

专论与综述

Reviews

高温控温处理防治害虫的研究及应用进展

吕建华*, 张豫麒, 康宇龙

(河南工业大学粮油食品学院, 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 粮食储藏与安全教育部工程研究中心, 郑州 450001)

摘要 高温控温处理方法具有环境友好、杀虫效率高、无残留等优点,已经用于商品闪热处理、检疫热处理防治害虫。但是高温控温处理可能会存在破坏商品质量,热量分布不均导致热利用效率较低,不能有效杀灭商品以及工厂中的害虫等问题。本文综述了高温控温处理方法在害虫防治中的研究及应用进展,讨论了高温控温处理所面临的问题以及今后发展方向。

关键词 高温控温杀虫; 物理防治; 害虫; 溴甲烷替代技术

中图分类号: S763.306 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2020569

Advances in the research and application of controlled heat treatment in insect pest control

LÜ Jianhua*, ZHANG Yuqi, KANG Yulong

(College of Food Science and Technology, Henan Collaborative Innovation Center for Grain Storage Security, Engineering Research Center of Grain Storage and Security of Ministry of Education, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract The controlled heat treatment has the advantages of environment-friendliness, high insecticidal efficiency, and free pesticide residue. It has been used in commercial flash heat treatment and quarantine heat treatment for controlling insect pests. However, the controlled heat treatment may negatively affect the quality of goods, and uneven heat distribution may result in low heat utilization efficiency and fail to effectively kill pests in goods and factories. The research and application progresses in the controlled heat treatment methods was summarized in this paper, and the existing problems during controlled heat treatment and its future development directions were discussed.

Key words controlled heat treatment; physical control; insect pests; methyl bromide alternatives

每年害虫发生均会对储粮、干货及水果等农产品造成严重危害。以前人们主要以化学方式作为害虫防治的主要手段。但是,近年来害虫抗药性增强、农药残留与环境污染等负面影响日益引起人们的高度关注,加上世界各国政府对农药的管制越来越严格,高温控温防治害虫的方法逐步成为植物保护领域研究的热点。

高温控温作为一种物理防治方法,具有安全、高效、可持续、环境友好等优点。高温控温处理技术在历史上很早就被人们用来控制害虫^[1-2]。例如,为了控制蝗虫,中国商代(约公元前 1520 年至 1030 年)就

专门任命了防治蝗虫的官员,他们用篝火燃烧捕捉到的蝗虫或击退它们^[2]。这种方法在 20 世纪被传入美国,当时主要在美国农场用于控制麦长蝻 *Blissus leucopterus* 和蝗虫^[3]。近年来,高温控温被广泛用于检疫处理杀灭植物及果蔬类农产品中的害虫,特别是用于粮食等农产品仓储及食品加工场所杀虫处理。高温控温热处理在控制害虫方面和常规熏蒸一样有效,而且使用成本正在下降^[4]。本文对高温控温防治害虫常用处理方法(干热、热蒸汽、热水、电磁能、强制热风、高温气调、太阳能等)研究及应用进展进行综述,以期今后开展高温控温杀虫研究与应用有所借鉴。

收稿日期: 2020-10-28 修订日期: 2021-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(U1604115)

* 通信作者 E-mail: jianhly@163.com

1 高温控温处理杀虫技术

1.1 干热杀虫技术

干热杀虫处理通常是在规定的时间内保持处理空间内高温以消灭害虫,是一个有较大潜力的熏蒸替代方法^[5]。干热杀虫技术主要应用于结构空间热处理杀虫,具有环境友好、杀虫效率高、无农药残留等优点。结构空间热处理杀虫技术是干热杀虫处理的一种主要处理方式,一般是将空间环境温度加热到50~60℃,并保温24~36 h以杀死结构空间内存在的害虫^[6]。这种方法在北美洲、欧洲和澳洲已被广泛应用于杀灭储粮空仓和食品加工厂空间中的害虫^[7-9]。

