

丁芳, 吕树立, 田壮博. 外源喷施 2,4-表芸苔素内酯对盛花期渍害胁迫下芝麻耐渍性的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1): 64-72.

DING F, LÜ S L, TIAN Z B. Effects of exogenous spraying brassinolide on waterlogging tolerance of sesame under waterlogging stress at flowering stage[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1): 64-72.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.01.07

外源喷施 2,4-表芸苔素内酯对盛花期 渍害胁迫下芝麻耐渍性的影响

丁 芳, 吕树立, 田壮博

(商丘市农林科学院, 河南 商丘 476000)

摘 要:为探究盛花期渍害胁迫对芝麻生长、生理特性的影响及 2,4-表芸苔素内酯对芝麻渍害胁迫的调控效应,以耐渍芝麻品种商芝 189 和渍害敏感郑芝 13 为试验材料,采用盆栽法,于芝麻盛花期(出苗后 50 d)进行叶面喷施 2,4-表芸苔素内酯(0.01、0.03、0.05 mg/kg),喷药后淹水处理 36 h,渍害胁迫结束后常温恢复 5 d,对芝麻植株根系生长情况、抗氧化体系及渗透调节物质等指标进行测定。结果表明,渍害胁迫下,2 个芝麻品种的光合效率、抗氧化酶活性及渗透调节物质含量均显著下降,渍害敏感品种郑芝 13 表现尤为明显。与不喷施(CK2)相比,2,4-表芸苔素内酯质量分数为 0.03 mg/kg 时,耐渍品种商芝 189 株高、茎粗、侧根数分别增加 9.36%、8.66%、12.82%,可溶性蛋白含量显著提高 31.01%;2,4-表芸苔素内酯质量分数为 0.05 mg/kg 时,渍害敏感品种郑芝 13 株高增加 9.96%,侧根数、侧根干质量分别增加 14.92%、14.28%,SOD、POD 活性分别增加 13.01%、13.88%。综上所述,喷施 2,4-表芸苔素内酯能显著提高盛花期渍害胁迫下芝麻的耐渍性,促进芝麻侧根生长,提高叶片保护酶活性和光合能力等多项指标,有利于渍害胁迫后芝麻植株的生长恢复;其中,0.03 mg/kg 2,4-表芸苔素内酯喷施对促进耐渍品种商芝 189 恢复生长的效果最好,渍害敏感品种郑芝 13 以 0.05 mg/kg 2,4-表芸苔素内酯喷施效果最佳。

关键词:芝麻;渍害胁迫;2,4-表芸苔素内酯;光合能力;酶活性;渗透调节物质

中图分类号:S565.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2481(2025)01-0064-09

Effects of Exogenous Spraying Brassinolide on Waterlogging Tolerance of Sesame under Waterlogging Stress at Flowering Stage

DING Fang, LÜ Shuli, TIAN Zhuangbo

(Shangqiu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, China)

Abstract: In order to study the effects of waterlogging stress on growth and physiological characteristics of sesame at flowering stage and the regulation effect of 24-epibrassinolide on waterlogging stress of sesame, in this study, using a waterlogging tolerant sesame variety Shangzhi 189 and a waterlogging sensitive sesame variety Zhengzhi 13 as experimental materials, taking the potted plant method, the treatment of foliar spraying of 24-epibrassinolide(0.01, 0.03, and 0.05 mg/kg), followed by continuous flooding treatment for 36 hours, and 5 days of normal temperature recovery after waterlogging stress was conducted. The indicators including root growth, antioxidant system, and osmotic regulators of sesame plants were measured. The results showed that under waterlogging stress, the photosynthetic efficiency, antioxidant enzyme activity, and osmotic regulator content of the two sesame varieties significantly decreased, especially the waterlogging sensitive variety Zhengzhi 13. Compared with the treatment without spraying(CK2), when the mass concentration of brassinolide was 0.03 mg/kg, the plant height, stem diameter, and lateral root number of the waterlogging tolerant variety Shangzhi 189 increased by 9.36%, 8.66%, 12.82%, the soluble protein content significantly increased by 31.01%. When the massconcentration of brassinolide was 0.05mg/kg, the plant

收稿日期:2024-04-01

基金项目:河南省科技攻关项目(212102110371);河南省农科系统协同创新合力发展工程项目(2020CX02);商丘市农林科学院科技攻关项目(2021006.2)

作者简介:丁 芳,助理研究员,硕士,主要从事芝麻育种与栽培研究,E-mail:214681636@qq.com

通信作者:吕树立,副研究员,主要从事芝麻育种与栽培研究,E-mail:lvshuli666666@163.com

height of waterlogging sensitive sesame variety Zhengzhi 13 increased by 9.96%, the lateral root number and dry weight increased by 14.92% and 14.28%, respectively, and the activities of SOD and POD increased by 13.01%, 13.88%. In conclusion, spraying brassinolide could significantly improve the waterlogging tolerance of sesame under waterlogging stress at the flowering stage, promote lateral root growth of sesame, increase protective enzyme activity and photosynthetic capacity, and other indicators, which was beneficial for the growth recovery of sesame plants after waterlogging stress. Among them, the best effect of recovery growth of waterlogging tolerant variety Shangzhi 189 was induced by spraying 0.03 mg/kg, and the best effect of recovery growth of waterlogging sensitive variety Zhengzhi 13 was induced by spraying 0.05 mg/kg.

