

胡 凡,张峰举,顾旭东,等. 施肥对盐碱地紫花苜蓿生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(18):150-155.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.18.025

施肥对盐碱地紫花苜蓿生理特性的影响

胡 凡¹,张峰举²,顾旭东¹,许 兴^{1,2}

(1. 宁夏大学农学院,宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学环境工程研究院,宁夏银川 750021)

摘要:为研究大田试验中氮磷钾不同用量在盐碱地上对紫花苜蓿生理特性的影响,设置氮磷钾梯度试验,对氮磷钾 3 种处理分别设置 6 个梯度,配施量相同,分别测定其叶片过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)的活性及丙二醛(MDA)、脯氨酸(PRO)、叶绿素 a、叶绿素 b 的含量。结果表明,当氮肥施用量为 90 kg/hm² 时,叶绿素总量达到最高,为 1.24 mg/g,同时过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶 3 种酶均保持较高活性;磷肥对于逆境胁迫下的植物调控系统主要以调节抗氧化系统为主;钾能够显著降低丙二醛含量($P < 0.05$),K2、K3、K4 处理分别比 K1 降低了 39.9%、31.4%、45.8%。主成分分析结果表明,过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性以及叶绿素总量的贡献率最大。该结果能够更好地为氮磷钾肥对紫花苜蓿耐盐碱机制的调控提供理论依据。

关键词:紫花苜蓿;盐碱地;施肥;生理特性

中图分类号:S541⁺.106 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)18-0150-06

土壤盐碱化不仅对作物产生危害,还导致土壤肥力退化。随着全球气候的改变,土壤盐碱化的面积逐渐扩大,已成为全世界农业生产上不可忽视的问题。据联合国教科文组织和联合国粮食及农业组织不完全统计,世界上盐碱土面积约为 9.543 8 × 10⁸ hm²^[1]。我国盐碱土面积约占耕地总面积的 25%^[2],主要分布在华北、东北以及西北地区,其中河套地区盐碱地面积约为 4.3 × 10⁵ hm²^[3]。土壤盐碱化问题日益严重,不仅是对农业土地资源的浪费,也对农业生产构成了威胁。土壤盐碱化造成植物生理性干旱,影响气孔开合、植物吸收营养,伤害植物组织^[4]。在盐碱土上种植耐盐碱植物,不仅具有经济和生态效益,而且能够高效利用和改良盐碱地。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是产量和营养价值双高且适应性广的优质多年生豆科牧草,被誉为“牧草之王”^[5]。紫花苜蓿根系深厚,分蘖多,地面覆盖面大,能够显著减少地面蒸腾,减少地表水分蒸发,从而有效降低耕层的盐碱含量^[6]。许多研究

表明,合理施肥可以提高紫花苜蓿的产量和品质^[7],也可以提高作物的酶活性和降低丙二醛含量^[8-11],并提高作物的耐盐性。本试验在宁夏盐碱地中种植紫花苜蓿,研究田间不同施肥处理下紫花苜蓿生理特性的变化,探讨紫花苜蓿耐盐碱机制,以期对紫花苜蓿合理施肥和盐碱地改良提出理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设于宁夏平罗县高庄乡(105°57'E、38°36'N),温带大陆性气候,日照时间长,昼夜温差大,蒸发强烈,平均降水量 173.2 mm,年平均气温 2.8~16.0℃,平均日照时数为 3 008.6 h,平均霜冻期为 194.6 d,无霜期为 171 d。该试验田初始土壤状况:pH 值为 8.54,全盐含量为 1.17 g/kg,有机质含量为 12.28 g/kg,全氮含量为 0.94 g/kg,全磷含量为 0.99 g/kg,碱解氮含量为 79.33 mg/kg,速效磷含量为 11.43 mg/kg,速效钾含量为 135.95 mg/kg。

