

供磷水平对柳枝稷光合特性与抗逆生理的影响

赵匆^{1,2}, 吴娜¹, 屈小玉¹, 陈娟¹, 刘吉利^{3,4*}

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:【目的】探究盐碱条件下供磷水平对不同品种柳枝稷光合特性与抗逆生理的影响。【方法】采用双因素随机区组试验设计进行盆栽试验, 设置3个柳枝稷品种(Alamo加倍体、Alamo和Pathfinder)和3个供磷水平[不施磷(P0)、低磷10 mg/kg (P10)、高磷100 mg/kg (P100)], 比较不同供磷水平下各品种柳枝稷光合特性、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量的变化规律, 综合评价不同柳枝稷品种抗逆性。【结果】柳枝稷叶片叶绿素a、b含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、脯氨酸含量随供磷水平的增加而增加, 其中Alamo加倍体品种P100处理较P0处理分别增加了57.3%、62.9%、41.4%、29.7%、55.2%、128%; 胞间CO₂浓度、过氧化氢酶活性(CAT)、可溶性糖含量(SS)随供磷水平的增加而降低, 其中Alamo加倍体品种P100处理较P0处理分别降低了51.7%、84.4%、20.9%。高磷处理下Alamo加倍体的净光合速率、超氧化物歧化酶活性(SOD)和脯氨酸含量均最大, 表现出较强的生理活性。【结论】盐碱条件下施磷提高了柳枝稷的光合能力和抗逆性, 以高磷处理下Alamo加倍体的抗逆性最强。

关键词: 供磷水平; 柳枝稷; 光合特性; 抗逆性; 隶属函数

中图分类号: S578 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)01-0013-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2024.01.002



磷是植物必需的大量元素之一, 不仅是植物体核酸、蛋白质、脂质等生物大分子的组成成分, 而且参与植物光合作用、信号转导、能量传递等多种代谢过程, 对植物的生长和发育过程起着至关重要的作用^[1]。磷在土壤中具有表面富集的特点, 导致深层根系无法吸收磷素^[2]。磷在土壤中主要以无机态存在, 碱性的盐渍土环境条件下, 大量的磷素更容易被土壤固定转化形成难以利用的磷形态^[3]。郭丰辉等^[4]研究表明, 缺磷会明显降低苜蓿的生物量, 改变个体形态。齐敏兴等^[5]通过对不同磷水平下紫花苜蓿的生长特性研究发

现, 植株的叶绿素含量、生物量会随着磷水平的增大而呈现出先增大后减小的趋势。施用磷肥可降低土壤pH值, 减轻土壤碱度, 改善作物光合与生理特性, 促进作物生长^[6]。因此, 施用磷肥, 不但可以满足作物对磷素的需要, 而且能起到改良土壤、提高作物抗逆性和增加作物产量的作用^[7]。

柳枝稷(*Panicum virgatum*)是多年生草本C₄植物, 因其适应性广、产量高、木质纤维素含量丰富、易于管理, 被视为理想的生物质能源作物^[8]。柳枝稷在长期进化过程中, 主要形成2种生态型: 高地生态型和低地生态型, 高地型适应寒冷和半干旱的环境, 茎秆较细, 分枝多, 抗病性强, 幼苗活力强, 主要变种有Cave-in-Rock、Pathfinde等; 低地型生长在低洼滩地和温暖地带, 再生早, 成熟晚, 植株高大, 根系深扎, 干物质产量高, 主要变种有Alamo^[9]、Kanlow^[10]。与传统作物相比, 柳枝稷具有耐旱、耐瘠薄、耐盐碱、高光效、低

收稿日期: 2023-01-22; 修回日期: 2023-02-25

基金项目: 宁夏自然科学基金(2022AAC03062); 国家自然科学基金(31860344)

作者简介: 赵匆(1998-), 女, 贵州六盘水人, 硕士研究生。

E-mail: zhaocong19750913@163.com

*通信作者。E-mail: tim11082003@163.com

呼吸、CO₂补偿低、磷利用效率高等特性,能够适应粘壤土、砂壤土等多种土壤类型,是良好的生态修复和生物改良材料^[9]。李会军等^[10]研究发现,一定范围内增施磷肥能有效改善禾本科牧草的光合特性,当土壤中的磷素不能满足作物需求时,要靠施肥来补充和调节。范希峰等^[11]研究发现,盐碱胁迫下柳枝稷光合作用受到抑制,但依然可以存活,属于典型的耐盐碱作物。王世琪等^[12]研究发现施磷可促进柳枝稷生长,提高柳枝稷对环境的适应性。目前关于柳枝稷的研究大多集中在引种适应性、生物质产量等方面,对施磷调控其光合特性及抗逆性的研究报道较少。因此,本研究以不同柳枝稷品种为材料,探讨不同供磷水平对

