

刘晓龙, 徐晨, 徐克章, 等. 不同供氮水平下盐胁迫对水稻光合特性和某些生理特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(2): 6-12.

不同供氮水平下盐胁迫对水稻光合特性和某些生理特性的影响

刘晓龙¹, 徐晨², 徐克章¹, 崔菁菁¹, 张治安¹, 凌凤楼¹, 安久海¹, 武志海¹
(1 吉林农业大学农学院, 吉林 长春 130118; 2 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:【目的】为了解不同供氮水平培养的水稻植株对盐胁迫的响应.【方法】以2个北方常规粳稻品种为材料,在5个供氮水平下培养至孕穗期,以3个盐浓度进行胁迫处理,研究了处理后的水稻植株生物量、光合特性及一些生理特性的变化.【结果和结论】不同供氮水平培养的水稻植株在盐胁迫后生物量均呈下降趋势;盐胁迫下,2个水稻品种的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)和表观叶肉导度(AMC)显著下降.低氮水平培养的水稻植株在盐胁迫后净光合速率下降的原因是由非气孔限制因素引起的,而高氮水平下其在盐胁迫后净光合速率下降的原因还增加了气孔限制因素.在盐胁迫下,1/2N水平下水稻的叶片抗氧化酶SOD、POD、CAT活性及植株体内脯氨酸、可溶性糖含量显著高于其他N水平,膜透性和丙二醛含量均低于其他N水平.1/2N水平的营养液培养水稻可提高水稻的渗透调节能力,从而增强其在孕穗期的抗盐能力;九稻13号的耐盐性高于吉粳88号.

关键词:水稻; 盐胁迫; 氮肥; 光合作用; 抗氧化酶活性
中图分类号:S565.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2015)02-0006-07

Effects of salt stress on photosynthetic characteristics and some physiological traits of rice varieties at different nitrogen levels

LIU Xiaolong¹, XU Chen², XU Kezhang¹, CUI Jingjing¹,
ZHANG Zhi'an¹, LING Fenglou¹, AN Jiuhai¹, WU Zhihai¹

(1 College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;
2 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract:【Objective】To understand the response to salt stress on rice varieties cultured at different nitrogen levels. 【Method】Two north *japonica* rice varieties were cultured at five nitrogen levels of nutrient solution until booting stage, the changes of biomass, photosynthetic characteristics and some physiological characteristics of two rice varieties were measured in three salt concentrations. 【Result and conclusion】The biomass of rice varieties which were cultured at different nitrogen levels of nutrient solution decreased under salt stress; there were significant decrease in net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr) and apparent mesophyll conductance (AMC) of rice leaves under salt stress. The Pn reduction was due to non-stomatal restriction factors in low-nitrogen-level nutrient solution, however, the stomatal and non-stomatal limitation factors resulted in the Pn reduction in high-nitro-

收稿日期:2014-02-21 优先出版时间:2015-01-21
优先出版网址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20150121.0951.021.html>
作者简介:刘晓龙(1987—),男,硕士研究生, E-mail:lxl032202@163.com;通信作者:武志海(1975—),男,副教授,博士, E-mail:wuzhihai1116@163.com
基金项目:国家自然科学基金(31171478);吉林省自然科学基金(201215183);吉林省科技厅重点资助项目(20080201);吉林省教育厅重点项目(2012044)

gen-level nutrient solution. Under salt stress, the activity of antioxidant enzymes such as SOD, POD and CAT, the contents of proline and soluble sugar of leaves in 1/2N-level nutrient solution were significantly higher than those at other nitrogen-levels, the membrane permeability and the content of MDA in 1/2N-level were lower than those at other nitrogen-levels. The results show that rice varieties cultured in 1/2N-level nutrient solution can improve the capacity of osmotic regulation, enhancing the salt-tolerance ability of rice varieties at booting stage. The capacity of salt-tolerance of Jiudao13 is higher than that of Jijing88.

Key words: rice; salt stress; nitrogen fertilizer; photosynthesis; antioxidant enzyme activity

