

井窖式移栽对烟苗生长和光合特性的影响

林叶春 陈伟 陈懿 高维常 丁福章 李洪勋 梁贵林 潘文杰*

(贵州省烟草科学研究院, 贵阳 550081)

摘要 为探讨井窖式移栽烟苗生长发育过程中的光合生理变化,结合田间和盆栽试验,对比研究了常规膜上和井窖式2种移栽模式下烟苗生长环境的太阳光合有效辐射(PAR)水平和生长发育水平,进一步分析了烟苗叶片光合作用的光系统II(PSII)最大光化学效率(F_v/F_m)特征。结果表明:与常规膜上移栽比较,井窖内太阳光合有效辐射水平降低,其中,井窖内距井窖口4和8cm处PAR分别为常规移栽的72.60%和52.85%;井窖式移栽提高了烟苗株高、增大了烟叶最大叶长和叶宽,但降低了叶片叶绿素含量;井窖式移栽降低了叶片最大净光合速率(P_{max})和光饱和点(LSP),但表观量子效率(AQY)提高了4.44%,光补偿点(LCP)和暗呼吸速率(R_d)分别减小了20.43%和17.78%,增强了烟苗对井窖内弱光的适应能力;井窖式和常规膜上移栽均降低了PSII的最大光化学效率(F_v/F_m),但井窖式移栽烟苗 F_v/F_m 显著($P<0.05$)高于常规膜上移栽,增幅5%~9%。采用井窖式移栽,烟苗对井窖内弱光环境的自我适应和光能利用能力增强,生长发育加快。

关键词 烟苗;移栽方式;井窖式;生长;光合生理

中图分类号 S 359.2

文章编号 1007-4333(2015)04-0120-07

文献标志码 A

Effects of well-cellar style transplanting on growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco seedlings

LIN Ye-chun, CHEN Wei, CHEN Yi, GAO Wei-chang, DING Fu-zhang,

LI Hong-xun, LIANG Gui-lin, PAN Wen-jie*

(Guizhou Academy of Tobacco Science, Guiyang 550081, China)

Abstract The well-cellar style transplanting (WCST) in China was an original transplanting method of flue-cured tobacco, and had obvious comparative advantages when compared to the conventional transplanting (CT). WCST accelerated the growth of tobacco seedlings, so it is necessary to study the characteristics of photosynthetic physiology of tobacco seedlings in WCST. Combined with the field and pot experiments, the study was conducted on photosynthetic active radiation (PAR) level, plant height, leaf length, leaf width and chlorophyll content. The leaf photosynthesis and maximal photochemical efficiency (F_v/F_m) of photosynthetic system II (PSII) were analyzed in WCST, compared with CT. The results showed that the photosynthetic active radiation (PAR) levels in WCST were decreased, e. g., the photosynthetic active radiation levels (PAR) were 72.60% and 52.85% at 4 cm and 8 cm in well-cellar respectively, compared with the conventional transplanting (CT). The plant height, leaf length and leaf width of tobacco seedlings were increased, but the leaf chlorophyll contents were reduced in WCST. In WCST, the maximum net photosynthetic rates (P_{max}) and the light saturation points (LSP) were decreased; the light compensation points (LCP) and dark respiration rates (R_d) were reduced by 20.43% and 17.78% respectively; nonetheless, the apparent quantum yield (AQY) was improved by 4.44%, compared to CT. There was a possibility that the tobacco seedlings were fitted for weak light within well-cellar. PSII maximal photochemical efficiency (F_v/F_m) of tobacco seedlings was reduced when transplanted in WCST or CT, but the F_v/F_m of transplanting seedlings was significantly ($P<0.05$) higher by 5% to

收稿日期: 2015-01-07

基金项目: 中国烟草总公司科技重点项目(110201302018); 贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2013]2196号); 贵州省科技厅重大科技专项(黔科合重大专项字[2014]6015-3)

第一作者: 林叶春, 助理研究员, 主要从事作物高效栽培研究, E-mail: linyechun@live.cn

通讯作者: 潘文杰, 研究员, 硕士生导师, 主要从事烟草栽培研究, E-mail: wenjiepan@163.com

9% in WCST than in CT. The growth of tobacco seedlings transplanted by well-cellar style transplanting was accelerated in the well-cellar. The self-adaptation and the enhanced light use efficiency in weak light environment are the physiological basis to promote tobacco growth.

