



文章编号: 1000-4025(2012)11-2321-07

天山西部野杏光合作用日变化特征 与其生理生态因子的关系

白志强¹, 毛培利², 刘 华^{3*}, 刘 端¹, 韩燕梁¹, 郭仲军¹

(1 新疆林业科学研究院森林生态研究所, 乌鲁木齐 830002; 2 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东烟台 264003; 3 安徽农业大学 林学与园林学院, 合肥 230036)

摘 要: 在新疆天山西部伊犁野果林资源发展研究中心的野杏林选定野生成年杏树为样株, 用 Li-6400 光合仪测定晴天和阴天两种天气状况下野杏的光合生理生态特性, 并通过相关分析、通径分析、回归分析探讨其净光合速率与生理生态因子的关系。结果显示: (1) 野杏的最大净光合速率(P_{nmax})和光饱和点(LSP)分别为 12.63 和 1389.44 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 属喜光的阳生树种。(2) 晴天和多云天气下野杏的净光合速率(P_n)日变化最大值和日均值之间差异不显著, 晴天 P_n 日变化为单峰型, 而多云为双峰型, 具典型的“午休”现象, 而且是由非气孔限制因素造成, 与叶温(T_l)的降低有关。(3) 野杏气孔导度(G_s)与 P_n 和蒸腾速率(T_r)呈显著正相关; 随着其 T_l 的增加, 晴天 P_n 、 G_s 和 T_r 为单峰形; 多云 P_n 和 T_r 呈线性增加, 而 G_s 呈线性降低; T_l 增加超过最适值后 G_s 的降低是晴天野杏产生严重光抑制的重要原因; 气孔的快速关闭降低了 T_r , 造成 T_l 增加和 P_n 降低, 在最大程度上控制了水分丢失。(4) 晴天和多云天气下影响野杏叶片 P_n 日变化主导生理因子均为 G_s , 主要限制因子为胞间 CO_2 浓度(C_i); 主导生态因子为空气相对湿度(RH), 限制因子为气温(T_a)。研究表明, 野杏能够适应高光强环境条件, 这是野杏主要分布在较为干旱阳坡上的重要原因之一; 多云天气条件对野杏进行光合作用的抑制程度较弱, 这为野杏种群天然更新环境条件的人工调节提供一定的理论依据。

关键词: 野杏; 光合速率; 生理生态适应性

中图分类号: Q945.79 文献标志码: A

Armeniaca vulgaris Diurnal Variation of Photosynthesis and Relationship with the Eco-physiological Factors in the West of Tianshan Mountains

BAI Zhi-qiang¹, MAO Pei-li², LIU Hua^{3*}, LIU Duan¹, HAN Yan-liang¹, GUO Zhong-jun¹

(1 Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830002, China; 2 Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Science, Yantai, Shandong 264003, China; 3 School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: *Armeniaca vulgaris* Lam. is the most important constructive species of wild fruit forests in the Tianshan Mountains, Northwest China. Our objective was to clarify the existence status and photosynthetic characteristics of *A. vulgaris* and the relationships between wild fruit forest and some eco-physiological factors. Saplings of *A. vulgaris* were selected at the Center for Research and Development of Wild-Fruit Forest Resources, Yili Kazak Autonomous Prefecture, Xinjiang Province, China. And the response of photosynthetic rate to photosynthetic effective radiation, diurnal change of photosynthetic rate and eco-physiology factors, were analyzed *in situ* by Li-6400 Portable Photosynthesis Analysis System under natural conditions. Relative analysis, path coefficient analysis and stepwise regression equation were used to discuss how related factors influenced diurnal changes of photosynthetic rate. The results showed that: (1) The maxi-

① 收稿日期: 2012-06-14; 修改稿收到日期: 2012-10-05

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费项目(200704016)

