新产品开发

农药减量增效用支化聚醚有机硅润湿剂的合成与应用研究

张亚宇[1,2]，王潇浚[1,2]，夏富[2]，郑楠[1,2*]
（1. 秦巴生物资源与生态环境国家重点实验室（培育），陕西理工大学化学与环境科学学院，陕西 汉中 723001；2. 陕西省催化基础与应用重点实验室，陕西理工大学化学与环境科学学院，陕西 汉中 723001）

摘　要：农药液滴在疏水作物叶片上的反弹和润湿不良是导致其利用率低下的关键瓶颈。针对农业领域农药利用率低、过量施用所导致的环境污染问题，通过分步硅氢加成反应，设计合成支化聚醚改性聚硅氧烷润湿剂（BEMS）。采用核磁共振氢谱（^{1}HNMR）、傅里叶变换红外光谱（FT-IR）和凝胶渗透色谱（GPC）对BEMS进行化学成分、结构和分子量表征。通过拉脱法、喷雾法等系统探究了BEMS在植物疏水表面的快速吸附与润湿机制。结果表明，BEMS的化学结构可显著降低水的表面张力，并在疏水植物（水稻、小麦、大葱等）表面表现出优异的铺展润湿性能。此外，开展了水稻纹枯病防治大田试验。结果表明，与不添加助剂不减量的农药防治效果相比，添加BEMS的农药减量20%仍可获得与常规用量相当的防治效果，展现出优异的减量增效潜力。

关键词：聚醚改性聚硅氧烷；支化聚合物；润湿剂；农药减量增效
中图分类号：TQ450.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1008-1100（2026）06-0027-07
DOI：10.19482/j.cn11-3237.2026.06.05

Synthesis and application of branched polyether-modified polysiloxane wetting agent for pesticide reduction and synergistic enhancement

ZHANG Ya-yu[1,2]，*WANG Xiao-jun*[1,2]，*XIA Fu*[2]，*ZHENG Nan*[1,2*]
（1. Qinba State Key Laboratory of Biological Resources and Ecological Environment (Incubation), School of Chemical and Environmental Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Catalysis, School of Chemical and Environmental Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China）

Abstract: Droplet rebound and insufficient wetting on hydrophobic crop leaf surfaces are primary barriers limiting pesticide utilization efficiency. To tackle the dual challenge of low field efficacy and environmental risks associated with conventional pesticide overuse, we rationally designed and synthesized a branched polyether-modified polysiloxane wetting agents (BEMS) via controlled stepwise hydrosilylation. The chemical composition and structure, as well as molecular weight of BEMS were characterized by NMR, FT-IR and GPC. The rapid adsorption and wetting mechanisms of BEMS on the hydrophobic surfaces of plants (such as rice, wheat, and scallions) were systematically investigated using the droplet detachment method and spray method. The results

收稿日期：2026-03-27
基金项目：秦巴生物资源与生态环境国家重点实验室（培育）市校共建科研专项产业化项目（SXC-2310）；陕西省催化基础与应用重点实验室项目（22JS003）
作者简介：张亚宇（2001-），男，在读硕士研究生，研究方向为环境功能材料设计与应用。
通讯作者：郑楠（1982-），女，博士，教授，研究方向为仿生智能型新材料与器件的结构设计、先进制造及产业化。

showed that BEMS reduce aqueous surface tension and enable complete, non-rebounding coverage on hydrophobic plants. In addition, a field trial for controlling rice sheath blight was conducted. The results indicated that compared with the pesticide control effect without additives and without reduction in dosage, adding BEMS to the pesticide can achieve the same control effect as the conventional dosage with a 20% reduction in dosage, demonstrating excellent potential for reduction and enhancement of efficacy.

Key words: polyether-modified polysiloxane; branched polymer; wetting agent; pesticide reduction for increased efficiency

现代可持续农业中，农药的有效利用对于保障粮食安全至关重要。农药喷施过程中，药液能否在作物叶面实现有效润湿、快速铺展并稳定滞留，是影响农药利用率和防治效果的关键因素[1]。然而，受叶片表面蜡质层、微纳粗糙结构等的影响，喷雾液滴在叶面易出现反弹、飞溅或滚落现象，造成靶标沉积量降低和施药损失增加[2]。因此，确保药滴在叶面的快速沉积就显得至关重要。但是，沉积并非单纯的静态润湿过程，而是涉及界面吸附、表面张力调控、动态铺展及黏附稳定等多个环节的复杂界面行为[3]。目前，常规农药润湿剂如拉开粉丁基萘磺酸钠盐（BX）、十二烷基硫酸钠（K14）、烷基萘磺酸盐和阴离子润湿剂的混合物（Morwet EFW）等，均难以在极短时间内克服液滴与疏水叶面间的动态能垒，实现快速铺展与浸润[4~6]。聚硅氧烷类表面活性剂由于其具有低表面能、分子链柔顺及界面迁移速度快等特点，在改善药液润湿铺展性能方面表现出明显优势[7]。但传统线性聚醚改性聚硅氧烷在结构可调性和多位点界面作用能力方面仍表现不足，难以满足复杂叶面界面对药液沉积行为的调控需求。因此，研究设计可实现快速界面响应及稳定沉积效果的新型农药润湿剂是提升农药减量增效水平、实现资源有效利用、维护粮食安全的重要途径。

