# 施用木醋液与氮肥对盐碱地藜麦生长及生理的影响

乔 曼 庞春花 张 萌 王嘉祺 闫晶蓉

（山西师范大学生命科学学院，030031，山西太原）

**摘 要** 为探究木醋液与氮肥复合施用对盐碱环境下藜麦生长与生理机能的影响，以藜麦品种亿隆 1 号为试验材料进行盆栽试验。木醋液用量设置 4 个梯度：不添加（WV0）、稀释 100 倍（WV1）、稀释 300 倍（WV2）和稀释 500 倍（WV3），氮肥用量设置 4 个梯度：0.00（N0）、0.10（N1）、0.15（N2）和 0.20 g/kg（N3），进行随机区组试验。结果表明，在同一木醋液用量下，随氮肥用量增多，藜麦株高、茎粗及地上部生物量呈先升后降的趋势，在 N2 处理下效果最优。在同一氮肥用量下，随木醋液稀释倍数变大，藜麦叶片的叶绿素含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量以及抗氧化酶活性呈先上升后下降的趋势，而丙二醛和脯氨酸含量则表现为先减少后逐步增加的趋势，在 WV2 处理下效果最优。根据综合隶属函数值的分析结果，N2WV2 处理对藜麦生理生长有显著的促进作用，可缓解藜麦在盐碱胁迫环境下受到的伤害，氮肥用量 0.15 g/kg 配施稀释 300 倍的木醋液处理，表现出最佳的促进效果。

**关键词** 木醋液；氮肥；盐碱胁迫；藜麦；生理生长

土壤盐碱化是当今全球所面临的共同难题[1]。世界各国盐碱地总面积约 $1.1\times10^9$ hm$^2$，同时盐碱化土壤面积每年以 10%的速度增长[2]。我国盐碱土面积约有 $3.69\times10^7$ hm$^2$[3]，山西省是我国盐碱地分布较为集中的省份之一[4]。盐碱土是一种土壤类型，其特点是含有较高浓度的可溶性盐分和碱性物质，包括盐化土壤和碱化土壤。盐碱土主要由自然因素和人为因素形成。土壤盐碱化对作物生长产生抑制作用，其危害也是多方面的，如阻碍作物根系吸收水分引发的生理干旱；高浓度钠氯离子等盐分直接对作物产生毒害作用；高盐量显著降低种子的发芽率，还会抑制幼苗的生长发育，使其生长缓慢或死亡；导致土壤板结、结构破坏，引起土壤颗粒分散，降低土壤的通透性和保水保肥能力，进一步加剧土壤板结和水土流失等问题。这些危害不仅影响作物的生长发育，还对农业生产造成经济损失和生态压力。因此，有效利用盐碱土、充分发挥其农用价值对我国农业的发展具有重要意义。

藜麦（*Chenopodium quinoa* Willd.），又称南美藜、奎奴亚藜和藜谷等，为苋科藜属一年生双子叶草本作物，原产于南美洲安第斯地区，这种作物具有极高的营养价值，且因其能够耐受非生物胁迫而备受重视[5]。藜麦是一种耐寒、抗旱且耐盐碱的传统粮食作物，具有广泛的环境适应性。藜麦主要种植在南美洲和亚洲，在我国主要种植于山西省、青海省及西北地区。藜麦营养丰富，是蛋白质、脂肪、矿物质、维生素、纤维和其他营养素的宝贵来源，其含量往往高于更常见的粮食作物[6]。作为潜在的功能性食品和营养补充剂来源，藜麦日益受到关注[7]，也是诸多国家保障粮食安全的理想作物[8]。因此，加强藜麦在盐碱地的推广种植，实现盐碱条件下藜麦的高产优质栽培具有重要现实意义。

为满足人们生活需求，促进生态可持续发展，改良盐碱地具有重要意义。国内外采取的改良措施可概括为水利工程、农业技术和生物化学 3 类[9]。木醋液（wood vinegar）是由有机酸、酚、醛、酮、醇和呋喃等复杂成分组成的混合物[10]，在农业上的作用主要是促进作物生长、防治病虫害、抑菌抗菌和土壤改良[11]。尹美莉等[12]研究发现，木醋液作为土壤改良剂可使较多单粒聚集在一起形成团聚体，进而降低土壤 pH，调节盐碱土电导率（EC 值）和碱化度。于雷等[13]研究表明，木醋液能够提高土壤有机质和水溶性有机碳以及有效磷的含量；影响土壤细菌、放线菌和真菌的数量及微生物对碳源的利用能力与代谢活性，有利于改善土壤的物理性质和化学性质。杜薇等[14]研究发现，木醋液可提高土壤酶活性和土壤肥力，进而提高作物的产量及品质。常青等[15]研究发现，木醋液可以增强作物叶片净光

作者简介：乔曼，主要从事植物生理生态研究，E-mail：754191645@qq.com
庞春花为通信作者，主要从事植物生理生态研究，E-mail：pangch6269@126.com
基金项目：国家自然科学基金（NSFC-31571604）
收稿日期：2025-05-21；修回日期：2025-06-27；网络出版日期：2025-10-20