作者简介: 白志强(1963-), 男, 高级工程师, 主要从事森林生态及生物多样性保育方面的研究。E-mail: bai1963@163.com

* 通信作者: 刘 华, 副教授, 主要从事森林生态及生物多样性保育方面的研究。E-mail: liuhuanmg@126.com

mum net photosynthetic rate (P_{nmax}) and light compensation point (LSP) were 12.63 and 1389.44 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. It is a heliophilous plant. (2) Diurnal change of P_n showed a unimodal curve in sunny days. But the diurnal change of P_n showed a bimodal curve in cloudy days, and there was obvious midday depression of photosynthesis, because of the non-stomata limitation, which indicated the degree of photoinhibition reduced in cloudy days. (3) The reduction of photoinhibition was caused by the decrease of leaf temperature (T_l). Stomatal conductance was positive correlation with both P_n and transpiration rate (T_r). With the increase of T_l , P_n , G_s and T_r exhibited a unimodal curve in sunny days. However, in cloudy days, P_n and T_r was positive correlation with T_l , whereas G_s was negative with T_l . The decrease of G_s due to T_l exceeding the optimal value was an important reason for the appearance of severe photoinhibition in sunny days. The decrease of T_r by closing stomata quickly controlled the lose of water to the utmost extent, in spite of leading to the increase of T_l and decrease of P_n , which was one of the important physiological characteristics for *A. vulgaris* to distribute the arid adret. (4) The main physiological factor affecting the characteristic of P_n of *A. vulgaris* was G_s , C_i was the main limiting factor; and the main ecological factor was RH, T_a was the limiting factor both in sunny days and cloudy days. The results indicated that *A. vulgaris* adapt to high-light's capability, it is a heliophilous plant, and the photosynthesis were no visible inhibition in cloudy days, while the environmental conditions under forest crown artificial accommodated to suit the self-restoration of *A. vulgaris* population.

Key words: *Armeniaca vulgaris* Lam.; photosynthesis; eco-physiological adaptability

新疆地域辽阔、自然条件复杂,孕育了丰富的植物资源。该区域属于极端干燥的内陆性干旱气候,植物生存环境十分严酷和脆弱。但许多生态系统类型或生态地段至今仍较好地保持着近原始状态,具有重要的科研价值,一旦破坏,则很难恢复^[1]。分布在新疆天山西部伊犁谷地的野果林是世界多种果树的起源地^[2]、特殊的阔叶林森林生态系统类型^[3]和中国生物多样性特殊地区之一^[4],已被列为中国优先保护生态系统名录。由于不合理开发目前尚保存的面积仅为1959年调查时的70%~80%^[5]。对新疆野果林的研究,主要集中在群落组成^[2,6-7]、土壤特性^[8-9]和遗传多样性^[10-12]等方面,对建群种的生理生态适应性研究还未见报道。

新疆野果林乔木层主要由新疆野苹果 [*Malus sieversii* (Ldb.) Roem]、野杏 (*Armeniaca vulgaris* Lam.) 和野核桃 (*Juglans regia* L.) 等组成,其中野杏是重要的建群种。野杏具有很强的耐干旱和耐贫瘠能力,适应能力强。在草原化的阳坡上,野杏与新疆野苹果常组成混交林;但在稠密的新疆野苹果林内,野杏很少存在,仅分布在疏林中或林缘;野杏也可在一些情况下形成纯林^[13],但是目前对它的生理生态适应性却知之甚少。最近的研究表明,植物在不同天气状况下有着不同的光合生理适应方式,这与外界环境因子的剧烈变化密切相关^[14-16]。植物对不同环境因子的适应特性对森林群落的组成和分布有着重要影响^[17]。本试验以新疆野果林的重要建群种野杏为研究对象,从光合生理角度分析其生态适应

性,了解其种群恢复与环境因子的关系,为野杏种群及其野果林生态系统的研究与保护提供依据。

1 研究区概况

中国天山野果林集中分布于新疆维吾尔自治区伊犁州境内 (E80°31'~84°00'; N42°40'~44°30') 的海拔1100~1600 m间的前山地带,气候温和,年降水量可达510 mm,前山冬季的“逆温层”又使它免遭冻害。野杏多分布于海拔950~1400 m的沟谷与山脊,株高4~6 m,林分郁闭度为0.3左右。林下灌木有忍冬 (*Lonicera tatarica*)、兔儿条 (*Spiraea hypericifolia*)、天山卫茅 (*Euonymus semenovii*)、蔷薇 (*Rosa acicularis*) 等,草本有大羊茅 (*Festuca gigantea*)、牛至 (*Origanum vulgare*)、千叶蓍 (*Achillea millefolium*)、雀麦 (*Bromus benekenii*)、荅草 (*Koeleria cristata*) 等。

本试验在新源县伊犁野果林资源发展研究中心的野杏林中进行。该研究中心位于新疆伊犁河谷东部,气候湿润,冬暖夏凉。年平均气温7.7℃,1月平均气温-8.1℃,7月平均气温20.4℃,年降水量580 mm,≥10℃有效积温3006.3℃,日照时数2674.5 h,土壤为山地黑棕色土,有机质含量12%~14%。

2 研究方法

2.1 样株选择

通过野外踏查,选择树高接近的野生成年野杏为样株。由于野杏经常在地径处形成多个分株或在

树干 1.3 m 以下形成多个分枝,不利于胸径测量。因此,试验以树高为标准,选择平均树高为 5.9 m 的野杏 5 株,在每株中上部选定 3 片健康功能性阳生叶,通过用绳子将枝条拉至适宜测量的高度进行各项指标测量。

