

邓杰, 戴林建, 苏招红, 等. 二氧化钛喷施剂对烤烟上部烟叶光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(4): 33-38.

二氧化钛喷施剂对烤烟上部烟叶光合作用和 叶绿素荧光参数的影响

邓 杰¹, 戴林建¹, 苏招红², 王建波¹, 杨 苏¹, 周 田¹
(1 湖南农业大学 农学院, 湖南 长沙 410128; 2 湖南农业大学 理学院, 湖南 长沙 410128)

摘要:【目的】探讨二氧化钛喷施剂对烤烟上部烟叶光合作用及叶绿素荧光参数的影响, 为提高上部烟叶的可用性提供参考。【方法】以溶胶-凝胶法特制的二氧化钛为材料, 研究了不同浓度和配方的喷施剂对成熟期上部烟叶光合色素含量、光合生理指标及叶绿素荧光参数的影响。【结果】二氧化钛喷施剂延缓了上部烟叶中叶绿素和类胡萝卜素的降解速度。二氧化钛喷施剂对上部烟叶的光合作用和叶绿素荧光参数影响显著, 喷施剂降低了上部烟叶的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率, 提高了胞间二氧化碳浓度, 对叶温的影响不明显; 喷施剂处理的 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 潜在活力 (F_v/F_o)、光化学淬灭系数 (qP) 均高于清水对照处理, 初始荧光 (F_o)、非光化学淬灭系数 (NPQ) 低于清水对照处理。二氧化钛和二氧化钛复合氧化石墨烯 2 种喷施剂对光强的吸收效能均以质量浓度为 $0.45\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的喷施处理表现最好。【结论】喷施二氧化钛的烤烟上部烟叶在一定程度上能够吸收紫外线, 其中, 二氧化钛复合氧化石墨烯喷施剂对光强的吸收效果较好; 喷施剂作用于烟叶的光能吸收效果有一定浓度阈值。

关键词: 二氧化钛 (TiO_2); 烤烟; 上部烟叶; 光合作用; 叶绿素荧光参数
中图分类号: S572 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)04-0033-06

Effects of titanium dioxide spraying agents on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of upper tobacco leaves

DENG Jie¹, DAI Linjian¹, SU Zhaohong², WANG Jianbo¹, YANG Su¹, ZHOU Tian¹
(1 College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
2 College of Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: 【Objective】To explore the effect of TiO_2 spraying agent on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of upper tobacco leaves, and provide a reference for improving the availability of upper tobacco leaves. 【Method】 TiO_2 spraying agent was prepared by means of sol-gel method. The effects of different concentrations and formulas of TiO_2 spraying agent on photosynthetic pigment content, photosynthetic physiological indexes and chlorophyll fluorescence parameters of upper tobacco leaves at maturity were studied. 【Result】 TiO_2 spraying agents retarded the degradation rates of chlorophyll and carotenoid of upper tobacco leaves. The spraying agents reduced photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of upper tobacco leaves, increased the intercellular CO_2 concentration in upper tobacco leaves, but leaf temperature was unaffected. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of upper tobacco leaves were significantly affected by TiO_2 spraying agents. Compared with the spraying water control, the spraying agents increased F_v/F_m , F_v/F_o and qP, and decreased F_o and NPQ. The absorption efficiency of light intensity of tobacco leaves sprayed titanium dioxide or titanium dioxide composite graphene was the best at the

concentration of 0.45 g·L⁻¹. 【Conclusion】 Tobacco leaves can absorb ultraviolet (UV) to a certain extent, and the efficiency of spraying titanium dioxide composite graphene was better. There was a threshold of spraying agent concentration for light absorption efficiency.

Key words: titanium dioxide (TiO₂); flue-cured tobacco; upper tobacco leaf; photosynthesis; chlorophyll fluorescence parameter