干热处理能有效防治仓库里谷物、坚果和干果中的害虫。早在1792年,法国就进行了针对麦蛾 *Sitotroga cerealella* 侵害的谷类食物的热处理^[10],后来法国人使用被称为“昆虫磨”的设备加热进出的粮食,杀灭其中的害虫^[5]。Kirkpatrick 等发现将米象 *Sitophilus oryzae* 和谷蠹 *Rhizopertha dominica* 在39℃和43℃条件下处理4 d,死亡率达到99%^[11]。Dermott 等报道将感染害虫的小麦在59℃下处理12 min,可杀灭其中所有的米象和麦蛾^[12]。Mahroof 等确定了热处理时间与赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 卵、幼虫、蛹和成虫死亡率的关系,发现升温速率越快,高温持续时间越长其死亡率越高,且蛹的死亡率明显低于其他发育阶段^[13]。Boina 等测定了杂拟谷盗 *Tribolium confusum* 所有虫态的热敏感性,发现卵和低龄幼虫对热最敏感,而高龄幼虫对热最不敏感^[14]。Mahroof 等分别将赤拟谷盗1日龄蛹和2周龄成虫在50℃下暴露60 min和39 min,其繁殖力、卵发育到成虫的存活率和后代产量均受到了不利影响^[15]。

干热处理也可以用来防治一般建筑物结构内的害虫。Mahroof 建议将感虫的房间加热到45℃以上来控制害虫^[13]。Pereira 等研究了臭虫 *Cimex lectularius* 热致死时间曲线,报道了从41℃处理100 min到49℃处理1 min均可达到100%致死率^[16]。

1.2 热蒸汽杀虫技术

热蒸汽处理有悠久的历史,主要利用蒸汽传递热量来达到杀虫目的。该方法于1913年在墨西哥首次用于控制墨西哥按实蝇 *Anastrepha ludens*^[17]。在利用44℃热蒸汽处理2 h成功杀灭水仙拟蜂蝇

Merodon equestris 后,热蒸汽处理方法相继被用于控制佛罗里达柑橘^[17]、加利福尼亚水果和蔬菜^[18]中的地中海实蝇 *Ceratitis capitata*。热蒸汽加热技术由 Baker 进一步发展,现在广泛用于处理柑橘 *Citrus*、木瓜 *Chaenomeles sinensis*、菠萝 *Ananas comosus*、甜椒 *Capsicum annuum*、茄子 *Solanum melongena*、番茄 *Lycopersicon esculentum* 和西葫芦 *Cucurbita pepo* 中的害虫^[19]。Sinclair 等对加州柑橘和鳄梨 *Persea americana* 进行了热蒸汽处理,发现热处理对水果品质的影响明显受到品种、生长环境、成熟度和处理时水果质量的影响^[20]。Seo 等将该技术应用于杀灭木瓜上的橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis*^[21]。在美国佛罗里达州,McCoy 等提出了一种在高温强制通风的设施中进行热蒸汽处理有效控制玫瑰短喙象 *Pantomorus cervinus* (异名 *Asynonychus godmani*) 卵的方法^[22]。

1.3 热水杀虫技术

热水浴(>40℃)和浸浴是最简单的热处理方式。由于以水为介质,处理过程不与空气接触,具有快速转移能量的特点。热水浴在实验室中被广泛用于热处理时害虫死亡动力学(TDK)参数测定^[23]。McLaren 等描述了一种商业规模的热水处理杀虫方法。用50℃热水浴处理杏、桃和油桃1~2 min来杀死其中的新西兰花蓟马 *Thrips obscuratus*^[24]。虽然热水处理方法历史悠久,但直到2007年用于检疫的热水处理才被批准使用。

Couey 等将二溴乙烯熏蒸与热水浴相结合来控制夏威夷木瓜中的黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster*^[25-26]。Crocker 等使用60℃热水浴来控制弗吉尼亚栎 *Quercus virginiana* 果实中的欧洲榛实象 *Curculio glandium*^[27]。热水浸泡已用于控制佛罗里达芒果中的加勒比按实蝇 *Anastrepha suspensa* 和进口到美国的水果中的果蝇^[28]。由于对产品施加的热应力,这种处理方法更适用于防治热带和亚热带水果中的害虫。

1.4 电磁能杀虫技术

早期使用电磁能(射频或微波)进行热处理的工作主要集中在防治储藏物昆虫上。利用微波或射频处理产生的热效应使昆虫体内水分升温进而破坏蛋白质及酶活性来杀灭干燥储藏物中的害虫。Lutz 和 Headlee 首次报道了射频处理对昆虫造成的致命热效应^[29-30]。Hadjinicolaou 和 Whitney 将暴露于

