

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180585

王亚虹, 韩丹, 高森, 曹丽君, 王晓丽, 牛桂言, 任志广, 许自成. 表面活性剂辅助钾肥喷施对烤烟叶片润湿性能、生理指标及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1663–1671

WANG Y H, HAN D, GAO S, CAO L J, WANG X L, NIU G Y, REN Z G, XU Z C. Effects of spraying potassium fertilizer with surfactant on wettability, physiology and quality indexes of flue-cured tobacco[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1663–1671

## 表面活性剂辅助钾肥喷施对烤烟叶片润湿性能、 生理指标及品质的影响\*

王亚虹<sup>1</sup>, 韩丹<sup>1</sup>, 高森<sup>1</sup>, 曹丽君<sup>2</sup>, 王晓丽<sup>2</sup>, 牛桂言<sup>1</sup>, 任志广<sup>1</sup>, 许自成<sup>1\*\*</sup>

(1. 河南农业大学烟草学院 郑州 450002; 2. 湖北省烟草公司襄阳市公司 襄阳 441003)

**摘要:** 为提高烟叶钾肥利用率及改善烟叶品质, 以烤烟品种‘K326’为材料, 利用接触角法测定了烟叶的临界表面张力; 选取蔗糖脂肪酸酯、茶皂素、洗衣粉 3 种表面活性剂, 利用表面张力法确定其临界胶束浓度; 以喷施清水和单独喷施钾肥为对照, 分别在钾肥中加入 3 种表面活性剂进行大田喷施试验(CK: 喷施清水; CK1: 喷施钾肥; T1: 喷施钾肥+蔗糖脂肪酸酯; T2: 喷施钾肥+茶皂素; T3: 喷施钾肥+洗衣粉), 测定不同生育期不同处理烟叶钾含量、抗氧化酶活性以及质体色素含量, 并对烤后烟叶进行化学成分测定, 研究了表面活性剂辅助钾肥喷施对烤烟润湿性能、生理指标及烤后烟叶品质的影响。结果表明: 1) 烟叶临界表面张力为  $30.41 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , 属于临界表面张力较低的叶片, 较难被液体润湿。表面活性剂蔗糖脂肪酸酯和茶皂素的临界胶束浓度为  $1\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 对应的表面张力值为  $32.64 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $40.33 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , 而洗衣粉浓度  $2\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时的表面张力最接近烟叶的临界表面张力, 对应的表面张力值为  $30.30 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。加入表面活性剂后, 钾肥溶液表面张力显著降低, 润湿性能增加。2) 表面活性剂促进了烟叶对钾肥的吸收。与单独喷施钾肥相比, 加入表面活性剂后, 烟叶生长过程中钾含量提高, 其中 T1、T2 处理 4 个生育期烟叶钾含量均高于 CK1 处理。表面活性剂辅助钾肥喷施不同程度提高了烟叶 SOD、POD 酶活性, 降低了 MDA 含量, 烟叶抗氧化能力增强, 膜脂过氧化程度降低, 烟株抗逆性增强。此外, 加入表面活性剂后, 烟叶功能盛期叶绿素含量、类胡萝卜素含量提高, 进而增强了烟叶的光合作用, 有利于光合产物的合成和积累。3) 加入表面活性剂后, 烤后烟叶总氮和烟碱含量降低, 钾含量和总糖、还原糖含量升高, 化学成分更协调, 烟叶品质更加优异。综合来看, 添加蔗糖脂肪酸酯处理在提高烟叶润湿性能、促进钾肥吸收以及改善烟叶生理指标、提升品质方面效果最佳。

**关键词:** 表面活性剂; 钾肥; 烤烟; 润湿性能; 生理指标; 品质

中图分类号: S572 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)11-1663-09

## Effects of spraying potassium fertilizer with surfactant on wettability, physiology and quality indexes of flue-cured tobacco\*

WANG Yahong<sup>1</sup>, HAN Dan<sup>1</sup>, GAO Sen<sup>1</sup>, CAO Lijun<sup>2</sup>, WANG Xiaoli<sup>2</sup>, NIU Guiyan<sup>1</sup>,  
REN Zhiguang<sup>1</sup>, XU Zicheng<sup>1\*\*</sup>

(1. College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Xiangyang Branch Station, Hubei

\* 中国烟草总公司湖北省公司重点科技攻关项目(027Y2016-007)资助

\*\* 通信作者: 许自成, 主要从事烟草品质生态学研究。E-mail: zichengxu@126.com

王亚虹, 主要从事烟草品质生态与质量评价研究。E-mail: yhwang30@126.com

收稿日期: 2018-06-25 接受日期: 2018-07-16

\* This work was supported by the Scientific Program of Hubei Province Corp. of China National Tobacco Corp. (027Y2016-007).

\*\* Corresponding author, E-mail: zichengxu@126.com

Received Jun. 25, 2018; accepted Jul. 16, 2018

Provincial Tobacco Company, Xiangyang 441003, China)

**Abstract:** The ‘K326’ flue-cured tobacco variety was used to investigate the improvement of potassium fertilizer utilization and quality of tobacco leaf under combined application of surfactant and potassium fertilizer. While in the study the contact angle method was used to determine critical surface tension of tobacco leaf, the study critical micelle concentrations of surfactants of sucrose fatty acid ester, tea saponin and washing powder were measured by using surface tension method. By spraying water and potassium fertilizer as the control, the 3 surfactants were added to potassium fertilizer in the field spraying test. In the experiment, CK was the control involving water, CK1 was the control involving potassium fertilizer, T1 was the treatment involving potassium fertilizer plus sucrose fatty acid ester, T2 was the treatment involving potassium fertilizer plus tea saponin, and T3 was the treatment involving potassium fertilizer plus washing powder. The potassium content, antioxidant enzymes activities and plastid pigments contents of tobacco leaves in 5 treatments in different times were measured, and the chemical constituents of flue-cured tobacco leaf were determined. The effects of spraying potassium fertilizer with surfactant on the wettability, physiology and quality indexes of flue-cured tobacco leaf were determined. The results indicated that: 1) critical surface tension of tobacco leaf was  $30.41 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$  indicating lower wettability of tobacco leaf. The critical micelle concentrations (CMC) of sucrose fatty acid ester and tea saponin were  $1\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $5\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , with corresponding surface tensions of  $32.64 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$  and  $40.33 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , respectively. When washing powder concentration was  $2\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , its surface tension ( $30.30 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ) was close to the critical surface tension of tobacco leaf. Under the addition of surfactant, the surface tension of potassium fertilizer solution decreased significantly while the wettability increased. 2) Surfactants promoted the absorption of potassium in tobacco leaf. Potassium contents under T1 and T2 treatments were higher than under CK1 during the growth period of tobacco. Application of potassium fertilizer with surfactant increased the activities of SOD and POD and decreased MDA content in tobacco leaf. This increased antioxidant capacity of tobacco leaf and reduced membrane lipid peroxidation. Also after the addition of surfactant, chlorophyll and carotenoid contents of tobacco leaf increased at the peak function stage. This enhanced photosynthesis of tobacco leaf which in turn was conducive for the synthesis and accumulation of photosynthetic products. 3) With the addition of surfactant, the contents of total nitrogen and nicotine decreased, while those of potassium, total sugar and reducing sugar increased in flue-cured tobacco leaf. The chemical constituents were more harmonious and the quality of tobacco leaf better. In summary, the addition of sucrose fatty acid ester had the best effect in terms of improving wettability of tobacco leaf, absorption of potassium fertilizer, physiology of tobacco and quality of tobacco leaf.

