S-烯虫酯实仓应用防效评估及对稻谷品质的影响

王沁园[1] 薛丁榕[1] 穆海亮[2] 郑 妙[2] 方 治[3] 黄呈兵[4] 伍 祎[1*]

（1. 国家粮食和物资储备局科学研究院，粮食储运国家工程研究中心，北京 100037；2. 浙江中保粮生物科技有限公司，台州 317599；3. 张家港市粮食产业发展有限公司，江苏 张家港 215699；4. 福建省储备粮管理有限公司仙游直属库，莆田 351253）

摘要：为明确S-烯虫酯对储粮害虫的控制效果，在高大平房仓内分别采用粮面施药和全仓施药两种方法对稻谷进行防护处理，均通过皮带输送机利用多角度超低容量喷施设备施药，分析两种施药方法在害虫防治、施药均匀性及持效性和稻谷品质保持方面的效果。结果表明：施药后30 d，两种施药方法处理下4种代表性储粮害虫谷蠹*Rhyzopertha dominica*、玉米象*Sitophilus zeamais*、赤拟谷盗*Tribolium castaneum*和长角扁谷盗*Cryptolestes pusillus*的死亡率均达97.6%以上，显著优于未施药对照组。在均匀性方面，全仓施药后对距粮面0.2、3.0和5.8 m三层高度共24个检测点的检测发现，87.5%的粮食上药剂浓度达到喷施浓度，且不同深度和同一层高度不同检测点粮食上的药剂浓度均匀，无显著差异；粮面施药后对距粮面0.2、1.0和2.0 m三层高度共24个检测点的检测发现，药剂浓度从表层到粮堆内部依次减少，说明全仓施药的均匀性优于粮面施药。在持效性方面，采用8.50 mg/kg的浓度全仓施药后18个月，稻谷出仓时药剂浓度不低于1.08 mg/kg，仍维持在S-烯虫酯的有效杀虫浓度范围内；且全仓施药后18个月的储粮周期内基本无害虫发生，粮面施药在施药后6个月内可起到较好的防护效果，但在越夏时局部发生虫害，需结合局部杀虫处理技术进行害虫控制。在粮食品质方面，两种施药处理与硫酰氟熏蒸对照组均无明显差异。表明S-烯虫酯全仓施药在防虫效果、均匀性、持效性以及安全性方面具有明显优势，可以作为储粮害虫综合防控的有力手段，助力粮食行业化学药剂减量。

关键词：S-烯虫酯；实仓应用；全仓施药；粮面施药；害虫防治；稻谷品质

Evaluation of the efficacy of S-methoprene in practical grain storage and its effects on rice quality

Wang Qinyuan[1] Xue Dingrong[1] Mu Hailiang[2] Zheng Miao[2] Fang Zhi[3] Huang Chengbing[4] Wu Yi[1*]

（1. National Engineering Research Center for Grain Storage and Transportation, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. Zhejiang Zhongbaoliang Biotechnology Co., Ltd., Taizhou 317599, Zhejiang Province, China; 3. Zhangjiagang Grain Industry Development Co., Ltd., Zhangjiagang 215699, Jiangsu Province, China; 4. Xianyou Depot, Fujian Grain Reserves Co., Ltd., Putian 351253, Fujian Province, China）

Abstract: To evaluate the control efficacy of S-methoprene against stored-grain pests, protection treatments were conducted in large flat warehouses using two application methods: grain-surface treatment and full-warehouse treatment. Both methods applied the insecticide with a multi-angle ultra-low-

基金项目：国家粮食和物资储备局科学研究院财政预算项目（CZ2025LCXM1101-01），国家粮食和物资储备局科学研究院技术服务项目（H22085，H23097）

* 通信作者（Author for correspondence），E-mail：wuyi@ags.ac.cn

收稿日期：2025-06-13

volume sprayer mounted on a belt conveyor. Their performance was assessed in terms of pest control, application uniformity, persistence, and the maintenance of rice quality. The results showed that 30 days after treatment, the mortality of four representative stored-grain pests, *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus zeamais*, *Tribolium castaneum*, and *Cryptolestes pusillus*, reached at least 97.6% under both application methods, significantly higher than the untreated control. Regarding uniformity, in the full-warehouse treatment, 87.5% of grain samples collected from three depth layers (0.2, 3.0, and 5.8 m; 24 sampling points in total) reached the target concentration, and pesticide concentrations showed no significant variation across depths or sampling points at the same height. In contrast, in the surface-treatment method, pesticide concentrations gradually decreased from the surface toward the interior, indicating superior uniformity with full-warehouse application. In terms of persistence, when S-methoprene was applied at 8.50 mg/kg using the full-warehouse method, the pesticide concentration remained no lower than 1.08 mg/kg at warehouse exit 18 months, still within the effective insecticidal range. Almost no pest occurrence was observed during these 18 months. Surface application provided good protection within the first six months; however, localized infestations occurred during summer, requiring supplementary local treatments. No significant differences in rice quality were observed among either S-methoprene treatments or the sulfuryl fluoride fumigation control. Overall, full-warehouse application of S-methoprene exhibits distinct advantages in efficacy, uniformity, persistence, and safety, and can serve as an effective approach for integrated stored-grain pest management while promoting reduced pesticide use in the grain industry.

