网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.003

不同耐盐水稻品种对宁夏盐碱地的适应性研究

郭富城,苟瑞丽,舍杨梦斐,廖婷璐,郝馨怡,罗成科
(宁夏大学 农学院,宁夏 银川 750021)

[摘 要] 【目的】分析不同水稻品种(系)间的农艺性状、灌浆期生理特性及产量差异,为筛选宁夏盐碱地耐盐高产水稻品种(系)提供参考。【方法】采用随机区组试验设计,在宁夏盐碱地种植 SD-22、陈 2、SD-26、宁粳 48、HJW14、香优 108、陈 1、宁粳 56、宁粳 52、宁粳 50、宁粳 57、96D10、宁粳 43、SD-18、801 和陈 3 等 16 个不同水稻品种(系),利用方差分析、相关性分析及主成分分析等方法对不同水稻品种(系)的产量、农艺性状、光合特性和籽粒淀粉合成关键酶活性进行了综合评价。【结果】与宁夏主栽水稻品种(系)宁粳 43 相比,96D10、宁粳 52、SD-22 和 HJW14 产量分别显著增加 30.00%,26.23%,25.88%和 25.88%;96D10、宁粳 52、SD-22 和 HJW14 的分蘖数和光合作用也有所增加,其中 96D10 的分蘖数显著增加 30.19%,净光合速率(P_n)显著提高 7.81%;96D10、宁粳 52、SD-22 和 HJW14 的气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)分别显著增加 18.55%~55.80%,16.33%~63.27%;HJW14、陈 2 的籽粒可溶性淀粉合成酶(SSS)活性分别显著增加 54.52%,20.87%。相关性分析结果表明,水稻产量与分蘖数、P_n、G_s、T_r、SSS 活性呈极显著正相关。进一步分析表明,综合得分较高的品种(系)从高到低依次为:96D10>陈 2>HJW14>SD-22>宁粳 52。【结论】从综合得分与产量综合考虑,96D10、宁粳 52、SD-22、HJW14 可作为宁夏盐碱地种植的优良品种(系)。

[关键词] 水稻;耐盐碱性;农艺性状;籽粒淀粉合成关键酶;宁夏盐碱地
[中图分类号] S511 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0024-09

Study on the adaptability of different salt-tolerant rice varieties to saline-alkali land in Ningxia

GUO Fucheng, GOU Ruili, SHE Yangmengfei, LIAO Tinglu, HAO Xinyi, LUO Chengke
(*College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aims to analyze the differences in agronomic traits, physiological characteristics during the grain-filling period, and yield among different rice varieties (lines), to provide theoretical guidance for selecting salt-tolerant rice varieties (lines) that also exhibit high yield in the saline-alkali soils of Ningxia. 【Method】 The randomized regional experiment design was adopted. In saline-alkali soil of Ningxia, 16 different rice varieties (lines) were planted: SD-22, Chen 2, SD-26, Ningjing 48, HJW14, Xiangyou 108, Chen 1, Ningjing 56, Ningjing 52, Ningjing 50, Ningjing 57, 96D10, Ningjing 43, SD-18, 801, and Chen 3. And the yield, agronomic characteristics, photosynthetic characteristics and key enzyme activities of grain starch synthesis were comprehensively evaluated by means of variance analysis, correlation analysis and principal component analysis. 【Result】 Compared with the main Ningxia variety Ningjing 43, the yields of 96D10, Ningjing 52, SD-22 and HJW14 were increased significantly by 30.00%, 26.23%, 25.88% and 25.88%, respectively. The number of tillers and photosynthesis of 96D10, Ningjing 52, SD-22

[收稿日期] 2024-12-26 [修回日期] 2025-02-05
[基金项目] 国家重点研发计划项目(2021YFD1900603);宁夏自然科学基金项目(2023AAC03144)
[作者简介] 郭富城(2000—),男,陕西铜川人,硕士,主要从事作物栽培生理生化研究。E-mail:guofuchengaku@163.com
[通信作者] 罗成科(1979—),男,宁夏海原人,副研究员,博士,主要从事水稻高产栽培技术研究。E-mail:chkluo2022@163.com

and HJW14 were all increased, in which the number of tillers of 96D10 increased by 30.19% and the net photosynthetic rate (P_n) increased by 7.81%. The stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r) of 96D10, Ningjing 52, SD-22 and HJW14 were significantly increased by 18.55%－55.80% and 16.33%－63.27%, respectively. The grain soluble synthase (SSS) activity of HJW14 and Chen 2 were significantly increased by 54.52% and 20.87%, respectively. The correlation analysis revealed that rice yield was significantly positively correlated with tiller number, P_n, G_s, T_r and SSS activity. Further analysis revealed that the varieties (lines) with higher comprehensive scores, ranked from highest to lowest were: 96D10＞Chen 2＞HJW14＞SD-22＞Ningjing 52.【Conclusion】Based on the comprehensive score and yield, 96D10, Ningjing 52, SD-22 and HJW14 rice varieties can be regarded as excellent varieties (lines) for planting in saline-alkali land in Ningxia.

Key words: rice; salt-alkali tolerance; agronomic traits; key enzyme of starch synthesis; salt-alkali land in Ningxia

水稻作为我国三大粮食作物之一，其产量约占粮食总产量的 40%[1]，水稻也是我国 60%以上人口的主要食物来源[2]。然而由于全球气候变暖及其他因素，导致全球盐碱地面积不断增加。中国是世界上第三大盐碱土国家，盐渍土壤面积为 3 600 万 hm^2，占全国耕地面积的 4.88%[3]。宁夏作为西北主要盐碱地分布区，干旱少雨、蒸发强烈，土壤贫瘠、含盐量高。宁夏引黄灌区作物生长受到土壤盐渍化危害，导致产量降低。当地生产实践表明，盐碱地种稻具有洗盐压盐的功效[4]。因此，筛选适宜宁夏盐碱地的水稻品种对当地农业生产和盐碱地生态治理具有重要的现实意义。

灌浆期是水稻产量形成的关键时期，籽粒灌浆过程受到光合产物供应、茎秆储存物质的转运、运输系统的功能以及籽粒自身生理活动的影响，同时还受到多种酶和激素等内在因素的调节[5]。研究表明，不同水稻品种间光合特性差异显著，高光效水稻品种能够增加碳水化合物的积累[6]。茎秆作为碳水化合物储存的重要器官，深度参与水稻“源-库”关系的调节[7]。施伟等[8]研究发现，保证光合产物的供给，同时平衡“源-库”之间的关系是保证水稻籽粒灌浆的基础。在水稻开始灌浆后，茎鞘和叶片储存的碳水化合物主要以蔗糖的形式通过韧皮部运输到籽粒。周红英等[9]对不同水稻品种籽粒灌浆的研究发现，输导组织活性强的水稻品种灌浆早，且灌浆速度快。灌浆期间，运输到籽粒的碳水化合物需要通过腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGP)、淀粉分支酶(SBE)、颗粒结合态淀粉合成酶(GBSS)和可溶性淀粉合成酶(SSS)等多种酶的作用转化为淀粉及其他储存物质[10-12]，促进产量形成。刘大同等[13]研究表明，在灌浆前中期，灌浆速率快的小麦品种，其籽粒 AGP、SBE、GBSS 和 SSS 活性均高于灌浆速率较慢的小麦品种，同时其淀粉体也较大，能促进淀粉合成与积累。

