果 树 学 报 2022,39(12):2330-2342
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20220190

覆盖散光膜对设施葡萄不同节位叶片光合特性和果实品质的影响

李志强[1],林 琭[1*],李 磊[1],赵 琪[1],李 倩[1],安福尚[2],金洪波[2]

([1]山西农业大学园艺学院,太原 030031;[2]唐山市忠福塑料制品销售有限公司,河北唐山 063000)

摘 要:【目的】探明散射光薄膜覆盖下植株不同节位之间光环境的差异及对叶片光合特性及果实品质的影响,为散光膜的进一步推广应用提供理论依据。**【方法】**以4年生早黑宝葡萄为试材,以覆盖散射光薄膜的大棚为处理,覆盖普通PO膜的大棚为对照,研究不同薄膜覆盖的大棚内光环境的变化对植株低位叶(离地高度0.80~0.90 m)、中位叶(离地高度1.20~1.30 m)和高位叶(离地高度1.60~1.70 m)的叶片净光合速率(P_n)、荧光参数、光响应特性、CO_2响应特性、叶片质量以及果实品质的影响。**【结果】**与对照相比,处理的高位叶光强较低;植株背光测(即上午西侧和下午东侧)的中位叶光强显著提高;而低位叶则全天的受光状况得到显著改善,光强日平均值提高29.1%~35.4%。对照的高位叶由于受到光照过强而在午间出现无法缓解的光抑制现象,叶片P_n在中午和下午显著低于处理;处理的植株背光侧的中位叶P_n比对照显著提高;低位叶的叶片P_n则表现为处理全天高于对照,平均提高18.3%~59.8%($p<0.05$)。处理植株不同节位叶片的光系统Ⅱ的潜在量子效率(F_v/F_m)均显著高于对照。处理的叶片饱和光强下的最大净光合速率(P_{nmax})和叶片CO_2响应的最大净光合速率($P_{nmax,c}$)分别比对照提高了2.2%~9.0%和30.2%~68.7%($p<0.05$)。处理植株不同节位叶片的叶长×叶宽均显著高于对照,且提高程度随着节位的降低而增大。叶绿素相对含量(SPAD值)表现为高位叶在处理和对照之间无显著差异,而中位叶和低位叶处理显著高于对照。与对照相比,除果形指数无显著差异外,处理的果实单果质量、可溶性固形物含量、维生素C含量、可溶性糖含量以及果实中的全钙、全钾和粗蛋白质含量均显著提高,总酸度显著降低。**【结论】**覆盖散射光薄膜显著改善了植株中部背光侧叶片以及下部叶片的光环境,从而提高了叶片的光合速率、叶长×叶宽值以及叶绿素相对含量,进而显著提升了果实品质。

关键词:葡萄;散光膜;节位;光合特性;果实品质

中图分类号:S663.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2022)12-2330-13

Effects of covering with light-diffusing film on photosynthetic characteristics of leaves at different node positions and fruit quality of grapes under protection

LI Zhiqiang[1], LIN Lu[1*], LI Lei[1], ZHAO Qi[1], LI Qian[1], AN Fushang[2], JIN Hongbo[2]

([1]College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi, China; [2]Zhongfu Plastic Products Sales Company Limited in Tangshan, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract:【Objective】The aim of this study was to explore the effects of covering light-diffusing film on light environment in greenhouse and photosynthetic characteristics of leaves at different node positions as well as fruit quality, in order to provide reference for application of light diffusing film.【Methods】In this study, 4-year-old Zaoheibao grapevines were adopted as experimental materials, and the effects of changing light environment on growth and quality of grape berries through covering with light-diffusing (as treatment) or with ordinary PO film (as control) were examined. Diurnal variations of light intensity at lower leaf (LL, 0.80−0.90 m above ground), middle leaf (ML, 1.20−1.30 m above ground) and upper leaf (HL, 1.60−1.70 m above ground) positions of the eastward and westward sides were mea-

收稿日期:2022-04-18 **接受日期:**2022-06-11

基金项目:山西省重点研发重点项目子课题(201903D211011-02);山西省农业科学院科企合作项目(2020kqhzpt01)

作者简介:李志强,男,副研究员,硕士,主要从事果树栽培生理研究。Tel:18734599708,E-mail:448093260@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:15135086693,E-mail:linluyyxy@sxau.edu.cn

sured at intervals of one hour from 08:00 to 18:00 using a hand-held photons instrument (MQ-100) in three successive clear days. Diurnal variations of leaf net photosynthetic rate (P_n) and dark respiration rate (R_d) at LL, ML and HL of eastward side and westward side were measured once every two hours from 08:00 to 18:00 using a LI-6400XT photosynthesis measurement system. Chlorophyll fluorescence parameters including minimum fluorescence in dark (F_o), maximum fluorescence in dark (F_m), and potential quantum efficiency of PSⅡ (F_v/F_m) at LL, ML and HL in the treatment and the control were measured using the LI-6400XT equipped with an integrated fluorescence chamber head (LI-6400-40). The response curves of P_n to photosynthetically active radiation (*PAR*) and intercellular CO_2 concentration (C_i) of LL, ML and HL were measured using the LI-6400XT with its standard 6 cm^2 leaf chamber and red-blue LED light source (LI-6400-02B). The P_n-*PAR* response curves were obtained at ambient CO_2 concentration of (400±20) $\mu mol \cdot mol^{-1}$ with *PAR* set in a decreasing series of 1500, 1200, 1000, 800, 500, 200, 100, 80, 50, 20 and 0 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. The P_n−C_i response curves were measured under light intensity of 1200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (saturated *PAR* derived from P_n-*PAR* response curves) with CO_2 concentration set at 400, 300, 200, 100, 50, 400, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 and 2000 $\mu mol \cdot mol^{-1}$. The leaf traits such as length, width and relative chlorophyll content (reflected by SPAD value) of LL, ML and HL were also measured for correlation analysis. During the fruit harvest season, fruit quality characters including single fruit weight, fruit shape index (vertical diameter/cross diameter of the fruit), soluble solid content, vitamin C content, soluble sugar content, total acidity as well as total calcium, total potassium and crude protein content in the fruit were determined.【Results】Compared with the control, decreased light intensity at HL and increased light intensity at ML of shaded side (i.e. westward side in the morning and eastward side in the afternoon) in treatment were observed, and light environment was improved significantly at LL in the whole day with daily mean vale of light intensity increased by 29.1%−35.4% in the treatment. P_n of HL in the control was significantly lower than that in the treatment at noon and in the afternoon due to the photoinhibition induced by oversaturated light intensity at midday. P_n of ML at the shaded sides in the treatment was significantly higher than that in control. P_n of LL in the treatment was increased significantly in the whole day with daily maximum value and daily mean value increased by 18.3% and 59.8%, respectively, compared with the control ($p < 0.05$). Leaf F_o, F_m and F_v/F_m in the treatment were higher than in the control across different node positions (HL, ML and LL). Leaf maximum P_n under saturated light intensity (P_{nmax}) and leaf maximum P_n in the P_n−C_i response curves ($P_{nmax,\ c}$) in the treatment increased by 2.2% (mean value of HL, ML and LL at eastward side)-9.0% (mean value of HL, ML and LL at westward side) and 30.2% (mean value of HL, ML and LL at eastward side)-68.7% (mean value of HL, ML and LL at westward side) ($p < 0.05$), respectively than those in control. The value of leaf length multiplied by leaf width in the treatment was significantly higher than that in the control across different node positions and a sharp increase occurred as node position became lower. Relative chlorophyll content (SPAD value) of HL was not significantly different between the treatment and the control. However, those of ML and LL were significantly higher in the treatment than in the control. Except for fruit shape indices which showed no significant difference, other fruit quality characters such as single fruit weight, soluble solids content, vitamin C content, soluble sugar content as well as total calcium, total potassium and crude protein content in grape fruit increased significantly while total acidity decreased significantly in the treatment.【Conclusion】Accordingly, in greenhouse covered with light-diffusing film, light environment of the middle and lower leaves was improved greatly, leading to increased leaf photosynthetic rate and leaf size and relative chlorophyll content, and thus improved fruit quality.

