江西农业大学学报 2019,41(4):641-648 http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis DOI:10.13836/j.jjau.2019074

谢晓梅,廖敏,方至萍,等.有机硅助剂协同对双季稻叶面喷施的氨基酸微量元素肥增效潜力初探[J].江西农业大学学报,2019,41(4):641-648.

有机硅助剂协同对双季稻叶面喷施的氨基酸微量元素肥增效潜力初探

谢晓梅[1,2],廖 敏[2*],方至萍[2],丁亚丽[2],陈树森[2],徐昌旭[3]

(1.浙江大学 环境与资源学院实验教学中心,浙江 杭州 310058;2.浙江大学 环境与资源学院/浙江省农业资源与环境重点实验室,浙江 杭州 310058;3.江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所,江西 南昌 330200)

摘要:为探究有机硅助剂协同对双季稻叶面喷施的在氨基酸微量元素肥增效潜力,选择江西省宜春市双季稻系统为研究对象,以农用有机硅和氨基酸微量元素叶面肥为研究材料,系统地比较早、晚稻施用添加不同体积分数的有机硅助剂的叶面肥后水稻叶片中微量元素锌(Zn)、锰(Mn)的含量、成熟期水稻相关的生长性状以及添加不同体积分数的有机硅助剂对肥液的理化性质的影响。结果表明:当有机硅助剂添加体积分数达到0.05%(胶束临界浓度)时,3次叶面肥喷施后,Zn、Mn在早、晚稻叶片中的含量均达到最大,与对照组相比,均提高了30%以上;同时早、晚稻的株高、稻草生物量、有效分蘖率、千粒质量及产量均达到最大,与对照组相比,其中早、晚稻的产量分别增长了13.76%、7.72%。有机硅助剂的对叶面肥的协同增效机制主要是通过改善肥液的界面性质,提高肥液在叶片的附着面积、附着量和附着时间实现,在试验设计的有机硅助剂添加的体积分数范围内,有机硅助剂添加的体积分数与肥液的表面张力、润湿直径或铺展面积呈显著相关,相关系数分别为-0.982($P<0.01$)、0.995($P<0.01$)、0.988($P<0.01$);随着有机硅助剂添加的体积分数的增大,肥液的干燥时间及其叶片最大持留量呈现出先增后减的趋势,最佳有机硅助剂添加量为体积分数0.05%,此时肥液在水稻叶片上的最大持留量分别较对照组增加了25.90%、88.79%。可见有机硅助剂的合理应用可显著促进水稻叶片对叶面肥中微量元素(Zn、Mn)的吸收利用,提高水稻产量,是叶面肥的有效增效剂。

关键词:有机硅助剂;氨基酸微量元素叶面肥;水稻;增效作用

中图分类号:S511.4+2;S146 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2286(2019)04-0641-08

A Primaty Study on the Synergistic Potentiality of Organosilicon Additive on Amino Acid Microelement Foliar Fertilizer Leaves in A Hybrid Rice Double-Cropping System

XIE Xiao-mei[1,2], LIAO Min[2*], FANG Zhi-ping[2], DING Ya-li[2], CHEN Shu-sen[2], XU Chang-xu[3]

(1.Experimental Teaching Center, College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou310058, China; 3.Institute of Soil & Fertilizer and Resource & Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

收稿日期:2019-04-02 **修回日期:**2019-05-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200800)

Project supported by National Key Research and Development Project(2016YFD0200800)

作者简介:谢晓梅(1970—),女,高级工程师,博士,主要从事环境科学与环境生态研究,orcid.org/0000-0003-1112-4386,xiexiaomei@zju.edu.cn;*通信作者:廖敏,研究员,博士,orcid.org/0000-0001-9078-204X,liaomin@zju.edu.cn。

Abstract: In order to explore the application potential of agricultural organosilicon additive for synergism of amino acid microelement foliar fertilizer in a hybrid rice double-cropping system, a field experiment was conducted with agricultural organosilicon additive and foliar fertilizer in the double-cropping areas in Yichun City of Jiangxi Province, China, which systematically compared the contents of trace elements zinc (Zn) and manganese (Mn) in rice leaves, the related growth characters of rice in the mature stage and its physicochemical properties after sprayed with fertilizer solution and different volume fractions of organosilicon additive. The results were as follows. When the addition volume fraction of organosilicon additive was equal to critical micelle concentration of organosilicon additive, i.e. 0.05%, the contents of Zn and Mn in the leaves of the early and late rice after sprayed with amino acid microelement foliar fertilizer three times were up to the maximum, which increased by more than 30% compared with the control. At the same time, the plant height, the straw biomass, the effective tillering rate, the 1 000-grain weight and the yield of the early and late rice reached the maximum, of which the yield of the early and late rice increased by 13.76% and 7.72%, respectively compared with the control. The mechanism of agricultural organosilicon additive for synergism of amino acid microelement foliar fertilizer was due to the fact that organosilicon additives making the interfacial properties of foliar fertilizersolution improved obviously, which could increase the attachment area, amount and time of fertilizer solution on rice leaves. The addition volume fraction of organosilicon additive was significant correlated withsurface tension, wetting diameter or spreading area, and the correlation coefficients were −0.982 (P<0.01), 0.995 (P<0.01) and 0.988 (P<0.01), respectively. With the increase of the volume fraction of the organic silicon additives, the trends of the drying time of foliar fertilizer solution and the maximum retention of foliar fertilizer solution on the rice leaves were increasefirst and then decreaseand the maximum values wereresponsedwiththe addition volume fraction of 0.05% organosilicon additive, the drying time and the maximum retentionon rice leaves for foliar fertilizer solution increased by 25.90%, 88.79%, respectively, compared with the control. Therefore, the rational application of organosilicon additives could significantly promote the uptake and utilization of trace elements (Zn, Mn) in foliar fertilizer by rice leaves, and increase the yield of rice. It is an effective synergist of foliar fertilizer.

