

# TBHQ 对阿维菌素光解的影响及对灰飞虱的增效作用\*

徐广春<sup>1</sup> 顾中言<sup>1\*\*</sup> 徐德进<sup>1</sup> 许小龙<sup>1</sup> 范鹏<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省农业科学院植物保护研究所 南京 210014; 2. 扬州大学园艺与植物保护学院 扬州 225009)

**摘要** 为延缓阿维菌素的光解,研究了不同浓度抗氧化剂 TBHQ 对阿维菌素光解的影响,并通过稻茎浸渍法测定其与阿维菌素混用后对灰飞虱的毒力。结果表明:阿维菌素的光解行为符合化学反应一级动力学方程,阿维菌素在太阳光下的光解速率小于紫外光下的光解速率;在 TBHQ 抑制阿维菌素光解试验中,其与阿维菌素比值为 1:1 时,阿维菌素的光解速率最小,光解半衰期为 11.81 h,比不添加 TBHQ 在紫外光下的光解半衰期延长 167.19%。室内生物测定结果表明, TBHQ 与阿维菌素混用后对灰飞虱表现为增效作用;经太阳光和紫外光照射 3 h 后,加入 TBHQ 的阿维菌素对灰飞虱的毒力均显著高于未添加 TBHQ 的处理,增效比分别为 2.00 和 2.63。

**关键词** 阿维菌素 光解 毒力 灰飞虱 叔丁基对苯二酚

中图分类号: X122; S482.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2010)06-1306-05

## Effect of TBHQ on avermectin photo-degradation and its synergism on small brown planthopper

XU Guang-Chun<sup>1</sup>, GU Zhong-Yan<sup>1</sup>, XU De-Jin<sup>1</sup>, XU Xiao-Long<sup>1</sup>, FAN Peng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Plant Protection, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;  
2. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract** To delay avermectin photo-degradation, the paper studied the effects of different concentrations of antioxidant, tertiary butyl hydroquinone (TBHQ), on avermectin photo-degradation. The toxicity of avermectin and TBHQ mixture on small brown planthopper (SBPH) *Laodelphax striatellus* (Fallén) was also determined via rice-stem-dipping method. The results indicate that avermectin photo-degradation fits into the equation for first-order chemical reaction kinetics. Photolysis rate of avermectin photo-degradation under sunlight is slower than that under UV light. When TBHQ and avermectin ratio is 1:1, photolysis rate is lowest for avermectin photo-degradation, and its half-life is 11.81 h. This is 167.19% increase compared with treatment without TBHQ. Laboratory bioassay results demonstrate that the synergistic effect of TBHQ and avermectin mixture on SBPH is significantly strong. After 3 h exposure to sunlight and UV light, the toxicity of avermectin and TBHQ mixture on SBPH increases significantly compared to that without TBHQ. The synergism ratio is 2.00 and 2.63, respectively.

**Key words** Avermectin, Photo-degradation, Toxicity, *Laodelphax striatellus* (Fallén), TBHQ

(Received Nov. 12, 2009; accepted April 13, 2010)

阿维菌素是日本北里研究所和美国默克公司首先开发的一类具有杀虫、杀螨、杀线虫活性的十六元大环内酯化合物,是由链霉菌(*Streptomyces avermitilis*)发酵后提取分离的代谢产物<sup>[1]</sup>。1985 年阿维菌素作为农药投入市场,到目前为止,阿维菌素防治谱包括节肢动物中的蜱螨目、鞘翅目、同翅目和鳞翅目等害虫、害螨至少有 84 种之多<sup>[2-3]</sup>。但大量研究表明<sup>[4-8]</sup>阿维菌素见光通过氧化和光氧化机制

迅速分解,在水中光照降解半衰期为 12 h,在土壤中光照降解半衰期为 21 h,在模拟阳光照射下阿维菌素的半衰期小于 10 h,在环境中形成药膜后,太阳光加速其分解,导致半衰期仅为 4~6 h。阿维菌素光解性强的特点导致其光稳定性差,大田使用持效期短,无形中增加农药的用药次数和用药成本,最终影响其在田间的推广使用。

研究表明阿维菌素作为链霉菌的代谢产物,其

\* “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD08A03-4)和江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(09)615]资助

