

马 畅,李 旭,吕小红,等. 盐粳系列水稻氮肥效率差异及氮高效品种筛选[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):32-38.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.13.006

# 盐粳系列水稻氮肥效率差异及氮高效品种筛选

马 畅,李 旭,吕小红,王 宇,付立东,任 海,隋 鑫,杜 萌,李振宇,于亚辉

(辽宁省盐碱地利用研究所,辽宁盘锦 124010)

**摘要:**为科学准确筛选氮高效水稻品种,同时进一步明确氮高效水稻品种筛选指标,设置了零氮(0 kg/hm<sup>2</sup>)、低氮(150 kg/hm<sup>2</sup>)、中氮(195 kg/hm<sup>2</sup>)、高氮(240 kg/hm<sup>2</sup>)4 种氮肥处理,比较盐粳系列水稻在不同施氮水平下产量、氮肥利用率、氮素积累量、光合特性及叶片营养指标。结果表明,品种间,盐粳 22、盐丰 47 的产量显著高于盐粳 218,其他品种间差异不显著。盐丰 47 各生育时期氮积累总量不高,但成熟期氮素积累主要集中在穗部,氮收获指数显著高于其他品种。盐丰 47 氮吸收利用率不高,但氮生理利用率、氮素转运效率、氮收获指数最高,氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力高,具有较高的氮素利用能力、氮素转运能力以及将吸收的氮素转化为稻谷(产量)的能力。盐粳 218 各生育时期氮积累总量较高,氮吸收利用率高,但齐穗后氮素积累主要集中在茎叶部,氮生理利用率和氮收获指数最低。结合产量、氮肥利用率、氮收获指数,盐丰 47 为氮高效水稻品种,盐粳 218 为氮低效品种,盐粳 939、盐粳 22、盐粳 456、盐粳 933 为中间型品种。方差分析表明,氮肥的施用显著或极显著影响水稻的产量、穗数、氮生理利用率、氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力、各生育时期氮素积累量、光合特性和移栽后叶片的 SPAD 值与 NBI,同时超过品种的影响。品种分别对氮收获指数和氮生理利用率有极显著和显著影响。齐穗期的 SPAD 值、NBI 能够较好反映叶片的营养状态和各生育时期的氮素积累量,但不能直接作为氮高效品种筛选指标。为协调氮高效吸收和高效利用的关系,生产中应选择高产和氮收获指数高的水稻品种。

**关键词:**水稻;氮肥利用率;氮高效;产量

**中图分类号:**S511.06

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2022)13-0032-07

长期以来由于我国粮食自给自足的压力,我国水稻育种及栽培策略主要追求高产。氮肥施用是实现水稻高产和稳产的有效手段,是保障粮食安全和缓解耕地资源不足的重要措施<sup>[1]</sup>,但由于氮肥的不合理施用尤其是过量施用导致氮肥回报率降低以及对农业生态系统和环境造成不良影响<sup>[2]</sup>。为提高氮肥利用率,促进减氮增产,实现水稻高产高效生产,前人做了大量研究,主要集中在优化氮肥管理<sup>[3-6]</sup>、土壤改良<sup>[7-8]</sup>、研发新型肥料<sup>[9-11]</sup>等。氮肥利用率是一个复杂性状,受种植环境、栽培措

施、品种特性等多因素影响<sup>[12]</sup>。不同基因型水稻品种对氮素的吸收利用效率存在一定的差异<sup>[13-14]</sup>,挖掘水稻耐低氮相关基因,培育氮高效水稻新品种,是提高氮素利用率、降低氮肥施用量的有效途径<sup>[15-16]</sup>。国内外越来越重视研究水稻氮素利用机理,改良氮素利用率的遗传潜力,从而建立高产高效技术体系,实现农业的高质量可持续发展。本试验以高产盐粳系列水稻品种作为供试材料,设置零氮、低氮、中氮、高氮 4 种水平氮肥处理,比较不同水稻品种产量、氮肥利用率和田间表现,进一步筛选氮高效品种,探讨氮高效水稻氮素利用率高的机理,为氮高效水稻品种选育提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2018 年在盘锦市大洼区的辽宁省盐碱地利用研究所试验基地(122.19°E,44.04°N)进行。土壤类型为滨海盐滞型水稻土,基本理化性质为:有机质含量 25.554 g/kg、全氮含量 1.257 g/kg、碱解氮含量 114.57 mg/kg、速效磷含量 56.533 7 mg/kg、速效钾含量 256.594 0 mg/kg,pH 值 7.5。以高产盐粳

