

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.012

引用格式:徐欣欣,张晨辉,马西青.羊草叶面喷施6-BA用表面活性剂筛选[J].草地学报,2026,34(9):3276—3283

XU Xin-xin, ZHANG Chen-hui, MA Xi-qing. Screening of Surfactants for Foliar Application of 6-BA on *Leymus chinensis*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3276—3283

羊草叶面喷施6-BA用表面活性剂筛选

徐欣欣¹, 张晨辉², 马西青^{1*}

(1. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学理学院, 北京 100193)

摘要:为筛选适合羊草(*Leymus chinensis*)叶面喷施,能提高6-苄氨基嘌呤(6-Benzylaminopurine, 6-BA)吸收效率的表面活性剂。以表面张力、临界胶束浓度、接触角和最大稳定持留量为指标,从有机硅类Silwet 408、无机盐类SDS及植物源类MES、DDM、橙皮精油共5种禾本科疏水叶片常用表面活性剂中筛选适宜羊草叶面的喷施材料。结果表明,羊草叶片呈超疏水性,抽穗期表观表面自由能显著低于返青期($P < 0.05$)。聚醚改性有机硅Silwet 408性能最优,在临界胶束浓度下表面张力最低($21.27 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$),可在两个生育期实现完全铺展(接触角 $< 5^\circ$),橙皮精油综合表现次之;SDS和橙皮精油分别在返青期($36.16 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)和抽穗期($34.60 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)持留量最高。因此,Silwet 408为首选表面活性剂,橙皮精油可作为抽穗期的绿色备选方案。本研究可为羊草叶面调控剂的高效递送提供理论依据与技术支持。

关键词:羊草;表面活性剂;叶面喷施;润湿特性;植物生长调节剂

中图分类号:TQ423

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3276-08

Screening of Surfactants for Foliar Application of 6-BA on *Leymus chinensis*

XU Xin-xin¹, ZHANG Chen-hui², MA Xi-qing^{1*}

(1. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To screen surfactants suitable for foliar application on *Leymus chinensis* and capable of enhancing the absorption efficiency of 6-benzylaminopurine (6-BA), five surfactants (Silwet 408, SDS, MES, DDM, orange) commonly used on hydrophobic leaves of gramineous plants were evaluated based on surface tension, critical micelle concentration, contact angle, and maximum stable retention. The results showed that the leaves of *L. chinensis* exhibited super hydrophobicity, and the apparent surface free energy at the heading stage was significantly lower than that at the regreening stage ($P < 0.05$). Polyether-modified silicone Silwet 408 exhibited the optimal performance, achieving the lowest surface tension at the critical micelle concentration ($21.27 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$) and complete spreading (contact angle $< 5^\circ$) at both growth stages, followed by orange peel essential oil. SDS and orange peel essential oil showed the highest retention at the regreening stage ($36.16 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$) and heading stage ($34.60 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$), respectively. Therefore, Silwet 408 is recommended as the preferred surfactant, while orange peel essential oil serves as a green alternative at the heading stage. This study provides a theoretical basis and technical support for efficient delivery of foliar regulators in *L. chinensis*.

Key words: *Leymus chinensis*; Surfactant; Foliar application; Wetting behavior; Plant growth regulators

表面活性剂作为农药制剂的关键组分,可通过协同作用显著提升农药的溶解性、分散性与润湿性,从而增强生物活性、减少用量并提高稳定性^[1]。我国目前常用的农用表面活性剂有无机盐类、矿物

油类、植物源类和有机硅类等。同时,我们一般使用药剂的表面张力(Surface tension, ST)和其在靶标叶面上的初始接触角(Contact angle, CA)来表征农药的润湿与持留能力^[2-6]。研究发现,常规药液因

收稿日期:2026-01-15;修回日期:2026-03-25

作者简介:徐欣欣(2002-),汉族,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事牧草育种研究, E-mail: s20233243628@cau.edu.cn; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: ma2016@cau.edu.cn

表面张力过高,在水稻蜡质层表面的接触角达 110°以上,导致沉积率不足 30%^[5]。在药液中添加 0.1% 有机硅助剂可使其表面张力降至 22 mN·m⁻¹,叶片持留量提升 50% 以上^[7],效果显著。这对于提高农药利用率,节约生产成本,保障农田环境安全具有重要意义^[8]。因此,在面对具有特殊叶面结构的植物时,合理选择和优化表面活性剂十分关键。

羊草(*Leymus chinensis*)为禾本科赖草属植物,是中国具有优势的牧草和生态草种之一^[9]。相较于其他牧草品种,羊草具有明显的生物学优势^[10-11],如具有极强的无性繁殖能力,适口性好,综合抗逆性强,营养价值高,兼具生态价值和饲用价值,有“禾草之王”的美称^[12-13]。然而,羊草生产长期面临抽穗率低、结实率低、萌发率低等难题,其低下的种子生产能力是限制产业发展的核心瓶颈。研究表明,外源植物生长调节剂(Plant growth regulators, PGR)可针对性提高植物种子生产能力^[14-16]。例如,田间喷施 6-苄氨基嘌呤(6-benzylaminopurine, 6-BA)可调控多种作物生殖生长过程,通过促进水稻(*Oryza sativa*)、小葵子(*Guizotia abyssinica*)等种子及果实中蛋白质含量、矿物质含量和糖分的积累,最终提高结实率及种子产量^[17-18]。由于羊草叶片形态与水稻相近,为典型的疏水结构,现有商用 6-BA 植物生

长调节剂中的常规表面活性剂(如烷基多糖苷、脂肪酸甲酯等)难以有效克服其润湿屏障。且少数研究虽在羊草喷施 PGR 时使用活性剂,但多采用常规品种,未考虑羊草叶面的特殊结构,导致活性剂效果不稳定,无法形成标准化应用体系^[19]。因此,本研究根据羊草叶面形态特性以及表面活性剂的润湿、持留特性,筛选适宜羊草叶面喷施的表面活性剂,为羊草田间生产提供技术支持,对建设草地和发展畜牧业具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

