储粮防护剂的应用现状及展望*

王争艳[1**] 王文芳[1] 苗世远[1] 陈利香[2] 黄 勇[2] 王文逸[2] 鲁玉杰[1]

（1. 河南工业大学粮油食品学院，郑州 450001；2. 福建省储备粮管理有限公司南平储备库，南平 353000）

摘 要 长期以来，磷化氢熏蒸已逐渐成为全球储粮害虫防治的主要手段。面对储粮害虫广泛产生的磷化氢抗性和替代药剂的缺乏，需要重新审视储粮防护剂的应用意义。由于储粮害虫对现用的储粮防护剂产生了广泛抗性，单一使用防护剂难以达到害虫防治的目的。只有综合考虑和利用各种影响药效的因素，改进防护剂的使用技术，并优化多种防治技术的组合方案，加强防护剂应用基础研究，才能解决防护剂使用所遇到的瓶颈问题，实现储粮害虫磷化氢抗性的治理。

关键词 储粮；防护剂；抗药性；药效；害虫综合治理

The use of grain protectants in pest control

WANG Zheng-Yan[1**] WANG Wen-Fang[1] MIAO Shi-Yuan[1] CHEN Li-Xiang[2]
HUANG Yong[2] WANG Wen-Yi[2] LU Yu-Jie[1]

(1. School of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. Nanping Grain Depot, Fujian Grain Reserves Management Corporation Limited, Nanping 353000, China)

Abstract Over several decades phosphine fumigation has gradually become essential to protect stored grain from pest damage. However, in view of the widespread development of phosphine resistance and shortage of alternative fumigants, the use of grain protectants in pest control needs to be re-considered. Because pests have developed resistance to most commonly used protectants, it is impossible to control these effectively with a specific protectant independently of other control methods. Better knowledge of factors that affect the performance of grain protectants could allow the development of more effective application technologies and the design of new control strategies. Furthermore, more research on the application of grain protectants may improve their effectiveness, which will help to overcome problems associated with phosphine resistance.

Key words stored-grain; grain protectant; insecticide resistance; pesticide efficacy; integrated pest management

储粮害虫的化学防治药剂有熏蒸剂和防护剂两类。自 20 世纪 60 年代起，我国开始使用磷化氢熏蒸防治储粮害虫。磷化氢具有使用简便、药效快、无残留等特点，是我国当前储粮害虫防治的主要手段。但是，长期单一和不合理地使用磷化氢导致储粮害虫产生了严重的抗性（Nayak *et al.*，2020），引起锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 和书虱 *Liposcelis* spp.等储粮害虫的种群猖獗（Nayak *et al.*，2013，2014）。防治药剂的轮换使用有助于磷化氢抗性的治理。但是，由于储粮害虫防治中对熏蒸剂的毒性及其残留限量有严格限定，一般化学药剂难以满足这些要求，可供选择的熏蒸剂种类有限（丁伟等，2002），目前尚未开发出可有效替代磷化氢的熏蒸剂。因此，在替代药剂缺乏的背景下需要重新审视储粮防护剂的应用意义。

储粮防护剂是指可用于原粮的药剂，通过触杀、胃毒、驱避等方式防治储粮有害生物的高效低毒、且具有一定残效期的化学药剂（白旭光，2008）。储粮防护剂的使用对仓房气密性没有特

*资助项目 Supported projects：河南省科技攻关项目（202102110059）；国家自然科学基金项目（31601890）；国家留学基金（201908410090）

**通讯作者 Corresponding author，E-mail：zywangedu@163.com

收稿日期 Received：2020-02-05；接受日期 Accepted：2020-04-21

别的要求，在美国、澳大利亚、法国等国家是主要的储粮害虫防治手段（张国梁，2002；Daglish *et al.*，2008；Guedes *et al.*，2008）。但是，在应用于防治实践时，储粮防护剂的使用遇到了诸多的问题（Athanassiou *et al.*，2008；Guedes *et al.*，2008；Hertlein *et al.*，2011；Singh，2017），如防护剂的速效性差，对粮堆深处和粮粒内部害虫的防效差；在大型粮仓中，缺乏能够实现药剂均匀分布的施药技术。防护剂的降解和施药的不均匀增加了害虫接触亚致死剂量杀虫剂的机率，从而诱导害虫抗药性的迅速形成。这些问题大大限制了储粮防护剂在我国储粮害虫防治中的应用。

在储粮生态环境中，影响防护剂药效的因素包括储藏条件（如温度、湿度）（Athanassiou *et al.*，2008；2009a），药剂的剂型、剂量和施药方法（Athanassiou and Korunic，2007），害虫的敏感性和发生密度（Nayak *et al.*，2002，2014）以及粮食的种类和含水量（Afridi *et al.*，2001；Athanassiou *et al.*，2009b）等。这些因素通过影响防护剂的降解速率、防护剂在粮食上的粘附量、防护剂对昆虫作用的强度等来影响防护剂的药效。在害虫综合治理的背景下，综合考虑各种影响防护剂药效的因素，改进防护剂的使用技术，评价防护剂与其它防控措施的联合作用，才能解决防护剂使用时所遇到的瓶颈问题（Nayak *et al.*，2002；Arthur *et al.*，2018a；鲁玉杰等，2019）。因此，本文围绕储粮防护剂的应用现状、增效途径和应用基础研究展开综述，以期为储粮害虫磷化氢抗性的治理和综合防治提供思路。

1 储粮防护剂的种类

残效期长是防护剂的应用特点，各国均对储粮防护剂的残效期进行了规定，如澳大利亚登记防护剂时要求药剂的残效期不少于 9 个月。为避免防护剂残留给食品安全带来隐患，各国均结合本国的储粮情况制定了防护剂的推荐使用剂量、安全间隔期和残留限量。目前，国内外登记使用的储粮防护剂有：马拉硫磷（Malathion）、杀螟硫磷（Fenitrothion）、甲基嘧啶磷（Pirimiphos-methyl）、甲基毒死蜱（Chlorpyrifos-methyl）、敌敌畏（Dichlorvos）、溴氰菊酯（Deltamethrin）、氯菊酯（Permethrin）、苄呋菊酯（Bioresmethrin）、联苯菊酯（Bifenthrin）、除虫菊素（Pyrethrins）、胡椒基丁醚（Piperonyl butoxide）、西维因（Carbaryl）、多杀霉素（Spinosad，即多杀菌素）、烯虫酯（Methoprene）、硅藻土等惰性粉及其混配药剂等（Nayak *et al.*，2002，2005；张国梁，2006；Daglish，2008；Guedes *et al.*，2008；Athanassiou *et al.*，2009b；Hertlein *et al.*，2011；Abdelghany *et al.*，2016）。GB/T 29890-2013 规定我国现用的储粮防护剂有马拉硫磷、杀螟硫磷、甲基嘧啶磷、溴氰菊酯（含增效醚）和惰性粉及其混配药剂。