收稿日期:2021-08-30

基金项目:辽宁省农业重大专项(编号:2019JH1/10200001);辽宁省农业科学院学科建设项目(编号:2019DD185927);辽宁省自然科学基金指导计划(编号:2019-ZD-0397);辽宁省农业科学院院长基金(编号:2021QN2017);辽宁省科学技术计划(编号:2020-MS-342)。

作者简介:马 畅(1989—),女,辽宁沈阳人,硕士,助理研究员,主要从事水稻高产优质高效栽培及生理研究。E-mail:mac\_89@126.com。

通信作者:李振宇,研究员,主要从事水稻耐盐高产优质育种研究工作。E-mail:13314276668@163.com。

系列水稻盐丰 47、盐粳 456、盐粳 218、盐粳 22、盐粳 933、盐粳 939 共 6 个品种作为供试材料。

## 1.2 试验设计

试验采用裂区设计,施氮水平为主区,品种为副区,3 次重复。设零氮(N0,0 kg/hm<sup>2</sup>)、低氮(N1,150 kg/hm<sup>2</sup>)、中氮(N2,195 kg/hm<sup>2</sup>)和高氮(N3,240 kg/hm<sup>2</sup>)4 个施氮水平,2018 年 4 月 18 日播种,5 月 24 日移栽,移栽密度 30 cm × 18 cm,每穴 4 ~ 5 本株。小区长 4 m、宽 2.7 m,面积 10.8 m<sup>2</sup>。主区四周做高 30 cm、宽 40 cm 田埂,以防水肥渗漏。施肥方式为氮肥分基肥、蘖肥、穗肥按质量比 70 : 16 : 14 分施,其中“大地丰”缓混肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 28%、18%、8%)作基肥,尿素作为追肥,蘖肥和穗肥分别在移栽后二叶龄期和倒四叶龄期施入。磷肥、钾肥作为基肥一次性施入,分别采用过磷酸钙和硫酸钾作为肥源,施用量为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 45 kg/hm<sup>2</sup>。其他田间管理同一般生产田。

## 1.3 测定项目

1.3.1 产量及产量构成 在水稻成熟期,每个小区取有代表性的 3 个测产点,每点取 1 m<sup>2</sup> 实收稻穗,晒干后脱谷测产,其中籽粒含水量为 14.5%。每小区选取均匀 5 穴,测量每穴穗数、每穗实粒数、每穗秕粒数、千粒质量。

1.3.2 叶绿素 SPAD 值与氮平衡指数(NBI) 分别在水稻移栽期、分蘖期、拔节期、齐穗期在每个小区选取有代表性植株 10 穴,利用 Dualex4 氮平衡指数测量仪测定水稻最上部功能叶(移栽期、分蘖期、拔节期的倒二叶;齐穗期的剑叶)的叶绿素 SPAD 值与氮平衡指数(NBI)。

1.3.3 干物质积累量及氮素积累量 分别在水稻的分蘖期、拔节期、齐穗期、成熟期从每个小区采集 5 穴有代表性植株(地上部),其中齐穗期和成熟期的植株分成茎叶(营养体)和籽粒 2 部分,75 ℃ 下烘干至恒质量,测量干物质积累量。烘干的植物样碾磨粉碎后经浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化,采用全自动凯氏定氮仪(Foss KjeltectTM8400, Swiss)测定植株全氮含量。

## 1.4 数据分析

氮肥农学利用效率 = (施氮区稻谷产量 - 未施氮区稻谷产量) / 施氮量;

氮肥偏生产力 = 施氮区稻谷产量 / 施氮量;

氮吸收利用率 = (施氮区植株氮素积累总量 -

未施氮植株氮积累总量) / 施氮量 × 100% ;

氮生理利用率 = (施氮区产量 - 未施氮区产量) / (施氮区氮积累量 - 未施氮区氮积累量);

