

羊粪配施木醋液对盐碱土壤养分及冬小麦耐盐能力的影响

*

郟莹^{1,2}, 王广恩^{3†}, 李义红¹, 蒋龙刚¹, 李东晓², 郭丽^{1†}, 张月辰²

(1. 河北省农林科学院农业资源环境研究所/河北省土壤培肥与农业绿色发展重点实验室, 石家庄 050051; 2. 河北农业大学农学院, 河北保定 071001; 3. 河北省农林科学院棉花研究所 石家庄 050051)

摘要: 为探究羊粪配施不同用量木醋液对河北低平原内陆盐碱障碍土壤改良效果和冬小麦耐盐能力的影响, 于2022—2024年进行大田试验, 试验设置常规施肥(CK)、羊粪 27 t·hm⁻²(T0)、羊粪 27 t·hm⁻²+木醋液 270 kg·hm⁻²(T1)、羊粪 27 t·hm⁻²+木醋液 540 kg·hm⁻²(T2)、羊粪 27 t·hm⁻²+木醋液 810 kg·hm⁻²(T3)五个处理, 分析羊粪配施不同用量木醋液对土壤养分、冬小麦耐盐特征、养分吸收利用以及产量的影响。结果表明: 在0~20 cm土层, T2的土壤容重、电导率较CK分别平均下降8.03%、13.17% ($P < 0.05$), 而T2的土壤总孔隙度、有机质和速效钾含量较CK显著提高, T2的硝态氮、有效磷含量较CK、T0显著提高; 在20~40 cm土层, T2的有效磷含量较CK显著提高。T2的旗叶在各灌浆时期可溶性糖含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性、灌浆前中期可溶性蛋白含量和过氧化物酶(POD)活性及灌浆前期游离氨基酸含量均较CK、T0和T1显著提高, 超氧阴离子自由基与SOD活性呈相反趋势。T2处理较CK、T0、T1的冬小麦地上部氮、磷、钾总累积量显著提高, 增幅为8.30%~25.79%。T2旗叶叶片气孔特征参数均较CK显著提高, 其中气孔开度较CK提高了21.23%。T2处理的产量较CK、T0、T1显著提高5.93%~17.29%。对木醋液最佳用量进行方程拟合, 两年模拟结果与配施540 kg·hm⁻²木醋液接近。综上, 建议该区盐碱土壤消障及提升冬小麦产能时, 优选施用羊粪27 t·hm⁻²的基础上配施木醋液量在535.46~551.03 kg·hm⁻²。

关键词: 羊粪; 木醋液; 盐碱土壤养分; 耐盐能力; 冬小麦

中图分类号: S512.1 文献标志码: A

Effects of Sheep Manure Combined with Wood Vinegar on Nutrients in Saline-alkali Soil and Salt Tolerance of Winter Wheat

QIE Ying^{1,2}, WANG Guangen^{3†}, LI Yihong¹, JIANG Longgang¹, LI Dongxiao², GUO Li^{1†}, ZHANG Yuechen²

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hebei Key Laboratory of Soil Fertilization and Agricultural Green Development, Shijiazhuang 050051, China; 2. College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China; 3. Cotton Research Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to explore the effects of applying different amounts of wood vinegar in combination

*国家重点研发计划项目(2021YFD1901002-6)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFD1901002-6)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: 594037094@qq.com; guolisoil@163.com

作者简介: 郟莹(2000—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要研究农村发展。E-mail: 2948128535@qq.com

收稿日期: 2025-03-03; 收到修改稿日期: 2025-07-02; 网络首发日期(www.cnki.net):

with sheep manure on the improvement of saline-alkali soil in the low plain of Hebei and the salt tolerance of winter wheat from 2022 to 2024. 【Method】 There were five treatments including conventional fertilization (CK), sheep manure at 27 t·hm⁻² (T0), T0 + wood vinegar at 270 kg·hm⁻² (T1), T0 + wood vinegar at 540 kg·hm⁻² (T2), and T0 + wood vinegar at 810 kg·hm⁻² (T3). The effects of the combined application of sheep manure with different amounts of wood vinegar on soil nutrients, salt tolerance characteristics of winter wheat, nutrient absorption and utilization, and yield were analyzed. 【Result】 The results showed that at soil depth of 0-20 cm, the soil bulk density and electrical conductivity value under T2 treatments were significantly reduced by an average of 8.03% and 13.17% compared with CK ($P < 0.05$), while the total porosity, organic matter and available potassium contents significantly increased. The nitrate nitrogen content and available phosphorus under T2 were significantly increased compared with CK and T0. At a soil depth of 20-40 cm, the content of available phosphorus under T2 was significantly increased compared with CK. Compared with CK, T0, and T1, the content of soluble sugar and the activity of superoxide dismutase (SOD) at each filling stage, the soluble protein content and the activity of peroxidase at the early and middle filling stages, and the free amino acid content at the early filling stage in the flag leaf of T2 were significantly increased. Also, the content of superoxide anions radicals showed an opposite trend to the SOD activity while the total accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium under T2 in the aboveground part was significantly increased by 8.30% to 25.79% compared with CK, T0, and T1. The stomatal characteristic parameters of the flag leaf under T2 were significantly increased compared with CK, among which the stomatal size of the flag leaf under T2 was significantly increased by 21.23% compared with CK. Moreover, the yield of winter wheat under T2 treatment was significantly increased by 5.93% to 17.29% compared with CK, T0, and T1. Using mathematical modeling, it was observed that the optimal dosage of wood vinegar liquid following a simulation for a two-year period was close to the application amount of 540 kg·hm⁻² of wood vinegar. 【Conclusion】 Based on these results, it was recommended that the optimal amount of sheep manure to be applied should be 27 t·hm⁻² while the amount of wood vinegar should be in the range of 535.46-551.03 kg·hm⁻². This, could contribute to mitigating the negative impacts of saline-alkali soils and enhance winter wheat productivity in this region.

Key words: Sheep manure; Wood vinegar; Saline soil nutrient; Salt tolerance; Winter wheat

土壤盐碱化备受全球关注。因盐碱土中钠 (Na⁺) 含量高, 钾 (K⁺)、钙 (Ca²⁺)、镁 (Mg²⁺) 溶解度低, 土壤易于吸收 Na⁺, 致使土壤物理结构受到破坏, 作物出现生理干旱, 严重时甚至出现耕地抛荒^[1]。我国是世界上土壤盐碱化问题较为严重的国家之一, 河北省低平原区是由古黄河、海河冲积形成, 土壤存在盐渍化^[2]。同时, 该区淡水资源匮乏, 但浅层地下微咸水分布广泛, 是旱季保证作物产量的重要灌溉水源, 而长期采用微咸水灌溉使土壤存在盐碱障碍, 此外也存在部分因地下水位高导致的盐碱土壤。土壤盐碱化已成为阻碍该区耕地产能提升的关键因素。

盐碱土壤改良研究经过多年的发展, 向盐碱土中添加有机物料的物理改良措施不但可有效抑制耕层土壤盐分, 还能提升地力, 且成本低、效率高, 是目前盐碱土改良领域的研究热点。前人大量研究^[3-4]表明施用有机肥可提高土壤孔隙度, 同时降低土壤容重, 从而大幅改善土壤质量, 提高作物产量。如羊粪具有疏松多孔的结构, 施入土壤后能够有效抑制土壤可溶性盐离子向上移动, 抑制土壤返盐^[5-6]。赵宇等^[7]在黑龙江省中度盐碱草地研究发现, 添加 2.50 kg·m⁻² 鲜羊粪能够显著降低土壤电导率。再者, 以植物为原料, 经炭化、干馏后形成的一种含酸、醛、酮、醇等有机物的酸性土壤改良剂木醋液, 因能有效改良土壤理化性质、降低土壤 pH、增加有机质含量, 被广泛应用^[8], 但木醋液对植物生长有促进或抑制双重效果, 浓度太高或太低均不利于植物生长, 仅在浓度合适时, 才能促进植物生长^[9], 且木醋液的最佳用量会因植物种类、栽培方式、施肥方式、土壤条件等因素的不同存在差异^[10-11]。此外, 周红娟等^[12]研究发现, 在施用鸡粪的基础上配施木醋液, 滨海盐碱土土壤养分含量显著提高。可见, 科学合理施用有机物料和木醋液对盐碱土壤改良及促进作物产能提升具有正调控效应。

