



王争艳, 李兴奎, 何梦婷, 罗琼, 鲁玉杰. 储粮防护剂药效影响因素分析 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (3): 660–666.

储粮防护剂药效影响因素分析

王争艳^{1*}, 李兴奎², 何梦婷¹, 罗琼¹, 鲁玉杰¹

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 郑州职业技术学院现代管理系, 郑州 450121)

摘要: 针对应用防护剂防治储粮害虫时存在的问题, 全面分析影响储粮防护剂药效的因素, 如害虫对药剂的敏感性、药剂剂型和施药方法、粮食种类和环境条件。并探讨了相关研究结果在储粮害虫防治实践中的意义和储粮防护剂未来研究的方向。

关键词: 储粮; 防护剂; 药效

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 03-0660-07

Effects of different factors on the efficacy of grain protectants

WANG Zheng-Yan^{1*}, LI Xing-Kui², HE Meng-Ting¹, LUO Qiong¹, LU Yu-Jie¹ (1. School of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Modern Management, Zhengzhou Technical College, Zhengzhou 450121)

Abstract: Confronted with different problems from application of grain protectants to stored grain pest control, this paper reviews effects of pest susceptibility to insecticide, formulation type, application technology, grain type, and storage condition on the efficacy of grain protectants. Practical significance of related results in stored grain pest control and future research direction of grain protectants are also discussed.

Key words: Stored grain; grain protectant; pesticide efficacy

储粮防护剂是指可用于原粮, 通过触杀、胃毒、驱避等方式防治储粮有害生物, 且具有一定残效期的化学药剂。储粮防护剂的使用对仓房气密性没有特别的要求, 是美国、澳大利亚、加拿大、法国等国家储粮害虫防治的主要手段 (张国梁, 2002; Guedes *et al.*, 2008)。但是, 在应用于防治实践时, 储粮防护剂遇到了诸多的问题, 如速效性差、药剂易降解、害虫抗药性形成速率快和农药易残留 (Hertlein *et al.*, 2011) 等。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推广和应用, 对防护剂药效影响因素的分析, 可以为解决这些问题提供思路。

药效是害虫、杀虫剂和环境因素相互作用的结果, 影响储粮防护剂药效的因素包括害虫对药剂的敏感性、药剂的剂型和施药方法、粮食种类和环境温湿度 (Hertlein *et al.*, 2011) 等。在储粮害虫防治中, 一般利用害虫的死亡率和后代的数量直接评价防护剂的药效, 或通过被为害粮食的虫蚀率、重量损失等间接评价防护剂的药效 (Arthur, 2016; Kavallieratos *et al.*, 2018)。各种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、作用于靶标的有效剂量等来影响防护剂的药效。全面分析各种因素对防护剂药效的作用, 掌握防护剂的使用原则, 可以为改进防护剂

基金项目: 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 Author for correspondence: 王争艳, 博士, 副教授, 主要从事储粮物昆虫学与害虫综合治理研究, E-mail: zywangedu@163.com

收稿日期 Received: 2020-04-27; 接受日期 Accepted: 2020-09-04

的使用技术提供理论依据。

国外对储粮防护剂药效的研究一直保持较高的热度,而国内鲜有防护剂应用及其基础研究的相关报道。因此,本文回顾近年国内外防护剂药效的研究进展,围绕影响防护剂药效的因素展开综述,并探究相关研究结果的实践意义,以期为解决防护剂使用所遇到的瓶颈问题提供思路,促进防护剂在我国储粮害虫防治中的推广和应用,逐步实现储粮害虫综合治理。

