



马英剑, 孙金诺, 钱坤, 徐维, 吕培, 冯建国. 用于白蚁防治的联苯菊酯微胶囊的制备及性能研究 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (6): 1543–1551.

用于白蚁防治的联苯菊酯微胶囊的制备及性能研究

马英剑¹, 孙金诺², 钱坤^{1*}, 徐维¹, 吕培², 冯建国^{1*}

(1. 扬州大学园艺与植物保护学院, 江苏扬州 225009; 2. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要: 针对白蚁防治药剂联苯菊酯传统加工剂型存在的安全性差、持效期短等缺点, 采用溶剂蒸发法制备联苯菊酯微胶囊。通过粒径大小、外观形貌、包封率以及载药量筛选出最佳芯壁比、乳化剂用量和剪切时间, 并对微胶囊理化特性及释放性能进行表征, 同时考察微胶囊对白蚁的杀灭效果和持效性。研究表明, 芯壁比为 1:1.5, 乳化剂用量为 7%, 剪切时间为 6 min 时制备的联苯菊酯微胶囊粒径适中 (97.6 μm), 包封率高达 70.5%, 缓释性能良好, 与市售乳油相比, 对白蚁的杀灭效果相当, 但持效性能优异。该研究获得的联苯菊酯微胶囊为安全、高效防治白蚁提供了技术手段。

关键词: 联苯菊酯; 微胶囊; 白蚁; 持效性

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 06-1543-09

Preparation and properties of bifenthrin microcapsules for controlling termite

MA Ying-Jian¹, SUN Jin-Nuo², QIAN Kun^{1*}, XU Wei¹, LV Pei², FENG Jian-Guo^{1*} (1. School of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu Province, China; 2. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: In view of poor safety and short duration of traditional formulations of bifenthrin for controlling termite, the preparation technology of bifenthrin microcapsule by solvent evaporation method was explored. The optimal core-wall ratio, emulsifier dosage and shear time were screened by particle size, appearance, encapsulation rate and drug loading, and the physicochemical properties and release properties of the microcapsules were characterized. Meanwhile, the control efficiency and long effective duration of the microcapsules against termites were investigated. The results showed that the bifenthrin microcapsule was prepared with a core-wall ratio of 1:1.5, an emulsifier of 7%, and a shear time of 6 min, which had a moderate particle size (97.6 μm), a encapsulation rate of up to 70.5%, and a good sustained-release performance. The obtained bifenthrin microcapsules in this study provide a technical means for safe and efficient termite control.

Key words: Bifenthrin; microcapsule; termite; long effective duration

白蚁, 属节肢动物门昆虫纲蜚蠊目, 喜群居, (权永兵等, 2012)。白蚁蛀食多种大田作物、果
生存能力强, 会对人类生产和生活造成重要危害 树林木和花卉种苗, 造成减产乃至绝产。破坏或损

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (201910364082)

作者简介: 马英剑, 男, 1998 年生, 本科, 主要从事农药剂型加工技术的研究, E-mail: 948322711@qq.com

* 共同通讯作者 Author for corresponding: 钱坤, 博士, 副研究员, 主要研究卫生害虫防治技术研究, E-mail: qiank@yzu.edu.cn; 冯建国, 博士, 副教授, 研究方向为农药剂型加工原理与使用技术, E-mail: jgfeng@yzu.edu.cn

收稿日期 Received: 2020-08-06; 接受日期 Accepted: 2020-10-12

坏建筑物承重点,造成房屋突然倒塌,危害人类生命财产安全。古往今来,素有“千里之堤,溃于蚁穴”之说,雨水充沛季节,大坝承受能力因白蚁蛀蚀而大幅减弱,容易造成决堤现象,给人们带来巨大的灾难。

联苯菊酯以触杀和胃毒作用为主,是目前重要的白蚁防治药剂之一(李新,2016)。然而,其主要加工剂型是水乳剂、悬浮剂以及微囊悬浮剂,这些剂型都属于热力学不稳定体系,生产和贮存过程中容易出现奥氏熟化、分层和沉淀等物理不稳定问题,严重影响使用效果,且持效期短(史雅丽等,2016;华乃震,2019)。此外,联苯菊酯属于中等毒性杀虫剂,传统剂型难以避免药剂与人畜直接接触,容易发生中毒现象(Sapkota *et al.*, 2020)。

微胶囊通过壁材对活性成分进行包覆而获得均匀的粉状制剂,直接使用或者现场兑水稀释使用,可以克服水乳剂和悬浮剂等物理稳定性差的不足。此外,微胶囊能够延长持效期,减少施药量和施药次数,既可以降低防治成本,又可以避免人畜中毒,符合未来农药剂型的发展方向(Liu *et al.*, 2016; 闫晓静等, 2019)。

本文在考察各工艺参数对微胶囊理化性能影响的基础上,获得了溶剂蒸发法制备联苯菊酯微胶囊的优化配方,并对微胶囊相关理化性能进行表征,同时测试了微胶囊的生物活性和持效性,旨在为白蚁防治提供高效、安全的防治药剂。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

原药:96%联苯菊酯,扬农化工股份有限公司;乳化剂:Tween-80,壁材:乙基纤维素(粘度为40~100 mPa·s),溶剂:二氯甲烷,均为分析纯,国药集团化学试剂北京有限公司;25 g/L联苯菊酯乳油,山东百农思达生物科技有限公司;自制去离子水。

