

王嘉祺, 庞春花, 张永清, 等. 磷石膏与氮肥配施对盐碱地土壤及藜麦生长生理的影响 [J]. 江苏农业科学, 2025, 53(18): 264-269.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.18.036

磷石膏与氮肥配施对盐碱地土壤 及藜麦生长生理的影响

王嘉祺¹, 庞春花¹, 张永清^{1,2}, 毋悦悦¹, 侯钰晨¹, 闫晶蓉¹, 乔曼¹

(1. 山西师范大学生命科学学院, 山西太原 030031; 2. 山西师范大学地理科学学院, 山西太原 030031)

摘要:为明确磷石膏与氮肥配施对盐碱土的改良效果及对藜麦生长生理和产量的影响,以陇藜 1 号为研究对象,于 2023 年在山西师范大学遮雨棚进行盆栽土培试验。磷石膏用量设置 3 个梯度:2 g/kg(PG1)、10 g/kg(PG2)、18 g/kg(PG3),氮肥设置 3 个梯度:0.06 g/kg(N1)、0.13 g/kg(N2)、0.20 g/kg(N3),以氮肥、磷石膏均不施为对照(CK)。结果表明:(1)相同氮肥水平下,随着磷石膏施用量增加,土壤 pH 值呈下降趋势,电导率和全盐量呈上升趋势。(2)相同磷石膏用量下,与 CK 相比,藜麦叶片叶绿素含量,超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性均随氮肥用量增加呈先升后降的趋势,PG2N2 处理下处于最大值;藜麦叶片的丙二醛(MDA)含量呈先减后增的趋势,PG2N2 处理下处于最小值;表明 PG2N2 处理有利于促进藜麦的光合作用,增强抗氧化酶活性。(3)在 PG2N2 处理下,藜麦的顶穗小穗数、有效分枝数、千粒重均最优;随着磷石膏和氮肥的过量施用,藜麦的生长受到抑制。综合分析土壤指标及藜麦的生长指标、产量指标,适宜的磷石膏和氮肥施用量可改善土壤理化性质,降低盐害,增强藜麦光合作用,提高其抗氧化能力,促进其生长并提高产量,在 PG2N2(即磷石膏施用量为 10 g/kg、氮肥施用量为 0.13 g/kg)处理下效果最佳。

关键词:磷石膏;氮肥;盐碱地;藜麦;产量;生理特性

中图分类号:S156.4;S512.906 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)18-0264-06

据统计,我国盐碱土总面积约为 3 690 万 hm^2 ,主要广泛分布在西北、华北、东北及沿海地区^[1]。近年来,部分地区耕地盐碱化趋势加剧^[2]。盐碱胁迫不仅造成土壤板结与肥力下降,破坏土壤理化性质,降低土壤生产力,还使植物受到渗透胁迫和缓慢离子毒害,造成作物体内氧化损伤和代谢紊乱,致使作物减产^[3-4]。目前,国内外盐碱地改良措施主要包括农艺措施、物理方法、化学方法和生物除盐^[5]。化学改良剂的应用与藜麦的种植是改良盐碱土并提高粮食产量的有效方法^[6-7]。藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.),为苋科藜属一年生草本植物,其原产地为南美洲的安第斯山脉地区^[8]。藜麦不仅具有耐盐、耐旱、耐寒等特性^[9],且富含高质量蛋白质、人体必需氨基酸、多种微量元素(如锌、钙、镁、铁)、膳食纤维、皂苷等多种营养成分^[10-11],具有巨大的经济发展潜力^[6]。

磷石膏是湿法生产磷酸及磷肥过程中产生的主要副产品^[12]。我国磷石膏总堆存量超过 8.3 亿 t,未利用率超 80%^[13]。磷石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)不仅含有植物生长所必需的磷、镁、硫、铁、硅等元素,且含有的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 会与土壤中的 CO_3^{2-} 或 HCO_3^- 形成沉淀,降低土壤胶体钠离子,从而降低土壤 pH 值,保护作物免受碱性伤害^[14-15]。有研究表明,在盐碱地施用磷石膏,可增强盐碱地藜麦的抗性,提高藜麦的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性,改善氧化应激指标^[16],并提高作物产量^[17-18]。但磷石膏施用量过量会加重盐害,不利于作物生长^[17]。氮是作物生长和产量品质形成过程中不可或缺的关键元素^[19]。近年来,为追求增产效应,超量的氮肥投入和不合理的肥料运筹方式,不仅导致作物产量负增长及品质、氮肥农学效率降低,同时还造成土壤板结等环境污染。合理施氮对作物生产至关重要。有研究表明,将磷石膏与尿素混合,可有效提升氮肥的生产效率和利用率,进而改善作物的农艺性状^[20]。磷石膏可与尿素反应制成长效氮肥,其氮素释放速度仅为单一尿素的 50%,提高肥效的同时还能减少用量^[21]。目前关于磷石膏的研究主要集中于单独施加改良盐碱土;关于磷石膏