1.2 试验材料

供试材料为建植 3 年的紫花苜蓿品种耐盐之星。供试肥料为尿素、过磷酸钙、氯化钾。

1.3 试验设计与方法

试验材料于 2018 年 3 月底播种,播种量为 22.5 kg/hm²,播深 2 cm,行距为 15 cm。2018、2019 年采取田间高产田管理措施,于 2019 年开始采取单

收稿日期:2021-01-14

项目基金:国家重点研发计划(编号:2016YFC0501307);宁夏重点研发计划(编号:2019BBF02001)。

作者简介:胡 凡(1996—),女,内蒙古兴安盟人,硕士研究生,研究方向为牧草生理。E-mail:1558276732@qq.com。

通信作者:许 兴,教授,博士生导师,研究方向为植物生理。E-mail:xuxingscience@126.com。

因素随机区组试验设计。本试验于 2020 年 3 月开展,磷、钾肥做基肥于 2020 年 3 月底施入,人工条施,氮肥分 2 次施入,每次施入 50%,第 1 次做基肥施入,第 2 次于第 2 次刈割后,7 月 4 日施入。施肥量采用随机区组设计,18 个处理(表 1),每个处理 3

个重复,共 54 个小区,每个小区 30 m²。

于 2020 年 7 月 3 日采集第 2 茬初花期紫花苜蓿,每个小区采集生长状况良好、长势相同的苜蓿叶片 100 g,迅速带回实验室,−20 ℃ 冰冻保存,待测。

表 1 各处理肥料施用量

肥料	施肥量 (kg/hm ²)						配施用量 (kg/hm ²)		
	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6	N	P	K
氮肥(N)	0	60	90	180	270	360	0	105	75
磷肥(P)	0	45	90	135	180	225	120	0	75
钾肥(K)	0	45	90	135	180	225	120	105	0

1.4 测定指标及方法

叶绿素含量的测定采用乙醇浸泡法^[12]测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[13]测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^[13]测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法^[13]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[13]测定;脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮比色法^[14]测定。所有指标均取 3 次重复,最后计算平均值。

1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 对测定指标数据预处理,再使用 SPSS 26.0 统计分析软件中广义线性模型(GLM)进行单因子方差分析和 Duncan's 多重比较, $P < 0.05$ 为显著差异。采用 Origin 8 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同肥料处理对紫花苜蓿叶绿素含量的影响

光合作用不仅与环境因素有关,还与矿质元素息息相关。如图 1 所示,N2、N3、N4、N5、N6 处理的叶绿素 a 含量与 N1 处理(对照)相比存在显著差异($P < 0.05$),随着施用量的增加,总体呈先上升再下降趋势,其中 N4 处理与对照差异最大,相比对照提高了 19.8%;磷肥用量试验中各处理之间不存在显著差异;钾肥用量试验中,与 K1 处理(对照)相比,K2 处理的叶绿素 a 含量增加了 8.5%。如图 2 所示,随着肥料施用量的增加,叶绿素 b 含量总体呈先上升后下降的趋势,N3 处理与对照(N1)相比增加了 44.7%;磷肥各处理间不存在显著差异;K2、K3、K4、K5、K6 处理的叶绿素 b 含量均高于对照,K4 处理与对照(K1)相比显著增加了 22%。如图 3 所示,从叶绿素总量来看,氮肥各处理间达到了显著水平($P < 0.05$),N3、N4 处理相比对照(N1)提高了