本文通过分子结构设计合成具有支化结构的聚醚改性聚硅氧烷润湿剂（BEMS），并采用核磁共振氢谱（^{1}HNMR）、傅里叶变换红外光谱（FT-IR）和凝胶渗透色谱（GPC）对 BEMS 进行化学成分、结构和分子量表征。通过拉脱法、喷雾法等对 BEMS 作用下液滴在作物叶面的附着力及其润湿性能（接触角、持液量、润湿时间、润湿面积）进行研究，揭示基于 BEMS 分子结构的吸附与润湿机制。此外，通过水稻纹枯病防治大田试验，综合评价 BEMS 的实际防治效果，以获得新型低成本高效农药润湿剂。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

四甲基二硅氧烷（TMDS）、七甲基三硅氧烷（HMTS）和三烯丙基异氰脲酸酯（TAIC），分析纯，上海安耐吉医药化学有限公司；烯丙基聚醚（APEG，400g/mol）、氘代氯仿（$CDCl_3$）和二甲基甲酰胺（DMF），分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司；氯铂酸（H_2PtCl_6），分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；改性聚有机硅农用助剂（A8），南京红太阳农资连锁集团有限公司；噻呋·己唑醇（10%噻呋酰胺，5%己唑醇），石家庄农信生物科技集团有限公司。

VERTEX70 傅里叶变换红外光谱仪、ADVANCE Ⅲ HD 核磁共振波谱仪，德国布鲁克仪器公司；1260 Infinity Ⅱ凝胶渗透色谱仪，美国安捷伦科技有限公司；90Plus 动态光散射仪，美国布鲁克海文仪器公司；MC-1021 表面张力仪，闽测仪器设备有限公司；ZJ-6900 接触角测试仪，深圳致佳仪器有限公司；RE-52A 旋转蒸发仪，巩义予华仪器有限公司；D2F-1 真空干燥箱，北京科伟永兴仪器有限公司；DCAT 21 高灵敏度天平，北京奥德利诺仪器有限公司；WS-18D 背负式电动喷雾器，山东卫士植保机械有限公司。

1.2 BEMS 的合成

在 150mL 的圆底烧瓶中，依次加入 3.34g TMDS 和 0.05g H_2PtCl_6，油浴条件下升温至 50℃，再向其中逐滴加入 10g APEG，继续升温至 70℃，在 1000r/m 转速下搅拌并反应 5h。反应结束后，在真空干燥箱中 70℃干燥 2h 除去未反应的原料，即获得 HSi1。向 HSi1 中加入 0.02g H_2PtCl_6，升温至 70℃后逐滴加入 4.43g TAIC，继续升温至 80℃搅拌并反应 10h。反应结束后，在真空干燥箱中 70℃干燥 4h，即得到 HSi2。向

HSi2 中加入 0.05g H_2PtCl_6，升温至 70℃后逐滴加入 9.80g HMTS，保持搅拌并反应 12h。反应结束后，在真空干燥箱中 70℃干燥 4h，即得 BEMS。BEMS 的合成路线见图 1。