目前有关在盐渍化大田试验条件下筛选耐盐水稻品种的研究，主要集中在考察农艺性状、产量及其构成因素上[14-15]，而有关灌浆期光合特性、籽粒淀粉合成关键酶活性的变化，以及其与耐盐水稻品种(系)产量间内在关系方面的研究很少。基于此，本研究从水稻产量和农艺性状、灌浆期光合特性以及籽粒淀粉合成关键酶活性等多个角度，综合评价了 16 个水稻品种(系)的田间表现，以期筛选出适宜在宁夏盐碱地种植的水稻品种(系)，为挖掘宁夏盐碱地水稻产能提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2022－2023 年在宁夏回族自治区平罗县前进农场的农垦槽型洼地示范区进行。试验地属于大陆性干旱气候，常年干旱少雨，土壤为中度盐碱土，0～20 cm 土层土壤基本理化性质为 pH 8.12，全盐含量 3.45 g/kg，全氮含量 1.52 g/kg，速效磷含量 34.83 mg/kg，速效钾含量 210.48 mg/kg，有机质含量 13.57 g/kg。

1.2　试验材料

以 SD-22、陈 2、SD-26、宁粳 48、HJW14、香优 108、陈 1、宁粳 56、宁粳 52、宁粳 50、宁粳 57、96D10、宁粳 43、SD-18、801 和陈 3 等 16 个耐盐水稻品种(系)为试验材料，其中陈 1、陈 2 和陈 3 为海稻 86 衍生系，其余均为宁夏当地自育品种(系)。

1.3　试验设计

本试验采用单因素随机区组设计，设有 3 次重

复,16 个品种(系)共计 48 个小区,小区面积为 12 m^2(5 m×2.4 m)。采用插秧种植,每穴 3~5 株,行距 30 cm,穴距 10 cm;4 月 20 日育秧,5 月 19 日插秧。施用的氮肥为尿素(N≥46%),用量为 270 kg/hm^2;磷肥采用过磷酸钙(P_2O_5≥12%),用量为 135 kg/hm^2;钾肥则施用氯化钾(K_2O≥52%),用量为 90 kg/hm^2。其他栽培管理措施按当地常规管理进行。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 产量和农艺性状测定 在每小区中间,随机选取长势较一致的 1 m 行长,分别测定水稻各品种(系)的分蘖数,记录始穗期、抽穗期和齐穗期的日期,统计抽穗持续时间;在灌浆结实期测定株高、剑叶长和宽,计算叶面积;在成熟期,从每个小区随机选取长势较一致的 5 穴植株,考察农艺性状,包括有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量等指标。每小区 3 次重复。成熟期测定每个小区的实际产量。

1.4.2 光合指标测定 在水稻灌浆期,挑选晴朗且阳光充足的天气,在上午 09:30—11:30,利用 Li-6400 光合仪测定不同小区水稻剑叶的光合指标,包括净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r),并计算水分利用效率(WUE)。使用 SPAD-502 叶绿素仪测量剑叶上部、中部和下部的 SPAD 值,求平均值,每小区 3 次重复。

1.4.3 淀粉合成关键酶活性测定 灌浆中期,在每小区中间随机选择长势一致的 5 穴植株,剔除空粒和病虫粒,将大小一致的稻穗保存至液氮中用于淀粉合成关键酶活性测定。采用生化试剂盒测定籽粒中 AGP、GBSS、SSS 和 SBE 活性。

1.5 数据处理

隶属函数值计算相关公式如下:

$$u(X_j)=\frac{X_j-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}},j=1,2,\cdots,n; \quad (1)$$

$$W_j=P_j/\sum_{j=1}^{n}P_j,j=1,2,\cdots,n; \quad (2)$$

$$D=\sum_{j=1}^{n}[u(X_j)\times W_j],j=1,2,\cdots n。 \quad (3)$$

式中:$u(X_j)$为各品种(系)X_j 的隶属函数值;X_j 是第 j 个综合指标;$X_{\min}$ 是第 j 个综合指标的最小值;$X_{\max}$ 是第 j 个综合指标的最大值;W_j 是第 j 个综合指标在所有综合指标中的权重;P_j 是经主成分分析所得各粳稻品种(系)第 j 个综合指标的贡献率;D 为 16 个水稻品种(系)综合指标评价后获得的综合得分值[16]。

使用 Microsoft Excel 2023 软件进行数据统计和整理,采用 SPSS 27.0 进行方差分析、相关性分析和主成分分析,使用 Origin 2024 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水稻品种(系)产量和农艺性状的比较

2.1.1 产量及其构成因素 16 个水稻品种(系)产量及其构成因素的变化见表 1。

表 1 16 个水稻品种(系)产量及其构成因素的变化

Table 1 Changes in the yield and its composition of 16 rice varieties (lines)

品种名称 Varieties name	有效穗数 Effective spike number	穗粒数 Spikeletes per panicle	结实率/% Setting rate	千粒质量/g 1 000-grain weight	产量/(kg·hm^{-2}) Yield
SD-22	10.50 bc	79.76 bc	89.14 a	26.86 a	8 917.05 a
陈 2 Chen 2	10.50 bc	46.49 cd	79.09 a	25.55 ab	6 916.95 abc
SD-26	11.00 abc	55.67 bcd	77.02 a	25.83 a	5 000.25 bcd
宁粳 48 Ningjing 48	10.00 bc	89.24 b	88.13 a	25.81 a	7 250.40 ab
HJW14	10.50 bc	130.68 a	83.13 a	16.87 c	8 917.05 a
香优 108 Xiangyou 108	14.50 ab	62.73 bcd	85.02 a	26.41 a	8 583.75 a
陈 1 Chen 1	14.00 ab	62.35 bcd	97.01 a	23.15 ab	7 125.30 ab
宁粳 56 Ningjing 56	7.00 c	43.12 cd	66.74 a	24.87 ab	4 000.20 d
宁粳 52 Ningjing 52	15.00 ab	47.15 cd	80.51 a	26.39 a	8 942.10 a
宁粳 50 Ningjing 50	10.50 bc	51.18 cd	73.09 a	24.64 ab	5 125.20 bcd
宁粳 57 Ningjing 57	12.00 abc	55.41 bcd	72.38 a	26.12 a	8 500.50 a
96D10	16.00 a	53.70 bcd	90.96 a	23.35 ab	9 208.80 a
宁粳 43 Ningjing 43	12.00 abc	45.30 cd	80.61 a	25.87 a	7 083.75 bcd
SD-18	11.50 abc	31.11 d	70.39 a	23.04 ab	5 041.95 cd
801	8.50 c	60.17 bcd	84.52 a	20.94 bc	5 791.95 abcd
陈 3 Chen 3	11.50 abc	45.33 cd	71.64 a	22.24 ab	6 875.40 abc

注:同列数据后标不同小写字母表示不同水稻品种间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences among different rice varieties ($P<0.05$). The same below.

