烯啶虫胺肠衣饵剂对黑翅土白蚁的防治效果*

杭 行[1**] 林 红[2] 高勇勇[1] 陈香湍[2] 熊 强[3]
陈文清[2] 雷朝亮[1] 黄求应[1***]

（1. 华中农业大学植物科学技术学院，武汉 430070；2. 福建省水利管理中心，福州 350000；
3. 宜昌市白蚁防治研究所，宜昌 443000）

摘 要 **【目的】** 为了开发一种高效环保型白蚁饵剂。**【方法】** 选定烯啶虫胺和溴虫腈对黑翅土白蚁 *Odontotermes formosanus* 进行室内毒力测定，根据室内毒力测定结果筛选毒力较高药剂进行驱避试验，并制备 3 种不同剂量的肠衣饵剂，开展室内白蚁毒杀效果试验和园林白蚁防治效果试验；选用合适剂量肠衣饵剂进行堤坝黑翅土白蚁诱杀试验，并用挖巢法检测肠衣饵剂对堤坝黑翅土白蚁的诱杀效果。**【结果】** 1.6 μg/mL 烯啶虫胺处理黑翅土白蚁 72 h 后校正死亡率达 100%，16 μg/mL 溴虫腈处理 72 h 后黑翅土白蚁校正死亡率也达到 100 %。室内毒力测定结果表明烯啶虫胺对黑翅土白蚁的 LC_{50} 值低于溴虫腈，100 μg/mL 烯啶虫胺处理 8 h 后对黑翅土白蚁无显著驱避作用。3 种剂量烯啶虫胺肠衣饵剂处理 72 h 后，黑翅土白蚁校正死亡率均在 60%以上。将不同剂量的烯啶虫胺肠衣饵剂投放到园林中 45 d 后，肠衣饵剂基本被食空，施药点周围无白蚁及活动迹象。在福建省水库大坝周围投放 60 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵剂，3 个月后肠衣饵剂未发霉且基本被食空，6 个月后挖巢发现蚁道内无黑翅土白蚁活动，白蚁巢体出现死亡和坍塌情况。**【结论】** 60 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵剂对园林和堤坝中的黑翅土白蚁具有良好的诱杀效果，是一种高效环保型白蚁肠衣饵剂。

关键词 黑翅土白蚁；烯啶虫胺；肠衣饵剂；诱杀效果；园林；堤坝

The effectiveness of nitenpyram casing baits for controlling the termite *Odontotermes formosanus*

HANG Xing[1**] LIN Hong[2] GAO Yong-Yong[1] CHEN Xiang-Tuan[2] XIONG Qiang[3]
CHEN Wen-Qing[2] LEI Chao-Liang[1] HUANG Qiu-Ying[1***]

(1. College of Plant Science & Technology of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Fujian Water Conservancy Management Center, Fuzhou 350000, China; 3. Institute of Yichang Termite Control, Yichang 443000, China)

Abstract **[Objectives]** To develop an efficient and environmental-friendly bait against termites. **[Methods]** The toxicity of nitenpyram and chlorfenapyr baits to the termite *Odontotermes formosanus* was evaluated under laboratory conditions. Higher toxicity insecticides were chosen to determine their repellent effect on *O. formosanus*. Casing baits with three different pesticide doses were made in order to test both indoor toxicity and the effectiveness of control in the field. A suitable dose was chosen to carry out trials on the effectiveness of controlling *O. formosanus* in dams, which was subsequently tested by excavating termite nests. **[Results]** The corrected mortality of *O. formosanus* reached 100% 72 h after treatment with 1.6 μg/mL nitenpyram and 16 μg/mL chlorfenapyr. The results of indoor toxicity test showed that the LC_{50} of nitenpyram was lower than that of chlorfenapyr. Baits containing 100 μg/mL nitenpyram had no repellent effect on *O. formosanus* 8 h after treatment. The three different doses of nitenpyram casing baits all achieved a corrected mortality of 60% 72 h after treatment. Casing baits containing the three different doses were completely consumed by *O. formosanus* and

*资助项目 Supported projects：堤坝白蚁绿色防控技术研究（707115078）
**第一作者 First author，E-mail：15505557618@163.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：qyhuang2006@mail.hzau.edu.cn
收稿日期 Received：2020-11-20；接受日期 Accepted：2021-01-20

there were no termites or signs of termite activity 45 days after baits had been deployed. Casing baits with 60 μg/g nitenpyram placed around dams in Fujian Province did not become moldy and were completely consumed by *O. formosanus* within three months. Moreover, there were no termites in tunnels and termite nests were either dead, or collapsed, six months after treatment. **[Conclusion]** Casing baits containing 60 μg/g nitenpyram are an effective and environmentally-friendly method of controlling *O. formosanus*, both in the general landscape and in dams.

Key words *Odontotermes formosanus*; nitenpyram; casing bait; trapping effect; landscape; dam

白蚁是一类世界性的重要害虫，主要取食纤维素，为害房屋建筑、农林植物、电缆设施、水库堤坝等（黄远达，2001）。全球每年因白蚁造成的经济损失和防治白蚁费用高达 400 亿美元（Su，2019）。白蚁的防治手段主要包括物理防治、生物防治和化学防治等（曹莉等，2007）。物理防治主要利用物理屏障如砂砾、防水薄膜、惰性粉或是塑料挡板等将白蚁和食物隔开，从而保护建筑物等不受白蚁危害（莫建初等，2003；高勇勇等，2018）。生物防治是利用一些病原真菌如球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*、金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 等进行白蚁防治，具有对环境友好且不伤害非靶标生物的优点（Liu *et al.*，2019）。但是，在防治白蚁的方法中，物理防治和生物防治存在防治周期较长、防治效果较差等缺点，因此，化学防治手段仍是目前防治白蚁的主要方法（闫峻，2008）。