1 影响防护剂药效的因素

1.1 害虫敏感性

1.1.1 害虫种类

害虫对杀虫剂的吸收和代谢机制、杀虫剂的作用机理及其与靶标的结合能力决定昆虫对防护剂的敏感性。昆虫对防护剂的敏感性存在较大差异,如对多杀霉素的敏感性排序为,大谷蠹 *Prostephanus truncatus* 和谷蠹 *Rhyzopertha dominica* > 米象 *Sitophilus oryzae* > 赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 和杂拟谷盗 *T. confusum* (Nayak *et al.*, 2005; Athanassiou and Kavallieratos, 2014); 赤拟谷盗对烯虫酯的敏感性高于花斑皮蠹 *Trogoderma variable* (Arthur *et al.*, 2017); 拟谷盗属害虫对硅藻土的耐受性高于其他害虫 (Arnaud *et al.*, 2005); 谷象 *S. granarius* 对防护剂的敏感性排序为,溴氰菊酯和甲基毒死蜱 > 敌敌畏 > 马拉硫磷 > 甲基嘧啶磷 > 氯氰菊酯 (Kljajic and Peric, 2007); 无色书虱 *Liposcelis decolor* 对有机磷杀虫剂的敏感性排序为,甲基毒死蜱 > 杀螟硫磷 > 甲基嘧啶磷 (Nayak *et al.*, 2002)。

害虫体壁的结构和生物学特征决定了进入虫体内的药剂剂量,也会影响防护剂的药效。通常在粮粒内部完成部分发育阶段的害虫接触防护剂的机率小,对药剂的敏感性低,而体型扁平、体表粗糙多毛、活动量大的害虫体壁粘附的药剂量大,对药剂的敏感性高。如烯虫酯拌粮时对谷蠹和赤拟谷盗的防效好,而对在粮粒内完成成虫前发育的麦蛾 *Sitotroga cerealella*、米象和谷象的防效差 (Arthur, 2016; Wijayaratne *et al.*, 2018); 活动量大的锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 对硅藻土的敏感性高 (Vardeman *et al.*, 2007); 体表多毛的锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis* 对沸石粉的敏感性高于米象和杂拟谷盗 (Rumbos *et al.*, 2016b;

Eroglu *et al.*, 2019)。但过长的刚毛也会阻止药剂的吸附,如谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium* 幼虫对硅藻土的耐受性较高 (Kavallieratos *et al.*, 2017)。

硅藻土破坏昆虫体壁,致使虫体脱水、死亡,体壁柔软的昆虫应对硅藻土的敏感性高,如杂拟谷盗和大谷蠹幼虫对硅藻土的敏感性高于成虫。但是,硅藻土在推荐剂量下拌粮不能有效防治体壁柔软的嗜虫书虱 *L. entomophila*、无色书虱 *Lepinotus reticulatus* 和害嗜鳞螨 *Lepidoglyphus destructor* (Athanassiou *et al.*, 2009a); 使用剂量为 2~4 g/m² 的硅藻土能杀死黄粉虫 *Tenebrio molitor* 成虫,但对其 3 龄和 4 龄幼虫无效 (Mewis and Ulrichs, 2001)。据此推测昆虫对硅藻土的抗性机制应包括以下 3 个方面: (1) 昆虫高度骨化的表皮能降低硅藻土对虫体的损伤; (2) 在不同的虫期,昆虫的体表烃组成不同,体表烃中低分子量的酸类、醛类和胺类含量的升高会增加体壁的光滑度,不利于硅藻土的粘附; (3) 昆虫特殊的水分吸收机制,如利用隐肾结构回收水分,或利用直肠(黄粉虫幼虫)和口器(书虱)从环境中摄入水分,可以补偿从体壁流失的水分。

1.1.2 害虫生理状态

害虫的虫期、取食、滞育等状态均会影响防护剂的药效。通常幼虫,特别是低龄幼虫的体壁骨化程度低,杀虫剂易于穿透。如印度谷螟 *Plodia interpunctella* 高龄幼虫对硅藻土的耐受性高于 1 龄幼虫,谷斑皮蠹高龄幼虫对杀虫剂的耐受性高于低龄幼虫。但也有例外,如谷斑皮蠹高龄幼虫对氯氰菊酯、溴氰菊酯、多杀霉素、甲基嘧啶磷、硅藻土及其复配剂的耐受性远高于成虫 (Kavallieratos *et al.*, 2017); 黄粉虫幼虫对甲基嘧啶磷、溴氰菊酯、多杀霉素和硅藻土的耐受性高于成虫 (Mewis and Ulrichs, 2001; Kavallieratos *et al.*, 2019)。幼虫体表的多毛结构和特殊的体表烃组成在阻止防护剂穿透体壁的过程中起着重要的作用。在食物存在的情况下,谷象、印度谷螟、黄粉虫和杂拟谷盗对硅藻土的耐受性增加,可能是因为害虫可以从食物中获取水分补偿体壁流失的水分 (Mewis and Ulrichs, 2001)。

