

腐殖酸对盐胁迫下紫花苜蓿生长及土壤酶活性的影响

姚德宝*, 华 珍, 胡艺馨, 曹芝悦, 王 哲#

商洛学院生物医药与食品工程学院, 陕西 商洛

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年4月3日; 发布日期: 2026年4月10日

摘 要

为探究腐殖酸(Humic Acid, HA)对盐胁迫的缓解效应及作用机制。本研究通过盆栽试验, 以NaCl模拟盐胁迫, 设置空白对照(CK)、盐胁迫组(ST)及不同浓度腐殖酸(10, 25, 50和100 mg/kg, T1~T4)处理, 系统探究HA盐胁迫下紫花苜蓿生长和土壤微环境的调控效应。结果表明: ST处理显著抑制了紫花苜蓿的生长并导致土壤环境劣化。与CK相比, ST处理组植株地上部和地下部生物量分别降低49.37%和52.14%; 叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量分别下降45.21%和31.98%。同时, ST处理降低了土壤氮素的有效性, 硝态氮和铵态氮含量分别降低57.56%和49.69%; 土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、脲酶和过氧化氢酶活性分别下降了41.37%、72.31%、86.37%、74.01%和44.69%。施用腐殖酸可有效缓解盐胁迫的负面效应, 其中T3处理效果最佳。与ST相比, T3处理地上部和地下部生物量分别提高179.86%和312.79%; 叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量分别提高139.95%和49.88%; 土壤硝态氮和铵态氮含量分别提高172.05%和121.22%; 蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、脲酶和过氧化氢酶活性较ST分别提高67.26%、231.75%、697.26%、327.82%和79.77%。综上所述, 适宜浓度腐殖酸(50 mg/kg)通过改善土壤氮素供应、提升碳氮转化相关酶活性、促进渗透调节物质积累, 有效缓解盐胁迫对紫花苜蓿生长的抑制作用, 研究结果为盐碱地改良及优质苜蓿栽培提供了理论依据与实践指导。

关键词

腐殖酸, 盐胁迫, 紫花苜蓿, 土壤酶活性

Effects of Humic Acid on Alfalfa Growth and Soil Enzyme Activity under Salt Stress

Debao Yao*, Zhen Hua, Yixin Hu, Zhiyue Cao, Zhe Wang#

School of Biomedical and Food Engineering, Shangluo University, Shangluo Shaanxi

Received: March 2, 2026; accepted: April 3, 2026; published: April 10, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 姚德宝, 华珍, 胡艺馨, 曹芝悦, 王哲. 腐殖酸对盐胁迫下紫花苜蓿生长及土壤酶活性的影响[J]. 农业科学, 2026, 16(4): 568-575. DOI: 10.12677/hjas.2026.164072

Abstract

This study aimed to investigate the alleviating effects and underlying mechanisms of Humic Acid (HA) on salt stress in alfalfa. A pot experiment was conducted with NaCl-stimulated salt stress, including a control (CK), a salt stress group (ST), and different concentrations of HA treatments (10, 25, 50, and 100 mg/kg, T1~T4). The effects of HA on alfalfa growth and the soil micro-environment under salt stress were systematically examined. The results showed that ST treatment significantly inhibited alfalfa growth and deteriorated the soil environment. Compared with CK, ST treatment reduced aboveground and belowground biomasses by 49.37% and 52.14%, respectively; soluble sugar and soluble protein contents in leaves decreased by 45.21% and 31.98%, respectively. Simultaneously, ST treatment reduced soil nitrogen availability, with nitrate and ammonium contents decreasing by 57.56% and 49.69%, respectively. The activities of soil sucrose, amylase, cellulase, urease, and catalase decreased by 41.37%, 72.31%, 83.60%, 74.01%, and 44.69%, respectively. Application of HA effectively mitigated the negative effects of salt stress, with the 50 mg/kg HA treatment (T3) showing the most pronounced effect. Compared with ST, the T3 treatment increased aboveground and belowground biomasses by 179.86% and 312.79%, respectively; soluble sugar and soluble protein contents in leaves increased by 139.95% and 49.88%, respectively; soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents increased by 172.05% and 121.22%, respectively; and the activities of soil sucrose, amylase, cellulase, urease, and catalase increased by 67.26%, 231.75%, 697.26%, 327.82%, and 79.77%, respectively. In conclusion, an appropriate concentration of humic acid (50 mg/kg) effectively alleviated the inhibitory effects of salt stress on alfalfa growth by improving soil nitrogen availability, enhancing the activities of enzymes involved in carbon and nitrogen transformations, and promoting the accumulation of osmotic adjustment substances. These findings provide both a theoretical basis and practical guidance for the remediation of saline-alkali soils and the cultivation of high-quality alfalfa.