上部烟叶质量和可用性偏低是导致我国上部烟叶大量积压的主要原因,其中光温等环境因素对上部烟叶质量及可用性的影响不容忽视。光照强度过大导致烟叶海绵组织和栅栏组织加厚,细胞间隙降低,造成叶片厚而组织粗糙,叶脉突出,形成粗筋暴叶;日照时间过长、温度过高,导致烟碱的积累增加和其他化学成分的不协调^[1]。生产上常通过调整移栽期,使上部烟叶成熟期避开强光高温的外部环境,继而提高上部烟叶可用性。但烤烟生育期内气候变化随机因素较多,通过调整移栽期具有较大的局限性。二氧化钛 (TiO₂) 俗称钛白,是金属钛的一种氧化物^[2]。作为一种优异的无机功能材料, TiO₂ 具有光催化效率高、化学稳定性好、安全无毒、廉价等优点^[3-5]。由于其紫外反射和吸收的特性,被广泛应用于防晒化妆品、遮光剂、涂料、橡胶、化纤等领域^[6-7]。目前, TiO₂ 作为紫外线防护剂应用于人体防晒的研究较多,但作为防晒剂应用于植物的研究比较少见。本研究以大田成熟期烤烟上部叶为材料,通过在成熟期对烟叶表面喷施特制的二氧化钛及二氧化钛复合材料喷施剂,利用 TiO₂ 在烟叶表面所形成的保护膜吸收或反射紫外线,探讨其对上部烟叶光合作用及叶绿素荧光参数的影响,旨在为提高上部烟叶的可用性提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2016 年在湖南农业大学芸园烟草教学基地进行。供试烤烟品种为 ‘k326’, 施用的喷施剂为溶胶-凝胶法特制的二氧化钛喷施剂 (TiO₂) 和二氧化钛复合材料喷施剂 (TiO₂ 复合), 均由湖南农业大学理学院提供, 喷施设备为小型手动喷雾器。试验地土壤: 水稻土, pH5.89, 有机质、全氮、全磷、全钾的质量分数分别为 28.37、1.29、0.64 和 5.21 g·kg⁻¹, 速效磷和速效钾的质量分数分别为 23.66 和 132.60 mg·kg⁻¹。施肥及田间管理按照当地优质烤烟生产技术规范执行。

1.2 试验设计

采用双因素试验, 双因素分别为喷施剂配方

(A) 和施用浓度 (B), 试验共设置 7 个处理: A1B1、A1B2 和 A1B3 分别喷施 TiO₂ 质量浓度为 0.30、0.45 和 0.60 g·L⁻¹, A2B1、A2B2 和 A2B3 分别喷施 TiO₂ 复合质量浓度为 0.30、0.45 和 0.60 g·L⁻¹, 以喷施等量清水的处理为对照组 (CK)。3 次重复, 共 21 个小区, 各小区面积 50 m², 随机排列。

1.3 试验方法

烤烟于 6 月 8 日打顶。使用小型手动喷雾器将药剂均匀地喷施于上部烟叶正表面, 以喷至叶面滴水为度, 用液量为 600 L·hm⁻²。喷施处理共进行 2 次, 第 1 次为打顶后 10 d (6 月 19 日), 第 2 次为打顶后 25 d (7 月 5 日), 施用时应避免阴雨天气。6 月 19 日—7 月 20 日的日平均气温 32.6 ℃, 最高气温 39 ℃, 最低气温 22 ℃, 其中, 多云和晴天 20 d、阴雨天气 11 d。7 月 20 日进行上部烟叶的采收, 30 日烤烟出烤房。

1.4 光合指标测定方法

1.4.1 光合色素的测定 于首次喷施处理后的第 5、15 和 30 天测定上部烟叶的光合色素含量, 固定选取见光一致的第 3 序位 (从上至下) 的上部叶, 采用 φ 为 80% 的丙酮溶液提取, 分光光度计测量法^[8]测定。以提取试剂为空白, 分别于 663、646 和 470 nm 处测定光密度 (D), 计算单位面积内的叶绿素及类胡萝卜素含量。

1.4.2 光合生理指标的测定 于首次喷施处理后第 1、9、17 和 25 天的上午 10:00—12:00, 用便携式光合测定仪 (Li-6400, LI-COR) 控制光强为固定值, 测定条件为开放式气路, 测定各处理小区上部叶的净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci)、蒸腾速率 (Tr) 及叶片温度 (Tl)。为尽量消除各处理在测定时间上的误差, 各处理每个重复仅测定有代表性的烟株 3 株, 且固定选取见光一致的第 3 序位 (从上至下) 的上部叶进行测定, 结果取平均值。

1.4.3 叶绿素荧光动力学参数的测定 于首次喷施处理后第 26 天, 固定选取见光一致的第 3 序位 (从上至下) 的上部叶, 用便携式脉冲调制荧光仪 (Palm-2000, WALZ) 测定经暗适应 30 min 后叶片的最大荧光 (F_m)、初始荧光 (F₀)、稳态荧光 (F_s) 和