柳枝稷叶片光合作用及抗逆生理特性的影响,为土壤改良与柳枝稷高效种植提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试柳枝稷品种 Alamo 加倍体、Alamo 和 Pathfinder 的种子由北京市农林科学院草业与环境发展研究中心提供,种质资源的名称和来源见表 1。供试土壤为宁夏平罗西大滩盐碱地试验站 0~30 cm 耕层盐碱土^[13],其基本理化性质为有机质含量 11.6 g/kg;碱解氮含量为 33.9 mg/kg;速效磷含量 8.9 mg/kg;速效钾含量 214 mg/kg;pH 值(水:土=5:1)为 7.85,全盐含量 1.63 g/kg。

表 1 柳枝稷品种的生态类型、染色体倍性及来源

Table 1 Ecological types, chromosomal ploidy, and sources of switchgrass materials

品种	生态类型	染色体倍性	原产地
Alamo	低地 Lowland	四倍体 Tetraploid	Southern Texas 28° N
Alamo 加倍体	低地 Lowland	八倍体 Octoploid	Alamo 通过秋水仙素人工加倍
Pathfinder	高地 Upland	八倍体 Octoploid	Nebraska / Kansas 40° N

1.2 试验设计

试验于 2019 年 6—10 月在北京农林科学院温室大棚内自然光照下进行,室内气温在 18~27 °C。试验采用双因素随机区组设计,设计 3 个供磷水平,分别为不施磷 0 mg/kg(P0),低磷 10 mg/kg(P10),高磷 100 mg/kg(P100),3 个柳枝稷品种分别为 Alamo 加倍体、Alamo 和 Pathfinder,共 9 个处理,每个处理种植 6 盆(每 2 盆为 1 个重复),以底肥形式一次性施入纯氮 100 mg/kg(尿素供给)、纯钾 100 mg/kg(K₂SO₄供给)和纯磷(KH₂PO₄供给)。

试验采用盆栽种植,花盆长、宽和高分别为 23、17 和 15 cm,每盆装入风干土壤 5 kg。每个花盆内播种已发芽种子 7 粒,出苗后每盆定苗 4 株,柳枝稷生长期,定期称重浇水,使土壤含水量保持在田间持水量的 75% 左右。柳枝稷出苗 60 d 进行光合及抗逆生理指标的测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合作用及叶绿素含量测定 采用便携式光合系统测定仪 LI-6400XT 于上午 9:00~11:00 自然光照条件下选取柳枝稷植株从上往下数第 1 片完全展开叶片进行活体测定,所测叶片完整无损并保持自然取

向,每个处理随机测量 3 株,测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)。

叶绿素含量采用乙醇浸提法进行测定:称叶片 0.05 g,剪碎后置于离心管中;加入 8 mL 95% 的乙醇,避光静置 24 h;于 665 nm、649 nm 下测定其吸光度值,计算叶绿素含量^[14]。

1.3.2 抗氧化酶活性和渗透调节物质含量测定 随机采集不同品种的每个处理 15 片健康成熟功能叶,用于抗逆生理生化指标测定。其中,可溶性糖(SS)含量采用蒽酮法测定^[16];脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮比色法测定^[15];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[17];超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定^[17];过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定^[16]。

1.4 隶属函数法进行抗逆性综合评价

参考栗振义等^[17]和袁照年等^[18]的方法,采用模糊综合评价法,利用各生理指标对供试品种进行隶属函数平均值的计算,对其抗逆性进行评价。该平均值代表柳枝稷的抗逆性,数值越大表示抗逆性越强^[19]。具体隶属函数值计算方法如下:

A:若指标与抗逆性呈正相关关系,则:

$$\mu(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, j=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

B:若指标与抗逆性呈负相关关系,则:

$$\mu(X_j)(\text{反}) = 1 - \mu(X_j); D = \frac{1}{n} [\mu(X_j)], j=1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中: $\mu(X_j)$ 表示第 j 项指标的隶属函数值、 X_j 表示第 j 个指标实际测定值; X_{\max} 表示第 j 个指标实际测定最大值、 X_{\min} 表示第 j 个综合指标实际测定最小值; D 表示隶属函数平均值, n 为指标数。

1.5 数据分析

用Excel 2020进行数据处理,采用SPSS 27($P < 0.05$)进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和Duncan's多重检验($P < 0.05$)检测样本间的差异显著性及相关性,所有图表均用Origin 2019绘制。

2 结果与分析

2.1 柳枝稷叶片叶绿素含量的变化

随着供磷水平的增加,柳枝稷各品种叶片叶绿素a和b含量均显著增加,且P10、P100处理下叶绿素a和b含量均显著大于P0处理,P100处理下叶绿素含量略高于P10处理,但相同品种P100、P10处理间差异不显著。在同一磷水平下,叶绿素a和b含量表现为Alamo加倍体>Alamo>Pathfinder(表2)。