化学屏障法是早期化学防治白蚁的一种方法，主要使用液体化学药剂处理建筑物周围的土壤或地基形成化学屏障，达到驱避或毒杀白蚁的效果（胡剑等，2006）。但是，大量使用化学屏障防治白蚁不仅会造成严重的土壤污染和水污染，而且施药一段时间后，仍会有白蚁活动（Semhi *et al.*，2008）。随着白蚁防治技术水平的提高，白蚁诱杀法逐渐成为白蚁防治的主要技术（谭速进等，1999）。白蚁诱杀法不仅高效、低毒，而且可以降低对环境的污染（Huang *et al.*，2006）。目前主要使用的诱杀法有诱杀桩法、诱杀箱法、诱集堆法、诱杀坑法、饵剂诱杀法和监控诱杀法等（Evans and Iqubal，2015）。饵剂诱杀法的基本原理是将毒性缓慢的药剂与白蚁喜食的饵料混合制成饵剂，白蚁取食饵剂后并将其带回巢内喂食给其他个体，药剂在巢内个体间进行传播，一段时间后达到杀灭蚁巢的目的（黄求应，2006）。在 1995 年，Su 等（1995）研发的地下白蚁巢群监测-诱杀站（Sentricon® System）开始投入商业化。Li 等（2010）使用氟虫胺、氟铃脲和氟虫腈 3 种饵剂防治我国农村房屋白蚁，发现施用饵剂 100 d 后，黑胸散白蚁 *Reticulitermes chinensis* 的数量和监测站中木块被食量均显著降低，有效控制了房屋白蚁为害。

烯啶虫胺（Nitenpyram）是一种新型烟酰亚胺类化合物，主要作用于烟碱乙酰胆碱酯酶受体（Nicotinacetylcholine，nAChR），通过抑制昆虫神经系统的 nAChR，阻断中枢神经系统的正常传导，使昆虫麻痹死亡（Tomizawa and Casida，2003）。溴虫腈（Chlorfenapyr）是一种杀虫剂前体物质，在昆虫体内经过多功能氧化酶转变为具杀虫活性化合物（Raghavendra *et al.*，2011），通过干扰线粒体的氧化磷酸化过程，造成虫体能量供应不足从而导致虫体死亡（Nicastro *et al.*，2013；Tharaknath *et al.*，2013；Zhao *et al.*，2018）。本文通过测试烯啶虫胺和溴虫腈 2 种药剂对黑翅土白蚁的室内毒力，筛选合适的药剂及其剂量用于制备白蚁肠衣饵剂，并测试肠衣饵剂对园林和堤坝白蚁的防治效果，以期开发出一种高效环保型白蚁肠衣饵剂。

1 材料与方法

1.1 供试白蚁

供试白蚁为黑翅土白蚁 *Odontotermes formosanus*，采自华中农业大学狮子山枯树枝中，将枯树枝带回实验室并放入塑料箱（80 cm × 60 cm × 40 cm）内，在温度为（25 ± 1）℃和湿度为 85% ± 5%的室内黑暗条件下饲养，备用。

选用活性较强的黑翅土白蚁工蚁作为试虫。

1.2　2 种低毒药剂对黑翅土白蚁的室内毒力测定

参照黄求应等（2005）方法，配制 1.6、0.8、0.4、0.2 和 0.1 μg/mL 的烯啶虫胺稀释液和 16.0、8.0、4.0、2.0 和 1.0 μg/mL 的溴虫腈稀释液，将 9 cm 定性滤纸平铺于直径 9 cm 培养皿中并吸取 1 mL 药剂稀释液均匀滴在滤纸上。每个培养皿中投放 30 头活性良好的黑翅土白蚁工蚁。在（25 ± 1）℃，85% ± 5% RH 的黑暗条件下进行试验，每隔 24 h 挑出死亡白蚁个体，并计数。每个处理重复 3 次，用蒸馏水作为对照。试验结束后，采用 Abbott（1925）公式计算 2 种药剂处理 24、48 和 72 h 后黑翅土白蚁工蚁校正死亡率。

1.3　优选药剂对黑翅土白蚁的驱避作用试验

参照毛伟光等（2009）的方法，设置 3 个大小相同的圆形区域（直径 3.5 cm）并连通 3 个区域，黑翅土白蚁工蚁可在 3 个区域之间自由活动（图 1）。中间区域为中间区，在实验装置的两侧区域底部平铺 3.5 cm 的定性滤纸，右侧区域设置为处理区，底部滤纸用 200 μL 一定浓度的优选药剂溶液润湿；装置左侧区域设置为对照区，底部的滤纸用 200 μL 蒸馏水润湿。挑选活性较强、大小一致的黑翅土白蚁工蚁 50 头放入装置的中间区，8 h 后计数 3 个区域内活动的黑翅土白蚁工蚁数量，并比较对照区和处理区的工蚁数量差异。试验重复 3 次。

图 1　驱避试验装置

Fig. 1　Device of repellent experiment

1.4　不同剂量优选药剂肠衣饵剂对黑翅土白蚁的室内毒杀效果

将不同剂量的优选药剂与松木屑均匀混合，用饵剂成型机制成浓度为 15、30、60 μg/g 的肠衣饵剂，以不含药剂的肠衣饵剂作为对照。在长方形塑料盒（25 cm × 15 cm × 10 cm）的底部铺上一定湿度的砂土，再放入已称重的不同剂量肠衣饵剂，投放 200 头黑翅土白蚁工蚁。将塑料盒置于温度为（25 ± 1）℃和湿度为 85% ± 5%的室内黑暗条件下让工蚁取食肠衣饵剂，每隔 24 h 观察记录黑翅土白蚁工蚁死亡数，并剔除死亡个体，试验观察 72 h。试验处理 72 h 后，烘干称重剩余肠衣饵剂，计算饵剂被食量。每个组处理重复 3 次。

