

不同基因型粳稻籽粒产量与功能成分的生态变异

杨树明^{1,2}, 夏小环³, 赵旭⁴, 方晓东⁵, 杜娟¹, 曾亚文^{1,2*}, 普晓英¹, 杨涛¹, 彭潞波¹

(1.云南省农业科学院 生物技术与种质资源研究所, 云南 昆明 650205; 2.云南省农业生物技术重点实验室, 云南 昆明 650223; 3.黄冈师范学院 化学与生命科学学院, 湖北 黄冈 438000; 4.寻甸县农业局 植保植检工作站, 云南 寻甸 655200; 5.新平县农业局农业技术推广站, 云南 新平 653400)

摘要:以云南省育成的 14 个功能型水稻品种(系)为材料, 在新平、玉溪和寻甸 3 个生态点种植, 研究不同基因型粳稻的产量和功能成分含量及其生态变异。结果表明: 寻甸的水稻平均产量、有效穗数和结实率均显著高于新平和玉溪, 以新平最低, 玉溪每穗粒数显著高于新平和寻甸, 不同地区粳稻千粒重差异不显著; 路径分析表明, 限制新平、玉溪、寻甸水稻产量的主要因素分别为每穗粒数、有效穗数、结实率; 基因型、环境及其互作均对产量及其构成因素和稻米功能成分有显著或极显著的影响, 稻谷产量、有效穗数、每穗总粒数和结实率主要受生态环境的影响, 而千粒重受基因型控制, γ -氨基丁酸受生态环境的影响, 总黄酮、生物碱受基因型及基因型与环境互作的共同调节, 抗性淀粉含量主要受基因型控制; 新平水稻糙米 γ -氨基丁酸和生物碱含量较高, 玉溪和寻甸 2 种成分含量相接近; 总黄酮以玉溪点最高, 寻甸较低; 不同地区抗性淀粉含量差异较小。

关键词: 水稻; 基因型; 生态环境; 总黄酮; γ -氨基丁酸; 生物碱; 抗性淀粉

中图分类号: S511.01 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2012)05-0464-06

Ecological variations in yield and functional components in different genotypes of japonic rice

YANG Shu-ming^{1,2}, XIA Xiao-huan³, ZHAO Xu⁴, FANG Xiao-dong⁵, DU Juan¹,
ZENG Ya-wen^{1,2*}, PU Xiao-ying¹, YANG Tao¹, PENG Lu-bo¹

(1.Biotechnology and Genetic Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 2.Agricultural Biotechnology Key Laboratory of Yunnan Province, Kunming 650223, China; 3.School of Chemistry and Life Science, Huanggang Normal College, Huanggang, Hubei 438000, China; 4.Plant Protection and Inspect Station of Agricultural Bureau in Xundian County, Xundian, Yunnan 655200, China; 5.Agro-Technical Station of Agricultural Bureau in Xinping County, Xinping, Yunnan 653400, China)

Abstract: Field experiments were conducted in Xinping, Yuxi and Xundian to investigate the yield and functional components and their environmental variation among different rice genotypes including 14 cultivars from Yunnan. The results showed that mean rice yield, valid spike number and seed setting rate in Xundian were significantly higher than those in Xinping and Yuxi, and those in Xinping were the lowest. Spikelets per panicle in Yuxi was significantly higher than that in Xinping and Xundian, while 1 000-grain weight showed no significant difference among three eco-sites. Path analysis showed that grain yield was mainly influenced by spikelets per panicle, valid panicles and seed setting rate. The grain yield and yield components and functional elements were significantly or very significantly affected by genotype (G), environment (E) and their interaction (G×E). The yield, valid panicles, spikelets per panicle and seed setting rate were mainly regulated by environment, while grain weight mainly by genotype. The γ -aminobutyric acid (GABA) was impacted by eco-environment, while total flavonoids and alkaloids by genotype and G×E interaction, and resistant starch (RS) by genotype. The GABA and

收稿日期: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31060186); 云南省重点新产品开发项目(2010BB001); 云南省自然科学基金项目(2010CD006); 云南省技术创新人才培养项目(2011CI059)

作者简介: 杨树明(1973—), 男, 云南武定人, 研究员, 主要从事功能作物种质资源、遗传育种及其生态环境研究, yangshuming126@126.com; 夏小环与杨树明同等贡献; *通信作者, zengyw1967@126.com

alkaloids of brown rice were the highest in Xinping, and similar in Yuxi and Xundian. Total flavonoids were the highest in Yuxi, the lowest in Xundian. There was no significant difference in RS of brown rice among three eco-sites.