由表 1 可知，不同水稻品种（系）产量及其构成因素存在不同程度的差异。有效穗数为 7.00～16.00，其中 96D10 的有效穗数最多（16.00），而宁粳 56 的有效穗数最少（7.00），二者差异显著；穗粒数为 31.11～130.68，其中 HJW14 的穗粒数最多（130.68），且与其他品种（系）有显著性差异，SD-18 穗粒数最少（31.11）；结实率为 66.74%～97.01%，各品种（系）间无显著性差异，较高的有陈 1、96D10、SD-22；千粒质量为 16.87～26.86 g，SD-22 最大（26.86 g），HJW14 最低（16.87 g）；产量为 4 000.20～9 208.80 kg/hm^2，较高的有 96D10、宁粳 52、SD-22、HJW14 和香优 108，较宁粳 43 分别显著提高了 30.00%，26.23%，25.88%，25.88% 和 21.18%，宁粳 56 产量最低，仅有 4 000.20 kg/hm^2。

2.1.2　农艺性状　表 2 显示，16 个水稻品种（系）的农艺性状存在一定差异。株高在 86.52～102.16 cm，较高品种（系）有陈 2、HJW14、宁粳 48、宁粳 50 和 SD-26，较宁夏主栽品种（系）宁粳 43 分别提高 12.64%，10.66%，8.96%，6.91% 和 5.71%；分蘖数在 110.00～175.33，较高品种（系）有 96D10、香优 108、宁粳 52、SD-22 和 HJW14，较宁粳 43 分别增加了 30.19%，16.58%，14.85%，13.86% 和 13.37%；抽穗持续时间在 8.00～16.33 d，较高品种（系）有香优 108、HJW14、宁粳 50、陈 3 和 801，较宁粳 43 分别增加了 32.44%，24.33%，21.65%，16.22% 和 16.22%；叶面积在 34.39～53.95 cm^2，较高的品种（系）有宁粳 50、宁粳 52、宁粳 48、HJW14 和 SD-26，较宁粳 43 分别增加了 12.58%，3.80%，2.13%，1.61% 和 0.29%。

表 2　16 个水稻品种（系）的农艺性状

Table 2　Agronomic traits of 16 rice varieties(lines)

品种名称 Varieties name	株高/cm Plant hight	分蘖数 Tiller number	抽穗持续时间/d Duration of heading	叶面积/cm^2 Leaf area
SD-22	93.93±2.72 a	153.33±2.60 ab	12.33±1.45 abcd	39.71±4.81 ab
陈 2 Chen 2	102.16±1.28 a	151.33±7.88 b	8.33±0.67 cd	38.97±4.40 ab
SD-26	95.88±6.43 a	139.33±2.19 b	8.33±0.33 cd	48.06±2.55 ab
宁粳 48 Ningjing 48	98.83±4.90 a	111.00±4.58 de	8.00±0.00 d	48.94±4.36 ab
HJW14	100.37±2.74 a	152.67±4.67 ab	15.33±0.88 ab	48.69±4.32 ab
香优 108 Xiangyou 108	86.89±4.45 a	157.00±5.69 ab	16.33±1.67 a	39.54±4.94 ab
陈 1 Chen 1	92.54±0.49 a	151.33±2.91 b	13.33±0.33 abc	34.39±3.29 b
宁粳 56 Ningjing 56	91.39±3.18 a	113.67±3.53 cde	10.33±0.33 bcd	43.94±4.34 ab
宁粳 52 Ningjing 52	94.28±4.93 a	154.67±6.89 ab	13.00±1.00 abcd	49.74±2.41 ab
宁粳 50 Ningjing 50	96.97±2.74 a	110.00±4.51 e	15.00±1.15 ab	53.95±5.69 a
宁粳 57 Ningjing 57	95.20±2.46 a	151.00±6.66 b	14.00±0.00 ab	39.01±2.88 ab
96D10	89.93±2.98 a	175.33±2.91 a	11.00±0.00 bcd	35.99±3.64 ab
宁粳 43 Ningjing 43	90.70±1.78 a	134.67±3.28 bc	12.33±1.33 abcd	47.92±2.35 ab
SD-18	94.12±0.83 a	141.00±1.53 b	14.00±1.53 ab	42.77±0.06 ab
801	91.21±1.98 a	142.33±3.67 b	14.33±1.33 ab	35.17±0.43 ab
陈 3 Chen 3	86.52±0.33 a	133.67±1.86 bcd	14.33±1.33 ab	42.97±3.03 ab

2.2　灌浆期不同水稻品种（系）光合特性的比较

表 3 表明，16 个水稻品种（系）的光合特性有显著差异。P_n 在 6.26～11.74 μmol/(m^2 · s)，96D10 的 P_n 最高，较宁粳 43 提升了 7.81%，其他 P_n 较高的品种（系）依次是 SD-22、陈 2、宁粳 52 和宁粳 48。C_i 在 265.45～500.32 μmol/mol，96D10 同样最高，较宁粳 43 显著提升了 50.68%，其余 C_i 较高的品种（系）有宁粳 57、SD-26、宁粳 50 和宁粳 52。G_s 和 T_r 分别在 82.70～294.00 mmol/(m^2 · s)，5.00～16.00 μmol/(m^2 · s)，其中 SD-22 的 G_s、T_r 表现最为突出，分别达到 294.00 mmol/(m^2 · s) 和 16.00 μmol/(m^2 · s)；其次较高的有香优 108、宁粳 52、HJW14 和 96D10，较宁粳 43 分别显著提升了 18.55%～55.80%，16.33%～63.27%；而陈 3 的 G_s 和 T_r 最低。WUE 在 0.56～1.84 μmol/mol，陈 3 表现最佳，较宁粳 43 显著提升了 65.77%；其次较高的有 SD-18、宁粳 57、宁粳 50 和 96D10。

2.3　灌浆期不同水稻品种（系）籽粒淀粉合成关键酶活性的变化

表 4 显示，16 个水稻品种（系）的籽粒淀粉合成关键酶活性存在显著差异。AGP 活性为 2.52～12.81 U/g，其中 801 品种（系）的 AGP 活性最高，达到 12.81 U/g；其次是香优 108、宁粳 48 和 SD-26，较宁粳 43 显著增加 89.19%～171.40%。SBE 活性为 269.00～658.00 U/g，其中 SD-22 品种（系）的 SBE 活性最高，为 658.00 U/g；其次是 SD-26、宁

