

臭氧对不同磷化氢抗性储粮害虫作用效果研究

孟宏杰¹, 陈锐¹, 唐培安^{1*}, 陆月明², 赵叶飞³, 冯俊³

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 南京 210023;

2. 江苏省太仓市粮食局, 太仓 215400; 3. 江苏省太仓市粮食购销有限公司, 太仓 215400)

摘要 为探明臭氧对主要储粮害虫的熏蒸效果及其与磷化氢抗性的关系, 本研究采用臭氧发生装置测定浓度为 0.84 g/m³ 臭氧对 5 种主要储粮害虫(赤拟谷盗、杂拟谷盗、玉米象、锈赤扁谷盗、谷蠹)的熏蒸效果, 及对具有不同磷化氢抗性的赤拟谷盗(抗性系数为 1.7~862.7)和杂拟谷盗(抗性系数为 2.3~144.7)的毒力效果, 并统计分析了试虫经臭氧熏蒸 1 h 后在不同时间内的行为状态差异。研究结果表明: 在 0.84 g/m³ 臭氧浓度下, 5 种害虫对臭氧均具有较强敏感性, 其 LT₅₀ 在 0.58~1.53 h, 其中谷蠹对臭氧的耐受性相对最强; 赤拟谷盗和杂拟谷盗的不同磷化氢抗性品系对臭氧的敏感性差异较小, 表明磷化氢与臭氧无交互抗性。经臭氧熏蒸 1 h 后, 试虫有正常爬行、非正常爬行和死亡 3 种行为状态, 其中较大比例的试虫(24%~66%)处于非正常爬行状态, 且持续时间较长, 约 10 d 后此部分试虫恢复正常或死亡。结果表明, 臭氧对储粮害虫具有高效性和广谱性, 且与磷化氢无交互抗性, 可作为储粮害虫防治及磷化氢抗性治理药剂。

关键词 储粮害虫; 熏蒸剂; 臭氧; 磷化氢抗性; 死亡率

中图分类号: S 379.5 文献标识码: B DOI: 10.16688/j.zwhb.2019136

Efficacy of ozone against stored grain insects with different resistance to phosphine

MENG Hongjie¹, CHEN Rui¹, TANG Peian^{1*}, LU Yueming², ZHAO Yefei³, FENG Jun³

(1. College of Food Science and Engineering, Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China; 2. Taicang Grain Bureau of Jiangsu Province, Taicang 215400, China; 3. Taicang Grain Marketing Limited Company of Jiangsu Province, Taicang 215400, China)

Abstract In order to investigate the efficacy of ozone against major stored-product insects and its relationship with phosphine-resistance, five stored-product insects, *Tribolium castaneum* (Herbst), *T. confusum* (Jac. du Val.), *Sitophilus zeamais* (Motschulsky), *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) and *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) were exposed to ozone at concentration of 0.84 g/m³ by using an ozone generator. The toxicity of ozone to *T. castaneum* (*Rf* 1.7~862.7) and *T. confusum* (*Rf* 2.3~144.7) with different phosphine-resistance were studied. Finally, the differences of behavioral state of the insects in different observation time after ozone fumigation for 1 h were evaluated. The results indicated that the five pests were sensitive to ozone, and their LT₅₀ ranged from 0.58 h to 1.53 h, of which *R. dominica* was the most resistant to ozone at tested concentration. There is no significant difference in the sensitivity to ozone among different phosphine-resistant strains of *T. castaneum* and *T. confusum* and there is no cross-resistance between the resistance to phosphine and ozone. After being fumigated by ozone for 1 h, the insects showed three behavioral states, including normal crawling, abnormal crawling and death. A large proportion of the test insects (24%~66%) were in an abnormal crawling state and lasted for a long time. After about 10 days, the part of the test insects returned to normal or died. The results showed that ozone fumigation is highly efficient and broad-spectrum for stored-product insects, and there is no cross-resistance between the resistance to phosphine and ozone. Ozone has the characteristics of controlling stored grain pests and phosphine-resistance treatment.

