

◆ 综述与专论 ◆

生物农药辣椒素在农业领域的研究进展

王寅敏^{1,2}, 徐勇¹, 张泗达², 李海芸², 段福俊², 吴学民^{1*}, 徐建富^{2*}

(1. 中国农业大学理学院, 北京 100193; 2. 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

摘要:近年来,生物农药快速发展,由于其具有选择性强、无污染、不易产生抗药性、不破坏生态环境等特点,已经成为农药可持续发展的研究重点。辣椒素是由辣椒果实中提取出来的活性成分,具有特殊的杀虫、抑菌及驱避作用,在农业领域具有良好的应用前景。笔者综述了生物农药发展现状、国内登记情况、辣椒素的主要作用、应用领域及其在农业领域的应用状况,探讨了生物农药辣椒素在农业领域应用的可行性及可发展的剂型,并对其应用前景进行了展望,旨在为辣椒素制剂的发展和在农业领域的应用提供理论指导。

关键词:生物农药;辣椒素;研究进展

中图分类号:S 482.2⁺92 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2021.05.002

Research Progress of Biological Pesticide Capsaicin in Agriculture

WANG Yinmin^{1,2}, Xu Yong¹, ZHANG Sida², Li Haiyun², DUAN Fujun², WU Xuemin^{1*}, XU Jianfu^{2*}

(1. College of science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

Abstract: Recently, the rapid development of biopesticides has become a research priority for the sustainable development of pesticides due to their characteristics such as strong selectivity, pollution-free, unchangeably producing drug resistance, and not damaging the ecological environment. Capsaicin, an active ingredient extracted from the fruits of chili peppers, has special insecticidal, bacteriostatic and repellent effects, and it has a promising application in agriculture. In this review, we summarized the current status of development and domestic registration of biopesticides, the main roles of capsaicin, the application areas and their applications in agriculture. Meanwhile, we discussed the feasibility and developable dosage forms of the biopesticide capsaicin in agriculture, and gave an outlook on its application, which aimed to provide theoretical guidance for the development of capsaicin formulations and applications in agriculture.

Key words: biological pesticide; capsaicin; research progress

农药作为重要的农业生产资料,在农产品生产以及林业、草原和卫生害虫防控等方面发挥着重大作用,尤其是化学农药,其具有见效快、防效高等特点,在防治病虫害中被广泛使用,但由于其过量使用所导致的问题越来越突出,如农药残留超标、产生抗药性、杀伤有益生物等。二十一世纪以来,随着全球对环境保护和农产品安全的日益关注

以及可持续发展战略的兴起,利用对环境友好、生态和谐和有利食品安全等措施来防控农作物病虫害已经成为了世界农业发展的新趋势,这就要求农药必须向低毒、无公害方向发展。生物农药正是这样一类既满足上述要求又与环境相容的绿色农药。与化学农药相比,其具有选择性强、无污染、不易产生抗药性、不破坏生态环境且生产原料广泛等特

收稿日期:2021-07-02

作者简介:王寅敏(1998—),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为农药制剂与助剂研究。E-mail: yinminwang@cau.edu.cn

通信作者:吴学民(1968—),男,重庆市人,博士,教授,主要从事农药制剂与助剂研究。E-mail: wuxuemin@cau.edu.cn

(共同通讯作者)徐建富(1973—),男,浙江龙游人,博士,副研究员,主要从事纳米毒理学与纳米生物效应研究。E-mail: jianfuxu2000@sina.cn

点,应用前景广阔。

1 生物农药及辣椒素简介

1.1 生物农药简介

1.1.1 生物农药定义

目前,对于生物农药或者生物源农药没有相对统一的定义。学术界普遍认为广义的生物农药是指直接利用生物活体或生物代谢过程产生的具有生物活性的物质,或从生物体提取的物质,以及人工合成的与天然化合物结构相同的物质,作为防治农林作物病、虫、草、鼠害的农药^[1]。我国并没有明确生物源农药或生物农药的定义^[2]。根据农业农村部种植业管理司对十三届全国人大二次会议第6733号建议的答复,我国将生物农药分为3类:生物化学农药、微生物农药和植物源农药,农用抗生素不包括在内^[3]。对于这三类生物农药,我国在2017年实施的《农药登记资料要求》中分别进行了定义。生物化学农药是指同时满足下列2个条件的农药:一是对防治对象没有直接毒性,而只有调节生长、干扰交配或引诱等特殊作用;二是天然化合物,如果是人工合成的,其结构应与天然化合物相同(允许异构体比例的差异)。微生物农药是指以细菌、真菌、病毒和原动物或基因修饰的微生物等活体为有效成分的农药。植物源农药是指有效成分直接来源于植物体的农药。