Key words tobacco seedling; transplanting; well-cellar style transplanting; growth; photosynthetic physiology

烟苗最佳移栽期内,适时移栽和移栽后快速生长发育是保障现代烟草农业稳定发展的基础。2009年,贵州省铜仁市率先发展了烤烟井窖式移栽新技术。截至2014年,在全国烤烟生产中已实现累积推广应用71.9万 hm^2 ,在玉米、辣椒和番茄等作物生产中累积推广应用超过1.3万 hm^2 。井窖式移栽技术很好地解决了春季低温、干旱和寡照等不利气候因素对烟苗生长发育的影响。烤烟移栽方式从之前的高茎壮苗深栽发展到当前的地膜覆盖小苗栽培,土壤保温、保水和保肥效应提升显著,对促进烤烟生产发挥了积极作用^[1]。但烤烟膜上移栽和膜下打塘小苗移栽仍存在田间操作繁杂、劳动强度较大和移栽效率低下等实际生产问题,特别是在当前农村劳动力不足的生产背景下加剧了农业生产与劳动力缺乏之间的矛盾^[2]。井窖式移栽技术简化了烟苗移栽,实现了减工降本,每公顷移栽用工比常规膜上移栽减少近30个。刘杰等^[3]研究发现,与烤烟常规膜上移栽比较,井窖式内烟苗生长的环境温度较为稳定,井窖对外界大气的存在“缓冲效应”,促进了烟苗的快速生长。罗会斌等^[2]指出,井窖式移栽10 d后,烟苗地上部干、鲜物质量比常规移栽分别增加了0.21和1.97 g,烟苗基部茎围增大了0.07 cm。

光照、温度和水分等环境因子影响作物苗期的生长发育,光是作物进行光合作用、促进生长发育的能量基础。吴正锋等^[4]研究了遮荫对苗期花生光合生理的影响,结果表明花生对弱光胁迫有一定的自我调节和适应能力,短期遮荫(如40 d)后花生叶片净光合速率(P_n)、RuBP羧化效率降低,但提高了表观量子效率及光系统II最大光化学效率(F_v/F_m)。前人对茄科作物对弱光的响应开展了大量的研究,适度遮荫可提高观赏辣椒的株高和株幅、增大叶长和叶宽^[5];弱光条件下番茄的根、茎、叶均能较良好地生长^[6],番茄的株高和叶面积增大^[7];弱光胁迫下黄瓜株高升高、叶面积增大^[8],但黄瓜净光合速率(P_n)、光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)和暗呼吸速率(R_d)均降低^[9],弱光对黄瓜叶片PSII最大光化学效率(F_v/F_m)的影响不明显^[10]。吴云平等^[11]于每

天日落后对烟苗进行弱光处理4 h,结果发现烟苗净光合速率(P_n)和表观量子效率(AQY)明显升高,光饱和点(LSP)明显下降,光补偿点(LCP)和最大净光合速率(P_{max})没有受影响。杨兴有等^[12]发现长期弱光胁迫下,旺长期烟株生长发育迟缓。采用井窖式移栽,烟苗在长出井窖前处于一定程度的弱光环境下,与常规膜上移栽相比,井窖式移栽显著促进了烟苗生长发育,但其中的生理基础尚不明确。已有的研究主要集中在井窖内的水热因子分析^[2-3],对井窖内烟苗的光合生理特性研究不充分。本研究通过对比烟苗井窖式与常规膜上移栽对烟苗光合生理特性影响的差异,旨在为井窖式移栽技术的进一步发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验时间及地点

田间试验于2013年在贵州省烟草科学研究院龙岗试验基地(N 26°52', E 107°06')进行,盆栽试验在贵州省烟草科学研究院(N 26°39', E 106°36')进行。盆栽试验用土取自田间试验0~20 cm耕层,其基本养分为有机质30.01 g/kg、全氮1.78 g/kg、全磷1.09 g/kg、全钾15.76 g/kg, pH为6.87。

1.2 试验材料

供试烤烟品种为K326,于塑料大棚内采用漂浮式育苗。烟苗素质:苗龄45~50 d,茎高5 cm,茎围1.5 cm,功能叶4~5片。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

试验设2个处理:井窖式移栽(Well-cellar style transplanting, WCST)和常规膜上移栽(Conventional transplanting, CT)。烤烟井窖式和常规移栽模式见图1。田间试验于4月25日移栽,井窖式田间移栽流程:按行距110 cm条施基肥,基肥N:P:K=10:10:25,施肥量750 kg/ hm^2 ;采用起垄机沿施肥方向起垄,垄底宽60~80 cm,垄高25~30 cm;采用井窖制作工具打制井窖,井窖上部为圆柱形,直径8~10 cm,深约10 cm;井窖下部呈圆锥形,深约10 cm;将健壮的烟苗根部向下放入井

