

赵小驰,任超,陈浩.不同种养模式下华墨香5号黑米的营养组分比较[J].华中农业大学学报,2025,44(3):17-25.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.03.003

不同种养模式下华墨香5号黑米的营养组分比较

赵小驰,任超,陈浩

华中农业大学作物遗传改良全国重点实验室/湖北洪山实验室,武汉 430070

摘要 为研究华墨香5号在不同种养模式下营养品质的差异,对水稻单作(monoculture, CK)模式以及稻-虾种植(rice-crayfish coculture, RX)、稻-鸭-虾单元格投放(rice-duck-crayfish unit release model, CRXD)、稻-鸭-虾“游牧鸭”(rice-duck-crayfish “nomadic duck” model, NRXD)、稻-鸭-虾大田块(rice-duck-crayfish large field block model, BRXD)等综合种养模式下水稻的主要营养组分、矿质元素和维生素、花青素等生物活性物质含量进行测定,通过比较分析,探究不同种养模式对华墨香各类营养组分的影响。结果显示,华墨香5号全谷黑米的营养组分较为丰富,营养价值显著优于其加工后的精米;综合比较得出,不同种养模式各具特色,单作模式在维持主要营养组分稳定性方面表现较优;而综合种养模式提升了稻米的食味品质和某些营养组分的含量;相较于水稻单作,综合种养模式显著降低了蛋白质含量9.17%~13.82%($P<0.05$),同时显著提高了脂肪酸含量2.71%~5.30%($P<0.05$),有利于其食味品质的改善。此外,综合种养模式的全谷黑米还明显提高了B族维生素(B₁ 15.23%~60.58%、B₂ 1.13%~16.66%、B₃ 27.28%~49.74%、B₆ 1.75%~18.21%、B₉ 20.17%~48.17%)、谷维素(3.41%~7.27%)、γ-氨基丁酸(9.91%~39.87%)以及大部分可溶性酚酸(比如香草酸29.77%~48.88%、原儿茶酸17.58%~41.54%、阿魏酸6.07%~16.04%、对香豆酸14.58%~33.65%、丁香酸21.52%~27.67%)含量,有利于提升稻米的营养价值。因此,综合种养模式能够提高稻米的食味品质,但降低了部分营养组分如维生素E、花青素、类胡萝卜素等的含量,但是下降的绝对值较小。

关键词 稻-鸭-虾种养模式; 稻田综合种养; 稻米营养组分; 黑米

中图分类号 S511; S966.12 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)03-0017-09

随着生活水平的不断提高,消费者健康意识逐渐增强,对主要粮食作物营养品质有了新的要求^[1]。华墨香5号黑米是华中农业大学自主选育的黑米新品系,与传统黑米相比,兼具感官评价优良、营养价值丰富的特点(<https://news.hzau.edu.cn/info/1007/13007.htm>)。然而黑米营养品质的评价指标和评价体系尚未完善,在一定程度上限制了黑米产业的健康发展和消费者对其营养价值的全面认知。

分析黑米的理化性质可以准确了解黑米中蛋白质、淀粉、脂肪酸、灰分、矿质元素、维生素以及生物活性物质等营养成分的含量及比例,为消费者提供科学、准确的营养信息;还可以使消费明确认识黑米的营养价值和保健价值^[2-3],提高消费者对黑米的认知度和接受度,这有助于促进黑米的市场推广和普及,让更多人享受到黑米带来的健康功效。

张启发院士在2023第一届现代农业国际论坛上倡议“主食全谷化”,并提及黑米作为全谷物的代表之一,发挥多种健康效应,如:黑米含有丰富的有益的生物活性物质,如花青素、酚类化合物、谷维素等,这些活性成分是黑米具有抗氧化、抗衰老等生理功能的关键^[4-7]。同时黑米含有丰富的膳食纤维^[8],有助于润肠通便、减轻身体负担;黑米中大量的不饱和脂肪酸^[9],有助于保持血管的弹性和健康,降低高血压的风险;长期食用黑米还能够对心脑血管等慢性病具有良好的预防作用^[10]。但是由于黑米相较于白米熟制后黏稠性低,煮制时间较长、口感欠佳,体质弱的人会增加肠胃消化的负担,且黑米的种植技术及相对成本较高,人们未能充分认识其真正价值,这是黑米未能大规模推广的普遍问题。

本研究选用的华墨香5号黑米食味优良,属于米

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 湖北洪山实验室重大项目(2021HSZD002)

赵小驰, E-mail: xc-zhao@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 陈浩, E-mail: hchen@mail.hzau.edu.cn

饭型全谷黑米,营养价值高。稻-鸭-虾种养模式是一种符合新发展理念、经济附加值高的种植模式。该模式不仅能够提高农业经济效益,也能为农业的绿色可持续发展提供巨大的潜力与机遇。本研究通过分析不同种养模式下黑米营养成分的相对含量差异及稻米品质,比较不同种养模式的优缺点,旨在为优化种养模式,帮助人们更好了解华墨香5号黑米的营养价值和健康功效,为黑米的合理利用和开发提供科学依据并为探讨其他谷物类食品的营养价值和健康功效提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设置

试验水稻品种为华墨香5号,供试虾为克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*),在湖北省监利市开展大田试验,设水稻单作模式(对照组,CK)、稻-虾种植(rice-crayfish coculture, RX)、稻-鸭-虾单元格投放(rice-duck-crayfish unit release model, CRXD)、稻-鸭-虾“游牧鸭”(rice-duck-crayfish “nomadic duck” model, NRXD)、稻-鸭-虾大田块(rice-duck-crayfish large field block model, BRXD)共5种种养模式,每种模式设置3个重复,成熟后收获种子于-20℃保存。