1.1.2 生物农药的登记情况

截至2020年12月,我国在登记有效期内的生物农药有效成分有125个,其中不包括农用抗生素和天敌^[4]。近5年来,我国的生物农药有效成分逐渐增加(图1),生物农药正在快速发展。

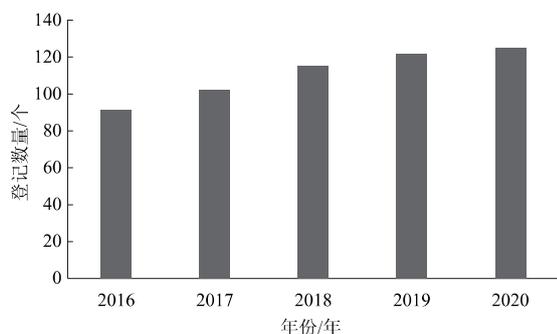


图1 2016—2020年我国生物农药有效成分登记数量

作为最早使用的一类生物农药,植物源农药的有效成分多为植物在进化中产生具有保护作用的次生代谢物质,这些物质往往可以抵抗其他生物的侵害^[5]。自然界中具有杀虫或杀菌活性的植物次生

代谢产物数量庞大、种类繁多,如萜烯类、生物碱、类黄酮、甾体、独特的氨基酸和多糖等^[6],而这些物质对非靶标生物毒性较低,并且易降解,不会对环境和生态系统造成持久性影响,安全性较高。

截至2020年底,我国在登记有效期内的植物源农药有28种,其中研究比较深入的主要有苦参碱、鱼藤酮、印楝素、狼毒素、蛇床子素、除虫菊素、烟碱等^[7]。不过也有不少已成功进入登记应用阶段的品种如羊角扭苷、辣椒碱、楝素、百部碱、莨菪碱、乌头碱、马钱子碱等。由于市场等多方面原因,在登记到期后未能延续^[8]。

1.2 辣椒素简介

辣椒素,是一种从茄科植物辣椒的成熟果实中提取得到的有效成分,最早由Thresh^[9]于1876年从辣椒果实中分离出来,是辣椒辛辣味和具有药物功能的主要来源,主要由辣椒素单体(约占68%)、二氢辣椒素单体(约占25%)和降二氢辣椒素单体(约占5%)组成。

1.2.1 辣椒素理化性质

辣椒素纯品化学名称为(反)-N-[(4-羟基-3-甲氧基苯基)-甲基]-8-甲基-6-壬烯酰胺,分子式为 $C_{18}H_{27}NO_3$,相对分子质量为305.41,结构式如图2所示。其纯品为单斜长方形状无色结晶,无毒,但刺激性较强,熔点为62~66℃,沸点为210~220℃,其化学稳定性较高,在各种有机溶剂萃取过程中损失极小,易溶于乙醇、乙醚、苯、丙酮及氯仿中,微溶于二硫化碳,难溶于冷水,也可溶于碱性水溶液。

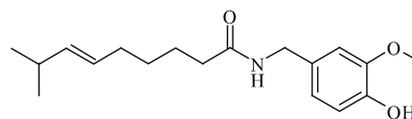


图2 辣椒素结构式

1.2.2 辣椒素的生物活性

辣椒素具有止痛^[10]、抗癌^[11]、调节血脂^[12]、抗菌消炎^[13]、减肥^[14]等作用,还可导致皮肤血管扩张、改善微循环,又能利用其刺激性辣味对人和动物产生一系列生理反应和驱避作用^[15]。因此,辣椒素广泛应用在医疗、美容、有害生物防治、食品添加剂等领域。

2 辣椒素在农业领域的应用情况

作为一种从植物果实中提取出来的有效成分,由于其独特的抗虫抑菌活性,辣椒素被认为是一种良好的生物农药。美国环保局(EPA)认为,作为一种

传统食物,没有发现辣椒素对人体有害的证据,并于1991年将辣椒素类化合物认定为生物农药^[16],且免除其在蔬菜、水果上残留量的限制,应用于生物防治领域。在我国,辣椒素作为植物源农药有效成分,也已经成功进入登记应用阶段。

