

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2020.03.015

# 不同类型抗蒸腾剂对 4 种草本植物叶片水分利用效率的影响

吕国利<sup>1</sup>, 王进鑫<sup>2\*</sup>, 冯树林<sup>1</sup>, 姚丽霞<sup>1</sup>, 党倩楠<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为探究 3 种抗蒸腾剂叶片喷施对 4 种草本植物水分消耗和利用的影响规律,比较得出不同抗蒸腾剂的最佳使用浓度,为干旱荒漠区采煤迹地植被保育技术提供参考,本试验以蒙古冰草(*Agropyron mongolicum* Keng)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)、白花草木樨(*Melilotus albus* Medic. ex Desr.)、蜀葵(*Althaea rosea* (Linn.) Cavan.) 4 种草本植物为研究对象,每种草叶面分别喷施不同类型和浓度的抗蒸腾剂:旱地龙(Fulvic Acid, FA)浓度分别为 1, 2, 3, 4 g · L<sup>-1</sup>;冠存(Guan Cun, GC)浓度分别为 3, 6, 9, 12 g · L<sup>-1</sup>;高岭土(Kaolin, KL)浓度分别为 20, 40, 60, 80 g · L<sup>-1</sup>,以喷施清水为对照,喷施 3 个月后测定其对 4 种草叶片蒸腾速率(Transpiration rate, Tr)、净光合速率(Net photosynthetic rate, Pn)、水分利用效率(Water use efficiency, WUE)和生物量的影响。结果表明:在试验浓度区间内,FA 浓度越高,蒙古冰草、沙打旺、白花草木樨的 Tr 值越小、Pn 值越小,WUE 呈现先升高再降低的趋势;GC 喷施浓度越高,蒙古冰草、沙打旺、白花草木樨叶片的 Tr 值越小、WUE 值越大,Pn 值较对照低但各浓度间未达到显著性差异;KL 喷施浓度越高,蒙古冰草与蜀葵各浓度处理的 Pn 值越小、WUE 值越小,Tr 值较对照低但各浓度间未达到显著性差异。3 种抗蒸腾剂对蒸腾速率的抑制程度均为 GC 和 KL 大于 FA,对净光合速率的抑制程度均为 KL 和 GC 小于 FA,对水分利用效率的提升程度均为 KL 和 GC 大于 FA。综合 3 种抗蒸腾剂在植物叶面的喷施效果,GC 和 KL 喷施效果较好,FA 较差;蒙古冰草与沙打旺喷施 12 g · L<sup>-1</sup>的 GC、白花草木樨与蜀葵喷施 20 g · L<sup>-1</sup> KL 的措施可用于干旱荒漠区采煤迹地的植被恢复。

**关键词:**草本植物;抗蒸腾剂;喷施浓度;水分利用效率;干旱荒漠区

中图分类号:S423+.1

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2020)03-0712-08

## Effects of Different Types of Anti-transpirants on Water Use Efficiency of four Herbaceous Plants

LV Guo-li<sup>1</sup>, WANG Jin-xin<sup>2\*</sup>, FENG Shu-lin<sup>1</sup>, YAO Li-xia<sup>1</sup>, DANG Qian-nan<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to explore the effects of three types of anti-transpirants on water consumption and utilization in four herbaceous plants. The optimal concentration was selected for each anti-transpirant after comparing, in order to provide theoretical basis for the vegetation conservation technique at coal mining sites in arid areas. Four kinds of herbaceous (grass) species, *Agropyron mongolicum* Keng, *Astragalus adsurgens* Pall., *Melilotus albus* Medic. ex Desr. and *Althaea rosea* (Linn.) Cavan., were used as research objects, and 3 different anti-transpirants were used on leaf surface of each grass with 4 concentrations for each; Fulvic Acid (FA, 1, 2, 3, 4 g · L<sup>-1</sup>), Guan Cun (GC, 3, 6, 9, 12 g · L<sup>-1</sup>), Kaolin (KL, 20, 40, 60, 80 g · L<sup>-1</sup>). Water spray was used as the control. The transpiration rate (Tr), net photosynthetic rate (Pn), water use efficiency (WUE) and biomass of leaves in four grasses were determined after three months of anti-transpirants spraying. For FA application, Tr and Pn were the highest in control plants and decreased with the increase of FA concentration within the tested concentration ranges for *A. Mongolicum*, *M. albus* and *A. adsurgens* whereas the WUE of these three grasses was higher at lower FA

收稿日期:2020-02-08;修回日期:2020-03-01

基金项目:国家重点研发计划项目课题“采煤迹地植被重建与保育技术研究”(2017YFC0504402);国家自然科学基金项目(31670713);榆林市林业科技计划项目(K403021528)共同资助

作者简介:吕国利(1994-),男,汉族,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事林草生态工程研究,E-mail:lvguoli2017@126.com; \*通信作者 Author for correspondence, E-mail:jwang118@126.com

concentration and lower at higher FA concentration. Similar tendency was found in Tr value of these three plant species after spraying with GC, and a slight difference was observed in Pn values in terms of different GC concentrations with lower Pn value than that of respective controls. The WUE was higher compared to control and increased with the increase in GC rates. For KL, Pn and WUE were lower in leaves of *A. Mongolicum* and *A. rosea* than those of control after spraying KL and decreased with concentrate increasing; Tr value was lower after spraying KL compared to the control with no significant differences among the KL treatments. The extent of both restraining Tr and Pn, and promoting WUE of spraying these three anti-transpirants on leaves of the four grass species we studied, was GC and KL better than FA. After comparing the effects of these three anti-transpirants on the four species, we concluded that GC and KL showed better performance than FA. *A. Mongolicum* and *A. adsurgens*, spraying GC with the concentration of  $12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , and *A. rosea* and *M. albus*, spraying KL with the concentration of  $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , could be used for the vegetation conservation techniques at coal mining sites in arid areas.