种养模式参照文献[11]。CK:传统种植模式,种植密度16 cm×30 cm,每穴4株。基追比(基础施肥量与追肥量的比例)为7:3,即水稻移栽前按照N 150 kg/hm²施用基肥66.5 kg,分别于2022年6月30日和7月16日追施尿素12.4、6.2 kg。灌溉方式为当地传统淹灌,除了晒田和收获期田间自然晒干且不灌水外,其余时期田面水保持10 cm。RX:小区周围开挖围沟,于3月投放虾苗40 kg,精准投放饲料150 kg左右,4月中旬开始捕捞成虾,6月捕捞完毕,而未成熟的幼虾随水迁移至虾沟中,待整田、插秧、晒田控藻及复水后再次进入稻田活动。为了防止克氏原螯虾逃跑,将各小区边缘用尼龙网在田内围起0.4 m的防逃网。种植密度14 cm×30 cm,每穴4株。水稻移栽前不施用基肥,移栽后于2022年6月30日和7月16日分别按照N 45 kg/hm²和22.5 kg/hm²施用尿素,整个生育期内不施用农药。CRXD:采用单元模式,每单元开挖围沟,稻田四周设尼龙网围栏;各田块设独立的鸭棚,供鸭休息与喂食,避免饲料污染土壤和水体;饲料以稻田自然饲料为主,酌情喂食稻谷粒;单元设置独立进出水口,保持水环境一致且独立;水稻移栽后14 d,以180只/hm²密度放入室内培

育20 d的雏鸭;保持适当水层,不排浑水,适时补水,合理保持水层高度至抽穗期后排水搁田。其余田间管理与RX一致,直至抽穗后赶出鸭排水搁田。NRXD:水稻插秧后10 d,放入室内培育20 d的雏鸭,密度80只/hm²,实施“鸭-稻”共作;鸭棚位于相邻田间并设通道,通过人工赶鸭来控制其活动区域。其余田间管理与CRXD一致。BRXD:3月放虾,6月前收获。6月30日按180只/hm²密度放鸭于1.65 hm²稻田,设300只容量大鸭棚,鸭自由活动。其余田间管理与CRXD一致。

1.2 黑米营养成分的测定分析方法

收获的稻谷通过砻谷和打磨,分为全谷黑米和精米2种材料。其中全谷黑米是指除了稻米外壳之外都保留的全谷粒,试验中用砻谷机去壳;而精米则是在除去外壳后通过精米机将全谷黑米除去种皮、果皮、胚和糊粉层等米糠层部分后所剩的部分,使用小型精米机打磨90 s而得。其中,测定维生素、次生代谢物时需要提前1~2 d进行样品加工,分别取5 g全谷黑米、精米置于全自动组织研磨仪中研磨(55 Hz, 70 s),降低样品因长时间而造成营养组分的流失,将研磨好的米粉过孔径0.425 mm筛,然后加提取液,进行代谢物的提取。测定方法参考食品国家标准以及相关文献(表1)。

表1 营养组分测定方法

Table 1 Methods for determining nutrient components

营养组分 Nutrient components	参考方法 Methods for determination
水分 Moisture	近红外分析仪测定 Measured by near-infrared analyzer
淀粉 Total starch	GB/T 20194—2018
蛋白质 Total protein	GB/T 6432—2018
油/脂肪酸 Oil/Fatty acid	GB/T 5009.168—2016
灰分 Ash	GB 5009.4—2016
膳食纤维 Dietary fiber	[8]
矿质元素 Mineral elements	[12]
花青素 Anthocyanin	[13]
类胡萝卜素 Carotenoid	[14]
谷维素 γ-Oryzanol	[15]
B族维生素 B vitamins	[16]
维生素E Vitamin E	[17]
酚酸 Phenolic acids	[18]
γ-氨基丁酸 γ-Aminobutyric acid	[19-20]

1.3 数据处理与分析

使用IBM SPSS Statistics 27及Office 2016软件进行数据处理与分析:同一稻谷加工程度下(全谷黑

米/精米),不同处理间采用Duncan's法分析。使用GraphPad Prism 8.0.2软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同种养模式下主要营养组分的差异

谷物中主要营养成分包括水分、淀粉、蛋白质、

膳食纤维、油脂、灰分,从稻米加工程度来看,全谷黑米在蛋白质、膳食纤维、油脂、灰分这些营养组分含量上明显高于精米;在淀粉含量、可消化碳水方面低于精米(表2)。食用全谷黑米能够补充更多的蛋白质、膳食纤维、油脂,更符合人们现阶段的饮食结构。

表2 华墨香5号主要营养组分含量

Table 2 Main nutrient components of Huamoxiang 5

Rice type	Nutrient components	CK	CRXD	NRXD	BRXD	g/100 g
全谷 Whole grain	水分 Moisture	15.43±0.33a	14.13±0.32b	14.41±0.61b	14.30±0.07b	14.22±0.25b
	淀粉 Total starch	71.90±1.93a	69.37±1.38b	68.26±1.19b	69.54±0.59b	73.35±0.23a
	蛋白质 Total protein	10.63±0.04a	9.16±0.44b	9.63±0.12b	9.61±0.05b	9.65±1.02b
	总膳食纤维 Dietary fiber	10.16±0.57a	9.76±0.21ab	8.84±0.40b	9.94±0.24a	9.25±0.78ab
	油脂 Oil	3.92±0.07b	4.13±0.07a	4.11±0.07a	4.09±0.05a	4.03±0.03a
	灰分 Ash	1.58±0.04ab	1.60±0.11ab	1.50±0.01b	1.66±0.11ab	1.70±0.14a
精米 Polished rice	可消化碳水 Carbohydrates	73.71±0.67b	75.36±0.34ab	75.92±0.48a	74.70±0.19ab	75.37±1.80ab
	水分 Moisture	14.92±0.29a	13.64±0.15b	14.09±0.65b	14.13±0.07b	13.79±0.25b
	淀粉 Total starch	79.16±2.68a	81.41±2.52a	83.67±6.82a	80.10±5.15a	78.55±2.48a
	蛋白质 Total protein	8.69±0.18a	7.09±0.56b	7.63±0.27ab	7.62±0.02ab	7.82±1.17ab
	总膳食纤维 Dietary fiber	3.14±0.15a	2.74±0.10a	3.01±0.14a	2.86±0.28a	2.93±0.36a
	油脂 Oil	0.64±0.01bc	0.62±0.03c	0.67±0.01ab	0.69±0.01a	0.68±0.02a
	灰分 Ash	0.21±0.02a	0.18±0.03a	0.20±0.02a	0.22±0.01a	0.22±0.02a
	可消化碳水 Carbohydrates	87.32±0.08b	89.37±0.46a	88.49±0.37ab	88.60±0.28ab	88.36±1.50ab

注:采用Duncan's multiple range test 进行多重比较,表中标注的不同字母表示不同模式间存在显著差异($P<0.05, n=3$)。下同。Numeric values followed by different letters are significantly different between different farming models ($P<0.05, n=3$) as determined by Duncan's multiple range test. The same as below.

