

张忠杰研究员主持“粮食储运国家工程研究中心绿色储粮科技新视野”特约专栏文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.05.003

左祥莉, 马文斌, 张汉宜, 等. 现代绿色储粮新技术的研究现状——以武汉国家稻米交易中心有限公司为例[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(5): 19-25.

ZUO X L, MA W B, ZHANG H Y, et al. The current research status of new technologies for modern green grain storage—taking Wuhan national rice trading center co., ltd. as an example[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(5): 19-25.

现代绿色储粮新技术的研究现状 ——以武汉国家稻米交易中心有限公司为例

左祥莉¹, 马文斌², 张汉宜², 朱治国², 曾仕林¹, 王翔²✉, 刘齐¹

(1. 湖北大学 知行学院, 湖北 武汉 430011;

2. 武汉国家稻米交易中心有限公司, 湖北 武汉 431400)

摘要: 为加快建设绿色安全的智慧粮库, 提高管理现代化水平, 在科技赋能, 大力发展新质生产力的背景下, 绿色储粮技术迎来了新的发展。综述了武汉国家稻米交易中心有限公司集成应用的3项新型控温技术(光伏离网供电空调系统、粮仓垂直热皮层定向控温、零耗能辐射制冷控温)和3项新型防虫杀虫技术(多杀霉素、S-烯虫酯、食品级惰性粉, 评价了其应用效果, 并建议以仓房的隔热保冷等准低温仓改造措施为基础, 以空调控温或气调储藏等为主要手段, 综合运用上述新技术, 以达到准低温储粮、免熏蒸储粮、智慧储粮的要求, 以期为粮食仓储企业开展绿色储粮新技术的应用研究提供相关参考。

关键词: 粮食仓储; 绿色储粮; 控温技术; 防虫杀虫

中图分类号: TS 210.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2024)05-0019-07

网络首发时间: 2024-09-01 16:57:10

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240830.0927.004>

The Current Research Status of New Technologies for Modern Green Grain Storage —Taking Wuhan National Rice Trading Center Co., Ltd. as an Example

ZUO Xiang-li¹, MA Wen-bin², ZHANG Han-yi², ZHU Zhi-guo²,
ZENG Shi-lin¹, WANG Xiang²✉, LIU Qi¹

(1. Zhixing College, Hubei University, Wuhan, Hubei 430011, China;

2. Wuhan National Rice Trading Center Co., Ltd, Wuhan, Hubei 431400, China)

Abstract: To accelerate the construction of secure, green, and intelligent granaries and to enhance the level of modern management, green grain storage technologies have ushered in new developments under the backdrop of technological empowerment and the vigorous development of new production forces. This study

收稿日期: 2024-05-11

基金项目: 国家粮食和物资储备局绿色储粮标准化试点项目(2022-34); 2023年湖北省揭榜制粮食科技项目(2023HBLSKJ011)

Supported by: Green Grain Storage Standardization Pilot Project of National Grain and Material Reserve Bureau (No. 2022-34); Unveiled Grain Technology Projects of Hubei Province in 2023 (No. 2023HBLSKJ011)

作者简介: 左祥莉, 女, 1990年出生, 硕士, 讲师, 研究方向为农产品加工与贮藏, E-mail: zuoxiangli163@163.com

通信作者: 王翔, 男, 1990年出生, 学士, 研究方向为粮食的绿色储藏, E-mail: 515027546@qq.com. 本专栏背景介绍详见 PC7-9

took Wuhan National Rice Trading Center Co., Ltd. as an example reviewed and evaluated three new temperature control technologies, including photovoltaic off grid power supply technology air conditioning system, vertical thermal cortex temperature control technology in grain silos, zero energy radiation refrigeration technology, and three new insect control and insecticidal technologies by using spinosad, S-methoprene or food grade inert powder. Additionally, it was recommended to take the thermal insulation and cold insulation measures of the warehouse as the basis for the transformation of quasi low temperature warehouses, and use green grain storage technologies as the main means, such as air conditioning temperature control technology or modified atmosphere storage technology. The above new green grain storage technologies should be comprehensively applied to meet the requirements of quasi low temperature grain storage, non-fumigation grain storage, and smart grain storage. This study aimed to provide relevant references for grain storage enterprises to carry out research on the application of green grain storage new technologies.

