



不同钙浓度对宽叶雀稗幼苗的生长和抗性生理的影响

赵鑫¹ 王文娟¹ 王普昶^{2,3} 黄莉娟¹ 赵丽丽^{1,2*}

¹贵州大学动物科学学院草业科学系, 贵阳 550025; ²山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 贵阳 550025; ³贵州省草业研究所, 贵阳 550006

摘要 研究不同钙浓度对宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*)幼苗生长和生理的影响, 对于揭示宽叶雀稗对不同钙浓度环境的适应机理至关重要。该研究采用盆栽砂培试验, 研究不同钙浓度(0、5、25、50、100和200 mmol·L⁻¹ CaCl₂)和不同处理时间(7、14、21和28天)对宽叶雀稗幼苗生长、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性、叶绿素含量和光合参数的影响。结果表明, 随着CaCl₂浓度的增加和处理时间的延长, 宽叶雀稗幼苗株高等形态指标、生物量、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性、叶绿素含量和光合参数呈先增后减的趋势, 低钙浓度(5–50 mmol·L⁻¹)环境下, 株高、叶长、叶宽、根长和生物量与对照(0 mmol·L⁻¹)相比均升高, 脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量、过氧化物酶、过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性提高, 丙二醛含量和胞间CO₂浓度降低、叶绿素含量增加以及净光合速率、蒸腾速率和气孔导度增强; 高钙浓度(200 mmol·L⁻¹)环境下, 脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量、过氧化物酶、过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性降低, 丙二醛含量和胞间CO₂浓度增加, 叶绿素含量减少以及净光合速率、蒸腾速率和气孔导度减弱。结合隶属函数分析, 低钙盐浓度(5–50 mmol·L⁻¹)处理对宽叶雀稗幼苗无抑制作用, 说明宽叶雀稗对低钙浓度具有一定的耐受性; 而在高钙浓度(200 mmol·L⁻¹)下, 宽叶雀稗幼苗通过提高自身有机渗透调节物质含量、增强酶活性、增加叶绿素含量以及增强光合作用等方式来快速调节植物生理代谢功能, 进而适应高钙浓度环境条件。

关键词 宽叶雀稗; 钙浓度; 生长; 生理

赵鑫, 王文娟, 王普昶, 黄莉娟, 赵丽丽 (2019). 不同钙浓度对宽叶雀稗幼苗的生长和抗性生理的影响. 植物生态学报, 43, 909–920. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0235

Effects of different calcium concentrations on growth and physiology of *Paspalum wettsteinii* seedlings

ZHAO Xin¹, WANG Wen-Juan¹, WANG Pu-Chang^{2,3}, HUANG Li-Juan¹, and ZHAO Li-Li^{1,2*}

¹Department of Grassland Science, College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China; ²Key Laboratory of Mountain Plant Resources Protection and Germplasm Innovation Ministry of Education, Guiyang 550025, China; and ³Guizhou Institute of Prataculture, Guiyang 550006, China

Abstract

Aims The study about the effects of different calcium concentrations on the growth and physiology of *Paspalum wettsteinii* seedlings is very important to reveal the adaptive mechanism of *Paspalum wettsteinii* to the environment with different calcium concentrations.

Methods Potted sand culture was used to study the effects of different calcium concentrations (0, 5, 25, 50, 100 and 200 mmol·L⁻¹ CaCl₂) and different treatment times (7, 14, 21 and 28 d) on the growth, osmotic regulator content, antioxidant enzyme activity, chlorophyll content and photosynthetic parameters of *Paspalum wettsteinii* seedlings.

Important findings Results showed that, with the increase of the CaCl₂ concentration and the extension of treatment time, the morphological indexes, biomass, osmotic regulators content, antioxidant enzyme activity, chlorophyll content and photosynthetic parameters of *Paspalum wettsteinii* seedlings displayed a similar trend of first increasing and then decreasing. Under the low calcium concentrations (5–50 mmol·L⁻¹), plant height, leaf length, leaf width, root length and biomass all increased. The contents of proline, soluble protein, soluble sugar

收稿日期Received: 2019-09-05 接受日期Accepted: 2019-10-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502607-04)和贵州省科技计划项目(黔科合重大专项字[2016]3002号)。Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFC0502607-04), and the Science and Technology Program of Guizhou Province (Qian Kehe Special Project [2016]3002)。

* 通信作者Corresponding author (zhaolili_0508@163.com)

and the activities of peroxidase, catalase, superoxide dismutase, chlorophyll content, net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance increased as well, but, malondialdehyde content and intercellular CO₂ concentration decreased. Under the high calcium concentrations (200 mmol·L⁻¹), the contents of proline, soluble protein, soluble sugar and the activities of peroxidase, catalase and superoxide dismutase decreased. Malondialdehyde content and intercellular CO₂ concentration increased as well, but chlorophyll content, net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance decreased. Combined with the membership function analysis, the treatment of low calcium concentrations (5–50 mmol·L⁻¹) had no inhibitory effect on the seedlings of *Paspalum wettsteinii*, indicating that *Paspalum wettsteinii* had certain tolerance to low calcium salt stress. Under the treatment of high calcium concentration (200 mmol·L⁻¹), *Paspalum wettsteinii* seedlings could rapidly regulate the physiological and metabolic functions of plants by increasing the content of organic osmotic regulating substances, enhancing enzyme activity, chlorophyll content and photosynthesis, so as to adapt to high calcium concentration environment.

Key words *Paspalum wettsteinii*; calcium concentrations; growth; physiological

Zhao X, Wang WJ, Wang PC, Huang LJ, Zhao LL (2019). Effects of different calcium concentrations on growth and physiology of *Paspalum wettsteinii* seedlings. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 909–920. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0235

位于我国西南的贵州高原是世界上面积最大、分布最集中的喀斯特地区的中心,也是喀斯特发育最典型的一个地区(Zeng *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019)。其分布广泛的碳酸盐岩层出露面积达 1.3×10^5 km²,占贵州全省总面积的73% (宁茂岐和赵佳, 2013)。贵州属于亚热带湿润季风气候,碳酸盐岩层受到侵蚀较为严重,导致土壤钙盐化(蒋忠诚等, 2014),其中碳酸盐岩范围占土壤钙盐化范围的1%–3%,是同纬度硅酸盐地区的2–3倍(李小方, 2006)。由于侵蚀严重,导致土壤中氮、磷、钾等养分大量流失(王世杰和李阳兵, 2007),严重威胁喀斯特地区植物的生长,因此选择种植耐高钙盐的植物对喀斯特地区草地畜牧业的发展和生态环境的改善具有重要意义。钙是植物生长发育所必需的元素(Liang *et al.*, 2009),可以通过维持细胞膜通透性、离子运输、信号转导等方式直接参与植物抵抗盐胁迫(Ferit & Füsün, 2016)、重金属(Gabara *et al.*, 1995)和干旱(Li *et al.*, 2017)等非生物逆境,但不同植物对钙的敏感性不同,缺钙、低钙或钙浓度过高都会影响植物生长,适宜钙浓度才能促进植物生长,有利于提高作物产量。

宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*)是多年生禾本科牧草,具有适口性好、营养价值高、抗逆性强、适应性广和水土保持能力强等优良特性,是石漠化治理的先锋植物,在贵州具有较高的饲用价值和石漠化治理价值(赖志强, 1989; 沈林洪等, 2001; 龙金梅和李显刚, 2016)。目前针对宽叶雀稗逆境适应性的研究主要集中在氮(王文娟等, 2019)、干旱(屈兴红等, 2017)、酸和重金属(陈顺钰等, 2018; 赵雅曼等, 2019)

胁迫等方面,而关于不同钙浓度处理的研究鲜有报道。因此,本试验选取宽叶雀稗为研究对象,采用砂培法,经不同钙浓度处理,从生长指标、生理指标和光合参数3个角度,揭示宽叶雀稗对不同钙浓度环境的适应机理,为宽叶雀稗在西南地区的推广种植提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验在贵州大学草业科学系实验温室进行,供试宽叶雀稗种子由贵州省草业研究所提供。

1.2 不同钙浓度处理

选取籽粒饱满、均一的宽叶雀稗种子,用2% NaClO溶液浸泡30 min,用蒸馏水冲洗数次后在60 °C蒸馏水中浸泡6 h。将种子放在有双层滤纸的培养皿中,在25 °C的恒温培养箱中进行萌发和幼苗培养。待宽叶雀稗幼苗长出2–3片真叶时,移至装有粒径为1–2 mm的石英砂的塑料桶中进行培养(塑料桶直径20.5 cm、高20.3 cm)。待幼苗生长到5–6片真叶时进行间苗(保留盆内生长较健壮且生长状况大致相同的3株幼苗)并开始胁迫处理,以改良霍格兰营养液为基础,设0 (CK)、5、25、50、100、200 mmol·L⁻¹ 6个CaCl₂浓度,采用随机区组试验设计,每个处理3次重复。

