

稻谷黄变机制研究进展

郑霄,曲亚男,王雅雯,刘金光,崔钰,陈义伦,刘玉茜*
(山东农业大学 食品科学与工程学院,山东 泰安 271000)

摘要: 稻谷的储藏黄变影响稻谷的外观品质。稻谷黄变与储藏温度、时间、气体成分及微生物等因素有关。研究发现稻谷黄变与堆积热和呼吸热有关,是初次级代谢共同作用的结果。此外,美拉德反应也是黄变的一个原因。该文系统阐述稻谷黄变的影响因素及机制进展,以期为商业储藏中黄变稻谷的控制提供思路和理论基础。

关键词: 稻谷;黄变;影响因素;机制;初级代谢和次级代谢

Research Progress in the Mechanism of Rice Yellowing

ZHENG Xiao, QU Yanan, WANG Yawen, LIU Jinguang, CUI Yu, CHEN Yilun, LIU Yuqian*

(College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, Shandong, China)

Abstract: The yellowing of rice during storage affects the appearance quality of rice. The yellowing of rice is related to factors such as storage temperature, time, gas composition, and microorganisms. Available studies have suggested that rice yellowing is related to grain storage heating and respiratory heat, and it is the result of the combined action of primary metabolism and secondary metabolism. In addition, the Maillard reaction is also a cause of yellowing. The research progress in the influencing factors and mechanisms of rice yellowing were reviewed, with a view of providing ideas and a theoretical basis for the control of rice yellowing in commercial storage.

Key words: rice; yellowing; influencing factors; mechanism; primary metabolism and secondary metabolism

引文格式:

郑霄,曲亚男,王雅雯,等. 稻谷黄变机制研究进展[J]. 食品研究与开发,2025,46(6):184-190.

ZHENG Xiao, QU Yanan, WANG Yawen, et al. Research Progress in the Mechanism of Rice Yellowing[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 184-190.

稻谷作为全球重要的主食之一,其外观品质受储藏条件的影响。稻谷黄变即储藏过程中米粒从白色或半透明变为淡黄或黄色。黄变不仅影响稻谷的外观和口感,还会降低其营养价值。研究表明,黄变可能由真菌污染^[1]、气体成分^[2]、湿度^[2-3]、温度^[4]及稻谷内部的非酶褐变^[5]等多种因素引起。稻谷在储藏过程中仍然维持一定的代谢活动,尤其在高温条件下稻谷的代谢活动增强,导致初级代谢产物和次级产物的积累,反映了对热胁迫的适应机制,为深入了解稻谷黄变的分子机制提供了重要参考。本文综述近年来稻谷黄变机制的研究进展,包括不同诱导因素的影响及其分子机制的最新研究,以期为进一步研究稻谷黄变提供全面的

参考。

1 稻谷黄变的研究现状

稻谷是世界三大谷物之一,一半以上的国家以稻谷为主食。稻谷的外观是评价其品质的重要指标之一。稻谷从采收到消费离不开储藏这一重要环节,而稻谷在采后储藏过程中由于受到贮藏环境、呼吸氧化和酶等的影响仍保持着较强的生理和代谢活性,因此其品质可能发生不同程度的变化^[6]。黄变是稻谷在储藏期间普遍存在的问题。黄变即稻谷在稻谷脱壳后经碾磨得到的大米由应有的白色或半透明色变为淡黄或明显的黄色^[7]。研究表明黄变会影响稻米的外观、营

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32102049)

作者简介:郑霄(2001—),女(汉),在读硕士,研究方向:稻谷储藏。

*通信简介:刘玉茜,女,副教授,博士研究生,研究方向:粮食储藏。

养品质、食用品质等理化性质。有消费者反映黄变米味道不佳,黏度低,且由于水分含量的变化、稻谷结构逐渐脆弱、酶活性和微生物的作用等因素多为碎米粒,因此在市场上的接受度低^[8]。稻谷储藏外观对比见图1。