收稿日期: 2019-03-19 修订日期: 2019-06-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0401004-04, 2017YFD0401003-5); 江苏省高校自然科学研究面上项目(17KJB210005); 江苏省六大人才高峰高层次人才项目(NY-057); 粮食公益性行业科研专项(201413007-2, 201513002-5-3); 江苏省高校优势学科建设工程; 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18_1421)

* 通信作者 E-mail:tangpeian@163.com

Key words stored grain insect; fumigant; ozone; phosphine-resistance; mortality

目前,国内储粮害虫的防治主要采用磷化氢(PH_3)熏蒸或有机磷酸盐(马拉硫磷、杀螟松、甲基嘧啶磷等)和拟除虫菊酯杀虫剂喷洒拌粮等方式^[1]。其中, PH_3 在储粮害虫防治中扮演着极为重要的角色。然而,长期单一使用 PH_3 已导致世界范围内主要储粮害虫(赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*、谷蠹 *Rhyzopertha dominica*、锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 等)对 PH_3 产生了十分严重的抗药性,因而用药量不断增加,给生态环境带来较大压力,粮食安全及人畜安全也受到严重威胁。 PH_3 的应用面临新的挑战,寻找合适的替代 PH_3 的熏蒸剂成为当前研究的热点^[2]。

臭氧(O_3)是一种强氧化剂,在空气中极易被分解为氧气。臭氧具有广谱、高效的杀菌特性和对微小害虫的杀灭作用。相对于其他杀虫剂,臭氧无残留,杀菌快速,且在一定程度上能降解粮食表面残留的有机磷、有机氯等农药,是一种环保、优良的杀虫剂替代品^[3-5]。已有研究表明,臭氧对储粮害虫的呼吸作用等生理功能具有一定的影响,并且能在一定条件下杀死不同虫态的昆虫^[6-12]。陈渠玲等^[13]通过模拟试验证明臭氧对高水分粮具有良好的防霉效果,对油脂中黄曲霉毒素 B₁具有较好的降解功能。因此,臭氧储粮技术在粮食储藏领域将会得到越来越广泛的关注和研究。本文主要研究臭氧对主要储粮害虫的毒力,并深入分析不同 PH_3 抗性品系

的害虫对臭氧的敏感性差异及臭氧熏蒸后昆虫的行为状态变化情况。在实验室条件下,验证臭氧储粮技术对高抗性储粮害虫的有效性及其适用条件,为研发高效合理的储粮害虫治理新技术提供新的思路。

1 材料和方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试昆虫

供试昆虫采自湖南、广东、重庆、海口、苏州等全国不同省市地区,并在南京财经大学食品科学与工程学院储粮害虫实验室培养数10代(培养期间无任何药剂接触),具体情况见表1。试虫的磷化氢抗性系数的测定采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的方法。将试虫置于熏蒸瓶,在30℃、相对湿度75%的恒温恒湿培养箱中密闭熏蒸20 h,熏蒸结束散气1 h后取出试虫,置于添加饲料的培养皿中饲养3 d后统计死亡数量,记录每个浓度下试虫的死亡数与总数,并计算其抗性系数。抗性系数(R_f)=试虫实际LC₅₀/敏感品系LC₅₀。敏感品系半致死浓度以FAO的推荐值及抗性抽查情况为依据(赤拟谷盗和杂拟谷盗的LC₅₀分别为0.009、0.011 mg/L)。本试验赤拟谷盗品系CKTca的 PH_3 抗性系数源于王亚洲等^[14]的报道,其余试虫抗性系数由本实验室测定但尚未发表。

