

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2012.01782

全生育期耐盐恢复系在正常灌溉条件下性状表现及耐盐杂交稻的选育

章禄标^{1,2} 潘晓飏³ 张 建² 陈 凯² 张 强² 徐建龙^{2,*} 潘学彪¹
黎志康²

¹ 扬州大学 / 江苏省作物遗传生理重点实验室 / 植物功能基因组学教育部重点实验室, 江苏扬州 225009; ² 中国农业科学院作物科学研究所 / 农作物基因资源与基因改良国家重大科学工程, 北京 100081; ³ 浙江省台州市农业科学研究院作物研究所, 浙江临海 317000

摘 要: 利用前期以明恢 86 为轮回亲本与全球水稻分子育种计划的 4 个供体亲本(Gayabyeo、沈农 265、早粳 14 和 Y134)杂交构建的高代回交导入群体, 在浙江省三门县沿海滩涂采用 0.5%盐浓度的海水全生育期灌溉, 筛选出 150 个耐盐恢复系, 考察了耐盐恢复系在正常灌溉条件下的性状分离及与 2 个三系不育系测交种的优势表现。结果表明, 耐盐恢复系在正常灌溉条件下的产量及其相关性状出现明显的分离, 性状分离的类型及特点因选择群体和性状本身不同而异, 从中选育出 30 个单株产量和耐盐性显著好于轮回亲本明恢 86 的株系, 这些株系大多表现穗长缩短, 株高和千粒重下降, 但单株有效穗和结实率显著增加, 导致产量的显著提高。4 个组合的耐盐恢复系群体与 2 个三系不育系(II-32A 和川 345A)测交种的性状分离明显, 与明恢 86 和 2 个三系不育系的测交种相比, 多数测交种表现穗长缩短, 株高降低, 单株有效穗数相仿, 但与 II-32A 测交的杂种千粒重显著增加, 杂种表现趋势与耐盐恢复系本身不完全相同。分别鉴定出 22 个和 23 个耐盐恢复系, 其与 2 个不育系测交的杂种产量显著高于明恢 86 与相应不育系的测交种, 表现出较强的杂种优势, 其中比生产对照种汕优 10 号显著或极显著增产的测交组合分别有 7 个(II-32A 为母本)和 4 个(川 345A 为母本)。研究表明, 利用优良恢复系的回交导入后代在大田盐胁迫条件下筛选耐盐单株, 结合耐盐后代在正常灌溉条件下产量及相关性状的鉴定筛选, 可以有效地改良恢复系的耐盐性, 并选育出耐盐性提高的强优势组合。

关键词: 水稻; 耐盐性; 测交种; 恢复系; 杂种优势

Performance of Restorer Lines with Salt Tolerance in Whole Growth Period under Normal Irrigated Condition and Development of Hybrid Rice with Salt Tolerance

ZHANG Lu-Biao^{1,2}, PAN Xiao-Biao³, ZHANG Jian², CHEN Kai², ZHANG Qiang², XU Jian-Long^{2,*}, PAN Xue-Biao¹, and LI Zhi-Kang²

¹ Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province / Key Laboratory of Plant Functional Genomics of Education Ministry / Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; ² National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement / Institute of Crop Sciences Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ³ Crop Research Institute, Taizhou Academy of Agricultural Sciences of Zhejiang Province, Linhai 317000, China

Abstract: Four introgression line populations derived from the recurrent parent Minghui 86 and four donor parents (Gayabyeo, Shennong 265, Zaoxian 14, and Y134) were screened and evaluated for salt tolerance (ST) under the stress of 0.5% salt concentration over the whole growth stages in Sanmen County of Zhejiang Province. A total of 150 restorer lines with ST were selected. These 150 restorer lines with ST and their test-crossing hybrids with cytoplasmic male sterile lines II-32A and Chuan 345A were investigated for grain yield and its related agronomic traits under normal irrigated condition. Segregations presented in yield and its related traits among those lines, showing various types with different populations and traits. Thirty promising restorer lines with significantly higher yield and ST were selected. Most of them showed decreases in panicle length (PL), plant height (PH),

本研究由引进国际先进农业科学技术计划(948 计划)项目[2011-G2B(2)]和国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA101101)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 徐建龙, E-mail: xujlcaas@yahoo.com.cn, Tel: 010-82105854

Received(收稿日期): 2012-03-21; Accepted(接受日期): 2012-06-10; Published online(网络出版日期): 2012-07-27.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20120727.0844.010.html>

and thousand-grain weight (TGW), but significant increases in panicle number per plant (PNP) and seed setting rate (SSR), thus resulting in significantly higher yield. As compared with hybrids crossed between Minghui 86 and the two sterile lines, test-crossing populations derived from the crosses between the restorer lines with ST and the two sterile lines showed reduces PL and PH, similar PNP, but significantly increased TGW when tested with II-32A, indicating there were partial differences in trait performance between salt-tolerant restorer lines and their hybrids. Twenty-two and 23 hybrid combinations showed stronger heterosis as compared with the hybrids derived from Minghui 86 and the two corresponding sterile lines. Among them, seven (from II-32A) and four (from Chuan 345A) hybrids significantly surpassed the commercial check combination Shanyou 10 in yield. It was indicated that ST screening in the field under salt stress combined with selections of yield and its related traits in normal irrigated condition for introgression line populations with an elite restorer background will efficiently improve the ST of restorer lines and possibly facilitate to develop the ST-improved hybrid rice.

