

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.02050

## 长江中下游地区常规中熟粳稻产量、品质及氮素吸收性状的相互关系分析

刘秋员<sup>1,2</sup> 周磊<sup>1</sup> 田晋钰<sup>1</sup> 程爽<sup>1</sup> 陶钰<sup>1</sup> 邢志鹏<sup>1</sup> 刘国栋<sup>1</sup>  
魏海燕<sup>1,\*</sup> 张洪程<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室 / 粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009; <sup>2</sup> 信阳农林学院农学院, 河南信阳 464000

**摘要:** 于2017—2018年分别收集长江中下游地区90份和105份常规中熟粳稻品种(系)为材料, 研究各供试品种(系)的产量、稻米品质以及氮素吸收量, 对产量、品质、氮素吸收之间的相互关系进行系统分析, 以期探索长江中下游地区常规中熟粳稻产量、品质和氮素吸收协同提升途径。结果表明, 产量与千粒重、穗粒数呈极显著正相关, 与结实率呈负相关, 与有效穗数相关性不显著。穗粒数对产量的直接促进作用最大, 而有效穗数通过其他产量构成因素对产量形成的限制作用最大, 千粒重通过其他产量构成因素对产量形成的限制作用最小。总吸氮量与茎、叶、穗的干重均呈极显著正相关, 与茎、叶、穗含氮率相关性较弱, 增加茎、叶、穗的干重是增加氮素吸收量的有效途径。直链淀粉、蛋白质与稻米加工品质、外观品质以及稻米食味均存在显著的相关性, 降低直链淀粉和蛋白质含量, 有利于提升稻米食味品质, 但不利于加工品质和外观品质的改善。影响产量的关键指标千粒重、穗粒数与影响氮素吸收的关键指标茎干重、叶干重、穗干重均呈极显著正相关。直链淀粉与茎干重、叶干重、穗干重、千粒重以及穗粒数无显著相关性, 而蛋白质与茎干重、叶干重、穗干重、千粒重、穗粒数总体呈负相关。综上所述, 在直链淀粉含量相对较低的品种中, 选择生物量较大, 且穗粒数较多、千粒重较高的品种, 能够实现长江中下游地区常规中熟粳稻产量、氮素吸收以及食味品质的协同提升, 但这可能不利于加工以及外观品质的改善, 有待于进一步研究其中的平衡关系。

**关键词:** 产量; 氮素; 稻米品质; 粳稻

## Relationships among grain yield, rice quality and nitrogen uptake of inbred middle-ripe *japonica* rice in the middle and lower reaches of Yangtze River

LIU Qiu-Yuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Lei<sup>1</sup>, TIAN Jin-Yu<sup>1</sup>, CHENG Shuang<sup>1</sup>, TAO Yu<sup>1</sup>, XING Zhi-Peng<sup>1</sup>, LIU Guo-Dong<sup>1</sup>, WEI Hai-Yan<sup>1,\*</sup>, and ZHANG Hong-Cheng<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China; <sup>2</sup> Agricultural College, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, Henan, China

**Abstract:** In 2017 and 2018, 90 and 105 inbred middle-ripe *japonica* rice varieties (lines) in the middle and lower reaches of Yangtze River were collected and planted in a unified way, and grain yield, rice quality and nitrogen uptake of each variety were measured at mature stage. The relationships among grain yield, rice quality and nitrogen uptake were analyzed, so as to clarify the

本研究由国家重点研发计划项目(2016YFD0300503), 国家自然科学基金项目(31971841), 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-27), 江苏省重点研发计划项目(BE2018355), 江苏省农业产业技术体系专项(JATS[2018]298)和江苏省作物遗传生理重点实验室开放课题(YCSL201907)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300503), the National Natural Science Foundation of China (31971841), the China Agriculture Research System (CARS-01-27), the Key Research Program of Jiangsu Province (BE2018355), the Earmarked Fund for Jiangsu Agricultural Industry Technology System (JATS[2018]298), and the Open Program of Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology (YCSL201907).

\* 通信作者(Corresponding authors): 张洪程, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn; 魏海燕, E-mail: wei\_haiyan@163.com

第一作者联系方式: E-mail: joss85@163.com

Received (收稿日期): 2020-07-20; Accepted (接受日期): 2020-11-13; Published online (网络出版日期): 2020-12-15.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20201215.0823.002.html>

coordinated improvement path of grain yield, rice quality and nitrogen uptake of inbred middle-ripe *japonica* rice in the middle and lower reaches of Yangtze River. The results indicated that grain yield was significantly positive correlated with spikelet per panicle and 1000-grain weight, and negatively correlated with percentage of filled grains. There was no significant correlation between grain yield and the number of effective panicles. Spikelet per panicle had the greatest direct path coefficient to grain yield, the number of effective panicles had the greatest limiting effect on yield formation through other yield components, and 1000-grain weight had the least limiting effect on yield formation through other yield components. The total nitrogen uptake was significantly positive correlated with the dry matter weight of stem, leaf and panicle. Path analysis showed that increasing biomass had a positive effect on increasing nitrogen uptake. Amylose and protein were significantly correlated with rice milling quality, appearance quality and taste value. Reducing amylose and protein content was beneficial to improve eating quality, but not conducive to the improvement of milling and appearance quality. The results of correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between 1000-grain weight, spikelet per panicle, dry weight of stem, leaf and panicle. There was no significant correlation between dry weight of stem, leaf and panicle, 1000-grain weight, spikelet per panicle and amylose content, but they were significantly negatively correlated with protein content. To sum up, the selection of varieties with low amylose content among those with large biomass, suitable population spikelet and higher 1000-grain weight would be an effective way to realize the coordinated improvement of grain yield, nitrogen uptake and eating quality of inbred middle-ripe *japonica* rice in the middle and lower reaches of Yangtze River. However, this may not be conducive to the improvement of milling and appearance quality and it needs to be further studied.

**Keywords:** grain yield; nitrogen; rice quality; *japonica*

中国是水稻种植和消费大国。在农业供给侧结构性改革和农业绿色发展同步推进的大背景下,选育和推广集优质、高产、氮高效等优良性状于一身的优良水稻品种,已成为当前水稻品种选育的重要方向<sup>[1]</sup>。深入研究水稻产量、氮素吸收利用以及稻米品质之间的相互关系,有利于阐明水稻产量、氮素吸收利用以及稻米品质三者之间协同提升的途径,为优质高产氮高效水稻品种选育提供依据。关于水稻产量与稻米品质的关系,以往研究多认为优质的品种难以高产,而高产的品种则难以兼顾优质<sup>[2-3]</sup>。随着水稻育种技术的进步,人们发现新育成的水稻品种产量与稻米品质存在明显的改善<sup>[4-5]</sup>。关于产量与品质协同的途径,前人研究认为一定的产量( $9 \text{ t hm}^{-2}$ 以下)范围内,产量与主要品质性状的矛盾并不突出<sup>[6]</sup>,选择穗粒数少、穗数和千粒重高以及二次枝梗籽粒偏向穗轴中上部分布的品种<sup>[7]</sup>,或选择籽粒直链淀粉含量较低,且灌浆结实期略长的品种<sup>[8]</sup>,均可实现产量与稻米品质协同提升。水稻产量与氮素吸收利用关系密切,前人研究结论较一致,多认为二者之间存在明显的相互促进关系<sup>[9-10]</sup>。水稻氮素吸收利用存在显著的基因型差异<sup>[11]</sup>,前人关于水稻氮素吸收利用与稻米品质的关系,主要集中在氮肥用量及其运筹方式对稻米品质的影响<sup>[12-14]</sup>,而关于水稻氮素吸收利用的基因型差异与稻米品质的关系尚不清晰,特别是水稻产量、氮素吸收利用以及稻米品质三者协同提升的机理与途径也未明确。为此,本研究以长江中下游地区主要常规中熟粳稻品种(系)为研究对象,系统分析产量、氮素吸收以及稻米品质

