氮钾运筹模式对高花青素特种稻产量及糙米营养品质的影响

石洪芳1 易志杰1 杨特武1 赵思明2 周 强3 周 成1 杨罗浩1

1.华中农业大学植物科学技术学院/农业部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室,武汉 430070; 2.华中农业大学食品科学技术学院,武汉 430070; 3.湖北省黄冈市农业科学院,黄冈 438000

摘要 以新培育的高产棕红色稻米品种冈特优 37 为材料,在本田习惯施肥水平(N 159 kg/hm²、 P_2 O_6 67.5 kg/hm² P_2 O_6 67.5 kg/hm² P_2 P_3 P_4 P_4 P_5 P_5 P_5 P_5 P_6 P_6 P_6 P_7 P_8 P_9 P_9

关键词 花青素;氮钾运筹;产量;稻米品质; γ -氨基丁酸;有色稻米

中图分类号 S 511.311 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2018)02-0043-07

有色米是指水稻的种皮和果皮中沉积有大量不 同类型的原花青素或花青素苷而形成的不同颜色的 糙米[1]。与普通白米相比,有色米中除富含天然色 素外,还含有丰富的 Fe、Mn、Zn 等人体必需的矿质 元素[1-2]及 γ -氨基丁酸(GABA)、 γ -谷维素、膳食纤 维、维生素等多种功能性营养成分[3-5]。原花青素和 花青素属类黄酮物质,具有增强人体免疫力、延缓衰 老、养肝补血、降血糖、降血脂及预防心脏病等作 用[4]。GABA 是一种非蛋白质氨基酸,在高等动物 体内作为抑制性神经递质或递质前体参与大脑神经 活动,具有降血压、降血脂、防止动脉硬化、增加脑部 供氧等功效[6]。随着社会经济的发展和人们生活水 平的提高,有色米的市场需求不断增大。我国是有 色米资源大国,资源蕴藏量占世界90%以上,但长 期以来因品种改良的落后产量普遍较低[7]。自 20 世纪80年代开始,国内外加强了有色米的品种改良 工作[8-9]。近来湖北省黄冈市农业科学院与华中农 业大学联合培育出棕红色有色米高产品种冈特优

37,综合性状优良。这些工作为有色米品种的扩大 栽培奠定了基础。然而,有色米的产量和品质还受 到栽培技术和环境条件的制约^[10],但相关研究报道 较少。本研究以冈特优37为材料,通过田间试验研 究氮、钾不同施肥模式对其产量和品质的影响,以期 为新品种的扩大栽培提供施肥技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 6 -10 月在湖北省荆州市监利县新沟镇福娃集团水稻生产基地进行,试验基地属北亚热带季风气候区,年平均气温 15.9~16.6 $^{\circ}$,无霜期 255 d,年均降水量 1226 mm。试验地土壤理化性质:有机质 15.8 g/kg,全氮 0.28 g/kg,全磷 0.36 g/kg,全钾 7.26 g/kg,碱解氮 82.6 mg/kg,有效磷 9.8 mg/kg,速效钾 164.3 mg/kg,pH 7.2。

1.2 试验品种

冈特优 37,为棕红色糙米三系籼型杂交稻,由

收稿日期: 2017-10-11

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFD0301400); 湖北省重大科技创新计划项目(2014ABC009)

石洪芳,硕士研究生. 研究方向:作物栽培生理. E-mail: 1306916078@qq.com

黄冈市农业科学院与华中农业大学联合培育。

1.3 试验方法

在当地中稻习惯施肥水平 (N 159 kg/hm²、 $P_2O_567.5$ kg/hm²和 $K_2O_67.5$ kg/hm²和 $E_2O_67.5$ kg/hm²)和氮肥基追比 (60%作基肥、40%作追肥)的条件下,按 4 (追氮)×2(施钾)双因素试验设计,设置 8 种氮、钾肥施肥模式处理,以在相同施钾模式下本田全生育期不施氮为对照 (CK₁和 CK₂),共 10 个处理 (表 1)。所有处理的磷肥全部作基肥施用。试验随机区组排列,3 次重复,小区面积 15 m²。小区间筑 30 cm 宽、15 cm 高的隔离埂,并用塑料膜包裹防止串肥。氮、