Key words: Grape; Diffuse light film; Node positions; Photosynthetic characteristics; Fruit quality

传统棚膜由于对紫外线辐射没有调控作用，当自然光照度较强时，易造成点状辐射的紫外线照射到作物表面，造成灼伤危害，导致作物产量降低，已逐渐不能满足种植户的要求。散射光薄膜（即散光膜）是采用面散射光技术（利用棚膜表面粗糙度达到散射光效果）或者体散射光技术（通过混入折光指数与基体树脂有差异的光散射体实现散射光目的），从而把平行直射的光线转变成各向同性的面光源或各向异性的面、线光源，扩大光照面积的一种聚合物薄膜[1]。散光膜可以改变进入棚内的光照角度，将直射光均匀地散射到植株的各部位，不仅能减少叶片和果实的日灼，而且种植者不用为了改善作物底部的光照而去剪枝，从而减小了劳动强度、节省了人工成本，近年来在生产上逐渐得到使用[2]。研究散光膜覆盖下作物生长和生理特性的变化对其进一步推广和应用意义重大。

关于覆盖散光膜后散射光对设施生产的影响，前人研究主要关注了设施内环境状况（光照、温度、湿度）的变化[3-5]。使用散光膜后，棚内早晚光照弱时，透光率较高、升温快；中午光照强时，直射光集中度低、利于遮阳，可减缓棚温上升。因此，散光膜有利于稳定棚内温度，缩短作物生长周期，提高作物产量和品质[6-8]。

光合作用是植物叶片将捕获的光能用于光化学反应和碳同化的过程，是作物产量和品质形成的基础[9]。迄今为止，在散射光对作物叶片光合作用的影响以及作物生长对散射光的响应和生理生态适应性方面，多见于大田作物的研究报道，设施内的研究较少[10-12]。关于覆盖散光膜后棚内环境状况的变化对设施作物生长的影响，前人研究大多关注了光照变化对作物某一节位叶片净光合速率或不同节位叶片平均净光合速率的影响[13-15]；然而，设施内光照的空间分布是不均匀的，尤其对于像葡萄这样的藤本作物，植株在垂直方向上的光强具有显著的非线性变化特点，但直至目前，关于异质性光环境对不同节位叶片光合特性的影响差异未见研究报道。

笔者在本研究中拟通过测定和量化分析在不同薄膜覆盖的大棚下植株不同节位之间的光环境变化对叶片光合特性、荧光特性、叶片质量性状以及果实品质的影响，探讨设施作物的生长及光合生理生态对散射光的响应机制，以期为散光膜的进一步示范推广和应用提供理论依据和技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验站点和材料

试验地点位于山西省运城市盐湖区王范乡王范村的呱呱香种植专业合作社。试验拱棚为单栋棚，跨度17 m、长140 m、高5 m，拱架为1寸钢管，设置顶风口2道，底风口2道。试验材料为4年生早黑宝葡萄，采用水平架形整枝（是指结果母枝水平绑缚于架面、结果枝直立绑梢的一种生产上常用的栽培模式，如图1所示）。株距1 m、行距2 m，栽培土壤为壤

图1 水平架形整枝及不同节位叶片示意图

Fig. 1 Schematic diagram for horizontal trellis training and leaves at different node positions

土，水肥管理条件均一。

1.2　试验设计

试验设置试验棚1栋，对照棚1栋。试验棚覆盖博禄贸易（上海）有限公司生产的双峰聚乙烯散光膜（透光率95%），对照棚覆盖普通PO膜（透光率93%）。双峰聚乙烯散光膜采用两种不同分子质量的聚合物聚合而成，它们不同的收缩率使薄膜表面凹凸不平，提高雾度达到漫散射效果而不影响透光率。

试验棚和对照棚的葡萄植株均为南北向种植7行，除去2个边行以及最中间1行（受顶部卷帘机和棉被遮挡的影响），在剩余4行的中间100 m内（除去靠南和靠北各20 m，避开棚入口处的影响）随机选取试验植株。笔者在本研究中选取葡萄植株3个不同高度节位的叶片进行试验指标的测定，并进行如下定义（如图1所示）：（1）低位叶，为果穗对位叶，离地高度0.80~0.90 m；（2）中位叶，为果穗以上第3叶，离地高度1.20~1.30 m；（3）高位叶，为果穗以上第6或第7叶，离地高度1.60~1.70 m。

1.3　测定项目和方法

1.3.1　植株不同节位叶片接受的光强日变化测定　于2020年5月上旬（即植株叶面积系数达到最大、叶幕光环境达到稳定的时期）选择3个晴朗无云的日期，采用MQ-100手持式光量子测量仪，测定散光膜试验棚和普通膜对照棚内植株东侧和西侧的低位叶、中位叶和高位叶接受的光照度的日变化。测定时间为08:00—18:00，每小时测定1次，每次测定同时记录棚外的光照度。

1.3.2　植株不同节位叶片净光合速率日变化测定　于2020年5月的晴天，采用LI-6400XT便携式光合作用测定系统，于散光膜试验棚和普通膜对照棚内随机选取有代表性的3株植株作为观测株，测定观测株东侧和西侧的低位叶、中位叶和高位叶的净光合速率P_n的日变化。测定时间为08:00—18:00，每2 h测定1次。每个部位测定3~5次，取其平均值分析。

1.3.3　植株不同节位叶片的荧光参数测定　采用LI-6400XT便携式光合作用测定系统并配备荧光叶室（6400-40），将试验棚和对照棚内观测株东侧和西侧的低位叶、中位叶和高位叶各随机选取3枚，提前一天傍晚用铝箔纸包裹，经过一晚上的充分暗适应，于翌日清晨7:00开始测定以下参数：暗适应下的最小初始荧光（F_o）、最大荧光（F_m）和暗呼吸速率（R_d），由此得出光系统Ⅱ（PSⅡ）的潜在光化学量子效率（F_v/F_m）。

1.3.4　植株不同节位叶片的光响应曲线测定　于2020年5月晴天的08:00—11:30，在自然大气状态下（CO_2浓度=400 ± 20 μmol·mol^{-1}），设置LI-6400XT叶室内的光强梯度PAR_i为1500、1200、1000、800、500、200、100、80、50、20和0 μmol·m^{-2}·s^{-1}，测定试验棚和对照棚内观测株东侧和西侧的低位叶、中位叶和高位叶在不同光强下的气体交换参数（净光合速率P_n、气孔导度G_s、胞间CO_2浓度C_i和瞬时蒸腾速率T_r）的变化。每个光强下设定测量时间为200 s，数据稳定后记录。

1.3.5　植株不同节位叶片的CO_2响应曲线测定　在饱和光强下（由光响应曲线得出为1200 μmol·m^{-2}·s^{-1}），设置LI-6400XT叶室内的叶片表面CO_2浓度C_s为400、300、200、100、50、400、400、600、800、1000、1200、1500和2000 μmol·mol^{-1}，测定试验棚和对照棚内观测株东侧和西侧的低位叶、中位叶和高位叶在不同CO_2浓度下的气体交换参数（同1.3.4）的变化。每个CO_2浓度下设定测量时间为300 s，数据稳定后记录。测定时间同1.3.4。

1.3.6　植株不同节位叶片的叶长和叶宽测定　在试验棚和对照棚内观测株东侧和西侧的低位、中位和高位处分别随机选取健康、无病虫害、均匀一致的代表性叶片5枚，分别测定每枚叶片的主叶脉长度和叶片最宽处长度，记为叶长和叶宽，取5个重复的平均值进行分析。

1.3.7　植株不同节位叶片的叶绿素含量测定　采用SPAD-502 plus便携式叶绿素测定仪（KONICA MINOLTA，Japan），对上述1.3.6中选取的叶片，测定其叶绿素相对含量（SPAD值）。测定位点为叶片中部、避开主叶脉处，取5个重复的平均值进行分析。

1.3.8　果实品质测定　于果实成熟期（2020年6月下旬）分别对试验棚和对照棚的植株东侧和西侧采5穗果实，从中随机选取30粒果实，并进行以下指标测定：（1）单果质量：用1/100电子天平称量；（2）果形指数：用游标卡尺分别测量果实的纵径和横径，两者的比值即为果形指数；（3）可溶性固形物含量：采用日本手持式折光仪PAL-1测定；（4）可溶性糖含量：采用蒽酮比色法测定；（5）维生素C含量：采用2，6-二氯靛酚滴定法测定；（6）总酸度：采用酸碱中和滴定法测定；（7）全钙和全钾含量：采用原子吸收法测定；（8）粗蛋白质含量：采用凯氏定氮法测定。

