

3个苹果品种气体交换特性及其对环境因子的响应

杨红丽,王明,徐业勇*,张志刚

(新疆林业科学院 科技推广处,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:利用 Li-6400 光合作用系统对 3 个苹果品种(富士、早富一号、新富一号)的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 的浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)以及光响应曲线等生理指标进行测定、对比分析。结果表明:1)3 个苹果品种均是高光合、高蒸腾、高水分利用效率的品种,富士光饱和点(LSP) 和光补偿点(LCP) 分别为 $1\ 542.8\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $30.4\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,早富一号 LSP 和 LCP 分别为 $1\ 618.8\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $26.6\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,新富一号 LSP 和 LCP 分别为 $1\ 189.4\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $41.8\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2)富士的 P_n 、 T_r 日变化呈“单峰”曲线;早富一号、新富一号的 P_n 、 T_r 日变化均呈“双峰”曲线分布,并且存在光合“午休”现象。3)影响富士 P_n 、 T_r 日变化的主要内外界环境因子及作用大小的顺序分别依次为: $PPFD > G_s > RH > T_{air} > G_s$;影响早富一号 P_n 、 T_r 日变化的主要内外界环境因子以及作用大小的顺序分别依次为: $PPFD > G_s > RH > T_{air} > G_s > PPFD$;影响新富一号 P_n 、 T_r 日变化的主要内外界环境因子以及作用大小的顺序分别依次为: $PPFD > G_s > RH > T_{air} > G_s > PPFD$ 。

关键词:气体交换;光合特性;水分利用效率

中图分类号:S718.43

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2016)03-0030-06

Gas Exchange Characteristics of 3 Apple Tree (*Malus domestica*) Species and Response to Environmental Factors

YANG Hong-li, WANG Ming, XU Ye-yong*, ZHANG Zhi-gang

(Science and Technology Promotion Department, Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: Li-6400 portable photosynthesis system was used to measure the relative parameters of three apple varieties: Fuji, Zaofu No. 1, Xinfu No. 1. The parameters measured included the diurnal change of photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), transpiration rate (T_r), water use efficiency (WUE), light response curve and another physiological indicators. The results indicated that the three varieties all presented high P_n , T_r , and WUE. LSP and LCP of Fuji were $1\ 542.8\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $30.4\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $1\ 618.8\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $26.6\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for Zaofu No. 1, and $1\ 189.4\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $41.8\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for Xinfu No. 1. The diurnal variation of P_n and T_r of Fuji presented a single peak curve, while the other two varieties were in a double peak curve, and had the phenomenon of “photosynthetic sleep”. Factors that affected P_n and T_r of Fuji were in the order of $PPFD > G_s$, and $RH > T_{air} > G_s$, for Zaofu No. 1, the orders were $PPFD > G_s > RH$, and $RH > T_{air} > G_s > PPFD$, For Xinfu No. 1, the orders were $PPFD > G_s > RH > T_{air}$ and $RH > T_{air} > G_s > PPFD$.

Key words: gas exchange; photosynthetic characteristic; water use efficiency

收稿日期:2015-07-10 修回日期:2015-08-22

基金项目:中央财政林业科技推广示范项目[(2010)2T01]。

作者简介:杨红丽,女,工程师,研究方向:果树栽培与管理。E-mail:2373903245@qq.com

*通信作者:徐业勇,男,高级工程师,研究方向:果树栽培与生理。E-mail:648753460@qq.com

光合作用是苹果生理生态的一个重要性状,是研究比较苹果种间、品种间及不同发育阶段的光合产量、经济产量等的一项重要指标^[1]。光合作用又是果树生长和结果的基础,研究植物光合作用有利于选择适应当地外界环境的栽培品种,在保质保量的条件下顺利完成更新换代的任务,对当地林果业的发展起到重要作用^[2-4]。新疆阿克苏地区昼夜温差大,一般在10℃左右,利于苹果果实的着色和糖分的积累,得天独厚的光能资源对苹果品质的提高起到了很大的作用。近年来,随着苹果发展势头的增长,种植面积逐渐增大,但是由于品种的选择单一性限制了当地苹果产业的进一步发展,目前关于阿克苏地区不同苹果品种的气体交换以及与外界环境因子关系的研究较少,本研究通过对阿克苏地区3个苹果品种光合特性以及对外界环境因子的响应,确定出哪些品种更能适应当地气候,为当地苹果产业的进一步发展提供理论研究及指导生产的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于新疆阿克苏地区温宿县境内的新疆林业科学院佳木良种试验站(80°32' E, 41°15' N),海拔1103.8 m。试验站总面积80 hm²,呈长方形,