Keywords

Humic Acid, Salt Stress, Alfalfa, Soil Enzyme Activity

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

土壤盐渍化是制约全球可持续农业发展的重要非生物胁迫因子，尤以干旱半干旱地区最为突出。在蒸发强烈的区域，深层土壤或地下水中的可溶性盐分(Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 等)随毛管水上升并在地表持续积累，导致盐离子浓度显著升高，形成土壤盐渍化现象[1][2]。这一过程不仅加剧了耕地资源紧张，更对作物生长构成严重威胁。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)作为多年生豆科牧草，因其适应性广、抗逆性强且兼具一定耐盐特性，被广泛视为盐渍化土壤生态修复与农业利用的首选植物之一。该作物栽培不仅具有重要的饲用价值，同时在改良土壤结构、提升地力、防风固沙等方面发挥着积极的生态功能。然而，当土壤盐分浓度超过其耐受限度时，高盐环境所引发的渗透胁迫与离子毒害，严重抑制植株对氮素等营养元素的吸收利用，导致光合效率下降、生物量积累受阻、最终表现为产量品质降低。从生理机制层面来看，盐渍化对植物的伤害具有多维度特征：一方面通过诱导活性氧爆发，破坏抗氧化酶系统[3][4]，扰乱细胞正常的生理生化代谢秩序[5]；另一方面直接抑制叶绿素合成与光合作用效率[6]，同时干扰根系对矿质养分的

吸收、转运与分配[7]。上述生理紊乱最终将抑制细胞分裂与伸长，减缓植株生长发育进程，严重时可致植株死亡。因此，探究并提升植物耐盐能力，对于保障全球盐渍化背景下的粮食安全与农业可持续发展具有重要理论价值和现实意义。

腐殖酸(Humic Acid, HA)是由动植物残体经微生物分解及地球化学过程形成的天然大分子有机弱酸，为土壤腐殖质中最具生物活性的组分。施用腐殖酸等有机改良剂可通过吸附、交换与酸碱缓冲作用改善盐碱土壤理化性质，提高土壤有机质含量，从而实现盐碱地改良与作物种植的双重目标[8][9]。在植物耐盐调控方面，腐殖酸的作用已得到广泛证实：适量腐殖酸能够显著提高梭梭种子在盐胁迫下的萌发率，并促进初生根生长[10]。针对木本植物，腐殖酸也能够减轻 NaCl 胁迫对苹果嫁接苗根系形态建成及活力的抑制，改善光合性能与水分利用效率，降低气孔限制值[11]。也能显著提升刺槐叶片含水量，缓解盐胁迫诱导的生理干旱[12]。紫花苜蓿作为盐碱地改良的优选牧草，其对盐胁迫的响应机制备受关注，但腐殖酸能否通过改善土壤微生态环境来增强紫花苜蓿的耐盐能力。本研究以紫花苜蓿为供试材料，采用盆栽试验 NaCl 模拟盐胁迫，设置不同的腐殖酸浓度系统研究腐殖酸对盐胁迫下紫花苜蓿生长特性、生理指标及土壤酶活性的调控作用，明确腐殖酸缓解盐胁迫的适宜浓度及作用机制，以期为盐碱地改良及优质紫花苜蓿栽培提供理论依据与实践指导。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

本实验选取紫花苜蓿为供试植物，供试土壤采自陕西关中平原渭南地区的耕地表层黄绵土，自然风干后过 2 mm 筛备用。土壤基础理化性质为：全磷 0.70 g/kg，速效磷 11.34 mg/kg，全氮 1.13 g/kg，有机质 12.03 mg/kg，pH 8.21。供试腐殖酸(黄腐酸)购自上海麦克林生化科技有限公司，CAS 号为 479-66-3，纯度 $\geq 95\%$ 。

