

气调技术对稻谷储藏品质变化及控制的研究进展

何宇锐, 杨志成, 张彦, 潘丹杰, 汪中明, 沈波, 刘兴泉, 张双凤

Research Progress of Controlled Atmosphere Technology on Changes and Control of Paddy Storage Quality

HE Yukai, YANG Zhicheng, ZHANG Zhengyan, PAN Danjie, WANG Zhongming, SHEN Bo, LIU Xingquan, and ZHANG Shuangfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稻谷储藏过程中发热霉变研究进展

Progress on the fever and moldy of paddy during storage

食品工业科技. 2017(12): 338-341

低温气调协同乙烯去除剂、臭氧组合处理对秋葵贮藏品质的影响

Effects of Low Temperature Controlled Atmosphere Combined with Ethylene Absorbent and Ozone Treatment on the Storage Quality of Okra

食品工业科技. 2020, 41(7): 249-254

不同气调贮藏条件对早酥梨采后生理品质的影响

Effects of different controlled atmosphere storage on postharvest physiological quality of "Zaosu" pear

食品工业科技. 2018, 39(11): 291-296

两种气调保鲜方式对香菇贮藏品质及生理生化性质的影响

Effects of Two Kinds of Modified Atmosphere Preservation Methods on Storage Quality and Physiological and Biochemical Properties of *Lentinus edodes*

食品工业科技. 2021, 42(4): 276-281

气调贮藏对金针菜外观色泽和营养品质的影响

Influence of controlled atmosphere storage on surface color and nutritional qualities of *hemerocallis citrina baroni*

食品工业科技. 2017(09): 339-342

电子鼻结合气相-离子迁移谱联用技术分析兰茂牛肝菌气调贮藏期间挥发性风味物质的变化

Changes in Volatile Compounds of *Lanmaoa asiatica* during Controlled Atmosphere Storage Using Electronic Nose Combined with Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy

食品工业科技. 2021, 42(21): 111-117



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

何宇铠, 杨志成, 张丞彦, 等. 气调技术对稻谷储藏品质变化及控制的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 377-384. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090008

HE Yukai, YANG Zhicheng, ZHANG Zhengyan, et al. Research Progress of Controlled Atmosphere Technology on Changes and Control of Paddy Storage Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 377-384. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090008

· 专题综述 ·

气调技术对稻谷储藏品质变化及控制的研究进展

何宇铠¹, 杨志成², 张丞彦², 潘丹杰², 汪中明³, 沈波⁴, 刘兴泉¹, 张双凤^{5,*}

(1. 浙江农林大学农业与食品科学学院, 浙江杭州 311300;

2. 杭州市粮油中心检验监测站, 浙江杭州 310003;

3. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037;

4. 浙江衢州省级粮食储备库, 浙江衢州 324022;

5. 浙江省疾病预防控制中心, 浙江杭州 310051)

摘要: 随着全球新冠疫情的蔓延, 粮食需求量迅速增加, 粮食安全遭遇重要挑战, 保障粮食储藏安全事关国家和社会稳定。气调作为一种绿色可持续的储粮技术, 不仅可避免化学药剂对稻谷的污染, 也能有效防治虫害对稻谷的影响, 减缓稻谷品质的劣变。本文综述了我国现阶段气调储藏的技术要点, 以及对稻谷在气调储藏中和启封后的品质变化进行了归纳总结, 为稻谷绿色优质储藏的研究及应用提供一定的理论依据。

关键词: 气调储藏, 稻谷, 品质, 储粮技术, 虫害

中图分类号: TS210

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)23-0377-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090008



本文网刊:

Research Progress of Controlled Atmosphere Technology on Changes and Control of Paddy Storage Quality

HE Yukai¹, YANG Zhicheng², ZHANG Zhengyan², PAN Danjie², WANG Zhongming³, SHEN Bo⁴, LIU Xingquan¹, ZHANG Shuangfeng^{5,*}

(1. College of Agriculture and Food Science, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China;

2. Hangzhou Grain and Oil Center Inspection and Monitoring Station, Hangzhou 310003, China;

3. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;

4. Zhejiang Quzhou Provincial Grain Reserve, Quzhou 324022, China;

5. Zhejiang Provincial Center for Disease Control and Prevention, Hangzhou 310051, China)

Abstract: With the spread of covid-19 globally, food demand is increasing rapidly and food security is facing major challenges. Ensuring food storage security is a matter of national security and social stability. As a green and sustainable grain storage technology, controlled atmosphere can not only avoid the pollution of paddy by chemical agents, but also effectively prevent and control the influence of insect and mildew on rice, and make the deterioration of rice quality slow down. This article summarizes the controlled atmosphere storage technology points in China at the present stage, and the research of paddy quality changes during and after controlled atmosphere storage, which provides a certain theoretical basis for the research and application of green high quality storage of paddy.

Key words: controlled atmosphere storage; paddy; quality; storage technology; insect mildew damage

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 浙江省重点研发项目(2018C02050); 杭州市农业与社会发展科研主动设计项目(20190101A07)。

作者简介: 何宇铠(1996-),男,硕士研究生,研究方向:食品安全控制技术, E-mail: 1245041275@qq.com。

* 通信作者: 张双凤(1964-),女,本科,主任技师,研究方向:食品质量与安全, E-mail: shfzhang@cdc.zj.cn。

稻谷是我国重要的主粮之一,其安全储藏与国家安全和社会稳定密切相关^[1]。随着人们生活水平的提高以及国家贸易竞争的加剧,消费市场对稻谷品质的要求日益提高^[2]。目前,受新冠肺炎疫情的影响,已有多个国家宣布限制粮食出口,使全球粮食供应遭遇挑战,粮食安全储藏的重要性更加突出^[3]。在储藏过程中,除稻谷自身的营养物质发生变化外,储粮害虫和霉菌的影响也是导致其品质劣变的主要因素^[4]。