2.1 杀虫作用

辣椒素类物质对害虫的触杀作用明显,害虫与辣椒素类物质接触后即表现麻痹(不活动、不取食)、瘫痪、最终死亡的现象。其对害虫也具有胃毒作用,害虫取食后,则抑制解毒酶系,影响消化吸收、干扰呼吸代谢,致使害虫因正常的生理活动受阻而引起生理病变,生长发育受到抑制而死亡。

Claros等^[17]研究了辣椒素和芥子油苷对蚜虫的杀虫活性。室内试验表明,2种活性成分对蚜虫的毒力随浓度的增加而逐渐增加。采用10%辣椒素、75%~100%芥子油苷或10%辣椒素和90%芥子油苷复配溶液作用于蚜虫时,蚜虫死亡率在83%~99%;田间试验发现,喷洒5%辣椒素、50%芥子油苷或5%辣椒素和45%芥子油苷复配的溶液,蚜虫死亡率达到87%~97%。刘新等^[18]对辣椒素类物质对桃蚜的生物活性及其于几种杀虫剂的联合作用进行了研究。结果表明,辣椒素类物质对桃蚜具有较强的毒力和良好的防效,当辣椒素质量浓度为20 mg/L时,喷药1 d后防效为83.8%,3 d后防效为93.6%,7 d后防效为85.6%,并且在与其他农药复配时,辣椒素类物质与阿维菌素和三唑磷复配增效明显,而辣椒素类物质与高效氯氟菊酯复配,拮抗作用明显。Isaacs等^[19]通过对辣椒碱及传统的杀虫剂,如谷硫磷、吡虫啉等对葡萄及玫瑰害虫的作用效果对比,发现辣椒碱与其他生物杀虫剂类似,其速效性和持效性与传统的高毒农药相比,无明显优势,但对环境安全。作为一种植物源杀虫剂,辣椒素具有安全、低毒的特点,但药效不如化学农药显著。目前文献报道的大多数研究仅限于辣椒粗提物或辣椒素类似物,因此有必要做进一步的研究,验证辣椒素单体的杀虫活性。

2.2 杀菌作用

辣椒素不仅具有强烈的刺激性,也是一种高活性的抑菌剂。Soetarno等^[20]通过对辣椒乙醇提取物的抑菌实验发现,虽然不同种类辣椒中,其辣椒素含量不同,但是对革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、酵母以及霉菌均有抑制效果,并且通过生物自显影法测定,确定该提取物中的主要抑菌成分为辣椒素。王建明等^[21]发现辣椒素在3.57~50 $\mu\text{g/mL}$ 质量浓度时对辣椒枯萎病菌有明显抑制生长作用,20 $\mu\text{g/mL}$ 时

对番茄叶霉病菌、番茄灰霉病菌、洋葱灰霉病菌等都有强烈的抑制作用。魏玉西等^[22]实验发现,辣椒碱对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、普通变形杆菌、四连球菌、痢疾志贺氏菌等细菌有较强抑制活性,但对芒果灰斑病菌、番茄灰霉病菌等霉菌的抑制作用弱。同时,辣椒碱的抑制细菌作用受其浓度的影响,质量浓度在0.012 5 mg/mL以下无抑菌活性,在较高质量浓度(≥ 0.05 mg/mL)时,辣椒碱对革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌都有较强的抑制作用,但浓度的变化对霉菌的抑制效果变化并不明显。