氮素转运效率 = (成熟期施氮区地上部植株氮积累总量 - 齐穗期施氮区地上部植株氮积累总量) / 成熟期施氮区地上部植株氮积累总量 × 100% ;

氮收获指数 = 施氮区籽粒氮积累总量 / 成熟期植株氮积累总量 × 100% 。

利用 Excel 2007 及 DPS 7.50 进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮肥水平下各品种产量及产量构成情况

由表 1 可知,随着施氮量的增加,产量增加,施氮处理的产量水平显著高于未施氮处理,品种间表现为盐粳 22 产量最高,其次为盐丰 47,两者差异不显著,显著大于盐粳 218,其他品种间差异不显著。施氮处理的穗数显著大于未施氮处理,盐丰 47、盐粳 939 的穗数显著高于盐粳 456,其他品种间差异不显著。N0 处理的千粒质量显著高于 N1 处理,盐粳 933、盐粳 22 的千粒质量显著高于盐粳 939、盐粳 218。各施氮处理下结实率无显著差异,盐粳 22 的结实率显著高于盐粳 939,其他品种间差异不显著。产量、穗数极显著受氮肥水平影响,且超过品种的影响(*F* 值大于品种),实粒数极显著受品种影响,千粒质量受品种影响大于氮肥影响。

### 2.2 不同氮肥水平下各品种的氮肥利用率

氮肥利用率是描述氮肥吸收利用特性的主要指标,其中氮肥农学利用率是单位施肥量对作物籽粒产量增加的反映,是农业生产的一项重要经济指标;氮肥偏生产力是以产量与施氮量的关系来衡量氮肥利用率的指标,反映的是作物吸收土壤中的氮和施用氮肥后引起的边际效应<sup>[17]</sup>;氮吸收利用率反映了植株对投入氮素的吸收效果;氮生理利用率表示吸收氮素后转化为稻谷产量的效率;氮素转运效率表示抽穗后植株氮素积累的转化效率<sup>[13]</sup>。由表 2 可知,随着施氮量的增加,氮吸收利用率、氮生理利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力、氮素转运效率逐渐降低。其中各施氮水平下氮吸收利用率差异不显著,N3 处理下氮生理利用率显著低于 N1、N2 处理,N3 处理下氮肥农学利用效率显著低于 N1 处理。各施氮水平下氮肥偏生产力表现为 N1 > N2 > N3,处理间差异显著。N3 处理下氮素转运效

表 1 不同氮肥水平下的产量及产量构成

项目	产量 (t/hm <sup>2</sup> )	穗数 (万株/hm <sup>2</sup> )	实粒数 (粒/穗)	千粒质量 (g)	结实率 (%)
氮肥水平					
N0	6.22c	243.84b	102.67b	26.88a	94.06a
N1	8.76b	348.78a	107.55ab	25.70b	93.96a
N2	9.00ab	338.91a	114.17a	26.58ab	92.33a
N3	9.57a	362.06a	109.77ab	26.37ab	93.20a
品种					
盐丰 47	8.72a	357.89a	103.30bc	26.83ab	93.60ab
盐粳 456	8.17ab	288.44b	122.95a	26.18abc	93.12ab
盐粳 218	8.03b	328.72ab	107.53b	25.40c	93.24ab
盐粳 22	8.76a	309.74ab	113.10ab	27.05a	94.82a
盐粳 933	8.30ab	298.63ab	107.03bc	27.10a	93.45ab
盐粳 939	8.36ab	356.96a	97.33c	25.75bc	92.10b
变异来源( <i>F</i> 值)					
氮肥	20.44 **	19.08 **	3.20	2.64	1.32
品种	1.02	3.83 *	7.18 **	3.57 *	1.05

注:同一指标同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著;\*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平显著。下表同。