**Key words:** Herbaceous plants; Anti-transpirant; Spray concentration; Water use efficiency; Arid desert area

煤矸石山为煤炭开挖过程中所产生的矸石、碎石与沙土等废弃的矿渣露天堆积所形成,据统计我国2017年煤矸石堆存量50亿吨以上,每年排放量7.5亿吨左右<sup>[1]</sup>。这些堆积的煤矸石不仅直接占用土地、破坏地表植被,还会因自燃、风化等原因对大气、土壤以及水环境造成污染,严重破坏当地生态环境,因此煤矸石山治理对生态环境的保护尤为重要。目前,主要通过矸石山整形,矸石山的防渗、堆积及酸性改造技术等工程措施以及植被恢复技术来达到对矸石山的综合治理。其中,植物恢复技术通过立地条件分析、基质改良技术、选择适生树草种、植物栽植播种技术及抚育管理技术等实现对煤矸石山植被重建及自然环境的保护,是目前煤矸石山治理的有效途径之一<sup>[2]</sup>。但在治理过程中常因矸石山气候、土壤等自然环境条件比较恶劣导致植被恢复比较困难。在西北干旱荒漠区矸石山限制植物生长的各种自然环境条件中,降水少、蒸发散大所造成的植物水分亏缺是造成恢复植被栽植播种成活率低、保存率低、生长缓慢的主要原因,因此在缺少灌水条件下确保植被重建成功的关键在于减少水分的消耗<sup>[3]</sup>。抗蒸腾剂是一类通过直接或间接的方式来减少叶片气孔开张进而抑制植物蒸腾、减少水分散失的化学物质,根据其叶面作用方式的不同可分为3类:一是代谢型抗蒸腾剂,该类型抗蒸腾剂可以通过影响叶片代谢使气孔关闭或减小气孔开张度,从而达到减小叶片蒸腾的目的,并通过影响保护酶系统活性从而提高植物抗旱性,这类物质只会影响气孔蒸腾阻力而不会影响角质蒸腾阻力与界面水分扩散阻力;常用的代谢型抗蒸腾剂有苯汞乙酸、脱落酸、氯化钙、多效唑、旱地龙(Fulvic Acid, FA)等<sup>[4]</sup>。二是成膜型抗蒸腾剂,该类型抗蒸腾剂会在叶片表面形成一层薄膜,阻止叶片内水分通过气孔向大气

的散发,从而降低植物的蒸腾,减缓植物萎蔫,提高水分利用效率;Folicote, Wilt prof, Vapor guard, Plant guard等国外代表性产品以及国内抗蒸腾剂产品如冠存(Guan Cun, GC)、森泰美、森活等均为成膜型抗蒸腾剂<sup>[5]</sup>。三是反射型抗蒸腾剂,该类抗蒸腾剂会在叶片表面形成一层白色保护膜,通过反射部分太阳辐射、降低叶温从而达到抑制蒸腾作用的目的;常用材料有高岭土(Kaolin, KL)、碳酸钙、铝粉等<sup>[6]</sup>。

抗蒸腾剂的叶片喷施在抑制植物蒸腾速率减少水分散失的同时,也会影响植物光合产物的积累。抗蒸腾剂的施用效果在不同药剂类型、不同浓度、不同环境条件以及不同植物材料上均存在着较大差异<sup>[7-8]</sup>,目前国内外关于抗蒸腾剂在草本植物以豌豆(*Pisum sativum* L.)、番茄(*Solanum lycopersicum* Mill.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)等作物上的研究较多,通过抗蒸腾剂对蒸腾速率的影响从而实现豌豆<sup>[9]</sup>固氮调控的影响,增加番茄<sup>[10]</sup>对盐分的耐受性,提高小麦<sup>[11]</sup>与玉米<sup>[12]</sup>的水分利用效率以及促进甘蔗<sup>[13]</sup>抗旱增产等目标,而抗蒸腾剂在蒙古冰草(*Agropyron mongolicum* Keng)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)、白花草木樨(*Melilotus albus* Medic. ex Desr.)、蜀葵(*Althaea rosea* (Linn.) Cavan.)上的研究则鲜见报道,对这4种草本植物喷施不同抗蒸腾剂的效果尚未可知。

蒙古冰草为禾本科冰草属多年生草本植物,沙打旺为豆科紫云英属多年生草本植物,白花草木樨是豆科草木樨属2年生草本植物,蜀葵是锦葵科蜀葵属2年生草本植物。在课题组前期的研究工作中发现,作为生态型植被配置的重要草本植物蒙古冰草、沙打旺、白花草木樨与生态景观型植被配置的重

要草本植物蜀葵,能适应干旱高温的气候条件在贫瘠的沙地土壤条件下存活,这些植株可起到保持水土、防风固沙、改良土壤等作用,且其植株也能带来较好的经济价值与观赏价值。本试验根据抗蒸腾剂的节水机理,以西北干旱荒漠区采煤迹地 4 种生态型或生态景观型的耐旱、耐贫瘠、抗污染的适生草本植物为对象,通过国内常见 3 种抗蒸腾剂代谢型旱地龙、成膜型冠存、反射型高岭土不同浓度喷施 3 个月,研究其对 4 种草本植物叶片光合、蒸腾及水分利用效率的影响,以水分利用效率为核心选择出能让适生草本植物在干旱荒漠区采煤迹地保持低耗水的同时也能积累更多干物质的抑制剂类型及喷施浓度,从而为干旱荒漠区采煤迹地植被保育技术提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验于陕西省杨凌西北农林科技大学南校区人工气候室中进行,试验期间观测日间气温波动范围为 24℃~35℃。草种于 3 月初点种到圆形塑料盆(上口口径 32 cm,底径 18.5 cm,高度 21 cm)中,每盆装土 10 kg,3 叶期间苗,每盆留苗 5 株;试验土壤取自宁夏灵武地区煤矸石山区域,种植期间保持土壤自然肥力。所用抗蒸腾剂旱地龙(黄腐殖酸 $\geq 80$  g·L<sup>-1</sup>,有效磷 $\geq 2\%$ ,溶液)购于新疆汇通旱地龙腐殖酸有限责任公司,冠存(矿物油有效成分 $\geq 95\%$ ,母液)购于深圳八方纵横生态技术有限公司,高岭土(粒径 15  $\mu\text{m}$ ,化学纯,粉剂)购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

