

引用格式:

王玲玲, 虎淘淘, 张昕怡, 马潇源, 张黎, 靳磊, 严瑞. 油菜素内酯对盐碱胁迫下菊花幼苗生长及生理特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(3): 55–61.

WANG L L, HU T T, ZHANG X Y, MA X Y, ZHANG L, JIN L, YAN R. Effects of brassinolide on growth and physiological characteristics of chrysanthemum seedlings under saline-alkali stress[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(3): 55–61.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



油菜素内酯对盐碱胁迫下菊花幼苗生长及生理特性的影响

王玲玲¹, 虎淘淘¹, 张昕怡¹, 马潇源², 张黎¹, 靳磊², 严瑞^{1*}

(1.宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要: 以菊花耐盐品种‘绚秋江月’和盐敏感品种‘绚秋尽染’为试材, 用 NaCl 和 NaHCO₃ 按 1 : 1(质量比)配制成 100 mmol/L 复合盐碱处理液, 对园林小菊幼苗进行盐碱胁迫处理, 对其叶片喷施不同浓度(0.001、0.010、0.100、1.000 mg/L)外源油菜素内酯(BR), 以喷施 H₂O 为对照(CK), 研究 BR 对盐碱胁迫下园林小菊幼苗生长及生理指标的影响。结果表明: 与对照相比, 在盐碱胁迫下外源喷施 0.100 mg/L BR, ‘绚秋江月’和‘绚秋尽染’叶片相对含水量分别提高了 8.11%、16.95%; SPAD 值分别增加了 9.55% 和 13.97%; 相对电导率分别下降了 27.63% 和 24.69%; 丙二醛(MDA)含量分别下降了 41.24% 和 67.38%; 脯氨酸(Pro)含量分别提高了 86.49% 和 69.46%; 过氧化氢酶(CAT)活性分别增大了 16.25% 和 18.14%; 过氧化物酶(POD)活性分别增大了 46.15% 和 68.38%; 超氧化物歧化酶(SOD)活性分别增大了 12.36% 和 16.32%; 抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性分别增大了 76.88% 和 95.04%。外源喷施 0.100 mg/L BR 可以更好地促进盐碱胁迫下园林小菊幼苗的生长发育, 提高抗氧化酶活性, 增强生物膜的稳定性, 从而起到缓解盐碱胁迫对菊花幼苗的伤害, 且对盐敏感品种‘绚秋尽染’盐碱受害的缓解效果更佳。

关 键 词: 园林小菊; 外源油菜素内酯; 盐碱胁迫; 生理特性

中图分类号: S682.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2024)03–0055–07

Effects of brassinolide on growth and physiological characteristics of chrysanthemum seedlings under saline-alkali stress

WANG Lingling¹, HU Taotao¹, ZHANG Xinyi¹, MA Xiaoyuan², ZHANG Li¹, JIN Lei², YAN Rui^{1*}

(1.College of Wine and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2.College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: In this study, the salt-tolerant chrysanthemum cultivar ‘Xuanqiu Jiangyue’ and the salt-sensitive cultivar ‘Xuanqiu Duran’ were used as test materials, and NaCl and NaHCO₃ were mixed with 1 : 1 mass ration to prepare a compound saline-alkali solution at the concentration of 100 mmol/L. The seedlings of chrysanthemum were treated with saline-alkali stress, and the leaves were sprayed with four concentrations(0.001, 0.010, 0.100, 1.000 mg/L) of exogenous brassinolide(BR) with the H₂O as the control(CK). The effects of BR on the growth and physiological indexes of chrysanthemum seedlings under saline-alkali stress were studied. The results showed that compared with the control, the relative water contents of the leaves of ‘Xuanqiu Jiangyue’ and ‘Xuanqiu Duran’ increased by 8.11% and 16.95%, respectively, and the chlorophyll contents increased by 9.55% and 13.97%, respectively, when sprayed with 0.100 mg/L BR under saline-alkali stress. The relative conductivities decreased by 27.63% and 24.69%, respectively. The contents of malondialdehyde(MDA) decreased by 41.24% and 67.38%, respectively. The contents of proline(Pro) increased by 86.49% and 69.46%. The activities of catalase(CAT) increased by 16.25% and 18.14%, respectively. The activities of

收稿日期: 2023–09–14

修回日期: 2024–06–19

基金项目: 2023 年宁夏自然科学基金项目(2023AAC03147); 2022 年宁夏重点研发计划(2022BBF03035)

作者简介: 王玲玲(1999—), 女, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 主要从事菊花逆境生理研究, wanglingling0915@163.com; *通信作者, 严瑞, 博士, 副教授, 主要从事观赏植物栽培生理及逆境分子育种研究, yanrui2020@sina.cn

peroxidase(POD) increased by 46.15% and 68.38%, respectively. The activities of superoxide dismutase(SOD) increased by 12.36% and 16.32%, respectively. The activities of ascorbate peroxidase(APX) increased by 76.88% and 95.04%, respectively. In summary, exogenous spraying of 0.100 mg/L BR could better promote the growth and development of chrysanthemum seedlings under saline-alkali stress, improve the activity of antioxidant enzymes and the stability of biofilms, thereby alleviate the damage of saline-alkali stress to chrysanthemum seedlings, and the alleviation effect of salt-alkali damage of salt-sensitive variety 'Xuanqiu Duran' was more obvious.