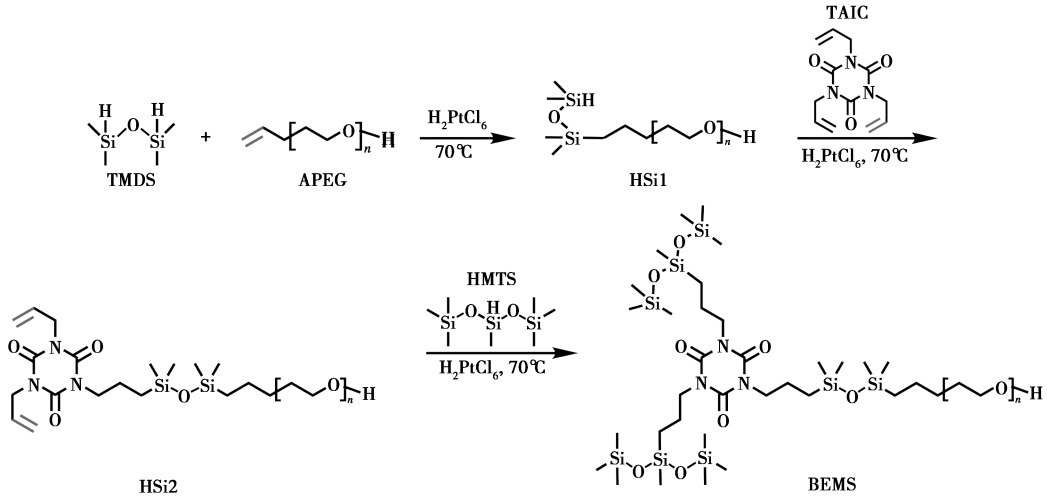


图 1　BEMS 的合成路线

1.3　结构和性能测试方法

采用傅里叶变换红外光谱仪分析样品化学组成与结构，扫描波数范围 4000～400cm^{-1}。将少量样品溶于 $CDCl_3$ 中，以 TMS 为内标，用核磁共振波谱仪分析样品化学组成与结构。在 50℃的二甲基甲酰胺溶液中，以 1.0mL/min 的洗脱速率进行凝胶渗透色谱测试。在单个 Polargel-M 柱上，使用线性聚甲基丙烯酸甲酯或聚苯乙烯作为标准来确定表观分子量。采用质量分数为 0.05%的 BEMS、A8 水溶液，通过动态光散射仪测试其平均粒径。

采用高灵敏度天平结合拉脱法测定水稻、小麦和大葱叶片与液滴之间的表面附着力。将叶片固定于高灵敏度天平上，使拉脱环上的液滴缓慢接触叶片表面，随后以恒定速度进行分离，直至液滴完全脱离。通过记录拉脱前后的质量变化，并按照式（1）计算表面附着力。每组样品平行测试 3 次，结果取平均值。

$$F = \Delta m \times g \tag{1}$$

式中，F 为表面附着力，mN；Δm 为天平记录的质量变化量，g；g 为重力加速率，取值 9.8m/s^2。

将 BEMS 和 A8 分别配置成质量分数为 0.01%、0.03%、0.05%、0.07%和 0.1%的水溶液，用表面张力仪测试其表面张力，并通过作图法求得其临界胶束浓度和临界胶束浓度下的表面张力，每组平行测试 3 次。采用接触角测试仪记录样品在聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）、水稻、小麦和大葱表面的静态接触角，每组平行测试 3 次。用喷雾法测定样品水溶液在植物叶片表面的持液量。将水稻、小麦和大葱切成等长的部分，称重后放在实验台上，倾斜角度为 70°，喷雾装置的喷嘴压力为 2bar，水溶液的喷雾时间为 2s，喷雾后再次称量植物叶片的质量。测试时 3 个叶片为一组，平行测试 5 次。将水稻叶片裁剪为 30mm×15mm 的小块，采用微量进样器在针尖形成 5μL 液滴，以悬滴法缓慢将液滴接触叶片表面，液滴与叶面接触后迅速撤离针头，在 5、10 和 20s 时拍照记录，使用 ImageJ 软件计算铺展面积，每组平行测试 3 次。

1.4　水稻田试验方法

在陕西省汉中市南郑区协税镇张坪村水稻试验田开展农药添加 BEMS 后的水稻纹枯病防治效果及减药量研究。试验采用随机区组设计，共设 5 个处理，每个处理 3 次重复，共 15 个小区，每个小区面积为 45m^2。各处理设置如下：处理 1 为噻呋·己唑醇悬浮剂 50mL/亩；处理 2 为噻呋·己唑醇悬浮剂 45mL/亩＋BEMS 7.5mL/亩；处理 3 为噻呋·己唑醇悬浮剂 40mL/亩＋BEMS 7.5mL/亩；处理 4 为噻呋·己唑醇悬浮剂 30mL/亩＋BEMS 7.5mL/亩；处理 5 为清水对照。其中，BEMS 在药液中的质量施用量为 0.05%，并于水稻孕穗期施药 1 次。按上述处理设置配制药液，每小区喷液量为 25L，充分混匀后均匀喷雾。施药前调查病情基数，施药后 3、7 和 10d 观察各处理对水稻生长的影响，施药后 20d 调查水稻纹枯病防治效果。调查所用方法、具体分级标准及相关数据处理均参考