土壤盐渍化是世界性的环境和农业灾害,全世界大约有 8 亿多 hm^2 土地遭受不同程度的盐胁迫伤害. 在盐胁迫下,植物的种子萌发^[1]、生长发育^[2-3]及光合能力^[4-5]均受到不同程度的影响. 盐胁迫对植物的伤害可分为快速的渗透胁迫和缓慢的离子毒害^[6]. 渗透胁迫主要体现为环境中的盐浓度过高,水分难以进入植物体内,造成植物生理干旱;而离子毒害则是由于 Na^+ 和 Cl^- 在叶片中大量积累造成的. 氮肥是作物生产中增产作用最大的养分,对作物的许多生理过程、抗逆性和其他营养元素的利用均有重要的调节作用^[7]. Palfi^[8] 研究表明,盐胁迫下水稻对 N 的吸收降低. 许多学者对氮素营养提高水稻耐盐性做过研究,刘开力等^[9] 研究表明盐胁迫下对水稻幼苗施加低浓度外源 NO 可以提高幼苗根组织的抗氧化能力,黄本开等^[10] 认为外源 NO 可以缓解水稻幼苗膜质过氧化作用. Abdelgadir 等^[11] 在 3 个盐浓度和 3 个供氮水平下对水稻进行研究,结果表明增加 NO_3^- 能够减少水稻体内 Cl^- 的含量. 关于不同供氮水平培养的水稻植株在盐胁迫后生理特性变化鲜见报道. 本文选择 2 个北方常规粳稻品种为材料,研究在不同供氮水平下盐胁迫对水稻光合特性及生理特性的影响,探讨盐胁迫下水稻的最佳施氮量,为提高水稻耐盐性提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 材料

北方常规粳稻品种:九稻 13 号和吉粳 88 号,生育期均在 142 d 左右,为中晚熟品种. 其中,九稻 13 号为耐盐品种,吉粳 88 号为盐敏感品种. 以上 2 个品种是通过吉林省 156 个水稻品种采用 NaCl 浓度为 $80 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的改良 IRRI Yoshida (1976) 营养液在种子萌发期和幼苗期筛选获得的.

1.2 试验设计

试验在植物生长室进行,每天光照 11 h;昼夜温度分别为 (22 ± 0.5) 和 $(17 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,湿度为 $(60 \pm$

5)% . 发芽阶段施用蒸馏水在培养皿中进行培养,成苗后(株高超过 10 cm)用脱脂棉固定幼苗根部将幼苗插入打孔的黑色塑料泡沫板中,移栽至直径为 30 cm、高为 35 cm 的桶中,移栽后植株间距为 2.5 cm,每桶 15 株,同时分别施以改良 IRRI Yoshida (1976) 营养液正常含氮量的 1/4、1/2、1、2 和 4 倍的营养液进行培养(分别记为 1/4N、1/2N、1N、2N、4N,其中,1/4N、1/2N 为低氮,2N、4N 为高氮),pH 为 5.1 ± 0.2 ,7 d 更换 1 次营养液,并调节营养液的 pH. 水稻移栽后于孕穗初期进行盐胁迫处理,即在每个氮水平营养液中分别加入不同量的 NaCl [$c(\text{NaCl})$ 分别为 40、80、120 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,分别表示低盐、中盐、高盐],每个品种 16 个处理,其中,对照(CK)为不含盐的正常改良 IRRI Yoshida (1976) 营养液,7 d 更换 1 次营养液,并调节营养液的 pH 至 5.1 ± 0.2 ,每个处理设 3 次重复,处理 15 d 后在孕穗中期开始进行器官生物量、光合特性、膜透性、丙二醛、抗氧化酶活性和渗透性调节物质的测定,每个指标测 3 次.

1.3 各项指标的测定方法

1.3.1 生物量的测定 随机选取 3 株植株进行生物量的测定,先分别测定地上部分和根系的鲜质量,然后将鲜样在 105°C 的烘箱中杀青 15 min,于 80°C 烘干 48 h 后,用分析天平分别称地上部和根系的干质量. 然后将干物质粉碎,用于可溶性糖、脯氨酸含量的测定.

1.3.2 光合特性指标的测定 用 Li-6400 型便携式光合测定系统(Li-cor 公司)测定,测定时采用光量子密度为 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的固定红蓝光源,为避免测定时环境 CO_2 浓度的变化对测定结果的干扰,将仪器的进气口与装有恒定 CO_2 浓度的钢瓶相接,钢瓶 CO_2 浓度调节成 $(495 \pm 5) \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 测定水稻剑叶的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)和胞间 CO_2 浓度(Ci). 测定时间为 09:00—11:00.

气孔限制值(Ls)按下式计算:

<http://xuebao.scau.edu.cn>

$$L_s = (1 - C_i/C_a) \times 100\%$$

式中,C_i 为胞间 CO₂ 浓度,C_a 为环境 CO₂ 浓度;

表观叶肉导度(AMC)是通过净光合速率与胞间 CO₂ 浓度的比值(P_n/C_i)来计算的,用于估测非气孔限制作用,即 RuBP 羧化酶的活性.

1.3.3 生理指标的测定 膜透性、丙二醛含量和抗氧化酶活性均采用张治安等^[12]的方法进行测定. SOD 活性以抑制 NBT 光化学还原的 50% 为 1 个酶活性单位,CAT 活性以 1 min 内 D_{240 nm}减少 0.1 的酶量为 1 个酶活性单位,POD 活性以 1 min 内 D_{470 nm}减少 0.01 的酶量为 1 个酶活性单位,均记为“U”. 脯氨酸采用磺基水杨酸法^[13]进行测定. 可溶性糖采用蒽酮比色法^[14]进行测定.