磷、钾肥源分别为尿素(含 46% N)、过磷酸钙(含 12% P_2O_5)、氯化钾(含 60% K_2O)。

2015年6月8日按当地常规方法播种、育秧,7月4日移栽大田,移栽规格为17.5 cm×19 cm,每穴1本。10月23日收获,测定各处理产量并调查产量构成。收获后,干燥稻谷经砻谷后制备糙米粉,过0.15 mm 孔径的筛,用于测定糙米淀粉(含直链淀粉和支链淀粉)、粗蛋白、粗脂肪、可溶性糖、游离氨基酸、花青素苷、GABA、谷氨酸(Glu)含量。选择GABA含量差异显著的处理糙米在30℃下浸泡6h、发芽72h后测定其发芽后GABA和Glu含量。

表 1 试验设计方案

Table 1 Experimental design and treatments

编号 Code	试验处理 Treatment						
	氮肥 N application	钾肥 K application					
A	40%分藥肥 40% at tillering stage						
В	30%分蘖肥 $+10%$ 保花肥 $30%$ at tillering $+$ $10%$ at spikelet developing stage	100%基肥					
C	20%分蘖肥+20%保花肥 20% at tillering + 20% at spikelet developing stage	100% as basal fertilizer					
D	10%分蘖肥+30%保花肥 10% at tillering + 30% at spikelet developing stage						
CK_1	0						
E	40%分蘖肥 40% at tillering stage						
F	30%分蘖肥 $+10%$ 保花肥 $30%$ at tillering $+$ $10%$ at spikelet developing stage	60%基肥+40%保花肥					
G	20%分蘖肥+20%保花肥 20% at tillering + 20% at spikelet developing stage	60% as basal fertilizer+40% as spikelet developing fertilize					
Н	10%分蘖肥+30%保花肥 10% at tillering + 30% at spikelet developing stage						
CK_2	0						

1.4 测定方法

应用浓 H₂ SO₄-HClO₄ 消化糙米粉样品,采用流动注射分析仪(Smart chem 200, Italy AMS company)测定消化液氮浓度,计算样品粗蛋白含量[11]。采用蒽酮硫酸法测定样品可溶性糖和总淀粉含量[11],按 GB/T15683-1995[12] 方法测定直链淀粉含量,支链淀粉含量由总淀粉含量减去直链淀粉含量计算。采用索氏抽提法测定样品粗脂肪含量,茚三酮比色法测定游离氨基酸含量[11]。糙米花青素苷含量按 NY/T 832-2004[13] 方法测定,以色价表示。

按郑洪健等 $^{[14]}$ 方法提取糙米粉 Glu 和 GABA。 参照吕莹果等 $^{[15]}$ HPLC 方法测定 Glu 含量,固定相为 YMC-Triart C18 (250 mm × 4.6 mm, 5 μ m), HPLC 色谱仪为 Agilent Technologies,1260 Infinity,USA,其余测定条件同文献 [15]。参照赵健等 $^{[16]}$ LC-MS 法测定 GABA 含量并稍加改进。固定相为 ACQUITY UPLC@BEH C18 色谱柱 (2.1 mm×50 mm, 1.7 μ m);洗脱程序为:0~0.5 min,80%A(0.1%甲酸) + 20%B(乙腈);0.5~10 min,

(80% A+20% B)~(20% A+80% B);10~12 min,20% A+80% B;12~15 min,(20% A+80% B)~(80% A+20% B)。柱温 45 ℃,流速 0.4 mL/min,进样量 4 μ L。质谱条件:毛细管电压为 1.01 kV,脱溶剂气温 400 ℃,载气流量 49 L/h。质谱仪为ACQUITY UPLC H-Class and Xevo G2-XS QTof,Waters Corporation,Ireland。其余测定条件同文献[16]。

1.5 统计分析方法

采用 Excel 对数据进行处理,采用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析和显著性比较,应用 Duncan's 多重比较检验不同处理间差异显著性,数据以平均值士标准误表示。

2 结果与分析

2.1 稻谷产量及其构成因素

测定结果(表 2)显示:所有处理中以处理 D 的稻谷产量最高,但仅与处理 E 和 2 个不施氮对照处理差异显著;2 个不施氮对照处理的产量、单株有效

穗数、每穗总粒数均显著低于各施氮处理,而结实率 有效穗数显著高于处理 A 和 E 外,其他产量构成因则高于施氮处理,在施氮处理中,除处理 G 的单株 素在不同处理间差异不显著(表 2)。