关于辣椒碱抑菌作用的早期文献所采用的辣椒碱样品大多是辣椒碱的粗制品或提取液,样品中的辣椒碱含量较低,不能证明是辣椒碱的抑菌作用。因此为了确证辣椒碱的抑菌效果,刘可春等^[23]采用纯化后的辣椒碱样品对大肠杆菌、绿脓杆菌、金黄色葡萄球菌、乙型溶血性链球菌、白色葡萄球菌、白色念珠菌等6种菌进行了抑菌试验,辣椒碱对乙型溶血性链球菌和白色念珠菌的最低抑菌浓度(MIC)分别为37.5~50 mg/L和75~100 mg/L,而对其他试验菌没有抑菌效果,高于此浓度范围则对实验菌均有明显抑制效果。吴影等^[24]以7种实验菌种生长情况为依据,认为辣椒碱对7种菌株的抑菌作用依次为金黄色葡萄球菌>枯草芽孢杆菌>大肠杆菌>啤酒酵母菌>葡萄酒酵母>黑曲霉>青霉,对前5种菌株的抑菌效果较明显。王梦等^[25]研究了辣椒素单体、二氢辣椒素单体、降二氢辣椒素单体及辣椒素对细菌和真菌的抑制效果,其结果表明,辣椒素单体具有明显的抑菌作用,抑菌效果明显好于二氢辣椒素单体、降二氢辣椒素单体和辣椒素。进一步比较发现,辣椒素单体对5种菌株抑菌效果由大到小依次为金黄色葡萄球菌>大肠杆菌>铜绿假单胞菌>白色念珠菌>黑曲霉菌。总的来说,辣椒素对球菌、杆菌、弧菌(螺旋菌)具有良好的抑制作用,对霉菌、酵母也有一定抑制作用。

2.3 趋避作用

除了杀虫和抑菌作用,辣椒素还具有驱避作用。辣椒素具有强烈的刺激性,可以用作鸟类、动物和昆虫的驱避剂,其特点是药效高、持效长、可降解,而且不会对哺乳动物造成持久性的伤害,是一种新型的生物农药^[26]。

陈渠玲等^[27]对湖南省望城县农村的老鼠进行了密度调查和鼠种分类,并展开以辣椒素为主要成分的农村储粮害鼠防制剂的研究。试验结果表明,辣椒素对储粮害鼠有良好的驱避效果,使用0.2%辣椒

素对农村储粮害鼠防护期超过349 d。杨卫东等^[28]通过将辣椒素混合明胶等多糖后涂覆于聚乙烯薄膜袋外的试验证明,辣椒素对小鼠具有驱避性质,且在浓度低至1%时,驱避效果仍然显著,并且能够维持效果长达一周。

3 辣椒素的农药剂型

辣椒素因其独特的杀虫抑菌和驱避作用,在农业领域具有良好的应用前景。目前,仅有辣椒素乳油、微乳剂等剂型被开发,这极大地限制了辣椒素在农业中的应用,因此需要开发更加高效环保的辣椒素制剂,扩展辣椒素在农业领域的应用。辣椒素化学稳定性较好,可溶于大部分有机溶剂,难溶于水,可以开发乳油、微胶囊悬浮剂等常规农药剂型,也可以开发纳米乳、纳米分散体等纳米农药剂型。

3.1 常规农药剂型

3.1.1 乳油

乳油因加工工艺简单,产品稳定性好,使用方便,生物活性高等优点,一直以来都是农药制剂的注药剂型之一。辣椒素易溶于大多数有机溶剂,且化学稳定性好,因此可以采用环保溶剂来开发辣椒素乳油制剂,避免使用有害溶剂,降低乳油中有机溶剂对人体健康、安全和环境的危害。可采用的绿色环保溶剂主要有3类:一是生物源溶剂,主要包括大豆油、玉米油、生物柴油、植物精油、松脂基植物油等。这些溶剂主要是从动植物中提取的低毒类天然产物,可生物降解,对环境污染较小,并且对大多数疏水性的农药原药有良好的溶解性;二是矿物源溶剂,主要为饱和的环烷烃与链烷烃混合物,如埃森克美孚公司生产的高沸点重芳烃溶剂油Solvesso-100(S-100)、Solvesso-150(S-150)和Solvesso-200(S-200)等系列溶剂,其毒性比甲苯、二甲苯低,且对多种农药具有较好的溶解性能,而人工合成溶剂,如乙酸仲丁酯、乙二醇二乙酸酯(EGDA)等,其毒性也比甲苯、二甲苯低,对大多数农药的溶解性和其成本均比生物源溶剂和矿物源溶剂更有优势^[29]。因此,利用这些环保溶剂,开发环境友好型辣椒素乳油具有良好的前景。

3.1.2 微胶囊悬浮剂

微胶囊技术是一种用成膜材料把固体或液体包覆形成微小粒子的技术,大小一般在微米级范围(1~400 μm),而辣椒素本身具有强烈的刺激性,因此可以利用一些天然高分子材料,如环糊精、壳聚糖、海藻酸钠等,将辣椒素包覆,制备辣椒素微胶