1.5　不同剂量肠衣饵剂对园林中黑翅土白蚁的防治效果

在华中农业大学狮子山上选择白蚁活动迹象明显的地段投放白蚁肠衣饵剂。将不同剂量的肠衣饵剂投放在有黑翅土白蚁活动的泥被、泥线、蚁道周围，并用杂草或落叶覆盖。调查时间持续 2 个月，肠衣饵剂投放 3 d 后开始观察饵剂被食情况，每隔 1 d 记录被食情况并拍照记录，直至肠衣饵剂被完全取食。试验结束后再次检查地面黑翅土白蚁活动情况。

1.6　优选剂量肠衣饵剂对水库大坝周围黑翅土白蚁的防治效果

根据华中农业大学狮子山的试验结果，选定最优剂量肠衣饵剂进行堤坝黑翅土白蚁防治试验。选定福建省泉州市山美水库以及福鼎市龟墩水库、文渡水库为试验点。在水库坝端下游约 5-10 m 处，查找黑翅土白蚁活动痕迹，在白蚁活动区域范围内施药，每个水库设置 9 个施药点。施药分 2 次进行，时间间隔在 2 个月以内，对黑翅土白蚁取食情况进行拍照记录。施药 6 个月后，在大坝周围合适的地点现场挖巢，检验肠衣饵剂防治堤坝黑翅土白蚁的效果。

1.7 数据处理与分析

本研究中所有数据采用 SPSS 26.0 进行统计与分析，其中室内毒力、肠衣饵剂室内毒杀效果和肠衣饵剂的取食量使用 One-way ANOVA 法进行统计分析，并用 Tukey HSD 法在 5%水平上进行差异显著性分析。驱避试验结果使用独立样本 *t*-检验进行统计分析，并在 5%水平上进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 烯啶虫胺和溴虫腈对黑翅土白蚁的室内毒力

由表 1 可知，1.6 μg/mL 烯啶虫胺处理 24 h 和 48 h 后黑翅土白蚁校正死亡率显著高于其余浓度（$P < 0.05$），1.6 μg/mL 烯啶虫胺处理 72 h 后黑翅土白蚁校正死亡率达到 100%。16 μg/mL 溴虫腈处理 24 h 后黑翅土白蚁校正死亡率显著高于其余浓度处理（$P < 0.05$），16 μg/mL 和 8 μg/mL 溴虫腈处理 72 h 后黑翅土白蚁校正死亡率均达到 100%，显著高于其它浓度处理（$P < 0.05$）。

由表 2 可知，药后 72 h，烯啶虫胺的 LC_{50} 值为 0.620 μg/mL，溴虫腈的 LC_{50} 值为 7.083 μg/mL，烯啶虫胺的 LC_{50} 值明显低于溴虫腈，说明烯啶虫胺对黑翅土白蚁的毒力高于溴虫腈，因此本研究选择烯啶虫胺作为优选药剂开展后续试验。

2.2 烯啶虫胺对黑翅土白蚁的驱避作用

由图 2 所示，用 100 μg/mL 烯啶虫胺处理黑翅土白蚁 8 h 后，对照区和处理区黑翅土白蚁数量之间无显著差异（$t = 0.06$，$P = 0.95$），可见 100 μg/mL 烯啶虫胺对黑翅土白蚁无驱避作用。

表 1 烯啶虫胺与溴虫腈对黑翅土白蚁的室内毒杀效果

Table 1 Toxic effect of nitenpyram and chlorfenapyr against *Odontotermes formosanus* in laboratory

药剂种类 Chemicals type	药剂浓度（μg/mL） Chemical concentration	校正死亡率（%）Adjusted mortality		
		24 h	48 h	72 h
烯啶虫胺 Nitenpyram	1.60	32.18 ± 9.95a	97.70 ± 1.99a	100.00 ± 0.00a
	0.80	8.05 ± 5.27b	75.86 ± 10.34b	91.86 ± 5.33a
	0.40	6.90 ± 3.45b	18.39 ± 1.99c	41.78 ± 2.01b
	0.20	6.90 ± 3.45b	8.05 ± 1.99cd	10.48 ± 5.33c
	0.10	0.00 ± 3.45b	4.60 ± 1.99d	5.82 ± 3.49c
溴虫腈 Chlorfenapyr	16.00	53.49 ± 5.15a	100.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00a
	8.00	4.51 ± 1.96b	98.88 ± 1.95a	100.00 ± 0.00a
	4.00	4.51 ± 3.89b	4.51 ± 3.89b	21.84 ± 1.99b
	2.00	7.88 ± 1.95b	10.12 ± 1.95b	10.34 ± 0.00c
	1.00	3.38 ± 5.15b	5.63 ± 5.84b	3.45 ± 5.97c

表中数据为平均值 ± 标准误，同一列数字后标有不同小写字母表示经 Tukey HSD 法在 5%水平上差异显著。表 3 同。
Data in the table are mean ± SE, and followed by the different lowercase letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 level by the Tukey HSD method. The same as table 3.