\*\* 通讯作者:顾中言(1957-),男,本科,研究员,主要研究方向为农药应用技术。E-mail: guzy@jaas.ac.cn

徐广春(1982-),男,硕士,研究实习员,主要研究方向为农药毒理学。E-mail: xgc551@163.com

收稿日期: 2009-11-12 接受日期: 2010-04-13

结构中含有一定量的生色团, 这些生色团能够强烈吸收紫外光, 从而引起光氧化降解反应, 是一种伴随着氧化反应的紫外线吸收降解过程。齐邦峰等<sup>[9]</sup>研究认为, 有机物的光氧化降解是一系列的链式反应, 且密切相关, 只要添加光稳定剂就能抑制其光解氧化。在阿维菌素中加入紫外吸收剂 UV-73 和 UV-75 可以显著提高其对光稳定性, 室内生测试验表明添加 UV-73 和 UV-75 后其对小菜蛾的增效比值分别为 1.59 和 1.74<sup>[10]</sup>。不同光稳定剂(受阻胺光稳定剂、紫外光吸收剂、抗氧化剂)对阿维菌素的光分解具有不同的抑制效果, 其中以抗氧化类的稳定剂效果最佳。常见的抗氧化剂有丁基羟基茴香醚(BHA)、二丁基羟基甲苯(BHT)、没食子酸丙酯(PG)等, 其中又以 BHA 对阿维菌素的光分解抑制效果最为明显<sup>[8]</sup>。叔(特)丁基对苯二酚(Terliary butyl hydroquinone, TBHQ)是一种新型的酚类油溶性抗氧化剂, 目前被广泛应用于食品加工、医药及饲料中, 而在农药中的应用尚少见报道<sup>[11-13]</sup>。TBHQ 的水溶性优于 BHA、BHT、PG, 将利于环境友好型农药剂型的研制; 同时从 TBHQ 取代基团位于苯环中心羟基的邻对位的构效来看, 其抗氧化性能优于 BHA、BHT、PG 等其他酚类抗氧化剂<sup>[14]</sup>。另有研究表明, 在某些环境下使用 BHA 和 BHT 对动物有致癌作用, 而使用 TBHQ 的安全性则相对较高<sup>[15]</sup>。本文研究了不同浓度 TBHQ 与阿维菌素混用抗紫外光解氧化的效果, 并测定了其对于灰飞虱的室内活性, 旨在通过抗氧化剂的应用, 以降低阿维菌素的光解速率, 提高并延长阿维菌素的防效, 为阿维菌素田间使用防治灰飞虱以及环境友好型农药剂型的研制提供科学依据。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 试验材料

试验药剂、溶剂包括阿维菌素(Avermectin B<sub>1</sub>, 含量≥95%), 浙江升华拜克生物股份有限公司生产; 叔丁基对苯二酚(TBHQ, 含量≥99%), 上海染料研究所有限公司生产; 吐温-80, 上海申宇医药化工有限公司生产; 无水甲醇(分析纯), 南京化学试剂有限公司生产。

试验虫源为 2007 年采自江苏句容市麦田中的灰飞虱成虫, 于室内用“武育粳 3 号”稻苗饲养。先在 30 cm×25 cm×20 cm 的养虫箱内垫一层滤纸, 用水润湿滤纸后播种“武育粳 3 号”水稻种子, 之后覆盖约 1 cm 厚的细土, 待稻苗长至 8~11 cm 时备用。将田间采回的成虫按每箱约 200 头进行饲养, 7 d 后将成虫移至另一养虫箱继续产卵繁殖。灰飞虱的饲养条件为温度 26±1 ℃、光照周期 16 h : 8 h(L :

D)、湿度 80%。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 阿维菌素的检测波长

阿维菌素的检测波长参照刘群等<sup>[16]</sup>的方法进行测定。称取 95%阿维菌素原药 16.84 mg, 用甲醇溶解稀释成 80 μg·mL<sup>-1</sup> 的母液(有效成分含量, 下同)。精密吸取上述母液 2 mL, 置于 20 mL 的容量瓶中, 用甲醇稀释定容, 在紫外可见分光光度计 UV-9100 上以光谱带宽 2 nm、2 nm Δλ 的间隔, 于 200~400 nm 处进行扫描, 并绘制紫外吸收图谱, 发现阿维菌素在 252 nm 处有最大吸收峰, 因此以 252 nm 的波长作为检测波长。

