

实地氮肥管理对不同氮响应粳稻品种产量和品质的影响

剧成欣^{1,2} 陈尧杰¹ 赵步洪² 刘立军¹ 王志琴¹ 杨建昌^{1,*}

(¹扬州大学 江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009; ²江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏 扬州 225007; *通讯联系人, E-mail: jcyang@yzu.edu.cn)

Effect of Site-Specific Nitrogen Management on Grain Yield and Quality of *japonica* Rice Varieties Differed in Response to Nitrogen

JU Chengxin^{1,2}, CHEN Yaojie¹, ZHAO Buhong², LIU Lijun¹, WANG Zhiqin¹, YANG Jianchang^{1,*}

(¹ Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; ² Lixiahe Region Agricultural Research Institute of Jiangsu, Yangzhou 225007, China; *Corresponding author, E-mail: jcyang@yzu.edu.cn)

Abstract: 【Objective】The aim is to clarify the effect of site-specific nitrogen management on grain yield, nitrogen use efficiency and grain quality of *japonica* rice varieties with different nitrogen responses. 【Method】Using four *japonica* rice varieties(Huaidao 5, Lianjing 7, Ningjing 1 and Yangjing 4038) as material, three nitrogen managements, zero nitrogen plot (ZN), farmers' common practice (FCP) and site-specific nitrogen management (SSNM), were applied during the growing season. The yield components, nitrogen use efficiency and grain quality were investigated. 【Result】Compared with FCP, SSNM significantly increased grain yield and nitrogen use efficiency, especially for varieties with A-type nitrogen response(type A). SSNM significantly improved head rice percentage, gel consistency, hot viscosity and breakdown values, and increased the content of albumin and glutelin, reduced chalkiness, amylose content and gelatinization temperature. Compared with varieties fallen in B-type of nitrogen response(type B), A-type varieties had a greater head rice percentage and breakdown values at the same nitrogen management, higher content of albumin and glutelin, lower chalkiness, amylose content and setback value. 【Conclusion】SSNM could significantly increase grain yield and nitrogen use efficiency for both A-type and B-type varieties, and A-type varieties were more sensitive to nitrogen in terms of grain quality of rice.

Key word: rice; nitrogen response; site-specific nitrogen management; yield; grain quality

摘 要: 【目的】本研究旨在阐明实地氮肥管理对不同氮响应粳稻品种产量、氮肥利用效率和稻米品质的影响。【方法】以4个粳稻品种(淮稻5号、连梗7号、宁梗1号和扬梗4038)为材料,设置了氮空白、农民常规施肥和实地氮肥管理3个氮肥处理,观察了不同氮肥处理下产量构成、氮肥利用效率和稻米品质的变化特征。【结果】与农民常规施肥相比,实地氮肥管理显著提高了水稻的产量和氮肥利用效率。实地氮肥管理显著提高了水稻的整精米率、胶稠度、热浆黏度和崩解值,显著增加了稻米中清蛋白和谷蛋白的含量,显著降低了垩白度、直链淀粉含量和糊化温度。依据不同品种在较低施氮量下产量和氮肥利用效率的响应,将供试品种分为A型(淮稻5号和连梗7号)和B型(宁梗1号和扬梗4038)。与氮响应B型品种相比,氮响应A型品种的整精米率、清蛋白和谷蛋白含量、崩解值较高,垩白度、直链淀粉含量、消减值较低。【结论】实地氮肥管理可以提高不同粳稻品种的产量和氮肥利用效率,对氮响应A型品种的效果更为明显,其米质对氮肥的响应更为敏感。

关键词: 水稻; 氮响应; 实地氮肥管理; 产量; 稻米品质

中图分类号: S143.1; S511.01

文献标志码: A

文章编号: 1001-7216(2018)03-0237-10

水稻是我国最重要的粮食作物之一,为世界上
一半以上的人口提供了近60%的饮食热量^[1]。据联

合国粮食及农业组织估计^[2],到2025年世界水稻产
量必须达到8亿t才能满足人口增长的需要。中国

收稿日期: 2017-08-27; 修改稿收到日期: 2018-01-03。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31461143015, 31471438, 31471447); 国家科技支撑计划资助项目(2014AA10A605); 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0300206-4); 江苏省农业科技自主创新项目(CX(17)3042); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 扬州大学高端人才支持计划资助项目(2015-1)。

作为世界上最大的产稻国和氮肥消费国,产量水平必须在现有水平上提高 20%^[3-4]。在过去几十年,我国水稻产量持续增长,主要是由于肥料的增施、品种的改良以及栽培技术的进步等。其中,氮肥是影响水稻生长的一个重要因子,在水稻生长发育和产量形成上的作用最为显著,在肥料投入中的比重达到 60% 以上^[5-6]。因此,增加氮肥的投入是提高水稻单产的一个重要措施^[5-6]。但过多的施氮造成氮肥利用效率普遍较低,我国氮素平均吸收利用效率仅为 33%,其余的氮素通过氨挥发、硝化与反硝化作用和硝酸盐淋溶等途径损失;平均农学利用效率为 12 kg/kg,还不到发达国家的一半^[7-9]。氮肥大量施用还会造成严重的环境污染,发达国家对此往往采用环境优先的原则;我国人多地少、资源紧缺,持续提高作物单产,同时高效利用有限的资源,是农业可持续发展的必由之路^[10-14]。如何降低氮肥施用量,提高氮肥利用效率,是我国农业生产特别是水稻生产上亟待解决的一个重要问题。

有研究表明^[15-16],不同水稻品种的氮肥利用效率存在明显的差异,培育和选用氮高效品种是协同提高作物产量和氮肥利用效率的一条重要途径。在以往的研究中我们发现^[17],对长江下游里下河地区种植的粳稻而言,在氮素供应充足的条件下,不同品种间的产量差异并不显著,都能达到一个较高的产量水平;但限制氮素供应,不同品种对氮素的响应表现出显著的差异。据此将在较低施氮量(≤ 200 kg/hm²)下产量和氮肥利用效率较高的品种称为氮响应 A 型品种;将在较低施氮量下产量和氮肥利用效率较低,但在高施氮量(> 200 kg/hm²)下产量较高或高施氮量下产量和氮肥利用效率与氮响应 A 型品种无显著差异的品种称为氮响应 B 型品种。这两类品种对氮素响应的差异主要体现在中低施氮水平。

