



生物表面活性剂鼠李糖脂对大豆叶面肥喷施效果的影响

刘 雅,蔡光容,于 伟,冯乃杰,郑殿峰

(黑龙江八一农垦大学 农学院,黑龙江 大庆 163000)

摘 要:为研究生物表面活性剂鼠李糖脂对大豆叶面肥喷施效果的影响,以合丰 50 大豆品种为材料,通过盆栽试验,进行叶面喷施,分别测定叶面喷施后 1,3,5,7,9 d 大豆叶片中 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、叶绿素含量及整株生物量干重。结果表明:与 CK(喷施清水)及叶面肥($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理相比,添加鼠李糖脂($250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的叶面肥($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理明显促进了大豆植株整株生物量的增加且在处理后期显著提高了叶片叶绿素含量;在处理后的 1~5 d 内显著提高大豆叶片对 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 离子的吸收水平、1~6 d 显著提高大豆叶片对 Fe^{2+} 离子的吸收水平、1~7 d 内显著提高大豆叶片对 Mn^{2+} 离子的吸收水平。说明,生物表面活性剂鼠李糖脂对大豆叶面肥喷施具有明显的调控作用。

关键词:鼠李糖脂;叶面肥;叶绿素含量;生物量

Effect of Biosurfactant Rhamnolipid on the Spraying Efficiency of Soybean Foliar Fertilizer

LIU Ya, CAI Guang-rong, YU Wei, FENG Nai-jie, ZHENG Dian-feng

(Agricultural College of Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 130000, China)

Abstract: In order to study the effect of biosurfactant rhamnolipid on spraying efficiency of soybean foliar fertilizer, Hefeng 50 soybean variety was used as material to conduct the foliar spraying by pot experiment. After spraying, the contents of Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} and Mn^{2+} , chlorophyll content and whole plant biomass dry weight of soybean leaves on the 1st, 3rd, 5th, 7th and 9th day were measured. The results showed that foliar fertilizer ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) added rhamnolipid ($250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) was more effective than control (spraying water) and foliar fertilizer treatment, the whole plant biomass of soybean plants and the content of chlorophyll in leaves at the later stage of treatment significantly increased. In the first five days, the uptake of Cu^{2+} and Zn^{2+} in soybean leaves significantly increased, and in the first six days the absorption of Fe^{2+} by soybean leaves significantly increased, during the first seven days, the level of Mn^{2+} uptake by soybean leaves significantly increased. Above all, the biosurfactant rhamnolipid obviously regulates the spraying of soybean foliar fertilizer.

Keywords: Rhamnolipid; Foliar fertilizer; Chlorophyll content; Dry biomass

作物生长发育过程中,因其养分需要,应适时适当追肥。叶面喷施作为追肥的一种方式,可及时补充作物后续生长发育所需养分。但由于叶表结构中含有一层疏水的蜡质层及角质层,导致喷施液部分流失,造成叶片养分吸收效率较低^[1-2]。有研究表明,微量元素叶面肥中添加表面活性剂可提高黄瓜幼苗对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 离子的吸收水平,并增加黄瓜幼苗的生物量,增幅在 6.5%~19.9%。其原理基于在叶面肥中添加表面活性剂后,喷施液在叶表的表面张力向趋近于叶表临界表面张力的趋势改变,从而增强了叶片的润湿性能,最终提高养分吸收效率^[3-6]。

不同类型表面活性剂的结构不同,可分为阳离

子表面活性剂和阴离子表面活性剂,其对植物的润湿作用也有所不同^[7]。一些表面活性剂具有亲水及亲油特点,作为叶面肥助剂,可起到湿润、渗透、溶解、乳化、悬浮等作用^[8-9]。与传统的表面活性剂相比,生物表面活性剂具有更好的应用效能。鼠李糖脂(rhamnolipid)是一种天然的次生代谢产物,产生于一些假单胞菌中^[10-12]。其结构主要由两部分组成,即亲水基团和疏水基团,亲水基团由 1~2 分子的鼠李糖构成,疏水基团则由 1~2 分子具有不同碳链长度的饱和或不饱和脂肪酸组成,这种特殊的结构决定了其具有表面活性剂的功能^[13-14]。其作为一种阴离子生物表面活性剂,不仅溶于甲醇、氯仿和乙醚,在碱性水溶液中也表现出良好的溶解