合作用，增加叶绿素含量，促进生长发育。陈伟等[16]研究发现，一定浓度的木醋液与氮肥协同作用能显著促进甘薯生长发育、提高块根产量。高妍等[17]在木醋液对春小麦产量及营养品质影响的研究中发现，氮肥与木醋液配施能够增加春小麦的穗长和穗粒数，并提高千粒重和产量。马君怡[18]研究木醋液对盐胁迫下甘蓝型油菜的生理调控时发现，木醋液可以缓解逆境胁迫对作物的影响。然而，如何在盐碱地上合理施加木醋液仍是当前亟待解决的问题。氮素是作物生长发育的必需营养元素，适时施用氮肥能够提高作物产量，增加叶面积和干物质的积累，提高作物氮素同化效率，促进蛋白质和其他含氮化合物的合成。合理施氮可以改善土壤的理化性质，提高土壤肥力。但氮肥用量过高并不会对作物产量产生促进作用，反而会造成氮资源利用率低，导致土壤理化性质变差[19]。

综上，研究盐碱化土地的氮肥最佳施用剂量对于促进生态农业的发展至关重要，将氮肥和木醋液配施具有改良土壤和促进作物生长发育的双重功效。本研究以藜麦为研究对象，通过盆栽试验探讨施用木醋液与氮肥对盐碱地藜麦生理生长的影响，筛选出最适宜的氮肥和木醋液配施用量，旨在为今后利用氮肥和木醋液配施改良盐碱地、提高藜麦的产量提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验材料

以藜麦品种‘亿隆 1 号’为试验材料，由山西忻州亿隆科技推广有限公司提供。供试改良剂为木醋液，由山东永鑫化工有限公司提供。供试土样为山西省太原市小店区西温庄乡 0~20 cm 盐碱土，土壤基本理化性质为碱解氮 27.45 mg/kg、有效磷 9.16 mg/kg、速效钾 90.70 mg/kg、全盐量 4.86 g/kg、有机质 15.32 g/kg 和 pH 9.02。供试肥料为尿素（含 N 46.2%）、硫酸钾（含 $K_2O$ 52%）和过磷酸钙（含 $P_2O_5$ 15%）。

### 1.2　试验设计

于 2024 年 4−10 月在山西师范大学试验基地开展盆栽土培试验。采用随机区组试验的方法。设置 4 个氮肥水平，分别为 0.00（N0）、0.10（N1）、0.15（N2）和 0.20 g/kg（N3），4 个木醋液水平，分别为不添加（WV0）、稀释 100 倍（WV1）、稀释 300 倍（WV2）和稀释 500 倍（WV3），共 16 个处理，每种处理 7 次重复，共计 112 盆。使用 30 cm×20 cm×30 cm（盆口直径×盆底直径×高）的营养钵，每营养钵装土 8 kg。每盆施用磷肥 0.3 g/kg 和钾肥 0.1 g/kg，以及不同施用量的氮肥和稀释不同倍数的木醋液 800 mL，混合均匀，在植物生长阶段前一次性施用，此后不额外追肥。选用籽粒饱满均匀的藜麦种子，用 30% $H_2O_2$ 溶液浸泡 5 min，双蒸水重复冲洗 3 次，确保彻底清除残留物。采取“米”字形布局播种，每个营养钵内均匀播撒 20 粒种子。在植物成长阶段实施均匀灌溉策略，待作物长至两叶一心状态时开始分苗，每盆内种植大小相仿的 8 株作物。

### 1.3　测定项目与方法

1.3.1　*生长指标*　于播种后 60 d 将藜麦从营养钵中取出并清洗干净，采用 50 cm 直尺测量株高；采用精度 0.02 mm 的游标卡尺测量茎粗；采用烘干称重法测定地上部干重。每个处理重复 3 次。

1.3.2　*生理指标*　于播种后 55 d 选择藜麦相同叶位且大小匀称的叶片测定其生理指标，采用浸提法测定叶绿素含量；采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛（MDA）含量；采用氮蓝四唑（NBT）法测定超氧化物歧化酶（SOD）活性；采用愈创木酚法测定过氧化物酶（POD）活性；采用蒽酮比色法测定可溶性糖（SS）含量；采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白（SP）含量；采用茚三酮法测定脯氨酸（Pro）含量[20]。每个处理重复 3 次。

1.3.3　*隶属函数分析*　采用综合隶属函数评价藜麦抗盐碱性，综合隶属函数 $U(X_j)=(X_j-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$，$j$=1，2，3，…，$n$。式中，$X_j$ 表示第 $j$ 个测定指标，$X_{min}$ 表示第 $j$ 个测定指标的最小值，$X_{max}$ 表示第 $j$ 个测定指标的最大值。

### 1.4　数据处理

运用 Office Excel 2021 软件进行数据整理，运用 SPSS 25 软件进行数据分析，多组间两两比较采用 Duncan 法，运用 Origin 2021 软件作图。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同试验处理对藜麦生长的影响

由表 1 可知，在同一用量的氮肥处理下，施加不同用量的木醋液可显著提高藜麦的株高、地上部生物量及茎粗，藜麦的株高和地上部生物量随木醋液的用量呈先升后降的趋势，各处理表现为 WV2＞WV3＞WV1＞WV0；藜麦的茎粗，除 N0 处理下