粳 57、陈 3,较宁粳 43 显著增加 42.28%～56.29%。GBSS 活性为 2.28～9.01 U/g,其中宁粳 56 品种(系)的 GBSS 活性最高,达到 9.01 U/g;其次为宁粳 57、香优 108、宁粳 50,较宁粳 43 显著增加 91.94%～150.28%。SSS 活性则为 2.00～4.96 U/g,其中 HJW14 品种(系)的 SSS 活性最高,达到 4.96 U/g;其次是陈 2、香优 108、宁粳 57,较宁粳 43 增加 3.12%～54.52%。

表 3 不同水稻品种(系)灌浆期剑叶光合指标的变化

Table 3 Changes in photosynthetic index of different rice varieties(lines)

品种名称 Varieties name	P_n/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	C_i/($\mu mol \cdot mol^{-1}$)	G_s/($mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	T_r/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	WUE/($\mu mol \cdot mol^{-1}$)
SD-22	10.18±0.29 bc	283.88±9.60 ij	294.00±4.00 a	16.00±0.80 a	0.64±0.01 ef
陈 2 Chen 2	10.06±0.66 bc	308.23±6.82 ghi	274.70±7.00 ab	14.60±0.10 ab	0.69±0.04 ef
SD-26	8.84±0.50 cd	382.38±4.23 c	181.30±9.00 e	9.70±0.90 ef	0.91±0.03 cd
宁粳 48 Ningjing 48	9.38±0.13 cd	291.76±7.82 hij	260.00±10.00 bc	13.50±0.50 bc	0.70±0.02 def
HJW14	9.15±0.24 cd	348.73±8.22 def	228.70±1.00 d	11.80±0.80 d	0.78±0.03 def
香优 108 Xiangyou 108	9.37±0.28 cd	327.15±7.28 fg	245.00±9.00 cd	12.10±0.50 cd	0.77±0.01 def
陈 1 Chen 1	9.17±0.34 cd	346.09±12.61 ef	232.00±10.00 d	11.70±0.70 d	0.79±0.08 def
宁粳 56 Ningjing 56	7.32±0.17 ef	349.20±5.92 def	184.70±3.00 e	9.30±0.20 fg	0.79±0.00 def
宁粳 52 Ningjing 52	9.72±0.28 bcd	362.55±13.41 cde	243.00±13.00 cd	12.10±0.80 cd	0.80±0.03 de
宁粳 50 Ningjing 50	6.46±0.35 f	378.90±8.64 c	116.00±8.00 g	6.10±0.20 h	1.06±0.09 bc
宁粳 57 Ningjing 57	8.60±0.96 de	413.95±8.61 b	150.00±2.00 f	7.80±0.10 g	1.10±0.11 bc
96D10	11.74±0.26 a	500.32±13.80 a	223.70±8.00 d	11.40±0.30 d	1.03±0.00 bc
宁粳 43 Ningjing 43	10.89±0.45 ab	332.05±7.45 fg	188.70±13.00 e	9.80±0.30 ef	1.11±0.08 bc
SD-18	8.89±1.01 cd	374.87±9.49 cd	144.00±16.00 f	7.80±0.30 g	1.14±0.17 b
801	6.26±0.23 f	265.45±6.55 j	197.00±2.00 e	11.10±0.20 de	0.56±0.03 f
陈 3 Chen 3	9.15±0.12 cd	313.86±10.10 gh	82.70±6.00 h	5.00±0.30 h	1.84±0.13 a

表 4 不同水稻品种(系)灌浆期籽粒淀粉合成关键酶活性的变化

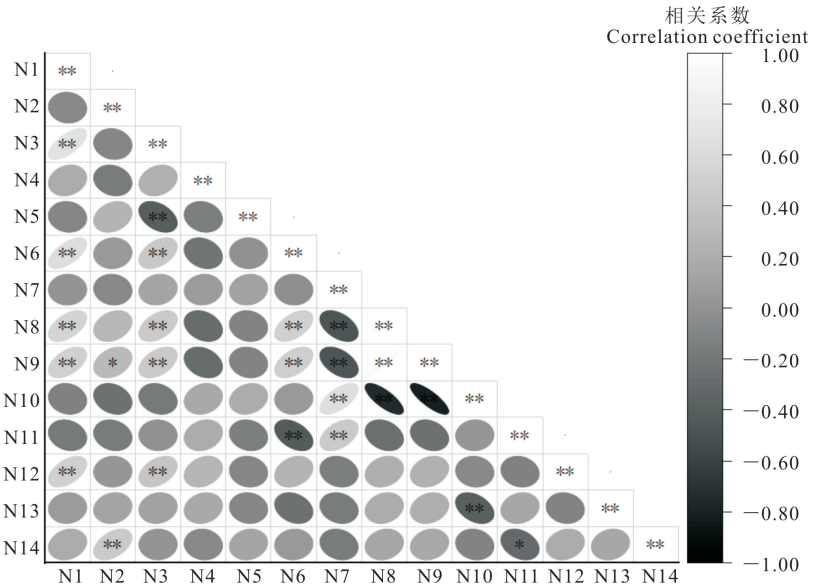
Table 4 Changes in key enzymes activity of grain starch synthesis in different rice varieties(lines) U/g

品种名称 Varieties name	AGP 活性 AGP activity	SBE 活性 SBE activity	GBSS 活性 GBSS activity	SSS 活性 SSS activity
SD-22	6.70±0.44 fg	658.00±30.00 a	2.86±0.29 ij	2.97±0.11 cde
陈 2 Chen 2	2.52±0.09 j	596.00±17.00 b	4.47±0.26 gh	3.88±0.10 b
SD-26	8.93±0.13 cd	635.00±23.00 ab	5.22±0.35 efg	2.63±0.05 e
宁粳 48 Ningjing 48	9.52±0.62 bc	589.00±8.00 b	5.52±0.36 def	2.80±0.09 de
HJW14	6.89±0.06 fg	581.00±19.00 bc	5.67±0.42 def	4.96±0.21 a
香优 108 Xiangyou 108	9.94±0.63 b	596.00±13.00 b	7.87±0.04 b	3.31±0.07 c
陈 1 Chen 1	8.38±0.12 de	269.00±1.00 g	5.66±0.20 def	3.06±0.05 cd
宁粳 56 Ningjing 56	4.46±0.12 i	321.00±16.00 g	9.01±0.16 a	2.00±0.12 f
宁粳 52 Ningjing 52	7.69±0.32 ef	512.00±32.00 cd	4.95±0.53 fg	3.21±0.22 c
宁粳 50 Ningjing 50	5.97±0.60 gh	523.00±5.00 cd	6.91±0.14 c	2.99±0.20 cde
宁粳 57 Ningjing 57	6.72±0.16 fg	603.00±17.00 ab	8.83±0.27 a	3.31±0.13 c
96D10	5.33±0.31 hi	410.00±5.00 f	6.25±0.41 cd	3.04±0.14 cde
宁粳 43 Ningjing 43	4.72±0.08 i	421.00±26.00 ef	3.60±0.03 hi	3.21±0.20 cd
SD-18	7.37±0.16 f	506.00±26.00 d	6.05±0.30 cde	2.65±0.13 e
801	12.81±0.27 a	480.00±30.00 de	5.97±0.27 de	3.14±0.07 cd
陈 3 Chen 3	5.24±0.22 hi	599.00±10.00 ab	2.28±0.07 j	3.20±0.10 cd