2 储粮害虫对防护剂的抗性现状

多数储粮防护剂内吸作用差，很难穿透粮粒作用于内部害虫，降低了粮粒内部害虫接触药剂的机率。防护剂的降解和施药的不均匀增加了害虫接触亚致死剂量药剂和产生抗药性的机率。有限种类的防护剂的单一和长期使用更是增加了抗性筛选的压力。在全球范围内，大谷蠹 *Prostephanus truncatus*、谷蠹 *Rhyzopertha dominica*、米象 *Sitophilus oryzae*、谷象 *S. granarius*、麦蛾 *Sitotroga cerealella*、赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*、杂拟谷盗 *T. confusum*、锈赤扁谷盗、锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*、嗜虫书虱 *L. entomophila*、嗜卷书虱 *L. bostrychophilus*、小眼书虱 *L. paeta*、无色书虱 *L. decolor* 对现用的防护剂产生了广泛抗性（表 1）。尽管硅藻土的杀虫机理是破坏昆虫表皮，使昆虫脱水死亡等物理作用，害虫仍能产生抗性（Arnaud *et al.*，2005）。

害虫对杀虫机理相同的防护剂易产生交互抗性，如在澳大利亚，抗马拉硫磷谷蠹对杀螟硫磷、甲基毒死蜱和甲基嘧啶磷产生交互抗性，抗苄呋菊酯谷蠹对联苯菊酯产生交互抗性，抗除虫菊素谷象对苄呋菊酯产生交互抗性（Nayak *et al.*，2005；Kljajic and Peric，2007）。害虫对杀虫机理不同的防护剂不易产生交互抗性，如多杀霉素与其它防护剂不存在交互抗性（Nayak

表 1　主要储粮害虫对现用防护剂的抗性情况

Table 1　Resistance of main stored-grain pests to grain protectants

杀虫剂 Insecticide	害虫 Pest	地区 Place	抗性描述 Description of resistance	参考文献 References
马拉硫磷 Malathion	谷象 *Sitophilus granarius*	塞尔维亚 Serbia	抗性倍数 3.6-11.8	Kljajic and Peric，2007
	麦蛾 *Sitotroga cerealella*	中国中山 Zhongshan, China	30 mg·kg^{-1} 处理 60 d，发现麦蛾成虫	蒋社才等，2008
	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	抗性倍数 30.5	Collins and Wilson，1987
杀螟硫磷 Fenitrothion	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	抗性倍数 92.2	Collins and Wilson，1987
	嗜虫书虱 *Liposcelis entomophila*	新加坡 Singapore	抗性倍数 8.0	Leong and Ho，1994
甲基嘧啶磷 Pirimiphos-methyl	大谷蠹 *Prostephanus truncatus*	希腊 Greece	4 mg·kg^{-1} 处理 21 d，死亡率 51.4%-57.1%	Rumbos *et al.*，2013
	谷象 *Sitophilus granarius*	塞尔维亚 Serbia	抗性倍数 1.2-2.7	Kljajic and Peric，2007
	杂拟谷盗 *Tribolium confusum*	希腊 Greece	2 mg·kg^{-1} 处理 21 d，死亡率 45.7%-56.9%	Rumbos *et al.*，2013
	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	希腊 Greece	2 mg·kg^{-1} 处理 21 d，死亡率 28.6%-51.3%	Rumbos *et al.*，2013
		澳大利亚 Australia	抗性倍数 11.5	Collins and Wilson，1987
甲基毒死蜱 Chlorpyrifos-methyl	谷蠹 *Rhyzopertha dominica*	澳大利亚 Australia	10 mg·kg^{-1} 处理 14 d，最高死亡率 40%	Daglish，2008
	谷象 *Sitophilus granarius*	塞尔维亚 Serbia	抗性倍数 1.0-3.7	Kljajic and Peric，2007
	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	10 mg·kg^{-1} 处理 14 d，无死亡	Daglish，2008
	嗜虫书虱 *Liposcelis entomophila*	澳大利亚 Australia	10 mg·kg^{-1} 处理 14 d，死亡率 63%	Nayak and Daglish，2007
敌敌畏 Dichlorvos	谷象 *Sitophilus granarius*	塞尔维亚 Serbia	抗性倍数 1.5-3.2	Kljajic and Peric，2007
	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	抗性倍数 3.0	Collins and Wilson，1987
溴氰菊酯 Deltamethrin	谷蠹 *Rhyzopertha dominica*	澳大利亚 Australia	0.5 mg·kg^{-1} 处理 7 d，死亡率 8.8%-100%	Nayak *et al.*，2002
		塞尔维亚 Serbia	抗性倍数 5.7-238.8	Kljajic and Peric，2007
		中国台湾 Taiwan, China	抗性倍数 1.0-63.8	Chen and Chen，2013
	麦蛾 *Sitotroga cerealella*	中国中山 Zhongshan, China	0.5 mg·kg^{-1} 处理 35 d，发现麦蛾成虫	蒋社才等，2008
	无色书虱 *Liposcelis decolor*	澳大利亚 Australia	1 mg·kg^{-1} 处理 7 d，死亡率 15%-28%	Nayak *et al.*，2002
氯菊酯 Permethrin	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	抗性倍数 3.9	Collins and Wilson，1987
苄呋菊酯 Bioresmethrin	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	抗性倍数 3.5	Collins and Wilson，1987