窖底部,淋施定根水,烟苗基质部覆土后完成移栽。盆栽试验于5月24日移栽,每盆(盆口直径33 cm,

盆底直径20 cm,盆高27 cm)装入经风干过筛的田间试验地耕层土27 kg。

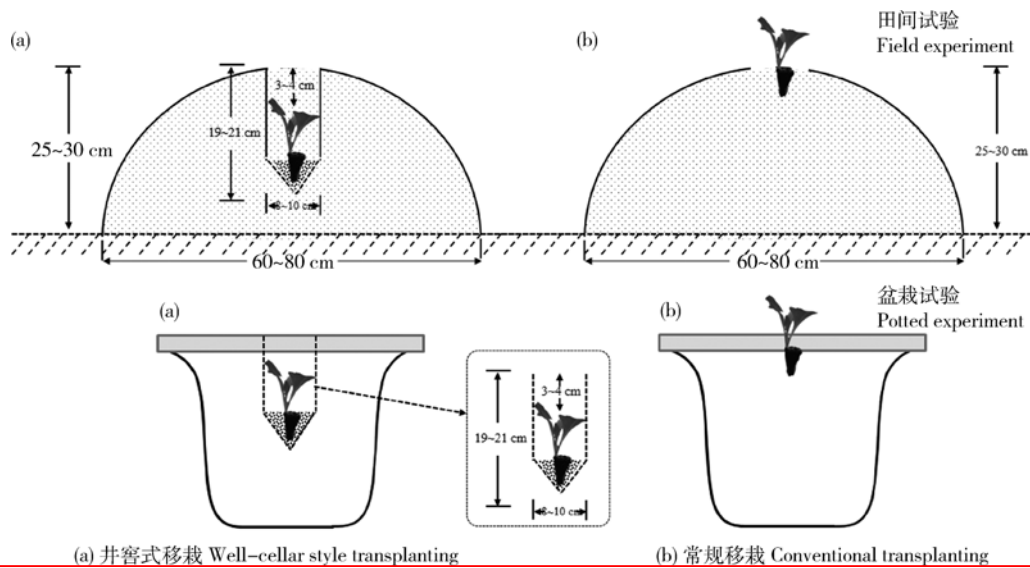


图1 烤烟常规及井窖式移栽

Fig. 1 Well-cellar style and conventional transplanting

1.3.2 烟苗生长的光照环境

盆栽条件下,利用LI-1400同时监测常规移栽地表与井窖式移栽井窖内4和8 cm处的太阳光合有效辐射水平,测定时间由日出时始至日落时止,数据采集时间间距为1 min。

1.3.3 农艺性状

田间试验烟苗移栽后30 d内,每5 d测定一次烟株株高(cm)、最大叶长(cm)和最大叶宽(cm);利用手持叶绿素计(SPAD-502,日本)测定完全展开叶片的相对叶绿素含量(SPAD)。

1.3.4 光合响应曲线

选择晴天上午9:00—11:30间自然光诱导1.0~1.5 h,采用LI-6400便携式光合作用测定系统(LI-COR,美国)提供的红蓝光源,开放式气路,叶室温度为25℃,CO₂设定为400 μmol/mol,光合有效辐射(PAR)梯度设置为1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、300、100、60、40、20、10和0 μmol/(m²·s),于移栽后7 d测定田间烟苗第5片叶的

光合参数。以净光合速率(P_n , μmol/(m²·s))和PAR拟合光响应曲线,得出表观量子效率(AQY)、最大净光合速率(P_{max})和暗呼吸速率(R_d),光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)由基于Farquhar模型设计的“光合助手”拟合。

1.3.5 PS II 最大光化学效率

盆栽试验条件下,烟苗移栽后连续4 d,分别剪取烟苗第4片叶,立即置于黑暗环境下,暗适应30 min后应用叶绿素荧光成像系统MAXI-IMAGING-PAM(WALZ,德国)测定PS II最大光化学效率(F_v/F_m)。

1.3.6 统计分析

采用Excel 2013进行数据整理,Origin Pro 8(Origin Lab, USA)绘制图形,利用SAS v8(SAS Institute, USA)的Duncan比较法进行差异显著性分析($P < 0.05$)。光的响应曲线及响应参数用非直角双曲线模型拟合:

$$P_n = \frac{AQY \cdot PAR + P_{max} - \sqrt{(AQY \cdot PAR + P_{max})^2 - 4 \cdot AQY \cdot PAR \cdot P_{max}}}{2k} - R_d$$

式中: P_n 为净光合速率;PAR为光合有效辐射; P_{max} 为最大净光合速率;AQY为表观量子效率; k 为光响应曲线曲率($0 < k < 1$)。

2 结果与分析

2.1 井窖式移栽对光合有效辐射的影响

图2(a)展示了井窖内8 cm处和常规移栽地表

PAR 连续 4 d 的变化。其中,常规移栽(CT)地表接受的平均光合有效辐射为 $316 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,井窖(WCST)内 8 cm 处接受的平均光合有效辐射为 $167 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,井窖内 8 cm 处的 PAR 为地表的 52.85%。图 2(b)展示了井窖内 4 cm 处和常规