**Keywords:** Surfactant; Potassium fertilizer; Flue-cured tobacco; Leaf wettability; Physiology; Quality

在所有营养元素中,烟草(*Nicotiana tabacum* L.)对钾元素的吸收量最大<sup>[1]</sup>。钾不仅是多种酶的催化剂,与烟株光合作用、呼吸作用等生理活动密切相关,并且对烟株的抗逆性也有积极作用<sup>[2]</sup>。研究指出,施用钾肥可以显著增加作物叶绿素含量、可溶性蛋白含量,提高SOD、POD、CAT等抗氧化酶活性,降低MDA含量,减轻叶片膜脂过氧化程度,提高植株抗氧化能力、延缓衰老<sup>[3]</sup>。此外,钾含量高的烟叶成熟度好,化学成分协调,燃烧性佳,且香气量足、焦油量少<sup>[1]</sup>。生产上通常采用增施钾肥的方法来提提高烤后烟叶的品质。与根部传统施肥不同,叶面肥具有针对性强、养分吸收快、养分利用率高、施用方法简单、对环境污染小等特点,已在烟草等需钾作物生产中作为补钾措施广泛使用<sup>[4-5]</sup>。

植物叶表皮细胞外壁覆盖有蜡质层和角质层<sup>[4]</sup>,对叶面肥吸收具有阻碍作用。已有研究指出,烟叶表面蜡质主要是烷烃类物质,蜡质层虽然平滑、无裂痕,属于薄膜状蜡质<sup>[6]</sup>,但其临界表面张力仍较低,属于低能表面,较难被水润湿<sup>[7]</sup>。因此,许多叶面肥、农药不能很好地在烟叶表面润湿,从而影响

了吸收效率。表面活性剂作为农药、叶面肥中的常用助剂,在浓度较低时即可显著降低喷施液的表面张力,有效改变植物叶片的润湿性能,具有很好的助吸功能<sup>[4]</sup>。例如,表面活性剂TBP、DESU、DES对小麦(*Triticum aestivum* L.)叶片吸收赤霉素有显著的促进作用<sup>[8]</sup>。表面活性剂SAA能增进芥蓝(*Brassica alboglabra* L. H. Bailey)叶片对甲硫氨酸的吸收效果,促进脂肪族芥子油苷的合成和积累<sup>[9]</sup>。早在20世纪90年代已有研究指出,在抑芽敏中添加表面活性剂洗衣粉,可以提高烤烟的抑芽效果并起到增产作用<sup>[10]</sup>。虽然表面活性剂在叶面肥、农药中的应用已有大量研究,但目前有关表面活性剂对烟叶钾肥的吸收效果鲜有报道。本研究选取3种不同表面活性剂辅助钾肥喷施,研究了其对烟叶润湿性能、钾元素吸收、生理指标以及烤后烟叶品质的影响,旨在为提高烟草叶面营养提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用钾肥为磷酸二氢钾,3种表面活性剂分

别为蔗糖脂肪酸酯、茶皂素和洗衣粉, 供试烤烟品种为‘K326’。田间试验于2016年在湖北省襄阳市南漳县薛坪镇(111°39'E, 31°42'N, 海拔677.37 m)试验田进行。试验田为壤土, pH为7.58, 碱解氮为121.53 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾为182 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效磷为29.95 mg·kg<sup>-1</sup>, 有机质为33.57 g·kg<sup>-1</sup>。

## 1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组试验设计, 共设置5个处理: CK, 喷施清水; CK1, 喷施钾肥; T1, 钾肥+蔗糖脂肪酸酯; T2, 钾肥+茶皂素; T3, 钾肥+洗衣粉。钾肥选择KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 浓度5 000 mg·L<sup>-1</sup>, 蔗糖脂肪酸酯、茶皂素的浓度均为各自的临界胶束浓度1 000 mg·L<sup>-1</sup>、5 000 mg·L<sup>-1</sup>, 洗衣粉浓度为最接近烟叶临界表面张力时的浓度2 000 mg·L<sup>-1</sup>。每个处理设3次重复, 每小区面积130 m<sup>2</sup>, 四周设保护行。田间种植行距110 cm, 株距55 cm, 留叶数18~19片。各处理于团棵期(移栽后30 d)进行第1次喷施, 以后每隔15 d喷施1次, 共喷施4次。每次分别在烟叶正反面喷施, 以叶面湿露不滴水为准。5月10日移栽, 9月15日采烤结束。

试验区施肥情况为: 纯氮52.5 kg·hm<sup>-2</sup>, N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O为1:1.5:5。田间管理措施均按当地烤烟生产技术规程进行。

## 1.3 测试样品的采集

选取团棵期未进行处理的中部叶片进行烟叶临界表面张力的测定。分别于每次处理后15 d(移栽后45 d、60 d、75 d、90 d)进行取样, 取样结束后当天进行下一次的叶面喷施处理。每个处理选取3株代表烟株, 采集中部烟叶6片, 用清水冲洗数遍, 每片叶去除主侧脉后取1/2混合用锡箔纸包裹, 迅速放置于液氮罐中带回实验室进行生理指标测定, 剩余1/2叶杀青烘干后, 过60目筛用于钾含量测定。各处理取烤后C3F原烟1.5 kg, 用于烟叶常规化学成分分析。