Key words: grain storage; green grain storage; temperature control technology; insect control and insecticidal

“仓廩实，天下安”，尤其是在现阶段国际形势不稳定的情况下，粮食的储藏安全不容忽视。在当前人们食品安全意识高、储粮害虫抗药性强、能源危机日趋显现的背景下，粮食储藏也需要创新发展，大力发展新质生产力，逐步实现绿色储粮。近年来，为落实党中央国务院提出的“强化绿色导向、标准引领和质量安全监管”部署，助力科学储粮、优粮优储和“粮食绿色仓储提升行动”的实施，各仓储企业积极参与到绿色储粮标准化试点工作中，使得许多新的储粮技术涌现。本文对武汉国家稻米交易中心有限公司集成应用的光伏离网供电技术、粮仓垂直热皮层定向控温技术、零耗能辐射制冷技术、多杀霉素绿色防治技术、S-烯虫酯绿色防治技术、食品级惰性粉绿色防治技术等 6 项绿色储粮新技术的研究进行了综述与分析，以期为粮食仓储企业开展绿色储粮新技术的应用研究提供相关参考。

1 新型控温技术

实践证明，粮堆温度是影响粮食安全储存的决定性因素之一^[1-2]。粮油储藏技术规范^[3]对低温储藏和准低温储藏做了相关规定，且准低温储藏在目前的实践中被广泛应用。为了达到准低温储藏的温度要求，很多仓储企业进行了准低温仓的改造，并在粮仓中安装了空调，取得了良好的控温效果。但实践发现，夏季高温季节时，利用空调控制仓温、粮温，电能消耗过大，使得绿色储

粮在经济上的投入大大增加。因此，开发绿色能源，发展新质生产力，推出绿色节能、低成本的制冷方案是降低准低温储藏过程中能耗的关键^[4]。近年来，在国家“十四五”节能减排、碳达峰、碳中和的政策下，很多新技术企业和粮食企业共同开展了控温新技术的研究。

1.1 光伏离网供电的空调系统

太阳能作为一种绿色能源，具有可再生、零排放、储量大等优点^[5-6]，如果能够用于绿色储粮中，则会大大降低储粮中的电耗成本。目前，太阳能发电技术已经得到了广泛应用，且以并入国家电网，再从电网入户的模式为主^[7]。但对于粮企来说，并网手续繁琐，多倾向于离网发电。张红建等^[8]将太阳能离网发电技术在海南地区的低温储粮中开展了应用研究，安装光伏系统并设置多晶硅电池组件，该系统在正常情况下可供 2 台 2 匹空调 24 h 用电。

虽然离网发电配备蓄电池具有一定的应用前景，但蓄电池成本较高，且光伏发电为直流电，普通的空调为交流空调，光伏发电后需要经过蓄电池、逆变器才能供空调使用。在这个过程中，电能均存在一定的损耗，利用率降低。再加上蓄电池的后期更新及维护费用，会在很大程度上增加成本投入。武汉国家稻米交易中心有限公司在探索实践中发明了用于粮食冷却的光伏离网供电的直流空调系统，即不设电池组件，利用光伏组

件发电后产生的直流电直接供直流空调使用，能有效控制储粮温度和湿度，且环保、经济、高效，目前已在武汉国家稻米交易中心有限公司（阳逻库）12 栋仓房全面推广应用。2023 年测得的数据发现，光伏离网供电项目可节约粮仓空调用电成本 70% 左右。目前，该技术仍在实仓实践中，为计算更准确的市电替代率和投资回报比提供数据。该技术如果能够得到广泛应用，既可以解决粮仓空调买得起、用不起的问题，也可以降低用电成本，同时起到高温季节优化电力资源配置的作用，有效缓解市电用电压力，实现真正意义上的“绿色储粮”。