### 1.2 试验设计

本试验以 4 种草本植物蒙古冰草、沙打旺、白花草木樨和蜀葵为研究对象,喷施不同浓度 FA,GC,KL 3 种抗蒸腾剂,在植物生长期正常供水(最大田间持水量 70%,土壤含水量 7.71%)。抗蒸腾剂喷施浓度分别为:FA:1,2,3,4 g·L<sup>-1</sup>;GC:3,6,9,12 g·L<sup>-1</sup>;KL:20,40,60,80 g·L<sup>-1</sup>,喷施清水作为对照(Control,CK)。蜀葵、白花草木樨、蒙古冰草、沙打旺每种草各 12 个处理,共 48 个处理。

### 1.3 测定方法

抗蒸腾剂于晴天的傍晚喷施,喷施标准为药剂在叶表面均匀附着而不下滴。抗蒸腾剂于 6 月 10

日第 1 次喷施之后每隔 20 天喷施 1 次,共喷施 5 次,在最后 1 次(9 月 1 日)喷施结束后 3~5 天内进行一次光合的测定。利用便携式光合仪 CIRAS-3,在人工光源条件下于上午 8:00—11:00,每个处理随机挑选 3 株,每株选择 1 片中上部叶位朝向一致的健康成熟叶片,进行光合特性指标净光合速率(Net photosynthetic rate, Pn)与蒸腾速率(Transpiration rate, Tr)的测定;水分利用效率(Water use efficiency, WUE) = Pn/Tr。试验结束后将地上部分与根系用水清洗干净后,105℃杀青半小时后 75℃烘干至恒重,测定干重。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2013 对所测数据进行整理计算,采用 SPSS 23.0 进行单因素方差分析及 LSD 法进行多重比较,采用 Origin 2016 进行图表的绘制。数据结果均以平均值 $\pm$ 标准误差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同抗蒸腾剂叶面喷施对 4 种草蒸腾速率的影响

从图 1 可以看出,FA 在 4 种草叶面长期喷施后,4 种草高浓度(3 g·L<sup>-1</sup>和 4 g·L<sup>-1</sup>)处理的 Tr 值与对照相比显著降低( $P < 0.05$ ),且在试验浓度区间内 FA 浓度越大蒙古冰草、白花草木樨、沙打旺的 Tr 值越小。不同浓度 FA 叶面喷施后蒙古冰草 Tr 值较对照降低 10.44%~33.79%,白花草木樨 Tr 值较对照降低 11.55%~41.77%,沙打旺 Tr 值较对照降低 11.58%~41.80%,蜀葵在低浓度 1 g·L<sup>-1</sup>和 2 g·L<sup>-1</sup>时与对照无显著差异( $P > 0.05$ ),在 3 g·L<sup>-1</sup>时 Tr 值显著降低( $P < 0.05$ ),较对照降低 16.27%。从 4 种草喷施 FA 后 Tr 值较对照降低的百分比均值来看,FA 对 4 种草的蒸腾抑制效果由大到小依次为沙打旺>白花草木樨>蒙古冰草>蜀葵。

除沙打旺在 3 g·L<sup>-1</sup>时与对照无显著性差异外( $P > 0.05$ ),GC 不同喷施浓度下 4 种草的 Tr 值显著低于对照( $P < 0.05$ ),在试验浓度区间内 GC 喷施浓度越大蒙古冰草、白花草木樨与沙打旺的 Tr 值越小,蜀葵不同浓度间无显著差异( $P > 0.05$ )。不同浓度 GC 叶面喷施后蒙古冰草 Tr 值较对照降低 26.60%~46.53%,白花草木樨 Tr 值较对照降低 28.79%~46.82%,沙打旺 Tr 值较对照降低

17.71%~39.74%,蜀葵 Tr 值较对照降低 14.05%~24.99%。从 4 种草喷施 GC 后 Tr 值较对照降低的均值来看,GC 对 4 种草的蒸腾抑制效果由大到小依次为白花草木樨>蒙古冰草>沙打旺>蜀葵。

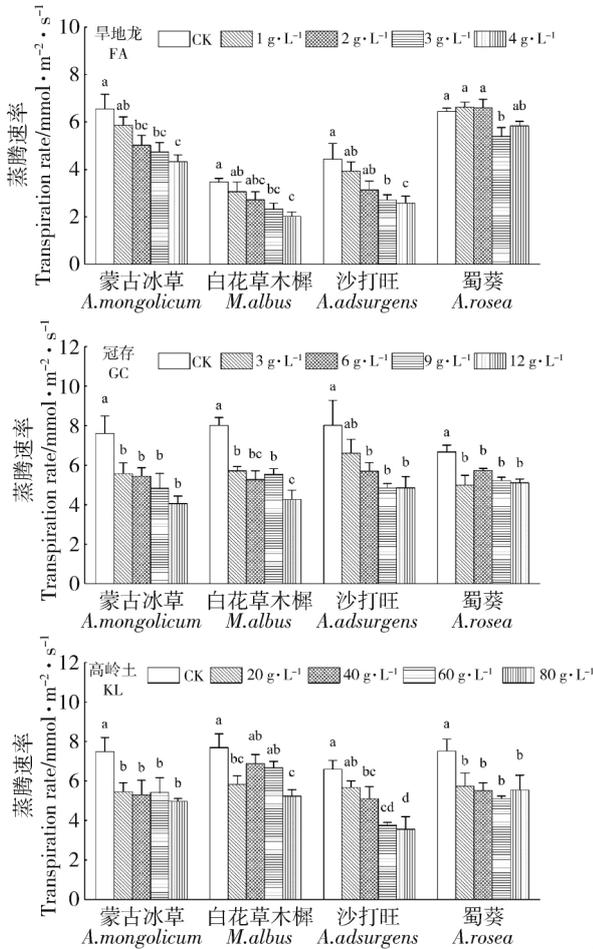


图 1 不同抗蒸腾剂叶面喷施对 4 种草蒸腾速率的影响

Fig. 1 Effect of foliar application of different anti-transpiration agents on transpiration rate in four grass species

注:同种草中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同

Note: Different letters within the same grass showed significant differences ( $P < 0.05$ ). The same as below