Keywords: organosilicon additive; amino acid microelement foliar fertilizer' rice; synergism

微量元素叶面肥喷施能快速补充水稻生长所需的微量元素，这是由于叶片既可通过叶面气孔、表皮亲水小孔实现养分吸收，也可通过胞间连丝主动吸收叶面肥[1]，可见如何提高叶面肥在水稻叶片上的渗透性、延长其在叶片的持留时间是提高叶面肥使用效率及控制可能因叶面肥进入土壤-水体引起水环境的农业面源污染也显得十分必要。

有机硅助剂是一类表面活性剂，19世纪60年代研究发现，喷施的农药中添加有机硅助剂，可显著改善农药在植物叶面的浸湿、铺展与附着，大大增加了叶片上药滴的沉积持留，叶片上药滴的药效得到显著增强，据此有机硅助剂开始作为节约农药使用量的增效剂得到关注，至19世纪80年代，有机硅助剂农业商品化应用在国外开始逐步展开[2]。Silwet L-77是最早农用商品化的有机硅助剂，主要针对于除草剂增效[3]，相关研究[4]证明，除草剂草甘膦的喷施时添加有机硅助剂还可有效抑制Ca-草甘膦的生成，进一步提高草甘膦药效。此外，有关研究[5]证明有机硅助剂的添加可减少33%的烟嘧磺隆除草剂用量，还节省50%用水量；添加有机硅助剂可提高除草剂莠去津40%的防效[6]；同样在除草剂硝磺草酮或氟磺胺草醚中添加有机硅助剂可显著提高其鲜重防效和株防效[7-8]。目前国内相关研究与国外相似，主要集中在添加有机硅助剂促进农药(除草剂、杀虫剂)的药效上，但随着叶面肥的广泛应用与推广，对有机硅助剂在叶面肥增效方面的应用研究正日益受到关注，研究表明有机硅助剂对叶面肥增效的机制与对农药的增效机制基本一致，这意味着合理利用有机硅助剂在增效叶面肥的同时，也将有助于节省叶面肥的喷施量。

鉴于此，基于有机硅助剂可提升液滴在植物叶片表面的润湿、铺展以及药肥在叶片上的持留时间，

本研究通过大田试验,探究双季稻种植中不同体积分数有机硅助剂的添加对氨基酸微量元素叶面肥施用效果的影响,分析有机硅助剂对叶面肥的提效的潜力及其提效作用机制,以期为应用有机硅助剂作为叶面肥增效剂,减少叶面喷施肥料施用量,削减过度施肥带来的农业面源污染提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区与供试材料

研究区:田间试验位于东经115°07′04.41″,北纬28°16′15.79″的江西省宜春市上高县泗溪镇曾家村,区域属典型的亚热带季风气候,年平均气温17.6 ℃,年平均降水量1 718.4 mm,平均无霜期276 d。当地的种植模式为双季稻作区,其成土母质主要是第四纪红壤及河湖沉积物。

供试水稻品种:早稻品种:陵两优7717,属于籼型两系杂交水稻,全生育期111.5 d,适宜江西、湖南、浙江、安徽南部、湖北南部的双季稻区种植;晚稻品种:新两优611,属于晚籼两系杂交稻,全生育期118 d左右,适宜沿长江及江南稻区种植。