1)全谷黑米主要营养组分。CRXD、NRXD、BRXD种养模式下稻米的淀粉含量显著低于CK和RX($P<0.05$),相较于CK分别降低了3.52%、5.06%、3.28%,RX比CK提高了2.02%;总体表现为RX>CK>BRXD>CRXD>NRXD。CRXD、NRXD、BRXD、RX种养模式下蛋白质含量均显著低于CK($P<0.05$),相较于CK分别降低了13.82%、9.39%、9.54%、9.17%,总体表现为CK>RX>NRXD>BRXD>CRXD。不同种养模式下的膳食纤维含量均较CK有不同程度的降低,总体表现为CK>BRXD>CRXD>RX>NRXD,其中NRXD显著低于CK($P<0.05$),降低了12.99%。CRXD、NRXD、BRXD、RX模式下的油脂含量均显著高于CK($P<0.05$),相较于CK分别提高了5.30%、4.82%、4.33%、2.71%,总体表现为CRXD>NRXD>BRXD>RX>CK。灰分含量除NRXD模式显著低于RX外(降低了7.06%),其他种养模式无显著差异,总体表现为RX>BRXD>CRXD>CK>NRXD。可消化碳水相较于

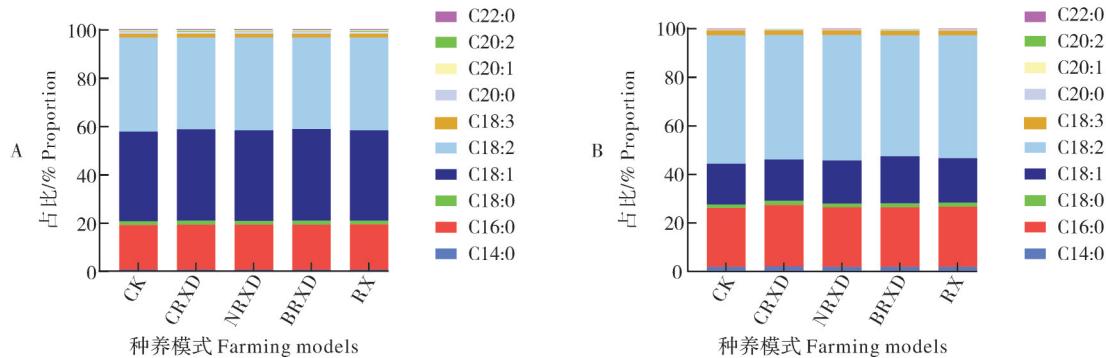
CK均有所提升,分别提升了2.24%、3.01%、1.35%、2.26%,其中NRXD显著高于CK($P<0.05$)。

2)精米主要营养组分。不同种养模式下的淀粉含量无显著差异($P>0.05$),总体表现为NRXD>CRXD>BRXD>CK>RX。蛋白质含量总体表现为CK>RX>NRXD>BRXD>CRXD, CRXD、NRXD、BRXD、RX的蛋白质含量均低于CK,相较于CK分别降低了18.29%、12.23%、12.29%、10.09%,其中CRXD的蛋白质含量显著低于CK($P<0.05$)。不同种养模式下的总膳食纤维含量无显著差异($P>0.05$),总体表现为CK>NRXD>RX>BRXD>CRXD,其中CRXD相较于CK降低幅度最大,低了12.69%。不同种养模式下的油脂含量存在显著差异($P<0.05$),除CRXD相较于CK降低了3.43%外,其他种养模式均显著高于CK,总体表现为BRXD>RX>NRXD>CK>CRXD,其中BRXD提高幅度最大,提高7.97%。不同种养模式下的灰分含量无显著差异($P>0.05$),总体表现为BRXD>RX>CK>

NRXD>CRXD。各种养模式下的可消化碳水含量相较于CK均有所提高,分别提高了2.35%、1.33%、1.46%、1.18%,其中CRXD显著高于CK($P<0.05$)。

3)脂肪酸组分占比。由图1可见,全谷黑米和精

米之间存在较大差异,相较于精米,全谷黑米中含有较高的不饱和脂肪酸。同时全谷黑米中油酸(C18:1)和亚油酸(C18:2)比例更加接近1:1,更符合国际卫生组织推荐的健康食用油配比。不同种养模式下的稻米,脂肪酸组分占比波动不大。



C14:0:肉豆蔻酸 Myristic acid; C16:0:棕榈酸 Palmitic acid; C18:0:硬脂酸 Stearic acid; C18:1:油酸 Oleic acid; C18:2:亚油酸 Linoleic acid; C18:3:亚麻酸 Linolenic acid; C20:0:花生酸 Arachidic acid; C20:1:花生一烯酸 Eicosenoic acid; C20:2:花生二烯酸 Eicosadienoic acid; C22:0:山嵛酸 Behenic acid.