1.2 粮仓垂直热皮层定向控温技术

在粮食储藏过程中，“三温”变化规律为气温影响仓温，仓温影响粮温，变化幅度则是气温 > 仓温，仓温 > 粮温^[9]。近年来国家推动粮仓保温隔热性能的改造，使得粮仓的保温隔热性能整体提升了很多，为准低温储藏提供保障。但由于高大平房仓的仓容很大，加之近几年夏季气温多变，一些地区不乏 42 °C 乃至 45 °C 以上的高温天气，粮粒作为热的不良导体，使得粮堆内部温度变化较慢，但粮仓仓壁及仓顶在外界气温的影响下，变化速度相对粮堆中心位置要快^[10]。在应用了准低温储藏技术的粮仓中，空调控制的主要是粮面以上的仓温，这使得上层粮堆的温度在一定程度上受控，但粮仓四周仓壁受到阳光照射和地面高温的影响，造成夏季时粮仓仓壁垂直热皮层温度不易控制的行业共性难题，继而引起局部粮食乃至整仓粮食的质量问题^[11]。

针对此现象，曾诚等^[12]在粮仓内四周墙壁安装毛细管网，于管网间填充蓄冷材料，夏季时利用仓内空调的回风系统，使得粮仓空间冷量在毛细管网中循环，继而带走仓墙结构中蓄存的热量，延缓四周粮温升高。武汉轻工大学则通过在仓墙内壁安装多孔轻质隔热板，利用环流风机定向引导冷空气在隔热板的散热圆孔中循环流动，形成动态隔热，并与隔热板自身的静态隔热相结合，构建出动静复合隔热系统，即围护结构动静复合隔热新技术。目前该技术已在武汉国家稻米交易中心有限公司（阳逻库）4 号仓进行实仓应用，

结果显示该技术能有效降低夏季气温对靠近仓壁部位粮温的影响，针对性地解决常规情况下空调控温无法消除“垂直热皮”的问题。根据目前对垂直热皮层的研究发现，新技术以在仓墙内壁四周加设可供冷空气流动的夹缝或管网居多。在实际应用中，应注意进入墙壁夹缝或管网的冷风温度不宜过低，否则可能导致局部粮食结露。

1.3 辐射制冷控温技术

辐射制冷技术自 2014 年在实验室中首次实现以来，近几年来发展迅速，已经出现了涂层、镀膜、织物、柔性薄膜等多种类型的材料^[13-14]。辐射制冷材料是通过将自身表面的能量以辐射的方式（发射不被大气吸收的 8~13 μm 波段的红外线）穿过大气窗口传递到太空，直接实现将物体表面温度降低至环境温度以下的目的。这种降温技术不消耗电能，是一种零能耗制冷技术^[15]。在能源危机日趋显现的当代社会，该技术具有巨大应用潜力和应用前景。

该技术目前已经在粮食储藏中开展实仓应用研究，曾凌沛等^[16]对仓墙做隔热改造，然后用辐射制冷膜对仓房屋面和门窗进行粘贴处理，记录度夏期间屋面、仓内温度的变化，发现试验仓仓温比对照仓显著降低，最大可降 11.8 °C，回温速率也比对照仓慢。张晓培^[17]在仓顶和门窗铺设辐射制冷反射膜、仓墙外围喷涂辐射制冷白色涂料，并开启空调进行控温，从而研究“空调控温+辐射制冷”在夏季时的控温效果。结果发现，仓顶表面温度一直低于环境温度（4±2）°C 左右，未使用制冷设备辅助降温的情况下，仓温一直维持在 30~31 °C。由此可知，使用辐射制冷材料，可以辅助降低仓温。该技术目前在武汉国家稻米交易中心有限公司（汉川库）正在试用，采用仓顶、门窗等部位粘贴辐射制冷膜，并配以空调控温。研究发现，高温季节试验仓与对照仓相比，仓顶外表面温度低于环境温度最高可达 33.7 °C，仓温平均降低约 6.0 °C，中心粮温可降 1~3 °C，全仓平均粮温总体达到了准低温储粮的要求。

