

李军营,徐超华,崔明昆,等.不同光质对烟草叶片生长及叶绿素荧光参数的影响[J].江苏农业科学,2015,43(11):140-145.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.040

不同光质对烟草叶片生长及叶绿素荧光参数的影响

李军营¹,徐超华^{2,3},崔明昆²,马二登¹,黄国宾²,龚明²

(1. 云南省烟草农业科学研究院,云南昆明 650031;

2. 云南师范大学生命科学学院/生物能源持续开发利用教育部工程研究中心/云南省生物质能与环境生物技术重点实验室,云南昆明 650500;

3. 云南省农业科学院甘蔗研究所/云南省甘蔗遗传改良重点实验室,云南开远 661699)

摘要:以烤烟品种云烟 87 为材料,通过覆盖白、红、黄、蓝、紫色滤膜获得不同光质,研究了烟草叶片在 70 d 生长发育期内,光质对烟叶生长进程、叶绿素含量、光合作用及叶绿素荧光参数的影响。结果表明:①与白膜处理相比,处理 14 d,红、紫膜处理的叶长显著增加,各处理叶宽、株高、茎围差异不显著;在 14~42 d 处理下,蓝膜处理对叶长、叶宽、株高抑制明显,增加茎围粗度;②处理 14~42 d,蓝、黄膜促进光合色素含量降解,处理 42~70 d,蓝、紫膜延缓烟叶衰老,红膜在整个生长过程中都促进光合色素的合成;③处理 14~70 d,与黄膜处理相比,红、蓝、紫膜处理有较高的净光合速率 P_n 、PS II 最大光化学量子效率 F_v/F_m 、PS II 实际光化学量子效率 Φ_{PSII} 、光化学淬灭系数 q_P 。结果表明,烟草不同生长期对光质的反应不同,红光、蓝光、紫光有利于烟叶的生长发育,黄光对烟叶生长的抑制作用明显。

关键词:叶绿素荧光;生长发育;光合作用;光质;烟叶

中图分类号: S572.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)11-0140-06

光是植物生存、生长和发育进程中不可或缺的生态因子,它对植物的影响主要体现在光质、光强和光照时间 3 个方面^[1-5]。光不仅作为能源控制植物的光合作用,还是一种触发信号调控植物的生长发育^[6]。光信号被植物体内不同的光受体感知,如光敏素、蓝光/近紫外光受体(隐花色素)、紫外光受体等,进而影响植物的生长、光合生理、抗逆和衰老等^[7-9]。近年来,关于光质对植物生长发育的影响已经报道很多^[9-13],但由于各试验所关注的光质、植物种类、获得光质的手段不同,从而研究的结论也不尽相同。

烟草是一种以叶片为主要收获对象的喜光作物,其生长发育受光的影响更显著。2010 以来,笔者所在实验室就光质对烟叶生长发育的影响机理做了一系列的研究,主要集中在光质对烟叶生理成熟期的影响^[13-16],关于光质对烟叶整个生长发育过程的影响关注较少。本研究通过比较不同光质对烟叶生长进程以及叶绿素含量、光合作用、叶绿素荧光参数的动态变化,为探明光质对烟叶生长和品质形成的影响过程提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以云南省烟草农业科学研究院选育的烤烟品种云烟 87 为材料,采用漂浮育苗方式培育烟苗,于 2012 年 4 月 26 日移

栽至大田,土壤类型为水稻土,移栽行株距为 120 cm×50 cm,按当地常规生产方式进行田间管理。选取自下而上第 12 位叶片为研究对象,以叶长 5 cm 时为光质处理和取样时间起点,计为处理 0 d,之后分别在处理 14、28、42、56、70 d 时采集叶片及相关参数测定。

1.2 方法

1.2.1 光质处理 光质处理方式参考柯学等的方法^[13],在第 12 片叶长至 5 cm 时,开始覆盖不同颜色滤膜,于自制拱形升降棚上获得不同光质,其中白色滤膜(W)获得白光,红色滤膜(R)获得红光,黄色滤膜(Y)获得黄光,蓝色滤膜(B)获得蓝光,紫色滤膜(P)获得紫光。用白色防虫网调整各处理光强,使透光率约为 70% (与自然光相比)。根据烟株生长高度适时调节升降棚高度,使烟株顶部与棚顶保持约 50 cm 距离。试验期间根据外界降雨情况,用相同降雨量淋洗烟株。

1.2.2 烟叶生长相关指标 叶长、叶宽、株高、茎围分别于处理后 14、28、42、56、70 d 在田间用皮尺测定。用直径 1.0 cm 圆形打孔器于叶片第 5~8 位叶片叶脉间取叶圆片 120 片,一半用液氮保存,用于光合色素测量,另一半于烘箱中杀青后烘干称质量,计算比叶面积。