供试叶面肥:微量元素型氨基酸水溶肥,广西喷施宝股份有限公司生产,氨基酸≥110 g/L,锰(Mn)+锌(Zn)+硼(B)≥30 g/L。

有机硅助剂:乙氧基改性聚三硅氧烷,河北农迅生物科技有限公司生产,临界胶束浓度(CMC)=5.0×10^{-4} g/mL。

1.2　试验设计

早稻和晚稻种植期间(2017年3—11月),均设计6个不同有机硅助剂体积分数处理的氨基酸微量元素叶面肥喷施试验,每个有机硅助剂体积分数处理的叶面肥喷施试验设计3个重复小区,每个小区面积为2 001 m^2。叶面肥喷施时的6个不同的有机硅助剂体积分数的处理分别为0%(空白对照,CK)、0.01%(C1)、0.03%(C2)、0.05%(C3)、0.07%(C4)、0.10%(C5)。水稻移栽后20 d后,喷施不同体积分数的有机硅助剂处理的氨基酸微量元素叶面肥,,喷施间隔为1周,合计喷施3次。水稻种植期间常规养分管理具体为:早稻只施一次基肥,施肥量为N 148.35 kg/hm^2、P_2O_5 34.27 kg/hm^2、K_2O 65.36 kg/hm^2,在秧苗移栽前3 d 1次性撒施;而晚稻分2次施肥,即基肥和分蘖期追肥,基肥施用量与早稻一致,分蘖期追肥量为N 11.25 kg/hm^2、P_2O_5 4.91 kg/hm^2和K_2O 9.34 kg/hm^2,水稻生长期间的水分管理以及农药的使用同当地习惯。

1.3　植株样品的采集与叶片微量元素和水稻生长特性的测定

于每次喷施后的第6天,采集水稻植株鲜样,带回实验室,去离子水洗净,部分于60 ℃下烘干,并称量水稻植株干质量,之后保存,用于测定水稻叶片中微量元素含量,叶片中的微量元素含量以Zn和Mn为代表进行测定,3次喷施对应水稻叶片样品批次按时间先后顺序标注为Zn-1、Zn-2、Zn-3和Mn-1、Mn-2、Mn-3,叶片经干灰化-1:1硝酸溶解法提取,采用火焰原子吸收分光光度法测定Zn、Mn含量[9-10]。水稻成熟后,于田间测定水稻的株高、有效分蘖率和田间产量,之后,并于不同体积分数有机硅助剂处理区,随机采集十株水稻植株,用水洗净根系,带回实验室,于60 ℃下烘干,测定对应每穴的稻草的生物量及谷粒的千粒质量。

1.4　有机硅助剂添加下氨基酸微量元素叶面肥肥液的pH及界面性质的测定

取叶面肥喷施宝氨基酸微量元素叶面肥(有机水溶肥料)10 mL稀释1 500倍至15 L,使用时,分成若干份,按体积分数0、0.01%、0.03%、0.05%、0.07%、0.10%添加有机硅助剂,获得6种有机硅助剂体积分数肥液,分别测定其界面性质及pH值。

液肥pH:采用pH计测定。

表面张力:采用滴重法进行测定[11]。

干燥时间:采用液滴干燥法进行测定[12]。

润湿直径和铺展面积:于水稻叶片上,用移液枪喷洒添加了有机硅助剂的肥液30 μL,30 s后,测定肥液的铺展面积和润湿直径。

最大持留量(R_{MAX}):按方格状剪取水稻分蘖期叶片,测量并计算表面积(S),用天平称量出所剪叶片质量(M_1),随后,于添加了有机硅助剂的肥液中将水稻叶片浸入,10 s后取出叶片,至叶片无液滴下落

