

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 19 期 Vol.32 No.19 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 19 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颞的形态差异	方舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	谭向峰, 杜宁, 葛秀丽, 等 (5998)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	王莉雯, 卫亚星 (6006)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	张亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	吕晋慧, 王玄, 冯雁梦, 等 (6033)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	顾韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	张荣, 刘彤 (6056)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	李茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	秦华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
H ₂ O ₂ 参与 AM 真菌与烟草共生过程	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
北京山区防护林优势树种分布与环境的关系	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
旱直播条件下强弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	熊君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	黄林, 王峰, 周立江, 等 (6110)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	王树芹, 赖娟, 赵秀兰 (6128)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO ₂ 排放量的影响	张俊丽, 高明博, 温晚霞, 等 (6147)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	孙特生, 李波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于非, 王吟, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江鑫, 赛珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有 13 种, 其中有大白鹭、中白鹭、白鹭 (小白鹭)、黄嘴白鹭等, 体羽皆是全白, 世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽, 状若双辫, 肩和胸着生蓑羽, 冬季时蓑羽常全部脱落, 白鹭虹膜黄色, 嘴黑色, 脚部黑色, 趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边, 以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食, 好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期 3—7 月。繁殖时成群, 常和其他鹭类在一起, 雌雄均参加营巢, 次年常到旧巢处重新修葺使用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201109101327

吕晋慧,王玄,冯雁梦,李艳锋,赵红霞,王媛. 遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响. 生态学报, 2012, 32(19): 6033-6043.

Lv J H, Wang X, Feng Y M, Li Y F, Zhao H X, Wang Y. Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of *Trollius chinensis* Bunge. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6033-6043.

遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响

吕晋慧*, 王玄, 冯雁梦, 李艳锋, 赵红霞, 王媛

(山西农业大学林学院, 太谷 030801)

摘要: 以金莲花为材料, 系统研究了不同遮荫处理(全光照、40%、60%和80%遮荫)对金莲花叶片光合特性和叶解剖结构的影响, 为金莲花引种驯化和抚育管理提供理论依据。结果表明: 全光照下金莲花叶净光合速率有明显光合“午休”现象, 遮荫处理下“午休”现象不明显。其中, 40%遮荫处理显著促进了金莲花叶片净光合速率, 80%遮荫处理则起抑制作用; 40%和60%遮荫处理促进金莲花叶蒸腾速率和气孔导度的提高, 降低了蒸汽压亏缺, 有利于光合作用的进行; 80%遮荫处理下胞间 CO_2 浓度提高, 气孔限制值和蒸汽压亏缺均显著高于其它处理, 抑制了金莲花叶蒸腾作用和光合作用; 遮荫处理降低了金莲花叶光补偿点和暗呼吸速率, 40%和60%遮荫处理下表观量子效率和最大净光合速率提高, 说明金莲花有一定耐荫性; 金莲花叶光合特性与解剖结构关系密切。遮荫降低了金莲花叶气孔密度和气孔指数, 但气孔纵轴长和横轴长显著高于对照。40%和60%遮荫处理下, 单叶气孔数量没有明显变化; 遮荫下金莲花叶片增厚。栅栏组织厚度和细胞层数减少, 栅栏细胞宽度加大, 且第二层栅栏细胞有向海绵组织过度的趋势。海绵组织厚度增加, 栅栏组织/海绵组织比值减小。随遮荫度增高, 栅栏组织和海绵组织细胞间隙增大。该结构有利于提高对光能的利用效率; 遮荫处理促进维管束的发育, 维管束数量增加, 木质部、韧皮部分化明显, 其中中脉导管直径和导管数目增加, 有利于蒸腾作用和光合作用的进行。

关键词: 金莲花; 遮荫; 净光合速率; 蒸腾速率; 解剖结构

Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of *Trollius chinensis* Bunge

LV Jinhui*, WANG Xuan, FENG Yanmeng, LI Yanfeng, ZHAO Hongxia, WANG Yuan

College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

Abstract: Effect of different shading treatments (0, 40%, 60% and 80% shade) on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of *Trollius chinensis* Bunge was studied to provide some theoretical basis for introduction, domestication and cultivation of the species. The results showed that the significant midday depression of net photosynthetic rate at noon was observed for *T. chinensis* under the full sunlight treatment, while the depression was not significant under the shading treatments. The net photosynthetic rate increased at 40% shade but decreased at 80% shade. The transpiration rate and stomatal conductance increased while the vapor pressure deficit reduced at both 40% and 60% shade, which was helpful to photosynthesis. The stomata limitation, stomatal conductance and vapor pressure deficit were highest in the 80% shade treatment by comparison with other shade treatments, which suppressed net photosynthetic rate and transpiration rate of the plants. The fact that dark respiration and light compensation point declined in the shading treatments and that the 40% and 60% shading treatments resulted in increase of the apparent quantum efficiency and maximum net photosynthetic rate of the species indicated that *T. chinensis* had shade tolerance to some extent. The results also showed that there was a close

基金项目: 国家自然科学基金项目(30972021); 高等学校优秀青年学术带头人支持计划项目(201002); 山西农业大学科技创新基金(2008008)

收稿日期: 2011-09-10; **修订日期:** 2012-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lujinhui11@126.com

relation between the photosynthetic characteristics and anatomical structure of *T. chinensis*. Shading treatments resulted in decrease of stomatal density and stomatal index, while increased the stomatal size. The average number of stomata in a leaf did not significantly change at 40% and 60% shade treatments, however, the average size of stomata increased. Leaf thickness also increased. The thickness of palisade tissue and layers of palisade cells reduced, while the breadth of palisade tissue enlarged. In particular, a tendency of palisade tissue changing into spongy tissue was also observed. The thickness of spongy tissue increased and the ratio of palisade tissue to spongy tissue decreased. The gaps between the cells of both palisade tissue and spongy tissue became larger as the increase of shading degree. The above changes of the mesophyll tissue structure were helpful for *T. chinensis* to improve the utilization of luminous energy. The shading treatment was also able to promote the development of vascular bundle and increase the number of vascular bundle and significantly increased the differentiation of xylem and phloem. The number of catheter in midrib and the diameter of catheters in midrib increased, which was helpful to increase the net photosynthetic rate and transpiration rate.