GB/T 17980.20—2000。

2 结果与讨论

2.1 化学成分与结构

2.1.1 红外光谱

APEG、TMDS、HSi1、HSi2 和 BEMS 的红外光谱图见图 2。

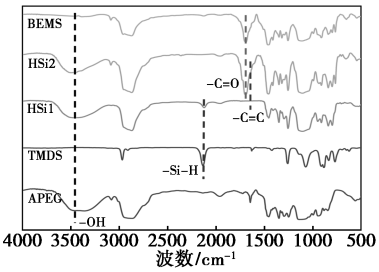


图 2 APEG、TMDS、HSi1、HSi2 和 BEMS 的红外光谱图

由图 2 可知，在 HSi1 的谱线中，2123cm^{-1}处 Si—H 伸缩振动吸收峰[8~9]的强度相对于 TMDS 出现明显减弱，1645cm^{-1}处的烯丙基 C═C 伸缩振动吸收峰[10]消失，表明 HSi1 被成功合成。在 HSi2 的谱线中，2123cm^{-1}处的 Si—H 伸缩振动吸收峰消失，1695cm^{-1}出现 C═O 伸缩振动吸收峰[11]，且 1645cm^{-1}处 C═C 的伸缩振动吸收峰增强，说明 TAIC 结构单元被引入。对于 BEMS 谱线，1645cm^{-1}处 C═C 伸缩振动吸收峰和 2123cm^{-1}处 Si—H 伸缩振动吸收峰消失，3450cm^{-1}处出现—OH 的伸缩振动吸收峰[12]，表明 BEMS 被成功合成。

2.1.2 核磁氢谱

HSi1、HSi2 和 BEMS 的核磁共振氢谱谱图见图 3。

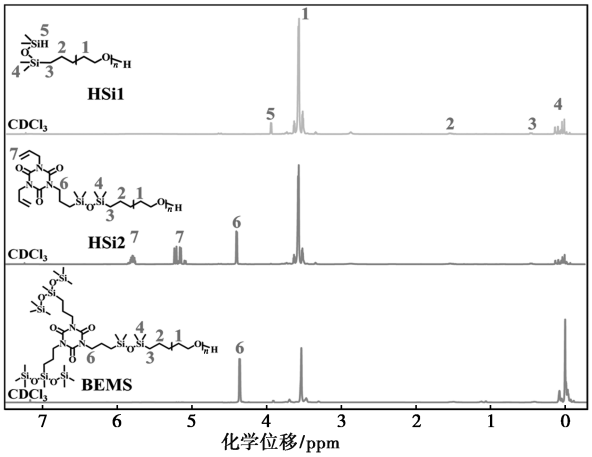


图 3 HSi1、HSi2 和 BEMS 的核磁氢谱谱图

由图 3 可知，在 HSi1 的谱线中，0.0ppm 处为硅甲基的氢信号[13]，3.5ppm 处为聚醚链段中亚甲基的氢信号[14]，同时 3.9ppm 处还出现 Si—H 的信号峰[15]，0.4ppm 处为与硅相连的亚甲基氢信号，表明 HSi1 被成功合成。在 HSi2 的谱线中，4.4ppm 处出现与氮相连的亚甲基氢信号[16]，5.1ppm 和 5.7ppm 处为碳碳双键氢信号[17]，表明 HSi2 被成功合成。在 BEMS 的谱线中，5.1ppm 和 5.7ppm 处的烯丙基双键信号消失，0.0ppm 处硅甲基氢信号明显增强，0.4ppm 处的硅亚甲基和 3.5ppm 处的聚醚链段中亚甲基的氢信号仍然存在，表明 BEMS 被成功合成。