收稿日期:2024-09-09

基金项目:山西省研究生创新项目(编号:2023KY471)。

作者简介:王嘉祺(1999—),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事植物生理生态方面的研究。E-mail:wjq9963@163.com。

通信作者:庞春花,硕士,教授,主要从事植物生理生态方面的研究。E-mail:pangch6269@126.com。

与氮肥配施,进而实现改良与高产的双重效益的研究尚不多见。本研究采用盆栽试验,以藜麦品种陇藜 1 号为研究对象,探究在盐碱胁迫下磷石膏与氮肥配施对藜麦生长、产量及土壤的影响,明确当地磷石膏及氮肥配施的最适用量,以期在盐碱地藜麦高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验所用材料为山西亿隆有限公司提供的陇藜 1 号种子。供试改良剂为磷石膏, pH 值为 2.98, 含水量为 15.47%, P_2O_5 含量为 2.57 g/kg, Fe_2O_3 含量为 1.67 g/kg, CaO 含量为 32.16 g/kg, SiO_2 含量为 3.38 g/kg, 由盛峰矿产加工厂提供。供试土壤为山西省太原市小店区西温庄乡 0~20 cm 土层盐碱土, 其理化性质: pH 值 8.80, 含有机质 15.27 g/kg、速效磷 11.05 mg/kg、速效钾 89.16 mg/kg、碱解氮 28.34 mg/kg, 全盐量为 1.71 g/kg。供试肥料为尿素(含 N 46.2%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 15.0%)、硫酸钾(含 K_2O 52.0%)。

1.2 试验设计与实施

试验于 2023 年 5—10 月在山西师范大学搭建的遮雨棚和实验室内进行。在已有研究的基础上设置磷石膏和氮肥 2 个因素。磷石膏用量设置 3 个梯度处理: 2 g/kg (PG1)、10 g/kg (PG2)、18 g/kg (PG3); 氮肥设置 3 个梯度处理: 0.06 g/kg (N1)、0.13 g/kg (N2)、0.20 g/kg (N3), 以氮肥、磷石膏均不施为对照 (CK)。共 10 个处理, 每个处理重复 9 次, 共 90 盆。选用底部有孔的黑色营养钵(口径×底径×高度为 30 cm×20 cm×30 cm), 每盆装风干土 8 kg, 施用过磷酸钙 0.2 g/kg 和硫酸钾 0.1 g/kg, 磷石膏和氮肥按照试验处理水平施入。选取颗粒饱满均匀的藜麦种子, 用 10% H_2O_2 对种子进行消毒 10 min, 用蒸馏水反复冲洗多次, 于 2023 年 5 月 1 日播种; 采用“米”字法播种, 每盆播 25 粒。待两叶一心期定苗, 每盆均留苗 7 株。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤理化性质的测定 土壤 pH 值使用 pH 计 (SevenCompact™ S220, 梅特勒-托利多集团) 测定(水、土质量比 5:1); 土壤电导率 (EC) 使用电导率仪 (SevenCompact™ S220, 梅特勒-托利多集团) 测定(水、土质量比 5:1); 土壤全盐量采用残渣烘干法测定^[22]。

1.3.2 藜麦生理指标的测定 叶绿素含量用浸提法测定; 超氧化物酶 (SOD) 活性用氮蓝四唑法 (NBT 法) 测定; 过氧化物酶 (POD) 活性用愈创木酚法测定; 丙二醛 (MDA) 活性用硫代巴比妥酸法测定。

1.3.3 藜麦产量指标的测定 用卷尺测量主枝穗长; 顶穗小穗数、有效分枝数用直接计数法测定; 千粒重用称重法测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据整理, 采用 SPSS 25.0 进行统计分析, 采用 Origin 2021 对测定数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 磷石膏与氮肥配施对土壤理化性质的影响