表 2 不同施肥模式的水稻产量及其构成因素

Table 2 Grain yield and its components under different fertilizer application patterns

处理 Treatment	单株有效穗数 Effective panicle number per plant	每穗总粒数 Total grain number per panicle	每穗实粒数 Filled grain number per panicle	结实率/% Grain-setting rate	千粒重/g Thousand-grain weight	产量/(t/hm²) Grain yield	收获指数 Harvest index
A	10.0±0.3b	201.2±4.1a	160.6±4.9a	79.8±1.1b	23.2±0.1a	9.19±0.22ab	0.51±0.03a
В	$10.8\!\pm\!0.2ab$	$193.7 \pm 8.0 a$	$156.0 \pm 6.5 \mathrm{ab}$	$80.5 \!\pm\! 0.7 \mathrm{b}$	$23.2 \pm 0.1a$	$9.23 \pm 0.37 ab$	$0.49 \pm 0.01a$
С	$11.0\!\pm\!0.7ab$	$188.5 \pm 6.9a$	$148.6 \pm 4.2 ab$	$78.9 \pm 1.8 \mathrm{b}$	$23.1\!\pm\!0.1a$	$9.30 \pm 0.24 ab$	$0.53 \pm 0.05a$
D	$10.8\!\pm\!0.2ab$	$193.0 \pm 10.2a$	$156.1\!\pm\!8.1\mathrm{ab}$	$81.0 \pm 0.4\mathrm{b}$	$23.3\!\pm\!0.1a$	$9.83 \pm 0.31a$	$0.53 \pm 0.02a$
CK_1	$8.1 \pm 0.2 \mathrm{c}$	$166.0 \pm 2.3 \mathrm{b}$	$145.9 \pm 0.6 ab$	$87.8\!\pm\!1.4a$	$23.4 \pm 0.2a$	$6.31\!\pm\!0.12c$	$0.52\!\pm\!0.02a$
Е	$10.1 \pm 0.4 \mathrm{b}$	$192.3\!\pm\!2.1a$	$158.0 \pm 4.8 \mathrm{ab}$	$82.0 \pm 1.5 \mathrm{b}$	$23.2 \pm 0.2a$	$8.83 \pm 0.15 \mathrm{b}$	$0.51 \pm 0.01a$
F	$10.8\!\pm\!0.2ab$	$197.2 \pm 4.7a$	$158.5 \pm 3.6a$	$80.1 \pm 0.4\mathrm{b}$	$23.1\!\pm\!0.1a$	$9.37 \pm 0.38 ab$	$0.49 \pm 0.02a$
G	11.3 ± 0.1 a	$192.6 \pm 2.7a$	$157.9 \pm 2.8 ab$	$81.9 \pm 0.8 \mathrm{b}$	$23.1 \pm 0.1a$	$9.68 \!\pm\! 0.26 ab$	$0.49 \pm 0.01a$
Н	$10.8\!\pm\!0.5ab$	$197.3\!\pm\!4.0a$	$158.8\!\pm\!2.2a$	$80.4 \pm 0.4\mathrm{b}$	$23.2 \pm 0.1a$	$9.61\!\pm\!0.12ab$	$0.51\!\pm\!0.03a$
CK ₂	$8.5 \pm 0.4 \mathrm{c}$	$165.9 \pm 7.3b$	$142.6 \pm 4.4 \mathrm{b}$	$86.2\!\pm\!2.4a$	$23.5 \pm 0.1a$	$6.86\!\pm\!0.32c$	$0.56 \pm 0.04 a$

注:同列不同小写字母表示 P<0.05 水平差异显著性。下同。Note: Different letters within a column indicate significant differences at P<0.05, the same as follows.