Keywords: Rice; Salt tolerance; Test cross; Restorer line; Heterosis

盐害是影响水稻产量的主要非生物逆境因素之一, 随着气候的异常变化和工业污染的不断加剧, 盐碱化土壤面积正呈逐年递增的趋势。据估计, 全球有超过 10% 的耕地正遭受盐害的影响, 其面积超过 8 亿公顷^[1]。在我国, 因盐害而不适合耕种的土地面积就达 1 亿公顷, 约占栽培面积的 1/5^[2], 严重制约了粮食生产的可持续发展。水稻是一种盐敏感作物, 培育水稻耐盐新品种是缓解盐害和确保粮食安全的最经济有效的方法。

目前在我国的各种水稻育种计划中, 耐盐性尚未正式列入育种目标。目前推广的常规稻和杂交稻品种大多对盐胁迫敏感。迄今为止, 水稻耐盐性鉴定筛选工作主要集中在苗期, 即利用适当浓度的 NaCl 营养液对二叶一心至三叶一心的水稻幼苗进行盐胁迫, 以幼苗存活天数、叶片盐害级别或地上部钾、钠离子浓度等作为指标进行评价。研究表明, 水稻苗期的耐盐性与生殖生长期的耐盐性没有明显的相关性^[3-5], 苗期测定的生理指标与生殖生长期盐胁迫下的产量也没有必然的联系^[6-7]。因此, 必须同时鉴定苗期和生殖生长期的耐盐性, 才能全面评价水稻品种耐盐性, 培育出全生育期耐盐性强的水稻新品种。

我们曾以利用中籼骨干恢复系明恢 86 为轮回亲本, 与 4 个供体品种杂交培育出高代回交导入群体, 在海涂自然条件下, 从二叶一心期开始采用海水与河水调配至浓度为 0.5% 的盐水进行全生育期的灌溉胁迫, 获得了 4 个群体的 150 个耐盐恢复系^[8]。本研究旨在通过分析这些耐盐恢复系在正常水田和盐胁迫条件下的性状表现, 评价耐盐恢复系与三系不育系测交种的杂种优势, 为开展耐盐恢复系和耐盐杂交稻新组合选育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2009—2010 年, 利用轮回亲本明恢 86, 以韩国

粳稻品种 Gayabyeo 和我国粳稻品种沈农 265、籼稻品种早籼 14 和 Y134 为供体构建 BC₂F₄ 回交导入群体, 在大田进行全生育期耐盐筛选, 获得了 150 个耐盐恢复系^[8]。本研究以此为试验材料。三系不育系 II-32A 和川 345A 用于耐盐恢复系的测交, II 优 838 和汕优 10 号分别作为对照组合。

1.2 耐盐恢复系与不育系测交种的测配与种植

将 2010 年经耐盐重复鉴定获得的 150 个耐盐单株在海南种植成株系, 每隔 10 个株系种植轮回亲本对照, 根据后期长势和丰产性选择优良株系中的代表单株, 分别与 II-32A 和川 345A 测交, 同时配制明恢 86 与 II-32A 和川 345A 的杂交种子。将测交种及对应的测交父本种子一分为二, 于 2011 年夏季分别种植在浙江省台州市农业科学院试验基地的正常水田和三门县盐田。正常水田育秧单本移栽, 秧龄 23 d, 每株系 1 行, 每行 12 株, 行株距为 25 cm × 17 cm; 盐田直播, 播种和盐胁迫处理方式同 2010 年^[8]。在水田和盐田中每隔 20 个株系插入 II-32B、川 345B 和杂交稻生产对照组合 II 优 838、汕优 10 号及轮回亲本与 2 个不育系的测交种 (II-32A/明恢 86 和川 345A/明恢 86)。顺序排列所有株系及测交种, 水田和盐田均为 2 次重复。以盐田鉴定耐盐株系和杂种的耐盐性, 正常水田鉴定耐盐株系的农艺性状表现, 评价杂种优势, 选育优良耐盐恢复系和优势新组合。

1.3 耐盐恢复系及测交种的性状考察

2011 年在水田和盐田 2 种环境种植耐盐性强的株系及其所对应的测交种。由于盐胁迫期间连续高温晴天, 8 月初也无降雨, 土壤盐分严重积累, 大量秧苗枯死, 耐盐鉴定失败, 故只考察了正常水田的性状。记载水田环境下耐盐恢复系和其对应测交种的抽穗期, 成熟后每个材料取中间 8 株考察株高和单株有效穗数, 从每株上收获 1 个主穗用于考察产量相关性状, 包括穗长、每穗总粒数、结实率和千粒重, 混收 8 株剩余的所有穗, 测定平均单株产量。

1.4 数据分析

利用 SAS V6.12 软件的 PROC GLM 程序^[9], 对耐盐单株测交种的产量及其组分性状进行多重比较测验。

2 结果与分析

2.1 耐盐选择群体在正常水田条件下产量及其相关性状的表现

在正常灌溉条件下, 与轮回亲本明恢 86 相比, 4 个耐盐选择群体的平均穗长、穗总粒数、千粒重和株高均有下降的趋势(表 1), 其中穗长和千粒重在所有 4 个群体中的降幅均达到极显著水平; 结实率出现增加的趋势, 但只有明恢 86/沈农 265 的导入系达极显著水平; 明恢 86/沈农 265 和明恢 86/Gayabyeo 的抽穗期分别表现显著提早和极显著延迟; 明恢 86/Y134 的单株产量和明恢 86/Gayabyeo 的单株有效穗数均显著减少, 表明盐选植株在正常水田条件产量及其相关性状的表现因不同群体而异。

在 4 个耐盐选择群体株系中均分离出产量及其相关性状显著不同于轮回亲本的个体(表 2)。其中, 明恢 86/Gayabyeo 的单株有效穗数、明恢 86/沈农 265 的抽穗期、明恢 86/早籼 14 的千粒重和明恢 86/Y134 的穗长均未出现显著高于轮回亲本的耐盐株系; 所有组合耐盐株系后代的穗长、千粒重和株高较轮回亲本明恢 86 显著减少的株系远多于增加的株系, 结实率则相反, 比轮回亲本显著增加的株系远多于减少的株系, 其余性状出现双向分离的株系数相当。