19.6%、20.6%;磷肥各处理间无显著差异;施用钾肥后,处理组间叶绿素总量均高于对照 K1,但 5 个处理组间差异不明显。

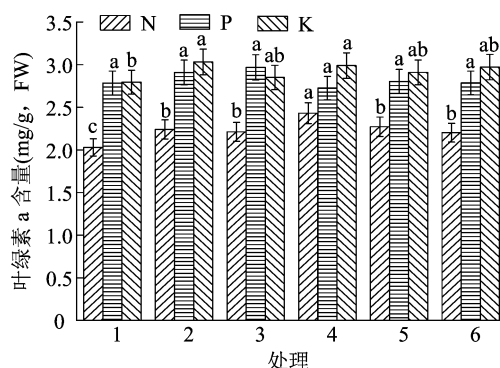


图1 不同肥料处理下紫花苜蓿的叶绿素 a 含量

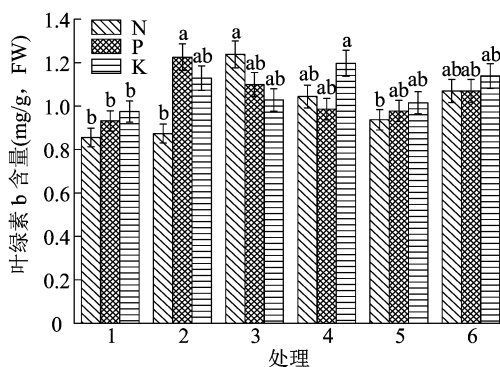


图2 不同肥料处理下紫花苜蓿的叶绿素 b 含量

2.2 不同肥料处理对紫花苜蓿抗氧化酶活性的影响

当植物受到逆境胁迫后,植物体内由于氧化代谢失调,会形成氧化胁迫。在不利于植物生长发育的条件下,植物组织会通过各种途径产生超氧阴离子自由基、羟基自由基、过氧化氢等具有强氧化能力的活性氧。而植物可以通过 SOD、POD、CAT 等抗氧

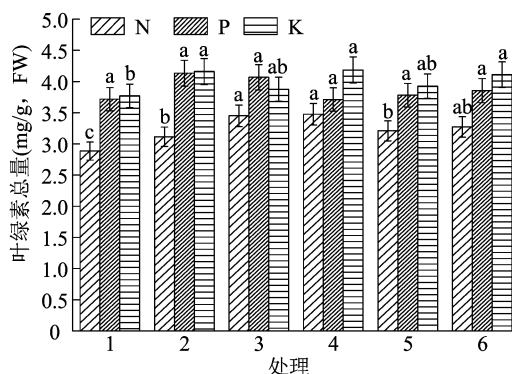


图3 不同肥料处理下紫花苜蓿的叶绿素总量

化酶系统对植物组织进行调节,主要目的是清除有害的活性氧自由基,减轻或避免活性氧自由基对膜脂的攻击,避免膜损伤。

如图4所示,氮肥不同施用量对SOD活性存在显著差异($P < 0.05$),处理N2、N3、N4、N5、N6分别比对照(N1)增加了20.2%、36.3%、14.7%、38.8%、20.3%,其中以N3与N5最显著,说明氮肥能够提高SOD活性。随着不同磷肥用量的增加,SOD活性呈现先升高后降低的趋势,与对照(P1)相比,P2、P3、P4、P5分别增加了1.7%、3.5%、1.3%、6.4%,P6下降了12.2%,表明适当的磷可以提高SOD活性,过量反而会降低SOD活性。钾肥试验中,随着钾肥施用量的增加,SOD活性总体呈现先升高后降低的趋势,除K6处理比K1(对照)下降6.9%之外,其余4个处理组比K1(对照)提高了2.4%~26.6%,其中K3、K4与对照存在显著差异($P < 0.05$),分别提高了26.6%、21.6%,也表明钾在提高SOD活性中的重要性。

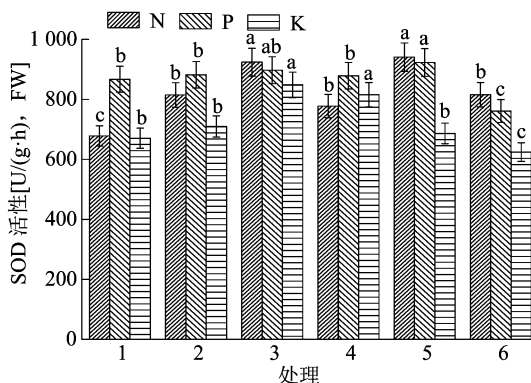


图4 不同肥料处理下紫花苜蓿的SOD活性

如图5所示,不同施氮处理在POD活性上不存在显著差异。POD活性在磷肥各处理中呈现先上升后下降的趋势,P2处理比P1处理(对照)提高了7.1%,表示低磷可以提高POD的活性;在钾肥处理