1.1.3 害虫地理种群

不同地区使用防护剂的种类和频率存在差异,抗性筛选的压力不同,造成不同种群的害虫对防护剂的抗性水平不同。此外,害虫不同地理种群生活史发育参数的差异以及对寄主有毒代谢物适

应性进化的差异也会影响防护剂的药效。如自然种群对药剂的抗性通常高于实验室种群; 硅藻土对不同种群赤拟谷盗的防效存在差异 (Arnaud *et al.*, 2005); 不同地理种群的谷象对敌敌畏、马拉硫磷、甲基毒死蜱、甲基嘧啶磷、溴氰菊酯和氯氰菊酯的抗性水平不同 (Kljajic and Peric, 2006); 使用溴氰菊酯 LD_{70} 筛选 1 次后, 谷象的两个种群对溴氰菊酯的耐药水平分别达到筛选前的 23.0 倍和 238.8 倍 (Kljajic and Peric, 2007); 不同地理种群的四纹豆象 *Callosobruchus maculatus* 对胡椒粉末的敏感性不同 (Oyenyi *et al.*, 2015)。

1.2 药剂剂型和施药方法

在美国、加拿大、澳大利亚已登记储粮用硅藻土制剂至少有 20 余种。这些硅藻土制剂的组分、粒度、pH 和硅藻来源不同, 对储粮害虫表现出不同的药效 (Athanassiou *et al.*, 2009a)。硅藻土制剂对小麦中谷蠹和米象的防效与其无定形二氧化硅含量正相关, 与硅藻土的粒度负相关 (Nwaubani *et al.*, 2014)。添加硅胶和食物级引诱剂可增强硅藻土的药效 (Arnaud *et al.*, 2005), 这是因为引诱剂可增加昆虫接触硅藻土的机率, 同时可刺激昆虫摄入大量的硅藻土, 加快虫体内脱水。在开发其它惰性粉制剂时, 同样要考虑制剂物理特征的影响。如沸石粉随着颗粒粒度的减小, 虫体附着量增加, 对锯谷盗的防效升高 (Rumbos *et al.*, 2016 b)。

通常, 粉剂的残效期比乳油和悬浮剂长, 微胶囊剂型的残效期比乳油长, 如与悬浮剂相比, 多杀霉素粉剂对谷蠹有更好的防效 (Athanassiou *et al.*, 2008 a); 与乳油相比, 以静电粉末作为载体的甲基嘧啶磷粉剂对锯谷盗和杂拟谷盗的防效更好 (Athanassiou *et al.*, 2016); 使用 640 mg/kg 的大蒜油处理大米 5 个月后, 微胶囊化剂型引起的赤拟谷盗的死亡率远高于未胶囊化的 (Yang *et al.*, 2009)。这主要是因为粉剂载体的多孔结构和微胶囊的包埋作用可以延缓药剂的降解, 并利于药剂的缓释。但也有例外, 如使用绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 孢子防治米象和杂拟谷盗时, 以硅藻土为载体的粉剂的效果好于悬浮剂, 而防治小麦和鹰嘴豆中的谷蠹时, 悬浮剂的效果好于粉剂, 这可能是因为粉剂中硅藻土和绿僵菌的增效表现因昆虫表皮烃组成而异 (Kavallieratos *et al.*, 2006)。

粉剂的施药方法有粉剂拌粮法和兑水喷浆法

两种。与喷浆法相比, 添加阿维菌素或苦皮藤素的硅藻土的可湿性粉剂直接拌粮时, 对小麦中米象和赤拟谷盗的种群抑制作用更好 (Athanassiou and Korunic, 2007)。粉剂的喷浆施药法利于药剂的均匀分布, 是硅藻土的常用的一种方法, 害虫防治实践中要考虑提高使用剂量来保证药效。