2.2 糙米主要营养成分含量

方差分析显示,施氮、施钾模式及二者互作对糙 米可溶性糖和游离氨基酸含量影响显著,但对直链 淀粉、支链淀粉、总淀粉及花青素苷含量影响均不显 著;施氮和施钾模式对粗脂肪含量影响显著,但二者 互作对其影响不显著;施氮模式对粗蛋白含量影响 显著,而施钾模式及氮钾互作对其影响不显著(资料 未列出)。

稻米主要营养成分含量测定结果(表 3)显示: 糙米可溶性糖含量以处理 H 最高,显著高于 A、D、 E、F 和 G 等处理,而处理 E 的可溶性糖含量最低, 显著低于除 A、D、F 和 G 外的其他处理;粗脂肪含量以处理 H 最高,显著高于 A、B、C、D 和 F 等处 理,而处理 F 的粗脂肪含量最低,显著低于 CK₁、E、G、H 和 CK₂;粗蛋白含量以处理 C 最高,但仅与 CK₁和 CK₂达差异显著水平,而 CK₁的粗蛋白含量 最低,显著低于除 A、B 和 CK₂外的其他处理;游离 氨基酸含量以处理 E 最低,显著低于除 CK₁和 F 外的其他处理,而处理 B 的游离氨基酸含量显著高于其他处理。

2.3 糙米谷氨酸和 GABA 含量

图 1 和图 2 分别为 HPLC 法检测糙米 Glu 的 色谱图和 LC-MS 法检测 GABA 的质谱图,均显示目标 物 分离 效 果 良 好。其中,谷 氨酸 回 收 率 为 $103.44\%\pm6.68\%$,检测限为 $17.77~\mu g/m L$; GABA 回收率为 $96.63\%\pm5.6\%$,检测限为 6.15~n g/m L。

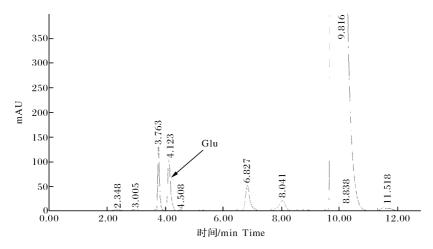


图 1 HPLC 法检测糙米谷氨酸色谱图

Fig.1 HPLC chromatogram for glutamate determination in dehulled rice

第 37 卷

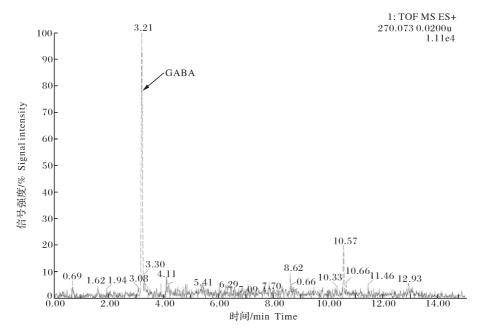


图 2 LC-MS 法检测糙米 GABA 质谱图

Fig.2 LC-MS spectrum for GABA determination in dehulled rice

方差分析表明:施氮和施钾模式对糙米 Glu 和 F 外的其他处理。糙米 GABA 含量以 CK_1 最高,GABA 含量均影响显著,而氮钾互作仅对 Glu 含量 显著高于除 B、D 和 F 外的其他处理;处理 A 的影响显著(资料未列出)。表 3 显示:糙米 Glu 含量 GABA 含量最低,但仅与 B、D、F 和 CK_1 差异达到以处理 C 最高,显著高于除 D、G、 CK_1 和 CK_2 外的 显著水平(表 3)。

其他处理;处理 H 的 Glu 含量最低,显著低于除 A

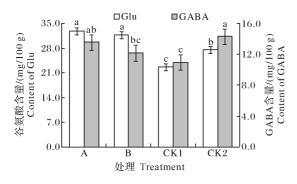
46

表 3 不同施肥模式下稻米主要营养成分含量

Table 3 Contents of main nutrient components in dehulled rice under different fertilizer application patterns