表 2 烯啶虫胺和溴虫腈对黑翅土白蚁的室内毒力

Table 2 The toxicity of nitenpyram and chlorfenapyr against *Odontotermes formosanus* in laboratory

时间 Time	药剂 Chemicals	毒力回归方程 Virulence regression equation	LC_{50} (μg/mL)	95%的置信区间 95% confidence interval	卡方值 χ^2
72 h	烯啶虫胺	$y = 0.092 + 0.658x$	0.620	0.273 - 0.728	0.817
	溴虫腈	$y = 0.034 + 0.071x$	7.083	0.221 - 0.721	0.779

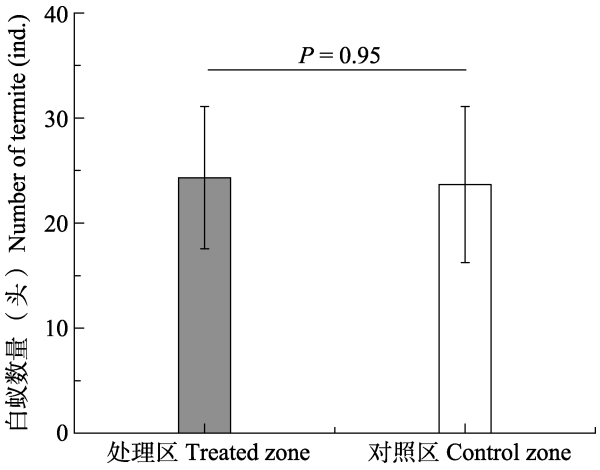

图 2　烯啶虫胺对黑翅土白蚁的驱避作用

Fig. 2　Repellent effect of nitenpyram against *Odontotermes formosanus*

数据为平均值±标准误（独立样 *t*-测验，$P = 0.95$，无显著差异）。

Data are mean ± SE (Independent-samples *t*-tests, $P = 0.95$, no significant difference).

2.3　烯啶虫胺肠衣饵剂对黑翅土白蚁的室内毒杀效果

由表 3 可知，3 种剂量烯啶虫胺肠衣饵剂处理 24 h 后，30 μg/g 烯啶虫胺饵剂处理的黑翅土白蚁校正死亡率显著高于 15 μg/g 烯啶虫胺处理（$P < 0.05$），但与 60 μg/g 烯啶虫胺饵剂处理无显著差异（$P > 0.05$）。3 种剂量烯啶虫胺肠衣饵剂处理 48 h 后黑翅土白蚁校正死亡率均达到 50%以上，其中 30 μg/g 烯啶虫胺饵剂处理的黑翅土白蚁校正死亡率高于 15 μg/g 和 60 μg/g 烯啶虫胺处理，但三者间无显著差异（$P > 0.05$）。3 种剂量烯啶虫胺肠衣饵剂处理 72 h 后黑翅土白蚁校正死亡率均达到 60%以上，其中 30 μg/g 烯啶虫胺饵剂处理的黑翅土白蚁校正死亡率高于 15 μg/g 和 60 μg/g 烯啶虫胺处理，但三者间无显著差异（$P > 0.05$）。

表 3　3 种剂量烯啶虫胺肠衣饵剂对黑翅土白蚁的室内毒杀效果

Table 3　Toxic effect of three doses of nitenpyram casing baits against *Odontotermes formosanus*

饵剂浓度（μg/g）Bait concentration (μg/g)	校正死亡率（%）Adjusted mortality		
	24 h	48 h	72 h
15	43.13 ± 1.75b	51.25 ± 12.64a	60.50 ± 10.02a
30	62.88 ± 6.54a	66.13 ± 10.66a	72.25 ± 9.00a
60	56.88 ± 6.46a	61.50 ± 6.36a	70.13 ± 0.63a

如图 3 所示，黑翅土白蚁取食不同剂量烯啶虫胺饵剂 72 h 后，黑翅土白蚁对 30 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵剂的取食量最高，但与对照组、15 μg/g 和 60 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵剂的取食量无显著差异（$P > 0.05$），这说明供试烯啶虫胺肠衣饵剂对黑翅土白蚁没有明显的拒食性。

2.4　烯啶虫胺肠衣饵剂对园林中黑翅土白蚁的防治效果

在华中农业大学狮子山上开展野外试验表明，烯啶虫胺肠衣饵剂投放 15 d 后，对照饵剂和 15 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵剂出现黑翅土白蚁取食痕迹。投放 30 d 后，3 种剂量烯啶虫胺肠衣饵剂和对照饵剂均有黑翅土白蚁取食痕迹且有黑翅土白蚁工蚁正在取食肠衣饵剂（图 4：A），投放 45 d 后 15、30 和 60 μg/g 3 种烯啶虫胺肠衣饵剂基本被食空，内部可见白蚁泥被（图 4：B）。投放期间，未发现肠衣饵剂发霉情况，饵剂投放点周围黑翅土白蚁活动明显降低。剥开白蚁建筑的泥被及泥路均未发现活动黑翅土白蚁，肠衣饵剂表面铺设的枯叶也无活动工蚁。在此试验过程中，未发现其他非靶标昆虫和动物取食肠衣饵剂，也未发现动物死亡个体。

2.5　烯啶虫胺肠衣饵剂对堤坝上黑翅土白蚁的防治效果

在福建省泉州市山美水库大坝周围投放 60 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵剂 10 d 后，肠衣饵剂表面出现孔洞，有黑翅土白蚁开始进出取食肠衣饵剂。施药 30 d 后，各施药点均出现黑翅土白蚁

取食痕迹。施药 6 个月后，肠衣饵剂表面覆盖泥被（图 5），内部被吃空，肠衣饵剂周围无黑翅土白蚁活动痕迹。在山美水库大坝周围选择肠衣饵剂被取食的区块现场挖巢，发现 1 号蚁巢内没有黑翅土白蚁及菌圃，蚁巢泥骨架稀少松垮，表明该白蚁巢体死亡时间较久（图 6：A）；2 号蚁巢内白蚁数量较少，菌圃稀少，说明该蚁巢白蚁取食肠衣饵剂中毒后菌圃处于萎缩衰退状态（图 6：B）。