Keywords: chrysanthemum; exogenous brassinolide; saline-alkali stress; physiological characteristic

菊花(*Chrysanthemum morifolium* Ramat.)是中国十大传统名花和世界四大切花之一^[1],根据其应用方式可分为独本菊、多头菊、大立菊和园林小菊等^[2]。园林小菊是经长期人工杂交育种所得,其花色艳丽、植株矮小、株型紧凑,是理想的园林造景花卉^[3]。然而,菊花在沿海及盐碱地区栽培时,容易因盐碱胁迫而导致生长发育不良,或者是因为长期在设施条件下栽培,土壤次生盐渍化,容易造成生理障碍;因此,研究菊花耐盐碱性并找到有效缓解盐碱胁迫的方法是菊花研究工作的重要任务之一。油菜素内酯(brassinolide, BR)是一类甾醇类激素,它在植物生长发育以及耐逆性方面起着重要作用^[4]。土壤的盐碱化会使植物受害,影响其生长发育,外源 BR 对植物盐害的缓解效应已在黄瓜^[5]、水稻^[6]、番茄^[7]、甜菜^[8]等多种作物上有报道,但油菜素内酯对盐碱胁迫下菊花幼苗生长和生理的影响及其作用机制目前尚不清楚。本试验中,研究不同浓度 BR 对盐碱胁迫下菊花幼苗的生长和生理指标的影响,以期找到能够缓解菊花盐碱胁迫的最适 BR 浓度,为盐碱地区种植园林小菊提供理论支持和参考。

1 材料与方法

1.1 材料

以园林小菊耐盐品种‘绚秋江月’和盐敏感品种‘绚秋尽染’为试验材料,于2023年2月在宁夏银川国家农业科技园区(贺兰园艺产业园)温室大棚进行试验。

1.2 方法

称取 NaHCO_3 和 NaCl 固体粉末,按 1 : 1 配制成 100 mmol/L 的复合盐碱处理液。选取 2.5 ~ 3.5 cm 生长良好、长势一致的嫩梢,扦插于基质中,待插穗生根并展开 6 ~ 7 片真叶后,以复合盐碱处理液处理菊花幼苗,并于 18:00 时叶面喷施不同浓度 BR;

对照组(CK)喷洒去离子水;每 2 d 喷施 1 次,共处理 10 d。每个处理重复 3 次,每个重复 6 株扦插苗。试验共设 6 个处理:CK, 喷 H_2O ; YJ, 100 mmol/L 盐碱液; T1, 100 mmol/L 盐碱液 + 0.001 mg/L BR; T2, 100 mmol/L 盐碱液 + 0.01 mg/L BR; T3, 100 mmol/L 盐碱液 + 0.1 mg/L BR; T4, 100 mmol/L 盐碱液 + 1.0 mg/L BR。

1.3 指标测定

采用精度为 0.1 mg 的电子天平测定生物量,计算根冠比;参照高俊凤^[9]的方法,采用浸泡法测定叶片含水量,采用愈创木酚显色法测定 POD 活性。参照张治安^[10]的方法测定相对电导率(REC);采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量;采用蒽酮比色法测定可溶性糖(SS)含量;采用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白(SP)含量;使用脯氨酸含量检测试剂盒(Solarbio)测定脯氨酸(Pro)含量;采用 SPAD 便携式叶绿素仪测定叶片的 SPAD 值;采用氮蓝四唑法测定 SOD 活性;参照李合生^[11]方法测定 CAT 活性;使用过氧化氢(APX)含量检测试剂盒(Solarbio)测定抗坏血酸酶(APX)活性。

1.4 数据统计与分析

运用 Excel 2022 和 Graphpad Pism 9.5 进行数据分析、制图和制表;运用 SPSS 26.0 进行显著性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 外源 BR 对盐碱胁迫下菊花幼苗表型和生物量的影响

由图 1 和表 1 可知, YJ 胁迫显著抑制‘绚秋江月’和‘绚秋尽染’植株的生长发育,与 CK 相比,盐碱胁迫处理 10 d 后,2 个品种菊花幼苗叶片从下到上均出现不同程度的失绿、萎蔫现象,其鲜质量、干质量和根冠比均降低。与耐盐品种‘绚秋江月’相

比，盐敏感品种‘绚秋尽染’受到了更大的影响。外源喷施不同浓度 BR 有效缓解了 2 个品种菊花幼苗盐碱胁迫的受害症状，但缓解程度存在差异，其中，‘绚秋江月’在 T3 处理下缓解程度最高，与 YJ 相比，株高增加了 4.77%，单株干质量增加了 43.48%，根