综上, 前人对有机肥及木醋液改良盐碱土壤理化性质和提高植物耐盐能力方面已有部分研究, 但羊粪配施木醋液对河北低平原区内陆盐碱障碍粮田改良及作物产能提升效果尚缺乏系统报道, 因

此,开展该区盐碱障碍粮田羊粪配施不同用量木醋液对土壤养分、冬小麦抗氧化特性、养分吸收利用和产量影响的研究,可为丰富土壤盐碱障碍消减和沃土增产理论提供参考。

1 材料与方方法

1.1 试验地概况

本试验于2022年10月—2024年6月在河北省衡水市故城县北堤口村盐碱障碍土壤改良试验田进行。试验地为北温带亚湿润大陆性季风气候,年均温12.9℃,年均降水量485 mm,全年无霜期190 d左右,年日照时间2608.5 h,年日照率59%,供试土壤属于盐化潮土。试验前0~20 cm耕层土壤理化性质:pH7.65、电导率(EC)899 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、有机质15.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、硝态氮16.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷17.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾110.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本试验采用完全随机设计,共设5个处理:常规施肥(CK)、羊粪27 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T0)、羊粪27 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +木醋液270 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T1)、羊粪27 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +木醋液540 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T2)、羊粪27 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +木醋液810 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T3),每个处理3次重复,随机排列,各小区面积106 m^2 (10 m×10.6 m),外围设置保护行。供试的已发酵羊粪来自当地养殖农场,其干基有机质含量445 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮12 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾17 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,含水量200 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,施用量以干基计算。供试木醋液以梨木和苹果木为原料,pH2.97,其中有机化合物中含有机酸323 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (其中乙酸253 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、酚类及衍生物337 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、酮类106 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机碳含量31.14 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,密度是1.05 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。冬小麦季基施羊粪和化肥均匀撒施后进行旋耕,旋耕深度18 cm,冬小麦试验品种为衡4399,行距为15 cm,播种量为300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;基施的化学肥料为尿素、磷酸二铵和硫酸钾,追施的氮肥为尿素,各处理基施化肥用量相同,分别施纯N、 P_2O_5 和 K_2O 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,春季起身期灌水时各处理追施纯氮75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;木醋液稀释20倍后在冬小麦首次灌水前,均匀洒施在离地面3~5 cm处的植株行间。所有处理统一灌起身水和孕穗水,每次灌溉量为675 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,灌溉水为含盐量1.4 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的地上河水,各处理的田间管理相同。试验田种植模式为夏玉米-冬小麦,各处理的上茬夏玉米施肥和田间管理均一致,夏玉米季肥料为专用复混肥,采用种肥同播的方式一次底施,化学N、 P_2O_5 、 K_2O 施用量分别为225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.3 样品采集与测定

土壤容重、总孔隙度和养分的测定:在冬小麦成熟期(2023年6月12日,2024年6月4日)于各小区采用S型采样方法,随机在行间选取3个样点,用土钻分别取0~20、20~40 cm土层土壤样品,每层3钻混合为1个重复装入封口袋混匀,每个处理3次重复,-20℃保存于冰箱中。硝态氮、有效磷、速效钾和有机质含量分别用KCl浸提—紫外分光光度法、 NaHCO_3 浸提—钼锑抗分光光度法、 NH_4OAc 浸提—火焰光度计法、重铬酸钾氧化外加加热法测定;用pH计测定土壤pH,水土质量比2.5:1;采用电导率仪测定土壤电导率(EC),浸提时水土质量比为5:1;用环刀法测定土壤容重^[13]。

旗叶生理指标的测定:冬小麦灌浆前、中、后期(2023年5月6日、5月22日、6月3日,2024年4月29日、5月16日、5月29日)于各小区随机采集10~15片小麦旗叶,擦净叶片用锡纸包裹,迅速置于液氮中,-80℃冷藏,用于后续测定生理指标。分别用蒽酮比色法、考马斯亮蓝G-250蛋白染色法、茚三酮显色法测定可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸含量。超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和超氧阴离子自由基(O_2^-)分别采用氮蓝四唑(NBT)法、愈创木酚法、羟胺氧化反应法测定^[14];采用氮蓝四唑(NBT)和二氨基联苯胺(DAB)进行组织化学染色^[15]。

叶片气孔性状的测定:于冬小麦灌浆中期(2024年5月16日)采用指甲油印迹法测定叶片气孔性状^[16]。用蔡司光学显微镜在40倍物镜下(放大倍数为400倍)观察气孔并拍摄图片,使用Image J软件进行测量,测定气孔两侧保卫细胞的横轴长度,即气孔长度(SL);垂直于保卫细胞的最宽值,

即气孔宽度 (SW); 气孔器的边缘长度, 即气孔周长 (SP); 气孔孔径的最宽处, 即气孔开度 (SOS); 气孔面积 (SA) = πab , 其中 $a=1/2SL$, $b=1/2SW$ 。

植株全量养分含量测定: 冬小麦成熟期于各小区随机取 30 株小麦, 80 °C 烘干后, 分器官称干物质量, 粉碎后分别用凯氏定氮法、钼锑抗吸光光度法和火焰光度法测定各器官的氮、磷、钾含量^[17]。

产量测定: 冬小麦成熟期于各小区长势均匀处随机选取 30 个麦穗, 进行穗粒数统计; 选取 1 m 双行小麦, 调查有效穗数, 折合单位面积穗数; 风干后脱粒, 测定千粒重; 收获 1 m² 的小麦植株测产。

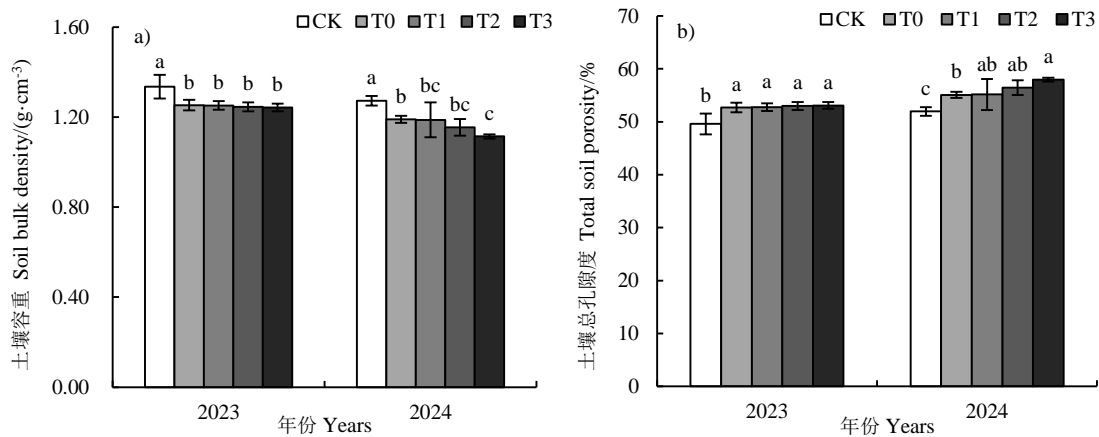
1.4 数据处理

采用 Excel 2021、DPS 9.01 (数据处理系统) 对数据进行统计分析, 采用最小显著差异法 (LSD) 对处理间差异进行显著性检验 ($P < 0.05$), 使用 Excel 2021 绘图, Origin 2021 进行相关性分析。图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果