KL 不同喷施浓度下蒙古冰草与蜀葵的 Tr 值与对照相比均显著降低( $P < 0.05$ ),不同浓度间无显著性差异( $P > 0.05$ )。白花草木樨与沙打旺在高浓度(80  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )KL 处理下 Tr 值较对照显著降低( $P < 0.05$ )。不同浓度 KL 叶面喷施后蒙古冰草 Tr 值较对照降低 27.28%~33.52%,白花草木樨 Tr 值较对照降低 10.43%~31.86%,沙打旺 Tr 值较对照降低 13.88%~45.96%,蜀葵 Tr 值较对照降低 23.61%~32.03%。从 4 种草喷施 KL 后 Tr 值较对照降低的均值来看,KL 对 4 种草的蒸腾抑制效果由大到小依

次为沙打旺>蒙古冰草>蜀葵>白花草木樨。根据 3 种抗蒸腾剂喷施处理的 Tr 值较对照降低的百分比得出,对蒙古冰草蒸腾抑制的效果从大到小依次为 GC>KL>FA,对沙打旺叶面喷施 3 种抗蒸腾剂间的效果无显著差异,对白花草木樨蒸腾抑制的效果为 GC>FA>KL,对蜀葵蒸腾抑制的效果为 KL>GC>FA。3 种抗蒸腾剂各处理中蒙古冰草与白花草木樨以 GC 12  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、沙打旺以 KL 80  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、蜀葵以 KL 60  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  时的蒸腾抑制效果最强。

## 2.2 不同抗蒸腾剂叶面喷施对 4 种草净光合速率的影响

FA 不同喷施浓度下 4 种草的 Pn 值均低于对照,在试验浓度区间内 FA 浓度越大蒙古冰草、白花草木樨与沙打旺的 Pn 值整体越小(图 2)。不同浓度 FA 叶面喷施后,4 种草均以最高浓度 4  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  时的各处理 Pn 值下降最多;与对照相比,蒙古冰草、白花草木樨、沙打旺和蜀葵 Pn 值分别降低 54.5%,65.7%,64.2%,30.5%。从 4 种草喷施 FA 后 Pn 值较对照降低的均值来看,FA 对 4 种草光合的抑制效果由大到小依次为沙打旺>白花草木樨>蒙古冰草>蜀葵。

不同浓度 GC 喷施下,蒙古冰草、白花草木樨和沙打旺的 Pn 值显著降低,不同浓度间无显著性差异( $P > 0.05$ ),蜀葵则只在 3  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  时显著低于对照( $P < 0.05$ )。不同浓度 GC 叶面喷施后蒙古冰草在喷施浓度为 12  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  时 Pn 值较对照降低 44.5%,白花草木樨在喷施浓度为 6  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和 12  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  时 Pn 值较对照均降低 51.2%,沙打旺在喷施浓度为 9  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  时 Pn 值较对照降低 36.3%,蜀葵在喷施浓度为 3  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  时 Pn 值较对照降低 24.2%。从 4 种草喷施 GC 后 Pn 值较对照降低的均值来看,GC 对 4 种草光合的抑制效果由大到小依次为白花草木樨>蒙古冰草>沙打旺>蜀葵。

KL 不同喷施浓度下,4 种草的 Pn 值都低于对照,且在试验浓度区间内 KL 浓度越高 Pn 值越小。不同浓度 KL 叶面喷施后均为 80  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  时各处理的 Pn 值最低,其中蒙古冰草、白花草木樨、沙打旺与蜀葵的 Pn 值比对照降低 41.1%,32.1%,59.8%,26.2%。从 4 种草喷施 KL 后 Pn 值较对照降低的均值来看,KL 对 4 种草光合的抑制效果由大到小依次为沙打旺>蒙古冰草>白花草木樨>蜀葵。根据抗蒸腾剂喷施处理的 Pn 值较对照降低的百分比得出,3 种抗蒸腾剂在沙打旺与蜀葵上的喷施处理 GC 与 KL 低于 FA 处理值,3 种抗蒸腾剂对

蒙古冰草光合的抑制效果从小到大依次为  $KL < GC < FA$ , 对白花草木樨光合的抑制效果从小到大依次为  $KL < FA < GC$ 。3 种抗蒸腾剂各处理中蒙古冰草、沙打旺与蜀葵以  $KL 20 g \cdot L^{-1}$ 、白花草木樨以  $KL 40 g \cdot L^{-1}$  时的  $P_n$  值较对照降低最小。

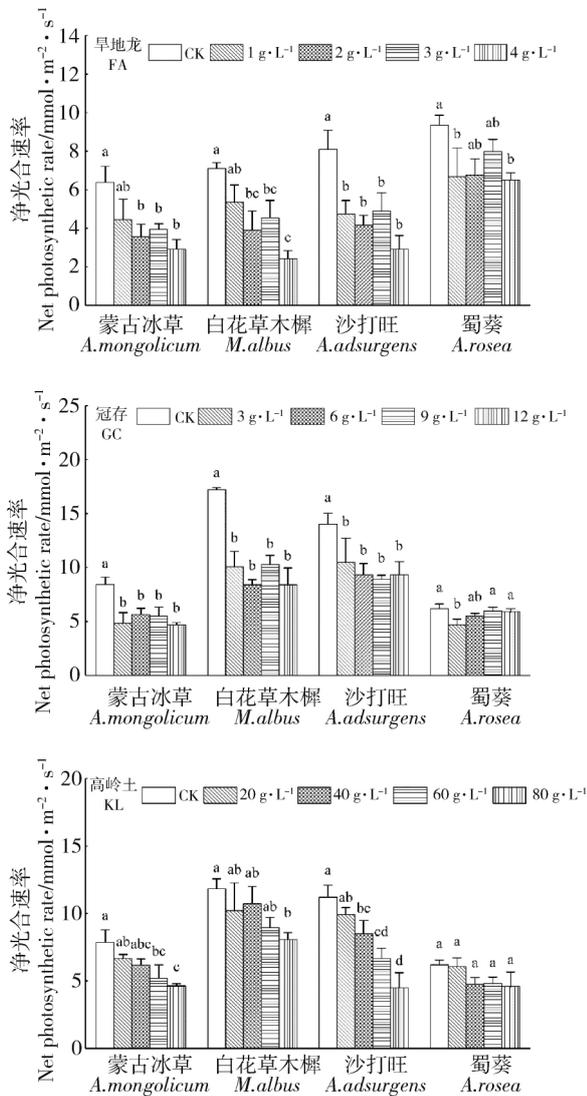


图 2 不同抗蒸腾剂叶面喷施对 4 种草净光合速率的影响  
Fig. 2 Effect of foliar application of different anti-transpiration agents on photosynthetic rate of four grass species