时，称出叶片质量（M_2）[7-8]。最大持留量计算如下：$R_{MAX}=(M_2-M_1)/2S$。

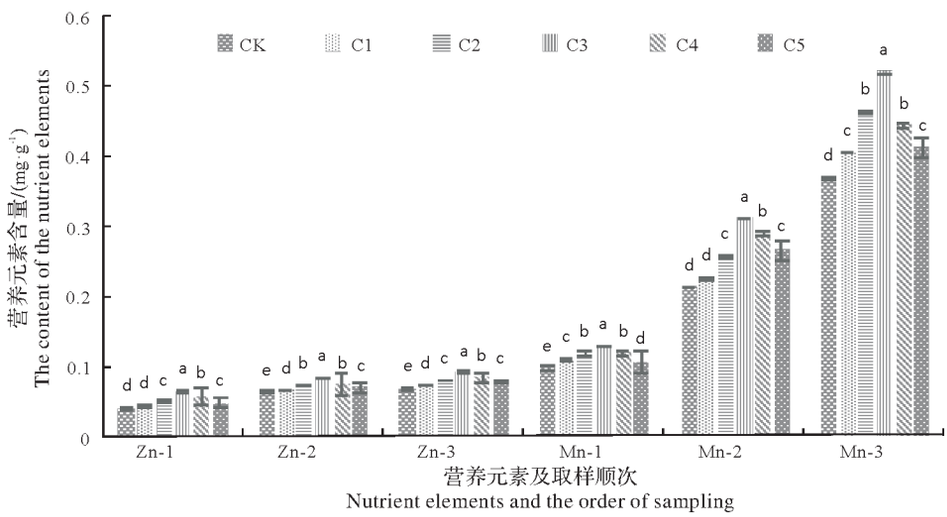
1.5 数据分析

试验数据采用Excel整理，数据的单因素方差分析（ANOVA）、相关性分析等统计分析采用SPSS Statistics 20软件。

2 结果与分析

2.1 有机硅助剂添加对水稻叶片吸收氨基酸微量元素叶面肥中Zn与Mn养分的影响

图1和图2是氨基酸微量元素叶面肥中添加有机硅助剂时水稻叶片吸收Zn与Mn养分的变化，结果表明，一定有机硅助剂用量下，随着添加有机硅助剂体积分数的增加，水稻叶片吸收氨基酸微量元素叶面肥中Zn、Mn养分效率逐渐增强，但添加有机硅助剂超过体积分数0.05%后，水稻叶片对吸收氨基酸微量元素叶面肥中Zn、Mn养分的吸收效率表现出逐渐减弱，最佳有机硅助剂添加体积分数为0.05%，其与有机硅助剂的临界胶束浓度一致。对早稻而言，对应3次喷施后第6天的时间节点，都是有机硅助剂添加体积分数为0.05%处理的叶片中Zn、Mn含量均为最大，Zn含量分别达到0.064 2，0.082 7，0.091 2 mg/g，Mn含量分别达到0.128 9，0.311 1，0.519 9 mg/g。Zn比照组分别增加56.59%、30.33%、33.92%，Mn比照组分别增加31.00%、45.92%、41.09%。对晚稻而言，对应第3次喷施后第6天的时间节点，同样都是有机硅助剂添加体积分数为0.05%处理的叶片中Zn、Mn含量均为最大，Zn含量分别达到0.079 2，0.093 7 mg/g，0.103 4 mg/g，Mn含量分别达到0.112 1，0.133 2，0.302 4 mg/g，Zn比照组分别增加42.19%、40.48%、42.03%，Mn比照组分别增加40.65%、39.33%、43.52%。可见，一定体积分数的有机硅助剂的添加到叶面肥中能显著提高微量元素的Zn、Mn在早稻和晚稻叶片中的积累，说明有机硅助剂的添加能显著促进水稻叶片对叶面肥的吸收，有效提高叶面肥的利用率。



不同字母表示处理间差异达到5%显著水平，下同

Different letters mean significant at 5% level among diffent treatment.The same as below

图1 有机硅助剂添加量对早稻叶片吸收氨基酸微量元素叶面肥中Zn、Mn养分的影响。

Fig.1 Effect of differentamount of organosilicon additive additiononuptake efficiency of nutrients of Zn and Mn in amino acid microelementfoliar fertilizer by early rice leaves

2.2 氨基酸微量元素叶面肥中添加有机硅助剂对水稻生物学特性的影响

表1是氨基酸微量元素叶面肥中添加不同剂量有机硅助剂对对双季稻区早晚稻成熟期的水稻生物学特性的影响，由表1可知，一定有机硅助剂用量下，随着有机硅助剂添加体积分数的增加，水稻的稻草生物量和谷物产量逐渐增加，但有机硅助剂用量超过一定体积分数后，稻草生物量和谷物产量开始下降，其变化趋势与有机硅助剂添加影响水稻叶片吸收微量元素叶面肥中Zn、Mn养分的结果一致，有机硅助剂添加对水稻生长最有利，添加量为体积分数0.05%，这一浓度也是与有机硅助剂的临界胶束浓度一致。有机硅助剂添加体积分数0.05%时，早晚稻的株高、稻草生物量、有效分蘖率、千粒质量及产量均最

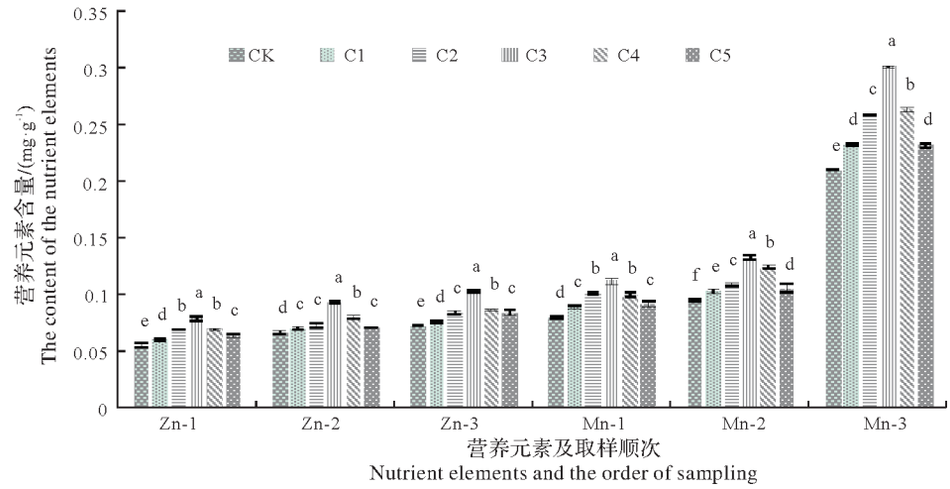


图2　有机硅助剂添加量对晚稻叶片吸收氨基酸微量元素叶面肥中Zn、Mn养分的影响

Fig.2　Effect of different amount of organosilicon additive addition on uptanke efficiency of nutrients of Zn and Mn in amino acid microelementfoliar fertilizer by late rice leaves