2.1 盐碱障碍粮田土壤容重和总孔隙度对羊粪配施木醋液的影响

在 2023 年和 2024 年, 羊粪配施木醋液各处理的土壤容重较 CK 显著降低 (图 1a), 土壤总孔隙度较 CK 显著提高 (图 1b), 其中, 在 2024 年, 不同木醋液用量间表现为 T3 处理的土壤容重较 T0 显著降低 12.46%, T3 处理土壤孔隙度较 T0 显著提高 11.52%, 但 T1~T3 间土壤容重和孔隙度无显著差异。上述两年结果表明, 羊粪配施 270~810 kg·hm⁻² 木醋液对土壤容重和土壤通透性均有一定程度正向调控。



注: CK, 常规施肥; T0, 羊粪 27 t·hm⁻²; T1, 羊粪 27 t·hm⁻² + 木醋液 270 kg·hm⁻²; T2, 羊粪 27 t·hm⁻² + 木醋液 540 kg·hm⁻²; T3, 羊粪 27 t·hm⁻² + 木醋液 810 kg·hm⁻²。不同小写字母代表相同年份各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: CK, conventional fertilization; T0, sheep manure at 27 t·hm⁻²; T1, sheep manure at 27 t·hm⁻² + wood vinegar at 270 kg·hm⁻²; T2, sheep manure at 27 t·hm⁻² + wood vinegar at 540 kg·hm⁻²; T3, sheep manure at 27 t·hm⁻² + wood vinegar at 810 kg·hm⁻². Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments in the same year. The same below.

图 1 羊粪配施木醋液处理对盐碱障碍粮田土壤容重 (a) 和总孔隙度 (b) 的影响

Fig. 1 The effects of sheep manure combined with wood vinegar on soil bulk density (a) and total porosity (b) in saline-alkali barrier grain field

2.2 盐碱障碍粮田土壤化学性质和养分对羊粪配施木醋液的影响

在 2023 年, 0~20 cm 土层中, 土壤 EC 表现为 T1、T2、T3 均较 CK 显著降低, T0~T3 处理间无显著性差异 (表 1); 硝态氮含量表现为 T2、T3 较 CK、T0 和 T1 显著提高, 增幅为 9.15%~20.79%,

T2 和 T3 间无显著性差异；有效磷含量表现为 T2、T3 较 CK、T0 显著提高，T2 较 T1 显著提高了 8.67%；速效钾含量表现为增施羊粪及配施木醋液处理均较 CK 显著提高，T2 处理速效钾含量分别较 T0、T1 显著提高 12.22%、10.90%；各处理间有机质含量均无显著差异。在 20~40 cm 土层，仅 T2 处理有效磷含量与 CK 呈显著性差异。在 2024 年，0~20 cm 土层中，EC 表现为 T2 较 CK 显著降低了 13.16%；有机质含量表现为羊粪配施木醋液处理均较 CK 显著提高；硝态氮含量表现为 T2、T3 较 CK、T0 显著提高，增幅为 8.92%~15.14%，T1、T2、T3 间无显著性差异；有效磷含量表现为 T2 分别较 CK、T0 显著提高；速效钾含量表现为 T2 显著高于 CK。在 20~40 cm 土层，有效磷含量表现为 T2 较 CK、T0、T1 显著提高，增幅为 12.36%~15.63%。两个生长季各处理间 pH 变化较小，同时 20~40 cm 土层中，除有效磷含量外，其他指标各处理间无显著性差异，因此数据不在表中列出。可见，0~20 cm 土层中，羊粪配施中量木醋液 (T2) 较 CK 的 EC 显著降低，增加了速效氮磷钾含量，且 20~40 cm 土层中有效磷含量显著提高。

表 1 羊粪配施木醋液处理对盐碱障碍粮田土壤化学性质和养分的影响

Table 1 The effects of sheep manure combined with wood vinegar on chemical properties and nutrients of soil in saline-alkali barrier grain field

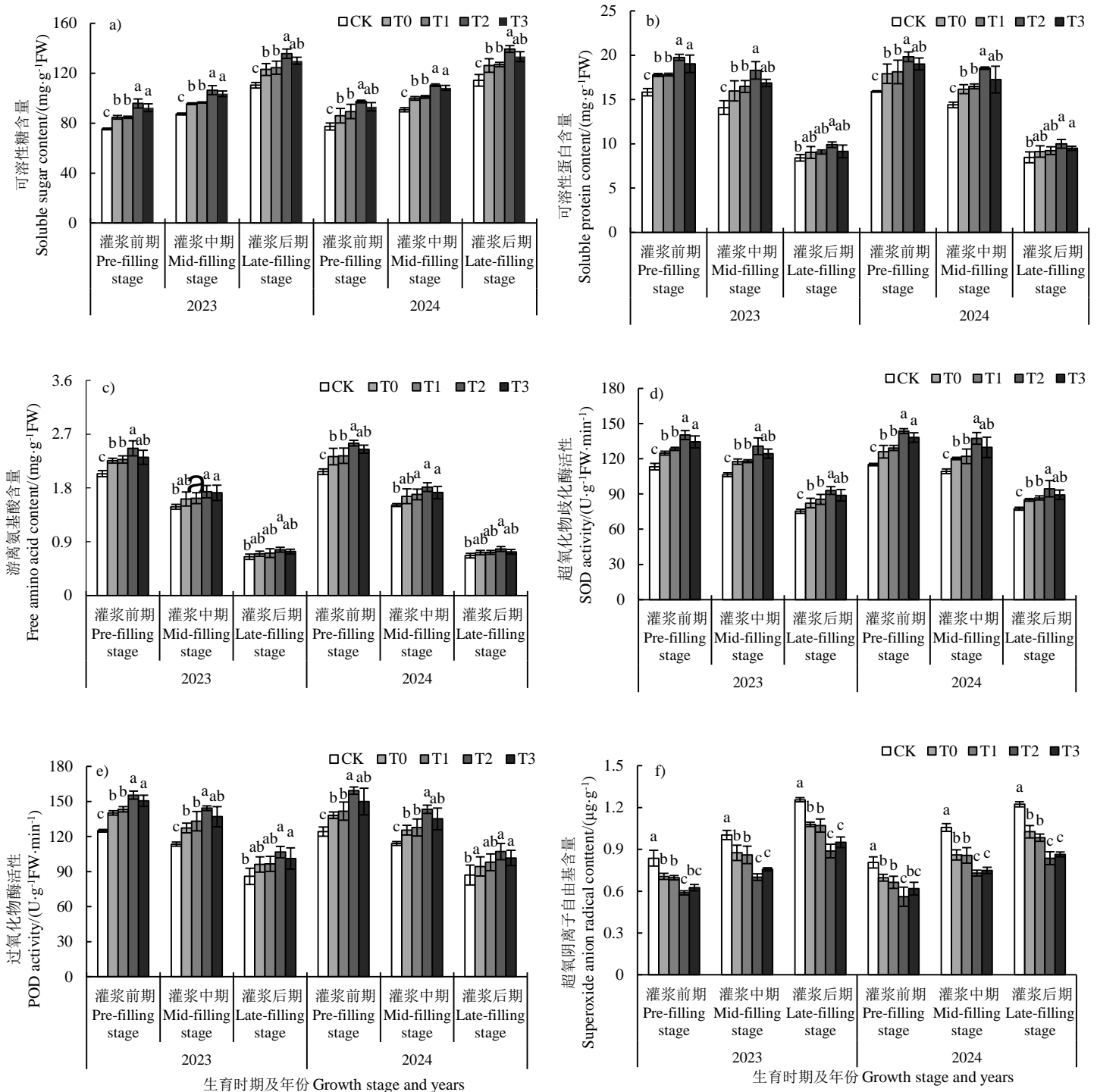
年份 Year	处理 Treatment	0~20 cm						20~40 cm
		pH	EC/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	OM/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	NN/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AP/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AK/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AP/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
2023	CK	7.65±0.15a	892.67±44.24a	15.41±0.21a	17.25±0.88b	17.53±0.15c	113.77±3.01c	5.68±0.67b
	T0	7.65±0.05a	839.67±38.73ab	15.44±0.21a	18.04±1.05b	17.67±0.67c	123.87±5.75b	5.92±0.16ab
	T1	7.62±0.04a	804±25.06b	15.45±0.12a	18.25±0.81b	18.07±0.75bc	125.33±5.83b	5.93±0.21ab
	T2	7.61±0.04a	775±52.72b	15.51±0.11a	20.84±0.26a	19.63±0.42a	139±4.39a	6.47±0.28a
	T3	7.6±0.04a	810.67±37.75b	15.49±0.1a	19.92±1.25a	18.73±0.58ab	132.07±3.42ab	6.17±0.19ab
2024	CK	7.63±0.05a	876.67±53.58a	15.54±0.24b	18.27±1.18b	18.26±0.56b	126±9.31b	5.97±0.32b
	T0	7.64±0.04a	823±58.66ab	16.44±0.11a	19.1±0.88b	18.55±0.83b	131.17±7.86ab	6.06±0.28b
	T1	7.6±0.11a	789.33±47.59ab	16.49±0.23a	19.79±0.78ab	18.75±0.98ab	135.68±8.48ab	6.15±0.1b
	T2	7.58±0.04a	761.33±46.61b	16.57±0.18a	21.04±0.97a	20.41±1.15a	144.9±8.28a	6.91±0.68a
	T3	7.57±0.05a	796.33±33.86ab	16.5±0.27a	20.8±0.61a	19.59±0.98ab	140.42±7.73ab	6.31±0.11ab