近年来,实地氮肥管理技术在水稻生产中广泛应

用。该技术以氮肥管理为中心,依据土壤养分的有效供给量、水稻产量和稻草对养分的吸收量来确定施肥量,在水稻主要生育期使用叶绿素测定仪(SPAD)和叶色卡(LCC)观测叶片氮素情况并依此指导施肥,从而最大限度地提高氮肥利用效率,协调高产高效^[18-20]。但是关于实地氮肥管理对上述品种产量和米质的影响有何差异,优质与高产高效能否协同等方面缺乏研究。因此,本研究以不同粳稻品种为材料,比较分析了实地氮肥管理和农民常规施肥对水稻产量、氮肥利用效率和稻米品质的影响,以期水稻高产和优质栽培以及氮敏感或氮高效水稻品种的选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

试验于 2014—2015 年在江苏省里下河地区农业科学研究所扬州试验基地(32°42'N, 119°53'E, 海拔 21 m)进行。前茬作物为小麦,耕层含有机质 2.36%、有效氮 110 mg/kg、速效磷 32.1 mg/kg、速效钾 72.2 mg/kg,田间持水量为 0.189 g/g,土壤容重为 1.33 g/cm³。试验选择 2 个氮响应 A 型水稻品种淮稻 5 号和连粳 7 号,2 个氮响应 B 型水稻品种宁粳 1 号和扬粳 4038^[17],各品种的累计推广面积分别为 33.3、109、105.7 和 21.7 万 hm²(国家水稻数据中心),是江苏省里下河地区主栽品种。四个品种的生育期接近,为 150~155 d。采用裂区设计,氮肥处理为主区,品种为裂区(小区),重复 3 次,小区面积为 28 m²。设置了氮空白(ZN)、农民常规施肥(FCP)和实地氮肥管理(SSNM)3 种氮肥运筹方式,各处理的氮肥施用时期及施用量列于表 1,在实地氮肥管理处理下,淮稻 5 号和连粳 7 号的施氮量为 255 kg/hm²,宁粳 1 号和扬粳 4038 的施氮量为 270 kg/hm²。所有品种于 5 月 16 日播种,6 月 12 日

表 1 不同氮肥运筹处理的施氮时期及施氮量

Table 1. Stage and amount of nitrogen application for different nitrogen managements.

时期 Stage	氮空白区 ZN /(kg hm ⁻²)	农民常规 FCP /(kg hm ⁻²)	实地氮肥 SSNM /(kg hm ⁻²)
移栽前 Pre-transplanting	-	150	90
分蘖中期 Mid-tillering	-	60	60
穗分化始期 Panicle initiation	-	60	60 (38<SPAD<40) 75 (SPAD≤38) 45 (SPAD≥42)
颖花分化期 Spikelet differentiation	-	30	60 (40<SPAD<42) 75 (SPAD≤40) 45 (SPAD≥42)
合计 Total	0	300	240-300

ZN, Zero nitrogen level; FCP, Farmer's common practice; SSNM, Site-specific nitrogen management.

移栽, 株行距为 $0.25\text{ m} \times 0.13\text{ m}$, 双本栽插, 主区间筑埂并用塑料薄膜包裹。8 月 23—25 日抽穗, 10 月 16—18 日收获。各小区在移栽前均施用过磷酸钙(含 P_2O_5 13.5%) 240 kg/hm^2 和氯化钾(含 K_2O 52%) 240 kg/hm^2 。水分管理和病虫草害的防治按照当地高产栽培。

1.2 植株含氮量测定

于成熟期从各小区取代表性植株 10 株, 由分蘖节处分为地上部和地下部两个部分, 地上部分解为绿叶、茎鞘、穗, 将地上部各部分杀青后烘干用于测定干物质重, 保留样本, 粉碎过筛后用凯氏定氮法测定含氮量。氮肥利用率计算方法如下: 氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮区籽粒产量—氮空白区籽粒产量)/施氮量; 氮肥吸收利用率(%)=(施氮区植株吸氮量—氮空白区植株吸氮量)/施氮量 $\times 100$; 氮肥生理利用率(kg/kg)=(施氮区籽粒产量—氮空白区籽粒产量)/(施氮区植株吸氮量—氮空白区植株吸氮量); 氮肥偏生产力(kg/kg)=籽粒产量/施氮量。

1.3 产量及其构成因素

成熟期各小区取 1 m^2 考查实际穗数, 取 12 穴水稻刮粒后测定穗粒数、结实率与千粒重, 结实率采用水漂法测定, 将稻粒置于密度为 $1.1 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ 的生理盐水中, 比重大于 1.1 的是饱粒, 其余为空瘪粒。每个小区实收 150 穴脱粒计产。

1.4 稻米品质测定

风干稻谷置于室温下 3 个月后用于米质的测定。测定前各处理统一用 NP4350 型风选机等风量风选。参照中华人民共和国国家标准《GB/T17891—1999 优质稻谷》^[21-22]测定糙米率、精米率、整精米率、长宽比、垩白粒率、垩白大小、垩白度和胶稠度等。用 FOSS TECATOR 公司生产的近红外谷物分析仪(Infratec 1241 Grain Analyzer)测定精米的直链淀粉和蛋白质含量。参照陈毓荃^[23]与陈因等^[24]方法测定蛋白组分含量。采用澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司的 Super 3 型 RVA(Rapid Viscosity Analyzer)快速测定淀粉黏滞谱特性, 用 TWC(Thermal Cycle for Windows)配套软件进行数据分析。

1.5 数据分析

用 Excel 2013 软件整理数据, SAS 9.4 软件统计分析数据, SigmaPlot 10.0 绘图。由于 2 年试验结果趋势一致, 且同一品种各测定指标在年度间的差异不显著($P>0.05$), 因此本研究中产量和氮素利用效率以两年结果表示, 品质数据用 2015 年试验结果进行分析。