表明耐盐选择后代植株的性状在水田条件下产生了不同的分离, 这些性状的分离为选育不同熟期的高产、耐盐恢复系提供了材料基础。

根据水田的单株产量表现, 从明恢 86/Gayabyeo、明恢 86/沈农 265、明恢 86/早籼 14 和明恢 86/Y134 4 个的耐盐群体后代筛选出 6、11、10 和 3 个单株产量显著或极显著高于轮回亲本明恢 86 的耐盐恢复系(表 3), 除来自明恢 86/Gayabyeo 的 ZY122 株系外, 其余株系的穗长均较明恢 86 明显缩短; 单株有效穗数除 ZY122、ZY123、ZY3、ZY35、ZY39 和 ZY77 等 6 个株系外, 其余株系均多于明恢 86; 结实率除 ZY83 和 ZY100 外, 其余株系均高于明恢 86, 而且多数株系的单株有效穗数和结实率均显著或极显著高于明恢 86。千粒重除 ZY114、ZY139 和 ZY68 外, 其余株系均低于明恢 86, 株高大多数株系表现显著降低, 而抽穗期有迟有早。从总体上看, 耐盐恢复系的高产主要通过增加单株有效穗数和提高结实率来实现。

2.2 耐盐恢复系杂交种的杂种优势评价

表 4 表明, 以轮回亲本明恢 86 与相应不育系的测交种为对照, 4 个耐盐恢复系群体与 2 个不育系测交种的产量和单株有效穗数均与对照相仿; 以 II-32A 为母本的所有耐盐恢复系测交种的穗长和株高均显著减小, 千粒重显著增加, 多数测交种的单株有效穗数和结实率高于对照但未及显著水平, 每穗粒数多于对照但仅明恢 86/Gayabyeo 群体的测交种达到显著水平; 以川345A 为母本的所有耐盐恢复系测交种的株高显著降低, 多数测交种的千粒重

表 1 4 个耐盐选择群体在正常灌溉条件下的产量及其相关性状的表现

Table 1 Performance of grain yield and its related traits of four salt tolerance-selected populations under normal irrigated condition

群体 Population	株系数 No. of lines	单株产量 Grain yield per plant (g plant ⁻¹)	穗长 Panicle length (cm)	单株有效穗数 Panicle number per plant	每穗总粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	株高 Plant height (cm)	抽穗期 Heading date (d)
明恢 86/Gayabyeo Minghui 86/Gayabyeo	37	24.8±5.26a	25.6±1.54B	6.35±1.21b	266.3±25.9a	71.6±9.91a	24.5±3.13B	122.2±7.42a	87.8±4.82B
明恢 86/沈农 265 Minghui 86/Shennong 265	40	26.9±6.43a	26.0±1.14B	6.97±1.42a	254.2±37.1a	76.6±7.62B	25.0±1.63B	121.7±4.28a	81.7±2.10b
明恢 86/早籼 14 Minghui 86/Zaoxian 14	40	25.7±6.45a	25.9±1.56B	7.48±1.67a	253.8±40.3a	72.8±10.7a	24.1±1.59B	118.8±5.32B	83.6±3.69a
明恢 86/Y134 Minghui 86/Y134	33	23.2±5.24b	26.0±1.48B	7.00±1.20a	244.8±37.3a	70.0±9.16a	25.5±1.72B	121.0±7.75a	83.6±3.89a
明恢 86 Minghui 86	12	25.6±2.07a	28.0±1.14a	7.38±1.13a	267.6±25.8a	66.4±4.93a	26.8±0.85a	123.3±4.20a	84.0±1.26a

耐盐选择群体与轮回亲本之间性状均值的差异显著性测定, 相同字母表示差异无显著, 不同小写和大写字母分别表示差异达 0.05 和 0.01 的显著水平。

Significance was detected for trait average between populations and the recurrent parent. The same letter stands for no significant difference between populations and the recurrent parent whereas different lowercase and capital letters for significant differences at $P\leq0.05$ and $P\leq0.01$, respectively.

表 2 4 个耐盐选择群体在正常水田条件下各性状分离出显著不同于轮回亲本的株系及其表现

Table 2 Trait performance of the lines significantly different from the recurrent parent in four salt tolerance-selected populations under normal paddy field condition