之间的相互关系,以期阐明水稻产量、氮素吸收以及稻米品质协同提升途径,为长江中下游地区筛选与培育高产、优质和氮高效协同的粳稻品种提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与试验地点

供试材料为长江中下游粳稻生产地区育成的中熟粳稻品种(系),2017年供试品种(系)共90份,2018年在2017年基础上新增15个品种(系),共105份,具体见表1。试验地点位于泰州市姜堰区沈高镇河横村农业生态园。试验田土壤类型为潴育型水稻土,质地黏性。0~20 cm土层含有机质含量为 $31.72 \text{ g kg}^{-1}$ 、全氮 $1.96 \text{ g kg}^{-1}$ 、速效钾 $165.26 \text{ mg kg}^{-1}$ 和速效磷 $32.54 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

### 1.2 种植方法

2年试验均于6月13日播种,6月23日至24日移栽,行距25 cm,穴距6 cm,每穴2苗,小区面积 $15 \text{ m}^2$ ,重复2次。氮肥用量 $270 \text{ kg hm}^{-2}$ ,氮磷钾比例为2 1 2,其中氮肥按照基肥 分蘖肥 穗肥=3 4 3施用,分蘖肥于四叶一心施用,穗肥于倒四叶期施用;磷肥一次性基施,钾肥分别于耕翻前、拔节期等量施入。在设计田间小区时,根据品种生育期类型大致划分为中熟中粳和迟熟中粳2种类型进行集中种植。每个类型所有肥料的施用时期,按照田间品种达到预定生育期的众数进行施肥。为防止2种类型由于施肥时间差异造成串肥,品种类型间作埂进行隔离。水分管理及病虫草害防治等相关栽培措施,均按照当地高产栽培技术要求进行。

表 1 供试品种(系)清单

Table 1 List of tested varieties (lines)

年度 Year	品种(系) Variety (line)
2017	JD 6602, JD 6614, JD 6619, 常软 07-1, 常软 07-11, 常软 07-2, 常软 07-3, 常软 07-4, 常软 07-5, 常软 07-6, 丰梗 1606, 沪香梗 165, 沪早软梗, 沪早香软 1 号, 沪早香软 2 号, 华丰 1502, 华梗 295, 华梗 5 号, 华梗 8 号, 淮 330, 淮稻 5 号, 连梗 11 号, 连梗 12 号, 连梗 13, 连梗 13264, 连梗 15, 连梗 15113, 连梗 7 号, 南繁 1604, 南繁 1605, 南繁 1609, 南繁 1610, 南梗 2728, 南梗 505, 南梗 5711, 南梗 5833, 南梗 9108, 南梗 3818, 南梗 5718, 宁 5720, 宁 9003, 宁 9022, 宁 9039, 宁梗 040, 宁梗 4 号, 宁梗 7 号, 圣稻 1647, 圣稻 18-15, 圣稻 18-4, 圣稻 19, 圣稻 20, 圣稻 22, 圣稻 2620, 泗 15-234, 泗 15-301, 泗稻 14-211, 泗稻 15 号, 松早香 1 号, 苏 1795, 苏梗 815, 苏香梗 3 号, 苏秀 867, 泰梗 1152, 泰梗 2340, 皖垦梗 3 号, 武 4610, 武 6267, 武梗 004, 武育梗 3 号, 武运 5020, 武运 5051, 武运梗 21, 武运梗 27 号, 武运梗 32 号, 武运梗 80, 新稻 22, 新科稻 31, 徐 36618, 徐 41368, 徐稻 9 号, 徐农 33202, 盐梗 16 号, 扬梗 1612, 扬梗 239, 扬梗 3012, 扬梗 3491, 扬梗 5515, 扬育梗 2 号, 镇 9471, 镇稻 99 JD6602, JD6614, JD6619, Changruan 07-1, Changruan 07-11, Changruan 07-2, Changruan 07-3, Changruan 07-4, Changruan 07-5, Changruan 07-6, Fengjing 1606, Huxiangjing 165, Huazuanjing, Huazoxiangruan 1, Huazoxiangruan 2, Huafeng 1502, Huajing 295, Huajing 5, Huajing 8, Huai 330, Huaidao 5, Lianjing 11, Liangjing 12, Liangjing 13, Lianjing 13264, Lianjing 15, Lianjing 15113, Liangjing 7, Nanfan 1604, Nanfan 1605, Nanfan 1609, Nanfan 1610, Nanjing 2728, Nanjing 505, Nanjing 5711, Nanjing 5833, Nanjing 9108, Nanjing 3818, Nanjing 5718, Ning 5720, Ning 9003, Ning 9022, Ning 9039, Ningjing 040, Ningjing 4, Ningjing 7, Shendao 1647, Shendao 18-15, Shendao 18-4, Shendao 19, Shendao 20, Shendao 22, Shendao 2620, Si 15-234, Si 15-301, Sida 14-211, Sida 15, Songzaoxiang 1, Su 1795, Sujing 815, Suxiangjing 3, Suxiu 867, Taijing 1152, Taijing 2340, Wankengjing 3, Wu 4610, Wu 6267, Wujing 004, Wuyujing 3, Wuyun 5020, Wuyun 5051, Wuyunjing 21, Wuyunjing 27, Wuyunjing 32, Wuyunjing 80, Xindao 22, Xinkedao 31, Xu 36618, Xu 41368, Xudao 9, Xunong 33202, Yanjing 16, Yangjing 1612, Yangjing 239, Yangjing 3012, Yangjing 3491, Yangjing 5515, Yangyujing 2, Zhendao 9471, Zhendao 99 2018 早香梗 1 号, 福梗 1601, 福梗 1608, 沪早香 181, 宁 9036, 申梗 1221, 圣稻 18, 圣稻 23, 圣稻 24, 圣香 66, 苏 1785, 武育梗 36 号, 武运 4326, 徐 40398, 徐稻 10 号 Zaoxiangjing 1, Fujing 1601, Fujing 1608, Huazoxiang 181, Ning 9036, Shenjing 1221, Shendao 18, Shendao 23, Shendao 24, Shenxiang 66, Su 1785, Wuyujing 36, Wuyun 4326, Xu 40398, Xudao 10
2018	早香梗 1 号, 福梗 1601, 福梗 1608, 沪早香 181, 宁 9036, 申梗 1221, 圣稻 18, 圣稻 23, 圣稻 24, 圣香 66, 苏 1785, 武育梗 36 号, 武运 4326, 徐 40398, 徐稻 10 号 Zaoxiangjing 1, Fujing 1601, Fujing 1608, Huazoxiang 181, Ning 9036, Shenjing 1221, Shendao 18, Shendao 23, Shendao 24, Shenxiang 66, Su 1785, Wuyujing 36, Wuyun 4326, Xu 40398, Xudao 10