1.4 数据分析

文中所有数据均为 3 次重复的平均值,数据的处理采用 Excel 2003 和 DPS 数据处理系统进行.

2 结果与分析

2.1 不同供氮水平下盐胁迫对水稻植株生物量的影响

从表 1 中可以看出,盐胁迫下,水稻植株地上部分和根系的鲜质量与干质量显著下降,随着盐浓度的提高,下降幅度越显著. 随着氮浓度的升高,植株地上部分和根系鲜质量与干质量均呈先增加后下降的变化趋势,与对照相比,3 个盐浓度下植株生物量均表现为 1N 水平培养的下降最小.

		表 1 不同供氮水平下盐胁迫对水稻生物量的影响 ¹⁾								m/g	
c(NaCl)/ (mmol·L ⁻¹)		地上部分				根系					
氮水平		I 九稻13号	II 九稻13号	I 吉梗88号	II 吉梗88号	I 九稻13号	II 九稻13号	I 吉梗88号	II 吉梗88号		
0	CK	7.42±0.545a	1.42±0.052a	7.83±0.629a	1.51±0.120a	6.55±0.287a	0.69±0.029a	5.78±0.405a	0.66±0.011a		
40	1/4N	1.69±0.196ef	0.43±0.057efgh	2.36±0.217efg	0.58±0.065efgh	2.53±0.287cde	0.31±0.014ef	2.51±0.127cd	0.30±0.008g		
	1/2N	3.18±0.545bcd	0.64±0.028cdefg	3.86±0.242cd	0.98±0.079bc	3.38±0.722bc	0.40±0.012c	4.75±0.179b	0.55±0.013b		
	1N	6.35±0.137a	1.23±0.116a	5.47±0.262b	1.15±0.128b	4.24±0.735b	0.50±0.010b	5.71±0.517a	0.53±0.016c		
	2N	3.66±0.833bc	0.85±0.055cdef	3.04±0.776de	0.74±0.068def	1.59±0.447defg	0.25±0.005g	1.86±0.649de	0.24±0.006i		
	4N	1.48±0.388ef	0.65±0.254cdef	1.53±0.165g	0.60±0.047efgh	1.47±0.259efg	0.20±0.013h	0.81±0.077fg	0.17±0.006j		
80	1/4N	1.63±0.524ef	0.42±0.022gh	2.09±0.071efg	0.49±0.042gh	2.29±0.750cdef	0.29±0.012f	2.12±0.457de	0.27±0.012h		
	1/2N	2.41±0.151cdef	0.62±0.069defgh	3.82±0.245cd	0.95±0.033bcd	3.15±0.201bc	0.38±0.009e	3.29±0.679e	0.40±0.027e		
	1N	4.02±0.425b	0.88±0.076b	4.50±0.241bc	0.94±0.065bcd	3.20±0.274bc	0.33±0.012de	4.73±0.646b	0.45±0.012d		
	2N	2.69±0.454bcde	0.79±0.035bcd	2.38±0.035efg	0.69±0.042efg	1.34±0.115fg	0.19±0.007hi	1.45±0.074efg	0.24±0.007i		
	4N	1.36±0.259ef	0.59±0.039defgh	1.52±0.137g	0.52±0.062fgh	0.88±0.223g	0.14±0.008j	0.56±0.165g	0.10±0.006l		
120	1/4N	1.38±0.158ef	0.41±0.061h	1.83±0.394fg	0.47±0.054gh	2.23±0.075cdef	0.29±0.009f	1.55±0.286ef	0.26±0.005h		
	1/2N	2.40±0.185cdef	0.61±0.045defgh	2.76±0.779def	0.72±0.052def	3.02±0.165c	0.34±0.007d	2.73±0.558cd	0.39±0.013e		
	1N	2.50±0.238cdef	0.68±0.080bcde	2.95±0.623def	0.79±0.034cde	2.65±0.446cd	0.30±0.008f	3.42±0.612c	0.35±0.007f		
	2N	2.20±0.288def	0.75±0.051bcd	1.81±0.118fg	0.66±0.024efg	1.29±0.392fg	0.18±0.009i	0.77±0.085fg	0.15±0.008k		
	4N	1.18±0.296f	0.51±0.072efgh	1.48±0.568g	0.40±0.039h	0.74±0.223g	0.10±0.004k	0.54±0.094g	0.09±0.003l		

1) I :鲜样,II :干样;表中数据为 3 次重复的平均值±标准差,同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示差异不显著(P>0.05,Duncan's 法).