表 2 不同氮肥水平下的水稻氮肥利用率

项目	氮吸收利用率 (%)	氮生理利用率 (kg/kg)	氮肥农学利用 效率(kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮素转运效率 (%)
氮肥水平					
N1	32.27a	58.50a	18.45a	59.1a	26.99a
N2	30.05a	56.52a	16.55ab	47.82b	18.27ab
N3	25.68a	52.04b	13.22b	38.63c	10.49b
品种					
盐丰 47	23.27c	71.85a	16.72a	50.20a	27.62a
盐粳 456	24.74bc	58.22b	14.24a	46.69a	13.80b
盐粳 218	35.69a	43.75d	15.72a	46.62a	18.83b
盐粳 22	29.20abc	51.12c	15.07a	50.34a	24.95a
盐粳 933	33.16ab	55.51bc	18.64a	49.18a	25.17a
盐粳 939	29.93abc	53.67bc	16.06a	48.09a	10.22b
变异来源( <i>F</i> 值)					
氮肥	2.54	23.40 **	5.36 *	89.03 **	3.45
品种	2.56	5.89 *	0.89	1.16	2.07

率显著小于 N1 处理。品种间盐粳 218 的氮吸收利用率最高,显著高于盐粳 456、盐丰 47。盐丰 47 氮生理利用率最高,显著高于其他品种;盐粳 218 的氮生理利用率最低,显著低于其他品种。品种间氮肥农学利用率和氮肥偏生产力差异不显著。盐丰 47 的氮素转运效率最高,其次为盐粳 933、盐粳 22,显著高于其他品种。氮肥和品种对氮吸收利用率和氮素转运效率的影响未达显著水平,氮生理利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力受施氮水平影

响达极显著或显著水平,且氮肥的影响大于品种的影响(*F* 值大于品种)。氮生理利用率显著受品种影响,因此区分品种间的氮肥利用率可以参考氮生理利用率的差异。

2.3 各生育时期氮素积累量的比较

随着生育进程的推进,不同氮肥水平下各品种的氮素积累总量逐渐增加(表 3),施肥处理下氮积累总量显著高于未施肥处理。随着施氮量的增加,各生育时期氮积累总量总体呈上升趋势。齐穗期

N0 处理的穗部吸氮比例显著高于其他处理,N1、N2、N3 处理间差异不显著。成熟期 N0 处理氮收获指数显著高于 N3 处理。各生育时期氮素积累量极显著地受施氮水平影响,同时超过品种因素的影响;品种显著影响拔节期和齐穗期茎叶氮积累总量,极显著影响齐穗期穗部吸氮比例、成熟期茎叶氮积累总量和氮收获指数。品种间盐粳 218 的拔节期氮积累总量、齐穗期茎叶氮积累量、齐穗期氮积累总量、成熟期茎叶氮积累量、成熟期氮积累总量最高,其中拔节期氮积累总量和成熟期茎叶氮素积累量显著高于其他品种,而各品种间齐穗期和成熟期穗部氮积累量无显著差异,因此盐粳 218 齐穗期

的穗部吸氮比例和成熟期氮收获指数最低。即盐粳 218 虽然在各生育时期氮积累总量高,但在齐穗后氮素积累主要集中在茎叶部(营养体),因此氮收获指数低。盐丰 47 表现为有效分蘖临界期、成熟期氮积累总量较低,拔节期和齐穗期氮积累总量、齐穗期和成熟期茎叶部吸氮量最低,齐穗期穗部吸氮比例较高,成熟期穗部氮素积累量最高,氮收获指数最高,氮收获指数显著高于其他品种。即虽然盐丰 47 成熟期氮积累总量不高,但穗部氮积累总量最高,氮素积累主要集中在穗部,因此氮收获指数最高。除了盐丰 47、盐粳 218 外,其他品种间氮收获指数无显著差异。