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 产量性状测定 在成熟期, 各供试品种(系)每个小区普查 60 穴茎蘖数, 计算有效穗数。每个小区按照每穴平均有效穗数选取长势相近植株 5 穴, 测量每穗粒数、结实率和千粒重。在每个小区中间取 8 m<sup>2</sup> (2 m×4 m) 进行实际产量测定。

1.3.2 千物质及氮素积累测定 在成熟期, 各供试品种(系)按照每穴平均有效穗数选取长势相近植株 3 穴, 分茎鞘、叶和穗置于 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘至恒重后称重, 计算各供试品种(系)单位面积茎鞘、叶、穗干物质积累量及总干物质积累量(茎鞘、叶、穗干物质积累量之和)。将各器官干物质样品烘干粉碎, 采用 FOSS 凯氏定氮仪测定各器官含氮率。按照各器官干物质积累量×各器官含氮率计算成熟期各器官吸氮量, 总吸氮量为茎、叶、穗吸氮量之和。

1.3.3 稻米品质测定 成熟收获后, 每个品种(系)保留 1 kg 稻谷, 参照国家标准《优质稻谷》(GB/T 17891-2017)<sup>[15]</sup> 进行相关品质指标测定, 主要包括加工品质(糙米率、精米率、整精米率)、外观品质(垩白粒率、垩白大小、垩白度)和直链淀粉含量。

蛋白质含量利用 FOSS 全自动凯氏定氮仪测定氮素含量, 乘以 5.95 转换成粗蛋白含量<sup>[16]</sup>。稻米食味值采用日本佐竹公司研发的 STA1B 型米饭食味计进行测定。

### 1.4 数据处理与统计方法

采用 Microsoft Excel 2013 整理数据、作表及画图, SPSS 22.0 进行相关统计分析。通径分析及决策系数参照宋小园等<sup>[17]</sup>提供的方法进行计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 供试品种(系)稻米品质

供试品种(系)稻米品质指标如表 2 所示。加工品质的 3 个指标中, 整精米率变异系数最大, 说明随着碾磨加工程度的深入, 品种(系)间的差异也越来越大。垩白性状在品种(系)间变异最大, 其中, 垢白度的变异系数 2 年均超过了 60%。直链淀粉含量变异系数 2 年也分别达到了 28.74% (2017) 和 27.54% (2018)。根据《优质稻谷》(GB/T 17891-2017)<sup>[15]</sup> 对品质指标的要求(图 1), 整精米率符合要求国标 3 级 (≥ 55%) 及以上等级要求的品种(系), 2017 年有 81 个,

2018年有72个; 垒白度符合国标3级(≤6%)及以上等级要求的品种(系)数, 分别有22个(2017)和31个(2018); 直链淀粉含量在14%~20%的品种(系)分别有37个(2017)和41个(2018)。

在品质指标36对简单相关系数中(表3), 2年分别有19对(2017)和20对(2018)相关系数达到显著或极显著水平, 说明稻米品质指标间关系密切。食味值2年均与整精米率、直链淀粉、蛋白质呈极显著负相关, 与垒白粒率、垒白度呈极显著正相关, 但整精米率、垒白粒率以及垒白度与食味值的偏相关系数均未达到显著水平, 只有直链淀粉、蛋白质与食味值的偏相关系数仍呈极显著水平。此外, 直链淀粉与整精米率、垒白粒率、垒白度的相关系数以及

蛋白质与整精米率的相关系数也都呈极显著水平, 说明整精米率、垒白粒率和垒白度可能是通过直链淀粉和蛋白质与食味值形成的显著相关关系。由此可见, 直链淀粉和蛋白质与稻米加工品质、外观品质以及食味品质均存在密切关系。

## 2.2 供试品种(系)产量及构成因素

从表4可以看出, 产量2年变化范围为6.80~10.28 t hm<sup>-2</sup>, 平均产量为8.50 t hm<sup>-2</sup>, 平均收获指数为0.47。穗粒数在品种间的变异系数最大, 2年均超过了10%。简单相关和通径分析结果(表5)表明, 产量构成因素对产量的直接通径系数都为正值, 而间接通径系数均为负值, 说明产量构成因素之间存在较强的相互制约作用。从通径系数绝对值

表2 供试品种(系)稻米品质的变异

Table 2 Variation of tested varieties (lines) in rice quality traits

指标 Trait	2017				2018			
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	变异系数 CV (%)	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	变异系数 CV (%)
糙米率 BR (%)	82.00	86.58	85.52	0.93	83.43	86.75	85.28	0.90
精米率 MR (%)	67.50	78.10	73.97	2.70	63.74	75.54	70.09	3.65
整精米率 HR (%)	47.18	74.86	63.89	8.47	39.22	70.79	58.14	12.09
垒白粒率 CKR (%)	10.23	88.70	35.80	51.18	11.20	90.73	33.98	49.89
垒白大小 CA (%)	15.44	41.29	26.19	17.01	20.54	50.77	28.03	16.97
垒白度 CKD (%)	1.57	36.63	9.75	64.22	2.29	46.07	9.89	68.44
蛋白质 PC (%)	8.25	10.30	9.17	4.12	7.20	10.05	8.53	6.99
直链淀粉 AC (%)	6.59	20.13	14.07	28.74	7.35	19.98	14.60	27.54
食味值 Taste value	45.07	76.00	58.96	13.10	42.83	80.67	61.59	12.36

BR: brown rice rates; MR: milled rice rates; HR: head rice rates; CKR: chalky kernel rate; CA: chalky area; CKD: chalkiness degree; PC: protein content; AC: amylose content; CV: coefficient of variation.

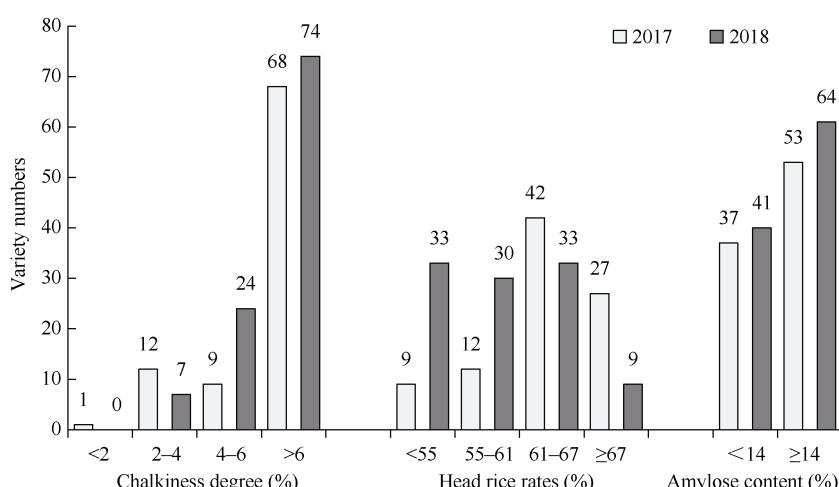


图1 供试品种(系)垒白度、整精米率和直链淀粉分布

Fig. 1 Distribution of chalkiness degree, head rice rates and amylose content of tested varieties (lines)

表 3 稻米品质指标的简单相关及偏相关分析

Table 3 Simple correlation and partial correlation analysis of rice quality index