收稿日期:2017-12-29

基金项目:黑龙江省青年科学基金(QC2014C022)。

第一作者简介:刘雅(1993-),女,硕士,主要从事作物化控研究。E-mail:2684955996@qq.com。

通讯作者:郑殿峰(1969-),男,博士,教授,主要从事作物化控研究。E-mail:zdffnj@263.net。

性,其可显著降低水溶液的表面张力,改变固体表面的润湿性,具有乳化、破乳、润湿等多种功能,在石油开采、医药、食品等方面应用广泛^[9,15]。鼠李糖脂在农业上同样应用广泛,张培军^[16]研究表明鼠李糖脂能显著增加苹果产量;刘菊^[17]研究表明鼠李糖脂可以较好地延缓西瓜枯萎病的发生;孙星星等^[18]研究表明鼠李糖脂可以作为一种新型的生物农药,对防治蚜虫表现出较强的增效作用;有研究表明,1 g·kg⁻¹的鼠李糖脂可对黑麦草生长和吸收土壤重金属 Cu²⁺、Zn²⁺、Cd²⁺、Pb²⁺ 离子,以及对土壤酶活性有显著影响^[19-20];王盼盼^[8]发现,鼠李糖脂可以缓解土壤中重金属对作物生长发育的影响;邓杰勇等^[21]研究表明,合理的使用生物表面活性剂作为叶面肥助剂可显著提高植物叶片的养分吸收效率,从而提高经济效益。

很多表面活性剂可以作为肥料助剂促进大豆对养分的吸收^[4]。李晓莉等^[2,22]研究表明,与不含表面活性剂的硼营养液相比,加入表面活性剂后,大豆植株对硼的吸收水平显著增加。叶小利等^[23]研究表明烷基聚氧乙烯基醚(PPJ)和蔗糖脂肪酸酯(SFE)表面活性剂可在不同程度上调节大豆叶片气孔开闭、蜡质层的溶解、乙烯释放量和锰离子的吸收,其中蔗糖脂肪酸酯还可以增强大豆叶片喷施氮肥的效果,显著增加大豆叶片叶绿素含量及产量,并且提高大豆的吸氮能力。赵青^[6]研究表明癸二酸二乙酯(DES)、辛二酸二乙酯(DESU)、磷酸三乙酯(TBP)等表面活性剂均可促进大豆叶片对 GA₃ 的吸收。杨文杰等^[24]研究表明,氨基酸钼肥可显著提高大豆苗期叶片的叶绿素含量及地上部生物量,并且显著促进大豆幼苗对 Ca、K、Mg、P 等大量元素的吸收效率及大豆的生长发育。但对生物表面活性剂鼠李糖脂作为肥料助剂的报道较少。为了研究生物表面活性剂鼠李糖脂对大豆叶面肥喷施效果的影响,本研究选择合丰 50 大豆品种为试材,测定在鼠李糖脂处理下大豆叶片叶绿素含量、整株干重及 Cu²⁺、Zn²⁺、Fe²⁺、Mn²⁺ 离子的吸收水平,旨在为鼠李糖脂生物表面活性剂作为肥料助剂,在大豆及其它作物叶面肥上的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

- 1.1.1 供试土壤 草炭土:砂子,混合比例为 3:1。
- 1.1.2 供试大豆 大豆品种为合丰 50,由黑龙江八一农垦大学农学院提供。
- 1.1.3 供试试剂及肥料 1 mol·L⁻¹ NaHCO₃ (用于溶解鼠李糖脂);鼠李糖脂(含量为 20%);叶面肥

(市售),主要成分及含量为(FeSO₄ 3.5%) + (ZnSO₄ 3.5%) + (HBO₃ 1.0%) + (MnSO₄ 2.5%) + (CuSO₄ 1.0%) + ((NH₄)₂Mo₂O₇ 0.2%) ≥ 10%, 1:2 000 倍稀释。

1.2 试验设计

试验于 2016 - 2017 年在黑龙江八一农垦大学农学院温室内进行。设 3 个处理,分别为 CK(喷施清水)、叶面肥(30 mg·L⁻¹,原剂稀释倍数为 2 000 倍),添加鼠李糖脂(250 mg·L⁻¹,此浓度由前期预试验确定)的叶面肥(30 mg·L⁻¹)处理。

采用盆栽试验,每盆(d_底 = 6 cm, d_顶 = 8 cm, h = 15 cm)播种体积均匀一致的大豆种子 10 粒,在昼夜温度分别为(24 ± 0.5℃)和(17 ± 0.5℃),湿度为 60% ± 5%,12 h 光照,光照强度为 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 的温室中培养,真叶期定苗 6 株,培养至 V2 期。选取均匀一致的苗盆,每个处理 10 盆,共 30 盆。

对 V2 期大豆叶片进行叶面喷施,每盆喷施 1 mL 的 NaHCO₃ 和 9 mL 的相应溶液,对照用相同体积清水喷施,使植株正反叶面湿润均匀。2016 年于 12 月 15 日播种;2017 年于 3 月 24 日播种。

每次每组处理选取 2 盆,分别测定叶面喷施后 1,3,5,7,9 d 大豆叶片中 Cu²⁺、Zn²⁺、Fe²⁺、Mn²⁺ 的含量、叶绿素含量及整株生物量干重。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 大豆叶片叶绿素含量 采用叶绿素仪(SPAD-502)测定叶片的 SPAD 值,测定时间为上午 9:30 - 11:30,每个处理随机选取 6 片新叶,每片叶片重复测 3 次。