返青期和抽穗期是羊草营养生长向生殖生长转变的关键阶段,也是田间施用植物生长调节剂的主要时期^[20-21]。因此,本研究选取‘中科 1 号’羊草的返青期和抽穗期叶片作为试验材料。5 种供试表面活性剂涵盖有机硅类、植物源类及无机盐类(见表 1),参考了水稻、小麦等禾本科疏水叶面表面活性剂筛选研究的报道^[5,22-23]。6-苄氨基嘌呤(6-BA):纯度 98%,购自北京索莱宝科技有限公司;商用 6-BA 制剂:有效含量 0.1% 水剂,购自青岛丹罗丰科技有限公司。

表 1 供试表面活性剂特性信息

Table 1 Characteristics of the surfactants tested

名称 Name	种类 Category	来源 Source
Silwet 408(聚醚改性)	有机硅类 Organosilicone	南京捷润科技有限公司
Silwet 408 (Polyether-Modified Siloxane)		Nanjing Jierun Technology Co., Ltd.
MES(脂肪酸甲酯磺酸钠)	植物源类 Plant-derived	湖北东曹化学科技有限公司
MES (Sodium Fatty Acid Methyl Ester Sulfonate)		Hubei Dongcao Chemical Technology Co., Ltd.
SDS(十二烷基硫酸钠) SDS (Sodium Dodecyl Sulfate)	无机盐类 Inorganic Salt	西格玛奥德里奇 Sigma Aldrich
DDM(十二烷基麦芽糖苷)	植物源类 Plant-derived	上海阿拉丁生化科技股份
DDM (n-Dodecyl β-D-Maltoside)		Shanghai Aladdin Biochemical Technology Co., Ltd.
Orange(橙皮精油, d-柠檬烯)	植物源类 Plant-derived	河北祯禧堂科技有限公司
Orange (Orange Peel Essential Oil, d-Limonene)		Hebei Zhenxitang Technology Co., Ltd.

1.2 试验方法

1.2.1 羊草叶面形貌观察 于羊草返青期、抽穗期,选择健康、无病虫害的成熟功能叶片。用锋利的刀片或剪刀快速截取叶片中部约 1.0 cm 长的片段(避开主脉),固定于载玻片上,置于光学显微镜(型号为 OLYMPUS-IX73)下观察。

将截取好的羊草叶片放入 2.5% 戊二醛中固定,取出后进行 30%, 50%, 70%, 100% 的乙醇梯度脱水,每个梯度 10 min,脱水完毕后放入超临界干燥机中,进行临界点干燥,干燥时间约 1 h。后将样品用导电胶带固定在样品台上,喷金,最后用扫描电

镜(Scanning electron microscope, SEM, 型号为日立 SU8010)对制备的样本进行观察。

1.2.2 OWRK 法测定羊草叶片表面自由能 选择新鲜洁净的羊草叶片,剪取中间平整部分固定于载玻片,并置于 OCA 20 接触角测量仪样品测试台上。用去离子水、乙二醇、甲酰胺和 N,N-二甲基甲酰胺等溶液滴于羊草叶面(2 μL)测量接触角,重复 3 次,所得平均值用 SCA21 软件计算羊草叶片表面自由能(Surface free energy, SFE)。

羊草表面特性研究采用奥文斯-温特-拉贝尔-凯尔布勒法(Owens-Wendt-Rabel-Kaelble, OWRK)

法^[24],根据 Berthelot 假设,表观表面自由能由色散和极性组分组成。羊草叶片的自由能由公式(1)计算:

$$\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \gamma_{LV}}{2 \sqrt{\gamma_{LV}^d}} = \sqrt{\gamma_{SV}^p} \times \sqrt{\frac{\gamma_{LV}^p}{\gamma_{LV}^d}} + \sqrt{\gamma_{SV}^d} \quad (1)$$

式中: γ_{LV} , γ_{LV}^d 和 γ_{LV}^p 分别代表液体的表面张力、色散组成和极性组成, γ_{SV}^d 和 γ_{SV}^p 分别代表固体表面的色散组成和极性组成。根据公式(1),利用 $\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \gamma_{LV}}{2 \sqrt{\gamma_{LV}^d}} \sqrt{\frac{\gamma_{LV}^p}{\gamma_{LV}^d}}$ 作图, γ_{SV}^p , γ_{SV}^d 可以从斜率和截距中得到,固体表观表面自由能为二者之和。

1.2.3 Zisman 法测定羊草临界表面张力 根据 Zisman 法^[25],羊草的临界表面张力(Critical surface tension, CST, γ_c)计算公式为:

$$\cos \theta = a + b \cdot \gamma_{LV} \quad (2)$$

θ 为测试液体在羊草叶面上的接触角, a 和 b 为拟合常数, γ_{LV} 为测试液体的表面张力。以 γ_{LV} 为横坐标, $\cos \theta$ 为纵坐标绘制拟合直线,并将直线外推至 $\cos \theta = 1$ (即 $\theta = 0^\circ$) 处,其在横坐标上对应的截距即定义为该固体的临界表面张力 γ_c 。

1.2.4 表面活性剂临界胶束浓度测定 使用 DCAT 21 表面张力仪对不同表面活性剂不同浓度水溶液测定其表面张力,每个样品重复测定 3 次,取其平均值为表面张力值。将表面活性剂水溶液浓度和对应的表面张力值作图,得曲线,其拐点即为其水溶液的临界胶束浓度(Critical micelle concentration, CMC)。