图1 全谷(A)与精米(B)脂肪酸组分占比

Fig. 1 Proportion of fatty acid

2.2 不同种养模式下矿质元素的差异

对稻米的常量矿质元素(钙、磷、钾、钠、镁)、微量元素(铬、锰、铁、铜、锌、硒、钼)和重金属元素(镉、砷、铅)进行定量分析,结果显示,全谷黑米常量矿质元素含量均高于精米(表3)。

对于全谷黑米,不同种养模式下稻米Na、P、Ca元素含量存在显著差异($P<0.05$),CRXD模式下Na元素含量较CK显著降低(25.67%);其他种养模式均较CK要高,其中BRXD提高幅度最大,提高了96.72%;总体表现为:BRXD>NRXD>RX>CK>

CRXD。不同种养模式P元素含量总体表现为CK>RX>CRXD>BRXD>NRXD,其中NRXD比CK降低20.42%。Ca与P相同,总体表现为CK>RX>BRXD>CRXD>NRXD,其中NRXD比CK降低13.39%。Mg、K无显著差异。

对于精米,不同种养模式下除了BRXD模式Na元素含量高于CK外,其余常量矿质元素均低于CK,其中CRXD降低幅度最大,分别为Mg(40.11%)、P(34.46%)、K(16.07%),NRXD种养模式下Ca元素降低幅度最大,较CK降低了19.75%。

表3 华墨香5号常量矿质元素含量

Table 3 Analysis of macromineral elements in Huamoxiang 5 mg/100 g

稻米类型 Rice type	种养模式 Farming models	Na	Mg	P	K	Ca
全谷 Whole grain	CK	1.00±0.05c	115.52±2.67a	284.46±9.07a	315.65±23.60a	12.57±0.30a
	CRXD	0.74±0.11d	105.02±10.75a	256.81±19.19abc	288.44±34.19a	10.98±0.35c
	NRXD	1.58±0.13b	100.92±8.46a	226.37±16.93c	310.11±8.86a	10.89±0.28c
	BRXD	1.97±0.11a	106.37±8.55a	252.46±19.14bc	327.38±23.51a	11.05±0.15c
精米 Polished rice	CK	1.03±0.03c	111.52±2.44a	267.96±14.41ab	310.97±11.11a	11.79±0.52b
	CRXD	0.78±0.07a	8.32±1.30a	31.22±3.85a	83.76±6.96a	3.59±0.31a
	NRXD	0.65±0.03b	4.98±0.96b	20.46±2.31b	70.30±1.23b	2.99±0.18b
	BRXD	0.71±0.08a	7.38±1.04a	25.51±2.59b	80.37±6.66a	2.88±0.19b
	RX	0.80±0.07a	7.89±0.30a	25.19±1.11b	82.63±0.95a	3.22±0.07ab

微量矿质元素测定结果(表4)显示,全谷黑米Mn、Fe、Cu、Mo元素含量都高于精米,因此食用全谷

黑米能够补充更多的微量元素。对于全谷黑米,不同种养模式的Cr含量都低于CK,组间差异不显著

($P>0.05$) ,其中 NRXD 较 CK 降低了 27.74%;除 CRXD 模式 Mn 含量略低于 CK 外,其他种养模式均高于 CK,其中 RX 提高幅度最大,提高了 15.10%;NRXD 模式 Cu 元素含量较 CK 提高幅度最大,提高了 13.48%;BRXD 模式 Fe、Zn 元素含量较 CK 分别提高了 14.46%、9.99%;CRXD 模式 Se 和 Mo 元素含

量较 CK 分别提高了 41.74%、11.06%。对于精米,不同种养模式的 Cr 含量都低于 CK,其中 CRXD 较 CK 降低了 39.76%;BRXD 模式 Fe、Cu、Zn、Mo 元素含量较 CK 分别提高了 335.27%、10.26%、5.44%、13.32%;NRXD 模式 Se 元素含量较 CK 提高了 21.72%。

表 4 华墨香5号微量元素分析

Table 4 Analysis of micromineral elements in Huamoxiang 5

μg/100 g

稻米类型 Rice type	种养模式 Farming models	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Se	Mo
全谷 Whole grain	CK	9.26±3.16a	2219.21±91.17a	1037.21±189.92a	228.22±28.31a	1855.83±64.75a	20.35±2.43ab	57.06±1.76ab
	CRXD	7.63±0.84a	2179.46±60.66a	875.03±140.22a	202.88±47.12a	1606.32±150.82b	28.84±7.72a	63.37±12.94a
	NRXD	6.69±2.19a	2322.07±94.03a	1039.43±128.89a	259.00±8.96a	1618.99±94.73b	18.69±5.98b	48.74±6.30b
	BRXD	7.63±1.85a	2266.96±267.41a	1187.15±239.67a	254.39±17.14a	2041.20±60.34a	16.80±1.16b	59.02±1.29ab
精米 Polished rice	RX	7.76±3.24a	2554.29±430.81a	997.16±261.79a	241.25±41.26a	1882.09±138.71a	23.52±2.43ab	56.17±4.95ab
	CK	14.67±0.44a	473.57±22.61a	87.56±6.83b	153.96±18.26a	1192.70±51.12a	17.68±3.70a	34.25±2.95a
	CRXD	8.84±5.18b	440.60±40.47a	189.87±78.65ab	124.06±39.61a	1089.00±60.51a	17.14±3.90a	34.38±1.72a
	NRXD	10.05±2.34ab	468.75±34.24a	123.64±57.42b	157.60±13.11a	1132.68±23.62a	21.52±3.60a	30.14±10.95a
精米 Polished rice	BRXD	10.47±2.22ab	446.72±16.46a	381.12±88.23a	169.76±4.60a	1257.60±93.76a	19.68±0.98a	38.82±2.13a
	RX	9.33±1.22ab	496.98±25.93a	135.46±195.02b	149.12±36.76a	1194.41±252.52a	19.48±6.66a	32.24±0.68a

综合种养模式下全谷黑米中的 As 含量都较 CK 要低,其中 NRXD 模式显著低于 CK($P<0.05$),降低了 39.66%;Cd 含量都较 CK 要高,其中 CRXD 模式提高了 148.76%。CRXD 模式的 Pb 元素含量较 CK 降低了 69.86%。精米中,RX 模式的 As 元素含量