在福建省福鼎市龟墩水库和文渡水库周围

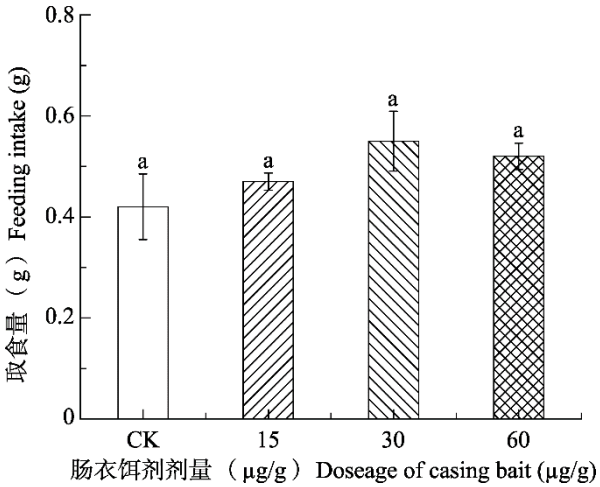

图 3　室内黑翅土白蚁对不同剂量烯啶虫胺肠衣饵剂的取食量比较

Fig. 3　Comparison of feeding intake for different nitenpyram casing baits by *Odontotermes formosanus*

图中数据为平均值±标准误，柱上标有相同小写字母表示不存在显著性差异（Tukey's HSD test, $P > 0.05$）。
Data are means ± SE. Histograms with same lowercase letters indicate no significant difference at the 0.05 level by Tukey's HSD test.

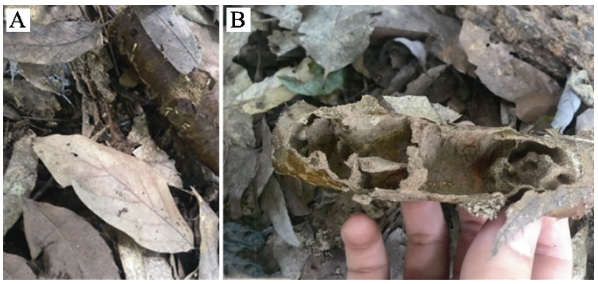

图 4　园林中黑翅土白蚁取食烯啶虫胺肠衣饵剂情况

Fig. 4　Nitenpyram casing bait fed by *Odontotermes formosanus* in the landscape

A. 30 d；B. 45 d.

图 5　山美水库大坝周围黑翅土白蚁取食烯啶虫胺肠衣饵剂情况

Fig. 5　Nitenpyram casing bait fed by *Odontotermes formosanus* around Shanmei Reservoir Dam

图 6　烯啶虫胺肠衣饵剂对山美水库大坝周围黑翅土白蚁巢体的防治效果

Fig. 6　Controlling effect of nitenpyram casing baits against *Odontotermes formosanus* around Shanmei Reservoir Dam

A. 1 号蚁巢；B. 2 号蚁巢。
A. No.1 termite colony; B. No.2 termite colony.

投放 60 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵剂 7 d 后，黑翅土白蚁开始进出取食肠衣饵剂（图 7：A）。14 d 后，肠衣饵剂表面出现明显的孔洞（图 7：B），黑翅土白蚁取食饵剂的频率加快。3 个月后，部分肠衣饵剂被白蚁食空，剩余饵剂未出现发霉情况（图 7：C）。投放饵剂 6 个月后，肠衣饵剂基本被食空（图 7：D）。在 2 座水库大坝周围选择肠衣饵剂被取食的区块现场挖巢，发现龟墩水库黑翅土白蚁巢体的副巢内菌圃发霉（图 8：A），主巢内菌圃稀少，没有黑翅土白蚁活动，蚁巢泥骨架已松垮（图 8：B），表明蚁巢死亡较长时间。在文渡水库挖出发霉的蚁道（图 9：A），蚁道和副巢内均无黑翅土白蚁活动，蚁巢副巢已坍塌（图 9：B）。

3　讨论

烯啶虫胺是一种理想的白蚁诱杀药剂。安鑫（2012）研究发现，0.001%烯啶虫胺处理台湾乳白蚁 *Coptotermes formosanus* 2 d 后死亡率可达 100%，而且 0.001%烯啶虫胺对台湾乳白蚁无显著驱避作用。本研究也发现，1.6 μg/mL 烯啶虫胺处理黑翅土白蚁 3 d 后死亡率可达 100%，而且烯啶虫胺对黑翅土白蚁无驱避作用。曾小虎等（2019）测定了除虫菊素及联苯菊酯的室内毒力，胃毒性试验结果发现 50 mg/L 联苯菊酯处理 6 d 后台湾乳白蚁全部死亡，500 mg/L 除虫菊素处理 2 d 后台湾乳白蚁死亡率达到 90%。黄求应等（2005）在研究氟虫腈和吡虫啉对黑翅土白蚁

图 7　福鼎市两处水库大坝周围黑翅土白蚁取食烯啶虫胺肠衣饵剂情况

Fig. 7　Nitenpyram casing baits were fed by *Odontotermes formosanus* around two reservoir dams in Fuding