1.3 指标测定及方法

处理后第28天每重复取3株幼苗,测定生长指标。用直尺和游标卡尺测量幼苗株高、叶长、叶宽、根长。从根茎处将植株剪断分为地上部分和地下部分,称鲜质量,将其烘干后称干质量。

在处理第7、14、21、28天利用YZQ-100E多叶室动态光合仪(翼鬃麒, 北京)测定植株第2片完全展开叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s)等光合指标, 并将同部位叶片剪碎混匀进行生理指标的测定。其中利用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白(SP)含量、蒽酮比色法测定可溶性糖(SS)含量、酸性茚三酮比色法测定脯氨酸(Pro)含量、愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性、氮蓝四唑光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性(李合生, 2000)、硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量(赵世杰等, 2002)、紫外分光光度法测定叶绿素含量(王晶英等, 2003)。

1.4 数据分析

数据用SPSS 25软件进行方差分析和多重比较, 用Microsoft Excel 2010和Origin 2018作图, 并对所测生长指标和处理28天后的生理指标进行相关性分析。

采用模糊隶属函数值法对6种 $CaCl_2$ 浓度进行综合评价:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

式中: U 为不同 $CaCl_2$ 浓度下的每个指标的隶属函数值, X_j 表示第 j 个因子的得分值, X_{\min} 表示第 j 个因子得分的最小值, X_{\max} 表示第 j 个因子得分的最大值。将不同 $CaCl_2$ 浓度下的每个指标的隶属函数值相加后

求平均值, 即为隶属度。

2 结果和分析

2.1 不同 $CaCl_2$ 浓度对宽叶雀稗幼苗生长的影响

由图1可知, $CaCl_2$ 处理28天后, 宽叶雀稗幼苗株高、叶长、叶宽和根长均随 $CaCl_2$ 浓度的提高而先增后减。5和25 $mmol \cdot L^{-1}$ $CaCl_2$ 处理下, 宽叶雀稗幼苗株高、叶长、叶宽和根长与CK相比均显著升高($p < 0.05$), 分别是CK的1.13、1.10、1.34、1.15倍和1.21、1.15、1.14、1.03倍; 200 $mmol \cdot L^{-1}$ $CaCl_2$ 处理下, 宽叶雀稗幼苗株高、叶长、叶宽和根长与CK相比均显著降低($p < 0.05$), 分别是CK的0.75、0.82、0.72、0.83倍。

2.2 不同 $CaCl_2$ 浓度对宽叶雀稗生物量的影响

由图2可知, 宽叶雀稗地上部分和地下部分的鲜质量、干质量均随钙浓度升高而先增后减。宽叶雀稗地上部分和地下部分的鲜质量、干质量在5和25 $mmol \cdot L^{-1}$ $CaCl_2$ 处理下与CK均差异显著($p < 0.05$), 其中地上部分鲜质量是CK的1.05、1.22倍, 地下部分鲜质量是CK的1.28、1.38倍, 地上部分干质量是CK的1.12、1.19倍, 地下部分干质量是CK的1.35、1.25倍; 200 $mmol \cdot L^{-1}$ $CaCl_2$ 处理下, 宽叶雀稗地上部分和地下部分的鲜质量、干质量与CK相比均显著降低($p < 0.05$), 宽叶雀稗地上部分和地下部分的鲜质量均是CK的0.71倍, 宽叶雀稗地上部分和地下部

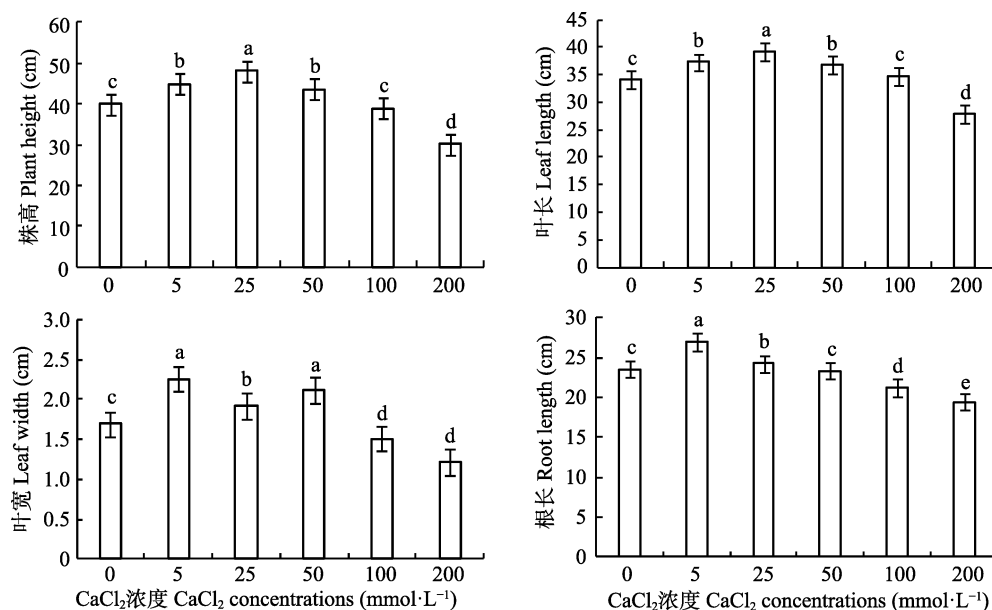


图1 不同 $CaCl_2$ 浓度对宽叶雀稗幼苗生长指标的影响(平均值±标准误差)。同一指标不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。
Fig. 1 Effects of different $CaCl_2$ concentrations on the growth indices of *Paspalum wettsteinii* seedlings (mean ± SE). Different lowercase letters indicate significant difference among different $CaCl_2$ concentrations ($p < 0.05$).

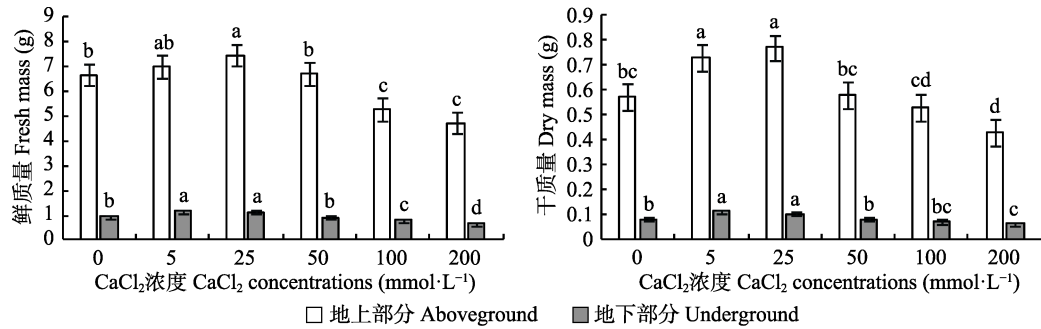


图2 不同CaCl₂浓度对宽叶雀稗幼苗生物量的影响(平均值±标准误差)。同一指标不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。
Fig. 2 Effects of different CaCl₂ concentrations on the biomass of *Paspalum wettsteinii* seedlings (mean ± SE). Different lowercase letters indicate significant difference among different CaCl₂ concentrations ($p < 0.05$).

表1 不同CaCl₂浓度对宽叶雀稗幼苗脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响(平均值±标准误差)
Table 1 Effects of different CaCl₂ concentrations on proline content, soluble protein and soluble sugar content of *Paspalum wettsteinii* seedlings (mean ± SE)