Key words: S-methoprene; warehouse application; full-warehouse application; surface application; pest control; rice quality

保障粮食的数量和质量安全是我国粮食安全战略中的首要任务。在粮食储藏期间，温度、湿度、气体等非生物因素以及害虫和霉菌等生物因素都会对粮食安全产生重要影响（Manandhar et al.，2018）。其中，储粮害虫是威胁粮食安全的主要因素之一，其导致的损失约占粮食产后总损失的30%~40%（Kumar & Kalita，2017；Mng’ong’o，2023；Ragasruthi et al.，2024）。储粮害虫的发生不仅直接导致粮食储量的减少，还会降低粮食的营养价值，如游离脂肪酸和水分含量的增加，以及蛋白质含量的减少（Paul et al.，2020）。同时储粮害虫还会改变储粮微环境，促使粮堆局部温度和水分条件恶化，从而加剧真菌和微生物的危害，导致粮食霉变。此外，储粮害虫残体及其代谢物还会污染粮食，可能引起消费者发生过敏反应，对消费者的健康构成潜在威胁（Hubert et al.，2018；Kumar et al.，2022）。因此，有效控制储粮害虫对于确保粮食安全至关重要。

我国农业农村部在2022年发布《到2025年化学农药减量化行动方案》，提出要建立和完善环境友好、生态包容的病虫害综合防控技术。随着环境保护意识的提升以及消费者对食品安全关注度的增加，对农药筛选和使用标准的要求日益严格，推动了低毒、环保型生物农药的研究与开发。其中，昆虫生长调节剂是一种生物源农药，因其对环境和非靶标生物的影响较小而受到广泛关注（Krismawati et al.，2024）。S-烯虫酯作为一种人工合成的保幼激素类昆虫生长调节剂能够有效防控储粮害虫（FAO & WHO，2020），其作用机制是通过干扰昆虫正常的生长发育过程，使其发生滞育现象，形成超龄幼虫或中间体，从而抑制昆虫的繁殖（Naruse et al.，2020）。1973年，烯虫酯首次成功应用于储藏物害虫的防治（Wijayaratne et al.，2018）；1980年，烯虫酯作为储粮害虫杀虫剂正式进入市场（Arthur，2004）；1982年，美国监管机构将烯虫酯列为生物化学农药（胡森，2023）；2002年，烯虫酯的有效成分升级为S-烯虫酯（Arthur，2016）。目前，烯虫酯在北美洲和欧洲被广泛应用（李峰等，2020），能有效防治谷蠹 *Rhyzopertha dominica*、玉米象 *Sitophilus zeamais*、赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*、米象 *Sitophilus oryzae* 和锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis* 等储粮害虫（Daglish et al.，1995）。然而，S-烯虫酯在中国的研究起步较晚，直至2018年才被正式列为生物化学农药（白小宁等，2019）。S-烯虫酯以其绿色高效的特点有望成为储粮害虫防控的新型防护药剂，助力于实现粮食行

业化学药剂减量增效保质的储粮需求。

目前，国内针对S-烯虫酯对多种储粮害虫的防治效果已进行了初步评估，邹易等（2023）研究发现7 mg/kg浓度的S-烯虫酯能在90 d内完全控制谷蠹成虫的生长；姜雪等（2022）研究结果表明5 mg/kg浓度的S-烯虫酯能有效抑制米象和玉米象成虫，并显著减少其子代种群数量；王沁园等（2025）研究结果显示5 mg/kg浓度的S-烯虫酯对不同品系谷蠹成虫及其子代种群均有抑制作用。但S-烯虫酯对害虫的防控效果受环境条件、施药方法、储粮时间等多种因素的影响，本研究通过对比全仓施药与粮面施药两种方法对储粮害虫的防治效果和实仓应用的均匀性和持效性差异，以及施药前后粮食品质的变化，评估S-烯虫酯实仓应用的防控效果和对粮食质量的保持情况，以期为S-烯虫酯在实际仓储条件下施用技术和工艺的优化提供参考，为制订更加精准的储粮害虫防治策略提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料

供试试验仓：共有3个高大平房仓，分别为1号仓、2号仓和3号仓，仓房规格均为长20.5 m×宽14.5 m×高8.0 m，稻谷堆高度为6.04 m，仓容1 046 t。

供试昆虫：4种代表性储粮害虫谷蠹、玉米象、赤拟谷盗和长角扁谷盗*Cryptolestes pusillus*均由国家粮食和物资储备局科学研究院提供，在温度（27±1）℃、相对湿度（70±1）%、全黑暗条件下扩繁培养多代，均取成虫供试。

药剂、试剂及仪器：1% S-烯虫酯（S-methoprene）水乳剂，中保粮生物科技有限公司；硫酰氟（sulfuryl fluoride），山东省龙口市化工厂。黄曲霉毒素B1快速检测试剂盒，河北芮路生物科技有限公司；其余试剂均为国产分析纯。智喷喷®超低容量喷施机，中保粮生物科技有限公司；PL602E型电子分析天平以及HE53型水分测定仪，梅特勒–托利多仪器（上海）有限公司；JDMZ100型稻谷出米率检测仪、JMWT-12型大米外观品质检测仪、JCXG型大米测鲜仪和JC-SWJ-B型大米食味测定仪，北京东孚久恒技术有限公司；Memmert HPP 750型恒温恒湿培养箱，德国美墨尔特有限公司；孔径为38 μm的尼龙网虫笼，规格为长24 cm×宽17 cm，由国家粮食和物资储备局科学研究院自制；pp材质密封箱，规格为长55.0 cm×宽40.0 cm×高31.5 cm，北京玖通科贸有限责任公司。

1.2 方法

1.2.1 试验仓S-烯虫酯的施用方式

1号仓、2号仓及3号仓的入仓时间均为2023年3月6日，入仓后仓房环境条件保持一致，具体为仓温23 ℃、仓内相对湿度69%，均采用自然通风模式调控仓内环境。其中，1号仓进行S-烯虫酯全仓施药处理，在粮食输送进仓的过程中，将超低容量喷施机架设在皮带输送机上，根据输送机速度调整S-烯虫酯水乳剂喷施量，以保证仓内所有稻谷都受到S-烯虫酯的有效保护，施药浓度为8.50 mg/kg。2号仓进行S-烯虫酯粮面施用处理，采用皮带输送机将粮食输送进仓，预估粮仓进粮达到2/3时，将超低容量喷施机架设在输送机上，对剩余约1/3进粮进行处理，施药浓度为8.50 mg/kg。3号仓作为对照仓，根据实仓保粮情况，基于粮食安全，安排未作任何处理的实仓进行对照较难，因此本研究使用硫酰氟进行全仓熏蒸处理作为药剂对照，施药浓度为17 g/m^3。