2.4 不同水稻品种(系)产量潜力相关性状的相关性分析

对 13 个与产量潜力相关的性状进行相关性分析,结果见图 1。由图 1 可以看出,水稻的农艺性状、灌浆期光合特性、籽粒淀粉合成关键酶活性与产量之间存在显著的相关性。具体而言,分蘖数与产量之间的关系尤为突出,表现为极显著正相关($P<0.01$),这表明增加分蘖数能够有效促进产量的提升,此外分蘖数与光合指标 P_n、G_s、T_r 及 SSS 活性之间存在极显著正相关关系。光合特性指标中,除 C_i 外,其余指标均与产量呈现极显著正相关,表明光合能力的提升可以显著提高作物产量,其中 P_n 与 G_s 和 T_r 之间同样表现出极显著正相关,这说明水稻叶片净光合速率的提高与气孔的开放程度和蒸腾作用密切相关,其中 G_s 与 T_r 之间也展现出极显著的正相关关系,这表明气孔的开放状态与蒸腾作用之间存在强烈的正相关性。在籽粒淀粉合成关键酶方面,SSS 活性与产量之间也呈现极显著的正相

关关系，进一步强调了该性状对产量的积极影响。



N1. 产量；N2. 株高；N3. 分蘖数；N4. 抽穗持续时间；N5. 叶面积；N6. 净光合速率；N7. 胞间 CO_2 浓度；N8. 气孔导度；N9. 蒸腾速率；N10. 水分利用效率；N11. GBSS 活性；N12. SSS 活性；N13. AGP 活性；N14. SBE 活性。＊＊与＊分别表示在 0.01 和 0.05 概率水平差异显著。

N1. Yield; N2. Plant hight; N3. Tiller number; N4. Duration of heading; N5. Leaf area; N6. Net photosynthetic rate; N7. Intercellular CO_2 concentration; N8. Stomatal conductance; N9. Transpiration rate; N10. Water use efficiency; N11. GBSS activity; N12. SSS activity; N13. AGP activity; N14. SBE activity. ＊＊ and ＊ indicate significant differences at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively.

图 1　16 个水稻品种(系)产量潜力指标的相关性分析

Fig. 1　Correlation analysis of yield potential indexes of 16 rice varieties(lines)

2.5　不同水稻品种(系)的综合评价

2.5.1　主成分分析　主成分分析结果(表 5)显示，前 5 个主成分的特征值均大于 1，方差贡献率分别为 23.15%，17.40%，16.82%，15.39%和 12.70%，累计方差贡献率达到了 85.46%。遵循特征值≥1 且累计方差贡献率≥80%的原则，表明前 5 个主成分能够代表 16 个水稻品种(系)不同性状的多数遗传信息量。

由表 5 可以看出，在主成分 1 中，贡献值最高的性状是 G_s 和 T_r；在主成分 2 中，SSS 活性是贡献值最大的性状；在主成分 3 中，分蘖数的贡献值最高；在主成分 4 中，P_n 的贡献值最大；在主成分 5 中，GBSS 活性的贡献值最高。

表 5　不同水稻品种(系)各指标的主成分分析结果

Table 5　Principal component analysis results of various indexes of different rice varieties(lines)

指标 Index	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3	主成分 4 Component 4	主成分 5 Component 5
产量 Yield	0.25	0.71	0.45	0.26	0.04
分蘖数 Tiller number	0.11	0.46	0.81	0.18	0.14
叶面积 Leaf area	−0.14	0.19	−0.88	0.14	0.03
P_n	0.20	0.30	0.40	0.75	−0.15
C_i	−0.34	0.05	0.20	0.45	0.73
G_s	0.92	0.11	0.07	0.14	−0.17
T_r	0.92	0.20	0.24	0.07	−0.16
WUE	−0.90	0.02	−0.02	0.32	−0.20
GBSS 活性 GBSS activity	0.05	−0.21	−0.07	−0.31	0.87
SSS 活性 SSS activity	0.07	0.81	0.07	0.04	−0.03
AGP 活性 AGP activity	0.12	0.08	0.19	−0.85	−0.01
SBE 活性 SBE activity	0.03	0.69	−0.28	−0.13	−0.32
特征值 Eigenvalue	2.78	2.09	2.02	1.85	1.52
方差贡献率/% Contribution rate of variance	23.15	17.40	16.82	15.39	12.70
累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	23.15	40.55	57.37	72.76	85.46

2.5.2 综合得分 16 个水稻品种(系)耐盐适应性综合得分 D 值如表 6 所示。由表 6 可以看出,综合得分前 5 名的品种(系)依次为:96D10、陈 2、HJW14、SD-22、宁粳 52。其中,陈 2 的综合得分为第 2 名,但其产量较低(第 10 名),说明陈 2 不适宜在宁夏盐碱地大面积种植。

表 6 16 个水稻品种(系)的综合得分与排名

Table 6 Comprehensive score and ranking of 16 rice varieties(lines)

品种名称 Varieties name	综合得分 Aggregate score	排名 Ranking	品种名称 Varieties name	综合得分 Aggregate score	排名 ranking
SD-22	0.36	4	宁粳 52 Ningjing 52	0.30	5
陈 2 Chen 2	0.47	2	宁粳 50 Ningjing 50	−0.65	15
SD-26	−0.24	11	宁粳 57 Ningjing 57	0.25	7
宁粳 48 Ningjing 48	−0.03	9	96D10	0.82	1
HJW14	0.45	3	宁粳 43 Ningjing 43	−0.06	10
香优 108 Xiangyou 108	0.28	6	SD-18	−0.44	14
陈 1 Chen 1	0.09	8	801	−0.43	13
宁粳 56 Ningjing 56	−0.34	12	陈 3 Chen 3	−0.83	16