Key Words: *Trollius chinensis*; shading; net photosynthetic rate; transpiration rate; anatomical structure

目前,园林绿化中存在过多使用 1、2 年生草花的现象,且相当数量的草花依赖进口。生产成本和养护成本高是大量使用 1、2 年生草花的主要弊病。原产我国的多年生草本植物以其高抗逆性、较强的观赏性和较低的生产成本和养护成本而引起人们注意,引种野生花卉对丰富园林植物资源和降低园林绿化成本有积极意义。

金莲花(*Trollius chinensis* Bunge)为毛茛科金莲花属多年生草本植物,内蒙古、河北、山西、河南、吉林和辽宁等地有分布,多野生于海拔 1000—2700 m 的山地草坡、溪边疏林下。其花色金黄,植株秀丽,是优良的花坛、花境和盆花材料。将金莲花引种到园林绿地中,对丰富园林景观、打破长期依赖 1、2 年生草花的现状等具有重要意义。然而,金莲花喜冷凉、湿润环境,引种地与金莲花野生地较大的生态因子差异,常导致引种驯化失败。高光照、高温和干旱等生态因子是金莲花引种驯化的主要限制因子。遮荫可以有效降低光照强度、气温、叶面温度和土壤温度,并提高土壤水分含量、空气湿度等^[1]。遮荫影响植物光合特性,如提高了茶树、绞股蓝等的净光合速率^[1-3],降低了崖柏等植物的光饱和点和光补偿点^[4]。遮荫也改变了植物叶解剖结构,叶角质层、表皮细胞、叶片厚度、栅栏组织和海绵组织等均发生相应变化^[5-8]。于 2007 年将金莲花引种到山西晋中地区全光照下栽培,金莲花叶呈黄绿色,常带焦灼现象,植株生长偏弱。因此,借鉴前人对不同植物遮荫处理的成功经验,就不同遮荫处理对金莲花光合特性和叶解剖结构等的影响进行研究,旨在明确不同遮荫处理下金莲花叶片解剖特征、气孔结构和光合特性的变化规律,探讨它们之间的关系,寻求适宜金莲花生长的最适遮荫度,为金莲花的引种驯化、抚育管理和园林应用提供理论支持和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于山西农业大学林学院实验苗圃。该地区位于黄土高原东部边缘,属暖温带大陆性气候。全年日照时数平均为 2530.8 h,年平均气温 8—10 ℃,7 月平均气温介于 21—26 ℃之间,极端最低气温-23.3 ℃,极端最高气温 38 ℃,年平均降雨量 437.4 mm。

1.2 试验材料与试验设计

供试材料为生长健壮、长势一致的 2 年生金莲花。试验于 2011 年 5 月 4 日开始用不同透光率的黑色遮荫网进行遮荫处理。遮荫棚南北向,高 2.5 m,宽 3.0 m,东、西遮荫网距地面 60 cm,南北敞开,便于通风透气。试验共设 4 个处理,遮荫度分别为 0% (全光照)、40%、60%、80%,其中全光照为对照,不同遮荫后的光合有效辐射见图 1。单因子随机区组设计,每处理 3 次重复,每重复 10 株金莲花,株行距 30 cm。不同处理间栽培管理技术一致。

选充分展开、叶位一致的成熟叶片为材料,挂牌标记,于 7.26—7.31 (最高气温 36.77 ℃,最低气温 26.85

℃,最高光照强度 $1975 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 进行光合参数等的测定。同时,进行叶片显微结构和气孔特性的观测。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 金莲花光合日变化和光响应曲线测定

自 7:00—18:00,每隔 1 h 用 LI-6400 型便携式光合测定仪测定 1 次(使用开放气路, CO_2 浓度为 $380 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)。测定光合参数有叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)、气孔限制值(L_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸汽压亏缺(V_{pdl})。其中气孔限制值 $L_s = 1 - C_i/C_a$, C_a 为空气中 CO_2 浓度, C_i 为胞间 CO_2 浓度。利用 LED 红蓝光源测定梯度光照强度下不同遮荫处理的

净光合速率,光强梯度分别为 0、20、50、100、150、300、400、500、800、1200、1600、2000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。于晴天 9:00—11:00 进行测定,测定前对叶片进行 15 min 光诱导($1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。采用非直角双曲线模型进行光响应曲线拟合^[9],并对光响应曲线的初始部分(0—150 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 进行直线回归,获得不同遮荫处理下的光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、暗呼吸速率(R_d)、最大净光合速率($P_{\max}$)和表观量子效率(AQY)。

1.3.2 金莲花叶片显微结构的观测

摘取叶片,于叶片中部沿中脉横切,切块约 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,用 FAA 固定,乙醇和二甲苯系列脱水,石蜡包埋,横切片厚度 $10 \mu\text{m}$,番红-固绿染色,中性树脂胶封片。于 OLYMPUS-BX61 显微镜下,选取典型视野照相,并用测微尺测量叶上表皮细胞厚度(UET)、下表皮细胞厚度(LET)、叶片总厚度(LT)、栅栏组织厚度(PT)、栅栏组织细胞长度(PL)、栅栏细胞宽度(PW)、海绵组织厚度(ST)、维管束数量、中脉导管数量、中脉导管直径等。

1.3.3 金莲花叶气孔特征的观测

指甲油印膜法将金莲花叶上、下表皮取下,制成临时切片。OLYMPUS-BX61 显微镜下观察,每切片随机观察 5—8 个视野,选取典型视野照相,统计单位视野内的气孔数量和表皮细胞数量,测量气孔大小,即保卫细胞纵轴长和横轴长^[10-11]。计算气孔密度、单片叶气孔数和气孔指数。单片叶气孔数=气孔密度×叶面积。气孔指数: $SI = SD / (SD + ED)$,其中 SI 为气孔指数, SD 为气孔密度, ED 为表皮细胞密度^[11]。

1.4 数据处理

试验结果以平均值±标准误表达,采用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析、Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 遮荫对金莲花光合特性的影响

2.1.1 遮荫对金莲花叶片净光合速率的影响

不同遮荫处理下金莲花叶净光合速率日变化趋势不同。由图 2 可以看出,全光照下呈双峰曲线,有明显光合“午休”现象,高温、高光照导致气孔关闭,进而引起光合“午休”。遮荫处理下则为不典型双峰曲线,第 2 峰值不明显,没有明显的光合午休现象。

随遮荫强度增高,最高净光合速率出现时间推迟,全光照、40%、60% 和 80% 遮荫处理下最高净光合速率出现时间依次为 8:00、9:00、10:00 和 13:00。从光合日变化中可以看出 7:00—9:00 时间段内全光照下净光合速率高于其它遮荫处理。此时,光照充足,空气湿度较高,气温较低,有利于金莲花叶片光合作用的进行,而遮荫处理下光照不足,导致净光合速率低于全光照。10:00—16:00 时间段内净光合速率依次为 40% 遮荫 > 60% 遮荫 > 全光照 > 80% 遮荫。遮荫降低了光照强度、气温和土壤温度,土壤湿度和空气湿度较高,多种因素共同作用促进了光合作用的进行。金莲花叶日平均净光合速率由高到低依次为 40% 遮荫处理 > 全光照和

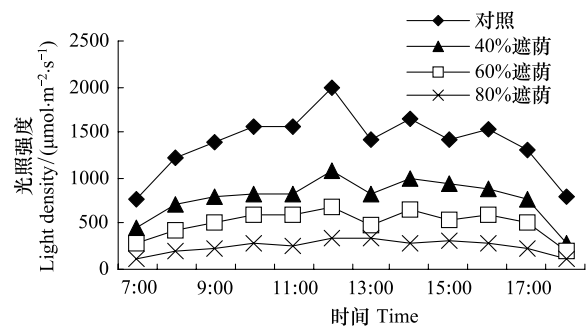


图 1 不同遮荫处理下光合有效辐射值

Fig. 1 Light density in different shade treatments

60% 处理 > 80% 遮荫处理, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。40% 遮荫处理显著促进了金莲花叶片净光合速率, 80% 遮荫处理则起抑制作用 (表 1)。