Keywords: sesame; waterlogging stress; 24-epibrassinosteroid; photosynthetic capacity; enzyme activity; osmotic regulator

渍涝害是一种常见的非生物胁迫,会造成作物根部缺氧、叶绿素光合系统遭到破坏、碳水化合物过量消耗,从而导致植株能量供应不足而死亡^[1],给我国农业生产带来巨大的经济损失。芝麻是我国重要的油料作物之一,黄淮流域是我国芝麻的主要产区,约占我国芝麻总种植面积的70%^[2-5]。但渍涝灾害一直是威胁该地区芝麻生产的主要原因。芝麻整个生育期处于高温高湿的环境中^[6-8],尤其是在对渍害最为敏感的初花期—盛花期,经常由于阴雨或暴雨造成渍涝伤害^[9-10],导致芝麻植株病害加重,品质下降,甚至大面积减产绝收^[11-13],渍涝严重的地区,芝麻减产高达90%以上。因此,提升芝麻耐涝性能对芝麻生产意义重大。

已有研究表明,喷施外源植物生长调节剂可有效缓解逆境胁迫对作物造成的损害^[14-15]。2,4-表芸苔素内酯(2,4-epibrassinolide, EBR)是一种新型的植物内源性激素,在调控植物衰老及抗性、促进细胞生长和生殖发育、改善逆境环境下植物体内的渗透调节中发挥重要作用^[16-17]。研究表明,2,4-表芸苔素内酯可以在一定程度上提高干旱胁迫下玉米的抗逆性^[18],促进高温胁迫下茄子幼苗的

生长发育^[19],改善西瓜植株在涝害胁迫后的水分和养分代谢^[20]。

目前,关于渍害对不同芝麻品种产量积累及生理机理的影响研究较多,但施加外源植物生长调节剂对芝麻渍害胁迫的调控效应研究较少。因此,本研究以芝麻品种商芝189和郑芝13为试验材料,采用盆栽试验人工模拟渍害,研究外源喷施2,4-表芸苔素内酯对渍害条件下芝麻形态和生理的影响,明确2,4-表芸苔素内酯适宜用量及其对渍害胁迫后芝麻植株的生长恢复情况,旨在为建立芝麻渍害的大田控制措施提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试芝麻品种为商芝189(商丘市农科院自选耐渍型芝麻品种)和郑芝13(河南省审定品种,渍害敏感);2,4-表芸苔素内酯(焦作艾普瑞化学有效公司)为0.01%水剂。

1.2 试验设计

试验于2021年春季在河南省商丘市农林科学院双八试验基地进行。试验设计方案见表1。

表1 试验设计方案
Tab.1 Experimental design scheme

品种 Variety	处理 Treatment	药剂 Pharmaceutical	水分 Water
商芝189 Shangzhi 189	CK1	清水喷施	适宜土壤水分
	CK2	清水喷施	淹水胁迫
	T1	喷施2,4-表芸苔素内酯0.01 mg/kg	淹水胁迫
	T2	喷施2,4-表芸苔素内酯0.03 mg/kg	淹水胁迫
	T3	喷施2,4-表芸苔素内酯0.05 mg/kg	淹水胁迫
郑芝13 Zhengzhi 13	CK1	清水喷施	适宜土壤水分
	CK2	清水喷施	淹水胁迫
	T1	喷施2,4-表芸苔素内酯0.01 mg/kg	淹水胁迫
	T2	喷施2,4-表芸苔素内酯0.03 mg/kg	淹水胁迫
	T3	喷施2,4-表芸苔素内酯0.05 mg/kg	淹水胁迫

供试土壤为沙壤土,采用盆栽试验,盆栽用土选用大田耕层土壤,自然风干后与肥料混合均匀装盆(内径 35 cm,高 28 cm)。每盆装土 12 kg,上留约 5 cm 作灌水用。于 2021 年 5 月 19 日播种,8 月 18 日收获。3 对真叶时取长势一致的植株,每盆定苗 3 株,植株进入盛花期时(即出苗后 50 d)喷施 2,4-表芸苔素内酯;次日移入水池中进行渍水处理,水面高于盆中表土层 1~2 cm,连续渍水 36 h 后,将盆移出;次日再次喷施 2,4-表芸苔素内酯(各处理不变),每个处理 20 盆。试验在防雨棚条件下进行,其他管理措施同大田生产。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 形态、叶面积指数、光合气体交换参数测定 于撤水恢复后第 5 天 9:00,每个小区选取长势一致的植株 5 株,利用 CIRAS-3 光合测量仪,测定完全展开的第 3 片叶的净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(Tr)等光合参数,每片叶打点 5 次,所测数值去除离散值后进行分析。用直尺测量 5 株株高,用游标卡尺测量茎粗(以离基质表面 20 cm 处最大茎粗为准),用叶面积测量仪(YMJ-B)测定叶面积指数,利用 SPAD-502 叶绿素仪测定最上部完全展开叶的 SPAD 值。

1.3.2 渍水胁迫生理指标测定 摘取上述 5 株植

株(自上而下)的第 2、3 对真叶,清理干净后,迅速置于液氮中冷冻保存,用于生理指标的测定。参考李合生^[21]的方法测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)的酶活性;采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[21]测定可溶性蛋白含量;采用硫酸蒽酮比色法^[21]测定可溶性糖含量;采用茚三酮比色法^[22]测定脯氨酸含量。

1.3.3 根系形态指标 取出所有测定植株,测定主根长度、侧根数,然后在 75 °C 下烘干,测定主根、侧根干质量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2018 整理和分析数据,运用 SPSS 19.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同质量分数 2,4-表芸苔素内酯对芝麻植株和根系生长的影响

由表 2 可知,商芝 189 和郑芝 13 的 CK1 的地上部分形态指标和地下部分干质量均为最优,进行渍害胁迫的 4 个处理中,CK2 处理下 2 个芝麻品种株高、茎粗、主根干质量、侧根干质量均为各处理最低,品种间表现一致。