渗透调节物质 Osmoregulation substance	CaCl ₂ 浓度 CaCl ₂ concentrations (mmol·L ⁻¹)	时间处理 Time treatment (d)			
		7	14	21	28
脯氨酸 Proline (μg·g ⁻¹)	0	16.13 ± 0.84 ^{Cc}	27.24 ± 0.97 ^{Ac}	23.87 ± 0.70 ^{Bc}	10.08 ± 1.43 ^{Dc}
	5	23.44 ± 1.17 ^{Ca}	30.91 ± 0.87 ^{Ab}	27.64 ± 0.63 ^{Bb}	13.25 ± 0.61 ^{Db}
	25	25.04 ± 1.41 ^{Ca}	32.82 ± 0.68 ^{Aa}	30.91 ± 0.52 ^{Ba}	16.97 ± 0.65 ^{Da}
	50	20.51 ± 0.95 ^{Cb}	24.46 ± 0.67 ^{Ad}	22.68 ± 0.62 ^{Bc}	12.94 ± 0.74 ^{Db}
	100	14.23 ± 0.57 ^{Cd}	22.98 ± 0.62 ^{Ae}	19.08 ± 0.38 ^{Bd}	8.85 ± 0.62 ^{Dd}
	200	9.65 ± 0.32 ^{Bc}	14.66 ± 1.17 ^{Af}	15.15 ± 0.32 ^{Ae}	7.25 ± 0.68 ^{Bd}
可溶性蛋白 Soluble protein (mg·g ⁻¹)	0	10.22 ± 0.70 ^{Bd}	14.09 ± 0.41 ^{Ac}	10.73 ± 0.43 ^{Bc}	6.25 ± 0.36 ^{Cb}
	5	11.23 ± 0.50 ^{Bc}	15.47 ± 0.31 ^{Ab}	13.16 ± 0.73 ^{Ca}	7.48 ± 0.23 ^{Db}
	25	12.50 ± 0.27 ^{Bb}	17.38 ± 0.54 ^{Aa}	14.11 ± 0.77 ^{Ba}	8.99 ± 0.44 ^{Ca}
	50	13.67 ± 0.12 ^{Ba}	18.03 ± 0.43 ^{Aa}	11.84 ± 0.34 ^{Cb}	6.13 ± 0.45 ^{Db}
	100	11.56 ± 0.49 ^{Bc}	16.25 ± 0.64 ^{Ab}	10.17 ± 0.57 ^{Cc}	4.93 ± 0.25 ^{Dc}
	200	8.05 ± 0.54 ^{Cc}	13.54 ± 0.35 ^{Ac}	8.96 ± 0.07 ^{Bd}	3.75 ± 0.11 ^{Dd}
可溶性糖 Soluble sugar (mg·g ⁻¹)	0	17.04 ± 1.22 ^{Cd}	27.07 ± 1.42 ^{Ad}	22.54 ± 0.61 ^{Bc}	12.26 ± 1.64 ^{Db}
	5	18.60 ± 0.64 ^{Cc}	30.27 ± 0.70 ^{Ab}	23.68 ± 0.85 ^{Bb}	12.36 ± 0.80 ^{Db}
	25	21.25 ± 1.21 ^{Cb}	32.00 ± 1.47 ^{Aa}	25.40 ± 1.50 ^{Ba}	14.36 ± 0.95 ^{Da}
	50	22.23 ± 0.51 ^{Ba}	29.05 ± 1.36 ^{Ac}	20.81 ± 1.10 ^{Cd}	13.62 ± 0.49 ^{Da}
	100	15.82 ± 0.97 ^{Cc}	27.23 ± 1.29 ^{Ad}	19.09 ± 1.06 ^{Bc}	10.45 ± 0.43 ^{Dc}
	200	13.92 ± 0.87 ^{Cf}	26.53 ± 0.80 ^{Ad}	19.62 ± 0.44 ^{Bc}	10.50 ± 1.08 ^{Dc}

不同大写字母表示同一浓度不同时间处理间差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示同一时间处理不同浓度间差异显著($p < 0.05$)。
Different uppercase letters indicate significant difference between treatments at different times of the same concentration ($p < 0.05$); different lowercase letters indicate significant difference between different concentrations at the same time ($p < 0.05$).

分的干质量均是CK的0.75倍。

2.3 不同CaCl₂浓度对宽叶雀稗幼苗渗透调节物质的影响

由表1可知, 宽叶雀稗叶片脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量随CaCl₂浓度的提高而先增后减。其中Pro含量均在25 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下达到最大值, 分别是CK的1.55、1.20、1.30和1.68倍; 且与CK相比, 100和200 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下, Pro含量受到显著抑制($p < 0.05$)。SP含量在处理7天和14天均

在50 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度达到最大值, 分别是CK的1.22和1.23倍, 而处理21天和28天在25 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度达到最大值, 分别是CK的1.32和1.44倍 ($p < 0.05$); CaCl₂浓度为50 mmol·L⁻¹时, SS含量在处理7天后达到最大值, 是CK的1.30倍, CaCl₂浓度为25 mmol·L⁻¹时, SS含量在处理14、21和28天后达到最大值, 分别是CK的1.18、1.13和1.17倍, 且最大值均显著高于CK ($p < 0.05$); 在CaCl₂浓度为200 mmol·L⁻¹时, SP和SS含量显著降低($p < 0.05$)。同时,

在各钙盐浓度处理下, Pro、SP和SS含量均随处理时间的延长先增后减, 并均在处理14天达最大值且显著高于处理7、21和28天的Pro、SP和SS含量($p < 0.05$)。

2.4 不同CaCl₂浓度对宽叶雀稗幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

不同钙浓度处理7、14、21和28天后, POD、CAT和SOD活性随CaCl₂浓度的增加呈先升后降趋势, MDA含量随CaCl₂浓度的增加呈先降后升趋势(表2)。与CK相比, 5和25 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下, 不同钙浓度处理14、21和28天对POD、CAT和SOD活性均有显著促进作用($p < 0.05$); 而在100和200 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下, 不同钙浓度处理14、21和28天对POD、CAT和SOD活性均有显著抑制作用($p < 0.05$)。且POD、CAT和SOD活性均在25 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下达到最大值(除处理7天的POD活性),

所有最大值均显著高于CK组($p < 0.05$)。与CK相比, 不同钙浓度处理14、21和28天后, 25 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度对MDA含量有显著抑制作用, 200 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度对MDA含量有显著促进作用, 结果与抗氧化酶活性相反。

50–200 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度下POD活性随时间变化呈递减趋势, 在处理的第7天达到最大值, 显著($p < 0.05$)高于处理14、21和28天的POD活性(除处理14天50和100 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度下POD活性)。0–25 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度下的POD活性和0–200 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度下的CAT、SOD活性均呈先增后减趋势, 且均在处理14天时活性显著高于其他处理时间段($p < 0.05$)。而MDA含量随时间的延长逐渐增加, 处理28天的MDA含量显著高于处理7、14、21天的($p < 0.05$)。

表2 不同CaCl₂浓度对宽叶雀稗幼苗过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量的影响(平均值±标准误差)
Table 2 Effects of different CaCl₂ concentrations on peroxidase, catalase, superoxide dismutase activity and malondialdehyde content of *Paspalum wettsteinii* seedlings (mean ± SE)

抗氧化酶和丙二醛 Antioxidative enzyme and malondialdehyde	CaCl ₂ 浓度 CaCl ₂ concentrations (mmol·L ⁻¹)	时间处理 Time treatment (d)			
		7	14	21	28
POD (U·g ⁻¹)	0	1 034.32 ± 65.54 ^{Bb}	1 135.20 ± 29.29 ^{Ac}	827.85 ± 37.30 ^{Cc}	667.22 ± 38.99 ^{Db}
	5	1 043.20 ± 37.77 ^{Bb}	1 240.38 ± 60.69 ^{Ab}	967.84 ± 21.11 ^{Bb}	825.57 ± 59.04 ^{Ca}
	25	1 173.26 ± 21.35 ^{Bb}	1 381.73 ± 35.64 ^{Aa}	1 111.83 ± 29.74 ^{Ba}	883.05 ± 54.03 ^{Ca}
	50	1 185.94 ± 52.78 ^{Aa}	1 158.08 ± 61.95 ^{Abc}	802.64 ± 26.22 ^{Bc}	639.95 ± 17.27 ^{Cb}
	100	1 048.06 ± 55.63 ^{Ab}	998.21 ± 27.68 ^{Ad}	661.87 ± 52.83 ^{Bd}	458.34 ± 31.80 ^{Cc}
	200	890.13 ± 24.29 ^{Ac}	726.07 ± 56.01 ^{Be}	446.48 ± 63.14 ^{Ce}	398.46 ± 13.29 ^{Cc}
CAT (U·g ⁻¹)	0	49.58 ± 5.27 ^{Ccd}	91.00 ± 4.84 ^{Ac}	66.25 ± 2.84 ^{Bc}	40.33 ± 2.02 ^{De}
	5	58.18 ± 3.69 ^{Cb}	96.86 ± 3.75 ^{Abc}	75.56 ± 3.61 ^{Bb}	44.21 ± 0.98 ^{Db}
	25	66.18 ± 5.21 ^{Ca}	106.90 ± 3.97 ^{Aa}	81.33 ± 2.30 ^{Ba}	50.22 ± 0.99 ^{Da}
	50	53.87 ± 2.95 ^{Cbc}	102.75 ± 4.81 ^{Ab}	71.13 ± 2.85 ^{Bb}	37.60 ± 1.24 ^{Dd}
	100	44.38 ± 4.29 ^{Cd}	78.95 ± 2.41 ^{Ad}	52.96 ± 1.65 ^{Bd}	32.82 ± 1.39 ^{De}
	200	42.96 ± 3.79 ^{Cd}	63.27 ± 2.40 ^{Ae}	49.20 ± 2.66 ^{Bd}	30.58 ± 2.24 ^{De}
SOD (U·g ⁻¹)	0	449.72 ± 15.86 ^{Cc}	761.24 ± 19.78 ^{Ac}	511.24 ± 1.00 ^{Bd}	362.00 ± 4.92 ^{De}
	5	531.29 ± 17.48 ^{Cc}	783.43 ± 7.93 ^{Ab}	566.58 ± 10.39 ^{Bb}	391.70 ± 1.45 ^{Db}
	25	598.90 ± 5.61 ^{Ca}	878.34 ± 3.26 ^{Aa}	626.77 ± 20.00 ^{Ba}	416.30 ± 2.84 ^{Da}
	50	566.31 ± 1.98 ^{Bb}	797.08 ± 3.70 ^{Ab}	545.40 ± 5.00 ^{Cc}	387.04 ± 5.43 ^{Db}
	100	516.22 ± 1.12 ^{Bc}	660.98 ± 10.88 ^{Ad}	431.00 ± 10.00 ^{Cc}	333.14 ± 3.22 ^{Dd}
	200	468.37 ± 2.77 ^{Bd}	629.66 ± 13.24 ^{Ae}	404.64 ± 4.00 ^{Cf}	219.90 ± 9.99 ^{De}
MDA (μmol·g ⁻¹)	0	5.29 ± 0.37 ^{Dbc}	8.83 ± 0.29 ^{Cab}	9.49 ± 0.23 ^{Bbc}	12.68 ± 0.20 ^{Abc}
	5	5.19 ± 0.17 ^{De}	8.00 ± 0.62 ^{Cbc}	9.04 ± 0.33 ^{Bcd}	11.77 ± 0.16 ^{Ac}
	25	5.04 ± 0.41 ^{Dc}	7.50 ± 0.75 ^{Cc}	8.47 ± 0.14 ^{Bd}	11.29 ± 0.44 ^{Ad}
	50	5.81 ± 0.53 ^{Dbc}	8.59 ± 0.30 ^{Cab}	10.40 ± 0.56 ^{Bb}	13.66 ± 0.35 ^{Ab}
	100	6.00 ± 0.41 ^{Dab}	8.94 ± 0.63 ^{Cab}	11.12 ± 0.75 ^{Ba}	15.22 ± 0.46 ^{Aa}
	200	6.60 ± 0.45 ^{Da}	9.64 ± 0.61 ^{Ca}	11.58 ± 0.27 ^{Ba}	15.53 ± 0.34 ^{Aa}