2 结果与分析

2.1 散光膜对植株不同节位叶片接受光强日变化的影响

试验棚(散光膜)和对照棚(普通膜)内植株不同部位受光强度的日变化如图2所示。对于无遮挡、受光情况较好的高位叶,对照棚全天的光强均高于试验棚,东侧和西侧在正午12:00的最大值分别达到6.10×10^4 lx和6.79×10^4 lx,显著高于试验棚的6.05×10^4 lx(东侧)和5.77×10^4 lx(西侧)。中位叶的受光情况在上午和下午有所不同:08:00—12:00太阳光从棚东面射入,植株受光测(东侧)的光强表现为对照棚高于试验棚,但植株背光测(西侧)的光强表现为对照棚低于试验棚;13:00—18:00太阳光从棚西面射入,植株受光侧(西侧)表现为对照棚光强高于试验棚,植株背光侧(东侧)则表现为对照棚光强低于试验棚。可见,试验棚的散光膜将入射的直射光变为散射光后,显著改善了中位叶的背光测的光照状况。对于受光情况较差的低位叶,对照棚内光照从植株上部到下部层层衰减、显著降低;而试验棚由于覆盖散光膜将光线变为散射状态而使得光照在植株整体分布得较为均匀,因此表现为全天光强(东西侧日平均值分别达到1.64×10^4 lx和1.76×10^4 lx)均高于对照棚(东西侧日平均值分别达到1.27×10^4 lx

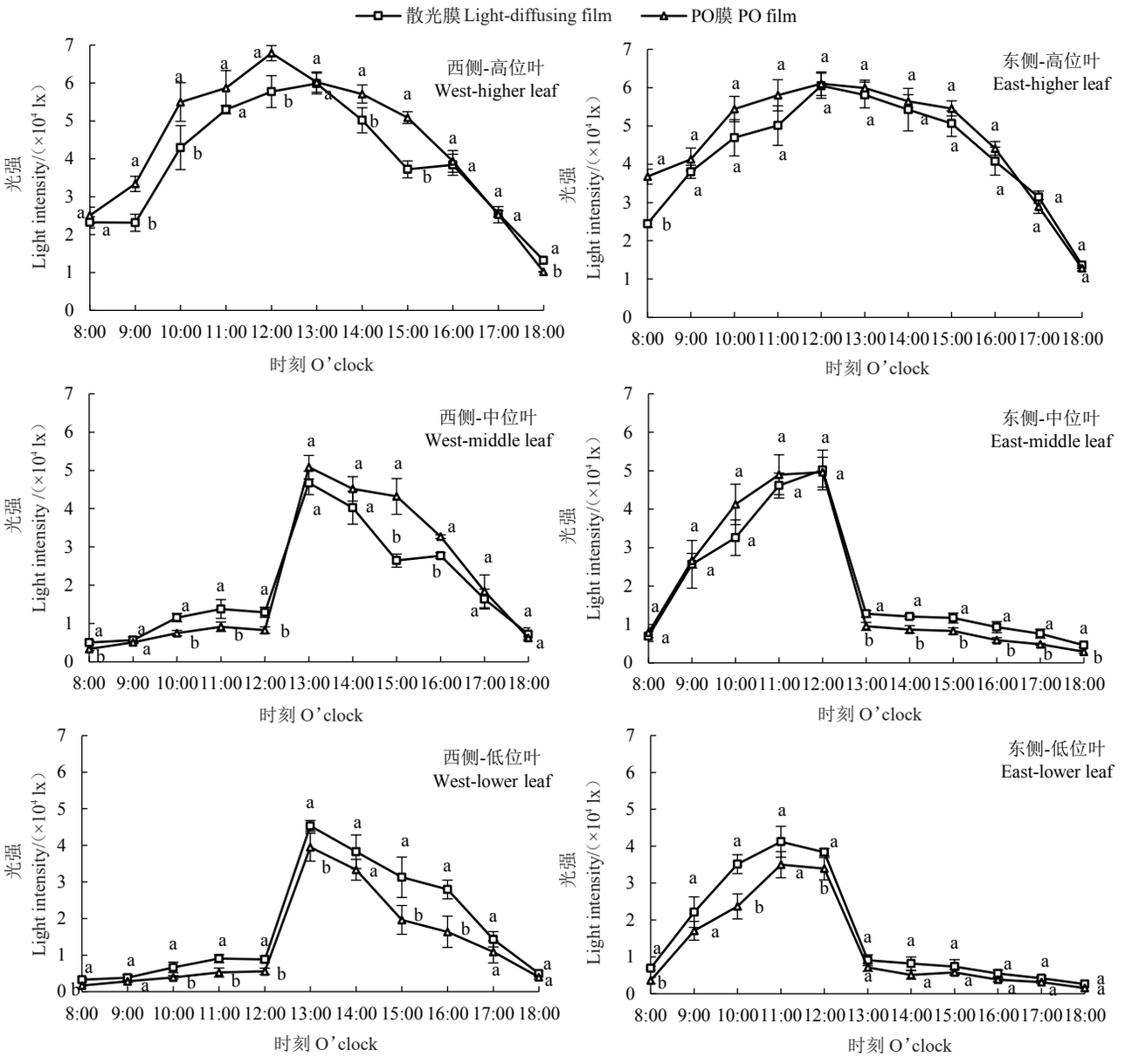

图2 试验棚和对照棚内植株不同节位叶片接受的光强日变化

Fig. 2 Diurnal change in light intensity received by leaves at different node positions under light-diffusing film and PO film

和 1.30×10⁴ lx），比对照提高 29.1%（东侧）和 35.4%（西侧）（$p<0.05$）。

2.2　散光膜对植株不同节位叶片净光合速率日变化的影响

试验棚和对照棚植株的叶片净光合速率（P_n）的日变化在不同节位的叶片之间有所差异（图 3）。对照棚植株东、西两侧的高位叶均表现为上午由于受光更好（图 1）而叶片 P_n 高于试验棚，中午由于出现光抑制（光强过饱和）而叶片 P_n 等于或低于试验棚，下午由于光抑制未解除而叶片 P_n 显著低于试验棚的趋势。中位叶上午东侧（受光侧）表现为对照棚略高于试验棚、但西侧（背光侧）显著低于试验棚；而下午西侧（受光侧）表现为对照棚略高于试验棚，但东侧（背光侧）则显著低于试验棚。试验棚由于植株下部光照明显改善（图 1），因此低位叶全天的叶片 P_n 均高于对照棚，日最大值和日均值分别为 11.98、5.81 μmol·m⁻²·s⁻¹（东侧）和 9.31、5.81 μmol·m⁻²·s⁻¹（西侧），显著高于对照棚的 10.61、3.04 μmol·m⁻²·s⁻¹（东侧）和 7.38、4.23 μmol·m⁻²·s⁻¹（西侧），东西两侧平均日最大值和日均值分别提高 18.3% 和 59.8%。