处理	直链	支链	总淀粉/%	可溶	粗脂肪/%		游离氨	谷氨酸/	GABA/	花青素苷
Treatment	淀粉/%	淀粉/%	Total	性糖/%	Crude	Crude	基酸(N)/	(mg/100 g)	(mg/100 g)	(色价值)
	Amylose	Amylopectin	starch	Soluble	fat	protein	(μg/g)	Glutamate		Anthocyanin
				sugar			Free amino			(color
							acid			value)
A	$20.6 \pm$	$53.0\pm$	$73.6 \pm$	$1.17\pm$	$4.08\pm$	$7.61\pm$	$134.3 \pm$	$13.31 \pm$	$0.98 \pm$	$0.27\pm$
	0.6a	1.1a	0.5a	0.05bc	0.19bcd	0.42abc	3.9bc	0.09cd	0.05d	0.02a
В	$20.3 \pm$	$52.5\pm$	$72.8 \pm$	$1.34\pm$	$3.89\pm$	$7.60 \pm$	$167.0 \pm$	$14.91 \pm$	$1.34\pm$	$0.29 \pm$
	0.2a	0.6a	0.5a	0.06a	0.39cd	0.08abc	10.9a	0.23b	0.01a	0.02a
С	$20.9 \pm$	$53.9 \pm$	$74.7 \pm$	$1.34\pm$	$4.03\pm$	$8.36 \pm$	$145.3 \pm$	$16.46\pm$	$1.14\pm$	$\textbf{0.29} \pm$
	0.4a	1.3a	1.5a	0.05a	$0.09 \mathrm{bcd}$	0.12a	1.8b	0.34a	0.07bcd	0.02a
D	$20.8 \pm$	$53.3 \pm$	$74.1 \pm$	$1.16\pm$	$4.12 \pm$	$7.93 \pm$	$133.2\pm$	$15.48 \pm$	$1.26\pm$	$0.28\pm$
	0.5a	1.0a	0.6a	$0.05 \mathrm{bc}$	$0.07 \mathrm{bcd}$	0.26ab	5.2bc	0.10ab	0.02abc	0.01a
CK_1	$20.8 \pm$	$54.8 \pm$	$75.6 \pm$	$1.29\pm$	$4.42 \pm$	$6.84 \pm$	$127.8 \pm$	$15.72 \pm$	$1.37\pm$	$0.30 \pm$
	0.6a	2.2a	1.6a	0.06ab	0.15abc	0.23c	10.9bcd	0.25ab	0.09a	0.02a
Е	$20.1 \pm$	$57.7 \pm$	$77.8 \pm$	$1.01 \pm$	$4.50\pm$	$8.10\pm$	$107.2 \pm$	$13.46\pm$	$1.08\pm$	$0.27\pm$
	0.3a	1.8a	1.5a	0.08c	0.14abc	0.33a	1.3d	0.20c	0.03cd	0.01a
F	$20.1 \pm$	$53.9 \pm$	$74.0\pm$	$1.15\pm$	$\textbf{3.69}\pm$	$\textbf{7.99}\pm$	$119.7\pm$	$12.54\pm$	$1.28\pm$	$0.30\pm$
	0.3a	1.5a	1.5a	0.01bc	0.24d	0.10ab	$4.6 \mathrm{cd}$	0.65cd	0.06ab	0.01a
G	$20.3 \pm$	$53.9 \pm$	$74.2 \pm$	$1.11\pm$	$4.67\pm$	$\textbf{7.88} \pm$	$134.5 \pm$	$15.76 \pm$	$1.01\pm$	$0.28\pm$
	0.2a	0.9a	1.0a	0.06c	0.10ab	0.35ab	10.9bc	0.28ab	0.06d	0.01a
Н	$19.8 \pm$	$53.9 \pm$	$73.7 \pm$	$1.38\pm$	$4.95 \pm$	$8.06\pm$	$139.5 \pm$	$12.31 \pm$	$1.11\pm$	$0.30\pm$
	0.3a	2.3a	2.5a	0.04a	0.08a	0.62a	1.5bc	0.40d	0.06bcd	0.01a
CK_2	$20.3 \pm$	$55.4\pm$	$75.7 \pm$	$1.31\pm$	$4.47\pm$	$6.98 \pm$	$140.7\pm$	$15.64\pm$	$0.99 \pm$	$0.30\pm$
	0.1a	1.6a	1.7a	0.03ab	0.32abc	0.17bc	5.1bc	0.36ab	0.07d	0.01a

由于糙米在发芽后 GABA 含量显著升高[6],本研究选择糙米 GABA 含量差异最大的 2 个施氮处理(A和B)和 2 个对照处理,分析其发芽后 GABA和 Glu含量的变化。图 3 显示,糙米在发芽后 GABA和 Glu含量均有大幅提高,A、B、CK₁和 CK₂发芽糙米的 GABA含量较发芽前分别提高 12.9倍、8.1倍、7.0倍和 13.5倍,Glu含量分别提高 147.8%、112.8%、45.1%和 76.2%。发芽糙米的GABA含量以 CK₂最高,显著高于 B和 CK₁处理,但与处理 A 差异未达显著水平;CK₁和 CK₂发芽糙米的Glu含量显著低于处理 A和B,处理 A和B的发芽糙米 Glu含量差异不显著,而 CK₂发芽糙米的Glu含量显著高于 CK₁(图 3)。



注:同一指标不同小写字符表示 P < 0.05 水平差异显著性。 Note: Different letters of the same indicator indicate significant differences at P < 0.05.