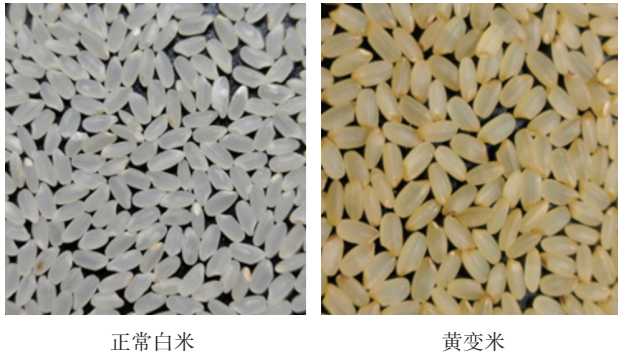


图1 稻谷储藏外观对比

Fig.1 Comparison on appearance of rice during storage

黄变会显著影响稻谷的理化特性,包括糊化性质、热特性、流变特性以及表观直链淀粉等^[9-11]。正常白米可以清楚地看到内部结构,淀粉颗粒排列均匀,具有典型的多角度形态,且细胞壁结构完整。而黄变后籽粒内部结构变得松散,淀粉颗粒之间存在明显的间隙,淀粉颗粒和细胞壁之间存在微小的裂缝^[12]。这种结构的破坏不仅影响稻谷的物理性质,还会对其加工特性产生影响^[13]。此外,黄变也会影响稻谷的营养特性。黄变米中赖氨酸、蛋氨酸、半胱氨酸和精氨酸等氨基酸的含量低于正常白米。这些氨基酸的减少会导致黄变米的营养价值下降,并影响其蛋白质的质量。研究表明,黄变米的氮消化率和蛋白质利用率也较低,意味着黄变不仅影响稻谷的口感和外观,还降低了其营养吸收效率^[14]。

研究表明稻谷黄变可能由多种因素造成,包括真菌污染、气体成分(氧气和二氧化碳含量)、水分含量、温度、湿度以及非酶褐变(美拉德反应)等^[11]。真菌不仅会直接影响稻谷的颜色,使其变黄,还可能产生霉菌毒素,降低稻谷的品质和安全性;氧气和二氧化碳的浓度影响稻谷成分的化学反应,如脂肪氧化,可能导致稻谷颜色变黄^[15];较高的水分活度则会促进微生物繁殖,从而加速黄变;不适宜的储藏条件如高温高湿也会加剧黄变进程。尽管对稻谷黄变的理化特性研究较多,但对稻谷黄变的潜在分子机制的研究仍较为有限。近年来,随着分子生物学技术的发展,组学技术被逐渐应用到稻谷黄变的机制研究。这些研究尝试通过分析蛋白质表达及代谢物的变化,深入了解黄变的分子基础^[16-17]。研究表明,与正常白米相比,黄变米中糖、多元醇和氨基酸等初级代谢产物的表达显著上调。这种变化可能与稻谷在储藏期间对热胁迫的反应密切相关^[17]。研究表明可溶性碳水化合物含量的变化与种子

的脱水耐性有关^[18],由于热胁迫和干旱胁迫导致糖类物质的积累^[19-20]。这些糖类物质的增加是对热应激的保护性反应,通过参与抗氧化和热保护机制来缓解热胁迫对细胞的损伤。同时,多元醇作为抗氧化剂可以保护细胞膜、减少自由基的损伤。此外,氨基酸的上调可能与应激反应中的蛋白质合成和代谢调整有关。因此,这些初级代谢产物的变化反映了稻谷在热应激条件下的适应机制^[17]。

2 稻谷黄变的影响因素

2.1 环境因素

为深入研究黄变的原因,许多研究人员采用人工诱导稻谷黄变,通常包括控制温度、湿度以及其他环境因素,以模拟不同储藏条件下稻谷的黄变过程。

研究表明,温度、水分活度、气体成分、水分含量等因素可能引起稻谷黄变^[2-3,21-22]。目前有研究发现低温环境下稻谷黄变缓慢,而在高温环境中则黄变较快。高温高湿储藏条件下,稻谷黄变尤为明显^[23-24]。元世昌等^[25]将两种优质籼稻“两优”和“黄花粘”在40℃条件下储藏35d,发现稻谷糖含量在黄变过程中有所减少。这一变化可能是由于还原性糖与氨基化合物之间发生了美拉德反应,从而导致稻谷颜色的改变。Zhao等^[26]研究发现“茉莉”籼稻、“稻花香”粳稻以及“阳丰”粳稻3个品种的稻谷在15℃、常温(20~25)℃和37℃的条件下,经过300d的储藏,稻谷的理化性质、显微结构和香气均发生了变化,高温贮藏会加速稻谷的变质。除了温度,水分含量也是影响稻谷储藏黄变的重要因素。Ambardekar等^[21]在诱导黄变研究中发现初始水分含量较高的长粒“Hybrid CL”和“XL729”两个品种稻谷在60℃条件下储藏时,比初始水分含量较低的稻谷更容易发生显著黄变。另外,有研究将稻谷黄变与水分含量相关联,发现 b^* 值与稻谷的水分含量呈正相关,即水分含量的增加显著促进了稻谷的黄变过程。同样,Liu等^[12]研究不同水分含量(11.62%、14.5%和17.5%)的“连糯1号”粳稻在20℃条件下储藏6个月的黄变过程。研究表明,稻谷黄变速率与水分含量呈正相关,即水分含量较高的稻谷更易发生黄变。理化性质分析发现,黄变会提高米饭的黏度并降低糊化温度。这种现象在高水分含量(17.5%)稻谷黄变中更为明显。一些研究表明,水分含量对稻谷储藏过程中的黄变有显著影响,同时高温会加速黄变的进程。杨舒琳等^[27]研究温度和水分对云南地区中晚籼稻稻谷黄变的影响,结果表明,稻谷的水分含量越高,随着储藏时间的延长,黄变现象越明显。在相同储藏时间和水分条件下,高温(65℃)会加速稻谷的黄变进程。同样,研究人员对晚籼稻在不同储藏温度(30、35、40、45℃)和不同水分含量(13.1%、13.6%、14.7%、15.7%)下的