囊,以降低其刺激性,延长其持效期,从而可减少施药的数量和频率。此外,天然的高分子材料具有无毒、可降解等特性,有利于生态 and 环境保护,这对于农药低毒、无毒化发展具有重要意义。

3.2 纳米农药剂型

3.2.1 纳米乳剂

纳米乳是由水、油、表面活性剂和助表面活性剂等形成的粒径在20~200 nm的透明或半透明且热力学相对稳定的均相分散体系^[30]。辣椒素单体化学稳定性较高,在极性溶剂中溶解度较好,因此可利用环保型溶剂和易生物降解的表面活性剂来开发辣椒素纳米乳。与乳油相比,其不仅可以降低其溶剂和乳化剂的使用量,更加安全环保,而且由于其较小的液径,药效也将进一步提高。开发辣椒素纳米乳,有助于提高这类生物农药的药效以及扩展其使用农药剂型和使用场景。

3.2.2 纳米分散体

纳米分散体是将难溶于水的有机农药化合物,利用研磨、熔融乳化法、微沉淀法、溶剂挥发法结合喷雾干燥、冷冻干燥等方法直接加工成纳米颗粒的粉剂,或分散于水中形成纳米混悬剂,其颗粒粒径通常在50~200 nm^[31]。辣椒素单体熔点较低、稳定性好,可应用熔融乳化法结合冷冻干燥法制备其固体纳米分散体。这种方法不仅可以提高其药效,还可以提高在运输和储存过程中的稳定性和安全性。此外,固体纳米分散体还可以通过直接喷粉施药对温室大棚中的病虫害进行防治,避免由喷雾施药引起的大棚湿度增加而导致病虫害严重化。

辣椒素由于具有良好的抑菌抗虫作用,开发适合的剂型是辣椒素在农业领域中应用的关键环节,尤其是在细菌病害的防治和粮食储藏安全等方面。乳油和微胶囊悬浮剂属于常规尺寸制剂。乳油加工工艺简单,使用方便。微胶囊化可以使辣椒素控制释放,增加其持效期,降低其刺激性。纳米乳和纳米分散体属于纳米制剂,由于具有更小的粒径,可以更好地发挥其药效,从而能降低辣椒素的施药量,达到减量增效的目的。

4 展望

随着人们健康环保意识的加强,低残留、高效的绿色环保型农药越来越受关注。农业农村部提出农药使用量要达到零增长,倡导建立资源节约型和环境友好型的生态文明和绿色生产。生物农药由于其选择性强,对环境危害小,原料广泛等特点,将会

在未来的有害生物防治中扮演越来越重要的角色。辣椒素对害虫具有良好的触杀与驱避作用,并且对多种真菌和细菌都具有较好的抑菌作用,是一种良好的植物源农药。其低毒性、易降解的优点,在有害生物的生物防治领域具有广阔开发前景。因此,针对辣椒素这类天然的植物源农药活性成分,开发其适合的剂型,扩展其在农业领域的应用场景,将有助于农药的低毒、低残留化以及推动生态农业的可持续发展。