注：EC，电导率；OM，有机质；NN，硝态氮；AP，有效磷；AK，速效钾。同列不同小写字母代表同年份各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。表中数据为均值±标准差。下同。Note: EC, electrical conductivity; OM, organic matter; NN, nitrate nitrogen; AP, available phosphorus; AK, available potassium. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments in the same year. Values are Mean ± Standard deviation. The same below.

2.3 盐碱障碍粮田冬小麦碳氮代谢和抗氧化能力对羊粪配施木醋液的响应

在 2023 年，可溶性糖含量在各灌浆时期 T0、T1、T2 和 T3 处理均较 CK 显著提高，其中 T2 增幅最大，此外，T2 较 T0、T1 也显著提高 (图 2a)。可溶性蛋白含量在灌浆前、中期 T0~T3 较 CK 显著提高，增幅分别为 12.34%~24.90%、13.42%~29.87%，不同木醋液用量间表现为 T2 较 T0、T1 显著提高；灌浆后期 T2 较 CK 显著提高了 17.75% (图 2b)。游离氨基酸含量灌浆前期 T0~T3 分别较 CK 显著提高了 10.74%、11.65%、20.86% 和 13.44%，T2 分别较 T0、T1 显著提高了 9.13%、8.25%，灌浆中、后期 T2 分别较 CK 显著提高了 17.09%、17.95% (图 2c)。SOD 活性在灌浆各时期 T0~T3 较 CK 显著提高，不同木醋液用量间表现为 T2 较 T0、T1 显著提高 (图 2d)。叶片 POD 活性灌浆前、中期增施羊粪及羊粪配施木醋液处理均显著高于 CK，木醋液不同用量间表现为 T2 较 T0、T1 显著提高，增幅为 8.40%~10.87%、8.34%~13.30%；灌浆后期 T2、T3 较 CK 显著提高了 24.22%、17.77% (图 2e)。叶片超氧阴离子自由基灌浆期间各处理总体表现出与 SOD 相反趋势 (图 2f)。各指标 T2 和 T3 处理间差异较小，均未达到显著水平。2024 年植株碳氮代谢和抗氧化能力表现的趋势与 2023 年基本相似。此外，2024 年灌浆中期对旗叶进行 DAB 和 NBT 染色，进一步证实各处理间

抗氧化能力(图3),结果表明,CK和T0处理叶片染色较深,T2染色最浅。综上,羊粪配施中量木醋液(T2)显著提高了小麦碳氮代谢和抗氧化能力。



注:不同小写字母表示相同年份和生育期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same year and growth stage ($P < 0.05$).

图2 羊粪配施木醋液对冬小麦叶片碳氮代谢和抗氧化能力的影响

Fig. 2 The effects of sheep manure combined with wood vinegar on carbon and nitrogen metabolism and antioxidant capacity of winter wheat leaves

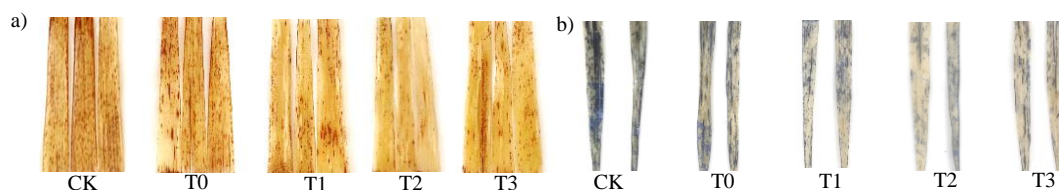


图 3 各处理下二氨基联苯胺 (a) 和氮蓝四唑 (b) 的组织化学染色

Fig. 3 Histochemical staining of diaminobenzidine (DAB, a) and nitroblue tetrazolium chloride (NBT, b) under each treatment

2.4 冬小麦叶片气孔对羊粪配施木醋液的响应

羊粪配施不同用量木醋液对冬小麦旗叶气孔形态特征的影响如图 4 和表 2 所示。由表 2 可知, 气孔长度表现为 T2 分别较 CK、T0、T1 显著提高 8.25%、6.19%、5.83%; 气孔宽度表现为 T2、T3 较 CK、T0 显著提高, 增幅为 5.49%~5.54%; 气孔开度表现为 T1、T2、T3 较 CK 显著提高, 增幅为 17.69%~21.23%; 气孔周长表现为 T2、T3 较 CK 显著提高, 此外, T2 分别较 T0、T1 显著提高 6.05% 和 5.23%; 气孔面积与气孔周长表现出相似规律。T2 和 T3 间气孔性状差异较小未达显著性水平。以上结果表明, 与 CK 相比, T2 提高冬小麦的气孔长度、气孔宽度、气孔开度、气孔周长和面积的效果优于其他处理。可见, 羊粪配施 540 kg·hm⁻² 木醋液增强了冬小麦与外界大气环境的交换能力, 促进二氧化碳吸收同化效率, 最终有利于光合产物的累积。