指标 Trait	糙米率 BR	精米率 MR	整精米率 HR	垩白粒率 CKR	垩白大小 CA	垩白度 CKD	蛋白质 PC	直链淀粉 AC	食味值 SCC	味值 PCC
糙米率 BR	1	0.560**	0.057	0.160	0.183	0.167	0.083	0.082	0.072	—
精米率 MR	0.299**	1	-0.035	0.423**	0.158	0.364**	0.035	-0.389**	0.458**	—
整精米 HR	-0.064	0.380**	1	-0.258*	-0.081	-0.264*	0.330**	0.317**	-0.335**	-0.057
垩白粒率 CKR	0.184	0.025	-0.307*	1	0.461**	0.944**	-0.205	-0.638**	0.498**	0.189
垩白大小 CA	0.026	-0.045	-0.013	0.444**	1	0.682**	0.171	-0.025	-0.096	—
垩白度 CKD	0.097	-0.016	-0.251**	0.932**	0.694**	1	-0.128	-0.530**	0.365**	-0.208
蛋白质 PC	0.171	0.187	0.326**	-0.005	0.310*	0.115	1	0.350**	-0.571**	-0.480**
直链淀粉 AC	-0.060	-0.210*	0.300**	-0.598**	-0.224*	-0.533**	0.165	1	-0.797**	-0.668**
食味值 SCC	0.009	0.079	-0.331**	0.435**	-0.018	0.311**	-0.661**	-0.701**	1	
Taste value PCC	—	—	0.128	0.173	—	-0.091	-0.758**	-0.700**		

缩写同表 2。上三角和下三角分别为 2017 年和 2018 年简单相关系数。<sup>\*</sup>和<sup>\*\*</sup>分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。SCC: 简单相关系数; PCC: 偏相关系数。

Abbreviations are the same as those given in Table 2. The upper triangle and lower triangle represent correlation coefficients of 2017 and 2018, respectively. \* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. SCC: simple correlation coefficient; PCC: partial correlation coefficient.

表 4 供试品种(系)产量及其构成因素

Table 4 Grain yield and its component of tested varieties (lines)

指标 Trait	2017			2018		
	变幅 Range	平均值 Mean	变异系数 CV (%)	变幅 Range	平均值 Mean	变异系数 CV (%)
有效穗数 Number of effective panicles ( $\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ )	302.58~467.52	365.20	8.16	268.51~456.36	350.82	8.58
千粒重 1000-grain weight (g)	20.60~29.88	26.38	5.87	20.78~30.17	26.62	6.57
穗粒数 Spikelet per panicle	75.38~136.08	103.21	10.48	74.19~134.88	103.31	11.08
结实率 Percentage of filled grains (%)	82.43~95.77	89.43	3.39	86.84~98.56	94.60	2.62
产量 Grain yield ( $\text{t hm}^{-2}$ )	6.80~9.89	8.42	8.11	6.82~10.28	8.58	8.49
收获指数 Harvest index	0.44~0.49	0.46	2.39	0.44~0.49	0.47	2.34

CV: coefficient of variation.

大小看, 穗粒数、千粒重的直接通径系数均明显大于他们的间接通径系数, 说明增加穗粒数和千粒重能够促进产量增加, 与产量呈极显著正相关; 有效穗数、结实率则表现出与穗粒数、千粒重相反的规律, 基本上以间接通径系数较大, 因此与产量呈现出不相关甚至负相关。决策系数越大, 说明自变量对响应变量的增进作用越大。产量构成因素的决策系数最大的为千粒重, 最小的是有效穗数, 2 年规律一致, 说明增加千粒重能够较小的影响其他产量构成因素, 从而促进产量的增加。

### 2.3 供试品种(系)干物质积累及氮素吸收

在成熟期, 供试品种(系) 2 年总干物质积累量分布范围在  $14.56\sim21.25 \text{ t hm}^{-2}$  之间, 平均值分别为

$18.27 \text{ t hm}^{-2}$ ; 总吸氮量分布范围在  $175.72\sim270.38 \text{ kg hm}^{-2}$  之间, 平均值为  $225.53 \text{ kg hm}^{-2}$  (表 6)。叶干重以及茎、叶吸氮量变异系数较大, 2 年均在 10%以上, 其余指标变异系数均在 10%以下。相关及通径分析结果表明(表 7), 茎、叶、穗的干重对总吸氮量的直接和间接通径系数均为正值, 说明增加茎、叶、穗的干重能促进总吸氮量的增加, 呈现极显著正相关关系。茎、叶、穗的含氮率对总吸氮量的直接通径系数均为正值, 但它们的间接通径系数均为负值, 且基本上都要大于其直接通径系数, 说明茎、叶、穗的含氮率对总吸氮量存在一定的限制作用。茎、叶、穗的干重对总吸氮量的决策系数均要明显高于茎、叶、穗含氮率的决策系数, 说明干物质积累量是吸氮量产生差异的主要原因。

表5 产量与产量构成因素的相关及通径分析

Table 5 Correlation and path analysis of yield and yield components

指标 Trait	简单相关系数 Simple correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficients	间接通径系数 Indirect path coefficients				决策系数 Decision coefficient
	有效穗数 Number of effective panicles	千粒重 1000-grain weight	穗粒数 Spikelet per panicle	结实率 Percentage of filled grains	合计 Total		
<b>2017</b>							
有效穗数 Number of effective panicles	0.083	0.976	—	-0.163	-0.742	0.013	-0.893
千粒重 1000-grain weight	0.287 <sup>**</sup>	0.720	-0.222	—	-0.180	-0.032	-0.433
穗粒数 Spikelet per panicle	0.538 <sup>**</sup>	1.354	-0.535	-0.096	—	-0.184	-0.814
结实率 Percentage of filled grains	-0.253 <sup>**</sup>	0.398	0.031	-0.058	-0.626	—	-0.652
<b>2018</b>							
有效穗数 Number of effective panicles	0.002	0.968	—	-0.194	-0.790	0.018	-0.967
千粒重 1000-grain weight	0.303 <sup>**</sup>	0.752	-0.250	—	-0.242	0.042	-0.450
穗粒数 Spikelet per panicle	0.549 <sup>**</sup>	1.399	-0.547	-0.130	—	-0.173	-0.850
结实率 Percentage of filled grains	-0.181	0.359	0.048	0.087	-0.676	—	-0.540

\*和\*\*分别表示在0.05和0.01水平上显著。

\* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表6 供试品种(系)干物质积累及氮素吸收

Table 6 Dry matter accumulation and nitrogen absorption of tested varieties (lines)

指标 Trait	2017			2018			变异系数 CV (%)
	变幅 Range	平均值 Mean	变异系数 CV (%)	变幅 Range	平均值 Mean	变异系数 CV (%)	
茎干重 SDM ( $t \text{ hm}^{-2}$ )	4.62–7.44	6.01	9.29	4.78–7.09	5.99	8.34	
叶干重 LDM ( $t \text{ hm}^{-2}$ )	2.24–4.37	3.28	12.34	2.15–3.83	3.05	11.43	
穗干重 PDM ( $t \text{ hm}^{-2}$ )	6.94–10.99	9.00	8.93	7.20–11.63	9.21	9.72	
总干重 TDM ( $t \text{ hm}^{-2}$ )	14.56–21.25	18.29	7.89	14.77–21.23	18.25	7.94	
茎含氮率 SNR (%)	0.80–1.19	1.02	8.94	0.71–1.18	0.94	9.64	
叶含氮率 LNR (%)	1.33–1.86	1.59	8.50	1.09–1.65	1.39	7.92	
穗含氮率 PNR (%)	1.24–1.56	1.36	4.66	1.06–1.50	1.28	6.32	
茎吸氮量 SNC ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	43.92–84.95	61.50	12.71	37.94–73.85	55.97	11.60	
叶吸氮量 LNC ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	36.62–70.98	52.00	12.57	25.96–58.01	42.33	13.61	
穗吸氮量 PNC ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	89.19–149.51	121.92	8.60	89.37–144.78	117.32	9.73	
总吸氮量 TNC ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	194.77–270.38	235.42	6.50	175.72–246.13	215.63	6.80	

SDM: stem dry matter; LDM: leaf dry matter; PDM: panicle dry matter; TDM: total dry matter; SNR: stem nitrogen rate; LNR: leaf nitrogen rate; PNR: panicle nitrogen rate; SNC: stem nitrogen content; LNC: leaf nitrogen content; PNC: panicle nitrogen content; TNC: total nitrogen content; CV: coefficient of variation.