2.2 光响应曲线的测定

在每一样株中上部选择 1 片功能性叶片,在光合作用饱和光强下诱导 30 min,利用 Li-6400 红蓝光光源测定野杏叶片的光响应曲线。根据温度-光合速率曲线结果将测量时叶室温度设定为 30℃,外界 CO₂ 浓度 360~380 μmol·mol⁻¹,光量子通量密度 (PPFD) 梯度为 2 000、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、100、75、50、25、0 μmol·m⁻²·s⁻¹,每一光强下停留 200 s。拟合 P_n-PPFD 的曲线方程,求得光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP),并计算最大净光合速率(P_{nmax})、表观量子效率(AQY)、暗呼吸速率(R_d)。

2.3 环境因子及光合生理指标测定

在生长季(7月)的上、中和下旬,分别选择晴朗(SD)和多云(CD)天气状况各 1 d,于 8:00~20:00,用 Li-6400 测定 PPFD、气温(T_a)、大气相对湿度(RH)、环境 CO₂ 浓度(C_a)等环境因子,以及野杏叶片的净光合速率(P_n)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、叶温(T_l)等光合生理指标,测定时间间隔 2 h,共测定 6 d。再按以下公式计算气孔限制值(L_s)和水分利用效率(WUE)。

$$L_s = 1 - C_i/C_a \quad (1)$$

$$WUE = P_n/T_r \quad (2)$$

2.4 数据处理

采用 Excel、SPSS 13.0 和 DPS 软件分析检验野杏光合生理指标差异性及其净光合速率与生理生态因子的关系。

3 结果与分析

3.1 野杏叶片光合-光响应特征

随着光量子通量密度的增加,野杏叶片的 P_n 先直线增加,然后缓慢增加直至达到最大值,出现光饱和现象(图 1)。其中,根据光响应曲线计算 P_{nmax} 为(12.63±3.54) μmol·m⁻²·s⁻¹,AQY 为(0.044±0.003) μmol·μmol⁻¹,R_d 为-(2.08±0.99) μmol·m⁻²·s⁻¹,LCP 和 LSP 分别为(47.27±18.24) μmol·m⁻²·s⁻¹和(1 389.44±88.61) μmol·m⁻²·s⁻¹。较低的 AQY 和较高的 LCP 值表明野杏为喜光树种,但从其 P_{nmax} 和 LSP 值的大

小又表明其适应高光照强度的阈值在阳生植物的下限范围。这说明野杏对高光强有一定的适应性。

3.2 研究区环境因子日变化动态特征

由于新疆地处高纬度地带,日照时数较中国内地长,其光合有效辐射的日变化在晴天和多云天气

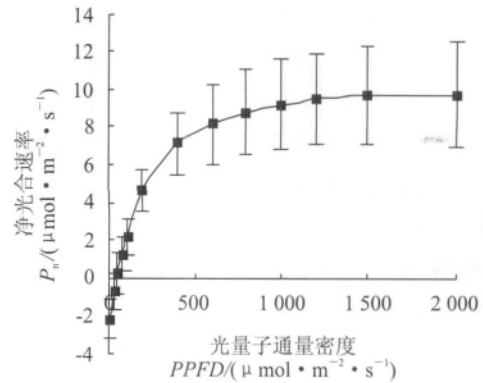


图 1 野杏的光响应曲线

Fig. 1 Light response curve of *A. vulgaris*

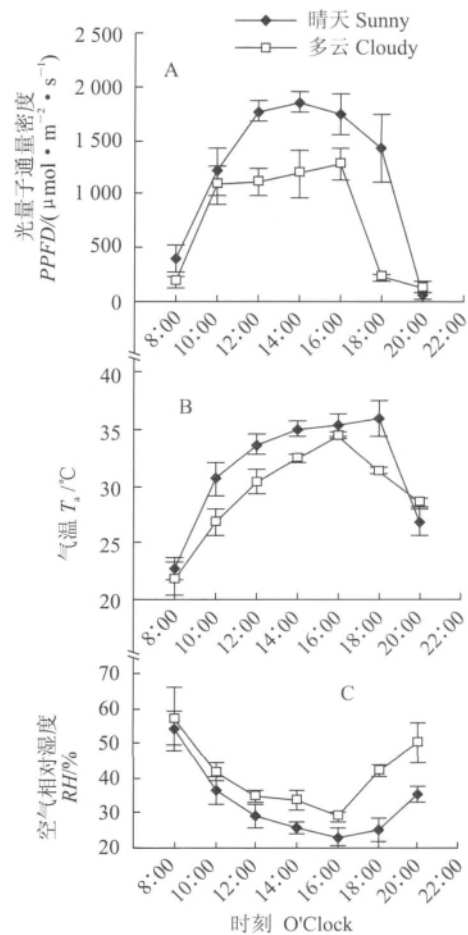


图 2 光子通量密度、气温、空气相对湿度在晴天、多云天气下的日变化

Fig. 2 Diurnal changes of photon flux density (PPFD), atmosphere temperature (T_a) and relative humidity (RH) in sunny and cloudy day