2.2 柳枝稷叶片光合作用的变化

不同品种和供磷水平均显著影响柳枝稷的光合速率,且随着供磷水平的增加,柳枝稷的叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)呈上升趋势,胞间 CO_2 浓度(P_i)呈下降趋势。3个供磷水平下Alamo加倍体的净光合速率均高于Alamo、Pathfinder。在P0、P10、P100处理下,Alamo加倍体净光合速率分别比Pathfinder升高13.3%、6.2%、14.7%(图1-A)。在P0、P10处理下Alamo加倍体、Alamo气孔导度显著大于Pathfinder($P < 0.05$),分别是Pathfinder的1.73倍、1.64倍和1.54倍、1.42倍(图1-B)。柳枝稷叶片蒸腾速率P0、P100处理间差异显著($P < 0.05$),P100处理下Alamo加倍体、Alamo和Pathfinder较P0处理分别增加了55.2%、62.2%、112.2%。在同一磷水平下,3个品种蒸腾速率表现为Alamo加倍体>Alamo>Pathfinder(图1-C)。不同供磷水平对柳枝稷的胞间 CO_2 浓度影响显著($P <$

表2 不同品种柳枝稷在供磷处理下叶片叶绿素含量的变化
Table 2 Changes of chlorophyll content in leaves of different switchgrass cultivars under phosphorus treatment

处理	叶绿素 a/ ($mg \cdot g^{-1}$)	叶绿素 b/ ($mg \cdot g^{-1}$)	
Alamo加倍体	P0	1.356±0.018 ^b	0.431±0.011 ^b
	P10	2.089±0.018 ^a	0.684±0.009 ^a
	P100	2.134±0.004 ^a	0.702±0.039 ^a
Alamo	P0	1.319±0.072 ^b	0.474±0.039 ^b
	P10	1.497±0.064 ^b	0.560±0.045 ^a
	P100	1.508±0.011 ^b	0.589±0.010 ^a
Pathfinder	P0	0.883±0.036 ^b	0.356±0.024 ^b
	P10	1.347±0.036 ^a	0.518±0.032 ^a
	P100	1.450±0.094 ^a	0.588±0.074 ^a
V	**	**	
F	**	**	
V×F	**	*	

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),V品种,F供磷水平,V×F品种与供磷水平的交互作用;*和**分别表示在0.05和0.01水平上有显著性,下同。

0.05)。与P0相比,P100处理下Alamo加倍体、Alamo、Pathfinder分别降低了51.7%、49.1%和54.6%(图1-D)。

2.3 不同品种柳枝稷在供磷处理下抗氧化酶活性和渗透调节物质的变化

2.3.1 柳枝稷叶片超氧化物歧化酶活性的变化 各品种柳枝稷叶片SOD活性随着供磷水平的增加均表现出先升高后降低的趋势,品种和供磷水平的交互作用对柳枝稷叶片SOD活性的影响不显著。Alamo加倍体、Alamo、Pathfinder品种柳枝稷叶片SOD活性P10较P0处理上升了26.2%、91.8%和59.4%;Alamo加倍体和Pathfinder品种柳枝稷P100较P10处理显著降低了19.6%和49.6%,Alamo品种柳枝稷P100、P10处理间无显著差异(图2)。

2.3.2 柳枝稷叶片过氧化物酶活性的变化 Alamo加倍体和Pathfinder品种柳枝稷的POD活性随供磷水平的增大而减小,其中P0、P100处理间差异显著($P < 0.05$),较P0处理,P100处理下POD活性分别降低了85.5%和30.5%,P10、P100处理间无显著性差异。Alamo品种柳枝稷的POD活性随供磷水平的增加呈上升趋势,P0、P100处理间差异显著($P < 0.05$),较P0