中呈现出倒“V”趋势,即两边低、中间高,与钾处理组的SOD活性趋势一致,K3处理相比K1处理(对照)提高了14.9%。如图6所示,CAT活性在氮肥试验中呈现出先升高后降低趋势,氮肥各处理均高于对照,N2、N3处理比N1处理(对照)显著提高了31.5%、28.4%。磷肥处理的CAT活性与POD活性趋势一致,先上升后降低,P2处理比P1处理提高了3.8%。钾肥的CAT活性与POD活性趋势相似,K3处理与K1处理(对照)存在显著差异($P < 0.05$),相比提升了18.8%。

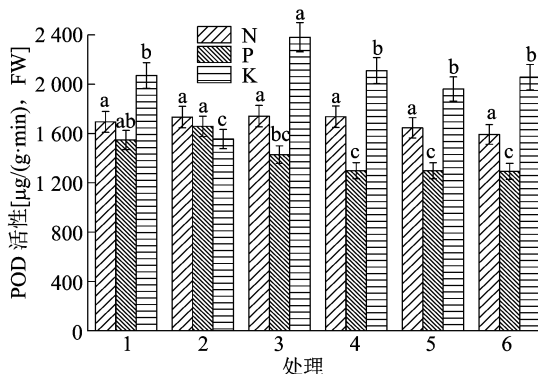


图5 不同肥料处理下紫花苜蓿的POD活性

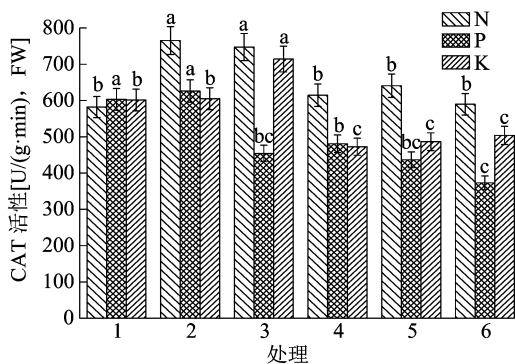


图6 不同肥料处理下紫花苜蓿的CAT活性

2.3 不同肥料处理对紫花苜蓿MDA含量的影响

MDA是植物处于逆境时,活性氧破坏细胞功能,导致膜脂质发生过氧化反应产生的。MDA含量可以反映出植株受伤害的程度。如图7所示,氮肥各处理的MDA含量均低于N1处理(对照),N4、N5、N6处理与N1处理(对照)差异显著($P < 0.05$),分别低于对照22.2%、22.2%、20.8%;磷肥中P2、P3、P4、P5、P6处理的MDA含量均低于P1处理(对照),但未达到显著水平;钾肥各处理组与对照差异明显,在施用钾肥之后,MDA含量显著下降,但在不同钾肥用量的处理间无显著差异,与对照(K1)相比,其他各处理分别降低了39.9%、31.4%、45.8%、24.6%、37.0%。