供试仪器:BSA型电子天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;BT9300R激光粒度仪,丹东百特科技有限公司;S-4800冷场发射扫描电子显微镜,日本日立有限公司;FA25高剪切分散乳化机,上海弗鲁克流体机械制造有限公司;RE-501型旋转蒸发仪,巩义市瑞德仪器设备有限公司;循环水式多用真空泵,上海大颜仪器设备有限公司。

限公司。

供试试虫:台湾乳白蚁 *Coptotermes formosanus* Shiraki 采自江苏扬州,在实验室内以松木板饲养(27℃±1℃,RH 65%±5%,L:D=0 h:24 h)。试验时挑取个体大小一致、活力较好的台湾乳白蚁工蚁。

1.2 微胶囊制备

1)称取0.4 g联苯菊酯原药溶于15 g二氯甲烷中,待原药完全溶解后,在该溶液中加入0.6 g乙基纤维素,搅拌至完全溶解,得到透明溶液C。

2)称取2.5 g Tween-80 乳化剂溶解于去离子水,制成透明溶液D。

3)将透明溶液C和透明溶液D混合后经高剪切(12 000 r/min)得到O/W乳状液。

4)将步骤3)所得乳状液通过旋转蒸发仪去除其中的二氯甲烷,得到联苯菊酯微胶囊的悬浮液。

5)将步骤4)得到的微胶囊悬浮液进行离心(8 000 r/min, 15 min)、使用去离子水洗涤3次后进行冷冻干燥,即可获得联苯菊酯微胶囊。

1.3 粒径及跨距测定

将微胶囊分散在适量去离子水中制成悬浮液,超声处理30 s后,在激光粒度仪上进行粒径和跨距测定,重复测定3次,取其平均值。其中,跨距大小是对样品粒径大小分布宽度的一种度量,跨距数值越小表示粒径分散度越集中。

$$\text{Span} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (1)$$

式中: D_{10} 表示样品粒径分布中占10%所对应的粒径; D_{50} 表示样品粒径分布中占50%所对应的粒径; D_{90} 表示样品粒径分布中占90%所对应的粒径。

1.4 光学显微镜(OM)观察

取旋转蒸发后的微胶囊悬浮液滴于载玻片上,盖上盖玻片后在光学显微镜下观察其外观形貌。

1.5 扫描电镜(SEM)观察

将充分干燥的联苯菊酯微胶囊样品固定在样品台上,经真空干燥、喷金等操作后,置于扫描电镜下进行扫描观察。

1.6 红外光谱测定

将联苯菊酯、乙基纤维素、乙基纤维素/联苯菊酯混合物和联苯菊酯微胶囊的样品分别与溴化钾粉末混合后压片,使用红外光谱仪进行测定。

1.7 包封率和载药量测定

通过高效液相色谱测定微胶囊的包封率和载药量。色谱条件：Agilent SB-C18 色谱柱（25 mm × 4.6 mm × 5 μm），检测波长：203 nm；柱温：25 ℃；流动相：V（乙腈）：V（水）= 80：20；流速：1.0 mL/min，进样量：1 μL。最后按照公式（2）和（3）计算联苯菊酯微胶囊包封率及载药量。

$$\text{包封率}(\%) = \frac{\text{微胶囊中所含联苯菊酯的质量}(\text{g})}{\text{联苯菊酯原药投入质量}(\text{g})} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{载药量}(\%) = \frac{\text{微胶囊中所含联苯菊酯的质量}(\text{g})}{\text{联苯菊酯微胶囊总质量}(\text{g})} \times 100 \quad (3)$$

1.8 微胶囊缓释性能测定

采用透析袋法测定（Fan *et al.*, 2014）。以乙醇和水的混合溶液（体积比为 1：1）作为释放介质。分别称取相同质量的联苯菊酯原药和微胶囊于盛有 3 mL 释放介质的透析袋中，将袋口密封后置于装有 30 mL 释放介质的锥形瓶中，以 200 r/min 的转速振荡。分别于 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 和 12 h 时取缓释介质 1 mL；12 h 后每间隔 12 h 取缓释介质 1 mL，每次取样后立即补充 1 mL 缓释介质。采用高效液相色谱法测定样品中联苯菊酯含量，最后绘制其累积释放标准曲线。

1.9 生物测定

1.9.1 毒力测定

采用滤纸片-药膜法测定（邹文娟和尹红，2009；林雁等，2014）。分别将市售联苯菊酯乳油与制备的微胶囊用去离子水配成 25、50、100、200、400、800 mg/L 的药液，移取 1.2 mL 该药液滴加在滤纸（Φ90 mm）上，自然晾干后放入到干净培养皿（Φ90 mm）内。滴加 1 mL 去离子水，投入 30 头工蚁，持续接触。每浓度重复 3 次，设空白对照，观察和记录白蚁的死亡虫数（死亡是指用钝器轻触其腹部，其身体所有部位均无反应），试验在 27℃ ± 1℃、黑暗条件下进行，注意保持滤纸湿润。

以药液浓度的对数值为自变量 X，以 24 h 的白蚁平均死亡率的机率值为因变量 Y，计算毒力回归方程，求出两种制剂的 LC₅₀ 值。

1.9.2 持效性实验

取 1.2 mL 800 mg/L 联苯菊酯微胶囊药液滴于

滤纸（Φ90 mm）上，待自然晾干后放入干净培养皿中，滴加 1 mL 去离子水保持湿润，放入 30 头工蚁，按上述实验条件在 24 h 后观察工蚁的死亡情况，计算死亡率。在 15 d 时清理前期放入的全部试虫，重新放入 30 头健康工蚁，按上述方法观察 24 h 后的死亡情况，计算死亡率。按同样方法，调查在 30 d 和 45 d 时放入工蚁 24 h 后的死亡率。以市售联苯菊酯乳油为对照药剂，设置空白对照，每组实验重复 3 次。