2.2 不同供氮水平下盐胁迫对水稻光合特性的影响

由图 1 可以看出,与对照相比,盐胁迫下水稻叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(Tr)和表观叶肉导度(AMC)均呈下降趋势;随着氮浓度的增加,水稻叶片 P_n、G_s、Tr 和 AMC 均呈先增加后下降的变化趋势,与对照相比,高氮水平培养的水稻植株叶片光合特性指标的下降幅度显著高于低氮水平. 低盐胁迫后,水稻叶片胞间 CO₂ 浓度(C_i) 在 5 个氮水平下均变化不大,气孔限制值(L_s) 在低氮和 1N 水平下变化

不大,在高氮水平下略有升高;中盐胁迫后,低氮和 1N 水平下 C_i 变化不大,高氮水平下 C_i 显著下降,L_s 在 5 个氮水平下均显著升高;高盐胁迫后,C_i 在 5 个氮水平下均显著下降,且 L_s 均显著升高. 由此推测低氮水平培养的水稻植株在盐胁迫后净光合速率下降的原因是由非气孔限制因素引起的,而高氮水平下其在盐胁迫后净光合速率下降的原因还增加了气孔限制因素. 从图 1 还可以看出,不同处理下,九稻 13 号的 P_n、G_s 和 Tr 均高于吉梗 88 号.