2.2. 试验设计

采用盆栽实验方法，于 2025 年 3 月至 6 月在商洛学院校园内进行。共设置 6 个处理，包括：(1) CK：空白对照组；(2) ST：盐胁迫处理(0.5 g/kg NaCl)；(3) T1：盐 ST + 10 mg/kg 腐殖酸；(4) T2：ST + 20 mg/kg 腐殖酸；(5) T3：ST + 50 mg/kg 腐殖酸；(6) T4：ST + 100 mg/kg 腐殖酸。选用规格一致的花盆(直径 25 cm，深度 20 cm)，每盆装干土 8 kg，每个处理 4 次重复，共 24 盆。NaCl 以溶液形式均匀施入土壤，施用量为 0.5 g·kg⁻¹ 干土(相当于每盆 4.0 g)。腐殖酸与底肥(复合肥 N-P₂O₅-K₂O 15-15-15，按田间常规用量折算)同步以溶液方式施入，边喷洒边翻拌，确保与土壤充分混匀后装盆。装盆后浇去离子水调节土壤含水量至田间持水量的 60%，平衡 7 d 后进行播种，以保证盐分在土壤基质中分布均匀。实验周期采用称重补水法控制土壤水分，播种至出苗期间保持表层土壤湿润；定苗后每 3 d 称重补水 1 次，补水量根据盆重损失确定，全程避免盆底渗漏，以防盐分淋失。试验期间如遇降雨，采用活动式遮雨棚遮蔽。供试苜蓿种子经粒选，剔除病虫害粒后，用 0.5%NaClO 溶液消毒 1 min，以去离子水反复冲洗，随后置于培养皿中遮光条件催芽 12 h。次日进行播种，每盆设置 30 穴，每穴播 1 粒种子。待子叶展开后定苗，每盆留苗 20 株健壮幼苗，种植 90 天后收获，并测定相关指标。

2.3. 测定指标与方法

2.3.1. 样品收集

试验结束后，将植株从盆中完整取出，采用“抖根法”收集根际土壤：轻轻抖动根系，去除与根系结合松散的非根际土壤，使用无菌刷子或轻轻拍打，将紧密附着在根系表面的根际土壤收集至无菌采样袋

中。根际土壤样品经 2 mm 筛去除根系残体后, 分为两份: 一份作为鲜样保存于-20℃冰箱, 用于碳氮代谢相关酶活性的测定; 另一份土壤自然风干后、研磨过筛后, 用于理化性质分析。

根际土壤采集完成后, 将茎叶与根系分别装入样品袋, 用于生物量的测定。

2.3.2. 生物量测定

每盆选取 15 株长势一致的植株进行测定。产量采用直接收割称重法测定。生物量测定: 将茎叶与根系样品于 105℃杀青 30 min, 随后于 75℃恒温烘干至恒重, 分别记录地上部(茎、叶)和地下部(根)生物量。

2.3.3. 生理指标与土壤酶活性测定

植株生理指标: 可溶性蛋白采用考马斯亮蓝法测定[13]; 可溶性糖采用蒽酮比色法测定[14]。

土壤酶活性及氮素指标: 土壤硝态氮和铵态氮分别采用 KCI 浸提-紫外分光光度法和靛酚蓝比色法测定[15]。脲酶的测定采用苯酚钠-次氯酸钠比色法[15], 土壤蔗糖酶、纤维素酶和淀粉酶的活性测定均采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法[16]。

2.4. 数据处理

使用 Excel 对生物量、生理指标、土壤酶活性等数据进行预处理。使用 GraphPad Prism (10.4.1)软件进行统计分析并绘制图形。图表中的数据为平均值±标准差(Mean ± SD)。

3. 结果与分析

3.1. 盐胁迫下紫花苜蓿生长特性的影响

盐胁迫处理(ST)显著抑制了苜蓿的生长, 与对照组(CK)相比, ST 处理的地上生物量、地下生物量分别降低了 63.11%和 75.95%(表 1)。施加外源腐殖酸可有效缓解盐胁迫的抑制效应, 其中, T3 和 T4 组地上生物量较 ST 分别显著提高了 179.86%和 193.64%, 均与 CK 组无显著性差异; 地下部分生物量分别提高了 312.79%和 405.21%, 亦与 CK 组无显著性差异。

Table 1. Effects of humic acid application on the shoot and root biomass of alfalfa under salt stress. Different lowercase letters in the columns indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$), the same below

表 1. 施用腐殖酸对盐胁迫下苜蓿地上和地下生物量的影响, 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$), 下同