Key words: rice; genotype; eco-environment; flavonoids; γ -aminobutyric acid; alkaloids; resistant starch

近年来,富含总黄酮、 γ -氨基丁酸(GABA)、抗性淀粉等活性功能成分的功能型水稻品种选育及其产品开发备受国内学者关注^[1-5]。总黄酮能有效降低人体血脂、血糖,对糖尿病、心血管病等有一定的预防和辅助治疗效果^[6]; γ -氨基丁酸具有降血压、改善脑机能、促进肝、肾功能活化和乙醇代谢、改善更年期综合症等作用^[7]; 生物碱有抗病原微生物、抗炎、抗肿瘤、抗过敏、抗心律失常和增强免疫等作用^[8]; 抗性淀粉具有控制餐后血糖、降血脂、促进锌、钙、镁离子吸收等对人类健康有益的生理功能^[9-10]。

适宜的生态环境和优良的基因型是水稻高产的前提^[11],而基因型与环境互作是影响品种稳定性的根源^[12]。有研究^[13]表明,生物碱、总黄酮等植物次生代谢产物不仅受遗传基因控制,同时也受光、温度、土壤、空气以及生物等环境因素的影响。植物次生代谢能因环境温度的改变而应激性地产生变化^[14]。云南是亚洲栽培稻籼粳分化中心之一^[15],也是中国稻种最大的生态多样性中心和中国稻种

优异种质的富集中心^[16]。在长期的自然选择和人工选择下,云南稻种资源蕴藏着丰富的有利基因和高价值的功能成分^[16-17],对水稻育种具有极其重要的意义。笔者选取 3 个不同生态区作为试验点,以云南水稻核心种质作供体选育的优良功能性水稻品(系)为材料,研究功能性水稻的籽粒产量与功能成分的基因型和环境变异及其互作效应,旨在为功能性水稻的遗传改良和区域化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻材料为以品种合系 35 作轮回亲本,云南稻核心种质作供体亲本,通过回交选育(BC₄F₅)获得的粳稻品系 13 个,均由云南省农业科学院生物技术种质资源研究所选育;以云南主栽品种合系 41 为对照品种(表 1)。供试土壤均为砂壤土,3 个试验点土壤理化性质及水稻灌浆结实期温度见表 2。

表 1 供试材料

Table 1 Experimental materials

编号	品种(系)	编号	品种(系)
1	(合系 35/冷水糯)//合系 35	8	(合系 35/花糯)//合系 35
2	(合系 35/海白谷)//合系 35	9	(合系 35/冷水谷)//合系 35
3	(合系 35/大黑灰)//合系 35	10	(合系 35/元江普野)//合系 35
4	(合系 35/老来红)//合系 35	11	(合系 35/麻线谷)//合系 35
5	(合系 35/毫格捞)//合系 35	12	(合系 35/新选一号)//合系 35
6	(合系 35/毫勐混)//合系 35	13	(合系 35/芒占)//合系 35
7	(合系 35/高脚糯)//合系 35	14	合系 41 (对照)

表 2 不同生态点土壤的理化性质及结实期气温

Table 2 Physical and chemical properties of soil and corresponding air temperature at three eco-sites

地点	pH	有机质/%	全氮/%	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	灌浆结实期日均气温/°C
新平	7.10	2.8	2.1	96.50	18.15	167.89	27.4 °C(7月)和 26.7 °C(8月)
玉溪	6.25	2.3	1.8	102.31	14.32	115.13	24.3 °C(8月)和 23.1 °C(9月)
寻甸	6.82	3.4	2.5	117.64	21.43	87.46	20.4 °C(8月)和 19.7 °C(9月)