1.3.2 大豆叶片中 Fe²⁺、Mn²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺ 的含量及整株生物量干重 取样时每次每组处理随机选取 2 盆中长势均匀一致的 6 株,每株叶片用蒸馏水冲洗 3 次,去除叶片表面灰尘,在 70℃ 烘干至恒重,采用原子吸收分光光度计(型号:SDA-100)测定叶片中 Fe²⁺、Mn²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺ 的含量,并将剩余部分用相同方法烘干至恒重,通过计算得出整株干重(DW_{整株} = DW_叶 + DW_{剩余部分})。

1.4 数据分析

所有的测定的数据均为 2016 和 2017 年两次试验的平均值。数据处理使用 Excel 2016、Origin 2017 和 SPASS 19.0 进行统计分析制图。

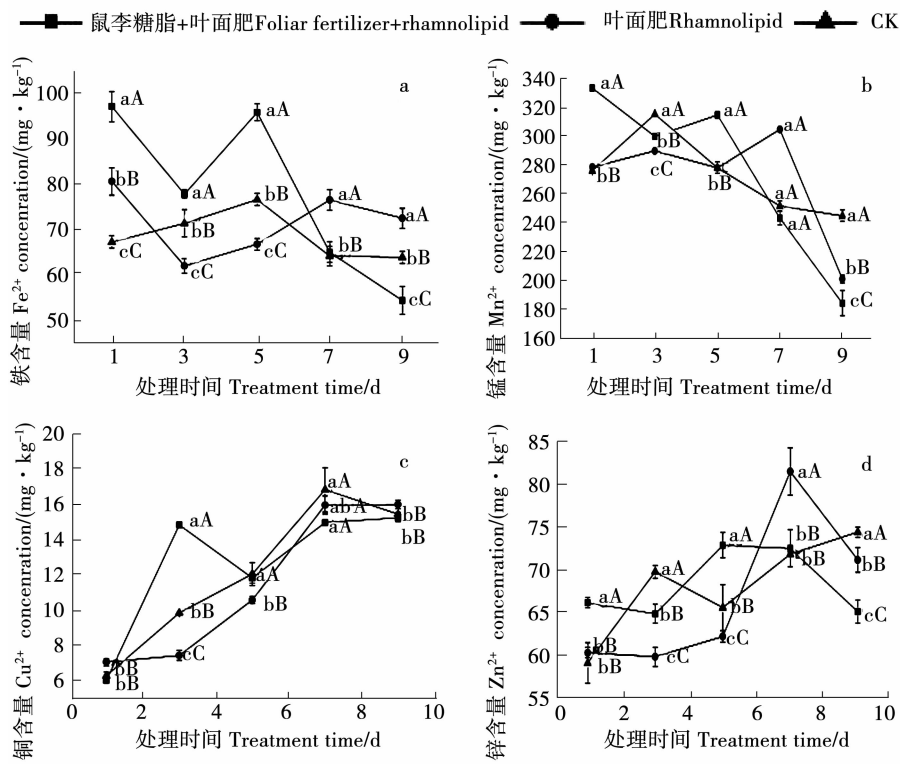
2 结果与分析

2.1 喷施添加鼠李糖脂的叶面肥对大豆叶片微量元素含量的影响

2.1.1 Fe²⁺ 含量 如图 1a 所示,不同处理对叶片中 Fe²⁺ 含量的影响随处理时间的变化而有所不同。

与CK及叶面肥处理相比,在处理1~6 d内,添加鼠李糖脂的叶面肥处理均极显著高于CK与叶面肥处理,且在处理后第5天达到峰值,为96.18 mg·kg⁻¹,此时分别比CK及叶面肥处理增加了25.27%和43.92%,在处理6~9 d,添加鼠李糖脂的叶面肥处理的叶片Fe²⁺含量呈下降趋势,但在6~7 d内与CK差异不显著,与叶面肥处理差异显著,在7~9 d

内显著低于CK及叶面肥处理。
总体来说,与CK及叶面肥处理相比,喷施添加鼠李糖脂的叶面肥处理可在处理后的1~6 d内对叶片中Fe²⁺含量的吸收有更极显著的促进作用。因此,向叶面肥中加入生物表面活性剂鼠李糖脂在处理1~6 d内更能有效发挥叶面肥的肥效。



图中不同大小写字母分别代表0.01和0.05水平差异显著,下同。
The different capital and lowercase indicate significant difference at 0.01 and 0.05 probability level respectively, the same as below.