1.2.3 光合色素含量 叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量测定采用 95% 乙醇提取,分光光度法测定^[17]。

1.2.4 光合参数 叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、荧光参数分别于处理 14、28、42、56、70 d 用 LI-6400XT 便携式光合仪(LI-COR,美国)田间活体测定。测定时间在 09:00—11:00,叶绿素荧光参数在 12:00—13:00 测定(暗处理用暗适应夹)。测定光下荧光强度时,使用仪器自带光源,光强统一设置为 1 200 μmol/(m²·s)。参数 F_v 由 $F_m - F_o$ 计算得出, Φ_{PSII} 由 $(F_m' - F_o)/F_m'$ 计算得出^[18],其他荧光参数由仪器给出。

1.2.5 数据处理 数据来自 3 个重复小区,每 1 个小区至少

收稿日期:2015-05-29

基金项目:中国烟草总公司云南省公司科技计划(编号:2011YN02);
国家烟草专卖局科技专项[编号:110201101003(TS-03)]。

作者简介:李军营(1978—),男,河北河间人,博士,助理研究员,主要从事烟草栽培生理研究。E-mail:ljy1250@163.com。

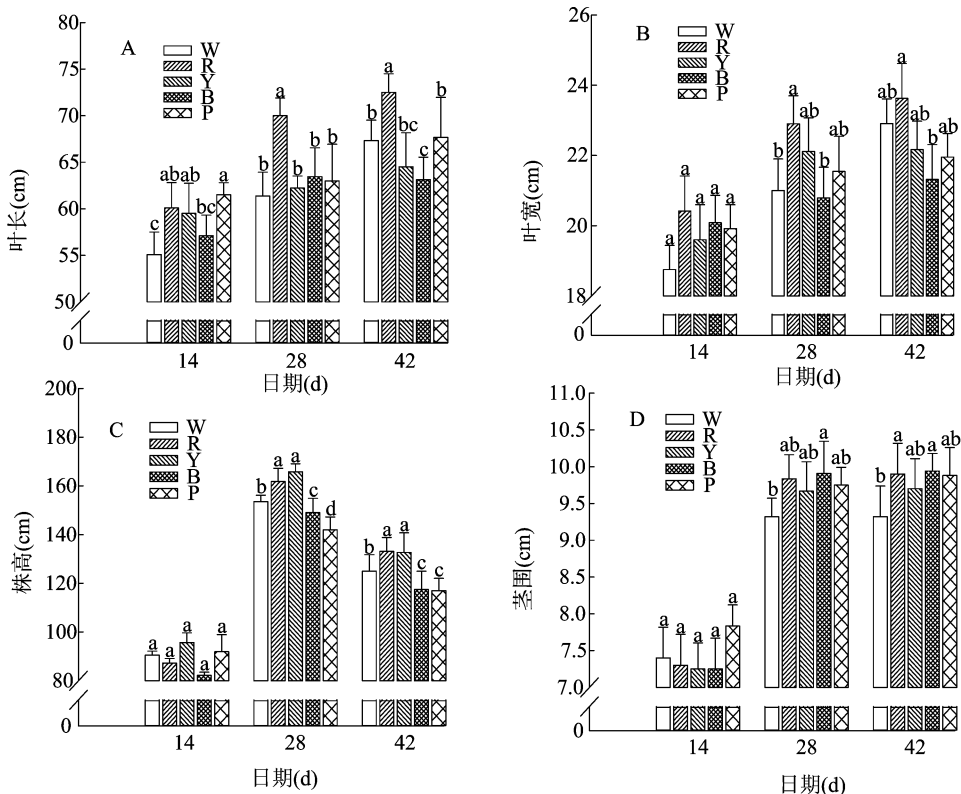
通讯作者:龚明,博士,教授,主要从事植物生物化学研究。
E-mail:gongming63@163.com。

选择 4 张叶片,数据用 SPSS 进行方差分析,统计结果用 Sigmaplot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同光质对烟叶生长发育进程的影响

图 1 显示,不同光质处理对烟叶生长发育进程造成不同程度的影响。不同滤膜处理下,叶长、叶宽、株高、茎围在处理 14~28 d 迅速升高,随后增长幅度降低。在处理 14 d 时,红膜、黄膜、紫膜处理下叶长显著高于白膜,分别比白膜高