2.1.1 对土壤 pH 值的影响 由图 1 可知, 不同磷石膏与氮肥处理对土壤 pH 值有显著影响 ($P < 0.05$)。在同一氮肥水平下, 土壤 pH 值随着磷石膏用量的增加而降低, 其降幅表现为 $PG3 > PG2 > PG1$; 在 PG3 水平下, 土壤 pH 值降幅最大。中氮 (N_2) 水平下, 与 CK 相比, PG1、PG2、PG3 处理的土壤 pH 值分别显著降低 0.43、0.74、0.90, 降幅分别为 4.85%、8.35%、10.16%。说明磷石膏施用量的增加促进了土壤中钠离子与磷石膏含有的钙离子的交换, 交换下来的钠离子会随灌溉淋洗, 从而降低土壤 pH 值, 有利于植物对养分的吸收。在同一磷石膏用量下, 土壤 pH 值随氮肥用量增加呈先减后增趋势。在 PG3 用量下, 与 CK 相比, N1、N2、N3 处理的土壤 pH 值分别显著降低 0.62、0.90、0.77, 降幅分别为 7.00%、10.16%、8.69%; N2 处理下效果最好。由此可见, 磷石膏和氮肥不同配比使土壤 pH 值均有不同程度降低, PG3N2 处理效果最佳。

2.1.2 对土壤电导率的影响 由图 2 可知, 不同磷石膏和氮肥处理下, 土壤电导率呈不同程度的变化。在中氮 (N_2) 水平下, 土壤电导率在 PG1 用量下较 CK 显著降低 58.06%; 在 PG2 用量下较 CK 降低 8.06%, 差异不显著; 在 PG3 用量下较 CK 显著增加 46.77%。说明在中氮水平下, 低磷石膏施用量有利于降低土壤电导率, 缓解盐碱胁迫对藜麦生长的影响; 过量增施磷石膏导致土壤电导率升高, 不利于藜麦的生长发育。由此可见, 不同磷石膏和氮肥处理既能降低也能升高土壤电导率, 降低土壤电导率的最佳组合为 PG1N2 处理。

2.1.3 对土壤全盐量的影响 由图 3 可知, 不同磷石膏和氮肥处理均对土壤全盐量有不同程度的影响。

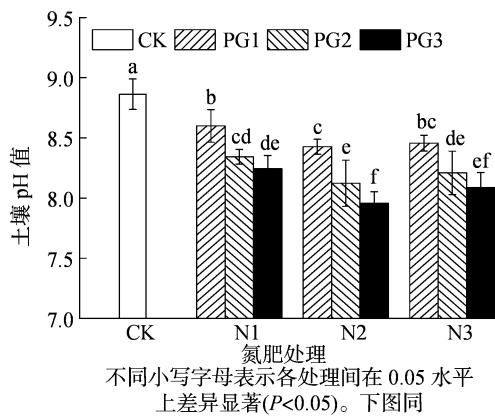


图1 磷石膏与氮肥配施对土壤 pH 值的影响

在中氮(N2)水平下,土壤全盐量在PG1用量下较CK显著降低49.44%;在PG2用量下较CK降低6.18%,差异不显著;在PG3用量下较CK显著增加40.45%。PG1N2处理下土壤全盐量达最小值。说明低磷石膏施用量有利于降低土壤全盐量,减少盐害,磷石膏过量则导致土壤全盐量升高。由此可见,不同磷