## 1.4 测定方法

表面活性剂临界胶束浓度利用表面张力法测定: 分别配制蔗糖脂肪酸酯、茶皂素、洗衣粉的水溶液, 使其浓度分别为10 mg·L<sup>-1</sup>、20 mg·L<sup>-1</sup>、50 mg·L<sup>-1</sup>、100 mg·L<sup>-1</sup>、200 mg·L<sup>-1</sup>、500 mg·L<sup>-1</sup>、1 000 mg·L<sup>-1</sup>、2 000 mg·L<sup>-1</sup>、5 000 mg·L<sup>-1</sup>和10 000 mg·L<sup>-1</sup>。利用全自动表面张力仪(QBZY-2), 测定不同浓度下3种溶液的表面张力, 同一浓度平行测定3次取平均值, 用表面张力与浓度的对数作图, 在表面吸附达到饱和时, 曲线出现转折点, 该点的浓度即为表面活性剂的临界胶束浓度。此外, 利用全自动表面张力仪测定大田不同喷施溶液的表面张力值。

烟叶临界表面张力的测定: 烟叶临界表面张力采用接触角法测定<sup>[11]</sup>。采集团棵期新鲜烟叶, 剪成1 cm<sup>2</sup>左右的小方块, 固定于载玻片上并放置于接触角测定仪(JCY系列)载物台上, 不接触待测叶片表面, 避免破坏烟叶表面结构。分别选取不同浓度的蔗糖脂肪酸酯水溶液(蔗糖脂肪酸酯浓度分别为10 mg·L<sup>-1</sup>、20 mg·L<sup>-1</sup>、50 mg·L<sup>-1</sup>、100 mg·L<sup>-1</sup>、200 mg·L<sup>-1</sup>, 对应的表面张力为70.15 mN·m<sup>-1</sup>、66.84 mN·m<sup>-1</sup>、53.22 mN·m<sup>-1</sup>、42.97 mN·m<sup>-1</sup>、37.66 mN·m<sup>-1</sup>), 将相同体积的不同液体滴到叶片表面形成液滴, 通过与接触角测定仪连接的电脑分析软件得到不同的接触角数据, 每种溶液平行测定5次。通过不同溶液在烟叶表面的接触角 $\theta$ , 用 $\cos\theta$ 对溶液表面张力作图, 当接触角 $\theta=0$ 即 $\cos\theta=1$ 时对应的表面张力值即为烟叶的临界表面张力值。

烟叶生理指标测定: 鲜烟叶叶绿素和类胡萝卜素含量采用乙醇浸提比色法测定<sup>[12]</sup>, 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定<sup>[13]</sup>, 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定<sup>[13]</sup>, 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸加热显色法测定<sup>[12]</sup>, 烟叶钾含量采用火焰光度法测定<sup>[14]</sup>。

## 1.5 数据分析

数据处理采用Microsoft Excel 2016, 方差分析采用SPSS 23.0, 多重比较选用最小显著差异法(LSD)。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面活性剂对烤烟叶片润湿性能的影响

#### 2.1.1 烤烟叶片临界表面张力

不同表面张力的液体在烤烟叶片上的接触角度数及其对应的 $\cos\theta$ 测定结果见表1。可以看出, 随着液体表面张力的减小, 接触角随之减小。根据 $\cos\theta$ 和溶液的表面张力做图1, 所得直线为 $y=-0.018 2x+1.553 4$ , 令 $\cos\theta=1$ , 求得表面张力为30.41 mN·m<sup>-1</sup>, 该值即为烤烟叶片的临界表面张力值。

表 1 不同表面张力的液体在烤烟叶片表面的接触角  
Table 1 The contact angle of different surface tension liquids on surface of flue-cured tobacco leaves

蔗糖脂肪酸酯浓度 Concentration of sucrose fatty acid ester (mg·L <sup>-1</sup> )	表面张力 Surface tension (mN·m <sup>-1</sup> )	接触角 $\theta$ Contact angle (°)	$\cos\theta$
10	70.15	74.93	0.26
20	66.84	68.53	0.37
50	53.22	55.18	0.57
100	42.97	39.10	0.78
200	37.66	29.54	0.87

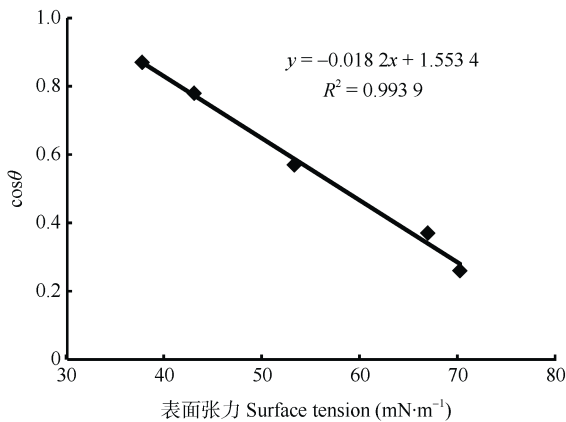


图 1 不同表面张力的液体在烤烟叶片表面的接触角余弦值  
Fig. 1 The contact angle cosine values of different surface tension liquids on surface of flue-cured tobacco leaves

### 2.1.2 表面活性剂临界胶束浓度

3种表面活性剂在10个浓度下的表面张力值见表2。可以看出,随着表面活性剂溶液浓度的增加,表面张力逐渐下降,当蔗糖脂肪酸酯、茶皂素浓度达到一定值时,表面吸附达到饱和,表面张力值出现拐点。洗衣粉溶液在所测定的浓度范围内,表面张力值随着浓度的增加持续下降,未出现明显拐点,说明其临界胶束浓度并未在所测定的10个浓度内。结果表明,蔗糖脂肪酸酯临界胶束浓度为1 000 mg·L<sup>-1</sup>,对应的表面张力值为32.64 mN·m<sup>-1</sup>;茶皂素临界胶束浓度为5 000 mg·L<sup>-1</sup>,对应的表面张力值为40.33 mN·m<sup>-1</sup>;而洗衣粉溶液浓度为2 000 mg·L<sup>-1</sup>时的表面张力最接近烟叶的临界表面张力,为30.30 mN·m<sup>-1</sup>。

表 2 3种表面活性剂不同浓度下的表面张力值

Table 2 The surface tension vales of three surfactants at different concentrations