呈逐渐上升趋势外，其余也都随木醋液稀释倍数的增加表现为先升后降的趋势，均在 WV2 处理下达到峰值，在 N0 处理下，各处理呈现出 WV3＞WV2＞WV1＞WV0。在相同浓度的木醋液施用条件下，藜麦的植株高度、茎粗及地上部生物量均随氮肥用量的增加表现为先升后降的趋势，各处理呈现出 N2＞N3＞N1＞N0，并在 N2 处理下达到峰值。

**表 1 不同试验处理对藜麦生长指标的影响**

Table 1 Effects of different experimental treatments on growth indices of quinoa

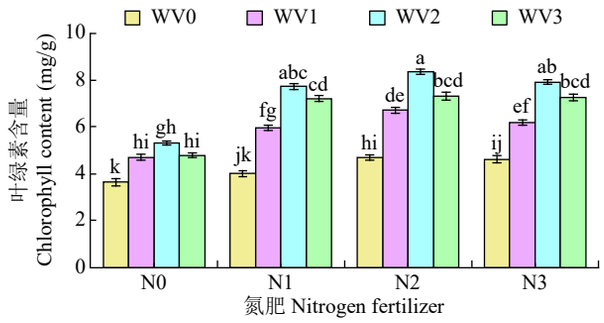
| 处理 Treatment | 株高 Plant height (cm) | 茎粗 Stem diameter (mm) | 地上部生物量 Aboveground biomass (g) |
|---|---|---|---|
| N0WV0 | 31.17±0.46i | 3.33±0.07j | 5.10±0.17j |
| N0WV1 | 33.38±0.35h | 3.50±0.05i | 7.97±0.22gh |
| N0WV2 | 39.86±0.26f | 3.71±0.07h | 9.54±0.29ef |
| N0WV3 | 35.46±0.31g | 3.74±0.06gh | 8.47±0.25fg |
| N1WV0 | 33.68±0.27h | 3.63±0.05hi | 7.55±0.24ghi |
| N1WV1 | 36.38±0.33g | 3.91±0.05f | 10.04±0.26e |
| N1WV2 | 46.88±0.23d | 4.35±0.06cd | 14.22±0.33c |
| N1WV3 | 43.69±0.25e | 4.28±0.04d | 12.49±0.24d |
| N2WV0 | 40.39±0.32f | 3.88±0.04fg | 6.72±0.20hi |
| N2WV1 | 45.44±0.33de | 4.22±0.05d | 12.00±0.26d |
| N2WV2 | 53.93±0.48a | 4.72±0.05a | 18.04±0.20a |
| N2WV3 | 51.93±0.46b | 4.56±0.04b | 14.66±0.33c |
| N3WV0 | 35.95±0.28g | 3.66±0.04h | 6.45±0.27ij |
| N3WV1 | 44.50±0.28e | 4.06±0.05e | 11.59±0.30d |
| N3WV2 | 48.70±0.33c | 4.45±0.05bc | 16.57±0.23b |
| N3WV3 | 46.54±0.33d | 4.28±0.04d | 12.63±0.27d |

同列不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$ level.

## 2.2 不同试验处理对藜麦生理特性的影响

2.2.1 对藜麦叶绿素含量的影响 由图 1 可知，随氮肥施肥量与木醋液稀释倍数变化，藜麦叶绿素含量有显著变化。在相同氮肥施用量的情况下，随着木醋液稀释倍数的增加，叶片中的叶绿素含量呈先增后减的趋势，即 WV2＞WV3＞WV1＞WV0，在 WV2 时达到最高水平，较 WV0 处理分别显著提升了 92.84%、78.11%和 71.33%。在 N0 处理下，施加 WV1、WV2 和 WV3 时处理间无明显差异。在同一用量的木醋液处理下，随氮肥用量的变大叶绿素含量表现为先升后降的趋势，且在 N2 处理下达到最高水平，与 N0 处理相比，分别显著提高了 28.96%、42.70%、57.51%和 53.10%，说明氮肥可以促进叶绿素的形成、提高作物的光合作用以及促进生长。综上可知，氮肥与木醋液配施对藜麦叶绿素含量具有显著影响，N2WV2 处理效果最优。




不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level, the same below.

**图 1 不同试验条件下藜麦叶片中叶绿素含量的变化**

Fig.1 Changes in chlorophyll content in quinoa leaves under different experimental conditions

2.2.2 对藜麦叶片 MDA 含量及抗氧化酶活性的影响 从图 2 可以看出，在同一用量的氮肥处理下，施加木醋液可显著降低 MDA 含量，且 MDA 含量随木醋液的稀释倍数变大呈先降后升的趋势，表现为 WV2＜WV3＜WV1＜WV0，在 N0 处理下，施加 WV1、WV2 和 WV3 的处理间无显著差异，各氮肥处理均在木醋液 WV2 处理时达到最小值，较 WV0 处理分别显著降低了 26.26%、41.36%、56.31%和 48.09%，说明施加木醋液可提高作物的抗逆性，减轻藜麦所受的盐碱胁迫。在同一用量的木醋液处理下，随氮肥施用量变大 MDA 含量呈先降后升的趋势，相较于 N0WV0 处理，各处理均显著降低了 MDA 含量，在 N2 处理时达到最小值，较 N0 处理分别显著降低了 7.71%、27.86%、45.32%和 35.16%。综上可知，氮肥与木醋液配施效果优于氮肥与木醋液单施，可显著降低藜麦叶片的 MDA 积累。