在应用过程中，辐射制冷材料也显现出了一些缺点，如制冷功率偏低、易受大气透明度影响等。粮库进出粮时灰尘附着在辐射制冷材料表面，

影响其红外线的发射,进而影响制冷效果。为此,有研究将辐射制冷技术与太阳能集热技术集成应用^[18-19],也有研究开发出环境、气候自适应性的辐射制冷材料,如超疏水辐射制冷材料^[20-22]。其中,超双疏自清洁辐射制冷材料通过化学修饰的方式,降低了涂层的表面自由化学能,构筑合适且牢固的粗糙结构,实现“荷叶效应”自清洁效果。针对传统被动辐射制冷材料价格高、光污染、维护困难等问题,该材料采用漫反射代替镜面反射,用水性制冷涂料产品实现了温度低于环境气温的制冷效果,同时结合表面自清洁技术。目前,超双疏自清洁辐射制冷技术和光伏离网空调控温技术的集成应用在武汉国家稻米交易中心有限公司(阳逻库)正在开展。

1.4 控温节能集成应用效果评价

在集成应用控温节能技术时,首先可采用绿色节能型建筑材料和工艺,提升仓顶、墙等建筑构件的隔热性;其次,综合运用动静态隔热措施,降低建筑能耗;最后,应选用高效低能耗的制冷措施,如充分利用光伏太阳能等可再生能源,实现低碳节能减排,降低作业能耗。武汉国家稻米交易中心有限公司 2023—2024 年数据表明,绿色储粮技术集成应用后,同品种、同年份、同等储存条件的粮食与去年同期相比,仓温最高下降 5.3 °C,平均下降 4.2 °C,最高粮温下降可达 4.7 °C,平均下降 3.5 °C,平均粮温最高下降 2.5 °C,平均下降 2.1 °C,全仓粮食品质得到了保障。

2 新型防虫杀虫技术

粮食在长期储藏过程中,发生虫害的概率较高,如不及时处理,可能造成严重后果。然而,长期使用磷化氢熏蒸等传统做法造成储粮害虫抗药性增加,越来越难以有效杀死害虫。为此,新型防虫杀虫技术应运而生,为探索一种免熏蒸系统提供技术支持。

2.1 食品级惰性粉储粮害虫绿色防治技术

早期,国内外就曾对一些惰性粉作为储粮防虫杀虫剂的可行性进行了研究,如硅藻土、高岭土、沸石粉等,其中对硅藻土的研究较多。硅藻土是一种天然矿物,有着多孔松散的结构,具有

良好的亲水性和吸附性,能够很好地吸附粮食中的水分和有机物。有研究发现,硅藻土能够杀死粮堆内不同抗性程度的杂拟谷盗,可以部分取代目前使用的化学防护剂^[23]。硅藻土中,主要成分为二氧化硅,而符合 GB 25576—2020^[24]规定的二氧化硅可作为食品添加剂。研究发现,按 GB 2760^[25]标准中规定的推荐添加量使用,二氧化硅可用作原粮抗结剂,处理后可制得食品级惰性粉防虫杀虫剂,成为一种新型防虫杀虫剂。

食品级惰性粉是具有一定硬度、比重、粒径、吸附性的多孔结构的微小颗粒,与害虫接触时,可进入害虫关节,造成害虫节间膜磨损破裂,使害虫行为活动受阻。同时,食品级惰性粉还可以吸附害虫的体液/血液,使其逐渐死亡。与磷化氢等化学杀虫剂相比,食品级惰性粉是一种纯物理杀虫技术,具有安全绿色、杀虫广谱、使用方便、害虫无抗性等特点。目前食品级惰性粉储粮害虫绿色防治技术已在武汉国家稻米交易中心有限公司(阳逻库)9、10 号仓进行粮面拌粮的应用实验,虫害相对往年明显减少。但是,单独使用食品级惰性粉控制储粮害虫仍然存在一定的局限性,常作为化学杀虫剂的一种补充手段。首先,全仓拌粮所需食品级惰性粉的量较大,成本会大大提高;其次,在拌入粮堆的过程中,较难做到全仓混拌均匀。在实仓应用中,多采用粮面、通风管道、仓门口或其他易发生虫害的粮堆重点部位喷洒食品级惰性粉进行防虫杀虫。因此,食品级惰性粉常常结合其他储粮技术或其他害虫防治技术一起使用,如气调储藏、准低温储藏等,共同实现防虫杀虫的目的。目前已经发布了惰性粉储粮防虫技术规程^[26]。

