

赵黎明,段绍彪,项洪涛,等. 盐胁迫对水稻种子持续萌发及幼苗光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(1):86-94.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.01.013

盐胁迫对水稻种子持续萌发及幼苗光合特性的影响

赵黎明¹,段绍彪¹,项洪涛²,赵卉林¹,史金华¹,许益澄¹,刘智楷¹,谭镇林¹,黄钧宇¹

(1. 广东海洋大学滨海农业学院,广东湛江 524088; 2. 黑龙江省农业机械工程科学研究院绥化分院,黑龙江绥化 152054)

摘要:为了揭示不同盐浓度胁迫下水稻种子持续性萌发规律及其播后幼苗光合特性的变化。以粳禾丝苗为试验材料,设置 6 个盐浓度(0、40、80、120、160、200 mmol/L),于发芽盒中进行持续性盐胁迫萌发试验,研究盐胁迫对种子持续萌发的萌发势、萌发率及萌发种子阴干播种后幼苗生长和光合特性的影响。结果表明,持续萌发降低了萌发势和萌发率,降幅均随持续萌发次数增加而增加;盐浓度的增加导致第 1、3 批次试验的每日最大萌发率降低,第 1 批次试验的每日萌发率峰值出现时间延迟,而第 2 批次试验中处理间差异较大。萌发势随盐浓度增加而降低,萌发率在 40 mmol/L 盐处理下呈现增加趋势,增幅随持续萌发次数增加而降低,≥80 mmol/L 则抑制种子萌发。在萌发动态上,种子萌发随时间变化均可用 Logistic 方程拟合,其中理论最大萌发率(K)和最大萌发速率(V_{max})随着盐浓度增加而降低,而达到最大萌发速率的时间(T_0)和萌发周期(T_{max})均随着盐浓度增加而增加。与 0 mmol/L 相比,40 mmol/L 盐浓度胁迫能够提高第 1 批次种子的出苗率,增加幼苗株高和地上部生物量,其中地上部生物量增幅为 3.54%~6.05%;而在第 2、3 批次试验中,低盐胁迫已经失去对出苗率和幼苗生长的促进优势。在光合特性上,盐胁迫会导致水稻幼苗叶片 SPAD 值和叶绿素含量降低,但降幅强度因叶龄期和萌发批次不同而异。综上所述,低盐胁迫能够促进水稻种子持续萌发及播后幼苗生长,而高盐胁迫抑制种子持续萌发、幼苗生长及叶片光合特性的提高。

关键词:盐胁迫;水稻;种子萌发;幼苗;光合特性

中图分类号:S511.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)01-0086-08

目前,我国盐渍土总面积约为 0.99 亿 hm^2 ,且多为滨海和内陆盐碱地,其中广东省盐碱地面积将近 500 万亩(1 亩 = 667 m^2),沿海滩涂盐碱地约 300 万亩。水稻作为中度盐敏感作物,在盐碱地上有一定的种植面积^[1-2]。然而,在盐碱地种植水稻会影响其正常生长发育,严重时造成水稻停止生长甚至死亡,对高产稳产造成严重影响^[3-4]。因此,研究种子萌发期耐盐性有助于耐盐性鉴定和耐盐新品种的培育,利于盐渍地开发和推广盐地水稻种植。种子作为一种主要的繁殖手段,种子萌发是种子生活史的第一阶段,也是作物生命周期中最关键和最脆弱的阶段,决定作物生长状态,影响最终产量。在实际生产中,水稻播种后通常会受到各种恶劣环境条件的影响,其中在应对盐渍化环境胁迫响应时,种子萌发阶段必然最先受到盐分胁迫,从而影响后

期植株生长发育。有研究表明,盐胁迫容易抑制种子萌发成苗,造成烂种和死苗,因此盐渍环境下种子能否发芽成苗是决定后期植株完成整个生育过程的重要阶段^[5-7]。盐胁迫会导致种子、种苗和幼苗体内缺水,造成细胞分裂分化与胚生长停止,从而抑制种子萌发^[8-10]。相关研究表明,盐胁迫能够阻碍种子萌发和植物发芽,导致植物发育能力和生产力下降甚至死亡,造成种子和幼苗内部生理代谢紊乱,进而影响幼苗生长发育及光合生理特性^[11-14],并认为种子萌发期和幼苗期是作物进行耐盐性筛选的关键期^[15-16]。关于萌发的定义因人而异,种子检验人员常把萌发定义为胚根的动态突起,而一些栽培人员则认为萌发就是出苗。在机械化生产的今天,适于水稻机械化的播种萌发标准通常是指“破胸”或“露白”,又或者是发芽初期,否则待种子芽和根长出后再进行机械播种,不仅会影响播种密度,还会增加芽和根的损伤率,导致播种后不出苗。目前,虽然关于盐胁迫对种子发芽影响的研究较多^[17-19],但对于盐胁迫下水稻种子持续萌发及其播种后幼苗生长与叶片光合特性变化的研究相对较少。本研究考察了不同盐浓度胁迫对种子

收稿日期:2024-01-26

基金项目:广东海洋大学科研启动经费资助项目(编号:060302052010);

湛江市创新创业团队引育“领航计划”(编号:2020LHJH01)。

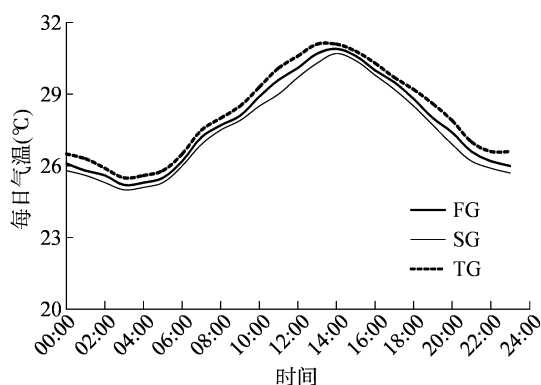
作者简介:赵黎明(1980—),男,黑龙江海伦人,博士,副研究员,主要从事作物高产高效与智控抗逆研究。E-mail: nxyzm@gdou.edu.cn。

持续萌发特性及其播种后幼苗生长动态与叶片光合特性的影响,旨在为盐渍地种植水稻和品种耐盐性鉴定提供新的参考思路。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及处理