#### 1.2.2 阿维菌素的标准曲线

取上述阿维菌素母液适量, 用甲醇稀释成 5 μg·mL<sup>-1</sup>、10 μg·mL<sup>-1</sup>、15 μg·mL<sup>-1</sup>、20 μg·mL<sup>-1</sup>、25 μg·mL<sup>-1</sup>、30 μg·mL<sup>-1</sup>、35 μg·mL<sup>-1</sup>、40 μg·mL<sup>-1</sup> 溶液, 以甲醇作空白对照, 用 1 cm 石英比色皿于 252 nm 处测定吸收度, 以吸光度为纵坐标、浓度为横坐标绘制标准曲线。

#### 1.2.3 TBHQ 的紫外吸收光谱

称取 99%TBHQ 50.51 mg, 置于 50 mL 的容量瓶中, 用甲醇稀释定容, 配制 1.00 mg·L<sup>-1</sup> 的 TBHQ 母液。吸取上述母液 1 mL, 用甲醇定容至 10 mL, 然后以光谱带宽 2 nm、2 nm Δλ 的间隔, 于 200~400 nm 处进行扫描, 并绘制紫外吸收图谱。

#### 1.2.4 TBHQ 对阿维菌素含量测定的影响

称取 95%阿维菌素原药 0.63 mg、1.05 mg、1.58 mg, 并按 1 : 1 和 2 : 1 比例加入 TBHQ, 置于 50 mL 容量瓶中用甲醇定容, 并以相同浓度的 TBHQ 甲醇溶液作为样品空白, 甲醇溶液作为溶剂空白, 摇匀后于 252 nm 处测定吸收度, 然后根据 1.2.2 中获得的的标准曲线计算阿维菌素含量, 将其与实际称量值进行比较。

#### 1.2.5 阿维菌素的光解试验

吸取 80 μg·mL<sup>-1</sup> 阿维菌素母液 1.5 mL, 用甲醇定容至 10 mL 并倒入石英管中, 将样品管与地平面呈 30°角, 分别置于太阳光和 40 W 的紫外灯下照射(采用太阳自然光, 光照强度大于 20 000 lux, 紫外光的光照强度为 200 lux, 时间为 2009 年 7 月下旬, 地点为江苏省农业科学院), 以无光照暗处理为对照, 处理 1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h 后, 用紫外分光光度计测定阿维菌素甲醇溶液在 252 nm 下的吸光度, 并按公式(1)计算残存率, 每处理重复 3 次。阿维菌素含量测定方法同 1.2.4。

$$\text{残存率} = \frac{\text{光照后阿维菌素残存量}}{\text{暗对照阿维菌素残存量}} \times 100\% \quad (1)$$

1.2.6 不同浓度 TBHQ 对阿维菌素光分解抑制试验

吸取 80 μg · mL<sup>-1</sup>阿维菌素母液 1.5 mL, 分别加入不同浓度的 TBHQ(与阿维菌素有效成分的比值分别为 0.25 : 1、0.5 : 1 和 1 : 1), 用甲醇定容至 10 mL 并倒入石英管中, 置于 40 W 的紫外灯下照射, 光照强度 200 lux, 分别处理 1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h 后测定含不同浓度 TBHQ 的阿维菌素甲醇溶液在 252 nm 下的吸光度, 每处理重复 3 次。阿维菌素含量测定方法同 1.2.4。

1.2.7 室内生物测定

将 TBHQ 与阿维菌素按有效成分 0 : 1、1 : 1 比例, 用甲醇溶解配制成 500 mg · L<sup>-1</sup>(有效成分含量, 下同)的阿维菌素母液, 分别在太阳光(光照强度大于 20 000 lux)和 40 W 紫外灯下(光照强度 200 lux)照射 3 h, 采用稻茎浸渍法<sup>[17]</sup>测定其对灰飞虱 1 龄若虫的毒力, 并利用 SPSS13 软件的概率分析, 求出致死中浓度, 然后进行比较分析。