1.2 试验设计

试验于 2011 年分别在云南省新平县则黑(海拔高度为 1 100 m, 籼稻区)、玉溪农业职业技术学院试验农场(海拔高度为 1 546 m, 籼粳交错区)和寻

甸县七星农科站(海拔高度为 1 867 m, 粳稻区)进行。试验采用随机区组设计,小区面积 13.33 m²,规格为 5.60 m×2.38 m,插秧规格 20 cm×10 cm,每穴 2 苗,重复 3 次。氮、磷、钾(N、P₂O₅、K₂O)施用量分别为 120、80、80 kg/hm²。磷肥、钾肥作

基肥,移栽前1次性施入。氮肥按基肥60%、分蘖肥30%、穗肥10%分3次施入。其他管理与当地一般大田管理相同。新平点4月15日播种,6月3日移栽,7月15日至8月27日成熟;玉溪点3月18日播种,5月13日移栽,8月12日至9月7日成熟;寻甸点3月13日播种,5月8日移栽,8月25日至9月21日成熟。

1.3 测定项目与方法

成熟后,每小区取10穴代表性植株,考查穗数、穗粒数、结实率和千粒重,并去除四周边行及杂株,按实收株测定产量。每小区采集黄熟饱满、无病虫害、无穗发芽的稻谷250g,晾晒至含水量13%以下,GABA含量参照文献[18]方法测定;抗性淀粉含量采用文献[19]方法测定;总黄酮和生物碱含量按文献[20-21]方法测定。

1.4 数据处理

采用Excel 2003和SPSS 17.0进行数据处理和统计分析;采用LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同生态区各水稻品系的产量及产量构成因素

由表3可知,新平、玉溪和寻甸不同基因型水稻籽粒产量分别为2730~6105、5055~8205和

6120~8955 kg/hm²,变异系数分别为27%、14%和13%。新平和寻甸各水稻品系产量分别以品系1、8最高,玉溪以对照最高。新平点有效穗数变幅为1.83×10⁶~3.55×10⁶穗/hm²,变异系数为21%;玉溪为2.22×10⁶~4.17×10⁶穗/hm²,变异系数为20%;寻甸为2.83×10⁶~4.53×10⁶穗/hm²,变异系数为16%,其中以品系1、2、3、6、11和13的穗数在3个生态点均较高。不同品系间穗粒数在新平、玉溪差异较大,其变异系数分别为18%和13%,品系1、7和9的穗粒数在3个生态点均较高。新平、玉溪点品系间结实率差异明显,其变异系数分别为16%和17%,而3个点以品系1、9、11和13的结实率较高。千粒重在品系间差异不明显。不同生态点的水稻平均产量以寻甸的最高,为7560 kg/hm²,各生态点间差异达显著水平。从产量构成因素看,寻甸点平均有效穗数显著高于新平和玉溪,为3.71×10⁶穗/hm²;平均穗粒数以玉溪点最高,显著高于其他2个试验点;平均结实率3个生态点间差异达显著水平,但平均千粒重差异不显著。由此可看出,不同基因型水稻在3个试验点的有效穗数、穗粒数和结实率不同,是造成各生态点水稻产量差异的重要原因。

表3 不同生态条件下各水稻品(系)的产量及产量构成因素

Table 3 Variation of yield and yield components among different rice genotypes at three eco-sites