2.1.3 凝胶渗透色谱

BEMS 的凝胶渗透色谱曲线见图 4。

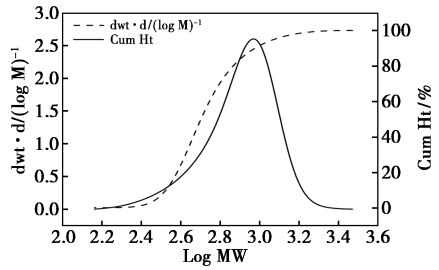
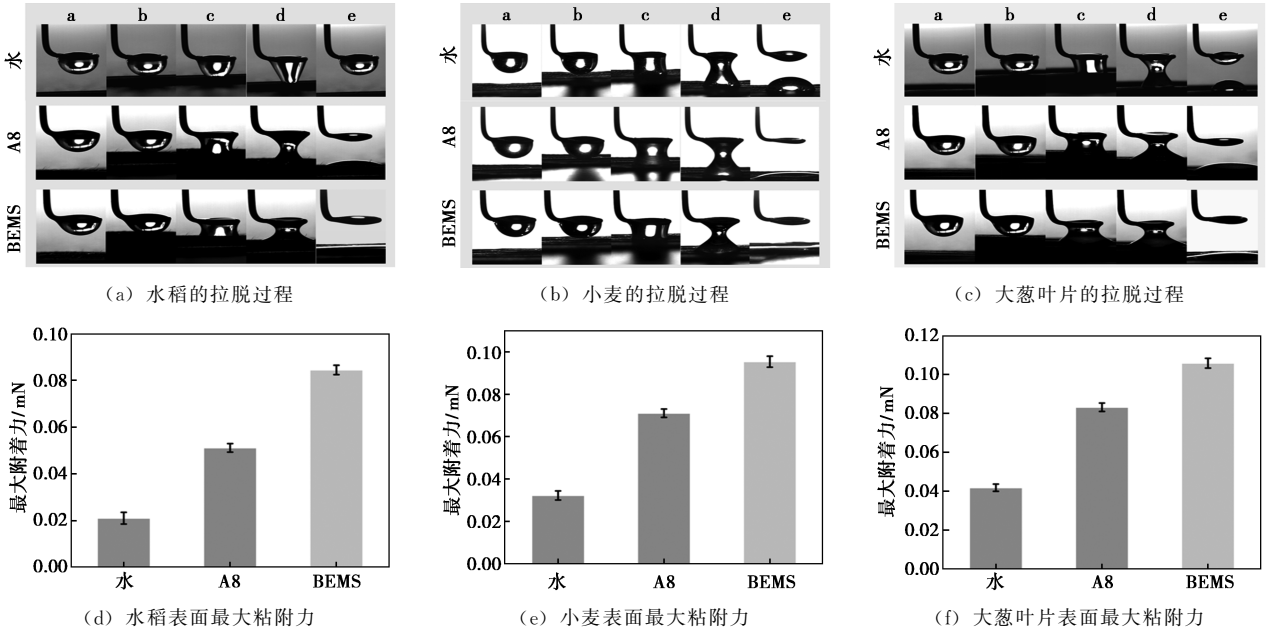


图 4 BEMS 的凝胶渗透色谱曲线

由图 4 可知，BEMS 的数均分子量（M_n）为 725，重均分子量（M_w）为 862，多分散性指数（M_w/M_n）为 1.19。BEMS 的 M_n 和 M_w 均处于较低范围，说明 BEMS 主要以低分子量聚醚改性聚硅氧烷低聚体存在。此外，BEMS 的多分散性指数仅为 1.19，说明 BEMS 的分子量分布较窄，不同分子链之间的分子量差异较小，组成相对均一。表明硅氢加成反应及后续封端过程进行较为平稳，分子量分布较为集中，未出现明显的高分子量副产物或分子量过度扩展现象。结合图 2 和图 3，说明 BEMS 被成功合成且具有较好的结构均一性和集中的分子量分布。

2.2 表面附着力

为了验证 BEMS 的加入能否提高液滴在叶面的附着力，对水及 A8、BEMS 水溶液（质量分数均为 0.05%）在水稻、小麦和大葱叶片表面进行了液滴拉脱实验。水及 A8、BEMS 水溶液在水稻、小麦和大葱叶片表面的拉脱过程及最大附着力见图 5，其中（a）、（b）和（c）上的 a、b、c、d、e 分别代表接近、接触、拉伸、变形、分离状态。



（a）水稻的拉脱过程　（b）小麦的拉脱过程　（c）大葱叶片的拉脱过程

（d）水稻表面最大粘附力　（e）小麦表面最大粘附力　（f）大葱叶片表面最大粘附力

图 5　水、A8 和 BEMS 水溶液接触水稻、小麦和大葱叶片的拉脱过程及与水稻、小麦和大葱叶片表面最大粘附力

由图 5（a）～图 5（c）可知，植物叶面的水滴在提升过程中弧度显著增大，多数水滴倾向于随提升环脱离叶面。添加 BEMS 后，液滴与叶片的接触面积明显增加，较多液滴因润湿改善而停留叶面。在疏水性更强的水稻叶面，与 A8 相比，添加 BEMS 的液滴形变更大，提升环上残留更少，在叶片表面铺展更完全。由图 5（d）～图 5（f）可知，BEMS 能够显著提高液滴在作物叶面的附着力，其叶面附着与滞留能力均优于 A8 和水，表明 BEMS 具有更好的界面粘附性能。这是因为 BEMS 的支化结构有利于分子在固液界面的吸附及其相互作用[18]。