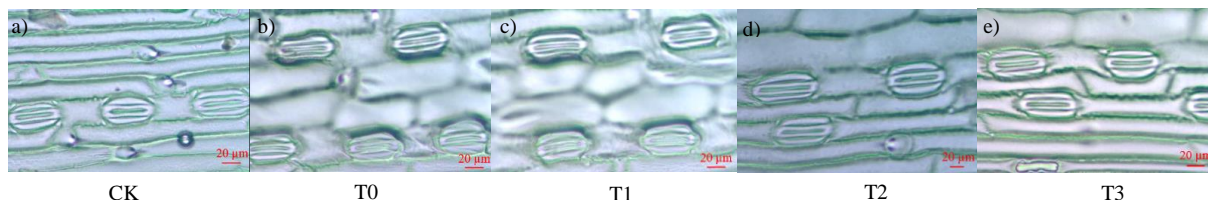


图 4 羊粪配施不同用量木醋液下的小麦旗叶气孔图像

Fig. 4 Image of stomata in flag leaves of wheat under sheep manure combined with different amounts of wood vinegar

表 2 羊粪配施木醋液对冬小麦旗叶气孔的影响

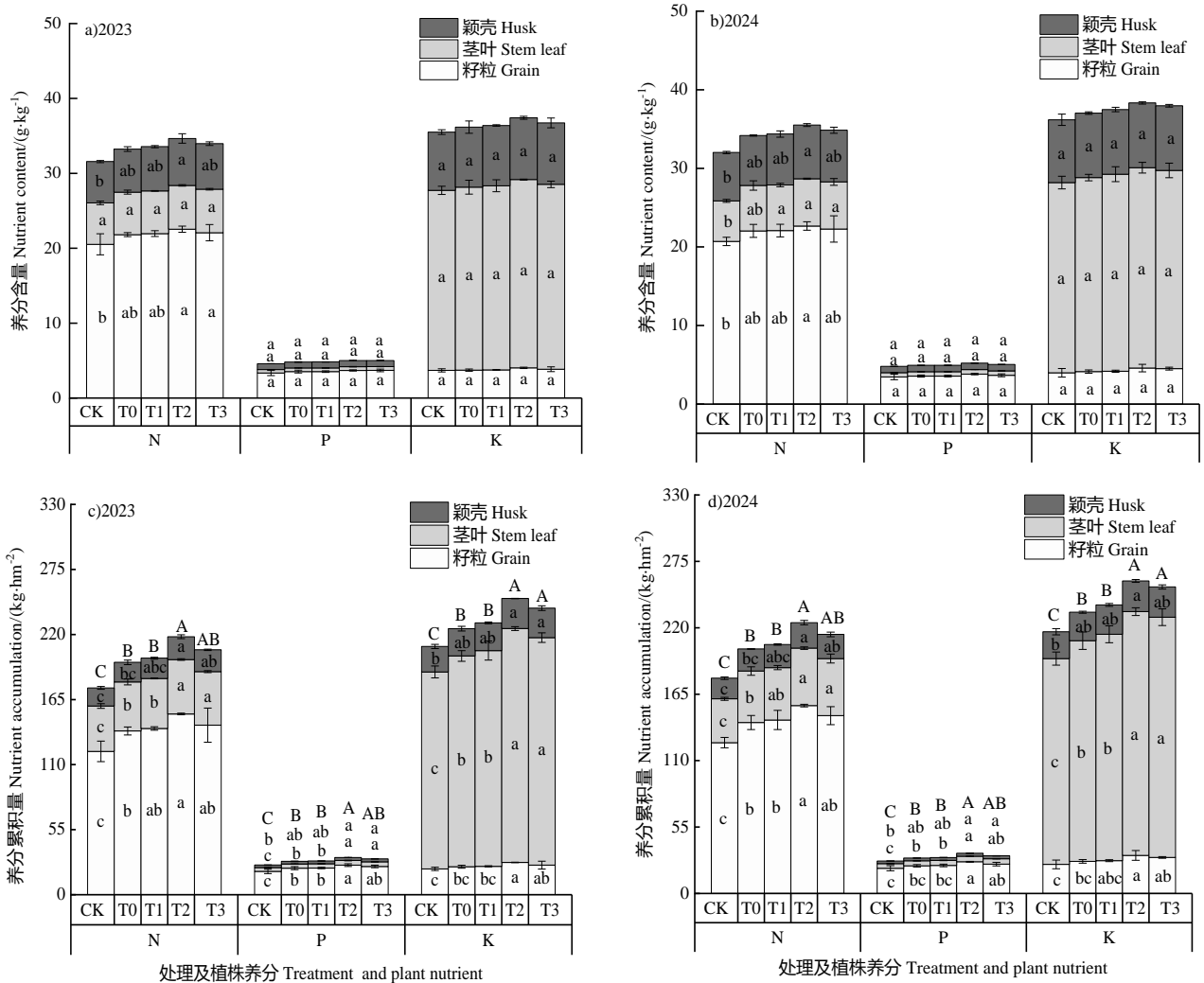
Table 2 The effects of sheep manure combined with wood vinegar on stomata in flag leaves of winter wheat

处理	气孔长度	气孔宽度	气孔开度	气孔周长	气孔面积
Treatment	Stomatal length/ μm	Stomatal width/ μm	Stomatal open sizes/ μm	Stomatal perimeter/ μm	Stomatal area/ μm^2
CK	55.67±0.33b	26.6±0.15b	3.58±0.53b	133.2±0.8c	1 162.3±13.3c
T0	56.74±0.92b	26.61±0.37b	4.05±0.31ab	135.2±1.5bc	1 185.3±16.2c
T1	56.94±2.45b	27.25±0.56ab	4.21±0.19a	136.3±1.1bc	1 217.4±30.3bc
T2	60.26±1.27a	28.07±0.78a	4.34±0.21a	143.4±2.0a	1 327.7±28.5a
T3	58.15±2.69ab	28.07±0.16a	4.28±0.12a	139.3±5.2ab	1 281.6±64.2ab

2.5 盐碱障碍粮田冬小麦各器官养分含量对羊粪配施木醋液的响应

2023 年, T2、T3 籽粒氮含量分别较 CK 显著提高 9.82%、7.57%, T2 颖壳氮含量较 CK 显著提高了 13.73%, 而其他处理各器官氮、磷、钾含量无显著差异 (图 5a)。与 CK 相比, 除 T0、T1 的籽粒钾累积量和颖壳氮、磷、钾累积量无显著差异, 其他处理各器官氮、磷、钾累积量均较 CK 显著提高 (图 5c)。2024 年, T2 籽粒、茎叶和颖壳的氮含量分别较 CK 显著提高了 9.43%、16.62%、10.86% (图 5b); T2 处理籽粒氮、磷、钾累积量均较 CK、T0 显著提高, T3 籽粒氮、磷、钾累积量较 CK 显著提高了 17.91%、16.37%、24.01%; CK、T0 处理茎叶氮、磷、钾累积量及 T1 茎叶磷钾累积量均较 T2 处理显著降低; CK 处理颖壳氮、磷、钾累积量及 T0 颖壳氮累积量均较 T2 显著降低 (图 5d)。两个生长季, 羊粪配施木醋液处理下冬小麦氮、磷、钾总累积量 (颖壳、茎叶和籽粒养分累积量的总和) 均较 CK 显著提高, T2 处理下冬小麦氮、磷、钾总累积量均较 T0、T1 显著提高, 而 T2 和 T3 处理下冬小麦各器官养分含量、累积量以及总累积量差异较小, 未达显著性水平。以上结果表明,

羊粪与木醋液配施能提高冬小麦对营养物质吸收和积累能力，其中羊粪配施中量木醋液（T2）优于其他处理。



注：不同小写字母代表同一部位养分含量或积累量在各处理间差异显著($P < 0.05$)。不同大写字母代表各处理间的养分总积累量(颖壳、茎叶和籽粒养分积累量的总和)差异显著($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) in nutrient content or accumulation at the same part among treatments. Different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) in the total nutrient accumulation (sum of nutrient accumulation in husk, stem leaf, and grain) among treatments.