以籼型常规水稻品种粤禾丝苗为试验材料,该品种由广东省农业科学院水稻研究所选育,晚造平均全生育期 114 ~ 115 d,2014 年广东省品种审定并推广。试验于 2022 年 6 月在广东海洋大学霞山校区实验室内进行。选取大小均匀且饱满的水稻种子,利用 SLY - C 型微电脑自动数粒仪数出 500 粒,均匀放入铺有 2 层滤纸的发芽盒(长 × 宽 × 高为 12 cm × 12 cm × 5 cm)中,以 NaCl 溶液模拟盐胁迫,设置 0 mmol/L(对照,以蒸馏水代替)、40、80、120、160、200 mmol/L 浓度水平,每个处理设置 3 次重复,加 NaCl 前每盒种子先用 50 mL 25% 氰烯菌酯 2 000 倍液进行杀菌处理 3 h,杀菌后除去杀菌液并用蒸馏水洗种 2 次,更换滤纸后每盒加入对应浓度的 NaCl 溶液各 50 mL,每 24 h 更换 1 次滤纸和 NaCl 溶液。试验在实验室内变温环境条件下,其中 06:00—18:00 时用 LED 灯进行光照,温度变化见图 1,数据来自于无线温度记录仪(型号 CS - TTHH40)。以胚根露出种皮且小于 2 mm 作为萌发标准,每天早中晚各调查 1 次,直至再无萌发种子为止,将所有选出的符合萌发标准的种子在常温下阴干 5 d,将陆续达到 5 d 阴干标准的种子放于塑封袋常温保存,待全部达到阴干标准后,按照第 1 批次萌发试验(FG)步骤继续进行第 2 批次萌发试验(SG),同样将第 2 批次萌发种子阴干,继续进行第 3 批次萌发试验(TG)(图 1)。



FG 表示第 1 批次萌发试验; SG 表示第 2 批次萌发试验;
TG 表示第 3 批次萌发试验

图1 萌发期间每日 24 h 平均气温变化

随机抽取每一批次萌发后的阴干种子 30 粒,采用发芽盒进行播种,底土(田间常规用土)450 g,浇透等量肥水后,进行播种,覆土 0.4 ~ 0.6 cm,与萌发试验的 3 次重复相对应,用于幼苗出苗动态、地上部生长及叶片光合特性情况分析,具体流程见图 2。

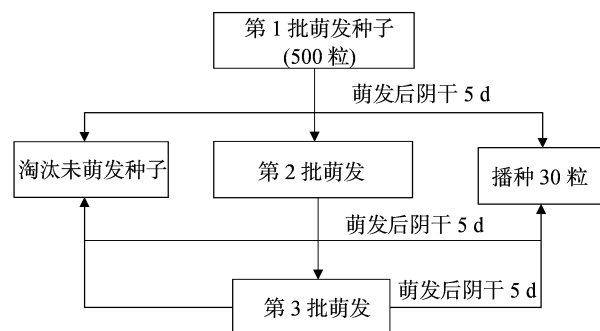


图2 水稻种子持续萌发流程

1.2 测定指标与方法

1.2.1 萌发势及萌发率测定 从萌发第 1 天开始,每天早中晚调查种子萌发数,计算公式如下:

$$GP = \frac{\sum_{i=1}^3 G_i}{N} \times 100\%;$$

$$GR = \frac{\sum_{i=1}^{10} G_i}{N} \times 100\%。$$

式中:GP 和 GR 分别为萌发势和萌发率; G_i 为在时间为 t d 的萌发种子数; N 为供试种子数。

1.2.2 出苗率及保苗率测定 于每批次播种后调查出苗情况,每天调查 1 次,直至 3 叶 1 心期,计算公式如下:

$$\text{出苗率} = \frac{\sum_{i=1}^{10} S_i}{M} \times 100\%;$$

$$\text{保苗率} = \frac{\text{3 叶 1 心期幼苗数量}}{M} \times 100\%。$$

式中: S_i 为在时间为 t d 的出苗数; M 为播种数。

1.2.3 形态指标测定 于出苗后 1.1 叶、2.1 叶和 3.1 叶进行取样,每个时期随机取 15 株,将水稻植株冲洗干净,选代表性植株 10 株用直尺测定每株株高,去除根系部分,包装后在 105 °C 烘箱下杀青 30 min,75 °C 烘干 48 h 后测定地上部干重。

1.2.4 叶片 SPAD 值和叶绿素含量测定 在进行“1.2.3”节中步骤的同时,采用 SPAD - 502PLUS 叶绿素测量仪分别测定各叶龄期最上部展开叶的 SPAD 值,每个处理测定 10 株苗,并根据李合生的方法^[20]测定 3 个叶龄期绿色展开叶的总叶绿素含量。

1.3 数据处理与分析

采用 Logistic 生长曲线方程对萌发率进行拟合,方程为 $Y = K / (1 + e^{a+bx})$,式中: Y 为萌发率(%); X 为萌发后时间(d); K 为理论最大萌发率(%); a 、 b 为待定参数,且 $b < 0$ 。对式 Logistic 生长曲线方程

求一阶导数可得萌发速率方程 $VR = -Kbe^{a+bX} / (1 + e^{a+bX})^2$, 通过对该方程计算一阶和二阶导数可以得到达到最大萌发速率时间 (T_0)、最大萌发速率 (V_{max}) 和种子萌发周期 (T_{max}), 各参数计算公式分别为 $T_0(d) = -a/b$; $V_{max}(\%/d) = -bK/4$; $T_{max}(d) = [\ln(1/19) - a]/b$ 。

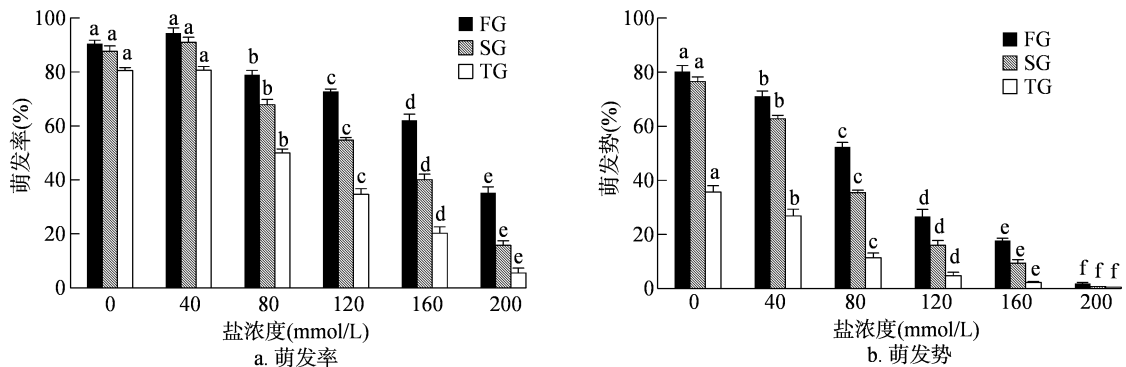
采用 Microsoft Excel 2019 进行原始数据处理和参数计算, 用 DPS 7.05 统计软件对数据进行差异显著性分析 ($\alpha = 0.05$) 和 Logistic 生长曲线模型建立。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对水稻种子萌发率和萌发势的影响