2.1.2 遮荫对蒸腾速率的影响

不同遮荫处理下叶片蒸腾速率日变化总体趋势是随时间推移持续上升, 直至 17:00 后迅速下降 (图 3)。40% 和 60% 遮荫处理显著提高了金莲花叶蒸腾速率 (表 1), 不同处理下日平均蒸腾速率由高到低依次为 40% 遮荫 > 60% 遮荫 > 全光照 > 80% 遮荫, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

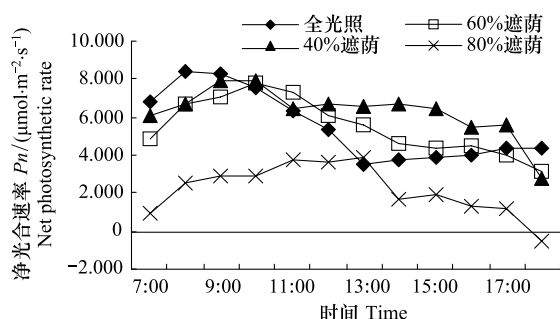


图2 遮荫对金莲花净光合速率日变化的影响

Fig. 2 The effects of shades on diurnal net photosynthetic rate of *Trollius chinensis*

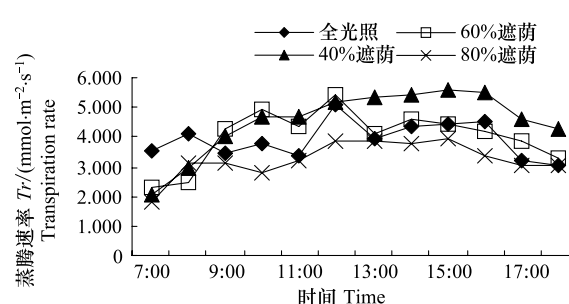


图3 遮荫对金莲花蒸腾速率日变化的影响

Fig. 3 The effects of shades on diurnal variations of transpiration rate in leaves of *Trollius chinensis*

全光照下蒸腾速率与净光合速率成负相关, 蒸腾速率低是导致净光合速率低的因素之一。遮荫条件下二者成正相关, 且随遮荫度增高, 相关系数增高 (表 2)。遮荫条件下蒸腾速率高有利于水分、矿质营养和碳水化合物等的运输, 进而促进了净光合速率的提高。

2.1.3 遮荫对气孔导度的影响

气孔导度大小可以反映 CO_2 和水汽交换能力的高低。不同处理下气孔导度变化规律基本一致。11:00 之前不同处理下, 叶片气孔导度值较高, 11:00 后维持在较低水平 (图 4)。日平均气孔导度由高到低分别为 40% 遮荫 > 60% 遮荫 > 全光照 > 80% 遮荫, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 40% 和 60% 遮荫处理显著提高了气孔导度 (表 1)。

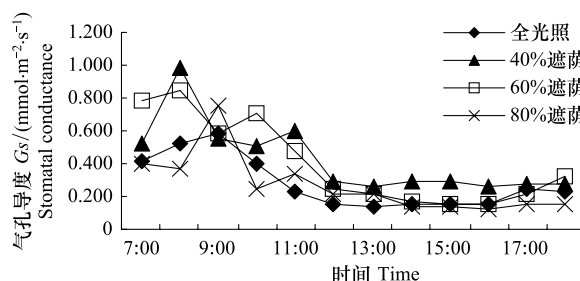


图4 遮荫对金莲花气孔导度日变化的影响

Fig. 4 The effects of shades on diurnal variations of stomatal conductance in leaves of *Trollius chinensis*

气孔导度与净光合速率成正相关。全光照和 60% 遮荫处理下, 气孔导度与净光合速率分别达极显著和显著正相关, 40% 和 80% 遮荫下未达显著相关 (表 2)。40% 和 80% 遮荫处理下气孔导度不是影响净光合速率的主要因素。刘月秋等也认为气孔导度与净光合速率没有显著相关性, 气孔导度不是净光合速率的制约因素^[3,12]。当光合速率和胞间 CO_2 浓度变化趋势相同, 且气孔限制值增大时, 光合速率的下降主要由气孔因素引起^[13]。气孔导度与蒸腾速率成负相关。原因是 12:00 后气温升高, 气孔导度维持在较低水平, 而蒸腾速率持续上升, 气孔导度和蒸腾速率变化趋势不同步, 导致二者呈负相关关系。

2.1.4 遮荫对金莲花气孔限制值的影响

不同处理下气孔限制值总体呈先升后降趋势。日平均气孔限制值依次为全光照 > 60% 遮荫 > 40% 遮荫 > 80% 遮荫, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$) (图 5)。

全光照下气孔限制值与净光合速率成显著负相关 (表 2), 高温高光照使部分气孔关闭或开张度减小, 气孔限制值增高, 增加了 CO_2 进入细胞的阻力, 光合速率降低。80% 遮荫下, 二者成极显著正相关, 原因是气孔限制值与净光合速率日变化趋势一致所致。

2.1.5 遮荫对胞间 CO₂ 浓度的影响

不同遮荫处理下胞间 CO₂ 浓度变化趋势相似,呈 U 形(图 6)。不同遮荫处理下胞间 CO₂ 浓度高低依次为 80% 遮荫>60% 遮荫>全光照>40% 遮荫,各处理间差异显著($P<0.05$)(表 1)。

全光照下,胞间 CO₂ 浓度与净光合速率成极显著正相关(表 2),胞间 CO₂ 浓度是制约净光合速率的主要因素。80% 遮荫处理下,二者成负相关。过度遮荫导致光合有效辐射显著减少,气孔导度低,CO₂ 同化率低,致使较多 CO₂ 滞留胞间,胞间 CO₂ 浓度增高。

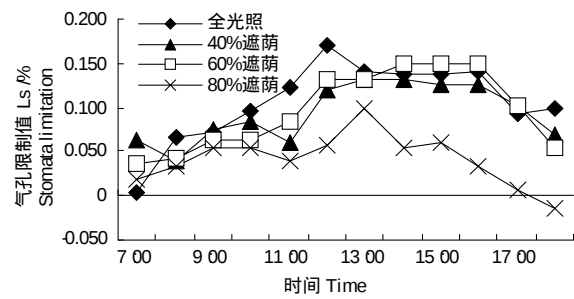


图 5 遮荫对金莲花气孔限制值的影响

Fig. 5 The effects of shades on Stomata limitation of *Trollius chinensis*

表 1 不同遮荫处理对金莲花叶光合特性的影响

Table 1 Effect of different shading treatments on the photosynthetic characteristics of *Trollius chinensis*

处理 Treatments	净光合速率 Net photosynthetic rate /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 transpiration rate /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 internal carbon dioxide concentration /($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$ 空气)	气孔限制值 Stomata limitation	蒸气压亏缺 the vapor pressure deficit /(kPa)
全光照	5.56±0.46b	3.90±0.15ab	0.35±0.04ab	404.69±7.66b	0.11±0.01a	1.68±0.10ab
40%	6.28±0.15a	4.50±0.17a	0.43±0.01a	403.14±3.40b	0.097±0.02ab	1.32±0.06c
60%	5.50±0.94b	4.10±0.24a	0.43±0.06a	409.92±2.01b	0.10±0.01a	1.47±0.04bc
80%	2.16±1.68c	3.37±0.26b	0.27±0.02b	438.28±13.49a	0.05±0.02b	1.77±0.11a