性状 Trait	统计参数 ¹⁾ Statistical parameter ¹⁾	明恢 86/Gayabyeo		明恢 86/沈农 265		明恢 86/早籼 14		明恢 86/Y134		明恢 86
		Minghui 86/Gayabyeo		Minghui 86/Shennong 265		Minghui 86/Zaoxian 14		Minghui 86/Y134		Minghui 86
		增 Increased	减 Decreased	增 Increased	减 Decreased	增 Increased	减 Decreased	增 Increased	减 Decreased	对照 Check
单株产量 Grain yield per plant (g plant ⁻¹)	株系数 No. of lines	6	13	11	8	10	9	3	15	—
	平均值 Mean±SD	33.5±4.87	20.1±2.25	34.7±5.64	20.8±1.18	33.1±3.86	17.2±5.10	35.8±4.81	19.2±2.24	25.6±2.07
	变幅 Range	29.3–40.5	13.2–21.9	29.1–45.4	18.3–22.2	29.6–40.8	4.66–20.1	32.2–39.1	13.6–21.7	22.0–29.8
	±%	30.8	–21.5	35.5	–18.8	29.3	–32.8	29.8	–25.0	—
穗长 Panicle length (cm)	株系数 No. of lines	1	28	1	33	1	27	0	21	—
	平均值 Mean±SD	29.0±2.35	24.9±0.87	28.9±1.81	25.6±0.78	29.7±1.57	25.1±1.11	—	25.2±1.31	28.0±1.14
	变幅 Range	—	23.4–26.3	—	23.8–26.9	—	21.6–26.8	—	22.9–26.9	25.5–29.9
	±%	3.57	–11.10	3.21	–8.57	6.07	–10.40	—	–10.00	—
单株有效穗数 Panicle number per plant	株系数 No. of lines	0	11.0	3	3	5	3	2	3	—
	平均值 Mean±SD	—	5.10±0.25	9.60±0.21	4.70±0.60	10.4±0.61	4.20±1.59	10.6±0.07	5.20±0.29	7.40±1.13
	变幅 Range	—	4.70–5.33	9.20–9.83	4.00–5.17	9.70–11.30	2.30–5.17	10.50–10.60	4.80–5.33	6.00–8.67
	±%	—	–31.4	30.6	–36.7	40.9	–43.5	43.6	–29.9	—
每穗总粒数 Spikelet num- ber per panicle	株系数 No. of lines	1	2	3	6	3	7	1	10	—
	平均值 Mean±SD	320.8±13.4	209.2±13.7	338.1±10.5	209.0±11.2	340.2±21.2	198.4±17.6	319.3±23.6	198.9±13.1	267.6±25.8
	变幅 Range	—	199.5–218.8	329.0–349.6	188.3–219.8	324.2–364.3	168.2–218.8	—	178.3–217.8	236.0–299.7
	±%	19.9	–21.8	26.3	–21.9	27.1	–25.9	19.3	–25.7	—
结实率 Seed setting rate (%)	株系数 No. of lines	16	4	20	1	18	5	12	5	—
	平均值 Mean±SD	80.7±4.02	53.2±3.33	82.5±5.56	59.8±0.14	82.5±4.65	54.7±1.26	79.0±3.62	54.1±2.91	66.4±4.93
	变幅 Range	75.3–87.6	49.2–57.0	74.2–91.4	—	74.8–92.2	53.6–56.6	74.7–86.9	50.2–57.9	57.7–72.0
	±%	21.5	–19.9	24.2	–9.94	24.3	–17.6	19	–18.5	—
千粒重 1000-grain weight (g)	株系数 No. of lines	6	24	2	27	0	37	4	22	—
	平均值 Mean±SD	29.3±1.06	22.7±2.08	28.0±0.37	24.2±1.27	—	23.8±1.44	28.3±0.52	24.5±1.10	26.8±0.85
	变幅 Range	28.2–30.6	20.2–25.9	27.8–28.3	21.8–25.9	—	20.3–25.8	27.8–29.1	22.2–25.9	25.7–28.7
	±%	9.33	–15.30	4.48	–9.70	—	–11.20	5.60	–8.58	—
株高 Plant height (cm)	株系数 No. of lines	9	14	4	14	1	21	6	11	—
	平均值 Mean±SD	131.1±3.18	114.4±3.87	128.9±1.18	117.2±2.06	128.0±4.24	114.5±3.05	131.1±4.64	112.6±4.94	123.3±4.20
	变幅 Range	127.5–137.0	107.0–118.8	127.3–130.2	112.5–119.2	—	107.3–118.8	127.3–139.9	104.3–117.5	116.0–131.0
	±%	6.33	–7.22	4.54	–4.95	3.81	–7.14	6.33	–8.68	—
抽穗期 Heading date (d)	株系数 No. of lines	18	2	0	16	5	12	5	12	—
	平均值 Mean±SD	92.4±1.54	80.0±1.41	—	79.7±1.62	91.8±1.30	80.0±1.04	91.0±1.00	79.8±1.11	84.0±1.26
	变幅 Range	90.0–94.0	79.0–81.0	—	75.0–81.0	90.0–93.0	78.0–81.0	90.0–92.0	78.0–81.0	82.0–85.0
	±%	10.10	–4.76	—	–5.13	9.29	–4.76	8.33	–4.96	—

¹⁾ 株系数指耐盐选择后代在产量及其相关性状上显著不同于轮回亲本(明恢 86)的株系数目; 平均值表示性状差异显著株系的性状平均值; ±% 表示性状差异显著株系的性状平均值相对于轮回亲本的增减百分率。

¹⁾ No. of lines means the number of total lines significantly different from the recurrent parent (Minghui 86) in yield and its related traits for salt tolerance-selected populations; the average is calculated from those lines significantly different from the recurrent parent; and ±% means a increased or decreased percentage of average for lines with significant difference over the recurrent parents.

表 3 4 个耐盐群体后代产量显著高于轮回亲本的耐盐株系的性状表现

Table 3 Trait performance of four salt-tolerant lines with higher yield than the recurrent parents selected from salt-tolerant progenies