1.2.5 不同表面活性剂在羊草叶面最大稳定持留量测定 采用浸渍法^[22]测定不同浓度不同表面活性剂在羊草叶面上的最大稳定持留量(Maximum retention, R_m , $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$),重复测量 3 次,具体持留量由公式(3)计算:

$$R_m = (m_2 - m_1) \times 1000 / s \quad (3)$$

式中: m_1 为羊草叶片初始重量(g), m_2 为浸泡后取出不滴水时重量(g), s 为叶面积测量仪所测数值(cm^2)。

1.2.6 试剂配制 表面活性剂水溶液:所有表面活性剂均为工业纯或分析纯,使用前经去离子水溶解配制成母液($1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 4°C 避光保存;6-BA 溶液:将 6-BA 原药溶解于去离子水中,配制成质量浓度为 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液;BS 复配液:在质量浓度为 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 6-BA 溶液中加入 Silwet 408 使其终浓度为 0.05% (体积分数),该浓度基于 2.2 节筛选

结果,为 Silwet 408 在羊草叶面实现稳定润湿与持留的最低有效浓度;商用 6-BA 制剂:按产品说明书推荐方法稀释,配制成质量浓度为 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的药液(以有效成分 6-BA 计)。

1.2.7 数据统计分析 试验数据以重复为统计单位,采用 Excel 2019 软件进行数据处理和统计,使用 WORK 法并结合最小二乘法计算羊草表观表面自由能,使用 R 语言进行临界胶束浓度曲线图和接触角折线图作图,使用 SPSS 18 对表面活性剂的临界胶束浓度和最大稳定持留量进行单因素方差分析(One-way ANOVA, LSD),结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 羊草叶片表面性质表征

2.1.1 羊草叶片表面显微结构观察 如图 1 所示,在光学显微镜下观察可见,羊草叶面呈扁平或向内卷曲的形态结构,其表面分布有丰富的表皮毛与刚毛,且覆盖有明显的蜡质层,在主脉附近区域常可见柔毛密集分布(图 1A、D)。通过扫描电镜技术对羊草叶片进行观察,结果显示羊草叶面具有显著的微纳米复合结构,包括多种尺度的凸起,该类结构与已报道的水稻叶面相似,表现出典型的超疏水植物界面特性。对比羊草返青期(图 1A-C)与抽穗期(图 1D-F)叶片的叶面形态可知,随生育进程推进,叶片颜色逐渐加深,表皮毛呈现出由长细向短粗转变的趋势,同时表面蜡质覆盖程度显著增加。

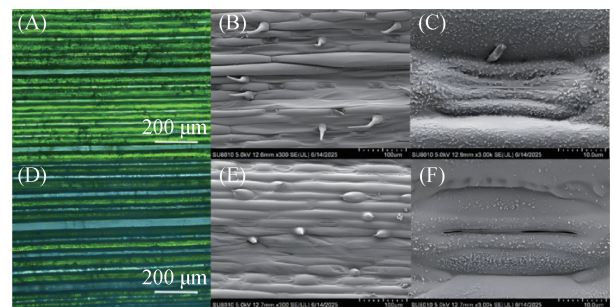


图1 羊草叶片表面显微结构图

Fig. 1 Leaf surface microstructure of *Leymus chinensis*

注:图 A、D 为光学显微镜图像;图 B、C、E、F 为扫描电子显微镜图像;图 A-C 为羊草叶片表面返青时期成像,图 D-F 为羊草叶片表面抽穗时期成像

Note: Figures A and D show optical microscopy images; Figures B, C, E and F show scanning electron microscopy images. Figures A-C show leaf surface of *Leymus chinensis* at the regreening stage, Figures D-F show leaf surface image at the heading stage

2.1.2 羊草表观表面自由能测定 首先测量水、乙二醇、甲酰胺及 N,N-二甲基甲酰胺等四种液体在羊草叶面不同时期(返青期和抽穗期)的接触角,见表 2:羊草叶片表面与水的接触角大于 90°,属于疏水表面。四种液体中水的接触角最大,N,N-二甲基甲酰胺接触角最小,且抽穗期接触角均大于返青期。利用 OWRK 法计算羊草叶片表观表面自由能及其分量,结果如表 3 所示:羊草叶片表观表面自由能值为 30.14 mJ·m⁻²(返青期)和 28.68 mJ·m⁻²(抽穗期),自由能值和低能疏水表面聚乙烯(PE, 31~33 mJ·m⁻²)相近。羊草从营养生长(返青期)向生殖生长(抽穗期)转变时,表面自由能显著降低($P<$

0.05),且抽穗期色散分量比例增加。两个时期自由能色散分量均大于 90%,占主导地位,表明羊草叶片表观自由能主要来源于非极性分子间作用。

表 2 测试溶液在羊草叶面上的接触角

Table 2 Contact angle of probe liquid on the *Leymus chinensis* leaf surface

测试溶液 Test solution	初始接触角 Initial contact angle/°	
	返青期 Regreening stage	抽穗期 Heading stage
去离子水 Deionized water	104.91±1.59	121.02±1.89
甲酰胺 Formamide	85.11±1.86	96.43±1.23
乙二醇 Ethylene glycol	72.81±0.69	84.26±0.89
二甲基甲酰胺 Dimethylformamide	48.85±0.51	56.83±0.73

表 3 羊草叶片表观表面自由能及其分量

Table 3 The apparent surface free energy and its component of *Leymus chinensis* leaves

时期 Stage	表观表面自由能 Apparent surface free energy/(mJ·m ⁻²)	色散组成 Dispersive component/(mJ·m ⁻²)	极性组成 Polar component/(mJ·m ⁻²)	色散组成比例 Proportion of dispersive component/%	极性组成比例 Proportion of polar component/%
返青期 Regreening stage	30.14±0.08 ^a	27.43	2.71	91.01	8.99
抽穗期 Heading stage	28.68±0.04 ^b	27.93	0.75	97.38	2.62