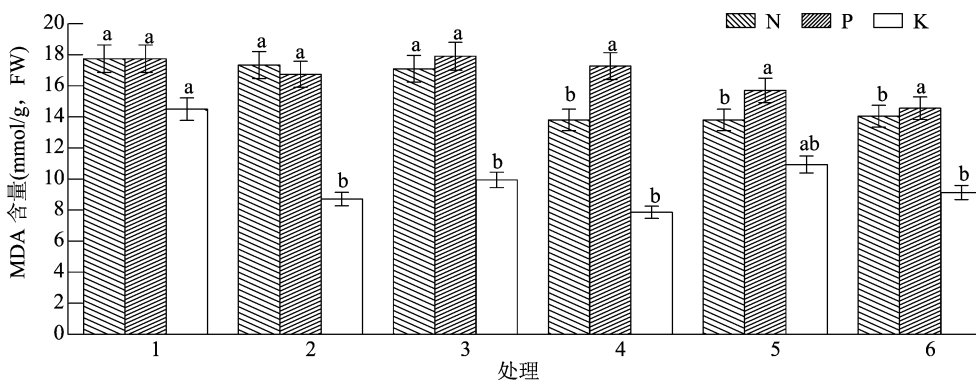


图7 不同肥料处理下紫花苜蓿的MDA含量

2.4 不同肥料处理对紫花苜蓿脯氨酸含量的影响

当植物处于盐碱胁迫下时,由于土壤中可溶性盐分过多,会造成土壤水势降低,导致土壤吸水困难。水分的亏缺会导致植物产生渗透胁迫,而植物为了维持正常的生长生理活动,开始积累渗透调节物质。经过研究发现,脯氨酸是多种植物体内最有效的一种在细胞内合成的有机溶质,是具有亲和性

的渗透调节物质。脯氨酸的主要作用是维持原生质和环境的渗透平衡,防止植物因失水过多而抑制生长发育。如图8所示,施用氮肥后脯氨酸含量均有所提升,N6处理与N1相比显著提高28.9%($P < 0.05$);磷肥各处理组脯氨酸含量无显著差异;K4处理与对照K1差异显著($P < 0.05$),与对照相比,提高29.8%。

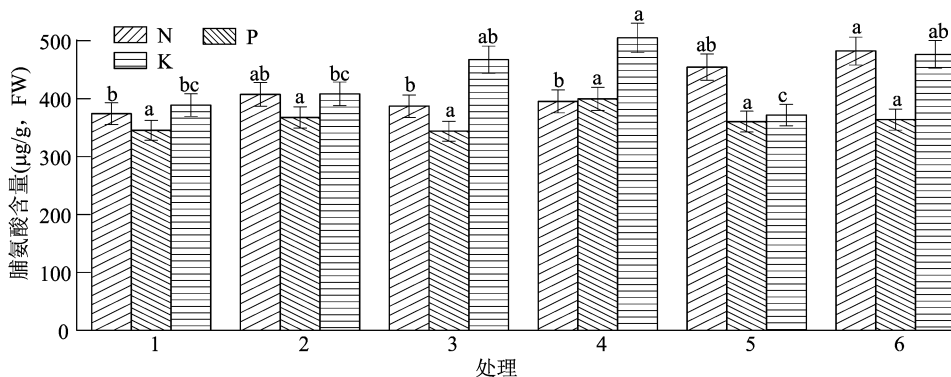


图8 不同肥料处理下紫花苜蓿的脯氨酸(Pro)含量

2.5 主成分分析

主成分分析是一种降维的常用统计方法,将原来变量重新组合成一组新的相互无关的几个综合变量,同时根据实际需求从几个综合变量中取出几个较少的总和变量,尽可能多地反映原来变量的信息。对氮磷钾3种肥料处理的9个指标进行主成分分析,KMO值为0.447,巴特利特球形度检验显著性小于0.001。主成分1~3特征值大于1,累计贡献

率达到81.57%,3个主成分贡献率分别为39.76%、26.93%、14.88%。由表2可知,对主成分1特征向量影响较大的指标是叶绿素a含量和叶绿素总量;对主成分2特征向量影响较大的指标是过氧化物酶(POD)活性和脯氨酸(Pro)含量;对主成分3特征向量影响较大的指标是超氧化物歧化酶(SOD)活性和叶绿素b含量。