不同字母表示差异显著性($P<0.05$)

2.1.6 遮荫对金莲花叶片蒸汽压亏缺的影响

不同处理下,金莲花叶片蒸汽压亏缺趋势一致,自 7:00 叶片蒸汽压亏缺缓慢上升,11:00 后迅速上升,14:00—16:00 趋于平缓,16:00 后迅速下降。全光照下叶片蒸汽压亏缺最高峰出现在 12:00,遮荫处理下出现时间较晚(图 7)。叶片蒸汽压亏缺日平均值由小到大依次为 40% 遮荫<60% 遮荫<全光照<80% 遮荫,各处理间差异显著($P<0.05$)(表 1)。40% 和 60% 遮荫处理降低了光照强度和气温,有效提高了土壤含水量和空气湿度,进而降低了叶片蒸汽压亏缺,有利于光合作用的进行。

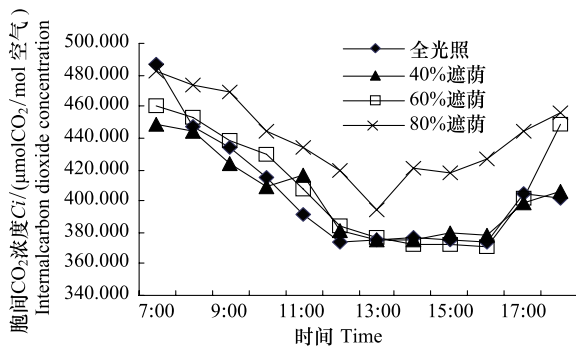


图 6 遮荫对金莲花叶胞间 CO₂ 浓度的影响

Fig. 6 The effects of shades on internal carbon dioxide concentration of *Trollius chinensis*

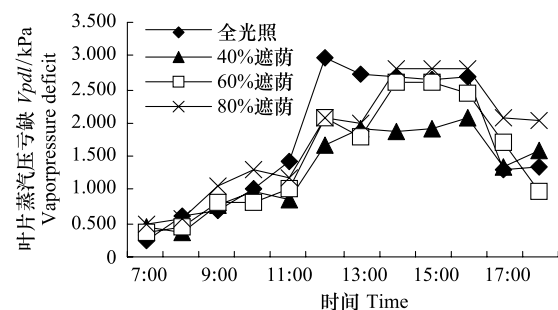


图 7 遮荫对金莲花叶片蒸汽压亏缺的影响

Fig. 7 The effects of shades on Vapor pressure deficit of *Trollius chinensis*

蒸汽压亏缺与净光合速率成负相关,其中全光照下达极显著水平(表 2)。Poorter 等认为植物蒸汽压亏缺可能比高温和高光照造成的光合“午休”对光合作用的影响还要明显^[14]。当蒸汽压亏缺增大时,植株大量失

水导致细胞水势下降,气孔下腔蒸汽不再饱和,蒸腾速率降低^[15],蒸腾速率的降低又影响矿质元素和水的吸收,进而影响光合作用的进行。同时,蒸腾速率降低使得光合产物输出变慢,产生反馈抑制,也降低了光合速率。

表 2 遮荫处理下金莲花叶光合参数间的相关性

Table 2 The correlation among photosynthetic parameter in leaves of <i>Trollius chinensis</i> at shading treatments						
处理 Treatments	蒸腾速率 T_r	气孔导度 G_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	气孔限制值 L_s	蒸汽压亏缺 V_{pdl}	
净光合速率 P_n	全光照	-0.245	0.926 **	0.732 **	-0.619 *	-0.782 **
	40%	0.012	0.367	0.086	0.061	-0.309
	60%	0.257	0.587 *	0.222	-0.315	-0.456
	80%	0.397	0.298	-0.403	0.790 **	-0.198
蒸腾速率 T_r	全光照	—	-0.413	-0.479	0.613 *	0.717 **
	40%	—	-0.684 *	-0.945 **	0.818 **	0.866 **
	60%	—	-0.543	-0.682 *	0.633 *	0.592 *
	80%	—	-0.371	-0.834 **	0.586 *	0.717 **

** 表示在 0.01 水平上显著相关,* 表示在 0.05 水平上显著相关

2.1.7 遮荫对光响应参数的影响

金莲花叶光合-光响应曲线如图 8 所示。在设定条件下,不同遮荫处理下的金莲花净光合速率对光合有效辐射的响应过程基本相似。随遮荫度加大,光补偿点和暗呼吸速率降低,差异达显著水平($P<0.05$) (表 3),说明金莲花对遮荫环境有较强适应能力。40% 和 60% 遮荫处理下,光饱和点、表观量子效率和最大净光合速率高于全光照下,说明金莲花对弱光的利用能力较强,适当遮荫下金莲花通过增加光能利用率,从而提高光合效率。

2.2 遮荫对金莲花叶解剖结构的影响

2.2.1 遮荫对金莲花叶片显微结构的影响

由图 9 可以看出,金莲花叶为两面叶,近轴面分化为栅栏组织,远轴面分化为海绵组织。遮荫处理下,金莲花叶片厚度增加,不同处理间差异显著($P<0.01$)。金莲花上、下表皮细胞均由单层细胞构成。全光照下表皮细胞大小相对一致,排列紧密。遮荫下表皮细胞凸透,一致性差,下表皮尤为明显(图 9,表 4)。遮荫处理极显著提高了上、下表皮细胞厚度,其中上表皮细胞较厚,下表皮细胞较薄,不同处理间差异显著($P<0.01$)。

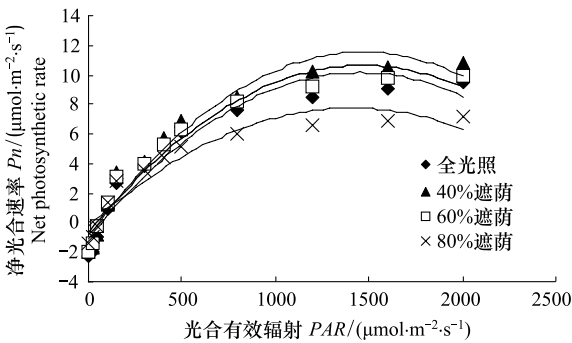


图 8 不同遮荫处理下金莲花叶光响应曲线
Fig. 8 Light response curve of photosynthesis in *Trollius chinensis* leaves under different shading treatments

表 3 不同遮荫处理对金莲花叶片光合生理参数的影响

处理 Treatments	光饱和点 Light Saturation /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光补偿点 Light Compensation /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	表观量子效率 Apparent quantum yield /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率 Dark Respiration /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
全光照	992.0±8.32 b	72.7900±2.39a	0.0347±0.01a	2.325±0.14a	11.304±0.674a
40% 遮荫	1084.0±19.73a	64.659±2.44b	0.0355±0.02a	2.025±0.13ab	12.366±0.89a
60% 遮荫	1008.0±21.96b	57.554±1.33bc	0.0354±0.02a	1.967±0.06ab	11.500±1.01a
80% 遮荫	780.0±10.41c	52.190±2.98c	0.0286±0.01b	1.357±0.05c	8.051±0.87b