A. 7 d；B. 14 d；C. 3 个月；D. 6 个月。A. 7 d; B. 14 d; C. 3 mouths; D. 6 mouths.

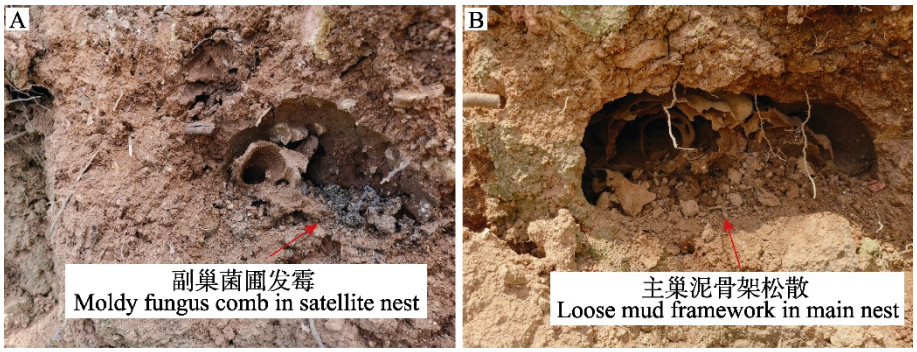

图 8　烯啶虫胺肠衣饵剂对龟墩水库大坝周围黑翅土白蚁的防治效果

Fig. 8　Controlling effect of nitenpyram casing bait against the termite *Odontotermes formosanus* around Guidun Reservoir Dam

A. 副巢；B. 主蚁巢。A. Satellite nest; B. Main nest.

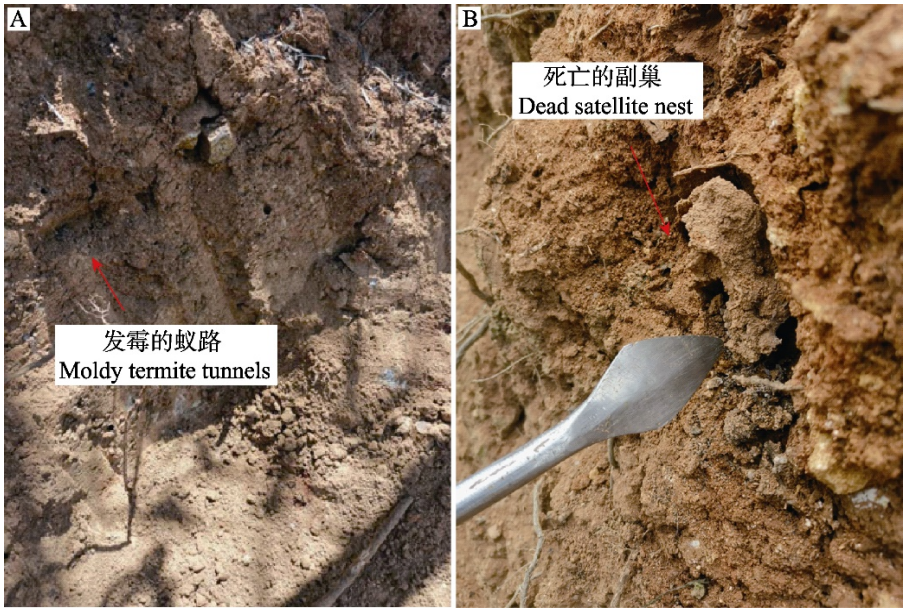

图 9 烯啶虫胺肠衣饵剂对文渡水库大坝周围黑翅土白蚁的防治效果

Fig. 9 Controlling effect of nitenpyram casing bait against the termite *Odontotermes formosanus* around Wendu Reservoir Dam

A. 蚁路；B. 副巢。A. Termite tunnels; B. Satellite nest.

的诱杀效果发现，0.4 μg/mL 吡虫啉处理 5 d 后死亡率达到 80%以上，但是 50 μg/mL 吡虫啉对黑翅土白蚁具有明显的驱避性；0.4 μg/mL 氟虫腈处理 3 d 后，黑翅土白蚁死亡率达到 90%以上，而且 50 μg/mL 氟虫腈对黑翅土白蚁无显著驱避性。与其他药剂相比，烯啶虫胺对非靶标生物的毒性更低，在水中降解速率高，对水生生物安全（Matthew，2016），因此烯啶虫胺是一种高效安全的白蚁诱杀药剂，可以用于园林和堤坝白蚁饵剂的研制。

烯啶虫胺肠衣饵剂对园林和堤坝白蚁有良好的防治效果。本研究室内试验表明，60 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵剂处理 72 h 后黑翅土白蚁校正死亡率均达到 70%以上，且黑翅土白蚁对 60 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵没有出现拒食性。在华中农业大学狮子山中，投放 60 μg/g 烯啶虫胺肠衣饵剂 45 d 后被食空，饵剂投放点周围未发现白蚁及其活动迹象，说明 60 μg/g 烯啶虫胺饵剂的毒性能被觅食工蚁带回蚁巢中并通过交哺行为传毒给同伴，达到了诱杀白蚁巢群的效果（Huang *et al.*，2006；Rust and Su，2012）。在几丁质合成抑制剂类白蚁饵剂研究中，Osbrink 等（2011）在美国新奥尔良建筑物周围投放 0.5%氟铃脲饵剂进行野外防效试验，调查发现灭除建筑物周围的北美散白蚁 *Reticulitermes flavipes* 和台湾乳白蚁需要 2-3 年时间。Neoh 等（2011）投放 1%双三氟虫脲饵剂防治马来西亚塞恩斯大学明登校区的黄球白蚁 *Globitermes sulphureus*，发现 4 个月后黄球白蚁巢群活性降低，工蚁出现体色变白，体表附着螨虫。梁世优（2020）研究发现，培菌白蚁巢内的菌圃可以降解氟铃脲、双氟虫脲和氟碇脲等几丁质合成抑制剂，由此降低和延缓了几丁质合成抑制剂类饵剂对培菌白蚁的防治效果。Lee 等（2014）使用 0.1%氟碇脲饵剂防治大白蚁，发现 4 个月后蚁巢活性未受到显著抑制，仅在工蚁、幼蚁和菌圃中检测到微量氟碇脲。本研究在福建省 3 座水库附近使用烯啶虫胺肠衣饵剂对堤坝土白蚁进行防治，肠衣饵剂投放 3 个月后被食空，施药 6 个月后蚁巢内出现菌圃发霉、泥骨架松垮、甚至坍塌死亡特征。因此，与几丁质合成抑制剂类白蚁饵剂相比，烯啶虫胺肠衣饵剂对培菌白蚁的防治效果更好。