表 7 总吸氮量与其构成因素相关及通径分析

Table 7 Correlation and path analysis of total nitrogen uptake content and its components

指标 Trait	简单相关系数 Simple correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficients	间接通径系数 Indirect path coefficients						决策系数 Decision coefficient	
			茎干重 SDM	叶干重 LDM	穗干重 PDM	茎含氮率 SNR	叶含氮率 LNR	穗含氮率 PNR		
<b>2017</b>										
茎干重 SDM	0.669**	0.382	—	0.159	0.376	-0.016	-0.094	-0.139	0.287	0.365
叶干重 LDM	0.693**	0.428	0.142	—	0.327	0.052	-0.093	-0.164	0.265	0.410
穗干重 PDM	0.803**	0.692	0.208	0.202	—	-0.042	-0.147	-0.110	0.111	0.632
茎含氮率 SNR	0.214*	0.354	-0.017	0.063	-0.083	—	-0.006	-0.097	-0.140	0.026
叶含氮率 LNR	-0.342**	0.273	-0.132	-0.146	-0.373	-0.008	—	0.043	-0.615	-0.261
穗含氮率 PNR	-0.261*	0.358	-0.148	-0.196	-0.212	-0.096	0.033	—	-0.619	-0.315
<b>2018</b>										
茎干重 SDM	0.611**	0.312	—	0.202	0.294	-0.055	-0.029	-0.112	0.300	0.284
叶干重 LDM	0.768**	0.353	0.178	—	0.444	0.026	-0.012	-0.221	0.415	0.418
穗干重 PDM	0.811**	0.753	0.122	0.208	—	-0.055	-0.066	-0.151	0.059	0.654
茎含氮率 SNR	0.059	0.356	-0.048	0.025	-0.117	—	0.040	-0.198	-0.297	-0.085
叶含氮率 LNR	-0.106	0.205	-0.044	-0.020	-0.241	0.069	—	-0.075	-0.311	-0.085
穗含氮率 PNR	-0.155	0.487	-0.072	-0.160	-0.233	-0.145	-0.031	—	-0.642	-0.388

缩写同表 6。\*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。

Abbreviations are the same as those given in Table 6. \* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

## 2.4 影响产量、氮素吸收及稻米品质的关键指标相关性分析

综上分析, 直链淀粉、蛋白质是影响稻米品质的关键因素; 穗粒数与产量相关系数最高, 对产量的直接作用最大, 千粒重能够较小的影响其他产量构成因素, 有利于促进产量的提高; 而茎、叶、穗干物质积累量则是影响氮素吸收量的关键指标。对上述影响产量、氮素吸收以及稻米品质的关键 7 项指标进行相关分析(表 8), 结果表明茎干重、叶干重、穗干重与千粒重、穗粒数 2 年均呈显著或极显著正相关。直链淀粉与茎干重、叶干重、穗干重、千粒

重、穗粒数 2 年均无显著相关性, 而蛋白质与茎干重、叶干重、穗干重、千粒重、穗粒数总体呈负相关, 其中与叶干重 2 年均呈极显著负相关。

## 3 讨论

### 3.1 关于影响产量、氮素吸收及稻米品质的关键指标

水稻产量高低取决于群体库容大小和库容的充实度, 其中有效穗数、穗粒数以及千粒重等是影响群体库容的关键指标<sup>[18]</sup>。吴桂成等<sup>[19]</sup>认为在足穗的基础上增加穗粒数, 是进一步获得高产的关键; 也

表 8 影响产量、氮素吸收及稻米品质的关键指标间的相关系数

Table 8 Correlation coefficients of key indexes affecting grain yield, nitrogen uptake and rice quality

指标	茎干重 SDM	叶干重 LDM	穗干重 PDM	蛋白质 PC	直链淀粉 AC	千粒重 1000-grain weight	穗粒数 Spikelet per panicle
茎干重 SDM	1	0.371**	0.544**	-0.190	0.013	0.258*	0.337**
叶干重 LDM	0.583**	1	0.473**	-0.346**	-0.002	0.276**	0.310**
穗干重 PDM	0.400**	0.590**	1	-0.144	-0.107	0.248*	0.484**
蛋白质 PC	-0.227*	-0.563**	-0.358**	1	0.250*	0.044	-0.085
直链淀粉 AC	0.042	-0.026	-0.039	0.165	1	0.121	0.097
千粒重 1000-grain weight	0.366**	0.424**	0.212*	-0.190	0.023	1	-0.133
穗粒数 Spikelet per panicle	0.280**	0.387**	0.544**	-0.231*	0.144	-0.173	1

缩写同表 2 和表 6。上三角和下三角分别为 2017 年和 2018 年简单相关系数。\*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。

Abbreviations are the same as those given in Tables 2 and 6. The upper triangle and lower triangle represent correlation coefficients of 2017 and 2018, respectively. \* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

有研究认为在保证适宜的群体颖花量(有效穗数×穗粒数)的基础上, 提高千粒重和结实率, 是进一步获得高产的有效途径<sup>[20-21]</sup>。本研究表明, 穗粒数、千粒重对产量的直接促进作用均要明显大于其间接限制作用, 而有效穗数、结实率对产量的限制作用基本上都要大于其促进作用。说明穗粒数、千粒重是影响该地区常规中熟粳稻品种(系)产量的主要因素。

氮素吸收量主要由干物质积累量和含氮率2个因素决定, 因此, 提高干物质积累量或含氮率或二者同时提高, 理论上都能有效提高植株的氮素吸收量。研究表明, 与氮素积累少的品种相比, 氮素积累量大的水稻品种其植株含氮率较低<sup>[22-23]</sup>, 或者没有明显规律<sup>[24]</sup>, 但其干物质积累量都明显偏高<sup>[25-26]</sup>。因此, 增加干物质积累量是增加氮素吸收量的有效途径<sup>[27]</sup>。本研究表明, 无论是直接通径系数还是间接通径系数, 茎、叶、穗干重对吸氮量的作用均要大于器官含氮率对吸氮量的作用, 且茎、叶、穗干重对吸氮量表现出促进作用, 而器官含氮率表现出限制作用。说明增加干物质生产量是提高吸氮量有效途径。