2 结果与分析

2.1 产量与氮肥利用效率

由表 2 可知, 不同品种的产量在不同氮肥处理下表现出较大的差异。在氮空白和实地氮肥管理处理下, 氮响应 A 型品种淮稻 5 号和连梗 7 号的产量显著高于氮响应 B 型品种宁梗 1 号和扬梗 4038, 在农民常规施肥处理下, 不同品种间产量差异不显著。与农民常规施肥方法相比, 实地氮肥管理显著提高了水稻的产量, 两个氮响应 A 型品种平均增产 12.6%, 两个氮响应 B 型品种平均增产 6.8%, 表明氮响应 A 型品种在实地氮肥管理处理下具有更强的增产潜力。从产量构成因素来看, 实地氮肥管理产量增加的原因是单位面积穗粒数和结实率的提高(表 2)。

不同品种的吸氮量和氮肥利用效率见表 3。与农民常规施肥相比, 实地氮肥管理显著增加了不同品种的吸氮量(表 3)。在实地氮肥管理处理下, 氮响应 A 型品种处理下的施氮量要小于氮响应 B 型品种, 但是氮响应 A 型品种的吸氮量反而高于氮响应 B 型品种。不同粳稻品种的农学利用效率、吸收利用效率、生理利用效率和偏生产力在实地氮肥管理处理下均显著高于农民常规施肥。在实地氮肥管理处理下, 氮响应 A 型品种的农学利用效率、吸收利用效率和偏生产力要显著高于氮响应 B 型品种。

2.2 加工品质与外观品质

由表 4 可知, 实地氮肥管理显著增加了各品种的精米率和整精米率, 而糙米率在各处理下无显著差异。氮响应 A 型品种的精米率和整精米率要略高于氮响应 B 型品种。与加工品质的变化类似, 不同粳稻品种的垩白粒率和垩白面积在实地氮肥管理下显著降低, 因而降低了水稻的垩白度; 这表明实地氮肥管理能够提高稻米的加工品质和外观品质, 氮响应 A 型品种和氮响应 B 型品种表现出相同的趋势。

2.3 蒸煮与食味品质

各品种的直链淀粉含量和蛋白质含量在农民常规栽培处理下最高, 实地氮肥管理下直链淀粉含量显著降低(表 6)。各品种的胶稠度在实地氮肥管理下显著升高, 糊化温度在实地氮肥管理下显著降低, 表明实地氮肥管理能够提高稻米的蒸煮与食味品质。与氮响应 B 型品种相比, 氮响应 A 型品种的直链淀粉含量和糊化温度较低, 胶稠度较长, 表明氮响应 A 型品种的蒸煮与食味品质优于氮响应 B 型品种。氮响应 A 型品种的蛋白质含量也显著高于氮

表2 不同氮肥运筹处理下水稻的产量及其构成因素

Table 2. Grain yield and its components of rice varieties under different nitrogen managements.

年份/品种 Year/Variety	处理 Treatment	产量 Yield (t hm ⁻²)	穗数 No. of panicles per hm ² /(×10 ⁴ hm ⁻²)	每穗粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Filled grain rate /%	粒重 Grain weight /mg
2014						
淮稻5号 Huaidao 5	氮空白区 ZN	6.40 d	223 d	115 e	90.4 a	27.6 a
	农民常规 FCP	9.19 c	301 a	141 c	80.5 e	26.9 ab
	实地氮肥 SSNM	10.29 a	298 a	149 b	85.8 c	27.0 ab
连粳7号 Lianjing 7	氮空白区 ZN	6.41 d	199 de	132 d	89.7 a	27.2 a
	农民常规 FCP	9.28 c	286 ab	150 b	82.9 d	26.1 cd
	实地氮肥 SSNM	10.35 a	277 b	162 a	87.4 b	26.4 bc
宁粳1号 Ningjing 1	氮空白区 ZN	6.00 e	209 de	122 de	89.5 a	26.3 cd
	农民常规 FCP	9.33 c	303 a	145 bc	83.3 d	25.5 d
	实地氮肥 SSNM	9.83 b	283 ab	151 b	86.8 bc	26.5 bc
扬粳4038 Yangjing 4038	氮空白区 ZN	6.03 e	190 e	129 d	89.4 a	27.5 a
	农民常规 FCP	9.24 c	261 bc	165 a	80.7 e	26.6 bc
	实地氮肥 SSNM	9.73 b	251 c	169 a	84.6 cd	27.1 ab
2015						
淮稻5号 Huaidao 5	氮空白区 ZN	6.33 d	204 d	122 f	93.5 a	27.2 b
	农民常规 FCP	9.12 c	284 a	146 d	81.5 e	27.0 b
	实地氮肥 SSNM	10.30 a	285 a	156 c	86.1 d	26.9 b
连粳7号 Lianjing 7	氮空白区 ZN	6.31 d	187 e	140 e	89.3 bc	27.0 b
	农民常规 FCP	9.15 c	263 b	163 b	82.7 de	25.8 c
	实地氮肥 SSNM	10.29 a	263 b	174 a	86.5 d	26.0 c
宁粳1号 Ningjing 1	氮空白区 ZN	5.86 e	202 d	121 f	91.1 b	26.3 c
	农民常规 FCP	9.07 c	290 a	153 c	81.4 e	25.1 d
	实地氮肥 SSNM	9.77 b	286 a	156 c	84.2 d	26.0 c
扬粳4038 Yangjing 4038	氮空白区 ZN	5.84 e	172 f	137 e	88.5 c	28.0 a
	农民常规 FCP	8.97 c	256 bc	164 b	80.9 e	26.4 c
	实地氮肥 SSNM	9.48 b	248 c	167 b	85.1 d	26.9 b

同栏同年比较, 不同字母表示 $P=0.05$ 水平上差异显著。下同。

Values within the same column for a same year followed by different letters are significantly different at the 0.05 level. The same as below.

表3 不同氮肥运筹处理下水稻的吸氮量与氮肥利用效率

Table 3. Nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of rice varieties under different nitrogen managements.