3 讨 论

3.1 不同水稻品种(系)农艺性状与产量的比较

品种对作物高产具有重要影响[17]。水稻的重要农艺性状,如株高、分蘖数、有效穗数、穗长、穗粒数等均为数量性状,受多基因控制且易受环境影响,这些数量性状不仅关系到水稻的产量,同时也直接影响其在不同种植环境下的表现和适应性[18]。刘猷红等[19]研究发现,水稻产量与株高呈显著正相关;吴小敏[20]基于农艺性状筛选优质水稻品种,结果发现产量与分蘖数、穗粒数呈极显著正相关。本研究中,与产量相关性最大的是分蘖数,相关性最小的是株高,说明分蘖数直接影响水稻产量,且不同品种(系)间分蘖数在 110.00～175.33,差异较大,分蘖数较多的水稻品种(系)有 96D10、香优 108、宁粳 52、SD-22 和 HJW14。产量是株高、分蘖数、叶面积等农艺性状的综合体现,对于筛选适宜品种至关重要[18]。本研究中 16 个水稻品种(系)产量差异较大,其中 96D10、宁粳 52、SD-22、HJW14、香优 108 产量均在 8 583.75 kg/hm^2 以上,显著高于宁粳 43,在生产中表现出较高产量潜力。

3.2 不同水稻品种(系)灌浆期光合特性和淀粉合成关键酶活性的比较

水稻的产量高度依赖光合作用,尤其是在灌浆期,具体来说高效的光合作用促进产量提升,这是因为 90%～95%的植物干质量和生物量来源于光合作用的产物[21]。李君霞等[22]研究认为,灌浆期 P_n 与产量极显著正相关,P_n 越高,越有利于有机物积累;朱鹏飞[23]对 12 个晚粳稻品种光合特性研究发现,水稻产量与剑叶 G_s、C_i 呈显著正相关;陈鸽等[24]研究发现,水稻产量与剑叶 P_n、G_s 和 T_r 呈极显著正相关。在本研究中,与宁粳 43 相比,96D10 的 P_n 值提升了 7.81%,其产量增加了 30.00%;SD-22、香优 108、宁粳 52、HJW14 和 96D10 的 G_s、T_r 分别显著增加 18.55%～55.80%,16.33%～63.27%,同样产量显著增加 21.18%～30.00%,即高产水稻具有高光效特性,其中 P_n、G_s 和 T_r 与产量的相关性达到极显著水平。高 P_n 值的品种(系)能够在光照下更有效进行光合作用,合成更多有机物[22];同时 G_s 的增加提高了二氧化碳的吸收效率,促进光合作用的增强,从而增加了产量[25];T_r 在水分管理和叶片温度调节中起到重要作用,适宜的 T_r 有助于维持叶片水分平衡,避免水分不足导致的光合速率下降[26]。因此,剑叶 P_n、G_s 和 T_r 共同协作构成了不同水稻品种(系)间产量差异的生理基础。综上所述,水稻的高产可以归功于光合作用的高效进行,在今后水稻栽培育种中可以通过优化光合效率来提升水稻整体产量。

灌浆过程中淀粉积累是水稻籽粒的主要成分[27],其合成是一个复杂的生理过程,主要受籽粒中淀粉代谢途径关键酶活性的直接影响[28]。步金宝[29]研究发现,在齐穗后 3 个水稻品种籽粒 AGP、SSS 活性与产量呈显著或极显著正相关,不同品种间淀粉合成关键酶活性存在差异;郭连安等[30]研究发现,4 种水稻品种籽粒淀粉含量与 GBSS 和 SSS 活性有关;YANG 等[31]研究发现,在灌浆期适当的干旱胁迫能增加灌浆过程中水稻籽粒 SSS 和 SBE 活性,而且其活性与淀粉含量有极显著的相关性。本研究结果表明,16 个水稻品种(系)均能在宁夏盐碱地完成生育期,其中 96D10、宁粳 52、SD-22、HJW14 具有较高的产量,且有较高的 SSS、AGP、SBE 活性,其中 SSS 活性与产量呈极显著正相关;

HJW14、陈 2、香优 108 和宁粳 57 籽粒的 SSS 活性较宁粳 43 增加 3.12%～54.52%。AGP 是淀粉合成途径中的关键限制酶，高活性的 AGP 能显著提高淀粉合成速率[32]。SBE 是调控直链淀粉和支链淀粉含量的关键酶，通过催化支链淀粉合成改变直链淀粉和支链淀粉的比例及结构，能显著影响产量[33]。本研究结果发现，AGP、SBE 活性与产量间的相关性不显著，这与步金宝[29]的研究结果不同，这可能是不同试验中水稻品种（系）间基因型存在差异以及稻穗取样时间和次数不同所导致的。

3.3　不同水稻品种（系）的综合评价

在进行作物品种（系）筛选时，利用多种方法（方差分析、相关性分析、主成分分析）对多个性状进行综合评价，具有一定的科学合理性。付江鹏等[34]利用多元统计方法对多个高粱品种的农艺性状进行综合评价，结果显示辽粘 3、晋杂 34 的综合得分高于其他品种，认为这 2 个品种适宜在陇东黄土高原种植。王英成等[35]利用方差分析、相关性分析和主成分分析方法，筛选高产且适合西宁地区种植的玉米品种，结果显示翔玉 998、优迪 919 适宜在西宁地区种植。同样，本研究利用多种分析方法对 16 个水稻品种（系）进行综合评价，综合得分较高的品种（系）从高到低依次为 96D10、陈 2、HJW14、SD-22、宁粳 52。实际产量结果表明，96D10、宁粳 52、SD-22、HJW14、香优 108 这 5 个品种（系）的产量高于其他品种（系）。将综合得分与实际产量结合考虑，本研究筛选出 96D10、宁粳 52、SD-22 和 HJW14，这些品种（系）在宁夏农垦槽型洼地示范区田间表现良好，具有较强的盐碱适应性。鉴于水稻耐盐碱机制较为复杂，大田土壤盐碱分布不均一，建议今后在分析农艺性状、光合特性、淀粉合成关键酶活性等指标的基础上，还应结合调查一些大田环境适应性指标，建立完善的综合评价体系，从而精准筛选出适宜本地区种植的耐盐碱作物品种（系）。

4　结　论

基于对 16 个水稻品种（系）农艺性状、灌浆期光合特性和籽粒淀粉合成关键酶活性的测定，通过方差分析、相关性分析和主成分分析，结合实际产量，综合得出适宜宁夏盐碱地种植的水稻品种（系）为 96D10、宁粳 52、SD-22 和 HJW14。

[参考文献]

[1] 吴少祥，王斌，郭涛. 水稻优质高产新品种筛选试验[J]. 现代农业科技，2023(16)：43-46.
WU S X，WANG B，GUO T. Screening experiment of new rice varieties with high quality and high yield[J]. Modern Agricultural Science and Technology，2023(16)：43-46.

[2] 朱德峰，张玉屏，陈惠哲，等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学，2015，48(17)：3404-3414.
ZHU D F，ZHANG Y P，CHEN H Z，et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. Scientia Agricultura Sinica，2015，48(17)：3404-3414.