高频无线电波中的各种储藏物品有害生物的死亡归因于昆虫体内产生的热量^[31-32]。Mouromtseff 等致力于设计将射频用于防治谷物中害虫的振荡器^[33-34]。粮堆中的油棕象甲 *Elaeidobius kamerunicus* 老熟幼虫比其他发育阶段的虫体更耐受高频电流,粮堆外的成虫比其内部的成虫更易受到伤害^[35]。

1.4.1 红外辐射

电磁波谱红外区域的频率范围在 0.3~430 THz,介于可见光和微波之间。红外辐射由热物质强烈发射,并很容易被所照射的物质吸收,使其温度升高,从而达到杀虫的目的。红外辐射比微波辐射能够更有效地防治米象^[36]。Kirkpatrick 等测定了 12 种储藏物害虫在小麦中的死亡率,发现 65℃处理 1 min 后,所有害虫的死亡率均高于 95%^[36]。在 43.3℃下使用红外辐射处理感染米象的小麦 24 h 后,米象的死亡率高于 93%^[37]。在 50℃下红外辐射处理 1 h 后,锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*、米象和赤拟谷盗成虫的死亡率均高于 94%^[38]。

1.4.2 微波

微波(microwave, MW)的频率为 1~100 GHz,介于红外和调频(frequency modulation, FM)无线电之间,接近无线电频率范围。微波已被广泛应用于处理土壤、博物馆文物和新鲜水果等物品,特别是用于控制谷物和储藏物中的害虫^[39]。与其他处理方式相比,在一定强度微波场的作用下,物料中的害虫会吸收微波,导致体内温度升高,其蛋白质和酶等被破坏而死亡,所以微波最适合处理干燥的物体。

Hamid 等研究了一种微波干燥小麦的系统,在 65℃下处理 30 min,杂拟谷盗死亡率即可达到 100%^[40]。米象的老熟幼虫和蛹比其他害虫的幼虫或卵更能抵抗微波处理^[37]。Wilkin 等利用微波在 60℃下持续处理糖果和核桃 15 min 可杀灭赤拟谷盗和锯谷盗成虫、印度谷螟 *Plodia interpunctella* 和烟草粉斑螟 *Ephestia elutella* 的幼虫^[41]。

微波也被开发用于防治木材和其他物品中的害虫。Lewis 等将微波处理与其他 5 种控制小楹白蚁 *Incisitermes minor* 的方法进行了比较,发现微波处理木材 8 min,3 d 后小楹白蚁死亡率为 93%,4 周后死亡率达到 99%^[42]。与传统加热处理 123 min 相比,使用微波将木材加热到 60℃并维持 5 min 对木材包装材料中的光肩星天牛 *Anoplophora glabrip-*

ennis 有更好的防治效果^[43]。Hall 讨论了用微波作为熏蒸的一种替代方法处理植物标本,以控制肾斑皮蠹 *Trogoderma inclusum* 和药材甲 *Stegobium paniceum* 幼虫和成虫^[44]。

1.4.3 无线射频

无线射频(radio frequency, RF)波位于电磁波谱的较低频率范围,具有较长的波长,工业上最常用的频率是 13.56、27.12 MHz 和 40.68 MHz^[45]。无线射频通过分子极性的快速变化和带电离子的迁移使昆虫体内产生较高内热而死亡^[31]。射频加热的优点是速度快,由于其波长较长,可以穿透目标材料,在产品 and 害虫之间产生差异加热,而且不会产生有毒残留物。

Headlee 等研究发现射频处理会造成昆虫与其寄主植物之间的差异损伤^[30]。采用射频处理时,杀死日本弧丽金龟 *Popillia japonica* 所有发育阶段虫体所必需的热量也会破坏宿主植物北美香柏 *Thuja occidentalis* 和欧洲云杉 *Picea abies* 的根^[46]。无线射频也会对昆虫的行为和生理变化产生影响^[46]。Mickey 等发现,当昆虫暴露于电磁场中时,它们会向波的方向平行或垂直移动,而不是随机移动^[47]。Rai 等将黄粉虫 *Tenebrio molitor* 幼虫放置在射频场中,其成虫形态发生了异常变化^[48]。