2.2 S-烯虫酯储粮害虫绿色防治技术

昆虫激素是昆虫内分泌腺分泌到体外或由体液输送至全身各处的化学物质,分为内激素和外激素^[27],而 S-烯虫酯为昆虫内激素中保幼激素的类似物。与常规化学杀虫剂相比, S-烯虫酯对防治对象具有高度的选择性,用于粮食储藏时,它可以模仿害虫自身的激素,阻碍或干扰储粮害虫体内的激素平衡,造成虫体内分泌紊乱,使得害虫在虫卵、幼虫、虫蛹、成虫等不同生长发育阶

段不能完成变态生长, 最终大大减少粮堆中的害虫数量, 达到防治效果。

目前, 国内已有企业实现了 S-烯虫酯的批量生产, 正在逐步验证 S-烯虫酯绿色储粮技术在实验室和实仓中的应用效果。胡森等^[28]在实验室中研究了 S-烯虫酯对几种常见的储藏物害虫的控制作用, 发现 S-烯虫酯处理后, 可显著影响害虫从卵发育至成虫的成功率。李燕羽等^[29]将小麦入仓全仓拌和 S-烯虫酯后, 分别扦取了 90 d 和 365 d 后的小麦样品, 然后在实验室内模拟了 S-烯虫酯对赤拟谷盗和杂拟谷盗的防治效果, 并测定了 S-烯虫酯对赤拟谷盗和杂拟谷盗幼虫 3 种解毒酶的影响, 发现施药时间和虫态是影响 S-烯虫酯杀虫效果的关键因素。

近五年来, 关于 S-烯虫酯的研究较多, 目前已在多个省的中储粮粮库、地方储备粮粮库的多种储粮品种中开展了 S-烯虫酯的实仓研究。通过对整个储藏期害虫变化的监测发现, 结合粮食入仓时对害虫的消杀处理, S-烯虫酯能使整个储藏期处于基本无虫的状态, 达到较好的防治效果。目前 S-烯虫酯储粮害虫绿色防治技术已在武汉国家稻米交易中心有限公司(阳逻库)3 号仓进行粮面拌粮的应用实验, 相对往年虫害大大减少。但是, 目前 S-烯虫酯的价格相对化学杀虫剂很高, 在粮仓中全面开展应用的费用相对较高。后期, 如果 S-烯虫酯在储粮中能够大范围使用, 生产企业扩大 S-烯虫酯的生产量后, 可能会大大降低药剂成本。同时, 将 S-烯虫酯在储粮中应用的技术规程标准化后, 其在粮食储藏中有较大应用前景。

2.3 多杀霉素储粮害虫绿色防治技术

食品级惰性粉属于物理性防虫杀虫剂, S-烯虫酯属于生物化学类农药^[30], 多杀霉素则属于生物杀虫剂^[31]。多杀霉素又称多杀菌素, 是土壤放线菌中刺糖多孢菌发酵后产生的一种杀虫剂。该杀虫剂能选择性针对储粮害虫进行触杀和摄食毒杀, 对人和哺乳动物非常安全, 兼具化学农药的速效性、生物农药的安全性, 可控制包括双翅目、膜翅目、缨翅目等种类的储粮害虫的数量^[32]。多杀霉素的作用机理是通过作用于害虫特有的烟碱

型乙酰胆碱受体, 导致害虫产生震颤和麻痹, 最终死亡。而人和哺乳动物没有这种受体, 所以多杀霉素对人和哺乳动物无毒。因此, 多杀霉素具有安全、高效、绿色的特点, 同时兼具环境友好、可生物降解的优点。目前多杀霉素在全国多个仓储企业已经开展试用研究, 其中武汉国家稻米交易中心有限公司作为湖北省第一家试点单位推广该技术, 目前在阳逻库 1、2 号仓、汉川库 4、5 号仓正在开展实仓试验。