冠比增加了 104.35%，而‘绚秋尽染’在 T2 处理下缓解程度最高，株高增加了 20.69%，单株干质量增加了 43.48%，根冠比增加了 110.00%。这些结果说明，外源 BR 可有效缓解盐碱胁迫对菊花幼苗生长的抑制作用，提高其耐盐碱能力。

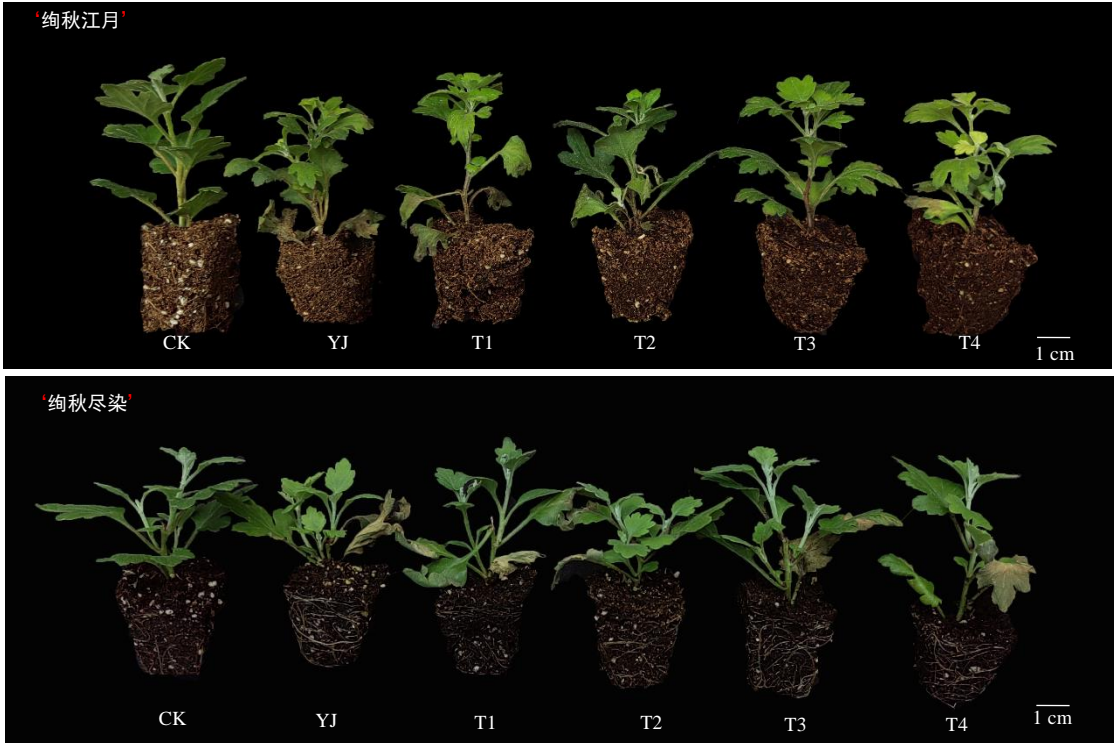


图 1 盐碱胁迫下外源 BR 处理的菊花幼苗的表型

Fig. 1 Phenotypes of chrysanthemum seedlings under exogenous BR treatment and saline-alkali stress

表 1 盐碱胁迫下外源 BR 处理的菊花幼苗的生物量

Table 1 Biomasses of chrysanthemum seedlings under exogenous BR treatment and saline-alkali stress					
品种	处理	株高/cm	单株鲜质量/g	单株干质量/g	根冠比
‘绚秋江月’	CK	(4.70±0.10)a	(3.79±0.83)a	0.39±0.28	(0.53±0.18)a
	YJ	(3.98±0.07)c	(2.52±0.50)b	0.23±0.11	(0.23±0.04)b
	T1	(3.14±0.12)e	(2.68±0.50)b	0.25±0.19	(0.36±0.06)ab
	T2	(3.54±0.05)d	(2.98±0.43)b	0.28±0.25	(0.41±0.13)ab
	T3	(4.17±0.07)b	(2.16±1.00)ab	0.33±0.31	(0.47±0.17)a
	T4	(4.13±0.07)ab	(2.03±1.52)ab	0.28±0.18	(0.35±0.17)ab
‘绚秋尽染’	CK	(3.21±0.03)a	(4.14±1.00)a	(0.32±0.15)a	(0.49±0.26)a
	YJ	(2.61±0.02)d	(2.48±0.57)b	(0.23±1.53)b	(0.20±0.02)b
	T1	(3.10±0.04)ab	(2.60±0.45)b	(0.28±2.30)b	(0.27±0.10)ab
	T2	(3.15±0.13)a	(2.13±0.50)b	(0.33±2.31)a	(0.42±0.15)ab
	T3	(2.91±0.17)bc	(3.20±0.44)ab	(0.24±1.82)b	(0.38±0.10)ab
	T4	(2.90±0.11)bc	(2.70±0.22)b	(0.20±1.36)b	(0.33±0.07)ab