不同字母表示差异显著性($P<0.05$)

不同遮荫处理影响了维管束的发育。遮荫处理显著促进了维管束的发育,维管束数量显著增加,韧皮部、

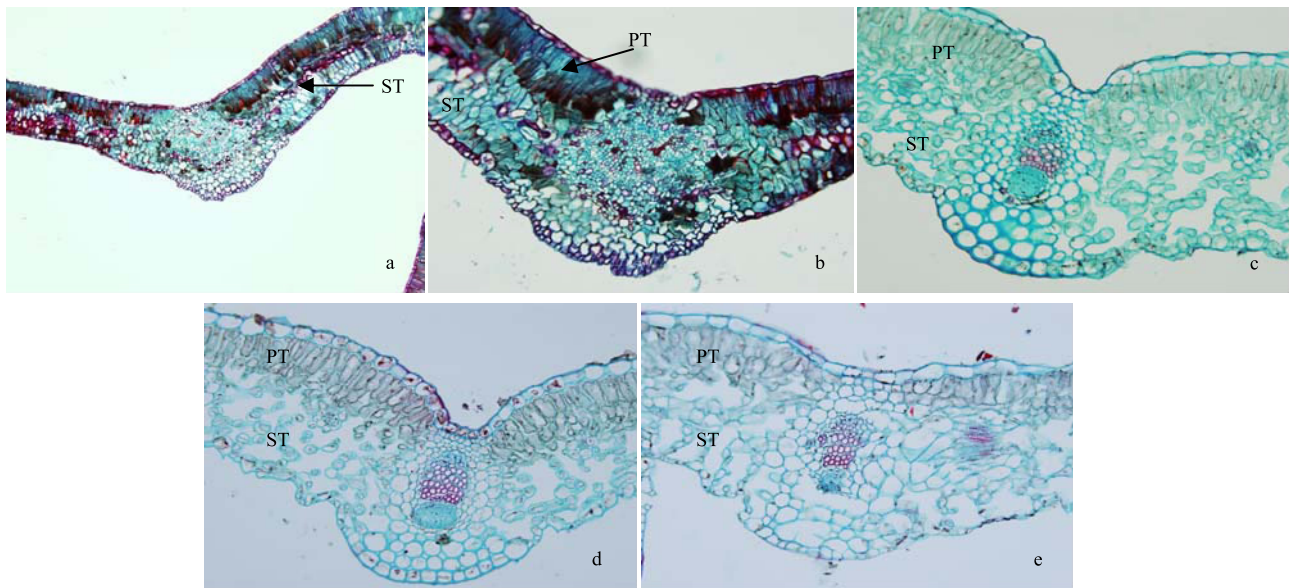


图 9 不同遮荫处理下金莲花叶横切面

Fig.9 The cross-section of *Trollius chinensis* leaf at different shading treatments

a:全光照下金莲花叶横切面(×10);b—e:分别为全光照、40%、60%和80%遮荫下叶片横切面(×20);PT:栅栏组织;ST:海绵组织

木质部分化明显,中脉导管数目和导管直径显著增加,且随遮荫度增加表现出先升后降趋势,不同处理间差异显著($P<0.01$)(图9,表4)。全光照下维管束韧皮部和木质部分化不明显,导管不规则分布于维管束薄壁细胞中,没有明显的韧皮部,木质部中脉导管数量和导管直径极显著小于遮荫处理(图9,表4)。

表 4 不同遮荫处理对金莲花叶片解剖结构的影响

Table 4 Effect of different shading treatments on anatomical structure of *Trollius chinensis* leaves

处理 Treatments	叶片厚度 Leaf thickness / μm	上表皮细胞厚度 Thickness of upper epidermis cell / μm	下表皮细胞厚度 Thickness of lower epidermis cell / μm	维管束 Number of vascular bundle/个	中脉导管数目 Number of vessel in midrib /个	中脉导管直径 Diameter of vessel in midrib / μm
全光照	273.93 $\pm$ 2.11C	12.78 $\pm$ 0.48B	14.28 $\pm$ 0.11C	16.33 $\pm$ 0.33C	17.67 $\pm$ 0.33C	10.66 $\pm$ 0.21C
40% 遮荫	393.79 $\pm$ 4.15A	28.42 $\pm$ 1.12A	23.27 $\pm$ 0.27A	23.50 $\pm$ 0.29B	53.50 $\pm$ 0.29A	16.10 $\pm$ 0.43A
60% 遮荫	357.39 $\pm$ 1.15B	32.53 $\pm$ 0.69A	17.48 $\pm$ 0.33B	29.67 $\pm$ 0.17A	51.33 $\pm$ 0.17A	13.38 $\pm$ 0.24B
80% 遮荫	369.35 $\pm$ 2.34B	29.43 $\pm$ 1.82A	13.79 $\pm$ 0.18C	24.33 $\pm$ 0.33B	25.55 $\pm$ 0.40B	13.53 $\pm$ 0.27B

不同字母表示差异显著性($P<0.01$)

遮荫影响了金莲花叶肉组织的分化。全光照下栅栏组织由3层柱状细胞组成,不同层栅栏细胞近等长、排列整齐、致密(图9)。栅栏组织排列紧密,有利于降低蒸腾失水,是植物对高光照和干旱的一种适应性表现,有利于提高植株抗旱能力^[16]。遮荫处理后栅栏组织由两层细胞组成,近轴面第1层栅栏细胞发达,为长柱状。80%遮荫处理下,该层栅栏组织有向海绵组织过度的趋势。不同遮荫处理显著影响了第1层栅栏细胞高度,其中,40%遮荫处理下细胞高度极显著高于其它处理。第2层栅栏细胞呈短柱形或不规则圆形,排列疏松,部分栅栏组织成海绵组织状,不同处理间差异显著($P<0.01$)。40%遮荫下栅栏组织厚度与全光照没有显著差异,60%和80%遮荫处理极显著降低了栅栏组织厚度(图9,表5)。栅栏细胞宽度增加,不同处理间差异显著($P<0.01$)。

全光照下海绵组织由3层细胞组成,远轴面由两层排列紧密的长形或长圆形细胞形成,第3层为圆形海绵组织。遮荫处理下海绵组织由排列疏松的不规则椭圆形或圆形细胞组成。遮荫处理增加了海绵组织厚度。随遮荫度增强,海绵细胞间隙增大(图9),栅栏组织/海绵组织比值减小,不同处理间差异达极显著水平(表5)。