表1 供试储粮害虫种类、品系名称、采集时间及来源

Table 1 Species, strains, time and locations of stored grain insects

种类 Species	品系名称 Strain	采集时间/年-月 Time	采集地点 Location	抗性系数 R_f
赤拟谷盗 <i>Tribolium castaneum</i>	XKTca	2016-08	江苏省苏州市胥口农户	1.7
	TLTca	2015-09	重庆市铜梁农户铁桶仓	3.0
	CKTca	2016-08	湖南省湘阴长康饲料厂	5.5 ^[14]
	QHTca	2015-01	山东省齐河饲料加工厂	60.8
	HKTca	2015-12	海南省海口粮食储备库	38.0
	SZTca	2016-08	广东省深圳粮食储备库	862.7
杂拟谷盗 <i>T. confusum</i>	FXTco	2016-07	上海市福新面粉厂	2.3
	ZYTco	2016-08	湖南省怀化众源面条厂	4.3
	GZTco	2015-12	广东省广州面粉加工厂	144.7
玉米象 <i>Sitophilus zeamais</i>	CDSz	2017-12	四川省成都饲料加工厂	/
锈赤扁谷盗 <i>Cryptolestes ferrugineus</i>	WLCf	2015-12	湖南省常德武陵酒厂	11.5
谷蠹 <i>Rhyzopertha dominica</i>	SMRd	2015-12	福建省三明粮食储备库	21.0

1.1.2 仪器与试剂

恒温恒湿培养箱(BSC-250),上海博讯实业有限公司医疗设备厂;电热恒温鼓风干燥箱(DUG-

9642A),上海精宏实验设备有限公司;DH45S臭氧发生器,南京金环仁宝科技有限公司;GT-903复合气体检测仪,深圳市科尔诺电子科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 饲料准备

玉米象饲料:将小麦用水清洗干净,放入60℃电热恒温鼓风干燥箱烘干4 h,调节小麦水分含量至15%±1%,冷却后放入4℃冰箱中冷冻保存备用。

锈赤扁谷盗、赤拟谷盗、杂拟谷盗饲料:将上述小麦磨碎,得到全麦粉,冷却后放入冰箱中冷冻保存备用。

谷蠹饲料:使用时将上述小麦籽粒与全麦粉按2:1混合均匀备用。

1.2.2 试虫培养

每种试虫挑选数百头成虫(无性别区分)置于装有半瓶饲料的500 mL广口瓶中,于温度30℃±0.5℃,相对湿度75%,无光照条件下饲养。待成虫产卵3 d后,挑出全部成虫,并将带有卵的饲料在相同条件下进一步培养(3 d产的卵视为同一龄期),待其羽化为成虫后,挑选2~3周龄、生长状态良好的成虫进行试验。

1.2.3 臭氧对不同储粮害虫的毒力测定

臭氧熏蒸装置:具塞广口熏蒸瓶,双向导管分别连接臭氧发生器和复合气体检测仪,保证气密性良好。将试虫放入瓶中(不添加饲料)进行毒力测定。环境温度25℃±1℃,相对湿度为60%±2%,臭氧流速为3 L/min,熏蒸瓶中臭氧浓度为0.84 g/m³。

选用5种储粮害虫作为试验对象,分别为赤拟谷盗(QHTca)、杂拟谷盗(FXTco)、谷蠹(SMRd)、锈赤扁谷盗(WLCf)和玉米象(CDSz)。挑取2~3周龄的成虫50头(无性别区分),待熏蒸瓶中臭氧浓度达到设定值并且稳定后,迅速将试虫放入瓶中。熏蒸时间分别为30、60、90、120、150、180 min,每组试验重复3次,以未经臭氧处理的试虫为空白对照。

熏蒸结束后散气并将试虫置于添加适量饲料的培养皿中,于恒温恒湿培养箱(30℃±0.5℃,相对湿度75%,无光照)中培养,10 d后统计死亡虫数(试虫无生理活动者视为死亡)。