不同小写字母表示处理间在0.05水平存在显著性差异

图1 不同光质对烟株叶长(A)、叶宽(B)、株高(C)、茎围(D)的影响

不同滤膜处理下烟叶比叶面积随着叶龄的增长呈下降趋势(图2),在处理 14~28 d,烟叶比叶面积下降变化幅度最大,随后逐渐开始缓慢下降。在处理 14 d 时,红膜、黄膜处理下烟叶比叶面积分别比白膜显著高 8.5%、13.3%,紫膜比白膜显著低 16.7%。在处理 28 d 时,红膜、蓝膜、黄膜与白膜均呈显著差异,红膜、蓝膜分别比白膜显著低 9.1%、6.6%,而黄膜比白膜显著高 11.5%。在处理 42、70 d,黄膜、白膜与红膜、蓝膜、紫膜间均存在显著差异。处理期间,红膜、蓝膜、紫膜的比叶面积一直低于白膜和黄膜,表明红、蓝、紫光比例增加有利于叶片单位面积干物质的积累,黄膜处理下单位面积叶片积累物质较少。

2.3 不同光质对烟叶光合色素含量的影响

不同滤膜处理下烟叶的光合色素含量见图 3。由图 3 可见,不同滤膜处理下叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素及总叶绿素含量呈下降趋势。处理 14 d,蓝膜、紫膜处理下叶绿素 a 含量分别比白膜显著降低 8.9%、9.8%,叶绿素 b 含量也分别比白膜显著降低 7.5%和 7.0%。处理 28、42 d 时,黄膜、蓝

膜处理下叶绿素 a、叶绿素 b 含量与白膜呈显著差异。处理 56 d,红膜、黄膜、蓝膜处理下叶绿素 a 含量与白膜差异达显著水平,红膜、蓝膜分别比白膜显著高 14.9%和 13.2%,而黄膜比白膜显著低 10.9%,红膜、蓝膜处理下叶绿素 b 含量也与白膜呈显著差异。处理 70 d,蓝膜、紫膜处理下叶绿素 a 含量分别比白膜显著高 20%和 9.1%,而黄膜比白膜显著低

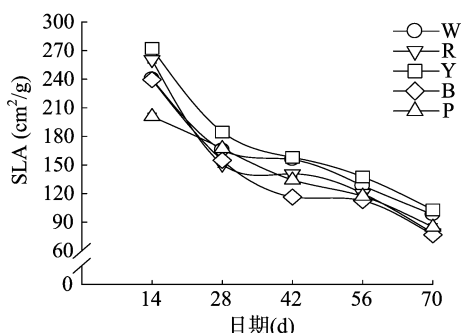
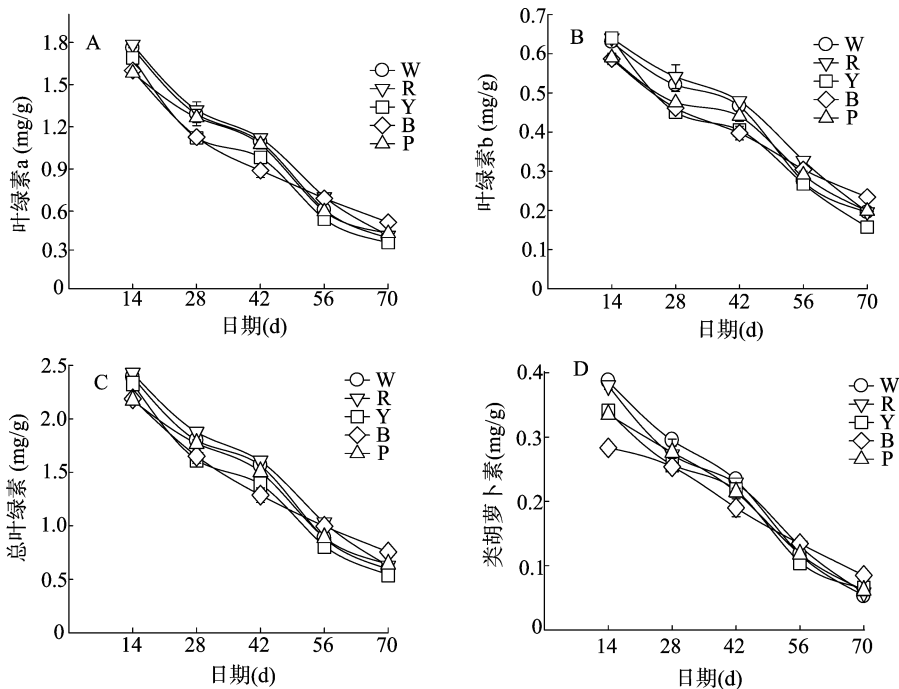


图2 不同光质对烟叶比叶面积的影响

膜处理下叶绿素 a、叶绿素 b 含量与白膜呈显著差异。处理 56 d,红膜、黄膜、蓝膜处理下叶绿素 a 含量与白膜差异达显著水平,红膜、蓝膜分别比白膜显著高 14.9%和 13.2%,而黄膜比白膜显著低 10.9%,红膜、蓝膜处理下叶绿素 b 含量也与白膜呈显著差异。处理 70 d,蓝膜、紫膜处理下叶绿素 a 含量分别比白膜显著高 20%和 9.1%,而黄膜比白膜显著低