储粮害虫通常采用药剂熏蒸处理,在甲基溴因环境安全问题被限制使用后,磷化氢成为了目前储粮过程中主要的虫害防制剂。然而,随着储粮害虫对磷化氢耐药性的增强,需不断提高磷化氢的浓度才能够实现有效熏蒸^[5]。与此同时,硫酰氟^[6]、一氧化氮^[7]和二氧化氯^[8]等多种新型熏蒸剂亦取得了一定的研究进展,但受残留、环保和经济效益等原因的限制,尚不能应用于实际生产。添加防霉剂是减少稻谷霉变的有效方法之一。其中,复合型防霉剂是高水分稻谷应急储藏较为理想的制剂,但是上述防霉剂大多为化学合成,可能对人体有一定的毒害作用^[9]。研究发现臭氧熏蒸能有效减少霉菌等微生物的生长,并可降解黄曲霉毒素 B1 等真菌毒素^[10],且对常见仓储害虫也有较好的杀灭效果^[11],但高浓度的臭氧熏蒸会对粮食的品质造成较大影响,在应用时需要进行适当控制^[12]。

气调储藏作为一种绿色储粮技术,被广泛应用于粮食仓储。该方法不仅可以避免磷化氢等熏蒸剂的使用而导致的耐药性问题,而且对储粮害虫和真菌也有较好的防治效果,对保持粮食品质、保障操作员和消费者安全具有较好的效果,是一种安全、环保、易于实施的绿色方法。

1 气调储粮技术要点

目前我国实仓中使用较多的是氮气气调储粮,主要是从空气中分离出高浓度氮气,充入气密性达标的粮仓中,置换出粮堆内的氧气,来长期保持高浓度氮气环境。制氮方法有深冷法、变压吸附法和膜分离法^[13]。规模较大的氮气气调储粮一般采用变压吸附法,中储粮成都储藏所与大连力德在 2009 年提出以空压机不卸载设计制氮机的新理念,开发出产气高、能耗低、一键启动和远程自控的气调储粮专用变压吸附制氮设备。在产气量相同的情况下,与常规制氮装置相比,可分别节约能耗 40% 和 43%^[14]。

结合不同实仓应用情况,一般采用上充下排,下充上排^[15],边排边充,环流平衡^[16]等充氮工艺,这些充氮工艺均可实现杀虫、抑虫和储藏的目的。但气调储粮的使用效果与仓房气密性密切相关,表 1 为“GB/T25229-2010 平房仓气密性要求”中对氮气气调的仓房密闭、薄膜密封粮堆的气密性要求。由于我国绝大部分仓房的气密性达不到气调储粮的要求,故迫切需要进行仓房的气密性改造。

表 1 平房仓气密性分级
Table 1 Classification of cabin tightness

	气密性等级	压力差变化范围(Pa)	压力半衰期(min)
平房仓气密性	一级	500~250	$t \geq 5$
	二级	500~250	$4 \leq t < 5$
	三级	500~250	$2 \leq t < 4$
薄膜密封粮堆气密性	一级	-300~-150	$t \geq 5$
	二级	-300~-150	$2.5 \leq t < 5$
	三级	-300~-150	$1.5 \leq t < 2.5$

在实际生产中大多数粮库对气调仓采取大气囊密闭粮面等临时密闭措施,以弥补仓房气密性差的不足^[17]。康国宇等^[18]对提高气密性关键节点进行探讨,在对 30 号和 42 号试验仓进行一般气密性改造的基础上,针对压槽、仓门、仓窗、通风口、管线等关键节点改造后,压力半衰期分别达到 769 和 608 s,相比于只进行一般气密性改造的仓房有了显著的提高,这大大降低了气调储粮的成本。

2 稻谷气调储藏过程中的品质变化

气调储藏主要通过降低储藏环境的氧气浓度,抑制储粮害虫和霉菌的生长繁殖,以及稻谷自身呼吸作用和酶活性,达到减缓稻谷微观结构、化学成分和最终品质变化的目的。

2.1 主要成分的变化

2.1.1 淀粉 淀粉作为稻谷最重要的组成部分,其理化特性会影响稻谷各个方面的品质^[19]。由于淀粉在稻谷营养成分中所占比例大,即使储藏期间质量有所减少,其所占的比例也不会发生显著变化,但是淀粉的内部分子结构会有一些的变化^[20]。

天然淀粉由直链淀粉、支链淀粉和中间组分组成,其中直链淀粉被认为是决定稻谷蒸煮食用品质的最重要因素之一^[21],因为它直接关系稻谷的膨胀性、粘性、柔软性、光泽和食味品质。特别是在脂质存在的情况下,直链淀粉既可以作为稀释剂,也可以作为膨胀的抑制剂^[22]。在一定范围内,直链淀粉含量越低,稻谷品质越好^[23]。直链淀粉又分为可溶性和不溶性,可溶性直链淀粉含量在气调储藏条件下随着储藏温度的增高具有减少的趋势,而不溶性直链淀粉的含量则增加,因此,可将不溶性直链淀粉含量作为稻谷新陈度的一个指标^[24]。张兴亮^[25]发现在 80% CO₂ 气调储藏条件下,储藏 150 d 后稻谷不溶性直链淀粉增加 7.96%,明显低于对照处理的 15.14%,说明采用高浓度 CO₂ 气调贮藏可通过抑制不溶性直链淀粉的上升,削弱稻谷淀粉微晶束结构合成,利于炊制过程中水分的渗透,从而改善稻谷食味品质。

2.1.2 蛋白质 稻谷在储藏过程中,其蛋白质含量变化不大,但溶解度明显下降^[22]。由于储藏过程中,稻谷中蛋白巯基的含量下降,而二硫键增多,分子量增大,导致蛋白和淀粉相互结合作用逐渐减弱,影响粘性和口感^[26]。张来林等^[27]发现氮气气调储藏条件下稻谷蛋白中巯基含量和二硫键含量与对照组相比变

化较小,说明氮气气调储藏能有效抑制稻谷巯基向二硫键的转变。

蒋春燕^[28]采用双向凝胶电泳技术对储藏期 90 d 的 25 °C 常规和 CO₂ 气调的储藏样品的蛋白质表达量进行研究,发现前者表达上调蛋白质数量为 12 个,下调数量为 27 个,后者表达上调蛋白质数量为 16 个,下调 14 个。孙术国等^[29]采用蛋白质组学技术分析对差异蛋白表达分析发现在相同温度条件下,与非气调储藏比较,CO₂ 气调储藏能一定程度降低稻谷差异蛋白的表达,减轻高温对稻谷蛋白的影响,从蛋白质分子代谢视角发现 CO₂ 气调储藏能延缓稻谷陈化。