不同大写字母表示同一浓度不同时间处理间差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示同一时间处理不同浓度间差异显著($p < 0.05$)。
Different uppercase letters indicate significant difference among treatments at different times of the same concentration ($p < 0.05$); different lowercase letters indicate significant difference among different concentrations at the same time ($p < 0.05$).

2.5 不同CaCl₂浓度对宽叶雀稗幼苗叶绿素含量的影响

由表3可知, 不同钙浓度处理7、14、21和28天后的叶绿素a (Chl a)、叶绿素b (Chl b)和总叶绿素 (Chl a+b)含量随CaCl₂浓度的增加呈先增后降趋势。与CK相比, 5–100 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度对Chl a、Chl b和Chl a+b含量无抑制作用, Chl a含量在25 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下达最大值, Chl b和Chl a+b含量在5 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下达最大值, 三者最大值与CK均无显著性差异。

随处理时间的延长, 各钙浓度下的Chl a含量逐渐降低(除0和5 mmol·L⁻¹ CaCl₂), Chl b和Chl a+b含量先增后减。其中Chl a含量在处理14和28天时于5和50 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下差异显著($p < 0.05$), Chl b含量在处理7和14、21天时于200 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下差异显著($p < 0.05$), Chl a+b含量在处理7和14天时于100–200 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度范围内差异显著($p < 0.05$)。

2.6 不同CaCl₂浓度对宽叶雀稗幼苗光合参数的影响

由图3可知, C_i 随CaCl₂浓度升高呈先降低后升

高趋势, 不同钙浓度处理7、14、21和28天后 C_i 在25 mmol·L⁻¹ CaCl₂胁迫下均最低, 但处理7天与CK无显著性差异, 处理14、21、24天与CK差异显著($p < 0.05$), 200 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理时 C_i 均最高, 除胁迫28天外均与CK差异显著($p < 0.05$); P_n 、 T_r 和 G_s 随CaCl₂浓度升高呈先升高后降低趋势, 在25 mmol·L⁻¹ CaCl₂胁迫时(除处理14天的 T_r) P_n 、 T_r 和 G_s 均达到最大值, 且除处理14和21天的 T_r , 均显著高于CK ($p < 0.05$)。

随处理时间的变化, 0–50 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度的 P_n 和 G_s 先增后降, 处理14天达最大值且与处理21、28天差异显著($p < 0.05$), 100–200 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度的 P_n 和 G_s 呈降低趋势, 均在处理28天降至最小($p < 0.05$)。 T_r 随时间变化逐渐降低, 且处理7天的 T_r 显著高于处理21、28天的 T_r ($p < 0.05$), C_i 随处理时间变化先减后增, 处理14天的 C_i 显著低于处理7和28天的 C_i ($p < 0.05$)。

2.7 耐盐性综合评价

2.7.1 耐盐性指标间的相关性分析

相关分析结果表明(表4), 宽叶雀稗幼苗生长指标(株高、叶长、叶宽、根长、地上部分鲜质量、地

表3 不同CaCl₂浓度对宽叶雀稗幼苗叶绿素含量的影响(平均值±标准误差)

Table 3 Effects of different CaCl₂ concentrations on the chlorophyll content of *Paspalum wettsteinii* seedlings (mean ± SE)

叶绿素 Chlorophyll (chl) (mg·g ⁻¹)	CaCl ₂ 浓度 CaCl ₂ concentrations (mmol·L ⁻¹)	时间处理 Time treatment (d)			
		7	14	21	28
Chl a (mg·g ⁻¹)	0	3.81 ± 0.34 ^{Aa}	4.41 ± 0.19 ^{Ab}	3.65 ± 0.32 ^{Aa}	2.43 ± 0.06 ^{Abc}
	5	4.38 ± 0.34 ^{ABa}	4.57 ± 0.20 ^{Ab}	3.75 ± 0.13 ^{ABa}	2.74 ± 0.31 ^{Bab}
	25	5.23 ± 0.15 ^{Aa}	5.00 ± 0.19 ^{Aa}	4.34 ± 0.11 ^{Aa}	3.20 ± 0.19 ^{Aa}
	50	4.08 ± 0.16 ^{Aa}	4.03 ± 0.13 ^{Ab}	2.89 ± 0.12 ^{ABab}	2.47 ± 0.13 ^{Bab}
	100	3.46 ± 0.13 ^{Aa}	3.33 ± 0.11 ^{Ab}	2.48 ± 0.08 ^{Ab}	2.20 ± 0.07 ^{Abc}
	200	2.26 ± 0.04 ^{Aa}	2.06 ± 0.14 ^{Ab}	1.94 ± 0.24 ^{Ab}	1.72 ± 0.11 ^{Ac}
Chl b (mg·g ⁻¹)	0	1.06 ± 0.08 ^{Ab}	1.24 ± 0.03 ^{Aa}	1.41 ± 0.06 ^{Ab}	1.26 ± 0.04 ^{Aa}
	5	1.33 ± 0.05 ^{Aa}	1.71 ± 0.09 ^{Aa}	2.05 ± 0.07 ^{Aa}	1.67 ± 0.02 ^{Aa}
	25	1.19 ± 0.06 ^{Aa}	1.57 ± 0.03 ^{Aa}	1.75 ± 0.03 ^{Ab}	1.59 ± 0.02 ^{Aa}
	50	1.12 ± 0.10 ^{Aab}	1.31 ± 0.06 ^{Aa}	1.74 ± 0.02 ^{Ab}	1.45 ± 0.06 ^{Aa}
	100	0.87 ± 0.06 ^{Aab}	1.20 ± 0.06 ^{Aa}	1.38 ± 0.09 ^{Ab}	1.23 ± 0.12 ^{Aa}
	200	0.65 ± 0.04 ^{Bb}	1.13 ± 0.09 ^{Aa}	1.20 ± 0.06 ^{Ab}	0.84 ± 0.13 ^{ABa}
Chl a+b (mg·g ⁻¹)	0	4.74 ± 0.47 ^{Aabc}	5.92 ± 0.15 ^{Ab}	6.48 ± 0.24 ^{Ab}	5.00 ± 0.30 ^{Ab}
	5	5.95 ± 0.09 ^{Aa}	7.09 ± 0.08 ^{Aa}	7.85 ± 0.31 ^{Aa}	6.51 ± 0.17 ^{Aa}
	25	5.44 ± 0.17 ^{Aab}	6.23 ± 0.37 ^{Ab}	7.23 ± 0.17 ^{Ab}	5.77 ± 0.32 ^{Ab}
	50	4.65 ± 0.17 ^{Aabc}	5.55 ± 0.35 ^{Ab}	6.19 ± 0.59 ^{Ab}	5.04 ± 0.33 ^{Ab}
	100	3.69 ± 0.38 ^{Bbc}	5.05 ± 0.46 ^{Abc}	5.37 ± 0.18 ^{Ab}	4.74 ± 0.15 ^{Ab}
	200	3.08 ± 0.65 ^{Bc}	3.78 ± 0.77 ^{ABc}	4.24 ± 0.18 ^{Ab}	3.15 ± 0.15 ^{Bc}

不同大写字母表示同一浓度不同时间处理间差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示同一时间处理不同浓度间差异显著($p < 0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant difference among treatments at different times of the same concentration ($p < 0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference among different concentrations at the same time ($p < 0.05$).