8.1%, 紫膜、蓝膜处理下叶绿素 b 含量与白膜呈显著差异。类胡萝卜素和总叶绿素含量与叶绿素 a、叶绿素 b 的趋势基本一致。可见, 处理 14 ~ 42 d, 红膜、白膜处理下叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和总叶绿素都高于蓝膜和黄膜, 42 ~ 70 d

蓝膜、紫膜高于白膜, 表明红膜处理有利于烟叶质体色素前期合成和后期的降解, 蓝膜、紫膜处理时不利于质体色素的降解。



A—叶绿素a; B—叶绿素b; C—总叶绿素; D—类胡萝卜素

图3 不同光质对烟叶光合色素含量的影响

2.4 不同光质对烟叶光合参数的影响

光质对烟叶叶片光合作用造成不同程度的影响(图4), 处理后 14 ~ 70 d, 各光合参数呈逐渐下降趋势。处理 14 ~ 42 d, 不同滤膜处理下烟叶净光合速率下降幅度缓慢, 随后开始大幅度下降。在处理 14 ~ 42 d, 红膜、蓝膜处理下的净光合速率分别与白膜、黄膜呈显著差异, 而黄膜与白膜差异不显著, 但从数值上看, 黄膜一直低于白膜。处理 14 d, 红膜、蓝膜处理下净光合速率分别比白膜显著提高 11.1% 和 10.4%, 处理 28 d, 红膜、蓝膜处理下净光合速率分别比白膜显著提高 12.76% 和 13.33%, 处理 42 d, 红膜、蓝膜处理下净光合速率分别比白膜显著提高 14.5% 和 20%。处理后 56 ~ 70 d, 各滤膜处理下净光合速率大幅度下降, 蓝膜、紫膜与白膜差异显著。处理后 70 d, 蓝膜、紫膜处理下净光合速率分别比白膜高 26.0% 和 20.7%, 白膜、黄膜、红膜之间差异不显著。从图 4 可以看出, 各滤膜处理下气孔导度、蒸腾速率下降趋势与净光合速率相似, 而胞间 CO_2 浓度在 14 ~ 42 d 相对稳定, 随后开始大幅度下降。红膜、蓝膜和紫膜处理时烟叶的光合速率增强, 黄膜处理时烟草的光合速度减弱, 气孔导度和胞间 CO_2 浓度受光质的影响程度与净光合速率的基本一致, 表明光质影响光合作用主要是通过气孔因素引起的, 红、蓝、紫膜处理时气孔导度增大, 胞间 CO_2 浓度增高, 进而导致净光合速率增强。

2.5 不同光质对烟叶叶绿素荧光参数的影响

2.5.1 不同光质对叶绿素荧光暗处理的影响 图 5 的数据显示不同滤膜处理对烟叶叶绿素荧光参数均造成不同程度的

影响。在处理 14 d, 初始荧光 F_0 (图 5 - A) 达到最高值, 显著高于其他时间段, 随后开始大幅度下降, 到 28 d, 稍有缓慢上升的趋势, 42 d 后一直呈缓慢下降趋势。处理后, 初始荧光 F_0 各处理之间差异不显著。处理后 14 ~ 42 d 最大荧光产量 F_m 逐渐缓慢上升 (图 5 - B), 随后开始大幅度下降。在处理 14, 42, 56 d 各处理之间最大荧光产量 F_m 差异不显著。而在处理 28 d, 红膜处理 F_m 显著高于白膜, 其他各处理之间差异不显著, 处理 70 d, 红膜、蓝膜显著高于白膜, 黄膜则相反。PS II 最大光化学效率 F_v/F_m (图 5 - C), 在处理 14 d 时最低, 随后迅速升高, 处理 28 d 开始缓慢下降, 其中黄膜的波动性最大。处理后 42 d, 蓝膜、紫膜显著高于白膜, 黄膜显著低于白膜, 处理后 70 d, 红膜和蓝膜显著高于白膜, 紫膜则显著低于白膜。以上结果表明, 红膜、蓝膜处理, 叶片对光能的利用能力增强, 黄膜处理则减弱光能利用率。

2.5.2 不同光质对烟叶叶绿素荧光活化的影响 图 6 显示, PS II 实际的光化学量子效率 Φ_{PSII} (图 6 - A), 在处理 14 ~ 42 d 大幅下降, 随后逐渐缓慢下降, 处理 42 d, 红膜、蓝膜、紫膜处理分别比白膜显著高 25.4%、36.5% 和 23.32%, 而黄膜处理与白膜不存在显著差异, 但与红、蓝、紫膜存在显著差异。处理后 56 ~ 70 d, 蓝膜、紫膜处理与白膜存在显著差异, 处理后 56 d 分别比白膜显著提高 27.1% 和 22.42%, 处理后 70 d 分别比白膜显著高 34.9% 和 23.2%, 其他各处理之间差异不显著。光化学猝灭系数 q_p (图 6 - B)、电子传递速率 ETR (图 6 - C) 与 PS II 实际的光化学量子效率 (Φ_{PSII}) 变化趋势相似。非光化学猝灭系数 q_N (图 6 - D), 处理后 14 ~ 28 d, 呈缓慢上