2.1.3 脂质 与稻谷中含量较多的淀粉和蛋白质相比,虽然脂类含量相对较少,但其对稻谷的陈化变质影响显著^[30]。这主要是由于脂类会在脂氧酶的催化作用下发生氧化,且产物较不稳定,会分解成醛类和酮类物质,使稻谷产生不良气味;此外,脂类发生水解随即导致游离脂肪酸的含量增加^[22]。由于脂肪酸值可准确反映出稻谷中游离脂肪酸的含量,因此其成为判断稻谷劣变的重要指标。在储藏过程中,脂肪酸值会先上升,后因自身的消耗和微生物的利用而降低^[31]。温度和水分含量是影响稻谷脂肪酸值变化的重要因素,即温度和水分含量越高,脂肪酸值的增加越快^[32-33]。气调储藏通过降低环境的氧气浓度,抑制酶活性,从而减缓脂质的氧化。邹易等^[34]在海南地区进行 2 年的气调控温实仓储藏实验,发现维持 95% 以上浓度的氮气气调实验仓中稻谷的脂肪酸值增加值明显小于对照仓。杨乾奎等^[35]对两种优质稻谷(黄华占和两优)的脂肪酸值进行测定,发现经 540 d 储藏后,氮气气调储藏的脂肪酸值均比常规储藏低,分别降低了 2.2、2.1 mg/100 g。

2.2 生理生化品质的变化

收获后的稻谷依旧是一个有机生命体,在储藏过程中其会不断的进行呼吸作用,消耗自身营养物质从而影响其品质。

发芽率是评价其生活力与利用价值的重要指标。随着储藏时间的延长,稻谷的发芽率逐渐降低^[36]。许启杰等^[37]发现经过 12 个月的储藏,与空气对照组相比,充氮组稻谷的发芽率高了 2%。同样,有研究表明在相同的温度条件储藏下,CO₂ 气调储藏的稻谷发芽率明显高于非气调组^[29]。

稻谷在储藏期间的成分变化需要有酶的参与,酶活性与稻谷的生命力密切相关,因此酶活性可以作为品质劣变的敏感指标。SUN^[38]发现相比于空气对照组,采用 CO₂ 气调储藏可延缓 α -淀粉酶活性的降低和抑制脂氧酶活性的上升。李凡^[39]通过研究不同包装条件下三种籼粳杂交稻的品质,发现在 PE 包装袋中添加脱氧剂处理后,与对照组相比,可以延缓抗氧化酶活性的降低。说明低氧气调环境能较好地保持稻谷的生理活性,延缓稻谷的品质变化。

2.3 挥发性成分的变化

稻谷的香气在很大程度上影响着其适口性和消费者的接受程度,是主要的特征品质之一^[40]。它由超过 500 种不同的挥发性化合物组成,主要包括 2-乙酰-1-吡咯啉(2-AP)、醛、醇、酚类物质和杂环化合物等^[41]。气味和理化品质是稻谷品质的外因和内因,所以稻谷的气味很大程度上取决于其理化品质的不同,在储藏过程中,稻谷的蛋白质被分解成胺类大分子,胺类大分子又被分解成氨、硫化氢和乙基硫醇;脂质通过脂肪酶水解降解,释放出游离脂肪酸,再分解成醛和酸;碳水化合物分解成挥发物,如醇、醛、酮和羧酸气体。这一系列的变化导致稻米产生不愉快的气味^[42]。

张美玲^[43]通过电子鼻检测粳稻挥发性物质的变化,发现采用电子鼻系统中的 LDA(线性判别法)法可以很好的区分出不同氧气浓度条件下储藏的稻谷样品,说明气调储藏后稻谷挥发性物质发生了改变。张婷筠^[44]发现不同氧气浓度(2%、5%、8% 和 21%)储藏下高水分稻谷的各挥发性物质总量随氧气浓度变化较大。其中烃类相差较大,氧气浓度 2% 和 21% 总相对量差为 15.14%,醛类相差 12.52%,酮类相差 3.4%,醇类相差 1.91%,酸酯类相差 1.84%,杂环类相差 0.75%,说明气调储藏能减少有害挥发性物质的产生^[45]。

2.4 蒸煮食用品质的变化

2.4.1 糊化特性 糊化是淀粉固有的重要物理特性之一,对食用加工具有重要影响^[46]。糊化特性可以通过快速粘度分析仪(RVA)来测定。表 2 是气调储藏中稻谷糊化特性变化研究概况。张美玲^[43]发现晚粳稻的峰值粘度、最低粘度、崩解值、最终粘度和胶凝值随着储藏时间延长而增加,且氧气浓度越低,变化越缓慢。张少芳^[47]发现 99% 浓度以上氮气气调储藏能缓解优质稻谷淀粉糊化特征值的变化,从而保持稻米原有的硬度和黏度,但温度是影响气调储藏时稻谷糊化特性变化的主要因素。有研究还发现在真空和氮气气调储藏下,稻谷的最终粘度均显著低于空气对照组^[52]。

2.4.2 质构特性 米饭的质构特性与蒸煮、食味品质密切相关。质构特性的差异意味着稻谷的组成成分以及结构的差异,这些变化会对大米食味品质产生影响^[53]。随着储藏时间的增加,稻谷制备米饭的硬度、咀嚼性逐渐增大,籼稻黏着性呈上升趋势,粳稻黏着性下降^[54],且在高温状态下变化趋势更为明显^[55]。表 3 是气调储藏中稻谷质构特性变化研究概况。蒋春燕^[28]研究了不同温度下 CO₂ 气调对稻谷质构特性的影响,发现 CO₂ 对低温 4 °C 下储藏的样品调节作用不大,对高温 37 °C 的调节效果比较明显,另外对 25 °C 储藏条件下的硬度和胶着性也有一定的作用。

表2 气调储藏中稻谷糊化特性变化研究

Table 2 Studies on the change of pasting characteristics of paddy in atmosphere control

储藏时间(d)	气调储藏类型和浓度	稻谷种类	糊化特性				文献来源
			PV	BD	FV	SB	
180	98%、95%、90% N ₂	晚粳稻	↓	↓	↓	—	[43]
360	>99% N ₂	丰优22(籼型杂交)	○	—	○	↓	[47]
360	纯CO ₂ 、纯N ₂ 、真空	籼糯稻	○	↓	○	○	[48]
180	98%、95% N ₂	晚籼稻	↓	↓	○	↓	[49]
360	98%、95%、90% N ₂	淮稻5号(晚粳稻)	↓	↓	↓	↓	[50]
270	>99% N ₂	甬优15(籼型杂交)	○	—	○	—	[51]
360	纯CO ₂ 、纯N ₂ 、真空	TDK8(糯稻)	↓	↓	↓	○	[52]
		TDK11(糯稻)	↓	↓	↓	↓	
		DG(非糯稻)	↑	↑	○	○	