[3] LI J G，PU L J，HAN M F，et al. Soil salinization research in China：advances and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences，2014，24(5)：943-960.

[4] 严海霞，何文寿. 宁夏银北地区盐碱地改良与水稻种植技术探讨[J]. 湖北农业科学，2010，49(11)：2693-2695.
YAN H X，HE W S. Improvement of saline-alkali soil and rice cultivation technology in northern Yinchuan of Ningxia[J]. Hubei Agricultural Sciences，2010，49(11)：2693-2695.

[5] 龚金龙，张洪程，胡雅杰，等. 灌浆结实期温度对水稻产量和品质形成的影响[J]. 生态学杂志，2013，32(2)：482-491.
GONG J L，ZHANG H C，HU Y J，et al. Effects of air temperature during rice grain-filling period on the formation of rice grain yield and its quality[J]. Chinese Journal of Ecology，2013，32(2)：482-491.

[6] 贺俐，罗辉，贺晓鹏，等. 基于光合电子流的超级早稻光合特性研究[J]. 核农学报，2020，34(2)：418-424.
HE L，LUO H，HE X P，et al. Photosynthetic characteristics of different super early rice based on mechanistic model of light-response of photosynthetic electron flow[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2020，34(2)：418-424.

[7] 张文地. 水氮调控对水稻非结构性碳水化合物积累转运与颖花形成的影响[D]. 江苏扬州：扬州大学，2023.
ZHANG W D. Effects of water and nitrogen regulation on accumulation and transportation of non-structural carbohydrates and spikelet formation in rice[D]. Yangzhou，Jiangsu：Yangzhou University，2023.

[8] 施伟，朱国永，孙明法，等. 水稻籽粒灌浆的影响因子及其机制研究进展[J]. 中国农学通报，2020，36(8)：1-7.
SHI W，ZHU G Y，SUN M F，et al. Influence factors and mechanism of rice grain filling：research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2020，36(8)：1-7.

[9] 周红英，张桂莲，肖应辉，等. 超大穗型水稻 R1 126 及其组合穗颈输导组织与籽粒灌浆结实的关系[J]. 中国水稻科学，2014，28(4)：411-418.
ZHOU H Y，ZHANG G L，XIAO Y H，et al. Relationship between the conducting tissue in the first internode and the grain-filling of super large panicle rice restore line R1 126 and its derived combinations[J]. Chinese Journal of Rice Science，2014，28(4)：411-418.

[10] KANG G Z，XU W，LIU G Q，et al. Comprehensive analysis of the transcription of starch synthesis genes and the transcription factor RSR1 in wheat (*Triticum aestivum*) endosperm[J]. Genome，2013，56(2)：115-122.

[11] FU J,XU Y J,CHEN L,et al. Changes in enzyme activities involved in starch synthesis and hormone concentrations in superior and inferior spikelets and their association with grain filling of super rice[J]. Rice Science,2013,20(2):120-128.

[12] YAN S,LI W,YIN Y,et al. Sink strength in relation to growth of superior and inferior grains within a wheat spike[J]. The Journal of Agricultural Science,2010,148(5):567-578.

[13] 刘大同,蒋正宁,张晓,等.小麦不同灌浆速率品种籽粒淀粉合成与积累研究[J].植物生理学报,2021,57(3):703-712.
LIU D T,JIANG Z N,ZHANG X,et al. Studies on starch biosynthesis and accumulation in wheat varieties with different grain-filling rates[J]. Plant Physiology Journal,2021,57(3):703-712.

[14] 陈绳全,许俊鹏.闽南沿海地区耐盐水稻品种筛选和产量构成分析[J].数字农业与智能农机,2024(7):91-93.
CHEN S Q,XU J P. Selection of salt-tolerant rice varieties and yield composition analysis in the coastal areas of southern Fujian[J]. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery,2024(7):91-93.

[15] 付雪蛟,李旭,付立东,等.耐盐水稻品种筛选试验报告[J].北方水稻,2017,47(1):22-24.
FU X J,LI X,FU L D,et al. Test report on selecting salt-tolerant rice varieties[J]. North Rice,2017,47(1):22-24.

[16] 陈新,宋高原,张宗文,等.PEG-6000胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价[J].植物遗传资源学报,2014,15(6):1188-1195.
CHEN X,SONG G Y,ZHANG Z W,et al. Identification and evaluation of drought resistance of naked oat(*Avena nuda* L.)under PEG-6000 stress at germination stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2014,15(6):1188-1195.

[17] 周文静,李文娟,郭涛,等.品种及收获时间对青贮玉米营养组成的影响[J].草业科学,2022,39(7):1419-1428.
ZHOU W J,LI W J,GUO T,et al. Effects of silage maize varieties and harvest time on silage nutritional composition[J]. Pratacultural Science,2022,39(7):1419-1428.

[18] 魏秀彩.基于MAGIC群体的水稻农艺和品质若干性状全基因组关联分析[D].长沙:湖南大学,2020.
WEI X C. Genome-wide association study of some agronomic and quality characters of rice based on MAGIC population[D]. Changsha:Hunan University,2020.

[19] 刘猷红,唐傲,董文军,等.黑龙江不同育种阶段粳稻主要农艺性状演变规律[J].中国稻米,2025,31(1):68-73.
LIU Y H,TANG A,DONG W J,et al. Evolution rule of major agronomic traits of Heilongjiang Japonica rice at different breeding stages[J]. China Rice,2025,31(1):68-73.

[20] 吴小敏.基于农艺性状信息的石阡县优质稻品种筛选研究[D].贵阳:贵州大学,2020.
WU X M. Screening of high quality rice varieties in Shiqian County based on agronomic trait information[D]. Guiyang:Guizhou University,2020.

[21] 魏媛媛.寒地水稻点深施氮的产量品质及氮素利用研究[D].黑龙江大庆:黑龙江八一农垦大学,2020.
WEI Y Y. Research on yield and quality and nitrogen utilization of rice in cold areas[D]. Daqing, Heilongjiang: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2020.

[22] 李君霞,朱灿灿,代书桃,等.不同夏谷品种光合特性、干物质积累转运及灌浆特性[J].江苏农业科学,2021,49(23):82-86.
LI J X,ZHU C C,DAI S T,et al. Photosynthetic characteristics,accumulation and transportation of dry matter,grain filling parameter of different summer foxtail millet cultivars[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2021,49(23):82-86.

[23] 朱鹏飞.十二个浙江省晚粳稻品种光合特性和产量的比较[D].河北秦皇岛:河北科技师范学院,2024.
ZHU P F. Comparison of photosynthetic characteristics and yield of 12 late Japonica rice varieties in Zhejiang Province[D]. Qinhuangdao, Hebei: Hebei Normal University of Science & Technology,2024.