年份/品种 Year/Variety	处理 Treatment	吸氮量 N uptake/(kg hm ⁻²)	吸收利用效率 RE/%	农学利用效率 AE/(kg kg ⁻¹)	生理利用效率 PE/(kg kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 PFP/(kg kg ⁻¹)
2014						
淮稻5号 Huaidao 5	氮空白区 ZN	75.2 d				
	农民常规 FCP	169.3 c	31.4 c	9.3 d	29.6 d	30.6 c
	实地氮肥 SSNM	190.2 a	45.1 a	15.3 a	33.8 b	40.4 a
连粳7号 Lianjing 7	氮空白区 ZN	75.3 d				
	农民常规 FCP	168.5 c	31.1 c	9.6 d	30.8 d	30.9 c
	实地氮肥 SSNM	190.8 a	45.3 a	15.5 a	34.1 b	40.6 a
宁粳1号 Ningjing 1	氮空白区 ZN	72.7 e				
	农民常规 FCP	170.9 c	32.7 c	11.1 c	33.9 c	31.1 c
	实地氮肥 SSNM	181.3 b	40.2 b	14.2 b	35.3 a	36.4 b
扬粳4038 Yangjing 4038	氮空白区 ZN	72.5 e				
	农民常规 FCP	169.4 c	32.3 c	10.7 c	33.1 c	30.8 c
	实地氮肥 SSNM	177.6 b	39.0 b	13.7 b	35.2 a	36.0 b
2015						
淮稻5号 Huaidao 5	氮空白区 ZN	77.5 d				
	农民常规 FCP	172.3 c	31.6 c	9.3 d	29.5 e	30.4 c
	实地氮肥 SSNM	190.5 a	44.3 a	15.6 a	35.1 b	40.4 a
连粳7号 Lianjing 7	氮空白区 ZN	77.6 d				
	农民常规 FCP	170.5 c	31.0 c	9.4 d	30.5 e	30.5 c
	实地氮肥 SSNM	191.6 a	44.7 a	15.5 a	34.9 b	40.4 a
宁粳1号 Ningjing 1	氮空白区 ZN	74.5 e				
	农民常规 FCP	169.1 c	31.5 c	10.7 c	33.9 c	30.2 c
	实地氮肥 SSNM	180.3 b	39.2 b	14.5 b	37.0 a	36.2 b
扬粳4038 Yangjing 4038	氮空白区 ZN	74.8 e				
	农民常规 FCP	172.6 c	32.6 c	10.4 c	32.0 d	29.9 c
	实地氮肥 SSNM	179.8 b	38.9 b	13.5 b	34.7 b	37.2 b

RE—吸收利用效率; AE—农学利用效率; PE—生理利用效率; PFP—氮肥偏生产力。

RE, Recovery nitrogen use efficiency; AE, Agronomic nitrogen use efficiency; PE, Physiological nitrogen use efficiency; PFP, Partial factory productivity of applied N.

表 4 不同氮肥运筹处理对水稻加工品质的影响

Table 4. Effect of nitrogen management on milling quality of rice.

品种	处理	糙米率	精米率	整精米率
Variety	Treatment	Brown rice percentage/%	Milled rice percentage/%	Head rice percentage/%
淮稻 5 号	氮空白区 ZN	84.1 a	74.9 bc	64.1 cd
Huaidao 5	农民常规 FCP	82.6 a	74.0 c	62.2 e
	实地氮肥 SSNM	83.8 a	78.1 a	71.1 a
连粳 7 号	氮空白区 ZN	83.8 a	73.8 c	63.2 d
Lianjing 7	农民常规 FCP	81.3 a	73.7 c	64.7 c
	实地氮肥 SSNM	84.3 a	78.6 a	70.6 a
宁粳 1 号	氮空白区 ZN	82.9 a	72.2 d	63.1 d
Ningjing 1	农民常规 FCP	82.6 a	73.8 c	63.0 d
	实地氮肥 SSNM	83.7 a	77.4 a	69.2 b
扬粳 4038	氮空白区 ZN	83.7 a	70.8 e	60.4 e
Yangjing 4038	农民常规 FCP	82.2 a	70.5 e	62.3 e
	实地氮肥 SSNM	83.9 a	75.8 b	69.2 b

表 5 氮肥运筹对水稻外观品质的影响

Table 5. Effect of nitrogen management on appearance quality of rice.

品种	处理	垩白粒率	垩白大小	垩白度
Variety	Treatment	Chalky grain rate/%	Chalky area/%	Chalkiness/%
淮稻 5 号	氮空白区 ZN	23.1 e	24.8 d	5.7 e
Huaidao 5	农民常规 FCP	39.4 a	34.2 b	13.5 a
	实地氮肥 SSNM	17.5 g	18.8 e	3.3 f
连粳 7 号	氮空白区 ZN	27.6 d	28.9 c	8.0 cd
Lianjing 7	农民常规 FCP	32.4 c	36.2 a	11.7 b
	实地氮肥 SSNM	20.9 f	19.7 e	4.1 f
宁粳 1 号	氮空白区 ZN	27.2 d	28.1 c	7.6 d
Ningjing 1	农民常规 FCP	38.4 a	34.6 b	13.3 a
	实地氮肥 SSNM	22.1 e	25.1 d	5.5 e
扬粳 4038	氮空白区 ZN	31.5 c	28.3 c	8.9 c
Yangjing 4038	农民常规 FCP	35.8 b	37.2 a	13.3 a
	实地氮肥 SSNM	22.6 e	26.7 cd	6.0 e

表 6 氮肥运筹对水稻蒸煮品质及蛋白质含量的影响

Table 6. Effect of nitrogen management on cooking quality and protein content of rice.

品种	处理	蛋白质含量	直链淀粉含量	胶稠度	糊化温度
Variety	Treatment	Protein content/%	Amylose content/%	Gel consistency/mm	Gelatinization temperature/℃
淮稻 5 号	氮空白区 ZN	7.7 d	15.5 g	70.3 e	85.4 c
Huaidao 5	农民常规 FCP	8.7 a	17.1 de	77.5 c	84.5 cd
	实地氮肥 SSNM	8.1 c	15.4 g	82.5 b	82.6 e
连粳 7 号	氮空白区 ZN	7.6 d	17.5 c	73.6 d	84.1 d
Lianjing 7	农民常规 FCP	8.5 b	19.5 a	79.8 bc	82.9 e
	实地氮肥 SSNM	8.0 c	16.5 f	88.8 a	80.2 f
宁粳 1 号	氮空白区 ZN	7.2 f	16.9 e	48.6 h	89.9 a
Ningjing 1	农民常规 FCP	8.1 c	17.3 cd	57.3 g	86.6 b
	实地氮肥 SSNM	7.6 d	17.0 e	64.5 f	84.3 d
扬粳 4038	氮空白区 ZN	7.1 f	16.5 f	50.3 h	89.5 a
Yangjing 4038	农民常规 FCP	7.8 d	18.9 b	60.2 g	87.0 b
	实地氮肥 SSNM	7.4 e	17.4 c	68.3 e	84.2 d