2 结果与分析

2.1 阿维菌素的标准曲线

如图 1 所示, 阿维菌素的添加浓度在 5~40 μg · mL<sup>-1</sup> 范围内时, 其浓度与吸光度呈良好的线性关系, 线性方程为  $y=0.026 4x+0.130 3$  ( $R^2=0.999 0$ )。

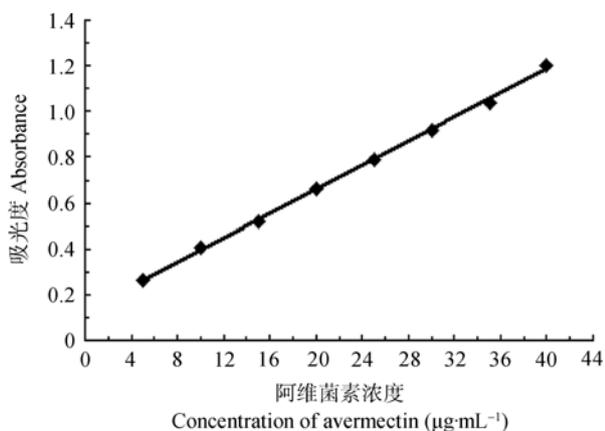


图 1 阿维菌素的标准曲线  
Fig. 1 Standard curve of avermectin

2.2 TBHQ 的紫外吸收光谱图

从图 2 可以看出, TBHQ 在 292 nm 处有 1 吸收峰, 其最大吸收净值为 0.766。在 252 nm 处也有吸收, 吸光系数为 5.89 L · g<sup>-1</sup> · cm<sup>-1</sup>。

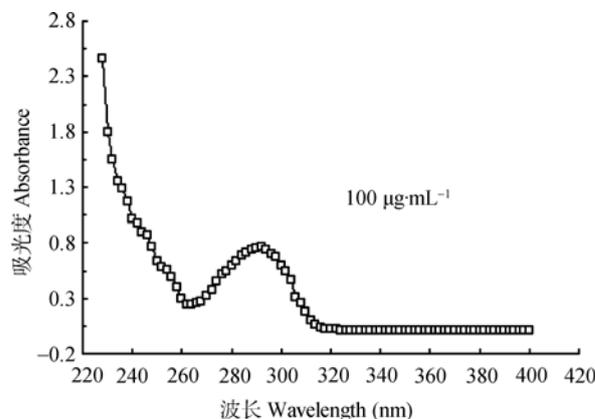


图 2 TBHQ 的紫外吸收光谱  
Fig. 2 Ultraviolet absorption spectrum of TBHQ

2.3 TBHQ 对阿维菌素含量测定的影响

通过比较阿维菌素的实测量与取样量, 可以看出 5 次测定的比值为 98.26%~100.55%, 平均值 99.23±0.41%(表 1), 表明 TBHQ 对测定阿维菌素含量的影响较小, 可以用该方法测定阿维菌素的含量。

2.4 阿维菌素的光解

农药的光解速率受农药性质与环境条件因素所制约, 大多数农药的光解遵循一级动力学方程, 其表达式为:

$$C_t = C_0 e^{-kt} \tag{2}$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / k = 0.693 / k \tag{3}$$

式中,  $k$  为光解速率常数,  $t$  为反应时间,  $C_0$  为农药的初始浓度,  $C_t$  为  $t$  时刻的农药浓度。从图 3 可知, 阿维菌素是极易光解的物质, 其在太阳光照下和紫外光照下的光解动态符合一级动力学规律, 光解动力学方程分别为  $y=99.701e^{-0.092 3x}$  ( $R^2=0.994 4$ )和  $y=92.916e^{-0.156 8x}$  ( $R^2=0.998 3$ ), 光解半衰期分别为 7.51 h 和 4.42 h。光解速率常数在太阳光和紫外光下分别

表 1 TBHQ 对阿维菌素含量测定的影响  
Tab. 1 Effect of TBHQ on determination of quantity of avermectin

处理 Treatment	取样量 Sample quantity (mg)		实测量 Actual quantity of avermectin (mg)	比值 Ratio (%)	平均值 Average (%)
	阿维菌素 Avermectin	TBHQ			
1	0.598 5	0.60	0.590 2	98.61	99.23±0.41
2	0.598 5	0.30	0.601 8	100.55	
3	0.997 5	1.00	1.002 4	100.49	
4	0.997 5	0.50	0.980 1	98.26	
5	1.501 0	1.50	1.481 9	98.72	
6	1.501 0	0.75	1.482 2	98.75	

比值=(实测量/取样量)×100% Ratio=(actual quantity of avermectin/sample quantity of avermectin)×100%.