2 结果与分析

溶剂蒸发法制备微胶囊过程中，影响微胶囊理化性能的因素主要包括壁材用量、乳化剂用量和剪切时间（张省委等，2019）。本实验依据外观形貌，平均粒径、包封率和载药量等对壁材用量、乳化剂用量和剪切时间等因素进行筛选，从而获得联苯菊酯微胶囊的优化配方。

2.1 不同因素对微胶囊粒径大小和外观形貌的影响

2.1.1 芯壁比的影响

芯壁比是微胶囊配方中芯材和壁材的质量比，能够显著影响溶剂蒸发法制备微胶囊的粒径大小和外观形貌（王宁等，2017）。实验中分别以芯壁比为 1：1、1：1.25、1：1.5、1：1.75、1：2 制备微胶囊，考察芯壁比对微胶囊性能的影响。随着芯壁比从 1：1 降低到 1：2，尺寸分布（跨距）保持相对恒定，微胶囊粒径从 34.4 μm 增加到 192.6 μm（图 1-A）。光学显微照片（图 1-B）也显示出相同的规律，芯壁比较大，即壁材较少时，微胶囊粒径小，成球不均一。随着壁材用量增加，微胶囊粒径分布变均匀。当壁材用量过多时，囊壁厚度明显增加，粒径增大（李宏英等，2019），然而，由于增加了分散相粘度，使微胶囊容易发生粘连。而芯壁比为 1：1.5 时，微胶囊大小分布较均匀，外观形貌较好，未出现破碎和粘连情况，因此，芯壁比的选择为 1：1.5。

2.1.2 乳化剂用量的影响

乳化剂用量通过影响溶剂蒸发法中乳状液液滴大小及稳定而影响微胶囊的粒径大小及外观形貌（熊记等，2018）。实验中以 3%、5%、7% 的用量制备微胶囊，通过测量粒径大小以及微胶囊外观形貌来确定乳化剂的最佳用量。随着 Tween-80 用量从 3% 增加到 7% 时，微胶囊平均粒径从

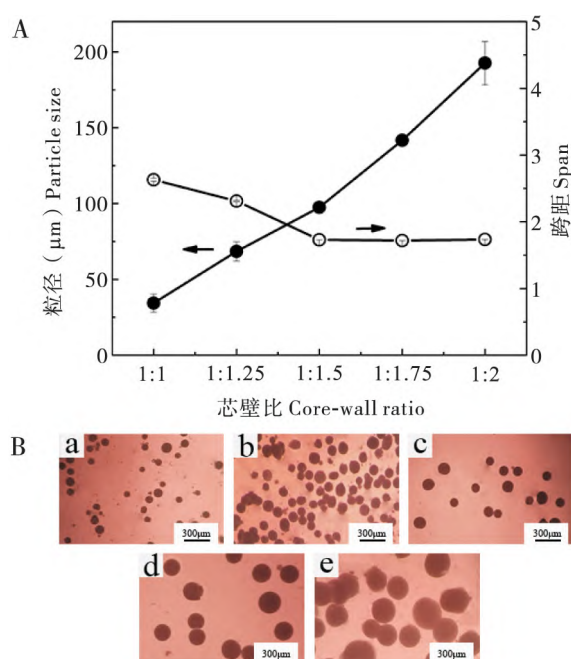


图1 芯壁比对微胶囊粒径大小 (A) 和外观形貌 (B) 的影响

Fig. 1 Influence of core wall ratio on microcapsule particle size (A) and appearance morphology (B)

注: a, 芯壁比为 1:1; b, 芯壁比为 1:1.25; c, 芯壁比为 1:1.5; d, 芯壁比为 1:1.75; e, 芯壁比为 1:2。
Note: a, core-wall ratio of 1:1; b, core-wall ratio of 1:1.25; c, core-wall ratio of 1:1.5; d, core-wall ratio of 1:1.75; e, core-wall ratio of 1:2.

235 μm 减小到 97.6 μm, 跨距从 1.90 减小到 1.73 (图 2-A)。图 2-B 结果表明, 乳化剂用量较低 (3%) 时, 微胶囊粒径较大, 容易粘连, 部分微胶囊出现破损, 当乳化剂用量增大到 7% 时, 微胶囊呈规则球形, 表面光滑, 平均粒径最小, 且分布较窄, 这与粒径测定结果一致。原因可能是乳化剂用量较少时, 乳化剂分子无法完全覆盖液滴表面, 容易出现液滴合并变大以及相互粘连的现象, 而用量较多时有利于乳化剂分子在油水界面形成致密吸附, 从而保证液滴均匀分散, 获得粒径更小的微胶囊 (王安琪等, 2018)。因此, 最佳乳化剂用量为 7%。

2.1.3 剪切时间对微胶囊的影响

剪切时间是影响乳状液形成及稳定的重要因素, 而乳状液的稳定又与微胶囊粒径大小及外观形貌密切相关 (梁井瑞等, 2019)。实验中将剪切速率固定为 12 000 r/min, 对剪切时间进行筛选。