响应 B 型品种(表 6)。

2.4 蛋白组分

蛋白组分反映稻米的营养品质，还与稻米的食味有关。稻米的蛋白质除绝对含量外，谷蛋白、醇溶蛋白等组分也与营养品质相关。氮响应不同水稻

品种的谷蛋白和清蛋白含量在实地氮肥管理下显著升高，醇溶蛋白含量在实地氮肥管理下显著降低，球蛋白在不同氮肥运筹处理下无明显差异(表 7)。氮响应 A 型品种的清蛋白和谷蛋白含量要显著高于氮响应 B 型品种，球蛋白和醇溶蛋白含量与氮

表 7 氮肥运筹对水稻籽粒蛋白质含量与蛋白组分的影响

Table 7. Effect of nitrogen management on protein content and its components in rice grain.

品种 Variety	处理 Treatment	清蛋白 Albumin/%	球蛋白 Globulin/%	醇溶蛋白 Prolamin/%	谷蛋白 Glutelin/%
淮稻 5 号	氮空白区 ZN	0.39 c	0.69 b	0.85 b	5.74 c
Huaidao 5	农民常规 FCP	0.42 b	0.68 b	0.97 a	5.91 b
	实地氮肥 SSNM	0.45 a	0.67 bc	0.69 c	6.29 a
连粳 7 号	氮空白区 ZN	0.36 d	0.70 b	0.94 ab	5.33 g
Lianjing 7	农民常规 FCP	0.37 d	0.73 a	1.01 a	5.89 b
	实地氮肥 SSNM	0.41 b	0.69 b	0.73 c	6.21 a
宁粳 1 号	氮空白区 ZN	0.29 fg	0.68 b	0.75 c	5.48 ef
Ningjing 1	农民常规 FCP	0.28 g	0.72 a	0.86 b	5.55 de
	实地氮肥 SSNM	0.31 f	0.65 c	0.75 c	5.90 b
扬粳 4038	氮空白区 ZN	0.28 g	0.67 bc	0.68 c	5.40 fg
Yangjing 4038	农民常规 FCP	0.30 f	0.70 b	0.91 ab	5.56 de
	实地氮肥 SSNM	0.34 e	0.72 a	0.75 c	5.68 cd

响应 B 型品种没有显著差异,表明氮响应 A 型品种总蛋白含量高主要是由于清蛋白和谷蛋白含量提高(表 7)。

2.5 淀粉黏滞谱特性

表 8 为各水稻品种的淀粉黏滞谱特性。在不同氮肥运筹处理间,最终黏度无明显变化规律。在实地氮肥管理下,水稻的热浆黏度、最高终黏度和崩解值与农民常规处理相比表现出增加的趋势,消减值则呈下降趋势,表明实地氮肥管理改善了稻米的食味品质。氮响应 A 型品种稻米淀粉谱的最高黏度、热浆黏度、崩解值均显著高于氮响应 B 型品种,而消碱值显著低于氮响应 B 型品种,说明氮响应 A 型品种稻米的蒸煮食味品质要优于对照品种(表 8)。与氮响应 B 型品种相比,氮响应 A 型品种稻米淀粉黏滞谱性的特征值在不同氮肥运筹处理下表现出更大的波动,表明氮响应 A 型品种的食味品质对氮肥更加敏感(表 8)。

3 讨论

3.1 实地氮肥管理对水稻产量和氮肥利用效率的影响

肥水管理是水稻增产的重要因素,氮肥运筹对水稻生产和环境保护有着重要的意义^[25-26]。本研究表明,实地氮肥管理显著提高了水稻的产量和氮肥利用效率,氮响应 A 型品种的增产增效效果较氮响应 B 型品种更为显著。有研究表明,减少水稻基肥施用量会导致其单位面积穗数不足,影响产量潜力的充分发挥^[18]。本研究则表明,与农民常规施肥相比,实地氮肥管理下虽然穗数有所降低,会造成一定的产量损失;但是实地氮肥管理下穗粒数和结实

率显著升高,引起产量增加,增产显著大于穗数减少引起的产量损失。水稻产量是库容量和灌浆效率的乘积,通常情况下穗粒数与结实率呈负相关^[27]。但是,本研究表明,实地氮肥管理与农民常规施肥相比,不仅显著增加每穗粒数,而且还可以提高籽粒结实率,这是实地氮肥管理增产增效的重要原因。氮响应 A 型品种在实地氮肥管理下能达到增产增效的效果,且较氮响应 B 型品种相比施氮量更低,即氮敏感水稻品种在相对较低施氮量下能获得较高的产量。

3.2 不同粳稻品种的米质

水稻米质是水稻理化特性的综合反映,包括碾磨加工品质、商品外观品质、蒸煮食味品质、营养品质等^[28]。本研究表明,氮响应 A 型品种的精米率和整精米率均显著高于氮响应 B 型品种;外观品质的差异未达到显著水平,说明了氮响应 A 型品种的加工品质优于氮响应 B 型品种。直链淀粉含量是评价稻米食味性的重要因素,直链淀粉含量较高的稻米胀性比较大,色泽暗淡,质地较硬,食味性比较差;直链淀粉含量较低的稻米胀性比较小,有光泽,质地柔软,食味性较好^[29]。稻米中蛋白质含量过高会抑制淀粉粒膨胀及糊化,导致米饭口感变差,影响稻米的食味品质。除绝对含量外,谷蛋白、醇溶蛋白等组分也与稻米的营养品质和食味品质有关^[30]。有研究表明,稻米的谷蛋白和清蛋白中含有较多的必需氨基酸,易于消化,营养价值比较高,是优质蛋白;而醇溶蛋白中氨基酸含量较低,而且因为结构紧密难以被吸收消化,被认为是劣质蛋白^[31]。胶稠度较长,米饭较软较黏,稻米额蒸煮与食味性较好^[32]。本研究表明,氮响应 A 型品种稻米的直链淀粉含量要低于氮响应 B 型品种,胶稠度的长