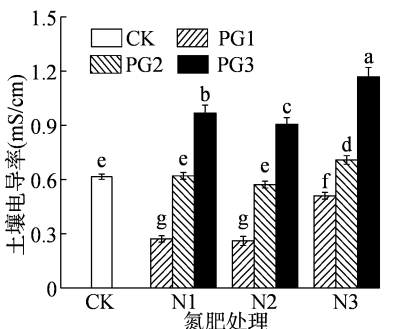


图2 磷石膏与氮肥配施对土壤电导率的影响

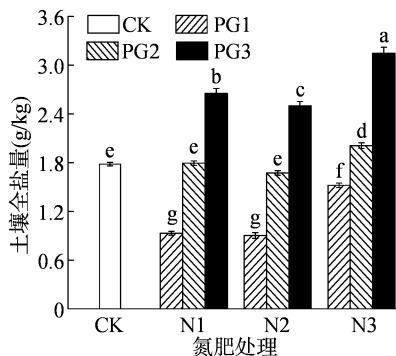


图3 磷石膏与氮肥配施对土壤全盐量的影响

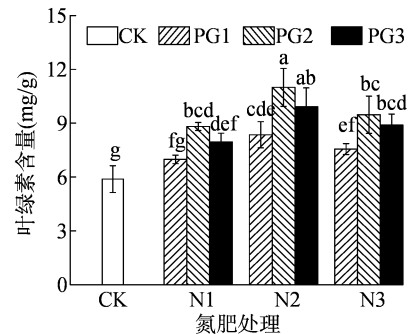


图4 磷石膏与氮肥配施对藜麦叶绿素含量的影响

石膏和氮肥处理既能降低也能升高土壤全盐量,降低土壤全盐量的最佳组合为PG1N2处理。

2.2 磷石膏与氮肥配施对藜麦生理指标的影响

2.2.1 对藜麦叶片叶绿素含量的影响 由图4可知,不同的磷石膏与氮肥处理对藜麦叶片的叶绿素含量存在不同程度的影响。在同一氮肥水平下,随着磷石膏施用量的增加叶绿素含量呈先增后减的趋势。在中氮(N2)水平下,PG1、PG2、PG3处理较CK分别显著提高2.46、5.11、4.02 mg/g,在PG2处理下效果最佳。在同一磷石膏用量下,随着氮肥施用量的增加,藜麦叶片的叶绿素含量均呈先增后减的趋势。在PG2用量下,与CK相比,N1、N2、N3处理分别显著提高49.75%、86.76%、60.78%;在PG2N2处理下取得最大值,为11.00 mg/g,是CK的1.87倍。由此可见,磷石膏与氮肥配施有利于叶片进行呼吸和光合作用,促进叶绿素含量的提升,最佳组合为PG2N2处理。

2.2.2 对藜麦 SOD、POD 活性和 MDA 含量的影响

由图5可知,不同磷石膏与氮肥处理均对藜麦叶片的SOD、POD活性及MDA含量均产生显著影响($P < 0.05$)。与CK相比,在同一氮肥用量下,不同磷石膏施用量均显著增加了藜麦叶片的SOD、POD活性,并降低了MDA含量;且在PG2N2处理下,藜麦的SOD、POD活性均达到最高,MDA含量均达到最低。

在同一氮肥水平下,随着磷石膏用量的增加,藜麦的SOD活性呈先增后减的变化趋势,与CK相比,各处理呈显著差异,均表现为PG2 > PG1 > PG3。POD活性在N1水平下随磷石膏用量的增加而增加;但在N2、N3水平下呈先增后减的趋势,表现为PG2 > PG3 > PG1。SOD、POD活性均在PG2N2处理下达到最大值,分别为770.52、751.56 U/(g·min)。在同一磷石膏用量下,随着氮肥用量的增加,藜麦的

SOD、POD活性整体均呈先增后降的趋势($P < 0.05$)。在PG2用量,N1、N2、N3处理与CK相比,SOD活性分别显著提高85.66%、98.17%、79.32%,POD活性分别显著提高48.39%、83.26%、75.07%,在N2水平下效果最好;其中,在N2、N3水平下POD活性无显著差异。由此可见,磷石膏与氮肥配合施用能够提高藜麦的SOD、POD活性,促进毒性 $O_2^- \cdot$ 转化为 H_2O_2 和 O_2 ,从而增强抗逆性;其中,PG2N2处理促进抗氧化酶活性效果最佳。

在同一氮肥水平下,随着磷石膏用量的增加,藜麦MDA含量表现为先减后增的趋势,各磷石膏处理的MDA含量均低于CK组。N2水平下,PG1、PG2、PG3处理与CK相比,分别显著降低41.22%、62.65%、57.64%。在同一磷石膏用量下,随着氮肥用量的增多,MDA含量呈先降后升的趋势;在PG2N2水平下MDA含量最低。由此可见,磷石膏