### 2.3 不同抗蒸腾剂叶面喷施对 4 种草水分利用效率与生物量的影响

从表 1 可以看出,在试验浓度区间内叶片喷施 FA 后,4 种草的 WUE 均随 FA 浓度增大呈现先升高再降低的趋势,以浓度  $3 g \cdot L^{-1}$  时 4 种草的 WUE 值最大。当 FA 浓度为  $4 g \cdot L^{-1}$  时白花草木樨与沙打旺处理值显著低于对照,FA 浓度为  $1 g \cdot L^{-1}$  时蜀葵的处理值显著低于对照 ( $P < 0.05$ )。FA 各浓度在蒙古冰草、白花草木樨与沙打旺的喷

施处理的 WUE 最大值分别较对照降低 13.27%、6.82% 和 1.81%,蜀葵较对照升高 2.07%。根据 4 种草各浓度 FA 喷施后叶片 WUE 较对照提高的均值得出,FA 对植物水分利用效率的提升由大到小依次为蜀葵 > 蒙古冰草 > 白花草木樨 > 沙打旺。

各浓度 GC 叶面喷施后,4 种草的 WUE 整体随 GC 浓度增大而升高,结合图 1 与图 2 可以看出 GC 不同浓度对 4 种草蒸腾速率的抑制强于对光合的抑制,各浓度处理中以  $12 g \cdot L^{-1}$  处理的 WUE 值最高。蒙古冰草与沙打旺在 GC 浓度为  $3 g \cdot L^{-1}$  和  $6 g \cdot L^{-1}$  时其处理值低于对照,  $9 g \cdot L^{-1}$  与  $12 g \cdot L^{-1}$  的处理值高于对照。白花草木樨在 GC 浓度为  $3, 6, 9, 12 g \cdot L^{-1}$  的处理值均低于对照,蜀葵在 GC 浓度为  $3, 6, 9, 12 g \cdot L^{-1}$  的处理值均高于对照。各浓度 GC 喷施叶片后,蒙古冰草、沙打旺与蜀葵的 WUE 最大值分别较对照提高 5.35%、4.83% 和 23.73%,白花草木樨较对照降低 10.53%。根据 4 种草各浓度 GC 喷施后叶片 WUE 较对照提高的均值得出,GC 对植物水分利用效率的提升由大到小依次为蜀葵 > 沙打旺 > 蒙古冰草 > 白花草木樨。

在试验浓度区间内,各浓度 KL 叶面喷施后,4 种草的 WUE 值均为 KL 浓度越高其 WUE 值越小,其中  $20 g \cdot L^{-1}$  的 KL 处理值均高于对照,  $80 g \cdot L^{-1}$  的 KL 处理值均低于对照。KL 各浓度在蒙古冰草、白花草木樨、沙打旺与蜀葵的叶片喷施处理的 WUE 最大值分别较对照提高 19.14%、10.03%、3.52% 和 26.11%。根据 4 种草各浓度 KL 喷施后叶片 WUE 较对照提高的均值得出,KL 对植物水分利用效率的提升由大到小依次为蜀葵 > 蒙古冰草 > 白花草木樨 > 沙打旺。根据 3 种抗蒸腾剂喷施处理的 WUE 较对照提高的均值来看,蒙古冰草、沙打旺与蜀葵 KL 与 GC 喷施处理大于 FA 处理值,白花草木樨水分利用效率的提升从大到小依次为  $KL > GC > FA$ 。3 种抗蒸腾剂各处理中蒙古冰草与沙打旺以 GC  $12 g \cdot L^{-1}$ 、白花草木樨与蜀葵以 KL  $20 g \cdot L^{-1}$  时的水分利用效率最高。

通过 4 种草的生物量变化规律可以看出(图 3),FA 喷施后蜀葵与蒙古冰草生物量整体较对照显著降低 ( $P < 0.05$ );在喷施  $1 g \cdot L^{-1}$  与  $2 g \cdot L^{-1}$  FA 时白花草木樨与沙打旺生物量较对照无显著差异 ( $P > 0.05$ ),  $3 g \cdot L^{-1}$  与  $4 g \cdot L^{-1}$  时生物量较对照显著降低 ( $P < 0.05$ );GC 和 KL 喷施后,4 种草生物量整体较对照显著降低 ( $P < 0.05$ )。当 4 种草 FA,GC,KL 喷施浓度为  $3, 12, 20 g \cdot L^{-1}$  时,4 种草

的生物量下降程度由小到大均为  $KL < GC < FA$ 。当 GC 喷施浓度为  $12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时蒙古冰草与沙打旺水分利用效率最高,其生物量分别较对照下降 17.06% 和 20.96%。白花草木樨与蜀葵水分利用效率最高时的处理为  $KL 20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其生物量分别

较对照下降 4.49% 和 15.31%。根据 3 种抗蒸腾剂喷施处理的生物量较对照降低的百分比得出,蒙古冰草、白花草木樨与蜀葵以  $KL 20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、沙打旺以  $GC 6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时生物量值较对照降低的百分比最小。

表 1 不同抗蒸腾剂叶面喷施对 4 种草水分利用效率的影响

Table 1 Effect of foliar application of different anti-transpiration agents on water use efficiency of four grass species