表 2 芸苔素内酯喷雾对涝害后芝麻植株生长的影响

Tab.2 Effects of brassinolide on sesame plant growth under waterlogging stress

品种 Variety	处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter	主根干质量/(g/株) Taproot dry weight	侧根数/(个/株) Lateral root number	侧根干质量/(g/株) Lateral root dry weight
商芝 189 Shangzhi 189	CK1	113.12±1.94a	2.138±0.033a	0.271 2±0.004 6a	59.39±1.27b	0.192 2±0.001 1a
	CK2	100.24±0.99d	1.946±0.019d	0.240 0±0.011 0c	55.70±1.90b	0.160 7±0.001 3c
	T1	104.76±0.76c	2.024±0.041bc	0.240 2±0.002 3c	58.55±2.07b	0.170 0±0.003 0c
	T2	109.62±3.55ab	2.122±0.073ab	0.251 7±0.002 2bc	62.84±2.24a	0.179 2±0.008 2ab
	T3	105.93±0.86bc	2.081±0.043ab	0.250 6±0.001 7bc	61.69±2.49ab	0.180 4±0.003 2b
郑芝 13 Zhengzhi 13	CK1	115.88±2.38a	2.240±0.092a	0.250 4±0.005 3a	57.32±1.79a	0.180 2±0.003 5a
	CK2	98.65±2.17b	1.962±0.035c	0.212 0±0.007 8c	46.04±0.62c	0.143 0±0.005 1c
	T1	100.10±4.45b	2.024±0.042bc	0.220 7±0.006 4bc	47.28±1.03c	0.140 0±0.002 2c
	T2	103.01±3.78b	2.086±0.013bc	0.220 2±0.007 2bc	47.72±1.46c	0.150 2±0.003 2bc
	T3	108.48±1.49a	2.142±0.085ab	0.221 0±0.006 8bc	52.91±2.13b	0.163 1±0.004 5b

注:不同小写字母表示各处理间在 0.05 水平下差异显著。下表同。

Note: Different lowercase letters indicated significant differences among the different treatments at the 0.05 level. The same as below.

叶片喷施 2,4-表芸苔素内酯处理后,商芝 189 和郑芝 13 的株高、茎粗、主根干质量、侧根干质量相比不喷施处理均有一定增长。其中,商芝 189 在 0.03 mg/kg 处理下株高、茎粗、侧根数、侧根干质

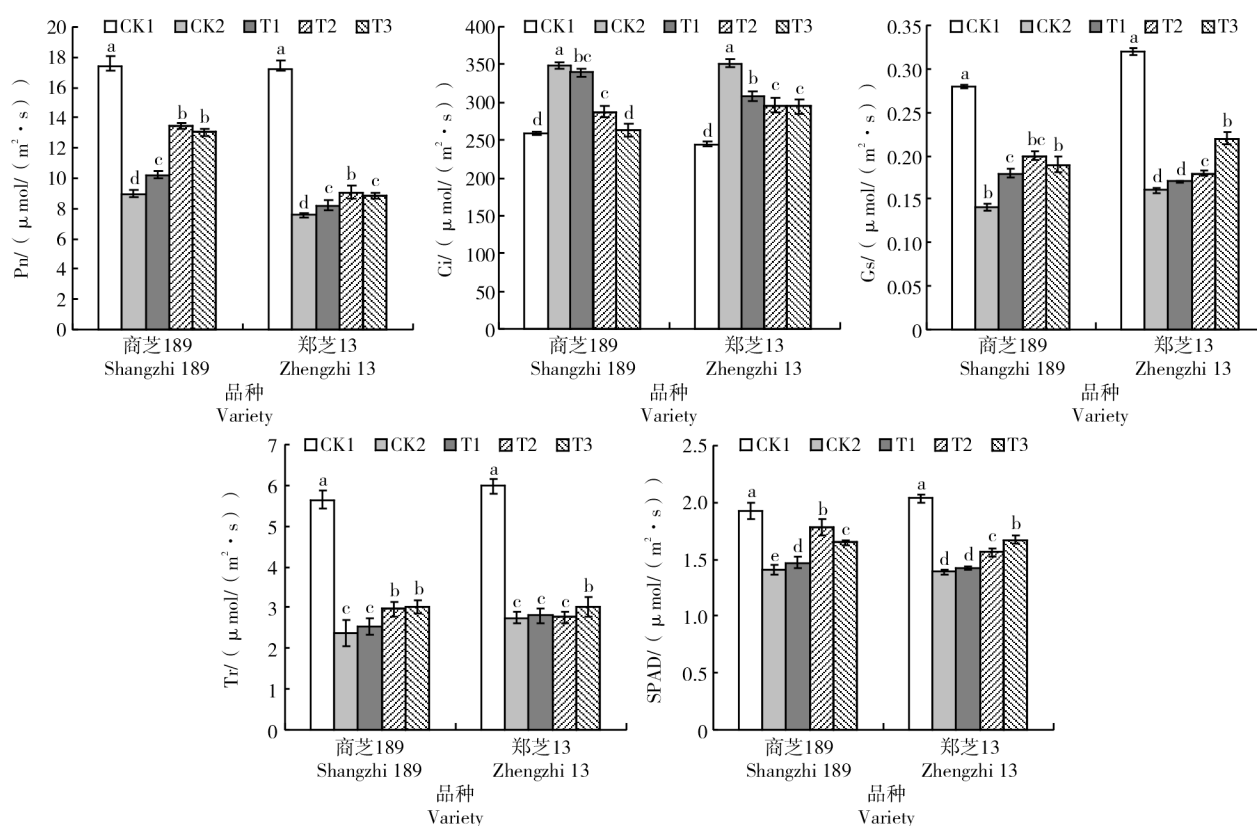
量增长最多,分别较 CK2 处理增加了 9.36%、8.66%、12.82%、12.5%;其次为 0.05 mg/kg 处理,其株高、茎粗、侧根数较 CK2 处理分别增加 5.67%、6.61%、10.75%、12.5%;0.03 mg/kg 处理和 0.05 mg/kg

处理间无显著差异,不同质量分数2,4-表油菜内酯处理间茎粗、主根干质量差异不显著。郑芝13在0.05 mg/kg处理下株高、茎粗、侧根数、侧根干质量增长最多,分别较CK2处理增加了9.96%、9.18%、14.92%、14.29%,差异显著($P<0.05$);CK2、0.01、0.03 mg/kg处理下株高、侧根数、侧根干质量无显著差异,但均显著低于0.05 mg/kg处理($P<0.05$),主根干质量各处理间差异不显著。可见,2,4-表芸苔素内酯不同质量分数对芝麻侧根

数和侧根干质量的影响较大,对主根的影响相对较小。

2.2 不同质量分数2,4-表芸苔素内酯对芝麻叶片光合作用的影响

从图1可以看出,CK1的 P_n 、 G_s 、 Tr 、SPAD值是5个处理中最高的,CK2处理的 P_n 、 G_s 、 Tr 、SPAD值是5个处理中最低的,2组间存在显著差异($P<0.05$),商芝189和郑芝13表现一致。