图 5 羊粪配施木醋液对冬小麦各器官养分含量 (a、b) 和养分积累量 (c、d) 的影响

Fig. 5 The effects of sheep manure combined with wood vinegar on nutrient contents (a, b) and nutrient accumulation (c, d) in various organs of winter wheat

2.6 盐碱障碍粮田冬小麦产量对羊粪配施木醋液的响应

在 2023 年和 2024 年，穗数表现为羊粪配施木醋液处理均较 CK 显著提高，两年间 T2 较 T0 分别显著提高了 5.66%、7.89%，T2 较 T1 显著提高了 5.06%、5.39%，T2 和 T3 间均无显著性差异(表 3)；各处理间穗粒数和千粒重差异较小，未达显著性水平；产量表现为羊粪配施木醋液处理均较 CK 显著提高，T2 较 T0 显著提高了 6.89%、10.16%，T2 较 T1 显著提高了 5.93%、6.05%，T2 和 T3 间无显著差异。以上结果表明，羊粪配施中量木醋液 (T2) 主要通过正向调控单位面积穗数实现小麦增产。

表 3 羊粪配施木醋液处理下盐碱障碍粮田冬小麦的产量

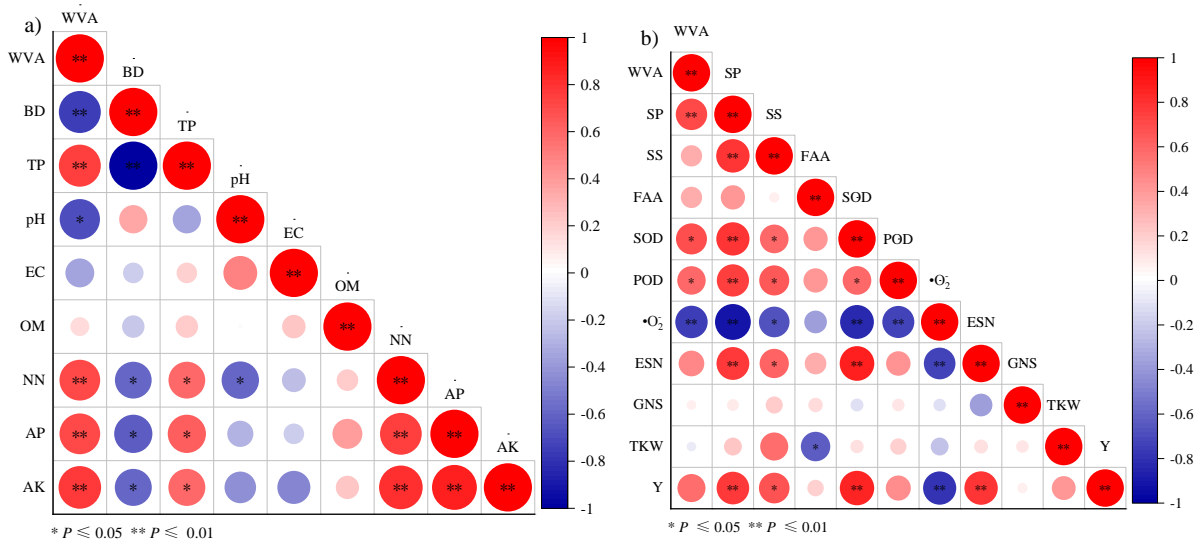
Table 3 The yield of winter wheat in saline-alkali barrier grain fields treated with sheep manure combined with wood vinegar

年份	处理	ESN	GNS	TKW	Y
Year	Treatment	/(10 ⁴ ·hm ⁻²)	/(粒·穗 ⁻¹)	/g	/(kg·hm ⁻²)
2023	CK	527.7±13.1c	34.6±1.1a	38.08±0.25a	5 904±41c
	T0	561±18.0b	34.9±1.0a	38.16±0.08a	6 345±102b
	T1	564.2±15.4b	34.9±0.5a	38.24±0.9a	6 402±63b
	T2	592.8±6.6a	35.1±0.6a	38.32±0.33a	6 782±140a
	T3	568.7±18.1ab	35±0.8a	38.28±1.29a	6 482±342ab
2024	CK	565.3±7.3c	34.8±0.3a	36.05±0.21a	6 030±89c
	T0	599.7±16.9b	34.9±0.9a	36.1±0.38a	6 420±93b
	T1	614.4±14.1b	35.3±0.4a	36.22±0.52a	6 669±152b
	T2	647.5±16.4a	35.4±0.1a	36.33±0.1a	7 072±183a
	T3	620.1±25.1ab	35.3±1.4a	36.29±1.48a	6 755±316ab

注: ESN, 有效穗数; GNS, 穗粒数; TKW, 千粒重; Y, 产量。下同。Note: ESN, effective spike number; GNS, grain number per spike; TKW, thousand kernel weight; Y, Yield. The same below.

2.7 木醋液用量与土壤理化性状、冬小麦碳氮代谢及产量的相关性

木醋液用量与土壤总孔隙度、土壤速效氮磷钾含量呈极显著正相关, 与土壤容重呈极显著负相关, 与 pH 呈显著负相关 (图 6a); 木醋液用量与可溶性蛋白含量呈极显著正相关, 与 SOD、POD 呈显著正相关, 与超氧阴离子自由基呈极显著负相关 (图 6b)。上述相关分析表明, 该试验条件下增施的木醋液, 通过正向调控土壤硝态氮、有效磷、速效钾含量及冬小麦 SOD、POD 活性, 进而降低超氧阴离子自由基的产生, 为增加冬小麦抗盐能力提供了物质基础。



注: WVA, 木醋液用量; BD, 土壤容重; TP, 土壤总孔隙度; SP, 可溶性蛋白; SS, 可溶性糖; FAA, 游离氨基酸; SOD, 超氧化物歧化酶; POD, 过氧化物酶; O₂⁻, 超氧阴离子自由基。*表示指标间呈显著差异 ($P \leq 0.05$), **表示指标间呈极显著差异 ($P \leq 0.01$)。Note: WVA, amount of wood vinegar; BD, soil bulk density; TP, total soil porosity; SP, soluble protein; SS, soluble sugar; FAA, free amino acid; SOD, superoxide dismutase; POD, pseudo-oxidase; O₂⁻, superoxide anion radical. * indicates a significant difference between the indicators ($P \leq 0.05$), ** indicates an extremely significant difference between the indicators ($P \leq 0.01$).

图 6 土壤理化性状 (a)、冬小麦抗盐能力及产量 (b) 与木醋液用量间的关系

Fig. 6 The relationship between soil physical and chemical properties(a), winter wheat salt tolerance and yield (b) and the

2.8 羊粪配施木醋液的最佳用量

在施用羊粪基础上,为了进一步明确配施木醋液的最佳用量,选择一元二次方程进行模拟,小麦产量随木醋液用量增加,表现出先上升后下降的趋势,两个生长季趋势一致(图7)。在两个生长季,羊粪分别配施 535.46、551.03 kg·hm⁻² 木醋液时,小麦产量最高,模拟结果均与配施 540 kg·hm⁻² 木醋液接近。