同一品种同列不同字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.2 外源 BR 对盐碱胁迫下菊花水分状况和叶绿素含量的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,在 YJ 胁迫处理下,‘绚秋江月’相对含水量下降了 12.94%,‘绚秋尽染’相对含水量下降了 24.36%,‘绚秋江月’和‘绚秋尽染’的 SPAD 值分别下降了 10.82%和 16.61%。外源喷施不同浓度 BR 均提高了 2 个品种菊花幼苗的含水量和 SPAD 值,在 T3 处理下其含量达到最大,随后相对含水量和 SPAD 值又呈下降趋势,可能是由于受到盐碱胁迫和外源物质浓度过高双重影响所致。T3 处理后缓解程度较为明显,与 YJ 胁迫处理相比,‘绚秋江月’和‘绚秋尽染’叶片相对含水量分别提高了 8.11%、16.95%,其 SPAD 值增加了 9.55%和 13.97%。且对盐敏感品种‘绚秋尽染’盐碱受害的缓解效果更为明显。

表 2 盐碱胁迫下外源 BR 处理的菊花幼苗的水分状况和叶绿素含量

Table 2 Water status and chlorophyll contents of chrysanthemum seedlings under exogenous BR treatment and saline-alkali stress

品种	处理	相对含水量/(g g ⁻¹)	SPAD 值
‘绚秋江月’	CK	(0.85 ± 0.04)a	(47.80 ± 0.43)a
	YJ	(0.74 ± 0.02)b	(42.63 ± 0.72)c
	T1	(0.75 ± 0.02)b	(43.33 ± 0.89)c
	T2	(0.76 ± 0.02)ab	(45.23 ± 1.42)b
	T3	(0.80 ± 0.06)ab	(46.70 ± 0.45)ab
‘绚秋尽染’	T4	(0.74 ± 0.05)b	(46.50 ± 0.30)ab
	CK	(0.78 ± 0.04)a	(44.37 ± 1.10)a
	YJ	(0.59 ± 0.02)c	(37.00 ± 0.72)d
	T1	(0.60 ± 0.02)c	(41.43 ± 0.40)bc
	T2	(0.65 ± 0.05)bc	(42.70 ± 0.72)b
	T3	(0.69 ± 0.01)b	(42.17 ± 1.55)b
	T4	(0.63 ± 0.06)bc	(40.23 ± 0.40)c

同一品种同列不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.3 外源 BR 对盐碱胁迫下菊花幼苗质膜相对透性与膜质过氧化的影响

由表 3 可知,在 YJ 胁迫处理下,‘绚秋江月’相对电导率较 CK 的增加了 230.43%,‘绚秋尽染’相对电导率较 CK 的增加了 88.37%。外源喷施不同浓度 BR 后,在 T3 处理下相对电导率降至最低,与 YJ 胁迫处理相比,‘绚秋江月’和‘绚秋尽染’相对电导率分别下降了 27.63%和 24.69%。以上结果表明,盐碱胁迫下喷施一定浓度的外源 BR 可有效提高细胞膜的稳定性,缓解电解质的外渗,但 BR 浓

度过高,可能会对植株产生离子胁迫。

在 YJ 胁迫处理下,‘绚秋江月’和‘绚秋尽染’MDA 含量显著上升,与 CK 相比分别增加了 110.78%和 212.38%。喷施不同浓度的外源 BR 后,与 YJ 处理相比,T1、T2、T3 和 T4 处理植株叶片的 MDA 含量显著下降,‘绚秋江月’MDA 含量分别显著下降了 8.68%、33.49%、41.24%、24.19%,‘绚秋尽染’在 T1、T2、T3 处理后 MDA 含量显著下降了 12.58%、44.60%、67.36%,T4 处理下 MDA 含量又上升,可能是受到了高浓度 BR 和盐碱胁迫双重胁迫所致。可见,T3 处理对缓解 2 个品种菊花幼苗的盐碱胁迫效果较好。‘绚秋尽染’的 MDA 含量下降幅度大于‘绚秋江月’,说明喷施外源 0.1 mg/L BR 对盐碱胁迫下‘绚秋尽染’的缓解效果更佳。

表 3 盐碱胁迫下外源 BR 处理的菊花幼苗的质膜相对透性与膜质过氧化

Table 3 The relatively permeable and membrane peroxide of plasma membrane of chrysanthemum seedlings under exogenous BR treatment and saline-alkali stress