1.3 粮食种类

防护剂的药效受到粮食种类的影响。利用硅藻土防治谷蠹时, 在小麦中的防效优于大米和玉米中的 (Wakil *et al.*, 2013); 利用多杀霉素防治米象和书虱时, 在小麦中的防效优于大麦、稻谷或玉米中的 (Athanassiou *et al.*, 2008 a, 2009 b)。此外, 粮食种类对防护剂药效的影响因害虫种类而异。利用甲基嘧啶磷防治米象时, 在小麦和玉米中的防效优于稻谷中的; 防治杂拟谷盗时, 在玉米中的防效优于稻谷和小麦中的 (Rumbos *et al.*, 2016 a)。利用硅藻土防治米象和杂拟谷盗时, 在小麦中的防效优于玉米中的; 防治谷蠹时, 在小麦中的防效与玉米中的相当 (Athanassiou *et al.*, 2007)。

防护剂在粮粒上的粘附量会影响防效, 而防护剂的粘附能力与粮粒外部的质构和光滑度有关。玉米光滑的表面和种皮的高脂肪含量会降低硅藻土的粘附能力从而降低药效 (Kavallieratos *et al.*, 2005; Wakil *et al.*, 2013), 玉米颗粒间较大的空间也不利于害虫接触防护剂 (Athanassiou *et al.*, 2008 b)。类似地, 利用甲基嘧啶磷、溴氰菊酯和多杀霉素防治黄粉虫和谷斑皮蠹时, 在大麦和小麦中的防效优于玉米中的 (Kavallieratos *et al.*, 2017, 2019)。但是, 防护剂的粘附能力与其防效并不总是相关。如硅藻土制剂 Insecto 和 SilicoSec 在稻谷、未脱壳大麦、黑麦、燕麦和小麦籽粒表面的粘附量最大, 其次为脱壳大麦和黑小麦, 玉米表面的粘附量最少, 但对谷蠹的防效排序为, 燕麦和黑小麦 > 小麦 > 黑麦 > 未脱壳大麦和玉米 > 稻谷 > 脱壳大麦 (Kavallieratos *et al.*, 2005)。

一些其它的相互作用也会影响防护剂的药效。拌粮 14 d 后, 多杀霉素在玉米中迅速降解, 而在小麦中的残留量没有发生变化, 这可能是因为多杀霉素与玉米之间的化学反应导致其降解 (Chintzoglou *et al.*, 2008)。不同粮食的物化特征不同, 会影响昆虫的生长发育, 导致粮食种类和害虫种类对药效的影响存在交互作用 (Oyenyi *et al.*, 2015)。在害虫不易存活的粮食中, 防护剂

引起的害虫死亡率较高 (Rumbos *et al.*, 2016a), 如使用硅藻土处理大谷蠹后, 不同玉米品种的被 害百分率存在显著的差异 (Kavallieratos *et al.*, 2018); 选取以硬麦、玉米和大麦饲养 5 年的 3 个 米象品系进行硅藻土拌粮试验发现, 大麦饲养的 米象对硅藻土的抗性最高, 而玉米饲养的米象最 敏感。这可能是因为玉米是米象的劣质寄主, 而 营养不良的米象对硅藻土的耐受性降低 (Athanassiou *et al.*, 2008 b)。

1.4 环境湿度和粮食含水量

对于触杀剂和胃毒剂, 高湿环境会促进防护 剂降解, 高温会加速其降解过程, 从而降低药效。 25℃, 在水分含量 10% 的小麦中, 甲基毒死蜱、 甲基嘧啶磷和氯菊酯的半衰期分别为 69 d、101 d 和 346 d; 40℃, 在水分含量 13% 的小麦中, 3 种 药剂的半衰期缩短至 34 d、36 d 和 78 d (Afridi *et al.*, 2001)。高湿环境 (相对湿度 > 60%) 可以 减弱硅藻土引起的虫体脱水, 从而降低硅藻土的 药效。在一定的范围内, 随着相对湿度增大, 硅 藻土对谷象、杂拟谷盗和嗜虫书虱的防效变差 (Mewis and Ulrichs, 2001; Athanassiou *et al.*, 2009a)。而环境湿度对沸石粉药效的影响因沸石 的种类而异, 一些种类的药效随环境湿度增加略 微升高 (Eroglu *et al.*, 2019)。