较 CK 降低降低了 19.16%,综合种养模式下 Cd 元素含量都较 CK 有所提高,其中 CRXD 模式提高了 148.35%,Pb 元素都较 CK 有所降低,其中 CRXD 模式显著降低了 65.22%($P<0.05$)。

表 5 华墨香5号重金属矿质元素含量

Table 5 Analysis of heavy metal mineral elements in Huamoxiang 5

μg/100 g

稻米类型 Rice type	种养模式 Farming models	As	Cd	Pb
全谷 Whole grain	CK	16.25±0.76a	0.65±0.09a	8.55±1.65a
	CRXD	15.36±2.22ab	1.62±1.02ab	2.58±0.87b
	NRXD	9.81±0.66c	2.46±0.50a	7.91±1.09a
	BRXD	15.04±0.78ab	2.23±0.12a	9.30±0.90a
精米 Polished rice	RX	13.44±1.50b	2.06±1.14a	7.96±3.33a
	CK	4.97±0.53b	0.52±0.07b	4.27±1.60a
	CRXD	4.98±0.57b	1.29±0.79b	1.49±0.11c
	NRXD	4.15±0.96b	1.47±0.51ab	2.31±0.63bc
精米 Polished rice	BRXD	6.53±0.60a	2.46±0.03a	2.11±0.13bc
	RX	4.02±0.50b	1.60±0.82ab	3.07±0.53ab

2.3 不同种养模式下维生素含量的差异

全谷稻米富含水溶性的 B 族维生素,全谷黑米中的维生素含量均远高于精米(表 6),因此,食用全谷黑米能够补充更多的维生素。

对于全谷黑米,不同种养模式下 B 族维生素含量均较 CK 要高,其中 CRXD 模式下的 VB₁、VB₉ 分别较 CK 提高了 60.58%、48.17%;NRXD 模式下的 VB₆ 较

CK 提高了 18.21%;BRXD 模式的 VB₃ 含量较 CK 提高了 49.74%;RX 模式的 VB₂ 较 CK 提高了 12.66%。CRXD、NRXD、BRXD 和 RX 的 VE 均较 CK 要低,分别降低 33.89%、13.18%、29.16%、13.99%。

对于精米,综合种养模式下 VB₁、VB₂、VB₃、VB₆ 含量都较 CK 有所降低,其中 NRXD 的 VB₁ 降低幅度最大,达 56.36%;BRXD 模式下 VB₂、VB₃、VB₆ 降低

幅度最大,分别降低了24.26%、22.93%、46.39%;CRXD的VB₉提高幅度最大,达17.05%。与全谷黑米一样,CRXD、NRXD、BRXD和RX的VE均较CK要低,分别低11.74%、4.36%、37.82%、55.98%。

表6 华墨香5号维生素含量分析

Table 6 Analysis of vitamin content in Huamoxiang 5

稻米类型 Rice type	种养模式 Farming models	水溶性维生素 Water soluble vitamin					脂溶性维生素 Lipid-soluble vitamin VE	μg/100 g		
		VB ₁	VB ₂	VB ₃	VB ₆	VB ₉				
全谷 Whole grain	CK	241.90±49.41d	117.21±14.36a	269.36±30.65b	44.11±5.16a	0.32±0.02c	637.69±191.56a			
	CRXD	388.45±36.05a	118.54±12.34a	342.84±45.72ab	45.41±5.41a	0.48±0.02a	421.59±74.36a			
	NRXD	350.97±16.96ab	122.71±11.08a	353.94±15.82a	52.14±2.19a	0.39±0.04bc	553.63±163.65a			
	BRXD	278.75±12.61cd	128.62±1.81a	403.35±14.93a	44.88±3.06a	0.47±0.02a	451.71±85.85a			
	RX	306.97±22.29bc	136.74±3.56a	390.97±75.90a	45.09±7.86a	0.41±0.06ab	548.46±74.65a			
精米 Polished rice	CK	13.64±1.20a	55.64±6.06a	163.93±15.48a	21.89±1.54a	0.14±0.02a	19.76±8.39a			
	CRXD	9.06±0.95b	52.93±2.43a	140.39±13.36ab	18.20±2.99a	0.17±0.02a	17.44±0.57a			
	NRXD	5.95±1.85c	50.50±4.08a	133.15±17.51b	12.90±0.47b	0.14±0.04a	18.90±10.40a			
	BRXD	6.26±0.14c	42.14±4.14b	126.34±3.95b	11.74±0.72b	0.16±0.03a	12.29±4.09a			
	RX	10.38±0.93b	48.12±3.36ab	148.40±19.27ab	22.13±3.64a	0.15±0.03a	8.70±9.03a			

2.4 不同种养模式下次级代谢物的差异

植物次生代谢物是在长期进化过程中植物与生物和非生物因素相互作用的结果,在水稻中生物碱、甾类化合物、酚类、芥子油和氰类物质是几种重要的次生代谢物,其中花青素、类胡萝卜素和可溶性酚酸是黑米中特有的次生代谢物。本研究除测定特有次生代谢物外还测定了谷维素、γ-氨基丁酸以及不可溶酚酸。从测定结果来看,这些次生代谢物主要存在于全谷黑米中,精米中基本没有这些次生代谢物(图2)。