在 WV0 处理时，SOD 活性随氮肥用量增多呈逐渐上升的趋势，N1 与 N2 处理之间差异不显著。在同一用量的氮肥处理下，不同稀释倍数的木醋液处理均能使 SOD 活性提升，且各处理间差异显著，在木醋液 WV2 处理时达到最大值，较 WV0 处理提升了 89.32%，说明一定氮肥用量下施加木醋液用量可以显著提升作物的 SOD 活性。在同一用量的木醋液处理下，除 WV0 处理其余各组均呈先升后降的趋势，在氮肥 N2 处理时效果最明显，较不施加氮肥时分别显著提升了 48.27%、51.19%和 42.70%。综上可知，氮肥与木醋液配施对 SOD 活性有积极作用，有利于藜麦抵御逆境胁迫。

在 N0 处理下，POD 活性随木醋液的施加而提升。在同一用量的氮肥处理下，POD 活性随木醋液稀释倍数变大呈先升后降的趋势，在 N1、N2 和

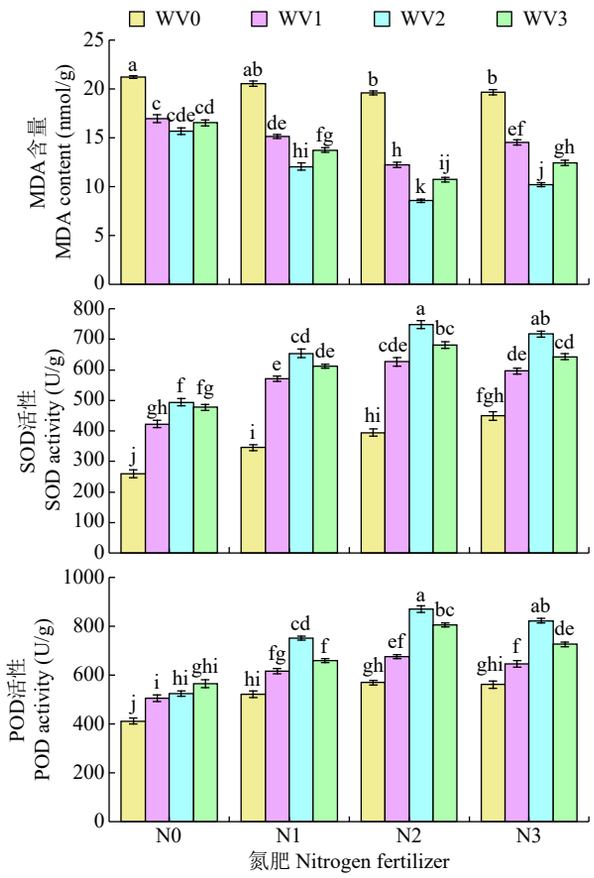



**图 2　不同试验条件下藜麦叶片中 MDA 含量、SOD 活性和 POD 活性的变化情况**

Fig.2　Variations in MDA content, SOD activity and POD activity in quinoa leaves under different experimental conditions

N3 处理下均表现为 WV2＞WV3＞WV1，较 WV0 处理分别平均提升了 44.25%、52.94%和 46.55%，在 WV2 处理下最大，为 871.92 U/g。在同一用量的木醋液处理下，随氮肥施加量增多均呈先升后降的趋势，表现为 N2＞N3＞N1＞N0，较 N0 处理分别平均提升了 38.19%、33.39%、66.12%和 42.42%，说明氮肥在一定范围内可提升 POD 活性。综上可知，施加氮肥和木醋液使藜麦 POD 活性显著提升，且在 N2WV2 处理下效果最好。

2.2.3　*对藜麦渗透调节系统的影响*　从图 3 可以看出，在同一用量的木醋液处理下，随氮肥施加量的增加，藜麦 SS 含量呈先升后降的趋势，且在不施加木醋液处理下 N1、N2 和 N3 差异不显著，在 N2WV2 处理下达到峰值，为 8.56 mg/g，较不施加氮肥处理分别提升了 62.79%、58.97%、67.12%和 101.43%。在同一用量的氮肥处理下，随木醋液稀释倍数变大呈先升后降的趋势，在 N0 处理下表现为 WV2＞WV1＞WV3＞WV0，在 N1、N2 和 N3 处理下都表现为 WV2＞WV3＞WV1＞WV0，在 WV2 处理下达到最大值，较不施加木醋液分别提升了 55.31%、63.49%、59.44%和 62.64%。综上可知，氮肥与木醋液配施可以缓解胁迫，促进藜麦生长。