1.2.2 S-烯虫酯施用后对害虫的防治效果检测

采用虫笼法和筛检法评估施用S-烯虫酯对害虫的防治效果。虫笼法试验为期60 d，选取谷蠹、玉米象、长角扁谷盗和赤拟谷盗各50头成虫置于同一个虫笼中，将虫笼分别放置在1.2.1中全仓施药和粮面施药粮仓的粮面四角及中心5个位置，取出粮仓中相应位置的一小部分粮食装入虫笼并封口，在粮面四角虫笼埋藏深度约为15 cm，在中心其埋藏深度约为50 cm。在粮食进仓施药前，对未施药的原粮进行随机取样，将所取样品置于长55.0 cm×宽40.0 cm×高31.5 cm的pp材质密封箱中作为对照组，在施药结束后放进各仓中，每个仓内的对照箱中同样放入一个虫笼装入未施药的粮食并封口，以确保不会接触到任何药剂。药后30 d和60 d时分别对虫笼中的虫体死亡情况进行观察和记录，并于第60天将所有虫笼取出，结束试验，计算试虫死亡率，死亡率=死亡数/试虫数×100%。前期在实验室内使用相同的8.5 mg/kg浓度S-烯虫酯进行预试验，在处理第15天时谷蠹、玉米象、长角扁谷盗和赤拟谷盗的死亡率依次为41%、14%、61%和11%，因此本研究虫笼试验的观察时间延长至60 d。

试验期间根据《粮油储藏技术规范》（GB/T 29890—2013）中粮食储藏期间粮情与品质质量检测要求，采用筛检法对1.2.1中3个处理粮仓的粮堆表面进行筛检，检测害虫的自然发生情况，每个月检测1次，共检测18个月。在此期间对粮仓内的仓温、粮温和仓湿进行实时监测。

1.2.3 S-烯虫酯施用后的均匀性和持效性检测

通过对不同层检测点之间的药剂浓度进行检测对比来评价S-烯虫酯均匀性。S-烯虫酯浓度检测点设置时以粮仓的宽为基准，将整个粮仓大致划分为两个边长约14.5 m的正方形，参考《粮油储藏技术规范》（GB/T 29890—2013）中五点法取样，每个正方形粮仓进行1次五点取样，两个正方形中间分界线上的4个点两两重合进一步合并为两个点，即整个粮仓共计8个点，每个点分上、中、下3层，共24个采样点。鉴于施药方法不同，因此取样时粮堆上、中、下3层的层高设置不同，1号仓为全仓施药，采样层设为距粮面0.2、3.0和5.8 m；2号仓为粮面施药，采样层设为距粮面0.2、1.0和2.0 m，分别在施药结束后第2天进行抽样检测1次。检测方法依照《食品安全国家标准 植物源性食品中331种农药及其代谢物残留量的测定：液相色谱-质谱联用法》（GB 23200.121—2021）进行。

鉴于2号仓在粮食入仓后发生了虫害，因此进行了两次施药，持效期检测仅在全仓施药的1号仓开展。在1号仓为期18个月的储藏周期内，分别于入仓时、入仓6个月时以及出仓时（即18个月时）对S-烯虫酯浓度进行3次检测，通过对比分析不同时间节点S-烯虫酯浓度来评估其持效性。检测时按照均匀性取样点，每层8个点取样后混合为1个样品进行S-烯虫酯浓度的检测，并计算药剂降解率。降解率=（药剂初始浓度-样品检测浓度）/药剂初始浓度×100%。

1.2.4 S-烯虫酯施用后的粮食品质检测

两种施药方式施药后粮食品质检测的取样点设置与1.2.3中全仓施药粮仓中取样点相同，每点分上、中、下3层，分别在距粮面0.2、3.0、5.8 m处抽样，每层8个点取样后混为1个样品，获得3个重复样品，对样品水分、出糙率、黄粒米率、新鲜度、食味值、脂肪酸值和黄曲霉毒素共7个指标进行检测，分析粮食品质变化。

水分含量根据《食品安全国家标准 食品中水分的测定》（GB/T 5009.3—2016）测定，出糙率依据《粮油检验 稻谷出糙率检验》（GB/T 5495—2008）测定，黄粒米率依据《粮油检验 稻谷黄粒米含量测定-图像分析法》（GB/T 35881—2018）测定，新鲜度依据《粮油检验 稻谷新鲜度测定与判别》（LS/T 6118—2017）测定，脂肪酸值依据《稻谷储存品质判定规则》（GB/T 20569—2006）中附录A脂肪酸值测定方法测定，食味值采用JC-SWJ-B型大米食味测定仪测定，黄曲霉毒素使用黄曲霉素B1快速检测试剂盒测定。

1.3 数据分析

采用SPSS 25.0统计软件对试虫死亡率和不同储藏时间的稻谷品质指标进行单因素方差分析，应用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。柱状图用Origin 2021软件进行绘制，散点图用Graph-Pad Prism 10.1.2软件绘制。