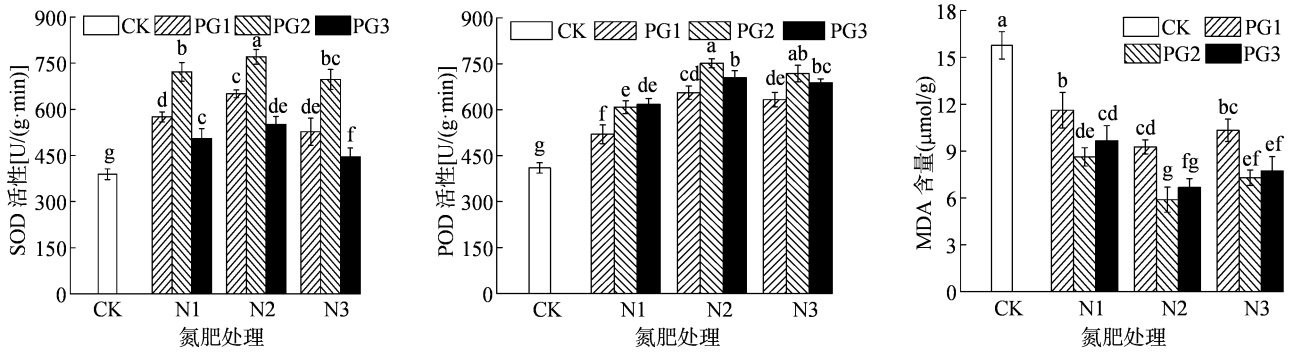


图5 磷石膏与氮肥配施对藜麦 SOD、POD 活性和 MDA 含量的影响

与氮肥不同配比能够降低植物的受损程度,缓解藜麦所受的氧化胁迫,降低 MDA 含量。

综上,PG2N2 处理可有效提高藜麦的 SOD、POD 活性,降低 MDA 含量,降低盐碱胁迫对藜麦生长的抑制作用。

2.3 磷石膏与氮肥配施对藜麦产量及其构成因素的影响

由表 1 可知,不同的磷石膏与氮肥处理对藜麦主枝穗长、顶穗小穗数、有效分枝数及千粒重均存在显著影响($P < 0.05$)。在同一氮肥水平下,随着磷石膏用量的增加,主枝穗长呈上升趋势;在

PG3N2 处理下达峰值,为 17.57 cm。与 CK 相比,藜麦的顶穗小穗数、有效分枝数、千粒重均呈先增后减的变化趋势;且均在 PG2N2 处理下取得最大值,分别为 31.00 个、19.00 个、2.93 g;过量施用磷石膏的处理对顶穗小穗数、有效分枝数、千粒重均有轻微的抑制作用。在同一磷石膏用量下,随着氮肥用量的增加,藜麦的各项产量指标均呈先增后减的变化趋势,在 PG2N2 处理下达最大值。由此可见,不同的磷石膏与氮肥处理对藜麦产量及其构成因素有不同程度的影响。综合分析可知,PG2N2 处理能显著提升藜麦产量及其构成,为最佳组合。

表 1 磷石膏与氮肥配施对盐碱地藜麦产量及其构成因素的影响

处理	主枝穗长 (cm)	顶穗小穗数 (个)	有效分枝数 (个)	千粒重 (g)
CK	5.30 ± 0.53f	17.67 ± 1.16f	8.00 ± 2.00e	1.76 ± 0.02e
PG1N1	7.90 ± 1.11e	23.67 ± 1.53d	13.33 ± 1.16d	2.28 ± 0.07d
PG2N1	10.03 ± 0.83d	24.67 ± 0.58d	15.00 ± 1.00cd	2.41 ± 0.06cd
PG3N1	11.83 ± 1.00c	21.00 ± 1.00e	12.67 ± 0.58d	2.26 ± 0.09d
PG1N2	12.53 ± 0.60c	29.33 ± 1.53abc	17.67 ± 1.53ab	2.57 ± 0.04b
PG2N2	15.30 ± 0.87b	31.00 ± 1.00a	19.00 ± 2.00a	2.93 ± 0.15a
PG3N2	17.57 ± 1.48a	28.00 ± 1.00bc	16.33 ± 0.58bc	2.41 ± 0.05cd
PG1N3	12.03 ± 0.59c	29.00 ± 1.00abc	16.33 ± 2.08bc	2.53 ± 0.10bc
PG2N3	14.53 ± 0.55b	29.67 ± 1.16ab	17.00 ± 1.00abc	2.83 ± 0.08a
PG3N3	15.43 ± 0.85b	27.33 ± 1.53c	14.67 ± 1.16cd	2.37 ± 0.14d

注:同列不同小写字母表示各处理间在 0.05 水平上差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 磷石膏与氮肥配施对土壤指标的影响