注: ↑表示与对照相比增加, ↓表示与对照相比减少, ○表示与对照相比变化不显著, —表示未提及, 表3、4同; PV=峰值粘度; BD=崩解值; FV=最终粘度; SB=回升值。

表3 气调储藏中稻谷质构特性变化研究

Table 3 Studies on the change of texture characteristics of paddy in atmosphere control

储藏时间(d)	气调储藏类型和浓度	稻谷种类	质构特性				文献来源
			硬度	粘性	咀嚼性	弹性	
50	98%、95% N ₂	粳稻	↓	↑	—	↑	[56]
270	>99% N ₂	甬优15(籼型杂交)	○	—	—	○	[51]
90	CO ₂	黄华占(晚籼稻)	↓	○	—	↑	[28]
			↓	○	—	—	[38]
150	>98% N ₂	黄华占、两优(籼稻)	↓	—	↓	↑	[35]

李岩峰^[57]通过扫描电镜(SEM)分析(图1), 储藏180 d后, 与对照组相比, 氮气气调组能更好保持原有的淀粉结构, 说明充氮气调抑制了稻谷的呼吸作用, 减少了稻谷淀粉的消耗, 影响了稻谷内部淀粉颗粒的变化, 这可能也会导致硬度降低^[58]。

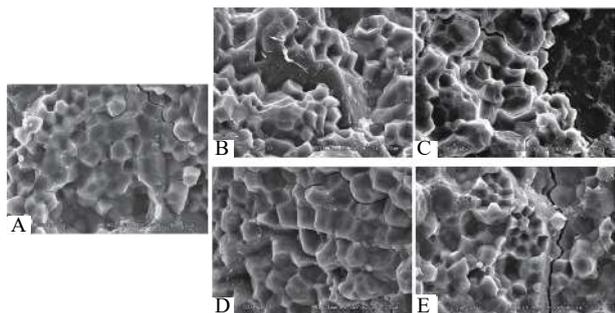


图1 氮气气调下稻谷贮藏过程中微观结构的变化比较^[57]

Fig.1 Comparison of changes in microstructure of paddy during storage under nitrogen gas regulation^[57]

注: A为稻谷原样, B、C、D、E分别是稻谷气调20、35℃, 对照20、35℃(2.00 Kx)下SEM照片。

2.4.3 热特性 陈化会引起稻谷中蛋白质、脂质和淀粉等成分含量的变化并改变其互作结果, 从而影响其热特性。通过RVA测定的成糊温度一般会远高于样品真实的糊化温度^[59], 这是因为成糊温度反映的是刚开始糊化而未完全糊化的温度^[60]。目前采用差示量热扫描仪(DSC)测定的糊化温度最为准确。表4

是气调储藏中稻谷热特性变化研究概况。柴芃宇^[48]经过DSC对各储藏方式下糯稻的热力学特性进行研究, 发现与常规储藏相比, 气调储藏对起始糊化温度、峰值糊化温度和终止糊化温度没有显著影响, 但对所需热焓值的检测发现, N₂气调的方式对稻谷保鲜有一定帮助作用。NAWAZ等^[52]对糯稻(TDK8和TDK11)和非糯稻(DG)品种在不同气调条件下储藏6个月和12个月, 发现在气调条件下老化引起的起始温度(T₀)、峰值温度(T_p)和终止温度(T_c)略有下降。TDK11和DG在N₂和CO₂贮藏过程中, 糊化焓(AH)增幅更明显。

表4 气调储藏中稻谷热特性变化研究

Table 4 Studies on the change of thermal characteristics of paddy in atmosphere control

储藏时间(d)	气调储藏类型和浓度	稻谷种类	热力学特性				文献来源
			T ₀	T _p	T _c	ΔH	
360	纯CO ₂ 、真空	籼糯稻	○	○	○	○	[48]
		TDK8(糯稻)	↓	↓	↓	○	
		TDK11(糯稻)	↓	↓	↓	○	
360	纯CO ₂ 、纯N ₂ 、真空	DG(非糯稻)	↓	↓	↓	○	[52]

注: T₀=起始糊化温度; T_p=峰值糊化温度; T_c=终止糊化温度; ΔH=糊化热焓变。

2.5 加工外观品质的变化

由于储藏期间稻谷自身呼吸作用和虫霉侵染导致组织结构疏松, 故稻谷的出糙率和整精米率随着储藏时间的延长而降低^[61]。我国目前以出糙率为稻谷的等级指标, 其在一定程度上也反映了稻谷加工品质的好坏^[62]。精米是稻谷加工的最终形态, 整精米率的高低不仅影响稻谷的经济价值, 对大米的口感及营养价值也会产生影响^[63]。有研究发现氮气气调储藏对稻谷出糙率影响不大, 但对整精米率有延缓下降的作用, 且15和20℃储藏的下降速度要小于25℃^[64]。

稻谷在储藏过程中常会出现颜色变暗的现象。ZIEGLER等^[65]发现无论米粒的颜色如何, 随着储藏温度和时间的增加, 米粒的明度(L*)值都随着a*和b*值的增加而降低。黄变是稻谷储藏过程中的一种普遍现象, 也是稻谷的一种特有现象。黄变的稻谷会影响其在市场的销售价格^[66]。一般认为导致稻谷黄变的原因有两点: 一是环境引起的黄变, 主要是湿度、温度和气体组分。二是由微生物引起的黄变, 主要以霉菌为主。目前关于气调储藏对于稻谷黄变的影响尚无统一论, 有研究发现对于一些品种的稻谷在二氧化碳或氮气储存条件下黄变会增加^[67], 而也有研究发现氮气气调可以延缓优质稻谷由高温所引起的黄变^[68]。

2.6 储粮害虫

储粮害虫是造成稻谷储藏期间数量和质量巨大损失的主要原因。气调室中, 储粮害虫的酶活性和代谢水平较低导致其体内的氧气浓度逐步降低^[69], 而为

了获得充足的氧气,害虫增大了自身气门的开启,进而导致体内的水分加速丧失,最终死亡。温度是影响气调杀虫效果的重要因素,随着温度的升高,害虫的致死时间显著下降^[70],这可能是由于温度的增加导致害虫代谢和呼吸速率的增加,需要更多的氧气。