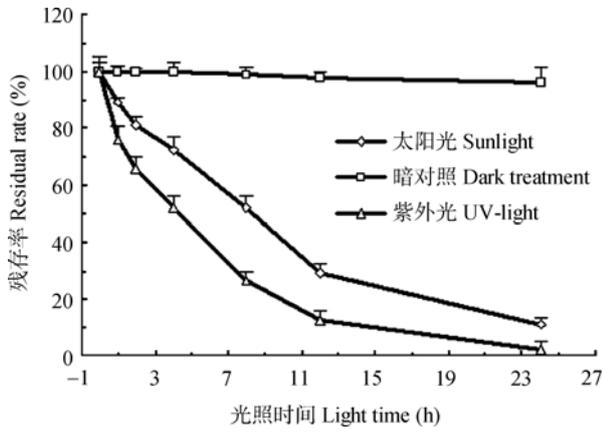


图 3 不同光源对阿维菌素光降解的影响

Fig. 3 Photodegradation of avermectin under different light sources

为  $9.23 \times 10^{-2}$  和  $15.68 \times 10^{-2}$ , 说明短波长的紫外线利于阿维菌素的光解。经统计分析, 暗处理下阿维菌素降解与时间呈线性关系, 方程为  $y = -0.1787x + 100.16$  ( $R^2 = 0.9571$ ), 斜率较小, 几乎与 X 轴平行, 说明暗处理下阿维菌素降解很慢。

2.5 不同浓度 TBHQ 对阿维菌素光解的影响

从图 4 可知, 添加不同浓度 TBHQ 的阿维菌素光解速率不同, 其光解动态也符合一级动力学规律。按 TBHQ 含量由低到高的顺序(0.25 : 1、0.5 : 1 和 1 : 1)其光解动力学方程分别为  $y = 90.586e^{-0.0952x}$  ( $R^2 = 0.8559$ )、 $y = 90.581e^{-0.0768x}$  ( $R^2 = 0.9850$ ) 和  $y = 93.988e^{-0.0587x}$  ( $R^2 = 0.9205$ ), 光解速率常数分别为  $9.52 \times 10^{-2}$ 、 $7.68 \times 10^{-2}$  和  $5.87 \times 10^{-2}$ , 其中以 TBHQ 与阿维菌素比值为 1 : 1 时, 阿维菌素的光解速率常数最小。当 TBHQ 与阿维菌素的比值为 0.25 : 1、0.5 : 1 和 1 : 1 时, 光解半衰期分别为 7.28 h、9.03 h 和 11.81 h, 分别比不添加 TBHQ 的阿维菌素在紫外光下的半衰期(4.42 h)延长 64.71%、104.30%和 167.19%。

2.6 阿维菌素对灰飞虱的毒力测定

由表 2 可知, 阿维菌素对灰飞虱 1 龄若虫的毒力较高, 其  $LC_{50}$  为  $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 紫外光解 3 h 后, 阿维菌素的毒力明显下降, 其  $LC_{50}$  为  $0.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,

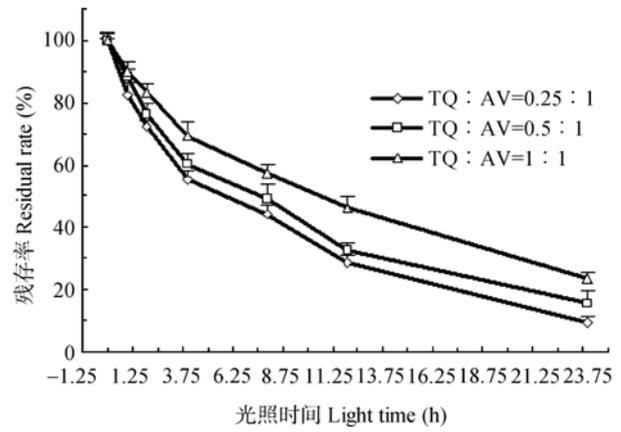


图 4 不同浓度 TBHQ 对阿维菌素光降解的影响

Fig. 4 Photodegradation of avermectin with different concentrations of TBHQ

TQ、AV 分别表示 TBHQ 和阿维菌素 TQ and AV are brief abbreviations of TBHQ and avermectin respectively.