品种	处理	相对电导率/%	MDA 含量/($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)
‘绚秋江月’	CK	(0.23 ± 0.02)c	(3.06 ± 0.09)e
	YJ	(0.76 ± 0.02)a	(6.45 ± 0.37)a
	T1	(0.67 ± 0.10)ab	(5.89 ± 0.15)b
	T2	(0.57 ± 0.04)b	(4.29 ± 0.08)d
	T3	(0.55 ± 0.05)b	(3.79 ± 0.41)d
‘绚秋尽染’	T4	(0.76 ± 0.14)a	(4.89 ± 0.20)c
	CK	(0.43 ± 0.07)c	(5.09 ± 0.24)e
	YJ	(0.81 ± 0.09)a	(15.90 ± 0.12)b
	T1	(0.73 ± 0.01)ab	(13.90 ± 0.47)c
	T2	(0.65 ± 0.10)b	(8.49 ± 0.05)d
	T3	(0.61 ± 0.02)b	(5.19 ± 0.04)e
	T4	(0.73 ± 0.05)ab	(17.90 ± 1.80)a

同一品种同列不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.4 外源 BR 对盐碱胁迫下菊花幼苗渗透调节物质的影响

由表 4 可知,在 YJ 胁迫处理下 2 个品种菊花幼苗的 Pro、SS 含量较 CK 的显著上升。外源喷施 BR 后,‘绚秋江月’和‘绚秋尽染’的 Pro 含量增加,在 T3 处理时达到最大值,‘绚秋江月’和‘绚秋尽染’Pro 含量分别较 CK 的提高了 86.49%和 69.46%,且存在显著差异。其 SS 含量在 YJ、T1、T2、T3、T4 处理下均显著高于 CK 的。在 T3 处理下,‘绚秋江月’的 SS 含量达到最大,较 YJ 处理的增加了

101.06%；而‘绚秋尽染’SS 含量在 T2 处理下达到最大,较 YJ 处理的增加了 110.91%。就 SP 含量而言,YJ 胁迫对 2 个品种菊花幼苗的 SP 含量无显著影响,喷施外源 0.1 mg/L BR 时,‘绚秋江月’和‘绚秋尽染’SP 含量均达到最大值,分别较 CK 的增加了 42.13%、51.19%。以上结果表明,喷施外源 BR 可以提高盐碱胁迫下菊花幼苗叶片的渗透调节物质含量,从而增加细胞渗透势,提高盐碱胁迫抗性,且对盐敏感品种‘绚秋尽染’盐碱受害的缓解效果更好。

表 4 盐碱胁迫下外源 BR 处理的菊花幼苗的渗透调节物质含量

Table 4 Osmotic regulators contents of chrysanthemum seedlings under exogenous BR treatment and saline-alkali stress				
品种	处理	Pro 含量/(μg g ⁻¹)	SS 含量/(mg g ⁻¹)	SP 含量/(mg g ⁻¹)
‘绚秋江月’	CK	(105.44±1.32)d	(4.24±1.61)d	(21.27±1.59)c
	YJ	(186.63±2.19)b	(7.55±0.66)c	(24.10±2.25)bc
	T1	(192.21±5.70)a	(10.54±1.32)b	(26.70±1.90)bc
	T2	(194.21±1.86)a	(13.14±2.06)a	(28.30±1.24)a
	T3	(196.63±2.19)a	(15.18±0.99)a	(30.23±2.55)a
	T4	(155.09±2.30)c	(9.22±1.33)bc	(21.60±2.20)b
‘绚秋尽染’	CK	(121.02±1.50)d	(3.49±0.58)e	(17.66±2.85)c
	YJ	(133.20±3.98)c	(6.51±0.63)c	(20.20±2.16)bc
	T1	(195.07±1.67)b	(9.72±0.90)bc	(23.71±0.95)bc
	T2	(203.61±0.53)a	(13.73±1.40)a	(24.10±2.25)ab
	T3	(205.08±4.48)a	(12.20±2.73)ab	(26.70±1.90)a
	T4	(191.85±2.66)b	(8.94±1.00)cd	(19.51±1.85)c

同一品种同列不同字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.5 外源 BR 对盐碱胁迫下菊花幼苗抗氧化酶活性的影响

植物遭受胁迫时会产生大量的活性氧(ROS),植物体内含有 SOD、POD、CAT 等,有助于增强植物的防御能力,维持植物正常生长。由表 5 可知,YJ 处理会引起叶片中 SOD、POD、CAT 和 APX 活性升高;喷施不同浓度 BR 后,叶片中 SOD、POD、

CAT、APX 活性进一步升高,在 T3 处理下酶活性达到最大值,与 YJ 胁迫处理相比,‘绚秋江月’POD 活性显著提高 46.15%,SOD 活性显著提高 12.36%,APX 活性显著提高 76.88%,CAT 活性显著提高 16.25%;‘绚秋尽染’的 POD 活性显著提高 68.38%,SOD 活性显著提高 16.32%,APX 活性显著提高 95.04%,CAT 活性显著提高 16.58%。