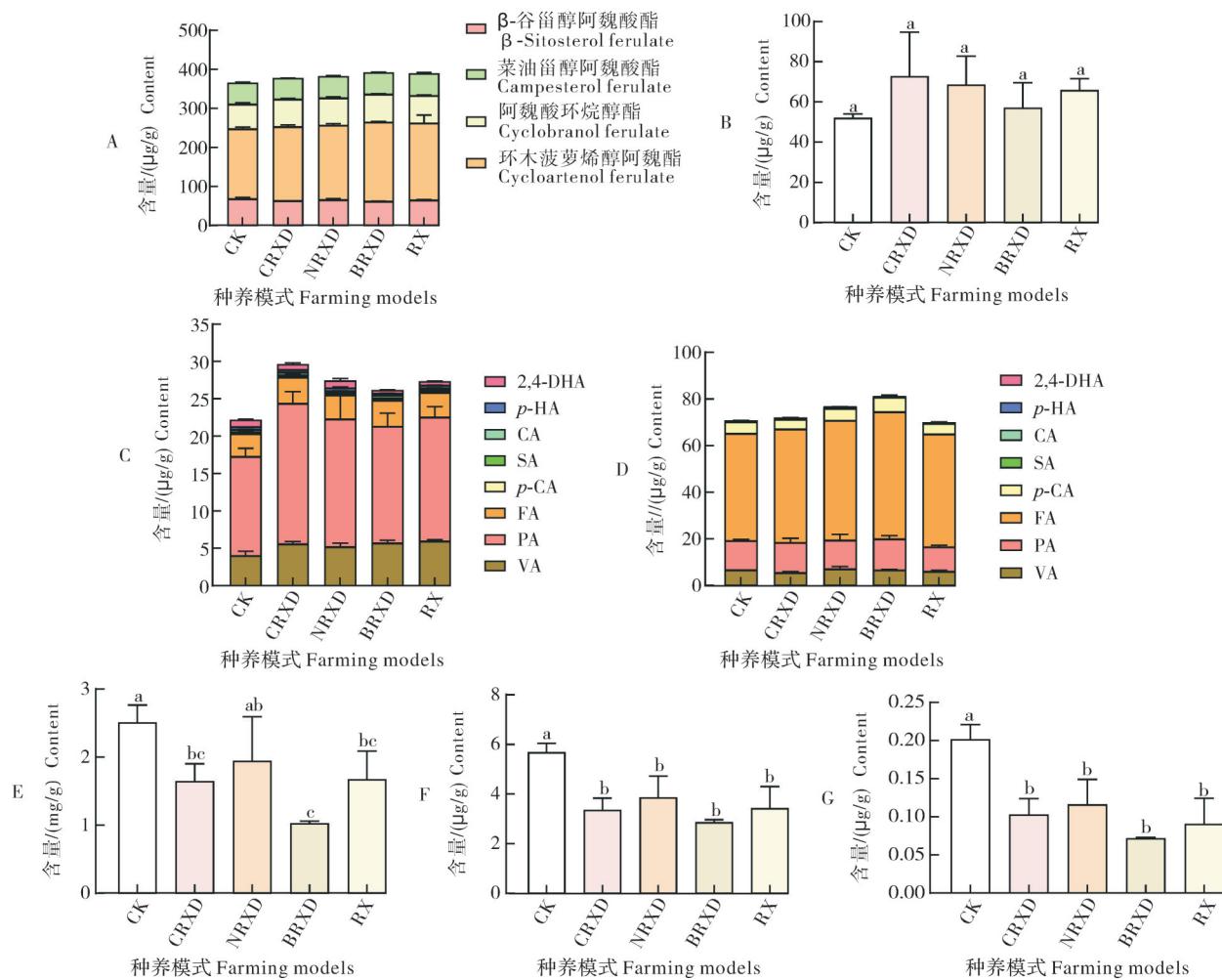
不同种养模式下稻米的谷维素、γ-氨基丁酸含量均较CK有不同程度的提高,种养模式间无显著差异($P>0.05$),CRXD、NRXD、BRXD和RX的谷维素含量分别较CK提高了3.41%、4.61%、7.27%、6.62%(图2A);γ-氨基丁酸分别较CK提高了39.87%、31.81%、9.91%、26.67%;种养模式间VA、PA、*p*-CA、SA、2,4-DHA存在显著差异($P<0.05$);其中VA、PA、*p*-CA、SA含量均显著高于CK;RX模式的VA、SA含量分别较CK提高了48.88%、27.67%(图2B);与CK相比较,CRXD模式的PA、*p*-CA含量提高幅度最大,分别提高了41.54%、33.65%;BRXD的2,4-DHA含量较CK降低幅度最大,降低了52.78%(图2C)。各种养模式的FA、CA、*p*-HA含量差异不显著($P>0.05$)。各种养模式的不可溶性酚酸与可溶性酚酸趋势一致。各种养模式的VA、FA、*p*-CA、SA含量有显著差异($P<0.05$),均较CK有显著性提高,其中VA、FA、*p*-CA、SA含量分别较CK提高5.95%、20.22%、32.24%、43.29%;各

种养模式的PA、CA、*p*-HA、2,4-DHA含量差异不显著($P>0.05$)(图2D)。

各种养模式的花青素含量均较CK有所降低,CRXD、NRXD、BRXD和RX分别较CK低34.40%、22.39%、59.01%、33.28%(图2E);叶黄素与花青素含量呈现出高度的相关性,CRXD、NRXD、BRXD和RX模式下的叶黄素含量分别较CK降低了40.92%、32.06%、49.59%、39.65%(图2F),β-胡萝卜素分别较CK降低了49.06%、42.39%、64.36%、55.09%(图2G)。

3 讨 论

本研究比较分析了不同种养模式下全谷黑米品种华墨香5号的营养组分含量。除淀粉外,全谷黑米的其他营养成分含量均高于精米,这与前人的研究结果一致^[21]。适量降低稻米中蛋白质含量、提高脂质的含量,可以明显改善米饭的食味品质^[22]。因此,稻-鸭-虾种养模式下的华墨香5号稻米在烹饪后更加美味可口,可满足人们对高品质稻米的需求。稻-鸭-虾种养模式相较于水稻单作模式能够降低全谷黑米中淀粉、蛋白质的含量,显著提高了脂肪酸含量,在一定程度上改善了稻米的食味品质。造成这种差异的因素有很多,可能与该模式下水稻的生长环境和养分供应有关,这种生态种养模式可能改变了土壤中的氮、磷、钾等养分的供应和转化,间接影响了稻米中淀粉、蛋白和脂肪酸的含量;同时更完善的生态系统可以促进水稻的健康生长,可能影响其内部代谢和物质合成,进而影响稻米中淀粉、蛋白