表面活性剂浓度 Surfactant concentration (mg·L <sup>-1</sup> )	浓度对数 Concentration logarithm	表面张力 Surface tension (mN·m <sup>-1</sup> )		
		蔗糖脂肪酸酯 Sucrose fatty acid ester	茶皂素 Tea saponin	洗衣粉 Washing powder
10	1.0	70.15	70.91	71.41
20	1.3	66.84	64.51	64.36
50	1.7	53.22	61.30	57.59
100	2.0	42.97	58.38	52.80
200	2.3	37.66	55.28	44.99
500	2.7	34.43	47.19	36.12
1 000	3.0	32.64	43.47	31.69
2 000	3.3	33.07	41.91	30.30
5 000	3.7	35.01	40.33	29.17
10 000	4.0	34.72	41.22	28.23

### 2.1.3 表面活性剂对喷施液表面张力的影响

表 3 为各喷施液表面张力值,可以看出,5 000 mg·L<sup>-1</sup> 钾肥溶液(CK1)表面张力明显超过烤烟叶片的临界表面张力(30.41 mN·m<sup>-1</sup>),润湿性能较差。加

表 3 大田各处理喷施液表面张力值差异比较

Table 3 Comparison of the surface tensions of spraying liquids of 5 treatments

处理 Treatment	喷施液表面张力 Surface tension of spraying liquid (mN·m <sup>-1</sup> )
CK	72.26±0.07a
CK1	72.44±0.02a
T1	28.42±0.78c
T2	42.13±1.05b
T3	27.83±0.03c

CK: 喷施清水; CK1: 喷施钾肥; T1: 喷施钾肥+蔗糖脂肪酸酯; T2: 喷施钾肥+茶皂素; T3: 喷施钾肥+洗衣粉。同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。CK: spraying water; CK1: spraying potassium fertilizer; T1: spraying potassium fertilizer + sucrose fatty acid ester; T2: spraying potassium fertilizer + tea saponin; T3: spraying potassium fertilizer + washing powder. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at  $P < 0.05$  level.

入表面活性剂后可以明显降低钾肥溶液的表面张力,T1、T2、T3处理喷施液表面张力值与CK1差异显著,分别比CK1降低60.77%、41.84%、61.58%,润湿性能得到极大改善。其中T1、T3处理的表面张力已降低到烟叶的临界表面张力以下,理论上已可以完全润湿烟叶。

### 2.2 表面活性剂对烤烟叶片钾吸收的影响

添加 3 种表面活性剂后喷施钾肥对不同时期烟叶钾吸收均有促进作用(表 4)。4 个时期烟叶钾含量均表现为 CK 显著最低,说明喷施钾肥对提高烟叶钾含量有显著作用。T1 处理在 4 个时期烟叶钾含量均显著高于 CK1 处理,分别增加 5.15%、15.89%、5.56%和 5.85%。T2 处理在不同时期烟叶钾含量虽高于 CK1 处理,但未达到显著水平。除移栽后 75 d 外,T3 处理烟叶钾含量也高于 CK1 处理,其中在移栽后 45 d 时,差异显著。另外,随着烤烟生育期的推进,烟叶钾含量呈下降趋势。

表 4 不同喷施处理对不同时期烤烟叶钾含量的影响

Table 4 Potassium contents of flue-cured tobacco leaves at different periods under different spraying treatments

处理 Treatment	烟叶钾含量 Potassium content of flue-cured tobacco leaf (%)			
	移栽后 45 d 45 days after transplanting	移栽后 60 d 60 days after transplanting	移栽后 75 d 75 days after transplanting	移栽后 90 d 90 days after transplanting
CK	2.86±0.04c	2.48±0.06c	1.91±0.03c	1.82±0.03c
CK1	2.91±0.03bc	2.58±0.06b	1.98±0.04b	1.88±0.03b
T1	3.06±0.07a	2.99±0.03a	2.09±0.03a	1.99±0.02a
T2	2.96±0.04b	2.62±0.02b	1.99±0.04b	1.92±0.05b
T3	3.10±0.04a	2.63±0.03b	1.94±0.02bc	1.93±0.03ab

CK: 喷施清水; CK1: 喷施钾肥; T1: 喷施钾肥+蔗糖脂肪酸酯; T2: 喷施钾肥+茶皂素; T3: 喷施钾肥+洗衣粉。同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。CK: spraying water; CK1: spraying potassium fertilizer; T1: spraying potassium fertilizer + sucrose fatty acid ester; T2: spraying potassium fertilizer + tea saponin; T3: spraying potassium fertilizer + washing powder. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at  $P < 0.05$  level.

### 2.3 表面活性剂对烤烟叶片生理指标的影响

#### 2.3.1 对 SOD 活性的影响

各处理烟叶SOD酶活性均高于对照CK, 且T1、T2、T3处理又不同程度高于单独喷施钾肥的CK1处理(图2)。不同处理相比, 以T1的酶活性最高。不同生育期T1比CK1分别增加33.54  $U \cdot g^{-1}$ 、42.16  $U \cdot g^{-1}$ 、72.67  $U \cdot g^{-1}$ 和54.28  $U \cdot g^{-1}$ , 提高幅度为14.22%、12.81%、23.91%和16.54%。T2、T3处理烟叶SOD酶活性在不同生育期虽然高于CK1处理, 但只有移栽后90 d的T2处理与CK1差异达显著水平。从整个生育期来看, 移栽后45 d烟叶SOD活性最低, 移栽后60 d SOD活性升高随后趋于稳定。

#### 2.3.2 对 POD 活性的影响

烤烟叶片POD活性随着烟株生长呈现不断上升趋势(图2)。与对照CK相比, 单独喷施钾肥CK1处理可以不同程度提高叶片POD活性。移栽后45 d, 3种表面活性剂酶促作用差异不显著, 但均显著高于CK1处理; 移栽后60 d, T2处理酶活性最高, 几乎可达CK1处理的2倍; 移栽后75 d, T1、T2、T3处理POD活性显著高于CK1处理, 分别高出25.11%、21.31%和14.14%; 移栽后90 d, 只有T1处理与CK1差异显著。

#### 2.3.3 对 MDA 含量的影响

各生育期烟叶MDA含量均表现为对照CK最高, 按4个时期MDA含量平均值大小排序, 表现为: CK>CK1>T2>T3>T1(图2)。MDA含量最高的时期为移栽后90 d, 说明此时期烟叶已经进入成熟期, 衰老程度加剧, 膜脂过氧化程度也相应增加。可以看出, 喷施钾肥可以在烟株成熟期显著降低叶片MDA含量, 其中T1处理MDA含量显著低于CK1处理, 而T2、T3处理略低于CK1, 差异不显著。