2.4 新型防虫杀虫技术应用效果评价

多杀霉素虽然被认为具有安全、环保、高效的特点, 但目前在储粮中开展试用时, 同 S-烯虫酯、食品级惰性粉一样, 多为粮面或粮堆重点部位施药, 且常结合准低温储藏、气调杀虫防虫等技术进行集合应用。后期如果要扩大多杀霉素在储粮中的应用, 降低药剂成本和技术规程标准化则是非常重要的一步。武汉国家稻米交易中心有限公司 2023—2024 年数据表明, 应用不同防护剂后, 同品种、同年份、同等储存条件的粮食与去年同期相比, 虫害情况得到明显抑制, 但杀虫针对性有所差异。同时, 可探索储粮防护剂的复配增效, 将具有增效作用的防护剂进行复配, 可以扩大杀虫谱, 降低使用剂量, 提高防治效果。

3 绿色储粮技术的应用建议

本研究所述绿色储粮技术多处于实仓研究中, 尚未完全成熟。在后续应用时, 提出以下建议。

3.1 以准低温粮库建设改造为核心, 着力改善仓储设施硬件环境

准低温储粮目前已经得到了广泛的推广和认可, 虽然用电成本增加, 但降低了轮换、药剂熏蒸费用和粮食数量损耗, 通过保持粮食品质提高粮食销售价格, 综合算账每吨粮食仍是增收的。因此, 在推广新的绿色储粮技术时, 应结合仓储设施建设改造和储粮设施设备更新、技术工艺升级、害虫生物综合防治等工作实践, 以准低温粮库建设改造为核心, 打造良好的仓储设施硬件环境。

3.2 多措并举, 打出绿色储粮技术综合应用“组合拳”

不同的绿色储粮技术具有各自的优点, 在推

动这些技术应用时,采用组合的方式可解决多种问题,为粮食安全更好地保驾护航。如,光伏离网供电项目可节约粮仓空调用电;粮仓垂直热皮层定向控温技术可解决仓壁四周垂直热皮层粮温不易控制的难题;超双疏自清洁辐射制冷技术具备零能耗制冷、自清洁、防冻 3 项功能,解决仓墙隔热问题;食品级惰性粉、多杀霉素、S-烯虫酯等绿色防虫杀虫技术解决害虫抗性与环境问题。这些绿色储粮技术,只有加强集成应用、创新研发,推行“1+N”绿色储粮、智慧储粮集成应用,促进绿色储粮标准体系建立和完善,探索可复制、可推广的绿色储粮典型经验和模式,才能取得较好的社会效益和经济效益。

3.3 用新质生产力赋能高质量发展,强化绿色储粮技术研究与应用

用科技的手段储好粮、管好粮是保障粮食安全的关键一招,加强绿色储粮技术应用,同样需要向科技要动力,向创新要活力。一方面有组织地开展仓储科技成果转化和自主创新,引领科学保粮工作向纵深推进,不断提高仓储科技含量和储粮科技贡献率,加大科研投入力度,紧紧围绕绿色、高效、安全、节能的储粮技术应用体系进行研发。积极推广应用自主研发科研成果,综合应用科技储粮技术;另一方面扎实做好重点项目研发,强化“校企合作”,落地实施粮食产业科技研发校企地合作模式,聚力绿色保粮、科技储粮等关键领域科技攻关,发挥保障粮食安全重要作用。

4 展望

我国当前粮食仓储技术正在朝着智能化、绿色化、安全化方向快速发展,绿色储粮新技术的出现完全契合了当代需求,推动粮食仓储高质量发展已经成为粮食仓储企业的共识和自觉行动。着眼科技运用,坚持科技赋能,用科技的手段储好粮、管好粮是保障粮食安全的关键一招,也是我国粮食仓储行业必走之路。因此,新型控温技术、新型防虫杀虫技术必将成为今后研究的重点。

参考文献:

[1] 陆娅,姚剑军,李以隽. 粮食仓储环境调控技术的现状与发

展[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(1): 4-6.

LU Y, YAO J J, LI Y J. Current situation and development trend of environment control technology of grain storage[J]. Cereals and Oils, 2018, 31(1): 4-6.

[2] 唐芳,程树峰,欧阳毅,等. 储存水分、温度和真菌生长对大豆品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(3): 74-78.