2.3　散光膜对植株不同节位叶片荧光参数的影响

如图 4 所示，试验棚和对照棚的植株叶片暗呼吸速率 R_d 在东侧和西侧均表现为随着节位的上升（光强增加）而升高，但在东侧表现为试验棚高于对

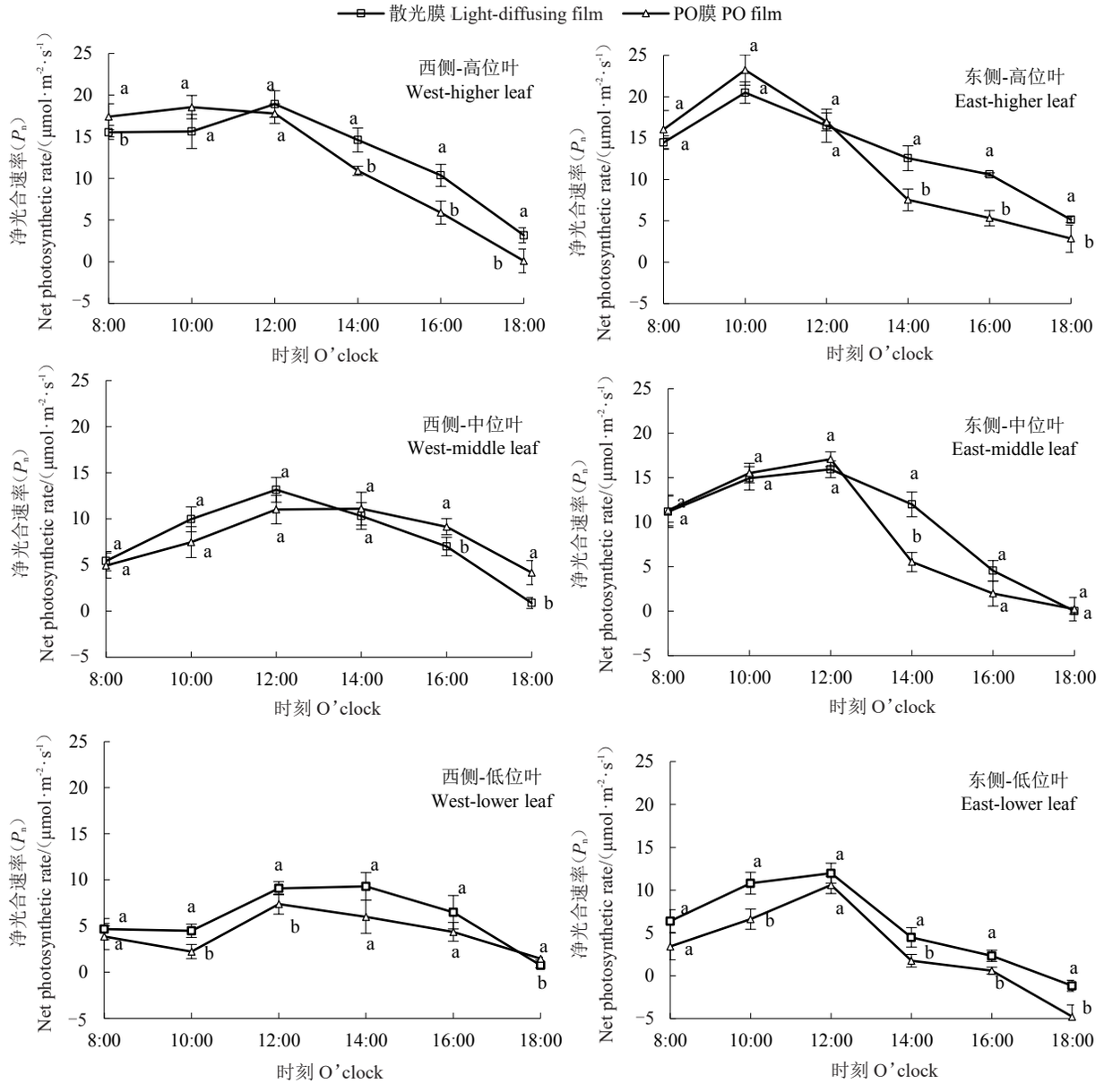

图 3　试验棚和对照棚内植株不同节位叶片的净光合速率日变化

Fig. 3　Diurnal change in leaf net photosynthetic rate at different node positions under light-diffusing film and PO film

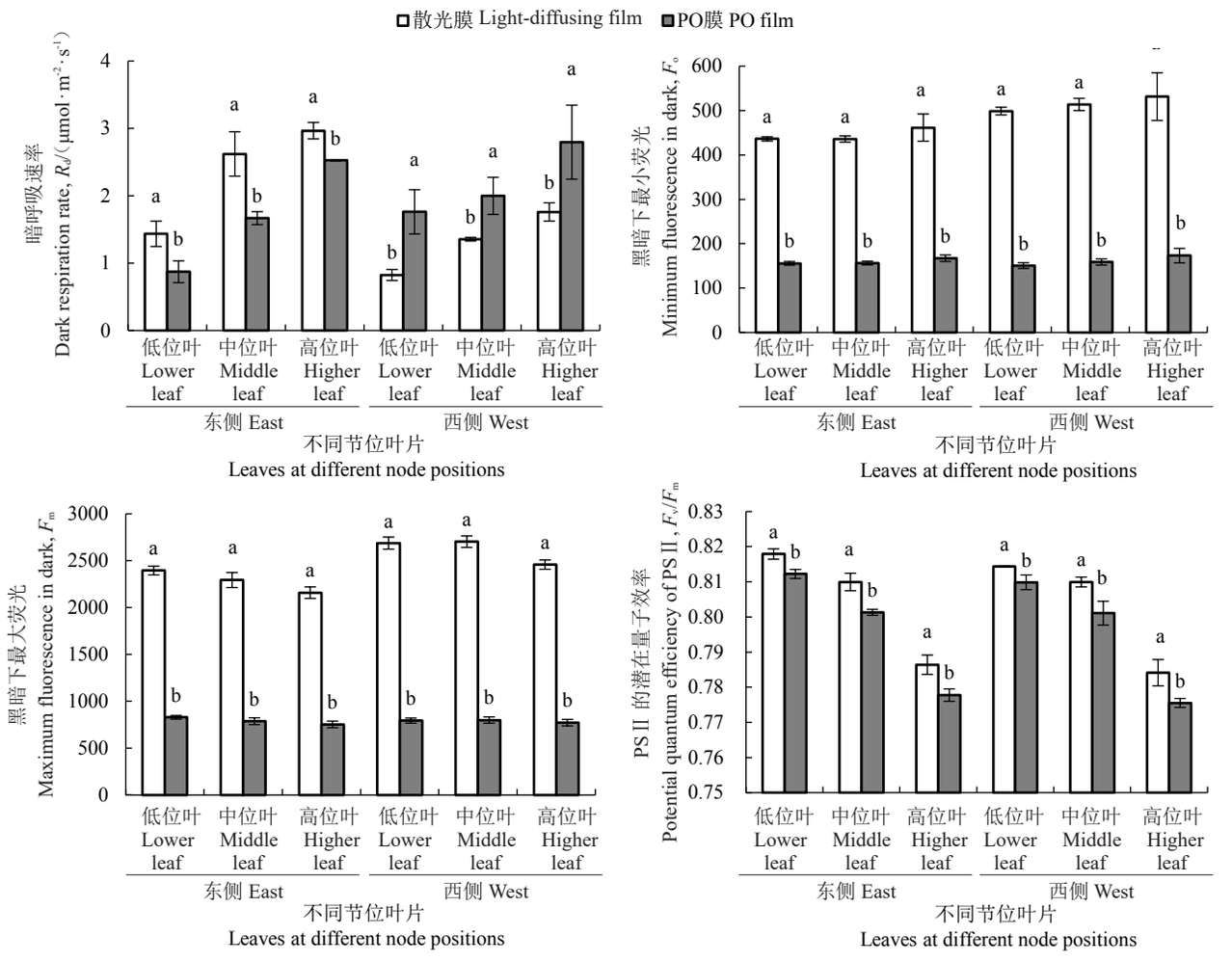

图4 试验棚和对照棚内植株不同节位叶片的荧光参数差异

Fig. 4 Differences in chlorophyll fluorescence parameters of leaves at different node positions under light-diffusing film and PO film

照棚、西侧表现为试验棚低于对照棚。黑暗下最小荧光F_o、黑暗下最大荧光F_m和光系统Ⅱ(PSⅡ)的潜在量子效率(F_v/F_m)在东侧和西侧以及低位叶、中位叶和高位叶均表现为试验棚显著高于对照棚,可见散射光显著提高了植株两侧和各节位叶片的光能利用能力。

2.4 散光膜对植株不同节位叶片的光合-光响应特性的影响

试验棚和对照棚内植株东西两侧各节位叶片的净光合速率(P_n)随光合有效辐射*PAR*的增加均服从指数增长的规律(图5)。东西两侧高位的叶片P_n表现为对照棚略高于试验棚,但在*PAR*超过1200 μmol·m^{-2}·s^{-1}以后,对照棚的叶片P_n随*PAR*的增加有所下降,即出现光抑制现象,而试验棚的叶片P_n未表现出光抑制。中位的叶片P_n表现出东侧(上午受光侧)对照棚略高于试验棚,但在西侧(上午背光侧)对照棚显著低于试验棚。东西两侧低位的叶片P_n在各光强下均表现为试验棚高于对照棚,这与试验棚植株低位的光环境得到显著改善有关。在1500 μmol·m^{-2}·s^{-1}的光强下,试验棚和对照棚东侧高、中、低位的叶片P_{nmax}分别达到16.84、14.72、12.69 μmol·m^{-2}·s^{-1}和16.77、16.26、10.97 μmol·m^{-2}·s^{-1};西侧高、中、低位的叶片P_{nmax}分别达到14.37、15.94、13.42 μmol·m^{-2}·s^{-1}和15.32、13.30、11.82 μmol·m^{-2}·s^{-1}。与对照棚相比,试验棚东侧高、中、低位的叶片最大净光合速率平均提高2.2%,西侧平均提高9.0%。