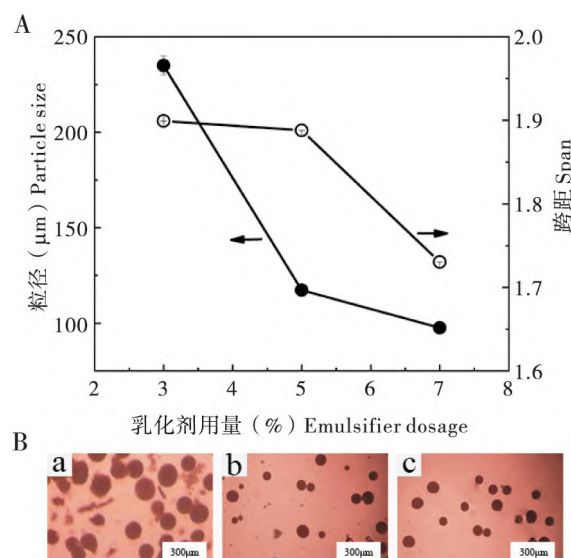


图2 乳化剂用量对微胶囊粒径大小 (A) 和外观形貌 (B) 的影响

Fig. 2 Influence of emulsifier dosage on microcapsule particle size (A) and appearance morphology (B)

注: a, 乳化剂用量为 3%; b, 乳化剂用量为 5%; c, 乳化剂用量为 7%。
Note: a, emulsifier dosage of 3%; b, emulsifier dosage of 5%; c, emulsifier dosage of 7%.

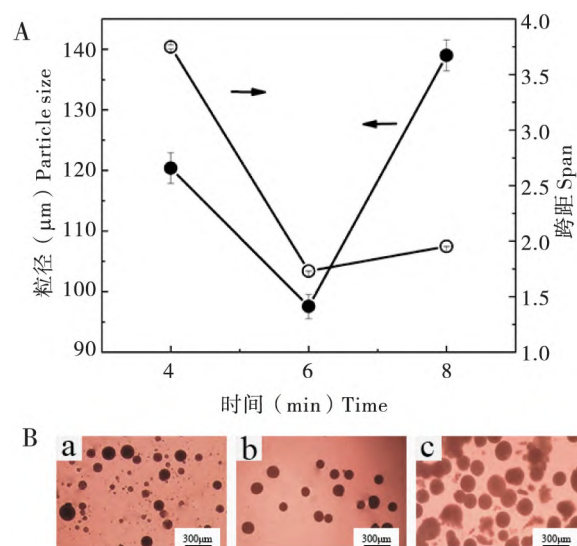


图3 剪切时间对微胶囊粒径大小 (A) 和外观形貌 (B) 的影响

Fig. 3 Influence of shear time on microcapsule particle size (A) and appearance morphology (B)

注: a, 剪切时间为 4 min; b, 剪切时间为 6 min; c, 剪切时间为 8 min。
Note: a, shear time of 4 min; b, shear time of 6 min; c, shear time of 8 min.

图 3 - A 是固定转速（12000 r/min）下，剪切时间对微胶囊粒径大小及跨距的影响。随着剪切时间增加，粒径和跨距均是先减小后增大。光学显微照片（图 3 - B）可以显示出，乳化时间为 4 min 时，形成的液滴数量少，且粒径较大；乳化时间为 8 min 时，微胶囊出现破裂现象。而乳化时间为 6 min 时，微胶囊大小均匀，外观呈规则球形，这也与粒径测定结果相吻合。刘润峰等（2016）在制备毒死蜱微胶囊发现相同的规律。原因可能是剪切时间太短，无法在剪切过程中提供足够的能量以便形成较小的液滴。相反，剪切时间过长会使溶剂过量挥发而造成表面未固化的微胶囊相互聚结变大，也会使部分微胶囊破碎而出现乙基纤维素碎片，导致微胶囊粒径增大。因此，确定剪切时间为 6 min。

2.2 不同因素对包封率和载药量的影响

包封率和载药量是微胶囊性能的关键质量指标，对评价微胶囊制备方法优劣具有重要参考价值（龚圣等, 2018）。实验中分别设置了不同芯壁比（样品 1 ~ 5），不同乳化剂用量（样品 3、6、7）和不同剪切时间（样品 3、8、9）制备微胶囊，考察以上因素对包封率和载药量的影响。表 1 是采用不同工艺制备的联苯菊酯微胶囊的包封率和载药量。随着芯壁比减小（样品 1 ~ 5），包封率

逐渐增大，载药量逐渐减少。这可能是由于芯壁比较大时，壁材少，芯材不能被完全包覆，同时芯材浓度高时，容易向水相扩散，导致包封率降低（韦佩彪等, 2020）。当乳化剂用量从 3% 增加到 7% 时（样品 3、6、7），包封率和载药量均增大，这是由于乳化剂用量较低时，液滴周围界面膜强度低，溶剂挥发过程中，微胶囊容易破裂，芯材外漏，包封率和载药量降低（杨斌等, 2018）。随着乳化剂用量增大，液滴周围界面膜强度增加，避免了芯材流失，从而使微胶囊具有更高的包封率和载药量。当剪切时间不同时（样品 3、8、9），微胶囊的包封率和载药量不同，随着剪切时间增加，液滴可以更好分散在介质中，同时加快二氯甲烷挥发，减少芯材向水相扩散，所以包封率和载药量增加。但当剪切时间过长（8 min）时，微胶囊容易出现破损，造成芯材流失，从而导致包封率和载药量减少（张微等, 2017）。