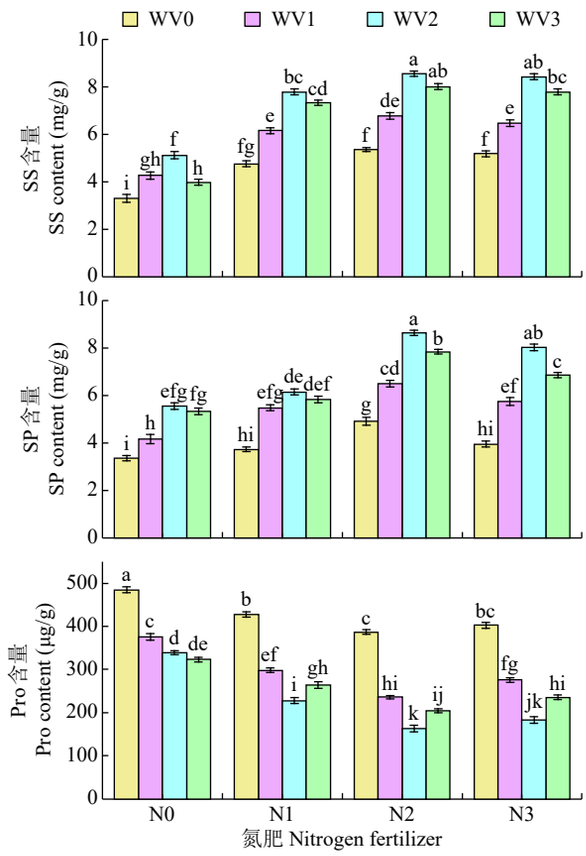



**图 3　不同试验条件下藜麦叶片中 SS、SP 和 Pro 含量的变化情况**

Fig.3　Changes in the contents of SS, SP and Pro in quinoa leaves under different experimental conditions

SP 含量在 N0 与 N1 处理下，随木醋液用量的变大呈先升后降的趋势，但差异不显著。在同一用量的木醋液处理下，表现为 N2＞N3＞N1＞N0，且 N0 和 N1 无显著差异，在 N2 处理下达到最高峰，相较于不施加氮肥处理分别提升了 46.32%、56.01%、55.61%和 47.00%。在相同氮肥剂量下，随着木醋液稀释倍数的增加，SP 含量呈先上升后下降的变化趋势，即 WV2＞WV3＞WV1＞WV0，于 WV2 处理时达到峰值，并相对未施用木醋液的处理分别提高了 65.71%、65.09%、76.22%和 103.47%，说明一定氮肥用量下施加适宜的木醋液用量对藜麦 SP 含量具有显著影响。综上可知，单施氮肥或木醋液在一定程度上对藜麦 SP 含量具有积极作用，但两者配施效果更好。

不同氮肥与木醋液处理下，Pro 含量差异显著，

随木醋液稀释倍数变大，Pro 含量呈先降后升的趋势。在 N0 处理下，随木醋液稀释倍数变大，Pro 含量呈下降的趋势，在 WV2 和 WV3 处理间差异不显著，WV3 处理较 WV0 处理显著降低了 33.25%，说明单施木醋液在一定范围内可以缓解作物受胁迫程度。在同一氮肥用量处理下，Pro 含量呈先降后升的趋势，较 WV0 分别降低了 20.27%、37.18%、51.87%和 36.78%。在同一用量的氮肥处理下，N2 处理与木醋液配施变化最大，表现为在 WV2 处理下最显著。

### 2.3 不同处理下藜麦隶属函数值及其排序

如表 2 所示，利用综合隶属函数值，使用株高、茎粗、地上部生物量、叶绿素含量、MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、SS 含量、SP 含量和 Pro 含量 10 个指标进行分析，明确改良盐碱土与利于藜麦生长的氮肥与木醋液最佳配施组合，综合分析得

**表 2 不同处理下藜麦各项指标的隶属函数值**

Table 2 Values of the membership functions of different treatments of quinoa

| 氮肥处理 Nitrogen fertilizer treatment | 木醋液处理 Wood vinegar treatment | 隶属函数值 Membership function value | | | | | | | | | | *D* 值 *D*-value | 排名 Ranking |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ | $X_{10}$ | | |
| N0 | WV0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.20 | 16 |
| | WV1 | 0.10 | 0.12 | 0.22 | 0.23 | 0.66 | 0.33 | 0.21 | 0.18 | 0.15 | 0.66 | 0.29 | 15 |
| | WV2 | 0.38 | 0.28 | 0.34 | 0.35 | 0.56 | 0.48 | 0.24 | 0.35 | 0.42 | 0.55 | 0.39 | 11 |
| | WV3 | 0.19 | 0.30 | 0.26 | 0.24 | 0.63 | 0.45 | 0.33 | 0.13 | 0.37 | 0.50 | 0.34 | 13 |
| N1 | WV0 | 0.11 | 0.22 | 0.19 | 0.08 | 0.94 | 0.18 | 0.24 | 0.28 | 0.07 | 0.82 | 0.31 | 14 |
| | WV1 | 0.23 | 0.42 | 0.38 | 0.49 | 0.52 | 0.64 | 0.45 | 0.54 | 0.40 | 0.42 | 0.45 | 9 |
| | WV2 | 0.69 | 0.74 | 0.70 | 0.87 | 0.27 | 0.81 | 0.74 | 0.85 | 0.53 | 0.20 | 0.64 | 4 |
| | WV3 | 0.55 | 0.68 | 0.57 | 0.76 | 0.41 | 0.72 | 0.54 | 0.77 | 0.47 | 0.31 | 0.58 | 6 |
| N2 | WV0 | 0.40 | 0.40 | 0.12 | 0.22 | 0.87 | 0.28 | 0.34 | 0.39 | 0.29 | 0.69 | 0.40 | 10 |
| | WV1 | 0.63 | 0.64 | 0.53 | 0.65 | 0.29 | 0.75 | 0.58 | 0.66 | 0.59 | 0.23 | 0.55 | 7 |
| | WV2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.80 | 1 |
| | WV3 | 0.91 | 0.89 | 0.74 | 0.78 | 0.17 | 0.86 | 0.86 | 0.89 | 0.85 | 0.13 | 0.71 | 3 |
| N3 | WV0 | 0.21 | 0.24 | 0.10 | 0.21 | 0.88 | 0.39 | 0.33 | 0.36 | 0.11 | 0.74 | 0.36 | 12 |
| | WV1 | 0.59 | 0.53 | 0.50 | 0.54 | 0.47 | 0.69 | 0.51 | 0.60 | 0.45 | 0.35 | 0.52 | 8 |
| | WV2 | 0.77 | 0.81 | 0.89 | 0.91 | 0.13 | 0.94 | 0.89 | 0.98 | 0.88 | 0.06 | 0.73 | 2 |
| | WV3 | 0.68 | 0.68 | 0.58 | 0.77 | 0.31 | 0.79 | 0.68 | 0.85 | 0.66 | 0.23 | 0.62 | 5 |