图1 不同处理对铁(a),锰(b),铜(c)和锌(d)含量的影响

Fig. 1 The effect of different treatments on iron (a), manganese (b), cuprum (c) and zinc (d) content

2.1.2 Mn²⁺含量 如图1b所示,随着处理后时间的推移,不同处理对叶片中Mn²⁺含量的影响随处理时间的变化而有所不同。与CK及叶面肥处理相比,除在处理第3天极显著低于CK外,在处理1~5 d内,添加鼠李糖脂的叶面肥处理的叶片中Mn²⁺含量均极显著高于CK与叶面肥处理,且在处理后第5天达到峰值,为315.5 mg·kg⁻¹,此时比CK及叶面肥处理均增加了12.78%;在处理第5~7天,添加鼠李糖脂的叶面肥处理的叶片中Mn²⁺含量呈下降趋势,但在处理后第7天与CK与叶面肥处理差异不显著;在处理第9天继续下降,且显著低于CK及叶面肥处理。

总体来说,与CK及叶面肥处理相比,喷施添加鼠李糖脂的叶面肥处理可在处理后1~5 d内对叶片中Mn²⁺含量的吸收有更明显的促进作用。

2.1.3 Cu²⁺含量 如图1c所示,随着处理后时间的推移,不同处理对叶片中Cu²⁺含量的影响随处理时间的变化而有所不同。与CK及叶面肥处理相比,在处理1~5 d内,添加鼠李糖脂的叶面肥处理的叶片中Cu²⁺含量显著高于CK与叶面肥处理,且在处理后第3天达到峰值,为14.83 mg·kg⁻¹,此时分别比CK及叶面肥处理增加了55.50%和99.13%,在处理第5天略低于CK,但与CK相比差异不显著;除在处理第6天略高于叶面肥处理外,在处理第5~8天,添加鼠李糖脂的叶面肥处理的叶片中Cu²⁺含量均略低于CK与叶面肥处理,但差异不显著;在处理第9天显著低于叶面肥处理,且略低于CK,但与CK相比差异不显著。

总体来说,对于喷施添加鼠李糖脂的叶面肥处理,在处理后的1~5 d之内,叶片内Cu²⁺含量上升

程度均显著高于CK及叶面肥处理,对叶片中 Cu^{2+} 含量的吸收较CK及叶面肥处理有明显的促进作用。因此,向叶面肥中加入鼠李糖脂生物表面活性剂在处理第1~5 d内有更好的效果。

2.1.4 Zn^{2+} 含量 如图1 d所示,随着处理后时间的推移,不同处理对叶片中 Zn^{2+} 含量的影响随处理时间的变化而有所不同。与CK及叶面肥处理相比,除在处理后2~4 d内显著低于CK外,在处理后的1~6 d,添加鼠李糖脂的叶面肥处理的叶片中 Zn^{2+} 含量均显著高于CK与叶面肥处理,且在处理后第5天达到峰值,为 $72.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,此时分别比CK及叶面肥处理增加了10.87%和16.77%;在处理后7~9 d,显著低于CK及叶面肥处理,但在第7天与CK相比差异不显著。

总体来说,对于喷施添加鼠李糖脂的叶面肥处理,在处理后的1~7 d内,除第3天显著低于CK、第7天显著低于叶面肥处理外,叶片内 Zn^{2+} 含量上

升程度均显著高于CK及叶面肥处理,对叶片中 Zn^{2+} 含量的吸收较CK及叶面肥处理有明显的促进作用。因此,向叶面肥中加入鼠李糖脂生物表面活性剂在处理1~7 d内有更好的效果。

2.2 喷施添加鼠李糖脂的叶面肥对大豆叶片叶绿素含量的影响

如图2所示,随着处理后时间的推移,不同处理对叶片叶绿素含量的影响随处理时间的变化而有所不同。与CK及叶面肥处理相比,在处理前期(1~3 d),添加鼠李糖脂的叶面肥处理的叶片叶绿素含量略低于CK及叶面肥处理,但差异不显著;除分别在处理后第5天与CK、第7天与叶面肥处理相比无显著性差异外,在处理后期(4~9 d),添加鼠李糖脂的叶面肥处理的叶片叶绿素含量均显著高于CK及叶面肥处理,且在第7天达到峰值50.03,此时分别比CK及叶面肥处理增加了11.85%和10.77%。