1.2.4 臭氧对不同磷化氢抗性的赤拟谷盗、杂拟谷盗品系的毒力测定

选取具有不同PH₃抗性的6个赤拟谷盗品系(XKTca、TLTca、CKTca、HKTca、QHTca、SZTca)和3个杂拟谷盗品系(FXTco、ZYTco、GZTco)作为试验对象,试验方法同1.2.3。经臭氧熏蒸1 h的试虫在培养期间每隔24 h观察统计其行为状态并分别计算不同行为状态试虫所占比率。正常爬行者视为正常爬行状态;四肢触角可以活动,但不能爬行者视为非正常爬行状态;四肢触角不活动,无生理活动者视为死亡状态。

1.3 数据处理

用SPSS 17.0软件分析测定结果,计算各种昆虫,各个品系的LT₅₀、LT₉₉和相应的毒力回归方程。

2 结果与分析

2.1 臭氧对不同储粮害虫的毒力

臭氧对不同储粮害虫的毒力测定结果见表2。由表2可知,赤拟谷盗、杂拟谷盗、玉米象、锈赤扁谷盗、谷蠹对臭氧均具有较强的敏感性,其LT₅₀为0.58~1.53 h,其中锈赤扁谷盗对臭氧的敏感性最强,LT₅₀为0.58 h;LT₉₉在2.85~5.98 h,其中谷蠹对臭氧的耐受性相对最强,LT₉₉为5.98 h。锈赤扁谷盗和谷蠹的毒力回归曲线斜率都较小,说明这两种昆虫的种群差异性较大,对臭氧的耐受性不同。

表2 臭氧对不同储粮害虫的毒力

Table 2 Toxicity of ozone to different stored grain insects

种类 Species	品系 Strain	截距 Intercept	斜率 Slope	致死时间(95%置信限)/h		χ^2	df
				LT ₅₀	LT ₉₉		
赤拟谷盗 <i>Tribolium castaneum</i>	QHTca	-1.70±0.19	13.34±0.96	1.34(1.28~1.40)	2.96(2.69~3.36)	10.47	13
杂拟谷盗 <i>T. confusum</i>	FXTco	-2.34±0.21	12.73±0.85	1.53(1.46~1.59)	3.50(3.17~3.95)	18.27	16
玉米象 <i>Sitophilus zeamais</i>	CDSz	-2.85±0.28	16.35±1.25	1.49(1.31~1.66)	2.85(2.32~4.77)	98.18	13
锈赤扁谷盗 <i>Cryptolestes ferrugineus</i>	WLCf	1.54±0.13	6.45±0.54	0.58(0.50~0.65)	2.98(2.30~4.43)	17.60	12
谷蠹 <i>Rhyzopertha dominica</i>	SMRd	-0.59±0.11	6.67±0.44	1.26(1.09~1.35)	5.98(4.62~8.83)	36.26	16

2.2 臭氧对赤拟谷盗、杂拟谷盗不同磷化氢抗性品系的毒力

由表1可知,赤拟谷盗6个品系对磷化氢抗性系

数相差巨大(*Rf*为1.7~862.7),但对臭氧的敏感性(表3)差异不大(LT₅₀为1.12~1.34 h);杂拟谷盗不同磷化氢抗性品系(*Rf*为2.3~144.7)对臭氧的敏感性略

有差异(LT_{50} 为1.08~1.53 h),但与磷化氢抗性无相关性,表明臭氧与磷化氢之间无交互抗性。除个别品系

外,多数品系的毒力回归曲线斜率相似(k 为12.11~14.97),表明害虫对臭氧的反应具有相对齐性。

表3 臭氧对赤拟谷盗、杂拟谷盗不同磷化氢抗性品系的毒力

Table 3 Toxicity of ozone to *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* strains with different phosphine-resistance levels