抗蒸腾剂 Anti-transpiration	浓度 Concentration/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	水分利用效率 Water use efficiency/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$			
		蒙古冰草 <i>A. mongolicum</i>	白花草木樨 <i>M. albus</i>	沙打旺 <i>A. adsurgens</i>	蜀葵 <i>A. rosea</i>
旱地龙 FA	0	0.98±0.11 <sup>a</sup>	2.05±0.02 <sup>a</sup>	1.84±0.08 <sup>a</sup>	1.45±0.05 <sup>ab</sup>
	1	0.75±0.16 <sup>a</sup>	1.74±0.16 <sup>ab</sup>	1.22±0.19 <sup>ab</sup>	1.02±0.24 <sup>c</sup>
	2	0.71±0.10 <sup>a</sup>	1.40±0.22 <sup>bc</sup>	1.33±0.06 <sup>ab</sup>	1.04±0.16 <sup>bc</sup>
	3	0.85±0.08 <sup>a</sup>	1.91±0.21 <sup>a</sup>	1.81±0.32 <sup>ab</sup>	1.48±0.07 <sup>a</sup>
	4	0.68±0.13 <sup>a</sup>	1.19±0.11 <sup>c</sup>	1.14±0.29 <sup>b</sup>	1.11±0.07 <sup>abc</sup>
冠存 GC	0	1.12±0.05 <sup>ab</sup>	2.16±0.12 <sup>a</sup>	1.81±0.15 <sup>a</sup>	0.94±0.08 <sup>b</sup>
	3	0.85±0.13 <sup>b</sup>	1.76±0.22 <sup>ab</sup>	1.55±0.26 <sup>a</sup>	0.94±0.04 <sup>b</sup>
	6	1.03±0.04 <sup>ab</sup>	1.62±0.15 <sup>b</sup>	1.62±0.10 <sup>a</sup>	0.97±0.05 <sup>ab</sup>
	9	1.16±0.13 <sup>ab</sup>	1.85±0.09 <sup>ab</sup>	1.85±0.06 <sup>a</sup>	1.14±0.08 <sup>ab</sup>
	12	1.18±0.13 <sup>a</sup>	1.93±0.17 <sup>ab</sup>	1.90±0.04 <sup>a</sup>	1.16±0.07 <sup>a</sup>
高岭土 KL	0	1.05±0.07 <sup>abc</sup>	1.57±0.13 <sup>a</sup>	1.70±0.08 <sup>a</sup>	0.84±0.08 <sup>a</sup>
	20	1.25±0.11 <sup>a</sup>	1.73±0.31 <sup>a</sup>	1.76±0.05 <sup>a</sup>	1.06±0.02 <sup>a</sup>
	40	1.21±0.12 <sup>ab</sup>	1.55±0.12 <sup>a</sup>	1.68±0.07 <sup>a</sup>	0.87±0.06 <sup>a</sup>
	60	0.94±0.08 <sup>bc</sup>	1.34±0.06 <sup>a</sup>	1.76±0.16 <sup>a</sup>	0.94±0.08 <sup>a</sup>
	80	0.93±0.06 <sup>c</sup>	1.54±0.05 <sup>a</sup>	1.24±0.15 <sup>b</sup>	0.79±0.13 <sup>a</sup>

注:表中数据为平均值±标准误(n=3),同列不同小写字母表示同种抗蒸腾剂处理间差异显著( $P < 0.05$ )

Note: Data was shown as mean ± standard error of three replicates (n=3), different small letters in the same column indicated significant differences at the 0.05 level

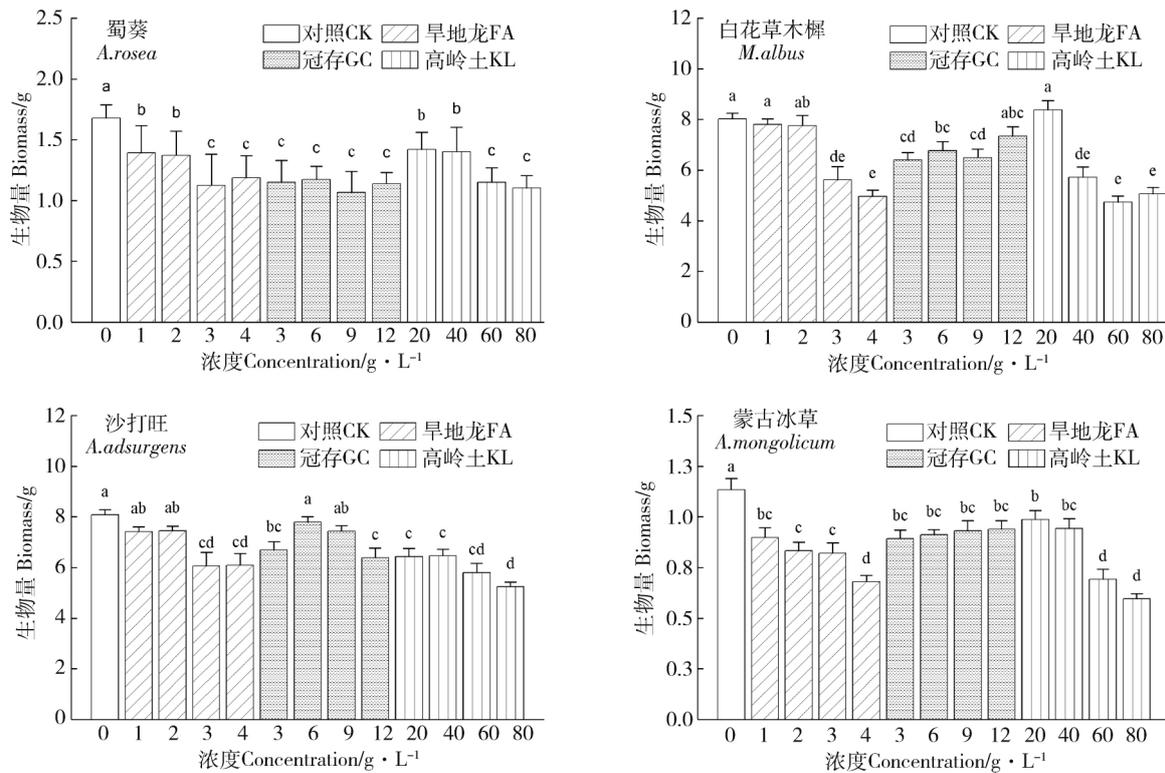


图 3 不同抗蒸腾剂叶面喷施对 4 种草生物量的影响

Fig. 3 Effect of foliar application of different anti-transpiration agents on biomass of four grass species