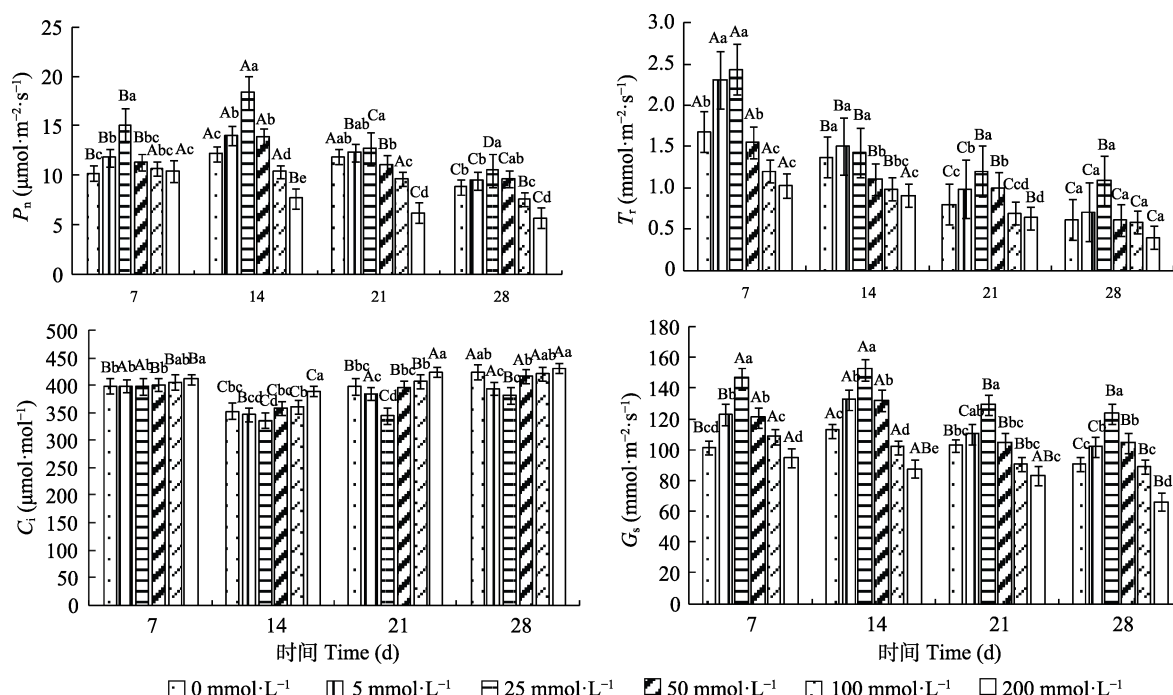


图3 不同 CaCl_2 浓度对宽叶雀稗幼苗光合参数的影响(平均值 \pm 标准误差)。 C_i , 胞间 CO_2 浓度; G_s , 气孔导度; P_n , 净光合速率; T_r , 蒸腾速率。不同大写字母表示同一浓度不同时间处理间差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示同一时间处理不同浓度间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 3 Effects of different CaCl_2 concentrations on photosynthetic parameters of *Paspalum wettsteinii* seedlings (mean \pm SE). C_i , intercellular CO_2 concentration; G_s , stomatal conductance; P_n , net photosynthetic rate; T_r , transpiration rate. Different uppercase letters indicate significant difference between treatments at different times of the same concentration ($p < 0.05$); different lowercase letters indicate significant difference between different concentrations at the same time ($p < 0.05$).

下部分鲜质量、地上部分干质量、地下部分干质量)与生理生化指标(渗透调节物质含量、抗氧化酶活性、叶绿素和光合参数)相互间存在显著($p < 0.05$)和极显著($p < 0.01$)相关,说明这些生长指标和生理生化指标可以评价宽叶雀稗的耐盐性。

2.7.2 隶属函数分析及综合评价

不同钙浓度处理对宽叶雀稗生长的影响不能用单独的指标来全面判断,可将宽叶雀稗各项指标综合起来即通过综合隶属函数值来判断其影响,从表5可以看出,不同钙浓度处理下宽叶雀稗幼苗各生长和生理指标的综合评价值大小为 $25 > 5 > 50 > 100 > 0 > 200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,其中5、25、50和 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 浓度处理综合评价值均高于CK,分别提高了2.39%、3.19%、1.40%、1.00%,可见4种 CaCl_2 浓度(5、25、50和 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)对宽叶雀稗的生长有一定促进作用。200 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 浓度处理综合评价值与对照相比降低3.19%,可见高钙浓度处理对宽叶雀稗有较强的毒害作用,抑制了宽叶雀稗的生长。

3 讨论

植物对盐胁迫最普遍的反应是植物生长受到抑制(Jose *et al.*, 2017),但在盐胁迫逆境下,植物会通过降低株高、叶长、叶宽和根长等形态特征来适应逆境条件,并通过分配生物量来维持植株在逆境下的存活和生长;同时,植物在面对逆境时因消耗过多的能量(如合成渗透调节物质、增强光合作用等)而导致生长所需的能量减少(Grotkopp *et al.*, 2002; 张会慧等, 2012)。本研究表明,在5–200 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 浓度范围内, CaCl_2 溶液对宽叶雀稗幼苗的株高、叶长、叶宽、根长和生物量表现出低浓度促进、高浓度抑制的规律,且5和25 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液对宽叶雀稗形态表现出显著的促进作用,最高浓度的 CaCl_2 溶液(200 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)对株高等形态特征的抑制作用达显著水平。研究发现,低盐胁迫促进藜麦(*Chenopodium quinoa*)根系生长及生物量累积,高盐胁迫使藜麦幼苗生长及生物量受到抑制(杨发荣等, 2017)。菘蓝(*Isatis indigotica*)幼苗在低浓度盐环

表4 宽叶雀稗幼苗形态和生理指标的相关性分析
Table 4 Correlation coefficients between growth and physiological indices of *Paspalum wettestinii* seedlings