株系 Line	单株产量 Grain yield per plant (g plant ⁻¹)	穗长 Panicle length (cm)	单株有效穗数 Panicle number per plant	每穗总粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	株高 Plant height (cm)	抽穗期 Heading date (d)
明恢 86/Gayabyeo Minghui 86/Gayabyeo								
ZY114	38.7	27.9	8.3	302.7	75.3	27.2	118.8	82
ZY118	29.4	24.2	9.0	228.8	69.5	25.7	125.0	82
ZY122	30.9	28.5	6.2	239.0	78.4	26.4	114.0	83
ZY123	32.6	24.7	6.7	293.5	78.1	22.4	124.3	86
ZY139	40.5	26.3	7.8	274.3	76.5	27.2	116.8	81
ZY140	29.3	25.4	8.3	245.7	80.0	21.0	126.0	84
LSD _{0.05}	3.64	1.86	1.20	16.4	3.91	1.09	2.45	—
LSD _{0.01}	5.25	2.69	1.74	28.0	5.63	1.58	3.53	—
明恢 86/沈农 265 Minghui 86/Shennong 265								
ZY3	29.1	24.4	7.3	227.7	73.2	25.1	117.0	83
ZY6	31.0	26.6	8.3	241.2	79.1	24.0	119.2	81
ZY11	34.7	24.6	9.7	243.2	73.2	25.3	117.3	82
ZY14	43.4	26.5	9.4	349.6	68.8	25.7	119.5	83
ZY17	30.3	27.6	8.7	335.7	74.4	24.3	113.0	82
ZY18	29.2	25.2	8.8	215.0	74.8	26.6	122.3	81
ZY19	45.4	25.1	9.8	302.8	87.6	22.9	118.2	82
ZY24	35.2	25.8	9.0	278.8	73.4	22.6	129.0	80
ZY25	35.3	27.6	8.5	237.8	71.3	25.9	121.0	82
ZY35	37.6	23.8	7.3	232.7	84.5	25.9	123.5	84
ZY39	29.8	26.1	7.3	293.7	86.6	22.8	122.8	79
LSD _{0.05}	2.61	0.39	1.04	7.21	3.37	1.09	1.27	—
LSD _{0.01}	3.77	0.57	1.50	10.40	4.86	2.00	4.54	—
明恢 86/早粳 14 Minghui 86/Zaoxian 14								
ZY74	32.0	25.8	7.5	264.8	87.2	25.0	116.3	78
ZY75	40.8	27.7	8.0	332.3	80.0	22.9	126.5	79
ZY77	30.1	26.4	7.0	364.3	80.3	25.0	123.7	81
ZY78	32.6	25.7	7.8	276.2	84.8	25.8	125.8	91
ZY83	39.3	24.1	11.3	289.3	62.9	21.3	118.8	83
ZY90	32.1	22.8	7.7	256.3	68.5	20.3	107.3	80
ZY91	32.4	24.7	9.2	216.5	78.3	25.8	124.7	84
ZY100	29.6	25.9	10.3	233.2	62.2	23.6	117.3	83
ZY108	29.8	24.7	10.3	245.7	69.6	22.8	110.8	84
ZY113	32.7	25.2	10.2	222.8	71.6	22.5	113.8	83
LSD _{0.05}	3.31	1.12	1.60	21.1	4.30	1.58	2.13	—
LSD _{0.01}	4.78	1.62	2.31	30.4	6.20	2.28	3.07	—
明恢 86/Y134 Minghui 86/Y134								
ZY45	32.2	27.2	8.7	275.5	77.4	25.2	123.3	78
ZY53	36.1	27.9	10.5	217.8	79.5	24.8	125.8	84
ZY68	39.1	27.5	10.5	267.7	72.1	27.8	139.9	92
LSD _{0.05}	2.29	1.40	1.21	13.4	3.79	0.64	1.98	—
LSD _{0.01}	3.31	2.02	1.74	19.3	5.47	0.92	2.86	—
明恢 86 Minghui 86								
	25.6	28.0	7.4	267.6	66.4	26.8	123.3	84.0

和穗长显著减小，结实率有 2 个群体的测交种显著高于对照但另 2 个群体则显著低于对照，每穗总粒

数仅有 2 个群体的测交种显著高于对照。显然，杂种一代的性状表现与耐盐恢复系本身有所不同，尤

表 4 4 个耐盐恢复系群体与不育系 II-32A 和川 345A 测交种在正常水田环境下的产量及其相关性状的表现

Table 4 Performance of yield and its related traits of hybrids between sterile lines II-32A, Chuan 345A, and restorer lines with salt tolerance derived from four populations under paddy field environment

组合 Combination	株系数 No. of lines	单株产量 Grain yield per plant (g plant ⁻¹)	穗长 Panicle length (cm)	单株有效穗数 Panicle number per plant	每穗总粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	株高 Plant height (cm)	抽穗期 Heading date (d)
II-32A									
明恢 86/Gayabyeo Minghui 86/Gayabyeo	34	40.1±7.94	28.1±0.94	8.4±2.26	312.7±28.0	73.9±8.37	25.2±1.45	128.7±5.50	82.5±2.36
明恢 86/沈农 265 Minghui 86/Shennong 265	38	41.7±10.70	27.7±1.06	9.6±2.42	293.6±39.2	75.5±5.58	25.1±0.96	126.7±3.66	81.9±1.77
明恢 86/早籼 14 Minghui 86/Zaoxian 14	38	39.5±7.45	28.2±1.12	9.3±1.74	296.5±30.5	74.9±7.96	24.7±1.00	126.9±4.43	82.0±2.44
明恢 86/Y134 Minghui 86/Y134	32	41.4±7.99	27.8±1.60	9.5±1.85	301.2±39.4	76.2±7.39	25.0±0.87	127.8±4.60	82.9±2.53
明恢 86 Minghui 86	12	39.7±6.03	29.4±1.10	8.7±1.88	288.8±21.7	74.3±9.24	23.7±0.70	133.3±3.45	83.0±1.73
LSD _{0.05}		4.88	0.63	0.96	16.4	3.83	0.53	2.1	1.08
川 345A Chuan 345A									
明恢 86/Gayabyeo Minghui 86/Gayabyeo	35	35.7±9.27	28.4±1.30	9.1±2.15	295.0±30.4	64.7±9.12	26.7±2.05	128.3±4.98	83.6±3.17
明恢 86/沈农 265 Minghui 86/Shennong 265	32	39.3±7.51	28.3±1.09	9.8±1.76	273.7±26.4	68.3±9.75	26.9±1.56	127.1±3.02	83.1±2.00
明恢 86/早籼 14 Minghui 86/Zaoxian 14	34	34.9±10.70	28.8±1.00	9.6±2.35	267.6±25.1	61.9±8.61	26.0±3.66	124.2±3.60	82.5±1.58
明恢 86/Y134 Minghui 86/Y134	27	38.8±9.11	29.2±1.07	9.7±1.68	291.3±36.1	62.0±6.83	27.0±1.43	126.6±4.40	84.1±2.59
明恢 86 Minghui 86	12	37.6±2.74	29.5±1.01	9.6±1.48	272.2±16.2	63.4±9.23	28.9±0.88	130.9±1.45	82.6±1.52
LSD _{0.05}		4.4	0.71	0.95	14.4	0.83	1.96	1.14	1.98