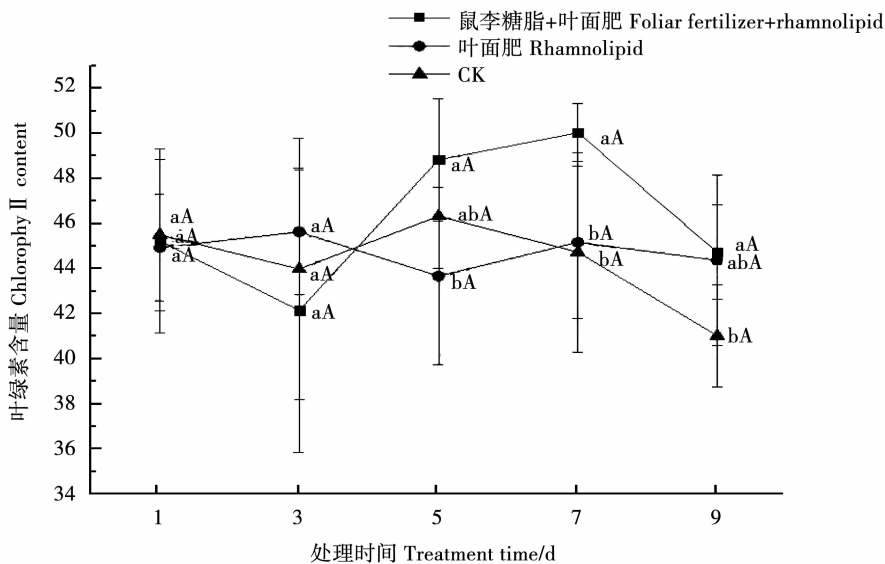


图2 不同处理对叶绿素含量的影响
Fig.2 Effects of different treatments on chlorophyll content

总体来说,在处理前期(1~3 d),不同处理对叶片叶绿素含量的影响没有显著性差异;但在处理后期(4~9 d),与CK及叶面肥处理相比,喷施添加鼠李糖脂的叶面肥处理对叶片中的叶绿素含量的提高有明显的促进作用。因此,在处理后期(4~9 d),向叶面肥中加入鼠李糖脂生物表面活性剂更有利于叶片中叶绿素含量的提高。

2.3 喷施添加鼠李糖脂的叶面肥对大豆整株干重的影响

如图3所示,在处理后的1~9 d,大豆整株生物量随时间推移逐渐增加,其大小表现为喷施添加鼠李糖脂的叶面肥处理>叶面肥处理>CK。在处理

后1~9 d,喷施添加鼠李糖脂的叶面肥处理的大豆整株生物量最大,从3.87 g增加到4.66 g,显著高于CK,增幅为1.71%~3.85%;在处理后1~5 d,虽高于叶面肥处理,但无显著性差异,而在处理后5~9 d,显著高于叶面肥处理,增幅为2.98%~5.27%;叶面肥处理的大豆整株生物量次之,从3.72 g增加到4.53 g,显著高于CK,增幅为0.78%~3.81%;CK的大豆整株生物量最小,从3.66 g增加到4.43 g。

总体来说,与CK及叶面肥处理相比,喷施添加鼠李糖脂的叶面肥处理对大豆整株生物量的增加有更明显的促进作用。

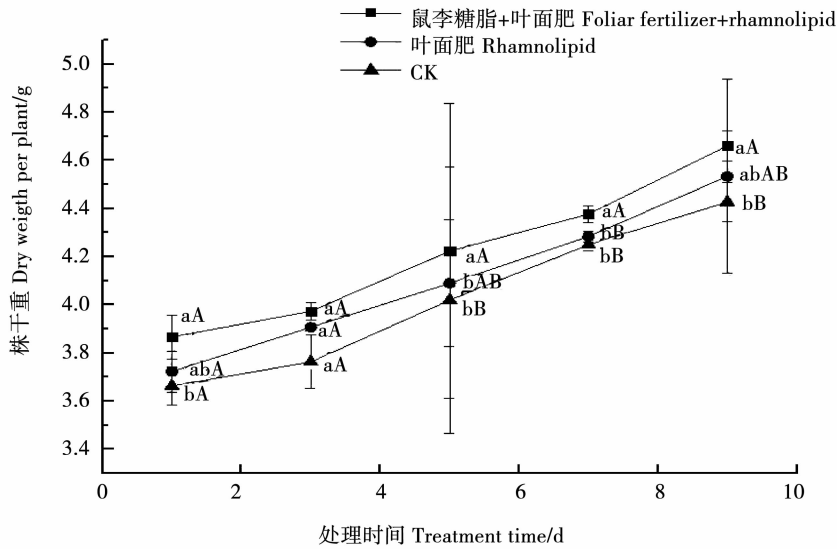


图3 不同处理对大豆植株生物量的影响
Fig. 3 Effects of different treatments on soybean plant biomass