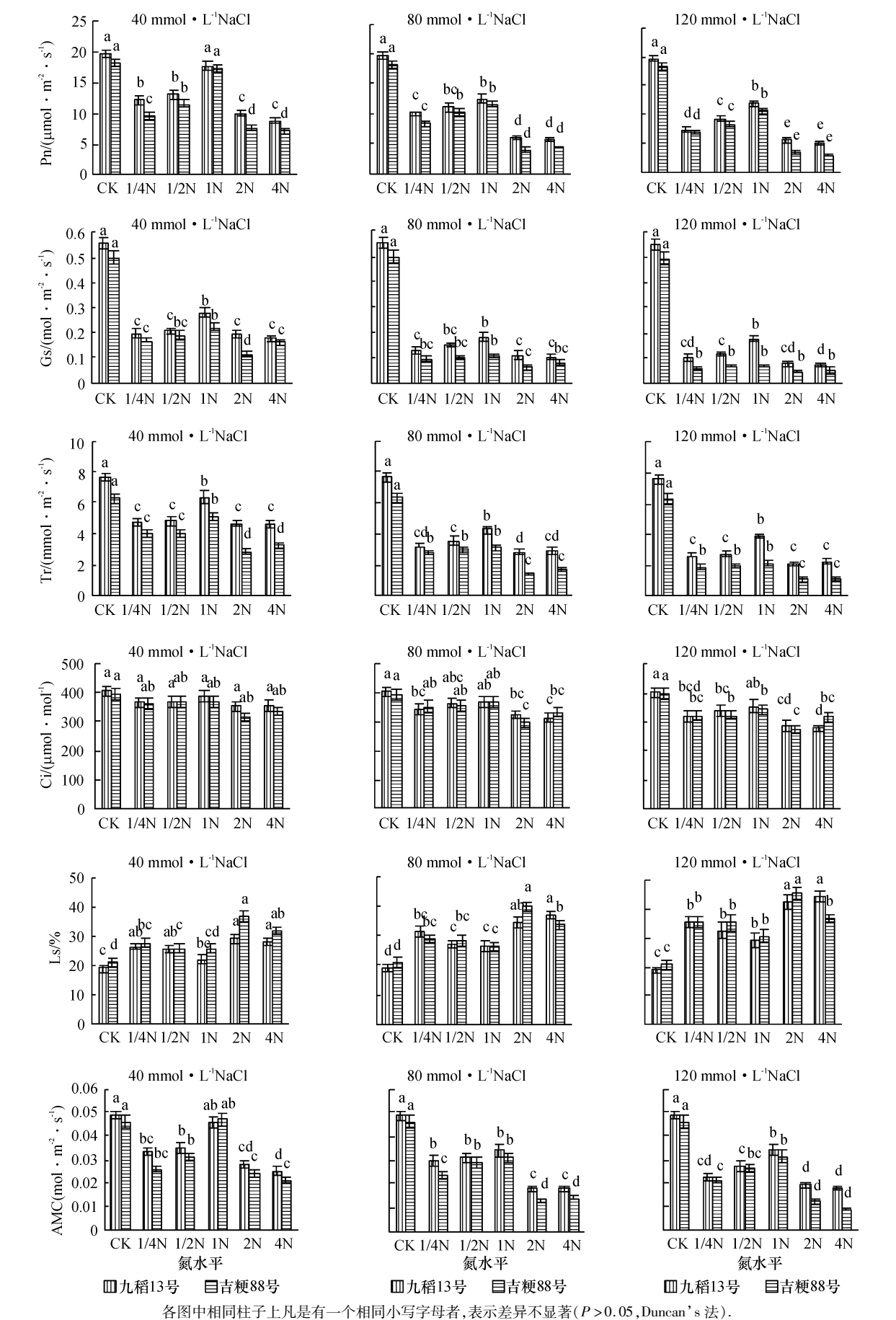


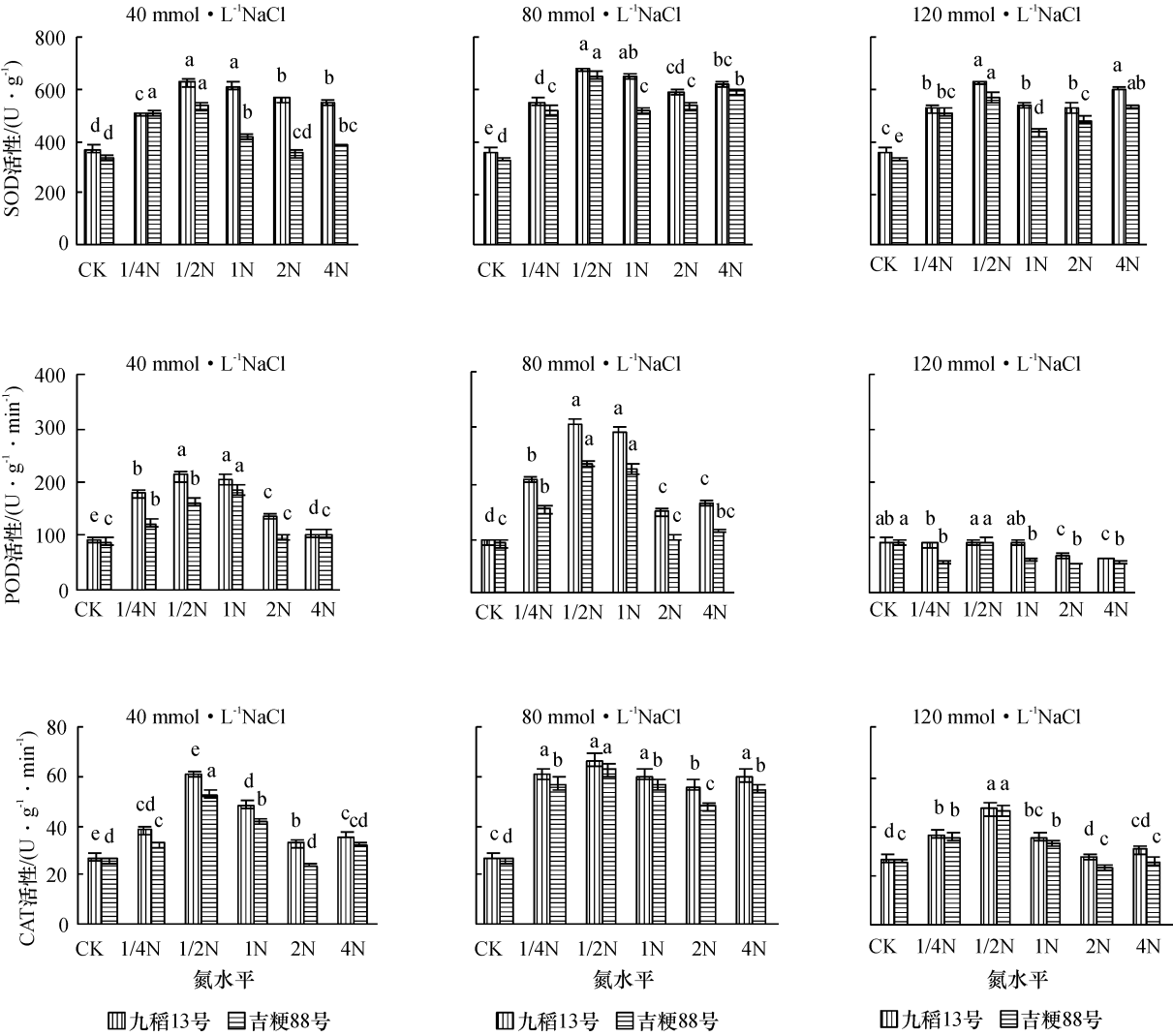
图1 不同供氮水平下盐胁迫对水稻叶片光合特性的影响

Fig.1 Effects of salt stress on photosynthesis traits of rice leaves at different nitrogen levels

2.3 不同供氮水平下盐胁迫对水稻叶片及根系生理特性的影响

2.3.1 叶片抗氧化酶活性的变化 从图 2 可以看出,随着盐浓度的增加,水稻叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性呈先增加后下降的变化趋势,说明低盐胁迫可诱导水稻叶片提高 SOD、POD 和 CAT 活性. 过高的盐浓度

超过了水稻自身的忍耐程度,导致 SOD、POD、CAT 活性下降. 1/2N 水平培养的水稻植株在盐胁迫后体内抗氧化酶活性最强. 不同处理下,九稻 13 号叶片中抗氧化酶活性均高于吉梗 88 号,说明在盐胁迫下,耐盐水稻品种比盐敏感水稻品种能保持更高的抗氧化酶活性以抵御盐害.