烯啶虫胺肠衣饵剂抗潮防霉能力强，因此防治野外白蚁的持效期长。周维（2009）使用氟铃

脲、杀铃脲、氟虫腈制备白蚁诱杀单剂及复配剂进行水库堤坝白蚁防治研究发现，由于制备的饵剂含有红糖，会引诱白蚁天敌如蚂蚁抢先取食，影响白蚁取食，而且容易导致饵剂发霉。李静（2011）使用畔康 0.08%氟虫胺饵剂和天惠 0.0025%吡虫啉饵剂对黑胸散白蚁和台湾乳白蚁进行野外防治试验，发现未及时被白蚁取食的饵剂出现了发霉情况。刘超华和尹海辰（2018）发现使用聚乙烯塑料袋封装的白蚁饵剂能够有效阻止饵剂发霉变质，但是聚乙烯塑料袋在自然界中无法降解，污染环境。本研究研制的烯啶虫胺肠衣饵剂主要饵料成分为木纤维，没有添加淀粉类粘合剂，饵剂由可降解的纤维素肠衣包裹，不仅可以保护饵剂形状、阻挡雨水渗入和减少药剂流失，而且在环境可以降解，不污染环境（黄求应等，2017），显著延长了白蚁饵剂的持效期。在本研究开展的园林白蚁和堤坝白蚁防治过程中，烯啶虫胺肠衣饵剂均未出现发霉情况，所投放饵剂基本被食尽，对提高白蚁饵剂的抗潮防霉能力有显著效果，可以有效延长饵剂的使用寿命，保证烯啶虫胺肠衣饵剂防治白蚁的效果。

综上所述，烯啶虫胺肠衣饵剂具有诱杀药剂使用量低、适口性好、投放方法简便、抗潮防霉能力强、灭治白蚁巢体效果好和时间短、对环境和非靶标生物安全友好等特点，是一种高效环保型白蚁诱杀饵剂，在园林和堤坝白蚁防治上具有良好的应用前景。

参考文献 (References)

Abbott WS, 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18: 265–267.

An X, 2012. Study on control techniques of termite for sympodial bamboo and composite materials. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [安鑫, 2012. 丛生竹及其复合材料的白蚁防治技术研究. 硕士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院.]

Cao L, Zhao RH, Chen JH, Han RC, 2007. Advances in the control techniques of termites. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(3): 342–347. [曹莉, 赵瑞华, 陈镜华, 韩日畴, 2007. 白蚁防治技术. 昆虫知识, 44(3): 342–347.]

Evans TA, Iqbal N, 2015. Termite (order Blattodea, infraorder Isoptera) baiting 20 years after commercial release. *Pest Management Science*, 71(7): 897–906.

Gao YY, Zhang ZB, Yu SX, Li JJ, Lei CL, Xiong M, Huang QY, 2018. Bioassay of inert powder against *Odontotermes formosanus*. *Hubei Plant Protection*, (3): 7–9, 15. [高勇勇, 张祖斌, 余树信, 李晶舰, 雷朝亮, 熊敏, 黄求应, 2018. 惰性粉剂对黑翅土白蚁生物活性的测定. 湖北植保, (3): 7–9, 15.]

Hu J, Zhong JH, Guo MF, 2006. A review of physical barriers against termites. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(1): 27–32. [胡剑, 钟俊鸿, 郭明昉, 2006. 物理屏障预防白蚁技术的研究及应用. 昆虫知识, 43(1): 27–32.]

Huang QY, 2006. Study on foraging behavior system for *Odontotermes formosanus* (Isoptera: Termitidae). Doctor dissertation. Wuhan：Huazhong Agricultural University. [黄求应, 2006. 黑翅土白蚁觅食行为学基础及诱杀系统的研究. 博士学位论文 武汉: 华中农业大学.]

Huang QY, Chen WQ, Gao YY, Ling H, Chen XT, Ling YH, Yu SX, Lei CL, 2017. A kind of casing bait that can trap and kill termites. China, CN107047623A. 2017-08-18. [黄求应, 陈文清, 高勇勇, 林红, 陈香湍, 林宇航, 余树信, 雷朝亮, 2017. 一种能诱杀白蚁的肠衣饵剂. 中国, CN107047623A. 2017-08-18.]

Huang QY, Lei CL, Xue D, 2006. Field evaluation of a fipronil bait against subterranean termite *Odontotermes formosanus* (Isoptera: Termitidae). *Journal of Economic Entomology*, 99(2): 455–461.

Huang QY, Xue D, Tong YY, Wang WP, Lei CL, 2005. Performance of fipronil and imidacloprid as the attracticide against *Odontotermes formosanus*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(6): 656–659. [黄求应, 薛东, 童严严, 王维平, 雷朝亮, 2005. 氟虫腈、吡虫啉作为黑翅土白蚁诱杀药剂的效果. 昆虫知识, 42(6): 656–659.]

Huang YD, 2001. An Introduction to Chinese Termites. Wuhan: Hubei Science & Technology Press. 1–11. [黄远达, 2001. 中国白蚁学概论. 武汉: 湖北科学技术出版社. 1–11.]

Lee CC, Neoh KB, Lee CY, 2014. Colony size affects the efficacy of bait containing chlorfluazuron against the fungus-growing termite *Macrotermes gilvus* (Blattodea: Termitidae). *Journal of Economic Entomology*, 107(6): 2154–2162.