由图 3-a、图 3-b 可知, 从萌发批次看, 萌发势和萌发率均随着持续萌发次数的增加而呈降低趋势, 与对照相比, 各批次萌发势和萌发率 (40 mmol/L 除外) 整体降低幅度均表现为 $FG <$

$SG < TG$, 其中 80 ~ 200 mmol/L 盐浓度下萌发率平均降幅分别表现为 $FG(31.23\%) < SG(49.89\%) < TG(65.76\%)$ 。从不同盐浓度处理看, 萌发势随盐浓度的增加而降低, 3 个批次试验的萌发势平均降幅表现为 40 mmol/L (18.08%) < 80 mmol/L (52.19%) < 120 mmol/L (77.53%) < 160 mmol/L (86.51%) < 200 mmol/L (99.06%); 而萌发率则是先升高后降低, 说明 40 mmol/L 盐浓度能够促进水稻种子萌发, 但该促进作用随持续萌发次数增加而逐渐降低, 表现为 $FG(4.21\%) > SG(3.88\%) > TG(0.15\%)$, 相比之下, 高盐浓度 (≥ 80 mmol/L) 则抑制了种子萌发, 3 个批次试验的萌发率平均降幅表现为 80 mmol/L (24.53%) < 120 mmol/L (38.29%) < 160 mmol/L (53.83%) < 200 mmol/L (79.19%), 与萌发势相比发现, 随着盐浓度的增加, 盐胁迫对萌发势的负向作用效果强于萌发率。



柱上不同小写字母表示同一批次萌发试验不同盐浓度处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。图 6、图 7 同

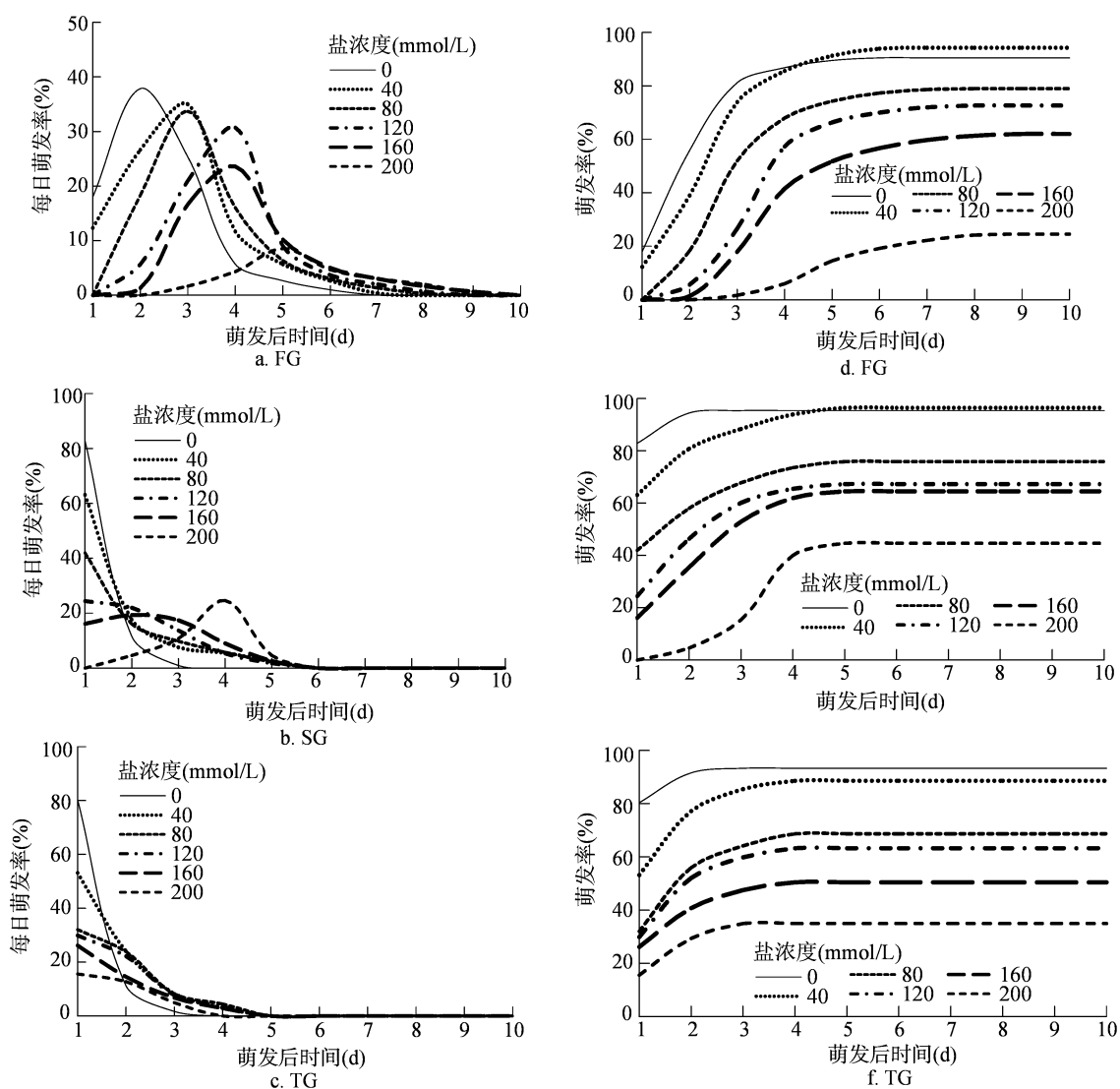
图 3 盐胁迫对水稻种子萌发率和萌发势的影响

2.2 盐胁迫对水稻种子每日和每批次萌发率动态变化的影响

从图 4-a、图 4-b、图 4-c 可以看出, 水稻种子每日萌发率变化曲线差异较大, 在 3 个批次萌发试验中, FG 批次每日萌发率呈单峰曲线变化, 且峰值大小随盐浓度增加而降低, 且峰值产生时间向后推迟; SG 批次在 0 ~ 120 mmol/L 盐浓度下每日萌发率随时间变化呈下降趋势, 而在 160 ~ 200 mmol/L 盐浓度之间则呈单峰曲线变化趋势; 至 TG 批次, 每日萌发率均随时间推移而呈下降趋势, 下降幅度随盐浓度增加而变缓。上述变化说明, 盐浓度增加能够降低 FG 批次每日最大萌发率和延迟峰值出现时间, 延缓 TG 批次每日最大萌发率的下降幅度。从图 4-d、图 4-e、图 4-f 可以看出, 3 个批次种子萌发率始终呈现先迅速升高后趋于平缓不变的变化趋势, 在 FG 和 SG 批次中, 40 mmol/L 盐处理在萌