#### 2.3.4 对质体色素含量的影响

移栽后45~90 d, 随着烟叶的生长发育, 叶绿素含

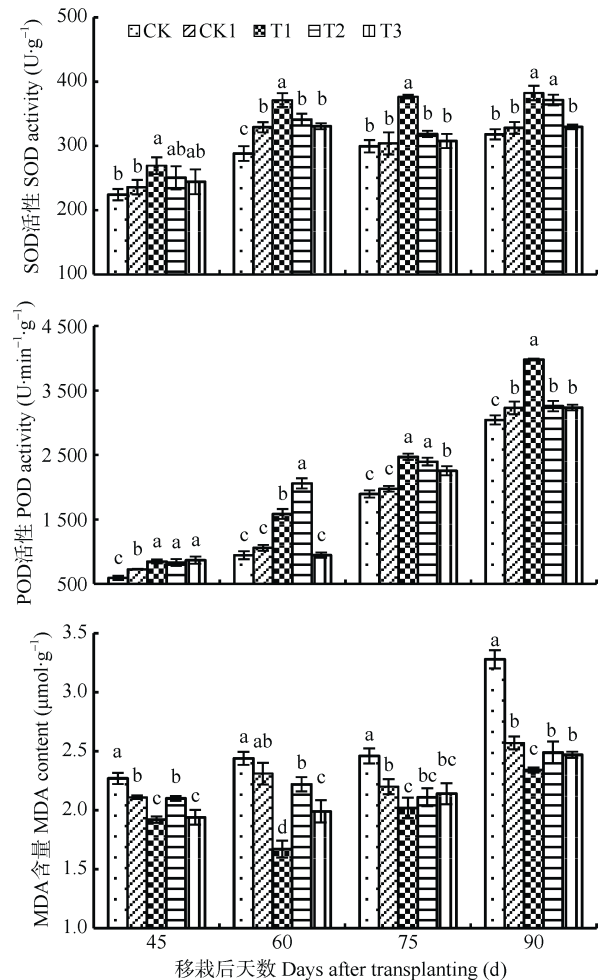


图 2 不同喷施处理对不同时期烤烟叶片 SOD、POD 活性及 MDA 含量的影响

Fig. 2 SOD, POD activities and MDA content of flue-cured tobacco leaves at different periods under different spraying treatments

CK: 喷施清水; CK1: 喷施钾肥; T1: 喷施钾肥+蔗糖脂肪酸酯; T2: 喷施钾肥+茶皂素; T3: 喷施钾肥+洗衣粉。不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。CK: spraying water; CK1: spraying potassium fertilizer; T1: spraying potassium fertilizer + sucrose fatty acid ester; T2: spraying potassium fertilizer + tea saponin; T3: spraying potassium fertilizer + washing powder. Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$  level.

量呈下降趋势, 从移栽后 60 d 开始, 叶绿素含量下降迅速而后期下降缓慢(图 3)。在移栽后 45 d, 各处理间叶绿素含量差异较大, T1、T2、T3 处理明显高于 CK、CK1 处理, 具体表现为 T2>T1>T3>CK1>CK。而在移栽 75 d 后, 各处理间叶绿素含量差异逐渐缩小, 移栽

后 90 d, 各处理间几乎无差异。同样, 类胡萝卜素含量的变化趋势与叶绿素相一致, 随着叶片成熟, 类胡萝卜素含量不断下降(图 3)。在移栽 60 d 之前, 以 T2 处理叶片类胡萝卜素含量最高, 随后 T2 处理类胡萝卜素含量迅速下降, 在 75 d 时含量略低于 T1、T3 处理。

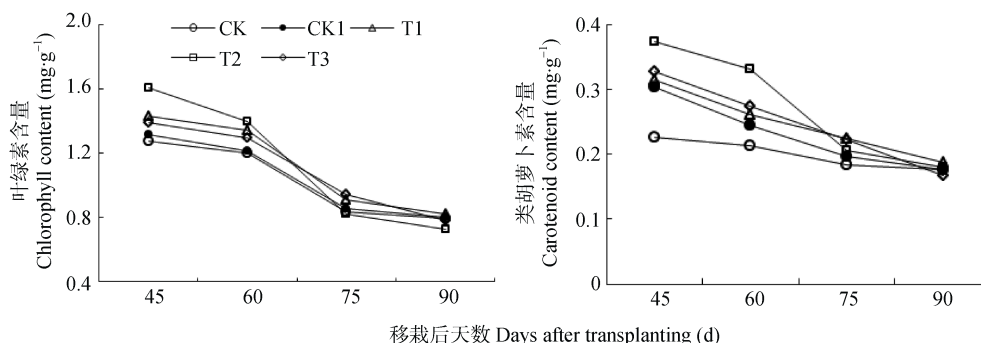


图 3 不同喷施处理对不同时期烤烟叶片叶绿素、类胡萝卜素含量的影响

Fig. 3 Chlorophyll and carotenoid contents of flue-cured tobacco leaves at different periods under different spraying treatments  
 CK: 喷施清水; CK1: 喷施钾肥; T1: 喷施钾肥+蔗糖脂肪酸酯; T2: 喷施钾肥+茶皂素; T3: 喷施钾肥+洗衣粉. CK: spraying water; CK1: spraying potassium fertilizer; T1: spraying potassium fertilizer + sucrose fatty acid ester; T2: spraying potassium fertilizer + tea saponin; T3: spraying potassium fertilizer + washing powder.

2.4 不同处理对烤后烟叶常规化学成分的影响

由表5可知, 与CK相比, 各喷施处理均提高了烤后烟叶钾含量, 其中T1、T2处理钾含量显著高于单独喷施钾肥的CK1, 分别增加9.50%、5.59%。国际型优质烟叶还原糖含量范围为16%~22%、总糖含量范围为18%~24%<sup>[15]</sup>, 除T3处理外, 其余处理还原糖含量、总糖含量均在适宜范围内。与对照相比, 不同处理提高了烟叶糖含量, 其中T1、T2处理均与CK1处理差异显著。此外, 各处理烟碱和总氮含量均不同程度低于对照, 但都处于优质烟叶烟碱、总氮含量范围内。对于烤后烟叶氯含量而言, 各处理间差异不显著。