地势北高南低,西高东低,南北长1 600 m,东西长650 m,地下水埋深2.8~3.3 m;属大陆性干旱荒漠气候,昼夜温差大;春季较短,多大风降温天气,时常有倒春寒现象发生,夏季炎热而干燥;降水量稀少,四季分配不均,降水量年际变化大,年均降水量65.4 mm,年蒸发量1 883.6 mm;年均气温10.1℃,极端低温-27.4℃,年均日照时数2 747.7 h,≥10℃积温2 916.8~3 198.6℃,无霜期195 d^[5]。

1.2 试验土壤

试验站的土壤为棕色荒漠土,有机质12.4~26.2 g·kg⁻¹之间,pH8.11~9.85,呈弱碱性,土壤厚度约为3 m(表1)。取试验样地土壤深度为0~160 cm,第1层土壤为壤土层,深度为0~30 cm,第2层是砂土层,深度为30~50 cm,第3层是黏土层,深度为50~80 cm,第4层是砂土层,深度为80~160 cm^[6]。

1.3 样地及样株的选择

样地选择在新疆林科院佳木试验站苹果园内进行,分别选取富士、早富一号、新富一号3个苹果品种(*Malus domestica*),长势相对一致,平均树龄13~15 a,地径20~22 cm,树高3~3.5 m,树冠4 m×4 m,株行距5 m×4 m,无病虫害的样树3株作为试验对象。

表1 试验地土壤的主要理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of test soil

深度/cm	土壤质地	容重 (g·cm ⁻³)	最大容积持水 /%	有机质含量 (g·kg ⁻¹)	全N含量 (g·kg ⁻¹)	pH
0~30(含30)	壤土	1.606 7	22.14	3.90	0.863	8.12
30~50(含50)	砂土	1.401 3	13.34	2.98	0.471	8.50
50~80(含80)	黏土	1.859 3	27.30	0.69	0.471	8.72
80~160(含160)	砂土	1.462 0	13.65	0.98	0.254	8.76

1.4 试验设计

气体交换数据测定在2014年7月上旬选一晴好天气,在自然光条件下分别对富士、早富一号、新富一号3个苹果品种的气体交换特性进行日变化测定,并选择样株冠层上部向阳的当年新生成熟叶片5位并用记号带标记,利用Li-6400便携式光合作用系统(Li-cor,Lincoln,USA)以及自然光叶室(2 cm×3 cm),在北京时间8:00~20:00期间每隔2 h进行1次活体测定,每次测定结果都利用仪器的自动采集存储功能记录下该次植物的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)等生理指标,以及植物所测部位的气温(T_{air})、叶温(T_{leaf})、空气湿度(RH)、空气CO₂浓度(C_a)、叶片大气压亏缺($VpdL$)等微气象参数,每位叶片测定读数重复5次。由于苹果叶片较大,测量时使叶片充

满自然光叶室,对于部分较小叶片不能满足标准叶室所设定的固定计算面积,在测定结束后,将观测的叶片样品剪下,利用扫描仪扫描后再利用Photoshop7.0选区面积计算软件计算出实际的叶面积,最后,按照计算后的叶面积回算出样株实际的各项生理指标^[7]。气孔限制值(L_s)和叶片瞬时水分利用效率(WUE)由以下公式计算: $L_s = 1 - C_i/C_a$ ^[7-9]
 $WUE = P_n/T_r$ ^[7-9]。