黄变现象进行研究,结果表明,粮温和水分互为影响且相互促进,显著加速了稻谷的黄变过程。随着储粮温度和水分含量的增加,稻谷的黄变程度会更加严重。这种加速黄变的现象随着储藏时间的延长愈加明显。中高温(45℃)和高水分含量(14.7%、15.7%)条件下,稻谷的黄变不仅速度加快,而且黄变程度也显著提高,导致稻谷的外观和质量受到严重影响^[28]。然而,有关水分含量在稻谷黄变中的作用并不完全一致,Dillahunty等^[29]在研究中发现,“Cypress”和“Bengal”两个梗稻品种稻谷黄变程度与储藏时间成正比,并且储藏温度对这一效应有显著影响,40℃储存的稻谷变色程度是20℃储存的6~11倍。不同贮藏水分含量水平间变色程度无显著差异。此外,研究人员发现不同的气体成分对稻谷黄变的影响存在差异。李月^[30]研究表明,在低温(15℃)、常温(25℃)和高温(35℃)3种储藏温度下进行氮气气调时,常温气调能够达到低温储粮的效果。研究还发现,当气调稻谷时温度较低,稻谷在解封后即使置于常温条件下,也能保持较好的品质;而高温则会加速稻谷品质的劣变,从而缩短其储藏时间。同样,丁超等^[31]探究“南梗5055”在30℃条件下,不同氮气体积分数(分别为98%、95%、92%、78%)以及4℃条件下氮气浓度为78%的储藏效果,研究发现充氮气调储藏过程中梗稻谷有机挥发性气体的变化,结合脂肪分解过程中内源酶的动态变化,研究发现充氮气调储藏能显著改善脂质代谢和挥发性气体的生成,有效延缓梗稻谷品质劣变,且储藏效果与4℃低温储藏最为接近。然而,Bason等^[2]通过控制温度、水分和气体成分来测定稻谷品种“Pelde”的黄变率,结果表明,水分含量和温度的增加会加速黄变过程,而氧气和二氧化碳浓度对黄变的影响不显著。综上所述,温度和水分含量是影响稻谷黄变的关键因素,高温和高水分含量会加速稻谷的黄变过程,储藏时间的延长以及稻谷水分含量的增加会导致更为显著的黄变现象。同时,不同品种和不同储藏条件下,稻谷的黄变表现也有所

不同。因此,在稻谷储存过程中,控制储藏温度和水分含量是减少黄变、保持稻谷质量的关键。

2.2 微生物因素

目前关于微生物与稻谷黄变之间关系尚未有定论。霉菌,特别是黄曲霉、芽孢杆菌、构巢曲霉和烟曲霉,被认为是导致稻谷黄变的主要微生物因素^[10]。Phillips等^[11]研究发现在机械通风储藏条件下,稻谷的黄变现象可能与微生物的活动有关。霉菌的污染通常先在稻谷的胚部引发黄变,随后逐渐扩散到周围区域,表明霉菌在稻谷黄变过程中可能扮演了重要角色。任思琦等^[32]通过研究灰绿曲霉、黄曲霉、白曲霉和黑曲霉4种主要霉菌对“两优”籼稻黄变的影响,发现在不同水分含量和储藏温度条件下,优质籼稻的黄度指数发生了不同程度的改变,在30℃和水分含量为17%的条件下,单一接种灰绿曲霉的稻谷黄度指数增加最快。带菌量和黄度指数相关性分析表明,灰绿曲霉对稻谷黄变的影响最大,而白曲霉的影响最小。然而,有研究报告关于稻谷黄变与真菌污染之间的关系并不一致,Bason等^[2]研究表明,稻谷品种“Pelde”在高温(60℃)和低水分活度(0.40、0.60)条件下,稻谷会变为淡黄色,但高温低水分同时也会抑制真菌的活性。即在霉菌活性降低的情况下,稻谷的变色仍可能发生。此外,有研究发现稻谷黄变与真菌总数之间存在负相关,进一步证明了微生物活动可能不是稻谷黄变的唯一原因^[33]。Mohammadi等^[5]研究“长粒杂交稻”、“杂粒纯种稻”和“中粒稻”在储存温度20、30℃和40℃下进行4个储存期(2、4、6、8周)时,黄变程度与霉菌生长的关系,结果发现霉菌的存在和大米变色之间没有相关性。综上所述,霉菌在一定条件下对稻谷黄变有一定影响,但其作用机制并非完全一致,且受到储藏温度、水分含量和稻谷品种等多种因素的影响。因此微生物在稻谷黄变中的确切作用有待进一步研究。稻谷的黄变可能是多种因素共同作用的结果,包括微生物、酶和底物的作用引发的生理和化学变化,具体影响因素见表1。