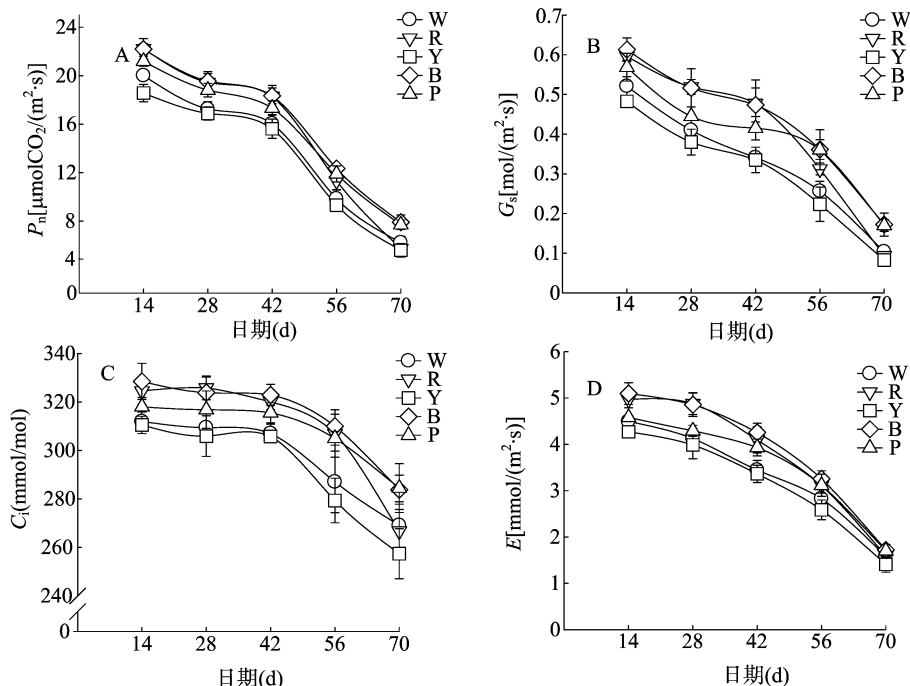
A— P_n (净光合速率); B— G_s (气孔导度); C— C_i (胞间 CO_2 浓度); D— E (蒸腾速率)

图4 不同光质对烟叶光合参数的影响

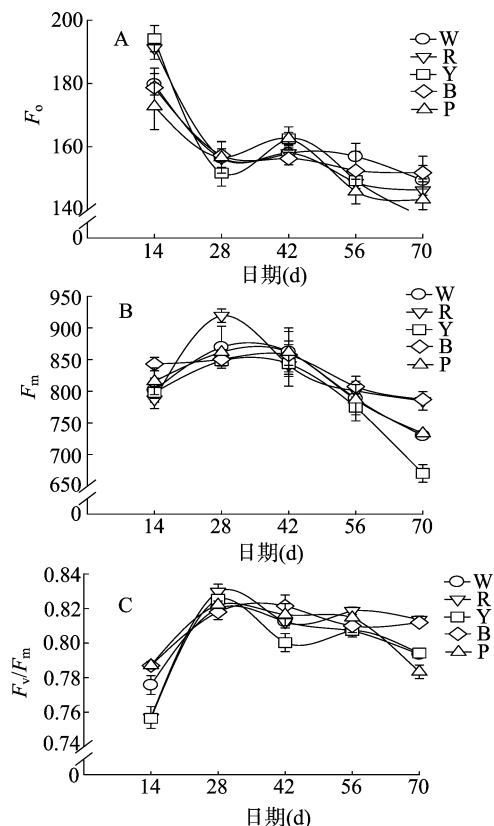
A— F_0 (初始荧光); B— F_m (最大荧光); C— F_v/F_m (最大光化学效率)