注:同种草中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

Note: Different letters within the same grass showed significant differences ( $P < 0.05$ )

### 3 讨论

气孔作为光合与蒸腾气体交换的主要通道,可以调节和控制植物叶片的光合与蒸腾作用。抗蒸腾剂的作用目标主要为气孔,通过对叶片气孔闭合程度的调节维持植物体内正常水分平衡,以此来保证植株的健康成长。光合作用是植物干物质积累与产量形成的重要基础,抗蒸腾剂在减小气孔开张度抑制叶片  $T_r$  的同时也会对  $P_n$  产生影响<sup>[14]</sup>。土壤含水量不同的条件下喷施抗蒸腾剂也会对植物  $P_n$  产生影响<sup>[15]</sup>,当土壤水分可以满足植物的正常生长时,喷施抗蒸腾剂会减小叶片气孔的开张程度,减少叶片气孔密度,进而减小叶片的  $P_n$ <sup>[16]</sup>;而在太阳辐射强、高温、干旱条件下气孔因素对叶片净光合速率的影响会小于因干旱导致酶活性降低等非气孔因素对叶片光合的影响,这种条件下抗蒸腾剂的喷施可以缓解植物对水分的需求,从而增加植物的  $P_n$ <sup>[17]</sup>。Shinohara 等<sup>[18]</sup>的研究结果表明洋蓟(*Cynara scolymus* L.)在土壤水分充足条件下喷施代谢性抗蒸腾剂脱落酸与成膜型抗蒸腾剂 Vapor Guard 后, $T_r$  与  $P_n$  值较对照降低,而随着土壤水分的降低  $T_r$  与  $P_n$  值则较对照升高;与其结果相似,本试验对 4 种草的研究观察到 GC 的喷施使  $T_r$  与  $P_n$  降低;另外本试验发现在试验浓度区间内 GC 的处理浓度越大对蒙古冰草、白花草木樨和沙打旺蒸腾速率抑制则越强。

本试验研究表明 FA 喷施也可使 4 种草的  $T_r$  与  $P_n$  降低,这与孙山等<sup>[19]</sup>在樱桃(*Cerasus pseudocerasus* G. Don)苗上喷施 FA 的研究结果相同;另外通过对不同浓度 FA 处理的比较我们发现在蒙古冰草、白花草木樨和沙打旺各浓度喷施处理的  $T_r$  与  $P_n$  值均受到明显抑制,而在蜀葵上规律则不太明显,这说明 FA 在蒙古冰草、白花草木樨和沙打旺上的喷施效果要更好一些。Boari 等<sup>[20]</sup>对番茄的研究结果表明正常供水条件下  $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的 KL 可使豌豆叶片  $T_r$ 、 $P_n$  与气孔导度下降,本试验 KL 对  $T_r$ 、 $P_n$  影响与其结果相似,通过不同浓度 KL 喷施处理的比较我们发现试验浓度区间内对于蒙古冰草与蜀葵低浓度的 KL 即可有效发挥其蒸腾抑制作用;而对白花草木樨和沙打旺则浓度越大蒸腾抑制作用越强。本研究中,在蒙古冰草、白花草木樨与沙打旺叶面喷施的抗蒸腾剂 GC 处理在降低  $T_r$  方面优于 FA 与 KL 的处理,蜀葵则为 KL 与 GC 处理优于 FA 的处理。在对光合的抑制方面,蒙古冰草与

白花草木樨喷施 KL 低于喷施 GC 与 FA 的影响,沙打旺与蜀葵喷施 GC 与 KL 低于喷施 FA 的影响。

水分利用效率是耦合水分生理与光合研究中的重要参数之一。FA、GC、KL 这 3 种类型抗蒸腾剂在叶片的喷施,在对叶片净光合速率和蒸腾速率产生影响的同时也会导致其水分利用效率的差异<sup>[11]</sup>。Abdallah 等<sup>[21]</sup>发现番茄在喷施 FA 后,其 WUE 较对照提升 33.45%;本研究结果与其不一致,本试验结果表明,不同浓度 FA 的喷施后 4 种草的 WUE 值低于对照,在试验浓度区间内 FA 喷施浓度越大 4 种草的 WUE 随 FA 浓度增大呈现先升高再降低的趋势,以浓度为  $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时的处理水分利用效率最高,这种结果差异的原因可能由植物所处气温与土壤水分含量不同所导致的。朴春红等<sup>[12]</sup>通过对玉米喷施成膜型抗蒸腾剂,发现不同浓度抗蒸腾剂均可提高植株 WUE;本试验 4 种草中蜀葵与其结果保持一致,白花草木樨、蒙古冰草与沙打旺则在不同浓度下得到了不同的结果,产生这种不同的结果的原因可能是植物种类的差异<sup>[17]</sup>。Dinis 等<sup>[22]</sup>在葡萄(*Vitis vinifera* L.)藤喷施  $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  KL 时发现其 WUE 显著升高;本试验中低浓度 KL 对 4 种草进行喷施处理后,其 WUE 也有所升高,但在高浓度 KL 喷施处理上得到了相反的结果,这说明 KL 浓度的不同会对植株水分利用效率的促进还是抑制产生影响。我们发现 4 种草中植物中蜀葵、白花草木樨与沙打旺叶面喷施的抗蒸腾剂 GC 与 KL 处理的 WUE 较对照升高方面优于 FA,蒙古冰草中 KL 处理优于 FA 与 GC。