土壤 pH 值直接反映土壤的酸碱程度,影响土壤中的有效养分组成,从而影响植物的生长发育^[23]。本试验结果显示,在盐碱土壤施用磷石膏和氮肥后的土壤 pH 值较 CK 显著降低。一方面是因为磷石膏本身呈酸性,能中和土壤中的碱性物质;另一方面是因为磷石膏中的 Ca^{2+} 能将土壤中的 Na^+ 置换

出来从而降低土壤 pH 值,达到改良盐碱土的目的。这与王舒华等施用磷石膏和有机改良剂降低盐碱土 pH 值的研究结果^[24]一致。土壤电导率和全盐量是评价土壤盐碱程度的 2 种指标^[25]。本试验结果显示,在盐碱土壤施用磷石膏和氮肥后,能够降低土壤电导率和全盐量;但当增加磷石膏施用量后,电导率和全盐量会随之升高,这可能是由于磷石膏虽然可以降低土壤盐分,但是当施用量过高时,土壤中的残留离子量过多,并未完全排出,导致

土壤盐分含量升高,增加土壤负担,不利于藜麦生长;这与吴洪生等在盐碱土施用磷石膏后土壤总盐有所升高的研究结论^[18]类似。因此,从土壤电导率和全盐量角度考虑,需控制磷石膏施用量,施用量为 2~10 g/kg 较为合适。

3.2 磷石膏与氮肥配施对藜麦叶绿素含量的影响

叶绿素含量反映光合作用的强弱,光合作用的强弱直接影响作物的生长^[26]。本试验结果显示,同一氮肥水平下施入不同量的磷石膏后,藜麦叶片的叶绿素含量呈先增后减的趋势,光合作用增强,这可能是由于在盐碱地施用磷石膏后,土壤中 Na^+ 含量减少, Ca^{2+} 含量增加,减弱盐害对藜麦生长发育的影响,有利于养分的吸收;且磷石膏增强土壤持水能力,提高水分运输效率,减轻盐碱胁迫对叶绿体膜结构的破坏程度,从而提高叶绿素含量,增强光合速率,促进藜麦的生长,这与毛久庚等研究发现在盐碱土上施用磷石膏可提高小白菜叶绿素含量^[17]和王伟等研究发现磷石膏的添加可有效促进 2 个芸豆品种叶片中的净光合速率、叶绿素含量^[27]的研究结果一致。磷石膏施用量不变时,中氮水平处理显著提高叶绿素含量,增强光合速率并促进光合作用;但在高氮水平下的叶绿素含量有所降低,这可能是由于过量施氮导致植物体内氮素代谢过于旺盛,维管束鞘细胞淀粉粒消耗过多,进而降低叶绿素含量,这与李鹏程等研究施氮量对棉花叶片叶绿素含量的影响结果^[28]相似。

3.3 磷石膏与氮肥配施对藜麦 SOD、POD 活性和 MDA 含量的影响

在逆境胁迫下,为了维持正常的生理代谢过程,植物会利用其体内抗氧化保护酶来清除自由基及其氧化反应的中间产物^[29]。本试验结果显示,同一氮肥水平下施入不同量的磷石膏后,能显著增强藜麦叶片的 SOD、POD 活性,这可能是由于磷石膏改善了土壤环境,提高了土壤肥力,增强了抗氧化酶系统清除有害物质的能力,缓解了盐碱胁迫和过氧化物大量积累对藜麦生长发育的伤害;这与曹鸣宇等研究磷石膏能有效提高马铃薯块茎的 SOD、POD 活性的结论^[30]一致。磷石膏施用量不变时,不同施氮水平下藜麦叶片的 SOD、POD 活性均呈先升后降的趋势,中氮水平下效果最佳;这可能是由于适量施氮能提高抗氧化酶活性,增强清除自由基和过氧化物的能力,保护细胞免受细胞毒性 O_2^- 引起的潜在危害,从而保护藜麦免受其对细胞膜和大分

子的破坏作用;这与侯钰晨等研究氮肥提高藜麦 SOD、POD 活性研究结果^[31]一致。MDA 含量的变化反映氧化损伤的程度^[32]。本试验结果显示,同一氮肥水平下施入不同量的磷石膏后,能够降低藜麦叶片的 MDA 含量;这可能是由于磷石膏可在一定程度上提高抗氧化酶活性,减少植物体内活性氧的积累,减轻膜脂损伤,有利于维持叶片的细胞代谢,缓解盐碱胁迫对藜麦生长的伤害;这一结果与 El-Shamy 等研究盐渍土壤水分胁迫下磷石膏和植物促生根杆菌降低藜麦 MDA 含量的结论^[16]相似。磷石膏施用量不变时,不同施氮水平下藜麦叶片的 MDA 含量呈先降后升的趋势;这可能是由于施氮过量导致活性氧代谢紊乱,活性氧增多,加剧了藜麦的氧化损伤程度;这与闫士朋等研究适量氮肥可降低藜麦根系 MDA 含量的结论^[33]相似。在 PG2N2 处理下, SOD、POD 活性达到最大值,MDA 含量达最小值。