A. 谷维素 Oryzanol; B:γ-氨基丁酸 γ-Aminobutyric acid; C:可溶性酚酸 Soluble phenolic acids; D:不可溶性酚酸 Insoluble phenolic acids; E:花青素 Anthocyanidin; F:叶黄素 Lutein; G:β-胡萝卜素 β-Carotene. VA:香草酸 Vanillic acid; PA:原儿茶酸 Protocatechuic acid; FA:阿魏酸 Ferulic acid; p-CA:对香豆酸, p-Coumaric acid; SA:丁香酸 Syringic acid; CA:咖啡酸 Caffeic acid; p-HA:对羟基苯甲酸 p-Hydroxybenzoic acid; 2,4-DHA:2,4-二羟基苯甲酸 2,4-Dihydroxybenzoic acid。

图2 华墨香5号活性成分含量

Fig. 2 Content of bioactive compounds in Huamoxiang 5

质、脂肪酸的含量。

稻-鸭-虾种养模式中,虾、鸭的活动疏松了土壤,增加土壤的通气性,有利于土壤中微生物的繁殖和活动。这些微生物在分解有机物质的过程中,会释放出营养物质,从而提高土壤的肥力。同时,稻-鸭-虾种养模式也增加了农田的生物多样性,使得更多的生物参与农田生态系统的养分循环,促进养分在不同生物体之间的传递和转化,利于水稻对营养物质的吸收和利用。并且这种模式能够提高农田的保水能力和土壤湿度,有利于水稻根系的生长和发育,进而促进水稻对营养物质的吸收和利用。BRXD相较于CK, Fe、Cu、Zn元素含量分别提高了14.46%、11.47%、9.99%;CRXD相较于CK, Se元素含量提高

了41.74%等。同时,稻-鸭-虾种养模式还降低了重金属元素As、Pb的含量,其中NRXD模式As的含量降低幅度最大,达39.66%;CRXD模式Pb的含量降低幅度最大,达69.86%。此外,稻-鸭-虾种养模式下全谷黑米中VB₁、VB₂、VB₃、VB₆、VB₉的含量均较CK有所提高。因此,稻-鸭-虾种养模式生产的黑米可以提供更多微量元素并降低重金属的积累。

此外,不同种养模式下全谷黑米中的次生代谢物如酚酸,花青素、叶黄素、β-胡萝卜素、γ-氨基丁酸和谷维素存在一定差异。本研究中稻-鸭-虾种养模式下可溶性酚酸VA、PA、p-CA、SA含量均显著高于CK($P<0.05$)。虽然,不同种养模式下全谷黑米的谷维素、γ-氨基丁酸含量组间无显著性差异

($P>0.05$),但是不同稻-鸭-虾种养模式均较CK有不同程度的提高,其中BRXD模式谷维素含量提高了7.27%,幅度最大;CRXD模式的 γ -氨基丁酸含量提高幅度最大,达39.87%。

综上,稻-鸭-虾种养模式能够提高稻米的食味品质,全谷中具有显著更高的脂肪酸含量($P<0.05$)以及高的B族维生素、谷维素、 γ -氨基丁酸、微量矿质元素和可溶性酚酸的含量;但是蛋白质、淀粉、维生素E、花青素、类胡萝卜素等营养组分的含量有所下降。

参考文献 References

- [1] MAHAJAN P, BERA M B, PANESAR P S, et al. Millet starch: a review [J]. International journal of biological macromolecules, 2021, 180: 61-79.
- [2] 张启发.保障粮食安全,促进营养健康:黑米主食化未来可期 [J].华中农业大学学报,2021,40(3):1-2. ZHANG Q F. Ensuring food security and promoting nutrition and health: making black rice staple food for the future [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40 (3) : 1-2 (in Chinese with English abstract).
- [3] 熊艳珍,黄紫萱,马慧琴,等.黑米的营养功能及综合利用研究进展[J].食品工业科技,2021,42(7):408-415. XIONG Y Z, HUANG Z X, MA H Q, et al. Advances on nutritional functions and comprehensive utilization of black (pericarp) rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Science and technology of food industry, 2021, 42(7): 408-415 (in Chinese with English abstract).
- [4] SOMPONG R, SIEBENHANDL-EHN S, LINSBERGER-MARTIN G, et al. Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka [J]. Food chemistry, 2011, 124(1): 132-140.
- [5] DENG G F, XU X R, ZHANG Y, et al. Phenolic compounds and bioactivities of pigmented rice [J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2013, 53(3): 296-306.
- [6] TANG Y Y, CAI W X, XU B J. From rice bag to table: fate of phenolic chemical compositions and antioxidant activities in waxy and non-waxy black rice during home cooking [J]. Food chemistry, 2016, 191: 81-90.
- [7] MAU J L, LEE C C, CHEN Y P, et al. Physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of chiffon cake prepared with black rice as replacement for wheat flour [J]. LWT, 2017, 75: 434-439.
- [8] REBEIRA S P, PRASANTHA B D R, JAYATILAKE D V, et al. A comparative study of dietary fiber content, *in vitro* starch digestibility and cooking quality characteristics of pigmented and non-pigmented traditional and improved rice (*Oryza sativa* L.) [J/OL]. Food research international, 2022, 157: 111389 [2024-09-10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111389>.
- [9] 陈雪,梁克红,王靖,等.膳食中多不饱和脂肪酸对心血管疾病防治研究进展[J].中国油脂,2020,45(10):87-94. CHEN X, LIANG K H, WANG J, et al. Progress in prevention and treatment of cardiovascular diseases by dietary polyunsaturated fatty acids [J]. China oils and fats, 2020, 45(10): 87-94 (in Chinese with English abstract).
- [10] ZHU J Y, WANG R Z, ZHANG Y, et al. Metabolomics reveals antioxidant metabolites in colored rice grains [J/OL]. Metabolites, 2024, 14 (2) : 120 [2024-09-10]. <https://doi.org/10.3390/metabo14020120>.
- [11] 王晓东.稻-鸭-虾模式水稻生长及温室气体排放特征研究 [D]. 武汉:华中农业大学, 2023. WANG X D. Study on the characteristics of rice growth and greenhouse gas emission in rice-duck-crayfish model [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [12] YANG M, LU K, ZHAO F-J, et al. Genome-wide association studies reveal the genetic basis of ionomic variation in rice [J]. The plant cell, 2018, 30(11): 2720-2740.
- [13] ZHAO M C, LIN Y J, CHEN H. Improving nutritional quality of rice for human health [J]. Theoretical and applied genetics, 2020, 133(5): 1397-1413.
- [14] 杜丽缺,赵明超,林拥军,等. β -胡萝卜素加强的转基因水稻培育 [J].华中农业大学学报, 2014, 33(5): 1-7. DU L Q, ZHAO M C, LIN Y J, et al. Cultivation of transgenic rice with enhanced β -carotene content [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(5): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张超,李丹,张昌,等.黑龙江地区水稻糙米中 γ -谷维素含量和阿魏酸酯组成 [J].食品科学, 2020, 41(20) : 234-241. ZHANG C, LI D, ZHANG C, et al. γ -Oryzanol content and ferulic acid ester composition in brown rice from Heilongjiang Province [J]. Food science, 2020, 41 (20) : 234-241 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈美君,王旻,亢美娟,等.超高压液相色谱-串联质谱法同时测定婴幼儿配方乳粉中11种B族维生素 [J].食品科学, 2016, 37(4) : 144-153. CHEN M J, WANG M, KANG M J, et al. Simultaneous determination of 11 B vitamins in infant formula by UPLC-MS/MS [J]. Food science, 2016, 37(4) : 144-153 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张桂云.水稻维生素E、C代谢调控研究 [D].扬州:扬州大学, 2012. ZHANG G Y. Study on metabolic regulation of vitamins E and C in rice [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [18] 杨泽南,张庆路,李凯凯,等.液质联用法测定不同地域种植的华墨香5号黑米中花青苷和酚酸类化合物含量 [J].华中农业大学学报, 2022, 41(5): 266-272. YANG Z N, ZHANG Q L, LI K K, et al. Determining contents of anthocyanin and phenolic acid compounds in black rice variety Hamoxiang 5 grown in different locations with HPLC-MS [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41 (5) : 266-272 (in Chinese with English abstract).
- [19] 赫欣睿,武中庸,叶永丽,等.高效液相色谱法测定氨基酸的