3 讨论

研究发现,在叶面肥中添加表面活性剂,可以促进作物叶面对养分的吸收^[13,25-26]。樊俊^[27]研究表明,喷施 Nutrivant 叶面肥可促进对小白菜叶片养分的吸收。复合型表面活性剂可明显增加作物叶片对硼(B)、锰离子的吸收^[4]。0.4 mmol·L⁻¹的脂肪醇聚氧乙烯醚(PPJ)可促进大麦叶片及棉叶对硼(B)、锰离子的吸收^[28-29]。本研究中,在叶面肥中添加生物表面活性剂鼠李糖脂,可以促进大豆叶片对Fe²⁺、Mn²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺离子的吸收能力,使叶面肥达到更好的喷施效果。但不同离子的吸收效果最佳天数及吸收峰值不同,Cu²⁺和Zn²⁺离子的吸收水平在处理后的1~5 d内显著提高,Zn²⁺含量处理后第5天达到峰值,为72.95 mg·kg⁻¹,而Cu²⁺则在处理后的第3天便达到峰值,但峰值最小,为14.83 mg·kg⁻¹,可能因为鼠李糖脂主要影响前期(1~3 d)的Cu²⁺的吸收水平,且影响程度小于其它几种离子;对叶片中Fe²⁺含量的吸收则是在处理后1~6 d效果最佳,在第5天达到峰值,为96.18 mg·kg⁻¹,吸收效果最佳天数及吸收峰值均大于Cu²⁺、Zn²⁺离子;对Mn²⁺的吸收水平在处理后1~7 d效果最佳,在第5天达到峰值,为315.5 mg·kg⁻¹,吸收效果最佳天数及吸收峰值最大。因此,鼠李糖脂对叶面肥喷施效果影响最佳为Mn²⁺ > Fe²⁺ > Zn²⁺ > Cu²⁺,这与邓杰勇^[21]研究结果相似,造成这些结果的原因可能是鼠李糖脂对不同离子的促进程度不同,或是相同离子对不同表面活性剂的反应程度不同。

本研究中,添加鼠李糖脂的叶面肥处理明显增加了大豆整株生物量,这可能因为对几种离子的吸

收能力增加后,增加了叶片的养分效率,叶面吸收的营养迅速转变成有机物质,增加叶片的叶面积及生物量^[30-31]。叶绿素作为光合作用的主要色素,其含量越低越会阻碍光合作用的进程,而其含量越高,越能保证光合作用的顺利进行,进而影响作物干物质的积累,最终影响产量^[32-33]。适当浓度的芸苔素内酯和营养物质可显著促进辣椒,番茄植株的生长,提高它们叶片的叶绿素含量^[34-35]。功能叶面肥可促进水稻功能叶的叶绿素含量增加^[32]。在本研究中,与CK(喷施清水)及叶面肥(30 mg·L⁻¹)处理相比,添加鼠李糖脂(250 mg·L⁻¹)的叶面肥(30 mg·L⁻¹)处理,在处理后的1~3 d与CK及叶面肥处理无明显变化,但处理后期(处理后4~9 d)显著提高了叶片叶绿素含量,且在第7天达到峰值,分别比CK及叶面肥处理增加了11.85%和10.77%。可能是因为试验后期大豆叶片增厚,叶面积也有所增加,导致叶绿素含量增加。

本文中,生物表面活性剂鼠李糖脂对大豆叶片叶面肥的喷施效果具有明显的调控作用。但由于大豆叶片的各项测定指标受大豆品种、叶面肥种类及浓度、表面活性剂种类及浓度、不同生育时期、喷施时间等因素影响,本文仅对Fe²⁺、Mn²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺离子的含量、叶绿素含量以及生物量进行测定,测定指标较少,缺乏对其它生育时期大豆叶片中更多的营养物质吸收的分析,对于促进大豆叶片营养元素及物质的吸收及光合性能的机制,有待于进一步研究。

4 结论

与CK(喷施清水)及叶面肥(30 mg·L⁻¹)处理相

比,添加鼠李糖脂($250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的叶面肥($30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)处理明显增加了大豆植株整株生物量且在处理后期(处理后4~9 d)显著提高了叶片叶绿素含量;在处理后的1~5 d内显著提高大豆叶片对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 离子的吸收水平,1~6 d显著提高大豆叶片对 Fe^{2+} 离子的吸收水平,1~7 d内显著提高大豆叶片对 Mn^{2+} 离子的吸收水平。

参考文献

[1] 魏雪琴,张长峰,庞杰,等. 植物角质层生物学特性及水分渗透性研究进展[J]. 植物学报,2013,48(5):573-587. (Wei X Q,Zhang C F,Pang J,et al. Research advances in biological characteristics and water permeability of stratum corneum of plants[J]. Botany,2013,48(5):573-587.)

[2] 李晓莉. 表面活性剂对植物角质膜渗透性能影响的研究[D]. 郑州:郑州大学,2012. (Li X L. Effect of surfactants on the permeability of plant keratome[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2012.)

[3] 张琳,曹兵,孙明德,等. 叶面肥中添加表面活性剂对黄瓜幼苗养分吸收和生长的影响[J]. 北方园艺,2008(12):60-61. (Zhang L,Cao B,Sun M D,et al. Effect of adding surfactant to foliar fertilizer on nutrient absorption and growth of cucumber seedlings[J]. Northern Gardening,2008(12):60-61.)