发后 4 ~ 10 d 的萌发率均超过对照, 以 FG 批次作用效果明显, 其余盐处理的萌发率均随盐浓度增加而降低, 这与对应由最初种子数计算得来的萌发率变化相一致 (图 3-a), 但不同的是, 在 TG 批次中已经体现不出低浓度盐胁迫对萌发率的促进优势。

由表 1 可知, 水稻种子萌发 Logistic 方程拟合及其特征参数表明, 所有模拟方程的决定系数 (r^2) 在 0.997 0 ~ 0.999 8 之间, 均达到极显著水平, 表明所建立的方程对表达种子萌发过程是可靠的, 可以利用 Logistic 方程对各批次种子萌发过程进行分析。盐胁迫下种子理论最大萌发率 (K) 和最大萌发速率 (V_{max}) 随盐浓度增加而降低, 在 0 ~ 200 mmol/L 范围内, 萌发率波动范围随持续萌发次数增加而降低, 其中 FG 波动范围为 23.49% ~ 88.95%, SG 波动范围为 44.82% ~ 95.38%, TG 波动范围为 35.06% ~ 93.28%; 而 V_{max} 值在 40 ~ 120 mmol/L 浓



图中萌发率计算对应的是单批次供试种子数

图4 盐胁迫下水稻种子每日和每批次萌发动态变化

度范围内相对稳定,并在短时间内达到各自盐处理的 V_{\max} 值。相比之下,达到最大萌发速率时间 (T_0) 和萌发周期 (T_{\max}) 随盐浓度增加而增加,且在有限盐浓度范围内随着持续萌发次数增加而降低,说明盐胁迫有抑制萌发、降低萌发率和延长萌发时间的作用。

2.3 盐胁迫对播种后出苗进程和保苗率的影响

从图 5-a、图 5-b、图 5-c 可以看出,与对照相比,40 mmol/L 盐处理 FG 批次萌发种子对播种后出苗率有促进作用,80 mmol/L 盐处理虽然在播种后 3~8 d 出苗率高于对照,但受死苗数量影响,播种后 9~10 d,最终出苗率已经低于对照,余下 FG 批次盐处理以及 SG、TG 批次盐处理萌发种子的播后出苗率均随盐浓度增加而降低,且降幅效果随持

续萌发次数增加而增加,整体以播种后 3 d 降幅效果最大,说明低盐浓度下萌发的种子能够增加播种后出苗率,而高盐浓度则显著抑制了萌发种子的出苗率。从最终保苗率(图 5-d)上看,对照的保苗率表现为 $SG > FG > TG$,其中 SG 和 FG 出苗率较 TG 增幅分别为 29.74% 和 20.14%;其余盐处理下出苗率均表现为 $FG > SG > TG$,尤其是当盐浓度达到 200 mmol/L 时,TG 保苗率为 0。

2.4 盐胁迫对播种后地上部幼苗生长的影响

从图 6 可以看出,播种后株高和地上部生物量均随持续萌发次数增加而降低,在 FG 批次试验中,40 mmol/L 盐处理增加了株高和地上部生物量,其中 1.1~3.1 LA 期地上部生物量较对照增幅 3.54%~6.05%,增幅效果高于株高。然而,在 80~

表 1 盐胁迫下水稻种子萌发 Logistic 曲线方程及特征参数

萌发批次	盐浓度 (mmol/L)	Logistic 模拟方程	r^2	T_0 (d)	V_{max} (%/d)	T_{max} (d)
FG	0	$Y = 88.9497 / [1 + e^{(3.1157 - 1.7781X)}]$	0.9991	1.75	39.54	3.41
	40	$Y = 89.8708 / [1 + e^{(3.2178 - 1.4687X)}]$	0.9985	2.19	33.00	4.20
	80	$Y = 78.4157 / [1 + e^{(4.3511 - 1.6380X)}]$	0.9970	2.66	32.11	4.45
	120	$Y = 72.7713 / [1 + e^{(6.1188 - 1.6884X)}]$	0.9984	3.62	30.72	5.37
	160	$Y = 64.3035 / [1 + e^{(5.3939 - 1.4434X)}]$	0.9975	3.74	23.20	5.78
	200	$Y = 23.4890 / [1 + e^{(6.2185 - 1.2939X)}]$	0.9978	4.81	7.60	7.08
SG	0	$Y = 95.3773 / [1 + e^{(0.8385 - 2.7294X)}]$	0.9998	0.31	65.08	1.39
	40	$Y = 96.7095 / [1 + e^{(0.3028 - 0.9045X)}]$	0.9974	0.32	22.74	3.45
	80	$Y = 81.1907 / [1 + e^{(0.7867 - 1.1017X)}]$	0.9986	0.71	22.36	3.39
	120	$Y = 67.4956 / [1 + e^{(1.8992 - 1.3022X)}]$	0.9991	1.46	21.97	3.72
	160	$Y = 64.7934 / [1 + e^{(2.4572 - 1.3270X)}]$	0.9994	1.85	21.50	4.07
	200	$Y = 44.8150 / [1 + e^{(7.9840 - 1.5757X)}]$	0.9972	5.07	17.65	6.94
TG	0	$Y = 93.2826 / [1 + e^{(0.3520 - 2.1775X)}]$	0.9998	0.16	50.78	1.51
	40	$Y = 88.6908 / [1 + e^{(1.0914 - 1.4948X)}]$	0.9996	0.73	33.14	2.70
	80	$Y = 68.6826 / [1 + e^{(1.6743 - 1.5122X)}]$	0.9982	1.11	25.97	3.05
	120	$Y = 63.2743 / [1 + e^{(1.7164 - 1.5026X)}]$	0.9990	1.14	23.77	3.10
	160	$Y = 50.6105 / [1 + e^{(1.8992 - 1.3069X)}]$	0.9991	1.45	16.54	3.71
	200	$Y = 35.0593 / [1 + e^{(2.3692 - 1.3927X)}]$	0.9987	1.70	12.21	3.82