1.5 环境温度

高温时, 害虫移动、呼吸、取食等活动增强, 接触防护剂的机率提高, 防护剂的药效增加。随 着温度升高, 有机磷类防护剂的防效增加 (Mlambo *et al.*, 2018), 硅藻土和沸石粉对谷蠹、 米象和锈赤扁谷盗的防效增加 (梁权, 2001; Vardeman *et al.*, 2007; Eroglu *et al.*, 2019), 多杀 霉素粉剂对谷蠹和米象的防效增加 (Athanassiou *et al.*, 2008 a)。但也有例外, 如 22℃、28℃ 和 34℃, 多杀霉素对小麦中谷蠹的防效相当 (Kavallieratos *et al.*, 2011); 拟谷盗属害虫对硅藻 土的耐受性随温度升高而增加 (Arnaud *et al.*, 2005), 这可能是因为高温时害虫的飞行行为增 强, 与防护剂的接触机率下降。多数拟除虫菊酯 类的药效随温度升高而降低, 这与杀虫剂的降解 速率及其在害虫体内的代谢机制相关 (Mlambo *et al.*, 2018)。

2 药效影响因素研究的实践意义

根据各种因素对防护剂药效的影响, 通过改

变和利用各种因素, 改进防护剂的使用技术, 达 到提高防护剂药效的目的。

2.1 防护剂的选择和复配

没有一种防护剂能够防治所有种类的害虫, 大谷蠹对拟除虫菊酯类防护剂的敏感性高, 而对 有机磷类防护剂的敏感性低; 象甲属的害虫对甲 基嘧啶磷的敏感性高, 而谷蠹对其敏感性低; 谷 蠹和锈赤扁谷盗对多杀霉素的敏感性高, 而赤拟 谷盗对其敏感性低 (Rumbos *et al.*, 2018)。将具 有增效作用的多种防护剂进行复配, 可以扩大杀 虫谱, 降低使用剂量。如多杀霉素和甲基毒死蜱 联用, 可提高对米象、锯谷盗和书虱的防效 (Hertlein *et al.*, 2011); 烯虫酯与硅藻土、甲基毒 死蜱或拟除虫菊酯类防护剂联用具有显著的增效 作用 (Wijayarathne *et al.*, 2018); 将真菌与硅藻土 结合, 硅藻土破坏昆虫体壁后, 利于病原菌的感 染 (Wakil and Schmitt, 2015)。此外, 选择不存在 交互抗性的防护剂进行轮用, 可以延缓害虫抗性 的发展, 进行抗性治理。如利用烯虫酯 + 多杀霉 素治理抗有机磷锯谷盗和抗马拉硫磷锈赤扁谷盗 (Nayak and Daglish, 2017); 利用多杀霉素治理抗 溴氰菊酯谷蠹 (Chen and Chen, 2013)。

2.2 施药技术的改进

环境因素会影响防护剂的药效, 应充分利用 或创造有利的环境因素, 提高防护剂药效, 实现 储粮害虫的综合治理。可以将防护剂与控温结合, 如在春末夏初气温回升阶段, 结合粮面压盖保持 低温, 可以降低防护剂的降解速率和提高药效 (庞文录, 2009); 夏粮入库后, 利用夜间气温较 低的时机进行通风降温, 可以延长溴氰菊酯的残 效期 (陈嘉东, 2003); 烯虫酯处理可以降低赤拟 谷盗的耐热性。在进行仓房结构处理 (Structural treatment) 时, 将热处理杀虫与烯虫酯联用可以降 低防治成本 (Wijayarathne *et al.*, 2018)。此外, 还 可以利用干燥空气进行粮堆通风, 降低环境湿度, 延长防护剂的残效期, 或是通过薄膜密闭粮堆等 气调措施创造低氧条件, 削弱储粮害虫的生理状 态, 提高药效, 如 CO₂ 气调结合溴氰菊酯等防护剂 拌粮, 能有效控制嗜卷书虱 (吴仕源等, 1997)。