TANG F, CHENG S F, OU Y Y, et al. Effect of moisture, temperature and fungi growth on the quality of stored soybeans [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(3): 74-78.

[3] 粮油储藏技术规范: GB/T 29890—2013[S].

Technical specifications for grain and oil storage: GB/T 29890—2013[S].

[4] 曹阳,魏雷,赵会义,等. 我国绿色储粮技术现状与展望[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(S1): 11-14.

CAO Y, WEI L, ZHAO H Y, et al. Status and prospect of technology of green grain storage in China[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015, 23(S1): 11-14.

[5] 李伟,李世超,王丹. 太阳能光伏发电风险评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 176-180.

LI W, LI S C, WANG D. Risk evaluation of the solar photovoltaic energy project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Sup.1): 176-180.

[6] 闪锦淮. 光伏直驱空调系统性能的理论及实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.

SHAN J H. Theoretical and experimental research on the performance of photovoltaic direct drive air conditioning system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

[7] 杨洪明,许丁中,项胜,等. 适应乡村振兴与可持续发展的农村光伏发电生态补偿优化决策[J]. 农业工程学报, 2023, 39(17): 218-226.

YANG H M, XU D Z, XIANG S, et al. Optimal decision-making method for the ecological compensation of rural photovoltaic power generation adapted to rural revitalization and sustainable energy development[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(17): 218-226.

[8] 张红建,邹易,赵阔,等. 太阳能光伏发电技术在海南地区低温储粮中的应用研究[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(5): 73-76.

ZHANG H J, ZOU Y, ZHAO K, et al. Application on solar photovoltaic power generation technology in low temperature storage of Hainan area[J]. Cereal and Food Industry, 2017, 24(5): 73-76.

[9] 王若兰. 粮油储藏学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016.

WANG R L. Grain and oil storage[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2016.

[10] 郝立群,刘建保,戴志桐,等. 不同地区不同储存条件对储粮“热皮”厚度的研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(7): 124-130.

HAO L Q, LIU J B, DAI Z T, et al. The thickness of hot skin of stored grain under different storage conditions in different areas [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(7): 124-130.