1.5 强制热风杀虫技术

强制热风处理类似于热蒸汽处理,但区别是强制热风处理没有水分^[49]。监测处理空间温度、湿度及改进空气输送方式推动了强制热风处理技术的发展^[6]。强制热风主要适用于处理水果中的害虫。强制热风处理比热水浸浴或热蒸汽处理方法能更好地提升水果质量^[50]。强制热风已成为夏威夷木瓜出口到美国大陆时的首选处理方法。从斐济出口到新西兰的木瓜、茄子和面包果,从库克群岛、萨摩亚和汤加出口到新西兰的木瓜也都使用强制热风处理杀虫^[6]。强制热风处理的缺点是处理时间长,操作设备复杂,而且并不是对所有园艺商品都适合,比如鳄梨 *Persea americana*^[51]。

1.6 太阳能杀虫技术

早期文明时代,人们利用太阳的热能杀死储藏物中的害虫^[1]。针对储藏物害虫的太阳能热处理,McFarlane 提出利用 50℃为临界温度的太阳能箱杀灭玉米中的大谷蠹 *Prostephanus truncatus*^[52]。Baskin^[53]描述了一种太阳能袋方法来灭除人工制品

中的害虫。利用太阳能来控制害虫的方法虽然很简单,但是存在精准调节温度方面的问题。

2 高温处理与其他方法联合应用

高温控温处理可以与其他防治方法联合用于害虫防治。与单独使用某种防治方法相比,联合使用可显著提高杀虫效果。

2.1 高温与气调相结合

高温气调(high-temperature controlled atmosphere, HTCA)处理是通过使用高浓度的氮气或二氧化碳替代氧气来实现热空气与缺氧环境相结合,也就是将升高温度与控制大气环境结合起来以提高杀虫效果。其杀虫机制是在加热过程中增加目标害虫的呼吸需求,同时限制可获得的氧气量,导致害虫窒息死亡。Neven 等讨论了高温气调杀虫的发展^[54],证明了高温(46℃)气调方法对控制西部樱桃实蝇 *Rhagoletis indifferens* 效果明显^[55]。Obenland 等发现,在用高温(46℃)气调方法处理油桃中的苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 时,油桃的品质并没有发生明显的变化^[56]。

高温气调处理在储藏物害虫防治上使用较多。提高温度会增加暴露在低氧高二氧化碳浓度下的昆虫死亡率^[57],增加高氮或高氦环境下赤拟谷盗和杂拟谷盗对低氧的敏感性^[58],增加在低氧环境下米象、赤拟谷盗和锯谷盗成虫的死亡率^[59]。在一定温度范围内可控大气环境中,当温度>27.5℃时,嗜卷

书虱 *Liposcelis bostrychophila* 的死亡率随着温度升高而上升^[60]。当温度为 38℃时,大气中二氧化碳浓度增加或氧气浓度降低时,赤拟谷盗的死亡率增加^[61]。在欧洲,高温气调处理已经取代了溴甲烷熏蒸,用于治理储存的食品、香料、谷物、家具和地板中的害虫。

2.2 高温与化学防治相结合

高温控温处理不影响氟氯氰菊酯和生长调节剂烯虫乙酯的有效性,并可增强其对赤拟谷盗的作用效果^[62]。在温度为 50℃的环境中使用硅藻土可以杀死全部赤拟谷盗成虫^[63]。与单一高温防治相比,杀虫剂与高温结合对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 有更好的防治效果^[64]。温度升高可以明显缩短磷化氢和二氧化碳混合熏蒸杀虫的时间^[65]。将二溴化乙烯熏蒸与热水浴相结合,可以控制夏威夷木瓜中的黑腹果蝇^[25-26]。

2.3 高温与其他方法相结合

烟草甲 *Lasioderma serricorne* 成虫和幼虫耐高温能力强,采用真空回潮与适当提高复烤干燥温度相结合,可以完全杀死烟草甲^[66]。在商品检疫处理的过程中也可以使用冷热结合的处理方式杀灭害虫^[67]。