续表 1（Table 1 continued）

杀虫剂 Insecticide	害虫 Pest	地区 Place	抗性描述 Description of resistance	参考文献 References
联苯菊酯 Bifenthrin	谷蠹 *Rhyzopertha dominica*	澳大利亚 Australia	0.5 mg·kg^{-1} 联苯菊酯+7 mg·kg^{-1} 增效醚+10 mg·kg^{-1} 甲基毒死蜱处理 7 个月，无死亡	Daglish *et al.*，2003
	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	同上剂量处理 7 个月，死亡率 11.3%-33%	Daglish *et al.*，2003
除虫菊素 Pyrethrins	嗜卷书虱 *Liposcelis bostrychophilus*	美国 USA	推荐剂量处理 14 d，最高死亡率 30%	Athanassiou *et al.*，2009b
	小眼书虱 *Liposcelis paeta*	美国 USA	推荐剂量处理 14 d，最高死亡率 30%	Athanassiou *et al.*，2009b
西维因 Carbaryl	无色书虱 *Liposcelis decolor*	澳大利亚 Australia	8 mg·kg^{-1} 处理 7 d，最高死亡率 35%	Nayak *et al.*，2002
	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	抗性倍数 203.3	Collins and Wilson，1987
多杀霉素 Spinosad	谷蠹 *Rhyzopertha dominica*	中国台湾 Taiwan, China	抗性倍数 1.0-2.7	Chen and Chen，2013
	米象 *Sitophilus oryzae*	澳大利亚 Australia	1 mg·kg^{-1} 处理 14 d，死亡率 30%	Daglish，2008
	赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*	澳大利亚 Australia	1 mg·kg^{-1} 处理 14 d，无死亡	Daglish，2008
	锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus*	澳大利亚 Australia	1 mg·kg^{-1} 处理 14 d，死亡率 56%	Daglish，2008
	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	1 mg·kg^{-1} 处理 14 d，无死亡	Daglish，2008
	嗜卷书虱 *Liposcelis bostrychophilus*	澳大利亚 Australia	1 mg·kg^{-1} 处理 14 d，死亡率 31%	Nayak and Daglish，2007
	无色书虱 *Liposcelis decolor*	澳大利亚 Australia	1 mg·kg^{-1} 处理 14 d，死亡率 44.9%	Nayak and Daglish，2007
	小眼书虱 *Liposcelis paeta*	澳大利亚 Australia	1 mg·kg^{-1} 处理 14 d，死亡率 4%	Nayak and Daglish，2007
烯虫酯 Methoprene	谷蠹 *Rhyzopertha dominica*	澳大利亚 Australia	0.6 mg·kg^{-1} 处理 14 d，无死亡	Daglish，2008
	米象 *Sitophilus oryzae*	澳大利亚 Australia	0.6 mg·kg^{-1} 处理 14 d，无死亡	Daglish，2008
	赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*	澳大利亚 Australia	0.6 mg·kg^{-1} 处理 14 d，无死亡	Daglish，2008
	锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus*	澳大利亚 Australia	0.6 mg·kg^{-1} 处理 14 d，无死亡	Daglish，2008
	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	澳大利亚 Australia	0.6 mg·kg^{-1} 处理 14 d，无死亡	Daglish，2008
	无色书虱 *Liposcelis decolor*	澳大利亚 Australia	1 mg·kg^{-1} 处理 7 d，无死亡	Nayak *et al.*，2002

et al.，2005），抗烯虫酯和抗马拉硫磷谷蠹甚至对多杀霉素产生负交互抗性（Daglish，2008）。但是，害虫对杀虫机理不同的防护剂也可能产生交互抗性，如抗除虫菊素谷象对马拉硫磷和甲基嘧啶磷产生交互抗性，谷象对溴氰菊酯和马拉硫磷或甲基嘧啶磷产生交互抗性（Kljajic and Peric，2007）。在抗性治理中，可以交替使用不存在交互抗性的防护剂来延缓抗性的发展。

3　储粮防护剂的增效途径

为解决防护剂应用的瓶颈问题，强化防护剂的应用意义，应注重结合影响防护剂药效的因素，改进防护剂的使用技术，并评价防护剂与其它防控措施的联合作用。

3.1　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。在现有防护剂种类有限和防效不佳的情况下，筛选具有增效作用的复配药剂成为研究热点。为避免防护剂交互抗性产生拮抗效应，进行药剂复配时优先选择杀虫机理不同的杀虫剂。如甲基毒死蜱+溴氰菊酯混剂对书虱的防效优于多杀霉素或除虫菊素（Athanassiou *et al.*，2009b；Nayak *et al.*，2014）；甲基毒死蜱+多杀霉素混剂能彻底抑制书虱和谷蠹的发生（Nayak and Daglish，2007；Daglish *et al.*，2008）；硅藻土与低剂量的多杀霉素或溴氰菊酯复配，对玉米中的大谷蠹、玉米象 *S. zeamais*、赤拟谷盗和麦蛾的防效提高（Machekano *et al.*，2017，2019）。昆虫生长调节剂与神经毒剂的杀虫机理完全不同，其复配药剂被广泛用于抗性治理。烯虫酯和多杀霉素联用可以防治抗有机磷锯谷盗和抗马拉硫磷锈赤扁谷盗；烯虫酯、多杀霉素和甲基毒死蜱三者联用可以防治抗马拉硫磷米象、抗马拉硫磷锈赤扁谷盗、抗马拉硫磷和拟除虫菊酯赤拟谷盗（Nayak and Daglish，2017）。

杀虫剂复配时需要注意两点：（1）不是所有的药剂均存在增效作用，如使用防护剂拌粮防治小麦中的米象时，甲基毒死蜱与多杀霉素或烯虫酯联用未表现出增效作用（Daglish，2008）。药剂的混配比例也会影响其增效作用，如评价混剂对扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* 的杀虫活性时，多杀霉素与毒死蜱（Chlorpyrifos）以任何比例混配均表现出增效作用，而多杀霉素与溴氰菊酯以不同比例混合时分别表现出增效作用或拮抗作用（Saddiq *et al.*，2017）。因此，必须通过严格的试验设计评价药剂间的相互作用和最佳混配比例（Wang *et al.*，2016）；（2）在测定防护剂混剂的残留限量时，目前仍参照单个药剂的残留限量。尽管单个药剂的残留限量不超标，但两种药剂的累加毒理学效应可能会带来新的食品安全问题。因此，亟需制定杀虫剂混剂毒性评价的标准体系。

3.2　储粮防护剂与熏蒸剂的联用

目前，尚未有一种防治技术能长期有效地防治储粮害虫。只有将化学防治融入害虫综合治理策略当中，才能取得最大的防效（Kavallieratos *et al.*，2009）。在美国、澳大利亚、加拿大和法国等粮食主产国，熏蒸剂与防护剂相结合的害虫防治策略被广泛用于治理储粮害虫磷化氢抗性和种群猖獗的问题。一般采取的策略是：当害虫密度较低时，使用防护剂抑制害虫的发生和种群增长；在储藏过程中，当害虫的发生密度达到经济阈值时，进行熏蒸（张国梁，2002）。储粮书虱通常多种混合发生，特别是当有嗜虫书虱和小眼书虱存在时，为解决虫种间抗性差异的问题，联合运用磷化氢熏蒸、防护剂拌粮和仓房结构表面处理（Structural treatment）可有效治理书虱猖獗的问题（Nayak *et al.*，2002）。