其在千粒重、株高、抽穗期和结实率等性状上变化较大,而且这种变化随不育系的不同而异。

经耐盐恢复系与2个不育系测交种的单株产量分析,发现有22个和23个耐盐恢复系与II-32A和川345A测交的杂种产量显著高于轮回亲本明恢86与相应不育系的测交种,表现出较强的杂种优势,其中比生产对照种汕优10号显著或极显著增产的测交组合分别有7个(II-32A为母本)和4个(川345A为母本)(表5)。这些组合主要通过增加单株有效穗数、穗总粒数和结实率来提高产量,多数组合的株高和穗长减小。其中分别来自明恢86/沈农265和明恢86/Y134群体的耐盐恢复系ZY39、ZY68与两不育系的测交种均表现出较强的杂种优势。

3 讨论

3.1 全生育期耐盐恢复系的筛选

水稻耐盐性是十分复杂的生理遗传性状,涉及植物生长发育过程中不同阶段在细胞和组织水平上

的一系列生理生化过程^[10]。水稻对盐敏感主要集中在二叶一心至三叶一心的秧苗期和幼穗分化至减数分裂的生殖生长期^[11-15]。前者直接影响秧苗的存活率,因而影响大田的基本苗情,最终影响单位面积产量;后者造成结实率下降,直接影响单株籽粒产量。本研究利用海涂自然条件,采用海水与河水调配至0.5%浓度的盐水灌溉,并与直播的方式相结合,从二叶一心的最敏感期开始盐胁迫,对存活下来的植株继续进行全生育期的盐胁迫,成熟后以单株产量为选择指标,在2009年秋耐盐性初筛的基础上,结合海南耐盐株系的高产鉴定,入选的高产株系经第2年的耐盐性重复鉴定,对耐盐后代株系再进行产量鉴定,这样经过2轮耐盐和高产筛选,从4个供体导入优良恢复系明恢86的回交导入后代中成功地选育出30份高产耐盐恢复系。由此表明在海涂全生育期盐胁迫和正常灌溉2种条件下,针对单株产量性状的严格鉴定,可以有效地选育出高产耐盐的优良恢复系材料。

表5 正常灌溉条件下优势杂交组合的性状表现
Table 5 Trait performance of promising hybrid combinations under normal irrigated condition

组合 ¹⁾ Combination ¹⁾	单株产量 Grain yield per plant (g plant ⁻¹)	穗长 Panicle length (cm)	单株有效穗数 Panicle number per plant	每穗总粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	株高 Plant height (cm)	抽穗期 Heading date (d)
Group I								
II32A/ZY18	63.9	27.7	14.3	302.3	75.1	25.3	121.5	81.0
II32A/ZY22	54.3	27.8	14.7	311.7	82.4	23.6	128.0	84.0
II32A/ZY23	57.2	28.6	13.7	329.6	76.0	24.0	130.3	82.0
II32A/ZY39	54.6	28.4	10.8	374.8	79.4	24.0	129.0	80.0
II32A/ZY68	56.7	29.9	11.1	341.5	82.6	24.7	136.7	81.0
II32A/ZY69	58.0	27.8	11.0	328.0	88.5	26.6	124.8	84.0
II32A/ZY141	58.9	29.5	10.8	309.0	78.0	27.4	130.8	78.0
II32A/Minghui 86	39.7	29.4	8.73	288.8	74.3	23.7	133.3	83.0
LSD _{0.05}	3.53	0.53	2.22	19.6	3.33	0.95	2.21	—
LSD _{0.01}	5.08	0.76	2.45	28.3	4.80	1.37	3.19	—
Group II								
Chuan 345A/ZY39	54.2	29.2	13.3	285.3	73.9	23.8	129.7	81.0
Chuan 345A/ZY68	54.1	29.0	12.6	296.8	69.2	26.9	131.8	82.0
Chuan 345A/ZY77	60.6	28.3	14.3	300.7	79.2	22.1	133.3	82.0
Chuan 345A/ZY148	57.3	27.9	16.3	264.5	72.8	27.1	125.6	78.0
Chuan 345A/Minghui 86	37.6	29.5	9.58	272.2	63.4	28.9	130.9	82.6
LSD _{0.05}	5.83	0.35	1.86	10.2	2.64	0.77	2.21	—
LSD _{0.01}	7.40	0.50	2.68	17.5	3.81	1.11	3.67	—
CK								
II 优 838 II you 838	34.6	26.7	7.88	247.0	81.5	28.3	129.2	86.3
汕优 10 号 Shanyou 10	47.2	28.0	11.10	234.3	79.1	28.1	128.9	82.5

¹⁾ ZY18、ZY22、ZY23、ZY39 来自组合明恢86/沈农265, ZY68和ZY69来自明恢86/Y134, ZY77来自明恢86/早籼14, ZY141和ZY148来自明恢86/Gayabyeo

¹⁾ ZY18, ZY22, ZY23, and ZY39 were derived from Minghui 86/Shennong 265, ZY68 and ZY69 from Minghui 86/Y134, ZY77 from Minghui 86/Zaoxian 14, and ZY141 and ZY148 from Minghui 86/Gayabyeo.