2 结果与分析

2.1 S-烯虫酯对储粮害虫的防治效果

全仓施药的1号仓和粮面施药的2号仓中4种储粮害虫在药后30 d时的死亡率均显著低于未施药对照组，其中1号仓和2号仓中谷蠹和长角扁谷盗的死亡率均达到了100.0%，玉米象和赤拟谷盗的死亡率均在97.6%以上（图1）。施药后60 d时1号仓和2号仓中4种害虫的死亡率均为100.0%，表面筛检后也未发现任何种类的成虫及幼虫；而未施药对照组试虫的死亡率仍然显著低于全仓施药和粮面施药处理组，且发现了F_1代成虫及幼虫。表明S-烯虫酯通过全仓施药和粮面施药在30 d内即能起到很好的防护作用，并且能有效防治谷蠹、玉米象、长角扁谷盗和赤拟谷盗这4种常见储粮害虫。

粮面施药的2号仓在施药4个月后，粮堆出现局部深层发热现象，在粮仓平均温度为18 ℃的情况下，东北角温度高达31 ℃，在距离粮面3.6~4.8 m处发现玉米象成虫，约4头/kg，为确保粮食安全，采用硫酰氟进行局部熏蒸杀虫。这表明采用粮面施用S-烯虫酯时，对入仓粮带虫情况、杂质和水分有较高要求，若粮仓入粮时为有虫粮，害虫容易在未施用药剂的粮仓底部发生，在越夏时存在害虫发生的风险，需在做好应急控虫措施的同时，联合害虫监测和其他技术手段进行综合防治。

2.2 实仓中喷施S-烯虫酯浓度均匀性分析

全仓施药的1号仓在距粮面0.2、3.0和5.8 m三层的24个检测点中，有21个检测点的药剂浓度基本维持在8.50 mg/kg左右，3层深度药剂浓度的差距很小，平均分别是8.62、8.69及8.57 mg/kg，即入仓时全仓87.5%的粮食药剂浓度达到喷施浓度且均匀分布（图2-A）。其中药剂最低浓度的检测点距粮堆表面5.8 m处，为3.5 mg/kg，药剂浓度最高的检测点距粮堆表面3.0 m处，为13.1 mg/kg，除此之外，其余点位药剂整体浓度位于喷施的总浓度范围内。表明通过皮带输送机绑定超低容量喷施机施药能有效保障S-烯虫酯在粮堆内均匀分布。

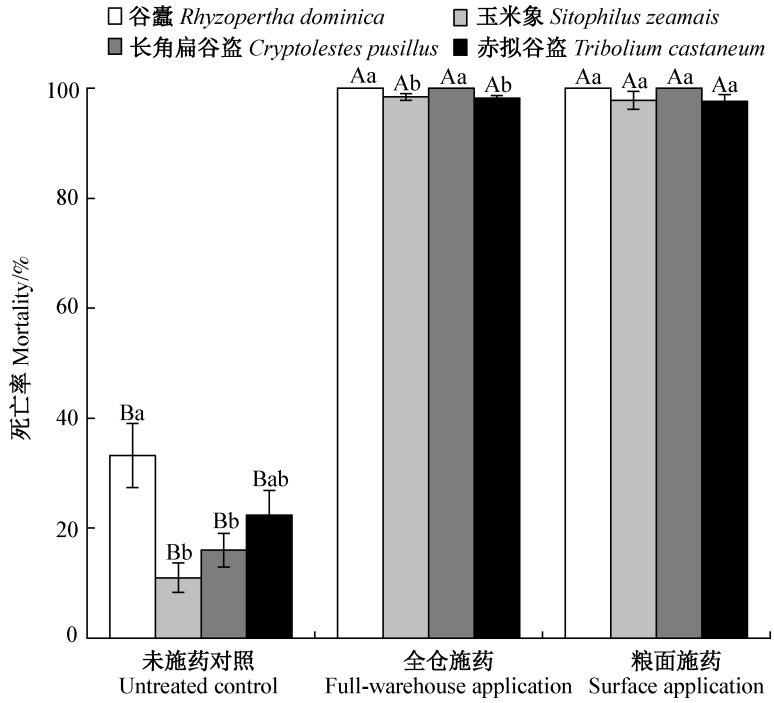


图1 S-烯虫酯处理后30 d时不同仓库中4种储粮害虫的死亡率

Fig. 1 Mortality of four stored-grain pests in different warehouses 30 days after treatment with S-methoprene

图中数据为平均数±标准误。不同大写字母表示同一害虫在不同仓库之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著(P<0.05)；不同小写字母表示同一仓库内不同害虫之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著(P<0.05)。Data are mean±SE. Different uppercase letters indicate significant differences among warehouses for the same pest species according to Duncan's new multiple range test (P<0.05). Different lowercase letters indicate significant differences among different pest species within the same warehouse as determined by Duncan's new multiple range test (P<0.05).

粮面施药的2号仓在距粮面0.2、1.0和2.0 m三层共24个检测点的检测结果显示，S-烯虫酯浓度从表层到粮堆内部依次减少，在距粮面0.2 m层各检测点的药剂浓度最高，平均达到9.05 mg/kg，距粮面1.0 m和2.0 m层的药剂浓度平均为7.09 mg/kg和6.4 mg/kg（图2-B）。粮面施药主要是为了减少人工成本，提高表面施药机械化程度，粮面施药仓虽然施用药剂浓度与全仓施药仓折算喷施药剂浓度相近，但由于粮面施药是待入仓的粮食大概达到2/3后，在未平整粮面的情况下，通过皮带输送机施药于剩余粮食，因此距粮面2.0 m处的部分粮食未能喷施上S-烯虫酯，故粮堆深层粮食上药剂的平均浓度较低。