表 5 盐碱胁迫下外源 BR 处理的菊花幼苗的抗氧化酶活性

Table 5 Antioxidant enzyme activities of chrysanthemum seedlings under exogenous BR treatment and saline-alkali stress					
品种	处理	POD 活性/(U g ⁻¹ min ⁻¹)	SOD 活性/(U g ⁻¹)	APX 活性/(U g ⁻¹ min ⁻¹)	CAT 活性/(U g ⁻¹ min ⁻¹)
‘绚秋江月’	CK	(3.14±0.30)d	(419.58±10.87)d	(3.38±0.30)d	(93.90±4.30)d
	YJ	(5.59±0.92)c	(487.40±13.90)c	(8.00±0.88)c	(116.11±2.94)c
	T1	(6.19±0.17)c	(505.44±16.30)bc	(12.63±0.10)b	(122.40±3.58)bc
	T2	(7.23±0.05)b	(522.06±6.91)b	(13.51±0.77)ab	(128.97±4.18)ab
	T3	(8.17±0.31)a	(547.66±15.29)a	(14.15±0.14)a	(134.98±4.79)a
	T4	(7.01±0.12)a	(492.07±7.87)c	(8.81±1.44)c	(125.98±3.82)b
‘绚秋尽染’	CK	(4.57±0.26)d	(381.76±14.72)d	(3.42±0.11)d	(87.42±1.82)c
	YJ	(5.63±0.11)c	(453.95±6.61)c	(6.85±1.61)c	(109.43±3.29)b
	T1	(6.23±0.65)c	(492.92±11.11)b	(9.14±1.30)b	(113.03±0.12)b
	T2	(7.23±0.05)b	(512.44±14.30)ab	(10.38±0.45)b	(126.18±4.75)a
	T3	(9.48±0.13)a	(528.02±34.35)a	(13.36±1.20)a	(127.57±2.82)a
	T4	(6.23±0.65)c	(402.85±12.37)d	(9.26±0.61)b	(112.60±6.60)b

同一品种同列不同字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

以上结果表明,盐碱胁迫下喷施 BR 可以提高园林小菊的抗氧化酶活性,以增强园林小菊对逆境胁迫的耐受性,且外源 0.1 mg/L BR 对‘绚秋尽染’盐碱胁迫的缓解效果更明显。

2.6 盐碱胁迫下不同浓度外源 BR 处理园林小菊幼苗生理指标的主成分分析

对本试验中所有处理的 15 个指标进行主成分分析,提取特征值>1 的 3 个主成分,其特征值分别为 6.913、5.299、1.207,累计方差贡献率达到 89.462%,符合分析要求。由表 6 可知,第一主成分(PC1)主要综合了电导率、Pro 含量、CAT 活性、POD 活性、APX 活性、SS 含量等指标的信息;第二主成分综合了 SP 含量、SOD 活性、叶绿素含量、SS 含量等指标的信息,第三主成分主要综合了 Pro 含量、株高指标的信息。根据 $F=0.460\ 89F_1+0.353\ 28F_2+0.080\ 45F_3$,计算出各处理的综合得分。由表 7 可知,园林小菊在不同浓度 BR 处理下的综合得分排名依次为 T3、CK、T2、T4、T1、YJ。

表 6 主成分及主成分分析后的旋转载荷
Table 6 Principal components and rotational load matrices after principal component analysis

指标	载荷值		
	PC1	PC2	PC3
电导率	0.885	-0.316	0.251
Pro 含量	0.819	-0.259	0.402
鲜质量	-0.782	-0.208	-0.498
CAT 活性	0.730	0.666	0.065
相对含水量	-0.725	0.578	0.148
干质量	-0.720	0.425	0.090
根冠比	-0.713	0.525	-0.274
POD 活性	0.691	0.536	-0.346
APX 活性	0.688	0.657	-0.223
SP 含量	0.385	0.848	-0.083
MDA 含量	0.502	-0.757	-0.055
SOD 活性	0.578	0.756	0.040
叶绿素含量	-0.602	0.711	0.257
SS 含量	0.636	0.709	-0.146
株高	-0.560	0.514	0.598
特征	6.913	5.299	1.207
方差贡献率/%	46.089	35.328	8.045
累计方差贡献率/%	46.089	81.417	89.462

表 7 主成分的综合得分及排名

Table 7 Comprehensive score and ranking of principal components

处理	主成分得分			综合得分	排名
	F ₁	F ₂	F ₃		
CK	1.878	0.788	0.404	1.176	2
YJ	0.547	0.313	-6.303	-0.144	6
T1	-0.081	0.799	1.005	0.326	5
T2	-0.384	2.368	0.610	0.708	3
T3	0.197	4.242	0.412	1.622	1
T4	1.615	-0.673	0.671	0.560	4