下均为单峰曲线,峰值分别出现在 14:00 和 16:00,其值分别为 $1\ 858.19$ 和 $1\ 277.63\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,多云天气是晴天的 68.76%;而且多云天气光合有效辐射在 10:00~16:00 变化幅度小于晴天(图 2,A)。环境气温日变化也为单峰曲线,晴天和多云天气时峰值分别出现在 18:00 和 16:00,最大值分别为 35.92°C 和 34.36°C (图 2,B)。晴天和多云天气的环境空气相对湿度日变化为山谷型,最小值均出现在 16:00,其值分别为 22.88% 和 28.85%(图 2,C)。总之,晴天的光合有效辐射和空气温度高于多云天气,而空气相对湿度低于多云天气。

3.3 野杏叶片光合参数日变化动态特征

图 3,A~F 显示,在晴天天气条件下,野杏叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 和 L_s 的日变化曲线均为单峰型, P_n 、 T_r 和 G_s 均在 10:00 达到峰值,而 L_s 在 16:00 最大; C_i 日变化为“U”形曲线,最低值出现在 16:00。多云天气条件野杏叶片的 P_n 和 T_r 日变化曲线均为双峰型,峰值分别出现在 12:00 和 16:00;其 G_s 、 L_s 和 C_i 的日变化趋势与晴天的一致。从 12:00~16:00 时段内,野杏 P_n 和 C_i 逐渐降低, L_s 逐渐增加,表明 P_n 的降低主要是由于 G_s 的降低引起;与晴天相比,多

云天气野杏叶片 P_n 、 T_r 和 G_s 的变化不显著, C_i 增加显著, L_s 降低极显著(表 1)。而较高的 C_i 和较低的 L_s 说明 P_n 受气孔限制程度减少。晴天和多云天气条件下 T_l 与 T_a 的日变化趋势一致。

在晴天和多云天气下,野杏叶片 WUE 的日变化呈线性下降的趋势,日最高值均出现在 8:00(图 4)。其中,晴天的 WUE 在 10:00 迅速下降,且在 10:00~18:00 时段内,基本维持在 2.34 左右的水平,18:00 后又迅速降低。多云天气的 WUE 在 10:00~16:00 时段内为缓慢下降,18:00 降到最低且到 20:00 仍维持在该水平。

3.4 野杏叶片净光合速率与生理生态指标的关系

3.4.1 净光合速率与生理因子的关系 野杏净光合速率与生理因子通径分析结果(表 2,表 3)表明:晴天和多云天气条件下,各生理因子对净光合速率直接通径系数的大小依次均为 $G_s > T_l > T_r > C_i$;尽管 G_s 通过 C_i 、 T_r 和 T_l 对 P_n 的间接作用均为负值,但直接作用(0.926/0.788)均要大于这些间接作用,故对 G_s 与 P_n 的极显著正相关关系没有产生影响($r_{SD}=0.924$, $r_{CD}=0.924$, $P<0.01$); T_r 对 P_n 的直接作用较大,但 G_s 的负间接作用没有掩盖 T_r 与 P_n