大,对应早稻株高、稻草生物量、有效分蘖率、千粒质量及产量分别为92.25 cm、26.73 g、79.50%、21.54 g、11 538.16 kg/hm^2,较对照组增加了2.22%、33.18%、8.90%、2.38%、13.67%;对应晚稻株高、稻草生物量、有效分蘖率、千粒质量及产量分别为102.00 cm、33.85 g、88.60%、19.83 g、10816.22 kg/hm^2,较对照组增加了4.08%、13.48%、5.14%、2.53%、7.72%。上述结果进一步说明添加适量的有机硅助剂能有效促进水稻叶片吸收叶面肥中养分,提高叶面肥利用率,保证水稻生长的微量元素养分需求,显著提高水稻株高、稻草生物量以及有效分蘖率、千粒质量及产量等生物学指标。

表1　氨基酸微量元素叶面肥中有机硅助剂添加量对水稻生物学特性的影响

Tab.1　Effect of different amount of organosilicon additive addition in amino acid microelementfoliar fertilizer on biological properties of rice

硅处理水平 Treatment level	早稻 Double early rice					晚稻 Double late rice				
	株高/cm Plant height	稻草生物量/g Above-ground biomass	有效分蘖率/% Effective tillering rate	千粒质量/g 1 000-Grain weight	产量/(kg·hm^{-2}) Grain yield	株高/cm Plant height	稻草生物量/g Above-ground biomass	有效分蘖率/% Effective tillering rate	千粒质量/g 1 000-Grain weight	产量/(kg·hm^{-2}) Grain yield
CK	90.25±0.96^{bc}	20.07±3.29^{b}	73.00±4.24^{a}	21.04±0.19^{b}	10 150.24±89.67^{d}	98.00±1.41^{d}	29.83±4.17^{a}	84.27±4.08^{a}	19.34±0.19^{b}	10 041.27±73.87^{d}
C1	91.75±1.50^{ab}	23.61±0.97^{ab}	74.50±5.45^{a}	21.09±0.25^{b}	10 260.69±35.18^{d}	99.75±0.50^{bcd}	32.38±1.95^{a}	85.90±7.52^{a}	19.54±0.14^{ab}	10 186.60±140.28^{c}
C2	92.00±0.82^{ab}	25.16±4.11^{a}	78.50±3.11^{a}	21.24±0.24^{ab}	11 234.36±125.41^{b}	101.50±1.29^{ab}	33.43±5.65^{a}	87.59±6.50^{a}	19.75±0.17^{ab}	10 473.00±47.73^{b}
C3	92.25±1.89^{a}	26.73±2.83^{a}	79.50±5.07^{a}	21.54±0.09^{a}	11 538.16±48.32^{a}	102.00±1.83^{a}	33.85±2.19^{a}	88.60±5.09^{a}	19.83±0.31^{a}	10 816.22±36.31^{a}
C4	88.50±0.58^{cd}	25.13±2.52^{a}	76.25±12.58^{a}	21.12±0.23^{b}	10 688.40±114.40^{c}	100.75±0.96^{abc}	31.48±2.17^{a}	85.06±4.86^{a}	19.47±0.30^{ab}	10 459.49±35.576^{b}
C5	86.75±1.71^{d}	23.70±3.01^{ab}	72.75±9.85^{a}	20.96±0.28^{b}	10 320.64±136.55^{d}	99.00±0.82^{cd}	30.86±4.73^{a}	84.21±4.92^{a}	19.45±0.35^{ab}	10 294.88±56.11^{c}

平均值±标准误差,n=3,同列不同字母表示LSD检验多重比较处理间差异显著(P<0.05),下同

Values in the table are mean±SE, n=3, different letters in the same column are significantly different at the 0.05 level by LSD, the same as below

2.3　有机硅助剂添加对氨基酸微量元素叶面肥中肥液pH及界面性质的影响

表2反映了不同有机硅助剂用量对肥液pH及界面性质的影响。结果显示,一定量的有机硅助剂添加将显著改变氨基酸微量元素叶面肥肥液的pH及界面性质,总体而言,在本论文设计的有机硅助剂添加的体积分数范围内,随着有机硅助剂添加的体积分数增加,氨基酸微量元素叶面肥肥液的表面张力逐步下降,肥液润湿直径、铺展面积与pH逐步增加,但其干燥时间表现出先增后减趋势。由表2可看出,有机硅助剂的体积分数添加0.10%(C5)时,氨基酸微量元素叶面肥肥液的表面张力降到最低,为31.61 mN/m,较未添加有机硅助剂的对照组下降了41.88%,此时,肥液润湿直径、铺展面积、pH分别变为0.43 cm、0.56 cm^2、6.70,