[4] 肖艳,曹一平,王敬国,等. 提高作物叶面养分吸收的复合型助剂研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004(3):281-285. (Xiao Y,Cao Y P,Wang J G, et al. Study on compound auxiliaries for increasing nutrient absorption of crop foliage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2004(3):281-285.)

[5] Liu H J, Shao B,Long X W. Foliar penetration enhanced by bio-surfactant rhamnolipid[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces,2016(5):58.

[6] 赵青. 表面活性剂对 GA_3 在作物表面渗透性影响的研究[D]. 郑州:郑州大学,2012. (Zhao Q. Effect of surfactants on the surface permeability of GA_3 [D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2012.)

[7] 蒋旻昀. α -烷基甜菜碱型表面活性剂的合成工艺优化研究[D]. 无锡:江南大学,2009. (Jiang W Y. Synthesis of α -alkyl betaine surfactants[D]. Wuxi:Jiangnan University,2009.)

[8] 王盼盼. 鼠李糖脂的发酵生产以及去除污染土壤中铅和镉的研究[D]. 无锡:江南大学,2016. (Wang P P. Fermentation production of rhamnolipid and removal of lead and cadmium in contaminated soil [D]. Wuxi:Jiangnan University,2016.)

[9] 张一宾. 表面活性剂在农药及植物上的作用特性及功能[J]. 世界农药,2008,30(4):14-19. (Zhang Y B. The role and function of surfactants in pesticides and plants[J]. World Pesticides, 2008,30(4):14-19.)

[10] 罗娜. 铜绿假单胞菌产鼠李糖脂的能力及其对烃类污染物降解的研究[D]. 西安:西北大学,2016. (Luo N. Study on the ability of pseudomonas aeruginosa to produce rhamnolipid and its degradation to hydrocarbon pollutants [D]. Xi'an:Northwest University,2016.)

[11] 赵健烽,辛兴,卫培培,等. 铜绿假单胞菌 M14808 产鼠李糖脂

分批发酵动力学研究[J]. 南京理工大学学报,2013,37(2):309-313. (Zhao J F,Xin X,Wei P P,et al. Study on batch fermentation kinetics of rhamnolipid production from pseudomonas aeruginosa M14808[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology,2013,37(2):309-313.)

[12] 张亚,蒋程,易龙,等. 铜绿假单胞菌次生代谢产物的研究进展[J]. 化学与生物工程,2015,32(1):8-11. (Zhang Y,Jiang C,Yi L, et al. Research progress of secondary metabolites of pseudomonas aeruginosa [J]. Chemistry and Bioengineering, 2015,32(1):8-11.)

[13] 朱墨. 表面活性剂对赤霉素和铁元素在植物表面吸收作用的研究[D]. 郑州:郑州大学,2014. (Zhu M. Absorption of gibberellin and iron on plant surface by surfactants[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2014.)

[14] 王靖,章厚名,安明泉,等. 高效产表面活性剂菌株(Lz-1)的筛选及其特性研究[J]. 石油化工高等学校学报,2009,22(3):33-36,41. (Wang J,Zhang H M,An M Q,et al. Screening and characterization of an efficient surfactant production strain (Lz-1) [J]. Journal of Petrochemical Industry,2009,22(3):33-36,41.)

[15] 彭子原,袁兴中,彭馨,等. 生物表面活性剂逆胶束中漆酶催化性能的研究[J]. 中国环境科学,2013,33(6):1091-1096. (Peng Z Y,Yuan X Z,Peng X,et al. Study on catalytic performance of biosurfactant reverse micelles in laccase[J]. China Environmental Science,2013,33(6):1091-1096.

[16] 张培苹. 鼠李糖脂水溶肥料对苹果农艺性状及产量的影响[J]. 农业科技通讯,2014(10):137-139. (Zhang P P. Effects of rhamnolipid water-soluble fertilizer on apple agronomic characters and yield [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014(10):137-139.)

[17] 刘菊. 鼠李糖脂对西瓜枯萎病防治作用的研究[D]. 杭州:浙江大学,2012. (Liu J. Study on the prevention and cure effects of Rhamnolipids on fusarium wilt of watermelon [D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2012.)

[18] 孙星星,王凯,李红阳,等. 新型生物农药鼠李糖脂及其复配剂对甘蓝蚜虫的防治效果[J]. 浙江农业科学,2016,57(12):2071-2073. (Sun X X, Wang K, Li H Y, et al. New biological pesticide rhamnolipid and its mixture on the control of cabbage aphids [J] Zhejiang Agricultural Sciences, 2016,57(12):2071-2073.)

[19] 石福贵. 鼠李糖脂与EDDS对黑麦草修复重金属复合污染土壤的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2009. (Shi F G. Effect of rhamnolipid and EDDS on ryegrass remediation of heavy metals contaminated soil [D]. Urumqi:Xinjiang Agricultural University, 2009.)