2.5 散光膜对植株不同节位叶片的光合-CO_2响应特性的影响

试验棚和对照棚内植株东西两侧各节位叶片的P_n对胞间CO_2浓度(C_i)的响应与P_n对*PAR*的响应类似(图6)。东西两侧高位的叶片P_n表现为对照棚略高于试验棚。中位的叶片P_n表现出东侧对照棚略高

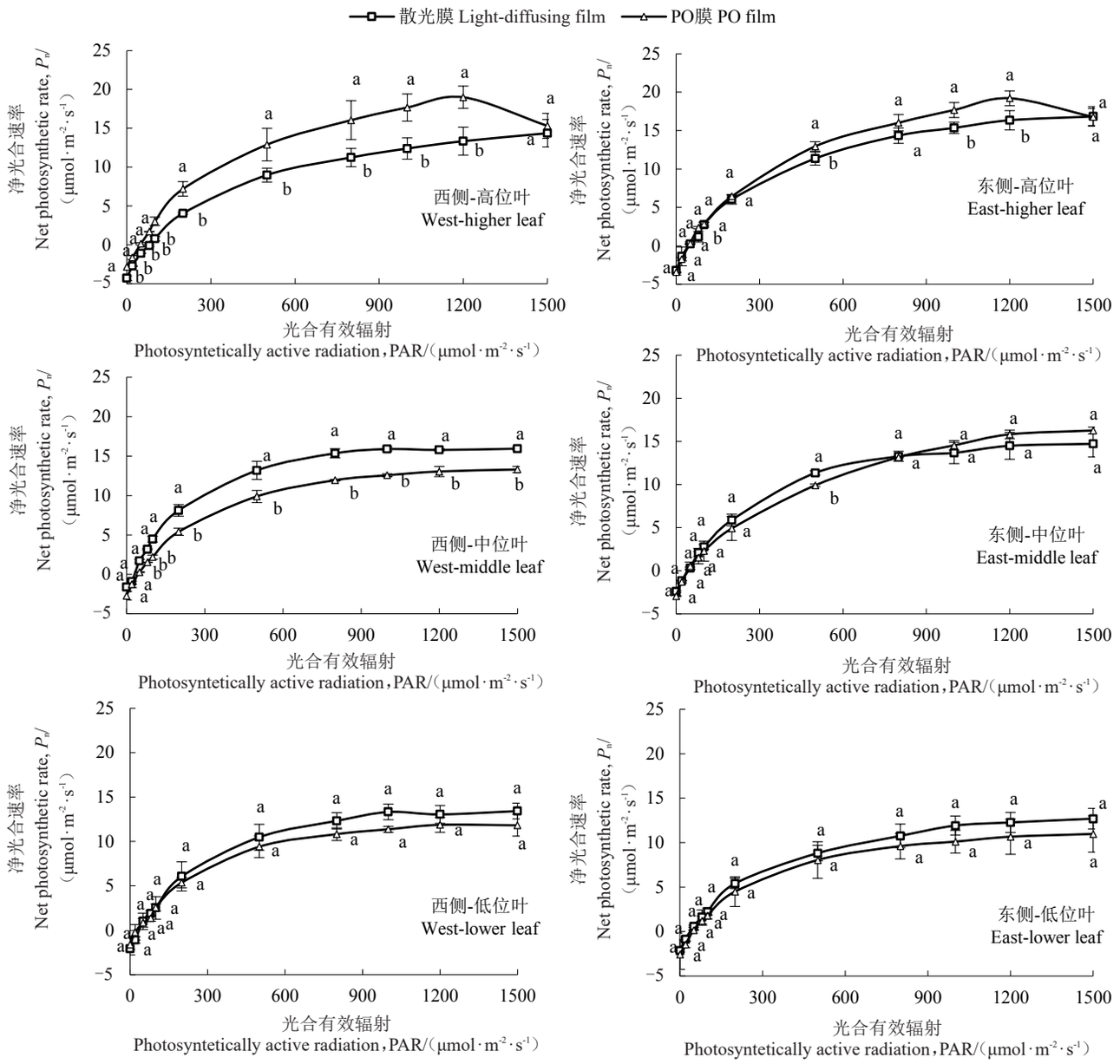

图5　试验棚和对照棚内植株不同节位叶片的光响应曲线差异

Fig. 5　Differences in light response curves of leaves at different node positions under light-diffusing film and PO film

于试验棚，但在西侧对照棚显著低于试验棚。东西两侧低位的叶片P_n在各光强下均表现为试验棚显著高于对照棚。将P_n−C_i响应曲线的最大值记为$P_{nmax,\ c}$，试验棚和对照棚东侧高、中、低位的叶片$P_{nmax,\ c}$分别达到52.26、42.54、37.77 μmol·m^{-2}·s^{-1}和54.08、49.02、18.24 μmol·m^{-2}·s^{-1}；西侧高、中、低位的叶片$P_{nmax,\ c}$分别达到42.79、49.87、36.01 μmol·m^{-2}·s^{-1}和43.70、32.65、14.09 μmol·m^{-2}·s^{-1}。综合考虑，试验棚东侧高、中、低位的叶片$P_{nmax,\ c}$比对照棚平均提高30.2%，西侧平均提高68.7%。

2.6　散光膜对植株不同节位叶片的叶长×叶宽的影响

试验棚和对照棚植株不同节位之间叶长×叶宽的差异如图7所示。除西侧的高位叶外，其余节位的叶片均表现为试验棚的叶长×叶宽显著高于对照棚：试验棚的高位叶、中位叶和低位叶（东、西两侧的平均值）分别达到了582.45、498.38和497.48 cm^2，分别比对照棚提高了19.9%、36.9%和43.2%，均达到了显著水平（p<0.05）。

2.7　散光膜对植株不同节位叶片叶绿素含量的影响

试验棚和对照棚植株不同节位叶片的叶绿素相对含量（以SPAD值表示）差异如图8所示。两者相比，植株东侧各节位叶片的SPAD值未表现出显著差异；西侧表现为高位叶在两者之间无显著差异，而