[24] 陈鸽,谷雨,文炯,等.冬闲杂草还田对水稻光合物质生产和产量的影响[J].中国农业科学,2025,58(4):657-659.
CHEN G,GU Y,WEN J,et al. Effects of fallow weeds returning to the field on photosynthetic matter production and yield of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica,2025,58(4):657-659.

[25] 张超,郑恩楠,顾鹤南,等.不同灌溉方式和施氮量对水稻光合特性、农艺性状及氮素利用的影响[J].吉林农业大学学报,2024,46(6):945-955.
ZHANG C,ZHENG E N,GU H N,et al. Effects of different irrigation and nitrogen application methods on photosynthetic characteristics,agronomic traits and nitrogen use of rice[J]. Journal of Jilin Agricultural University,2024,46(6):945-955.

[26] 王金鹏,田军仓.沙质盐碱地不同品种水稻生长、光合、产量及品质的差异性分析[J].宁夏工程技术,2024,23(3):219-225.
WANG J P,TIAN J C. Analysis of growth,photosynthesis,yield,and quality differences of different rice varieties in sandy saline-alkali land[J]. Ningxia Engineering Technology,2024,23(3):219-225.

[27] VERMA D K,SRIVASTAV P P. Isolation,modification,and characterization of rice starch with emphasis on functional properties and industrial application:a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,2022,62(24):6577-6604.

[28] 陈婷婷,许更文,钱希旸,等.花后轻干-湿交替灌溉提高水稻籽粒淀粉合成相关基因的表达[J].中国农业科学,2015,48(7):1288-1299.
CHEN T T,XU G W,QIAN X Y,et al. Post-anthesis alternate wetting and moderate soil drying irrigation enhance gene expressions of enzymes involved in starch synthesis in rice grains[J]. Scientia Agricultura Sinica,2015,48(7):1288-1299.

[29] 步金宝.盐碱胁迫下寒地粳稻产质量形成机理的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2012.
BU J B. Study on the formation mechanism of yield and quality of Japonica rice in cold region under saline-alkali stress[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2012.

(下转第44页)

YANG L,WU H,ZHAO L H,et al. The effect of intercropping of maize and soybean on stomata and photosynthetic efficiency of maize[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science),2012(1):39-43.

[18] 刘朝茂,李成云. 玉米与大豆、马铃薯间作对玉米叶片衰老、产量及病害控制的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(6):75-78.
LIU C M,LI C Y. Effects of intercropping maize with soybean and potato on leaf senescence, yield and disease control of maize[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2017,45(6):75-78.

[19] 张宪政. 植物叶绿素含量测定:丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学,1986(3):26-28.
ZHANG X Z. Determination of chlorophyll content in plant: acetone-ethanol mixed solution method[J]. Liaoning Agricultural Sciences,1986(3):26-28.

[20] 王雅梅,许彦骁,王亚露,等. 玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性及群体产量的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(11):2587-2595.
WANG Y M,XU Y X,WANG Y L,et al. Effects of corn-soybean intercropping with different widths on photosynthetic characteristics and population yield of soybean[J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2020, 39(11): 2587-2595.

[21] WEI W W,LIU T T,SHEN L,et al. Effect of maize (*Zeal mays*) and soybean (*Glycine max*) intercropping on yield and root development in Xinjiang,China[J]. Agriculture,2022,12(7):996.

[22] 张忠华,尹士芳,谢宾. 大豆玉米间作对作物生长特性及产量效益的影响[J]. 中国农技推广,2024,40(3):44-47.
ZHANG Z H,YIN S F,XIE B. Effects of soybean and maize intercropping on crop growth characteristics and yield benefit [J]. China Agricultural Technology Extension,2024,40(3):44-47.

[23] 林平,庞成民,海涛,等. 黄淮地区玉米与大豆不同间作模式的产量和效益比较[J]. 河北农业科学,2020,24(4):14-18.
LIN P,PANG C M,HAI T,et al. Comparison of yield and benefit of different intercropping patterns of maize and soybean in Huanghuai region[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences,2020,24(4):14-18.

[24] 李美霞,陈骋,汪健,等. 不同带状复合种植模式对大豆玉米农艺性状及产量的影响[J/OL]. 甘肃农业大学学报,2024:1-13(2024-05-11). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GSND20240508006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
LI M X,CHEN C,WANG J,et al. Effects of different strip compound planting patterns on agronomic traits and yield of soybean and maize[J/OL]. Journal of Gansu Agricultural University,2024: 1-13(2024-05-11). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=GSND20240508006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[25] 刘浩,左青松,刘婧怡,等. 盐分浓度对油菜干物质积累分配、农艺性状及品质的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(22):19-23.
LIU H,ZUO Q S,LIU J Y,et al. Effects of saltion content on dry matter accumulation and distribution, agronomic traits and quality of rapeseed[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2017,33(22):19-23.

[26] 曹曼君. 不同间作比例对玉米大豆光合特性及产量的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2022.
CAO M J. Effects of different intercropping proportions on photosynthetic characteristics and yield of maize and soybean [D]. Changchun:Jilin Agricultural University,2022.

(责任编辑:屈李纯)

(上接第32页)

[30] 郭连安,胡运高,杨国涛,等. 不同直链淀粉含量水稻籽粒淀粉积累及其相关酶的活性变化研究[J]. 云南大学学报(自然科学版),2014,36(6):942-949.
GUO L A,HU Y G,YANG G T,et al. The research on the accumulation of grain starch and change of related enzymes activity in rice with different amylose contents[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition),2014,36(6):942-949.

[31] YANG J C,ZHANG J H,WANG Z Q,et al. Activities of enzymes involved in sucrose-to-starch metabolism in rice grains subjected to water stress during filling[J]. Field Crops Research,2003,81(1):69-81.

[32] 高振楠,郝媛媛,李春寿,等. 水稻调控淀粉合成基因的研究进展[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(1):61-74.
GAO Z N,HAO Y Y,LI C S,et al. Study on genes regulating starch synthesis in rice[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2023,24(1):61-74.

[33] 张诚信. 灌浆结实期低温弱光复合胁迫对水稻产量和品质的影响[D]. 江苏扬州:扬州大学,2020.
ZHANG C X. Effects of low temperature and weak light combined stress on rice yield and quality during grain filling and filling stage[D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2020.

[34] 付江鹏,柳发财,闫宝琴,等. 不同高粱品种适应性综合评价与筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(5):35-46.
FU J P,LIU F C,YAN B Q,et al. Comprehensive evaluation and screening of adaptability of different sorghum varieties [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2025,53(5):35-46.

[35] 王英成,芦光新,邓晖,等. 基于主成分分析的青贮玉米品种农艺性状评价及筛选研究[J]. 草地学报,2019,27(6):1725-1732.
WANG Y C,LU G X,DENG H,et al. Evaluation and screening of agricultural characters of silage maize varieties based on principal component analysis[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019,27(6):1725-1732.

(责任编辑:屈李纯)