表明紫外光对阿维菌素具有较强的光分解能力。添加 TBHQ 可一定程度上抑制阿维菌素的光解, 从而提高对灰飞虱的毒力, 紫外光解 3 h 后, 阿维菌素  $LC_{50}$  为  $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 活性显著高于未添加 TBHQ 处理, 增效比为 2.63。同样, 在太阳光照 3 h 后, 添加 TBHQ 的阿维菌素对灰飞虱 1 龄若虫的活性显著高于未添加 TBHQ 处理, 增效比为 2.00。

3 讨论

阿维菌素的光解是由氧化和紫外光引起的, 光解过程中可能首先发生氧化反应, 即当空气中的  $O_2$  受到紫外光等的能量和代谢激发时, 处于高能态, 具有非常强的氧化性质, 活性氧分子再经得失电子形成活性氧自由基, 造成连锁反应, 从而引起阿维菌素氧化降解<sup>[18-19]</sup>。因此添加抗氧化剂能够有效抑制阿维菌素的光解。本研究表明阿维菌素在紫外光下的光解速率较快, 光解半衰期为 4.40 h, 添加不同浓度的 TBHQ 均能延长阿维菌素的光解时间, 证明 TBHQ 能够抑制阿维菌素的光解。TBHQ 作为一种酚类的抗氧化剂, 其抑制阿维菌素光解的途径可能

表 2 不同光源下阿维菌素对灰飞虱的毒力测定

Tab. 2 Toxicity of avermectin to small brown planthopper under different light sources

光源 Light source	TBHQ : 阿维菌素 TBHQ : avermectin	处理虫数 No. of small brown planthopper	斜率 Slope ± SE	r	$LC_{50}$ (95%置信区间) $LC_{50}$ (95% confidence interval, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	增效比 Synergism ratio
太阳光 Sunlight	0 : 1	585	1.94±0.16	0.999	0.54a (0.46~0.63)	1.00
	1 : 1	684	2.01±0.15	0.975	0.27b (0.19~0.39)	2.00
紫外光 UV-light	0 : 1	578	2.08±0.16	0.996	0.79a (0.58~1.06)	1.00
	1 : 1	655	1.91±0.14	0.982	0.30b (0.25~0.34)	2.63
暗对照 Dark treatment	0 : 1	634	2.03±0.15	0.960	0.23b (0.15~0.32)	—

以  $LC_{50}$  值 95%置信区间不重叠作为判断杀虫剂毒力差异显著性的标准; 增效比(同一种光源下)=不加 TBHQ 处理组的  $LC_{50}$ /加 TBHQ 处理组的  $LC_{50}$ 。Non overlapping 95% confidence intervals of  $LC_{50}$  are used as the criteria to determine significance of difference in toxicities to insecticides. Synergism ratio under the same light source=  $LC_{50}$  of treatment without TBHQ/  $LC_{50}$  of treatment with TBHQ.

是<sup>[11-12]</sup>: (1)TBHQ 酚羟基上的氢原子具有相当的活性,能够转移与活性游离基反应,生成大分子氢过氧化物,本身形成较稳定的游离基,从而终止了游离基链的传递和增长;(2)失去活泼氢的 TBHQ 游离基虽然较稳定,但也有一定的活性,其基团上的氧将捕获到的活性游离基通过二聚、歧化等反应生成稳定的产物,从而终止链锁反应。但抗氧化剂 TBHQ 是否按上述可能途径抑制阿维菌素的光解氧化以及阿维菌素的光解产物变化还有待进一步研究。