$X_1$：株高，$X_2$：茎粗，$X_3$：地上部生物量，$X_4$：叶绿素含量，$X_5$：MDA 含量，$X_6$：SOD 活性，$X_7$：POD 活性，$X_8$：SS 含量，$X_9$：SP 含量，$X_{10}$：Pro 含量。

$X_1$: plant height, $X_2$: stem diameter, $X_3$: aboveground biomass, $X_4$: chlorophyll content, $X_5$: MDA content, $X_6$: SOD activity, $X_7$: POD activity, $X_8$: SS content, $X_9$: SP content, $X_{10}$: Pro content.

出在 N2WV2 处理下综合评价值（*D* 值）为 0.80。

## 3 讨论

### 3.1 施用木醋液与氮肥对盐碱地藜麦生长的影响

植物的株高、茎粗和地上部生物量是衡量植物生长状况和生态功能的重要指标，反映了植物的生长速度、发育状态、适应能力及资源利用效率等。株高和茎粗能够直观地体现植物生长的快慢，地上部生物量能够直接体现光合产物的积累[21]。盐碱胁迫会影响植物的生长发育，造成植物营养器官的鲜重降低，还会导致植物的株高、茎粗、根长及生物量减少[22]。本试验结果表明，单独施用或配施氮肥和木醋液均能显著改善藜麦的生长状况，说明施加氮肥和木醋液对藜麦生长和发育均有促进作用；相较于氮肥和木醋液单施的处理，氮肥和木醋液配施的效果更好，在氮肥用量为 0.15 g/kg 配施木醋液稀释 300 倍时效果最显著。这可能因为施加木醋液后改善了盐碱土的碱化度和土壤结构，良好的土壤环境能够促进作物对养分的吸收利用[23]。同时氮肥使土壤有机质含量增加，为植物生长发育提供了大量的养分，在氮肥与木醋液配施后植物的生存环境得到改善，进而提高了藜麦的生长。这与耿坤等[24]通过盆栽试验得出木醋液能够显著提高青菜和生菜株高、生物量及品质等的研究结果基本一致。冷佳琦[25]以韭菜为研究对象，发现苹果木木醋液能够促进韭菜的株高、茎粗及地上部生物量。闫钰等[26]以辣椒为研究对象，发现施加木醋液能够促进辣椒的株高。本试验中，藜麦的株高、茎粗及地上部生物量随着氮肥用量的增加整体呈先升后降的趋势，表明适宜的氮肥用量能够促进植物的生长发育，施氮量太少对植物效果不显著，施氮量太多会抑制植物的碳代谢，抑制生长[27]。这与丁红等[28]的过量的

氮肥会使花生生长受到抑制的结论一致。

### 3.2　施用木醋液与氮肥对盐碱地藜麦生理指标的影响

叶绿素作为植物进行光合作用的关键色素，其活性与光合作用效率有着直接的正向关联，而光合作用的效率又会进一步影响植物的生长速率以及最终的产量[29]。因此，叶绿素含量的高低是衡量植物健康状况的重要参考标准。顾晓娜[30]研究木醋液对盐碱胁迫下的棉花生理特性发现，木醋液能够有效提高叶绿素的合成速率。王晨晨[31]通过盆栽的方式研究盐胁迫下添加木醋液后对棉花生长的影响发现，木醋液处理提高了盐胁迫下叶片光合色素含量和气体交换参数，促进植物生长。本试验表明，各处理对藜麦叶绿素含量有显著促进作用，可能由于木醋液富含多种营养元素，能够为植物提供所需的养分，而氮又是叶绿素分子结构中的关键成分，因此，氮肥与木醋液配合施用能够增强植物对氮元素的吸收和利用效率。