注:表中不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters mean significant differences ($P<0.05$)

2.1.3 羊草叶片临界表面张力测定 由 Zisman 法计算可得不同时期羊草叶片接触角余弦值与测试液体表面张力关系及临界表面张力(见表 4):不同时期羊草叶片的临界表面张力变化趋势与表观表面自由能相似,抽穗期(26.58 mN·m⁻¹)较返青期(32.25 mN·m⁻¹)临界表面张力小,表明抽穗期羊草叶片疏水能力增强。

表 4 羊草叶片不同时期临界表面张力

Table 4 Critical surface tension of *Leymus chinensis* leaves during different periods

时期 Stage	临界表面张力 Critical surface tension/(mN·m ⁻¹)	方程 Equation
返青期 Regreening stage	32.25	$\cos \theta=0.033\ 517\cdot\gamma_L-0.080\ 835$
抽穗期 Heading stage	26.58	$\cos \theta=0.040\ 675\cdot\gamma_L-0.070\ 972$

2.2 表面活性剂性质表征

2.2.1 表面活性剂临界胶束浓度测定 对不同浓度 5 种表面活性剂的表面张力变化作图(图 2):5 种表面活性剂的表面张力均随浓度增加而呈先降低,于临界胶束浓度处下降速率最为显著,最终趋于平缓的趋势。其中,聚醚改性有机硅 Silwet 408 低浓度时表面张力最低,且达到临界胶束浓度时其表面

张力为 21.39 mN·m⁻¹,显著低于其他 4 种表面活性剂($P<0.05$),远低于羊草返青期和抽穗期的临界表面张力(γ_c),即表明 Silwet 408 溶液可自发铺展

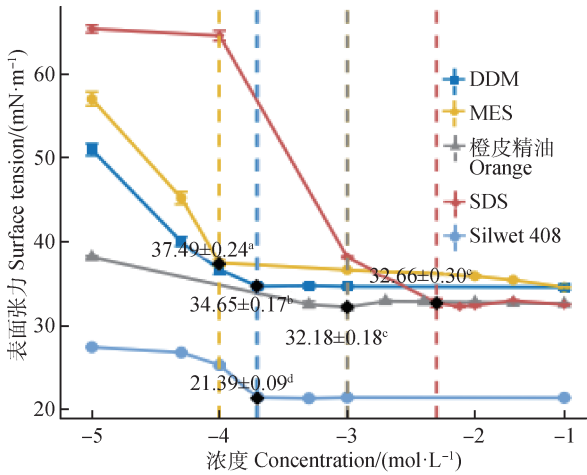


图 2 不同浓度下表面活性剂对应的表面张力值

Fig. 2 Surface tension values corresponding to surfactants at different concentrations

注:图中每条曲线上标注的黑色菱形(◆),即该表面活性剂的临界胶束浓度对应的点。且图中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同
Note: The black diamond symbol (◆) on each curve denotes the critical micelle concentration of the corresponding surfactant. Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). The same conventions apply to the figures below

于羊草叶片表面,实现高效润湿。橙皮精油次之,其达到临界胶束浓度时表面张力为 $32.18 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$,接近羊草临界表面张力,满足基本润湿需求,可选择性使用。MES达到临界胶束浓度时溶液表面张力最大,效果最差,不推荐选用。

2.2.2 不同浓度表面活性剂在羊草叶面上的初始接触角 将不同浓度的5种表面活性剂溶液点滴在返青期和抽穗期羊草叶片上测定其接触角,结果如图3所示:在羊草返青时(图3A),5种活性剂在羊草叶面上的初始接触角均随浓度增加呈先降低后趋于平缓的趋势,其中,与低浓度初始接触角相比,高浓度Silwet 408的润湿铺展效果明显,最终能达到完全润湿铺展、形成无明显液滴边界连续膜层的效果。

SDS溶液在羊草叶面上的初始接触角变化范围为 $29.95\sim 103.47^\circ$,铺展效果位于第二。橙皮精油在低浓度状态下的初始接触角最小,与高浓度相比差异较小,铺展效果中等。MES和DDM溶液铺展效果最差。在羊草抽穗时期(图3B),多数表面活性剂随浓度增加其在羊草叶面上的接触角降低,且在临界胶束浓度附近接触角变化显著。与返青期结果相似,聚醚改性有机硅Silwet 408溶液铺展效果最好,在 $5\times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度下,溶液与叶面接触角小于 5° ,溶液几近完全铺展。DDM溶液铺展效果最差,高浓度状态下溶液与叶面初始接触角为 73.68° ,表明其在叶面上呈现明显的非均匀铺展特性,不具有选择优势。