综合粒径大小、外观形貌以及包封率和载药量的测定结果，芯壁比为 1 : 1.5，乳化剂用量为 7%，剪切时间为 6 min 时，获得的微胶囊形状大小均匀，无破裂粘连现象，且具有较高包封率和载药量，为最佳制备工艺。

表 1 不同工艺制备的联苯菊酯微胶囊的包封率和载药量
Table 1 Encapsulation rate and drug loading of bifenthrin microcapsules prepared by different processes

样品 Sample	芯壁比 Ratio of core to wall	Tween-80 用量（%） Dosage of Tween-80	剪切时间（min） Shear time	包封率（%） Encapsulation rate	载药量（%） Drug loading
1	1 : 1	7	6	35.5	42.6
2	1 : 1.25	7	6	50.1	40.3
3	1 : 1.5	7	6	70.5	41.2
4	1 : 1.75	7	6	72.1	37.7
5	1 : 2	7	6	74.2	35.3
6	1 : 1.5	3	6	38.7	33.1
7	1 : 1.5	5	6	60.2	38.2
8	1 : 1.5	7	4	42.4	37.1
9	1 : 1.5	7	8	38.5	38.7

2.3 微胶囊的微观形貌

微胶囊表面的细微结构能够影响囊芯物的释放，是评价微胶囊理化性能的重要指标（冯建国等, 2011）。实验中通过 SEM 对最佳制备工艺获得

的联苯菊酯微胶囊外观形貌进行观察，结果如图 4 所示。微胶囊形状规则，大小均匀，结构完整，这与光学显微镜下所观察的结果一致。进一步放大倍数观察（见图 4 - b），微胶囊表面无原药晶体

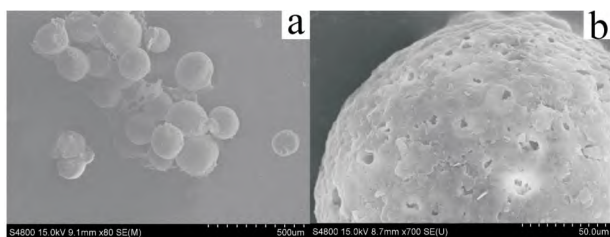


图4 联苯菊酯微胶囊的SEM照片

Fig. 4 SEM photographs of bifenthrin microcapsules

吸附,且表面微孔较多,这有利于联苯菊酯的释放,从而获得更好的杀灭效果。

2.4 红外光谱分析

联苯菊酯原药、乙基纤维素、联苯菊酯原药+乙基纤维素混合物、微胶囊样品的红外光谱见图5。联苯菊酯原药(a)和乙基纤维素(b)分别在 $1\,150\text{ cm}^{-1}$ (C—O)处和 $3\,452\text{ cm}^{-1}$ (—OH)处存在特征吸收峰,这些均在混合物(c)和微胶囊样品(d)中体现出来。联苯菊酯原药在 $1\,750\text{ cm}^{-1}$ 处由于羰基(C=O)伸缩振动而产生特征吸收峰,红外光谱发现:混合物在此处仍存在明显吸收,但微胶囊样品在此处的吸收峰的峰形变宽、吸收明显变弱,说明联苯菊酯原药被微胶囊成功包覆(胡奕俊等,2010)。

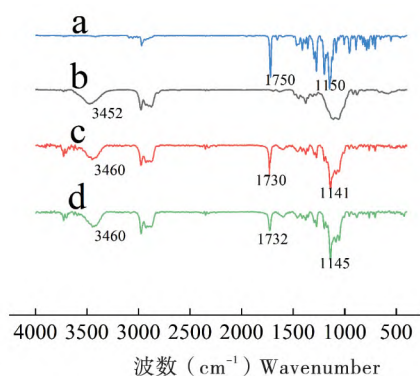


图5 样品的红外光谱图

Fig. 5 Infrared spectrogram of the samples

注: a, 联苯菊酯原药; b, 乙基纤维素; c, 联苯菊酯原药+乙基纤维素混合物; d, 联苯菊酯微胶囊。Note: a, technical bifenthrin; b, ethyl cellulose; c, technical bifenthrin + ethyl cellulose mixture; d, microcapsule sample.

2.5 微胶囊释放性能

最佳制备工艺获得的联苯菊酯微胶囊和原药在释放介质(乙醇-水的体积比1:1)中的累计

释放曲线见图6。与原药相比,联苯菊酯微胶囊具有更好的缓释性能。进一步通过零级动力学模型、一级动力学模型、Higuchi模型和Ritger-peppas模型进行动力学模型拟合(见表2),结果表明:拟合程度最高的是Ritger-peppas模型($\lg Q = \lg k + n \lg t$),式中, Q 为任意时刻药物的释放分数; k 为动力学参数; t 为释放时间; n 为药物的扩散指数, n 值大小代表药物不同的释放机制(冯建国等,2017)。当 $n \leq 0.43$ 时,主要为Fickian扩散;当 $0.43 < n < 0.85$ 时,符合Non-Fickian扩散,即扩散和骨架溶蚀2种作用的综合结果; $n \geq 0.85$ 时,主要为骨架溶蚀作用。进一步计算得到 $n = 0.52$,处于 $0.43 < n < 0.85$,所以联苯菊酯微胶囊在乙醇-水溶液中的释放属于Non-Fickian扩散。