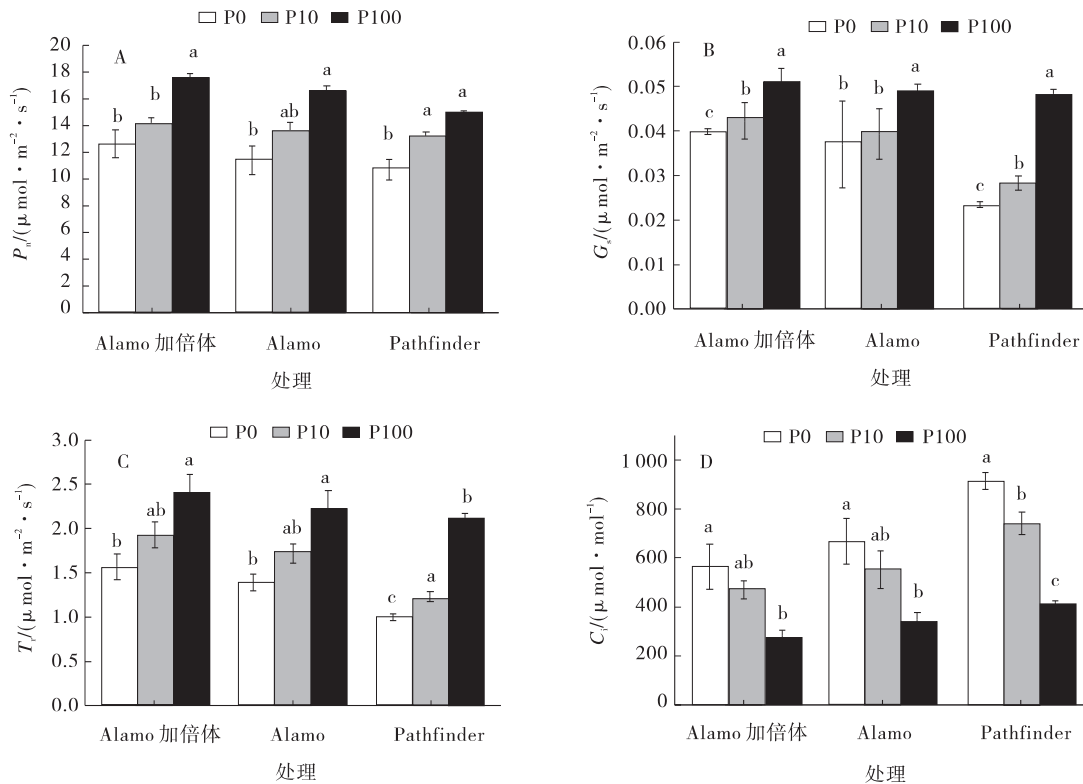


图1 不同品种柳枝稷在供磷处理下光合作用参数的变化

Fig. 1 Changes in photosynthesis parameters of different varieties of switchgrass under phosphorus supply treatment

注:同一品种不同磷水平处理柱上无相同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

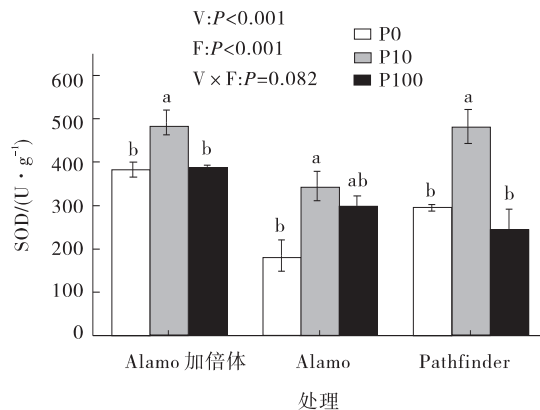


图2 不同品种柳枝稷在供磷处理下SOD活性

Fig. 2 Changes in superoxide dismutase activity of switchgrass under phosphorus donor treatment

处理,P100处理下POD活性上升了47.7%,P10处理与P0、P100处理间差异不显著。相同供磷水平下,Alamo的过氧化物酶含量明显低于Alamo加倍体和Pathfinder(图3)。

2.3.3 柳枝稷叶片过氧化氢酶活性的变化 各品种柳枝稷叶片CAT活性随着供磷水平的增加而逐渐降低。Alamo加倍体、Alamo、Pathfinder品种柳枝稷叶片CAT活性P0、P100处理间均差异显著($P<0.05$),较P0处理,P100处理下Alamo加倍体、Alamo、Path-

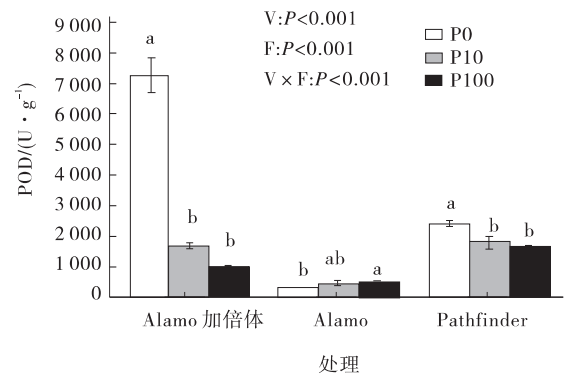


图3 不同品种柳枝稷在供磷处理下POD活性

Fig. 3 Changes in peroxidase activity of switchgrass under phosphorus donor treatment

finder品种柳枝稷叶片CAT活性分别降低了84.4%、25.5%和38.8%。Alamo加倍体、Pathfinder品种柳枝稷叶片CAT活性P10、P100处理间差异显著($P<0.05$),较P10、P100处理下柳枝稷叶片CAT活性分别降低了65.6%、34.8%,Pathfinder品种P0、P10处理间无显著差异。Alamo品种柳枝稷P10与P0、P100处理间差异不显著。3个品种柳枝稷相比,Alamo加倍体和Alamo的CAT活性明显高于Pathfinder,尤其是在P0处理下Alamo加倍体和Alamo比Pathfinder高