3 总结和展望

害虫对药剂的敏感性、药剂的种类和剂型、 施药方法、粮食种类和环境因素均会影响防护剂

的药效 (Hertlein *et al.*, 2011)。在储粮害虫防治实践中, 这些因素影响防护剂药效的程度不尽相同, 但又存在复杂的相互联系。其中, 害虫对防护剂的敏感性占主导地位, 其决定使用的防护剂的种类和剂量; 防护剂的种类和剂型是最活跃的因素, 防护剂的复配、新种类和剂型的研发始终是研究的热点。最新研究成果的应用不仅是解决害虫抗药性的有效途径, 而且为实现绿色储粮提供有利保障; 环境因素最易变, 是制定施药方法时要重点考虑的因素。我国七大储粮生态区域的生态环境存在显著差异, 应针对具体的生态环境, 综合评价环境因素对防护剂药效的作用, 注重利用有效的环境因素因地制宜地制定施药技术。

为提高防护剂的药效, 并促进其在储粮害虫防治中的应用, 在应用基础研究方面, 需加强以下几方面的工作: (1) 进一步使用科学的方法评价不同防护剂, 特别是杀虫机制不同的药剂间的增效作用及其最佳混配比例 (Wang *et al.*, 2016), 缓解储粮害虫防护剂抗性现状; (2) 深入研究纳米剂型和环境条件等对植物源防护剂药效的影响, 评价其与其他防治措施的联用效果, 克服和弥补植物源杀虫剂残效期短、用量大的应用缺陷 (Isman, 2020); (3) 进一步揭示防护剂药效影响因素的交互作用, 如防护对象的种类和害虫地理种群通过影响昆虫的生理状态影响害虫对防护剂的敏感性 (Oyeniyi *et al.*, 2015)。明确这些因素的交互作用, 可以为防护剂使用剂量的确定和优化防治技术组合方案提供依据。

参考文献 (References)

- Afridi IAK, Parveen Z, Masud SZ. Stability of organophosphate and pyrethroid pesticides on wheat in storage [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2001, 37 (2): 199–204.
- Arnaud L, Lan HTT, Brostaux Y, *et al.* Efficacy of diatomaceous earth formulations admixed with grain against populations of *Tribolium castaneum* [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2005, 41 (2): 121–130.
- Arthur FH, Campbell JF, Donaldson JE. Laboratory evaluation of particle size, food contamination, and residual efficacy of pyrethrin + methoprene aerosol [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2017, 72: 100–110.
- Arthur FH. Efficacy of methoprene for multi-year protection of stored wheat, brown rice, rough rice and corn [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2016, 68: 85–92.
- Athanassiou CG, Arthur FH, Opit GP, *et al.* Insecticidal effect of diatomaceous earth against three species of stored-product psocids on maize, rice, and wheat [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2009a, 102 (4): 1673–1680.
- Athanassiou CG, Arthur FH, Throne JE. Efficacy of grain protectants against four psocid species on maize, rice and wheat [J]. *Pest Management Science*, 2009b, 65 (2): 1140–1146.
- Athanassiou CG, Kavallieratos NG, Chintzoglou GJ, *et al.* Effect of temperature and commodity on insecticidal efficacy of spinosad dust against *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) and *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrychidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2008a, 101 (3): 976–981.
- Athanassiou CG, Kavallieratos NG, Meletsis CM. Insecticidal effect of three diatomaceous earth formulations, applied alone or in combination, against three stored-product beetle species on wheat and maize [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43 (3): 330–334.
- Athanassiou CG, Kavallieratos NG, Vayias BJ, *et al.* Influence of grain type on the susceptibility of different *Sitophilus oryzae* (L.) populations, obtained from different rearing media, to three diatomaceous earth formulations [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2008b, 44 (3): 279–284.
- Athanassiou CG, Kavallieratos NG. Evaluation of spinetoram and spinosad for control of *Prostephanus truncatus*, *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, and *Tribolium confusum* on stored grains under laboratory tests [J]. *Journal of Pest Science*, 2014, 87 (3): 469–483.
- Athanassiou CG, Korunic Z. Evaluation of two new diatomaceous earth formulations, enhanced with abamectin and bitterbarkomycin, against four stored-grain beetle species [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43 (4): 468–473.
- Athanassiou CG, Vassilakos TN, Dutton AC, *et al.* Combining electrostatic powder with an insecticide: Effect on stored-product beetles and on the commodity [J]. *Pest Management Science*, 2016, 72 (12): 2208–2217.
- Chen CY, Chen ME. Susceptibility of field populations of the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (F.), to deltamethrin and spinosad on paddy rice in Taiwan [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2013, 55: 124–127.
- Chen JD. The effect of grain temperature on protectant efficacy and residue [J]. *Grain Storage*, 2003, 32 (2): 3–4. [陈嘉东. 粮温对储粮防护剂药效和残留影响的研究 [J]. 粮食储藏, 2003, 32 (2): 3–4.]
- Chintzoglou GJ, Athanassiou CG, Markoglou AN, *et al.* Influence of commodity on the effect of spinosad dust against *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae) and *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) [J]. *International Journal of Pest Management*, 2008, 54 (4): 277–285.
- Eroglu N, Sakka MK, Emekci M, *et al.* Effects of zeolite formulations on the mortality and progeny production of *Sitophilus oryzae* and *Oryzaephilus surinamensis* at different temperature and relative humidity levels [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2019, 81: 40–45.
- Guedes RNC, Campbell JF, Arthur FH, *et al.* Acute lethal and