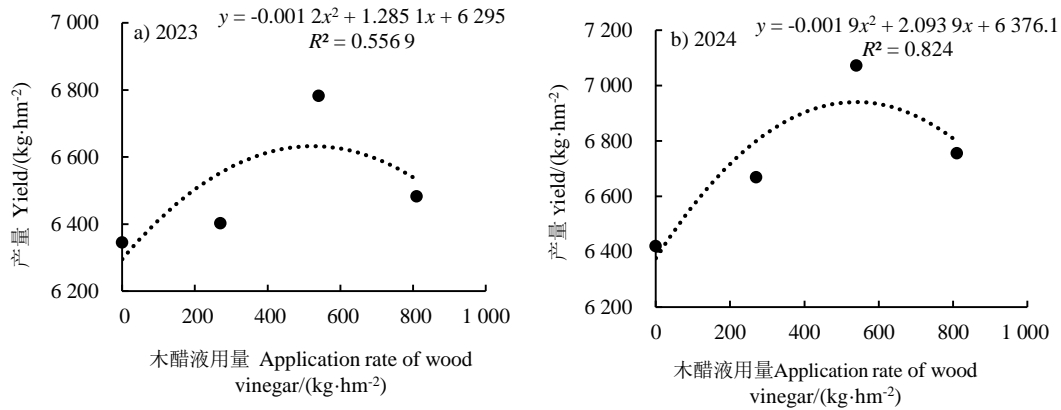


图7 木醋液用量与冬小麦产量关系

Fig. 7 Relationship between application rate of wood vinegar and yield of winter wheat

3 讨论

盐碱土中因含大量盐碱离子,导致电导率升高,土质恶化^[18],而有机肥能降低土壤容重,改善土壤孔隙特性,木醋液呈酸性且含有机物质,施入盐碱土后,会产生降盐作用。Lashari 等^[9]发现,生物质炭—鸡粪复合肥配施木醋液显著降低了 0~20 cm 土壤盐度、pH、土壤容重,显著提高了有效磷含量;Qiao 等^[20]发现,在施用羊粪、玉米秸秆等有机物料堆肥后,土壤中的全氮、全磷以及速效钾含量均显著提升,EC 显著下降;也有研究表明,施用羊粪显著提高了 0~20 cm 土壤孔隙度和土壤有机质含量^[21-22]。本研究结果与上述研究部分一致,0~20 cm 土层中,与 CK 相比,T2 的土壤容重、EC 显著降低,土壤总孔隙度、速效钾含量显著提高(图1,表1),与 CK、T0 相比,T2 的硝态氮、有效磷含量显著提高,2024 年 T2 土壤有机质含量较 CK 显著提高(表1)。本研究结果表明羊粪配施木醋液可通过协同机制提升土壤养分的有效性,一方面,木醋液中含有的低分子有机酸和酚类化合物能促进铵态氮(NH₄⁺)向硝态氮(NO₃⁻)的转化过程;同时,其有机酸组分通过络合固定态金属离子的螯合作用,有效促进土壤中难溶性磷、钾的释放,并显著提高有效磷和速效钾含量^[23]。另一方面,羊粪与木醋液协同作用可显著增加土壤有效养分浓度,从而提升氮、磷、钾的有效性,前人的研究结果^[12]也证明了这一点。而各处理间 pH 差异较小(表1),这与前人研究结果不一致,这可能与试验年限、土壤缓冲能力及试验材料投入量存在一定差异有关。

植物体内的抗氧化酶类及碳氮代谢相关物质是衡量抗逆性的重要指标。Ma 等^[10]发现,施用木醋液降低了盐胁迫下油菜的氧化应激水平和膜质过氧化程度,同时提高了抗氧化酶活性;也有研究^[24]表明,盐碱土施入羊粪增加了红心火龙果的总可溶性糖和氨基酸含量。本研究结果与上述研究结论相似,与 CK、T0、T1 相比,T2 的可溶性糖含量和 SOD 活性在灌浆前、中、后期显著提高,可溶性蛋白含量和 POD 活性在灌浆前、中期显著提高,游离氨基酸含量在灌浆前期显著提高,T2 的超氧阴离子自由基在三个时期较 T0、T1 显著降低(图2)。本研究表明,T2 减轻了盐碱胁迫对冬小麦产生的渗透胁迫及离子毒害,显著提高了其抗氧化酶活性,延缓了灌浆中后期叶片衰老(图3)。

气孔承担着与外界进行气体循环的关键任务,逆境时,植物会改变气孔开度来适应环境,而施加外源物质可调节气孔特征。Zhang 等^[25]发现,干旱条件下,褪黑素可显著提高小麦气孔保卫细胞长度、气孔孔径长度;张欢玲等^[26]发现,在高温强光胁迫下,小麦叶片受到刺激关闭气孔,而外源水杨酸能够诱导气孔张开。本研究结果与上述研究相似,T2的气孔长度和宽度较CK、T0显著提高,T2的气孔周长和气孔面积较T0、T1显著提高,T1、T2、T3的气孔开度较CK显著提高(表2)。该结论表明羊粪配施适宜木醋液用量可显著提高盐碱障碍粮田冬小麦叶片气孔与外界环境的交换能力。

有机物料富含有机质和多种营养元素,具有培肥改土、促进植株养分吸收的作用。Dubey 等^[21]研究表明,施用羊粪显著增加了芥菜氮、磷、钾含量。张玉凤等^[27]研究表明,与喷施叶面肥相比,喷施木醋液显著提高了小麦籽粒氮、磷、钾含量。本研究结果与上述研究基本相似,在两个生长季,T2的籽粒和颖壳氮含量较CK显著提高,T2的籽粒和茎叶氮、磷、钾累积量较CK、T0显著提高,T2的氮磷钾总累积量较CK、T0、T1显著提高(图5)。上述结果表明,羊粪配施540 kg·hm⁻²木醋液,提高了冬小麦对营养元素的吸收利用,为减轻植株受盐胁迫伤害提供了充足的氮、磷、钾养分。

Sun 等^[28]研究表明,腐植酸、尿素配施木醋液,使盐碱地小麦增产44.3%。常青等^[29]盆栽试验表明,灌施稀释倍数小于10倍的木醋液,会对茄子产生毒害作用,稀释50倍~200倍时,能够促进茄子生长,若进一步增大稀释倍数,促进效果就不再显著;Zhao 等^[30]发现,生物质炭配施1200 kg·hm⁻²木醋液显著提高了苏打盐碱地水稻百粒重。在本试验条件下,穗粒数和千粒重处理间均无显著差异(表3),与CK相比,羊粪配施木醋液处理的冬小麦穗数和产量均显著提高,其中T2提升幅度优于其他处理,但T2和T3的穗数和产量差异不明显(表3),该结果表明羊粪配施540 kg·hm⁻²木醋液通过正向调控单位面积穗数提高产量。这可能是适量木醋液中有有机酸、酚类、酮类等物质含量及其占比在促进作物生长、增加植株抗逆能力、改善土壤环境等方面具有复合调节效应^[11]。这与Lashari 等^[9]发现生物质炭鸡粪堆肥与木醋液配施提高小麦千粒重,实现增产的结果不同,且木醋液最佳用量与本研究也存在差异,可能与不同有机物料的叠加效应、试验的生态环境、盆栽与大田试验可控因素、肥料种类及品种特性等因素有关。

4 结论

两年试验表明,在施用27 t·hm⁻²羊粪的基础上配施540 kg·hm⁻²木醋液,显著降低了0~20 cm土层土壤容重、EC,显著增加了土壤速效养分含量,冬小麦体内碳氮代谢及抗氧化酶活性明显提高,减少了膜脂过氧化损伤,促进了冬小麦对营养物质的吸收积累,通过增加单位面积穗数实现小麦增产,两年木醋液最佳用量模拟范围为535.46~551.03 kg·hm⁻²。该结果可为羊粪配施木醋液对河北低平原盐碱土壤改良和提高冬小麦生产力提供理论依据和技术参考,但本研究仅是两年的试验结果,连续多年羊粪配施木醋液对该区盐碱土壤障碍消减及冬小麦生长带来何种影响,仍需进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Prevent soil salinization and enhance soil productivity[J]. Science, 2021, 73(6): 30-34. [杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力[J]. 科学, 2021, 73(6): 30-34.]
- [2] Guo K, Feng X H, Wu J W, et al. Research progress on mechanism and technology of integrated regulating on soil water, salt and fertility under fertile plough layers construction in saline-alkali soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 29-38. [郭凯, 封晓辉, 伍靖伟, 等. 盐碱地肥沃耕层构建水肥盐综合调控机理与技术研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 29-38.]
- [3] Li Y, Tian X Y, Wang Z L, et al. Effects of substitution of partial chemical fertilizers with organic fertilizers on soil improvement and wheat yield in coastal saline and alkaline land[J]. Soils, 2019, 51(6): 1173-1182. [李玉, 田宪艺, 王振林, 等. 有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1173-1182.]
- [4] Xie J, Shi X J, Zhang Y, et al. Improved nitrogen use efficiency, carbon sequestration and reduced environmental contamination under a