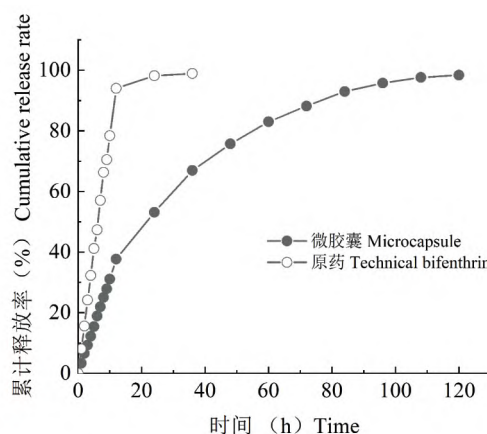


图6 联苯菊酯微胶囊与原药在释放介质中的累积释放曲线

Fig. 6 Cumulative release curve of bifenthrin microcapsule and technical bifenthrin in release medium

表2 不同动力学模型拟合结果

Table 2 Fitting results of different kinetic models

释放模型 Release the model	公式 Formula	R^2
零级动力学模型 Zero order dynamic model	$Q = Q_0 + kt$	0.8895
一级动力学模型 First order dynamic model	$\ln Q = \ln Q_0 - kt$	0.9754
Higuchi model	$Q = Q_0 + kt^{1/2}$	0.9786
Ritger-peppas model	$\lg Q = \lg k + n \lg t$	0.9971

2.6 生物测定

2.6.1 毒力测定

以市售的联苯菊酯乳油为对照，通过药膜法测定最佳制备工艺获得的联苯菊酯微胶囊对台湾乳白蚁的毒力。供试蚁与药膜连续接触 24 h 后，

25 g/L 联苯菊酯乳油对台湾乳白蚁的 LC_{50} 为 144.2 mg/L，联苯菊酯微胶囊的 LC_{50} 为 174.9 mg/L，两者对台湾乳白蚁的灭杀效果相当。运用 LSD 显著性差异分析，乳油与微胶囊无显著性差异 ($P > 0.05$) (表 3)。

表 3 联苯菊酯两种制剂对台湾乳白蚁触杀毒力的致死中浓度
Table 3 Lethal concentration of bifenthrin formulations against *Coptotermes formosanus* Shiraki

制剂种类 Types of formulations	毒力回归方程 ($y = ax + b$) Toxicity regression equation	LC_{50} 值 (mg/L) Lethal concentration 50	95% 置信限 95% confidence limit	相关系数 Coefficient of association
乳油 Emulsifiable concentrate	$y = 1.5189x + 1.7208$	144.2	120.7 ~ 172.2	0.9896
微胶囊 Microcapsule	$y = 1.4759x + 1.6900$	174.9	145.7 ~ 209.9	0.9939

2.6.2 持效性实验

通过两种制剂对台湾乳白蚁的持效性实验结果来看 (图 7)，施药后的 0 和 15 d，二者的杀灭效果相差不多，但与乳油相比，微胶囊的持效期更长，施药后 30 d 在培养皿中重新放入白蚁，24 h 后平均死亡率仍高达 78.9%，显著高于对照乳油处理后的平均死亡率 (57.8%)。施药后 45 d 后，乳油处理后的白蚁死亡率下降到 50% 以下，而微胶囊处理后的平均死亡率仍在 70% 以上。

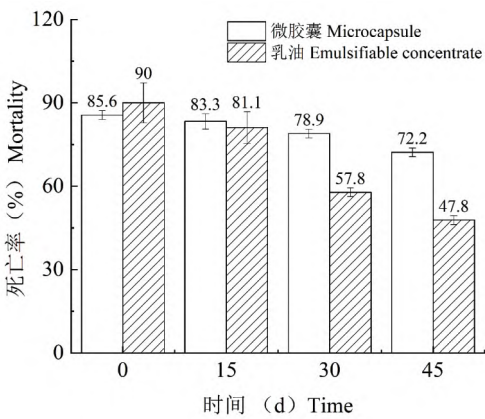


图 7 联苯菊酯两种制剂对台湾乳白蚁的持效性
Fig. 7 Long-lasting effect of bifenthrin formulations against *Coptotermes formosanus* Shiraki

3 结论与讨论

白蚁是地球上最古老的社会性昆虫之一，在进化过程中获得了独特的生存和繁衍能力，几乎占领了热带、亚热带的各个角落，其危害面积约占世界陆地总面积的一半。我国也是白蚁危害严

重的国家之一，其中 40% 陆地均有分布 (林雁, 2015)。近年来，随着白蚁活动范围的不断扩大，其对人类生产和生活造成的危害明显加重。目前，白蚁防治方法主要包括物理防治、生物防治和化学防治等。综合考虑操作难度、用户体验、时间成本和防治效果等，化学防治仍是白蚁防治最有效的途径 (刘晓燕和钟国华, 2019)。截止 2020 年 8 月，通过农业农村部登记的用于白蚁防治的杀虫剂品种主要包括联苯菊酯，吡虫啉，氟虫腈和毒死蜱等，其中，联苯菊酯是白蚁防治的主流药剂 (张晓杰等, 2017)，常规加工剂型为悬浮剂 (25 个)，水乳剂 (13 个)，乳油 (12 个)，粉剂 (7 个) 和饵剂 (3 个)，但是在应用过程中容易出现产品物理稳定性差和持效期短等问题。此外，联苯菊酯潜在的生物富集效应对水生环境造成不可接受的风险，传统加工剂型也难以消除这些弊端。