了163%和60.2%(图4)。

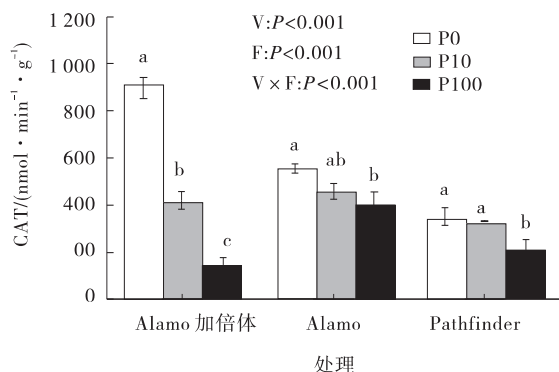


图4 不同品种柳枝稷在供磷处理下CAT活性

Fig. 4 Changes in catalase activity of switchgrass under phosphorus supply treatment

2.3.4 柳枝稷叶片脯氨酸含量的变化 脯氨酸含量均随供磷水平的增加呈上升趋势,其中Alamo加倍体、Alamo和Pathfinder的脯氨酸含量P0、P100处理间差异显著($P < 0.05$),与P0处理相比,P100处理下脯氨酸含量分别升高了4.97倍、1.48倍和0.6倍,Alamo加倍体P0、P10处理间差异显著,P10较P0处理脯氨酸含量增加了129%,Alamo和Pathfinder品种柳枝稷P0、P10处理间无显著差异。相同供磷水平下脯氨酸含量从高到低依次表现为Pathfinder > Alamo > Alamo加倍体(图5)。

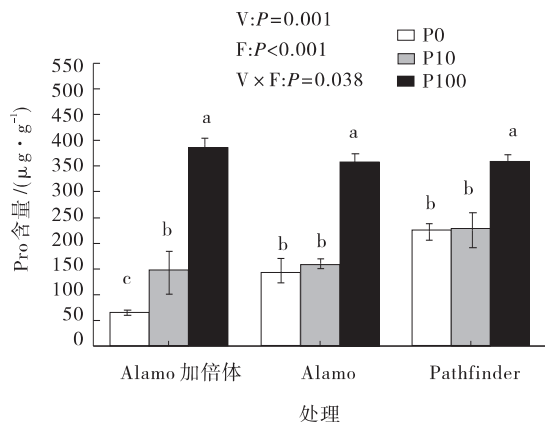


图5 不同品种柳枝稷在供磷处理下Pro含量的变化

Fig. 5 Changes in proline content in different varieties of switchgrass under phosphorus supply treatment

2.3.5 柳枝稷叶片可溶性糖含量的变化 3个品种柳枝稷可溶性糖含量均随供磷水平的增加而降低,其中Alamo加倍体、Alamo和Pathfinder品种柳枝稷的可溶性糖含量P0、P100处理间差异显著($P < 0.05$),与P0处理相比,P100处理下柳枝稷可溶性糖含量分别降低了20.9%、15.9%、26.1%;Alamo加倍体、Path-

finder品种柳枝稷P0、P100处理间差异显著($P < 0.05$),与P0处理相比,P100处理下可溶性糖含量分别降低了11%、21%;Alamo加倍体P10、P100处理间差异显著($P < 0.05$),Alamo、Pathfinder品种柳枝稷P10、P100处理间差异不显著。在P0、P100处理下,可溶性糖含量从高到低依次表现为:Pathfinder > Alamo加倍体 > Alamo,在P10处理下Alamo加倍体 > Pathfinder > Alamo(表6)。

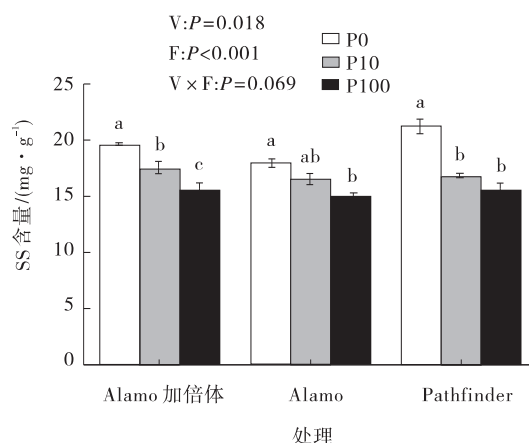


图6 不同品种柳枝稷在供磷处理下SS含量的变化

Fig. 6 Changes in soluble sugar content in different varieties of switchgrass under phosphorus donor treatment

2.4 隶属函数分析

通过隶属函数法,对不同供磷水平下3个品种柳枝稷的11个指标进行评价可知,各品种柳枝稷均在100 mg/kg供磷水平的均值最大,其中Alamo加倍体在10、100 mg/kg供磷水平下均高于Alamo和Pathfinder,在P0处理下低于Alamo,综上可知在施用磷肥条件下品种间综合排名为Alamo加倍体 > Alamo > Pathfinder,在无磷条件下相较Alamo加倍体、Pathfinder,柳枝稷品种Alamo具有更强的适应性(表4)。