Li J, 2011. Study on the efficacy of new baits to control termites. Master dissertation. Hangzhou: Zhejiang University. [李静, 2011. 新型毒饵防治白蚁效果研究. 硕士学位论文. 杭州：浙江大学.]

Li WZ, Tong YY, Xiong Q, Huang QY, 2010. Efficacy of three kinds of baits against the subterranean termite *Reticulitermes chinensis* (Isoptera: Rhinotermitidae) in rural houses in China. *Sociobiology*, 56(1): 209–221.

Liang SY, 2020. Study on the different responses of microbe to forest biomass between fungus comb of *Odontotermes formosanus* and *Macrotermes barneyi*. Doctor dissertation. Hangzhou:

Zhejiang University. [梁世优, 2020. 黑翅土白蚁和黄翅大白蚁菌圃微生物对林地生物质差异化响应研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学.]

Liu CH, Yin HC, 2018. Effects of different environmental conditions on termite bait trait. *Hubei Plant Protection*, (2): 22–24. [刘超华, 尹海辰, 2018.不同环境条件对白蚁饵剂性状差异的影响. 湖北植保, (2): 22–24.]

Liu L, Zhao XY, Tang QB, Lei CL, Huang QY, 2019. The mechanisms of social immunity against fungal infections in eusocial insects. *Toxins*, 11 (5): 244.

Mao WG, Ye TJ, Liu GS, Mo JC, 2009. Effect of fipronil against *Reticulitermes chinensis*. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides and Equipments*, 15(6): 449–452. [毛伟光, 叶天降, 刘光胜, 莫建初, 2009. 氟虫腈对黑胸散白蚁的药效观察. 中华卫生杀虫药械, 15(6): 449–452.]

Matthew N, Simon R, Hao CY, 2016. Nitenpyram degradation in finished drinking water. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 20(13): 1653–1661.

Mo JC, Wu J, Zhuang PJ, Tang ZH, 2003. Safe and effective termite control method-physical barrier method. *World Pesticides*, 25(2): 40–43. [莫建初, 吴峻, 庄佩君, 唐振华, 2003. 安全有效的白蚁防治方法——物理屏障法. 世界农药, 25(2): 40–43.]

Neoh KB, Jalaludin NA, Lee CY, 2011. Elimination of field colonies of a mound-building termite *Globitermes sulphureus* (Isoptera: Termitidae) by bistrifluron bait. *Journal of Economic Entomology*, 104(2): 607–613.

Nicastro RL, Arthur V, Sato ME, Silva MZ, 2013. Chlorfenapyr resistance in the spider mite *Tetranychus urticae*: Stability, cross-resistance and monitoring of resistance. *Phytoparasitica*, 41(5): 503–513.

Osbrink WLA, Cornelius ML, Lax AR, 2011. Areawide field study on effect of three chitin synthesis inhibitor baits on populations of *Coptotermes formosanus* and *Reticulitermes flavipes* (Isoptera: Rhinotermitidae). *Journal of Economic Entomology*, 104(3): 1009–1017.

Raghavendra K, Barik TK, Bhatt RM, Srivastava HC, Sreehari U, Dash AP, 2011. Evaluation of the pyrrole insecticide chlorfenapyr for the control of *Culex quinquefasciatus* Say. *Acta Tropica*, 118(1): 50–55.

Rust MK, Su NY, 2012. Managing social insects of urban importance. *Annual Review of Entomology*, 57: 355–375.

Semhi K, Chaudhuri S, Clauer N, Boeglin JL, 2008. Impact of termite activity on soil environment: A perspective from their soluble chemical components. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 5(4): 431–444.

Su NY, 2019. Development of baits for population management of subterranean termites. *Annual Review of Entomology*, 64: 115–130.

Su NY, Thomas EM, Ban PM, Scheffrahn RH, 1995. Monitroing-baiting station to detect and eliminate foraging populations of subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae) near structures. *Journal of Economic Entomology*, 88(4): 932–936.

Tan SJ, Zhang DY, He JH, 1999. Application of attraction technology in termite control. *Entomological Knowledge*, 36(4): 3–5. [谭速进, 张大羽, 何俊华, 1999. 白蚁防治中引诱技术的应用. 昆虫知识, 36(4): 3–5.]

Tharaknath VR, Prabhakar YVS, Kumar KS, Babu NK, 2013. Clinical and radiological findings in chlorfenapyr poisoning. *Annual of Indian Academy Neurology*, 16(2): 252–254.

Tomizawa M, Casida JE, 2003. Selective toxicity of neonicotinoids attributable to specificity of insect and mammalian nicotinic receptors. *Annual Review of Entomology*, 48: 339–364.

Yan J, 2008. Economic analysis and countermeasure of forest bio-disaster management in China. Doctor dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [闫峻, 2008. 我国林业生物灾害管理的经济学分析与对策研究. 博士学位论文. 北京：北京林业大学.]

Zeng XH, Chen SH, Wang SZ, Zhang L, Xu P, Guo YH, 2019. Laboratory toxicity test of concentrated solution of pyrethrins 50% to *Coptotermes formosanus* Shiraki. *Agrochemicals*, 58(4): 303–306. [曾小虎, 陈尚海, 王思忠, 张亮, 徐鹏, 郭耀辉, 2019. 50%除虫菊素浓缩对台湾乳白蚁室内毒力测定. 农药, 58(4): 303–306.]

Zhao YH, Wang QH, Ding JF, Wang Y, Zhang ZQ, Liu F, Mu W, 2018. Sublethal effects of chlorfenapyr on the life table parameters, nutritional physiology and enzymatic properties of *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 148: 93–102.

Zhou W, 2009. Termites control on dam of reservoirs. Master dissertation. Hefei: Anhui Agricultural University. [周维, 2009. 水库堤坝白蚁防治研究. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学.]