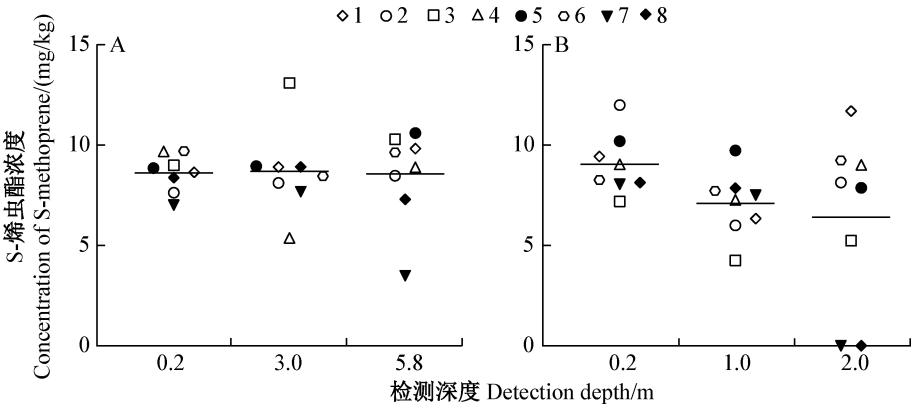
2.3 S-烯虫酯在粮食储藏时间内的持效性

针对全仓施药的1号仓，在实仓封闭的储藏条件下，经过6个月，S-烯虫酯浓度从最初的8.57~8.69 mg/kg下降至4.33~5.57 mg/kg；历经18个月的完整储藏周期至出仓时，S-烯虫酯浓度介于1.08~1.44 mg/kg之间（图3）。即随着储藏时间的延长，S-烯虫酯浓度逐渐减少，平均浓度由入仓喷施时的8.63 mg/kg逐渐降低至6个月时的5.02 mg/kg，再到出仓时的1.31 mg/kg；6个月内的降解率为41.83%，18个月内的降解率为84.82%。通过粮堆内和日常粮面害虫筛查，1号仓在全周期内没有虫害发生，粮温未出现异常，由此可见全仓施药在整个储藏周期内S-烯虫酯浓度仍能保持在有效防控储粮害虫的浓度范围内。

2.4 S-烯虫酯对粮食品质的影响

对储藏周期内稻谷品质的检测结果表明，全仓喷施和粮面喷施S-烯虫酯后，稻谷品质保持良好，在18个月的储藏时间内，硫酰氟熏蒸对照仓和粮面施药的2号仓因期间虫害发生导致水分含量略有升高，而全仓施药的1号仓内粮食水分含量保持较好；在出糙率和黄粒米率方面，硫酰氟熏蒸对照仓和两个S-烯虫酯处理粮仓之间均差异不显著，各仓样品保持在优质稻谷标准内；在新鲜度和食味值方面，全仓施药的1号仓和粮面施药的2号仓稻谷的这2个指标下降程度较硫酰氟熏蒸对照仓缓慢，即S-烯虫酯有效延缓了稻谷新鲜度和食味值的降低；脂肪酸值随储藏时间的延长而升高，储藏18个月后全仓施

药的1号仓稻谷的脂肪酸值仍保持在宜存范围内（≤25 mg/100 g），显著低于硫酰氟熏蒸对照仓和粮面施药的2号仓，S-烯虫酯全仓施用有效延缓了脂肪酸值的上升（图4）。整体来看，全仓施用S-烯虫酯能保持稻谷水分含量，减少稻谷质量损失，且不会加速稻谷脂类氧化酸败，稻谷品质保持较好。



1~8为同一层不同药剂浓度检测点。1~3依次位于靠近粮仓北向边缘从左到右3个点，4~5为粮仓中间从左到右2个中心点，6~8为粮库靠南边缘从左到右3个点。1−8 represent the sampling points for detecting pesticide concentrations within the same layer. Points 1−3 are located from left to right along the north-facing edge of the warehouse; points 4−5 are two central sampling points arranged from left to right in the middle of the warehouse, and points 6−8 are located from left to right along the south-facing edge of the warehouse.

图2　全仓施药1号仓（A）和粮面施药2号仓（B）中S-烯虫酯的浓度

Fig. 2　Concentrations of S-methoprene after application in Warehouse No. 1 with full-warehouse treatment (A) and Warehouse No. 2 with surface treatment (B)

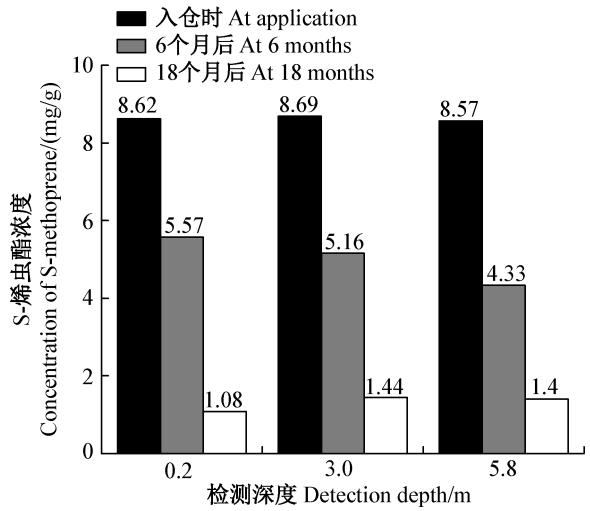


图3　全仓施药仓在储藏时间内的S-烯虫酯浓度

Fig. 3　Concentration of S-methoprene in the full-warehouse treatment during the storage period