与对照组相比，分别增加34.38%、64.71%、2.60%，有机硅助剂添加的体积分数与肥液的表面张力、润湿直径、铺展面积或pH呈显著相关，相关系数分别为−0.982（$P<0.01$）、0.995（$P<0.01$）、0.988（$P<0.01$）及0.898（$P<0.05$）；对肥液干燥时间而言，干燥时间最大值出现在添加体积分数0.05%的有机硅助剂时，干燥时间达到43.65 min，与对照组相比，延长了25.90%。上述结果表明，添加有机硅助剂能显著改善肥液的界面特性，即显著降低肥液的表面张力，提高其润湿直径、铺展面积，使肥液滴易于铺展和附着在水稻叶片表面，延长干燥时间，提高氨基酸微量元素叶面肥肥液与水稻叶片的接触量与接触时间，进而提升叶片对氨基酸微量元素叶面肥的吸收效率。

表2 添加不同体积分数的有机硅助剂对肥液界面性质和pH的影响

Tab.2 Effects of addition of different volumefractionsoforganosilicon additive on interfacial properties and pH of spray fertilizerliquid

硅处理水平 Treatment level	表面张力/(mN·m⁻¹) Surface tension	干燥时间/min Drying time	润湿直径/cm Wetting diameter	铺展面积/cm² Spreading area	pH
CK	54.39±0.00^{a}	34.67±0.35^{a}	0.32±0.02^{d}	0.34±0.02^{d}	6.53±0.02^{e}
C1	47.16±0.00^{b}	36.55±0.63^{b}	0.33±0.01^{d}	0.36±0.01^{d}	6.61±0.02^{d}
C2	41.37±1.53^{c}	39.68±0.39^{b}	0.36±0.01^{c}	0.41±0.02^{c}	6.64±0.02^{cd}
C3	36.08±1.53^{c}	43.65±0.81^{c}	0.37±0.01^{c}	0.42±0.02^{c}	6.66±0.01^{bc}
C4	33.99±1.40^{d}	39.72±0.56^{d}	0.40±0.01^{b}	0.50±0.01^{b}	6.67±0.01^{b}
C5	31.61±1.17^{e}	35.98±0.38^{d}	0.43±0.01^{a}	0.56±0.01^{a}	6.70±0.02^{a}

图3是有机硅助剂添加量对氨基酸微量元素叶面肥在水稻叶片上最大持留量的影响。图3显示，肥液在水稻叶片上的最大持留量随有机硅助剂添加量的变化，与其对水稻叶片上肥液干燥时间的影响一致，即随着有机硅助剂添加量的增加，肥液在水稻叶片上的最大持留量呈现出先增加后降低的变化趋势，保持肥液最大持留量的最佳有机硅助剂添加量为体积分数0.05%，这也与有机硅助剂的临界胶束浓度一致。

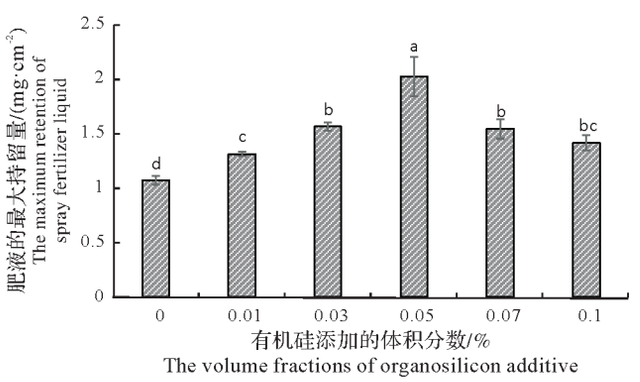


图3 添加不同体积分数的有机硅助剂对肥液在水稻叶片上的最大持留量的影响

Fig.3 Effect of different volumefractionsoforganosilicon additive on maximum retention of spray fertilizerliquid on rice Leaves

3 讨 论

影响叶面肥喷施利用率的因素诸多，如肥液的物理化学性质、植物吸收能力、环境气候等，而肥液的表面张力、润湿直径、干燥时间、扩展面积、最大持留量以及pH都是影响叶面肥利用率的重要理化及界面特性。已有研究[13−14]表明，通过添加农用助剂，可进一步改善和提升肥液在植物叶片表面的上述理化和界面特性，这是因为合理的农用助剂可调节肥液的表面张力、润湿直径以及肥液与植物叶片之间的接触角，从而提高肥液在叶片上的持有量、接触面积及有效吸收时间，进而提高叶面喷施肥液的肥效[15−16]。此外，已有研究[17−18]还发现，添加适量的有机硅助剂到叶面肥肥液中，可有效降低肥液的表面张力和接触角，从而增强肥液在植物叶片上的润湿能力和铺展能力，进而提升叶片上肥液的附着面积、附着时间和附着量，进而增加叶片对叶面肥肥液的吸收与利用效率，本研究的结果进一步说明了合适的添加有机硅助剂对提升叶片吸收叶面肥中的养分而言，表现出显著的增效作用，有机硅助剂添加改善叶面肥肥液的界面性质是其增效的主要作用机制。