表2 紫花苜蓿耐盐指标的主成分分析

主成分	载荷值								特征值	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
	POD 活性	SOD 活性	CAT 活性	MDA 含量	Pro 含量	叶绿素 a 含量	叶绿素 b 含量	叶绿素 总量			
1	-0.002	-0.096	-0.629	-0.473	-0.021	0.928	0.644	0.971	3.181	39.758	39.758
2	0.867	-0.301	0.428	-0.758	0.843	0.032	0.308	0.119	2.154	26.931	66.689
3	-0.168	0.855	0.389	0.273	0.044	-0.137	0.497	0.037	1.190	14.876	81.565

3 讨论

3.1 不同肥料处理对紫花苜蓿叶绿素含量的影响

植物对氮磷钾的需求量很大,在农田中需要施肥来补充土壤所损耗的养分。氮磷钾不仅可以提高作物的品质和产量,也影响着作物的生理作用。本试验以氮磷钾施用量的不同梯度对紫花苜蓿进行耐盐性研究,以期对盐碱地紫花苜蓿的耐盐调控机理提供理论依据。

叶绿素是在光合作用过程中吸收光能的光合色素,其在光合作用中起着重要的作用。研究表明,氮、磷、钾对植物叶绿素含量影响显著^[15]。叶绿素含量对叶片光合作用的影响很大^[16]。在氮肥试验中,叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量均呈现出先上升后下降的趋势,随着氮肥施用量的提高,叶绿素含量不断下降,当施用量从 N3 改变到 N4 处理时,叶绿素含量达到最高,这与张文等在草坪草^[17]和秦立金等在辣椒^[11]上的研究结果一致。适当氮促进叶绿素合成,但高氮会抑制叶绿素形成,这可能是因为高氮会影响根瘤菌对根毛的侵染,降低固氮酶活性,从而降低根瘤菌结瘤数量,导致固氮效率的降低^[18]。磷肥在这 3 个指标中并未表现出显著差异,与宋秀丽等在大豆上的研究结果^[19]一致。有研究表明土壤中 pH 值与有效磷利用效率呈直线负相关关系^[20],由此说明盐碱地高 pH 值抑制了溶磷微生物的活性,导致溶磷效率降低,抑制了磷的吸收。钾肥试验中 3 个指标也未显现出明显差异,这与杜明等的研究结果^[21]类似,其研究表明,开花期的大豆叶绿素含量并未由于品种差别显现出明显差异^[21]。

3.2 不同肥料处理对紫花苜蓿抗氧化酶活性及 MDA 含量的影响

在逆境胁迫下,植物细胞产生并积累活性氧,当活性氧的产生与消除无法达到均衡时,就超出了植物清除活性氧的能力,会产生氧化胁迫,对细胞及植物体造成氧化损伤^[22]。MDA 是膜脂氧化的最终产物,其在植物体内的含量可以反映膜的稳定性与植物受伤害的程度^[23]。SOD、POD、CAT 是抗氧化系统的主要酶类。SOD 是活性氧系统中第 1 个发挥作用的抗氧化酶^[24]。CAT 是一种名为接收细胞内产生的 H_2O_2 的接收器,是植物体、细胞器内氧化防御的重要物质^[25],其主要作用是清除活性氧自由基。本试验结果表明,SOD 活性、POD 活性、