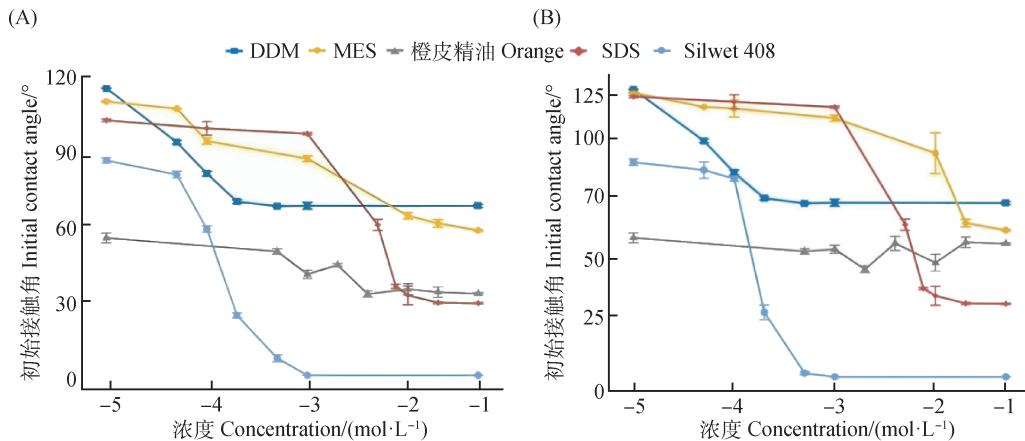


图3 表面活性剂在不同浓度下初始接触角

Fig. 3 Maximum stable retention of surfactant at different concentrations

注:图A为不同浓度表面活性剂在返青期羊草叶片上初始接触角;图B为不同浓度表面活性剂在抽穗期羊草叶片上初始接触角

Note: Figure A shows the initial contact angles of surfactants at different concentrations on the leaf surfaces of *Leymus chinensis* during the regreening stage; Figure B shows the initial contact angles of surfactants at different concentrations on the leaf surfaces of *Leymus chinensis* during the heading stage

2.2.3 不同浓度表面活性剂在羊草叶面上的最大稳定持留量 使用浸渍法测量表面活性剂在羊草叶面上的最大稳定持留量,结果如图4所示:整体表面活性剂随浓度增加,其最大稳定持留量不断增多,当超过流失点时持留量降低。在羊草返青时期(图4A),SDS($36.16 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)溶液的最大稳定持留量最大,MES($33.77 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)和Silwet 408($33.73 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)溶液分别位于第二、第三。在抽穗时期(图4B),橙皮精油($34.60 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)溶液最大稳定持留量最大,Silwet 408($33.36 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)和SDS($31.71 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)溶液分别位于第二、第三,显著高于DDM和MES溶液($P<0.05$)。其中,Silwet 408溶液达到最大稳定持留量时,浓度最低,表明其在较低浓度下即可实现高效持留,且在羊草不同生育期的持留表现稳定性最佳。

2.3 表面活性剂对6-BA溶液润湿特性的影响

测定6-BA、施加表面活性剂Silwet 408的6-BA(BS)和商用6-BA溶液的润湿表征指标,结果表明:如图5A所示,BS溶液的表面张力为 $20.71 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$,显著低于6-BA和商用6-BA溶液($P<0.05$),商用6-BA溶液表面张力最大。如图5B所示,两个时期BS在羊草叶面上的接触角均显著小于其他溶液($P<0.05$),且几乎达到完全铺展状态,其中商用6-BA溶液接触角最大。如图5C所示,两个时期BS在羊草叶片上的最大稳定持留量最大,显著大于其他溶液($P<0.05$),具有较好的持留特性。因此,Silwet 408能通过降低液气界面张力(改善铺展),增强固液界面相互作用(提高持留)两方面改善6-BA溶液润湿性能。

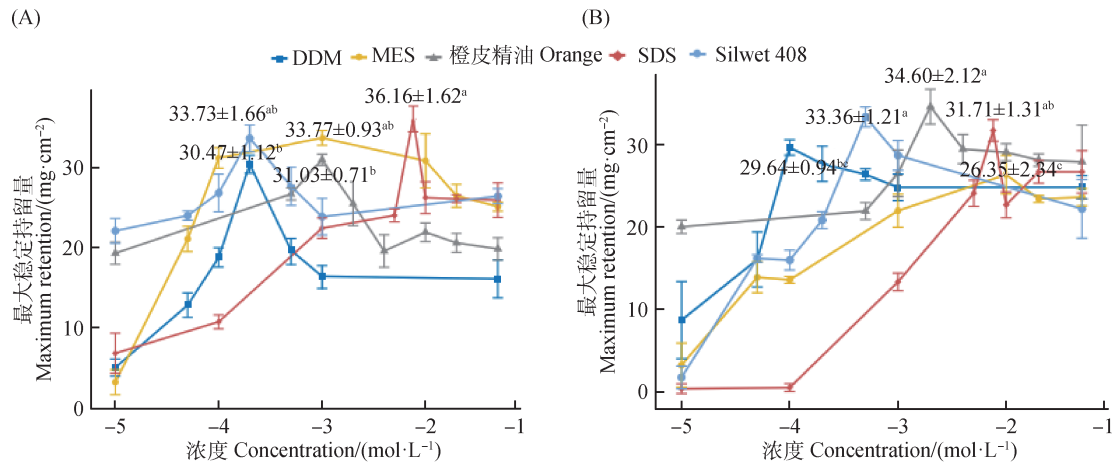


图4 表面活性剂在不同浓度下最大稳定持留量

Fig. 4 Maximum stable retention of surfactant at different concentrations

注:图A为不同浓度表面活性剂在返青期羊草叶片上最大稳定持留量;图B为不同浓度表面活性剂在抽穗期羊草叶片上最大稳定持留量

Note: Figure A shows the maximum stable retention of surfactants at different concentrations on the leaf surfaces of *Leymus chinensis* during the regreening stage; Figure B shows the maximum stable retention of surfactants at different concentrations on the leaf surfaces of *Leymus chinensis* during the heading stage