氮气气调的杀虫效果对于不同生长阶段的害虫差异较大,例如印度谷螟的卵和蛹对氮气气调的耐受力较低,但随着年龄的增长耐受力增强^[70]。气调储藏对米象属的成虫都有较好的杀死率^[71],但仍需在低氧条件下维持 14 d 以上,才能完全确保控制害虫的其他生命阶段^[72]。

为了解决储粮害虫因气调单一使用而导致抗性的问题,国内外大量研究表明联合熏蒸控制害虫效果更为显著^[5,73]。柳虎^[74]发现采用 95% 以上氮气和 200 mL/m³ 以上磷化氢联合熏蒸的方法能有效控制存在磷化氢抗性的粉食性害虫。由此可见,氮气和熏蒸联用可有效防治储粮害虫,降低熏蒸药剂的使用量,为储粮害虫耐药性治理提供了新的控制方法。

2.7 微生物

微生物伴随着稻谷储藏的整个过程,其进行的营养代谢活动会分解稻谷中的有机物质,并产生有毒有害物质导致稻谷品质劣变。

气调储藏通过控制粮堆中氧气与惰性气体(如氮气、二氧化碳)的比例,使惰性气体的浓度维持在 95%~98%,从而抑制微生物的生长繁殖^[75]。邹易^[34]等发现在控温气调储藏下,微生物菌落总数增长速率明显低于常规储藏技术。

3 稻谷气调储藏启封后品质控制研究

气调储藏可以有效减缓稻谷的陈化、品质劣变的速率等,但储藏的最终目的是流通,因此,稻谷储藏后的品质变化直接关系到粮企的经济效益,故启封后稻谷品质变化的控制研究也极为重要。

研究发现气调储藏启封后,稻谷的品质变化受入仓时品质、原始水分和储藏温度的影响^[76],即稻谷品质越差,水分含量越高,储藏温度越高,启封后品质劣变的速度也就越快。在氮气气调储藏启封后再进行常规储藏期间,稻谷的储藏和加工品质仍延续气调储藏期间的变化趋势,但随着储藏时间的增加,变化幅度相应增大^[77]。中储粮成都粮食储藏科学研究所通过分析不同水分的稻谷在不同温度条件下不同充氮气调方式对其品质的影响,发现氮气气调启封后对稻谷脂肪酸值影响不大^[78],但对品尝评分值的影响较为复杂,其中在 30 ℃ 条件下,水分含量为 15.1% 的稻谷采用交替充氮气调的品尝评分值下降最快^[79]。

为了减缓氮气气调储藏启封后稻谷品质的劣变,在新粮入库时水分应在安全水分以内,在环境温度较高时启封销售的稻谷必须品质好、水分低;水分偏高、品质稍差的稻谷尽可能在环境温度较低时启封和销售^[80]。

4 总结与展望

气调作为国际公认的绿色储粮技术,能减少熏蒸剂对保管人员健康的危害,可有效解决稻谷中有害化学试剂的残留问题,抑制稻谷品质的下降。

目前对气调储藏过程中品质影响的研究较多,而对启封后的研究只集中在糙米和大米中,故需研究气调启封后对稻谷品质变化规律的影响,筛选特征性敏感指标,探索稻谷的品质变化程度及趋势能否满足加工企业要求,从加工及消费市场角度科学评价气调储粮技术。

此外,气调的主要目的是控制储粮害虫,储粮害虫是否有效控制是衡量气调技术的关键指标。随着气调技术的使用,发现部分储粮害虫在气调低氧环境下的生存能力不断增强,但目前缺乏害虫在充氮低氧环境下其存活、生长繁殖及发育周期等基础信息,缺乏防控害虫需要的低氧浓度阈值,故需开展储粮害虫耐低氧研究。

参考文献

- [1] TONG C, GAO H Y, LUO S J, et al. Impact of postharvest operations on rice grain quality: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(3): 626–640.
- [2] 郭桂英,王青林,马汉云,等.碾磨品质对籼稻食味品质的影响[J].*天津农业科学*, 2017, 23(6): 40–44,53. [GUO G Y, WANG Q L, MA H Y, et al. Effect of milling quality on eating quality of indica rice[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2017, 23(6): 40–44,53.]
- [3] 赵亚琪.国际粮食市场波动对我国的影响[J].*中国经贸导刊(中)*, 2020(9): 85–88. [ZHAO Y Q. The impact of international grain market fluctuation on China[J]. *China Economic & Trade Herald*, 2020(9): 85–88.]
- [4] 葛志文,高珺琬,方勇,等.稻谷储藏过程中陈化变质研究进展[J].*粮食与油脂*, 2019, 32(2): 7–9. [GE Z W, GAO Y L, FANG Y, et al. Research progress on the aging metamorphism of rice during storage[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(2): 7–9.]
- [5] JAGADEESAN RAJESWARAN, SINGARAYAN VIRGINE T, CHANDRA KERRI, et al. Potential of co-fumigation with phosphine (PH₃) and sulfuryl fluoride (SO₂F₂) for the management of strongly phosphine-resistant insect pests of stored grain[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111(6): 2956–2965.
- [6] MUDHIR I HWAIDI, PATRICK J COLLINS, MIKE SISSONS. Does sorption of sulfuryl fluoride by wheat reduce its efficacy against adults and eggs of *Rhyzopertha dominica*?[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2017, 74: 91–97.
- [7] YANG X B, LIU Y B. Residue analysis of nitric oxide fumigation in nine stored grain and nut products[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2019: 84.
- [8] HAN G D, KWON H, KIM B H, et al. Effect of gaseous chlorine dioxide treatment on the quality of rice and wheat grain[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2018, 76: 66–70.
- [9] 蒋伟鑫,陈银基,陈霞,等.高水分稻谷品质劣变与防控技术研究进展[J].*粮食与饲料工业*, 2014(6): 11–14,17. [JIANG W X, CHEN Y J, CHEN X, et al. Research progress on quality deterioration and prevention and control techniques of high moisture