表 3 不同品种不同氮肥水平下各生育时期氮素积累量

项目	有效分蘖 临界期 (kg/hm <sup>2</sup> )	拔节期 (kg/hm <sup>2</sup> )	齐穗期				成熟期			
			茎叶 (kg/hm <sup>2</sup> )	穗 (kg/hm <sup>2</sup> )	合计 (kg/hm <sup>2</sup> )	穗部吸 氮比例 (%)	茎叶 (kg/hm <sup>2</sup> )	穗 (kg/hm <sup>2</sup> )	合计 (kg/hm <sup>2</sup> )	氮收获 指数(%)
施氮处理										
N0	10.38c	24.73c	37.89c	9.36c	47.26c	20.14a	21.40b	53.01b	74.41b	71.43a
N1	19.96b	51.19b	75.41b	14.44b	89.86b	16.28b	39.20a	86.27a	125.48a	69.56ab
N2	24.15ab	60.54b	83.96b	17.12a	101.08b	17.44b	38.14a	84.88a	123.02a	69.67ab
N3	28.45a	71.26a	100.06a	18.37a	118.43a	15.77b	44.46a	87.57a	132.03a	66.43b
品种										
盐丰 47	17.71b	39.21c	63.01c	14.33a	77.34d	18.31ab	20.54c	86.32a	106.86b	80.51a
盐粳 456	17.60b	52.45b	83.08ab	15.36a	98.43abc	15.94bc	37.75b	76.44a	114.19ab	66.94b
盐粳 218	22.46ab	66.94a	87.02a	14.06a	101.09a	14.27c	54.76a	77.81a	132.56a	59.66c
盐粳 22	19.33ab	49.97bc	64.14bc	15.21a	79.35bcd	20.78a	34.59b	78.69a	113.28ab	69.37b
盐粳 933	26.06a	50.47b	64.03bc	14.56a	78.59cd	19.01ab	31.98b	76.35a	103.97b	69.73b
盐粳 939	21.26ab	52.54b	84.71a	15.43a	100.14ab	16.14bc	35.19b	71.99a	111.54b	69.15b
变异来源( <i>F</i> 值)										
氮肥	13.76 **	33.97 **	25.77 **	31.63 **	28.54 **	4.95 *	11.03 **	17.88 **	22.72 **	1.84
品种	1.62	4.50 *	3.38 *	0.45	2.89	4.91 **	9.03 **	0.95	2.17	12.82 **

2.4 各生育时期各品种的叶绿素与氮平衡指数

叶绿素 SPAD 值与水稻单位面积叶绿素含量、含氮量呈极显著正相关<sup>[18-19]</sup>,有研究认为,SPAD 值可以作为耐低氮种质的筛选指标。Dualex4 氮平衡指数测量仪能快速、准确、无损测定田间作物相对叶绿素含量(SPAD 值)、氮平衡指数(NBI),并以此评估氮肥状况,可及时进行氮肥管理。当植物氮肥状态良好,氮平衡指数越大;当植物营养不平衡,产生的多酚(类黄酮)较多,生产的叶绿素较少,NBI 较低。由表 4 可知,各生育时期施氮处理的 SPAD 值、NBI 显著高于未施氮处理,随着施氮量的增加,拔节期的 NBI 逐渐增加。品种之间,移栽期各品种的 SPAD 值、NBI 差异不显著。盐粳 939 分蘖期和

拔节期的 SPAD 值、拔节期和齐穗期的 NBI 最高。盐粳 22 分蘖期、拔节期的 SPAD 值、NBI 最低,齐穗期盐丰 47 的 SPAD 值、NBI 最低。分蘖期、拔节期和齐穗期的 SPAD 值和 NBI 极显著受氮肥和品种影响,且氮肥影响大于品种。

2.5 光合作用的比较

由表 5 可知,各氮肥水平下,净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率均表现为 N2 > N1 > N3 > N0,其中,N2、N1 处理下净光合速率差异不显著,显著高于 N0 处理;N1、N3 处理净光合速率差异不显著。品种之间净光合速率表现为盐粳 939 > 盐丰 47 > 盐粳 933 > 盐粳 218 > 盐粳 456 = 盐粳 22,其中盐粳 939 与盐丰 47、盐粳 933 与盐粳 218、盐粳