各图中相同柱子上凡是有一个相同小写字母者,表示差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 2 不同供氮水平下盐胁迫对水稻叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 2 Effects of salt stress on antioxidant enzyme activities in rice leaves at different nitrogen levels

2.3.2 叶片及根系渗透性调节物质的变化 由图 3 可知,在盐胁迫下,叶片及根系中的渗透性调节物质可溶性糖和脯氨酸大量积累,九稻 13 号的可溶性糖和脯氨酸含量均高于吉梗 88 号. 随着盐浓度的增加,可溶性糖和脯氨酸含量先增加后减少,说明盐胁迫后水稻体内迅速积累渗透性调节物质来抵御盐害,而盐浓度过高时,水稻已无法产生足够的渗透性调节物质来抵御盐害. 盐胁迫后,水稻体内可溶性糖和脯氨酸含量随着供氮浓度的增加,均呈先增加后下降的变化趋势,其中以 1/2N 水平培养下含量最

高. 说明 1/2N 水平培养的水稻体内能积累更多的可溶性糖和脯氨酸来抵御盐害.

2.3.3 叶片质膜透性的变化 从图 4 可以看出,水稻在盐胁迫下丙二醛含量增加,膜透性也显著增加,且盐浓度越大,增加幅度越明显,九稻 13 号的丙二醛含量和膜透性均低于吉梗 88 号. 与对照相比,1/2N 水平培养的水稻叶片中,丙二醛含量和膜透性增加幅度最小,说明 1/2N 水平的处理可以降低盐胁迫对水稻叶片细胞质膜的伤害.

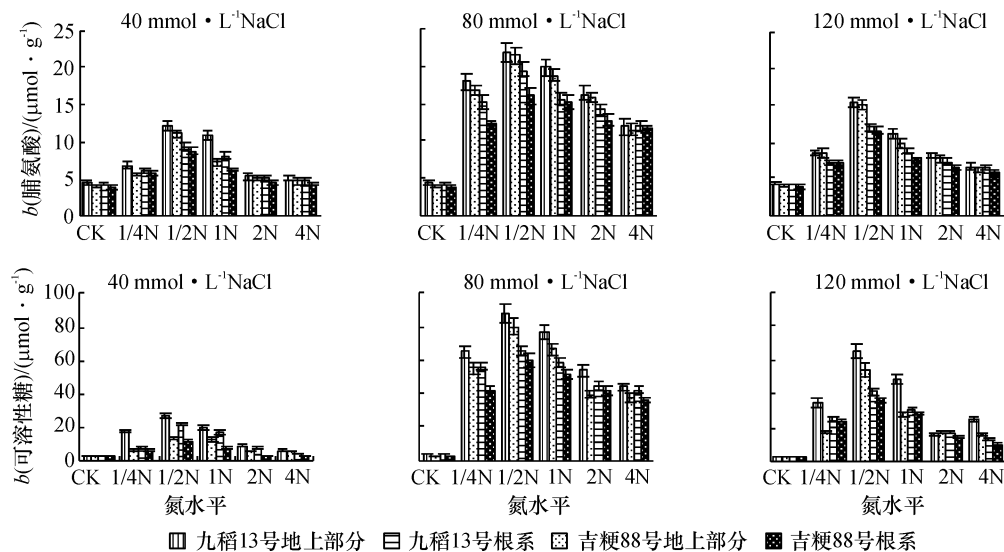
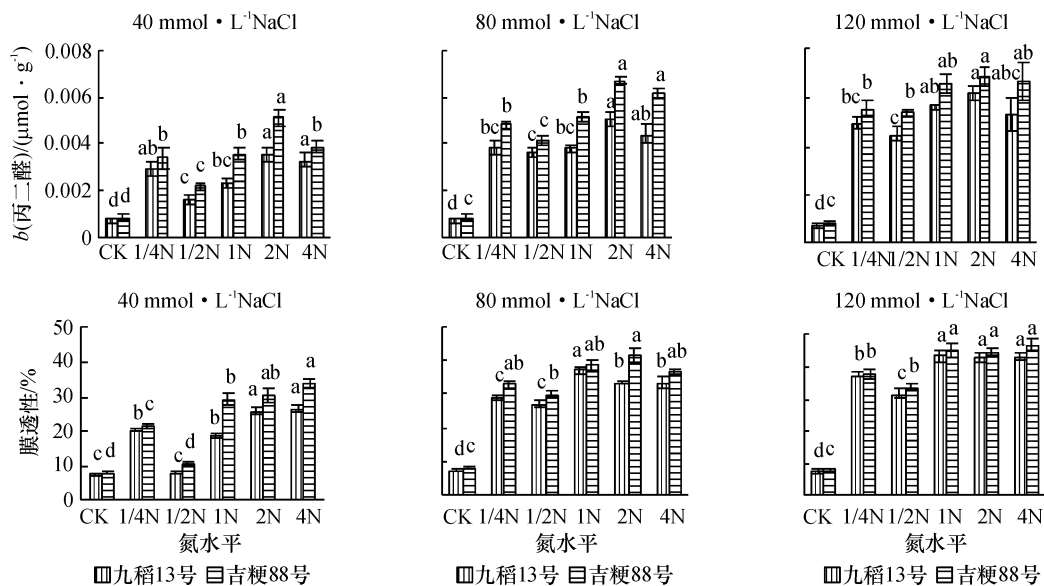