稳态最大荧光 (F_m')。参照 Genty^[9] 的方法计算 PS II 量子效率 ($\Phi PS II$)、光化学淬灭系数 (qP) 和非光化学淬灭系数 (NPQ):

$$\Phi PS II = (F_m' - F_s) / F_m'$$
$$qP = (F_m' - F_s) / (F_m' - F_o)$$
$$NPQ = (F_m - F_m') / F_m$$

1.5 统计方法

采用 SPSS18.0 和 Excel2016 进行数据分析和显著性检验。

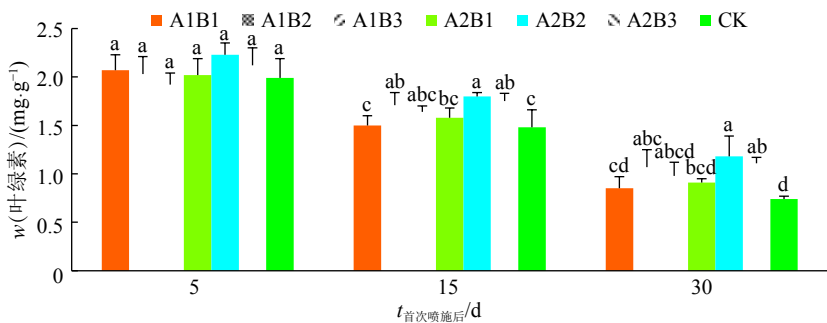
2 结果与分析

2.1 二氧化钛喷施剂对上部烟叶光合色素的影响

如图 1 所示, 随着生育期的推进, 烟叶的叶绿素含量逐渐降低, 喷施处理后的前期降幅较为缓慢, 生育后期叶绿素降解速度开始加快。各喷施处理间的极差也随着时间的推进而增大, 首次喷施后第 5 天各处理间并未出现显著性差异, 第 15 和

30 天的测量数据表明, 各喷施处理间的差异性明显增大, 且整体来看, 喷施剂处理的叶绿素含量高于清水对照处理, 其中 A2B2、A2B3 处理 (0.45 、 $0.60\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ TiO}_2$ 复合) 增加较为明显。2 种喷施剂均以 $0.45\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 喷施处理的叶绿素含量最高, 说明上部烟叶中光合色素的含量并不是随着喷施浓度的增加而增加, 而是具有一定浓度阈值。

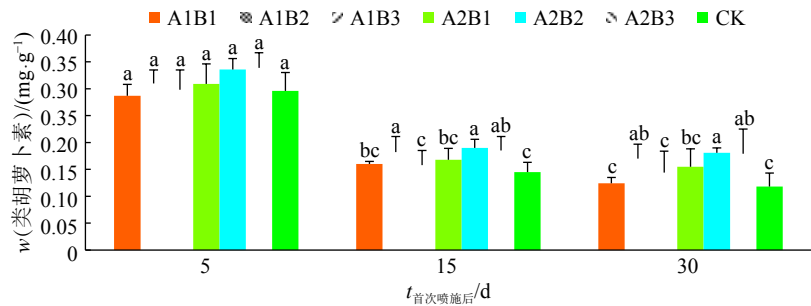
各处理对烟叶类胡萝卜素含量的影响如图 2 所示, 随着生育期的推进, 类胡萝卜素的含量逐渐降低, 当到达烟叶成熟末期, 类胡萝卜素降解速度缓慢, 含量趋于稳定。各喷施处理间的极差也随着时间的推进扩大, 首次喷施后第 5 天各处理间并未出现显著性差异, 第 15 和 30 天各喷施处理间的差异明显增大, 整体来看, 喷施剂处理的类胡萝卜素含量高于清水对照处理, 其中, A1B2($0.45\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ TiO}_2$)、A2B2 和 A2B3(0.45 和 $0.60\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ TiO}_2$ 复合) 处理增加较为明显。



相同时间不同柱子上凡是有有一个相同小写字母者, 表示不同喷施处理间的差异不显著 ($P>0.05$, 单因素方差分析)

图 1 不同处理对上部烟叶总叶绿素含量的影响

Fig. 1 The effects of different treatments on total chlorophyll contents of upper tobacco leaves



相同时间不同柱子上凡是有有一个相同小写字母者, 表示不同喷施处理间的差异不显著 ($P>0.05$, 单因素方差分析)