移栽地表光合有效辐射(PAR)连续 4 d 的变化。其中,常规移栽(CT)地表接受的平均光合有效辐射为 $281 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,井窖(WCST)内 4 cm 处接受的平均光合有效辐射为 $204 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,井窖内 4 cm 处的 PAR 为地表的 72.60%。

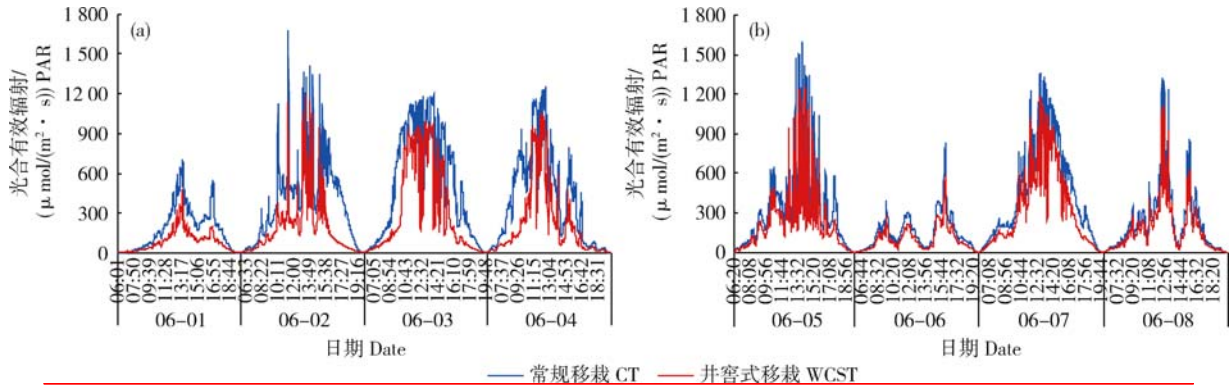
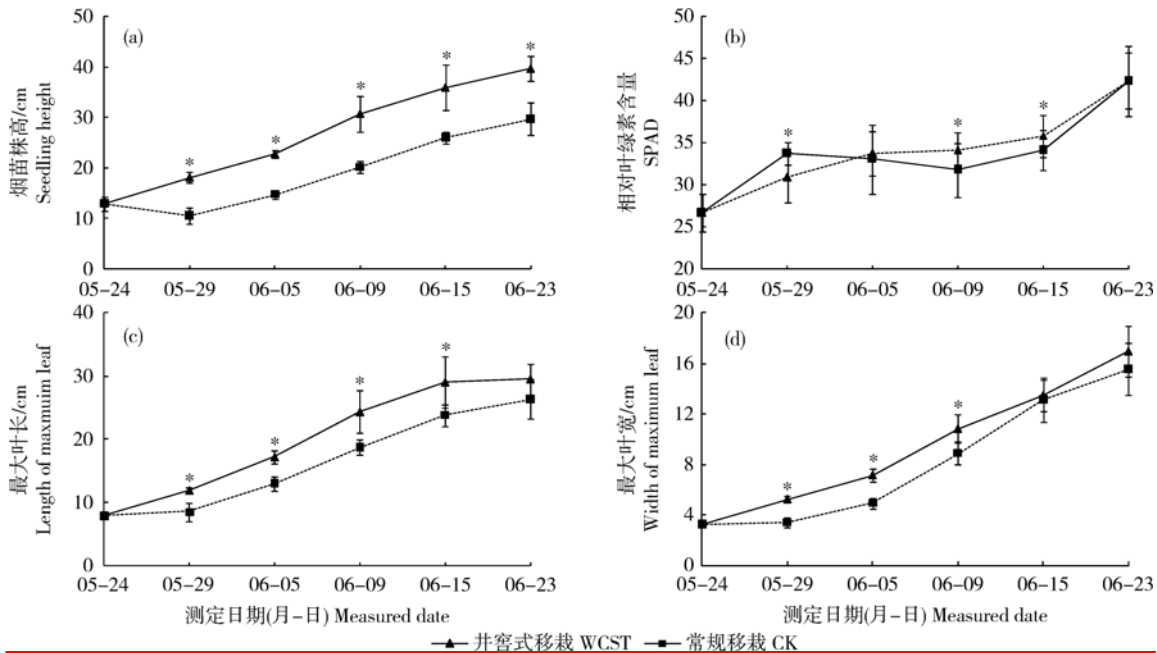


图 2 井窖内与常规移栽地表多日光合有效辐射变化趋势
Fig. 2 Photosynthetically active radiation in WCST and CT

2.2 井窖式移栽对烟苗生长的影响

烟苗移栽初期(移栽后 12 d),井窖式移栽(WCST)烟苗株高逐渐提高,常规移栽(CT)烟苗株高并未明显提高,CT 处理烟苗移栽后表现出明显的缓苗现象。自移栽后,井窖式移栽烟苗株高显著($P < 0.05$)高于常规移栽,株高增幅为 33.54%~71.81%。烟苗移栽后叶片相对叶绿素含量(SPAD

值)逐渐提高,其中移栽初期(移栽后 5 d)井窖式移栽(WCST)烟苗叶片 SPAD 值显著($P < 0.05$)高于常规移栽处理(CT);移栽后 12 d,不同移栽方式烟苗叶片 SPAD 值差异不显著($P > 0.05$);移栽后 16 和 22 d 时,CT 处理 SPAD 值显著高于 WCST;但在移栽后 30 d 时,不同移栽方式烟苗叶片 SPAD 值差异不显著(图 3)。



* 为 0.05 水平差异显著。* indicates the significant difference at 5% level.