注： r^2 表示决定系数； T_0 表示达到最大萌发率时间； V_{max} 表示最大萌发速率； T_{max} 表示萌发周期。

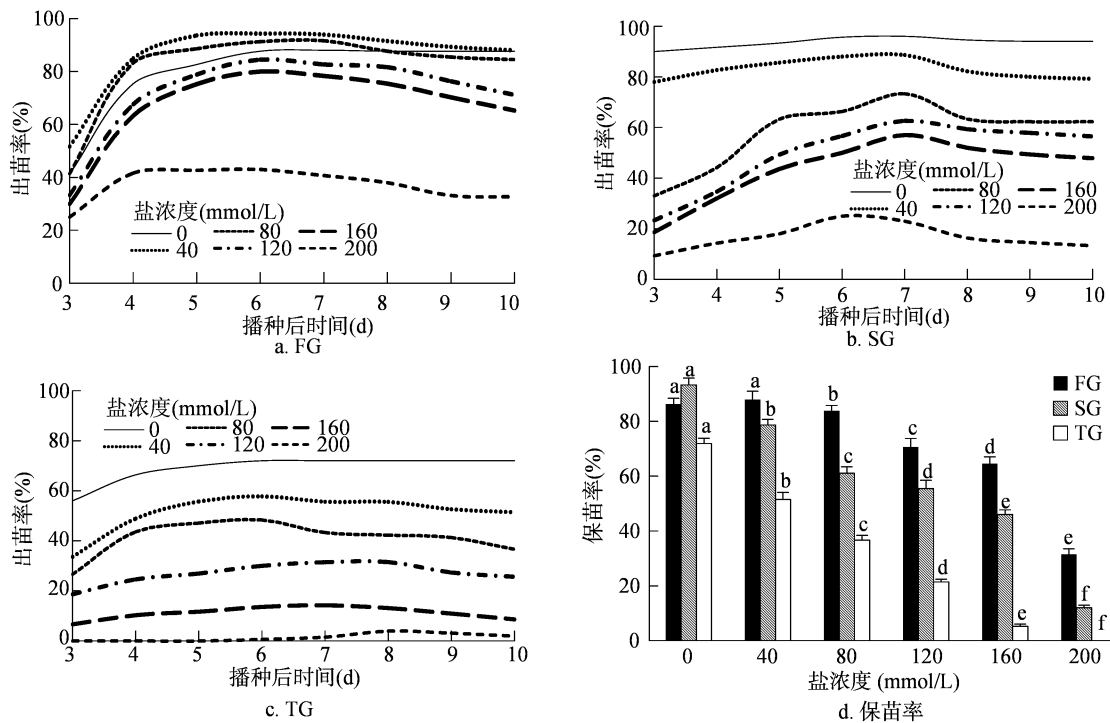


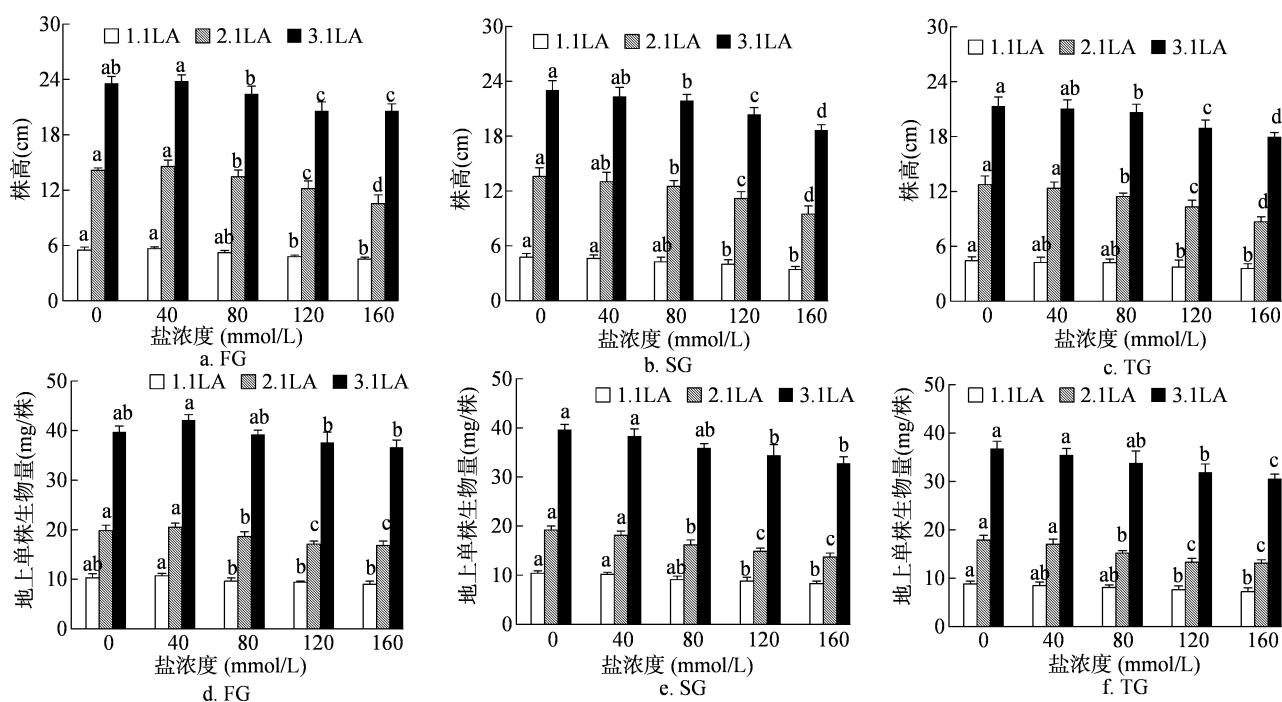
图 5 盐胁迫下萌发种子播种后出苗率和保苗率的变化

120 mmol/L 盐浓度范围内,株高和地上部生物量则均呈降低趋势,与对照相比,降幅随盐浓度增加而增加,且降幅效果均表现为 2.1 LA > 1.1 LA > 3.1

LA,盐处理在 1.1 LA、2.1 LA 和 3.1 LA 期的株高平均降幅分别为 15.79%、18.59%和 11.66%,地上部生物量平均降幅分别为 11.17%、13.26%和

5.98%。相比之下,在 SG 和 TG 批次试验中,40 mmol/L 盐处理则失去了增加株高和地上部生物量的优势,且各盐浓度处理均降低了株高和地上部

生物量。此外,各批次试验降幅效果整体表现为 SG > TG > FG。



1.1 LA 表示 1.1 叶龄; 2.1 LA 表示 2.1 叶龄; 3.1 LA 表示 3.1 叶龄。下图同

图6 盐胁迫下萌发种子播种后地上部幼苗株高和地上部生物量的变化

2.5 盐胁迫对播种后幼苗叶片 SPAD 值和叶绿素含量的影响

由图 7 可知,从整体上看,阴干的萌发种子播种后叶片 SPAD 值和叶绿素含量均随持续萌发次数增加而降低,其中在 FG 批次中,40 mmol/L 盐处理增加了 1.1 LA 期叶片 SPAD 值和叶绿素含量,而 2.1 LA 和 3.1 LA 期则均随盐浓度增加而降低。叶片 SPAD 值在 FG 批次中表现为 2.1 LA > 3.1 LA > 1.1 LA,在 SG 和 TG 批次中均以 3.1 LA 期 SPAD 值最低(图 7-a、图 7-b、图 7-c);而叶绿素含量在 FG 批次中则表现为 3.1 LA > 2.1 LA > 1.1 LA,在 SG 和 TG 批次中则表现为 2.1 LA > 1.1 LA > 3.1 LA,其中 SG 批次叶绿素含量降幅均随盐浓度增加而增加(图 7-d、图 7-e、图 7-f)。从不同批次降幅效果上看,与 FG 相比,降幅效果表现 TG > FG,且 2 个批次各盐浓度处理降幅效果均表现为 1.1 LA < 2.1 LA < 3.1 LA。上述数据说明,盐胁迫能够降低水稻幼苗叶片叶绿素含量,降幅效果受叶龄期和萌发批次影响较大。