3　讨论

本研究结果表明，将S-烯虫酯通过全仓施药和粮面施药对虫笼中害虫的致死效果在30 d时差异不显著，但均显著高于不施药对照组。即S-烯虫酯喷施于稻谷30 d后能有效控制长角扁谷盗、谷蠹、玉米象和赤拟谷盗这4种常见的储粮害虫，且全仓施用S-烯虫酯能减少其成虫数量，同时有效防止F_1代繁殖，这与Sakka et al.（2024）发现烯虫酯处理能使不同品系谷蠹成虫达到10%~27%的死亡率且影响雌虫产卵的结果一致。在两种施药方法中，全仓施药基本能实现药剂在粮堆中均匀分布，而粮面施药后药剂从粮面到粮堆内部呈减少趋势。因此全仓施药和粮面施药后储粮害虫防治效果存在差异，全仓施药的1号仓在18个月的储藏周期内未发生虫害现象，而粮面施药的2号仓，由于局部水分偏高导致粮面下没有施药的3.6~4.8 m深处局部点上发生虫害。粮面下0.5 m处表层是储粮害虫最易发生的地方，S-烯虫酯在粮面害虫的防控中虽起到了有效作用，但是粮库储备量大，入仓粮食水分、杂质不均匀以及入仓虫情水平差异大，均导致粮堆中未施药隐患点发生虫害。因此，在实际应用中，对于两种不同的施药方法，应从经济效益和入仓粮食状况出发进行合理选择。全仓施药防护效果好，防效周期长，即使粮食中自带有虫卵和害虫也能达到理想的防治效果。粮面施药更适合基本无虫粮储藏，针对表面防护时，根据入仓粮情，控制好杂质和水分，如为带虫粮可结合熏蒸和气调等技术对入仓后的粮食进行快速杀虫，再结合S-烯虫酯进行全储藏周期防护。

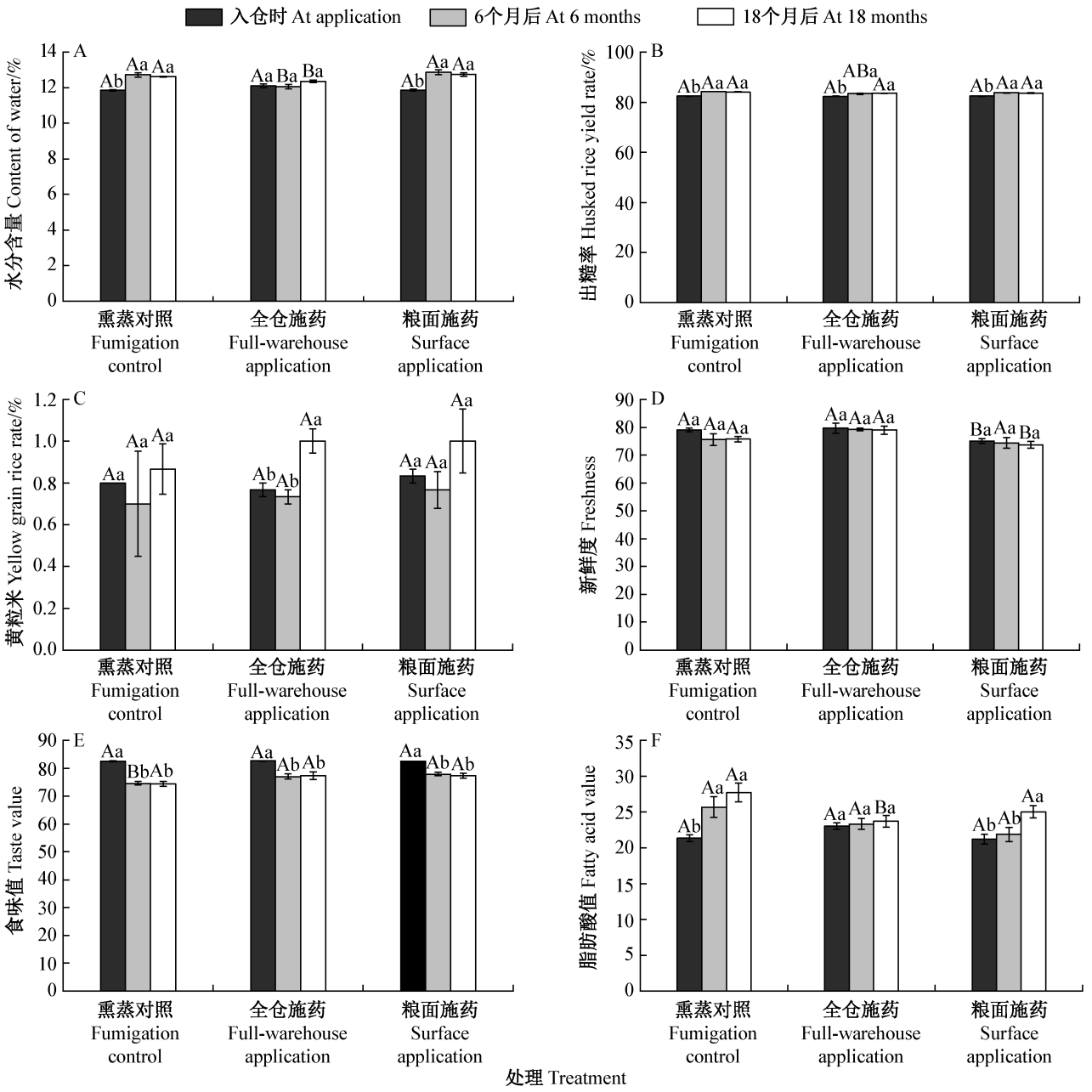


图4 S-烯虫酯对不同仓库中稻谷品质的影响

Fig. 4 Effects of S-methoprene on rice quality in different warehouses

图中数据为平均数±标准误。不同大写字母表示同一储藏时间不同仓库间经Duncan氏新复极差法检验差异显著(P<0.05)。不同小写字母表示同一仓库不同储藏时间经Duncan氏新复极差法检验差异显著(P<0.05)。Data are mean±SE. Different uppercase letters indicate significant differences among warehouses at the same storage time as determined by Duncan's new multiple range test (P<0.05). Different lowercase letters indicate significant differences among storage times within the same warehouse as determined by Duncan's new multiple range test (P<0.05).