不同小写字母表示各处理间在0.05水平下差异显著。下同

Different lowercase letters indicated significant differences among the different treatments at the 0.05 level. The same as below

图1 芸苔素内酯喷雾对涝害后芝麻叶片光合作用的影响

Fig.1 Effect of brassinolide spray on photosynthesis of sesame leaves under waterlogging stress

喷施不同质量分数2,4-表芸苔素内酯处理后,耐渍品种商芝189的 P_n 值呈先升高后下降的趋势,0.03 mg/kg处理下 P_n 值最大,分别较CK2、0.01、0.05 mg/kg处理增加了49.83%、31.25%、3.14%; G_s 和 Tr 随质量分数的增加呈先升高后下降的趋势,且均在0.03 mg/kg处理时达到最大值; C_i 呈逐渐下降的趋势,CK2处理时 C_i 值最大,最小值为0.05 mg/kg处理。

渍害敏感品种郑芝13的 P_n 、 G_s 、 Tr 均在0.05 mg/kg处理时达到最大值,CK2处理时最

小,0.05 mg/kg处理时 P_n 、 G_s 、 Tr 分别较CK2处理提升了20.10%、37.5%、10.58%,差异均达显著水平($P<0.05$)。

商芝189的SPAD值在CK1处理下最高,CK2处理下SPAD值最低,郑芝13与之表现一致。2,4-表芸苔素内酯不同质量分数对SPAD值影响不同。随喷施质量分数的升高,商芝189叶片SPAD值呈先升后降的趋势,与CK2处理相比,0.01、0.03、0.05 mg/kg质量分数处理下商芝189叶片SPAD值分别上升4.25%、26.24%、17.02%,均达

显著水平($P<0.05$)。郑芝 13 则相应上升 2.16%, 12.22%, 20.14%。其中, 0.03、0.05 mg/kg 质量分数处理达显著水平($P<0.05$)。可见, 2,4-表芸苔素内酯具有质量分数效应, 过高反而对耐渍品种商芝 189 的 SPAD 值起抑制作用。

2.3 不同质量分数 2,4-表芸苔素内酯对芝麻叶片酶促抗氧化防御系统的影响

由图 2 可知, 不同处理下商芝 189 的 SOD、POD、CAT 活性均以 CK1 处理最高, CK2 处理的酶活性最低, 郑芝 13 与之表现一致。与 CK1 相比, CK2 处理下商芝 189 和郑芝 13 的 SOD 分别减少了 26.33%、26.96%, POD 分别降低了 18.81%、31.43%, CAT 分别降低了 29.11%、35.30%, 差异

均显著($P<0.05$)。渍害敏感品种 POD、CAT 活性降低幅度明显大于耐渍品种。

喷施 0.01、0.03、0.05 mg/kg 2,4-表芸苔素内酯的 3 个处理, 商芝 189 的 SOD、POD 活性随芸苔素内酯质量分数的增加呈先上升后下降的趋势, 0.01、0.03、0.05 mg/kg 处理下的 SOD 活性分别较 0 mg/kg 处理显著增加了 7.06%、12.60%、11.08% ($P<0.05$), POD 活性分别较 CK2 处理增加了 4.15%、10.48%、9.04%, 以 0.03 mg/kg 处理效果最佳。CAT 随喷施质量分数增加呈上升趋势, 较 CK2 处理分别显著增加 6.52%、13.90%、14.28% ($P<0.05$), 但 0.03 mg/kg 处理与 0.05 mg/kg 处理间无显著差异。

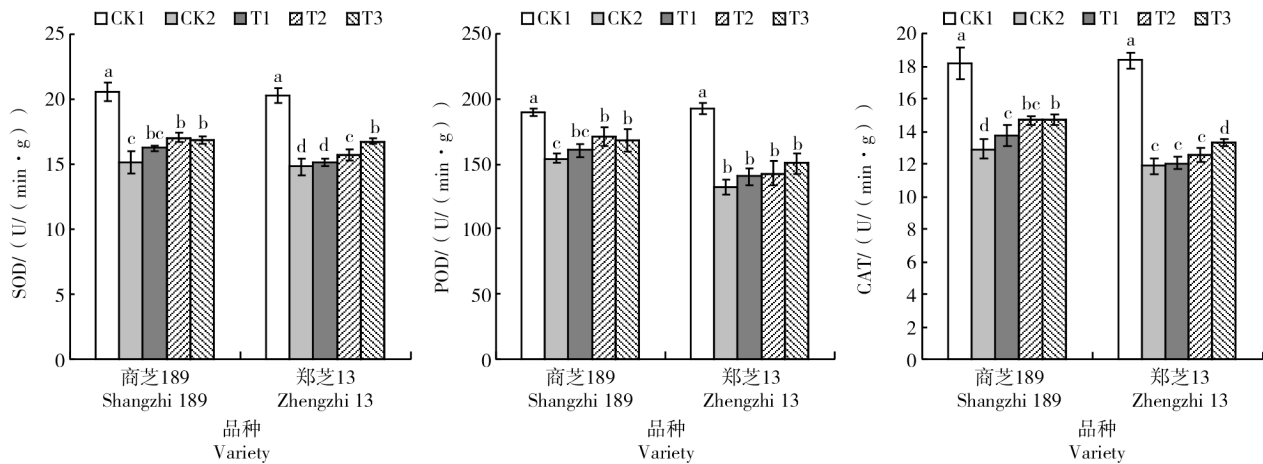


图 2 芸苔素内酯喷雾对涝害后芝麻叶片酶促抗氧化防御系统的影响

Fig.2 Effect of brassinolide spray on enzymatic antioxidant defense system of sesame leaves under waterlogging stress

郑芝 13 的 SOD、POD 活性均随芸苔素内酯质量分数的增加而上升, 0.01、0.03、0.05 mg/kg 处理下, SOD 分别较 CK2 处理增加了 1.88%、5.52%、13.01%, POD 活性分别相应增加了 6.12%、8.08%、13.88%, CAT 活性也以 0.05 mg/kg 处理表现最佳, 较 0.01 mg/kg 处理显著上升了 10.13% ($P<0.05$)。