表 5 不同遮荫处理对金莲花叶片解剖结构的影响

Table 5 The effect of anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> leaves under different shade light								
处理 Treatments	栅栏细胞密度 Palisade tissue density /(个/100μm)	栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness /μm	第 1 层栅栏 细胞高度 First layer of PT thickness /μm	第 2 层栅栏 细胞高度 Thickness of second layer of PT /μm	第 1 层栅栏 细胞宽度 Breadth of first layer of PT/μm	第 2 层栅栏 细胞宽度 Breadth of second layer of PT/μm	海绵组织厚度 Spongy tissue thickness /μm	PT/ST
全光照	15.83±0.17A	104.44±1.20A	48.47±1.15B	52.92±0.38A	9.74±0.36C	8.54±0.64D	104.58±1.04D	1.0±0.02A
40% 遮荫	8.50±0.5B	109.59±1.56A	75.04±1.87A	48.72±0.18B	16.88±0.22A	15.02±0.11A	193.52±2.78B	0.57±0.02B
60% 遮荫	8.50±0.29B	90.68±1.01B	52.12±0.58B	29.34±0.2C	16.33±0.21A	13.50±0.25B	204.42±1.46A	0.44±0.01C
80% 遮荫	9.00±0.0B	79.57±0.88C	47.08±1.68B	24.49±0.16D	14.00±0.31B	10.03±0.23C	170.82±2.63C	0.47±0.01C

不同字母表示差异显著性(P<0.01)

2.2.2 遮荫对金莲花叶气孔发育的影响

不同遮荫处理没有改变气孔分布的总体规律。金莲花气孔主要分布于叶片的远轴面,近轴面分布非常少,且气孔均突出于表皮细胞之上(图 10)。遮荫处理降低了金莲花叶片气孔密度和气孔指数,但 40% 和 60% 遮荫处理下单叶气孔数没有明显变化,80% 遮荫处理则极显著降低了单片叶气孔数(图 10,表 6)。遮荫处理下气孔纵轴长和横轴长分别显著和极显著高于全光照,不同遮荫处理间没有差别(表 6)。

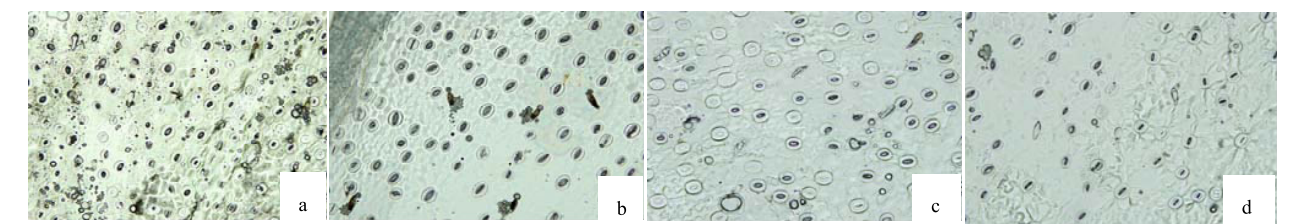


图 10 不同遮荫处理下金莲花叶气孔形态

Fig. 10 Somata of *Trollius chinensis* at different shading treatments

a 全光照,气孔;b 40% 遮荫,气孔;c 60% 遮荫,气孔;d 80% 遮荫,气孔(×20)

表 6 遮荫对金莲花叶气孔发育的影响

Table 6 Effect of shading on growth of stomata in leaves of <i>Trollius chinensis</i>					
处理 Treatments	气孔密度 /(个/mm ²) Stomatal density	纵轴长/μm Vertical axes of stomata	横轴长/μm Horizontal axes of stomata	单片叶气孔数/个 Numbers of stomata in per leaf	气孔指数 Stomatal index
全光照	9.81±0.11A	3.16±0.07b	3.25±0.17B	2.80×10 ⁴ ±78.74A	0.35±0.08a
40% 遮荫	5.55±0.19B	3.52±0.10a	4.12±0.16A	2.86×10 ⁴ ±108.77A	0.24±0.15b
60% 遮荫	5.44±0.201B	3.76±0.08a	3.93±0.28A	3.08×10 ⁴ ±113.31A	0.25±0.16b
80% 遮荫	3.97±0.96C	3.68±0.16a	4.11±0.29A	1.69×10 ⁴ ±87.77B	0.18±0.08c

同一列中大小写字母分别表示 1% 或 5% 水平下差异的显著性,相同字母表示差异不显著

3 结论与讨论

光是影响植物叶片形态、解剖结构和光合生理特性的重要生态因子,而植物叶片的形态、结构、光合生理功能和生长环境等密切相关^[5,17]。叶片是对环境变化较敏感且变异性 and 可塑性较大的器官^[18]。金莲花在不同光照强度选择压力下形成不同适应类型,其叶结构特征体现了外界生态因子的影响和植株对环境的适应性。遮荫处理后金莲花叶上、下表皮细胞形态凸透、体积增大。该变化有利于辐射光穿透叶表皮到达叶肉组织,增强叶片细胞对光的捕获能力^[19]。全光照下金莲花叶表皮细胞小,排列致密是对高光照和干旱的一种适应性调节。不同学者对遮荫后叶厚度变化报道不一。郝日明等报道遮荫处理后栅栏组织细胞和海绵组织细胞层数减少,排列疏松,叶片厚度变薄^[6,8,19]。游文娟认为在低光强下,耐荫性越强的植物叶片厚度下降幅度

越明显,海绵组织相对更发达,栅栏组织/海绵组织的比值也越小,而红花檵木、紫叶小檗等的叶片厚度呈增大趋势^[5]。遮荫处理后金莲花叶片厚度增加,随遮荫度增加,叶片厚度表现出先增后降的趋势。董如磊认为白辛树叶片厚度在 50% 遮荫处理下增大,之后随遮荫度增加而逐渐降低^[19],支持本文研究结果。叶片厚度增加,促进叶片吸收更多的光,弥补遮荫造成的光照强度减弱的缺陷,提高叶片的光能利用率^[19]。同时,也增强了叶储水能力^[18],促进叶蒸腾作用,也可防止蒸腾作用造成蒸汽压亏缺降低而影响光合作用。遮荫处理后金莲花叶栅栏组织厚度降低、海绵组织厚度增加,部分栅栏组织向海绵组织过度,是植物利用弱光条件的一种适应性表现。海绵组织细胞增多,有利于减少光量子的透射损失,提高叶片在弱光下的光能利用率^[19]。随着遮荫度增强,栅栏细胞、海绵细胞间隙加大,栅栏细胞高度显著降低,栅栏细胞宽度显著增加,该结构可在叶肉内产生大量的散射光,提高叶绿体对光的吸收能力,是植物对弱光条件的适应^[20]。近方形栅栏细胞也可以提高近轴面和侧面叶绿体分布的密度,增加受光面积。海绵组织与栅栏组织分化程度也反映植物生长环境的水分状态^[18,21]。杨九艳认为同种锦鸡儿中,随干旱程度的增加,栅栏组织/海绵组织比值增加、近轴面第一层栅栏组织密度增加^[22]。全光照下金莲花栅栏组织、海绵组织细胞层数多、排列致密,说明高温、高光照下金莲花处于相对干旱状态,高度发达的栅栏组织是金莲花对于旱和高光照环境的适应性调节。遮荫处理下,栅栏组织/海绵组织比值减小,说明遮荫有利于土壤含水量保持在较高水平,植株水分供应充足,是金莲花保持较高蒸腾速率和光合速率的前提。