CAT 活性在氮肥试验中表现出不同的趋势,试验各处理间 SOD 在 N3、N5 处理上活性最高,CAT 在 N2、N3 处理上活性最高,且均呈现出先上升后下降的趋势,表明紫花苜蓿在氮肥施用量在 90 kg/hm^2 时,2 种抗氧化酶活性均会保持一个比较高的状态,而氮素水平过高会抑制酶活性,这与王文娟等在宽叶雀稗^[26]和赵浩波等在羊草^[27]上的研究结果相似。MDA 含量在各处理间存在显著差异,其趋势与酶活性相反,随着酶活性的增强,MDA 含量不断减少,表明适宜的施氮量能够提高紫花苜蓿的耐盐碱能力。磷肥试验中 3 种酶活性趋势一致,在 P2 和 P3 处理中 3 种酶活性最高,随着磷肥施用量的增加,酶活性不断降低。在施肥量为 $45\sim 90\text{ kg/hm}^2$ 时,酶活性达到最高,施肥量超过 90 kg/hm^2 后酶活性降低,这可能因为施肥区土壤中可利用磷过高,对植物产生了胁迫,超出了抗氧化酶系统清除活性氧的能力,也有可能是因为苜蓿对磷的吸收存在阈值,当超过这个阈值之后,根细胞磷浓度提高,细胞膜磷脂含量增加,使得细胞膜通透性降低,根系分泌的碳水化合物减少,丛枝菌根真菌侵染率降低,降低作物根际土壤养分的有效性。而 MDA 含量在磷肥各处理间并未达到显著水平,这与舒钰在草坪草上的试验结果^[9]类似,对同一时期施用量不同的草坪草的 MDA 含量不存在显著影响^[9]。钾肥试验中各处理间 MDA 含量差异显著,说明钾肥可以缓解盐碱胁迫对植物造成的伤害,其中 K3 处理的 3 种酶活性均达到最高,K4、K5、K6 处理的酶活性逐渐减弱,这与丁雪梅等在大丽花上的研究结果^[28]相似,MDA 含量在各钾肥处理间存在显著差异,其趋势与 3 种酶活性相反,表明钾肥的施用超过了最适量,反而会导致钾元素积累太多,从而破坏活性氧代谢系统,加速膜脂过氧化作用。

3.3 不同肥料处理对紫花苜蓿脯氨酸含量的影响

当植物受到胁迫时,植物体内会积累脯氨酸。作为一种渗透调剂物质,脯氨酸可以调节渗透势,维持细胞膨压^[29]。氮肥试验结果表明:氮肥施用后对脯氨酸积累有促进作用,说明氮肥可以通过调节渗透势来改善植物由于受到逆境胁迫所带来的伤害;磷肥梯度试验结果表明,各处理组之前不存在差异显著,说明磷肥对逆境胁迫下植物的调控机制以调节抗氧化系统为主。钾肥试验结果表明,钾肥各处理间的脯氨酸含量存在显著差异,随着钾肥施用量的提高,脯氨酸含量呈现先升高后降低的趋

势,主要是因为盐碱胁迫下,植物不可避免地吸收土壤中的钠离子,钾肥的施入为叶片中的钾离子提供了充分的来源,维持钾钠离子平衡,降低了细胞内的渗透势,使植物的抗逆能力得到了提高^[30]。与对照相比,K4 处理脯氨酸含量显著增加,K5 处理下降,到 K6 处理脯氨酸含量又回升,这与丁雪梅等的研究结果^[28]一致,说明过量施钾反而对植物造成了逆境胁迫,导致脯氨酸含量增加来调节渗透势。

4 结论

在盐碱胁迫下,当氮肥施用量为 90 kg/hm²时,叶绿素总量达到最高,为 1.24 mg/g,同时过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶 3 种酶均保持较高的活性。本试验结果表明,磷肥对于逆境胁迫下的植物调控系统主要以调节抗氧化系统为主。钾肥试验各处理的数据表明,钾能够显著降低丙二醛含量和增加脯氨酸含量。主成分分析结果表明,过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性以及叶绿素总量的贡献率较大,为氮磷钾肥对紫花苜蓿耐盐机制的调控提供理论依据。

参考文献:

- [1] 杨真,王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学,2015,47(4):125-130.
- [2] 王硕. 盐碱胁迫对紫花苜蓿生理指标的影响及耐盐碱能力评价[D]. 长春:东北师范大学,2017.
- [3] 于浩然,贾玉山,贾鹏飞,等. 不同盐碱度对紫花苜蓿产量及品质的影响[J]. 中国草地学报,2019,41(4):143-149.
- [4] 何文义,于涛,蔡玉梅. 盐碱地的治理与利用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(21):158-160.
- [5] Zhang Q, Yu L, Lu W, et al. Optimal irrigation regime improving yield and quality of alfalfa in year of sowing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32:116-122.
- [6] 徐大伟. 11 个秋眠级苜蓿(*Medicago sativa*)标准对照品种生长适应性研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
- [7] 肖向华. 氮、磷、钾配比施肥对紫花苜蓿产量、品质及根瘤菌数量的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
- [8] 于雪薇. 不同钾肥对烟草生长及生理特性的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
- [9] 舒钰. 磷肥对草地早熟禾和黑麦草抗旱性的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2008.
- [10] 姜丽娜,李春喜,代西梅,等. 不同氮肥处理对小麦生育后期旗叶生理活性的影响[J]. 沈阳农业大学学报,1999(6):609-612.
- [11] 秦立金,邱艳玲,王瑞,等. 不同氮肥处理对辣椒生长与叶绿素含量的影响[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2015,31(13):12-13.
- [12] 李志丹,韩瑞宏,廖桂兰,等. 植物叶片中叶绿素提取方法的比较研究[J]. 广东第二师范学院学报,2011,31(3):80-83.
- [13] 高俊凤. 植物生理学试验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [14] 职明星,李秀菊. 脯氨酸测定方法的改进[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2005,33(4):10-12.
- [15] 童长春,刘晓静,蔺芳,等. 基于平衡施肥的紫花苜蓿光合特性及光合因子的产量效应研究[J]. 草业学报,2020,29(8):70-80.
- [16] 武悦萱,张辉,王苗苗,等. 氮磷配施对小麦生长、叶片叶绿素含量及叶绿素荧光特性的影响[J]. 江西农业学报,2020,32(2):9-15.
- [17] 张文,陈功,付薇. 施肥水平对草坪叶绿素含量及反射光谱的影响[J]. 农技服务,2015,32(9):188-189.
- [18] 师尚礼. 苜蓿根瘤菌固氮研究进展及浅评[J]. 中国草地,2005,27(5):63-68.
- [19] 宋秀丽,王冰雪,陆杰,等. 磷肥施用量对大豆生长状况的影响[J]. 黑龙江农业科学,2015(9):44-47.
- [20] 展晓莹,任意,张淑香,等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. 中国农业科学,2015,48(23):4728-4737.
- [21] 杜明,李彦生,张秋英,等. 钾肥对菜用大豆生殖生长期叶片叶绿素含量的影响[J]. 大豆科学,2012,31(6):941-946.
- [22] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. Trends in Plant Science,2002,7(9):405-410.
- [23] Jaleel C A, Gopi R, Sankar B, et al. Studies on germination, seedling vigour, lipid peroxidation and proline metabolism in *Catharanthus roseus* seedlings under salt stress[J]. South African Journal of Botany,2007,73(2):190-195.
- [24] 马旭俊,朱大海. 植物超氧化物歧化酶(SOD)的研究进展[J]. 遗传,2003,25(2):225-231.
- [25] Willekens H, Chamnongpol S, Davey M, et al. Catalase is a sink for H₂O₂ and is indispensable for stress defence in C₃ plants[J]. The EMBO Journal,1997,16(16):4806-4816.
- [26] 王文娟,赵丽丽,王普昶,等. 氮素水平对宽叶雀稗生理生态的影响[J]. 草业科学,2019,36(3):744-753.
- [27] 赵浩波,任卫波,于秀敏,等. 不同氮素水平对羊草形态及生理指标的影响[J]. 中国草地学报,2020,42(3):15-20.
- [28] 丁雪梅,苑兆和,冯立娟,等. 不同钾素水平对大丽花生理生化特性的影响[C]//中国园艺学会观赏园艺专业委员会,国家花卉工程技术研究中心. 中国观赏园艺研究进展. 广州:2012.
- [29] 石婧,刘东洋,张风华. 不同品种(品系)棉花对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 江苏农业学报,2020,36(4):828-835.
- [30] 姜昭然,杨守军,杜振宇. 滨海盐碱地冬枣对钾肥的响应[J]. 南方农业学报,2014,45(10):1803-1806.