在热带地区的很多国家，对储藏期较长的粮食进行熏蒸处理后，会使用防护剂定期处理粮仓或堆垛表面，而防护剂的种类、使用时机和次数均会影响防治效果。如使用除虫菊素或除虫菊素+烯虫酯混剂气雾剂连续处理 1、2 或 3 次（间隔 2 周）的赤拟谷盗种群的存活数量和瞬时增长率相当，但是与连续处理 4 次的差异显著，连续处理 4 次的种群瞬时增长率和成虫存活率较低（Tucker *et al.*，2015）；在熏蒸后间隔多次使用

杀螟硫磷处理袋装大米堆垛表面后，尽管害虫再次发生的密度稍低于未进行多次防护剂处理的仓库，但未能推迟赤拟谷盗和书虱再次感染的时间，而在熏蒸的同时一次性喷洒具有速杀和击倒活性的防护剂具有显著的增效作用（Hodges *et al.*，1992）；在磷化氢熏蒸前，用喷浆法在粮面施用 50-60 mg·m^{-2} 剂量的硅藻土，则可在粮面形成比覆盖塑料薄膜还好的顶盖，利于保持粮堆上层的熏蒸剂浓度并提高防效（梁权，2001）；在磷化氢熏蒸前，使用甲基嘧啶磷乳油或溴氰菊酯+甲基嘧啶磷粉剂对表层 30 cm 的粮食进行拌粮处理，结合结构表面处理，对锈赤扁谷盗和书虱有很好的防效（鲁玉杰等，2019）。

3.3 储粮防护剂与其它防治技术联用

由于温度、湿度、粮食的种类、品系和含水量均会影响防护剂的药效，可将防护剂和低温处理、机械通风、作物品系抗性等联用以提高防效。在施用硅藻土后将粮温长期保持在 20 ℃以下，可有效抑制害虫种群增长（梁权，2001）。将硅藻土 Dryacide 表面拌粮与制冷技术联用，可实现 9 个月的无虫期（Vardeman *et al.*，2007）。在 CO_2 气调的同时使用溴氰菊酯等防护剂拌粮，能有效控制嗜卷书虱（吴仕源等，1997）。

硅藻土与病原真菌联用时，硅藻土破坏昆虫体壁后，利于病原菌的感染。硅藻土和白僵菌 *Beauveria bassiana* 孢子联用处理小麦，6 个月后害虫的死亡率可达 76%-91%。硅藻土和绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 联用同样可以长期抑制害虫（Wakil and Schmitt，2015）。但是，当绿僵菌孢子浓度较小时，绿僵菌+硅藻土液剂对杂拟谷盗成虫的致死作用不如硅藻土单独使用的效果，这可能是因为硅藻土中的某些黏土对绿僵菌孢子具有致死作用，同时吸附绿僵菌孢子的硅藻土对害虫体壁的粘附能力降低（Kavallieratos *et al.*，2006）。

4 储粮防护剂的展望

使用防护剂防治储粮害虫面临的最大挑战是害虫抗药性和大型粮库如何均匀施药的问题。为进一步提高防护剂的应用效果，需加强以下两方面的研究和工作：

4.1 新型储粮防护剂的筛选

筛选或开发新型储粮防护剂是解决害虫抗药性最有效的途径。新型储粮防护剂必须具有以下特点（白旭光，2008）：防效与现有药剂相当或更好；对哺乳动物毒性低；在粮食中的半衰期适中（8-70 周）。据此，生物源杀虫剂、硅藻土、昆虫生长调节剂、新型触杀剂及其混剂成为研究的重点。

4.1.1 生物源杀虫剂 目前，植物源杀虫剂的研究已从活性材料的筛选转向剂型的开发和应用（Isman，2020）。番荔枝科、菊科、白桂皮科、唇形科、楝科、芸香科植物对储粮害虫有较好的活性，可以被开发为粉剂或液体剂型（Singh，2017）。在推荐剂量下，豌豆蛋白（25 g·m^{-2}）对烟草甲 *Lasioderma serricorne* 的触杀毒性与烯虫酯（30 μg·m^{-2}）、硅藻土（5 g·m^{-2}）相当；豌豆蛋白处理的外包装对烟草甲的驱避效果高于烯虫酯，与硅藻土相当（Abdelghany *et al.*，2016）。一些菊科 Asteraceae 植物、丁香 *Eugenia aromatica* 花、辣木 *Moringa oleifera* 叶粉末拌粮对米象、谷蠹、赤拟谷盗、谷象、菜豆象 *Acanthoscelides obtectus* 表现出较好的防效，并且与硅藻土联用具有一定的增效作用（Nenaah，2014；Adarkwah *et al.*，2017）。尽管印楝素对米象、杂拟谷盗种群增长具有一定的抑制效果，但易受剂型、温湿度的影响（Kavallieratos *et al.*，2007）。为降低植物源杀虫剂的应用剂量和延长药剂的残效期，与其它生物制剂或惰性粉的联用技术成为研究热点（Isman，2020），如印楝素和苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis* 联用对印度谷螟 *Plodia interpunctella* 幼虫具有增效致死作用（Nouri-Ganbalani *et al.*，2016）。

在微生物源农药方面，多杀菌素家族仍是研究的重点。与多杀霉素相比，乙基多杀菌素（Spinetoram）活性更高、残效期更长，施药 79 d 后在各种粮食内的残留量没有显著变化，药效受温度和湿度的影响较小。谷蠹和大谷蠹对乙基多杀菌素的敏感性很高，1 mg·kg^{-1} 的剂量拌粮处

理，14 d 后成虫全部死亡，在 74 d 内能彻底抑制害虫后代的发生。乙基多杀菌素对杂拟谷盗、米象和谷象也有很好的防效（Vassilakos and Athanassiou，2013；Athanassiou and Kavallieratos，2014；Vassilakos *et al.*，2015）。通常防护剂在玉米中的防效较差，而 0.5 mg·kg^{-1} 和 1 mg·kg^{-1} 的阿维菌素（Abamectin）在玉米中对谷蠹、米象和杂拟谷盗的防效优于在小麦中的（Kavallieratos *et al.*，2009）。