生长是反映植物体内各生理活动的一个综合指标,有研究<sup>[23-24]</sup>结果表明抗蒸腾剂使植物体内水分状况得到改善,使植物在干旱条件下仍能维持正常代谢,叶绿素含量升高,叶面积增大,净光合速率与根系吸收能力得到提高,是干旱条件下促进植物生长的有效手段。但也有研究认为使用抗蒸腾剂不可避免地会降低作物产量,并且认为植株生长缓慢是由于抗蒸腾剂使光合作用减弱导致净光合产物减少造成的<sup>[25]</sup>。Boari 等<sup>[26]</sup>发现适宜水分条件下喷施抗蒸腾剂 KL 使得番茄的生长受到抑制,与其结果相似,本试验中 4 种草的光合与生物量均出现了下降,说明长期喷施 3 种抗蒸腾剂可使其叶片光合能力降低,并导致其生长期内植物干物质积累减少。本试验结果表明在对生物量降低方面,蒙古冰草喷施 GC 的影响低于 KL 与 FA,沙打旺与蜀葵喷施 GC

与FA的影响低于KL,白花草木樨则为喷施KL与FA的影响低于GC。

## 4 结论

综合抗蒸腾剂在蒙古冰草、沙打旺、白花草木樨与蜀葵叶片喷施的效果来看,3种抗蒸腾剂以GC和KL喷施效果较好,FA较差;各抗蒸腾剂中FA以喷施浓度 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、GC浓度以 $12\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、KL浓度以 $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对4种草蒸腾抑制的能力较强且水分利用效率最佳。蒙古冰草与沙打旺以喷施GC $12\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、白花草木樨与蜀葵以喷施KL $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时水分利用效率最佳。本试验结果说明了3种抗蒸腾剂在生态型植被配置中的蒙古冰草、沙打旺、白花草木樨与生态景观型植被配置中的蜀葵这4种草本植物的叶面喷施效果,筛选出了盆栽条件下不同抗蒸腾剂的最佳使用浓度,为干旱荒漠区采煤迹地植被保育技术提供了新的理论策略。

## 参考文献

- [1] 武彦辉. 我国煤矸石的处置利用现状及展望[J]. 中国环保产业, 2019, 247(01): 55-57
- [2] 杨勤学, 赵冰清, 郭东昱. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1152-1157
- [3] 张仁慧. 西部干旱半干旱地区水资源合理利用问题探讨[J]. 水土保持通报, 2003, 23(5): 78-81
- [4] 张小雨, 张喜英. 抗蒸腾剂研究及其在农业中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 938-944
- [5] 李继东, 毕会涛, 王一涵, 等. 薄膜型抗蒸腾剂对常温贮藏富士苹果品质与生理的影响[J]. 河南农业大学学报, 2010, 44(3): 286-289
- [6] 冯建灿, 郑根宝, 何威, 等. 抗蒸腾剂在林业上的应用研究进展与展望[J]. 林业科学研究, 2005, 18(6): 755-760
- [7] 李金洪, 李伯航. 植物抗蒸腾剂的研究与应用[J]. 中国农学通报, 1993(4): 28-32
- [8] Brito C, Dinis L-T, Moutinho-Pereira J, et al. Kaolin, an emerging tool to alleviate the effects of abiotic stresses on crop performance[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 250: 310-316
- [9] Aldasoro J, Larrainzar E, Arrese-Igor C. Application of anti-transpirants temporarily alleviates the inhibition of symbiotic nitrogen fixation in drought-stressed pea plants[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 193-199
- [10] Boari F, Cucci G, Donadio A, et al. Kaolin influences tomato response to salinity: physiological aspects[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 2014, 64(7): 559-571
- [11] 师长海, 孔少华, 翟红梅, 等. 喷施抗蒸腾剂对冬小麦旗叶蒸腾效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1091-1095
- [12] 朴春红, 宝音巴特, 郭占全, 等. 抗蒸腾剂对玉米主要叶片光合特性及生理特性的影响[J]. 分子植物育种, 2017, 15(10): 4289-4293
- [13] 周主贵, 陆国盈, 林善海, 等. 抗旱营养调节剂“旱地龙”对甘蔗矿质营养和光合特性的影响[J]. 河南农业科学, 2013, 42(10): 31-35
- [14] 许喆, 任健, 田英, 等. 外源ABA对干旱胁迫下多年生黑麦草光合特性的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(05): 1243-1249
- [15] 刘军, 齐广平, 康燕霞, 等. 不同灌溉处理下紫花苜蓿光合特性、叶绿素荧光参数及生物量的变化[J]. 草地学报, 2019, 27(06): 1569-1576
- [16] 李金洪, 李伯航. 干旱条件下抗蒸腾剂对玉米的生理效应研究[J]. 河北农业大学学报, 1993(3): 42-46
- [17] 陈怡昊, 李波, 王奇峰, 等. FA型抗蒸腾剂对温室黄瓜生长和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 131-134
- [18] Shinohara T, Leskovaar D I. Effects of ABA, antitranspirants, heat and drought stress on plant growth, physiology and water status of artichoke transplants[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 165: 225-234
- [19] 孙山, 徐秀玉, 张力思, 等. 黄腐酸对甜樱桃砧木“吉塞拉”扦插苗蒸腾作用及光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2018(10): 45-49
- [20] Boari F, Donadio A, Schiattone M I, et al. Particle film technology: A supplemental tool to save water[J]. Agricultural Water Management, 2015, 147: 154-162
- [21] Abdallah A M, Burkey K O, Mashaheet A M. Reduction of plant water consumption through anti-transpirants foliar application in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 235: 373-381
- [22] Dinis L T, Malheiro A C, Luzio A, et al. Improvement of grapevine physiology and yield under summer stress by kaolin-foliar application: water relations, photosynthesis and oxidative damage[J]. Photosynthetica, 2017, 55: 1-12
- [23] 苏文锋, 苏振声, 林玲玲, 等. 干旱胁迫下抗蒸腾剂对叶子花生生理特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(12): 2122-2128
- [24] 李茂松, 李森, 张述义, 等. 灌浆期喷施新型FA抗蒸腾剂对冬小麦的生理调节作用研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 703-708
- [25] Iriti M, Picchi V, Rossoni M, et al. Chitosan anti-transpirant activity is due to abscisic acid-dependent stomatal closure[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 66(3): 493-500
- [26] Boari F, Donadio A, Pace B, et al. Kaolin improves salinity tolerance, water use efficiency and quality of tomato[J]. Agricultural Water Management, 2016, 167: 29-37

(责任编辑 陈力玉)