3.4 磷石膏与氮肥配施对藜麦产量指标的影响

产量构成因素是反映作物生长状况及养分吸收的重要指标^[34]。本试验结果显示,同一氮肥水平下施入不同量的磷石膏后,藜麦的主枝穗长、顶穗小穗数、有效分枝数、千粒重均较 CK 有所增加,表明磷石膏可提高作物产量;这可能是由于磷石膏降低土壤 pH 值,减少了土壤中的有害盐分,改善土壤理化特性,有利于藜麦主枝穗长伸长;同时,氮肥可提高土壤肥力、提高藜麦顶穗小穗数等,进而提升产量;这与曹鸣宇等研究磷石膏对马铃薯产量的影响^[30]和张济世等研究磷石膏对冬小麦生长的影响^[35]的研究结果一致。磷石膏施用量不变时,不同施氮水平下藜麦的主枝穗长、顶穗小穗数、有效分枝数、千粒重均呈先增后减的趋势,以中氮水平效果最佳;高氮水平下产量指标数值有所下降,这可能是由于过量施氮会干扰藜麦对磷、钾及其他微量元素的吸收,降低花芽分化率,抑制顶穗小穗数的增加,使藜麦籽粒不饱满、降低千粒重,导致产量下降。这与闻磊等研究过量施氮会降低春小麦产量的研究结果^[36]一致。

4 结论

在盐碱地中,磷石膏与氮肥配施能够改善土壤的理化特性,降低土壤 pH 值、电导率、全盐量;提高藜麦叶片的叶绿素含量,促进光合作用;提高藜麦叶片的抗氧化酶活性,抑制膜脂过氧化作用,降低 MDA 含量,从而缓解盐碱胁迫对藜麦的伤害,促进藜麦生长;同时改变藜麦产量及其构成因素,实现

藜麦高产。磷石膏具有高效能、低成本等优点,不仅可以资源化利用改良盐碱土,还可以提高藜麦产量。综合土壤指标及藜麦生长产量指标分析,PG2N2 处理(即磷石膏施用量为 10 g/kg、氮肥施用量为 0.13 g/kg)时效果最佳。但本研究盆栽试验具有局限性,与大田试验有差异,需进一步改善。

参考文献:

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等. 中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J]. 土壤学报,2022,59(1):10-27.
- [2] 周琦,祝遵凌. 盐胁迫对鹅耳枥幼苗光合作用和荧光特性的影响[J]. 林业科技开发,2015,29(2):35-40.
- [3] Li C Y, Wang Z C, Xu Y T, et al. Analysis of the effect of modified biochar on saline - alkali soil remediation and crop growth [J]. Sustainability, 2023, 15(6):5593.
- [4] 杨洋,庞春花,张永清,等. PAM 与磷肥互作对盐碱地藜麦生长及产量的影响[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(9):180-185.
- [5] 王世睿,黄迎新. 松嫩平原盐碱地改良治理研究进展[J]. 土壤与作物,2023,12(2):206-217.
- [6] Choukr - Allah R, Rao N K, Hirich A, et al. Quinoa for marginal environments; toward future food and nutritional security in MENA and central Asia regions[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7:346.
- [7] 马晨,马履一,刘太祥,等. 盐碱地改良利用技术研究进展[J]. 世界林业研究,2010,23(2):28-32.
- [8] Vega - Gálvez A, Miranda M, Vergara J, et al. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain; a review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(15):2541-2547.
- [9] 庞春花,张紫薇,张永清. 水磷耦合对藜麦根系生长、生物量积累及产量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(21):4107-4117.
- [10] 王启明,张继刚,郭仕平,等. 藜麦营养功能与开发利用进展[J]. 食品工业科技,2019,40(17):340-346,354.
- [11] 任妍婧,谢薇,江帆,等. 藜麦粉营养成分及抗氧化活性研究[J]. 中国粮油学报,2019,34(3):13-18.
- [12] Pérez - López R, Castillo J, Sarmiento A M, et al. Assessment of phosphogypsum impact on the salt - marshes of the Tinto river (SW Spain): Role of natural attenuation processes[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(12):2787-2796.
- [13] 卢维宏,王要芳,刘娟,等. 磷石膏无害化改性及其在农田土壤改良中的应用研究进展[J]. 土壤,2023,55(4):699-707.
- [14] Qi J, Zhu H, Zhou P, et al. Application of phosphogypsum in soilization; a review [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(9):10449-10464.
- [15] 王晓岑,李淑芹,许景钢. 农业应用磷石膏前景展望[J]. 中国农学通报,2010,26(4):287-294.
- [16] El - Shamy M A, Alshaal T, Hussein M H, et al. Quinoa response to application of phosphogypsum and plant growth - promoting rhizobacteria under water stress associated with salt - affected soil [J]. Plants, 2022, 11(7):872.
- [17] 毛久庚,毛欣宇,杨华金,等. 增施磷石膏对苏北地区轻度盐碱土改良及小白菜生长的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(3):699-706.
- [18] 吴洪生,陈小青,马文舟,等. 磷石膏改良滨海盐土效果及对小麦生长的影响[J]. 土壤学报,2024,61(4):1077-1087.
- [19] 薛利红,罗卫红,曹卫星,等. 作物水分和氮素光谱诊断研究进展[J]. 遥感学报,2003,7(1):73-80.
- [20] 张永春,朱万宝,苏国峰,等. 磷石膏对提高氮肥效率的研究[J]. 植物营养与肥料学报,1999,5(2):144-149.
- [21] 高卫民,冉景,朱巧红. 我国磷石膏资源化利用政策解读及研究进展刍议[J]. 化工矿物与加工,2022,51(7):48-53.
- [22] 杨洋. 不同磷水平下两种改良剂对盐渍化土壤理化性质及藜麦生长的影响[D]. 临汾:山西师范大学,2022:10-15.
- [23] Akpoveta O V, Osakwe S A, Okoh B E, et al. Physicochemical characteristics and levels of some heavy metals in soils around metal scrap dumps in some parts of delta state, Nigeria [J]. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 2010, 14(4):57-60.
- [24] 王舒华,陈爽,王悦,等. 有机改良剂配施磷石膏的盐碱土改良效果研究[J]. 江苏农业科学,2022,50(11):227-233.
- [25] 许尔琪,张红旗,许咏梅. 伊犁新垦区土壤全盐量和电导率定量关系探讨[J]. 资源科学,2012,34(6):1119-1124.
- [26] 庞春花,华艳宏,张永清,等. 不同磷水平下施加腐殖酸对藜麦生理特性及产量的影响[J]. 中国农业科技导报,2019,21(4):143-150.
- [27] 王伟,李明,张文慧,等. 不同改良措施对盐碱地芸豆生长及产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2018,30(1):1-7,16.
- [28] 李鹏程,董合林,刘爱忠,等. 施氮量对棉花功能叶片生理特性、氮素利用效率及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):81-91.
- [29] Gill S S, Anjum N A, Gill R, et al. Superoxide dismutase; mentor of abiotic stress tolerance in crop plants [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(14):10375-10394.
- [30] 曹鸣宇,赵晶晶,张丽. 施用磷石膏对马铃薯块茎保护酶活性及产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2020,32(5):7-12.
- [31] 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[J]. 作物杂志,2024(4):240-246.
- [32] Kovalikova Z, Jirutova P, Toman J, et al. Physiological responses of apple and cherry in vitro culture under different levels of drought stress [J]. Agronomy, 2020, 10(11):1689.
- [33] 闫士朋,冯焕琴,杨宏伟,等. 氮肥不同施用量及基肥比对藜麦根系生理及同化物分配的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(4):105-115.
- [34] Hlisenkovsky L, Menšík L, Čermák P, et al. Long - term effect of pig slurry and mineral fertilizer additions on soil nutrient content, field pea grain and straw yield under winter wheat - spring barley - field pea crop rotation on cambisol and luvisol [J]. Land, 2022, 11(2):187.
- [35] 张济世,于波涛,张金凤,等. 不同改良剂对滨海盐渍土壤理化性质和小麦生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(3):704-711.
- [36] 闻磊,张富仓,邹海洋,等. 水分亏缺和施氮对春小麦生长和水氮利用的影响[J]. 麦类作物学报,2019,39(4):478-486.