4.1.2　硅藻土　尽管很多硅藻土的商业制剂对储粮害虫表现出了较好的防效，并在粮食加工过程基本可以完全除去，但由于用量大（1-3.5 g·kg^{-1}）导致粮堆容重和流动性下降，粉尘残留严重，从而限制了其广泛应用（Arnaud *et al.*，2005）。将硅藻土与低剂量的触杀剂联用，可以同时解决硅藻土单独使用的瓶颈问题和杀虫剂农药残留的问题。使用苦皮藤素、硅藻土及其混剂（苦皮藤素：硅藻土=1：1 900，w/w）防治小麦中的玉米象、赤拟谷盗和锈赤扁谷盗时，混剂效果明显好于单剂，并且苦皮藤素+硅藻土混剂的药效受环境湿度的影响较小，在较高的相对湿度（70%）下仍然取得了很好的药效。此外，苦皮藤素+硅藻土混剂可制成水溶粉剂，施药更为方便（Athanassiou *et al.*，2009c）。在硅藻土中加入 0.03%的溴氰菊酯、0.003 7%的增效醚、0.95%的甲基毒死蜱、10%的矿物油和 0.65%的惰性组分，100 mg·kg^{-1} 的使用剂量可以有效防治谷蠹、米象和赤拟谷盗（Arthur，2004）。

4.1.3　昆虫生长调节剂　昆虫生长调节剂靶标性强，特异性作用于昆虫的生长发育，对哺乳动物毒性极低，适合储粮害虫防治。蚊蝇醚（Pyriproxyfen）对嗜虫书虱若虫的致死作用非常明显，其效果优于烯虫酯；蚊蝇醚能延长嗜虫书虱若虫的发育历期；蚊蝇醚对嗜虫书虱成虫无杀伤作用，但能抑制成虫产卵，并具有显著的杀卵作用（丁伟等，2002）。使用剂量大于 5 mg·kg^{-1} 的蚊蝇醚、苯氧威（Fenoxycarb）、除虫脲（Diflubenzuron）、氟虫脲（Flufenoxuron）、虱螨脲（Lufenuron）、杀铃脲（Triflumuron）和甲氧虫酰肼（Methoxyfenozide）对玉米中的大谷蠹和小麦中的谷蠹的种群抑制率大于 88.5%，其中，1 mg·kg^{-1} 的蚊蝇醚和虱螨脲能彻底抑制小麦中谷蠹的发生（Kavallieratos *et al.*，2012）。1 mg·kg^{-1} 烯虫酯和 1 mg·kg^{-1} 除虫脲联用可以有效抑制高粱中米象和谷蠹的发生（Daglish and Wallbank，2005）。

4.1.4　新型神经毒剂　在筛选触杀剂时，要注重药剂的高效低毒，推荐剂量低于 15 mg·kg^{-1} 的药剂有较好的应用前景。如使用 1.6 mg·kg^{-1} 的氯氰菊酯（Cypermethrin）拌粮处理后的 4 个月内，能完全抑制谷蠹和大谷蠹种群的发生，对米象和锯谷盗的种群发生具有显著的抑制作用（Gourgouta *et al.*，2019）；10 mg·kg^{-1} 的茚虫威（Indoxacarb）能有效抑制小麦和玉米中米象和谷蠹的发生（Miliordos *et al.*，2017）。此外，还需注意新型药剂的杀虫机理，避免与传统的防护剂产生交互抗性。杀虫机理不同于有机磷和拟除虫菊酯的杀虫剂，如氟虫腈（Fipronil）、啶虫脒（Acetamiprid）和噻虫嗪（Thiamethoxam）等成为研究热点。如使用 10 mg·kg^{-1} 的氟虫腈拌粮处理 48 h 后能完全杀死小麦、玉米、大麦和稻谷中的谷蠹、大谷蠹、米象和杂拟谷盗（Kavallieratos *et al.*，2010）；使用 200 mL·m^{-2} 右旋胺菊酯（d-Tetramethrin）和啶虫脒混剂（5%w/v 的啶虫脒+2.5%的右旋胺菊酯+10%增效醚）进行结构表面处理，7 d 后谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium* 成虫的死亡率为 96.7%，幼虫的死亡率为 84.4%（Kavallieratos and Boukouvala，2019）；与乙基多杀菌素（0.25-0.5 mg·kg^{-1}）相比，噻虫嗪（1-5 mg·kg^{-1}）对谷象、米象、锯谷盗、赤拟谷盗、锈赤扁谷盗成虫的致死活性更高，对种群后代的抑制作用更好（Rumbos *et al.*，2018a）。

4.2　施药方式和技术的改进

使用防护剂气溶胶处理表层粮食时，为了能使药剂均匀分散，通常会选择小粒径防护剂液滴施药技术，但很多药剂会漂移至墙面上，降低粮面的药剂量。可以借助粮仓通风系统，促进小液滴的迅速沉降及其在粮面的渗透，该法同样适用于喷粉处理的场景（Arthur *et al.*，2018a；鲁玉杰等，2019）。此外，需要考虑防护剂液滴粒径

对药效的影响。这种影响因害虫的种类和防护剂的作用模式而异（Arthur *et al.*，2017）。尽管粒径小的液滴容易通过昆虫气门被虫体吸入体内，但粒径大的液滴更容易粘附到虫体上，药效也会更好，如与粒径 2 μm 的液滴相比，液滴粒径 16 μm 的除虫菊素对杂拟谷盗的击倒和致死活性更高（Arthur *et al.*，2014）；液滴粒径 16 μm 的除虫菊素与烯虫酯混剂对杂拟谷盗、花斑皮蠹 *Trogoderma variabile*、烟草甲、书虱的防效更好（Arthur *et al.*，2017；Athanassiou *et al.*，2019）；33.4 μm 粒径的液滴对德国小蠊 *Blattella germanica* 的击倒率高于 14.4 μm 粒径的液滴（Sugiura *et al.*，2011）。因此，在防护剂喷雾施药前应确定最高效的液滴粒径。