表 8 氮肥运筹对水稻的淀粉黏滞谱特性的影响

Table 8. Effect of nitrogen management on starch viscosity of rice. cP

品种 Variety	处理 Treatment	最高黏度 Peak viscosity	热浆黏度 Hot viscosity	崩解值 Breakdown	最终黏度 Final viscosity	消减值 Setback
淮稻 5 号 Huaidao 5	氮空白区 ZN	2640 de	1915 d	725 d	2984 bc	344 d
	农民常规 FCP	2779 d	2059 c	720 d	2888 cd	109 g
	实地氮肥 SSNM	2920 c	2163 b	757 c	2672 e	-248 i
连粳 7 号 Lianjing 7	氮空白区 ZN	3070 b	1931 d	1039 b	3306 a	236 e
	农民常规 FCP	3141 b	2057 c	1064 b	2970 bc	-171 h
	实地氮肥 SSNM	3374 a	2359 a	1115 a	3221 a	-153 h
宁粳 1 号 Ningjing 1	氮空白区 ZN	2124 h	1544 f	580 e	3041 b	917 a
	农民常规 FCP	2487 fg	1799 e	608 e	3006 bc	519 c
	实地氮肥 SSNM	2687 de	2189 b	698 d	2864 cd	177 f
扬粳 4038 Yangjing 4038	氮空白区 ZN	2428 g	1846 de	582 e	3073 b	645 b
	农民常规 FCP	2573 ef	1995 cd	578 e	2746 de	273 e
	实地氮肥 SSNM	2737 d	2027 c	710 d	2994 bc	257 e

度则高于氮响应 B 型品种;氮响应 A 型品种稻米的清蛋白和谷蛋白含量均要显著高于氮响应 B 型品种,球蛋白和醇溶蛋白含量却低于氮响应 B 型品种,表明氮响应 A 型品种的食味和营养品质要优于氮响应 B 型品种。氮响应 A 型品种的蛋白质含量要高于氮响应 B 型品种,虽然营养品质较好,但在一定程度上降低了稻米的食味性。本研究发现,氮响应 A 型品种的蛋白质含量高主要是清蛋白和谷蛋白等优质蛋白较高,表明氮响应 A 型品种的营养品质较好。

稻米淀粉的 RVA 黏滞谱特征值与蒸煮食味品质关系密切,特别是崩解值和消碱值能较好地反映稻米的蒸煮与食味品质,RVA 谱特征值与直链淀粉和支链淀粉相对含量有关,还与稻米品质指标直链淀粉含量和胶稠度等关系密切^[33-34]。直链淀粉含量与崩解值负相关,与消碱值正相关^[35-36]。有研究表明,稻米的食味性与最高黏度和崩解值呈正相关,与消减值呈负相关^[37]。本研究表明,氮响应 A 型品种稻米淀粉谱的最高黏度、热浆黏度、崩解值均显著高于氮响应 B 型品种,而消碱值显著低于氮响应 B 型品种,说明氮响应 A 型品种稻米的蒸煮食味品质要优于氮响应 B 型品种。与氮响应 B 型品种相比,氮响应 A 型品种稻米淀粉黏滞谱的特征值在不同氮肥运筹处理下表现出更大的波动,表明氮响应 A 型品种的食味品质对氮肥更加敏感。

3.3 氮肥运筹对米质的影响

稻米的品质除受品种基因型影响外,还与栽培措施和环境因素等密切相关。在不同栽培要素中,氮肥运筹是影响稻米品质最主要的因素之一^[38]。氮肥运筹对稻米加工和外观品质会造成重大的影响。有研究认为^[39],氮肥会对稻米的加工品质造成负效

应;但也有研究认为^[40],氮肥运筹会增加稻米加工品质。金军等^[41]指出,不同品种外观品质对氮素反应不同。本研究表明,实地氮肥管理显著增加了不同粳稻品种的精米率和整精米率,显著降低了垩白粒率、垩白面积和垩白度,表明实地氮肥管理同步提高了稻米的加工品质和外观品质。

直链淀粉含量是评价稻米食味性的重要因素,以往研究表明实地氮肥管理和减少施氮量都会显著降低稻米中的直链淀粉含量,本研究结果与之一致^[42]。胶稠度和糊化温度是反映稻米食味性的重要指标^[43]。本研究发现,实地氮肥管理显著增加了稻米的胶稠度,显著降低了糊化温度,表明实地氮肥管理能够提高稻米的蒸煮与食味品质。稻米的蛋白质除绝对含量外,谷蛋白,醇溶蛋白等组分也与营养品质相关。有研究表明,谷蛋白和清蛋白属于优质蛋白;醇溶蛋白属于劣质蛋白^[31]。本研究表明,氮敏感性不同水稻品种的谷蛋白和清蛋白含量在实地氮肥管理下显著升高,醇溶蛋白含量在实地氮肥管理下显著降低,表明通过氮肥运筹可以改变稻米中蛋白组分的分布,进而改善稻米的营养品质。在实地氮肥管理下,水稻的热浆黏度、最高终黏度和崩解值与农民常规处理相比表现出增加的趋势,消减值则呈下降趋势,表明实地氮肥管理改善了稻米的食味品质。

4 结论

与农民常规施肥相比,实地氮肥管理能提高各品种的产量和氮肥利用效率,氮响应 A 型品种的增产增效幅度大于氮钝感水稻品种。实地氮肥管理可以显著提高水稻的整精米率、胶稠度、热浆黏度和

崩解值, 显著增加稻米中清蛋白和谷蛋白的含量, 显著降低垩白度、直链淀粉含量和糊化温度, 表明通过氮肥运筹可以提高水稻的米质。与氮响应 B 型品种相比, 氮响应 A 型品种的加工品质和蒸煮食味品质较优, 稻米中清蛋白和谷蛋白含量较高, 直链淀粉含量较低, 稻米淀粉黏滞谱性较好, 食味品质对氮肥的响应更为敏感。

参考文献:

- [1] Fageria N K. Yield physiology of rice. *J Plant Nutr*, 2007, 30: 843-879.
- [2] FAOSTAT. FAO Statistical Databases. Rome: Food and Agriculture Organization(FAO) of the United Nations, 2016. <http://www.fao.org>.
- [3] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod Sci*, 2009, 12: 3-8.
- [4] Fan M S, Shen J B, Yuan L X, Jiang R F, Chen X P, Davies W J, Zhang F S. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China. *J Exp Bot*, 2012, 63: 13-24.
- [5] 徐富贤, 熊洪, 谢戎, 张林, 朱永川, 郭晓艺, 杨大金, 周兴兵, 刘茂. 水稻氮素利用效率的研究进展及其动向. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1215-1225.
Xu F X, Xiong H, Xie R, Zhang L, Zhu Y C, Guo X Y, Yang D J, Zhou X B, Liu M. Advance of rice fertilizer-nitrogen use efficiency. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15(5): 1215-1225. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedo Sin*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese with English abstract)
- [7] 樊剑波, 张亚丽, 王东升, 段英华, 叶利庭, 沈其荣. 水稻氮素高效吸收利用机理研究进展. *南京农业大学学报*, 2008, 31(2): 129-134.
Fan J B, Zhang Y L, Wang D S, Duan Y H, Ye L T, Shen Q R. Research progress on high nitrogen uptake and utilization by rice plants. *J Nanjing Agric Univ*, 2008, 31(2): 129-134. (in Chinese with English abstract)
- [8] 剧成欣, 张耗, 王志琴, 杨建昌. 水稻高产和氮肥高效利用研究进展. *中国稻米*, 2013, 19(1): 16-21.
- [9] Ju C X, Zhang H, Wang Z Q, Yang J C. Research progress of high yield and high nitrogen use efficiency of rice. *China Rice*, 2013, 19(1): 16-21. (in Chinese)
- [10] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland J B, Christian W. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Roland J B, Christian W. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin*, 2002, 35(9): 1095-1103. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 36-46.
Yang J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 36-46 (in Chinese with English abstract)
- [12] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 王东升, 叶利庭, 沈其荣. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价. *土壤学报*, 2008, 45(2): 267-273.
Zhang Y L, Fan J B, Duan Y H, Wang D S, Ye L T, Shen Q R. Variation of Nitrogen use efficiency of rice different in genotype and its evaluation. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45(2): 267-273. (in Chinese with English abstract)
- [13] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259-273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China. *Plant Nutr Fert Sci*, 2013, 19: 259-273. (in Chinese with English abstract)
- [14] Zhang F S, Chen X P, Vitousek P. An experiment for the world. *Nature*, 2013, 497: 33-35.
- [15] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320: 889-892.
- [16] Kant S, Bi Y M, Rothstein S J. Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. *J Exp Bot*, 2011, 62: 1490-1509.
- [17] Haegerle J W, Cook K A, Nichols D M, Below F E. Changes in nitrogen use traits associated with genetic improvement for grain yield of maize hybrids released in different decades. *Crop Sci*, 2013, 53: 1256-1268.
- [18] Ju C X, Roland J B, Wang Z Q, Zhang H, Liu L J, Yang J C, Zhang J H. Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application. *Field Crops Res*, 2015, 175: 47-55.
- [19] 刘立军, 杨立年, 孙小淋, 王志琴, 杨建昌. 水稻实地氮肥管理的氮肥利用效率及其生理原因. *作物学报*,

- 2009, 35(9): 1672-1680.
- Liu L J, Yang L N, Sun X L, Wang Z Q, Yang J C. Fertilizer-nitrogen use efficiency and its physiological mechanism under site-specific nitrogen management in rice. *Acta Agron Sin*, 2009, 35(9): 1672-1680. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29(1): 70-73.
- Wang G H, Zhang C Q, Huang C Y. SSNM-A new approach to increasing fertilizer N use efficiency and reducing N loss from rice fields. *J Zhejiang Univ: Agric & Life Sci*, 2003, 29(1): 70-73. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘立军, 徐伟, 桑大志, 刘翠莲, 周家麟, 杨建昌. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率. 作物学报, 2006, 32(7): 987-994.
- Liu L J, Xu D W, Sang D Z, Liu C L, Zhou J L, Yang J C. Site-specific nitrogen management increases fertilizer-nitrogen use efficiency in rice. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(7): 987-994. (in Chinese with English abstract)
- [21] 国家质量技术监督局. 优质稻谷: GB/T 17891—1999. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- National Quality and Technical Supervision Bureau. High Quality Rice: GB/T 17891—1999. Beijing: Standards Press of China, 2005. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国农业部. 米质测定方法: NY/T 83—1988. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination Method of Rice Quality: NY/T 83-1988. Beijing: Standards Press of China, 1988. (in Chinese)
- [23] 陈毓荃. 生物化学研究技术. 北京: 中国农业出版社, 1995: 196-197.
- Chen L Q. Techniques in biochemistry researches. Beijing: China agriculture press, 1995: 196-197.
- [24] 陈因. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999: 143-144.
- Chen Y. Modern plant physiology experiment guide. Beijing: Science Press, 1999: 143-144.
- [25] Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu X J, Cui Z L, Yin B, Christea P, Zhu Z L, Zhang F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 3041-3046.
- [26] Liu L, Chen T, Wang Z, Zhang H, Yang J, Zhang J. Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice. *Field Crops Res*, 2013, 154: 226-235.
- [27] Fu J, Huang Z H, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. Pre-anthesis non-structural carbohydrate reserve in the stem enhances the sink strength of inferior spikelets during grain filling of rice. *Field Crops Res*, 2011, 123: 170-182.
- [28] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论. 北京: 中国农业出版社, 2003: 29-39.
- Yang W Y, Tu N M. Theory of crop cultivation. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 29-39.
- [29] 毕京翠, 张文伟, 肖应辉, 王海莲, 江玲, 刘玲珑, 万向元, 翟虎渠, 万建民. 应用近红外光谱技术分析稻米蛋白质含量. 作物学报, 2006, 32(5): 709-715.
- Bi J C, Zhang W W, Xiao Y H, Wang H L, Jiang L, Liu L L, Wan X Y, Zhai H Q, Wan J M. Analysis for protein content in rice by near reflectance spectroscopy (NIRS) Technique. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(5): 709-715. (in Chinese with English abstract)
- [30] 龚金龙, 张洪程, 李杰, 常勇, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 李德剑, 李炳维, 沙安勤, 周有炎, 罗学超, 朱镇. 施磷量对超级稻南粳 44 产量和品质的影响. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 447-451.
- Gong J L, Zhang H C, Li J, Chang Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Li D J, Li B W, Sha A Q, Zhou Y Y, Luo X C, Zhu Z. Effects of phosphorus levels on grain yield and quality of super rice Nanjing 44. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(4): 447-451. (in Chinese with English abstract)
- [31] 焦爱霞, 杨昌仁, 曹桂兰, 李点浩, 郭建春, 金钟焕, 金弘烈, 李圭星, 韩龙植. 水稻蛋白质含量的遗传研究进展. 中国农业科学, 2008, 41(1): 1-8.
- Jiao A X, Yang C R, Cao G L, Li D H, Guo J C, Jin Z H, Jin H L, L G X, Han L Z. Progress in genetic research on protein content of rice. *Acta Agric Sci*, 2008, 41(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王百灵, 张文忠, 商全玉, 于红卫, 黄丽丽, 张振宇. 不同收获时期对超级稻沈农 014 主要稻米品质影响. 北方水稻, 2009, 39(3): 7-9.
- Wang B L, Zhang W Z, Shang Y Q, Yu H W, Huang L L, Zhang Z Y. Effect of harvesting time on quality of super rice variety, Shennong 014. *North Rice*, 2009, 39(3): 7-9. (in Chinese with English abstract)
- [33] 赵晶晶, 李宏梁. 茛三铜柱后衍生法测定软香酥糕点中氨基酸含量及其营养评价. 食品科学, 2011, 32(9): 295-298.
- Zhao J J, Li H L. Determination of amino acids by ninhydrin post-column derivatization in soft crisp pastry and its nutritional evaluation. *Food Sci*, 2011, 32(9): 295-298. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李欣, 张蓉, 隋炯明, 梁国华, 沈新平, 严长杰, 顾世梁, 顾铭洪. 稻米淀粉粘滞性谱特征的表现极其遗传. 中国水稻科学, 2004, 18(5): 384-390.
- Li X, Zhang R, Sui J M, Liang G H, Shen X P, Yan C J, Gu S L, Gu M H. Performance and inheritance of rice starch viscosity (RVA Profile) characteristics. *Chin J Rice Sci*, 2004, 18(5): 384-390. (in Chinese with English