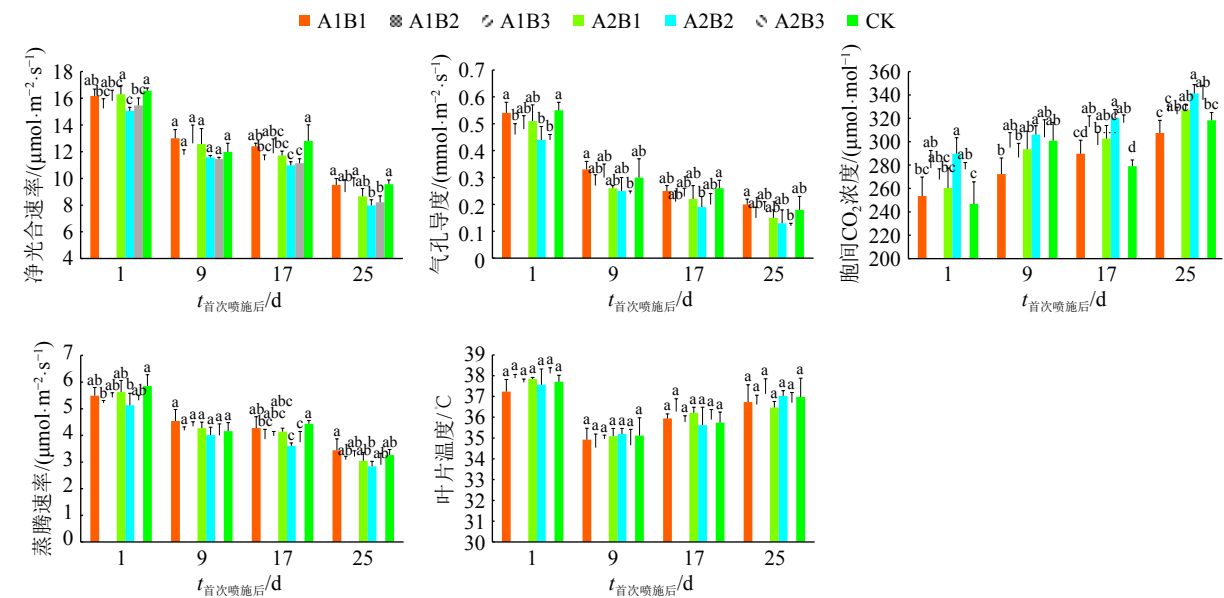
图 2 不同处理对上部烟叶类胡萝卜素含量的影响

Fig. 2 The effects of different treatments on carotenoid contents of upper tobacco leaves

2.2 二氧化钛喷施剂对上部烟叶光合生理指标的影响

图 3 的结果表明, 经过二氧化钛复合氧化石墨烯喷施剂处理的上部烟叶的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率降低幅度较为明显 (A1B1 除外), 胞间

CO_2 浓度上升幅度较大, A2B2、A2B3 处理 (0.45 、 $0.60\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ TiO}_2$ 复合) 与对照差异显著; 各处理的叶片温度变化规律不明显, 基本与大气温度呈同步趋势, 但由于上部烟叶直接受到阳光照射, 其表面温度略高于大气温度。



各图中，相同时间不同柱子上凡是有有一个相同小写字母者，表示不同喷施处理间的差异不显著 ($P>0.05$ ，单因素方差分析)

图 3 不同处理对上部烟叶光合生理指标的影响

Fig. 3 The effects of different treatments on photosynthetic physiological indexes of upper tobacco leaves

2.3 二氧化钛喷施剂对上部烟叶叶绿素荧光动力学参数的影响

各处理对上部烟叶叶绿素荧光参数的影响见表 1。整体来看，各喷施剂处理的 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 潜在活力 (F_v/F_0)、光化学淬灭系数 (qP) 均高于清水对照 (CK); 除 A1B1 处理外，各喷施剂处理的 PS II 量子效率 ($\Phi_{PS II}$) 均高于 CK;

各喷施剂处理的初始荧光 (F_0)、非光化学淬灭系数 (NPQ) 均低于 CK。将烤烟适熟期 (7 月 19 日) 测定的光合色素含量与同期测定的叶绿素荧光动力学参数进行 Pearson 相关性分析，结果见表 2。由表 2 得出，上部烟叶的叶绿素总量与 F_v/F_m 、 F_v/F_0 存在显著正相关，与 qP 存在极显著正相关，与 F_0 存在显著负相关，与 NPQ 存在极显著负相关; 类