品(系) 编号	有效穗数/(×10 ⁴ ·hm ⁻²)			穗粒数			结实率/%			千粒重/g			产量/(kg·hm ⁻²)		
	新平	玉溪	寻甸	新平	玉溪	寻甸	新平	玉溪	寻甸	新平	玉溪	寻甸	新平	玉溪	寻甸
1	252	301	324	131	194	96	73.5	69.1	88.1	25.1	26.2	24.9	6105 a	6705 bc	7125 bc
2	350	417	453	147	150	103	57.9	75.5	89.6	28.3	27.2	25.9	3195 c	5505 cd	8745 a
3	352	379	384	122	138	112	64.4	80.0	76.2	24.0	28.4	27.1	3495 c	5565 cd	7455 b
4	251	273	296	120	140	110	62.2	79.8	84.0	29.0	27.8	26.5	3285 c	6000 c	8325 ab
5	183	263	301	127	149	105	56.8	60.1	78.2	25.1	23.3	25.1	2730 c	5955 c	8070 ab
6	355	403	439	72	169	108	61.5	88.1	80.9	27.2	27.7	26.4	2835 c	7005 b	8370 ab
7	311	399	421	132	175	110	46.7	63.2	65.6	25.8	26.4	25.1	4635 ab	5055 d	6345 c
8	212	234	315	127	147	108	63.2	83.2	85.3	26.2	27.2	25.9	4485 ab	6855 b	8955 a
9	210	222	283	112	193	102	72.6	77.0	77.5	26.0	24.8	23.5	4530 ab	6825 b	6120 c
10	293	330	376	97	139	109	49.3	41.0	70.4	22.9	26.6	25.3	4215 b	5580 cd	6180 c
11	327	380	421	96	132	104	73.4	78.7	80.7	27.3	26.4	25.1	3165 c	7305 b	7380 bc
12	226	309	357	118	150	96	66.0	74.2	83.6	25.1	24.1	23.8	3735 c	6105 c	7620 b
13	236	393	438	87	156	94	84.1	75.5	81.7	27.4	27.7	26.4	3255 c	5625 cd	6675 bc
14	274	349	386	106	152	106	70.7	63.4	90.3	28.0	27.1	25.8	5895 ab	8205 a	8430 ab
Mean ^Δ	274 b	332 b	371 a	114 b	156 a	104 b	64.5 c	72.1 b	80.9 a	26.2 a	26.5 a	25.5 a	3975 c	6300 b	7560 a
CV/%	21	20	16	18	13	6	16	17	9	7	6	4	27	14	13

^Δ示地点间差异。

通径分析结果(表 4)表明 新平水稻的穗粒数对其产量的影响最大,其次是结实率和千粒重,有效穗数对产量的影响较小,表明在新平提高水稻产量应以增加穗粒数为主,并兼顾提高结实率和千粒重。玉溪点则以有效穗数对产量的通径系数最大,其次是结实率,穗粒数和千粒重的通径系数较小,

表明在玉溪点限制产量的主要因素为有效穗数,其次是结实率。寻甸以结实率对产量的影响最大,其次是穗粒数,有效穗数和千粒重对产量的影响较小,表明在寻甸提高水稻产量应以提高结实率为主。在生产中针对不同生态条件,协调群体有效穗数、穗粒数和结实率是提高水稻产量的关键。

表 4 不同生态条件下各水稻品系产量构成因素对产量的通径系数

Table 4 Path coefficient of yield components to grain yield at three eco-sites

地点	产量构成因素	直接通径系数	间接通径系数			
			穗数	穗粒数	结实率	千粒重
新平	穗数	0.037 1		-0.049 3	0.075 4	-0.023 5
	穗粒数	0.312 0	0.005 9		-0.099 3	-0.145 8
	结实率	0.298 2	0.009 4	-0.103 9		-0.077 0
	千粒重	0.235 1	-0.003 7	-0.019 3	-0.097 7	
玉溪	穗数	0.255 3		-0.009 1	0.009 9	-0.002 3
	穗粒数	0.048 7	-0.047 7		-0.015 1	-0.010 9
	结实率	0.236 5	0.010 7	-0.003 1		-0.015 0
	千粒重	0.045 4	-0.126 9	-0.011 7	-0.078 0	
寻甸	穗数	0.064 0		-0.013 1	0.060 2	-0.013 6
	穗粒数	0.571 7	-0.001 5		-0.387 5	-0.016 0
	结实率	0.927 1	0.004 2	-0.238 7		-0.004 5
	千粒重	0.035 6	-0.024 5	-0.256 4	-0.116 8	

2.2 不同生态条件下各水稻品(系)糙米功能成分含量

由表 5 可知,水稻籽粒 4 种功能成分的含量在不同基因型和生态环境间均存在差异。3 个生态点不同品种间均以 γ -氨基丁酸变异系数最大,其次为生物碱和抗性淀粉,总黄酮变异系数最小。 γ -氨基