烤烟香吃味的优劣不仅与单一的化学成分相关, 更取决于各化学成分之间的比例是否协调<sup>[6]</sup>。烟叶吃味和刺激性的协调程度常用糖碱比来衡量<sup>[17]</sup>。优质烟叶糖碱比一般在8~12<sup>[15]</sup>, 可以看出各处理糖碱比均较适宜, 其中钾肥处理后可以显著提高糖碱比, 加入表面活性剂后比值较单独喷施钾肥处理又有明显提高。除T3处理外, 各处理两糖比较对照有所提高, 烟叶化学成分更趋于协调。钾氯比与烟叶的燃烧性密切相关, 各处理钾氯比均较对照有所提高, 其中T1处理又显著高于单独喷施钾肥的CK1处理, 增加了18.31%。

表 5 不同处理间烤后烟叶化学成分的差异比较  
 Table 5 Comparison of chemical components of flue-cured tobacco leaves among different spraying treatments

处理 Treatment	还原糖 Rs (%)	总糖 Ts (%)	烟碱 Nic (%)	总氮 Tn (%)	钾 Pot (%)	氯 Chl (%)	糖碱比 Ts/Nic	氮碱比 Tn/Nic	两糖比 Rs/Ts	钾氯比 Pot/Chl
CK	16.29±0.72c	21.52±0.14d	2.21±0.05a	1.54±0.02a	1.70±0.02d	0.32±0.01a	9.75±0.19d	0.70±0.02ab	0.76±0.04a	5.33±0.23c
CK1	17.18±0.13b	22.41±0.10c	2.13±0.02b	1.50±0.02ab	1.79±0.04c	0.31±0.02a	10.54±0.10c	0.70±0.02ab	0.77±0.01a	5.79±0.26bc
T1	18.61±0.25a	23.39±0.07b	1.95±0.03d	1.43±0.02c	1.96±0.02a	0.29±0.02a	11.99±0.19a	0.73±0.02a	0.80±0.01a	6.85±0.41a
T2	18.32±0.23a	23.31±0.12b	2.04±0.04c	1.44±0.03c	1.89±0.04b	0.30±0.02a	11.45±0.26b	0.71±0.03ab	0.79±0.01a	6.24±0.53ab
T3	17.92±0.46ab	25.37±0.08a	2.18±0.04ab	1.49±0.02b	1.83±0.04c	0.31±0.02a	11.64±0.21ab	0.68±0.02b	0.71±0.02b	5.97±0.36bc

CK: 喷施清水; CK1: 喷施钾肥; T1: 喷施钾肥+蔗糖脂肪酸酯; T2: 喷施钾肥+茶皂素; T3: 喷施钾肥+洗衣粉。同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。CK: spraying water; CK1: spraying potassium fertilizer; T1: spraying potassium fertilizer + sucrose fatty acid ester; T2: spraying potassium fertilizer + tea saponin; T3: spraying potassium fertilizer + washing powder. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at *P* < 0.05 level. Rs: reducing sugar; Ts: total sugar; Nic: nicotine; Tn: total nitrogen; Pot: potassium; Chl: chloride.

3 讨论

3.1 表面活性剂与烟叶润湿性

临界表面张力是表征固体表面润湿性能的参数。液体与固体的接触角为零时, 液体的表面张力

即为固定的临界表面张力。只有当液体的表面张力小于固体的临界表面张力时, 液体才可以在固体表面完全润湿<sup>[18]</sup>。临界表面张力越低的叶片, 水溶性叶面肥、农药越不容易在其表面铺展和润湿<sup>[19]</sup>。烟

叶表面有一层蜡质, 具有疏水性。陈海涛等<sup>[7]</sup>测出‘云烟87’叶片的临界表面张力为 $29.46 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , 本研究选择的烟叶品种是‘K326’, 测定的临界表面张力为 $30.41 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , 虽然测定结果略有差异, 但都远低于 $100 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , 属于临界表面张力较低的叶片, 较难被液体润湿。

表面活性剂由疏水亲油的非极性基和亲水疏油的极性基组成, 可以降低液体的表面张力、提高润湿性能。当钾肥溶液中加入表面活性剂后, 一方面降低了溶液的表面张力, 另一方面表面活性剂的疏水碳氢链通过色散力吸附于烟叶表面, 亲水基深入喷施液内形成了定向吸附膜, 可降低钾肥溶液与烟叶之间的界面张力, 从而使得接触角变小, 提高了钾肥的润湿性能<sup>[20]</sup>。有研究指出, 疏水碳氢链的结构和表面活性剂的类型会影响吸附、润湿性能<sup>[21]</sup>。本研究选择3种表面活性剂, 其中蔗糖脂肪酸酯是一种非离子表面活性剂, 其降低表面张力的能力优于天然表面活性剂茶皂素。洗衣粉中的十二烷基苯磺酸钠, 作为离子型表面活性剂, 降低表面张力的能力最强, 在测试浓度范围内, 随着浓度的增加表面张力持续下降, 未出现明显拐点。

### 3.2 表面活性剂与烟叶钾吸收

叶面肥中加入表面活性剂后, 可以有效促进叶面肥的吸收进而提高作物叶片营养元素的含量。Howard等<sup>[22]</sup>曾研究指出, 表面活性剂可以促进棉花(*Gossypium* spp.)叶片对硝酸钾的吸收。蔗糖酯和茶皂素作为氮肥助剂, 可以显著增强叶面喷施氮肥的效果, 增强大豆[*Glycine max* (L.) Merr.]叶片的吸氮能力<sup>[23]</sup>。王强等<sup>[24]</sup>研究了表面活性剂PPJ对小麦(*Triticum aestivum* L.)叶片吸收营养物质的影响, 结果表明, 低于临界胶束浓度的PPJ以单体形式存在, 和小麦叶片发生相互作用, 可以显著促进硼、锰离子的吸收, 而当PPJ浓度超过其临界胶束浓度后, 多余分子形成胶束, 包裹了营养物质, 反而不利于元素的吸收。

表面活性剂促进叶面肥吸收的作用不仅仅和其降低溶液表面张力的能力有关。Stevens等<sup>[25]</sup>研究表明, 表面活性剂可以调节叶片气孔大小, 增加气孔的透性。叶小利等<sup>[26]</sup>指出, 表面活性剂促进大豆叶片气孔打开的机理可能是因为增强了蔗糖酶活性, 蔗糖含量相应提高, 保卫细胞吸水, 增加了膨压, 气孔打开。柴凌燕等<sup>[27]</sup>指出, 表面活性剂可以调节叶片角质膜的渗透性, 从而促进营养物质的吸收。表面活性剂烷基苯磺酸钠可以溶解松树(*Pinus pines*