图 3 不同供氮水平下盐胁迫对水稻叶片及根系渗透性调节物质的影响

Fig. 3 Effects of salt stress on physiological traits in rice leaves and roots at different nitrogen levels



各图中相同柱子上凡是有有一个相同小写字母者,表示差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法).

图 4 不同供氮水平下盐胁迫对水稻叶片质膜透性的影响

Fig. 4 Effects of salt stress on plasma membrane permeability in rice leaves at different nitrogen levels

3 讨论与结论

水稻对盐害的抵御能力与环境间存在复杂的互作关系,温度、水分、光照、肥料等条件以及添加外源物质都会不同程度地影响水稻的耐盐性^[15-16]. 朱晓军等^[17]研究表明,盐胁迫下,外源 Ca^{2+} 能有效改善水稻的光合作用,使净光合速率和气孔导度增加. 氮肥管理是作物养分管理中的核心内容,杜洪艳^[18]认为盐胁迫下水稻幼苗对不同氮形态的养分利用具有差异性, NH_4^+ -N 高于 NO_3^- -N 时对水稻生长较有利,过高的 NO_3^- -N 则不利于水稻生长;Herralde 等^[19]认为,适量的氮肥有助于补偿因盐胁迫造成的离子失衡. 本研究结果表明,1/2N 水平培养的水稻叶片抗

氧化酶活性以及脯氨酸、可溶性糖含量均高于其他供氮水平,同时膜透性和丙二醛含量也低于其他供氮水平,因此,1/2N 水平营养液培养的水稻可以增强抗氧化酶活性和生成更多的渗透性调节物质来抵御盐害,从而增强其在孕穗期的抗盐能力.

盐胁迫可通过限制植物的光合作用进而影响其产量. 一般认为,盐胁迫导致植物光合速率降低的原因包括气孔限制因素和非气孔限制因素^[20-21]. 许多研究表明,盐胁迫下植物气孔发生非均匀性关闭,导致光合速率下降^[5,22]. 孙璐等^[23]认为,NaCl 胁迫下高粱幼苗光合作用下降的原因在 NaCl 浓度为 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时是气孔限制因素,100~200 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时是非气孔限制因素. 本研究结果则表明,低盐胁迫后,5 个供氮水

平培养的水稻叶片 C_i 均变化不大, L_s 在低氮和 1N 水平下变化不大, 在高氮水平下略有升高; 中盐胁迫后, C_i 在低氮和 1N 水平下变化不大, 高氮水平下显著升高, L_s 显著升高; 高浓度盐胁迫后, 5 个氮水平处理下 C_i 均显著下降, 且 L_s 显著升高; 由此推测低氮水平培养的水稻植株在盐胁迫后净光合速率下降的原因是由非气孔限制因素引起的, 而高氮水平下其在盐胁迫后净光合速率下降的原因还增加了气孔限制因素. 同时 AMC 显著下降, 进一步推测, 盐胁迫导致水稻体内 $RuBP$ 羧化酶活性下降, 而这是导致净光合速率下降的非气孔限制因素, 这与前人^[24-26]的研究结果基本一致.

本研究结果表明, 低氮水平培养的水稻植株在盐胁迫后净光合速率下降的原因是由非气孔限制因素引起的, 而高氮水平下在非气孔限制因素的基础上, 还增加了气孔限制因素. 用 1/2N 水平的营养液培养水稻可以提高水稻的渗透调节能力, 从而增强其在孕穗期的抗盐能力. 盐胁迫下, 耐盐品种体内能保持较高的 P_n 、 G_s 、 Tr 、抗氧化酶活性以及脯氨酸和可溶性糖含量, 这也是耐盐品种比盐敏感品种更能适应盐胁迫环境的生理优势.