- rice[J]. *Grain & Feed Industry*, 2014(6): 11-14,17.]
- [10] TIWARI B K, BRENNAN C S, CURRAN T, et al. Application of ozone in grain processing[J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 51(3): 248-255.
- [11] 陈艳, 谢更祥, 王涛, 等. 臭氧熏蒸杀灭储粮害虫效果的研究[J]. *食品科技*, 2017, 42(1): 284-287. [CHEN Y, XIE G X, WANG T, et al. The killing effect of ozone fumigation of stored grain pests[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(1): 284-287.]
- [12] SHAH NOR NADIAH ABDUL KARIM, RAHMAN RUSSLY ABDUL, HASHIM DZULKIFLY MAT. Changes in physicochemical characteristics of ozone-treated raw white rice[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(3): 1525-1533.
- [13] 吕新萍. 深冷制氮与变压吸附制氮的比较分析[J]. *中国水运* (下半月), 2017, 17(8): 312-314. [LV X P. Comparative analysis of cryogenic nitrogen production and pressure swing adsorption nitrogen production[J]. *China Water Transport*, 2017, 17(8): 312-314.]
- [14] 李丹丹, 李浩杰, 张志雄, 等. 我国氮气气调储粮研发和推广应用进展[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2015, 31(5): 37-41. [LI D D, LI H J, ZHANG Z X, et al. Development, promotion and application of nitrogen gas controlled grain storage in China[J]. *Bulletin of Grain and Oil Storage Science and Technology*, 2015, 31(5): 37-41.]
- [15] 刘进吉, 赵磊, 叶海军, 等. 浅圆仓不同充氮工艺气调试验[J]. *粮食储藏*, 2019, 48(6): 16-20. [LIU J J, ZHAO L, YE H J, et al. Controlled atmosphere storage by filling nitrogen with different ways in squat silos[J]. *Grain Storage*, 2019, 48(6): 16-20.]
- [16] 孙沛灵, 季雪根, 沈波, 等. PSA 横向充氮气调与惰性粉防治技术综合应用研究[J]. *粮食储藏*, 2019, 48(5): 21-24. [SUN P L, JI X G, SHEN B, et al. Study on comprehensive application of PSA nitrogen-filled controlled atmosphere and inert powder control technology[J]. *Grain Storage*, 2019, 48(5): 21-24.]
- [17] 陶金亚, 张来林, 黄浙文, 等. 粮食仓房的气密性分析[J]. *现代食品*, 2016(16): 26-30. [TAO J Y, ZHANG L L, HUANG Z W, et al. Analysis of the air tightness of grain warehouse[J]. *Modern Food*, 2016(16): 26-30.]
- [18] 康国宇, 鞠阳, 徐擎宇, 等. 高大平房仓提高气密性关键节点探讨[J]. *粮食储藏*, 2020, 49(2): 54-55. [KANG G Y, JU Y, XU Q Y, et al. Discussion on key nodes of improving air tightness in tall bungalow[J]. *Grain Storage*, 2020, 49(2): 54-55.]
- [19] 许砚杰. 稻米品质及淀粉理化特性的影响因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. [XU Y J. Factors affecting grain quality and starch physicochemical properties of rice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.]
- [20] 朱星晔. 大米气调储藏保鲜品质变化规律的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010. [ZHU X Y. Study on effect of atmosphere storage on quality of rice[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.]
- [21] BHATTACHARYA K R, SOWBHAGYA C M, INDUDHARA Swamy Y M. Importance of insoluble amylose as a determinant of rice quality[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1978, 29(4): 359-364.
- [22] ZHOU Z, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. Ageing of stored rice: Changes in chemical and physical attributes[J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 35(1): 65-78.
- [23] 李玥, 钟芳, 麻建国. 大米直链淀粉分子量分布及分子旋转半径的研究[J]. *农业工程学报*, 2007(11): 36-41. [LI Y, ZHONG F, MA J G. Analysis of molecular weight distribution and root mean square radius of amylose from rice starch[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007(11): 36-41.]
- [24] 张兴亮, 李喜宏, 霍雨霞, 等. 温度对气调储藏水稻理化特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(5): 77-80. [ZHANG X L, LI X H, HUO Y X, et al. Effects of storage temperature on physicochemical property of rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2010, 25(5): 77-80.]
- [25] 张兴亮. 高 CO₂ 气调贮藏对稻谷食味品质的影响[J]. *农业技术与装备*, 2015(8): 7-10. [ZHANG X L. The effect of high CO₂ gas storage on taste quality of rice[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2015(8): 7-10.]
- [26] 王鹏跃. 稻米蛋白质及组成对其蒸煮食味品质影响的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2016. [WANG P Y. Study on influence of rice protein and its composition on rice cooking and eating quality[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2016.]
- [27] 张来林, 黄文浩, 肖建文, 等. 不同储藏条件对大豆、稻谷蛋白中巯基和二硫键的影响研究[J]. *粮食加工*, 2012, 37(3): 67-70. [ZHANG L L, HUANG W H, XIAO J W, et al. Study on the effect of different storage conditions on-SH and-S-S-from soybean and rice protein[J]. *Grain Processing*, 2012, 37(3): 67-70.]
- [28] 蒋春燕. CO₂ 气调储藏对稻谷品质的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015. [JIANG C Y. The research on effect of CO₂ controlled atmosphere storage on paddy quality[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.]
- [29] 孙术国, 王若晖, 林亲录, 等. 利用蛋白质组学技术研究不同储藏条件稻谷陈化机制[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 277-284. [SUN S G, WANG R H, LIN Q L, et al. Proteomics technique was used to study the aging mechanism of rice under different storage conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18): 277-284.]
- [30] 陈银基, 鞠兴荣, 董文, 等. 稻谷中脂类及其储藏特性研究进展[J]. *食品科学*, 2012, 33(13): 320-323. [CHEN Y J, JIANG X R, DONG W, et al. Advances in lipids and storage characteristics of rice[J]. *Food Science*, 2012, 33(13): 320-323.]
- [31] 陈晨, 胡晓菁. 稻米储藏期间的品质变化与储藏方法[J]. *粮食与油脂*, 2015, 28(7): 14-16. [CHEN C, HU X J. Quality changes and the method of the rice during storage quality changes and the method of the rice during storage[J]. *Cereals & Oils*, 2015, 28(7): 14-16.]
- [32] SUNG J, KIM B K, BYUNG Sam K, et al. Mass spectrometry-based electric nose system for assessing rice quality during storage at different temperatures[J]. *Stored Products Research*, 2014, 59: 204-208.
- [33] GENKAWA T, UCHINO T, INOUE A, et al. Development of a low moisture-content storage system for brown rice: To stability at decreased moisture contents[J]. *Biosytems Engineering*, 2008, 99: 515-522.
- [34] 邹易, 张红建, 郑联合, 等. 控温气调技术在海南地区储粮中的应用研究[J]. *粮食与食品工业*, 2018, 25(4): 49-52, 56. [ZOU Y, ZHANG H J, ZHENG L H, et al. The study on

application of temperature control and air conditioning technology in grain storage in Hainan area[J]. *Cereal & Food Industry*, 2018, 25(4): 49–52,56.]