L.)针叶上的蜡质<sup>[28]</sup>; 蔗糖脂肪酸酯在不同程度上可以溶解大豆叶片蜡质层<sup>[26]</sup>。本试验所用表面活性剂可能溶解了烟叶上、下表面的蜡质层, 提高了烟叶角质膜的渗透性, 减少了钾肥进入烟叶的阻碍作用。此外, 钾肥溶液中加入表面活性剂, 也在一定程度上减缓了淋溶作用, 提高了烟叶“抗淋”能力, 减少了钾素的外排<sup>[29]</sup>。本研究所选择的3种表面活性剂均达到了促进钾肥吸收的效果, 烟叶钾含量在不同时期均高于单独喷施钾肥处理, 其中以T1处理即蔗糖脂肪酸酯增钾效果最为显著。

### 3.3 表面活性剂与烟叶生理特性

SOD、POD和MDA是评价植物抗逆性的重要指标。SOD作为活性氧解毒过程中最重要的酶, 可以直接有效地催化超氧阴离子的歧化反应, 使其生成 $\text{O}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 。之后在POD的催化作用下,  $\text{H}_2\text{O}_2$ 可以进一步被转化为水从而彻底地清除活性氧, 使得细胞免受伤害<sup>[30]</sup>。MDA作为膜脂过氧化产物, 含量越高说明植物抗逆能力越差。MDA含量的积累还可以加剧膜脂过氧化程度<sup>[31]</sup>, 进一步增大对植物细胞的伤害。有研究表明, 在大豆开花期和结荚期喷施蔗糖脂肪酸酯, 在短时间内就可以显著提高大豆叶片SOD酶活性, 延缓大豆的衰老<sup>[23]</sup>。茶皂素具有较强的抗氧化作用, 可以很大程度上清除超氧阴离子自由基和羟自由基<sup>[32]</sup>。本研究表明, 3种表面活性剂辅助的钾肥喷施均可以不同程度提高烟叶SOD、POD酶活性, 降低MDA含量。其中, T1、T2处理SOD、POD活性要高于T3处理, 说明蔗糖脂肪酸酯、茶皂素清除活性氧的能力优于洗衣粉。T1处理烟叶MDA含量最低, 膜脂过氧化程度最小, 抗逆性最强。

烟草中质体色素(叶绿素和类胡萝卜素)是光传导和光反应中心的重要构成物质, 不仅影响光合作用的强度, 而且是烟叶重要的香气前体物质, 其降解产物与烤后烟叶香气品质密切相互<sup>[33]</sup>。有研究指出, 用尿素溶液喷施大豆叶片, 叶绿素含量有一定提高, 但提高效果并不显著。尿素溶液中加入蔗糖脂肪酸酯后, 大豆叶片叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量均大大提高<sup>[23]</sup>。孙燕<sup>[34]</sup>的研究表明混合喷施表面活性剂皂苷, 植株的叶绿素含量、光合速率、蒸腾速率显著提高。本研究表明, 加入表面活性剂后, 烟叶功能盛期的叶绿素、类胡萝卜素含量得到提高, 进而加强了光合作用产物的合成和积累, 而在成熟期, 叶绿素和类胡萝卜素得到充分降解, 有利于烤后烟叶香气物质的形成。加入表面活性剂后, 烟叶品质比单独喷施钾肥处理更为优异。一方面表面活

性剂对钾肥的吸收有促进作用进而提升了烟叶品质;另一方面可能所选用的蔗糖酯、茶皂素以及洗衣粉本身对烟叶的品质有一定影响,但具体机理尚不清楚,还需进一步研究。

#### 4 结论

本研究认为,试验所选3种表面活性剂对烟叶的润湿性能有很好的改善作用。表面活性剂辅助的钾肥喷施可以有效提高烟株生长过程中烟叶钾含量、抗氧化能力以及质体色素含量,使烤后烟叶化学成分更为协调。3种表面活性剂相比,蔗糖脂肪酸酯和洗衣粉的润湿性能优于茶皂素。但从烟叶生理指标和烤后烟叶品质方面来看,蔗糖脂肪酸酯和茶皂素优于洗衣粉。此外,蔗糖脂肪酸酯作为一种食品添加剂,成本低、无毒、易降解,无环境安全的问题。综合考虑,钾肥溶液中添加表面活性剂蔗糖脂肪酸酯效果最好,可用于大田生产。

#### 参考文献 References

- [1] 王欣, 许自成, 肖汉乾. 湖南烟区烤烟钾含量与土壤钾素的分布特点之间的关系[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(5): 83-87  
WANG X, XU Z C, XIAO H Q. Relation between the distribution features of K-content in tobacco leaves and its content in the soil of Hunan tobacco-growing areas[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(5): 83-87
- [2] 郭清源, 丁松爽, 刘国顺, 等. 钾用量与灌溉量对不同土层钾素及烟叶钾含量的积累效应[J]. 中国烟草科学, 2015, 36(1): 61-67  
GUO Q Y, DING S S, LIU G S, et al. Effect of potassium rate and irrigation frequency on potassium contents of different soil layers and tobacco leaves[J]. Chinese Tobacco Science, 2015, 36(1): 61-67
- [3] 李宗泰, 陈二影, 张美玲, 等. 施钾方式对棉花叶片抗氧化酶活性、产量及钾肥利用效率的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(3): 487-494  
LI Z T, CHEN E Y, ZHANG M L, et al. Effect of potassium application methods on antioxidant enzyme activities, yield, and potassium use efficiency of cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(3): 487-494
- [4] 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
- [5] 孙虎. 基施与叶面喷施钾肥对烤烟烟叶含钾量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010  
SUN H. Effect of base and foliar applications of potassium fertilizer on flue-cured tobacco leaves[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010
- [6] 徐静, 王美玲, 李婷婷, 等. 烟草叶片表面蜡质成分及含量研究[J]. 西北农业学报, 2014, 23(4): 140-145  
XU J, WANG M L, LI T T, et al. Composition and content of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaf cuticular waxes[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(4): 140-145
- [7] 陈海涛, 丁伟. 药液在烟草叶片上湿润展布的特性研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(6): 29-33  
CHEN H T, DING W. Studies on wet-spreading characteristics of pesticide liquids on tobacco leaves[J]. Journal of Southwest University: Natural Science, 2014, 36(6): 29-33
- [8] 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. Research on the effect of surfactants on permeation of gibberellin and iron through plant cuticular[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014
- [9] 腊贵晓, 孔海民, 方萍, 等. 表面活性剂辅助的甲硫氨酸和色氨酸叶面喷施对芥蓝生长及菜薹芥子油苷组分和含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 439-446  
LA G X, KONG H M, FANG P, et al. Effects of foliage spray of methionine and tryptophan with surfactant active agent on growth and bolting stem glucosinolate composition of Chinese kale[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(4): 439-446
- [10] 冯柱安. 抑芽敏加活性剂对烤烟的抑芽促产增值效果[J]. 烟草科技, 1994, (3): 34-36  
FENG Z A. Effect of suckercide and active agent on bud inhibition and growth of flue-cured tobacco[J]. Tobacco Science & Technology, 1994, (3): 34-36
- [11] LAW K Y, ZHAO H. Determination of solid surface tension by contact angle[M]//LAW K Y, ZHAO H. Surface Wetting: Characterization, Contact Angle, and Fundamentals. Cham: Springer, 2016
- [12] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000  
ZOU Q. Experimental Guide of Plant Physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000  
LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000
- [14] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003  
WANG R X. Tobacco Chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003
- [15] 陈江华, 刘建利, 龙怀玉. 中国烟叶矿质营养及主要化学成分含量特征研究[J]. 中国烟草学报, 2004, 10(5): 20-27  
CHEN J H, LIU J L, LONG H Y. The distribution characteristics of nutrition elements and main chemical composition in China's tobacco leaves[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2004, 10(5): 20-27
- [16] 刘国顺, 何永秋, 杨永锋, 等. 不同钾肥配施对烤烟质体色素和碳氮代谢及品质的影响[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(6): 49-55