图 3 不同施肥模式处理的发芽糙米谷氨酸与 GABA 含量 Fig.3 Contents of glutamate and GABA in germinated dehulled rice under different fertilizer application patterns

3 讨 论

本试验中不施氮处理的冈特优 37 产量显著低于施氮处理,进一步证明合理施肥特别是施用氮肥是促进水稻增产的有效途径[17]。不施氮处理的单株有效穗数和每穗粒数均显著低于施氮处理,说明缺氮导致植株分蘖能力下降和颖花分化数减少是其产量降低的主要原因。在施氮处理的产量构成因素中,不同处理仅单株有效穗数存在显著差异,说明施氮处理的产量差异主要受单位面积有效穗数所影响。在2种施钾模式下,氮肥一次追肥处理的稻谷产量和单株有效穗数均较低,说明后期追施氮肥有利于促进分蘖成穗。杨树明等[18]在常规白米品种研究中也获得类似结果。以上研究表明,冈特优 37 特种稻的产量形成对养分的需求与常规品种类似,通过合理施肥增加单位面积有效穗数是提高其产量

的主要途径。

在本研究中,不同施肥模式对冈特优 37 糙米两 类淀粉含量影响均不显著。这一结果与杨树明 等[18]在常规白米品种中的研究不同,或许与稻米的 品种特性有关,有待于进一步研究。本研究还显示, 适当施氮作保花肥有利于提高糙米可溶性糖含量, 特别是在施用钾肥作保花肥的条件下增加保花肥的 施氮比例,糙米可溶性糖含量增幅较大。钾可促进 同化物的合成和运输[19],而氮有利于延缓叶片衰 老[18]。因此,在施用钾肥作保花肥的条件下提供较 多的氮素营养在保障植株后期对钾需求的同时可增 强叶片的光合同化能力,从而提高糙米可溶性糖含 量。在本研究的相同施氮模式中,2次施钾的糙米 粗脂肪含量一般高于一次施钾模式,这与朱朋波 等[20]在常规白米品种中的研究结果一致,说明增加 后期钾素供应可提高包括有色米品种在内的稻米粗 脂肪含量。王德仁等[21]研究表明,提高后期氮肥供 应有利于稻米蛋白质合成,进而改善其营养品质。 然而,在本试验的2种施钾模式下,不同施氮模式的 冈特优 37 糙米粗蛋白含量虽显著高于不施氮处理, 但施氮处理间差异并不显著。此外,糙米游离氨基 酸含量与粗蛋白含量变化也无对应关系。在钾肥全 部基施的条件下,糙米游离氨基酸含量随保花肥氮 肥施用量的增加而呈先升后降趋势;在钾肥 60%作 基肥、40%作保花肥时,游离氨基酸含量则随保花肥 氮肥施用量的增加而提高。由此可见,施氮模式对 有色米蛋白质合成代谢的影响与施钾模式存在一定 的关系,具体机制仍需进一步研究。在本研究中,不 同施肥模式处理的花青素苷含量差异不大。蔡光 泽[10]以红米和黑米品种为材料研究也发现,不同施 肥水平对有色米的着色程度影响不明显,说明通过 施肥来调控有色米花青素或花青素苷含量有其局 限性。

在高等植物中,GABA 由谷氨酸脱羧酶(GAD) 催化谷氨酸脱羧而成,而 GABA 可由 GABA 转氨酶(GABA-T) 不可逆催化转变为琥珀酸半醛(SSA)^[6]。在本试验中,不施氮处理 CK₁ 的糙米GABA 含量最高,而其粗蛋白含量最低,可能因缺氮使得 GS/GOGAT(谷氨酰胺合成酶/谷氨酸合酶)途径受到抑制,蛋白质的合成降低,导致更多的谷氨酸转化成 GABA^[22]。然而,本试验 2 次施钾模式下的不施氮处理(CK₂)的糙米 GABA 含量却较低;并且,在相同施氮模式中,2 次施钾多数处理的