参考文献

- [1] 郭明程, 王晓军, 苍涛, 等. 我国生物源农药发展现状及对策建议[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 755-758.
- [2] 宋俊华, 杨峻. 全球生物农药定义、分类及管理测试准则介绍[J]. 农药科学与管理, 2021(2): 7-10.
- [3] 农业农村部种植业管理司. 对十三届全国人大二次会议第6733号建议的答复, 农办议[2019]243号[EB/OL]. (2019-08-06). http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201908/t20190812_6322463.htm
- [4] 李友顺, 白小宁, 袁善奎, 等. 2020年及近年我国农药登记情况和特点分析[J]. 农药科学与管理, 2021, 42(1): 1-11; 32.
- [5] GENTZ M C, MURDOCH G, KING G F. Tandem use of selective insecticides and natural enemies for effective, reduced-risk pest management[J]. Biological Control Australia and New Zealand Biocontrol Conference, 2010, 52(3): 208-215.
- [6] 罗都强, 张兴. 植物源杀虫剂研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版): 2001, 29(增刊1): 94-99.
- [7] 张正炜, 郗厚诚, 常文程, 等. 我国植物源农药商品化应用现状及产业发展建议[J]. 世界农药, 2020, 42(12): 6-15.
- [8] 张兴, 马志卿, 冯俊涛, 等. 植物源农药研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 685-698.
- [9] Thresh I C. Capsaicin[J]. Analyst, 1876(1): 149-151.
- [10] LIAO H, LEE H, HO Y, et al. Capsaicin the periaqueductal gray induces analgesia via metabotropic glutamate receptor-mediated retrograde disinhibition[J]. British Journal of Pharmacology, 2011, 163(2): 330-345.
- [11] DIAZ-LAVIADA I. Effect of capsaicin on prostate cancer cells[J]. Future Oncology, 2010, 6(10): 1545-1550.
- [12] SNITKER S, FUJISHIMA Y, SHEN H, et al. Effect of novel capsinoid treatment on fatness and energy metabolism in humans: possible pharmacogenetic implications[J]. American Journal Clinical Nutrition, 2009, 89(1): 45-50.
- [13] LEE I, LEE K, PYO J, et al. Anti-inflammatory effect of capsaicin in helicobacter pylori-infected gastric epithelial cells[J]. Helicobacter, 2007, 12 (5): 510-517.
- [14] INOUE N, MATSUNAGA Y, SATOH H, et al. Enhanced energy expenditure and fat oxidation in humans with high BMI scores by the ingestion of novel and non-pungent capsaicin analogues (capsinoids)[J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2007, 71(2): 380-389.
- [15] 刘莹莹, 欧阳建勋, 李忠海, 等. 辣椒素的抑菌活性研究现状[J]. 粮食科技与经济, 2010, 35(5): 18-22.
- [16] United States Office of Prevention Agency. Reregistration eligibility decision (RED) capsaicin case 4018 [EB/OL]. [2021-05-21]. <https://archive.epa.gov/pesticides/reregistration/web/pdf/4018fact.pdf>
- [17] CLAROS CUADRADO J L, PINILLOS E O, TITO R, et al. Insecticidal properties of capsaicinoids and glucosinolates extracted from capsicum chinense and *Tropaeolum tuberosum* [J]. Insects, 2019, 10(5): 132.
- [18] 刘新, 林永. 辣椒碱对桃蚜的生物活性及其与几种杀虫剂的联合作用[J]. 农药学报, 2003, 52: 94-96.
- [19] ISAACS R R, MERCADER J, WISE J C, et al. Activity of conventional and reduced-risk insecticides for protection of grapevines against the rose chafer, *Macrodactylus subspinosus* [J]. 2007, 128(5): 371-376.
- [20] SOETARNO S, SUKRASNO N, YULINAH E. Antimicrobial activities of the ethanol extracts of capsicum fruits with different levels of pungency[J]. Journal of Mountain Science, 1997, 2(2): 57~63.
- [21] 王建国, 梁建根, 陈燕飞, 等. 辣椒素的抑菌作用及其对某些保护酶活性的影响[J]. 植物病理学报, 2005(增刊1): 35-37.
- [22] 魏玉西, 帅莉, 郭道森, 等. 辣椒碱的抑菌活性研究[J]. 食品科学, 2006(8): 76-78.
- [23] 刘可春, 韩利文, 党立, 等. 辣椒碱的抑菌效果研究[J]. 山东科学, 2007(2): 38-40; 44.
- [24] 吴影, 古绍彬, 张永杰. 辣椒中辣椒碱抑菌作用的研究[J]. 安徽农业科学, 2007(29): 9130-9131.
- [25] 王梦, 赵佩霞, 张鹏, 等. 辣椒碱单体、二氢辣椒碱单体和降二氢辣椒碱单体抑菌效果研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 61-65.
- [26] 冯纪年, 付健, 韩明理. 辣椒碱的研究概述[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1): 84-87.
- [27] 陈渠玲, 邓树华. QS鼠类驱避剂研制与应用[J]. 粮食储藏, 2009, 4:14-17.
- [28] YANG W D. Effect of polyethylene films coated capsaicin on rodent repellent[J]. Advanced Materials Reseach, 2011, 174: 470-474.
- [29] 郭洋洋, 刘丰茂, 王娟, 等. 农药乳油中有害有机溶剂替代的研究进展[J]. 农药学报, 2020, 22(6): 925-932.
- [30] KAH M, BEULKE S, TIEDE K, et al. Nanopesticides: state of knowledge, environmental fate, and exposure modeling[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013, 43(16): 1823-1867.
- [31] 王春鑫, 崔博, 曾章华, 等. 农药固体纳米分散体及其制备方法的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(3): 108-114.

(责任编辑:高蕾)