3 结论与展望

综上所述,目前这些高温控温处理方法各有其优缺点(表 1),在生产实践或科研工作当中可根据具体情况选择使用。

表 1 高温控温处理方法的优缺点¹⁾

Table 1 Advantages and disadvantages of controlled heat treatment methods

方法 Strategy	首次使用时间/年 First year of use	处理对象 Material treated	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
干热 Dry heat	1792 ^[10]	建筑、谷物、纤维、文物、书籍	简单,通用,技术成熟	首先表面加热,加热缓慢
热蒸汽 Vapor heat	1913 ^[17]	水果、蔬菜	操作相对简单	设备昂贵,首先表面加热,加热缓慢
热水 Hot water	1925 ^[24]	水果、鳞茎、观赏植物、种子	简单,高效	商品表面加热,燃料成本高
电磁能 Electromagnetic energy	1927 ^[29]	实验室、谷物、种子、坚果	快速,首先内部加热	设备昂贵,受处理环境和样品等影响较大
太阳能 Solar energy	1983 ^[53]	实验室、建筑结构	简单,成本低	受环境影响较大
强制热风 Forced hot air	1989 ^[49]	水果、蔬菜	产品质量不会受损	设备昂贵,首先表面加热,加热缓慢
高温气调 HTCA	1996 ^[56]	实验室、食品、香料、谷物、家具	比其他加热方法快	首先表面加热,操作复杂,设备昂贵

1) 高温气调。

HTCA: High-temperature controlled atmosphere.

昆虫为害影响产品的储藏、贸易和销售,造成巨大的经济损失,需要预防或控制昆虫的感染来保证产品的品质。尽管化学药剂熏蒸是最常用且有效的

控制害虫的方法,但随之带来的环境以及安全问题也为开发非化学方法提供了强大的动力。昆虫为变温动物,环境温度对于昆虫的生长发育至关重要,因

此通过控制环境温度来防治害虫是一个有效可行的方法^[7]。随着国际上溴甲烷被完全禁止(检疫处理除外)使用,作为溴甲烷的替代技术,高温控温杀虫已逐步引起人们的重视,并不断在植物检疫处理、粮食加工场所空间杀虫等领域得到推广应用,取得了良好的效果。加热可以杀灭害虫,但同时也会影响产品质量甚至加速工厂设备老化,今后对关于高温控温杀虫过程中温度变化规律、不同害虫不同虫态对不同程度高温的适应性、害虫对高温处理的行为反应、高温处理对处理对象品质的影响等需要进一步研究,以便于在实践中更加科学高效实施高温控温杀虫,提高杀虫效果。

参考文献

- [1] COTTON R T. Pests of stored grain and grain products [M]. Minneapolis, Minnesota; Burgess Publishing Co., 1963: 318.
- [2] NEVO D. The desert locust, *Schistocerca gregaria*, and its control in the land of Israel and the near east in antiquity, with some reflections on its appearance in Israel in modern times [J]. *Phytoparasitica*, 1996, 24(1): 7-32.
- [3] VERMEIRE L T, MITCHELL R B, FUHLENDORF S D, et al. Selective control of rangeland grasshoppers with prescribed fire [J]. *Journal of Range Management*, 2004, 57(1): 29-33.
- [4] QUARLES W. Pest control operators and heat treatment [J]. Technical Note, 1994, 16(2): 8.
- [5] DEAM G A. Further data on heat as a means of controlling mill insects [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1913, 6(1): 40-53.
- [6] TANG J, MITCHAM E, WANG S J, et al. Heat treatments for postharvest pest control [M]. UK: CAB International, 2007.
- [7] 张会娜, 吕建华, 张晨光, 等. 热处理对经历高温锻炼的玉米象保护酶活性的影响[J]. *河南工业大学学报*, 2015, 36(3): 76-80.
- [8] LÜ Jianhua, HUO Mingfei, KANG Yulong. Transcript-level analysis in combination with real-time PCR elucidates heat adaptation mechanism of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera; Tenebrionidae) larvae [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2019, 112(6): 2984-2992.
- [9] LÜ Jianhua, HUO Mingfei. Transcriptome analysis reveals heat tolerance of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera; Tenebrionidae) adults [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2018, 78: 59-66.
- [10] FIELDS P G, WHITE D G. Alternatives to methyl bromide treatments for stored-product and quarantine insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2002, 47(1): 331-359.