3 讨论

水稻种子萌发是其生命周期的起始,对播种后

幼苗的生长发育起决定性作用。种子活力是决定种子萌发的关键因素,而种子萌发率、发芽势和发芽指数能够反映出种子活力大小,所以通常会吧萌发阶段的发芽势、发芽率和发芽指数作为衡量种子品质和萌发质量的重要指标^[15-16]。然而种子在萌发过程中易受到光照、温度、水分、盐分等外界环境因子的影响^[21-22],因此,逆境条件下种子萌发的优劣直接影响幼苗生长发育^[7,23]。盐分胁迫作为滨海地区最严重的非生物胁迫之一,是影响种子萌发和幼苗生长的重要环境因子,相关研究表明,在种子萌发期常伴有盐害发生,尤其是高盐胁迫会削弱种子吸水能力,导致种子萌发受到抑制,降低种子发芽率和发芽势,并随盐浓度增加而下降^[24-25],说明发芽率、发芽势大小与植物耐盐能力密切相关^[9-10],因此,发芽率与发芽势指标通常被用作种子萌发阶段的耐盐评判标准^[8,26-27]。在本研究中,低盐浓度(40 mmol/L)胁迫能够促进最终萌发率的增加,但随着持续萌发次数的增加,该作用逐渐减弱;而高盐浓度(≥ 80 mmol/L)胁迫则会抑制种子萌发,萌发势和最大萌发速率随着盐浓度增加而降低,达到最大萌发速率时间随盐浓度增加而增加。

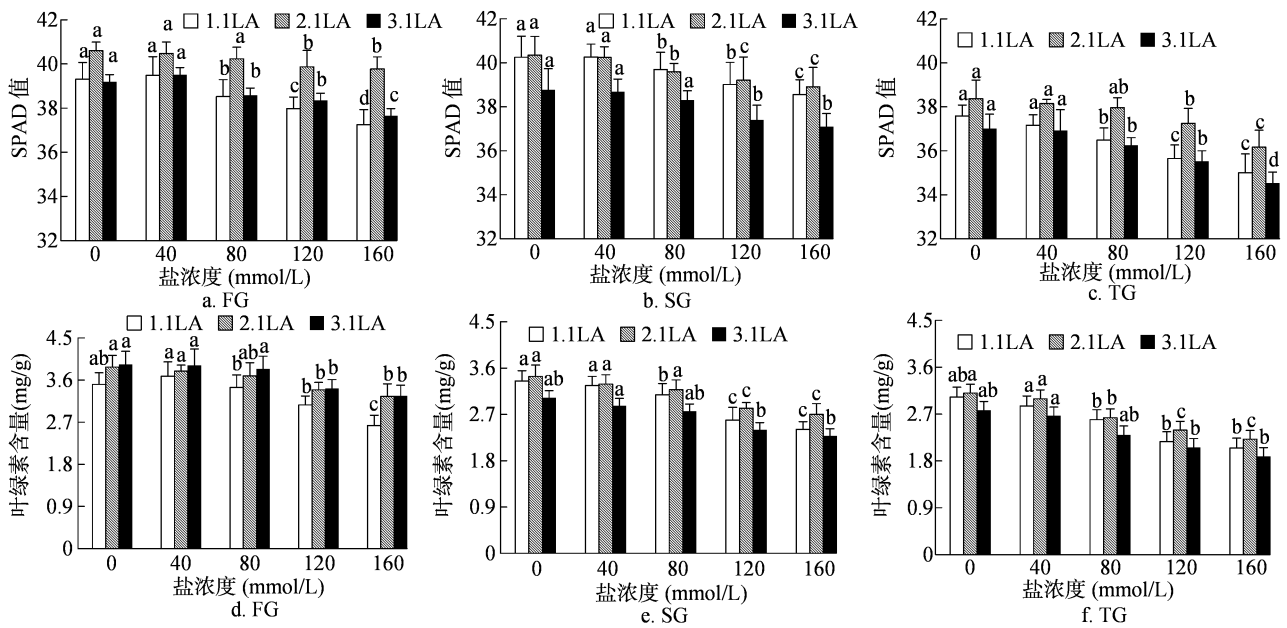


图7 盐胁迫对萌发种子播种后叶片 SPAD 值和叶绿素含量的影响

在水稻幼苗发育过程中,离乳期之前所需的物质及能量大部分是由种子中贮藏的有机物提供,因此萌发种子播种后的出苗率、株高及地上部干重能够体现出水稻种子向幼苗的转化差异,当早期幼苗具有良好的地上部生长状态时,后期才可以表现出更好的生长状况。相关研究表明,种子萌发质量影响出苗率和幼苗生长状态,在萌发阶段受到高浓度盐胁迫,会导致出苗障碍,抑制幼苗生长,降低幼苗地上部干物质积累^[28-30],且种子活力和幼苗生长随盐浓度升高而降低^[15,31]。在本研究中,40 mmol/L 盐胁迫能够促进首批萌发种子播种后的出苗率和幼苗地上部生长,但这种促进作用随着萌发次数的增加而逐渐减弱,而 ≥ 80 mmol/L 盐胁迫则会抑制幼苗地上部生长。试验中也观察到,种子萌发对盐胁迫虽然具有一定的忍耐力,但过高的盐浓度胁迫会严重抑制种子萌发,甚至导致种子不萌发,并且在盐胁迫下萌发种子播种后死苗数量也会随萌发时盐浓度的增加而增加,导致最终的成活苗比率极低。

叶绿素是植物进行光合作用所必需的色素,在一定程度上其含量的高低会直接影响植物叶片的光合作用,破坏叶绿体结构,会降低叶绿素含量,导致光合作用降低,进而影响植物生命活动^[32-34]。相关研究表明,盐胁迫能够降低地上部生物量积累,阻止叶绿素合成,进而抑制水稻光合作用和植株生长,最终导致产量下降^[35-37]。在本研究中,盐胁迫