表 4 不同氮处理下各生育时期 SPAD 值与 NBI

项目	移栽期		分蘖期		拔节期		齐穗期	
	SPAD 值	NBI	SPAD 值	NBI	SPAD 值	NBI	SPAD 值	NBI
施氮处理								
N0			30.19c	20.49b	28.19c	18.05c	28.14c	16.42c
N1			37.46a	26.08a	35.80ab	27.67b	32.50a	21.49a
N2			35.57b	26.73a	35.06b	27.78b	31.16b	20.39b
N3			35.69b	26.20a	37.51a	30.05a	31.48ab	21.43a
品种								
盐丰 47	29.31a	47.31a	31.80c	22.74d	32.61c	24.58c	29.17b	17.96d
盐粳 456	30.95a	45.12a	36.89a	26.09bc	36.23b	28.13b	32.72a	20.77b
盐粳 218	30.65a	45.50a	37.33a	27.80a	36.88b	29.44b	31.58a	20.32b
盐粳 22	31.37a	51.46a	30.57c	20.79e	27.75d	19.20e	29.59b	18.32cd
盐粳 933	30.63a	47.72a	34.00b	24.78c	31.11c	21.29d	29.23b	19.27c
盐粳 939	30.95a	44.86a	37.75a	27.06ab	40.26a	32.69a	32.62a	22.95a
变异来源( <i>F</i> 值)								
氮肥	—	—	50.50 **	48.87 **	39.29 **	83.74 **	34.17 **	82.15 **
品种	0.14	1.04	31.94 **	27.27 **	35.60 **	47.64 **	11.46 **	32.27 **

表 5 不同氮肥处理与品种间光合作用的比较

项目	净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度 [ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	蒸腾速率 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
施氮处理				
N0	37.78c	0.35d	157.01c	4.87c
N1	42.64ab	0.55b	193.82b	6.34a
N2	43.29a	0.63a	204.54a	6.48a
N3	42.38b	0.51c	187.09b	6.09b
品种				
盐丰 47	41.96a	0.50bc	183.13b	5.97b
盐粳 456	40.84bc	0.41d	171.80c	5.62c
盐粳 218	41.78ab	0.54b	188.14b	6.33a
盐粳 22	40.84bc	0.48c	186.05b	5.76b
盐粳 933	41.88ab	0.51bc	186.57b	5.88b
盐粳 939	42.15a	0.60a	198.02a	6.48a
变异来源( <i>F</i> 值)				
氮肥	66.69 **	100.33 **	79.46 **	77.03 **
品种	3.15 **	18.32 **	9.14 **	17.98 **

456 与盐粳 22 间差异不显著。盐粳 939 的气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率最大,其次为盐粳 218。净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率极显著受氮肥和品种影响,且受氮肥的影响更大。

2.6 氮肥利用率与产量的相关关系

由表 6 可知,氮吸收利用率与氮肥农学利用率呈极显著正相关关系,与氮肥偏生产力呈显著正相关,与氮生理利用率、氮收获指数呈负相关,相关性

不显著。氮收获指数与氮生理利用率呈极显著正相关,与成熟期氮积累总量呈显著负相关,与产量呈显著正相关。氮生理利用率与成熟期氮积累总量呈极显著负相关,氮肥农学利用率与氮肥偏生产力呈极显著正相关。氮转运效率分别与氮肥农学利用率和氮肥偏生产力呈显著、极显著正相关关系,与氮吸收利用率、氮生理利用率、氮收获指数呈正相关关系。

表 6 氮肥利用率与产量的相关关系

指标	相关系数					
	氮吸收利用率	氮生理利用率	氮肥农学利用率	氮肥偏生产力	氮收获指数	成熟期氮积累总量
氮生理利用率	-0.44					
氮肥农学利用率	0.73 **	0.28				
氮肥偏生产力	0.49 *	0.35	0.78 **			
氮收获指数	-0.32	0.86 **	0.33	0.32		
成熟期氮积累总量	0.41	-0.68 **	-0.10	-0.38	-0.47 *	
氮转运效率	0.33	0.31	0.56 *	0.60 **	0.32	-0.25
产量	0.12	0.25	0.33	-0.07	0.53 *	0.38

2.7 各生育时期 SPAD 值、NBI 与氮素积累量的关系

由表 7 可知,各生育时期的 SPAD 值、NBI 可以较好地反映水稻各生育阶段的氮素积累量,其中分蘖期的 SPAD 值与拔节期氮积累量呈显著正相关,与氮收获指数呈显著负相关。拔节期的 SPAD 值、NBI 均与分蘖期氮积累量呈极显著正相关,与拔节

期氮积累量呈显著正相关。齐穗期 NBI 与齐穗期茎叶氮积累量、齐穗期总积累量呈显著正相关,齐穗期 SPAD 值、NBI 与分蘖期氮积累总量、拔节期氮积累总量、成熟期茎叶氮积累量、成熟期氮积累总量呈显著或极显著正相关,与氮收获指数呈极显著负相关。