遮荫促进金莲花维管束发育。全光照下,高光照和高温等生态因子影响了维管束的发育。维管束的发育状况与水分及溶解于水中的碳水化合物和矿物质等的运转效率有关系。维管束数量越多、导管直径越大,导管数目越多,水分运送效率越高^[16,18]。遮荫下金莲花发达的维管束有效促进了蒸腾作用,也有利于碳水化合物的运输,进而促进净光合速率的提高。

气孔是植物叶片与外界气体交换和水分散失的主要通道,是影响植物光合和蒸腾作用的因素之一。植物依所处环境的生态因子的变化而调节气孔分布、气孔密度、气孔大小、气孔导度等,使植物在损失水分较少的条件下获取最多的 CO_2 。前人研究认为:植物在全光照下的气孔密度高于遮荫条件下^[5,7,23],气孔密度增加是植物对旱生环境的适应,气孔密度低是植物对湿生环境的适应^[22],支持本文研究结果。40% 和 60% 遮荫下,金莲花通过增加光合叶面积来弥补遮荫导致的气孔密度降低带来的不利因素,是金莲花对遮荫环境的一种适应性表现。全光照下气温高、土壤水分含量低,金莲花气孔密度大,但气孔小,气孔导度低,气孔限制值高,蒸腾作用减弱,减少了蒸腾失水量,但不利于光合作用的进行。适度遮荫提高了气孔导度,降低了气孔限制值, CO_2 和水蒸气进出气孔阻力小,有利于光合速率的提高。有研究认为气孔指数受湿度而不是光强的影响^[24]。遮荫处理下金莲花叶气孔指数降低,但有关生态因子对气孔指数的调节机理尚不清楚。

金莲花叶光合特性与解剖结构关系密切。不同植物长期对生态环境的适应使其对光照的需求不同。表观量子效率是光合作用中光能转化效率的一种量度,反映叶片在弱光情况下的光合能力^[25]。表观量子效率越大,植物吸收与转换光能的色素蛋白复合体可能越多,利用弱光能力越强^[26]。40% 和 60% 遮荫下表观量子效率较高,说明金莲花对适度遮荫有一定的耐受性。植物在适生环境下,表观量子效率为 0.03—0.05^[4]。80% 遮荫下,表观量子效率低于 0.03,说明 80% 条件下光合有效辐射低,超过了金莲花的耐受性,光能利用率低。光饱和点和光补偿点反映了植物对光照的需求,在一定程度上还能反映植物的耐荫性。其中,光饱和点反映植物利用强光的能力,光饱和点越高说明植物利用强光的能力越强。蒋高明等研究认为荫生植物的光饱和点和点为 500—1000 或更低^[27]。本研究除 80% 遮荫处理外,其它处理下光饱和点在 992—1084 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。光补偿点常用来判断植物利用弱光的能力。阳生植物光补偿点一般在 50—100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 阴生植物根据其耐荫性不同而不同。全光照下金莲花光补偿点为 72.79 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随遮荫程度加大,光补偿点下降。根据光饱和点和光补偿点可推断金莲花属于阳性耐荫草本,董然也报道多毛蹄叶橐吾为阳性耐荫植物^[28]。金莲花需光性介于强阳性和强荫性植物之间。全光照下金莲花叶片黄化,叶维管束发育受到一定影响,说明光照强度过高对金莲花叶结构有一定影响,也有可能产生了光抑制。40% 和 60% 遮荫处理降低了光

照强度和气温,有效改善了土壤水分含量,促进了金莲花叶气孔开张和维管束发育,气孔限制值、蒸汽压亏降低,缓解了高温、高光照对金莲花光合生理过程的抑制作用,提高了金莲花对光能的利用率,叶净光合速率较高。80%遮荫下光合有效辐射显著减少,超过了金莲花对弱光的耐受性,抑制了金莲花叶蒸腾速率和净光合速率等。综上,40%遮荫处理有利于提高金莲花叶光合功能,其次是60%遮荫处理,80%遮荫则起抑制作用。

References:

- [1] Xiao R L, Wang J R, Shan W X, Li X H, Song T Q, Tang Yu. Tea plantation environment and quality under different degrees of shading. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6): 6-11.
- [2] Liu S B, Hu Z H. Effects of shading treatment on the leaf morphology, structure and photosynthetic characteristics of *Gynostemma pentaphyllum*. Journal of Wuhan Botanical Research, 2004, 22(4): 339-344.
- [3] Huang C L, Wu Z M, Yao Y K, Xu X N. Photosynthetic characteristics of *Gynostemma pentaphyllum* under shade. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2099-2103.
- [4] Liu J F, Yang W J, Jiang Z P, Guo Q S, Jin J Q, Xue L. Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of the endangered plant *Thuja sutchuenensis*. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 5999-6004.
- [5] You W J, Zhang Q F, Xia L. Responses of leaf structure of urban greening plants to different light conditions. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(5): 22-25.
- [6] Hao R M, Li X Z, Hu J L. Leaf structural change of *Cyclobalanopsis multinervis* and *Michelia foveolata* after shaded treatment. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(6): 1083-1088.
- [7] Cai Z Q, Qi X, Cao K F. Response of stomatal characteristics and its plasticity to different light intensities in leaves of seven tropical woody seedlings. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 201-204.
- [8] Yang X H, Chen C R, Shi P. Effects of shading on the anatomical structure of cotton leaf and stem. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2000, 31(4): 373-377.
- [9] Zhang W F, Fan D Y, Xie Z Q, Jiang X H. The seasonal photosynthetic responses of seedlings of the endangered plant *Cathaya argyrophylla* to different growth light environments. Biodiversity Science, 2005, 13(5): 387-397.
- [10] Chen L Q, Li C S, Chaloner W G, Beerling D J, Sun Q G, Collinson M E, Mitchell P L. Assessing the potential for the stomatal characters of extant and fossil Ginkgo leaves to signal atmospheric CO₂ change. American Journal of Botany, 2001, 88(7): 1309-1315.
- [11] Sui X L, Mao S L, Wang L H, Li W, Zhang B X, Zhang Z X. Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light in leaves of *capsicum* seedlings. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(2): 195-208.
- [12] Liu Y Q, Sun X Y, Wang Y, Liu Y. Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Urtica dioica*. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3457-3464.
- [13] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.
- [14] Poorter H. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. Plant Ecology, 1993, 104-105(1): 77-97.
- [15] Li X W, Chen S L. Effect of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Fritillaria cirrhosa*. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3438-3446.
- [16] Yang C, Liang Z S. Foliar anatomical structures and ecological adaptabilities of dominant *Artemisia* species of early sere of succession on arable old land after being abandoned in Loess Hilly Region. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4732-4738.
- [17] Zhang X W, Zhang X P, Yang K J, Zhang Z X. Study on anatomical structure of leaf and ecological adaptability of *Pteroclis tartarinowii* maxim. Bulletin of Botanical Research, 2007, 27(1): 38-42.
- [18] Hu Y, Chu H J, Li J Q. Response of leaf anatomy characteristics and its plasticity to different soil-water conditions of *Medicago ruthenica* in four populations. Plant Science Journal, 2011, 29(2): 218-225.
- [19] Dong R L, Yu F Y, Ouyang X. Effects of shading treatments on leaf morphology and anatomical structure of *Styrax tonkinensis* seedlings. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2010, 32(5): 974-981.
- [20] Cai Y L, Song Y C. Adaptive ecology of lianas in Tiantong evergreen broad-leaved forest, Zhejiang, China I. leaf anatomical characters. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(1): 90-98.
- [21] Chang Z Y, Zhang M L. Anatomical structures of young stems and leaves of some *caragana* species with their ecological adaptabilities. Bulletin of

Botanical Research, 1997, 17(1): 65-71.