- abstract)
- [35] 隋炯明, 李欣, 严松, 严长杰, 张蓉, 汤述翥, 陆驹飞, 陈宗祥 顾铭洪. 稻米淀粉 RVA 谱特征与品质性状相关性研究. 中国农业科学, 2005, 38(4): 657-663.
Sui J M, Li X, Yan S, Yan C J, Zhang R, Tang S Z, Lu J F, Chen Z X, Gu M H. Studies on the rice RVA profile characteristics and its correlation with the quality. *Acta Agric Sci*, 2005, 38(4): 657-663. (in Chinese with English abstract)
- [36] 胡培松, 翟虎渠, 唐绍清, 万建民. 利用 RVA 快速鉴定稻米蒸煮及食味品质的研究. 作物学报, 2004, 30(6): 519-524.
Hu P S, Zhai H Q, Tang S Q, Wan J M. Rapid evaluation of rice cooking and palatability quality by RVA profile. *Acta Agron Sin*, 2004, 30(6): 519-524. (in Chinese with English abstract)
- [37] Han Y P, Xu M L, Liu X Y, Yan C J, Korban S S, Chen X L, Gu M H. Genes coding for starch branching enzymes are major contributors to starch viscosity characteristics in waxy rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Sci*, 2004, 166: 357-364.
- [38] 程方民, 钟连进. 不同气候生态条件下稻米品质性状的变异及主要影响因子分析. 中国水稻科学, 2001, 15(3): 187-191.
Cheng F M, Zhong L J. Variation of rice quality traits under different climate conditions and its main affected factors. *Chin J Rice Sci*, 2001, 15(3): 187-191. (in Chinese with English abstract)
- [39] 李彦利, 严光彬, 贾玉敏, 孟令君, 严永峰, 张晓梅. 栽培因素对北方粳稻产量及米质的影响. 北方水稻, 2008, 38(2): 37-39.
Li Y L, Yan G B, Jia Y M, Meng L J, Yan Y F, Zhang X M. Effect of cultivation factors on the yield and quality of North Japonica rice. *North Rice*, 2008, 38(2): 37-39. (in Chinese with English abstract)
- [40] 徐春梅, 王丹英, 邵国胜, 章秀福. 施氮量和栽插密度对超高产水稻中早 22 产量和品质的影响. 中国水稻科学, 2008, 22(5): 507-512.
Xu C M, Wang D Y, Shao G S, Zhang X F. Effect of transplanting density and nitrogen fertilizer rate on yield formation and grain quality of super high yielding rice Zhongzao 22. *Chin J Rice Sci*, 2008, 22(5): 507-512. (in Chinese with English abstract)
- [41] 金军, 徐大勇, 蔡一霞, 胡署云, 葛敏, 朱庆森. 施氮量对水稻主要米质性状及 RVA 谱特征参数的影响. 作物学报, 2004, 30(2): 154-158.
Jin J, Xu D Y, Cai Y X, Hu S Y, Ge M, Zhu Q S. Effect of N-fertilizer on main quality characters of rice and RVA profile parameters. *Acta Agron Sin*, 2004, 30(2): 154-158. (in Chinese with English abstract)
- [42] 刘立军, 吴长付, 张耗, 杨建昌, 赵步洪. 实地氮肥管理对稻米品质的影响. 中国水稻科学, 2007, 21(6): 625-630.
Liu L J, Wu C F, Zhang H, Yang J C, Zhao B H. Effect of site-specific nitrogen management on rice quality. *Chin J Rice Sci*, 2007, 21(6): 625-630. (in Chinese with English abstract)
- [43] 张自常, 李鸿伟, 陈婷婷, 王学明, 王志琴, 杨建昌. 畦沟灌溉和干湿交替灌溉对水稻产量与品质的影响. 中国农业科学, 2011, 44(24): 4988-4998.
Zhang Z C, Li H W, Chen T T, Wang X M, Wang Z Q, Yang J C. Effect of furrow irrigation and alternate wetting and drying irrigation on grain yield and quality of rice. *Acta Agric Sci*, 2011, 44(24): 4988-4998. (in Chinese with English abstract)