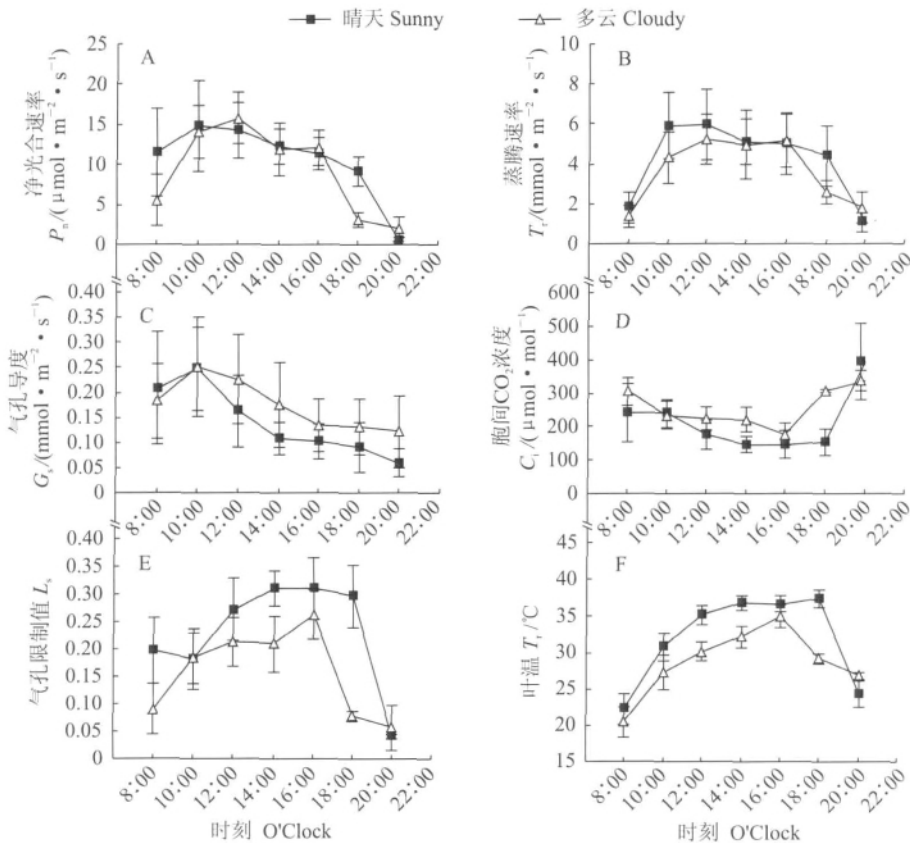


图 3 野杏光合生理指标在晴天和多云天气的日变化

Fig. 3 Diurnal changes of photosynthetic indexes of *A. vulgaris* in sunny and cloudy day

呈正相关关系。晴天天气条件下生理因子的决策系数顺序为 $R^2(G_s) > R^2(T_r) > R^2(C_i) > R^2(T_1)$,多云天气条件下生理因子的决策系数顺序为 $R^2(G_s) > R^2(T_r) > R^2(T_1) > R^2(C_i)$ 。所以,影响野杏 P_n 日变化规律的决定性生理因子为 G_s 和 T_r ,其中 G_s 为主导因子, C_i 为限制因子。

3.4.2 净光合速率与生态因子的关系 表 3 和表 4 显示,在晴天和多云天气条件下, RH 的变化对野杏 P_n 的影响显著($P < 0.05$),而 C_a 与 P_n 呈正相关关系;但晴天的 $PPFD$ 和 T_a 均与 P_n 呈负相关性,多云的 $PPFD$ 和 T_a 均与 P_n 呈正相关性。晴天和多云天气下各生态因子对 P_n 的直接通径系数大小排序均为 $RH > T_a > PPFD > C_a$ 。各环境因子在 2 种天气条件下相互作用, RH 正向的直接作用远大于其对 $PPFD$ 、 C_a 和 T_a 的负向间接作用,故表现为其与 P_n 呈显著的正相关性($r_{SD} = 0.608$, $r_{SD} = 0.553$, $P < 0.05$);虽然 C_a 的直接作用和其对 $PPFD$ 和 T_a 的间接作用均在负向值,但由于 C_a 通过 RH 产生较大的正向值使其与 P_n 的关系仍呈正

相关。由于 $PPFD$ 和 T_a 均与 RH 存在较大的负向间接作用,从而导致晴天的 $PPFD$ 和 T_a 与 P_n 呈负相关,而多云天气的 $PPFD$ 和 T_a 与 P_n 呈正相关。但 2 种天气下的生态因子的决策系数顺序为 $R^2(RH) > R^2(PPFD) > R^2(C_a) > R^2(T_a)$ 。所以,影响野杏 P_n 日变化规律的决定性生态因子为 RH 和 $PPFD$,其中 RH 为主导因子。

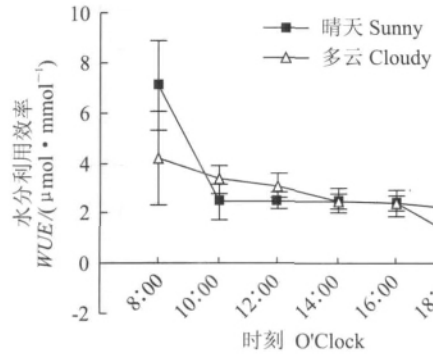


图 4 野杏水分利用效率在晴天和多云天气的日变化
Fig. 4 Diurnal changes of WUE of *A. vulgaris* in sunny and cloudy day