会导致水稻幼苗叶片叶绿素含量降低,且降幅强度因叶龄期和萌发批次的不同而不同。然而,在试验中笔者也观察到,FG 批次叶片 SPAD 值在低盐浓度低叶龄期有增加趋势,而叶绿素含量则是降低的,且在 SG 和 TG 批次中不同盐浓度对幼苗叶片 SPAD 值和叶绿素含量的作用效果也存在一定的差异,该差异的产生一方面可能是由于叶片 SPAD 值和叶绿素测定部位不同造成的;另一方面可能是所选的种子均是各批次萌发的种子,在经历盐胁迫后,萌发种子本身的营养状况、再次发芽能力以及生长后秧苗素质强弱均会产生差异性变化,且目前类似相关研究较少,因此,笔者下一步将针对试验中产生的差异及相应机制做进一步深入研究。

综上所述,本试验是以机械化育苗播种和直播稻播种为试验思考前提进行的研究,一是考虑到萌发是建立在淘汰未萌发种子的基础上进行的,因此如果对每个批次单独计算出的萌发率和萌发势进行比较是不科学的,为此,在计算萌发势和萌发率时,均以最初的供试种子数为参考,这样比较更具实际意义;二是考虑到室外育苗种植时昼夜温度是变化的,并且在各批次持续萌发期间温度波动不大的情况下,将每个批次萌发试验以单独形式存在,分析了每个批次的每日萌发率和萌发率的动态规律变化,并进行了 Logistic 曲线方程模拟,通过对其特征参数分析来判断种子萌发动态稳定性和科学性。此外,在盐胁迫下对水稻种子进行持续萌发试

验,所得出的萌发势和萌发率及其播种后出苗率指标变化能否作为水稻抗盐能力的评判标准,这也是笔者下一步针对多个品种进行持续性耐盐研究的重点方向,争取为移栽稻种子萌发期耐盐性鉴定和直播稻品种耐盐性鉴定体系提供理论补充。

4 结论

持续萌发会导致水稻种子萌发势和萌发率降低;不同盐浓度胁迫会降低萌发势,其中 40 mmol/L 盐胁迫能够增加萌发率、提高出苗率和促进幼苗地上部生长,但这种促进作用随着萌发次数增加而逐渐减弱,且盐浓度超过 80 mmol/L 会抑制种子萌发。各批次种子萌发及其阴干后种子的持续萌发动态均可用 Logistic 方程拟合,相关参数中最终萌发率和最大萌发速率随盐浓度增加而降低,而达到最大萌发速率时间随着盐浓度增加而增加。盐胁迫对第 2 批次持续萌发的抑制效果强于首次和第 3 批次,各批次萌发种子播后盐胁迫对 2.1 叶龄期幼苗生长的抑制效果大于 1.1 叶龄期和 3.1 叶龄期。盐胁迫能够降低幼苗叶片 SPAD 值和叶绿素含量,降幅效果因叶龄期和萌发批次不同而异。

参考文献:

- [1] Ghaffari A, Gharechahi J, Nakhoda B, et al. Physiology and proteome responses of two contrasting rice mutants and their wild type parent under salt stress conditions at the vegetative stage[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(1): 31–44.
- [2] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 10–27.
- [3] Hao S H, Wang Y R, Yan Y X, et al. A review on plant responses to salt stress and their mechanisms of salt resistance[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(6): 132.
- [4] Liu L L, Wang B S. Protection of halophytes and their uses for cultivation of saline-alkali soil in China[J]. *Biology*, 2021, 10(5): 353.
- [5] 蔺吉祥, 李晓宇, 唐佳红, 等. 盐碱胁迫对小麦种子萌发、早期幼苗生长及 Na⁺、K⁺ 代谢的影响[J]. *麦类作物学报*, 2011, 31(6): 1148–1152.
- [6] 岳新丽, 湛润生, 牛雅玉, 等. NaCl 胁迫对黄花菜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(16): 35–40.
- [7] 王才林, 张亚东, 赵凌, 等. 耐盐碱水稻研究现状、问题与建议[J]. *中国稻米*, 2019, 25(1): 1–6.
- [8] Wang Z F, Wang J F, Bao Y M, et al. Quantitative trait loci controlling rice seed germination under salt stress[J]. *Euphytica*, 2011, 178(3): 297–307.
- [9] 许耀照, 曾秀存, 王振朝, 等. NaCl 胁迫对冬油菜种子萌发和生理特性的影响[J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(3): 499–508.
- [10] 刘群, 彭斌, 田长彦, 等. 8 种盐生植物种子萌发特征与 NaCl 盐度的关系[J]. *生态学报*, 2023, 43(17): 7284–7293.
- [11] 颜佳倩, 顾逸彪, 薛张逸, 等. 耐盐性不同水稻品种对盐胁迫的响应差异及其机制[J]. *作物学报*, 2022, 48(6): 1463–1475.
- [12] Minhas P S, Ramos T B, Ben-Gal A, et al. Coping with salinity in irrigated agriculture: crop evapotranspiration and water management issues[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 227: 105832.
- [13] Tsai Y C, Chen K C, Cheng T S, et al. Chlorophyll fluorescence analysis in diverse rice varieties reveals the positive correlation between the seedlings salt tolerance and photosynthetic efficiency[J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19(1): 403.
- [14] 孙文君, 江晓慧, 付媛媛, 等. 盐分胁迫对棉花幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(7): 23–28, 121.
- [15] 孟晨, 鲁雪莉, 王菊英, 等. 不同类型盐胁迫对小黑麦种子萌发的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(12): 171–180.
- [16] 张燕红, 侯天钰, 巴音花, 等. 水稻重组自交系群体芽期和苗期耐盐性鉴定与评价[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(5): 1041–1049.
- [17] 张国伟, 路海玲, 张雷, 等. 棉花萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2045–2053.
- [18] 於丽华, 王宇光, 孙菲, 等. 甜菜萌发—幼苗期不同阶段耐盐能力的研究[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(19): 22–28.
- [19] Rajjou L, Duval M, Gallardo K, et al. Seed germination and vigor[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2012, 63: 507–533.
- [20] 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.
- [21] El-Keblawy A, Al-Ansari F, Al-Shamsi N. Effects of temperature and light on salinity tolerance during germination in two desert glycophytic grasses, *Lasiurus scindicus* and *Panicum turgidum*[J]. *Grass and Forage Science*, 2011, 66(2): 173–182.
- [22] 陈雅琦, 苏楷淇, 李春杰. 盐胁迫对 2 种冷季型草坪草幼苗生长和生理特性的影响[J]. *草原与草坪*, 2021, 41(3): 32–40.
- [23] 胡竞渝, 冯国军, 刘大军, 等. 外源腐胺对盐胁迫下菜豆种子萌发及抗性的影响[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(15): 52–58.
- [24] 何丽丹, 刘广明, 杨劲松, 等. NaCl 胁迫对梭梭种子萌发与幼苗生长的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(5): 69–72.
- [25] 郭文婷, 王国华, 蔡倩倩. 钠盐胁迫对藜科一年生草本植物种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(3): 128–141.
- [26] 王晓宁, 何新蕾, 樊滢玮, 等. 盐胁迫对甜高粱种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响研究[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(13): 4462–4467.
- [27] 李润枝, 靳晴, 李召虎, 等. 水杨酸提高甘草种子萌发和幼苗生长对盐胁迫耐性的效应[J]. *作物学报*, 2020, 46(11): 1810–1816.
- [28] 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.
- [29] 黄露, 余明龙, 冯乃杰, 等. 种子引发剂氯化胆碱和吡啶丁酸钾对盐胁迫下水稻幼苗生长和生理特性的影响[J]. *核农学报*, 2023, 37(1): 196–206.
- [30] 付媛媛, 司转运, 王兴鹏, 等. 水盐胁迫对超高产小麦幼苗生长