处理	地上生物量(g/盆)	地下生物量(g/盆)
CK	2.32 ± 0.24a	1.16 ± 0.11b
ST	0.85 ± 0.15c	0.28 ± 0.04d
T1	1.42 ± 0.18b	0.53 ± 0.05c
T2	1.53 ± 0.18b	0.61 ± 0.06c
T3	2.40 ± 0.06a	1.15 ± 0.09b
T4	2.52 ± 0.23a	1.41 ± 0.11a

3.2. 腐殖酸对盐胁迫下紫花苜蓿渗透物质的影响

盐胁迫处理显著降低了苜蓿叶片中渗透调节物质的含量。如表 2 所示, 与对照组(CK)相比, 盐胁迫(ST)处理下紫花苜蓿叶片的可溶性糖含量降低了 45.21%。施用腐殖酸可显著提高盐胁迫下苜蓿的可溶性糖含量。与 ST 组相比, T2、T3 和 T4 处理组分别提高了 44.39%, 139.95%和 34.67%。其中, T3 处理可

溶性糖含量达到最大值,且显著高于 CK 组,增幅达到 19.89%。可溶性蛋白的变化趋势与可溶性糖相似。与 CK 相比,ST 处理系下苜蓿叶片的可溶性蛋白的含量降低了 31.98%。添加腐殖酸可显著提高了盐胁迫下苜蓿的可溶性蛋白含量。与 ST 组相比,T2 和 T3 处理组分别显著提高了 13.76%和 49.88%。T3 处理组的可溶性蛋白含量达到最大值,且恢复至与 CK 组无显著性差异水平。

Table 2. Effects of humic acid on soluble protein and soluble sugar content in alfalfa leaves under salt stress

表 2. 腐殖酸对盐胁迫下苜蓿叶片可溶性糖和可溶性糖含量的影响

处理	可溶性糖(%)	可溶性蛋白(%)
CK	6.46 ± 0.46b	13.46 ± 0.59a
ST	3.62 ± 0.19d	9.16 ± 0.34c
T1	4.02 ± 0.11d	10.42 ± 0.29b
T2	5.23 ± 0.18bc	9.79 ± 0.36bc
T3	7.74 ± 0.35a	13.73 ± 0.53a
T4	4.87 ± 0.11c	9.94 ± 0.41bc

3.3. 施用腐殖酸对盐胁迫下土壤理化性质的影响

腐殖酸添加显著改变了盐胁迫下土壤硝态氮和铵态氮含量(表 3)。与对照(CK)相比,盐胁迫(ST)处理使土壤硝态氮含量显著降低 53.75% ($P < 0.05$)。施用腐殖酸可有效缓解这一抑制效应:与 ST 组相比,T1、T2 和 T3 处理组硝态氮含量分别增加 49.61%、63.95%和 106.40%;其中,T3 处理组效果最为显著,其硝态氮含量恢复至与 CK 组无显著性差异。土壤铵态氮含量呈现相似变化趋势。盐胁迫处理使铵态氮含量较 CK 组显著降低 55.07%。不同浓度腐殖酸处理均不同程度提升铵态氮含量。与 ST 组相比,T1、T2、T3 和 T4 处理组铵态氮含量分别提高 55.07%、74.95%、121.22%和 75.38%;其中,T3 处理组效果最优,其铵态氮含量恢复至与 CK 组无显著性差异(表 3)。

Table 3. Effects of humic acid on soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen under salt stress

表 3. 腐殖酸对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响

处理	硝态氮含量(mg/kg)	铵态氮含量(mg/kg)
CK	77.05 ± 11.92a	100.39 ± 13.94a
ST	35.64 ± 2.96d	45.11 ± 4.45c
T1	53.32 ± 5.72c	73.15 ± 2.94b
T2	58.43 ± 4.15bc	78.92 ± 7.18ab
T3	73.56 ± 6.49ab	99.80 ± 12.10a
T4	33.63 ± 5.66d	86.47 ± 6.30ab