研究表明36.7 mN/m是水稻叶面的临界表面张力，肥液要有效对水稻叶片进行润湿，其表面张力必须低于水稻叶面临界表面张力；另外，叶面肥液进入植物体的主要通道是气孔，当肥液的表面张力低于植物叶面临界表面张力时，肥液能通过气孔直接渗入叶片表皮，进而被植物吸收利用[17,19]。有机硅助剂

的添加虽然能有效延长肥液的干燥时间,但同时肥液表面张力的逐渐降低,肥液在叶面的铺展面积和润湿直径开始增大,形成较大的附着和覆盖,与接触空气的面积也随之增大,反过来会影响叶面上肥液的干燥时间,意味着并不是有机硅助剂添加量越大肥液的干燥时间会越长[11,14,16,20-21]。本研究前述结果说明,有机硅助剂添加量为临界胶束浓度时,水稻叶面上肥液的表面张力低于水稻叶面临界表面张力,同时最大持留量与干燥时间均为最大值,此时氨基酸微量元素叶面肥的吸收效果最佳,说明有机硅助剂的最佳增效用量主要受其临界胶束浓度的影响,上述结果进一步表明了添加合适的有机硅表面活性剂主要是通过改善肥液的界面性质,是有机硅助剂显著促进叶片吸收叶面肥中的养分的关键机制。据此可推知,在叶面喷施类的叶面肥等中,适量添加有机硅助剂可显著提高叶面肥利用效率,其核心机制是:添加有机硅助剂的可使肥液的表面张力显著降低,提升叶片上肥液的铺展面积与润湿直径,促进水稻叶片上肥液的附着和渗透吸收;同时添加延长叶面肥液的干燥时间和最大持留量,提升叶片对肥液的吸收时间与吸收量,进而提升叶片对肥液的利用效率。

综上可知,在农业生产实践中,有机硅助剂浓度按照临界胶束浓度添加到喷施的氨基酸微量元素肥液中,可最佳改善水稻叶面氨基酸微量元素叶面肥在附着时间、附着面积与最大持留量,最大量的避免叶面肥液的滴落损失,促进水稻叶片对叶面肥的吸收及提升对叶面肥的利用效率,实现水稻增产,并且该浓度的有机硅助剂对水稻植株无明显毒害作用,这说明有机硅助剂具有减少叶面喷施的农药与化肥的用量的潜力,其在农药及叶面肥增效与节本及削减因农药化肥的过量使用引起的农业面源污染领域具有广阔的应用前景。

4　结　论

在氨基酸微量元素叶面肥中添加一定量的有机硅助剂的能明显提高水稻叶片中Zn、Mn的积累量,其中当有机硅助剂的添加体积分数达到其胶束临界浓度时(0.05%),叶面肥3次喷施后的早、晚稻叶片中Zn、Mn的含量均达到最大,同时对应的早、晚稻的株高、稻草生物量、有效分蘖率、千粒质量及产量也均达到最大。

有机硅助剂的添加能明显改善肥液的界面性质,提高肥液在叶片的附着面积、附着量和附着时间,进而提高叶面对叶面肥的吸收效率,在试验设计的有机硅助剂添加的体积分数范围内,肥液的表面张力、润湿直径、铺展面积与有机硅助剂添加的体积分数呈显著相关关系。

肥液的干燥时间与其在水稻叶片上的最大持留量随着有机硅助剂添加的体积分数的增大呈现出先增后减的趋势,有机硅助剂的最佳添加体积分数与有机硅助剂的临界胶束浓度值一致,说明有机硅助剂的最佳增效用量主要受其临界胶束浓度的影响。

致谢:江西省宜春市上高县汇农种植业专业合作社提供试验场地,并在整个试验过程中为试验提供必要的支持与帮助。谨致谢意!

参考文献:

[1] 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,Xiao Y,et al.Advances in study on mechanism of foliar nutrition and development of foliar fertilizer application[J].Scientia Agricultura Sinica,2009,42(1):162-172.

[2] 廖洪流.有机硅助剂在农业中的应用进展[J].精细与专用化学品,2008,16(14):26-27.
Liao H L.Application advances of organosilicon additives in agriculture[J].Fine and Specialty Chemicals,2008,16(14):26-27.

[3] Ready K N,Singh M.Organosilicone -based adjuvants effects on glyphosate efficacy and rainfastness[J].Weed Technology,1992,6(2):361-365.

[4] Singh D,Singh M.Absorption and translocation of glyphosate with conventional and organosilicone adjuvants[J].Weed Biology and Management,2008,8(2):104-111.

[5] 郭继业,马云超,赵静红,等.有机硅助剂对烟嘧磺隆增效作用研究[J].化工科技,2013,21(3):48-50.
Guo J Y,Ma Y C,Zhao J H,et al.Research on synergism of organosilicone surfactants on nicosulfuron[J].Science & Technology in Chemical Industry,2013,21(3):48-50.