利用仪器自带Light-Curve测定程序,选取2014年7月晴好天气,11:00~12:00对3个苹果品种的光响应曲线进行测定,并利用便携式光合仪CO₂注入系统稳定测量时的CO₂浓度为400 μmol·mol⁻¹,光照强度设置为0、50、100、150、200、300、350、400、500、750、1 000、1 500、1 700 μmol·m⁻²·s⁻¹与1 900 μmol·m⁻²·s⁻¹。

1.5 数据分析

数据用 SPSS19.0 和 Excel2007 统计分析。

2 结果与分析

2.1 3个苹果品种气体交换参数与光响应曲线比较

富士、早富一号、新富一号的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 以及 WUE 均存在无显著差异 ($p < 0.05$)，3个苹果品种均是高光合、高蒸腾速率、高水分利用效率的树种（表 2）。

富士、早富一号对外界光照强度的响应规律基本一致，均随着光合有效辐射 (PAR) 的增加，各 P_n 也随之出现不同程度的上升；新富一号的光响应前期 P_n 也随着 PAR 的增加而增大，当达到一定光照强度时出现了骤降（图 1）。

对富士、早富一号、新富一号 3 个苹果品种的光

响应曲线进行拟合，利用该仪器自带光响应曲线分析软件对 P_n -PAR 曲线进行拟合，得到富士在饱和光条件下的净光合速率 (P_{max}) 为 $24.66 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、表观初始量子效率 (AQY) 为 $0.087 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、光饱和点 (LSP) 和光补偿点 (LCP) 分别为 $1542.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $30.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ；早富一号在饱和光条件下的净光合速率为 $23.56 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、表观初始量子效率为 $0.087 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、LSP 和 LCP 分别为 $1618.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $26.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ；新富一号在饱和光条件下的净光合速率为 $21.51 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、表观初始量子效率为 $0.077 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 L_s 和 LCP 分别为 $1189.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $41.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 2 3 种苹果气体交换及水分利用效率参数日变化均值

Table 2 The average parameters of gas exchange and water use efficiency of three apple varieties

品种	净光合速率 /(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})	气孔导度 /(mmol \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})	胞间 CO ₂ 浓度 /(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})	蒸腾速率 /(mmol \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})	水分利用效率 /(\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1})
富士	16.63 a	0.32 a	256.36 a	8.95 a	2.49 a
早富一号	16.31 a	0.30 a	246.81 a	9.30 a	2.40 a
新富一号	16.65 a	0.32 a	235.36 a	10.03 a	2.40 a

注：同列不同大写字母表示 3 种苹果各气体交换参数的平均值存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

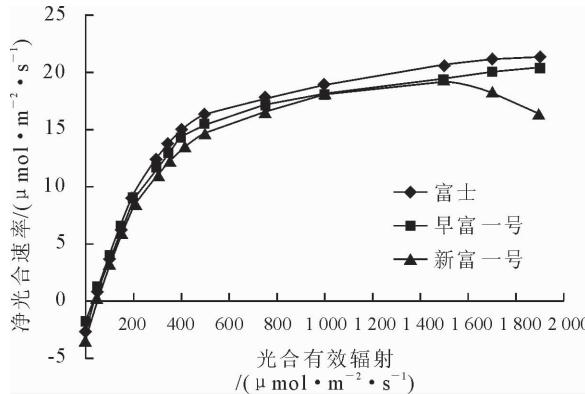


图 1 3 种苹果光响应曲线

Fig. 1 Light response curves of three varieties

2.2 3个苹果品种气体交换参数的变化特征

2.2.1 P_n 、 T_r 的日变化 富士的 P_n 日变化呈“单峰”曲线；早富一号、新富一号的 P_n 日变化均呈“双峰”曲线分布，并且存在光合“午休”现象（图 2）。自然光条件下，富士的 P_n 随着外界光照强度的增加，14:00 时达到最大值 $21.67 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 随后又逐渐下降；早富一号与富士有所不同，在 12:00 时出现第 1 个峰值，随后由于受到外界高温、高光照的影响 P_n 值逐渐降低，在 14:00 时出现光合“休眠”现象，新富一号与早富一号的 P_n 日变化动态相似，但是前者的光合“休眠”时间与 P_n 第 2 峰值均较早富一号晚。