- [11] KIRKPATRICK R L, TILTON E W. Infrared radiation to control adult stored-product Coleoptera [J]. *Journal of the Georgia Entomological Society*, 1972, 7(1): 73-75.
- [12] DERMOTT T, EVANS D E. An evaluation of fluidized-bed heating as a means of disinfesting wheat [J]. *Journal of Stored Products Research*, 1978, 14(1): 1-12.
- [13] MAHROOF R M, SUBRAMANYAM B, EUSTACE D. Temperature and relative humidity profiles during heat treatment of mills and its efficacy against *Tribolium castaneum* (Herbst) life stages [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2003, 39(5): 555-569.
- [14] BOINA D, SUBRAMANYAM B. Relative susceptibility of *Tribolium confusum* life stages exposed to elevated temperatures [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2004, 97(6): 2168-2173.
- [15] MAHROOF R M, SUBRAMANYAM B, FLIMN P W. Reproductive performance of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera; Tenebrionidae) exposed to the minimum heat treatment temperature as pupae and adults [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2005, 98(2): 626-633.
- [16] PEREIRA R M, KOEHLER P G, MARGIE P, et al. Lethal effects of heat and use of localized heat treatment for control of bed bug infestations [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2009, 102(3): 1182-1188.
- [17] LATTA R. The vapour-heat treatment as applied to the control of narcissus pests [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1932, 25(5): 1020-1026.
- [18] MACKIE D B. Heat treatments of California fruits from the standpoint of compatibility of the Florida process [J]. *Monthly Bulletin of the California Department of Agriculture*, 1931, 20: 211-218.
- [19] BAKER A C. Insects; the year book of agriculture [M]. Washington, US: Government Printing Office, 1952: 401-404.
- [20] SINCLAIR W B, LINDGREN D L. Vapour heat sterilization of California citrus and avocado fruits against fruit-fly insects [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1955, 48(2): 133-138.
- [21] SEO S T, HU B K S, KOMURA M, et al. *Dacus dorsalis* vapour heat treatment in papaya [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1974, 67(2): 240-242.
- [22] MCCOY C W, TERRANOVA A C, MILLER W R, et al. Vapour heat treatment for the eradication of fuller rose beetle eggs on grapefruit and its effect on fruit quality [J]. *Proceedings of the Florida Horticultural Society*, 1994, 107: 235-240.
- [23] IKEDIALA J N, TANG J, WIG T. A heating block system for studying thermal death kinetics of insect pests [J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 43(2): 351-358.
- [24] MCLAREN G F, FRASER J A, MCDONALD R M. The feasibility of hot water disinfestation of summerfruit [C]// *Proceedings of the 50th New Zealand Plant Protection Conference*, 1997: 425-430.
- [25] COUEY H M, HAYES C F. Quarantine procedure for Hawai-