- [22] Yang J Y, Yang J, Yang M B, Kong W X, Liang N. Leaf anatomical structures and ecological adaptabilities of 8 *Caragana Species* on ordos plateau. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(3): 175-179.
- [23] Meng L, Chen W F, Li L X, Xu Z J, Liu L X, Sun J W. Influence of low light on stomatal characters in rice leaves. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(2): 87-89.
- [24] Tichá I. Photosynthetic characteristics during ontogenesis of leaves. 7. Stomata density and sizes. Photosynthetica, 1982, 16: 375-381.
- [25] Wang J H, Ren S F, Shi B S, Liu B X, Zhou Y L. Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Forsythia suspense*. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(7): 1811-1817.
- [26] Richardson A D, Berlyn G P. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mt. Mansfield, Vermont, USA. American Journal of Botany, 2002, 89(1): 88-94.
- [27] Jiang G M. Plant Ecophysiology. Beijing: Higher Education Press, 2004: 65-68, 161-169.
- [28] Dong R, Wang Y, Zhao G Y, Zhang S. Diurnal change of photosynthetic characteristics and response to light intensity of five *Ligularia*. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2011, 31(9): 49-54.

参考文献:

- [1] 肖润林, 王久荣, 单武雄, 黎星辉, 宋同清, 汤宇. 不同遮荫水平对茶树光合环境及茶叶品质的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 6-11.
- [2] 刘世彪, 胡正海. 遮荫处理对绞股蓝叶形态结构及光合特性的影响. 武汉植物学研究, 2004, 22(4): 339-344.
- [3] 黄成林, 吴泽民, 姚永康, 徐小牛. 遮荫条件下绞股蓝光合作用特点的研究. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2099-2103.
- [4] 刘建锋, 杨文娟, 江泽平, 郭泉水, 金江群, 薛亮. 遮荫对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响. 生态学报, 2011, 31(20): 5999-6004.
- [5] 游文娟, 张庆费, 夏楠. 城市绿化植物叶片结构对光强的响应. 西北林学院学报, 2008, 23(5): 22-25.
- [6] 郝日明, 李晓征, 胡金良. 遮荫处理下多脉青冈和金叶含笑叶解剖结构变化研究. 西北植物学报, 2005, 25(6): 1083-1088.
- [7] 蔡志全, 齐欣, 曹坤芳. 七种热带雨林树苗叶片气孔特征及其可塑性对不同光照强度的响应. 应用生态学报, 2004, 15(2): 201-204.
- [8] 杨兴洪, 陈翠容, 施培. 遮荫对棉花茎叶解剖结构的影响. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2000, 31(4): 373-377.
- [9] 张旺锋, 樊大勇, 谢宗强, 蒋晓晖. 濒危植物银杉幼树对生长光强的季节性光合响应. 生物多样性, 2005, 13(5): 387-397.
- [11] 睦晓蕾, 毛胜利, 王立浩, 李伟, 张宝玺, 张振贤. 辣椒幼苗叶片解剖特征及光合特性对弱光的响应. 园艺学报, 2009, 36(2): 195-208.
- [12] 刘悦秋, 孙向阳, 王勇, 刘音. 遮荫对异株荨麻光合特性和荧光参数的影响. 生态学报, 2007, 27(8): 3457-3464.
- [15] 李西文, 陈士林. 遮荫下高原濒危药用植物川贝母 (*Fritillaria cirrhosa*) 光合作用和叶绿素荧光特征. 生态学报, 2008, 28(7): 3438-3446.
- [16] 杨超, 梁宗锁. 陕北撂荒地上优势蒿类叶片解剖结构及其生态适应性. 生态学报, 2008, 28(10): 4732-4738.
- [17] 张兴旺, 张小平, 杨开军, 张中信. 珍稀植物青檀叶的解剖结构及其生态适应性特征. 植物研究, 2007, 27(1): 38-42.
- [18] 胡营, 楚海家, 李建强. 4个花苜蓿居群叶片解剖结构特征及其可塑性对不同水分处理的响应. 植物科学学报, 2011, 29(2): 218-225.
- [19] 董如磊, 喻方圆, 欧阳献. 遮荫对东京野茉莉幼苗叶片形态和解剖结构的影响. 江西农业大学学报, 2010, 32(5): 974-981.
- [20] 蔡永立, 宋永昌. 浙江天童常绿阔叶林藤本植物的适应生态学 I. 叶片解剖特征的比较. 植物生态学报, 2001, 25(1): 90-98.
- [21] 常朝阳, 张明理. 锦鸡儿属植物幼茎及叶的解剖结构及其生态适应性. 木本植物研究, 1997, 17(1): 65-71.
- [22] 杨九艳, 杨劼, 杨明博, 孔维雪, 梁娜. 鄂尔多斯高原锦鸡儿属植物叶的解剖结构及其生态适应性. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 175-179.
- [23] 孟雷, 陈温福, 李磊鑫, 徐正进, 刘丽霞, 孙静文. 减弱光照强度对水稻叶片气孔性状的影响. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(2): 87-89.
- [25] 王建华, 任士福, 史宝胜, 刘炳响, 周玉丽. 遮荫对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响. 生态学报, 2011, 31(7): 1811-1817.
- [27] 蒋高明. 植物生理生态学. 北京: 高等教育出版社, 2004: 65-68, 161-169.
- [28] 董然, 王莹, 赵国禹, 张爽. 长白山 5 种橐吾光合生理日变化及光响应特征研究. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(9): 49-54.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 19 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	5943
..... ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)	
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	5953
..... YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)	
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	5962
..... YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)	
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	5972
..... GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)	
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	5986
..... FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)	
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	5998
..... TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)	
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	6006
..... WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)	
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	6016
..... ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)	
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	6023
..... HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)	
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	6033
..... LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)	
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from sedge and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	6044
..... GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)	
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	6056
..... ZHANG Rong, LIU Tong (6056)	
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	6067
..... LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)	
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	6076
..... QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)	
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	6085
..... LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)	
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	6092
..... SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)	
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	6100
..... XIONG Jun, LIN Huifeng, LI Zhenfang, et al (6100)	
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	6110
..... HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)	
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	6120
..... ZHAN Lijie, GUO Liye, NING Tangyuan, et al (6120)	
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	6128
..... WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)	
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	6138
..... ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)	
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	6147
..... ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)	
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	6155
..... SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)	
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	6168
..... KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)	
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	6176
..... WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)	
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	6187
..... TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)	
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	6195
..... LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)	
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	6203
..... YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)	
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	6210
..... PU Xinming, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)	
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	6223
..... PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)	
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	6233
..... DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)	
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	6242
..... JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)	
Advances in ecological immunology	6251
..... XU Deli, WANG Dehua (6251)	
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	6259
..... SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)	
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	6270
..... LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)	

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元