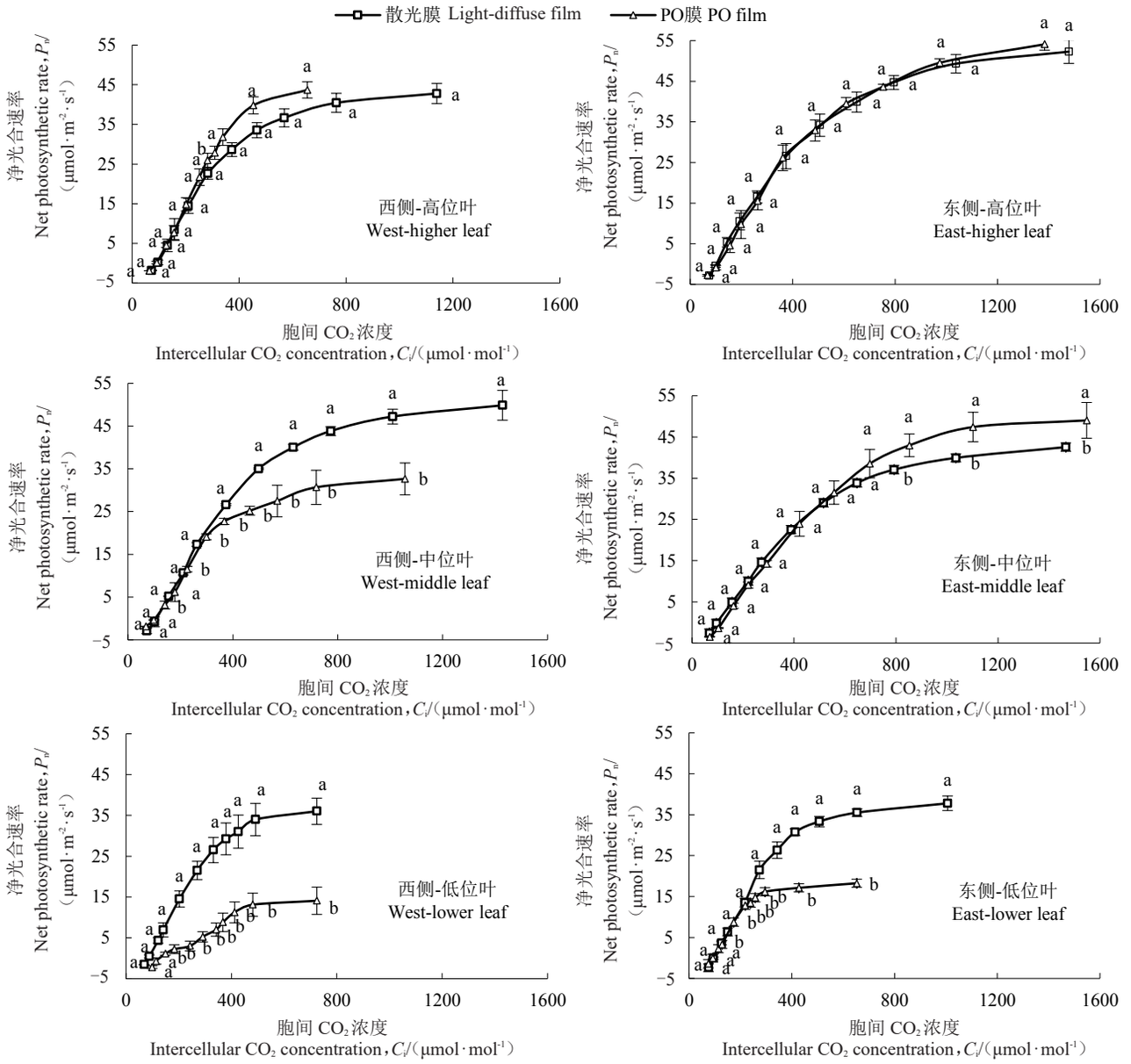

图 6 试验棚和对照棚内植株不同节位叶片的 CO_2 响应曲线差异

Fig. 6 Differences in CO_2 response curves of leaves at different node positions under light-diffusing film and PO film

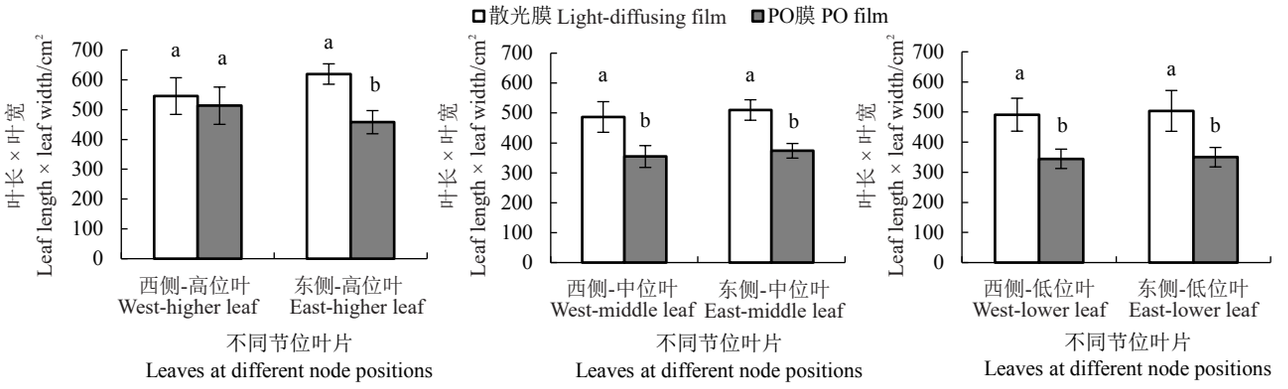

图 7 试验棚和对照棚内植株不同节位叶片叶长×叶宽的差异

Fig. 7 Differences in leaf length multiplied by leaf width of leaves at different node positions under light-diffusing film and PO film

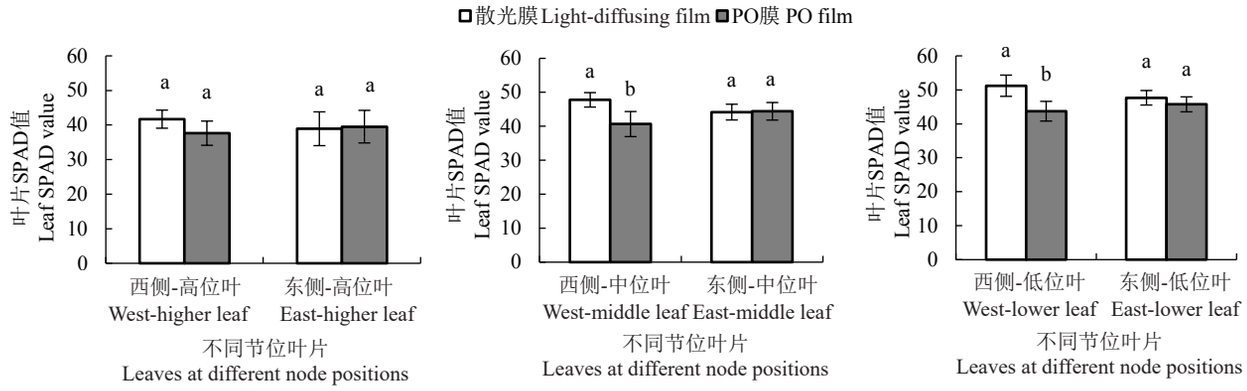

图 8　试验棚和对照棚内植株不同节位叶片的 SPAD 值差异

Fig. 8　Differences in SPAD value of leaves at different node positions under light-diffusing film and PO film

中位和低位叶则表现为试验棚显著高于对照棚。因此，综合各节位叶片的平均值来看，试验棚植株叶片的叶绿素相对含量仍显著高于对照棚。

2.8　散光膜对葡萄果实品质的影响

试验棚和对照棚的各果实品质指标差异如表 1 所示。东侧的单果质量表现为试验棚（8.56 g）显著高于对照棚（7.29 g），而西侧的单果质量在两个棚之间未表现出显著差异。东西两侧的果实果形指数（果实纵径/横径）在两个棚之间均未表现出显著差异。可溶性固形物含量在西侧表现为试验棚略高于对照棚，但未达到显著差异水平，而东侧试验棚显著高于对照棚，两侧的平均值由对照棚的 14.3%提高到试验棚的 15.1%（提高了 5.6%）。可溶性糖含量与可溶性固形物含量类似，但在东西两侧均表现出试验棚显著高于对照棚（两侧平均值提高了 55.0%）。维生素 C 含量也表现为东西两侧试验棚（两侧平均值为 0.210 mg · 100 g^{-1}）均显著高于对照棚（两侧平均值为 0.168 mg · 100 g^{-1}），提高了 25.0%。东西两侧的果实总酸度均表现为试验棚（0.775%）显著低于对照棚（0.872%），两侧平均降低了 11.1%。果实

表 1　试验棚和对照棚葡萄植株的果实品质差异

Table 1　Differences in fruit quality characters of grape plants under light-diffusing film and PO film

方位 Orientation	处理 Treatment	单果质量 Single fruit weight/g	果形指数 Fruit shape index	w（可溶性固形物）Soluble solids/%	w（维生素 C）Vitamin C/（mg · 100 g^{-1}）	w（可溶性糖）Soluble sugar/%	总酸度 Total acidity /%	w（全钙）Total calcium/（mg·kg^{-1}）	w（全钾）Total potassium/%	w（粗蛋白质）Crude protein/%
东侧 East	散光膜 Light-diffusing film	8.56± 0.42 a	1.14± 0.04 a	15.5± 0.49 a	0.17± 0.003 a	8.99± 0.77 a	0.76± 0.05 b	82.4± 8.5 a	0.17± 0.004 a	0.73± 0.028 a
	对照 PO film	7.29± 0.64 b	1.15± 0.03 a	14.2± 0.36 b	0.15± 0.008 b	5.59± 1.35 b	0.89± 0.01 a	63.0± 3.1 b	0.14± 0.002 b	0.53± 0.021 b
西侧 West	散光膜 Light-diffusing film	8.14± 0.77 a	1.15± 0.06 a	14.8± 0.19 a	0.25± 0.024 a	5.48± 0.88 a	0.79± 0.02 b	71.0± 5.4 a	0.15± 0.001 a	0.69± 0.012 a
	对照 PO film	7.56± 1.00 a	1.16± 0.05 a	14.5± 0.47 a	0.19± 0.018 b	3.75± 0.15 b	0.86± 0.03 a	71.2± 1.4 a	0.14± 0.007 b	0.66± 0.003 b

注：同列不同小写字母表示同一方位的散光膜和对照之间差异显著（$p<0.05$）。果形指数=果实纵径/果实横径。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at $p<0.05$ between the two films at the same orientation. The fruit shape index was calculated from the ratio of fruit vertical diameter to cross diameter.