3 个苹果品种的 T_r 日变化趋势与 P_n 日变化趋势相似，富士的 T_r 日变化呈“单峰”分布，早富一号、新富一号的 T_r 日变化均呈“双峰”分布；富士的 T_r 自 8:00—18:00 均呈上升趋势，随后出现较小的下降；早富一号、新富一号的 T_r 均呈“双峰”曲线分布，在 14:00 时，早富一号由于受到外界高温、高光照的影响，部分气孔出现关闭，导致此时出现短暂的“休眠”，在 16:00 时达到全天日变化最大峰值；新富一号的 T_r 日变化趋势与前者相似，但是其光合“休眠”时间点与 T_r 第 2 峰值均出现的较晚（图 2）。

早富一号与新富一号的 T_r 均在下午出现最大值，新富一号的第一个峰值、“午休”点、第二个峰值出现的时间均比早富一号晚约 2 h，可见，新富一号对外界环境响应较缓慢，相比之下富士更能适应南疆阿克苏地区午间高光辐射、高温度的环境。

2.2.2 其他气体交换参数的日变化 富士、早富一号的 C_i 曲线呈“U”型分布，结合图 2 可知，10:00—18:00 时段，2 个苹果品种的光合作用较强，此时段 C_i 值较低且平缓；新富一号则呈倒“S”型分布，8:00—10:00 时段新富一号的 C_i 值较低（图 3A）。

富士、早富一号的 G_s 呈“单峰”曲线，新富一号则呈“双峰”曲线分布，18:00 后两者有回升趋势，后者则呈下降趋势（图 3B）。结合图 2 和图 3A、B 分析可知，在 12:00—14:00 时 3 个苹果品种的 P_n

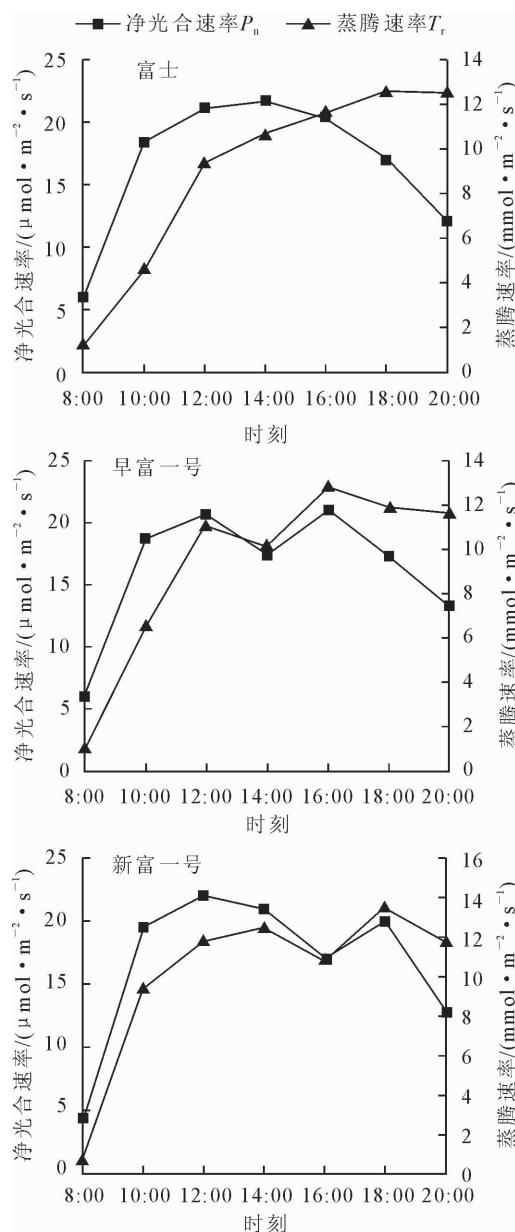


图2 3种苹果净光合速率和蒸腾速率日变化动态

Fig. 2 The diurnal change of photosynthetic rate and transpiration rate of three varieties