糙米 GABA 含量也呈现出低于 1 次施钾处理的趋势,说明后期高钾可能不利于冈特优 37 糙米的 GABA 积累,这是否因后期高钾可激活 GABA 转氨酶活性所致仍需进一步探讨。同时,在本研究中糙米谷氨酸含量变化与 GABA 含量变化也不呈对应关系。因此,施肥模式对糙米 GABA 积累的影响机制仍有待进一步探讨。需要指出的是,本研究仅为一年一地的试验结果,尚需开展多年多点试验深入探讨施肥技术对冈特优 37 产量和品质的影响。

水稻种子在吸水萌发过程中发生贮藏物降解等一系列生理生化变化,导致谷氨酸和 GABA 显著增加,从而为食品加工的营养强化提供了新的策略^[6]。本研究对发芽糙米的测定也证实这一现象。然而,有趣的是,发芽前糙米中谷氨酸和 GABA 水平较低的处理在发芽后却增幅更大,说明发芽糙米的GABA合成与种子发育期的 GABA 积累可能存在不同的机制,有待于深入研究。上述结果也提示,在发芽糙米食品加工中不宜依据发芽前糙米的GABA基础含量来选择原料。

综上,氮钾施肥模式对冈特优37产量具有重要 影响,合理施肥主要通过增加单位面积有效穗数而 增产。氮钾施肥模式对冈特优37糙米直链淀粉、支 链淀粉和花青素苷含量影响不大,但适当施用氮肥 作保花肥可提高糙米可溶性糖含量;施用钾肥作保 花肥可提高糙米粗脂肪含量,但有降低其 GABA 含 量的趋势。发芽糙米的 GABA 合成与种子发育期 的 GABA 积累可能存在不同的机制。在钾肥全部 基施的条件下,糙米游离氨基酸含量随保花肥氮肥 施用量的增加而呈先升后降趋势;在钾肥 60%作基 肥、40%作保花肥时,游离氨基酸含量则随保花肥氮 肥施用量的增加而提高。在本试验条件下,在钾肥 全部基施,氮肥60%作基肥、10%作分蘖肥、30%作 保花肥时冈特优37稻谷产量最高,且其糙米 GABA、Glu 和花青素苷含量与最高含量处理差异 不显著,其他营养成分处于中等水平,可确定为冈特 优 37 的适官氮钾施肥模式。

参考文献

- [1] 郭咏梅,段延碧,李少明,等.有色稻米 Fe、Zn、Cu 和 Mn 含量及与种皮颜色相关分析[J]. 植物遗传资源学报,2011,12(6):971-974,981.
- [2] 裘凌沧,潘军,段彬伍.有色米及白米矿质元素营养特征[J].中国水稻科学,1993,7(2):95-100.