表 1 不同处理对上部烟叶叶绿素荧光参数的影响¹⁾

Table 1 The effects of different treatments on chlorophyll fluorescence parameters of upper tobacco leaves

处理	初始荧光 (F_0)	PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)	PS II 潜在活力 (F_v/F_0)	PS II 量子效率 ($\Phi_{PS II}$)	光化学淬灭系数 (qP)	非光化学淬灭系数 (NPQ)
A1B1	140.94±6.20ab	0.75±0.03bcAB	3.06±0.48bcAB	0.537±0.014b	0.622±0.092ab	0.166±0.011abAB
A1B2	132.86±8.06ab	0.78±0.02abAB	3.56±0.45abAB	0.578±0.048ab	0.669±0.038ab	0.123±0.017bcBC
A1B3	136.80±4.79ab	0.76±0.02abcAB	3.33±0.33abcAB	0.548±0.041b	0.634±0.042ab	0.159±0.013abAB
A2B1	135.30±5.94ab	0.77±0.01abAB	3.42±0.10abcAB	0.561±0.045ab	0.659±0.027ab	0.131±0.043bcABC
A2B2	126.65±6.40b	0.80±0.02aA	3.95±0.44aA	0.598±0.058ab	0.710±0.080a	0.093±0.023cC
A2B3	129.54±12.91b	0.79±0.02aA	3.77±0.39aAB	0.624±0.028a	0.719±0.041a	0.111±0.009cBC
CK	145.68±5.73a	0.74±0.01cB	2.83±0.08cB	0.543±0.021b	0.572±0.030b	0.186±0.028aA

1) 同列数据后凡是有有一个相同大、小写字母者，分别表示不同喷施处理在0.01、0.05水平差异不显著(单因素方差分析)

表 2 光合色素含量与叶绿素荧光参数的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between photosynthetic pigment content and chlorophyll fluorescence parameter

光合色素 含量	初始荧光 (F_0)	PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)	PS II 潜在活力 (F_v/F_0)	PS II 量子效率 ($\Phi_{PS II}$)	光化学淬灭 系数(qP)	非光化学淬灭 系数(NPQ)
叶绿素总量	-0.454*	0.479*	0.452*	0.378	0.590**	-0.550**
类胡萝卜素	-0.152	0.399	0.355	0.544*	0.632**	-0.526*

1) “*”、“**”分别表示达到0.05、0.01水平的显著相关

胡萝卜素含量与ΦPS II 存在显著正相关、与 qP 存在极显著正相关, 与 NPQ 存在显著负相关。可见, 叶绿素荧光参数各项指标与叶绿素总量存在显著或极显著的相关, 叶绿素荧光参数在某种程度上反映了烤烟叶片的光合作用。

3 讨论与结论

3.1 二氧化钛喷施剂对上部烟叶光合生理指标的影响

光合色素的含量直接关系到光能与碳固定形成有机物, 是植株进行光合作用的基础^[10-11]。随着生育期的推进, 喷施剂处理与清水对照处理光合色素含量极差逐步增加, 可能是因为二氧化钛吸收光并影响光合色素形成需要一定过程, 也有可能是 7 月 5 日经过第 2 次喷施处理后, 延长了喷施剂在烟叶表面吸收光强的时间。2 种喷施剂都以 0.45 g·L⁻¹ 处理表现最好, 说明上部烟叶中光合色素的含量并不是随着喷施浓度的增加而增加, 而具有一定浓度阈值; 喷施剂处理的烤烟上部叶的叶绿素降解延缓有利于生育后期的烟叶捕获更多的光能供光合作用使用, 叶肉细胞的光合活性也得到增加, 湖南烟区烟叶成熟期气温高、光照强, 上部叶高温逼熟, 加之与晚稻抢节令, 使得上部叶可用性相对较差, 本试验喷施剂二氧化钛能够吸收紫外线, 使烤烟上部叶生育后期仍能维持较高的类胡萝卜素含量, 保护叶绿素免遭强光氧化的损害, 从而延续叶片的光合作用^[12], 这在一定程度上能够使上部叶正常落黄, 改善上部叶的烟叶品质。