对昆虫生物学的研究有助于改进防护剂的施药技术。如化蛹前，谷斑皮蠹幼虫漫游寻找化蛹场所。据此对外墙面或空仓内墙面、缝隙进行处理可以杀死漫游期的害虫，提高防治效果（Kavallieratos and Boukouvala，2019）。结构表面处理不受农药毒性的限制，可选择的药剂种类很多。不同药剂在不同材料表面降解的速率存在差异，需要通过实验筛选出防效好的药剂种类及其剂型。与烯虫酯和蚊蝇醚相比，溴氰菊酯和氟氯氰菊酯（Cyfluthrin）在混凝土、木头、油漆木板、乙烯基塑料和金属板表面上对谷蠹幼虫均表现出较好的防效（Arthur *et al.*，2018b）。又如赤拟谷盗成虫接触烯虫酯后，耐热能力下降。因此在对建筑结构和加工厂进行热处理的时候，同时使用烯虫酯能够缩短热处理时间，节约杀虫成本（Wijayaratne *et al.*，2018）。

5 总结

由于防护剂的药效受到诸多因素的影响，在储粮害虫防治实践中，应注重利用各种因素，因地制宜地制定防护剂的应用方案。首先要加强抗性监测，明确害虫对防护剂的敏感性。其次，结合害虫对药剂的敏感性和发生密度、环境的温度和湿度、防护对象的种类及储粮管理条件选择合适的防护剂种类、剂型、剂量、施药技术和防治时机，不能一成不变地照搬已有的防治经验。如杀螟硫磷+溴氰菊酯、甲基嘧啶磷+噻虫嗪、甲基嘧啶磷+溴氰菊酯和甲基嘧啶磷+氯菊酯 4 种混剂拌粮玉米，在津巴布韦高温干燥地区均取得较好的防效，而在中温高湿地区仅甲基嘧啶磷+噻虫嗪混剂能抑制害虫发生（Mlambo *et al.*，2018）。

在应用基础研究方面，现有防护剂的复配和缓释剂型的研发将是工作的重点。由于国家农药管控政策日益严格，开发储粮防护剂新品种的难度增大，而防护剂的增效复配有助于害虫抗药性的治理和减少防护剂的用量。缓释剂型可以延长防护剂的残效期，降低防护剂的使用频率和储粮害虫接触亚致死剂量药剂的机率，延缓害虫抗药性形成的速率（Rumbos *et al.*，2018b）。此外，GB/T 29890-2013 规定食品级植物源杀虫剂免登记，可直接用于储粮害虫防治，符合储粮害虫防治绿色环保的发展趋势。如果将植物源杀虫剂与熏蒸剂等其他防治措施联用，可以弥补植物源杀虫剂残效期短、使用剂量大的缺陷，促进其在粮库中的推广和应用。

参考文献 (References)

Abdelghany AY, Awadalla SS, Abdel-Baky NF, EL-Syrafi HA, Fields PG, 2016. Efficacy of reduced risk insecticides on penetration into jute and polyethylene bags by *Lasioderma serricorne* (F.) (Coleoptera: Anobiidae). *Journal of Stored Products Research*, 69: 190–194.

Adarkwah C, Obeng-Ofori D, Hormann V, Ulrichs C, Scholler M, 2017. Bioefficacy of enhanced diatomaceous earth and botanical powders on the mortality and progeny production of *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Chrysomelidae), *Sitophilus granarius* (Coleoptera: Dryophthoridae) and *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) in stored grain cereals. *International Journal of Tropical Insect Science*, 37(4): 243–258.

Afridi IAK, Parveen Z, Masud SZ, 2001. Stability of organophosphate and pyrethroid pesticides on wheat in storage. *Journal of Stored Products Research*, 37(2): 199–204.

Arnaud L, Lan HTT, Brostaux Y, Haubruge E, 2005. Efficacy of diatomaceous earth formulations admixed with grain against populations of *Tribolium castaneum*. *Journal of Stored Products Research*, 41(2): 121–130.

Arthur FH, 2004. Evaluation of a new insecticide formulation (F_2) as a protectant of stored wheat, maize, and rice. *Journal of Stored Products Research*, 40(3): 317–330.

Arthur FH, Campbell JF, Brabec, DL, Ducatte GR, Donaldson JE, 2018a. Aerosol insecticide distribution inside a flour mill: Assessment using droplet measurements and bioassays. *Journal of Stored Products Research*, 77: 26–33.

Arthur FH, Campbell JF, Donaldson JE, 2017. Laboratory evaluation of particle size, food contamination, and residual efficacy of pyrethrin + methoprene aerosol. *Journal of Stored Products Research*, 72: 100–110.

Arthur FH, Campbell JF, Ducatte GR, 2014. Susceptibility of *Tribolium confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae) to pyrethrin aerosol: Effects of aerosol particle size, concentration, and exposure conditions. *Journal of Economic Entomology*, 107(6): 2239–2251.

Arthur FH, Ghimire MN, Myers SW, Phillips TW, 2018b. Evaluation of pyrethroid insecticides and insect growth regulators applied to different surfaces for control of *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae) the Khapra beetle. *Journal of Economic Entomology*, 111(2): 612–619.

Athanassiou CG, Arthur FH, Campbell JF, Donaldson JE, 2019. Particle size matters: Efficacy of aerosols for the control of stored product psocids. *Journal of Stored Products Research*, 83: 148–152.

Athanassiou CG, Arthur FH, Opit GP, Throne JE, 2009a. Insecticidal effect of diatomaceous earth against three species of stored-product psocids on maize, rice, and wheat. *Journal of Economic Entomology*, 102(4): 1673–1680.

Athanassiou CG, Arthur FH, Throne JE, 2009b. Efficacy of grain protectants against four psocid species on maize, rice and wheat. *Pest Management Science*, 65(2): 1140–1146.

Athanassiou CG, Kavallieratos NG, 2014. Evaluation of spinetoram and spinosad for control of *Prostephanus truncatus*, *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, and *Tribolium confusum* on stored grains under laboratory tests. *Journal of Pest Science*, 87(3): 469–483.

Athanassiou CG, Kavallieratos NG, Chintzoglou GJ, Peteinatos GG, Boukouvala MC, Petrou SS, Panoussakis EC, 2008. Effect of temperature and commodity on insecticidal efficacy of spinosad dust against *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) and *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrychidae). *Journal of Economic Entomology*, 101(3): 976–981.

Athanassiou CG, Korunic Z, 2007. Evaluation of two new diatomaceous earth formulations, enhanced with abamectin and bitterbarkomycin, against four stored-grain beetle species. *Journal of Stored Products Research*, 43(4): 468–473.

Athanassiou CG, Korunic Z, Vayias BJ, 2009c. Diatomaceous earths enhance the insecticidal effect of bitterbarkomycin against stored-grain insects. *Crop Protection*, 28(2): 123–127.

Bai XG, 2008. Stored Products Pests and Control. Beijing: Science Press. 354. [白旭光, 2008. 储藏物害虫与防治. 北京: 科学出版社. 354.]