稻米品质主要包括加工品质、外观品质以及蒸煮食味品质等。研究表明, 加工品质与稻米蛋白质含量正相关, 蛋白质含量越高, 稻米硬度大不易破碎<sup>[28]</sup>。本研究结果也表明, 加工品质特别是整精米率与蛋白质呈极显著正相关, 说明提高籽粒蛋白质含量有利于加工品质的改善。垩白是由于胚乳中的淀粉体和蛋白质体排列不紧密导致的一些空腔所引起的一种光学特性, 是衡量稻米外观品质的重要性状<sup>[29]</sup>。本研究结果表明垩白性状与直链淀粉均呈极显著负相关, 与前人研究结果一致<sup>[30]</sup>, 这可能与低直链淀粉含量品种一般带有dull基因, 从而引起低直链淀粉含量品种的胚乳呈暗胚乳或云雾状, 透明度较差, 使得垩白相对偏高有关<sup>[31-32]</sup>。也有学者认为由低直链淀粉形成的暗胚乳, 只是光学上的不透明, 不同于传统意义上的稻米垩白<sup>[33]</sup>。此外, 本研究结果还发现垩白度与蛋白质呈显著或极显著负相关, 这可能与蛋白质能够填充淀粉颗粒之间的间隙, 减少光线透过米粒间隙而产生的折射有关<sup>[34]</sup>。米饭质地(硬度和黏性)是影响米饭食味品质的重要指标, 一般来说, 米饭硬度小, 粘弹性大, 适口性较好, 食味品质较优<sup>[35-36]</sup>。直链淀粉与蛋白质都能够影响稻米在蒸煮过程中的吸水性能以及糊化特性<sup>[37-38]</sup>, 降低直链淀粉和蛋白质含量, 有利于降低米饭硬度,

增加黏性, 提高米饭食味品质<sup>[39-40]</sup>。本研究简单相关以及偏相关分析结果均表明, 食味值与直链淀粉、蛋白质的关系最为密切, 且均呈极显著负相关。由此可见, 直链淀粉和蛋白质是影响稻米加工品质、外观品质以及蒸煮食味品质的重要指标。

### 3.2 关于产量、氮素吸收及稻米品质之间的关系

水稻产量与氮素吸收量存在明显的相互促进关系, 氮高效吸收型水稻产量也相对高, 而且, 高产氮高效型水稻品种最显著的特征之一是生物量大<sup>[25-26]</sup>。本研究表明, 影响氮素吸收的关键指标茎干重、叶干重、穗干重与影响产量的关键指标穗粒数、千粒重均呈极显著正相关关系, 说明, 增加茎、叶、穗干重, 有利于提高穗粒数和千粒重, 从而促进产量的提高。由此可见, 提高干物质生产量是促进吸氮量和产量协同提升的有效途径, 这与陈温福等<sup>[41]</sup>提出的增加干物质积累量, 优化产量结构, 夺取水稻超高产的路径一致。

在产量与氮素吸收有效统一的基础上, 如何进一步实现优质, 是当前水稻科研与生产追求的主要目标。胡蕾等<sup>[8]</sup>从南方稻区48个单季晚粳品种筛选出了味优高产、味优中产和味中高产3种类型品种, 发现直链淀粉含量在味优高产与味优中产之间并无显著差异。本研究结果也表明, 直链淀粉与茎干重、叶干重、穗干重以及千粒重、穗粒数均无显著的相关性, 说明针对直链淀粉含量的选择和改良, 不会对产量以及氮素吸收性状形成影响, 可以同步进行<sup>[42]</sup>。蛋白质作为影响稻米品质的另一关键指标, 与水稻产量、氮素吸收关系密切。前人研究表明, 水稻产量、穗粒数以及千粒重与籽粒蛋白质含量均呈负相关<sup>[43-44]</sup>, 增加穗粒数和千粒重不利于加工和外观品质的改善<sup>[6]</sup>。本研究结果也表明, 穗粒数、千粒重与蛋白质总体上存在负相关的趋势, 而蛋白质又与整精米率呈显著正相关, 与垩白度呈显著负相关。增加施氮量, 在显著提高水稻生物量、产量以及氮素吸收量的同时, 也能够显著提高籽粒蛋白质含量<sup>[12-13]</sup>。本研究结果表明, 籽粒蛋白质含量与茎干重、叶干重、穗干重呈负相关, 说明在相同氮肥水平下, 生物量大的品种, 反而有利于降低籽粒蛋白质含量。这与前人在不同氮肥水平下的得出的结论不一致, 其原因可能, 一方面与品种干物质积累量高, 导致茎、叶残留的氮素增多, 茎、叶中的氮素向穗的转运量及比例降低有关<sup>[14]</sup>; 另一方面与品种生物量大, 产量也相对高, 对籽粒蛋白质含量起到

了稀释作用有关<sup>[45]</sup>。综上所述, 产量与氮素吸收能够实现协同提升, 但随着二者的提升, 穗粒蛋白质含量呈现降低趋势, 这可能不利于加工和外观品质的改善, 因此, 有必要进一步研究其中的平衡关系。

## 4 结论

直链淀粉、蛋白质是影响稻米加工、外观以及食味品质的关键指标。穗粒数与产量相关系数最高, 对产量的直接促进作用最大, 而千粒重能够在较小的影响其他产量构成因素的基础上促进产量的提高。提高茎干重、叶干重以及穗干重是增加氮素吸收量的有效途径。茎干重、叶干重、穗干重与千粒重、穗粒数呈显著或极显著正相关。直链淀粉与茎干重、叶干重、穗干重、千粒重、穗粒数均无显著相关性, 而蛋白质与茎干重、叶干重、穗干重、千粒重、穗粒数总体呈负相关。在直链淀粉淀粉含量相对较低的品种中, 选择生物量较大, 且穗粒数较多、千粒重较高的品种, 是长江中下游地区实现水稻产量、氮素吸收以及食味品质协同提升的有效途径, 但可能会对加工以及外观品质形成一定的负面影响, 有待于进一步研究其中的平衡关系。