图 3 烟苗移栽后株高、叶绿素含量和叶片长宽的变化

Fig. 3 Plant height, SPAD and leaf size of tobacco seedlings when transplanted within several days

烟苗移栽后定期监测不同移栽方式对烟株最大叶长和叶宽的影响。随移栽天数的增加,井窖式移栽(WCST)烟苗的最大叶长和叶宽比常规移栽(CT)显著($P < 0.05$)增加;其中,WCST最大叶长比CT显著($P < 0.05$)提高了21.76%~39.95%,WCST最大叶宽较CT显著($P < 0.05$)提高了21.75%~54.39%。2种移栽方式最大叶长和叶宽分别在移栽后30和22 d时差异已不显著。井窖式移栽烟苗还苗更快,移栽后仍保持较快的生长势(图3)。

2.3 移栽方式对烟苗光响应的影响

采用Farquhar模型,通过光合有效辐射(PAR)和叶片净光合速率(P_n)拟合光响应曲线(图4)。PAR<500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,井窖式移栽烟苗叶片净光合速率高于膜上移栽处理,当PAR>500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时2种移栽方式表现出相反的关系。与膜上常规移栽比较发现,井窖式移栽烟苗表观量子效率(AQY)略高,光呼吸速率(R_d)和光补偿点(LCP)

值均较低,但最大净光合速率(P_{max})和光饱和点(LSP)小于常规移栽(表1)。弱光照条件下(PAR<500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),井窖式移栽烟苗叶片瞬时蒸腾速率(E)高于膜上常规移栽处理,这与其净光合速率高低有关,光合作用强时叶片气孔开度大,蒸腾作用加强;随着光合有效辐射增强,井窖式移栽烟苗蒸腾作用逐渐减弱。

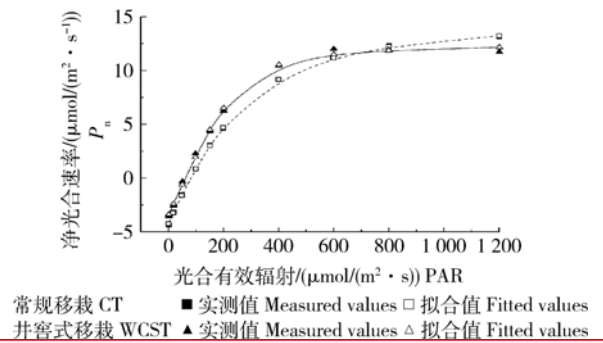


图4 井窖式和常规移栽方式烟苗光响应曲线
Fig. 4 Light response curves of WCST and CT

表1 不同移栽方式光响应曲线拟合参数

Table 1 Fitted parameters of the light response curves in WCST and CT

移栽方式 Treatment	AQY/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	$P_{\text{max}}/$ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	$R_d/$ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	LSP/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	LCP* / ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	R^2
常规 CT	0.045	19.41	4.33	1 180.68	88.75	1.000
井窖式 WCST	0.047	15.27	3.56	834.45	70.61	0.998

注: * 光补偿点由图5线性拟合。
Note: LCP was got by linear fitting in Fig. 5.

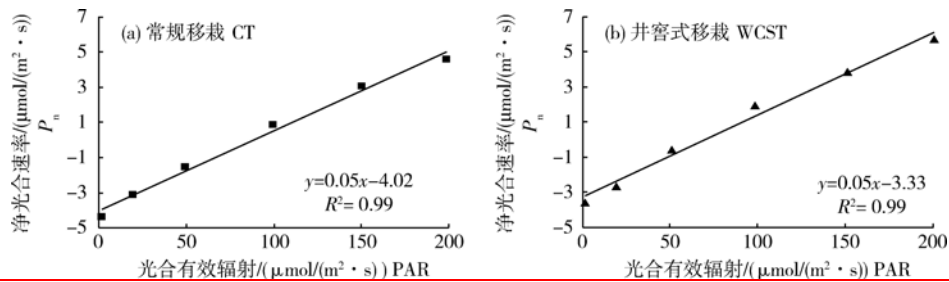


图5 不同移栽方式光补偿点(LCP)拟合曲线

Fig. 5 Linear approximation of the light compensation point (LCP) in WCST and CT

2.4 井窖式移栽 PS II 最大光化学效率

与育苗棚内烟苗叶片 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)(图6)比较,烟苗移栽后叶片 F_v/F_m 降低。其中,常规移栽处理(图6(a))叶片 F_v/F_m 下降最多,井窖式移栽(图6(b))下降相对较少,但均分别较CK降低了15.24%和8.02%。