表1 稻谷黄变的影响因素

Table 1 Factors affecting the yellowing of rice

品种	影响因素			参考文献	
	环境因素		微生物因素		
	温度	气体成分	水分含量		霉菌
未注明	-	-	-	√	[1]
澳大利亚稻谷品种“Pelde”	√	不显著	√	-	[2]
“Bengal”、“Cypress”、“Wells”梗稻	√	-	√	不显著	[3]
“长粒杂交稻”、“杂粒纯种稻”、“中粒稻”	√	-	√	无相关性	[5]
“连糯1号”梗稻	-	-	√	-	[12]
长粒“Hybrid CL”、“XL729”	√	-	√	-	[21]
韩国忠清北道收获的梗稻品种	√	-	-	-	[22]
未注明	√	-	√	-	[23-24]
“两优”、“黄花粘”籼稻	√	-	-	-	[25]

续表1 稻谷黄变的影响因素
Continue table 1 Factors affecting the yellowing of rice

品种	影响因素				参考文献
	环境因素			微生物因素	
	温度	气体成分	水分含量	霉菌	
“茉莉”籼稻、“稻花香”粳稻、“阳丰”粳稻	√	-	-	-	[26]
中晚籼稻	√	-	√	-	[27]
晚籼稻	√	-	√	-	[28]
“Cypress”、“Bengal”粳稻	√	-	无相关性	-	[29]
中晚籼稻	√	√	-	-	[30]
“南梗 5055”粳稻	√	√	-	-	[31]
“两优”籼稻	-	-	-	√	[32]
“XL745”	-	-	-	负相关	[33]

注:√表示该因素对稻谷黄变有影响。-表示文献未对该因素进行阐述。

3 稻谷黄变机制研究进展

现有的研究大多集中于稻谷黄变生理特性的变化表征,而对稻谷黄变呈色机制的研究相对有限。一些研究指出,大米中的淀粉和蛋白质在代谢过程中会发生羰氨反应,即淀粉还原糖中的羰基与蛋白质氨基酸中的氨基反应,这种非酶促的褐变反应即美拉德反应,可能是导致稻谷黄变的一个潜在机制^[11]。尽管美拉德反应被认为是黄变的潜在机制之一,但由于稻谷的遗传背景的复杂性以及对储藏条件下黄变理解的不足,其分子机制尚未完全明确。因此,近年来有研究者在分子水平上对稻谷黄变进行了更深入的探讨。

3.1 挥发性代谢物与脂肪酸氧化揭示稻谷黄变机制

Zhang 等^[34]采用顶空气相色谱-离子迁移谱法和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析了5个不同品种(“太湖”糯稻、“凤两优”籼稻、“嘉花”粳稻、“盐丰 47”粳稻及“盐丰系列”粳稻)黄变米和正常白米中的挥发性风味物质。结果显示,黄变米释放的醛、醇和呋喃含量较高,而酯含量较低。其中,黄米中的己醛、壬醛、癸醛和 2-戊基呋喃含量显著增加,醛类化合物是脂肪酸氧化的产物,2-戊基呋喃是亚油酸氧化产物环化产生的物质,由此说明黄变米比白米的脂质氧化程度更严重。5种挥发性风味物质己醛、辛醛、壬醛、1-戊醇和 2-戊基呋喃可用于区分黄变米和白米。进一步地,Liu 等^[35]对“嘉花”粳稻和“太湖”糯稻的代谢组学初步研究显示,稻谷黄变过程中不饱和脂肪酸如亚油酸和油酸积累较多,表明黄米的挥发性风味物质和不饱和脂肪酸的变化与其黄变过程密切相关。

3.2 蛋白组学和代谢组学揭示稻谷黄变机制

Liu 等^[16]对商储时黄变的“太湖”粳稻和“嘉花”糯稻进行生理和蛋白质组学分析,通过与同一粮仓同时段正常白米的对比研究发现,热休克蛋白、胚胎发育晚期丰度蛋白的表达均显著上调,推测稻谷的黄变主要与热胁迫有关。热胁迫引起了稻谷细胞失水,细胞内

溶物变得更加密集、黏稠,从而引起蛋白质变性和膜的融合。细胞膜结构受到破坏,脂质过氧化反应也随之发生,如黄变稻谷中过氧化产物丙二醛含量显著增加。而为了保护细胞,体内的抗氧化酶系统会被激活,以清除多余的自由基和过氧化物,如发现过氧化氢酶、过氧化物酶等抗氧化酶活性增强,且相关的蛋白表达在黄变米中也显著上调。此外,热胁迫还会导致细胞呼吸速率的增加,能量需求增加,从而导致碳水化合物的代谢变得更加活跃,如黄变米中可溶性糖和还原糖的含量增加,且蛋白组学分析中糖酵解和乙醛酸循环相关的蛋白表达亦显著增强^[21]。一些次级代谢产物如(苯丙素、类黄酮和生物碱)在黄变米中显著上调,这为后续揭示次生代谢与黄变呈色的关系奠定了蛋白水平上的理论基础^[36]。