梁昌志,王华美,褚沛宇,等. 外源色氨酸对低氮水平下大豆苗期生长及生理的调控效应[J]. 江苏农业科学,2025,53(1):94-102.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.01.014

外源色氨酸对低氮水平下大豆苗期生长及生理的调控效应

梁昌志¹, 王华美¹, 褚沛宇¹, 贝世俊¹, 刘汉林¹, 王 晨¹, 于高波¹, 张玉先^{1,3}, 王孟雪^{1,2,3}

(1. 黑龙江八一农垦大学/农业农村部大豆机械化生产重点实验室,黑龙江大庆 163316;

2. 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室,黑龙江大庆 163316; 3. 国家杂粮工程技术中心,黑龙江大庆 163316)

摘要:为探究外源色氨酸(Trp)对低氮水平下大豆幼苗的影响,以低氮敏感型大豆品种黑农 62 为试验材料,采用水培培养,在低氮水平下,于 V1 期进行 Trp 叶面喷施处理,Trp 设置 6 个浓度:0、100、200、300、400、500 mg/L,处理 6 d 后,进行大豆光合特性、氮同化和抗氧化系统的测定分析,针对不同浓度 Trp 对低氮水平下大豆生长及生理的影响开展研究,并筛选出提高大豆低氮耐受性的 Trp 最适浓度。结果表明,外源 200~300 mg/L Trp 处理通过提高低氮水平下大豆 NR、GS、GOGAT 和 GDH 活性,增强植株对无机氮的吸收和同化,从而促进可溶性蛋白和氨基酸的合成,增加植株体内氮素含量;同时,外源 Trp 处理显著增加了低氮下大豆的 P_n 、 G_s 、 T_r 、 C_i 和叶绿素含量,增强了大豆光合效率,促进了光合产物的合成,提高了大豆干物质积累量。此外,外源 Trp 还诱导了叶肉细胞内抗氧化酶活性的进一步升高,降低脂质过氧化程度,增强植株清除活性氧能力,缓解低氮对大豆生长带来的不利影响,其中 200 mg/L 浓度 Trp 处理的缓解能力最强。综上所述,外源 200~300 mg/L Trp 处理通过调节低氮水平下大豆的氮同化能力、光合特性和抗氧化系统来提高大豆幼苗耐低氮能力,并且在 200 mg/L 浓度 Trp 处理下效果最好。

关键词:大豆;低氮;色氨酸;生长;氮代谢;生理调控

中图分类号:S565.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)01-0094-09

氮素是大豆必需的大量营养素,不仅是氨基酸、蛋白质、遗传物质、色素和其他关键有机分子的组成部分,还是大豆生长和产量的重要限制因

素^[1-2]。由于大豆种子蛋白质含量高,因此,它的氮需求相对于许多其他大田作物更高^[3]。虽然大豆是共生固氮作物,但其固定的氮素只占大豆全生育期需氮量的 65%~70%,仍不足以维持其正常的生长发育^[4-6]。尤其在大豆苗期,生长对氮素尤为敏感,由于苗期根瘤在发育之中,尚无固氮能力,此时低氮往往会造成氮素“饥饿”,抑制大豆光合作用速率,影响光合产物积累以及无机碳、氮代谢产物水平,进而影响大豆正常发育进程^[7-11]。因此,低氮是限制苗期大豆生长的重要因素。

在我国大豆生产中,为了增加产量,过量及不

收稿日期:2023-10-17

基金项目:国家重点研发计划(编号:2022YFD10001050);黑龙江省应用技术研究及开发计划(编号:GA19B101-02);黑龙江省农垦总局重点科研计划(编号:HKKY190206-01)。

作者简介:梁昌志(1999—),男,贵州铜仁人,硕士研究生,主要研究方向为大豆生理生化。E-mail:2472249110@qq.com。

通信作者:王孟雪,博士,副教授,硕士生导师,主要从事农业水土工程研究。E-mail:wangmengxue1978@163.com。

及根系导水率的影响[J]. 灌溉排水学报,2023,42(2):16-23,31.

[31]塔伊尔·买买提江,兰海燕,王长海. 干旱与盐胁迫对玉米杂交种萌发及幼苗生长的影响[J]. 新疆大学学报(自然科学版),2021,38(1):61-68.

[32]Kader M H A,申孝军,陈津赛,等. 水盐胁迫下棉花叶片光合的气孔与非气孔限制[J]. 灌溉排水学报,2020,39(11):13-18.

[33]Liu J, Wu Y Q, Dong G C, et al. Progress of research on the physiology and molecular regulation of *Sorghum* growth under salt stress by gibberellin[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023,24(7):6777.

[34]Hussain S, Zhong C, Bai Z G, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on rice growth characteristics and superior and inferior spikelet development under salt stress[J]. Journal of Plant Growth Regulation,2018,37(4):1368-1384.

[35]张盼盼,杨裕然,薛佳欣,等. 烯效唑对盐胁迫下糜子幼苗形态和生理特性的调控效应[J]. 草业学报,2020,29(10):81-90.

[36]王 洋,张 瑞,刘永昊,等. 水稻对盐胁迫的响应及耐盐机理研究进展[J]. 中国水稻科学,2022,36(2):105-117.

[37]Cai Z Q, Gao Q. Comparative physiological and biochemical mechanisms of salt tolerance in five contrasting highland quinoa cultivars[J]. BMC Plant Biology,2020,20(1):70.