基于叶绿素荧光成像,获取叶片图像每一个像素点的PS II最大光化学效率值(F_v/F_m),绘制柱状频率统计图(图7)。烟苗移栽后,叶片PS II最大光化学效率值(F_v/F_m)降低,其中,井窖式移栽烟苗叶片 F_v/F_m 平均值为0.71,常规移栽 F_v/F_m 平均值为0.66。井窖式移栽(WCST)烟苗叶片 F_v/F_m 值高于常规移栽(CT),增幅5%~9%。

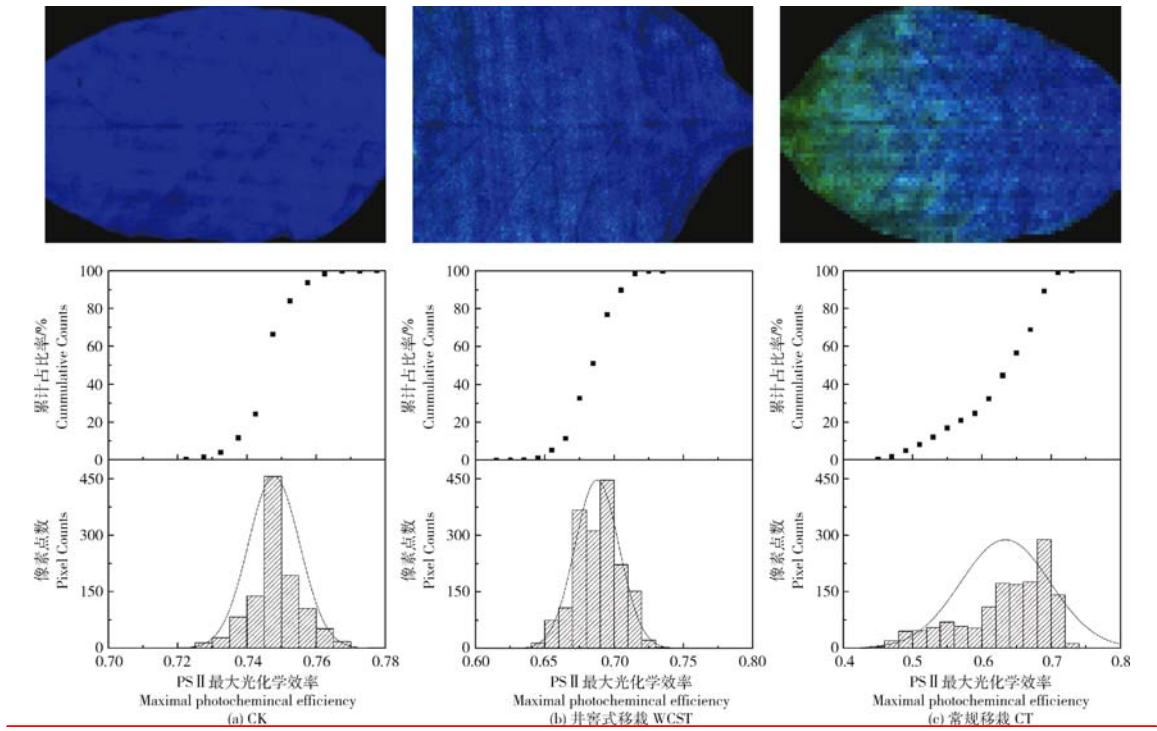


图 6 移栽后首日烟苗叶片 F_v/F_m 成像

Fig. 6 Images of PS II maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) at the first day after transplanting