- behavioral sublethal responses of two stored – product psocids to surface insecticides [J]. *Pest Management Science*, 2008, 64 (12): 1314 – 1322.
- Hertlein MB, Thompson GD, Subramanyam B, *et al.* Spinosad: A new natural product for stored grain protection [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2011, 47 (3): 131 – 146.
- Isman MB. Botanical insecticides in the twenty-first century-fulfilling their promise? [J]. *Annual Review of Entomology*, 2020, 65: 233 – 249.
- Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Diamantis GC, *et al.* Evaluation of six insecticides against adults and larvae of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on wheat, barley, maize and rough rice [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2017, 71: 81 – 92.
- Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Hatzikostantinou AN, *et al.* Abiotic and biotic factors affect efficacy of chlorfenapyr for control of stored – product insect pests [J]. *Journal of Food Protection*, 2011, 74 (8): 1288 – 1299.
- Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Michalaki MP, *et al.* Effect of the combined use of *Metarhizium anisopliae* (Metschnikoff) Sorokin and diatomaceous earth for the control of three stored – product beetle species [J]. *Crop Protection*, 2006, 25 (10): 1087 – 1094.
- Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Paschalidou FG, *et al.* Influence of grain type on the insecticidal efficacy of two diatomaceous earth formulations against *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) [J]. *Pest Management Science*, 2005, 61 (7): 660 – 666.
- Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Peteinatos GG, *et al.* Insecticidal effect and impact of fitness of three diatomaceous earths on different maize hybrids for the eco – friendly control of the invasive stored – product pest *Prostephanus truncatus* (Horn) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (11): 10407 – 10417.
- Kavallieratos NG, Michail EJ, Boukouvala MC, *et al.* Efficacy of pirimiphos – methyl, deltamethrin, spinosad and silicosec against adults and larvae of *Tenebrio molitor* L. on wheat, barley and maize [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2019, 83: 161 – 167.
- Kljajic P, Peric I. Altered susceptibility of granary weevil *Sitophilus granarius* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) populations to insecticides after selection with pirimiphos-methyl and deltamethrin [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43 (2): 134 – 141.
- Kljajic P, Peric I. Susceptibility to contact insecticides of granary weevil *Sitophilus granarius* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) originating from different locations in the former Yugoslavia [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2006, 42 (2): 149 – 161.
- Liang Q. A review of conspicuous research progress in stored grain pest control [J]. *Grain Storage*, 2001, 30 (1): 6 – 11. 梁权. 引人注目的储粮害虫防治研究进展述评 [J]. *粮食储藏*, 2001, 30 (1): 6 – 11.]
- Mewis I, Ulrichs C. Action of amorphous diatomaceous earth against different stages of the stored product pests *Tribolium confusum*, *Tenebrio molitor*, *Sitophilus granarius* and *Plodia interpunctella* [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2001, 37 (2): 153 – 164.
- Mlambo S, Mvumi BM, Stathers T, *et al.* Field efficacy and persistence of synthetic pesticidal dusts on stored maize grain under contrasting agro – climatic conditions [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2018, 76: 129 – 139.
- Nayak MK, Collins PJ, Pavic H. Long – term effectiveness of grain protectants and structural treatments against *Liposcelis decolor* (Pearman) (Psocoptera: Liposcelidae), a pest of stored products [J]. *Pest Management Science*, 2002, 58 (12): 1223 – 1228.
- Nayak MK, Daglish GJ, Byrne VS. Effectiveness of spinosad as a grain protectant against resistant beetle and psocid pests of stored grain in Australia [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2005, 41 (4): 455 – 467.
- Nayak MK, Daglish GJ. Base – line susceptibility of field populations of *Rhyzopertha dominica* (F.) to spinosad in Australia [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2017, 70: 1 – 6.
- Nwaubani SI, Opit GP, Otitodun GO, *et al.* Efficacy of two Nigeria – derived diatomaceous earths against *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) and *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) on wheat [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2014, 59: 9 – 16.
- Oyeniyi EA, Gbaye OA, Holloway GJ. The influence of geographic origin and food type on the susceptibility of *Callosobruchus maculatus* (Fabricius) to *Piper guineense* (Schum and Thonn) [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2015, 63: 15 – 21.
- Pang WL. The application of protective agent in storage grain [J]. *Cereals and Oils Processing*, 2009, 39 (8): 41 – 43. 庞文录. 储粮防护剂应用技术的探讨 [J]. *粮油加工*, 2009, 39 (8): 41 – 43]
- Rumbos CI, Dutton AC, Athanassiou CG. Insecticidal effect of spinetoram and thiamethoxam applied alone or in combination for the control of major stored – product beetle species [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2018, 75: 56 – 63.
- Rumbos CI, Dutton AC, Athanassiou CG. Insecticidal efficacy of two pirimiphos – methyl formulations for the control of three stored – product beetle species: Effect of commodity [J]. *Crop Protection*, 2016a, 80: 94 – 100.
- Rumbos CI, Sakka M, Berillis P, *et al.* Insecticidal potential of zeolite formulations against three stored grain insects, particle size effect, adherence to kernels and influence on test weight of grains [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2016b, 68: 93 – 101.
- Vardeman EA, Arthur FH, Nechols JR, *et al.* Efficacy of surface applications with diatomaceous earth to control *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) in stored wheat [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43 (4): 335 – 341.
- Wakil W, Riasat T, Lord JC. Effects of combined thiamethoxam and diatomaceous earth on mortality and progeny production of four Pakistani populations of *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) on wheat, rice and maize [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2013, 52: 28 – 35.