种类 Species	品系 Strain	截距 Intercept	斜率 Slope	致死时间(95%置信限)/h		χ^2	df
				LT_{50}	LT_{99}		
赤拟谷盗 <i>T. castaneum</i>	XKTca	-1.34±0.18	14.52±1.07	1.24(1.18~1.29)	2.56(2.34~2.89)	6.76	13
	TLTca	-1.05±0.17	14.77±1.16	1.18(1.13~1.23)	2.41(2.19~2.75)	7.26	12
	CKTca	-1.71±0.26	14.97±1.42	1.30(1.23~1.37)	2.64(2.36~3.09)	3.92	13
	QHTca	-1.70±0.19	13.34±0.96	1.34(1.28~1.40)	2.96(2.69~3.36)	10.47	13
	HKTca	-1.03±0.17	14.23±1.06	1.18(1.13~1.23)	2.49(2.26~2.82)	12.75	13
	SZTca	-0.97±0.18	19.11±1.68	1.12(1.08~1.17)	1.96(1.79~2.21)	3.69	12
杂拟谷盗 <i>T. confusum</i>	FXTco	-2.34±0.21	12.73±0.85	1.53(1.46~1.59)	3.50(3.17~3.95)	18.27	16
	ZYTco	-0.69±0.17	20.46±2.02	1.08(1.04~1.12)	1.81(1.66~2.06)	1.73	12
	GZTco	-1.34±0.17	12.11±0.90	1.29(1.14~1.43)	3.09(2.47~4.79)	52.38	12

2.3 赤拟谷盗和杂拟谷盗不同品系经臭氧熏蒸1 h 后的行为状态变化

赤拟谷盗和杂拟谷盗经臭氧熏蒸1 h后表现出正常爬行、非正常爬行和死亡3种行为状态,其中,第1天试虫的行为状态分化最为明显,正常爬行的试虫占26%~72%;死亡的试虫占4%~22%;非正常爬行的试虫占24%~66%,且持续时间长

(10 d)(图1),10 d后无试虫处于非正常爬行状态。非正常爬行的试虫饲养10 d后,多数趋于正常爬行,正常爬行的试虫比例相比第1天增加16%~60%,而死亡比例相比第1天增加6%~24%(表4),说明不同试虫对臭氧的耐受力及其恢复能力有差异,需要延长观察期(至少10 d)才能得到其准确的死亡率。

表4 赤拟谷盗、杂拟谷盗不同品系经臭氧熏蒸1 h后的死亡率变化

Table 4 Changes of mortality of *Tribolium castaneum* and *T. confusum* strains after ozone fumigation for 1 h

种类 Species	品系 Strain	正常爬行比例/%		死亡比例/%	
		1 d	10 d	1 d	10 d
赤拟谷盗 <i>T. castaneum</i>	XKTca	54.0	74.0	12.0	26.0
	TLTca	46.0	70.0	4.0	30.0
	CKTca	60.0	76.0	10.0	24.0
	QHTca	72.0	88.0	4.0	12.0
	HKTca	24.0	84.0	10.0	16.0
	SZTca	54.0	72.0	14.0	28.0
杂拟谷盗 <i>T. confusum</i>	FXTco	36.0	74.0	16.0	26.0
	ZYTco	26.0	66.0	22.0	34.0
	GZTco	26.0	64.0	20.0	36.0

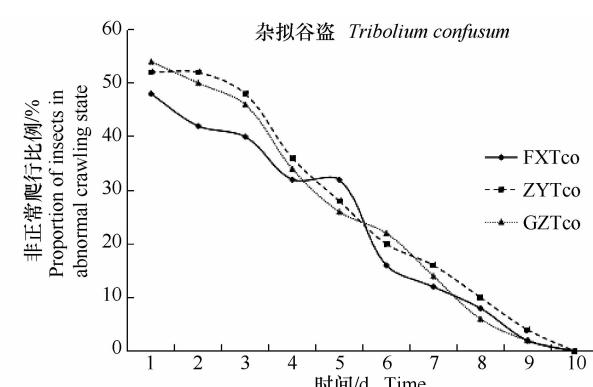
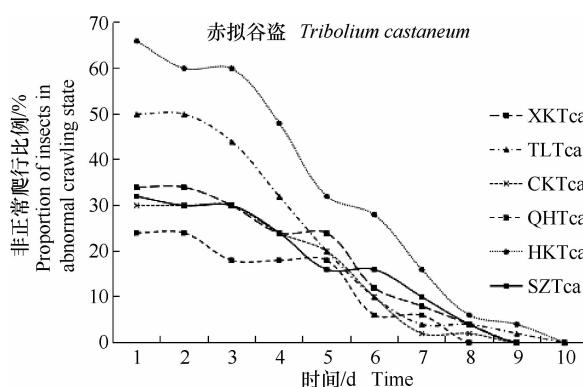