3 讨论

3.1 不同供磷水平对柳枝稷光合特性的影响

研究表明,磷肥可直接作用于光合作用的光合磷酸化和碳同化过程,能促进光能的吸收、传递和转化。高文龙等^[20]、单立文等^[21]表明增加土壤磷肥浓度可促进玉米、羊草和苜蓿叶片叶绿素合成,显著提升其光合效率,而植物生长环境中磷元素过饱和时,会降低植物光合作用。本研究结果表明,与不施磷相比,施磷显著提高了盐碱条件下柳枝稷的叶绿素含量及光

表4 不同供磷水平下柳枝稷生理指标与总生物量的隶属函数值

Table 4 Affiliation function values of physiological indicators and total biomass of switchgrass at different P supply levels

指标	Alamo 加倍体			Alamo			Pathfinder		
	P0	P10	P100	P0	P10	P100	P0	P10	P100
Chla	0.38	0.96	1.00	0.35	0.49	0.50	0.00	0.37	0.45
Chlb	0.22	0.95	1.00	0.34	0.59	0.67	0.00	0.47	0.67
Pn	0.24	0.48	1.00	0.10	0.42	0.84	0.00	0.35	0.62
Gs	0.59	0.72	1.00	0.52	0.61	0.94	0.00	0.19	0.88
Ci	0.54	0.69	1.00	0.39	0.57	0.90	0.00	0.27	0.78
Tr	0.40	0.66	1.00	0.28	0.52	0.88	0.00	0.17	0.77
SOD	0.33	0.00	0.32	1.00	0.44	0.61	0.60	0.00	0.80
POD	0.00	0.80	0.90	1.00	0.98	0.98	0.71	0.79	0.81
CAT	0.00	0.65	1.00	0.46	0.59	0.65	0.73	0.76	0.91
PRO	0.00	0.26	1.00	0.25	0.29	0.92	0.50	0.51	0.92
SS	0.28	0.62	0.94	0.54	0.75	1.00	0.00	0.72	0.90
均值(D)	0.27	0.62	0.92	0.47	0.57	0.81	0.23	0.42	0.77
排名	8	4	1	6	5	2	9	7	3

注:Chla 叶绿素 a 含量,Chlb 叶绿素 b 含量, P_n 净光合速率, G_s 气孔导度, C_i 胞间 CO_2 浓度, T_r 蒸腾速率,CAT 过氧化氢酶,SOD 超氧化物歧化酶,POD 过氧化物酶,Pro 脯氨酸,SS 可溶性糖

合速率,随着供磷水平的增加,柳枝稷3个品种的叶绿素含量 P10、P100 处理显著大于 P0 处理,而 P10 和 P100 处理间没有显著差异,表明施磷显著促进了柳枝稷叶绿素的合成,从而提升了柳枝稷的光合能力。尤其是高磷处理下,各柳枝稷品种均保持较高的净光合速率。这与前人得出的研究结果相同^[22-23]。

3.2 不同供磷水平对柳枝稷抗逆生理的影响

植物的抗逆生理是一个综合作用的过程,所处的逆境环境不同,各项抗逆指标的变化也不同^[24-25]。SOD、POD 和 CAT 是植物在长期适应环境中进化出的保护酶,SOD 能催化 O_2^- 发生歧化反应,生产 H_2O_2 和 O_2 ,POD 和 CAT 则具有分解 H_2O_2 的作用,且 POD 酶能够反映植物对外界环境的适应性^[24-26]。王枫等^[27]在低磷玉米幼苗胁迫的研究中表明,低磷处理 SOD 活性增加,高磷会降低 SOD 活性。孙小富等^[28]、卢闯等^[29]研究表明,在低磷环境胁迫条件下,宽叶雀稗通过增强保护酶 POD、CAT 的活性,维持细胞的稳态来适应外界环境带来的压力。本研究中,低磷处理时柳枝稷3个品种均保持较高的 SOD 活性,但施磷降低了 Alamo 加倍体和 Pathfinder 的 POD、CAT 活性。可见,在盐碱条件下低磷处理主要通过提高柳枝稷叶片 SOD 活性以辅助清除了活性氧,从而减轻细胞膜损伤程度^[11]。

植物在胁迫条件下快速积累渗透调节物质,以维持细胞渗透势的平衡,起到保护细胞适应逆境的作用^[30],脯氨酸、可溶性糖是植物体内重要的渗透调节物质^[31-32],同时脯氨酸还是一种抗氧化剂可与抗氧化系统协同作用^[33]。本试验结果显示,随着供磷水平的增加3个品种的脯氨酸含量随着供磷水平的增加逐渐上升,表明在低磷处理或高磷处理下脯氨酸与抗氧化系统协同作用含量会增高以缓解逆境条件对柳枝稷造成的伤害。这与张贺等^[6]、侯立刚等^[34]研究在棉花和水稻等植物对供磷水平的响应结果一致。刘洋等^[35]研究显示高磷处理下玉米的可溶性糖含量下降,且低于低磷处理。本试验研究显示随着供磷水平的增加3个品种的可溶性糖含量逐渐降低,这与其研究结果一致。