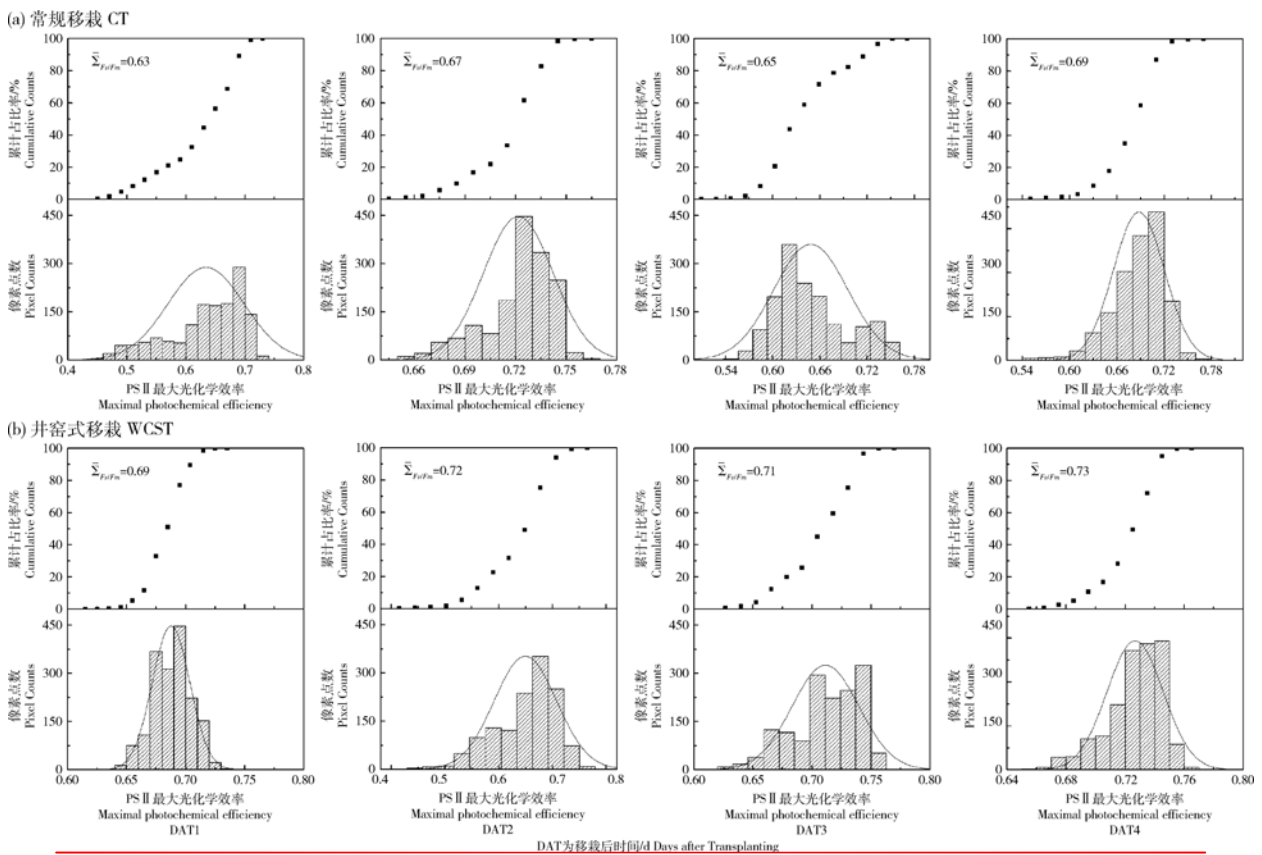


图 7 不同移栽方式对烟苗移栽初期叶片 F_v/F_m 分布特征的影响

Fig. 7 Normal distribution of PS II maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) in WCST and CT

3 结论与讨论

3.1 不同移栽方式下光照与烟苗生长发育的关系

井窖内烟苗接收到的太阳光合有效辐射低于常规膜上移栽,且随着井窖内深度的增加而降低。井窖内距井窖口4和8 cm处平均太阳光合有效辐射分别为同期常规膜上移栽的72.60%和52.85%。烟苗移栽5 d后,井窖式移栽烟苗株高、最大叶长、最大叶宽和叶片叶绿素含量显著提高,其中株高、叶长和叶宽在移栽后30 d内一直保持较快增长。前人研究结果表明,植物在弱光逆境条件下,株高提高,叶面积增大^[13],叶绿素含量提高^[14-16]。弱光条件下,植物光合同化产物向根、茎和生长锥的分配增多,使茎秆成为优先生长的器官。井窖内烟苗茎秆增长较快,株高升高较快,烟苗在弱光下较短时间内达到更靠井窖口的生长空间,以便截获井窖上部空间更多的太阳光合辐射^[8,17]。烤烟同其他茄科作物类似,烟苗对井窖内弱光胁迫的积极响应具有系统性,如叶长和叶宽显著提高,使得单叶面积增大。这与许红娟等^[5]和李伟等^[8]的研究结论一致。适当的遮荫有利于烤烟苗期株高的增加,过度的荫蔽不利于烟苗的生长发育^[12,15]。井窖式移栽后,烟苗株高等农艺性状显著优于常规膜上移栽,因此,井窖内的光照条件能够满足烟苗生长的需求。