图1 经臭氧熏蒸1 h后处于非正常爬行状态的试虫的比例变化

Fig. 1 Changes in the proportion of insects in abnormal crawling state after ozone fumigation for 1 h

3 讨论

长期以来,PH₃因其在粮堆中的穿透性强、杀虫谱广、成本较低、无残留等优点,在粮食储藏过程中得到广泛应用。然而长期单一使用PH₃使害虫产生了极大的抗性,导致用药量增加,对环境、人畜都造成巨大危害。因此,研究人员不断探索寻求PH₃的替代熏蒸剂,在这个过程中,气调贮藏(N₂和CO₂)、植物精油杀虫和硅藻土杀虫技术得到一定的研究与应用^[15]。另外,低温和热处理已经被证明在一定条件下可以有效杀灭具有不同磷化氢抗性的储粮害虫^[16-17]。臭氧熏蒸能够较为彻底地杀死粮食中的害虫及霉菌,并且在粮食和环境中无残留,无二次污染,且成本较低,是未来实现绿色储粮的重要途径之一。但臭氧极易分解,且具有吸附性,需要配合有效的通风系统对粮食进行综合处理,因此,臭氧的密闭环流熏蒸及其分解消耗速率仍需深入研究^[18-19],臭氧杀虫灭菌技术在实仓中的广泛应用仍需要进一步的探索。

本研究在实验室条件下,测定了臭氧对赤拟谷盗、杂拟谷盗、玉米象、锈赤扁谷盗、谷蠹的毒力,发现在0.84 g/m³的臭氧环境下,上述害虫在熏蒸5.98 h后均能被全部杀死,且不同虫种间敏感性差异较大,其中谷蠹对臭氧的耐受性最强(LT₉₉为5.98 h)。有研究人员分析了臭氧对不同昆虫的毒性,发现谷蠹比杂拟谷盗、赤拟谷盗对臭氧的敏感性更强^[7-9],与本文的研究结果不同,这可能是由于不同地理种群的差异决定的。此外,臭氧对不同PH₃抗性品系害虫的毒力测定结果表明,不同抗性品系的试虫对臭氧的敏感性差异较小,昆虫在对PH₃抗性与臭氧耐受性方面没有明显的相关性,二者无交互抗性。E等^[20]和Sousa等^[21]的研究也得到了类似的结论。Athanasou等^[22-23]研究了赤拟谷盗、杂拟谷盗、谷蠹等储粮害虫经PH₃熏蒸不同时间后的行为反应,发现试虫存在活跃、缓慢移动和不移动3种行为状态(或正常爬行和击倒两种状态),PH₃抗性品系昆虫相比敏感品系具有更强的耐受力与恢复力。臭氧熏蒸后同样存在正常爬行、非正常爬行和死亡3种行为状态,其中,熏蒸1 h后非正常爬行状态的试虫比例达24%~66%,且非正常爬行状态持续时间较

长,一般在散气10 d后非正常爬行状态才完全消失,统计结果表明,非正常爬行状态的试虫小部分彻底死亡(6%~24%),另一部分则恢复到正常爬行状态(16%~60%)。此种现象表明,臭氧熏蒸试验散气后需要较长时间的观察期(至少10 d)才能得到准确的死亡率。此外,非正常爬行状态的害虫对其他药剂的敏感性可能较强,因此,将臭氧与其他药剂联合使用有可能会得到较好的控制效果,这有待于进一步研究。