全钙含量在西侧未表现出差异，而东侧为试验棚（82.42 mg · kg^{-1}）比对照棚（63.03 mg · kg^{-1}）提高 30.8%（$p<0.05$）。果实中的全钾含量在东西两侧均表现为试验棚显著高于对照棚，东西两侧分别提高了 19.7%和 10.8%。试验棚东西两侧果实中的粗蛋白质含量分别比对照棚提高了 38.2%和 4.6%，分别达到了极显著（$p<0.01$）和显著（$p<0.05$）差异水平。

3　讨　论

已有研究表明，在覆盖普通薄膜的温室内，植株由于相互遮挡，中下部叶片获得的光照度比顶部叶片大幅衰减而不能满足其生长需要；而覆盖散光

膜的温室内由于光照更加均匀，植株的中下部叶片接收的光强显著增加，光合有效辐射（*PAR*）比普通膜提高4.39%[16-17]。张泽锦等[18]对比研究了不同棚膜对设施光温条件和茄子生长的影响，结果表明散光膜和PEP（一种共挤压式3层复合膜）新膜下的光照度为露地的90%，而PEP旧膜的光照度仅有露地的60%；不同月份设施内温度从大到小依次为散光膜＞PEP新膜＞PEP旧膜＞露地；因此综合考虑光温环境，茄子生产中在早春利用设施进行保温提苗时，散光膜是较为理想的选择。孙士景等[19]在温室番茄作物上观察到，散光膜将室外的直射光转变为散射光后，到达植株根际的*PAR*显著增加，从而有助于提高植株中下部叶片的光合速率。笔者在本研究中进一步发现，散光膜覆盖下的棚内光强变化在垂直方向上的不同节位叶片之间表现出显著异质性：对于无遮挡的高位叶（离地高度1.60~1.70 m），散光膜内光照低于对照普通膜，光强日最大值比对照降低0.8%（东侧）~15.0%（西侧）；对于植株的中位叶（离地高度1.20~1.30 m），覆盖散光膜改善了其背光测（即上午植株西侧和下午植株东侧）的光照状况，光强显著提高；而对于低位叶（离地高度0.80~0.90 m），散光膜则显著改善了全天的受光状况，光强日平均值提高29.1%（东侧）~35.4%（西侧）。

笔者发现，植株不同节位叶片所处的异质性光环境会导致叶片光合特性出现显著差异，在P_n的日变化方面表现为：普通膜覆盖下的植株高位叶由于受到光照过强（日最大值高达6.10×10^4~6.79×10^4 lx）而在午间出现光抑制现象，且光抑制在下午无法解除，致使中午和下午的叶片P_n显著低于覆盖散光膜的植株；散光膜覆盖下植株中位叶背光侧的叶片P_n比普通膜覆盖下的植株显著提高；低位叶的叶片P_n则全天表现为散光膜覆盖下的植株高于普通膜，平均提高18.3%~59.8%（$p<0.05$）。许宝玉等[20]报道了散光膜大棚内相同部位的光合有效辐射量无论晴天还是阴天均高于普通膜大棚；散光膜大棚内栽培的小番茄叶片P_n、可溶性糖含量均高于普通膜大棚。还有研究表明，在散光膜覆盖的日光温室中，东西垄向与南北垄向的番茄冠层光照累积量、叶片P_n、叶面积指数、叶片SPAD值以及产量均无显著差异，即散光膜通过导致设施内光分布的均匀性而使不同的种植垄向对番茄生长未产生影响；因此在散光膜覆盖的日光温室中，可以采取用东西垄向替代传统南北垄向的种植方式进行生产，从而提高了农机具的作业效率[21]。

笔者在本研究中进一步证明了散光膜覆盖下植株叶片利用光强和CO_2的光合能力显著提高。植物叶片光系统Ⅱ（PSⅡ）的潜在量子效率（F_v/F_m）是衡量叶片光利用能力的重要指标[4]，散光膜覆盖下植株的东、西两侧以及低位叶、中位叶和高位叶的叶片F_v/F_m均显著高于普通膜覆盖下的植株。试验棚和对照棚相比，东、西两侧叶片饱和光强下的最大净光合速率P_{nmax}分别平均提高了2.2%和9.0%，叶片CO_2响应的最大净光合速率$P_{nmax,\ c}$则分别平均提高了30.2%（东侧）和68.7%（西侧）。

叶面积和叶绿素含量是叶片的两个重要质量特性，其中后者与叶绿素仪测定的SPAD值显著相关，因此可利用SPAD值间接反映作物叶片的叶绿素含量[22]。有研究表明，弱光环境使叶片光合能力下降，植株通过增大叶面积来捕获更多光能从而维持一定的光合产物水平[23]。而本研究结果显示，散光膜覆盖下植株不同节位叶片的外接矩形面积（即叶长×叶宽）均显著大于普通薄膜覆盖下的植株，且提高程度随着节位的降低而增大（从高到低分别提高19.9%、36.9%和43.2%），这与散光膜覆盖下的植株越靠近下部、光环境改善程度越大呈正相关。而此差异也同时反映在叶片SPAD值的变化规律上，表现为高位叶在处理和对照之间无显著差异，而中位叶和低位叶则表现为散光膜覆盖下的植株显著高于普通薄膜覆盖下的植株。因此，本研究结果表明了散光膜通过改善植株中下部的光环境不仅增强了叶片的光合碳同化能力，同时提高了叶片的质量指标（叶面积和叶绿素含量），从而使叶片的光合生产力和植株整体的生长状况得到显著改善。范冰琳等[24]在黄瓜上的研究也表明，在处理组的散光膜（雾度39.65%）覆盖下，植株叶片数、叶面积和地上部/地下部鲜质量均显著高于对照组的普通薄膜（雾度24.12%）；散射光对黄瓜顶部叶片SPAD值的影响不显著，但对于中部叶片的SPAD值，处理组显著高于对照组，表明散射光改善了冠层中部的光环境；而散射光对下部叶片SPAD值的提高在生长后期才逐渐显现。

关于覆盖散光膜对设施作物果实品质的影响，前人已有研究报道[25]。张泽锦等[18]研究发现，散光

膜覆盖下的茄子单果质量（0.25 kg）和结果数（214个•30株$^{-1}$）均显著高于PEP新膜（分别为0.23 kg和190个•30株$^{-1}$）和PEP旧膜（分别为0.20 kg和188个•30株$^{-1}$）。孙士景等[19]研究表明，与普通薄膜温室相比，散光膜温室中生长的番茄果实体积显著增大、平均单果质量增加7.71%，3穗果实的维生素C含量平均增加18.97%，可溶性固形物含量平均提高0.24个百分点。散光膜对葡萄不同品种的果实品质影响也已有研究报道。吴香仪等[26]报道了覆盖不同层数的散光膜对北冰红葡萄果实品质的影响，研究发现果实的果径、果质量、糖酸含量、糖酸比、抗坏血酸含量、蛋白质含量等指标均比无膜对照显著提高，且提高程度随铺设散光膜层数的增加而增加。刘杰等[17]研究表明，散光膜覆盖下的克瑞森葡萄糖度（16.0%）显著高于普通膜（14.7%）。本研究结果表明，除果形指数外，散光膜覆盖下的早黑宝葡萄植株各项果实品质指标均与普通膜下的植株差异显著：与普通膜相比，散光膜覆盖下葡萄的单果质量提高17.4%，果实中可溶性固形物含量由14.3%提高到15.1%，果实可溶性糖含量和维生素C含量分别提高55.0%和25.0%，而果实总酸度降低11.1%，果实中的全钙、全钾和粗蛋白质含量分别提高30.8%、15.3%和21.4%。

4　结　论

覆盖散光膜的大棚内，葡萄植株高位叶在正午不会发生光抑制，中部背光侧的叶片以及低位叶全天的光合速率显著提高；植株叶长×叶宽和叶绿素含量平均值显著增加；葡萄果实的糖度上升、酸度下降、果实营养元素含量增加。

参考文献 References：

[1] 麻玉龙，杨康，王聚恒，张怡，曾舒，黄晓枭，钟安澜 . PMMA对聚乙烯散光薄膜性能的影响[J]. 塑料工业，2021，49(7)：164-167.
MA Yulong，YANG Kang，WANG Juheng，ZHANG Yi，ZENG Shu，HUANG Xiaoxiao，ZHONG Anlan. Effect of PMMA on properties of polyethylene astigmatism film[J]. China Plastics Industry，2021，49(7)：164-167.