Liu 等^[17]对“太湖”粳稻和“嘉花”糯稻两个品种稻谷进行非靶代谢组学的分析,发现与正常白米相比,氨基酸是变化最显著的代谢物,其次是碳水化合物、有机酸、脂肪酸和脂类。在黄变稻谷中,与莽草酸途径相关的一些化合物,如苯丙氨酸、色氨酸和酪氨酸的含量有所增加。黄变米中莽草酸-苯丙素代谢的增强,尤其是苯甲酸和 4-羟基肉桂酸的积累,暗示了次生代谢物在黄色色素合成中发挥了重要作用,然而采用非靶代谢技术检测到的次生代谢产物数量有限。因此,稻谷黄变是否完全由次生代谢物的积累引起仍不明确。Liu 等^[35]采用广靶代谢组学的手段对商储的同批黄变稻谷与正常稻谷(“嘉花”粳稻和“太湖”糯稻)的次生代谢物进行深入对比分析。研究发现,黄变稻谷中苯丙素代谢途径和类黄酮生物途径的相关次生代谢物显著积累,主要包括苯丙素类、黄酮类、黄酮醇类以及酚酸类化合物,这些次级代谢物质的增加是稻谷在应对热胁迫时的代谢变化。苯丙素代谢途径是类黄酮和色素类物质合成的关键上游通路。黄酮类化合物的合成始于苯丙素代谢,所有的苯丙素均源于肉桂酸,而肉桂酸是

由苯丙氨酸通过苯丙氨酸解氨酶裂解而形成的。苯丙氨酸解氨酶是连接初级代谢(莽草酸途径)和次级代谢(苯丙素途径)的关键酶^[37]。在这一过程中,肉桂酸经过一系列的羟基化、甲基化和脱水反应,生成诸如咖啡醇、反式肉桂酸、阿魏酸甲酯和对香豆酸甲酯等苯丙素类物质。这些苯丙素类物质经过酶促反应,进入不同的分支途径,催化合成各种类黄酮^[38]。此外,研究发现黄变稻谷中芳香族氨基酸如苯丙氨酸和酪氨酸显著富集。这些芳香氨基酸不仅是肉桂酸和咖啡酸等次级代谢产物的合成前体,同时也是莽草酸途径中的重要代谢产物。莽草酸途径作为连接初级代谢和次级代谢的重要支点,发挥着关键作用。黄变稻谷的形成是初级代谢与次级代谢相互作用的结果,体现了稻谷在热胁迫下的复杂代谢响应机制。苯丙素类和黄酮类化合物是黄变米中上调幅度最大的差异代谢物,与稻谷黄度值呈正相关。此外,黄变次级代谢产物如高圣草素、柚皮素查尔酮和4,2',4',6'-四羟基查尔酮被认为是稻谷黄变的潜在生物标志物,黄酮类化合物的积累是稻谷黄变的重要原因^[21]。

同样,Liu等^[39]基于液相色谱质谱联用的广靶代谢组学结合气相色谱质谱的挥发性风味物分析深入研究了6个不同品种稻谷(粳稻:南粳9108、辽星20号、盐丰47;籼稻:丰两优6号、鄂中5号、鉴真2号)在37℃储藏5个月黄变前后代谢产物的变化,发现与未储藏黄变稻谷相比,黄变稻谷中氨基酸、脂肪酸及其衍生物、碳水化合物以及有机酸等初级代谢物质和黄酮类、苯丙素类和生物碱及其衍生物等次级代谢产物显著积累。葡萄糖、氨基酸和脂肪酸等初级代谢产物是次级代谢产物的代谢前体^[40]。肉桂酸是苯丙素物质(如苯甲酸)的前体^[38],苯甲酸则是合成酚酸及其衍生物的重要前体物质^[41]。此外,苯丙素代谢途径对黄酮类化合物的合成至关重要^[20,42]。黄变过程中苯丙素和黄酮类化合物含量增加,表明苯丙素与黄酮类化合物之间存在初级代谢和次级代谢产物的转化。此外,稻谷黄变会形成更多挥发性化合物,包括酮类、醇类、酯类和碳氢化合物,由于其在稻谷黄变过程中含量的显著变化,因此可以直接用于表征稻谷黄变过程。

3.3 黄酮类靶向代谢组学揭示稻谷黄变机制

Liu等^[43]对40℃下储藏5个月的“黄花占”籼稻和“辽星”粳稻进行黄酮动态变化的代谢组学分析,发现与正常白米相比,储藏1、3、5个月的黄变米中几乎所有的黄酮类化合物均表达上调,证实黄变米中黄酮类化合物的显著积累。差异黄酮主要涉及黄酮、黄酮醇、异黄酮和花青素4个生物合成代谢通路。在稻谷黄变过程中,某些代谢产物作为其他黄酮类物质生物合成的中间体或前体物质。其中,花青素是主要的显色物质,黄酮醇作为共色类黄酮,影响与花青素成分相关的