表 1 不同天气下野杏立地环境因子及其光合气体交换参数最大值和平均值

Table 1 Maximum and mean value of photosynthetic parameters and environmental factors of *A. vulgaris* in sunny and cloudy day

| 天气 Weather condition | | $PPFD$ | T_a | RH | P_n | T_r | G_s | C_i | WUE | L_s | T_1 |
|-------------------------|-----------|----------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|-------|--------|-------|
| 最大值 Maximum | 晴天 Sunny | 1 817.39 | 31.91 | 34.94 | 21.97 | 7.24 | 0.30 | 215.83* | 8.84 | 0.65 | 39.16 |
| | 多云 Cloudy | 894.07** | 29.42 | 44.54* | 20.84 | 6.78 | 0.42 | 182.89 | 7.16 | 0.83** | 37.48 |
| 平均值 Mean value | 晴天 Sunny | 1 210.22 | 31.46 | 30.88 | 16.38 | 5.43 | 0.26 | 180.83 | 4.16 | 0.53 | 36.44 |
| | 多云 Cloudy | 733.97** | 28.78 | 40.4* | 14.72 | 5.55 | 0.25 | 157.03* | 5.10 | 0.60** | 34.85 |

注: * 和 ** 分别表示天气之间在 0.05 和 0.01 水平存在显著性差异;下同。

Note: * and ** show significant difference between different weather conditions at 0.05 and 0.01 level, respectively; The same as below.

表 2 净光合速率和生理因子的通径系数(晴天/多云)

Table 2 Path coefficients between P_n and physiological factors in sunny and cloudy day

| 生理因子 Physiological factor | 直接通径系数 Direct effect | 间接通径系数 Indirect effect | | | | 决策系数 R^2_j Decision coefficient |
|------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------------|
| | | T_r | G_s | C_i | T_1 | |
| T_r | 0.156/0.148 | | -0.424/0.385 | 0.301/0.248 | 0.008/0.003 | 0.038/0.029 |
| G_s | 0.926/0.788 | -0.029/-0.023 | | -0.206/-0.139 | -0.007/-0.003 | 0.887/0.563 |
| C_i | 0.033/-0.105 | -0.032/-0.011 | 0.253/0.186 | | -0.010/-0.012 | 0.024/-0.047 |
| T_1 | 0.104/0.098 | 0.061/0.033 | -0.583/-0.355 | 0.287/0.257 | | -0.013/-0.002 |

表 3 净光合速率与生理生态因子的相关系数(晴天/多云)

Table 3 Correlation coefficients between P_n and eco-physiological factors in sunny and cloudy day

| 天气 Weather condition | 生理因子 Physiological factor | | | | 生态因子 Ecological factor | | | |
|-------------------------|---------------------------|---------|--------|--------|------------------------|-------|--------|--------|
| | T_r | G_s | C_i | T_1 | $PPFD$ | C_a | T_a | RH |
| 晴天 Sunny | 0.355 | 0.924** | -0.201 | -0.201 | -0.445 | 0.322 | -0.510 | 0.608* |
| 多云 Cloudy | 0.119 | 0.766** | -0.113 | 0.196 | 0.362 | 0.247 | 0.141 | 0.553* |

表 4 净光合速率和生态因子的通径系数(晴天/多云)

Table 4 Path coefficients between P_n and ecological factors in sunny and cloudy day

| 生态因子 Ecological factor | 直接通径系数 Direct effect | 间接通径系数 Indirect effect | | | 决策系数 R_{ij}^2 Decision coefficient | |
|------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|---------------|--|---------------|
| | | PPFD | C_a | T_a | | RH |
| PPFD | 0.553/0.482 | | 0.224/0.185 | 0.601/0.528 | -0.998/-0.603 | -0.034/-0.019 |
| C_a | -0.137/-0.201 | -0.009/-0.013 | | -0.426/-0.339 | 0.965/0.751 | -0.147/-0.086 |
| T_a | 0.586/0.520 | 0.028/0.017 | 0.325/0.218 | | -1.010/-0.733 | -0.624/-0.407 |
| RH | 1.214/1.098 | -0.076/-0.043 | -0.303/-0.156 | -0.487/-0.325 | | 0.113/0.004 |

表 5 野杏光合生理指标与环境因子间的回归方程

Table 5 Regression equations P_n , G_s , T_r and PPFD in sunny and cloudy day, respectively

| 回归方程 Regression equation | | R^2 | P |
|---|---|-------------|------------|
| 晴天 Sunny | 多云 Cloudy | | |
| $P_n = 51.172G_s + 4.227$ | $P_n = 34.202G_s + 3.610$ | 0.556/0.292 | $P < 0.01$ |
| $T_r = 19.439G_s + 1.921$ | $T_r = 11.14G_s + 1.677$ | 0.486/0.284 | $P < 0.01$ |
| $P_n = -0.117T_1^2 + 7.401T_1 - 102.54$ | $P_n = 0.436 T_1 - 2.059$ | 0.407/0.123 | $P < 0.01$ |
| $G_s = -0.002T_1^2 + 0.118T_1 - 1.528$ | $G_s = 0.005 T_1 + 0.344$ | 0.354/0.075 | $P < 0.01$ |
| $T_r = -0.043T_1^2 + 2.802T_1 - 39.816$ | $T_r = 0.247 T_1 - 3.119$ | 0.508/0.360 | $P < 0.01$ |
| $P_n = 0.004PPFD^2 + 0.019PPFD + 1.009$ | $P_n = 0.001PPFD^2 + 0.021PPFD + 0.795$ | 0.574/0.687 | $P < 0.01$ |