当植物面临胁迫时，会生成大量的活性氧（ROS）自由基，进而激活体内的抗氧化酶系统，这些酶通过相互协调合作，来保护植物免受胁迫带来的伤害[32]。植物体内的抗氧化防御系统主要包含 SOD 和 POD 等酶类。本试验表明，氮肥与木醋液单施或配施均能够显著提高藜麦的 SOD 和 POD 活性，且在 N2WV2 处理下效果最佳。这表明氮肥与木醋液结合施用能够增强藜麦的抗氧化酶活性，降低体内 ROS 的积累，从而改善植物的生长状况。当木醋液稀释倍数较小时，藜麦的 SOD 与 POD 活性较低，这可能是因为木醋液中含有的有机酸和酚类物质在高浓度下对植物细胞产生毒害作用，且稀释倍数较低的木醋液可能改变土壤团聚体结构，减少有益微生物的活性，同时增加土壤中的有害物质浓度。这与谷思成等[33]通过盆栽试验得出稀释倍数小的木醋液对植物促进作用差的研究结果一致。本试验表明，适宜的氮肥与木醋液配施可显著抑制藜麦叶片 MDA 含量的增加，这与王雅倩[34]研究木醋液对元宝枫生长发育的影响，发现在适宜浓度下 MDA 含量下降的结果一致。

在逆境胁迫下，植物通常会积累 SP、SS 和 Pro 等渗透调节物质，这些物质的积累有助于降低细胞的渗透势，防止脱水，从而维持细胞结构，帮助植物抵御逆境胁迫[35]。本试验结果表明，在不施加氮肥与木醋液的处理下 Pro 含量积累最多，在氮肥与木醋液配施的处理下显著降低，这可能是因为氮肥与木醋液有效地改良了土壤盐碱化，减轻盐碱胁迫对藜麦造成的伤害，使渗透调节物质含量处于正常水平。同时，随着氮肥用量的增加及木醋液稀释倍数变大，SS 和 SP 含量呈先升后降的趋势，较单施氮肥或木醋液的处理效果更显著，这表明氮肥与木醋液共同作用能够显著提高 SS 和 SP 含量，增强细胞的代谢能力。这与周超等[36]研究不同浓度木醋液对棚室西瓜产量及品质的影响，发现木醋液能够提高 SS 和 SP 含量的结论类似。

## 4　结论

氮肥与木醋液配施可以显著促进藜麦生长，株高、茎粗及地上部生物量增加；提高藜麦叶片叶绿素含量，进而促进光合作用；降低 MDA 含量、减轻膜脂过氧化、保护细胞膜完整性及提高藜麦抗逆性；提高抗氧化酶活性，清除有害 ROS、增强抗逆性及促进藜麦生长发育；提高 SS 及 SP 含量，增强植物的抗逆性和生长能力；降低 Pro 含量，减轻氧化应激，缓解胁迫压力以及优化氮素利用等多种调控机制。0.15 g/kg 氮肥与稀释 300 倍的木醋液配施对藜麦生长的促进效果最佳。

### 参考文献


[1] 李广成，马瑞楠，马治虎，等. 施用一种有机肥类土壤调理剂对玉米生长及盐碱地改良的效果. 南方农业，2024，18(14)：20-22.

[2] 田雨雨. 盐碱地改良措施对滨海土壤微生物群落结构和向日葵生长的影响. 北京：中国农业科学院，2024.

[3] 杨劲松，姚荣江，王相平，等. 中国盐渍土研究：历程、现状与展望. 土壤学报，2022，59(1)：10-27.

[4] 侯钰晨，庞春花，张永清，等. 施用生物炭与氮肥对盐碱胁迫下藜麦幼苗生理生长特性的影响. 作物杂志，2024(4)：240-246.

[5] Zurita-Silva A，Fuentes F，Zamora P，et al. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives. Molecular Breeding，2014，34(1)：13-30.

[6] Huang H L，Jia C X，Chen X Y，et al. Progress in research on the effects of quinoa (*Chenopodium quinoa*) bioactive compounds and products on intestinal flora. Frontiers in Nutrition，2024，11：1308384.

[7] Zhang G J，Ren C X，Li N，et al. Valorization of quinoa by-products and their potential applications. Cereal Research Communications，2024，53：689-699.

[8] Connolly D，Minj J，Murphy K M，et al. Impact of quinoa and food processing on gastrointestinal health: a narrative review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2025，65(28)：5520-5533.

[9] 张彬，杨宁，王迪，等. 国内外盐碱地改良技术比较及对吉林省的启示. 现代营销，2023(7)：113-115.

[10] 杨柳，唐光木，张云舒，等. 农林废弃物热解木醋液的农业应用研究进展. 江苏农业科学，2024，52(18)：18-25.

[11] Luo X X，Wang Z Y，Meki K，et al. Effect of co-application of wood vinegar and biochar on seed germination and seedling growth. Journal of Soils and Sediments，2019，19(12)：3934-3944.