3.3 不同供磷水平下柳枝稷抗逆性评价

植物响应逆境胁迫涉及光合作用和多个生理生化过程,需要运用多个指标评价才能准确的反映出其抗逆性^[36]。何永涛等^[37]在披碱草属植物抗逆性评价时把叶绿素含量、脯氨酸含量作为禾本科的抗逆性鉴定指标;麻仲花等^[38]研究表明可溶性糖、脯氨酸、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶也可作为耐逆性评定的指标。因此,本研究综合叶绿素光合指标与保护性酶活性、渗透调节物质含量等抗逆生理指标,利用隶属函

数分析法对柳枝稷的抗逆性进行综合评价,结果表明盐碱条件下适当供磷有利于提高 Alamo 加倍体、Alamo、Pathfinder等柳枝稷品种适应性。

4 结论

盐碱条件下,随供磷水平的增加柳枝稷叶片叶绿素 a、b 含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、脯氨酸含量、总生物量增加;过氧化氢酶活性(CAT)、可溶性糖含量(SS)降低;高磷条件下,Alamo 加倍体具有较高的净光合速率、脯氨酸含量和 SOD 活性,表现出较强的抗逆生理活性。综合分析表明,盐碱条件下施磷能够提高 3 个柳枝稷品种的抗逆性,以 Alamo 加倍体高磷处理下 100 mg/kg 的抗逆性最强。

参考文献:

- [1] PLAXTON W C, TRAN H T. Metabolic adaptations of phosphate-starved plants [J]. *Plant Physiol*, 2011, 156(3):1006-15
- [2] 张文杰,杨亮,张龙骥,等. 低磷土壤条件对不同苜蓿品种的生长和磷效率的影响[J]. *草原与草坪*, 2021, 41(6): 81-87.
- [3] YAN Z J, CHEN S, LI J L, *et al.* Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181:26-35.
- [4] 郭丰辉,丁勇,马文静,等. 紫花苜蓿个体性状对土壤磷素供给能力的响应研究[J]. *草原与草坪*, 2021, 41(1): 18-25.
- [5] 齐敏兴,刘晓静,张晓磊,等. 不同磷水平对接根瘤菌紫花苜蓿生长特性的影响[J]. *草原与草坪*, 2013, 33(1): 50-53.
- [6] 张贺. 施磷对滨海盐碱地不同水埋深下棉花产量影响的机制研究[D]. 南京:南京农业大学,2019.
- [7] 杨兆波,焦艳芳. 盐碱地施用磷肥效果好[J]. *河北农业科技*, 2001(11):21.
- [8] SANDERSON M A, REED R L, MCLAUG S B. Switchgrass as a sustainable bioenergy crop [J]. *Biore-source Technology*, 1996, 56(1):83-93
- [9] 吴海燕. 低地型八倍体柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)的表型分析及生理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2019.
- [10] 李会军,胡雨彤,刘美君,等. 羊草生长和光合生理特性对不同施磷强度的响应[J]. *草业科学*, 2021, 38(10): 2041-2049.
- [11] 范希峰,侯新村,武菊英,等. 我国北方能源草研究进展及发展潜力[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(6): 150-158.
- [12] 王世琪,刘金彪,康继月,等. 水分和磷处理对建植当年柳枝稷根系生长和形态特征的影响[J]. *草业科学*, 2019, 36(8):2096-2104.
- [13] 鲍士旦. 土壤农业化学分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社,2010.
- [14] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2006
- [15] 常福辰,陆长梅,沙莎. 植物生物学实验[M]. 南京:南京师范大学出版社,2007.
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [17] 栗振义,张绮芯,全宗永,等. 不同紫花苜蓿品种对低磷环境的形态与生理响应分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20):3898-3907.
- [18] 袁照年,罗淑平,吴光成. 玉米两个生育时期抗旱性鉴定指标的研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 1995(S2):1-6.
- [19] 舒正悦,王景燕,龚伟,等. 淹水对水肥耦合管理竹叶花椒幼苗渗透性物质含量的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(5):1139-1145.
- [20] 高文龙,张赢心,卢英进,等. 不同磷素用量对玉米生长及生理生化指标的影响[J]. *山东农业科学*, 2022, 54(4):90-94.
- [21] 单立文,张强,朱瑞芬,等. 氮、磷添加下 AMF 对羊草和苜蓿生长与光合生理特性的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(8):46-57.
- [22] 刘伟,樊文华,刘奋武,等. 施磷对镉胁迫下黄瓜苗期光合作用及抗氧化酶系统的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3):596-604.
- [23] 江海慧,汪瑩,陈洁,等. 低磷胁迫对红豆草新品系幼苗生长及生理特性的影响[J]. *草原与草坪*, 2020, 40(6): 95-101.
- [24] SAGI M, FLUHR R. Production of reactive oxygen species by plant NADPH oxidases [J]. *Plant Physiology*, 2006, 141: 336-340.
- [25] 蔡妙珍,林咸永,罗安程,等. 磷对水稻高 Fe~(2+)胁迫的缓解作用[J]. *中国水稻科学*, 2002(3):50-54.
- [26] 杨舒怡,陈晓阳,惠文凯,等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. *福建农林大学学报(自然科学*