[35] 杨乾奎, 渠琛玲, 王红亮, 等. 优质稻谷氮气气调与常温储藏品质变化的比较研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(10): 148–154. [YANG G K, QU C L, WANG H L, et al. Comparative study on quality change of high quality paddy in nitrogen modification atmosphere storage and conventional storage[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(10): 148–154.]

[36] GAO Jiadong, FU Hua, ZHOU Xinqiao, et al. Comparative proteomic analysis of seed embryo proteins associated with seed storability in rice (*Oryza sativa* L.) during natural aging[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 103: 31–44.

[37] 许启杰, 刘琳, 李孟泽, 等. 臭氧结合氮气气调储藏对稻谷品质的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(1): 111–119. [XU Q J, LIU L, LI M Z, et al. Effects of ozone pretreatment combined with atmosphere packaging on quality characteristics of paddy during storage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(1): 111–119.]

[38] SUN Shuguo, LI Beiping, YANG Tao, et al. Preservation mechanism of high concentration carbon dioxide controlled atmosphere for paddy rice storage based on quality analyses and molecular modeling tools[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 85: 279–285.

[39] 李凡. 籼粳杂交稻稻谷贮藏过程品质变化及贮藏特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. [LI F. Study on quality change and storage characteristics of indica-japonica hybrid rice during storage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.]

[40] GUAN B B, ZHAO J W, JIN H J, et al. Determination of rice storage time with colorimetric sensor array[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10(4): 1054–1062.

[41] VERMA DEEPAK KUMAR, SRIVASTAV PREM PRAKASH. A paradigm of volatile aroma compounds in rice and their product with extraction and identification methods: A comprehensive review[J]. *Food Research International*, 2020, 130: 108924–108924.

[42] HU X Q, LU L, GUO Z L, et al. Volatile compounds, affecting factors and evaluation methods for rice aroma: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 97: 136–146.

[43] 张美玲. 稻谷储藏品质变化规律与其挥发性物质挥发规律相关性研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2012. [ZHANG M L. Research on the law of rice quality change and the relativity with rice volatile matters[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2012.]

[44] 张婷筠. 稻谷储藏期间挥发物变化规律及其与理化指标相关性研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2013. [ZHANG T J. Volatiles of rice during storage variation and its correlation with the physical and chemical indicators[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2013.]

[45] LIU K L, ZHAO S, LI Y, et al. Analysis of volatiles in brown rice, germinated brown rice, and selenised germinated brown rice during storage at different vacuum levels[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(6): 2295–2301.

[46] 夏书磊. 谷物糊化特性的测定方法与相关性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017. [XIA S L. Methods to determine the

gelatinization properties of grain and correlation studies[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017.]

[47] 张少芳. 充氮气调储藏对优质稻谷品质变化的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2013. [ZHANG S F. The effect of quality changes of high-quality paddy controlled atmosphere storage[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2013.]

[48] 柴芃宇. 糯稻储藏性的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016. [CHAI P Y. Study on storage of glutinous rice[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2016.]

[49] 吴凡. 偏高水分稻谷应急处理和控温控气储藏的研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2013. [WU F. Research on emergency treatment and control temperature and gas storage of high-moisture rice [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2013.]

[50] 乔琳. 粳稻谷储藏期间品质指标及稻谷糙米大米中主要挥发性成分的研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2016. [QIAO L. The research of japonica quality indicators and the main volatile substances among the japonica and brown rice and white rice during storage[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2016.]

[51] 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 W Y. Study of the stored optimum for high quality rice from the north of Fujian[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017.]

[52] NAWAZ M A, FUKAI S, PRAKASH S, et al. Effects of three types of modified atmospheric packaging on the physicochemical properties of selected glutinous rice[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2018, 76: 85–95.

[53] YADAV B K, JINDAL V K. Water uptake and solid loss during cooking of milled rice (*Oryza sativa* L.) in relation to its physicochemical properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 80(1): 46–54.

[54] 周显青, 祝方清, 张玉荣, 等. 不同储藏年限稻谷的蒸煮特性及其米饭的食味和质构特性分析[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(1): 96–103. [ZHOU X Q, ZHU F Q, ZHANG Y R, et al. Analysis of the cooking quality of rice after different storage periods and the taste quality and texture characteristics of the cooked rice[J]. *Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 41(1): 96–103.]

[55] 李岩, 童茂彬, 张来林, 等. 不同储藏方式对粳糙米加工食用品质的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(2): 47–51. [LI Y, TONG M B, ZHANG L L, et al. Influence of storage methods on processing and eating quality of indica brown rice[J]. *Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition)*, 2013, 34(2): 47–51.]

[56] 卢毅. 偏高水分稻谷储藏的应急措施研究及储粮装置的设计[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019. [LU Y, Study on emergency measures for storing high moisture paddy and design of grain storage device[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2019.]

[57] 李岩峰. 充氮气调稻谷储藏研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2010. [LI Y F. Study on paddy preservation by controlled atmosphere storage with N₂[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2010.]