2.3　润湿性能

2.3.1　接触角与持液量

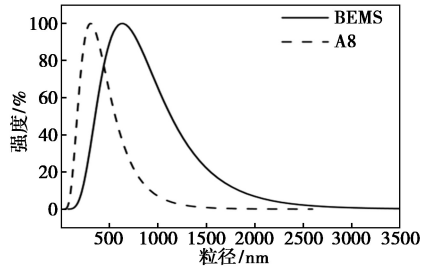
BEMS、A8 的粒径分布曲线、临界胶束浓度测定曲线以及水、BEMS、A8 水溶液在不同基材表面的静态接触角、持液量和在叶片表面的持液照片见图 6，其中（a）和（b）分别为 BEMS、A8 的粒径分布曲线和临界胶束浓度测定曲线，（c）和（d）为水、BEMS 及 A8 水溶液（质量分数均为 0.05%）在聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）、水稻、小麦和大葱表面的静态接触角，（e）为上述 3 种液体在水稻、小麦和大葱叶片表面的持液量及持液照片。

由图 6（a）和图 6（b）可知，BEMS 的平均粒径大于 A8 的平均粒径，这是因为 BEMS 的支化结构具有更加立体的构象，在水溶液中更容易形成较大的聚集体结构，能够包裹更多的液体，从而有利于液滴在疏水植物表面的粘附和沉积。BEMS 达到临界胶束浓度（CMC）时的表面张力低于 A8，且 BEMS 和 A8 达到 CMC 点的浓度基本一致，为 160μg/mL，这说明 BEMS 分子的支化结构和丰富的末端官能团能够促进其在溶液中形成胶束结构[19]，使其 CMC（17.54mN/m）显著低于线性分子 A8（20.62mN/m），从而有效提升其表面活性及与基材表面的界面吸附能力。

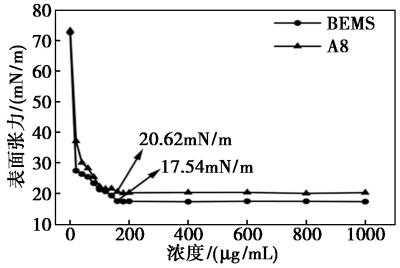
由图 6（c）～图 6（e）可知，BEMS 水溶液在 PP、PE、水稻、小麦和大葱表面的接触角分别为 15.58°、20.38°、27.40°、21.76°和 24.90°，均低于 A8 在相应表面的接触角（22.88°、23.40°、34.93°、26.60°和 25.44°），且 BEMS 在植物叶面上的持液量远高于 A8。BEMS 溶液能在叶面形成连续、均匀的透明水膜，实现完全铺展，而 A8 溶液及水在叶面呈现离散液滴状，润湿性较差。这表明 BEMS 的支化结构通过增强分子在界面的排列效率和降低表面张力，有效提升了水溶液对低能表面与复杂叶面的亲润性。

2.3.2　润湿时间及面积

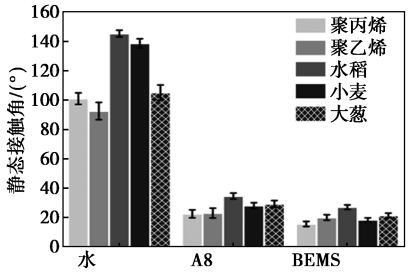
质量分数分别为 0.01%、0.03%、0.05%、0.07%和 0.1%的 A8、BEMS 水溶液在水稻叶片表面的润湿照片及润湿面积图见图 7，其中（a）为润湿照片，（b）～（d）分别为 5s、10s 和 20s 时的润湿面积。



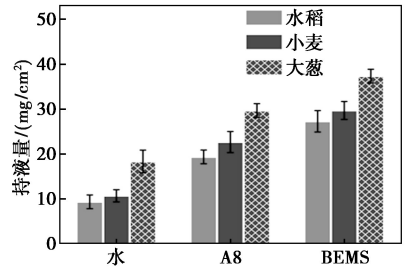
(a)



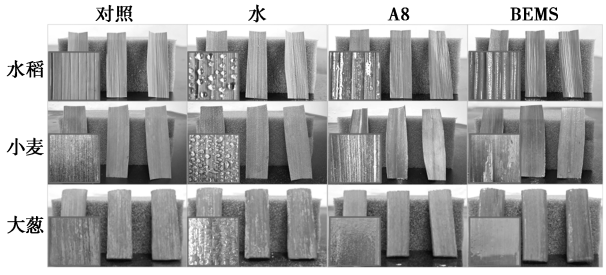
(b)



(c)