- ian papaya using fruit selection and a two-stage hot-water immersion [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1986, 79(5): 1307 - 1314.
- [26] COUEY H M, ARMSTRONG J W, HYLIN J W, et al. Quarantine procedure for Hawaii papaya, using a hot-water treatment and high temperature, low-dose ethylene dibromide fumigation [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1985, 78(4): 879 - 884.
- [27] CROCKER R L, MORGAN D L. Control of weevil (*Curculio* sp.) larvae in acorns of the live oak (*Quercus virginiana*) by heat [J]. *HortScience*, 1983, 18(1): 106 - 107.
- [28] SHARP J L. Hot-water treatment for control of *Anastrepha suspensa* (Diptera: Tephritidae) in mangos [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1986, 79(3): 706 - 708.
- [29] LUTZ F E. A much abused but still cheerful cricket [J]. *Journal of the New York Entomological Society*, 1927, 35(3): 307 - 308.
- [30] HEADLEE T J, BURDETTE R C. Some facts relative to the effect of high frequency radio waves on insect activity [J]. *Journal of the New York Entomological Society*, 1929, 37(1): 59 - 64.
- [31] HADJINICOLAOU J. Effect of certain radio waves on insects affect certain stored products [J]. *Journal of the New York Entomological Society*, 1931, 39(2): 145 - 150.
- [32] WHITNEY W R. Radiotherapy [J]. *General Electric Review*, 1932, 35: 410 - 412.
- [33] MOUROMTSEFF I E. Oscillator kills grain weevils in a few seconds [J]. *Electrical World*, 1933, 102: 667.
- [34] ULREY D. New electronic tubes and new uses [J]. *Physics*, 1936, 7(3): 97 - 105.
- [35] KUZNETZOVA E A. Study of the action of the high frequency field on insects [J]. *Review of Applied Entomology (Series A)*, 1937, 25: 154.
- [36] KIRKPATRICK R L, BROWER J H, TILTON E W. A comparison of microwave and infrared radiation to control rice weevil (Coleoptera: Curculionidae) in wheat [J]. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 1972, 45: 434 - 438.
- [37] KIRKPATRICK R L. Infrared radiation for control of lesser grain borers and rice weevils in bulk wheat (Coleoptera: Bostrichidae and Curculionidae) [J]. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 1975, 48(1): 100 - 104.
- [38] MAHROOF R, ZHU Kunyan, SUBRAMANYAM B. Changes in expression of heat shock proteins in *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) in relation to developmental stage, exposure time, and temperature [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2005, 98(1): 100 - 107.
- [39] WANG Shouang, TANG Juming. Radio frequency and microwave alternative treatments for insect control in nuts; a review [J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2001, 10(3): 105 - 120.
- [40] HAMID M A K, BOULANGER R J. A new method for the control of moisture and insect infestations of grain by microwave power [J]. *Journal of Microwave Power*, 1969, 4(1): 11 - 18.
- [41] WILKIN D R, NELSON G. Control of insects in confectionery walnuts using microwaves [J]. *British Crop Protection Council Monograph*, 1987, 37: 247 - 254.
- [42] LEWIS V R, HAVERTY M I. Evaluation of six techniques for control of the western dry wood termite (Isoptera: Kalotermitidae) in structures [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1996, 89(4): 922 - 934.
- [43] FLEMING M R, HOOVER K, JANOWIAK J J, et al. Microwave irradiation of wood packing material to destroy the Asian long horned beetle [J]. *Forest Products Journal*, 2003, 53(1): 46 - 52.
- [44] HALL D W. Microwave; a method to control herbarium insects [J]. *Taxon*, 1981, 30(4): 818 - 819.
- [45] TANG J, IKEDIALA J N, WANG S, et al. High-temperature-short-time thermal quarantine methods [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 21(1): 129 - 145.
- [46] HEADLEE T J, JOBBINS D M. Progress to date on studies of radio waves and related forms of energy for insect control [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1938, 31(5): 559 - 563.
- [47] MICKEY G H, HELLER J H. Radio-frequency treatment for breaking dormancy and controlling virus infections of plants [J]. *Transactions of the ASAE*, 1964, 7(4): 398 - 401.
- [48] RAI P S, BALL H J, NELSON S O, et al. Morphological changes in adult *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) resulting from radio frequency or heat treatment of larvae or pupae [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1971, 64(5): 1116 - 1121.
- [49] ARMSTRONG J W, HANSEN J D, HU B K S, et al. High-temperature, forced-air quarantine treatment for papayas infested with tephritid fruit flies (Diptera: Tephritidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1989, 82(6): 1667 - 1674.
- [50] HANSEN J D, ARMSTRONG J W, HU B K S, et al. Thermal death of oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae) third instars in developing quarantine treatments for papayas [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1990, 83(1): 160 - 167.
- [51] KERBEL E L, MITCHELL F G, MAYER G. Effect of postharvest heat treatments for insect control on the quality and market life of avocados [J]. *HortScience*, 1987, 22(1): 92 - 94.
- [52] MCFARLANE J A. Preliminary experiments on the use of solar cabinets for thermal disinfestations of maize cobs and some observations on heat tolerance in *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) [J]. *Tropical Agriculture*, 1989, 29(2): 75 - 89.