[12] 尹美莉，张凯煜，亢福仁，等. 木醋液改良盐碱土壤的研究进

展. 农学学报，2024，14(6)：31-38.
[13] 于雷，沈威，王敏，等. 木醋液在盐碱地土壤改良中的应用. 温带林业研究，2022，5(3)：60-64.
[14] 杜薇，朱一波，张晓，等. 添加木醋液对沙地土壤微生物生物量和酶活性的影响. 水土保持通报，2016，36(3)：358-362，368.
[15] 常青，王永亮，杨治平，等. 木醋液对土壤 pH、EC 与茄子叶片光合特性及根系发育的影响. 农业资源与环境学报，2019，36(3)：322-328.
[16] 陈伟，王巍凝. 氮肥与木醋液协同作用对甘薯生长发育的影响. 山西农业科学，2024，52(5)：98-106.
[17] 高妍，狄雅莉，郭赋涵，等. 氮肥配施不同用量木醋液对春小麦产量及营养品质的影响. 中国土壤与肥料，2022(4)：184-191.
[18] 马君怡. 木醋液对盐胁迫下甘蓝型油菜的生理调控作用. 杭州：浙江大学，2022.
[19] 高小峰，景航，闫本帅，等. 长期施氮对谷子根系内生真菌群落特征的影响. 水土保持学报，2021，35(5)：303-311.
[20] 张志良，瞿伟菁. 植物生理学实验指导. 3 版. 北京：高等教育出版社，2003.
[21] 高景，王金牛，徐波，等. 不同雪被厚度下典型高山草地早春植物叶片性状、株高及生物量分配的研究. 植物生态学报，2016，40(8)：775-787.
[22] 杨少辉，季静，王罡，等. 盐胁迫对植物影响的研究进展. 分子植物育种，2006，4(3)：139-142.
[23] 于贝贝，何莉莉，杨生茂，等. 木醋液改良盐碱土的研究进展. 国土与自然资源研究，2024(1)：62-67.
[24] 耿坤，梅朵曲珍，蒋梦圆，等. 叶面喷施木醋液对蔬菜产量及品质的影响. 中国土壤与肥料，2023(9)：160-168.
[25] 冷佳琦. 苹果木木醋液的成分分析及其对韭菜生长的促进作用研究. 烟台：烟台大学，2022.
[26] 闫钰，陆鑫达，李恋卿，等. 秸秆热裂解木醋液成分及其对辣椒生长及品质的影响. 南京农业大学学报，2011，34(5)：58-62.
[27] 郭晓霄. 不同施氮量对白杆生长及碳代谢的影响. 陕西林业科技，2025，53(1)：19-24.
[28] 丁红，张智猛，戴良香，等. 不同水分条件下氮肥对花生根系生长及产量的影响. 花生学报，2016，45(1)：8-14.
[29] 倪瑞军，张永清，庞春花，等. 藜麦幼苗对水氮耦合变化的可塑性响应. 作物杂志，2015(6)：91-98.
[30] 顾晓娜. 木醋液和京尼平苷缓解棉花幼苗碱胁迫的效应. 武汉：华中农业大学，2023.
[31] 王晨晨. 木醋液和腐植酸缓解棉花幼苗 NaCl 伤害的效应. 武汉：华中农业大学，2023.
[32] 张婷婷，刘宇乐，陈红，等. 不同外源物质对盐、碱及干旱胁迫下草木樨种子萌发、幼苗生长及生理的影响. 草业学报，2024，33(8)：122-132.
[33] 谷思成，朱坤淼，耿默琳，等. 叶面喷施木醋液对油菜苗期生长发育的影响. 中国油料作物学报，2020，42(3)：453-460.
[34] 王雅倩. 木醋液对元宝枫幼苗生长发育及土壤化学性质的影响. 杨凌：西北农林科技大学，2022.
[35] 李彦，张英鹏，孙明，等. 盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展. 中国农学通报，2008，24(1)：258-265.
[36] 周超，周传余，徐婷，等. 不同浓度木醋液对棚室西瓜产量和品质的影响. 黑龙江农业科学，2014(3)：53-55.

# Effects of Wood Vinegar and Nitrogen Fertilizer Application on Quinoa Growth and Physiology in Saline-Alkali Soil

Qiao Man, Pang Chunhua, Zhang Meng, Wang Jiaqi, Yan Jingrong

(College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

**Abstract** To investigate the effects of combined application of wood vinegar and nitrogen fertilizer on the growth and physiological functions of quinoa under saline-alkali stress, a pot experiment was conducted using the quinoa cultivar Yilong 1 as the test material. The application rates of wood vinegar were set at four gradients: no addition (WV0), 100-fold dilution (WV1), 300-fold dilution (WV2), and 500-fold dilution (WV3). The application rates of nitrogen fertilizer were set at four gradients: 0.00 (N0), 0.10 (N1), 0.15 (N2), and 0.20 g/kg (N3). The experiment was arranged in a randomized complete block design. The results showed that under the same wood vinegar application rate, with the increase of nitrogen fertilizer rate, the plant height, stem diameter, and aboveground biomass of quinoa exhibited a trend of first increasing and then decreasing, with the optimal effect observed under the N2 treatment. Under the same nitrogen fertilizer rate, with the increase of the dilution factor of wood vinegar, the chlorophyll content, soluble sugar content, soluble protein content, and antioxidant enzyme activities in quinoa leaves showed a trend of first increasing and then decreasing, whereas the contents of malondialdehyde and proline showed a trend of first decreasing and then gradually increasing, with the optimal effect observed under the WV2 treatment. According to the comprehensive membership function analysis, the N2WV2 treatment significantly promoted the physiological growth of quinoa and alleviated the damage suffered by quinoa under saline-alkali stress. The treatment with a nitrogen fertilizer rate of 0.15 g/kg combined with wood vinegar at a 300-fold dilution showed the best promoting effect.

**Key words** Wood vinegar; Nitrogen fertilizer; Saline-alkali stress; Quinoa; Physiology and growth