- [3] FINOCCHIARO F, FERRARI B, GIANINETTI A, et al. Characterization of antioxidant compounds of red and white rice and changes in total antioxidant capacity during processing [J]. Mol Nutr Food Res, 2007, 51:1006-1019.
- [4] ZHANG M W, ZHANG R F, ZHANG F X, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties[J]. J Agric Food Chem, 2010, 58:7580-7587.
- [5] GUNARATNE A, WU K, LI D, et al. Antioxidant activity and nutritional quality of traditional red-grained rice varieties containing proanthocyanidins [J]. Food Chem, 2013, 138: 1153-1161.
- [6] DING J, YANG T, FENG H, et al. Enhancing contents of γ-aminobutyric acid (GABA) and other micronutrients in dehulled rice during germination under normoxic and hypoxic conditions[J]. J Agric Food Chem, 2016, 64:1094-1102.
- [7] 孙志栋,陈国,虞振先,等.我国有色米的研究进展[J].浙江农业学报,2010,22(6):873-878.
- [8] 孙志栋,陈惠云,陈国,等.有色米色素的提取与测定方法[J]. 食品工业,2011(10);70-72.
- [9] 李艳霞,林拥军,陈浩.水稻花青素合成调控转录因子 OsC1 和 OsPAC1 的功能[J].华中农业大学学报,2017,36(1):1-9.
- [10] 蔡光泽.不同施肥处理对有色米产量性状及糙米着色程度的影响[J].西南农业学报,2002,15(4);55-58.
- [11] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].2 版.北京:高等教育出版社,2006.
- [12] GB/T 15683—1995.中华人民共和国国家标准: 稻米直链淀粉含量的测定[S].北京:中国标准出版社,1995.
- [13] NY/T 832—2004.中华人民共和国农业行业标准 黑米[S].北京:中国农业出版社,2004.
- [14] 郑洪健,叶立斌,励建荣,等.2,4-二硝基氟苯柱前衍生 RT-HPLC 法测定 γ-氨基丁酸[J].中国粮油学报,2011(4):104-106,111.
- [15] 吕莹果,张晖,孟祥勇,等.2,4-二硝基氟苯柱前衍生法测定植物中谷氨酸脱羧酶的活力[J].分析化学,2009,37(3):347-350.
- [16] 赵健,李凤华,杨丽,等.超高效液相色谱-质谱/质谱联用法测定 泰山白首乌中 γ-氨基丁酸含量及其相关药效分析[J].世界科 学技术(中医药现代化),2012,14(5),2029-2035.
- [17] 杨建, 樊慧梅, 刘笑笑, 等. 施氮对水稻产量氮素吸收及其品质的影响[J].农业与技术, 2015, 35(17):16-19.
- [18] 杨树明,杨慧,赵旭,等.不同时期施氮对功能型水稻产量及籽粒功能成分的影响[J].西南农业学报,2013,26(4):1527-1531.
- [19] 刘晓燕,何萍,金继运.钾在植物抗病性中的作用及机理的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):445-450.
- [20] 朱朋波,徐大勇,方兆伟,等.氮磷钾肥施用量对稻米粗脂肪含量的影响[J].江苏农业科学,2006(6):395-396.
- [21] 王德仁,卢婉芳,陈苇.施氮对稻米蛋白质、氨基酸含量的影响 [J].植物营养与肥料学报,2001,7(3):353-356.
- [22] 宋红苗,陶跃之,王慧中,等.GABA 在植物体内的合成代谢及生物学功能[J].浙江农业科学,2010(2);225-229.

Effects of nitrogen and potassium application patterns on yield and nutrition quality of a rice cultivar with high anthocyanin content

SHI Hongfang¹ YI Zhijie¹ YANG Tewu¹ ZHAO Siming² ZHOU Qiang³ ZHOU Xin¹ YANG Luohao¹

1. College of Plant Science and Technology, MOA Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River, Wuhan 430070, China; 2. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. Huanggang Academy of Agricultural Sciences, Huanggang 438000, China

Abstract A newly bred rice cultivar with high anthocyanin content, Gangteyou 37, was used to study the effects of nitrogen (N) and potassium (K) application patterns on the yield and the nutrition quality of dehulled rice under the total application of N 159 kg/hm², P₂O₅ 67.5 kg/hm² and K₂O 67.5 kg/hm² in the field. Results showed that the highest grain yield was obtained when all K was applied as basal fertilizer, 60% of N used as basal fertilizer, 10% of N applied at tillering stage and 30% of N at spikelet developing stage. Appropriate fertilizer application increased the effective panicles per area, therefore, increased the yield. The fertilizer application patterns rarely affected the contents of amylose, amylopectin and anthocyanin, but proper amount of N applied at the spikelet developing stage increased the content of soluble sugar in dehulled rice. The content of crude fat in dehulled rice was increased by supplying K at the later developmental stage under the same N application pattern. Gama-aminobutyric acid (GABA) tended to increase when N was applied at the spikelet developing stage under the same K application pattern. When all K was applied as basal fertilizer, the content of free amino acid increased first and then decreased with the increase of N application rate at the spikelet developing stage. When 60% of K was used as basal fertilizer and 40% as spikelet developing fertilizer, the content of free amino acid in dehulled rice increased with the increase of N application rate at the spikelet developing stage. Applying N significantly increased the content of crude protein in dehulled rice, but its changes were inconstant under different K application patterns. It is indicated that all K applied as basal fertilizer, 60% of N used as basal fertilizer, 10% of N applied at tillering stage and 30% of N at spikelet developing stage is suitable to improve rice yield and nutritional quality, and can be used as appropriate fertilizer application pattern for Gangteyou 37.

Keywords anthocyanin; nitrogen and potassium application; yield; rice quality; gama-aminobutyric acid; colored rice

(责任编辑:张志钰)