表 7 各生育时期 SPAD 值、NBI 与氮素积累量的相关关系

指标	相关系数					
	分蘖期 SPAD 值	分蘖期 NBI	拔节期 SPAD 值	拔节期 NBI	齐穗期 SPAD 值	齐穗期 NBI
分蘖期氮积累量	0.37	0.32	0.53 **	0.54 **	0.42 *	0.61 **
拔节期氮积累量	0.42 *	0.30	0.42 *	0.43 *	0.52 **	0.62 **
齐穗期茎叶氮积累量	0.28	0.09	0.18	0.14	0.33	0.42 *
齐穗期穗氮积累量	0.22	0.10	0.20	0.18	0.22	0.34
齐穗期总积累量	0.28	0.09	0.18	0.14	0.32	0.42 *
齐穗期穗吸氮比例	-0.19	0.04	-0.04	-0.02	-0.31	-0.29
成熟期茎叶氮积累量	0.35	0.23	0.28	0.30	0.59 **	0.61 **
成熟期穗积累量	-0.04	-0.11	0.01	0.01	0.14	0.15
成熟期氮积累总量	0.16	0.05	0.16	0.17	0.40 *	0.42 *
氮收获指数	-0.44 *	-0.33	-0.33	-0.36	-0.60 **	-0.62 **

3 结论与讨论

3.1 盐粳系列水稻产量、氮肥利用率及氮素积累特性的差异

本试验结果表明,氮肥的施用对水稻的产量、穗数、氮生理利用率、氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力、各生育时期氮素积累量、光合特性和移栽后叶片的 SPAD 值与 NBI 有显著或极显著影响,且超过品种的影响。品种分别对氮收获指数和氮生理利用率有极显著和显著影响。品种间,盐粳 22、盐丰 47 的产量显著大于盐粳 218,其他品种间无显著差异。盐丰 47 各生育时期氮积累总量不高,但成熟期氮素积累主要集中在穗部,氮收获指数最高,显

著高于其他品种。盐丰 47 氮吸收利用率不高,但氮生理利用率、氮素转运效率、氮收获指数最高,氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力较高,说明该品种虽然氮吸收能力较弱,但具有较高的氮素利用能力、氮素转运能力和将吸收的氮素转化为稻谷(产量)的能力。盐粳 218 氮吸收利用率高,但氮生理利用率和氮收获指数最低,各生育时期氮积累总量较高,但齐穗后氮素积累主要集中在茎叶部,未能将积累的氮素转移至穗部实现增产。