参考文献:

- [1] KOYRO H W, EISA S S. Effect of salinity on composition, viability and germination of seeds of *Chenopodium quinoa* Willd[J]. Plant Soil, 2008, 302(1/2): 79-90.
- [2] KOCA H, BOR M, ÖZDEMİR F, et al. The effect of salt stress on lipid peroxidation, antioxidative enzymes and proline content of sesame cultivars[J]. Environ Exp Botany, 2007, 60(3): 344-351.
- [3] 梁正伟, 杨福, 王志春, 等. 盐碱胁迫对水稻主要生育性状的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 43-46.
- [4] SOUSSI M, OCANA A, LLUCH C. Effects of salt stress on growth, photosynthesis and nitrogen fixation in chick-pea (*Cicer arietinum* L.) [J]. J Exp Botany, 1998, 49(325): 1329-1337.
- [5] 王仁雷, 华春, 刘友良. 盐胁迫对水稻光合特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 11-14.
- [6] SILVA E C, NOGUEIRA R J M C, ARAUJO F P, et al. Physiological responses to salt stress in young umbu plants [J]. Environ Exp Botany, 2008, 63(1/2/3): 147-157.
- [7] GAMETT T, CONN V, KAISER B. Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants[J]. Plant, Cell and Environ, 2009, 32(9): 1272-1283.
- [8] PALFI G. A correlation between nitrogen nutrition of rice and asparagines concentration in leaves [J]. Növénytermelés, 1963, 12: 157-168.
- [9] 刘开力, 韩航如, 徐颖洁, 等. 外源一氧化氮对盐胁迫下水稻根部脂质过氧化的缓解作用[J]. 中国水稻科

学, 2005, 19(4): 333-337.

- [10] 黄本开, 刘开力, 徐晟, 等. 一氧化氮供体对盐胁迫下水稻幼苗叶片脂质过氧化的调节[J]. 南京农业大学学报, 2005, 28(3): 22-25.
- [11] ABDELGADIR E M, OKA M, FUJIYAMA H. Nitrogen nutrition of rice plants under salinity [J]. Biol Plantarum, 2005, 49(1): 99-104.
- [12] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008.
- [13] 张殿忠, 汪沛洪, 赵会贤. 测定小麦叶片游离脯氨酸的方法[J]. 植物生理学通讯, 1990(4): 62-65.
- [14] 石连旋, 胡勇军, 宫亮, 等. 不同盐碱化草甸羊草越冬根茎中可溶性糖和蛋白的研究[J]. 东北师范大学学报: 自然科学版, 2008, 40(2): 88-92.
- [15] 王建飞, 陈宏友, 杨庆利, 等. 盐胁迫浓度和胁迫时的温度对水稻耐盐性的影响[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(5): 449-454.
- [16] 董海凤, 王义霞, 孙运杰. 水稻盐胁迫的研究进展[J]. 生物灾害科学, 2012, 35(4): 439-442.
- [17] 朱晓军, 杨劲松, 梁永超, 等. 盐胁迫下钙对水稻幼苗光合作用及相关生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1497-1503.
- [18] 杜红艳. NaCl 胁迫和氮形态对水稻幼苗生长的影响 [D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- [19] HERRALDE F D, BIEL C, SAVE R, et al. Effect of water and salt stresses on the growth, gas exchange and water relations in *Argyranthemum coronopifolium* plants [J]. Plant Sci, 1998, 139: 9-17.
- [20] BERRY J A, DOWNTON W J S. Environmental regulation of photosynthesis[M] // GOVIND J. Photosynthesis: Vol II. New York: Academic Press, 1982: 263-345.
- [21] 葛江丽, 石雷, 谷卫彬, 等. 盐胁迫条件下甜高粱幼苗的光合特性及光系统 II 功能调节[J]. 作物学报, 2007, 33(8): 1272-1278.
- [22] BETHKE P C, DREW M C. Stomatal and nonstomatal components to inhibition of photosynthesis in leaves of *Capsicum annuum* during progressive exposure to NaCl salinity[J]. Plant Physiol, 1992, 99: 219-226.
- [23] 孙璐, 周宇飞, 李丰先, 等. 盐胁迫对高粱幼苗光合作用和荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3265-3272.
- [24] 武志海, 赵国臣, 徐克章, 等. 吉林省过去 47 年来水稻品种遗传改良过程中叶片光合指标的变化[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(2): 165-171.
- [25] 徐晨, 凌凤楼, 徐克章, 等. 盐胁迫对不同水稻品种光合特性和生理生化特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(3): 280-286.
- [26] 曹树青, 翟虎渠, 钮中一, 等. 不同产量潜力水稻品种的剑叶光合特性研究[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(3): 1-4.

【责任编辑 周志红】