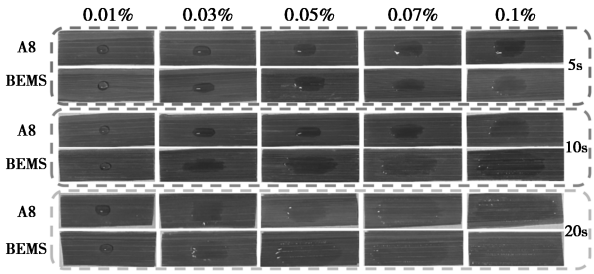
(d)



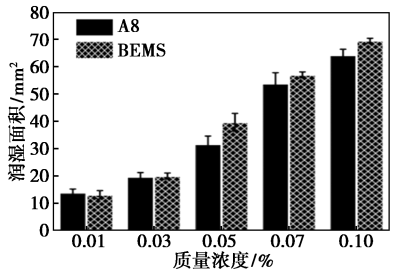
(e)

图 6 BEMS、A8 的粒径分布曲线、临界胶束浓度测定曲线以及水、BEMS、A8 水溶液在不同基材表面的静态接触角、持液量和在叶片表面的持液照片

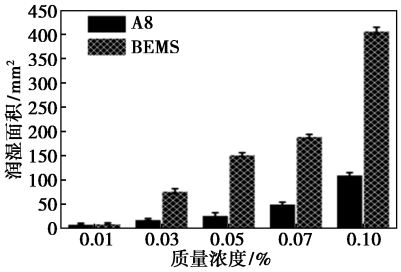
由图 7（a）可知，随着溶液浓度增加和铺展时间延长，A8、BEMS 水溶液在叶面的润湿面积均呈增大趋势。其中，A8 在相同条件下的润湿面积小于 BEMS，尤其在 10s 时差距进一步显现。由图 7（b）～图 7（d）可知，当质量分数为 0.1%



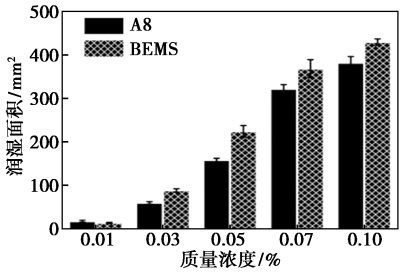
(a)



(b)



(c)



(d)

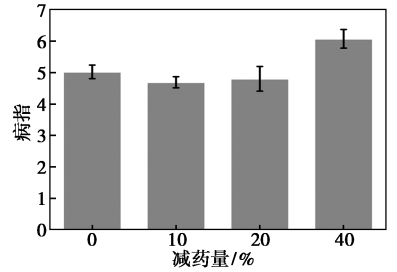
图 7 质量分数分别为 0.01%、0.03%、0.05%、0.07%和 0.1%的 A8、BEMS 水溶液在水稻叶片表面的润湿照片及润湿面积

时，BEMS 在 20s 时的润湿面积达到 430.07mm²，接近叶面几何上限 450mm²。这是由于 BEMS 具有支化结构和丰富的末端基团，有利于分子在界面上的有序排列[20]，从而表现出更高的铺展效率。

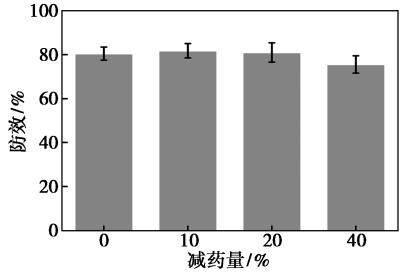
2.4 大田试验

BEMS 防治水稻纹枯病的病情指数和防治效果见图 8。

由图 8 可知，只施用农药时，病情指数为 5.02，防治效果为 80.40%。在农药减量 10%条件下，加入 BEMS 后病情指数降至 4.69，防治效果提高至 81.74%；在减量 20%条件下，病情指数和防治效果分别为 4.80 和 80.95%，仍优于只施用



（a）病情指数



（b）防治效果

图 8　BEMS 防治水稻纹枯病的病情指数和防治效果

农药处理。而在减量 40%条件下，病情指数升高至 6.07，防治效果下降至 75.50%。由此可见，与不添加助剂不减量的农药防治效果相比，添加 BEMS 农药减量 20%仍可获得与常规用量相当的防治效果，展现出优异的减量增效潜力。