3.2 氮高效水稻品种的筛选指标

氮高效品种具有在低氮、高氮条件下均能吸收利用较多的氮素,具有较高的氮肥利用率,收获较多的产量<sup>[20]</sup>,高效型品种(系)对解决高产稳产、提

高氮肥利用率、减少氮肥过量施用带来的土壤生态环境问题有重要意义。前人关于氮高效品种筛选以产量为主要评价指标,兼顾氮肥利用率。目前筛选氮高效水稻品种在氮肥水平的设置上没有统一的标准,尤其关于低氮水平的设置。零氮处理下,水稻品种的遗传力和品种特性得不到充分表现,同时也不符合生产实际,零氮设置的目的更多是为了计算肥料利用率。高氮的设置可以是各自基因型最适宜的氮肥水平或者是最高生产力水平<sup>[21]</sup>,而低氮水平的设置更多是依赖研究者对生产实践、生产效益和品质的考量。因此,受氮肥水平影响较小,受品种显著影响的氮收获指数无疑是筛选氮高效水稻品种的重要考量指标。同时,由于氮肥吸收利用率和氮生理利用率的矛盾,氮收获指数可以协调两者的关系<sup>[13]</sup>,因此生产中应选择高产和高氮收获指数的水稻品种,协调氮高效吸收和高效利用的关系。结合产量、氮肥利用率、氮收获指数,盐丰 47 为氮高效水稻品种,盐粳 218 为氮低效品种,盐粳 939、盐粳 22、盐粳 456、盐粳 933 为中间型品种。另外齐穗期的 SPAD 值、NBI 能够较好反映叶片的营养状态和各生育时期的氮素积累量,但氮高效水稻品种可能将吸收的氮素更多地转移到穗部,相对的叶片含氮量较少,同时又能保持较高的光合速率和光合功能期<sup>[22]</sup>,因此齐穗期 SPAD 值、NBI 不能直接作为氮高效品种筛选指标,甚至本试验条件下与氮收获指数有极显著负相关关系。这也与前人的研究结论<sup>[23-24]</sup>吻合,即高叶绿素含量并不是叶片高光合速率的必需条件,适当降低水稻叶绿素含量有利于提高光合速率和光合氮素利用效率,可以考虑选育叶绿素含量适中的品种从而提高光合效率和光氮利用效率<sup>[25]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 张卫峰,马 林,黄高强,等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业科学,2013,46(15):3161-3171.
- [2] 罗志祥,苏泽胜,施伏芝,等. 氮肥高效利用水稻育种的现状与展望[J]. 中国农学通报,2003,19(1):66-67,116.
- [3] 朱兆民,吴同斌,郑圣先,等. 氮肥分次施用对肥料效果的研究[J]. 土壤肥料,1984(4):29-32.
- [4] 苏祖芳,张亚洁,张 娟,等. 基肥与穗粒肥配比对水稻产量形成和群体质量的影响[J]. 江苏农学院学报,1995,16(3):21-30.
- [5] 王光火,张奇春,黄昌勇. 提高水稻氮肥利用率、控制氮肥污染的新途径——SSNM[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2003,29(1):67-70.
- [6] 胡雅杰,朱大伟,邢志鹏,等. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):12-22.
- [7] 张 刚,王德建,俞元春,等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(4):877-885.
- [8] 刘钰莹. 氮肥增效剂与生物炭配施对水稻土氮素转化及利用效率的影响[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [9] 吕小红,付立东,王 宇,等. 配比施用缓释肥与速效氮肥对机插水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):115-118.
- [10] 侯红乾,黄永兰,冀建华,等. 缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国水稻科学,2016,30(4):389-396.
- [11] 周雯雯,贾浩然,张 月,等. 不同类型新型肥料对双季稻产量、氮肥利用率和经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(4):657-668.
- [12] Peng S B,Tang Q Y,Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science,2009,12(1):3-8.
- [13] 徐富贤,熊 洪,谢 戎,等. 水稻氮素利用效率的研究进展及其动向[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(5):1215-1225.
- [14] 张晓果,徐春梅,陈 松,等. 氮利用效率差异水稻品种的根系铵离子吸收特性[J]. 中国农业科学,2015,48(22):4428-4436.
- [15] 江立庚,曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J]. 中国水稻科学,2002,16(3):261-264.
- [16] 肖国樱,肖友伦,李锦江,等. 高效是当前水稻育种的主导目标[J]. 中国水稻科学,2019,33(4):287-292.
- [17] 李 旭,王 宇,隋 鑫,等. 缓释肥与速效氮肥混施对机插水稻生长发育及氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(6):45-48.
- [18] 李刚华,薛利红,尤 娟,等. 水稻氮素和叶绿素 SPAD 叶位分布特点及氮素诊断的叶位选择[J]. 中国农业科学,2007,40(6):1127-1134.
- [19] 赵考诚,叶 迎,马 军,等. 水稻花后叶片 SPAD 值动态模型与特征分析[J]. 江苏农业科学,2021,49(16):74-80.
- [20] 张亚丽,樊剑波,段英华,等. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价[J]. 土壤学报,2008,45(2):267-273.
- [21] 霍中洋,顾海永,马 群,等. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种的氮素吸收利用差异[J]. 作物学报,2012,38(11):2061-2068.
- [22] 魏海燕,张洪程,马 群,等. 不同氮肥吸收利用效率水稻基因型叶片衰老特性[J]. 作物学报,2010,36(4):645-654.
- [23] 顾骏飞,周振翔,李志康,等. 水稻低叶绿素含量突变对光合作用及产量的影响[J]. 作物学报,2016,42(4):551-560.
- [24] 周振翔,李志康,陈 颖,等. 叶绿素含量降低对水稻叶片光抑制与光合电子传递的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(19):3709-3720.
- [25] 陈 颖,周振翔,周天阳,等. 水稻氮高效吸收利用机制及栽培调控措施[J]. 作物杂志,2016(6):26-32.