[58] HUANG H, BELWAL TARUN, LI L, et al. Effect of modified atmosphere packaging of different oxygen levels on

- cooking qualities and phytochemicals of brown rice during accelerated aging storage at 37 °C[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020; 25.
- [59] SAIYAVIT VARAVINIT, SUJIN SHOBSNGOB, WARUNEE VARANYANOND, et al. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of flours from different cultivars of Thai rice[J]. *Starch-Stärke*, 2003, 55(9): 410-415.
- [60] 许亮, 向珣朝, 杨博文, 等. 水稻淀粉糊化温度表征差异的比较[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(4): 63-68. [XU L, XIANG X C, YANG B W, et al. The comparison of difference between different measurements for gelatinization temperature of ricestarch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(4): 63-68.]
- [61] 夏雨杰, 汪静, 陈尚兵, 等. 稻谷储藏过程霉菌挥发性物质和品质分析[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(8): 90-95. [XIA Y J, WANG J, CHEN S B, et al. Analysis of mould volatile substances and quality during rice storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(8): 90-95.]
- [62] 胡钧铭, 周佳民, 刘开强, 等. 籼型稻谷碾磨品质研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2008(2): 194-198. [HU J M, ZHOU J M, LIU K Q, et al. Advance of research on milling quality of long-grain rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2008(2): 194-198.]
- [63] 刘英. 稻米的食用品质与其整精米率的关系[J]. *中国粮油学报*, 2004(5): 8-10. [LIU Y. Percentage of head rice and rice cooking quality[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2004(5): 8-10.]
- [64] 毕文雅. 气调结合低温、准低温储藏对偏高水分优质稻品质的影响研究[J]. *粮食储藏*, 2019, 48(5): 11-12, 34. [BI W Y. Effects of air conditioning and low temperature on high moisture and high quality rice.[J]. *Grain Storage*, 2019, 48(5): 11-12, 34.]
- [65] VALMOR ZIEGLER, CRISTIANO DIETRICH FERREIRA, JORGE TIAGO SCHWANZ GOEBEL, et al. Changes in properties of starch isolated from whole rice grains with brown, black, and red pericarp after storage at different temperatures[J]. *Food Chemistry*, 2017; 216.
- [66] ROLFE J BRYANT, KATHLEEN M YEATER, HELEN BELEFANT-MILLER. 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.
- [67] 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 Y L, KONG C C, WANG R L, et al. Research status of rice yellowing[J]. *Food Industry*, 2017, 38(11): 283-286.]
- [68] 元世昌, 黄亚伟, 王若兰, 等. 充氮气调对优质稻黄变及品质的影响研究[J]. *粮油食品科技*, 2019, 27(4): 57-61. [YUAN Y L, KONG C C, WANG R L, et al. Effects of controlled atmosphere storage with nitrogen on yellowing and quality of high quality rice[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2019, 27(4): 57-61.]
- [69] VÍCTOR A LEVY-DE LA TORRE, FRANCISCO J CINCO-MOROYOQUI, ALONSO A LÓPEZ-ZAVALA, et al. Mitochondrial response of the lesser grain borer *Rhyzopertha dominica* (F.) to modified atmospheres[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2019, 83: 338-346.
- [70] HUANG Y L, WANG D X, JIAN F J, et al. Mortality of different stages of plodia interpunctella (Lepidoptera: Pyralidae) at three temperatures in controlled atmosphere of high nitrogen[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2020: 1-5.
- [71] RADEK AULICKY, VLASTIMIL KOLAR, JAN PLACHY, et al. Field efficacy of brief exposure of adults of six storage pests to nitrogen-controlled atmospheres[J]. *Plant Protection Science*, 2017, 53(3): 169-176.
- [72] NJOROGÉ ANASTASIA W, MANKIN RICHARD W, SMITH BRADLEY, et al. Effects of hypoxia on acoustic activity of two stored-product pests, adult emergence, and grain quality[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2019, 112(4): 1989-1996.
- [73] 方智毅, 方江坤, 黄呈兵, 等. 充氮结合熏蒸的双低储粮在低气密性仓房的应用研究[J]. *粮食科技与经济*, 2018, 43(7): 58-61. [FANG Z Y, FANG J K, HUANG C B, et al. Study on the application of double low grain storage with nitrogen and fumigation in barn with low air tightness[J]. *Grain Science and Technology and Economy*, 2018, 43(7): 58-61.]
- [74] 柳虎, 王慧芳, 窦涛, 等. 氮气与磷化氢联合熏蒸对粉食性储粮害虫杀虫效果研究[J]. *粮食储藏*, 2019, 48(2): 34-40. [LIU H, WANG H F, DOU T, et al. Study on insecticidal effect of nitrogen and phosphine fumigation on powdery grain storage insects[J]. *Grain Storage*, 2019, 48(2): 34-40.]
- [75] 葛蒙蒙, 马涛, 陈家豪. 绿色储粮技术及其使用效果分析[J]. *粮食科技与经济*, 2019, 44(1): 53-55. [GE M M, MAO T, CHEN J H, et al. Green grain storage technology and its application effect analysis[J]. *Grain Science and Technology and Economy*, 2019, 44(1): 53-55.]
- [76] 涂杰, 郭道林, 兰盛斌, 等. CO₂气调储藏稻谷启封后品质变化的研究[J]. *粮食储藏*, 2004(3): 43-45, 56. [TU J, GUO D L, LAN S B, et al. Quality change of grain in CO₂ controlled atmosphere storage after unsealing[J]. *Grain Storage*, 2004(3): 43-45, 56.]
- [77] 尹绍东, 张来林, 毕文雅, 等. 充氮气调启封后对粳糙米品质的影响[J]. *粮食加工*, 2016, 41(1): 20-23. [YING S D, ZHANG L L, BI W Y, et al. The influence of quality of japonica rice after unsealing nitrogen of controlled atmosphere[J]. *Grain Processing*, 2016, 41(1): 20-23.]
- [78] 杨健, 黎万武, 周浩, 等. 不同温度条件下氮气气调储粮对稻谷脂肪酸值的影响[J]. *粮食储藏*, 2013, 42(3): 35-39, 53. [YANG J, LI W W, ZHOU H, et al. The effect of controlled atmosphere by nitrogen on fatty acid value of paddy stored under different temperature[J]. *Grain Storage*, 2013, 42(3): 35-39, 53.]
- [79] 李浩杰, 蒋天科, 盛强, 等. 不同温度条件下氮气气调储粮对稻谷品尝评分值的影响[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2016, 32(2): 50-54. [LI H J, JIANG T K, SHENG Q, et al. Effect of nitrogen controlled atmosphere storage on paddy taste score under different temperature conditions[J]. *Grain and Oil Storage Technology Communication*, 2016, 32(2): 50-54.]
- [80] 高影, 杨建新, 刘汝智, 等. CO₂气调储粮启封后品质变化的原因及控制方法[J]. *粮食储藏*, 2004(2): 38-40. [GAO Y, YANG J X, LIU R Z, et al. The reason and control method of grain quality change in CO₂ controlled atmosphere storage after unsealing[J]. *Grain Storage*, 2004(2): 38-40.]