S-烯虫酯的持效性是储粮害虫防治效果的指标之一,S-烯虫酯在紫外线下易分解(Hu et al.,2024),而粮仓是密闭环境不易被太阳照射,适宜使用该防护剂,在粮仓中施用S-烯虫酯比在大田施用时更能有效防止其分解,有利于S-烯虫酯浓度的维持,并且前期研究表明1.25~5.00 mg/kg的S-烯虫酯对谷蠹能起到较好的控制作用,2.5 mg/kg及以上浓度的S-烯虫酯能有效抑制谷蠹的生长繁殖(王沁园等,2025)。S-烯虫酯在实仓中储藏18个月的降解率为84.82%,而5 mg/kg浓度的有机磷农药乐果在土壤中160 d内的降解率约为80%(Meftaul et al.,2023),相比较而言S-烯虫酯的降解周期更长,持效性更

好。药剂的持效性与农药残留也密切相关，持效性过强的农药往往难以被降解，在环境中的残留量过高时会增加农药残留超标的风险，同时也给环境带来了更大的压力（Wang et al.，2024）。在美国将烯虫酯用于防治食品害虫幼虫时，其残留量无限制要求（苏天运和刘洪霞，2024）。我国《食品安全国家标准食品中农药最大残留限量》（GB 2763—2021）规定，S-烯虫酯在稻谷中的最大残留限量为10 mg/kg，虽然在实际应用时基本不会超过10 mg/kg，但应根据S-烯虫酯的降解趋势，合理选择初始施用浓度，在保障防治效果的同时经济高效用药。

近年来，防护剂在实仓中的应用难以打开市场，主要有以下两点原因：一是施药工艺的便捷性和均匀性，由于防护剂施用过程机械化和自动化程度低，导致人力成本很高，难以推广应用。在本研究中，针对药剂喷施的相关设备进行了开发配套，在空仓处理时使用了雾空空®双系统雾化机，在皮带输送机上使用了智喷喷®超低容量喷施机，适用于我国常见的高大平房仓，解决了大型粮库缺少自动施药设备，以及施药效率低、均匀性差等难题，还减少了每仓1~2人的劳力成本，提升了机械化应用。二是防护剂应用的安全性和经济性。S-烯虫酯在实仓应用中的施用量一般不会超过最大残留限量10 mg/kg，施用安全；同时S-烯虫酯不影响粮食品质，本研究中稻谷品质在施药后18个月仍保持良好，表明S-烯虫酯在有效防控害虫的同时有效保持了稻谷的品质。S-烯虫酯对哺乳动物的毒性极低，半数致死量大于34.5 g/kg，远高于常见杀虫剂（Phillips & Throne，2010），适宜用于储粮害虫的防治。但是，相对于化学熏蒸剂，防护剂使用成本偏高，面对成本应用问题，一方面需要生产企业优化生产流程，降低成本，另外也需要行业和政府加大绿色防护技术的配套政策支持，推动绿色防护剂的落地应用。实仓应用中需进一步完善S-烯虫酯与其他绿色防控技术的联合应用，细化针对生态区、粮食品种及害虫种类的精准用药。S-烯虫酯以其绿色生态和长效的优势，将助力化学药剂减量增效，成为储粮害虫绿色防控的重要技术之一。

皮带输送机上采用多角度智超低容量喷施设备进行S-烯虫酯全仓施用和粮面施用，均能起到防治储粮害虫、延缓稻谷品质劣变的效果，两种施药处理30 d内能有效控制代表性储粮害虫，从长期储藏的角度来看，全仓施药后药剂分布均匀，入仓后87.5%的粮食上药剂达到既定防护浓度；且持效性长，18个月的储藏周期内仍能维持在1.31 mg/kg左右的有效杀虫浓度。综上所述，全仓施药对储粮害虫的防治效果优于粮面施药，采用S-烯虫酯进行储粮防护时，需根据入仓粮情，采用综合防控措施。S-烯虫酯应用配套机械化程度高，药剂分布均匀，人力成本低，防虫保质效果显著，是储粮害虫综合防控的有效手段。

参 考 文 献（References）

Arthur FH. 2004. Evaluation of methoprene alone and in combination with diatomaceous earth to control *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) on stored wheat. Journal of Stored Products Research, 40(5): 485−498

Arthur FH. 2016. Efficacy of methoprene for multi-year protection of stored wheat, brown rice, rough rice and corn. Journal of Stored Products Research, 68: 85−92

Bai XN, Li YS, Wang N, Yang M, Wu J, Wang YY, Gao WL. 2019. New pesticides registered in China in 2018. Agrochemicals, 58(3): 165−169 (in Chinese) [白小宁, 李友顺, 王宁, 杨锴, 吴剑, 王以燕, 高万林. 2019. 2018年我国登记的新农药. 农药, 58(3): 165−169]

Daglish GJ, Eelkema M, Harrison LM. 1995. Chlorpyrifos-methyl plus either methoprene or synergized phenothrin for control of Coleoptera in maize in Queensland, Australia. Journal of Stored Products Research, 31(3): 235−241

FAO, WHO. 2020. Pesticide residues in food 2019: joint FAO/WHO meeting on pesticide residues evaluation part I: residues. Rome, Italy: FAO and WHO

Hu S. 2023. Efficacy of S-methoprene on several major stored products insects. Master thesis. Zhengzhou: Henan University of Technology (in Chinese) [胡森. 2023. S-烯虫酯对重要储藏物害虫控制作用研究. 硕士学位论文. 郑州: 河南工业大学]

Hu WB, Chen YJ, Liang Y, Su TY, Liu QY, Li XW, Liu XB. 2024. Laboratory and semi-field evaluation on S-methoprene formulations against *Anopheles sinensis* (Diptera: Culicidae): Yuxi City, Yunnan Province, China. China CDC Weekly, 6(6): 105−108