腐殖酸添加对盐胁迫下蔗糖酶、纤维素酶和淀粉酶活性均有显著影响(表 4)。与对照组(CK)相比,盐胁迫处理(ST)使土壤蔗糖酶活性显著下降 41.37% ($P < 0.05$)。添加腐殖酸可有效缓解这种抑制效应:与 ST 组相比,T2、T3 和 T4 处理分别使蔗糖酶活性显著提高了 20.24%、57.06%和 32.07% ($P < 0.05$),其中 T3 处理的活性接近 CK 水平。对于淀粉酶,ST 处理导致其活性显著下降了 72.31% ($P < 0.05$),腐殖酸添加显著提升了淀粉酶活性:与 ST 相比,T1、T2、T4 处理分别提高了 111.26%、231.75%和 39.03% ($P < 0.05$),

而 T3 处理的活性在所有处理中最高, 且显著高于 CK (表 4)。纤维素酶活性在盐胁迫下同样受到强烈抑制, 较 CK 降低了 86.73% ($P < 0.05$); 添加腐殖酸后, 各处理组纤维素酶活性均显著提升: 与 ST 相比, T1、T2、T3 和 T4 分别提高了 177.38%、207.48%、697.26%和 370.74%, 其中 T3 处理的活性接近 CK 水平。

Table 4. Effects of humic acid on activities of sucrase, amylase, and cellulase in soil under salt stress

表 4. 腐殖酸对盐胁迫下土壤蔗糖酶、淀粉酶和纤维素酶活性的影响

处理	蔗糖酶(mg/g)	淀粉酶(mg/g)	纤维素酶(mg/g)
CK	1.16 ± 0.09a	1.36 ± 0.16a	3.29 ± 0.15a
ST	0.68 ± 0.06d	0.39 ± 0.04c	0.46 ± 0.11d
T1	0.69 ± 0.08cd	0.68 ± 0.11bc	1.28 ± 0.31c
T2	0.82 ± 0.03cd	0.84 ± 0.15b	1.42 ± 0.21c
T3	1.07 ± 0.11ab	1.31 ± 0.21a	3.67 ± 0.15a
T4	0.89 ± 0.07bc	0.55 ± 0.07bc	2.17 ± 0.11b

盐胁迫显著抑制了土壤脲酶和过氧化氢酶的活性, 施用腐殖酸提高土壤酶活性(表 5)。与对照组(CK)相比, 盐胁迫(ST)处理显著降低了土壤脲酶活性, 降幅达 74.01% ($P < 0.05$)。不同腐殖酸施用比例处理下, 与 ST 组相比, T1、T2、T3 和 T4 处理组的酶活性分别提高了 73.32%、59.97%、327.82%和 150.75% ($P < 0.05$)。其中, T3 处理组的活性, 且与 CK 无显著性差异。由表 4 知, 与 CK 相比, ST 处理组过氧化氢酶活性下降 44.69%。添加腐植酸可提高其活性($P < 0.05$), 与 ST 组相比, T1、T2、T4 处理组土壤过氧化氢酶活性分别提高了 28.82%、43.379%、79.77%和 71.84% ($P < 0.05$), 其中 T3 和 T4 组的酶活性与 CK 组无显著性差异。

Table 5. Effects of humic acid on urease and catalase activity under salt stress

表 5. 腐殖酸对盐胁迫下土壤脲酶和过氧化氢酶活性的影响

处理	脲酶(mg/g)	过氧化氢酶(mg/g)
CK	51.27 ± 3.61a	23.27 ± 1.88a
ST	13.31 ± 2.60c	12.85 ± 1.05c
T1	23.09 ± 2.02c	16.57 ± 0.48c
T2	21.28 ± 2.20bc	18.46 ± 0.59c
T3	56.99 ± 6.63a	23.14 ± 1.55a
T4	33.40 ± 2.79b	22.12 ± 1.03a

4. 讨论

作物生物量是衡量植物生长状况与逆境适应能力的综合体现。本实验中, 盐胁迫显著抑制了紫花苜蓿的生长, 而施用腐殖酸可有效缓解这一抑制效应。植株生物量随腐殖酸浓度增加呈先升后降趋势, 以 T3 处理(50 mg/kg)效果最佳(表 1)。这表明, 适宜浓度的腐殖酸能够最大程度地改善盐胁迫下植株的生长状况, 其作用机制可能与土壤养分有效性、酶活性及植株生理响应的协同调控有关。