3.2 不同移栽方式下烟苗光合特性的差异

光照强弱对植株光合作用的大小影响显著,是改变植物感光系统的信号。井窖式移栽的烟苗在弱光($PAR < 500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)下叶片净光合速率(P_n)高于常规膜上移栽,表明烟苗对弱光胁迫有一定的自我调节和适应能力。光补偿点是评价植物耐荫蔽能力的重要生理参数^[9],井窖内弱光环境下烟苗的光补偿点降低,表观量子效率升高,表明烟苗对井窖内弱光的利用能力增强^[18]。井窖式移栽烟苗叶片暗呼吸速率(R_d)比常规膜上移栽降低了17.78%,暗呼吸速率减弱,减少了烟苗植株体有机物的消耗,有利于干物质积累,加快烟苗生长发育。

叶绿素荧光参数是反映植物光合效率的重要生理参数,荧光参数的变化可以从光合作用的内部变化角度进一步说明烟苗对井窖内弱光环境的适应力^[19]。本研究中,井窖式移栽弱光环境下烟苗叶片PSII最大光化学效率(F_v/F_m)显著高于常规膜上移栽,这与吴正锋等^[4]和陆晓蕾等^[20]在非烟作物上的研究结果一致。本研究中,井窖式移栽烟苗最大净光合速率(P_{max})和光饱和点较常规膜上移栽烟苗

减小,但其光补偿点降低、表观量子效率升高。引起光合速率降低的植物自身因素主要是气孔的部分关闭和叶肉细胞光合能力下降。井窖内烟苗光饱和点和最大净光合速率下降可能与部分叶肉细胞光合能力降低有关,还需要进一步开展研究。

参 考 文 献

- [1] 刘贞琦,伍贤进,刘振业. 土壤水分对烟草光合生理特性影响的研究[J]. 中国烟草学报,1995(1):44-49
- [2] 罗会斌,龙鹏臻,马键,等. 烤烟井窖式小苗移栽技术研究与应用[J]. 贵州农业科学,2012,40(8):101-107
- [3] 刘杰,周清明,周兴华,等. 地膜井窖式移栽对烤烟前期生长发育的影响[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2013,39(3):242-246
- [4] 吴正锋,王才斌,李新国,等. 苗期遮荫对花生(*Arachis hypogaea* L)光合生理特性的影响[J]. 生态学报,2009,29(3):1366-1373
- [5] 许红娟,巩振辉,贾志银,等. 不同遮荫对观赏辣椒苗期形态和生理生化指标的影响[J]. 北方园艺,2010,14:1-4
- [6] 鲁福成,张静芳,张仲国,等. 弱光对番茄幼苗生长的影响[J]. 华北农学报,2002,17(4):44-48
- [7] 唐韦华,李天来,张秀美,等. 苗期弱光胁迫对番茄生长和叶绿素含量的影响及其恢复效应[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(3):278-282
- [8] 李伟,袁学平,杨迺然,等. 弱光对两品种黄瓜光合特性和生长发育的影响[J]. 东北农业大学学报,2012,43(1):97-103
- [9] 李恩鹤,李加旺,张文珠. 不同品种黄瓜幼苗光合特性对弱光的响应[J]. 华北农学报,2010,25(4):158-161
- [10] 梁文娟,王美玲,艾希珍,等. 黄瓜幼苗光合作用对亚适弱光胁迫的适应性[J]. 农业工程学报,2008,24(8):240-244
- [11] 吴云平,朱信,王瑞,等. 利用弱光延长光照时间对温室烟苗光合作用与生长的影响[J]. 中国烟草学报,2011,17(5):59-63
- [12] 杨兴有,崔树毅,刘国顺,等. 弱光环境对烟草生长、生理特性和品质的影响[J]. 中国生态农业学报,2008,16(3):635-639
- [13] 王慧哲,庞金安,李淑菊,等. 弱光处理对春季温室不同品种黄瓜生长发育的影响[J]. 河南农业大学学报,2006,40(2):156-160
- [14] 李觅,李天福,杨焕文. 弱光胁迫对不同烤烟品种生理效应的影响[J]. 云南农业大学学报,2008(6):759-764
- [15] 云菲,刘国顺,史志宏,等. 光氮互作对烤烟光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(5):932-941
- [16] 云菲,刘国顺,宋晶. 不同光照强度下氮素对烤烟物质色素降解产物及品质的影响[J]. 中国烟草学报,2014,20(5):51-58
- [17] Trouwborst G, Oosterkamp J, Hogewoning S W, et al. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy[J]. *Physiologia Plantarum*, 2010, 138: 289-300
- [18] 管铭,金则新,王强,等. 千岛湖次生林优势种植物光合特性对不同光环境的响应[J]. 应用生态学报,2014,25(6):1615-1622
- [19] Demming-Adams B, Adams W W, Barker D H, et al. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation [J]. *Physiologia Plantarum*, 1996, 98(2): 253-264
- [20] 陆晓蕾,毛胜利,王立浩,等. 弱光条件下辣椒幼苗叶片的气体交换和叶绿素荧光特性[J]. 园艺学报,2007,34(3):615-622

责任编辑:苏燕