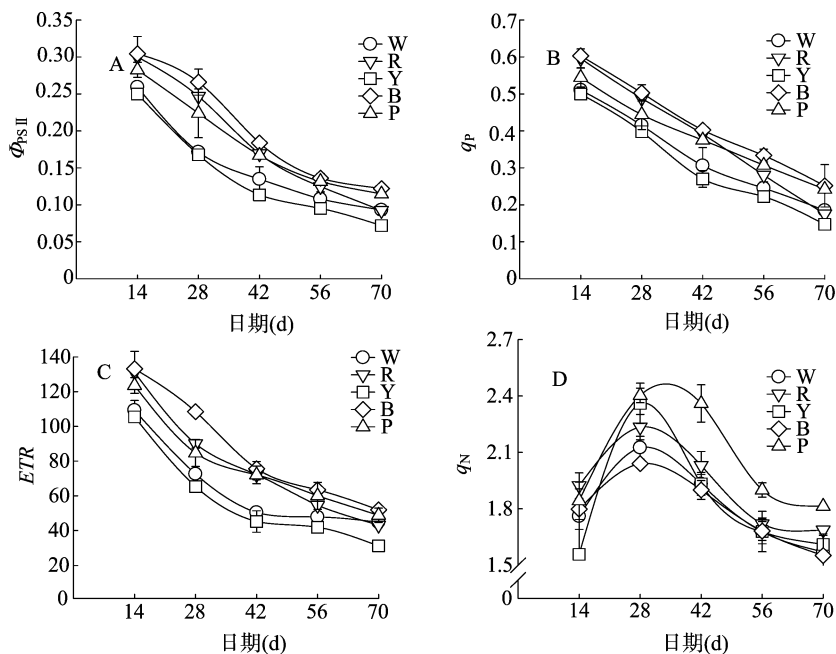
图5 不同光质对烟叶荧光暗处理的影响

白膜显著高 9.1%, 黄膜比白膜显著低 11.9%, 处理 28 d, 红膜、黄膜、紫膜显著高于白膜, 蓝膜低于白膜。在处理 56 d 时, 紫膜处理烟叶的 q_n 显著高于白膜, 并持续到叶片成熟(处理 70 d), 在处理 70 d, 红膜、紫膜处理烟草叶片的 q_n 分别比白膜显著高 7.0% 和 15.2%, 蓝膜比白膜低。以上结果表明, 红、蓝膜处理时烟叶的光化学量子利用率较高, 同化能力被促进, 热能耗散量相对较少, 而黄膜处理的烟叶表现则相反, 紫膜处理的烟叶光化学量子利用率较高, 同时热耗散的能力也较强, 不同于红蓝膜处理。

3 讨论

光质对叶片的生长发育起到一定的调控作用。前期研究结果表明, 红、蓝、紫膜处理下的烟草叶片较厚, 有较高的叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏细胞密度和较小的组织空隙率, 比叶面积较小^[13,16]。本研究发现, 在叶片完全展开时, 红光可促进叶片的发育, 蓝光抑制叶片的发育, 红膜处理下的叶长提高 7.6%, 蓝膜降低 6.2%, 蓝膜处理下的叶宽显著低于白膜处理, 黄光和紫光可促进烟叶前期的伸长速度, 对完全展开叶的大小影响不显著。从单位叶位面积干物质积累多少来看, 红、蓝、紫膜处理起促进作用, 而黄膜处理则相反。

光质对叶片生长发育的调控作用与叶片的光合能力密切相关, 质体色素含量高低、光能利用率强弱、光合同化能力差异均影响到叶片发育所需的能量和物质, 进而影响叶片干物质的积累和形态建成。Anna 等研究发现, 蓝光促进风信子愈伤组织叶绿素的形成, 而红光降低叶绿素含量^[19]; 杜洪涛等研究彩色甜椒发现, 蓝光处理下叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量都高于白光、黄光、红光^[20], 与本研究在烟叶完全展



A— Φ_{psII} : 实际光化学量子效率; B— q_p : 光化学猝灭系数; C—ETR: 电子传递速率; D— q_N : 非光化学猝灭系数

图6 不同光质对烟叶荧光活化的影响

开(处理后 42 d)之前与之结论不一致,而处理 56 ~ 70 d 之间的与之结论相一致,这可能与光质对同一植物不同生长时期的影响有关。倪纪恒等、储钟稀等研究黄瓜开花期、苗期得出了光质在不同生长时期的影响也不同^[21~22]。由此说明,同一植物不同生长期以及不同组织和器官对光质的反应不尽相同,表现出光质生物学反应的复杂性^[23]。烟叶生长后期,蓝膜、紫膜处理下叶绿素含量高于白膜、黄膜,可能与蓝光、紫光延缓叶片的衰老有关^[14]。

叶绿素是光合作用的基础,与叶绿素含量相对应的是植株的净光合速率。本研究结果表明:在烟叶生长发育期内,红膜、蓝膜、紫膜处理下的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳、蒸腾速率都高于白膜和黄膜,表明红、蓝、紫膜处理时叶片气孔导度增大,胞间 CO_2 浓度增高,是导致净光合速率增强的主要原因。各滤膜处理下净光合速率与倪纪恒等在温室黄瓜上的趋势^[21]相一致,而与江明艳等在一品红上的结果^[11]不一致,可能是由于其滤膜透光滤太高或者植物的材料不同引起的。