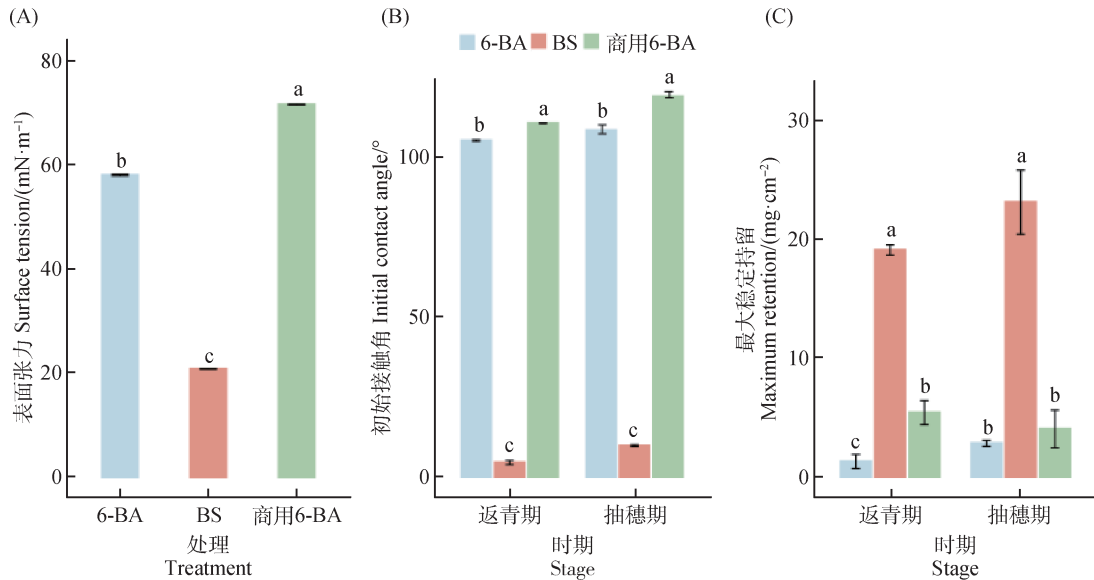


图5 表面活性剂对6-BA溶液润湿特性的影响

Fig. 5 Effect of surfactant on the wetting characteristic of 6-BA solution

注:图A表示不同处理药液的表面张力;图B表示不同处理药液在羊草叶片上的初始接触角;图C表示不同处理药液在羊草叶片上的最大稳定持留量。图例中6-BA为75 mg·L⁻¹ 6-BA溶液,BS为6-BA与表面活性剂复配溶液,商用6-BA为市售制剂

Note: Figure A shows the surface tension of differently treated spray solutions; Figure B shows the initial contact angle of differently treated spray solutions on *Leymus chinensis* leaf surface; Figure C shows the maximum stable retention of differently treated spray solutions on *Leymus chinensis* leaf surface. In the legend, 6-BA is the 75 mg·L⁻¹ 6-BA solution, BS is the 6-BA-surfactant mixed solution, and commercial 6-BA is the commercial preparation

3 讨论

在农业生产中,农药喷雾液滴与靶标叶面的界面相互作用是决定药效的核心环节^[26-27]。研究表明,影响农药药液在靶标作物叶面上润湿行为的因素包括植物叶面性质和药液本身的性质^[28]。植物叶面性质受种类、时期及叶面结构等多种因素影响。本研究发现,羊草叶片凭借微纳凸起与蜡质层的复合结构形成超疏水界面,其表面自由能值(28.68~30.14 mJ·m⁻²)与低密度聚乙烯接近,表明

非极性分子间作用主导固液界面行为^[29]。这一特性与水稻等禾本科植物一致,印证了叶面微结构通过 Wenzel-Cassie 复合效应放大疏水性的普适机制^[5, 30-31]。前人研究发现,随着水稻植株生长,其叶片表面自由能降低,即润湿性能下降^[19],与本研究结果一致。理论上,通过基因编辑技术靶向调控蜡质合成基因可在一定程度上改变叶面粗糙度或化学组成,进而优化润湿性^[23, 30, 33]。然而,这类遗传操作面临双重局限:叶片超疏水结构是长期自然选择的适应性特征,其在抵御水分蒸腾、病原体侵染等

方面具有关键生态功能,遗传改良可能引发抗逆性下降等连锁反应;此外,羊草为异源多倍体,基因编辑效率低且表型稳定性差^[34-35]。相较之下,表面活性剂调控因其快速响应、环境友好和技术成熟度高,成为更具实操性的解决方案,基于植物叶面特性选择适配的表面活性剂,技术可操作性强,对农业生产实践具有重要指导意义。

不同表面活性剂在羊草叶面的润湿与持留性能存在显著差异。有机硅类 Silwet 408 凭借“伞状”三硅氧烷骨架与亲水聚醚链的独特结构^[8],在临界胶束浓度下可实现超低表面张力($21.27 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$),能够突破羊草叶片的润湿阈值($\gamma_{\text{CMC}} < \gamma_{\text{C}}$),形成接触角 $<5^\circ$ 的完全铺展膜层,展现出优异的润湿能力。这与李彦飞等^[32]发现其在水稻叶面能显著降低表面张力、减小接触角的结果一致。相比之下,植物源类橙皮精油的表面张力($32.18 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$)接近返青期叶片临界值($32.25 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$),仅能在极性相对较高的营养生长期实现有效铺展,而进入抽穗期后,润湿性下降。在持留性能方面,无机盐类 SDS 在羊草返青期的最大持留量最高($36.16 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$),这可能与溶液黏度特性相关:SDS 分子量较小导致溶液黏度较低,更易通过叶片表面微结构渗入气孔或表皮间隙^[36]。而抽穗期时,橙皮精油的持留量升至最高($34.60 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$),推测与表面活性剂极性分量匹配有关——此时叶片表面极性组成比例降至 2.62%,橙皮精油中占比 70% 以上的萜烯类非极性成分更易通过相似相溶原理吸附于蜡质层^[37]。Silwet 408 在两个时期的最大稳定持留量分别位于第三和第二,且所需浓度较低,整体表现更为稳定。