综上所述,本研究在实验室条件下测定了一定浓度的臭氧对5种主要储粮害虫的毒力;并深入分析了赤拟谷盗和杂拟谷盗这两种害虫对臭氧耐受性及PH₃抗性的相关性;评估了臭氧熏蒸后昆虫的行为状态及其恢复能力的差异;验证了臭氧熏蒸对储粮害虫的高效性和广谱性,表明臭氧与磷化氢无交互抗性,可用于储粮害虫防治及磷化氢抗性治理。本研究也为储粮害虫防治新技术的研发及PH₃抗性问题的解决提供了基础数据和基本策略。

参考文献

- [1] 杨长举,唐国文,薛东. 21世纪的储粮害虫防治[J]. 湖北植保, 2004(5): 45~48.
- [2] 周天智,刘士强,马文斌,等. 鄂中地区四种储粮害虫对磷化氢抗性发展及对策研究[J]. 粮食储藏, 2011, 40(4): 6~9.
- [3] 李翠莲,黄中培,方北曙. 臭氧杀菌消毒技术在食品工业中的应用[J]. 湖南农业科学, 2008(4): 119~121.
- [4] KELLS S A, MASON L J, MAIER D E, et al. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize [J]. Journal of Stored Products Research, 2001, 37(4): 371~382.
- [5] 陈艳,谢更祥,王涛,等. 臭氧熏蒸杀灭储粮害虫效果的研究[J]. 食品科技, 2017(1): 284~287.
- [6] SOUSA A H, FARONI LRD'A, SILVA G N, et al. Ozone toxicity and walking response of populations of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2012, 105(6): 2187~2195.
- [7] LU Baoqian, REN Yonglin, DU Yuzhou, et al. Effect of ozone on respiration of adult *Sitophilus oryzae* (L.), *Tribolium castaneum* (Herbst) and *Rhyzopertha dominica* (F.) [J]. Journal of Insect Physiology, 2009, 55(10): 885~889.
- [8] ISIKBER A A, ATHANASSIOU C G. The use of ozone gas for the control of insects and microorganisms in stored products [J]. Journal of Stored Products Research, 2015, 64: 139~145.
- [9] MCDONOUGH M X, MASON L J, WOLOSHUK C P. Susceptibility of stored product insects to high concentrations of o-