植物叶片光合作用是一个复杂的过程,叶绿素吸收、传递的光能主要有 3 种去向:用于光化学反应、能量耗散和荧光发射^[24],因此,叶绿素荧光从一个侧面反映了植物的光合作用能力^[24~26]。植物在长期的进化过程中,其光合机构形成了一系列抵御强光破坏的生物物理和生物化学机制,因此,植物常常难以避免光破坏。在光保护机制研究中,依赖叶黄素循环热耗散和光呼吸等耗能代谢的光保护机制研究的比较多,PS II 原初光化学反应的最大光化学效率可由 F_v/F_m 表示,植物在不受任何影响时 F_v/F_m 值为 0.85 左右,此指标常用来判断植物是否受到光抑制^[27]。研究发现,叶龄 14 d,初始荧光 F_0 显著高于其他生长时期,最大荧光 F_m 降低,PS II 最大实际光化学效率(F_v/F_m)大幅度下降,表明在处理 14 d 各处理烟

叶均受到不同程度的光抑制,其中红膜处理下降幅度高于蓝膜、紫膜和白膜,说明在烟叶处理后 14 d 之前,红膜处理对强光胁迫更加敏感,蓝膜处理对强光胁迫敏感度较低,这一结论与潘刚等在草莓上的报道^[28]相似。其中本研究还发现在处理 14 d,红膜、黄膜处理下 F_v/F_m 大幅度下降,红膜处理下非光化学猝灭系数 q_N 、净光合速率较高,而黄膜处理则最低,由此说明红膜处理下叶片保持较高的光合效率以避免光合机构的光损伤。处理 28 d 热耗散比处理后 14 d 高,说明处理 28 d 烟叶利用光合的能力开始下降,净光合速率也开始下降。

植物能适应不同的光质和光强,得益于光合系统的多个调节水平和光合电子传递链各组份的协同作用^[29]。 Φ_{psII} 反映 PS II 实际的光化学量子效率,高 Φ_{psII} 往往代表着高光合效率,包括高效的光子吸收,高效的 $NADP^+$ 和 ADP 再生,以及高效的电子传递^[30],光化学猝灭系数(q_p)反映了 PS II 原初电子受体质体醌 A (QA) 的还原状态,高 q_p 往往代表着 PS II 原初电子受体质体醌 A (QA) 保持较高的氧化水平,PS II 反应中心中开放的反应中心比例也较高,具有更大的能量捕获速率^[26,30]。Ramalho 等在咖啡、草莓上的研究表明:PS II 光化学效率及电子传递速率受光质的影响较大^[31~32]。本研究结果表明,红膜、蓝膜和紫膜处理都保持较高的光化学效率(Φ_{psII})、光化学猝灭系数 q_p 以及电子传递效率 ETR,这也是红膜、蓝膜、紫膜能维持较高的光合速率的原因。许莉等对叶用莴苣的研究表明,黄光比红光、蓝光拥有较高的 PS II 实际的光化学量子效率(Φ_{psII})、电子传递效率(ETR)以及光化学猝灭系数(q_p)^[33]。这一结论与本试验结论不一致,这可能与试验植物种类、生长条件和光源获取方式不同有关。

本研究结果表明,光质对叶片生长发育的影响贯穿整个烟叶生长进程,红光可促进叶片的发育,蓝光抑制叶片的发

育,黄光和紫光可促进烟叶前期的伸长速度,对完全展开叶的大小影响不显著。不同光质条件下,烟叶对光能的利用率不同,进而影响到烟叶光合速率,红、蓝膜处理时烟叶的光化学量子利用率较高,同化能力被促进,热能耗散量相对较少,而黄膜处理的烟叶表现则相反,紫膜处理的烟叶光化学量子利用率较高,同时热耗散的能力也较强,不同于红蓝膜处理。

参考文献:

- [1] Chow W S, Anderson J M. Light regulation of the photosystem II and photosystem I reaction centers of plant thylakoid membrane [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1996: 315–326.
- [2] Naoya F, Mitsuko K Y, Masami U. Effects of light quality, intensity and duration from different artificial light sources on the growth of petunia (*Petunia × hybrida* Vilm.) [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2002, 71(4): 509–516.
- [3] 黄俊, 郭世荣, 吴震, 等. 弱光对不结球白菜光合特性与叶绿体超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 352–358.
- [4] Sotiris H, Traianos A Y, Thomas D S, et al. *Petunia × hybrida* during transition to flowering as affected by light intensity and quality treatments [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2008, 30(6): 807–815.
- [5] Wen ZL, Zi HS, Neil R J. Effects of day length, light quality and ethylene on phytochrome B expression during steme elongation [J]. Plant Growth Regul, 2011, 63: 291–300.
- [6] 高荣孚, 张鸿明. 植物光调控的研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(增刊1): 239–247.
- [7] Voskresenskaya N P, Nechayeva E P, Vlasova M P, et al. The significance of blue light and kinetin for restoration of the photosynthetic apparatus in aging narley leaves [J]. Fizid Rast, 1968, 15: 890–897.
- [8] Patil G G, Oi R, Gissinger A, et al. Plant morphology is affected by light quality selective plastic films and alternating day and night temperature [J]. Gartenbauwissenschaft, 2001, 66(2): 53–60.
- [9] Keiko O K, Masahide T, Noya K, et al. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna [J]. Environ control in boil, 2007, 45(3): 189–198.
- [10] 马光恕, 廉华, 闫明伟. 不同覆盖材料对大棚内番茄生长发育的影响[J]. 吉林农业科学, 2002, 27(4): 41–43.
- [11] 江明艳, 潘远智. 不同光质对盆栽一品红光合特性及生长的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33(2): 338–343.
- [12] 孙莉莉, 李凤兰, 秦智伟, 等. 光质对矮生黄瓜生长及生理特性的影响[J]. 中国蔬菜, 2011(8): 65–70.
- [13] 柯学, 李军营, 李向阳, 等. 不同光质对烟草叶片生长及光合作用的影响[J]. 植物生理学报, 2011, 47(5): 512–520.
- [14] 赵娟, 柯学, 徐超华, 等. 不同光质对烟草叶片生长发育过程中类半胱氨酸蛋白酶活性及其基因表达调控的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 13965–13968.
- [15] 文锦芬, 柯学, 徐超华, 等. 光质对烟草叶片生长发育过程中抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(9): 1799–1804.
- [16] 柯学, 李军营, 徐超华, 等. 不同光质对烟草叶片组织结构及 Rubisco 羧化酶活性和 *rbc*, *rca* 基因表达的影响[J]. 植物生理学报, 2012, 48(3): 251–259.
- [17] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008: 66–68.
- [18] 许大全. 光合作用效率 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 33.
- [19] Anna B, Alicja K. Effect of light quality on somatic embryogenesis in *Hyacinthus orientalis* L. ‘Delft’s blue’ [J]. Biological Bulletin of Poznan, 2001, 38(1): 103–107.
- [20] 杜洪涛, 刘世琦, 蒲高斌. 光质对彩色甜椒幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1): 41–45.
- [21] 倪纪恒, 陈学好, 陈春宏, 等. 补充不同光质对温室黄瓜生长发育、光合和前期产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2615–2623.
- [22] 储钟稀, 童哲, 冯丽洁, 等. 不同光质对黄瓜叶片光合特性的影响[J]. 植物学报, 1999, 41(8): 867–870.
- [23] Drum-Herrel H, Mohr H. A novel effects of UV-B in a higher plant (*Sorghum vulgare*) [J]. Photochem Photobiol, 1981, 33: 391–395.
- [24] 徐坤, 邹琦, 郑国生. 强光下姜叶片的光呼吸及叶黄素循环 [J]. 园艺学报, 2002, 29(1): 47–51.
- [25] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(345): 659–668.
- [26] Lefebvre S, Lawson T, Zakhleniuk O V, et al. Increased sedoheptulose-1,7-bisphosphatase activity in transgenic tobacco plants stimulates photosynthesis and growth from an early stage in development [J]. Plant Physiology, 2005, 138(1): 451–460.
- [27] Herppich W B, Peckmann K. Influence of drought on mitochondrial activity, photosynthesis, nocturnal acid accumulation and water relations in the CAM plants *Prenia sladeniana* (ME-type) and *Crassulaly copodioides* (PEPCK-type) [J]. Annals of Botany, 2000, 86(3): 611–620.
- [28] 潘刚, 徐凯, 郭延平, 等. 光质对草莓叶片光抑制的影响 [J]. 安徽农业科学, 2006, 34(22): 5817–5819.
- [29] Jensen P E, Bassi R, Boekema E J, et al. Structure, function and regulation of plant photosystem I [J]. Biochimica et Biophysica acta, 2007, 1767(5): 335–352.
- [30] Miyake C, Amako K, Shiraishi N, et al. Acclimation of tobacco leaves to high light intensity drives the plastoquinone oxidation system—relationship among the fraction of open PS II centers, non-photochemical quenching of Chl fluorescence and the maximum quantum yield of PS II in the dark [J]. Plant & Cell Physiology, 2009, 50(4): 730–743.
- [31] Ramalho J C, Marques N C, Semedo J N, et al. Photosynthetic performance and pigment composition of leaves from two tropical species is determined by light quality [J]. Plant Biology, 2002, 4(1): 112–120.
- [32] 徐凯, 郭延平, 张上隆. 不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 369–375.
- [33] 许莉, 刘世琦, 齐连东, 等. 不同光质对叶用莴苣光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1): 96–100.