[11] 彭明文,付鹏程,石若愚,等. 垂直热皮控温技术在基建房式

- 仓的优化应用[J]. 粮食储藏, 2024, 53(1): 27-32+9.
- PENG M W, FU P C, SHI R Y, et al. Optimized application of vertical heat skin temperature control technology in infrastructure-type warehouses[J]. Grain Storage, 2024, 53(1): 27-32.
- [12] 曾诚, 丁鹏辉, 钱国良, 等. 仓墙动静态隔热控温储粮试验[J]. 粮食储藏, 2023, 52(2): 15-18+27.
- ZENG C, DING P H, QIAN G L, et al. Design and application of a new type of unpowered dust suppression bucket[J]. Grain Storage, 2023, 52(2): 15-18+27.
- [13] 片思杰, 夏林骁, 田哲源, 等. 辐射制冷技术的物理基础与研究进展[J]. 量子电子学报, 2023, 40(1): 1-21.
- PIAN S J, XIA L X, TIAN Z Y, et al. Fundamentals and research progress of radiative cooling technology[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2023, 40(1): 1-21.
- [14] LI D, LIU X, LI W, et al. Scalable and hierarchically designed polymer film as a selective thermal emitter for high-performance all-day radiative cooling[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(2): 153-158.
- [15] 邹捷书, 李文菁, 苏欢, 等. 辐射制冷技术的发展现状及挑战[J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(3): 80-85.
- ZOU J S, LI W J, SU H, et al. Development and challenge of radiative cooling technology[J]. Journal of BEE, 2023, 51(3): 80-85.
- [16] 曾凌沛, 付鹏程, 刘胜强, 等. 辐射制冷膜对房式仓隔热效果研究[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(4): 44-48.
- ZENG L P, FU P C, LIU S Q, et al. Research on insulation effect of radiationrefrigeration film applied to house type warehouse[J]. Cereals and Oils, 2024, 37(4): 44-48.
- [17] 张晓培. “空调控温+辐射制冷”控温技术储粮试验[J]. 粮油仓储科技通讯, 2023, 39(5): 9-11.
- ZHANG X P. Grain storage experiment using temperature control technology of "air conditioning temperature control + radiation cooling"[J]. Grain and Oil Storage Technology Communication, 2023, 39(5): 9-11.
- [18] MIN X Z, WANG X Y, LI J L, et al. A smart thermal-gated bilayer membrane for temperature-adaptive radiative cooling and solar heating[J]. Science Bulletin, 2023, 68(18): 2054-2062.
- [19] 胡名科, 裴刚, 郑仁春, 等. 太阳能集热-辐射制冷复合表面及其试制与性能分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1248-1254.
- HU M K, PEI G, ZHENG R C, et al. Preliminary manufacture and analysis of a spectral selectivity surface for both solar heating and radiative cooling[J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2016, 37(5): 1248-1254.
- [20] 柳冰莹. 超疏水辐射自降温聚合物复合材料的制备与性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2023.
- LIU B Y. Fabrication and properties of superhydrophobic radiative cooling polymer composites[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2023.
- [21] 聂仕晋. 兼具超疏水与辐射制冷功能的薄膜制备与性能研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- NIE S J. Fabrication and properties of the films with superhydrophobic and radiative cooling functions[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2023.
- [22] 徐骋峰. 一种超疏水辐射制冷涂料的实验及理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- XU C F. Experimental and theoretical research on a superhydrophobic radiative cooling paint[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [23] 孟宏杰, 张婷, 陈二虎, 等. 硅藻土对 5 种储粮害虫和不同磷化氢抗性水平杂拟谷盗防治效果的研究[J]. 植物保护, 2020, 46(6): 240-245.
- MENG H J, ZHANG T, CHEN E H, et al. Control effect of diatomaceous earth on five stored grain pests and *Tribolium confusum* with different phosphine resistance levels[J]. Plant Protection, 2020, 46(6): 240-245.
- [24] 食品安全国家标准 食品添加剂二氧化硅: GB 25576—2020 [S].
- National food safety standard food Additive Silicon Dioxide: GB 25576—2020 [S].
- [25] 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准: GB 2760—2024[S].
- National food safety standards for the use of food additives: GB 2760—2024[S].
- [26] 惰性粉储粮防虫技术规程: LS/T 1227—2022[S].
- Code of practice for inert dust against insects pests in grain storage: LS/T 1227—2022[S].
- [27] 任剑豪, 吴卫国, 宗平, 等. 储粮害虫生物防治技术研究进展[J]. 粮油食品, 2020, 28(6): 218-222.
- REN J H, WU W G, ZONG P, et al. Research progress on bio-control technology of stored-grain pests[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(6): 218-222.
- [28] 胡森. S-烯虫酯对重要储藏物害虫控制作用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
- HU S. Efficacy of S-methoprene on several major stored products insects[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.
- [29] 李燕羽, 胡铁源, 姜雪, 等. S-烯虫酯防治拟谷盗持效性及解毒酶功能影响研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(5): 42-52.
- LI Y Y, HU T Y, JIANG X, et al. Simulation study on long-lasting effectiveness of S-methoprene on tribolium species and activity of detoxification enzyme[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(5): 42-52.
- [30] 李燕羽, 穆海亮, 胡铁源, 等. 生物化学农药 S-烯虫酯防治储粮害虫研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 27-36.
- LI Y Y, MU H L, HU T Y, et al. Advances in research and development of biochemical pesticides of methoprene and control of stored product insects[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(10): 27-36.
- [31] 郭超, 郭伟群, 张维清, 等. 多杀霉素综合防治储粮害虫技术研究[J/OL]. 中国粮油学报: 1-10 [2024-06-13].
- GUO C, GUO W Q, ZHANG W Q, et al. Development integration application technology of spinosad to control stored grain pests[J/OL]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association: 1-10[2024-06-13].
- [32] 华乃震. 绿色环保生物杀虫剂多杀霉素和乙基多杀菌素的述评[J]. 农药, 2015, 54(1): 1-5.
- HUA N Z. A review of green biological insecticide spinosad and spinetoram[J]. Agrochemicals, 2015, 54(1): 1-5. 完