颜色。花青素、黄酮、黄酮醇和异黄酮的共同作用导致了稻谷的黄变,不同的黄酮类物质对不同储藏阶段的稻谷黄变有不同的贡献。大多数黄酮类化合物在黄变中后期开始积累,积累的木犀草素、柚皮素、芦丁、丁香亭、8-甲氧基山奈酚、天竺葵素、矢车菊素和染料木素被认为是稻谷黄色形成的重要标志代谢物。

黄变的复杂生化反应并非由单一代谢途径控制,而是由多种蛋白调控和代谢环节相互作用引起。不同的蛋白在黄变过程中扮演着不同的角色,通过调节各自的代谢通路,共同影响黄变过程。例如,热胁迫下的热休克蛋白、氧化还原酶以及胚胎发育晚期丰富蛋白和次级代谢途径中的关键酶,都会影响黄变的过程。这些相互作用导致了代谢物的显著变化,包括抗氧化酶的上调和糖代谢产物的增加,尤其是次级代谢产物的积累如黄酮类物质最终导致稻谷颜色的变化。通过对这些蛋白质、代谢物及其调控途径的深入分析,可以更深入地了解稻谷黄变的发生机制,揭示不同生化过程如何协同作用于这一现象。这种系统性分析不仅帮助了解黄变的根本原因,还可能为将来改进稻谷储藏和加工技术提供新的见解和策略。

4 稻谷黄变的控制措施

考虑到影响稻谷黄变的各种因素及其可能的机制,首先需严格把控稻谷入库时的质量^[44]。稻谷的水分含量是储存的基础条件,也是防止黄变的关键因素^[45]。高水分含量不仅增加了稻谷的呼吸速率,还可能导致霉菌生长,加剧黄变。因此,确保稻谷在入库时水分含量符合标准,是控制黄变的首要步骤。其次可采用降低温度的方法有效延缓稻谷黄变的过程,这是因为低温可以减缓稻谷籽粒的呼吸代谢速率,并抑制因谷堆热积累引起的温度升高,从而减少黄变的发生。高温环境下,稻谷的呼吸作用加剧,产生的热量会导致籽粒温度升高,这种热胁迫会加速代谢紊乱,从而引发黄变。因此,通过冷却来降低储藏温度能够有效控制籽粒内部和外部的温度,减少热胁迫对稻谷的影响。此外,通风可进一步抑制霉菌的生长。霉菌在潮湿和温暖的环境中容易繁殖,它们的生长不仅会导致稻谷品质下降,还可能加剧黄变现象。良好的通风可以降低储藏环境中的温湿度,减少霉菌滋生,同时有助于保持稻谷的干燥状态,从而降低霉菌产生的风险。因此仓储时可通过低温空气通风条件下分阶段储藏(自然储藏—通风储藏—自然储藏)来保证稻谷仓储时的品质^[46]。通过这两种方法的结合应用,不仅能够延缓稻谷黄变的发生,还能提高稻谷的储藏品质和安全性^[27]。

5 结论与展望

稻谷储藏过程中的黄变是一个复杂的过程。环境

因素如温度、湿度以及籽粒水分含量和微生物因素均对稻谷黄变有着不同程度的影响。从分子水平来看,蛋白质组学和代谢组学的研究表明,黄变的发生主要与籽粒堆积引起的热胁迫或籽粒呼吸代谢有关。热胁迫导致代谢途径紊乱,从而导致稻谷黄变。代谢途径的改变包括抗氧化、蛋白水解、碳水化合物代谢和次生代谢,这些代谢途径均在黄变过程中增强。因此,黄变是初级代谢和次级代谢共同作用的结果。稻谷在黄变过程中的次生代谢增强,尤其是黄酮类化合物的上调,可能是导致黄变的直接原因。黄酮类化合物被认为是黄变过程中的代谢标志物。此外,美拉德反应在一定程度上也加速了储存过程中的黄变现象。为保证商储过程中的稻谷品质,可通过降低储藏温度、控制水分含量和改善通风等措施来控制稻谷储藏过程中的黄变。

参考文献:

- [1] PHILLIPS S, WIDJAJA S, WALLBRIDGE A, et al. Rice yellowing during post-harvest drying by aeration and during storage[J]. Journal of Stored Products Research, 1988, 24(3): 173-181.
- [2] BASON M L, GRAS P W, BANKS H J, et al. A quantitative study of the influence of temperature, water activity and storage atmosphere on the yellowing of paddy endosperm[J]. Journal of Cereal Science, 1990, 12(2): 193-201.
- [3] BELEFANT-MILLER H, KAY M G, LEE F N. Small-scale induction of postharvest yellowing of rice endosperm[J]. Cereal Chemistry, 2005, 82(6): 721-726.
- [4] GRAS P W, JONATHAN BANKS H, BASON M L, et al. A quantitative study of the influences of temperature, water activity and storage atmosphere on the yellowing of milled rice[J]. Journal of Cereal Science, 1989, 9(1): 77-89.
- [5] MOHAMMADI SHAD Z, ATUNGULU G G. Post-harvest kernel discoloration and fungi activity in long-grain hybrid, pureline and medium-grain rice cultivars as influenced by storage environment and antifungal treatment[J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 81: 91-99.
- [6] LIU R H. Whole grain phytochemicals and health[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46(3): 207-219.
- [7] 宋永令, 孔晨晨, 王若兰, 等. 稻谷黄变研究现状[J]. 食品工业, 2017, 38(11): 283-286.
SONG Yongling, KONG Chenchen, WANG Ruolan, et al. Research progress of rice yellowing[J]. The Food Industry, 2017, 38(11): 283-286.
- [8] LIU Y Q, SHAD Z M, STRAPPE P, et al. A review on rice yellowing: Physicochemical properties, affecting factors, and mechanism[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131265.
- [9] XIAO Y, SHANG W T, LIU J G, et al. Analysis of the physicochemical properties of rice induced by postharvest yellowing during storage[J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125517.
- [10] BRYANT R J, YEATER K M, BELEFANT-MILLER H. The effect of induced yellowing on the physicochemical properties of specialty rice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(2): 271-275.
- [11] WANG Y J, WANG L F, SHEPHARD D, et al. Properties and structures of flours and starches from whole, broken, and yellowed rice kernels in a model study[J]. Cereal Chemistry, 2002, 79(3): 383-386.
- [12] LIU J G, LIU M, LIU Y Q, et al. Moisture content is a key factor responsible for inducing rice yellowing[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 94: 102988.
- [13] 毕文雅. 闽北优质稻最佳储藏条件研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
BI Wenya. Study on optimum storage conditions of high quality rice in northern Fujian[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017.
- [14] EGGUM B O, JULIANO B O, VILLAREAL C P, et al. Effect of treatment on composition and protein and energy utilization of rice and mung bean by rats[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 1984, 34(4): 261-272.
- [15] ZHOU Z K, WANG X F, SI X, et al. The ageing mechanism of stored rice: A concept model from the past to the present[J]. Journal of Stored Products Research, 2015, 64: 80-87.
- [16] LIU Y Q, LIU J G, WANG A Q, et al. Physiological and proteomic analyses provide insights into the rice yellowing[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103048.
- [17] LIU Y Q, LIU J G, LIU M, et al. Comparative non-targeted metabolomic analysis reveals insights into the mechanism of rice yellowing[J]. Food Chemistry, 2020, 308: 125621.
- [18] YAN S J, HUANG W J, GAO J D, et al. Comparative metabolomic analysis of seed metabolites associated with seed storability in rice (*Oryza sativa* L.) during natural aging[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 127: 590-598.
- [19] WIDODO, PATTERSON J H, NEWBIGIN E, et al. Metabolic responses to salt stress of barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars, Sahara and Clipper, which differ in salinity tolerance[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(14): 4089-4103.
- [20] RIZHISKY L, LIANG H J, SHUMAN J, et al. When defense pathways collide. The response of *Arabidopsis* to a combination of drought and heat stress[J]. Plant Physiology, 2004, 134(4): 1683-1696.
- [21] AMBARDEKAR A A, SIEBENMORGEN T J. Effects of postharvest elevated-temperature exposure on rice quality and functionality[J]. Cereal Chemistry, 2012, 89(2): 109-116.
- [22] PARK C E, KIM Y S, PARK K J, et al. Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures[J]. Journal of Stored Products Research, 2012, 48: 25-29.
- [23] 余海, 王远成, 陈朝晖, 等. 仓储稻谷黄变的数值模拟研究[J]. 山东建筑大学学报, 2022, 37(3): 36-43, 59.
YU Hai, WANG Yuancheng, CHEN Chaohui, et al. Numerical simulation research on yellowing of stored rice[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2022, 37(3): 36-43, 59.
- [24] 李鑫, 余海, 杜鑫明, 等. 稻谷自然储藏黄变数值模拟研究[J]. 粮食储藏, 2022, 51(4): 1-7, 12.
LI Xin, YU Hai, DU Xinming, et al. Numerical simulation of yellowing change of rice in natural storage[J]. Grain Storage, 2022, 51(4): 1-7, 12.
- [25] 元世昌, 黄亚伟, 王若兰, 等. 优质稻黄变期间营养组分的变化规律研究[J]. 食品科技, 2019, 44(6): 156-161.
YUAN Shichang, HUANG Yawei, WANG Ruolan, et al. Changes of nutrient components during high quality rice yellowing[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(6): 156-161.
- [26] ZHAO Q Y, GUO H, HOU D Z, et al. Influence of temperature on storage characteristics of different rice varieties[J]. Cereal Chemistry, 2021, 98(4): 935-945.
- [27] 杨舒琳, 张国华, 彭涛, 等. 烘前储存时间和烘干条件对高水分稻谷黄变影响的研究[J]. 粮油仓储科技通讯, 2023, 39(4): 45-47.