3.2 水稻耐盐“有利隐蔽”基因的挖掘

水稻分子育种实践表明, 水稻种质资源中存在各种大量的对非生物胁迫抗性有利基因, 不管供体本身的目标性状表现如何, 在多数供体导入优良品种背景的回交导入后代中, 均出现目标性状的超亲分离, 分离出耐盐^[11,16]、耐冷^[17-18]和耐旱^[19-21]等优良抗性个体。表明供体与受体之间存在抗逆性的基因互补, 而且这种供体与受体之间的互补性受供体和受体本身及供体与受体不同组合的影响^[7,22]。本试验所使用的轮回亲本明恢86属中等感盐品种, 4种供体亲本均属盐敏感品种, 而以其导入后代在大田盐胁迫条件下均筛选到数量不等的耐盐单株, 说明这些本身耐盐性并不突出的供体确实携有以“隐蔽”形式存在的耐盐基因^[23]。相对于农家品种, 现有推广品种均经过各种优良性状的重组、配置和选择, 因而不存在明显不良的性状和不利的连锁累赘。因此, 对现有的育种群体进行严格的耐盐鉴定, 挖掘出优良品种中的“隐蔽”耐盐基因, 进一步通过标记辅助选择将其聚合并实现与其他优良农艺性状的重组, 不失为培育高产、耐盐新品种的一条快捷途径。当然, 从长远的育种目标来看, 还需要从野生稻或地方品种资源中挖掘和转移更优异的耐盐基因, 以最大限度地丰富育种亲本的耐盐基因资源。

3.3 耐盐杂交稻组合的选育

研究表明, 水稻耐盐筛选会导致耐盐材料出现一些对育种选择有益的性状, 如苗期秧苗活力和分蘖期分蘖能力增强^[24], 耐盐株系在正常水田条件下出现抽穗期、株高、产量及其相关性状的分离^[8,21]。在我们的试验中也观察到类似现象, 来源于不同供体的耐盐株系在正常栽培条件下均出现单株产量、穗长、单株有效穗数、穗总粒数、结实率、千粒重、株高、生育期等性状的明显分离。与轮回亲本相比, 耐盐筛选有使穗长显著缩短和千粒重显著降低的趋势, 尽管单株产量等性状的平均水平与轮回亲本相似, 但耐盐株系后代在多数性状上均出现显著不同于轮回亲本的两极分离, 这种分离的特点因不同组合和不同性状而异, 从而为选育不同生育类型的耐盐高产恢复系材料奠定了基础。

从4个供体导入明恢86背景选育出的30份耐盐高产改良恢复系, 与轮回亲本相比, 多数株系的穗长缩短, 单株有效穗数增多, 结实率提高, 千粒重和株高下降, 表明耐盐恢复系主要通过增加单株有效穗数和提高结实率取得高产。与明恢86与

II-32A和川345A配置的杂交种相比, 大多耐盐恢复系与这2个不育系的测交 F_1 群体的穗长和株高均显著下降, 与耐盐恢复系本身的表现相似, 但与II-32A测交种的千粒重则表现显著增加。因此, 耐盐恢复系测交种的性状表现与耐盐恢复系本身不完全一致, 还取决于不育系的差异。对上述耐盐恢复系和其杂交种的性状表现特点的了解, 将为今后耐盐恢复系和耐盐杂交稻的选育提供参考价值。

通过对II-32A和川345A测交种的优势鉴定与评价, 筛选到在水田条件下的11个强优势杂交稻新组合, 较原来的推广组合II优明86 (II-32A/明恢86) 及对照组合II优838和汕优10号显著增产, 这些优势组合主要是通过增加单株有效穗数、穗总粒数和结实率来实现增产, 而且株高显著降低, 因而抗倒能力可能比II优明86增强, 具有较大的生产应用潜力。一般地, 耐盐恢复系配置的杂种一代的耐盐性很可能好于对照组合II优明86, 其耐盐水平还有待进一步评价。因此, 利用恢复系的回交导入后代在大田盐胁迫条件下筛选耐盐单株, 结合耐盐后代的正常大田条件下产量及相关性状的筛选, 可以有效地改良恢复系的耐盐性, 选育出耐盐性得到提高的强优势组合, 对选育耐盐杂交稻具有一定的指导意义。

4 结论

具优良恢复系背景的回交导入群体经大田全生育期盐胁迫筛选出150个优良耐盐恢复系, 在正常灌溉条件下的产量及其相关性状出现分离, 从中选育出30个单株产量和耐盐性显著好于轮回亲本明恢86的株系, 这些株系大多表现穗长缩短, 株高和千粒重下降, 但单株有效穗和结实率显著增加, 导致产量的显著提高。优良耐盐恢复系群体与2个不育系的测交种大多表现穗长缩短, 株高降低, 单株有效穗数与明恢86的测交种相仿, 但与II-32A测交的杂种千粒重显著增加。鉴定出比生产对照种汕优10号显著增产的测交组合分别有7个 (II-32A为母本) 和4个 (川345A为母本), 表明利用恢复系的回交导入后代在大田盐胁迫条件下筛选耐盐单株, 结合耐盐后代的正常灌溉条件下的产量及相关性状的筛选, 可以有效地改良恢复系的耐盐性, 从而选育耐盐性得到提高的强优势组合。