微胶囊技术通过壁材对农药有效成分进行包覆，具有减少有效成分降解和挥发，缓慢释放，延长持续期，降低对非靶标生物毒性等优势，符合高效、低毒、持久、环保的白蚁预防理念 (金占宝和赵兴华, 2012；朱艳燕, 2013)。尽管当前在白蚁防治中也有微囊悬浮剂产品登记使用，但是与常规剂型相比数量有限。此外，针对白蚁防治药剂微囊化的研究并不多，且主要集中于药效试验，缺乏微胶囊制备技术的深入研究，这在一定程度上限制了微囊化技术在白蚁防治中的推广使用。本文采用溶剂蒸发法成功制备了联苯菊酯微胶囊，与市售乳油制剂相比，两者对台湾乳白蚁的毒力相近，但微胶囊具有优异的持效性，为安全、高效防治白蚁提供了技术手段，也为农药微胶囊的制备技术提供了一定的理论参考。

参考文献 (References)

- Fan TF, Feng JG, Ma C, *et al.* Preparation and characterization of porous microspheres and applications in controlled-release of abamectin in water and soil [J]. *Journal of Porous Materials*, 2014, 21 (1): 113–119.
- Feng JG, Xu Y, Luo XR, *et al.* Discussion on the solvent evaporation method for preparation of microcapsules and the development of the pesticides microcapsules [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2011, 13 (6): 568–575. [冯建国, 徐妍, 罗湘仁, 等. 浅谈溶剂蒸发法制备微胶囊与农药微胶囊的开发 [J]. 农药学报, 2011, 13 (6): 568–575]
- Feng JG, Yang GT, Yuan XY, *et al.* Preparation, characterization and release properties of β -cypermethrin microcapsules [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2017, 38 (11): 1974–1981. [冯建国, 杨关天, 袁小勇, 等. 高效氯氰菊酯微胶囊的制备、表征及释放性能 [J]. 高等学校化学学报, 2017, 38 (11): 1974–1981]
- Gong S, Shen ZC, Zhou XH, *et al.* Sustained-release kinetics and preparation process optimization of chlorpyrifos/urea-formaldehyde resin microcapsules [J]. *Materials Review*, 2018, 32 (8): 1241–1246. [龚圣, 沈之川, 周新华, 等. 毒死蜱/脲醛树脂微胶囊的制备工艺优化及缓释动力学 [J]. 材料导报, 2018, 32 (8): 1241–1246]
- Hua NZ. Processing difficulties and analysis of pesticide suspension concentrates [J]. *World Pesticides*, 2019, 41 (4): 37–47. [华乃震. 农药悬浮剂加工难点和解析 [J]. 世界农药, 2019, 41 (4): 37–47]
- Hu YJ, Xu Y, Ma C, *et al.* Preparation and properties of an inclusion compound of β -cyclodextrin with bifenthrin [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2010, 12 (3): 324–328. [胡奕俊, 徐妍, 马超, 等. 联苯菊酯- β -环糊精包合物的制备及其光谱研究 [J]. 农药学报, 2010, 12 (3): 324–328]
- Jin ZB, Zhao XH. Discussion on the application prospect of microcapsule pesticide in termite prevention [J]. *Hubei Plant Protection*, 2012, 5: 60–62. [金占宝, 赵兴华. 微胶囊农药在白蚁预防中的应用前景探讨 [J]. 湖北植保, 2012, 5: 60–62]
- Lee SE, Lee JK, Jang WS, *et al.* Enhancement of stability and controlled drug release of lipid nanoparticles by modified solvent-evaporation method [J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 508: 294–300.
- Liang JR, Li W, Wang J, *et al.* New method for stability determination of docosahexaenoic acid (DHA)-enriched microalgae oil emulsion and factors influencing the emulsion stability [J]. *Food Science*, 2019, 40 (19): 128–135. [梁井瑞, 李伟, 王剑, 等. 二十二碳六烯酸微藻油乳液稳定性的测定方法和影响因素 [J]. 食品科学, 2019, 40 (19): 128–135]
- Li HY, Wang HB, Fu JJ, *et al.* Optimization of preparation technology of peppermint oil microcapsules in gelatin-sodium alginate [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2019, 35 (9): 142–149. [李宏英, 王鸿博, 傅佳佳, 等. 明胶-海藻酸钠制备薄荷油微胶囊的工艺优化 [J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35 (9): 142–149]
- Lin Y. The research development of termite prevention and elimination in China [J]. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides and Equipments*, 2015, 21 (6): 537–544. [林雁. 我国白蚁防治的研究进展 [J]. 中华卫生杀虫药械, 2015, 21 (6): 537–544]
- Liu BX, Wang Y, Yang F, *et al.* Construction of a controlled-release delivery system for pesticides using biodegradable PLA-based microcapsules [J]. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 2016, 144: 38–44.
- Liu RF, Song JH, Liu HY, *et al.* Preparation of chlorpyrifos microcapsule by blending modification of polymethyl methacrylate and polypropylene carbonate [J]. *Agrochemicals*, 2016, 55 (1): 26–29. [刘润峰, 宋建华, 柳海营, 等. 树脂共混改性制备毒死蜱微胶囊 [J]. 农药, 2016, 55 (1): 26–29]
- Liu XY, Zhong GH. Situation and prospect of termiticides [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2002, 4 (2): 14–22. [刘晓燕, 钟国华. 白蚁防治剂的现状和未来 [J]. 农药学报, 2002, 4 (2): 14–22]
- Li X. The R&D and market profile of the pyrethroid insecticides [J]. *Agrochemicals*, 2016, 55 (9): 625–630. [李新. 拟除虫菊酯类杀虫剂研发及市场概况 [J]. 农药, 2016, 55 (9): 625–630]
- Lin Y, He LW, Yang JQ. Toxicity of some termiticides and joint action of their mixtures against termites [J]. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides and Equipments*, 2014, 20 (2): 139–142+145. [林雁, 何利文, 杨静勤. 几种药物复配对白蚁的毒力和联合作用测定 [J]. 中华卫生杀虫药械, 2014, 20 (2): 139–142+145]
- Quan YB, Liao L, Zhang WD, *et al.* Advance of quarantine molecular diagnosis of subterranean termite genus *Coptotermes* (Isoptera: Rhinotermitidae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2012, 34 (3): 354–362. [权永兵, 廖力, 张卫东, 等. 乳白蚁属 *Coptotermes* (Isoptera: Rhinotermitidae) 检疫分子鉴定研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2012, 34 (3): 354–362]
- Sapkota R, Stout M J, Henderson G. Residual effects of termiticides on mortality of formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae) on substrates subjected to flooding [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2020, 113 (1): 367–374.
- Shi YL, Yu QY, Sun CC, *et al.* Progress in research work field with respect to physical stability of emulsion oil in water for pesticides [J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2016, 46 (3): 173–177. [史雅丽, 郁倩瑶, 孙陈斌, 等. 农药水乳剂物理稳定性的研究进展 [J]. 日用化学工业, 2016, 46 (3): 173–177]
- Wang AQ, Wang Y, Wang CX, *et al.* Research progress on nanocapsules formulations of pesticides [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 20 (2): 10–18. [王安琪, 王琰, 王春鑫, 等. 农药纳米微囊化剂型研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2016, 20 (2): 10–18]
- Wang N, Qi L, Wang Y, *et al.* Preparation and performance of thermosensitive pyraclostrobin microcapsules [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2017, 19 (3): 381–387. [王宁, 齐麟, 王娅, 等. 温度响应型吡唑醚菌酯微囊的制备与性能表征 [J].