Chen CY, Chen ME, 2013. Susceptibility of field populations of the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (F.), to deltamethrin and spinosad on paddy rice in Taiwan. *Journal of Stored Products Research*, 55: 124–127.

Collins PJ, Wilson D, 1987. Efficacy of current and potential grain protectant insecticides against a fenitrothion-resistant strain of the sawtoothed grain beetle, *Oryzaephilus surinamensis* L. *Pesticide Science*, 20(2): 93–104.

Daglish GJ, 2008. Impact of resistance on the efficacy of binary combinations of spinosad, chlorpyriphos-methyl and s-methoprene against five stored-grain beetles. *Journal of Stored Products Research*, 44(1): 71–76.

Daglish GJ, Head MB, Hughes PB, 2008. Field evaluation of spinosad as a grain protectant for stored wheat in Australia: Efficacy against *Rhyzopertha dominica* (F.) and fate of residues in whole wheat and milling fractions. *Australian Journal of Entomology*, 47(1): 70–74.

Daglish GJ, Wallbank BE, 2005. Efficacy of diflubenzuron plus methoprene against *Sitophilus oryzae* and *Rhyzopertha dominica* in stored sorghum. *Journal of Stored Products Research*, 41(3): 353–360.

Daglish GJ, Wallbank BE, Nayak MK, 2003. Synergized bifenthrin plus chlorpyrifos-methyl for control of beetles and psocids in sorghum in Australia. *Journal of Economic Entomology*, 96(2): 525–532.

Ding W, Shaaya E, Wang JJ, Zhao ZM, Gao F, 2002. Acute lethal effect of two insect growth regulators on *Liposcelis entomophila* (Psocoptera: Liposcelididae). *Zoological Research*, 23(2): 173–176. [丁伟, Shaaya E, 王进军, 赵志模, 高飞, 2002. 两种昆虫生长调节剂对嗜虫书虱的致死作用. 动物学研究, 23(2): 173–176.]

Gourgouta M, Rumbos CI, Athanassiou CG, 2019. Residual toxicity of a commercial cypermethrin formulation on grains against four major storage beetles. *Journal of Stored Products Research*, 83: 103–109.

Guedes RNC, Campbell JF, Arthur FH, Opit GP, Zhu KY, Throne JE, 2008. Acute lethal and behavioral sublethal responses of two stored-product psocids to surface insecticides. *Pest Management Science*, 64(12): 1314–1322.

Hertlein MB, Thompson GD, Subramanyam B, Athanassiou CG, 2011. Spinosad: A new natural product for stored grain protection. *Journal of Stored Products Research*, 47(3): 131–146.

Hodges RJ, Sidik M, Halid H, Conway JA, 1992. Cost efficiency of respraying store surfaces with insecticide to protect bagged milled rice from insect attack. *Tropical Pest Management*, 38(4): 391–397.

Isman MB, 2020. Botanical insecticides in the twenty-first century-fulfilling their promise? *Annual Review of Entomology*, 65: 233–249.

Jiang SC, Li ZQ, Zhang F, Tan CJ, 2008. Application research of a new grain protectant. *Grain Storage*, 37(6): 17–21. [蒋社才, 李志权, 张峰, 谭焯佳, 2008. 新型高效谷物保护剂“储粮安”的应用研究. 粮食储藏, 37(6): 17–21.]

Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Michalaki MP, Batta YA, Rigatos HA, Pashalidou FG, Balotis GN, Tomanovic Z, Vayias BJ, 2006. Effect of the combined use of *Metarhizium anisopliae* (Metschinkoff) Sorokin and diatomaceous earth for the control of three stored-product beetle species. *Crop Protection*, 25(10): 1087–1094.

Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Saitanis CJ, Kontodimas DC, Roussos AN, Tsoutsa MS, Anastassopoulou UA, 2007. Effect of two azadirachtin formulations against adults of *Sitophilus oryzae* and *Tribolium confusum* on different grain commodities. *Journal of Food Protection*, 70(7): 1627–1632.

Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Vayias BJ, Betsi PCC, 2010. Insecticidal efficacy of fipronil against four stored-product insect pests: Influence of commodity, dose, exposure interval, relative humidity and temperature. *Pest Management Science*, 66(6): 640–649.

Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Vayias BJ, Mihail SB, Tomanovic Z, 2009. Insecticidal efficacy of abamectin against three stored-product insect pests: Influence of dose rate, temperature, commodity, and exposure interval. *Journal of Economic Entomology*, 102(3): 1352–1359.

Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Vayias BJ, Tomanovic Z, 2012. Efficacy of insect growth regulators as grain protectants against two stored-product pests in wheat and maize. *Journal of Food Protection*, 75(5): 942–950.

Kavallieratos NG, Boukouvala MC, 2019. Efficacy of d-tetramethrin and acetamiprid for control of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) adults and larvae on concrete. *Journal of Stored Products Research*, 80: 79–84.

Kljajic P, Peric I, 2007. Altered susceptibility of granary weevil *Sitophilus granarius* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) populations to insecticides after selection with pirimiphos-methyl and deltamethrin. *Journal of Stored Products Research*, 43(2): 134–141.

Leong ECW, Ho SH, 1994. Relative tolerance of *Liposcelis bostrychophila* (Bad.) and *L. entomophila* (End.) to some organophosphorus and carbamate insecticides. *International Journal of Tropical Insect Science*, 15(3): 343–349.

Liang Q, 2001. A review of conspicuous research progress in stored grain pest control. *Grain Storage*, 30(1): 6–11. [梁权, 2001. 引人注目的储粮害虫防治研究进展述评. 粮食储藏, 30(1): 6–11.]

Lu YJ, Wang LL, Wang ZZ, Li T, Mei ZJ, Chen Z, Wang DS, Qiao ZM, 2019. Control efficiency of combination with two kinds of protectants and phosphine on *Liposcelis* spp. and *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens). *Journal of Environmental Entomology*, 41(4): 882–890. [鲁玉杰, 王利利, 王争艳, 李涛, 梅芝健, 陈卓, 汪丁送, 乔占民, 2019. 两种防护剂和磷化氢联用对储粮书虱和锈赤扁谷盗的实仓防治效果. 环境昆虫学报, 41(4): 882–890.]

Machekano H, Mvumi BM, Chinwada P, Kageler SJ, Rwafa R, 2019. Evaluation of alternatives to synthetic pesticides under small-scale farmer-managed grain storage conditions. *Crop Protection*, 126: e104941.