- 研究进展[J].分析测试学报,2016,35(7):922-928. HE X R, WU Z Y, YE Y L, et al. Research progress on detection of amino acids by high performance liquid chromatography [J]. Journal of instrumental analysis, 2016, 35(7): 922-928 (in Chinese with English abstract).
- [20] 程威威.HPLC检测发芽糙米中GABA不同衍生方式评价及其制备关键技术初探[D].长沙:中南林业科技大学,2014. CHENG W W. Evaluation of different derivatization methods for determination of GABA in germinated brown rice by HPLC and preliminary study on its preparation key technolo-
- gies [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [21] ZHANG L, ZHANG C, YAN Y, et al. Influence of starch fine structure and storage proteins on the eating quality of rice varieties with similar amylose contents [J]. J Sci Food Agric, 2021, 101(9): 3811-3818.
- [22] YANG Z, LI D, WEI R, et al. Whole grain black rice: a paradigm shift from mainly calories to a nutritious food that benefits human health[J/OL]. Sci China Life Sci, 2025: 40035970 [2024-09-10].<https://doi.org/10.1007/s11427-024-2845-y>.

Comparison of nutritional components in Huamoxiang 5 rice under different models of farming

ZHAO Xiaochi, REN Chao, CHEN Hao

National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement/Hubei Hongshan Laboratory,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The content of main nutritional components including mineral elements, vitamins, anthocyanins, and other bioactive substances in rice cultivated under the models of integrated farming including the monoculture (CK, control), rice-crayfish coculture (RX), rice-duck-crayfish unit release model (CRXD), rice-duck-crayfish nomadic duck model (NRXD), and rice-duck-crayfish large field block model (BRXD) was measured to study the differences in nutritional quality of Huamoxiang 5 rice under different models of farming. The effects of models of farming on the nutritional components in Huamoxiang 5 rice were investigated with comparative analysis. The results showed that the nutritional components in the whole grain black rice of Huamoxiang 5 rice were relatively rich, and its nutritional value was significantly better than that of its milled counterpart. The results of comprehensive comparison showed that each farming model had distinct characteristics. The CK performed better in maintaining the stability of main nutritional components, while models of integrated farming improved the palatability of rice and enhanced the content of some nutritional components. Models of integrated farming significantly reduced the content of protein by 9.17%-13.82% ($P<0.05$), while increasing the content of oil by 2.71%-5.30% ($P<0.05$) compared with monoculture, contributing to better quality of taste. In addition, the whole grain black rice of Huamoxiang 5 rice under models of integrated farming significantly increased the content of B vitamins (B_1 : 15.23%-60.58%, B_2 : 1.13%-16.66%, B_3 : 27.28%-49.74%, B_6 : 1.75%-18.21%, B_9 : 20.17%-48.17%), oryzanol (3.41%-7.27%), γ -aminobutyric acid (9.91%-39.87%), and most soluble phenolic acids (e.g., vanillic acid: 29.77%-48.88%, protocatechuic acid: 17.58%-41.54%, ferulic acid: 6.07%-16.04%, p -coumaric acid: 14.58%-33.65%, syringic acid: 21.52%-27.67%), conducive to improving the nutritional value of rice. However, models of integrated farming reduced the content of some nutritional components including vitamin E, anthocyanins, and carotenoids, with relatively small decrease in the absolute value.

Keywords rice-duck-crayfish integrated farming model; integrated rice farming and aquaculture; nutritional components in rice; black rice

(责任编辑:张志钰)