致谢: 衷心感谢浙江省三门县种子技术推广站吴其褒推广研究员在大田盐胁迫方面提供的便利和帮助。

References

- [1] Martinez-Beltran J, Manzur C L. Overview of salinity problems in the world and FAO strategies to address the problem. In: Proceedings of International Salinity Forum Managing Saline Soils and Water: Science, Technology and Social Issues. Riverside Convention Center, Riverside, California, USA. 25–28 April, 2005. pp 311–314
- [2] Hu S-K(胡时开), Tao H-J(陶红剑), Qian Q(钱前), Guo L-B(郭龙彪). Progresses on genetics and molecular breeding for salt-tolerance in rice. *Mol Plant Breed* (分子植物育种), 2010, 8(4): 629–640 (in Chinese with English abstract)
- [3] Johnson D W, Smith S E, Dobrenz A K. Genetic and phenotypic relationships in response to NaCl at different developmental stages in alfalfa. *Theor Appl Genet*, 1992, 83: 833–838
- [4] Zang J-P(藏金萍), Sun Y(孙勇), Wang Y(王韵), Yang J(杨静), Li F(李芳), Zhou Y-L(周永力), Zhu L-H(朱苓华), Reys J, Fotokian M, Xu J-L(徐建龙), Li Z-K(黎志康). Dissection of genetic overlap of salt tolerance *qtls* at the seedling and tillering stages using backcross introgression lines in rice. *Sci China, Ser C* (中国科学 C 辑: 生命科学), 2008, 51(11): 583–591 (in Chinese)
- [5] Foolad M R, Chen F Q. RFLP mapping of QTLs conferring salt tolerance during the vegetative stage in tomato. *Theor Appl Genet*, 1999, 99: 235–243
- [6] Zaidem M L, Mendoza R D, Tumimbang E B. Genetic variability of salinity tolerance at different growth stages of rice. In: International Rice Research Institute. PBGB 2003 Annual Report. Los Banos, the Philippines: IRRI, 2004. pp 19–20
- [7] Li Z K, Xu J L. Breeding for drought and salt tolerant rice (*Oryza sativa* L.): progress and perspectives. In: Jenks M A, Hasegawa P M, Jain S M, eds. Advances in Molecular Breeding toward Drought and Salt Tolerant Crops. the Netherlands: Springer, 2007. pp 531–564
- [8] Pan X-B(潘晓颢), Huang S-J(黄善军), Chen K(陈凯), Meng L-J(孟丽君), Xu J-L(徐建龙). Selection of rice restorer lines with salinity tolerance through salt solution irrigation over whole growth stage under field conditions. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2012, 26(1): 49–54 (in Chinese with English abstract)
- [9] SAS Institute. SAS/STAT User's Guide. Cary NC, USA: SAS Institute, 1996. pp 25–36
- [10] Yeo A R. Physiological criteria in screening and breeding. In: Yeo A R, Flowers T J, eds. Soil Mineral Stresses: Approaches to Crop Improvement. Berlin: Springer-Verlag, 1994. pp 37–57
- [11] Meng L-J(孟丽君), Lin X-Y(林秀云), Cui Y-R(崔彦茹), Chen K(陈凯), Sun Y(孙勇), Zhu L-H(朱苓华), Xu J-L(徐建龙), Li Z-K(黎志康). Identification and screening of salt and alkaline tolerance in rice using advanced backcross introgression populations. *Mol Plant Breed* (分子植物育种), 2010, 8(6): 1142–1150 (in Chinese with English abstract)
- [12] Sun Y(孙勇), Zang J-P(藏金萍), Wang Y(王韵), Zhu L-H(朱苓华), Mohammadhosein F, Xu J-L(徐建龙), Li Z-K(黎志康). Mining favorable salt-tolerance QTL from rice germplasm using a backcrossing introgression line population. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(10): 1611–1617 (in Chinese with English abstract)
- [13] Tal M. Genetics of salt tolerance in higher plants: theoretical and applied considerations. *Plant Soil*, 1985, 89: 199–226
- [14] Rajanaidu N, Zakri A H. Breeding for morpho-physiological traits in crop plants. In: Zakri A H ed. Plant Breeding and Genetic Engineering. Bangkok: SABRAO Publishers, 1988. pp 116–139
- [15] Akbar M. Breeding saline-resistant varieties of rice. *Jpn J Breed*, 1973, 22: 277–284
- [16] Yang J(杨静), Sun Y(孙勇), Cheng L-R(程立锐), Zhou Z(周政), Wang Y(王韵), Zhu L-H(朱苓华), Cang J(苍晶), Xu J-L(徐建龙), Li Z-K(黎志康). Genetic background effect on QTL mapping for salt tolerance revealed by a set of reciprocal introgression line populations in rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(6): 974–982 (in Chinese with English abstract)
- [17] Andaya V C, Tai T H. Fine mapping of the *qCTS12* locus, a major QTL for seedling cold tolerance in rice. *Theor Appl Genet*, 2006, 113: 467–475
- [18] Jiang L, Xun M M, Wang H K, Wan H M. QTL analysis of cold tolerance at seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.) using recombination inbred lines. *J Cereal Sci*, 2008, 48: 173–179
- [19] Xu J L, Lafitte H R, Gao Y M, Fu B Y, Torres R, Li Z K. QTLs for drought escape and tolerance identified in a set of random introgression lines of rice. *Theor Appl Genet*, 2005, 111: 1642–1650
- [20] He Y X, Zheng T Q, Hao X B, Wang L F, Gao Y M, Hua Z T, Zhai H Q, Xu J L, Xu Z J, Zhu L H, Li Z K. Yield performances of *japonica* introgression lines selected for drought tolerance in a BC breeding programme. *Plant Breed*, 2010, 129: 167–175
- [21] Zhou Z(周政), Li H(李宏), Sun Y(孙勇), Huang D-Q(黄道强), Zhu L-H(朱苓华), Lu D-C(卢德城), Li K-H(李康活), Xu J-L(徐建龙), Zhou S-C(周少川), Li Z-K(黎志康). Effect of selection for high yield, drought and salinity tolerances on yield-related traits in rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron Sin* (作物学报), 2010, 36(10): 1725–1735 (in Chinese with English abstract)
- [22] Xu J-L(徐建龙), Gao Y-M(高用明), Fu B-Y(傅彬英), Li Z-K(黎志康). Identification and screening of favorable genes from rice germplasm in backcross introgression populations. *Mol Plant Breed* (分子植物育种), 2005, 3(5): 619–628 (in Chinese with English abstract)
- [23] Ali A J, Xu J L, Ismail A M. Hidden diversity for abiotic and biotic stress tolerances in the primary gene pool of rice revealed by a large backcross breeding program. *Field Crops Res*, 2006, 97: 66–76
- [24] Adorada D L, Mendoza R D, Gregorio G B. Agronomic characterization of saline-tolerant elite breeding lines with multiple tolerance for abiotic stresses. In: International Rice Research Institute. PBGB 2003 Annual Report. Los Banos, the Philippines: IRRI, 2004. p 29