- Wakil W, Schmitt T. 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 [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2015, 64: 160 – 167.
- Wang ZY, Zhao YR, Lu YJ. Fumigation action of four plant oils against eggs of *Callosobruchus chinensis* (L.) (Coleoptera: Bruchidae) [J]. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2016, 19 (6): 1394 – 1403.
- Wijayarathne LKW, Arthur FH, Whyard S. Methoprene and control of stored – product insects [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2018, 76: 161 – 169.
- Wu SY, Wang JJ, Zhao ZM. The acute toxicity of carbon dioxide and deltamethrin on *Liposcelis bostrychophila* (Badonnel) at different temperatures [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 1997, 12 (6): 5 – 9. [吴仕源, 王进军, 赵志模. CO₂和溴氰菊酯在不同温度下对嗜卷书虱毒性的相互影响 [J]. *中国粮油学报*, 1997, 12 (6): 5 – 9]
- Yang FL, Li XG, Zhu F, et al. Structural characterization of nanoparticles loaded with garlic essential oil and their insecticidal activity against *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57 (21): 10156 – 10162.
- Zhang GL. The effect of protectants on integrated control of stored – grain insects [J]. *Grain Storage*, 2002, 31 (6): 8 – 12. [张国梁. 防护剂在储粮害虫综合治理中的作用与性能 [J]. *粮食储藏*, 2002, 31 (6): 8 – 12]