[6] 滕春红,张利斌,王谦玉,等.有机硅助剂对莠去津增效作用的研究[J].东北农业大学学报,2011,42(1):71-75.
Teng C H,Zhang L B,Wang Q Y,et al.Research on synergism of organosilicone adjuvants on atrazine[J].Journal of Northeast Agricultural University,2011,42(1):71-75.

[7] 张忠亮,李相全,王欢,等.六种有机硅助剂对氟磺胺草醚的增效作用及其增效机理初探[J].农药学学报,2015,17(1):115-118.
Zhang Z L,Li X Q,Wang H,et al.Preliminary studie s on synergism and mechanisms of six organosilicon additives on fomesafen[J].Chinese Journal of Pesticide Science,2015,17(1):115-118.

[8] 张靖,吕和平,曹立冬,等.六种喷雾助剂提高硝磺草酮防除稗草及反枝苋效果的作用机理初探[J].农药学学报,2015,17(3):348-356.
Zhang J,Lü H P,Cao L D,et al.Synergism of six spray adjuvants on me sotrione in controlling Echinochloa crus-galli and Amaranthus retroflexus[J].Chinese Journal of Pesticide Science,2015,17(3):348-356.

[9] 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.Effects of foliar fertilizer with surfactant addition on nutrient uptake and growth of cucumber seedling[J].Northern Horticulture,2008,12:60-61.

[10] 罗椿梅,邓丽,周芥锋,等.黑木耳、白木耳中锌、铁、铜、锰微量元素的测定[J].微量元素与健康研究,2015,32(5):27-28.
Luo C M,Deng L,Zhou J F,et al.Determination of trace elements of zinc iron copper manganese in the black fungus and white fungus[J].Studies of Trace Elements and Health,2015,32(5):27-28.

[11] 李亦松,王俊刚,王少山,等.甲酯化油助剂对氯虫苯甲酰胺在甘蓝叶片上沉积的影响[J].植物保护,2015,41(5):105-109.
Li Y S,Wang J G,Wang S S,et al.Impacts of methylated oil adjuvants on chlorantraniliprole spary droplet deposition rate on cabbage leaves[J].Plant Protection,2015,41(5):105-109.

[12] 鲁梅,王金信,王云鹏,等.除草剂助剂对药液物理性状及对磺草酮药效的影响[J].农药学学报,2004,6(4):78-82.
Lu M,Wang J X,Wang Y P,et al.The effect of herbicide adjuvants on the physical characteristics and the bioactivity of sulcotrione[J].Chinese Journal of Pesticide Science,2004,6(4):78-82.

[13] 苏少泉,耿贺利.茎叶除草剂的吸收与助剂的使用[J].农药,2002,41(4):9-14.
Su S Q,Geng H L.Absorption of herbicides and use of auxiliaries[J].Pesticide,2002,41(4):9-14.

[14] 刘辉,张利斌,陶波.药液表面张力和粘度对苯达松水剂生物活性及增效机理的影响[J].东北农业大学学报,2013,44(10):150-154.
Liu H,Zhang L B,Tao B.Influence of surface tension and liquid viscosity on biological activity of bentazon agent and its mechanism[J].Journal of Northeast Agricultural University,2013,44(10):150-154.

[15] Tann R S,Berger P D,Berger C H.Applications of dynamic surface tension to adjuvansand emulsion systems[J].Pesticide Formulations and Application Systems,2002,21(4):158-172.

[16] 张利斌,张庆贺,韩玉军,等.药液表面张力和黏度对草甘膦药效的影响及其机理研究[J].植物保护,2011,37(5):160-163.
Zhang L B,Zhang Q H,Han Y J,et al.Influences of surface tension and liquid viscosity on the eficacy of glyphosate and its mechanism[J].Plant Protection,2011,37(5):160-163.

[17] Burrow R F,Wallick D E,Schulz W J J.Surfactant blends containing organosilicone surfactants and diphenyl oxide sulfonate surfactants useful as agricultural adjuvants[P].EP1064844,2001.

[18] 卢向阳,徐筠,陈莉.几种除草剂药液表面张力、叶面接触角与药效的相关性研究[J].农药学学报,2002,4(3):67-69.
Lu X Y,Xu J,Chen L.Study on relationships between surface tension,contact angle and efficacy on weeds of several herbicide solutions[J].Chinese Journal of Pesticide Science,2002,4(3):67-69.

[19] 李小兵,刘莹.固体表面润湿性机理及模型[J].功能材料,2007,38(10):3919-3924.
Li X B,Liu Y.Wetting mechanisms and models on solid surfaces [J].Functional Materials,2007,38(10):3919-3924.

[20] Menzel F,Smith J E,Chandler P J.The sciarid fauna of the British Isles (Diptera:Sciardae),including descriptions of six new species[J].Zoological Journal of the Linnean Society,2006,146(1):146-147.

[21] Hurley B P,Slippers B,Coutinho T A,et al.Molecular detection of fungi carried by Bradysia difformis (Sciaridae:Diptera) in South African forestry nurseries[J].Southern Hemisphere Forestry Journal,2007,69(2):103-109.