土壤硝态氮和铵态氮是植物可直接吸收利用的主要氮素形态, 其含量是衡量土壤氮素供应能力与肥

力状况的核心指标[17][18]。本试验中,施用腐殖酸显著提升了盐胁迫下土壤硝态氮和铵态氮含量,且均以 T3 处理效果最佳(表 3),这与包秀英[19]的研究结论一致。腐殖酸含有大量羧基、酚羟基等活性官能团,可通过络合作用降低 Na^+ 对土壤胶体的分散效应,改善土壤结构,从而为氮素的保持与转化提供有利的微环境;同时,腐殖酸对盐分离子的螯合作用可降低根际土壤的盐分活度,减轻盐分对氮素转化过程的直接抑制,进而提升土壤有效氮含量。

盐胁迫对土壤碳循环相关酶活性的抑制是导致土壤养分有效性下降的重要原因之一。蔗糖酶催化蔗糖水解,促进碳素在土壤-植物系统中的转化与利用,是评价土壤肥力水平和生物活性的有效指标;纤维素酶参与有机质降解和矿质养分释放,其活性直接影响土壤养分供给能力;淀粉酶则通过分解淀粉提供能量,在维持土壤碳循环中发挥作用[20]。本研究中,盐胁迫显著抑制了上述三种酶的活性,而施用腐殖酸可有效缓解这一抑制效应,三者活性均随腐殖酸浓度增加呈先升后降趋势,以 T3 处理效果最佳(表 1)。腐殖酸对酶活性的提升作用可能与其对土壤理化性质的改善密切相关:一方面,腐殖酸可通过络合 Na^+ 、 Cl^- 等离子,减轻盐分对酶蛋白结构的直接破坏[21]。另一方面,腐殖酸可促进土壤团聚体形成,改善孔隙度与通气性,为酶促反应提供更适宜的微环境。值得注意的是, T3 处理下纤维素酶和淀粉酶活性显著高于无盐胁迫对照,而蔗糖酶活性恢复至接近对照水平,这可能与不同酶对底物有效性的响应差异或其空间分布的特异性有关。不同有关。该变化趋势与耿丽平[22]的研究结果相似,表明三种碳循环相关酶活性的协同提升有助于加速土壤有机碳矿化与养分释放,为盐胁迫下紫花苜蓿生长提供更充足的碳源。

在氮素转化过程中,土壤脲酶发挥核心调控作用,其通过催化尿素水解为铵态氮驱动氮素矿化,活性受土壤理化性质及外源物质添加的共同调控。本研究中,腐殖酸添加显著提升了盐胁迫下土壤脲酶活性,以 T3 处理效果最优(表 5),表明腐殖酸可能通过优化土壤微环境促进氮素转化,与权刚[23]的研究结论一致。此外,过氧化氢酶通过分解代谢产生的过氧化氢,减轻氧化胁迫对根系的损伤,其活性与土壤氧化还原状态及有机质转化密切相关。本试验中,50 mg/kg 腐殖酸处理显著提升了过氧化氢酶活性(表 5),说明腐殖酸在缓解氧化损伤方面也具有积极作用。

土壤微环境的改善最终通过植物的生理响应得以体现。可溶性糖和可溶性蛋白是植物响应逆境胁迫的重要渗透调节物质:前者通过提高细胞溶质浓度、降低渗透势来维持细胞膨压,同时作为保护剂稳定膜结构并清除活性氧;后者则参与渗透调节和细胞结构维持,其含量变化可敏感反映植物的生理状态和代谢水平[24]。本研究结果显示,盐胁迫下紫花苜蓿叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量均随腐殖酸浓度增加呈先升后降趋势(表 2)。其中,可溶性糖含量在 T3 处理下达最高值,表明适宜浓度腐殖酸可有效促进渗透调节物质积累,增强植株抗盐能力;可溶性蛋白含量在 T3 处理下接近无盐胁迫对照水平,提示腐殖酸可能通过缓解盐胁迫对蛋白质合成系统的抑制,帮助植株恢复正常的生理代谢功能。

5. 结论

适宜浓度腐殖酸可有效缓解复合盐胁迫对紫花苜蓿生长的抑制作用,其中以 50 mg/kg 处理(T3)效果最佳,显著提高了植株生物量。其缓解机制主要体现在两个方面:一是通过改善土壤微环境,显著提升硝态氮、铵态氮含量及蔗糖酶、纤维素酶、脲酶和过氧化氢酶活性,增强土壤碳氮转化与养分供应能力;二是通过促进叶片可溶性糖和可溶性蛋白积累,增强植株渗透调节能力。综上,50mg/kg 腐殖酸通过优化根际微环境、提升关键酶活性、促进渗透调节物质积累等多重途径,有效缓解了盐胁迫对紫花苜蓿的抑制效应。研究结果为盐碱地改良及优质苜蓿栽培提供了理论依据。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(202411396016)。