## References

- [1] 肖国樱, 肖友伦, 李锦江, 邓力华, 翁绿水, 孟秋成, 于江辉. 高效是当前水稻育种的主导目标. 中国水稻科学, 2019, 33: 287–292.  
Xiao G Y, Xiao Y L, Li J J, Deng L H, Weng L S, Meng Q C, Yu J H. High efficiency is a dominant target for current rice breeding. *Chin J Rice Sci*, 2019, 33: 287–292 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张启发. 绿色超级稻培育的设想. 分子植物育种, 2005, 3: 601–602.  
Zhang Q F. Strategies for developing green super rice. *Mol Plant Breed*, 2005, 3: 601–602 (in Chinese).
- [3] Fitzgerald M A, McCouch S R, Hall R D. Not just a grain of rice: the request for quality. *Trends Plant Sci*, 2009, 14: 133–139.
- [4] 张宏根, 朱国永, 封智蔷, 许明, 吉健安, 裴艳, 钱凯, 汤述翥, 顾铭洪. 近 30 年江苏省迟熟中粳品种产量与品质分析. 中国水稻科学, 2014, 28: 327–334.  
Zhang H G, Zhu G Y, Feng Z Q, Xu M, Ji J A, Pei Y, Qian K, Tang S Z, Gu M H. Analysis on yield and quality of the late maturity medium *japonica* rice varieties released in Jiangsu province in the last 30 years. *Chin J Rice Sci*, 2014, 28: 327–334 (in Chinese with English abstract).
- [5] Gu J F, Chen J, Chen L, Wang Z Q, Zhang H, Yang J C. Grain quality changes and responses to nitrogen fertilizer of *japonica* rice cultivars released in the Yangtze River Basin from the 1950s to 2000s. *Crop J*, 2015, 3: 285–297.
- [6] 王远征, 王晓菁, 李源, 徐海, 王嘉宇, 赵明辉, 唐亮, 马殿荣, 徐正进, 陈温福. 北方粳稻产量与品质性状及其相互关系分  
析. 作物学报, 2015, 41: 910–918.  
Wang Y Z, Wang X J, Li Y, Xu H, Wang J Y, Zhao M H, Tang L, Ma D R, Xu Z J, Chen W F. Analysis of yield and quality traits and their relationship in *japonica* rice in northern China. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 910–918 (in Chinese with English abstract).
- [7] 徐正进, 陈温福, 张树林, 张文忠, 马殿荣, 刘丽霞, 周淑清. 辽宁水稻穗型指数组品种间差异及其与产量和品质的关系. 中国农业科学, 2005, 38: 1926–1930.  
Xu Z J, Chen W F, Zhang S L, Zhang W Z, Ma D R, Liu L X, Zhou S Q. Differences of panicle trait index among varieties and its relationship with yield and quality of rice in Liaoning. *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 1926–1930 (in Chinese with English abstract).
- [8] 胡蕾, 朱盈, 徐栋, 陈志峰, 胡兵强, 韩超, 裴实, 吴培, 张洪程, 魏海燕. 南方稻区优良食味与高产协同的单季晚粳稻品种特点研究. 中国农业科学, 2019, 52: 215–227.  
Hu L, Zhu Y, Xu D, Chen Z F, Hu B Q, Han C, Qiu S, Wu P, Zhang H C, Wei H Y. Characteristics of good taste and high yield type of single cropping late *japonica* rice in southern China. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 215–227 (in Chinese with English abstract).
- [9] Zhu D W, Zhang H C, Guo B W, Xu K, Dai Q G, Wei H Y, Gao H, Hu Y J, Cui P Y, Huo Z Y. Effects of nitrogen level on yield and quality of *japonica* soft super rice. *J Integr Agric*, 2017, 16: 1018–1027.
- [10] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 王志琴, 杨建昌, 朱庆森. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响. 中国农业科学, 2003, 36: 1456–1461.  
Liu L J, Sang D Z, Liu C L, Wang Z Q, Yang J C, Zhu Q S. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency. *Sci Agric Sin*, 2003, 36: 1456–1461 (in Chinese with English abstract).
- [11] Rakotoson T, Dusserre J, Letourmy P, Ramonta I R, Cao T V, Ramanantsoainirina A, Roumet P, Ahmadi N, Raboin L M. Genetic variability of nitrogen use efficiency in rainfed upland rice. *Field Crops Res*, 2017, 213: 194–203.
- [12] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 韦善清, 徐建云, 董登峰, 陈念平, 陆福勇, 秦华东. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响. 中国农业科学, 2004, 37: 490–496.  
Jiang L G, Cao W X, Gan X Q, Wei S Q, Xu J Y, Dong D F, Chen N P, Lu F Y, Qin H D. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice. *Sci Agric Sin*, 2004, 37: 490–496 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张洪程, 王秀芹, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响. 中国农业科学, 2003, 36: 800–806.  
Zhang H C, Wang X Q, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Effects of N-application rate on yield, quality and characters of nitrogen uptake of hybrid rice. *Sci Agric Sin*, 2003, 36: 800–806 (in Chinese with English abstract).
- [14] 徐大勇, 董明辉, 胡曙运, 王学红, 杨建昌, 朱庆森. 水稻品种氮素代谢特性与稻米主要品质性状关系的研究. 西南农业学报, 2005, 18: 522–528.  
Xu D Y, Dong M H, Hu S Y, Wang X H, Yang J C, Zhu Q S. Study on rice plant nitrogen metabolisms and their relationships with grain quality. *Southwest China J Agric Sci*, 2005, 18: 522–528 (in Chinese with English abstract).