丁酸和生物碱平均含量均以新平点最高,分别为 59.2 mg/(100 g)和 11.2 mg/(100 g),玉溪和寻甸水稻的这 2 种成分含量相接近。总黄酮以玉溪点含量较高,为 81.2 mg/(100 g),寻甸较低。不同生态区抗性淀粉平均含量差异较小。

表 5 不同生态条件下各水稻品系糙米功能成分含量

Table 5 Variation of functional components among different brown rice genotypes at three eco-sites

品(系)编号	γ -氨基丁酸/(mg·(100 g) ⁻¹)			总黄酮/(mg·(100 g) ⁻¹)			生物碱/(mg·(100 g) ⁻¹)			抗性淀粉/%		
	新平	玉溪	寻甸	新平	玉溪	寻甸	新平	玉溪	寻甸	新平	玉溪	寻甸
1	44.4	12.9	16.3	100.6	56.9	68.4	7.3	12.4	11.3	1.8	2.1	2.2
2	59.7	10.9	21.2	104.5	65.8	57.5	9.6	8.6	7.7	2.7	2.5	2.4
3	41.9	11.9	17.9	95.7	87.9	52.2	17.4	9.7	9.8	2.7	2.7	2.8
4	88.6	24.0	39.3	81.8	64.8	69.1	15.1	8.1	10.5	1.7	1.8	2.0
5	63.7	41.1	17.3	92.9	88.1	79.4	6.6	12.6	9.7	1.7	1.7	1.7
6	13.3	36.5	38.9	77.2	72.7	56.5	12.6	9.4	8.2	1.5	1.2	1.4
7	66.5	28.5	18.8	56.3	84.9	56.3	6.7	10.5	12.3	2.3	2.4	2.7
8	73.9	23.3	34.0	81.3	79.5	55.7	10.7	8.2	8.5	3.2	3.2	3.4
9	76.7	21.5	11.0	71.2	80.9	66.7	19.2	7.1	6.9	1.8	1.9	2.2
10	73.9	34.0	10.4	54.1	75.7	70.3	14.9	7.9	9.7	3.4	3.6	3.2
11	87.1	34.9	14.4	66.3	109.4	59.6	6.2	11.3	17.4	2.5	2.1	2.4
12	62.0	27.7	12.4	69.8	84.2	47.6	12.3	9.6	10.4	2.7	2.4	2.3
13	46.0	24.6	30.0	80.7	80.1	74.1	6.7	13.3	7.4	1.4	1.5	1.6
14	31.1	45.7	18.7	70.7	105.3	92.0	11.7	7.3	12.6	1.5	1.8	1.7
Mean	59.2	27.0	21.5	78.8	81.2	64.7	11.2	9.7	10.2	2.2	2.2	2.3
CV/%	36.5	39.8	46.3	19.6	17.7	18.5	38.1	21.0	26.6	30.0	29.0	25.6

2.3 基因型和环境对产量及糙米功能成分的互作效应

由表6可知,水稻的产量及构成因素均受基因型、环境及其互作的影响,且环境对产量影响的方差远大于基因型和基因型环境互作的方差,表明环境对产量影响最大。对产量构成因素而言,有效穗数、穗粒数和结实率主要受环境的影响,而千粒重主要受基因型的影响。水稻糙米4种功能成分的含

量极显著受基因型、环境及其互作的影响,其中, γ -氨基丁酸的环境效应方差所占比例为55%,大于基因型及互作的方差,表明 γ -氨基丁酸受生态环境影响较大。总黄酮和生物碱基因型与环境互作效应方差占总方差的比例大于环境方差,表明两者主要受基因型及基因型与环境互作的影响。抗性淀粉基因型方差所占比例大于环境及其互作方差,表明其主要受基因型控制。