	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃	T ₁₄	T ₁₅	T ₁₆	T ₁₇	T ₁₈	T ₁₉	T ₂₀	T ₂₁
T ₁																					
T ₂	0.981**																				
T ₃	0.801**	0.755**																			
T ₄	0.801**	0.760**	0.794**																		
T ₅	0.864**	0.828**	0.699**	0.844**																	
T ₆	0.869**	0.828**	0.708**	0.804**	0.811**																
T ₇	0.808**	0.779**	0.694**	0.866**	0.839**	0.803**															
T ₈	0.741**	0.670**	0.747**	0.811**	0.710**	0.749**	0.779**														
T ₉	-0.800**	-0.731**	-0.650**	-0.858**	-0.911**	-0.821**	-0.847**	-0.716**													
T ₁₀	0.862**	0.807**	0.647**	0.693**	0.868**	0.855**	0.799**	0.675**	-0.807**												
T ₁₁	0.883**	0.845**	0.562**	0.659**	0.856**	0.850**	0.799**	0.568**	-0.840**	0.903**											
T ₁₂	0.811**	0.741**	0.679**	0.611**	0.821**	0.699**	0.708**	0.572**	-0.743**	0.883**	0.837**										
T ₁₃	0.878**	0.808**	0.767**	0.899**	0.916**	0.905**	0.862**	0.822**	-0.926**	0.866**	0.840**	0.785**									
T ₁₄	0.852**	0.783**	0.623**	0.778**	0.863**	0.909**	0.829**	0.681**	-0.938**	0.876**	0.944**	0.794**	0.927**								
T ₁₅	0.977**	0.968**	0.775**	0.808**	0.883**	0.824**	0.796**	0.707**	-0.789**	0.798**	0.849**	0.780**	0.851**	0.811**							
T ₁₆	0.636**	0.631**	0.410	0.655**	0.787**	0.648**	0.627**	0.403	-0.823**	0.599**	0.727**	0.480**	0.697**	0.754**	0.644**						
T ₁₇	0.446	0.431	0.325	0.385	0.400	0.570*	0.373	0.303	-0.464	0.409	0.460	0.364	0.412	0.537*	0.479*	0.311					
T ₁₈	0.837**	0.798**	0.710**	0.661**	0.695**	0.769**	0.727**	0.685**	-0.714**	0.693**	0.793**	0.677**	0.710**	0.764**	0.811**	0.510*	0.350				
T ₁₉	0.957**	0.910**	0.744**	0.779**	0.879**	0.790**	0.774**	0.722**	-0.816**	0.856**	0.853**	0.866**	0.871**	0.828**	0.954**	0.593**	0.419	0.783**			
T ₂₀	0.505*	0.453	0.386	0.278	0.333	0.515*	0.161	0.190	-0.496*	0.409	0.494*	0.343	0.435	0.556*	0.443	0.526*	0.382	0.460	0.456		
T ₂₁	-0.816**	-0.762**	-0.671**	-0.692**	-0.731**	-0.895**	-0.775**	-0.813**	0.770**	-0.874**	-0.792**	-0.681**	-0.845**	-0.838**	-0.714**	-0.542*	-0.322	-0.774**	-0.744**	-0.482*	
T ₂₂	0.955**	0.953**	0.680**	0.692**	0.863**	0.843**	0.761**	0.621**	-0.787**	0.884**	0.928**	0.839**	0.814**	0.857**	0.921**	0.706**	0.456	0.807**	0.904**	0.503*	-0.797**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 。T₁ 株高; T₂ 叶长; T₃ 叶宽; T₄ 根长; T₅ 地上部分鲜质量; T₆ 地下部分鲜质量; T₇ 地上部分干质量; T₈ 地下部分干质量; T₉ 丙二醛含量; T₁₀ 脯氨酸含量; T₁₁ 可溶性蛋白含量; T₁₂ 可溶性糖含量; T₁₃ 超氧化物歧化酶活性; T₁₄ 过氧化物歧化酶活性; T₁₅ 超氧化物歧化酶活性; T₁₆ 超氧化物歧化酶活性; T₁₇ 超氧化物歧化酶活性; T₁₈ 超氧化物歧化酶活性; T₁₉ 超氧化物歧化酶活性; T₂₀ 超氧化物歧化酶活性; T₂₁ 超氧化物歧化酶活性; T₂₂ 超氧化物歧化酶活性。
* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 。T₁ 株高; T₂ 叶长; T₃ 叶宽; T₄ 根长; T₅ 地上部分鲜质量; T₆ 地下部分鲜质量; T₇ 地上部分干质量; T₈ 地下部分干质量; T₉ 丙二醛含量; T₁₀ 脯氨酸含量; T₁₁ 可溶性蛋白含量; T₁₂ 可溶性糖含量; T₁₃ 超氧化物歧化酶活性; T₁₄ 过氧化物歧化酶活性; T₁₅ 超氧化物歧化酶活性; T₁₆ 超氧化物歧化酶活性; T₁₇ 超氧化物歧化酶活性; T₁₈ 超氧化物歧化酶活性; T₁₉ 超氧化物歧化酶活性; T₂₀ 超氧化物歧化酶活性; T₂₁ 超氧化物歧化酶活性; T₂₂ 超氧化物歧化酶活性。
T₁₈ total chlorophyll content; T₁₉ net photosynthetic rate; T₂₀ transpiration rate; T₂₁ intercellular CO₂ concentration; T₂₂ stomatal conductance.

表5 不同CaCl₂浓度下宽叶雀稗幼苗形态和生理指标的隶属函数值
Table 5 Sobordinate function among all growth and physiological indices of *Paspalum wettsteinii* seedlings under different CaCl₂ concentrations

	隶属函数值 Sobordinate function					
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
I ₁	0.459	0.513	0.333	0.536	0.636	0.553
I ₂	0.400	0.478	0.635	0.519	0.523	0.404
I ₃	0.456	0.370	0.656	0.593	0.667	0.467
I ₄	0.412	0.563	0.664	0.617	0.606	0.619
I ₅	0.556	0.667	0.600	0.444	0.583	0.407
I ₆	0.667	0.556	0.500	0.500	0.556	0.500
I ₇	0.500	0.444	0.556	0.500	0.333	0.556
I ₈	0.667	0.500	0.417	0.583	0.500	0.583
I ₉	0.333	0.333	0.400	0.504	0.502	0.403
I ₁₀	0.600	0.646	0.378	0.476	0.400	0.611
I ₁₁	0.467	0.548	0.417	0.567	0.556	0.667
I ₁₂	0.522	0.422	0.500	0.398	0.664	0.447
I ₁₃	0.475	0.351	0.470	0.595	0.662	0.339
I ₁₄	0.519	0.655	0.485	0.529	0.364	0.560
I ₁₅	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
I ₁₆	0.526	0.468	0.634	0.459	0.445	0.364
I ₁₇	0.391	0.597	0.362	0.500	0.372	0.364
I ₁₈	0.491	0.500	0.625	0.436	0.481	0.347
I ₁₉	0.587	0.499	0.557	0.370	0.411	0.593
I ₂₀	0.583	0.657	0.567	0.556	0.333	0.600
I ₂₁	0.437	0.541	0.636	0.513	0.557	0.360
I ₂₂	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.457
综合评价值 Comprehansive evaluation	0.502	0.514	0.518	0.509	0.507	0.486

L₁, 0 mmol·L⁻¹ CaCl₂; L₂, 5 mmol·L⁻¹ CaCl₂; L₃, 25 mmol·L⁻¹ CaCl₂; L₄, 50 mmol·L⁻¹ CaCl₂; L₅, 100 mmol·L⁻¹ CaCl₂; L₆, 200 mmol·L⁻¹ CaCl₂.

境下能维持其正常生长, 浓度过高时菰蓝幼苗生长明显受到抑制(米永伟等, 2018)。宽叶雀稗幼苗在盐胁迫下生长变化与藜麦和菰蓝基本一致。可见, 低浓度CaCl₂溶液可以促进宽叶雀稗幼苗的生长, 而高浓度CaCl₂溶液使宽叶雀稗幼苗生长受到严重抑制。

在盐胁迫环境下, 植物细胞通过调节自身有机渗透调节物质含量从而降低细胞内渗透势进而实现自我保护, 增强抗盐能力(Xu *et al.*, 2017)。脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖是主要的有机渗透调节物质, 其中脯氨酸通过细胞质内渗透调节来帮助植物减缓胁迫环境伤害(柏新盛, 2019), 可溶性蛋白的含量说明植物体的代谢状况(Doganlar *et al.*, 2010), 可溶性糖可维持细胞膜稳定和保持植株自身活力(贾鹏燕

等, 2017)。大量研究表明, 盐胁迫使植物体内有机渗透调节物质含量明显升高(孙聪聪等, 2017; Guo *et al.*, 2018)。本试验中, 在5–50 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度下, 不同处理时间段大部分宽叶雀稗幼苗的脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量随CaCl₂浓度升高显著升高, 而在100–200 mmol·L⁻¹ CaCl₂溶液中, 大部分幼苗脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量显著低于CK。这与周莹等(2019)的研究结果类似。因此, 在低钙浓度处理下, 可能是因为宽叶雀稗幼苗通过刺激体内脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖的积累而增强自身抗盐能力, 从而适应外界环境; 然而当钙浓度过高时超过了宽叶雀稗自身的耐受极限, 导致脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖的合成受阻, 使植物细胞受损。

当植物处于逆境胁迫时, 植物体内自由基的产生和清除的平衡被打破, 细胞膜受到损害, 膜脂过氧化加剧, 产生大量MDA (Farhangi-Abriz & Torabian, 2017; Yang & Guo, 2018), 细胞液中有有机渗透物质流出(成广雷等, 2015), 质膜稳定性下降。本试验结果表明, 各时间段中, 随着CaCl₂浓度增加, MDA含量先降低后升高, 在低钙浓度(5–50 mmol·L⁻¹)处理下, 宽叶雀稗幼苗叶片MDA含量低于CK, 说明低钙浓度处理对宽叶雀稗伤害较小, 植物自身防御体系保护细胞不受伤害, 这与对海滨雀稗(*Seashore paspalum*)的研究结果(贾新平等, 2015)一致。高钙浓度(100–200 mmol·L⁻¹)处理下, MDA含量高于CK, 在200 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下达到峰值, 说明钙浓度过高加剧了膜脂过氧化, 细胞膜遭到损害。而植物在逆境条件下, 通过由SOD、CAT和POD组成的抗氧化酶系统来清除积累的O₂⁻, 从而避免细胞膜受到伤害(Mittler *et al.*, 2004), 使植物体内自由基保持较低水平状态。本试验中, 不同处理时间段下, 随CaCl₂浓度升高, 宽叶雀稗SOD、CAT和POD活性均先上升后下降, 在5–50 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度下SOD、CAT和POD活性不同程度的增加, MDA含量降低, 植物耐盐性增强。与Bor等(2003)和谢元贵等(2017)的研究结果一致。说明宽叶雀稗在低CaCl₂浓度处理下的适应性更强, 加速对逆境条件下累积的O₂⁻清除, 降低其对细胞原生质膜的损害。然而100–200 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度下3种酶活性不同程度降低, 说明超出宽叶雀稗的耐盐能力, 体内活性氧过多对保护酶造成损害, 导致保护酶活性降低, 引