Machekano H, Mvumi BM, Chinwada P, Richardson-Kageler SJ, Rwafa R, 2017. Efficacy of diatomaceous earths and their low-dose combinations with spinosad or deltamethrin against three beetle pests of stored-maize. *Journal of Stored Products Research*, 72: 128–137.

Miliordos DEN, Athanassiou CG, Tsiropoulos NG, Nakas CT, 2017. Persistence and efficacy of indoxacarb against three stored product insect species on wheat and maize. *Journal of Stored Products Research*, 73: 74–86.

Mlambo S, Mvumi BM, Stathers T, Mubayiwa M, Nyabako T, 2018. Field efficacy and persistence of synthetic pesticidal dusts on stored maize grain under contrasting agro-climatic conditions. *Journal of Stored Products Research*, 76: 129–139.

Nayak MK, Collins PJ, Pavic H, 2002. Long-term effectiveness of grain protectants and structural treatments against *Liposcelis decolor* (Pearman) (Psocoptera: Liposcelididae), a pest of stored products. *Pest Management Science*, 58(12): 1223–1228.

Nayak MK, Collins PJ, Throne JE, Wang JJ, 2014. Biology and management of psocids infesting stored products. *Annual Review of Entomology*, 59: 279–297.

Nayak MK, Daglish GJ, 2007. Combined treatments of spinosad and chlorpyrifos-methyl for management of resistant psocid pests (Psocoptera: Liposcelididae) of stored grain. *Pest Management Science*, 63(1): 104–109.

Nayak MK, Daglish GJ, 2017. Base-line susceptibility of field populations of *Rhyzopertha dominica* (F.) to spinosad in Australia. *Journal of Stored Products Research*, 70: 1–6.

Nayak MK, Daglish GJ, Byrne VS, 2005. Effectiveness of spinosad as a grain protectant against resistant beetle and psocid pests of stored grain in Australia. *Journal of Stored Products Research*, 41(4): 455–467.

Nayak MK, Daglish GJ, Phillips TW, Ebert PR, 2020. Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: A global perspective. *Annual Review of Entomology*, 65: 333–350.

Nayak MK, Holloway JC, Emery RN, Pavic H, Bartlet J, Collins PJ, 2013. Strong resistance to phosphine in the rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) (Coleoptera: Laemophloeidae): Its characterisation, a rapid assay for diagnosis and its distribution in Australia. *Pest Management Science*, 69(1): 48–53.

Nenaah GE, 2014. Bioactivity of powders and essential oils of three Asteraceae plants as post-harvest grain protectants against three major coleopteran pests. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 17(4): 701–709.

Nouri-Ganbalani G, Borzoui E, Abdolmaleki A, Abedi Z, Kamita SG, 2016. Individual and combined effects of *Bacillus thuringiensis* and azadirachtin on *Plodia interpunctella* Hübner (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Insect Science*, 16(1): e95.

Rumbos CI, Dutton AC, Athanassiou CG, 2013. Comparison of two pirimiphos-methyl formulations against major stored-product insect species. *Journal of Stored Products Research*, 55: 106–115.

Rumbos CI, Dutton AC, Athanassiou CG, 2018a. Insecticidal effect of spinetoram and thiamethoxam applied alone or in combination for the control of major stored-product beetle species. *Journal of Stored Products Research*, 75: 56–63.

Rumbos CI, Dutton AC, Tsiropoulos NG, Athanassiou CG, 2018b. Persistence and residual toxicity of two pirimiphos-methyl formulations on wheat against three stored-product pests. *Journal of Stored Products Research*, 76: 14–21.

Saddiq B, Ejaz M, Shad SA, Aslam M, 2017. Assessing the combined toxicity of conventional and newer insecticides on the cotton mealybug *Phenacoccus solenopsis*. *Ecotoxicology*, 26(9): 1240–1249.

Singh S, 2017. Natural plant products-as protectant during grain storage: A review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 5(3): 1873–1885.

Sugiura M, Horibe Y, Kawada H, Takagi M, 2011. Effect of different droplet size on the knockdown efficacy of directly sprayed insecticides. *Pest Management Science*, 67(9): 1115–1123.

Tucker AM, Campbell J, Arthur F, Zhu KY, 2015. Effects of methoprene and synergized pyrethrin aerosol applications on *Tribolium castaneum* (Herbst) populations. *Journal of Stored Products Research*, 64: 168–174.

Vardeman EA, Arthur FH, Nechols JR, Campbell JF, 2007. Efficacy of surface applications with diatomaceous earth to control *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) in stored wheat. *Journal of Stored Products Research*, 43(4): 335–341.

Vassilakos TN, Athanassiou CG, 2013. Effect of temperature and relative humidity on the efficacy of spinetoram for the control of three stored product beetle species. *Journal of Stored Products Research*, 55: 73–77.

Vassilakos TN, Athanassiou CG, Tsiropoulos NG, 2015. Influence of grain type on the efficacy of spinetoram for the control of *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus granarius* and *Sitophilus oryzae*. *Journal of Stored Products Research*, 64: 1–7.

Wakil W, Schmitt T, 2015. Field trials on the efficacy of *Beauveria bassiana*, diatomaceous earth and Imidacloprid for the protection of wheat grains from four major stored grain insect pests. *Journal of Stored Products Research*, 64: 160–167.

Wang ZY, Zhao YR, Lu YJ, 2016. Fumigation action of four plant oils against eggs of *Callosobruchus chinensis* (L.) (Coleoptera: Bruchidae). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 19(6): 1394–1403.

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

Wu SY, Wang JJ, Zhao ZM, 1997. The acute toxicity of carbon dioxide and deltamethrin on *Liposcelis bostrychophila* (Badonnel) at different temperatures. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 12(6): 5–9. [吴仕源, 王进军, 赵志模, 1997. CO_2 和溴氰菊酯在不同温度下对嗜卷书虱毒性的相互影响. 中国粮油学报, 12(6): 5–9.]

Zhang GL, 2002. The effect of protectants on integrated control of stored-grain insects. *Grain Storage*, 31(6): 8–12. [张国梁, 2002. 防护剂在储粮害虫综合治理中的作用与性能. 粮食储藏, 31(6): 8–12.]

Zhang GL, 2006. Application and prospects of stored-grain protectants. *Grain Storage*, 35(1): 10–12. [张国梁, 2006. 储粮害虫防护剂应用展望. 粮食储藏, 35(1): 10–12.]