Hubert J, Stejskal V, Athanassiou CG, Throne JE. 2018. Health hazards associated with arthropod infestation of stored products. Annual Review of Entomology, 63: 553−573

Jiang X, Zhao Z, Gong C, Zhang XX, He LS, Wang SS, Li YY. 2022. Simulation study on residual effects of S-methoprene on *Sitophilus oryzae* and *Sitophilus zeamais*. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 37(4): 153−158 (in Chinese) [姜雪, 赵珍, 龚超, 张锡贤, 何丽莎, 王森山, 李燕羽. 2022. 应用S-烯虫酯小麦防治米象和玉米象持效性模拟研究. 中国粮油学报, 37(4): 153−158]

Krismawati A, Yustisia Y, Arifin Z, Purbiati T, Rachmawati D, Latifah E, Putra NR, Irianto I, Qomariyah L. 2024. A bibliometric analysis of biopesticides in corn pest management: current trends and future prospects. Heliyon, 10(22): e40196

Kumar D, Kalita P. 2017. Reducing postharvest losses during storage

of grain crops to strengthen food security in developing countries. Foods, 6(1): 8

Kumar H, Vijay VK, Subbarao PMV, Chandra R. 2022. Studies on the application of bio-carbon dioxide as controlled atmosphere on pest management in wheat grain storage. Journal of Stored Products Research, 95: 101911

Li F, Zuo CW, Fang H. 2020. S-methoprene: foreign‘favourite’ why become China’s‘abandoned baby’: harmless biochemical pesticides in China to implement the urgent need to break the policy fence//Compilation of highlights of urban and rural development by the Research Centre for Integrated Urban and Rural Development of the Central Propaganda Department (2014—2018). Beijing: Research Centre for Integrated Urban and Rural Development, pp. 121−126 (in Chinese) [李峰, 左传文, 方贺. 2020. S-烯虫酯: 国外“宠儿”何成我国“弃婴”: 无害性生化农药在我国推行亟待破除政策樊篱//中宣部城乡统筹发展研究中心(2014—2018)城乡发展要情汇编. 北京: 城乡统筹发展研究中心, pp. 121−126]

Manandhar A, Milindi P, Shah A. 2018. An overview of the post-harvest grain storage practices of smallholder farmers in developing countries. Agriculture, 8(4): 57

Meftaul IM, Venkateswarlu K, Annamalai P, Parven A, Megharaj M. 2023. Degradation of four pesticides in five urban landscape soils: human and environmental health risk assessment. Environmental Geochemistry and Health, 45(5): 1599−1614

Mng’ong’o M. 2023. Assessment of maize and beans storage insect pest in major grain markets, Morogoro-Tanzania. Saudi Journal of Biological Sciences, 30(1): 103491

Naruse S, Washidu Y, Miura K, Shinoda T, Minakuchi C. 2020. *Methoprene-tolerant* is essential for embryonic development of the red flour beetle *Tribolium castaneum*. Journal of Insect Physiology, 121: 104017

Paul A, Radhakrishnan M, Anandakumar S, Shanmugasundaram S, Anandharamakrishnan C. 2020. Disinfestation techniques for major cereals: a status report. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 19(3): 1125−1155

Phillips TW, Throne JE. 2010. Biorational approaches to managing stored-product insects. Annual Review of Entomology, 55: 375−397

Ragasruthi M, Balakrishnan N, Murugan M, Swarnakumari N, Harish S, Sharmila DJS. 2024. *Bacillus thuringiensis* (Bt)-based biopesticide: navigating success, challenges, and future horizons in sustainable pest control. Science of the Total Environment, 954: 176594

Sakka MK, Jagadeesan R, Baliota GV, Nayak MK, Vontas J, Athanassiou CG. 2024. High concentrations of piperonyl butoxide (PBO) enhance toxicity of S-methoprene against the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica*. Environmental Science and Pollution Research, 31(39): 51344−51352

Su TY, Liu HX. 2024. Soft pesticides based on insect growth regulators: reshaping arthropod vector and urban pest management. Chinese Journal of Hygienic Insecticides and Equipments, 30(3): 197−207 (in Chinese) [苏天运, 刘洪霞. 2024. 基于昆虫生长调节剂的软性杀虫剂: 重塑节肢动物媒介和城市害虫的治理. 中华卫生杀虫药械, 30(3): 197−207]

Wang QY, Mu HL, Zhang XP, Fang JK, Wang FL, Xue DR, Zhang Y, Wu Y. 2025. Control effects of S-methoprene on common stored grain pests. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 40(4): 8−14 (in Chinese) [王沁园, 穆海亮, 张晓培, 方江坤, 王富领, 薛丁榕, 张好, 伍祎. 2025. S-烯虫酯对常见储粮害虫的防治效果研究. 中国粮油学报, 40(4): 8−14]

Wang SM, Yang Y, Li DZ, Xie LF, Wu YB, Li GL. 2024. Current research status, opportunities, and future challenges of nine representative persistent herbicides. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 72(40): 21959−21972

Wijayaratne LKW, Arthur FH, Whyard S. 2018. Methoprene and control of stored-product insects. Journal of Stored Products Research, 76: 161−169

Zou Y, Zhang HJ, Liang AW, Wang YP, Xie GX. 2023. Evaluation of the efficacy of S-methoprene in the control of grain borer in Hainan under laboratory conditions. Grain and Oil Storage Technology Newsletter, 39(1): 36−39 (in Chinese) [邹易, 张红建, 梁爱文, 王玉萍, 谢更祥. 2023. 实验室条件下S-烯虫酯对海南地区谷蠹的防治效果评价. 粮油仓储科技通讯, 39(1): 36−39]

（责任编辑：李美娟）