- LIU G S, HE Y Q, YANG Y F, et al. Effects of combining application of various potassium fertilizers on plastid pigment, carbon-nitrogen metabolism and quality in flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2013, 34(6): 49–55
- [17] 吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等. 断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5686–5695
- WU Y H, XUE L X, XU Z C, et al. Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar: Nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5686–5695
- [18] 许小龙, 徐广春, 徐德进, 等. 炔草酯微乳剂药液在苘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 Phytologica Sinica, 2015, 42(3): 453–459
- [19] 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, 10(3): 281–285
- XIAO Y, CAO Y P, WANG J G, et al. Research of mixed adjuvants on the absorption of nutrient elements in crop leaf[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 281–285
- [20] 肖艳, 唐永康, 曹一平, 等. 表面活性剂在叶面肥中的应用与进展[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(4): 14–15
- XIAO Y, TANG Y K, CAO Y P, et al. Application of surfactants in fertilizer for foliage dressing and its progress[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2003, 18(4): 14–15
- [21] 吴文炳, 林雅彬, 陈建华. 表面活性剂改性 4A 分子筛对 Cr( ) 的吸附行为[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3620–3624
- WU W B, LIN Y B, CHEN J H. Adsorption behavior of surfactant-modified molecular sieve 4A for Cr ( ) [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 3620–3624
- [22] HOWARD D D, GWATHMEY C O. Influence of surfactants on potassium uptake and yield response of cotton to foliar potassium nitrate[J]. Journal of Plant Nutrition, 1995, 18(12): 2669–2680
- [23] 叶小利, 李学刚, 陈时洪, 等. 蔗糖脂肪酸酯对大豆叶片超氧化物歧化酶和叶绿素的影响[J]. 大豆科学, 2000, 19(4): 330–336
- YE X L, LI X G, CHEN S H, et al. The effects of sucrose fatty acid ester (SFE) on the activity of superoxide dismutase and chlorophyll of soybean leaf[J]. Soybean Science, 2000, 19(4): 330–336
- [24] 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, 23(2): 113–116
- WANG Q, WANG J B. Effects of surfactant PPJ on the absorption of nutrient elements in wheat leaves[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2001, 23(2): 113–116
- [25] STEVENS P J G, GASKIN R E, HONG S O, et al. Contributions of stomatal infiltration and cuticular penetration to enhancements of foliar uptake by surfactants[J]. Pesticide Science, 1991, 33(3): 371–382
- [26] 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. The effects of surfactants on stomata and epicuticular wax structure of soybean[J]. Soybean Science, 2000, 19(1): 49–56
- [27] 柴凌燕, 董易凡, 李士伟, 等. 植物角质膜及其渗透性与抗旱性研究进展[J]. 植物研究, 2010, 30(6): 763–768
- CHAI L Y, DONG Y F, LI S W, et al. Research progress in the penetrability and drought resistance of plant cuticular[J]. Bulletin of Botanical Research, 2010, 30(6): 763–768
- [28] BUSSOTTI F, BOTTACCI A, GROSSONI P, et al. Cytological and structural changes in *Pinus pinus* L. needles following the application of an anionic surfactant[J]. Plant, Cell & Environment, 1997, 20(4): 513–520
- [29] 刘华山, 曾涛, 韩锦峰, 等. 淋浴对烟草叶片中钾素外排的影响[J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(2): 183
- LIU H S, ZENG T, HAN J F, et al. Effects of eluviation on the efflux of potassium in tobacco leaves[J]. Plant Physiology Communications, 2005, 41(2): 183
- [30] 王亚虹, 许自成, 高森, 等. 烟草干旱胁迫研究进展[J]. 节水灌溉, 2016, (12): 103–107
- WANG Y H, XU Z C, GAO S, et al. Research progress of tobacco drought stress[J]. Water Saving Irrigation, 2016, (12): 103–107
- [31] 牛慧伟, 许自成, 邵惠芳, 等. 不同生育期遮荫淹水对烤烟形态及抗氧化系统的影响[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(5): 39–45
- NIU H W, XU Z C, SHAO H F, et al. Effects of shading and waterlogging on morphology and antioxidants of flue-cured tobacco at different growth stages[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2012, 18(5): 39–45
- [32] 李俊, 张爱玉, 齐永杰, 等. 茶树油粕中茶皂素研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(1): 276–279
- LI J, ZHANG A Y, QI Y J, et al. Research progress in tea saponin from oil residue of *camellia semiserrata*[J]. Food Science, 2012, 33(1): 276–279
- [33] 贾国涛, 马一琼, 陈芳泉, 等. 枸橼溶性硅肥对烤烟生理指标和烟叶品质的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(6): 43–48
- JIA G T, MA Y Q, CHEN F Q, et al. Effect of a citrate-soluble silicon fertilizer on physiological indexes and quality of flue-cured tobacco leaves[J]. Chinese Tobacco Science, 2016, 37(6): 43–48
- [34] 孙燕. 大花蕙兰花生壳基质栽培及叶面施肥研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015
- SUN Y. Studies on peanuts shell media and foliar fertilizer for *Cymbidium hybridum*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015