3 结论与讨论

土壤盐碱化是限制植物生长发育的主要非生物胁迫因素之一^[12]。油菜素内酯(BR)是一类植物特异性甾体植物激素,在调节植物生长、发育和应激反应方面发挥着重要作用^[13]。本研究中,盐碱胁迫对不同菊花品种的生长均有抑制作用,外源喷施不同浓度 BR 缓解了 2 个品种菊花的盐碱胁迫受害症状,促进了它们的生长。2 个品种菊花受到盐碱胁迫时,‘绚秋尽染’对 BR 的敏感性高于‘绚秋江月’,说明在盐碱敏感品种中,喷施 BR 对减轻盐碱伤害更为有效。SHU 等^[14]研究发现喷施油菜素内酯能减轻 NaCl 对棉花的伤害。李巧丽^[5]研究发现,NaCl 胁迫下施用外源油菜素内酯,可以有效增加黄瓜叶片相对含水量。尚秉琛等^[15]研究发现,在盐碱胁迫

下喷施适宜浓度的外源油菜素内酯可提高水稻幼苗的叶绿素含量。本试验中,喷施 BR 可提高盐碱胁迫下园林小菊的相对含水量和叶绿素含量,维持园林小菊在盐碱胁迫下的正常生长。

有研究^[16-17]表明,丙二醛(MDA)是细胞膜脂过氧化产物之一,其含量既能反映细胞膜脂质过氧化,又能反映细胞膜结构的损伤程度,同时也是影响植物抗盐能力的一个重要指标。本研究结果表明,盐碱胁迫后植物体内 MDA 含量显著增加,对 2 个品种菊花损害较大,在盐碱胁迫后外源喷施 BR,其 MDA 含量均显著下降,说明施加油菜素内酯能缓解盐碱胁迫造成的损害,且‘绚秋尽染’在喷施外源 BR 之后,MDA 含量下降幅度更大,推测 BR 对敏感品种的效果更好。

脯氨酸(Pro)是植物体内重要的渗透调节物质,

它能够调节渗透平衡并保护植物亚细胞结构^[18]。本试验中, YJ 胁迫下 2 个品种菊花叶片的 Pro 含量均较对照显著升高, 说明 BR 对提高菊花耐盐性有积极作用。可溶性糖(SS)也是一种重要的渗透调节因子, 它能在胁迫下维持细胞内外的渗透压平衡, 保护细胞膜及蛋白质的活性, 从而促进水分的跨膜转运^[19]。已有研究^[20]表明, 使用外源 SA 进行叶面喷施, 可有效提高植物体内的 SS 含量, 调节细胞渗透压, 而 SS 含量升高幅度的不同表明植物体内渗透调节物质含量的复杂性。本试验中, 在盐碱胁迫下, 对菊花喷施不同浓度 BR, 可以使其体内逐渐积累 SS, 通过渗透调节作用来维持细胞的正常功能, 缓解盐碱胁迫对植物造成的伤害, 且在 0.1 mg/L BR 处理下效果最好。植物在胁迫过程中, 体内的抗氧化酶活性会增高。在植物抗氧化防御体系中, 由 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶组成的酶促防御系统起到非常关键的作用。研究^[21-22]表明, 在胁迫条件下外源喷施 BR 可以提高抗氧化酶活性, 缓解植物氧化胁迫。本研究中, 在 YJ 胁迫处理下 POD、SOD、CAT、APX 活性均高于盐碱胁迫前, 可能是园林小菊发生过氧化反应, 通过增强 SOD、POD、CAT 和 APX 等抗氧化酶活性来消除体内过剩的活性氧(ROS)。盐碱胁迫下外源喷施不同浓度 BR 进一步提高了 SOD、POD、CAT、APX 的活性, 但随 BR 浓度的增加, 2 个品种园林小菊的酶活性出现不同程度的降低, 说明高浓度 BR 对缓解园林小菊盐碱胁迫有抑制作用, 可能是因为高浓度的 BR 溶液使其叶片中抗氧化酶活性降低, 使盐碱胁迫下 ROS 清除延迟并在植物中积累 ROS 对其造成伤害。但耐盐品种‘绚秋江月’的降幅相对较小, 说明‘绚秋江月’可通过保持较强的抗氧化酶活性来清除积累的多余 ROS, 从而减轻逆境胁迫对植物细胞造成的伤害, 以适应盐碱胁迫。

综上所述, 盐碱胁迫下外源喷施 0.1 mg/L BR 可以较好地缓解幼苗叶片水分的流失, 减少叶片相对含水量及叶绿素含量的损失, 抑制叶片体内丙二醛含量的上升和质膜的相对透性, 提高抗氧化酶活性, 降低盐碱胁迫下园林小菊体内活性氧的产生, 改善园林小菊的渗透调节能力, 维持渗透压的平衡, 缓解盐碱胁迫对植物的伤害, 且对盐敏感品种‘绚秋尽染’盐碱受害的缓解效果更为明显。

参考文献:

- [1] 管志勇. 菊花近缘属植物的耐盐评价及耐盐机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [2] 朱德宁, 韩宇, 房伟民, 等. 多花型园林小菊品质评价与品种筛选[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(2): 266-274.
- [3] 孟蕊. 嫁接提高园林小菊耐盐性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [4] 赵恺, 辛文春, 何冰纾. 外源 BR 处理对碱性盐胁迫下辣椒生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(14): 29-31.
- [5] 李巧丽. 外源油菜素内酯对黄瓜耐盐性的调控[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [6] MU D W, FENG N J, ZHENG D F, et al. Studies on the physiological mechanism of brassinolide to improve the resistance of rice seedlings to NaCl stress[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2022, 233(7): 238.
- [7] 张林青. 盐胁迫下油菜素内酯对番茄产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2012(20): 23-25.
- [8] 刘丹. 外源 BR 对盐碱胁迫下甜菜生理特性及产量和品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 张治安. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [12] 李文姣. 油菜素内酯缓解花生盐胁迫的作用机理研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2022.
- [13] YAO T S, XIE R J, ZHOU C Y, et al. Roles of brassinosteroids signaling in biotic and abiotic stresses[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(21): 7947-7960.
- [14] SHU H M, NI W C, GUO S Q, et al. Root-applied brassinolide can alleviate the NaCl injuries on cotton[J]. Acta Physiol Plant, 2015, 37.
- [15] 尚秉琛, 何昊, 李丹丹, 等. 油菜素内酯引发对盐胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(4): 795-805.
- [16] QIN Y, DRUZHININA I S, PAN X Y, et al. Microbially mediated plant salt tolerance and microbiome-based solutions for saline agriculture[J]. Biotechnology Advances, 2016, 34(7): 1245-1259.
- [17] 徐亚军, 赵龙飞, 邢鸿福, 等. 内生细菌对盐胁迫下小麦幼苗脯氨酸和丙二醛的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3726-3737.

(下转第 68 页)

- in *Aphis gossypii* Glover[J]. Insect Molecular Biology, 2017, 26(5): 485–495.
- [23] JI R, LEI J X, CHEN I W, et al. Cytochrome P450s *CYP380C6* and *CYP380C9* in green peach aphid facilitate its adaptation to indole glucosinolate-mediated plant defense[J]. Pest Management Science, 2021, 77(1): 148–158.
- [24] NY/T 1154.10—2008 农药室内生物测定试验准则 人工饲料混药法[S].
- [25] LIVAK K J, SCHMITTGEN T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta Ct}$ method[J]. Methods, 2001, 25(4): 402–408.
- [26] WEN Z M, PAN L P, BERENBAUM, M R, et al. Metabolism of linear and angular furanocoumarins by *Papilio polyxenes* CYP6B1 co-expressed with NADPH cytochrome P450 reductase[J]. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2003, 33(9): 937–947.
- [27] LIU X N, LIANG P, GAO X W, et al. Induction of the cytochrome P450 activity by plant allelochemicals in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner)[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2006, 84(2): 127–134.
- [28] PAN Y O, TIAN F Y, WEI X, et al. Thiamethoxam resistance in *Aphis gossypii* glover relies on multiple UDP-glucuronosyltransferases[J]. Frontiers in Physiology, 2018, 9: 322.
- [29] WANG L, ZHU J S, CUI L, et al. Overexpression of multiple UDP-Glycosyltransferase genes involved in sulfoxaflor resistance in *Aphis gossypii* glover[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(17): 5198–5205.
- [30] DU T H, FU B L, WEI X G, et al. Knockdown of UGT352A5 decreases the thiamethoxam resistance in *Bemisia tabaci* (Hemiptera:Gennadius)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186:100–108.
- [31] TIAN F J, WANG Z B, LI C F, et al. UDP-Glycosyltransferases are involved in imidacloprid resistance in the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Lividae)[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2019, 154: 23–31.
- [32] CHEN M L, ZHANG S X, GUO P Y, et al. Identification and characterization of UDP-glycosyltransferase genes and the potential role in response to insecticides exposure in *Bactrocera dorsalis*[J]. Pest Management Science, 2023, 79(2): 666–677.
- 责任编辑: 罗慧敏
英文编辑: 罗维

(上接第 61 页)

- [18] 郑晓东, 裴祥利, 李玉琪, 等. 油菜素内酯对盐碱胁迫下平邑甜茶幼苗生长的影响及调控机理研究[J]. 园艺学报, 2022, 49(7): 1401–1414.
- [19] YUSUF M, FARIDUDDIN Q, KHAN T A, et al. Epibrassinolide reverses the stress generated by combination of excess aluminum and salt in two wheat cultivars through altered proline metabolism and antioxidants[J]. South African Journal of Botany, 2017, 112: 391–398.
- [20] 尚庆茂, 宋士清, 张志刚, 等. 外源 BR 诱导黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 幼苗的抗盐性[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1872–1877.
- [21] SUN S S, AN M Y, HAN L B, et al. Foliar application of 24-epibrassinolide improved salt stress tolerance of perennial ryegrass[J]. HortScience, 2015, 50(10): 1518–1523.
- [22] 孙玉珺, 吴玥, 马德志, 等. 外源油菜素内酯对低温胁迫下玉米发芽及幼苗生理特性的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(3): 119–128.
- 责任编辑: 毛友纯
英文编辑: 柳正