2.4 不同质量分数 2,4-表芸苔素内酯对芝麻叶片渗透调节物质的影响

由表 3 可知, 不同处理中, 商芝 189 的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量均以 CK1 处理为最高, CK2 处理各含量为最低, 郑芝 13 与之表现一致。与 CK1 相比, CK2 处理下商芝 189 和郑芝 13 的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量分别显著降低了 29.46% 和 38.98%、29.78% 和 29.81%、42.51% 和 49.89% ($P<0.05$)。

喷施不同质量分数 2,4-表芸苔素内酯的芝麻植株, 在渍害胁迫后的生长恢复过程中, 叶片渗透调节物质出现不同程度的增加, 与 CK2 处理相比, 0.01、0.03、0.05 mg/kg 处理下商芝 189 可溶性蛋白含量分别提高了 6.96%、31.01%、21.52%, 其中 0.03 mg/kg 处理效果最为显著, 较高质量分数的 2,4-表芸苔素内酯反而会降低耐涝品种叶片可溶性蛋白的积累, 可溶性糖和脯氨酸含量与之变化规律一致。郑芝 13 可溶性蛋白含量随喷施质量分数的提高呈逐渐升高的趋势, 与 CK2 处理相比, 郑芝 13 可溶性蛋白含量分别显著提高了 8.33%、12.5%、22.92% ($P<0.05$)。其中, 0.05 mg/kg 处理效果最佳, 分别较 0.01、0.03 mg/kg 处理显著增加了 13.46%、9.26% ($P<0.05$), 可溶性蛋白含量和脯氨酸含量均以 0.05 mg/kg 处理最高。

表3 2,4-表芸苔素内酯对涝害后芝麻叶片渗透调节物质的影响

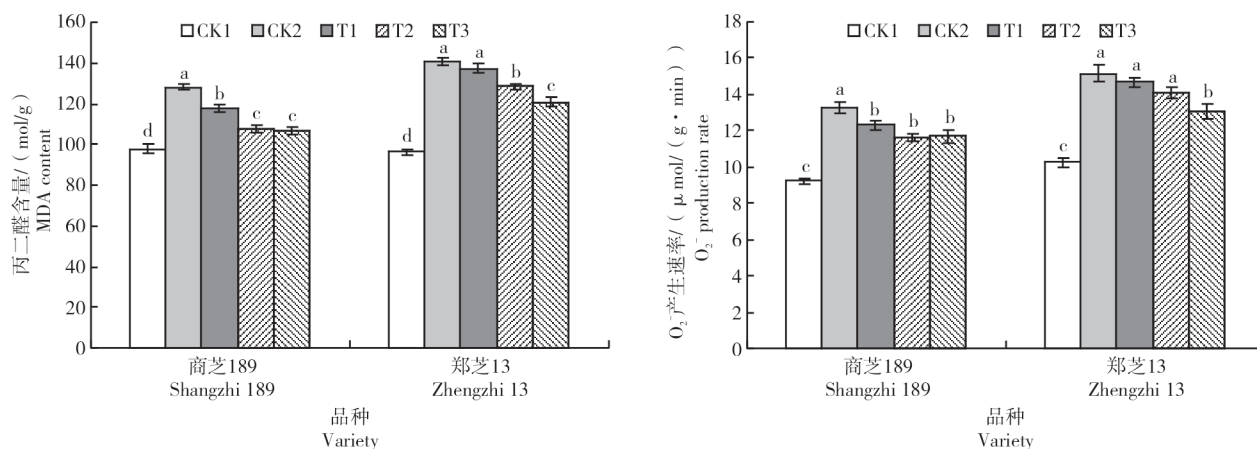
Tab.3 Effect of brassinolide on osmotic regulators of sesame leaves under waterlogging stress

品种 Variety	处理 Treatment	可溶性蛋白含量/(mg/g) Soluble protein content	可溶性糖含量/(mg/g) Soluble sugar content	脯氨酸含量/(mg/g) Proline content
商芝 189 Shangzhi 189	CK1	2.240±0.015a	10.24±0.35a	4.21±0.095a
	CK2	1.581±0.011d	7.19±0.12c	2.42±0.037c
	T1	1.692±0.045d	7.99±0.29b	2.47±0.041c
	T2	2.073±0.056b	9.81±0.19a	3.07±0.150b
	T3	1.922±0.033c	9.71±0.23a	2.95±0.150b
郑芝 13 Zhengzhi 13	CK1	2.360±0.078a	10.13±0.42a	4.65±0.072a
	CK2	1.442±0.015d	7.11±0.24d	2.33±0.0036e
	T1	1.558±0.041c	7.21±0.24d	2.50±0.120d
	T2	1.624±0.031c	7.85±0.37c	2.99±0.019c
	T3	1.772±0.041b	8.76±0.10b	3.23±0.031b

2.5 2,4-表芸苔素内酯对淹水胁迫下芝麻叶片 O_2^- 产生速率和丙二醛含量的影响

从图3可以看出,对商芝189而言,CK1处理下MDA含量最低、 O_2^- 产生速率最低;CK2处理下,MDA含量最高, O_2^- 产生速率最高。郑芝13与

之表现一致。与CK1相比,CK2处理下商芝189的MDA含量升高了31.37%, O_2^- 产生速率升高了43.71%,差异均显著($P<0.05$);郑芝13的MDA含量升高了46.07%, O_2^- 产生速率升高了47.66%,差异均显著($P<0.05$)。其中,渍害敏感品种郑芝13的丙二醛含量增幅更大。

图3 2,4-表芸苔素内酯对涝害后芝麻叶片 O_2^- 产生速率和丙二醛含量的影响Fig.3 Effect of brassinolide on O_2^- production rate and malondialdehyde content of sesame leaves under waterlogging stress