- 农药学学报, 2017, 19 (3): 381 – 387]
- Wei PB, Zhu LF, Xu WM, *et al.* Preparation and properties of avermectin and fosphiazate 5% complex microcapsule suspension [J]. *Agrochemicals*, 2020, 59 (4): 261 – 265. [韦佩彪, 祝林芳, 徐维明, 等. 5%阿维菌素·噻唑膦复配型微胶囊悬浮剂制备及性能 [J]. 农药, 2020, 59 (4): 261 – 265]
- Xiong J, Fang J, Zhang J. Research progress of preparation and modification of paraffin microcapsules [J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39 (5): 92 – 98. [熊记, 方健, 张佳. 石蜡微胶囊的制备及改性研究进展 [J]. 包装工程, 2018, 39 (5): 92 – 98]
- Yang B, Zhu SS, Zhang DK, *et al.* Preparation technology of 1% emamectin benzoate microcapsule suspensions [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2018, 20 (4): 514 – 522. [杨斌, 朱瞬瞬, 张登科, 等. 1%甲氨基阿维菌素苯甲酸盐微囊悬浮剂制备工艺研究 [J]. 农药学学报, 2018, 20 (4): 514 – 522]
- Yan XJ, Yang DB, Xue XY, *et al.* Overview in theories and technologies for pesticide application in China during the last two decades [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2019, 21 (Z1): 908 – 920. [闫晓静, 杨代斌, 薛新宇, 等. 中国农药应用工艺学 20 年的理论研究与技术概述 [J]. 农药学学报, 2019, 21 (Z1): 908 – 920]
- Zhang SW, Chen ZY, Wang R, *et al.* Preparation of emamectin benzoate microcapsule by solvent evaporation and characterization of its properties [J]. *Agrochemicals*, 2019, 58 (7): 487 – 490, 514. [张省委, 陈志洋, 王荣, 等. 溶剂蒸发法制备甲维盐微胶囊及其性能表征 [J]. 农药, 2019, 58 (7): 487 – 490, 514]
- Zhang W, Zhang ZG, Fu GY, *et al.* Preparation and characterization of urea-formaldehyde resin microcapsules for self-healing coatings [J]. *Material Protection*, 2017, 50 (4): 64 – 68. [张微, 张志刚, 付广艳, 等. 基于自修复涂料的脲醛树脂微胶囊的制备及其表征 [J]. 材料保护, 2017, 50 (4): 64 – 68]
- Zhang XJ, Wang X, Gong JX, *et al.* Research advances in application of bifenthrin in termite control [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23 (21): 74 – 76. [张晓杰, 汪霞, 龚进先, 等. 联苯菊酯用于白蚁防治的研究进展 [J]. 安徽农学通报, 2017, 23 (21): 74 – 76]
- Zhu YY. Outlook for the utilization of capsule suspension technology in drug barrier – based termite prevention [J]. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides and Equipments*, 2013, 19 (4): 342 – 343 + 345. [朱艳燕. 微囊技术在药物屏障预防白蚁中的应用研究 [J]. 中华卫生杀虫药械, 2013, 19 (4): 342 – 343 + 345]
- Zou WJ, Yin H. Toxic effects of three kinds of bifenthrin formulations on *Coptotermes formosanus* [J]. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides and Equipments*, 2009, 15 (3): 197 – 199. [邹文娟, 尹红. 联苯菊酯 3 种剂型对台湾乳白蚁的药效研究 [J]. 中华卫生杀虫药械, 2009, 15 (3): 197 – 199]