[20] 时进钢,袁兴中,曾光明,等. 鼠李糖脂对沉积物中Cd和Pb的去除作用[J]. 环境化学,2005(1):55-58. (Shi J G,Yuan X Z,Zeng G M,et al. Removal of Cd and Pb from sediments by rhamnolipid [J]. Environmental Chemistry,2005(1):55-58.)

[21] 邓杰勇. 表面活性剂对小白菜等作物生长及叶面肥上应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2016. (Deng J Y. Study on the application of surfactant on the growth of cabbage and other foliar fertilizers [D]. Hefei: Hefei University of Technology,2016.)

[22] 李晓莉,岳彩鹏,王冰,等. 表面活性剂对大豆和花生茎叶吸收量的影响[J]. 贵州农业科学,2011,39(7):107-111. (Li X

L, Yue C P, Wang B, et al. Effects of surfactants on boron uptake by stems and leaves of soybean and peanut [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2011, 39(7): 107-111.)

[23] 叶小利,李学刚,陈时洪,等. 表面活性剂对大豆叶面气孔和蜡质层影响研究[J]. 大豆科学, 2000, 19(1): 49-56. (Ye X L, Li X G, Chen S H, et al. Influence of surfactants on stomatal and wax layers of soybean leaves[J]. Soybean Science, 2000, 19(1): 49-56.)

[24] 杨文杰,詹俊义,袁溢,等. 氨基酸络合钼肥对大豆幼苗生长发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 98-101. (Yang W J, Zan J Y, Yuan Y, et al. Effect of amino acid complexing molybdenum fertilizer on growth of soybean seedlings[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(12): 98-101.)

[25] 孟淑丹. 几种农药助剂在植物表面渗透吸收作用的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017. (Meng S D. Study on penetration and absorption of several pesticide additives on plant surface[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.)

[26] 李瑞海,黄启为,徐阳春,等. 不同配方叶面肥对辣椒生长的影响[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(2): 76-81. (Li R H, Huang Q W, Yang X C, et al. Effect of different formula foliar fertilizer on the growth of pepper[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(2): 76-81.)

[27] 樊俊. Nutrivant 叶面肥对油菜和小白菜产量品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. (Fan J. Effect of nutritant foliar fertilizer on yield and quality of rape and cabbage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.)

[28] 王强,王邦俊. 表面活性剂 PPJ 对小麦叶子吸收营养物质的影响[J]. 西南农业大学学报, 2001(2): 113-116. (Wang Q, Wang B J. Effect of surfactant PPJ on nutrient absorption of wheat leaves[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2001(2): 113-116.)

[29] 陈时洪,李学刚,蒲涛,等. 表面活性剂对硼和锰离子在棉叶上吸收的影响[J]. 西南农业大学学报, 2000(3): 263-265. (Chen S H, Li X G, Pu T, et al. Effect of surfactants on absorption of boron and manganese on cotton leaf[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2000(3): 263-265.)

[30] 李婷婷,胡钧铭,韦彩会,等. 水稻叶片营养吸收机制及专用叶面肥发展趋势[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 12-16. (Li T T, Hu J M, Wei C H, et al. Mechanism of leaf nutrient absorption in rice and development trend of special foliar [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2016, 44(12): 12-16.)

[31] 李燕婷,李秀英,肖艳,等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 162-172. (Li Y T, Li X Y, X Y, et al. Propagation mechanism of foliar fertilizer and its application [J]. Chinese Journal of Agricultural Sciences, 2009, 42(1): 162-172.)

[32] 李婷婷,何铁光,胡钧铭,等. 功能型叶面对杂交水稻叶片生理特性和产量的影响[J]. 杂交水稻, 2017(6): 55-58, 63. (Li T T, He T G, Hu J M, et al. Effects of functional foliar fertilizer on physiological characteristics and yield of hybrid rice leaves [J]. Hybrid Rice, 2017(6): 55-58, 63.)

[33] 高荣庆,陈海宁,胡兆平,等. 喷施叶面微肥对小白菜生长和品质的影响[J]. 北方园艺, 2013(23): 184-186. (Gao R Q, Chen H N, Hu Z P, et al. Effects of functional foliar fertilizer on physiological characteristics and yield of hybrid rice leaves [J]. Northern Gardening, 2013(23): 184-186.)

[34] 李瑞海,徐大兵,黄启为,等. 不同叶面肥配施对番茄生长特性的影响[J]. 中国蔬菜, 2008(6): 17-20. (Li R H, Xu D B, Huang Q W, et al. Effect of different foliar fertilizer application on tomato growth characteristics [J]. Chinese Vegetables, 2008(6): 17-20.)

[35] 李瑞海. 不同配方叶面对作物生长的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2008. (Li R H. Effect of foliar fertilizer on crop growth [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.)