喷施不同浓度2,4-表芸苔素内酯处理后,商芝189的MDA含量呈先下降后上升的趋势,与CK2处理相比,0.01、0.03、0.05 mg/kg处理下MDA含量分别增加了8.27%、16.37%、16.85%,0.03 mg/kg处理与0.05 mg/kg处理间差异不显著,但均显著高于0.01 mg/kg处理($P<0.05$); O_2^- 产生速率相应显著下降了6.94%、12.15%、11.62%($P<0.05$),以0.03 mg/kg下降幅度最大,但与0.01、0.05 mg/kg处理间无显著差异。郑芝13的MDA含量和 O_2^-

产生速率均随喷施浓度的升高呈逐渐下降的趋势,其中,0.05 mg/kg处理下,MDA含量和 O_2^- 产生速率均为最低,分别较CK2处理显著下降了14.10%、13.73%($P<0.05$)。

3 结论与讨论

3.1 芸苔素内酯对芝麻植株生长的影响

逆境条件下,植物的形态和根系生长程度最能直接反映植株的受胁迫程度^[23]。相关研究表明,

涝害胁迫会导致芝麻株高降低、根系活力下降、叶绿素含量降低,最终导致籽粒产量下降^[24]。芸苔素内酯在涝害胁迫下能够提升植株根系活力,促进植物幼苗生长^[20]。本研究中,盛花期涝害后会造成芝麻萎蔫,株高降低,茎粗变细,主根长度及干质量、侧根数及侧根干质量均降低,品种间表现一致。这与汪妮^[24]和 SARKAR 等^[25]的研究结果类似。

喷施 2,4-表芸苔素内酯有利于渍害胁迫后芝麻植株的生长恢复,显著提高芝麻株高、茎粗、侧根数和侧根干质量,株高最大增幅 9.96%,茎粗最大增幅 8.66%,侧根数最大增幅 14.92%,但对主根干质量的影响不显著。比较发现,2,4-表芸苔素内酯对渍害胁迫后芝麻植株侧根生长的促进作用比主根更明显。可能是因为喷施 2,4-表芸苔素内酯后,根系生长的厌氧环境有所改善,侧根增加意味着植株生产能力部分恢复,这与王文泉等^[26]的研究基本一致。本试验中,2,4-表芸苔素内酯 0.03、0.05 mg/kg 处理对促进商芝 189 植株生长效果最为显著,浓度间差异不显著。0.03、0.05 mg/kg 处理对提高郑芝 13 的株茎粗、侧根数和侧根干质量效果最佳,0.05 mg/kg 处理对郑芝 13 株高的增幅最为显著。

3.2 淹水胁迫下芸苔素内酯喷雾对芝麻叶片光合作用的影响

光合作用是植物最基本的生理活动之一,对淹水胁迫反应也最为敏感^[27]。前人研究表明,当植物处于渍害胁迫时,叶绿素含量下降,光合磷酸化等过程受阻,植物光合能力下降^[28]。本研究结果表明,商芝 189 和郑芝 13 未经受渍害胁迫时叶片 Pn、Tr、Gs、SPAD 值在所有处理中最高,喷施 2,4-表芸苔素内酯的 3 个处理,Pn、Tr、Gs、SPAD 值显著高于未喷施处理。表明渍害胁迫会导致植株的光合作用受阻,这与许凤英等^[29]的研究结果基本一致。喷施 2,4-表芸苔素内酯一定程度上提高了叶片的 Pn、Tr、Gs 和 SPAD 值,保证了光合效率的稳定。本试验中,0.03 mg/kg 处理对提高商芝 189 叶片光合作用效果最为显著,0.05 mg/kg 处理对提高郑芝 13 叶片光合作用效果最为显著。

3.3 芝麻植株生理指标对淹水胁迫的响应

逆境胁迫下,植物细胞通过多种途径形成防御活性氧毒害的保护酶系统(包括 POD、SOD、CAT 等),研究发现,SOD 负责清除植物体内的超

氧自由基,POD 和 CAT 则负责清除逆境胁迫产生的 H_2O_2 ^[30],进而保持 ROS 代谢平衡,减轻逆境对植物造成的伤害^[31]。但也有研究认为,渍害胁迫会导致植株叶片抗氧化酶活性降低、叶片衰老加剧^[32]。本研究中,未经受涝害胁迫的 CK1,其 POD、SOD、CAT 活性在所有处理中最高,渍害胁迫后,喷施 2,4-表芸苔素内酯的芝麻 POD、SOD、CAT 活性均高于未喷施处理,品种间表现一致。由此可见,喷施 2,4-表芸苔素内酯可以提升芝麻叶片保护酶活性,从而在一定程度上提高芝麻植株的抗涝性。本试验中,芸苔素内酯 0.03 mg/kg 处理对提高商芝 189 酶活效果最为显著,0.05 mg/kg 处理对提高郑芝 13 酶活效果最为显著。

当植物受到淹水等逆境胁迫时,会引发一系列生理反应, O_2^- 等有害物质过量累积,MDA 等膜脂过氧化物含量增加^[33],细胞物质代谢遭到破坏^[34];未遭受胁迫或胁迫不严重时,植株体内的 MDA 含量处于较低水平。本试验中,未遭受涝害胁迫的芝麻叶片 MDA 含量最低,受渍害胁迫的 4 个处理中,未喷施 2,4-表芸苔素内酯处理的 MDA 含量最高,喷施 0.01、0.03、0.05 mg/kg 较未喷施处理 MDA 含量大幅下降,品种间表现一致。可见,喷施 2,4-表芸苔素内酯可以有效减轻渍害胁迫对芝麻植株的损伤,从而使 MDA 含量维持在较低水平。其中,0.03 mg/kg 处理对降低耐渍品种商芝 189 的丙二醛含量效果最为显著,0.05 mg/kg 处理对降低不耐渍品种郑芝 13 的丙二醛含量效果最好。