3.2 二氧化钛喷施剂对上部烟叶光合生理指标的影响

随着生育期的推进, 各喷施处理的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率逐步降低, 胞间二氧化碳浓度却随之上升, 说明净光合速率的下降并不是因为气孔因素造成, 这与 Farquhar 等^[13]的观点一致。光合生理指标是植物对光能利用能力最综合的评价^[14-15]。首次喷施处理后的第 1 天, 各喷施剂处理的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均低于清水对照, 胞间二氧化碳浓度均高于清水对照, 除叶片温度外, 部分喷施剂处理的光合参数与对照差异显著 ($P<0.05$), A2B2 处理 (0.45 g·L⁻¹ 二氧化钛复合氧化石墨烯) 的胞间二氧化碳浓度与对照差异极显著 ($P<0.01$)。净光合速率代表着作物光反应速率与呼吸消耗速率的差值, 是光合参数中最重要的指标, 喷施剂处理的上部烟叶净光合速率低于对照, 说明二氧化钛喷施剂对光强进行了一定程度的吸收, 引

起光合作用暗反应中同化力[即三磷酸腺苷 (ATP) 和还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸 (NADPH)] 供应不足, 限制了光合碳同化的进程^[16], 2 种喷施剂对光强的吸收效能未随着喷施浓度的增加而增加, 都以质量浓度为 0.45 g·L⁻¹ 的喷施处理表现最好, 说明喷施剂作用于烟叶的光能吸收效果有一定浓度阈值。

首次喷施处理后的第 9 天喷施剂处理与对照间的差异反而减小, 各处理的净光合速率和蒸腾速率差异不显著 ($P>0.05$), 推测可能是二氧化钛喷施剂在烟叶表面喷施后, 吸收光强和室外暴露环境都会对二氧化钛造成损耗, 所以喷施处理后第 1 天的光强吸收性要高于喷施处理后第 9 天, 氧化石墨烯本身并不具备吸光性, 但其更好的分散性和光催化性^[17-18]使二氧化钛复合氧化石墨烯喷施剂喷施在烟叶表面后更为稳定, 这也是 A2B2 处理 (0.45 g·L⁻¹ 二氧化钛复合氧化石墨烯) 在光强吸收上表现更好的原因, 第 2 次喷施处理后的第 1 天和第 9 天光合参数测定结果也验证了上述推测。

3.3 二氧化钛喷施剂对上部烟叶荧光动力学参数的影响

分析叶绿素荧光动力学参数有助于分析和探明光合机构中受影响的部位^[19]。初始荧光 (F_0) 反映的是 PS II 反应中心全部开放达到的荧光水平, 喷施剂处理后 F_0 的减少直观地反映了光合有效辐射的减少^[20]; F_v/F_m 、 F_v/F_0 分别代表 PS II 反应中心原始光能的转化率和受胁迫后 PS II 反应中心潜在活性的变化, ΦPS II 则表示植物叶片处于光照环境下用于电子传递的能量占捕获光能的比例, F_v/F_m 、 F_v/F_0 和 ΦPS II 的增加则说明光强减弱后烤烟对光的利用率加强、过剩光能减少。

qP 反映了 PS II 反应中心天线色素所捕获的光能转换成为化学能的份额, 非光化学淬灭系数 (NPQ) 则反映了 PS II 反应中心天线色素所捕获的光能未能转换成为化学能而以热能耗散的比例^[21]。本研究中喷施剂处理的 qP 高于对照, 表明上部烟叶光强减弱后 PS II 反应中心电荷分离的速度加快, 进而提高了 PS II 电子传递链的效率; NPQ 低于对照, 反映了在二氧化钛吸收了光强的情况下 PS II 反应中心非化学能的耗散减少, 这不利于对光合机构的保护^[22]。NPQ 还与 ATP、NADPH 的形成、积累以及光合膜有关, 但与光合电子传递链无直接关系^[23]。喷施剂处理的烤烟在光强被吸收的弱光环境下, 植株会将更多的吸收光能分配给光化学途径, 而清水对照处理的烤烟则将更多的吸收光能分配给热耗

散途径,说明植物在不同的光照条件下会作出不同的反应。

3.4 结论

光照、气温、湿度作为作物的三大生态因子,尤其是光照直接影响烤烟的生长发育及品质^[24-26]。本研究结果表明,喷施二氧化钛的烤烟上部叶在一定程度上能够吸收紫外线,其中,二氧化钛复合氧化石墨烯喷施剂对光强的吸收效果较好,一定浓度的喷施剂对上部烟叶的光合色素含量、光合生理指标、叶绿素荧光动力学参数影响显著。本研究主要侧重于验证二氧化钛喷施剂对上部烟叶表面光强的改变情况,今后的研究可侧重于二氧化钛喷施剂对上部烟叶质量的影响,并考察烤后烟叶理化性状及感官质量等指标,以进一步了解二氧化钛喷施剂对上部烟叶的影响。