在灰飞虱对阿维菌素敏感性测定试验中,添加抗氧化剂 TBHQ 处理对灰飞虱的毒力均显著高于未添加 TBHQ 处理,表明抗氧化剂 TBHQ 能一定程度抑制阿维菌素的光解,从而提高对灰飞虱的毒力,将 TBHQ 与阿维菌素混用对灰飞虱表现为增效作用。

阿维菌素为易光解物质,在大田推广使用过程中,提高其光稳定性,以延缓其光解氧化,提高持效期,对降低农户的用药成本至关重要。目前,国内外有关改善生物农药光分解的研究较少。本研究中,添加抗氧化剂 TBHQ 对抑制阿维菌素的光解氧化显示出良好作用,这对阿维菌素的农用开发具有潜在应用价值。但田间实际应用过程中直接加入抗氧化剂,可能会受到雨水的冲刷,对环境造成不良影响,因此将抗氧化剂加入到阿维菌素中还需要考虑制成合适的剂型,以及开发与之对应的农药助剂,并对其经济性、方便性、环境的安全性等方面给予评价,才能使阿维菌素的应用有更广阔的空间。

## 参考文献

- [1] Tsuji K. Microencapsulation of pesticides and their improved handling safety[J]. *Journal of Microencapsulation*, 2001, 18(2): 137-147
- [2] 王爱民, 李晓刚, 林壁润. 杀虫抗生菌的研究进展[J]. *广东农业科学*, 2008(8): 76-78
- [3] 王险峰. 进口农药应用手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 64
- [4] Gagliardi L, Amato A, Basili A, et al. Determination of sun-screen agents of the pamlnobenzonic acid type in cosmetic products by reversed phase high performance liquid chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 1986, 362: 450-454
- [5] Bull D L, Lvie G W, John G M. Fate of avermectin Bla in soil and plants[J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 1984, 32: 102-108
- [6] Clark J M, Scott J G, Campos F, et al. Resistance to avermectins: Extent, mechanisms, and management implications[J]. *Annual Review of Entomology*, 1995, 40: 1-30
- [7] Louis S C, William F F, Byron H A. Photodegradation of avermectin Bla thin films on glass[J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 1971, 39: 1310-1319
- [8] 吴传万, 杜小凤, 王伟中, 等. 阿维菌素光分解及其光稳定剂的筛选[J]. *农药*, 2006, 45(12): 828-830
- [9] 齐邦峰, 班红艳, 曹祖宾, 等. 有机大分子中的光稳定剂[J]. *抚顺石油学院学报*, 2002, 22(1): 19-22
- [10] 刘学涛, 刘峰, 慕卫, 等. 紫外吸收剂抑制阿维菌素光解及对小菜蛾防治的增效作用[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(2): 185-188
- [11] 胡行俊. 抗氧化剂与光稳定剂结构效应与作用机理[J]. *合成材料老化与应用*, 2007, 36(1): 27-31
- [12] 胡行俊. 抗氧化剂与光稳定剂结构效应与作用机理(续)[J]. *合成材料老化与应用*, 2007, 36(2): 29-34
- [13] 邬小兵, 蔺子敏. 食品级抗氧化剂(TBHQ)其衍生物在饲料中的抗氧化能力[J]. *湖南饲料*, 2009(1): 36-38
- [14] 黄涛, 王晓红, 朱健飞. 酚类饲料抗氧化剂及其构效关系研究[J]. *中国畜牧业通讯*, 2006(6): 74-75
- [15] 徐纯良. TBHQ 特性、安全性及国内外应用介绍[J]. *粮食与油脂*, 1996(4): 44-45
- [16] 刘群, 卢芳, 曾勇. 紫外分光光度法测定阿维菌素预混剂的含量[J]. *甘肃畜牧兽医*, 2002(1): 19-20
- [17] 庄永林, 沈晋良, 陈峥. 三唑磷对不同翅型稻褐飞虱繁殖力的影响[J]. *南京农业大学学报*, 1999, 22(3): 21-24
- [18] Burorws H D, Cattle L, Santaballa J A. Reaction pathways and mechanisms of photodegradation of pesticides[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2002, 67(2): 71-108
- [19] 宛梅丹. 阿维菌素的光降解及其光保护研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007: 49-52