- 版), 2016, 45(5): 481—489.
- [27] 王枫, 王玉凤, 许晓莹, 等. 低磷胁迫下玉米幼苗生理响应及相关基因表达研究[J]. 玉米科学, 2021, 29(1): 77—84.
- [28] 孙小富, 黄莉娟, 王普昶, 等. 不同供磷水平对宽叶雀稗形态及生理的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(8): 58—69.
- [29] 卢闯, 逢焕成, 张建丽, 等. 增施磷肥对重度盐碱地食葵生长及土壤微生物区系的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 329—337.
- [30] 龚丝雨, 梁喜欢, 杨帅强, 等. 低磷胁迫对不同磷效率基因型烟草苗期生长及生理特征的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(6): 1217—1224.
- [31] 王保平, 董晓燕, 董宽虎. 盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(6): 1124—1129.
- [32] 刘晓东, 李洋洋, 何淼. PEG模拟干旱胁迫对玉带草生理特性的影响[J]. 草业科学, 2012, 29(5): 687—693.
- [33] RODRIGUEZ, RUSTY, REDMAN, et al. Balancing the generation and elimination of reactive oxygen species [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 2005, 102(9): 3175—3176.
- [34] 侯立刚, 陈温福, 马巍, 等. 低温胁迫下不同磷营养对水稻叶片质膜透性及抗氧化酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(1): 118—123.
- [35] 刘洋. 不同磷肥施用量对玉米主要生理特性及产量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
- [36] SUDHIR P, MURTHY S D S. Effects of salt stress on basic processes of photosynthesis [J]. Photosynthetica, 2004, 42(4): 481—486.
- [37] 何永涛, 胡宇, 段慧荣, 等. 我国披碱草属植物抗逆性评价指标研究进展[J]. 中国草地学报, 2022, 44(8): 96—108.
- [38] 麻仲花, 吴娜, 陈娟, 等. 盐胁迫与供磷水平对柳枝稷苗期生理特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(6): 1205—1216.

Effects of phosphorus supply level on photosynthetic characteristics and stress resistance physiology of switchgrass

ZHAO Cong^{1,2}, WU Na¹, QU Xiao-yu¹, CHEN Juan¹, LIU Ji-li^{3,4*}

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. National Key Laboratory of Northwest Land Degeneration and Ecological Restoration of Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education of Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. School of Ecology and Environment of Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] The aim of the study is to explore the effect of phosphorus supply level on photosynthetic characteristics and stress-resistant physiology of different varieties of switchgrass under saline-alkali conditions. [Method] A pot experiment was conducted using a two-factor randomized block design. Three switchgrass varieties (Alamo syndiploid, Alamo and Pathfinder) and three phosphorus supply levels (no phosphorus 0 mg/kg (P0), low phosphorus 10 mg/kg (P10), high phosphorus 100 mg/kg (P100)) were set. The changes of photosynthetic characteristics, antioxidant enzyme activity and osmoregulatory substance content of switchgrass varieties under different phosphorus supply levels were analyzed and compared, and their stress resistance was comprehensively evaluated. [Result] The results showed that leaf chlorophyll a and b contents, net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and proline content of switchgrass increased with the increase of phosphorus supply level. And the values for Alamo syndiploid P100 treatment increased by 57.3%, 62.9%, 41.4%, 29.7%, 55.2% and 128% respectively compared with P0 treatment. Intercellular carbon dioxide content (C_i), catalase activity (CAT) and

soluble sugar content (SS) decreased with the increase of phosphorus supply level, compared with P0 treatment, the treatment of P100 of Alamo syndiploid variety decreased by 51.7%, 84.4% and 20.9%. The net photosynthetic rate, SOD activity and proline content of Alamo syndiploid were the highest under high phosphorus treatment. 【Conclusion】 Comprehensive analysis showed that phosphorus application under saline—alkali condition improved photosynthetic capacity and stress resistance of switchgrass, and Alamo syndiploid body under high phosphorus treatment had the strongest stress resistance.

Key words: phosphorus supply level; switchgrass (*Panicum virgatum* L); photosynthesis; stress resistance; mMembership function

(责任编辑 靳奇峰)