同时,羊草叶面特性随生育期动态变化是影响药液性能的关键之一。在本研究中,返青期羊草叶片极性组分占比为 8.99%,临界表面张力为 $32.25 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$,而抽穗期极性组分降至 2.62%,临界表面张力也相应降至 $26.58 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$,非极性显著增强,叶片愈加难以润湿。因此在羊草返青期进行叶面喷施效果优于抽穗期。而 Silwet 408 因其在低浓度下即可实现超低表面张力、高铺展效果以及跨生育期的稳定持留性能,可作为羊草叶面喷施植物生长调节剂的最佳表面活性剂。橙皮精油可作为抽穗期的补充选择,尤其在强调绿色、可持续防控策略时具有应用价值。此外,当前植物生长调节剂制剂的研发多聚焦于产品稳定性,对靶标植物叶面特性与溶液润湿行为的关联性关注不足。本研究发现,

市售 6-BA 制剂因未针对羊草叶面特性优化润湿性,导致药液在叶片表面的铺展均匀性和持留效率受限,进而影响药效传导。而通过引入 Silwet 408, 6-BA 溶液的界面铺展能力与叶面附着量显著提升,这为突破植物生长调节剂在疏水叶面的应用限制提供了有效策略,对提高药剂生物利用度、优化田间施用效果具有重要实践意义。

4 结论

本试验研究发现:羊草叶片表面以非极性作用为主,抽穗期疏水性显著增强。Silwet 408 等表面活性剂可通过降低表面张力改善药液铺展持留效果,其中 Silwet 408 在 $5 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 下达到临界胶束浓度,表现优异。因此,聚醚改性有机硅 Silwet 408 是羊草叶面施药的首选表面活性剂。

参考文献

- [1] 曹冲,黄敬良,曹立冬,等. 减施增效农药剂型设计与制剂研发策略[J]. 世界农药, 2021, 43(2):1-5
CAO C, HUANG Q L, CAO L D, et al. Strategy of pesticide formulation research and development for efficiency improvement with less application [J]. World Pesticides, 2021, 43(2):1-5
- [2] SONG M, JU J, LUO S, et al. Controlling liquid splash on superhydrophobic surfaces by a vesicle surfactant [J]. Science Advances, 2017, 3(3):e1602188
- [3] YANG L, WANG S, WANG R, et al. Floating chitosan-alginate microspheres loaded with chlorantraniliprole effectively control *Chilo suppressalis* (Walker) and *Sesamia inferens* (Walker) in rice fields [J]. Science of the Total Environment, 2021, 783:147088
- [4] 马悦,张晨辉,杜凤沛. 农药制剂发展趋势及前沿技术概况[J]. 现代农药, 2022, 21(1):1-8
MA Y, ZHANG C H, DU F P. Development tendency and frontier technology of pesticide formulations [J]. Modern Agrochemicals, 2022, 21(1):1-8
- [5] 徐广春,顾中言,徐德进,等. 稻叶表面特性及雾滴在倾角稻叶上的沉积行为[J]. 中国农业科学, 2014, 47(21):4280-4290
XU G C, GU Z Y, XU D J, et al. Characteristics of rice leaf surface and droplets deposition behavior on rice leaf surface with different inclination angles [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(21):4280-4290
- [6] LI Z, LI Z, GAO Y, et al. Assemblies disaggregation and diffusion dictated droplet impact and wetting behaviors on hydrophobic surface [J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 339:116826
- [7] ZHANG C, ZHAO X, LEI J, et al. The wetting behavior of aqueous surfactant solutions on wheat (*Triticum aestivum*) leaf surfaces [J]. Soft Matter, 2017, 13(2):503-513
- [8] 潘兴鲁,董丰收,刘新刚,等. 中国农药七十年发展与应用回顾[J]. 现代农药, 2020, 19(1):1-5
PAN X L, DONG F S, LIU X G, et al. Development and application of pesticide in China in past 70 years [J]. Modern Agrochemicals, 2020, 19(1):1-5
- [9] 刘公社. 羊草种业发展之我见[J]. 草原与草业, 2023, 35(1):1-5