3　结论

本文通过分子设计合成具有支化结构的聚醚改性聚硅氧烷润湿剂（BEMS），通过对 BEMS 进行化学成分、结构、分子量表征，证明 BEMS 被成功合成且具有较好的结构均一性和集中的分子量分布。通过拉脱法、喷雾法，并与市售 A8 助剂进行对比，对 BEMS 作用下药液在靶标表面的附着力及其润湿性能进行研究，揭示了基于 BEMS 分子结构的吸附与润湿机制，即 BEMS 的支化结构通过增强分子在界面的排列效率，加快界面迁移速率和降低表面张力，有效提升了水溶液对低能表面与复杂叶面的亲润性。此外，通过水稻纹枯病防治大田试验，对 BEMS 作用下噻呋·己唑醇农药的防治效果进行了评价。结果表明，添加 BEMS 的农药减量 20%时仍可获得与不添加助剂不减量相当的防治效果，展现出优异的减量增效潜力。

参考文献

[1] Zheng L, Cao C, Chen Z, *et al*. Efficient pesticide formulation and regulation mechanism for improving the deposition of droplets on the leaves of rice (Oryza sativa L.)[J]. Pest Management Science, 2021, 77(7): 3298-3307.

[2] Zhang C, Yang X, Yang S, *et al*. Eco-friendly and multifunctional lignocellulosic nanofibre additives for enhancing pesticide deposition and retention[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 133011.

[3] Zhao R, Yu M, Sun Z, *et al*. Regulating droplet impact and wetting behaviors on hydrophobic leaves using a nonionic surfactant[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 629: 926-937.

[4] 康峰，吴潇逸，王亚雄，等. 农药雾滴沉积特性研究进展与展望[J]. 农业工程学报，2021，37(20)：1-14.

[5] Topping C. J, Aldrich A, Berny P. Overhaul environmental risk assessment for pesticides[J]. Science, 2020, 367(6476): 360-363.

[6] Mitra S, Saran R K, Srivastava S, *et al*. Pesticides in the environment: Degradation routes, pesticide transformation products and ecotoxicological considerations[J]. Science of the Total Environment, 2024, 935: 173026-173112.

[7] 封云涛，郭晓君，李娅，等. 作物叶片表面自由能及喷雾助剂对农药药液在 5 种作物叶片上润湿性能的影响[J]. 农药学学报，2022，24(6)：1466-1472.

[8] Guo Y, Guo H, He D, *et al*. Development of cyclic tetrasiloxane polymer as a high-performance dielectric and hydrophobic layer for electrowetting displays[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(39): 46470-46482.

[9] Karasiewicz J, Otlewska A, Marcinkowska K, *et al*. Siloxane containing polyether groups-synthesis and use as an anti-biocorrosion coating[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(12): 6801.

[10] Li Y M, Hu S L, Fang H P, *et al*. The designation of intrinsic flame-retarding vinyl ester resins with high mechanical property, optical transparency and degradability[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 479: 147786.

[11] Fang Z, Wu X, Zhu X, *et al*. Curing kinetics study of thermosetting resin material with ultra-low dielectric loss for advanced electronic packaging[J]. Polymer Testing, 2024, 130: 108312.

[12] Wang Z, He J. A tandem continuous flow process for the synthesis of functionalized PDMS[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(28): 12511-12525.

[13] Huang Y, Guo M, Tan J, *et al*. Impact of molecular architecture on surface properties and aqueous stabilities of silicone-based carboxylate surfactants[J]. Langmuir, 2020, 36(8): 2023-2029.

[14] Li M, Nan L, Zhang B, *et al*. Polyether-thiourea-siloxane copolymer based on H-Bonding interaction for marine antifouling[J]. Molecules, 2023, 28(8): 3574.

[15] Quan X, Zhou F, Zhang C, *et al*. The effect of hydroxy silicone oil emulsion on the waterproof performance of cement[J]. Materials, 2024, 17(12): 2797.

[16] Chen P, Xiong Y, Du D, *et al*. Synthesis of linear modified siloxane-based thickeners and study of their phase behavior and thickening mechanism in supercritical carbon dioxide[J]. Polymers, 2025, 17(19): 2640.

[17] Mituła K, Duszczak J, Rzonsowska M, *et al*. Polysiloxanes grafted with mono (alkenyl) silsesquioxanes-particular concept for their connection[J]. Materials, 2020, 13(21): 4784.

[18] 赵远，樊乾龙，程鹏，等. 超支化聚合物制备及其在水处理中的研究进展[J]. 环境科学研究，2022，35(7)：1647-1657.

[19] Zhang Y, Tian L, Zhang J, *et al*. pH-responsive hyperbranched polymer scaffolds for polymer and peptide conjugation through molecular recognition: Synthesis and self-assembly[J]. Biomacromolecules, 2025, 26(5): 2960-2970.

[20] Yuan B, Zhang Y, Qi P, *et al*. Self-assembled dendrimer polyamide nanofilms with enhanced effective pore area for ion separation[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 471.