植物在淹水胁迫下,往往会通过脯氨酸、可溶性糖和蛋白质等渗透调节物质的累积^[35],以维持细胞稳定性,降低细胞损伤^[36]。李盼盼^[37]研究表明,施加过氧化钙后能够提高植株体内的可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、脯氨酸含量,从而减少水淹胁迫对玉米的伤害。本研究结果却表明,受渍害胁迫后,芝麻叶片中的渗透调节物质含量均下降,商芝 189 和郑芝 13 表现一致,这与前人研究不一致^[35],可能是因为不同作物对适应淹水胁迫产生的应激反应不同,也可能与受渍害胁迫的时长有关。喷施 2,4-表芸苔素内酯后,商芝 189 和郑芝 13 叶片渗透调节物质含量均出现一定程度的上升,0.03 mg/kg 处理时商芝 189 的可溶性糖、可溶性蛋白质、脯氨酸含量最高,渍害敏感品种郑芝 13 的可溶性糖、可溶性蛋白质、脯氨酸含量随芸苔素

内酯喷施质量分数的上升而增加,在0.05 mg/kg处理时达到最佳,表明喷施芸苔素内酯促进了芝麻叶片渗透调节物质的积累,进而提高了细胞稳定性,降低渍害损伤。

综上所述,喷施2,4-表芸苔素内酯有利于提高芝麻在渍水胁迫后的抗渍能力,但不同芝麻品种对芸苔素内酯的要求不同,其中,2,4-表芸苔素内酯喷施质量分数为0.03 mg/kg时,对耐渍品种商芝189恢复生长效果最明显,喷施质量分数为0.05 mg/kg时,对渍害敏感品种郑芝13效果最显著。本研究为芝麻在经受渍害胁迫后如何快速恢复生产、减少产量损失提供了一定的思路。但植物抗渍涝伤害是一个非常复杂的生理过程,受多重条件影响和外部环境制约,还需要进一步探索和研究。

参考文献:

- [1] FUKAO T, BAILEY-SERRES J. Ethylene-a key regulator of submergence responses in rice[J]. *Plant Science*, 2008, 175(1-2):43-51.
- [2] 黄凤洪. 花生芝麻加工技术[M]. 北京:金盾出版社,1995.
HUANG F H. Processing technology of peanut and sesame [M]. Beijing:Golden Shield Publishing House,1995.
- [3] 李春,段迎辉,琚铭,等. 我国芝麻主要育成品种遗传多样性分析及优异变异位点挖掘[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(3): 55-64.
LI C, DUAN Y H, JU M, et al. Genetic diversity analysis and elite allele mining in main sesame cultivars released in China[J]. *Journal of henan agricultural sciences*, 2022, 51(3):55-64.
- [4] 赵国志. 世界芝麻生产与贸易概况[J]. *粮食与油脂*, 2005, 18(1):31-32.
ZHAO G Z. World Sesame production and trade[J]. *Journal of Cereals & Oils*, 2005, 18(1):31-32.
- [5] 郭鹏燕,左联忠,王彩萍,等. 我国芝麻市场前景分析与对策[J]. *陕西农业科学*, 2007, 53(2):128-129.
GUO P Y, ZUO L Z, WANG C P, et al. Analysis and development strategy of sesame market in China[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2007, 53(2):128-129.
- [6] 陈和兴. 芝麻渍涝灾害及减灾措施[J]. *中国油料*, 1993, 15(4):70.
CHEN H X. Sesame waterlogging disaster and mitigation measures[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 1993, 15(4):70.
- [7] 张秀荣. 芝麻渍害及耐渍性研究现状[J]. *湖北农业科学*, 1992, 31(11):12-25.
ZHANG X R. Research status of sesame damage and water resistance[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 1992, 31(11):12-25.
- [8] 丁法元. 芝麻耐涝品种根系的初步研究[J]. *中国油料*, 1984, 6(2):25-29.
DING F Y. Preliminary study on root system of waterlogging tolerant sesame cultivars[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 1984, 6(2):25-29.
- [9] 吕伟,文飞,韩俊梅,等. 山西省芝麻病虫害发生规律及高效防控技术探索[J]. *山西农业科学*, 2023, 51(3):325-332.
LÜ W, WEN F, HAN J M, et al. Explore on Occurrence Regularity of Sesame Disease and Insect Pests, and Efficient Control Technology in Shanxi[J]. *Journal of shanxi agricultural sciences*, 2023, 51(3):325-332.
- [10] 孙建,张秀荣,张艳欣,等. 不同株型芝麻种质湿害后产量性状研究及耐湿性评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2010, 11(2): 139-146.
SUN J, ZHANG X R, ZHANG Y X, et al. Evaluation of yield characteristics and waterlogging tolerance of sesame germplasm with different plant types after waterlogging[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11(2):139-146.
- [11] 陈和兴. 芝麻渍涝灾害及减灾措施[J]. *中国油料*, 1993, 15(4):70.
CHEN H X. Sesame waterlogging disaster and disaster reduction measures[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 1993, 15(4):70.
- [12] 张秀荣. 芝麻渍害及耐渍性研究现状[J]. *湖北农业科学*, 1992, 31(11):12-25.
ZHANG X R. Research on damage and water resistance of sesame[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 1992, 31(11):12-25.
- [13] 张根峰,张翼. 渍涝胁迫对芝麻生理指标及产量性状的影响[J]. *作物杂志*, 2010(1):84-86.
ZHANG G F, ZHANG Y. Effects of waterlogging stress on physiological indices and yield traits of sesame[J]. *Crops*, 2010(1):84-86.
- [14] 吴文丽,尤春,孙兴祥,等. 4种植物生长调节剂对辣椒渍害胁迫的恢复效果[J]. *中国瓜菜*, 2020, 33(10):70-74.
WU W L, YOU C, SUN X X, et al. The recovery effect of four plant growth regulators on waterlogging stress of pepper [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020, 33(10):70-74.
- [15] 武辉,向镜,陈惠哲,等. 外源调节剂对淹涝水稻幼苗株高及碳水化合物消耗的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 149-157.
WU H, XIANG J, CHEN H Z, et al. Effects of exogenous growth regulators on plant elongation and carbohydrate consumption of rice seedlings under submergence[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1):149-157.
- [16] 郑洁,王磊. 油菜素内酯在植物生长发育中的作用机制研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2014, 16(1):52-58.
ZHENG J, WANG L. Advance in mechanism of brassinosteroids in plant development[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(1):52-58.
- [17] GHASEMI A, FARZANEH S, MOHARRAMNEJAD S, et al. Impact of 24-epibrassinolide, spermine, and silicon on plant growth, antioxidant defense systems, and osmolyte accumulation of maize under water stress[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):14648.
- [18] 孙石昂,何发林,姚向峰,等. 芸苔素内酯可提高玉米幼苗的抗旱性[J]. *植物生理学报*, 2019, 55(6):829-836.
SUN S A, HE F L, YAO X F, et al. Brassinolide improves