[2] LI T，HEUVELINK E，VAN NOORT F，KROMDIJK J，MARCELIS L F M. Responses of two *Anthurium* cultivars to high daily integrals of diffuse light[J]. Scientia Horticulturae，2014，179：306-313.

[3] LI T，KROMDIJK J，HEUVELINK E，VAN NOORT F R，KAISER E，MARCELIS L F M. Effects of diffuse light on radiation use efficiency of two *Anthurium* cultivars depend on the response of stomatal conductance to dynamic light intensity[J]. Frontiers in Plant Science，2016，7：56.

[4] MONTERO J I，ANTÓN A，HERNÁNDEZ J，CASTILLA N. Direct and diffuse light transmission of insect-proof screens and plastic films for cladding greenhouses[J]. Acta Horticulturae，2001，559：203-209.

[5] LI T，YANG Q C. Advantages of diffuse light for horticultural production and perspectives for further research[J]. Frontiers in Plant Science，2015，6：704.

[6] LI T，HEUVELINK E，DUECK T A，JANSE J，GORT G，MARCELIS L F M. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light：Quantifying the contributing factors[J]. Annals of Botany，2014，114(1)：145-156.

[7] HOVI T，NAKKILA J，TAHVONEN R. Interlighting improves production of year-round cucumber[J]. Scientia Horticulturae，2004，102(3)：283-294.

[8] RIGA P，BENEDICTO L. Effects of light-diffusing plastic film on lettuce production and quality attributes[J]. Spanish Journal of Agricultural Research，2017，15(1)：e0801.

[9] FARQUHAR G D，RODERICK M L. Pinatubo，diffuse light and the carbon cycle[J]. Science，2003，299(5615)：1997-1998.

[10] 王晓琳，李志强，姜闯道，石雷，邢全，刘立安 . 散射光和直射光对高粱叶片光合功能的影响[J]. 作物学报，2012，38(8)：1452-1459.
WANG Xiaolin，LI Zhiqiang，JIANG Chuangdao，SHI Lei，XING Quan，LIU Li’an. Effects of diffuse and direct light on photosynthetic function in sorghum leaf[J]. Acta Agronomica Sinica，2012，38(8)：1452-1459.

[11] URBAN O，JANOUŠ D，ACOSTA M，CZERNÝ R，MARKOVÁ I，NAVRÁTIL M，PAVELKA M，POKORNÝ R，ŠPRTOVÁ M，ZHANG R，ŠPUNDA V，GRACE J，MAREK M V. Ecophysiological controls over the net ecosystem exchange of mountain spruce stand. Comparison of the response in direct *vs*. diffuse solar radiation[J]. Global Change Biology，2007，13(1)：157-168.

[12] URBAN O，KLEM K，AČ A，HAVRÁNKOVÁ K，HOLIŠOVÁ P，NAVRÁTIL M，ZITOVÁ M，KOZLOVÁ K，RADEK P，ŠPRTOVÁ M，TOMÁŠKOVÁ I，ŠPUNDA V，GRACE J. Impact of clear and cloudy sky conditions on the vertical distribution of photosynthetic CO_2 uptake with in a spruce canopy[J]. Functional Ecology，2012，26：46-55.

[13] ZHENG L，ZHANG Q，ZHENG K X，ZHAO S M，WANG P Z，CHENG J Y，ZHANG X S，CHEN X W. Effects of diffuse light on microclimate of solar greenhouse，and photosynthesis and yield of greenhouse-grown tomatoes[J]. HortScience，2020，55(10)：1605-1613.

[14] HEMMING S，DUECK T A，JANSE J，VAN NOORT F R. The effect of diffuse light on crops[J]. Acta Horticulturae，2008，801：

1293-1300.

[15] KANG W H，ZHANG F，LEE J W，SON J E. Improvement of canopy light distribution，photosynthesis，and growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in plant factory conditions by using filters to diffuse light from LEDs[J]. Korean Journal of Horticultural Science & Technology，2016，34(1)：84-93.

[16] HEMMING S，BRAAK N J，DUECK T A，JONGSCHAAP R E E，MARISSEN A. Filtering natural light by the greenhouse covering using model simulations-more production and better plant quality by diffuse light[J]. Acta Horticulturae，2006，711：105-110.

[17] 刘杰，尹云霞，郑吉飞，付艳梅 . 漫散射薄膜在西南地区设施内的应用效果分析[J]. 农业工程技术，2021，41(22)：12-16.
LIU Jie，YIN Yunxia，ZHENG Jifei，FU Yanmei. Analysis on application of diffuse scattering film in facilities in southwest China[J]. Agricultural Engineering Technology，2021，41(22)：12-16.

[18] 张泽锦，王力明，雷晓葵，唐丽，黄阳 . 不同棚膜对四川盆地春季设施光温环境及茄子生长的影响[J]. 山西农业科学，2021，49(6)：725-728.
ZHANG Zejin，WANG Liming，LEI Xiaokui，TANG Li，HUANG Yang. Effects of different greenhouse films on light-temperature environment and eggplant growth under greenhouse condition during spring in Sichuan basin[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences，2021，49(6)：725-728.

[19] 孙士景，周清，范冰琳，赵淑梅，王平智，曲英华 . 散射光薄膜对番茄生长和果实品质的影响[J]. 中国蔬菜，2016(5)：22-26.
SUN Shijing，ZHOU Qing，FAN Binglin，ZHAO Shumei，WANG Pingzhi，QU Yinghua. Effect of diffuse light thin film on tomato growth and fruit quality[J]. China Vegetables，2016(5)：22-26.

[20] 许宝玉，赵淑梅，宋卫堂，董文其，张成浩 . 散射膜对设施环境与番茄栽培的影响[J]. 浙江农业科学，2019，60(6)：869-872.
XU Baoyu，ZHAO Shumei，SONG Weitang，DONG Wenqi，ZHANG Chenghao. Effect of diffuse light film on environment and tomato cultivation in facility[J]. Zhejiang Agricultural Science，2019，60(6)：869-872.

[21] 宋卫堂，李晨曦，孙旭光，王平智，赵淑梅 . 散射膜日光温室中种植垄向对番茄生长和产量的影响[J]. 农业工程学报，2017，33(24)：242-248.
SONG Weitang，LI Chenxi，SUN Xuguang，WANG Pingzhi，ZHAO Shumei. Effects of ridge direction on growth and yield of tomato in solar greenhouse with diffuse film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2017，33(24)：242-248.

[22] 王薇，宋廷宇，王艳，董晓涛，柴晶，薛英 . 番茄叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关性分析[J]. 北方园艺，2013(23)：12-15.
WANG Wei，SONG Tingyu，WANG Yan，DONG Xiaotao，CHAI Jing，XUE Ying. Correlation analysis on chlorophyll content and SPAD value in tomato leaves[J]. Northern Horticulture，2013(23)：12-15.

[23] 黄坚雄，潘剑，周立军，袁淑娜，林位夫 . 光照亏缺对橡胶-作物农林复合系统中作物生产力的影响[J]. 中国生态农业学报，2020，28(5)：680-689.
HUANG Jianxiong，PAN Jian，ZHOU Lijun，YUAN Shuna，LIN Weifu. Effect of light deficiency on productivity of intercrops in rubber-crop agroforestry system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2020，28(5)：680-689.

[24] 范冰琳，赵淑梅，孙士景，曲英华，周清，王平智 . 散射光薄膜下黄瓜生长性状的初步试验研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版)，2016，36(9)：633-638.
FAN Binglin，ZHAO Shumei，SUN Shijing，QU Yinghua，ZHOU Qing，WANG Pingzhi. Preliminary research on growth of cucumber under the diffuse light film[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Nature Science Edition)，2016，36(9)：633-638.

[25] RIGA P，BENEDICTO L，GIL-IZQUIERDO A，COLLADO-GONZÁLEZ J，FERRERES F，MEDINA S. Diffuse light affects the contents of vitamin C，phenolic compounds and free amino acids in lettuce plants[J]. Food Chemistry，2018，272：227-234.

[26] 吴香仪，韩玮，赵良锴 . 阴雨和伏旱天气覆膜对设施葡萄果实品质的影响[J]. 现代农业科技，2021(21)：61-64.
WU Xiangyi，HAN Wei，ZHAO Liangkai. Effects of film mulching on fruit quality of protected grape under cloudy，rainy and sunny drought weather[J]. Modern Agricultural Science and Technology，2021(21)：61-64.