- zone at different exposure intervals [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2011, 47(4): 306–310.
- [10] SILVA G N, FARONI L R D, CECON P R, et al. Ozone to control *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) in stored wheat grains [J]. *Journal of Stored Products and Post-harvest Research*, 2016, 7(4): 37–44.
- [11] AKBAY H, ISIKBER A A, SAGLAM O, et al. Efficiency of ozone gas treatment against *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae) (Indian meal moth) in hazelnut [C]// Proceedings of the 12th International Working Conference on Stored-Product Protection. Berlin, Germany: IWCSPP Press, 2018: 695–698.
- [12] MAHROOF R, AMOAH B. Toxic effects of ozone on selected stored product insects and germ quality of germinating seeds [C]// Proceedings of the 12th International Working Conference on Stored-Product Protection. Berlin, Germany: IWCSPP Press, 2018: 591–595.
- [13] 陈渠玲, 邓树华, 周剑宇, 等. 臭氧防霉、杀虫和去毒效果的探讨[J]. 粮食储藏, 2001, 30(2): 16–19.
- [14] 王亚洲, 刘蔓文, 唐培安, 等. 湖南省12个赤拟谷盗品系对磷化氢和敌敌畏抗性测定[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(9): 42–45.
- [15] 唐为民, 张旭晶, 巫幼华, 等. 国内外储粮害虫防治技术研究的新进展(2)[J]. 四川粮油科技, 2000(3): 29–31.
- [16] AGRAFIOTI P, ATHANASSIOU C G, SUBRAMANYAM B. Efficacy of heat treatment on phosphine resistant and susceptible populations of stored product insects [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2019, 81(3): 100–106.
- [17] FIELDS P G. Temperature: implications for biology and control of stored-product insects [C]// Proceedings of the 12th International Working Conference on Stored-Product Protection. Berlin, Germany: IWCSPP Press, 2018: 412–413.
- [18] 孟宪兵. 臭氧杀虫除菌技术的实仓应用[J]. 粮食储藏, 2011, 40(3): 14–17.
- [19] HARDIN J A, JONES C L, BONJOUR E L, et al. Ozone fumigation of stored grain; closed-loop recirculation and the rate of ozone consumption [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2010, 46(3): 149–154.
- [20] E Xinyi, SUBRAMANYAM B, LI Beibei. Efficacy of ozone against phosphine susceptible and resistant strains of four stored-product insect species [J/OL]. *Insects*, 2017, 8(2): 42. DOI:10.3390/insects8020042.
- [21] SOUSA A H, FARONI LRD'A, GUEDES R N C, et al. Ozone as a management alternative against phosphine-resistant insect pests of stored products [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2008, 44(4): 379–385.
- [22] ATHANASSIOU C G, KAVALLIERATOS N G, BRABEC D L, et al. From immobilization to recovery: Towards the development of a rapid diagnostic indicator for phosphine resistance [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2019, 80(1): 28–33.
- [23] ATHANASSIOU C G, KAVALLIERATOS N G, BRABEC D L, et al. Using immobilization as a quick diagnostic indicator for resistance to phosphine [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2019, 82(6): 17–26.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接230页)

- [28] STAHL-CSECH U, GISI U, SOZZI D. Determination of the sensitivity of *Plasmopara viticola* to phenylamides [J]. EPPO Bulletin, 2010, 22(2): 314–316.
- [29] BLUM M, WALDNER M, GISI U. A single point mutation in the novel *PvCesA3* gene confers resistance to the carboxylic acid amide fungicide mandipropamid in *Plasmopara viticola* [J]. *Fungal Genetics and Biology*, 2010, 47(6): 499–510.
- [30] CHIN K M, CHAVAILLAZ D, KAESBOHRER M, et al. Characterizing resistance risk of *Erysiphe graminis* f. sp. *tritici* to strobilurins [J]. *Crop Protection*, 2001, 20(2): 87–96.
- [31] COHEN Y, REUVENI M. Occurrence of metalaxyl-resistant isolates of *Phytophthora infestans* in potato fields in Israel [J]. *Phytopathology*, 1983, 73(6): 925–927.
- [32] HARTMAN G L, HUANG Y H. Characteristics of *Phytophthora infestans* isolates and development of late blight on tomato in Taiwan [J]. *Plant Disease*, 1995, 79(8): 849–852.
- [33] REIS A, SMART C D, FRY W E, et al. Characterization of isolates of *Phytophthora infestans* from southern and south-eastern Brazil from 1998 to 2000 [J]. *Plant Disease*, 2007, 87(8): 896–900.
- [34] 曹继芬, 孙道旺, 杨明英, 等. 云南省马铃薯、番茄晚疫病菌对甲霜灵敏感性及地理分布[J]. 西南农业学报, 2007, 20(5): 1027–1031.
- [35] 霍超, 曹继芬, 王昌命, 等. 云南省昆明市马铃薯晚疫病菌甲霜灵抗药性监测[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(12): 156–157.
- [36] 毕秋艳, 马志强, 韩秀英, 等. 葡萄霜霉病菌对甲霜灵抗药性治理及其田间抗药菌株遗传稳定性分析[J]. 植物病理学报, 2014, 44(3): 302–308.
- [37] FRAC. General Use Recommendations [EB/OL]. <http://www.frac.info/expert-fora/phenylamides/general-use-recommendations>.

(责任编辑: 杨明丽)