- gradient of manure application[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105386.
- [5] Bashir R, Pastora C E. Spatial and seasonal variations of water and salt movement in the vadose zone at salt-impacted sites[J]. Water, 2018, 10(12): 1833.
- [6] Zhang X, Wu Q F, Zhou Y, et al. Effects of organic amendments and their combination with biochar on the stability of aggregates in red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4): 1093-1102. [张新, 郭奇峰, 周燕, 等. 有机物料单施及与生物质炭配施对红壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62(4): 1093-1102.]
- [7] Zhao Y, Li S Y, Dong B W, et al. Effects of fresh sheep manure addition on the vegetation and soil characteristics of moderately saline-alkali degraded *Leymus chinensis* grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(9): 57-65. [赵宇, 李思宇, 董博文, 等. 鲜羊粪添加对中度盐碱退化羊草草地植被及土壤特征的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(9): 57-65.]
- [8] Kumar S, Rahman M, Bouket A C, et al. Unravelling the multifarious role of wood vinegar made from waste biomass in plant growth promotion, biotic stress tolerance, and sustainable agriculture[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2025, 185: 106851.
- [9] Geng K, Mei D Q Z, Jiang M Y, et al. Effects of foliar spraying of wood vinegar on yield and quality of vegetables[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(9): 160-168. [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[J]. 中国土壤与肥料, 2023(9): 160-168.]
- [10] Ma J Y, Islam F, Ayyaz A, et al. Wood vinegar induces salinity tolerance by alleviating oxidative damages and protecting photosystem II in rapeseed cultivars[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 189: 115763.
- [11] Zhu K M, Cheng T, Ma C K, et al. Effects of different application periods of wood vinegar on rapeseed growth and yield[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(2): 341-350. [朱坤淼, 程泰, 马晨坤, 等. 木醋液不同施用时期对油菜生长及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(2): 341-350.]
- [12] Zhou H J, Geng Y Q, Cong R C, et al. Effect of chicken manure co-applied with pyroligneous acid on chemical properties, enzyme activities of coastal solon-chak soils[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(3): 157-162. [周红娟, 耿玉清, 丛日春, 等. 鸡粪与木醋液配施对滨海盐碱土化学性质和酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 157-162.]
- [13] Chen H N, Ma Y R, Gao Y M, et al. Response of soil metabolites, microorganisms, and *Lycium barbarum* yield under cover crop cultivation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(5): 1571-1584. [陈浩楠, 马丫然, 高亚苗, 等. 覆盖种植下土壤中代谢物-微生物及枸杞产量的响应[J]. 土壤学报, 2025, 62(5): 1571-1584.]
- [14] Wang L H, Shi J, Zhang H Z, et al. Physiological and transcriptome analyses reveal the effects of fertilization on the yield of winter wheat and on the photosynthetic performance of leaves during the flowering period[J]. Genes, 2024, 15(9): 1179.
- [15] Rather B A, Mir I R, Masood A, et al. Ethylene-nitrogen synergism induces tolerance to copper stress by modulating antioxidant system and nitrogen metabolism and improves photosynthetic capacity in mustard[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(32): 49029-49049.
- [16] Yang N, Wan Q W, Li Y M, et al. Effects of exogenous spermidine on photosynthetic characteristics and gene expression of key enzymes under salt stress in tea plant[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(2): 378-394. [杨妮, 万绮雯, 李逸民, 等. 外源亚精胺对盐胁迫下茶树光合特性及关键酶基因表达的影响[J]. 园艺学报, 2022, 49(2): 378-394.]
- [17] Chang X J, He H, Cheng L Y, et al. Combined application of chemical and organic fertilizers: Effects on yield and soil nutrients in spring wheat under drip irrigation[J]. Agronomy, 2024, 14(4): 655.
- [18] He K, He G, Wang C P, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes *Miscanthus* growth in a coastal saline-alkali soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103674.
- [19] Lashari M S, Liu Y M, Li L Q, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 113-118.
- [20] Qiao Y L, Tie J Z, Wang X H, et al. Comprehensive evaluation on effect of planting and breeding waste composts on the yield, nutrient utilization, and soil environment of baby cabbage[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 341: 117941.
- [21] Dubey R K, Dubey P K, Abhilash P C. Sustainable soil amendments for improving the soil quality, yield and nutrient content of *Brassica juncea* (L.) grown in different agroecological zones of eastern Uttar Pradesh, India[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104418.
- [22] Zhang W T, Xiong Y W, Li Y P, et al. Effects of organic amendment incorporation on maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water-

- fertilizer productivity under arid conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 269: 107663.
- [23] Zhou X Q, Shi A, Rensing C, et al. Wood vinegar facilitated growth and Cd/Zn phytoextraction of *Sedum alfredii* Hance by improving rhizosphere chemical properties and regulating bacterial community[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 305: 119266.
- [24] Oliveira L M, Mendonça V, Moura E A, et al. Salt stress and organic fertilization on the growth and biochemical metabolism of *Hylocereus costaricensis* (red pitaya) seedlings[J]. *Brazilian Journal of Biology*, 2024, 84: e258476.
- [25] Zhang Z H, Guo L, Sun H C, et al. Melatonin increases drought resistance through regulating the fine root and root hair morphology of wheat revealed with RhizoPot[J]. *Agronomy*, 2023, 13(7): 1881.
- [26] Zhang H L, Liu S C, Su X Y, et al. Effects of exogenous SA and DPI on the stomatal closure of wheat leaves under heat and high light stress during grain filling stage[J]. *Crops*, 2014(3): 67-71. [张欢玲, 刘淑春, 苏小雨, 等. 外源 SA 和 DPI 对灌浆期高温强光下小麦叶片气孔开闭的影响[J]. *作物杂志*, 2014(3): 67-71.]
- [27] Zhang Y F, Liu Z H, Tian S Z, et al. Effects of spraying wood vinegar and organic water-soluble fertilizer on wheat resistance to dry hot wind[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4): 234-240. [张玉凤, 刘兆辉, 田慎重, 等. 喷施木醋液与有机水溶肥协同对小麦抗干热风的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 234-240.]
- [28] Sun X M, Guo Y C, Zeng L S, et al. Combined urea humate and wood vinegar treatment enhances wheat-maize rotation system yields and nitrogen utilization efficiency through improving the quality of saline-alkali soils[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(2): 1759-1770.
- [29] Chang Q, Wang Y L, Yang Z P, et al. Effects of wood vinegar on soil pH, EC, and the photosynthetic characteristics of eggplant leaves and root development[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3): 322-328. [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[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(3): 322-328.]
- [30] Zhao W, Zhao H R, Sun X P, et al. Biochar and wood vinegar altered the composition of inorganic phosphorus bacteria community in saline-alkali soils and promoted the bioavailability of phosphorus[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122501.

(责任编辑: 陈荣府)