- [15] 中华人民共和国国家标准(GB/T17891-2017)《优质稻谷》. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Standards of P.R.C. (GB/T17891-2017) "High Quality Paddy". Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese).
- [16] 中华人民共和国国家标准(GB 5009.5-2016)《食品中蛋白质的测定》. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Standards of P.R.C. (GB 5009.5-2016) "Determination of Protein in Foods". Beijing: Standards Press of China, 2016 (in Chinese).
- [17] 宋小园, 朱仲元, 刘艳伟, 赵宏瑾. 通径分析在 SPSS 逐步线性回归中的实现. 干旱区研究, 2016, 33(1): 108–113.
- Song X Y, Zhu Z Y, Liu Y W, Zhao H J. Application of path analysis in stepwise linear regression SPSS. *Arid Zone Res*, 2016, 33(1): 108–113 (in Chinese with English abstract).
- [18] 朱庆森, 张祖建, 杨建昌, 曹显祖, 郎有忠, 王增春. 亚种间杂交稻产量源库特征. 中国农业科学, 1997, 30: 52–59.
- Zhu Q S, Zhang Z J, Yang J C, Cao X Z, Lang Y Z, Wang Z C. Source-sink characteristics related to the yield in intersubspecific hybrid rice. *Sci Agric Sin*, 1997, 30: 52–59 (in Chinese with English abstract).
- [19] 吴桂成, 张洪程, 钱银飞, 李德剑, 周有炎, 徐军, 吴文革, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 高辉, 徐宗进, 钱宗华, 孙菊英, 赵品恒. 穗型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究. 中国农业科学, 2010, 43: 266–276.
- Wu G C, Zhang H C, Qian Y F, Li D J, Zhou Y Y, Xu J, Wu W G, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Xu Z J, Qian Z H, Sun J Y, Zhao P H. Rule of grain yield components from high yield to super high yield and the characters of super-high yielding *japonica* super rice. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 266–276 (in Chinese with English abstract).
- [20] 吴文革, 张洪程, 吴桂成, 翟超群, 钱银飞, 陈烨, 徐军, 戴其根, 许轲. 超级稻群体籽粒库容特征的初步研究. 中国农业科学, 2007, 40: 250–257.
- Wu W G, Zhang H C, Wu G C, Zhai C Q, Qian Y F, Chen Y, Xu J, Dai Q G, Xu K. Preliminary study on super rice population sink characters. *Sci Agric Sin*, 2007, 40: 250–257 (in Chinese with English abstract).
- [21] 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 常勇, 李杰, 张洪程, 马荣荣, 王晓燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 邓张泽, 明庆龙. 大穗型杂交粳稻产量构成因素协同特征及穗部性状. 中国农业科学, 2013, 46: 686–700.
- Gong J L, Hu Y J, Long H Y, Chang Y, Li J, Zhang H C, Ma R R, Wang X Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Deng Z Z, Ming Q L. Study on collaborating characteristics of grain yield components and panicle traits of large panicle hybrid *japonica* rice. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 686–700 (in Chinese with English abstract).
- [22] Tirol-Padre A, Ladha J K, Singh U, Laureles E, Punzalan G, Akita S. Grain yield performance of rice genotypes at suboptimal levels of soil N as affected by N uptake and utilization efficiency. *Field Crops Res*, 1996, 46: 127–143.
- [23] Inthapanya I P, Sihavong P, Sihathep V, Chanphengsay M, Ukai S F, Basnayake J. Genotype differences in nutrient uptake and utilization for grain yield production of rainfed lowland rice under fertilised and non-fertilised conditions. *Field Crops Res*, 2000, 65: 57–68.
- [24] 董桂春, 王熠, 于小凤, 周娟, 彭斌, 李进前, 田昊, 张燕, 袁秋梅, 王余龙. 不同生育期水稻品种氮素吸收利用的差异. 中国农业科学, 2011, 44: 4570–4582.
- Dong G C, Wang Y, Yu X F, Zhou J, Peng B, Li J Q, Tian H, Zhang Y, Yuan Q M, Wang Y L. Differences of nitrogen uptake and utilization of conventional rice varieties with different growth duration. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 4570–4582 (in Chinese with English abstract).
- [25] Ntanos D A, Kourtoubas S D. Dry matter and N accumulation and translocation for *indica* and *japonica* rice under Mediterranean conditions. *Field Crops Res*, 2002, 74: 93–101.
- [26] Jiang L G, Dai T B, Jiang D, Cao W X, Gan X Q, Wei S Q. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars. *Field Crops Res*, 2004, 88: 239–250.
- [27] 吴越, 胡静, 陈琛, 张家星, 李万元, 唐东南, 仲军, 羊彬, 朱正康, 姚友礼, 王余龙, 董桂春. 江苏省早熟晚粳高产水稻新品种氮素吸收利用特征及成因分析. 中国水稻科学, 2017, 31: 63–74.
- Wu Y, Hu J, Chen C, Zhang J X, Li W Y, Tang D N, Zhong J, Yang B, Zhu Z K, Yao Y L, Wang Y L, Dong G C. Nitrogen absorption and utilization characteristics of the newly approved early-maturity late *japonica* rice cultivars in Jiangsu province. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31: 63–74 (in Chinese with English abstract).
- [28] Balindong J L, Ward R M, Rose T J, Liu L, Raymond C A, Snell P J, Ovenden B W, Waters D L E. Rice grain protein composition influences head rice yield. *Cereal Chem*, 2018, 95: 1–11.
- [29] Zhang C Q, Chen S J, Ren X Y, Lu Y, Liu D R, Cai X L, Li Q F, Gao J P, Liu Q Q. Molecular structure and physicochemical properties of starches from rice with different amylose contents resulting from modification of OsGBSSI activity. *J Agric Food Chem*, 2017, 65: 2222–2232.
- [30] Zhou L J, Liang S S, Ponce K, Marundon S, Ye G Y, Zhao X Q. Factors affecting head rice yield and chalkiness in *indica* rice. *Field Crops Res*, 2015, 172: 1–10.
- [31] Isshiki M, Nakajima M, Satoh H, Shimamoto K. Dull: rice mutants with tissue-specific effects on the splicing of the waxy pre-mRNA. *Plant J*, 2000, 23: 451–460.
- [32] 吴殿星, 夏英武, 李旭晨. 水稻胚乳外观云雾性状形成基础及其快速识别条件分析. 中国水稻科学, 2001, 15: 192–196.
- Wu D X, Xia Y W, Li X C. Formation basis of rice mist endosperm appearance and its rapid identifying factors. *Chin J Rice Sci*, 2001, 15: 192–196 (in Chinese with English abstract).
- [33] 陆彦, 张晓敏, 祁琰, 张昌泉, 凌裕平, 刘巧泉. 不同透明度水稻籽粒横断面扫描电镜分析. 中国水稻科学, 2018, 32: 189–199.
- Lu Y, Zhang X M, Qi Y, Zhang C Q, Ling Y P, Liu Q Q. Scanning electron microscopic analysis of grain cross-section from rice with different transparency. *Chin J Rice Sci*, 2018, 32: 189–199 (in Chinese with English abstract).
- [34] 伍时照, 黄超武, 欧烈才, 刘建昭. 水稻品种性状研究: III. 水稻品种品质性状的研究. 中国农业科学, 1985, 8: 1–7.
- Wu S Z, Huang C W, Ou L C, Liu J Z. Studies on varietal characteristics in cultivars of *Oryza sativa*: III. A study on grain quality characters of rice varieties. *Sci Agric Sin*, 1985, 8: 1–7 (in Chinese with English abstract).

- [35] Lin J H, Singh H, Chang Y T, Chang Y H. Factor analysis of the functional properties of rice flours from mutant genotypes. *Food Chem*, 2011, 126: 1108–1114.
- [36] Suwannaporn P, Linnemann A. Rice eating quality among consumers in different rice grain preference countries. *J Sens Stud*, 2008, 23: 1–13.
- [37] Li H Y, Prakash S, Nicholson T M, Fitzgerald M A, Gilbert R G. The importance of amylose and amylopectin fine structure for textural properties of cooked rice grains. *Food Chem*, 2016, 196: 702–711.
- [38] Martin M, Fitzgerald M A. Proteins in rice grains influence cooking properties. *J Cereal Sci*, 2002, 36: 285–294.
- [39] Jang E H, Lee S J, Hong J Y, Chung H J, Lee Y T, Kang B S, Lim S T. Correlation between physicochemical properties of *japonica* and *indica* rice starches. *Food Sci Technol*, 2016, 66: 530–537.
- [40] Gayin J, Abdel-Aal E S M, Manful J, Bertoff E, Ragae S. Physical, cooking and thermal properties of African rice (*Oryza glaberrima*) and its starch digestibility *in vitro*. *Food Sci Technol*, 2017, 75: 481–487.
- [41] 陈温福, 徐正进, 张龙步, 张文忠, 马殿荣. 北方粳型稻超高产育种理论与实践. 中国农业科学, 2007, 40: 869–874 .  
Chen W F, Xu Z J, Zhang L B, Zhang W Z, Ma D R. Theories and practices of breeding *japonica* rice for super high yield. *Sci Agric Sin*, 2007, 40: 869–874 (in Chinese with English abstract).
- [42] 何道根, 潘晓飚, 屈为栋. 杂交早稻产量和品质性状间的典型相关分析. *杂交水稻*, 1998, 14(1): 36–38.  
He D G, Pan X P, Qu W D. Canonical correlation analysis between quality and yield characters of early *indica* hybrid rice. *Hybrid Rice*, 1998, 14(1): 36–38 (in Chinese with English abstract).
- [43] 徐正进, 陈温福, 马殿荣, 吕英娜, 周淑清, 刘丽霞. 稻谷粒形与稻米主要品质性状的关系. *作物学报*, 2004, 30: 894–900.  
Xu Z J, Chen W F, Ma D R, Lyu Y N, Zhou S Q, Liu L X. Correlations between rice grain shapes and main qualitative characteristics. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 894–900 (in Chinese with English abstract).
- [44] 王康君, 熊溢伟, 葛立立, 张耗, 王志琴, 杨建昌, 刘立军. 粳粒蛋白质含量不同的转基因水稻株系产量形成特点. *作物学报*, 2013, 39: 1266–1275.  
Wang K J, Xiong Y W, Ge L L, Zhang H, Wang Z Q, Yang J C, Liu L J. Yield formation characteristics of transgenic rice strains with different protein contents in grains. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 1266–1275 (in Chinese with English abstract).
- [45] Tadashi T, Sumiyo N, Yuri M. Cultivar differences in the grain protein accumulation ability in rice (*Oryza sativa L.*). *Field Crops Res*, 2016, 192: 110–117.