- LIU G S. Personal opinions on the development of *Leymus chinensis* seed industry [J]. Grassland and Prataculture, 2023, 35(1): 1-5
- [10] 侯向阳,白乌云. 基于表型性状的羊草遗传多样性评价[J]. 草地学报,2022,30(3):631-636
- HOU X Y, BAI W Y. Evaluation of genetic diversity of *Leymus chinensis* based on phenotypic traits [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(3): 631-636
- [11] 陶雅,徐丽君,李峰,等. 我国羊草产业亟待振兴[J]. 草业学报,2023,32(11):188-198
- TAO Y, XU L J, LI F, et al. The *Leymus chinensis* industry in China needs to be urgently revitalized [J]. Acta Prataculture Sinica, 2023, 32(11): 188-198
- [12] WANG Y, ZHOU G, WANG Y. Modeling responses of the meadow steppe dominated by *Leymus chinensis* to climate change [J]. Climatic Change, 2007, 82(3-4): 437-452
- [13] 王介繁,李健辉,张生原,等. 羊草 *LcPDS* 基因的克隆、表达模式分析及亚细胞定位[J]. 草地学报,2025,33(11):3550-3558
- WANG J F, LI J H, ZHANG S Y, et al. Cloning, expression pattern analysis and subcellular localization of *LcPDS* gene in *Leymus chinensis* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(11): 3550-3558
- [14] GUZMAN Y, PUGLIESE B, GONZALEZ C V, et al. Spray with plant growth regulators at full bloom may improve quality for storage of 'Superior Seedless' table grapes by modifying the vascular system of the bunch [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 176: 111522
- [15] 李凌雨,周琦锐,李洋,等. 外源6-BA调控孕穗期低温后小麦幼穗发育的转录组分析[J]. 作物学报,2023,49(7):1808-1817
- LI L Y, ZHOU Q R, LI Y, et al. Transcriptome analysis of exogenous 6-BA in regulating young spike development of wheat after low temperature at booting stage [J]. Acta Agonomica Sinica, 2023, 49(7): 1808-1817
- [16] 李晓宇,王彪,张继涛,等. 羊草有性生殖数量性状对不同外源植物激素喷施时间和浓度的响应[J]. 草地学报,2018,26(4): 826-831
- LI X Y, WANG B, ZHANG J T, et al. Quantitative traits of sexual reproduction of *Leymus chinensis* responding to different exogenous plant hormones concentration and spraying time [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(4): 826-831
- [17] PAN S, RASUL F, LI W, et al. Roles of plant growth regulators on yield, grain qualities and antioxidant enzyme activities in super hybrid rice (*Oryza Sativa* L.) [J]. Rice, 2013, 6: 1-10
- [18] TALUKDAR M, SWAIN D K, BHADORIA P B S. Effect of IAA and BAP application in varying concentration on seed yield and oil quality of *Guizotia Abyssinica* (L. F.) Cass [J]. Annals of Agricultural Sciences, 2022, 67(1): 15-23
- [19] 王健,张钊,赵春林,等. 不同浓度的植物生长调节剂、叶面水溶肥、矿物油及渗透剂对羊草产量的影响[J]. 饲料研究,2019,42(7):95-99
- WANG J, ZHANG Z, ZHAO C, et al. Effect of multiple concentration combination of plant growth regulator, fertilizer, mineral oil and additive on *Leymus chinensis* L. yield [J]. Feed Research, 2019, 42(7): 95-99
- [20] 姜澜. 三种植物生长调节剂对羊草种子产量的调控效应及其机制[D]. 通辽:内蒙古民族大学,2016:5
- JIANG L. Three kinds of plant growth regulator on *Leymus chinensis* seeds yield regulation effect and its mechanism [D]. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University, 2016: 5
- [21] 刘泽东,柴凤久,高海娟,等. 施用微量元素对羊草结实率的影响[J]. 黑龙江农业科学,2019(8):131-134
- LIU Z D, CHAI F J, GAO H J, et al. Effects of trace elements on seed setting rate of *Leymus chinensis* [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019, (8): 131-134
- [22] 许小龙,徐广春,徐德进,等. 炔草酯微乳剂药液在茵草叶片上的润湿和持留特性分析[J]. 植物保护学报, 2015, 42(3): 453-459
- XU X L, XU G C, XU D J, et al. Analysis of the wettability and retention of clodinafop-propargyl ME solutions on American sloughgrass *Beckmannia syzigachne* leaves [J]. Acta Phytolagica Sinica, 2015, 42(3): 453-459
- [23] 李彦飞,冯泽腾,张小军. 几种农用增效助剂的表面张力及接触角研究[J]. 农药,2021,60(3):172-175
- LI Y F, FENG Z T, ZHANG X J. Study on surface tensions and contact angles of several agricultural synergists [J]. Agrochemicals, 2021, 60(3): 172-175
- [24] ZHU Y, YU C, LI Y, et al. Research on the changes in wettability of rice (*Oryza sativa*) leaf surfaces at different development stages using the OWRK method [J]. Pest Management Science, 2014, 70(3): 462-469
- [25] FOX H W, HARE E F, ZISMAN W A. The spreading of liquids on low-energy surfaces. 6. Branched-chain monolayers, aromatic surfaces, and thin liquid films [J]. Journal of Colloid Science, 1953, 8(2): 194-203
- [26] NAIRN J J, FORSTER W A. Methods for evaluating leaf surface free energy and polarity having accounted for surface roughness [J]. Pest Management Science, 2017, 73(9): 1854-1865
- [27] KOCH K, BHUSHAN B, BARTHLOTT W. Diversity of structure, morphology and wetting of plant surfaces [J]. Soft Matter, 2008, 4(10): 1943-1963
- [28] 张晨辉,马悦,杜凤沛. 表面活性剂调控农药药液对靶润湿沉积研究进展[J]. 农药学报,2019,21(Z1):883-894
- ZHANG C H, MA Y, DU F P. Research progress on the wetting and deposition behaviors of pesticidedroplet on target surfaces with the addition of surfactants [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2019, 21(Z1): 883-894
- [29] VOLPE C D, SIBONI S. Acid-base surface free energies of solids and the definition of scales in the Good-van Oss-Chaudhury theory [J]. Apparent and Microscopic Contact Angles, 2000: 171-208
- [30] MAO B, CHENG Z, LEI C, et al. Wax crystal-sparse leaf2, a rice homologue of *WAX2/GL1*, is involved in synthesis of leaf cuticular wax [J]. Planta, 2012, 235(1): 39-52
- [31] WANG L, TIAN Z, JIANG G, et al. Spontaneous dewetting transitions of droplets during icing & melting cycle [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 378
- [32] HUANG H, YANG X, ZHENG M, et al. An ancestral role for 3-KETOACYL-COA SYNTHASE3 as a negative regulator of plant cuticular wax synthesis [J]. Plant Cell, 2023, 35(6): 2251-2270
- [33] YANG X, FENG T, LI S, et al. CER16 inhibits post-transcriptional gene silencing of *CER3* to regulate alkane biosynthesis [J]. Plant Physiology, 2020, 182(3): 1211-1221
- [34] LI T, TANG S, LI W, et al. Genome evolution and initial breeding of the triticeae grass *Leymus chinensis* dominating the Eurasian Steppe [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120(44)
- [35] LIN Z, CHEN L, TANG S, et al. Efficient CRISPR/Cas9-mediated genome editing in sheepgrass (*Leymus chinensis*) [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2023, 65(11): 2416-2420
- [36] QIN T, GOUAL L, PIRI M. Synergistic effects of surfactant mixtures on the displacement of nonaqueous phase liquids in porous media [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 582: 123885
- [37] TWORKOSKI T. Herbicide effects of essential oils [J]. Weed Science, 2002, 50(4): 425-431