- aria solani* in potato [J/OL]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 1196. DOI: 10.3389/fmicb.2020.01196.
- [15] HUANG Shuashuai, HE Zhangjiang, ZHANG Shiwei, et al. Interplay between calcineurin and the SlT2 MAP-kinase in mediating cell wall integrity, conidiation and virulence in the insect fungal pathogen *Beauveria bassiana* [J]. *Fungal Genetics & Biology*, 2015, 83: 78–91.
- [16] 刘丽丽. 马铃薯早疫病菌产孢诱导、嗜菌酯敏感性及品种抗病性的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
- [17] YIN Ziyi, TANG Wei, WANG Jingzhen, et al. Phosphodiesterase MoPdeH targets MoMck1 of the conserved mitogen-activated protein (MAP) kinase signalling pathway to regulate cell wall integrity in rice blast fungus *Magnaporthe oryzae* [J]. *Molecular Plant Pathology*, 2016, 17(5): 654–668.
- [18] 张小华, 刘向勇, 卞伟华, 等. 酵母 *SOD1* 基因缺失突变体应答刚果红胁迫的转录组学分析[J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2015, 31(9): 960–966.
- [19] 宋文静, 董金皋. 玉米大斑病菌孢子萌发和附着胞形成的影响因素研究[J]. *植物病理学报*, 2008, 38(5): 536–539.
- [20] TALBOT N J. On the trail of a cereal killer: Exploring the biology of *Magnaporthe grisea* [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2003, 57(1): 177–202.
- [21] CHI M H, PARK S Y, KIM S, et al. A novel pathogenicity gene is required in the rice blast fungus to suppress the basal defenses of the host [J/OL]. *PLoS Pathogens*, 2009, 5(4): e1000401. DOI: 10.1371/journal.ppat.1000401.
- [22] LIU Guosheng, GREENSHIELDS D L, SAMMYNAIKEN R, et al. Targeted alterations in iron homeostasis underlie plant defense responses [J]. *Journal of Cell Science*, 2007, 120(4): 596–605.
- [23] LÁZARO M, REGINE K. An *Ustilago maydis* gene involved in H₂O₂ detoxification is required for virulence [J]. *The Plant Cell*, 2007, 19(7): 2293–2309.
- (责任编辑: 杨明丽)
-
- (上接 6 页)
- [53] BASKIN B. Solar bagging: putting sunlight to work to eliminate insect infestations in mere hours [J]. *Western Association for Art Conservation Newsletter*, 2001, 23(2): 20–21.
- [54] NEVEN L G, MITCHAM E J. CATTS (controlled atmosphere/temperature treatment system): A novel tool for the development of quarantine treatments [J]. *American Entomologist*, 1996, 42(1): 56–59.
- [55] NEVEN L G, REHFELD-RAY L M. Combined heat and controlled atmosphere quarantine treatments for control of western cherry fruit fly in sweet cherries [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2006, 99(3): 658–663.
- [56] OBENLAND D, NEIPP P, MACKEY B, et al. Peach and nectarine quality following treatment with high-temperature forced air combined with controlled atmosphere [J]. *HortScience*, 2005, 40(5): 1425–1430.
- [57] HAREIN P K, PRESS A F. Mortality of stored-peanut insects exposed to mixtures of atmospheric gases at various temperatures [J]. *Journal of Stored Products Research*, 1968, 4(1): 77–82.
- [58] ALINIAZEE M T. Susceptibility of the confused and red flour beetles to anoxia produced by helium and nitrogen at various temperatures [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1972, 65(1): 60–64.
- [59] STOREY C L. Mortality of adult stored-product insects in an atmosphere produced by an exothermic inert atmosphere generator [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1975, 68(3): 316–318.
- [60] WANG Jinjun, TSAI J H, ZHAO Zhimo, et al. Interactive effects of temperature and controlled atmosphere at biologically relevant levels on development and reproduction of the psocid, *Liposcelis bostrychophila* Badoonell (Psocoptera: Liposcelidae) [J]. *International Journal of Pest Management*, 2001, 47(1): 55–62.
- [61] SODERSTROM E L, MACKEY B E, BRANDL D G. Interactive effects of low-oxygen atmospheres, relative humidity, and temperature on mortality of two stored-product moths (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1986, 79(5): 1303–1306.
- [62] ARTHUR F H, DOWDY A K. Impact of high temperature on efficacy of cyfluthrin and hydroprene applied to concrete to control *Tribolium castaneum* (Herbst) [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2003, 39(2): 193–204.
- [63] DOWDY A K. Mortality of red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) exposed to high temperature and diatomaceous earth [J]. *Journal of Stored Products Research*, 1999, 35(2): 175–182.
- [64] 左太强, 张彬, 张绍婷, 等. 高温和啮虫脲处理西花蓟马对其 F₁ 代生命表参数的联合作用[J]. *昆虫学报*, 2015, 58(7): 767–775.
- [65] 王殿轩, 石云庆, 吴小平. 高温对磷化氢和二氧化碳混合熏蒸杀虫增速增效作用的试验研究[J]. *植物检疫*, 2000, 14(5): 261–266.
- [66] 奚家勤, 尹启生, 宋纪真, 等. 高温、真空回潮及烟叶复烤杀虫工艺研究[J]. *烟草科技*, 2009, 42(1): 60–63.
- [67] 秦国勋, 姜良郎, 周弘, 等. 冷热处理巴西豆象效果的研究[J]. *植物检疫*, 2001, 15(3): 129–131.
- (责任编辑: 杨明丽)