参考文献

- [1] 鄂利锋, 徐金崇, 陈修斌, 等. 外源硅对盐胁迫下娃娃菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2024(6): 212-217.
- [2] Kitamura, Y., Yano, T., Honna, T., Yamamoto, S. and Inosako, K. (2006) Causes of Farmland Salinization and Remedial Measures in the Aral Sea Basin—Research on Water Management to Prevent Secondary Salinization in Rice-Based Cropping System in Arid Land. *Agricultural Water Management*, **85**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.007>
- [3] 赵跃锋, 陈昆. 盐胁迫对茄子光合特性、叶绿素荧光及保护酶活性的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(11): 1797-1799, 1906.
- [4] 王中玉. NaCl 胁迫对西瓜幼苗叶绿素荧光、光合特性、渗透调节及酶活性的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(12): 1909-1912.
- [5] Jan, M., Anwar ul Haq, M., ul Haq, T., Ali, A., Hussain, S. and Ibrahim, M. (2020) Protective Effect of Potassium Application on NaCl Induced Stress in Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) Genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, **43**, 1988-1998. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1766071>
- [6] 黄荣雁, 路程伟, 许嵘, 等. 盐碱胁迫对冬红 9 花楸生长、生理及光合特性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(2): 480-488.
- [7] 董睿满, 王永庆, 王鑫博, 等. 盐胁迫对食用型向日葵莢期叶片光合性能与冠层结构的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(1): 141-152.
- [8] 赵维彬. 生物炭与腐殖酸对弗吉尼亚栎在盐碱地生长的影响效果研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [9] 孙世君, 马博, 王逸轩, 等. 腐殖酸对盐胁迫下温室黄瓜根际土壤养分及微生物群落结构的影响[J]. 北方园艺, 2022(5): 83-90.
- [10] 王彬, 李诚志. 腐殖酸对 NaCl 胁迫下梭梭种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 95-102.
- [11] 曹依静, 逯昀, 赵莉霞, 等. 腐殖酸对盐胁迫下山定子砧苹果嫁接苗的缓解效应[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(8): 124-131.
- [12] 高云晓, 庞元湘, 毛培利. 黄腐酸有机肥对盐胁迫下刺槐幼苗生长的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 26-43.
- [13] 祝连彩, 唐士金, 周丽. 考马斯亮蓝 G250 法测定蛋白质含量的教学实践及方法学探讨[J]. 教育教学论坛, 2020(23): 266-269.
- [14] 张述伟, 宗营杰, 方春燕, 等. 蒽酮比色法快速测定大麦叶片中可溶性糖含量的优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(7): 196-200.
- [15] 南京农业大学, 主编. 土壤农化分析[M]. 第 2 版. 北京: 农业出版社, 1986: 40-64.
- [16] 高文军, 李卫红, 王喜明, 等. 3,5-二硝基水杨酸法测定蔓菁中还原糖和总糖含量[J]. 中国药业, 2020, 29(9): 113-116.
- [17] 王硕. 硫代硫酸铵调控氮转化及氮肥运筹对土壤氮供应及玉米生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2024.
- [18] 关松荫. 土壤酶与土壤肥力的关系[J]. 土壤肥料, 1980(2): 19-21.
- [19] 包秀英. 腐殖酸肥对黄河三角洲小麦玉米生长和土壤肥力的影响[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [20] 樊军. 黄土高原旱地长期定位试验土壤酶活性研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2001.
- [21] 陈星星, 刘新社, 王盛荣. 腐殖酸对盐胁迫下土壤理化性质、微环境及苦瓜生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(17): 138-144.
- [22] 耿丽平, 薛培英, 刘会玲, 等. 促腐菌剂对还田小麦秸秆腐解及土壤生物学性状的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 305-310.
- [23] 权刚, 仝玉琴, 张洁, 等. 腐殖酸与土壤酶活性交互响应初探[J]. 农村实用技术, 2022(2): 86-87.
- [24] 王一璞, 纪伟, 苏文英, 等. 盐胁迫和干旱胁迫下大豆萌发过程中可溶性糖含量的变化研究[J]. 中国种业, 2024(8): 91-96.