发活性氧伤害。

光合作用为植物提供生长发育所需的能量与物质,然而高盐浓度会严重抑制植物的光合作用(Killi & Haworth, 2017)。有研究认为,植物在高盐浓度下关闭气孔,CO₂同化量降低,叶片吸收过剩光破坏光合结构,使植物光合作用下降(张守仁, 1999)。本试验在100–200 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度范围内,随钙浓度的升高,宽叶雀稗叶片除C_i升高外, P_n、T_r和G_s均下降。这与罗达等(2019)的研究结果一致,研究表明,在盐胁迫下,随着盐浓度的升高, P_n、T_r和G_s均不同程度地下降, C_i则升高。叶绿素是光合作用的物质基础(Li *et al.*, 2003),在盐胁迫下,处理时间和处理浓度都会影响叶绿素含量。有研究表明,盐浓度升高会降解叶片中的叶绿素,从而使叶绿素含量减少(Sneha *et al.*, 2014)。也有研究表明,盐浓度升高会使植物叶片中叶绿素增加或先增后减(Pushpam & Rangasamy, 2000; Celik & Atak, 2012)。在本试验中,在100–200 mmol·L⁻¹ CaCl₂浓度范围内,随盐浓度的升高,叶绿素含量下降,与王标等(2009)的研究结果一致。且与P_n、T_r和G_s变化趋势相同,说明在高钙浓度处理下,叶绿素含量高低与光合作用呈正相关关系。

4 结论

高钙浓度能引起宽叶雀稗幼苗株高等形态指标降低、生物量累积减少以及丙二醛含量增加,抑制了宽叶雀稗幼苗的生长。为了缓解伤害,宽叶雀稗幼苗通过提高自身有机渗透调节物质含量、增强酶活性、增加叶绿素含量以及增强光合作用等方式来快速调节植物生理代谢功能,进而适应盐胁迫环境条件。CaCl₂浓度在5–50 mmol·L⁻¹范围时,对宽叶雀稗幼苗无抑制作用,反而能不同程度地促进其幼苗生长,说明宽叶雀稗对低钙浓度处理具有一定的耐受性。

致谢 感谢山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室开放课题(MOELP-201701)资助。

参考文献

Bai XS (2019). Adaptive responses of soybean leaves to osmotic retraction under drought and salt stress. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, (10), 5–6. [柏新盛 (2019). 旱盐胁迫下大豆叶片渗透调节的适应性响应。

现代农业科技, (10), 5–6.]

- Bor M, Özdemir F, Türkan I (2003). The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. *Plant Science*, 164, 77–84.
- Celik Ö, Atak C (2012). The effect of salt stress on antioxidative enzymes and proline content of two Turkish tobacco varieties. *Turkish Journal of Biology*, 36, 339–356.
- Chen SY, Zhao YM, Li ZX, Han H, Hou XL, Cai LP (2018). Effects of Pb, Cd and acid stress on seed germination, seedling growth and antioxidant enzyme activities of *Paspalum wettsteinii*. *Acta Agrestia Sinica*, 26, 1173–1180. [陈顺钰, 赵雅曼, 李宗勋, 韩航, 侯晓龙, 蔡丽平 (2018). Pb、Cd和酸胁迫对宽叶雀稗种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶活性的影响. *草地学报*, 26, 1173–1180.]
- Cheng GL, Zhang HJ, Zhao JR, Liu CG, Wang YD, Wang XG, Wang RH, Chen CY, Xu TJ (2015). Vigor and physiological changes of different genotypes of maize seed (*Zea mays* L.) under critical stress storage conditions. *Scientia Agricultura Sinica*, 48, 33–42. [成广雷, 张海娇, 赵久然, 刘春阁, 王元东, 王晓光, 王荣焕, 陈传永, 徐田军 (2015). 临界胁迫贮藏条件下不同基因型玉米种子活力及生理变化. *中国农业科学*, 48, 33–42.]
- Doganlar ZB, Demir K, Basak H, Gul IH (2010). Effects of salt stress on pigment and total soluble protein contents of three different tomato cultivars. *African Journal of Agricultural Research*, 15, 2056–2065.
- Farhangi-Abriz S, Torabian S (2017). Antioxidant enzyme and osmotic adjustment changes in bean seedlings as affected by biochar under salt stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 137, 64–70.
- Ferit Sönmez, Füsün Gülser (2016). Effects of humic acid and CaNO₃² on nutrient contents in pepper (*Apsicum annuum*) seedling under salt stress. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 66, 1–6.
- Gabara B, Krajewska M, Stecka E (1995). Calcium effect on number, dimension and activity of nucleoli in cortex cells of pea (*Pisum sativum* L.) roots after treatment with heavy metals. *Plant Science*, 111, 153–161.
- Grotkopp E, Rejmánek M, Rost TL (2002). Toward a causal explanation of plant invasiveness: Seedling growth and life-history strategies of 29 pine (*Pinus*) species. *The American Naturalist*, 159, 396–419.
- Guo YY, Yu HY, Yang MM, Kong DS, Zhang YJ (2018). Effect of drought stress on lipid peroxidation, osmotic adjustment and antioxidant enzyme activity of leaves and roots of *Lycium ruthenicum* Murr. seedling. *Russian Journal of Plant Physiology*, 65, 244–250.
- Jia PY, Tian FP, Liu YF, Liu Y, Wu GL, Hu Y, Lu Y (2017). Response of leaf physiological indexes to short-term salinity stress for seedlings of *Sonchus oleraceus* L. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 37, 1303–1311. [贾鹏