表6 不同品种产量及糙米功能成分的基因型与环境效应

性状	方差占总方差的比例/%			误差
	环境(E)	基因型(G)	E×G	
产量	394.28** (80)	4.55** (6)	3.11** (8)	0.64
穗数	447.81** (30)	134.25** (58)	7.60** (7)	2.07
穗粒数	31 610.79** (61)	827.17** (10)	828.32** (21)	97.11
结实率	2 834.04** (30)	548.37** (38)	167.34** (23)	14.94
千粒重	11.55** (7)	11.38** (46)	3.60** (29)	0.66
γ -氨基丁酸	17 455.57** (55)	538.35** (11)	750.51** (31)	18.19
总黄酮	3 339.05** (21)	452.75** (18)	659.27** (53)	35.99
生物碱	25** (4)	9.58** (10)	39.89** (80)	1.04
抗性淀粉	0.08* (1)	3.40** (92)	0.08** (4)	0.02

$F_{0.05}(E)=3.11, F_{0.01}(E)=4.88; F_{0.05}(G)=1.82, F_{0.01}(G)=2.32; F_{0.05}(G \times E)=1.60, F_{0.01}(G \times E)=1.94。$

3 结论与讨论

水稻产量除受基因型控制外,还与产量形成期日平均温度、太阳辐射和温差等生态条件以及土壤养分有关^[22],尤其在水稻冠层建成后,群体光合速率与光合持续时间决定了作物的产量^[23]。本研究中不同水稻品(系)的产量及其构成因素的环境变异程度不一样,且受基因型、环境以及基因型与环境互作的影响程度大小也不同,其中产量和穗粒数受环境的影响大于基因型;有效穗数、结实率和千粒重受基因型的影响大于环境,环境与基因型互作效应较大,这与熊洪等^[22]的研究结果相似。寻甸生态区水稻在冠层建成后的2个月平均温度分别比新平、玉溪低5.4℃和9.8℃,导致水稻生育期较长,合成的物质量大,且在灌浆期日平均温差较新平、玉溪分别高2.6℃和4.3℃,这可能是导致寻甸点产量高于其他2个试验点的原因。通径分析表明,新平点水稻产量主要受穗粒数的限制,其次是结实率和千粒重,而有效穗数对产量的影响较小;玉溪点

限制产量的主要因素是有效穗数,其次是结实率,而穗粒数和千粒重对产量的贡献较小。寻甸点产量主要受结实率限制,其次是穗粒数,而有效穗数和千粒重对产量的影响较小。在水稻生产中针对不同生态环境对优良品种选育的影响,注重协调群体有效穗数、穗粒数和结实率是选育高产品种的关键。

前人研究结果^[13,24]表明,在影响植物次生代谢产物的生态因子中,高温和增加光照以及紫外光辐射有利于生物碱和黄酮的合成。本研究结果表明,基因型与环境对糙米4种功能成分所起的作用和影响不同,其中, γ -氨基丁酸、总黄酮对环境变化的反应较生物碱、抗性淀粉明显,主要受生态环境和基因型环境互作的共同调节,这与鲁守平的研究结果^[13]一致。生物碱和抗性淀粉主要受基因型及基因型与环境互作的共同调节。本研究除对照外,其他所有供试材料均为合系35的近等基因系,保证了同一试验点生育期基本相同,且选择3个试验点的土壤理化性质及水稻整个生育期施肥量基本相近,环境的影响差异主要体现在水稻灌浆结实期日均

气温和温差不同,其中寻甸点的日平均温度低于新平和玉溪,各品系的生育期和籽粒灌浆时间较长。寻甸点的 γ -氨基丁酸、总黄酮、生物碱相对较低,由此证实日平均温度、昼夜温差和辐射等因子是影响 γ -氨基丁酸、总黄酮、生物碱含量的主要因素。而基因型对抗性淀粉的影响在总方差中占主要比例,表明可提高这个性状的稳定性和定向培育。此外,本研究中供试品系的平均产量以寻甸(粳稻区)较高,新平(籼稻区)较低,但 γ -氨基丁酸、总黄酮和生物碱则相反,说明粳稻品种的产量表现对生态环境适应性具有较强的选择性,而其功能成分的形成则不同。因此,在功能型水稻品种选育及基础研究中,应充分考虑基因型与环境互作对水稻高产稳产的影响,将遗传改良和生态环境相结合选育广适性品种,同时也应关注环境因素对提高水稻功能成分含量的作用。