另外,在晴天和多云天气条件下野杏的 P_n 和 T_r 均与 G_s 存在线性相关关系,说明气孔的开张是进行光合和蒸腾的决定因素; P_n 、 G_s 和 T_r 在晴天与多云天气下对叶温的响应特征明显不同(表 5)。

4 讨论

光合特征值体现植物光能利用的基本参数,表明野杏对光照条件的需求。野杏的光饱和点、光补偿点、最大净光合速率、表观量子效率等光合特征值表明其为喜光树种,但适应高光照强度的阈值在阳生植物的下限范围。因此,在野杏天然林更新抚育的过程中,可通过对上层树木树冠的整枝或择伐抚育方式来改变林下光照环境,为野杏林下幼苗天然更新提供充足的环境条件。

植物的光合作用明显受到外界环境因子变化的影响及其反馈调节机制是植物生理生态研究的重要内容。与晴天相比,多云时光量子通量密度、气温降低,空气相对湿度有所增加,这与其它研究结果一致^[16-20]。虽然多云时光量子通量密度明显降低,其日最大值仅为晴天时的 68.76%,但晴天与多云下净光合速率日最大值和日均值差异不显著以及净光合速率与光量子通量密度的回归曲线接近,说明在一定范围内光量子通量的变化对净光合速率没有显著影响。这与陆地上植物一般在光强达到全光的 1/2 或 1/3 时,光合作用就已经达到最大^[21]的结论一致。但不同的植物对环境因子变化的适应方式不

完全一样,如热带雨林冠层植物 *Luehea seemannii*, 雨季时云量增加使得其净光合速率低于晴天^[15];泥炭地桦树的净光合速率在多云天气条件下提高^[14]。

多云下光强的降低没有引起野杏净光合速率的降低,但却造成了空气温度降低,湿度增加。在日变化过程中,随着光量子通量密度的增加,使得气温和叶温增加,空气湿度降低,造成叶片周围的饱和蒸气压差增加,引起叶片蒸腾速率增加^[20]。当快速的水分丢失超出了植物耐受范围后就会关闭气孔^[22-24]。随着叶温的增加,晴天下的气孔导度和蒸腾速率为单峰形,这说明野杏在叶温增加到一定程度后关闭了部分气孔,避免更多的水分丢失。由于气孔导度决定了净光合速率,所以晴天下野杏的净光合速率随着叶温的增加也为单峰形。多云下野杏胞间二氧化碳浓度较高,气孔限制值较低,净光合速率受气孔限制程度降低。同时,多云下蒸腾速率与叶温成正相关,表明气孔没有明显关闭,这与气孔导度受叶温的影响很小一致。所以,多云下的净光合速率没有受到气孔导度的限制,而与叶温成正相关。因此,野杏光合生理对叶温的高度敏感是其重要的生态适应特征。而在多云下净光合速率速率由晴天下的单峰形变为双峰形,受到的光抑制程度降低,主要原因是多云下气温降低引起的叶温降低,而不是由光量子通量密度降低造成的^[16,25]。

植物通过调节气孔开张,增大蒸腾,来控制叶温,使其维持在正常的生理温度^[26]。晴天下,随着

气温和叶温的增加,蒸腾速率的迅速增加使得野杏降低了气孔导度而避免大量的水分丢失。蒸腾速率的增加有利于植物快速的降低叶温^[26],而野杏在晴天蒸腾速率的降低使得叶温迅速增加,促进了气孔的关闭,影响了光合作用,净光合速率在 10:00 就达到了最大。野杏为了减少水分丢失而牺牲部分光

合产物,说明了其对水分的高度敏感性,而气孔导度在晴天和多云之间的日变化最大值和日均值没有显著差异,也说明了野杏气孔开张对外界环境变化高度敏感,也有利于尽量减少水分丢失,属于生理适应的一种方式,这与其多分布在较为干旱的阳坡生境特征上是一致的^[13]。

参考文献:

- [1] ZHANG L Y(张立运),PAN B R(潘伯荣). Evaluation on exploitation and utilization of plant resources in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*(干旱区地理),2000,23(4):331-336(in Chinese).
- [2] BAI L(白玲),YAN G R(阎国荣),XU ZH(许正). Study on phyto-diversity and conservation of the wild fruit forest of Tianshan Mts in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*(干旱区研究),1998,15(3):10-13(in Chinese).
- [3] ZHANG X SH(张新时). Questions of eco-geography characteristics and population of wild-fruit forest in Yili[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*(植物学报),1973,15(2):239-253(in Chinese).
- [4] 陈灵芝. 中国的生物多样性-现状与保护对策[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [5] 林培钧,崔乃然. 天山野果林资源-伊犁野果林综合研究[M]. 北京:中国林业出版社,2000.
- [6] YANG H J(羊海军),CUI D F(崔大方),et al. Analysis on the components and resource situation of seed plants in the wild fruit forest in Tianshan Mountain in China[J]. *J. Plant Resour. & Environ.*(植物资源与环境学报),2003,12(2):39-45(in Chinese).
- [7] FENG T(冯涛),ZHANG Y M(张艳敏),CHEN X S(陈学森). Study on the age structure and density of the wild apple forest of *Malus sieversii*[J]. *Journal of Fruit Science*(果树学报),2007,24(5):571-573(in Chinese).
- [8] LIU L CH(刘立诚),LI Y P(李永萍). The genetic characteristics of the soils under wild-apple forest in Xinyuan County and the study of its classificatory problem[J]. *Journal of Xinjiang University*(新疆大学学报·自然科学版),1996,13(3):73-79(in Chinese).
- [9] WANG L(王磊),XU ZH(许正),et al. Analysis on the composition and resources of seed plants in wild-fruit forests in the large Xigou and small Xigou valleys in Huocheng County, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*(干旱区研究),2006,23(3):446-452(in Chinese).
- [10] CHEN X S, FENG T, ZHANG Y M, et al. Genetic diversity of volatile components in Xinjiang wild apple (*Malus sieversii*)[J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2007, 34(2):171-179.
- [11] HE T M, CHEN X S, XU Z, et al. Using SSR markers to determine the population genetic structure of wild apricot (*Prunus armeniaca* L.) in the Ily Valley of West China[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2007, 54:563-572.
- [12] YAN G R, HONG L, SONG W Q, et al. Genetic polymorphism of *Malus sieversii* populations in Xinjiang, China[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2008, 55:171-181.
- [13] WANG L(王磊). *Malus sieversii* and *Armeniaca vulgaris* Lam in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*(新疆农业科学), 1989, 6:33-34(in Chinese).
- [14] DANG Q L, LIEFFERS V J, ROTHWEI R L, et al. Diurnal-variation and interrelations of ecophysiological parameters in three peatland woody species under different weather and soil moisture conditions[J]. *Oecologia*, 1991, 88:317-324.
- [15] GRAHAM E A, MULKEY S S, KITAJIMA K, et al. Cloud cover limits net CO₂ uptake and growth of a rainforest tree during tropical rainy seasons[J]. *PNAS*, 2003, 100:572-576.
- [16] REINHARD T K, SMITH W K. Impacts of cloud immersion on microclimate, photosynthesis and water relations of *Abies fraseri* (Pursh.) Poiret in a temperate mountain cloud forest[J]. *Oecologia*, 2008, 158:229-238.
- [17] JOHNSON D M, SMITH W K. Cloud immersion alters microclimate, photosynthesis and water relations in *Rhododendron catawbiense* and *Abies fraseri* seedlings in the southern Appalachian Mountains, USA[J]. *Tree Physiology*, 2008, 28:385-392.
- [18] GU L, FUENTES J D, SHUGART H H, et al. Responses of net ecosystem exchange of carbon dioxide to changes in cloudiness: Results from two North American deciduous forests[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104:31 421-31 434.
- [19] ROBAKOWSKI P, WYKAB T, SAMARDAKIEWIC S, et al. Growth, photosynthesis, and needle structure of silver fir (*Abies alba* Mill.) seedlings under different canopies[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 201:211-227.
- [20] TAY A C, ABDULLAH A M, AWANG M, et al. Midday depression of photosynthesis in *Enkleia malaccensis*, a woody climber in a tropical rainforest[J]. *Photosynthetica*, 2007, 45(2):189-193.
- [21] LAMBERS H, CHAPIN F S, PONS L. *Plant Physiological Ecology*[M]. New York, Springer, New York, USA, 1998, 113-140.
- [22] TYREE M T, SPERRY J S. Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress? Answers from a model[J]. *Plant Physiology*, 1988, 88:574-580.
- [23] JONES H G, SUTHERLAND R A. Stomatal control of xylem embolism[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1991, 14:607-612.
- [24] SPERRY J S. Hydraulic constraints on plant gas exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104:13-23.
- [25] URBAN O, JANOUŠ D, ACOSTA M, et al. 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, 13:157-168.
- [26] LARCHER W. *Physiological Plant Ecology. Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995:57-164.