- 燕, 田福平, 刘一帆, 刘玉, 武高林, 胡宇, 路远 (2017). 短期盐胁迫对苦苣菜幼苗叶片抗逆生理指标的影响. 西北植物学报, 37, 1303–1311.]
- Jia XP, Deng YM, Sun XB, Liang LJ (2015). Impacts of salt stress on the growth and physiological characteristics of *Paspalum vaginatum*. *Acta Prataculturae Sinica*, 24, 204–212. [贾新平, 邓衍明, 孙晓波, 梁丽建 (2015). 盐胁迫对海滨雀稗生长和生理特性的影响. 草业学报, 24, 204–212.]
- Jiang ZC, Luo WQ, Deng Y, Cao JH, Qin XM, Li YQ, Yang QY (2014). The leakage of water and soil in the karst peak cluster depression and its prevention and treatment. *Acta Geoscientica Sinica*, 35, 535–542. [蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 曹建华, 覃星铭, 李衍青, 杨奇勇 (2014). 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究. 地球学报, 35, 535–542.]
- Jose AM, Maria O, Agustina BV, Pedro DV, Maria SB, Jose H (2017). Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7, 18. DOI: 10.3390/agronomy7010018.
- Killi D, Haworth M (2017). Diffusive and metabolic constraints to photosynthesis in quinoa during drought and salt stress. *Plants*, 6, 49. DOI: 10.3390/plants6040049.
- Lai ZQ (1989). Studies on tropical and subtropical fine grass *Paspalum wettsteini*. *Grassland of China*, 11, 60–63. [赖志强 (1989). 热带亚热带优良牧草宽叶雀稗的研究. 中国草地, 11, 60–63.]
- Li HS (2000). *Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments*. Higher Education Press, Beijing. [李合生 (2000). 植物生理生化实验原理和技术. 高等教育出版社, 北京.]
- Li XF (2006). *Speciation of Calcium in Soil and Plants' Leaves in Karst Ecosystem and Its Ecological Significance*. Master degree dissertation, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi. [李小方 (2006). 岩溶环境中土壤-植物系统钙元素形态分析及其生态意义. 硕士学位论文, 广西师范大学, 广西桂林.]
- Li XG, Meng QW, Jiang GQ, Zou Q (2003). The susceptibility of cucumber and sweet pepper to chilling under low irradiance is related to energy dissipation and water-water cycle. *Photosynthetica*, 41, 259–265.
- Li Z, Tan XF, Lu K, Liu ZM, Wu LL (2017). The effect of CaCl_2 on calcium content, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence of tung tree seedlings under drought conditions. *Photosynthetica*, 55, 553–560.
- Li ZW, Xu XL, Zhu JX, Xu CH, Wang KL (2019). Effects of lithology and geomorphology on sediment yield in karst mountainous catchments. *Geomorphology*, 343, 119–128.
- Liang WJ, Wang ML, Ai XZ (2009). The role of calcium in regulating photosynthesis and related physiological indexes of cucumber seedlings under low light intensity and suboptimal temperature stress. *Scientia Horticulturae*, 123, 34–38.
- Long JM, Li XG (2016). Effects of different sowing date on the growth and agronomic traits of *Paspalum auriculatum*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 44, 124–126. [龙金梅, 李显刚 (2016). 不同播种期对宽叶雀稗生长发育和农艺性状的影响. 安徽农业科学, 44, 124–126.]
- Luo D, Shi YJ, Song FH, Li JC (2019). Effects of salt stress on growth, photosynthetic and fluorescence characteristics, and root architecture of *Corylus heterophylla* × *C. avellana* seedlings. *Journal of Applied Ecology*, 30, 3376–3384. [罗达, 史彦江, 宋锋惠, 李嘉诚 (2019). 盐胁迫对平欧杂种榛幼苗生长、光合荧光特性及根系构型的影响. 应用生态学报, 30, 3376–3384.]
- Mi YW, Wang GX, Gong CW, Cai ZP, Wu WG (2018). Effects of salt stress on growth and physiology of *Isatis indigotica* seedlings. *Acta Prataculturae Sinica*, 27, 43–51. [米永伟, 王国祥, 龚成文, 蔡子平, 武伟国 (2018). 盐胁迫对菘蓝幼苗生长和抗性生理的影响. 草业学报, 27, 43–51.]
- Mittler R, Vanderauwera S, Gollery M, van Breusegem F (2004). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, 9, 490–498.
- Ning MQ, Zhao J (2013). The dynamic evolution of rocky desertification in Guizhou during 2005–2010. *Guizhou Agricultural Science*, (9), 75–78. [宁茂岐, 赵佳 (2013). “十一五”期间贵州省石漠化的变化情况. 贵州农业科学, (9), 75–78.]
- Pushpam R, Rangasamy SRS (2000). Variations in chlorophyll contents of rice in relation to salinity. *Crop Research*, 20, 197–200.
- Qu XH, Zhao LL, Wang PC, Chen C, Tang HJ, Zeng HX (2017). Drought resistance of six *Paspalum wettsteinii* materials during germination period. *Seed*, 36, 24–27. [屈兴红, 赵丽丽, 王普昶, 陈超, 唐华江, 曾洪学 (2017). 6个宽叶雀稗材料种子萌发期抗旱性研究. 种子, 36, 24–27.]
- Shen LH, Chen JP, Huang YH (2001). Research on characters of *Paspalum wettsteinii*. *Fujian Science & Technology of Tropical Crops*, (2), 1–8. [沈林洪, 陈晶萍, 黄炎和 (2001). 宽叶雀稗的性状研究. 福建热作科技, (2), 1–8.]
- Sneha S, Rishi A, Chandra S (2014). Effect of short term salt stress on chlorophyll content, protein and activities of catalase and ascorbate peroxidase enzymes in pearl millet. *American Journal of Plant Physiology*, 9, 32–37.
- Sun CC, Zhao HY, Zheng CX (2017). Effects of NaCl stress on osmolyte and proline metabolism in *Ginkgo biloba* seedling. *Plant Physiology Journal*, 53, 470–476. [孙聪聪, 赵海燕, 郑彩霞 (2017). NaCl胁迫对银杏幼树渗透调节物质及脯氨酸代谢的影响. 植物生理学报, 53, 470–476.]
- Wang B, Yu MK, Sun HJ, Cheng XR, Shan QH, Fang YM (2009). Photosynthetic characters of *Quercus acutissima* from different provenances under effects of salt stress. *Journal of Applied Ecology*, 20, 1817–1824. [王标, 虞木奎, 孙海菁, 成向荣, 单奇华, 方炎明 (2009). 盐胁迫对不同种源麻栎叶片光合特征的影响. 应用生态学报,

- 20, 1817–1824.]
- Wang JY, Ao H, Zhang J (2003). *Experimental Techniques and Principles of Plant Physiology and Biochemistry*. Northeast Forestry University Press, Harbin. 135–136. [王晶英, 敖红, 张杰 (2003). 植物生理生化实验技术与原理. 东北林业大学出版社, 哈尔滨. 135–136.]
- Wang SJ, Li YB (2007). Problems and development trends about researches on karst rocky desertification. *Advances in Earth Science*, 22, 573–582. [王世杰, 李阳兵 (2007). 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 22, 573–582.]
- Wang WJ, Zhao LL, Wang PC, Chen C, Yu QQ, Zhang YJ (2019). Effect of different nitrogen levels on the physiology and ecology of *Paspalum wettsteinii*. *Pratacultural Science*, 36, 744–753. [王文娟, 赵丽丽, 王普昶, 陈超, 余青青, 张宇君 (2019). 氮素水平对宽叶雀稗生理生态的影响. 草业科学, 36, 744–753.]
- Xie YG, Liu JM, Liao XF, Li P (2017). Effects of calcium stress on physiological and biochemical characteristics of honeysuckle. *Jiangsu Agricultural Science*, 45, 144–146. [谢元贵, 刘济明, 廖小锋, 李鹏 (2017). 钙胁迫对金银花生理生化特性的影响. 江苏农业科学, 45, 144–146.]
- Xu DH, Wang WY, Gao TP, Fang XW, Gao XG, Li JH, Bu HY, Mu J (2017). Calcium alleviates decreases in photosynthesis under salt stress by enhancing antioxidant metabolism and adjusting solute accumulation in *Calligonum mongolicum*. *Conservation Physiology*, 5, cox060. DOI: 10.1093/conphys/cox060.
- Yang FR, Liu WY, Huang J, Wei YM, Jin Q (2017). Physiological responses of different quinoa varieties to salt stress and evaluation of salt tolerance. *Acta Prataculturae Sinica*, 26, 77–88. [杨发荣, 刘文瑜, 黄杰, 魏玉明, 金茜 (2017). 不同藜麦品种对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价. 草业学报, 26, 77–88.]
- Yang YQ, Guo Y (2018). Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses. *New Phytologist*, 217, 523–539.
- Zeng C, Wang SJ, Bai XY, Li YB, Tian YC, Li Y, Wu LH, Luo GJ (2017). Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. *Solid Earth*, 8, 721–736.
- Zhang HH, Zhang XL, Li X, Ding JN, Zhu WX, Qi F, Zhang T, Tian Y, Sun GY (2012). Effects of NaCl and Na₂CO₃ stresses on the growth and photosynthesis characteristics of *Morus alba* seedlings. *Journal of Applied Ecology*, 23, 625–631. [张会慧, 张秀丽, 李鑫, 丁俊男, 朱文旭, 齐飞, 张婷, 田野, 孙广玉 (2012). NaCl和Na₂CO₃胁迫对桑树幼苗生长和光合特性的影响. 应用生态学报, 23, 625–631.]
- Zhang SR (1999). A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chinese Bulletin of Botany*, 34, 444–448. [张守仁 (1999). 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通报, 34, 444–448.]
- Zhao SJ, Shi GA, Dong XC (2002). *Experimental Guidance on Crop Physiology*. Science Press, Beijing. [赵世杰, 史国安, 董新纯 (2002). 作物生理学实验指导. 科学出版社, 北京.]
- Zhao YM, Chen SY, Zhang Y, Jiang Y, Hou XL, Cai LP (2019). Effects of acid and cadmium stresses on seed germination, seedling growth, and subcellular structure of *Paspalum wettsteinii*. *Journal of Agro-Environment Science*, 38, 60–69. [赵雅曼, 陈顺钰, 张韵, 姜云, 侯晓龙, 蔡丽平 (2019). 酸、Cd胁迫对宽叶雀稗种子萌发、幼苗生长及亚细胞结构的影响. 农业环境科学学报, 38, 60–69.]
- Zhou Y, Zhao YJ, Huang LJ, Tang NY, Tang XQ, Wang KC (2019). Physiological responses of *Schizonepeta tenuifolia* Briq. seedlings to salt stress. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 33, 166–175. [周莹, 赵永娟, 黄丽瑾, 唐楠煜, 唐晓清, 王康才 (2019). 荆芥幼苗对盐胁迫的生理响应. 核农学报, 33, 166–175.]

责任编辑: 陈保冬 责任编辑: 李 敏 实习编辑: 赵 航