常文贤、杨慧、魏明亮、李玉贤和唐俊杰参加了部分试验工作,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 杨朝柱,李春寿,舒小丽,等.富含抗性淀粉水稻突变体的淀粉特性[J].中国水稻科学,2005,19(6):516-520.
- [2] 王忠华.稻米功能性成分的生理活性及其产品开发[J].核农学报,2005,19(3):241-244.
- [3] Lee Y J, Kim B G, Chong Y, et al. Cation dependent O-methyltransferases from rice[J].Planta,2008,227(3):641-647.
- [4] 周惠明,张民平.糙米中功能性成分的研究[J].食品科技,2002(5):17-19.
- [5] 张鞍灵,高锦明,王株清.黄酮类化合物分布及开发利用[J].西北林学院学报,2000,15(1):69-74.
- [6] 孙玲,张名位,池建伟,等.黑米的抗氧化性及其与黄酮和种皮色素的关系[J].营养学报,2000,22(3):246-249.
- [7] 张晖,姚惠源,姜元荣.富含 γ -氨基丁酸保健食品的研究与开发[J].食品与发酵工业,2002,28(9):69-72.
- [8] 马养民,傅建熙.生物碱的研究概况[J].陕西林业科技,1997(1):75.
- [9] 郭春锋,李婧妍,张守文.抗性淀粉生理功能研究进展[J].食品科技,2006,8(2):1-3.
- [10] 张文青.抗性淀粉对糖尿病胰岛素抵抗的干预作用及相关机制研究[D].乌鲁木齐:新疆医科大学公共卫生学院,2006.
- [11] Saito K, Hayano-saito Y, Maruyama-funatsuki W, et al. Physical mapping and putative candidate gene identification of a quantitative trait locus *Ctb1* for cold tolerance at the booting stage of rice[J]. Theor Appl Genet, 2004, 109(3): 515-522.
- [12] Cauch H G. Model selection and validation for yield trials with interaction[J]. Biometrics, 1988, 44: 705-715.
- [13] 鲁守平,隋新霞,孙群,等.药用植物次生代谢的生物学作用及生态环境因子的影响[J].天然产物研究与开发,2006,18:1027-1032.
- [14] Kutchan T M. Ecological arsenal and developmental dispatcher, the paradigm of secondary metabolism[J]. Plant Physiology, 2001, 125: 58-60.
- [15] Zeng Y W, Shen S Q, Li Z C, et al. Ecogeographic and genetic based on morphological characters of indigenous rice (*Oryza sativa* L.) in Yunnan, China[J]. Genet Resour Crop Evol, 2003, 50(6): 566-576.
- [16] 曾亚文,李自超,申时全,等.云南地方稻种的多样性及优异种质研究[J].中国水稻科学,2001,15(3):169-174.
- [17] 曾亚文,李自超,申时全,等.云南稻核心种质糙米功能成分栽培型差异及其地带性特征[J].光谱学与光谱分析,2010,30(12):3388-3394.
- [18] Inatomi K, Slaughter J C. The role of glutamate decarboxylase and γ -aminobutyric acid in germinating barley[J]. Journal of Experimental Botany, 1971, 22: 561-571.
- [19] Goni I, Manas E, Garcia-Diz L, et al. Analysis of resistant starch: a method for food and food products[J]. Food Chemistry, 1996, 56: 445-449.
- [20] 董晓燕.生物化学实验[M].北京:化学工业出版社,2003:34-37.
- [21] Jan Gudej, Michal T. Determination of flavonoids tannins and ellagic acid in leaves from *Rubus* L. species[J]. Arch Pharm Research, 2004, 27(11): 1114-1119.
- [22] 熊洪,唐玉明,任道群,等.不同土壤类型、不同气候条件与水稻产量的关系[J].西南农业学报,2004,17(3):305-309.
- [23] 凌启鸿.作物群体质量[M].上海:上海科学技术出版社,2000:67.
- [24] 王红星,乔传英,古红梅.影响植物次生代谢产物形成的因素[J].安徽农业科学,2007,35(35):11376-11377,11405.

责任编辑:杨盛强