文献

- [1] 郑亚文, 杨潇, 严一字, 等. 桔梗皂苷的研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 206-215.
- [2] 李超, 张欢, 汲晨峰. 桔梗化学成分、药理作用及现代应用研究进展[J]. 中国药学杂志, 2025, 60(1): 9-20.
- [3] Zhang, S., Chai, X., Hou, G., Zhao, F. and Meng, Q. (2022) *Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC.: A Review of Phytochemistry, Pharmacology, Toxicology and Traditional Use. *Phytomedicine*, **106**, Article ID: 154422. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2022.154422>
- [4] Chen, J., Ji, X., Du, X., Xu, R., Shi, F. and Guo, X. (2024) Research Progress on Structure and Bioactivity of Polysaccharides from *Platycodon grandiflorum*. *Starch—Stärke*, **77**, Article ID: 2400086. <https://doi.org/10.1002/star.202400086>
- [5] 张美茜, 王晓琴, 关海滨, 等. 盐胁迫对桔梗幼苗生长及其根际土壤微生物数量的影响[J]. 华西药学杂志, 2024, 39(1): 89-93.
- [6] 信龙飞, 谷彩花, 张艳玲, 等. 盐胁迫对桔梗种子萌发和幼苗光合特性的影响[J]. 种子, 2022, 41(9): 40-46, 52.
- [7] 黄佳, 王丹, 王利新, 等. NaCl 胁迫对桔梗幼苗脯氨酸含量影响的研究[J]. 吉林农业, 2018(15): 59.
- [8] 张美茜, 于娟, 曹阳, 等. 盐胁迫对桔梗生化指标及总皂苷积累的影响[J]. 生物学杂志, 2024, 41(4): 71-77.
- [9] 张美茜. 桔梗对盐胁迫的响应及其分子应答机制研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古医科大学, 2024.
- [10] 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.
- [11] 景茂雅, 张子玉, 张萌, 等. 水杨酸浸种对盐胁迫藜麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 作物杂志, 2025(1): 194-201.
- [12] 赖弟利, 朱红林, 何凤, 等. 盐胁迫对 3 个燕麦品种幼苗生长及生理生化的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(5): 4-9.
- [13] 林国冰, 李静, 钱晨, 等. 外源物质缓解油菜盐胁迫效应研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(17): 1-10.
- [14] 闵筱筱, 高佳音, 岳建华, 等. 不同品种传统菊花对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 山东农业科学, 2024, 56(8): 62-73.
- [15] 张建鹏. 盐胁迫下不同辣椒品种的耐盐性差异及生理生化指标响应[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(16): 127-133.
- [16] 焦明翠, 蔡立格, 魏健, 等. 盐胁迫的生理危害与植物的适应机制研究进展[J]. 长春师范大学学报, 2023, 42(6): 125-132.
- [17] 王禹童, 刀静梅, 杨绍林, 等. 甘蔗生理生化特性对干旱胁迫及复水的响应及抗旱性评价[J]. 中国糖料, 2025, 47(1): 52-63.
- [18] 曾兵, 尚盼盼, 沈秉娜, 等. 淹水胁迫下鸭茅根系基因差异表达及相关通路分析[J]. 草业学报, 2024, 33(2): 93-111.
- [19] 王宝增, 钟珺珩, 江俊涛, 等. 干旱胁迫对两个玉米品种耐旱性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2020(11): 20-23.
- [20] 张衡锋, 杨绮, 韦庆翠, 等. 盐胁迫对 10 个品种紫薇的影响及其耐盐性综合评价[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(9): 34-40.
- [21] 单晓宇, 吕宗勇, 张杰, 等. 植物耐盐机理及生物修复策略[J]. 中国农学通报, 2025, 41(35): 46-54.
- [22] 关秀玲, 申健. 植物响应盐碱胁迫的生理和分子机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(21): 10-16.
- [23] 王大江, 刘昭, 路翔, 等. 植物耐盐机制研究进展及展望[J]. 华北农学报, 2024, 39(5): 80-92.
- [24] 刘雅辉, 杨雅华, 王秀萍, 等. 黄秋葵苗期的盐胁迫反应及耐盐阈值分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(23): 27-28, 57.
- [25] 李小康, 吴崇宁, 王维, 等. 人工合成六倍体小麦耐盐种质资源的筛选及评价[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(12): 1487-1495.