- the drought resistance of maize seedlings[J]. *Plant Physiology Journal*, 2019, 55(6): 829-836.
- [19] 吴雪霞, 查丁石, 朱宗文, 等. 外源 24-表油菜素内酯对高温胁迫下茄子幼苗生长和抗氧化系统的影响[J]. *植物生理学报*, 2013, 49(9): 929-934.
- WU X X, ZHA D S, ZHU Z W, et al. Effects of exogenous 24-epibrassinolide on plant growth and antioxidant system in eggplant seedlings under high temperature stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2013, 49(9): 929-934.
- [20] 束秀玉, 马江黎, 李长根, 等. 8 种不同药剂对西瓜涝害胁迫的恢复效果初探[J]. *农学学报*, 2020, 10(12): 68-72.
- SHU X Y, MA J L, LI C G, et al. The recovery effect of 8 medicaments on watermelon under waterlogging stress: a preliminary study[J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10(12): 68-72.
- [21] 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.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [22] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- ZHANG X Z. Methods of crop physiological research[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1992.
- [23] 孟蕊, 刘晔, 赵爽, 等. 砧穗互作对菊花嫁接苗耐盐性的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3): 629-642.
- MENG R, LIU Y, ZHAO S, et al. Effects of rootstock and scion interaction on salt tolerance of grafted *Chrysanthemum* seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3): 629-642.
- [24] 汪妮. 渍涝胁迫对不同基因型芝麻生理特性及产量性状的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- WANG N. Effects of waterlogging stress on physiological characteristics and yield traits of different genotypes of sesame [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009.
- [25] SARKAR P, KHATUN A, SINGHA A. Effect of duration of water-logging on crop stand and yield of sesame[J]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2016, 14(1): 1-6.
- [26] 王文泉, 梅鸿献, 郑永战, 等. 芝麻对涝害的反应及适应性变异 I. 模拟涝害胁迫下芝麻基因型间的形态、生物量及产量变化[J]. *中国油料作物学报*, 1999, 21(4): 48-52.
- WANG W Q, MEI H X, ZHENG Y Z, et al. Study on response to waterlogging and adaptative change in sesame (*Sesum indicum* L.) I. Changes of morphology, biomass and seed yield of different sesame genotypes under artificial flooding condition[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Scieives*, 1999, 21(4): 48-52.
- [27] 章毅, 蔡建国, 孙欧文, 等. 水淹胁迫下绣球光合响应机制的研究[J]. *核农学报*, 2019, 33(4): 808-815.
- ZHANG Y, CAI J G, SUN O W, et al. Research on photosynthetic responses mechanisms of *Hydrangea macrophylla* under waterlogging stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(4): 808-815.
- [28] 韩文娇, 白林利, 李昌晓, 等. 前期水淹对牛鞭草后期干旱胁迫光合生理响应的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5712-5724.
- HAN W J, BAI L L, LI C X, et al. Effects of flooding on the photosynthetic response of *Hemarthria altissima* to drought [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5712-5724.
- [29] 许凤英, 王晓玲, 张秀荣. 涝害对芝麻根系生长及光合特性的影响[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2017, 14(18): 1-4, 27, 93.
- XU F Y, WANG X L, ZHANG X R. Effects of waterlogging on root growth and photosynthetic characteristics of sesame seedlings[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2017, 14(18): 1-4, 27, 93.
- [30] 袁梦雅. 干旱胁迫对植物保护酶的影响[J]. *科技信息*, 2011(14): 501.
- YUAN M Y. Effects of drought stress on plant protective enzymes[J]. *Science & Technology Information*, 2011(14): 501.
- [31] 吴敏, 张文辉, 周建云, 等. 干旱胁迫对栓皮栎幼苗细根的生长与生理生化指标的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4223-4233.
- WU M, ZHANG W H, ZHOU J Y, et al. Effects of drought stress on growth, physiological and biochemical parameters in fine roots of *Quercus variabilis* Bl. seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4223-4233.
- [32] 张俊, 汤丰收, 臧秀旺, 等. 不同种植方式花生生育后期湿涝胁迫对产量及保护性酶系统的影响[J]. *河南农业科学*, 2014, 43(12): 46-50.
- ZHANG J, TANG F S, ZANG X W, et al. Effect of waterlogging stress on peanut yield and protective enzyme system in different planting patterns[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(12): 46-50.
- [33] 庞宏东, 胡兴宜, 胡文杰, 等. 淹水胁迫对枫杨等 3 个树种生理生化特性的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(10): 15-20.
- PANG H D, HU X Y, HU W J, et al. Effects of waterlogging stress on the physiological and biochemical characteristics of three tree species[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, 38(10): 15-20.
- [34] 张洪鹏, 张盼盼, 李冰, 等. 烯效唑对淹水胁迫下大豆农艺性状及生理生化指标的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2017, 39(5): 655-663.
- ZHANG H P, ZHANG P P, LI B, et al. Effects of uniconazole on alleviation of waterlogging stress in soybean[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(5): 655-663.
- [35] WANG J, SUN H, SHENG J J, et al. Transcriptome, physiological and biochemical analysis of *Triarrhena sacchariflora* in response to flooding stress[J]. *BMC Genetics*, 2019, 20(1): 88.
- [36] 聂功平, 陈敏敏, 杨柳燕, 等. 植物响应淹水胁迫的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(18): 57-64.
- NIE G P, CHEN M M, YANG L Y, et al. Plant response to waterlogging stress: research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(18): 57-64.
- [37] 李盼盼. 水淹胁迫下过氧化钙对玉米苗期生理生化特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- LI P P. Effects of calcium peroxide on physiological and biochemical characteristics of maize seedlings under water flooding stress [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.