- YANG Shulin, ZHANG Guohua, PENG Tao, et al. Study on the influence of pre drying storage time and drying conditions on yellowing of high moisture rice grains[J]. Journal of Grain and Oil Storage Technology, 2023, 39(4): 45-47.
- [28] 晚籼稻在储藏期间产生黄粒米的条件及对品质影响的试验[J]. 粮油仓储科技通讯, 1986(2): 10-14, 9.
Experimental study on the conditions for producing yellow grain rice during storage of late indica rice and its impact on quality[J]. Journal of Grain and Oil Storage Technology, 1986(2): 10-14, 9.
- [29] DILLAHUNTY A L, SIEBENMORGEN T J, MAUROMOUSTA-KOS A. Effect of temperature, exposure duration, and moisture content on color and viscosity of rice[J]. Cereal Chemistry, 2001, 78(5): 559-563.
- [30] 李月. 中晚籼稻氮气调储藏和解封后不同储藏温度下品质变化[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
LI Yue. Quality changes of mid-late indica rice stored in controlled atmosphere with nitrogen and at different storage temperatures after unsealing[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- [31] 丁超, 常乐, 郭啸天, 等. 基于 GC-IMS 对充氮储藏粳稻风味特性影响研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(1): 123-131.
DING Chao, CHANG Le, GUO Xiaotian, et al. Determination of flavor characteristic in Japonica rice during nitrogen storage by using GC-IMS[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(1): 123-131.
- [32] 任思琦, 侯园园, 宋永令, 等. 霉菌对优质籼稻黄变的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 103-109.
REN Siqi, HOU Yuanyuan, SONG Yongling, et al. Effect of fungi on yellowing of high quality indica rice[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 45(3): 103-109.
- [33] SHAFIEKHANI S, WILSON S A, ATUNGULU G G. Impacts of storage temperature and rice moisture content on color characteristics of rice from fields with different disease management practices [J]. Journal of Stored Products Research, 2018, 78: 89-97.
- [34] ZHANG X X, DAI Z, FAN X J, et al. A study on volatile metabolites screening by HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS for discrimination and characterization of white and yellowed rice[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(2): 496-504.
- [35] LIU Y Q, LIU J G, WANG R, et al. Analysis of secondary metabolites induced by yellowing process for understanding rice yellowing mechanism[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128204.
- [36] XU D B, YUAN H W, TONG Y F, et al. Comparative proteomic analysis of the graft unions in hickory (*Carya cathayensis*) provides insights into response mechanisms to grafting process[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 676.
- [37] DIXON R A, PAIVA N L. Stress-induced phenylpropanoid metabolism[J]. The Plant Cell, 1995, 7(7): 1085-1097.
- [38] GUPTA R, MIN C W, KIM S W, et al. Comparative investigation of seed Coats of brown- versus yellow-colored soybean seeds using an integrated proteomics and metabolomics approach[J]. Proteomics, 2015, 15(10): 1706-1716.
- [39] LIU J G, LIU Y Q, JIA M, et al. Association of enriched metabolites profile with the corresponding volatile characteristics induced by rice yellowing process[J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129173.
- [40] WANG Y Q, LI C S, ZHAO Y Q, et al. Novel insight into the formation mechanism of volatile flavor in Chinese fish sauce (Yu-lu) based on molecular sensory and metagenomics analyses[J]. Food Chemistry, 2020, 323: 126839.
- [41] FRASER C M, CHAPPLE C. The phenylpropanoid pathway in *Arabidopsis*[J]. The Arabidopsis Book, 2011, 9: e0152.
- [42] ZANDALINAS S I, SALES C, BELTRÁN J, et al. Activation of secondary metabolism in *Citrus* plants is associated to sensitivity to combined drought and high temperatures[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 7: 1954.
- [43] LIU Y Q, LIU J G, TANG C Y, et al. Flavonoids-targeted metabolomic analysis following rice yellowing[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 136984.
- [44] 舒在习, 李少寅. 大米加工厂稻谷储藏技术[J]. 粮食加工, 2014, 39(3): 25-26, 36.
SHU Zaixi, LI Shaoyin. Rice storage technology in rice processing plant[J]. Grain Processing, 2014, 39(3): 25-26, 36.
- [45] 王若兰, 渠琛玲, 何荣, 等. 优质稻保质保鲜储藏关键技术与装备研究进展[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(4): 62-67.
WANG Ruolan, QU Chenling, HE Rong, et al. Research progress on key technologies and equipment for quality preservation and fresh-keeping storage of high quality paddy[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(4): 62-67.
- [46] 刘家琦, 杨开敏, 余海, 等. 基于多物理场分析稻谷保质储藏的研究[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(6): 181-189.
LIU Jiaqi, YANG Kaimin, YU Hai, et al. Research on high-quality storage of paddy based on multi-physical field analysis[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(6): 181-189.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2024-09-28