参考文献:

- [1] 周冀衡,朱小平,王彦亭,等.烟草生理与生物化学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1996.
- [2] SHI L, LI C, CHEN A, et al. Morphological structure of nanometer $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ composite powders synthesized in high temperature gas mediumsreactor[J]. Chem Eng J, 2001, 84(3): 405-411.
- [3] 丛野,秦云,李轩科,等.二氧化钛涂覆多壁碳纳米管的制备及可见光催化活性[J].物理化学学报,2011,27(6): 1509-1515.
- [4] 唐玉朝,李薇,胡春,等. TiO_2 形态结构与光催化活性关系的研究[J].化学进展,2003(5): 379-384.
- [5] MANCINI M, KUBIAK P, GESERICK J, et al. Mesoporous anatase TiO_2 composite electrodes: Electrochemical characterization and high rate performances [J]. J Power Sources, 2009, 189(1): 585-589.
- [6] TARANKAR P, QIAO Q, JIANG H, et al. Hyperbranched conjugated polyelectrolyte bilayers for solar cell applications[J]. J Am Chem Soc, 2007, 129(29): 8958-8959.
- [7] BROWN P, KARNAT P V. Quantum dot solar cells: Electrophoretic deposition of CdSe-C_{60} composite films and capture of photogenerated electrons with $n\text{C}_{60}$ cluster shell[J]. J Am Chem Soc, 2008, 130(28): 8890-8891.
- [8] 萧浪涛,王三根.植物生理学实验技术[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [9] GENTY B, BRIANTAIS J M, BAKER N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and photochemical quenching of chlorophyll fluorescence[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1989, 990(1): 87-92.
- [10] 岳红宾.不同氮素水平对烟草碳氮代谢关键酶活性的影响[J].中国烟草科学,2007,28(1): 18-20.
- [11] 李合生.现代植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [12] 闫萌萌,王铭伦,王洪波.光质对花生幼苗叶片光合色素含量及光合特性的影响[J].应用生态学报,2014,25(2): 483-487.
- [13] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annu Rev Plant Phys, 1982, 33: 317-345.
- [14] 战吉成,黄卫东,王利军.植物弱光逆境生理研究综述[J].植物学通报,2003,20(1): 43-50.
- [15] 杨建昌,朱庆森,王志琴.亚种间杂交稻光合特性及物质积累与运转的研究[J].作物学报,1997,23(1): 82-88.
- [16] PARIDA A K, DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review[J]. Ecotox Environ Safe, 2004, 60(3): 324.
- [17] 周琪,钟永辉,陈星,等.石墨烯/纳米 TiO_2 复合材料制备及其光催化性能[J].复合材料学报,2014,31(2): 255-262.
- [18] ZHAO D, WANG X. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue under visible irradiation on graphene/ TiO_2 dyade structure[J]. Catalysis B: Environmental, 2012(111/112): 303-308.
- [19] 张守仁.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J].植物学通报,1999,16(4): 444-448.
- [20] GUO D, GUO Y, ZHAO J. Photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in leaves of stem mustard (*Brassica juncea* var. *tsatsai*) after turnip mosaic virus infection[J]. Plant Sci, 2004, 168(1): 57-63.
- [21] 赵会杰,邹琦,于振文.叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用[J].河南农业大学学报,2000,34(3): 248-251.
- [22] 宋丽丽,郭延平,徐凯.温州蜜柑叶片光合作用光抑制的保护机理[J].应用生态学报,2003,14(1): 47-50.
- [23] 刘建新,王金成,王鑫.外源 NO 对 NaHCO_3 胁迫下黑麦草幼苗光合生理响应的调节[J].生态学报,2012,32(11): 3460-3466.
- [24] 黄勇.烟叶结构与代谢产物差异及光因素影响的研究[D].长沙:湖南农业大学,2007.
- [25] 过伟民,张艳玲,蔡宪杰,等.光质对烤烟品质及光合色素含量的影响[J].烟草科技,2011(9): 65-70.
- [26] 杨兴有,刘国顺.成熟期光强对烤烟理化特性和致香成分含量的影响[J].生态学报,2007,27(8): 3450-3456.

【责任编辑 周志红】