和 G_s 均呈下降趋势,该时段胞间 CO_2 浓度降低、气孔限制值增大(L_s 增大, C_i 降低),导致 2 个苹果品种的 P_n 和 T_r 减弱,即此时段主要受到气孔限制的影响导致光抑制。18:00—20:00 时段 3 个品种的 P_n 和 T_r 再次出现减弱,该时段胞间 CO_2 浓度增加、气孔限制值降低(L_s 降低, C_i 增加),此时段主要导致 3 个品种 P_n 和 T_r 降低的原因是受到非气孔限制的影响,即外界有效光合辐射强度降低引起的光抑制。

3 个品种的 WUE 日变化均呈下降趋势,9:00—16:00 富士的 WUE 比早富一号、新富一号较大(图 3D)。8:00—12:00 3 个苹果品种的 WUE 下降较快,结合图 2 可知,在该时段 3 个品种的 P_n 增加的同时 T_r 也随之增加,相比之下 T_r 增加的比率较 P_n 大,导致了 WUE 逐步下降。

2.3 外界环境因子与 P_n 、 T_r 相关分析

3 个品种的 P_n 、 T_r 均与 G_s 呈显著正相关,可见 G_s 在植物气体交换过程中直接影响到植物 P_n 、 T_r 的大小。3 个品种的 P_n 、 T_r 均与 RH 呈负相关, T_r 与 RH 的相关系数较 P_n 大,即外界 RH 对 3 个苹果品种的 P_n 影响不显著,外界空气湿度越大 3 个苹果品种的 T_r 越小,主要是由于外界 RH 增大后导致植物部分气孔关闭, G_s 降低、 T_r 随之下降。3 个品种的 P_n 、 T_r 均与 T_{air} 呈正相关, T_r 与 T_{air} 相关性极显著,结合图 3B 可知,当外界气温在一定范围内,3 个品种的 T_r 随着 T_{air} 增加逐渐增大,但是当外界气温达到一定高度时,植物为了抵抗外界高温的伤害,会关闭部分气孔降低 G_s ,故气温对 3 个苹果品种 T_r 的影响是局限在一定的温度范围内。3 个苹果品种的 P_n 与 PPF 的相关系数均达到极显著水平, T_r 与 PPF 的相关系数较前者低,表明 3 个品种的 P_n 受到 PPF 主导影响,而 T_r 则是受到 PPF 的间接影响,既太阳辐射通过影响空气湿度以及外界温度来影响 3 个苹果品种的 T_r 变化。空气 H_2O 浓度与 P_n 、 T_r 呈负相关,但是对各个品种的 P_n 、 T_r 相关性均不显著(表 3)。

3 结论与讨论

植物的气体交换参数(P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r)是植物生理特性的表现形式。对植物气体交换的研究是研究植物生理活动的必要手段^[7]。富士、早富一号、新富一号均是高光合、高蒸腾速率、高水分利用效率的树种,说明 3 个苹果树种在阿克苏地区推广种植,符合适时适地、保质保产的要求,这也是多年来 3 个苹果品种能够长期在阿克苏地区种植的原因。

气孔限制和非气孔限制是导致光合速率降低的 2 种原因, L_s 和 C_i 的变化方向是区分 2 种限制的依据,若 L_s 增大和 C_i 降低,则为气孔限制,相反若 L_s 减少和 C_i 增大,则为非气孔限制^[7]。

叶片 WUE 是评价植物水分生产力和干旱气候环境下筛选抗旱物种的重要指标。根据: $WUE = P_n / T_r$,叶片的 WUE 大小主要取决于 P_n 和 T_r ^[10]。

气体交换作为植物复杂的生理过程,对外界环境因子的影响也非常敏感。除土壤水分外,影响植物气体交换的外界环境因子主要有光照、温度、湿度;与此同时,风、空气中 CO_2 等因子也对气体交换有一定影响^[5]。

富士、早富一号、新富一号的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 以及 WUE 均存在极显著差异,3 个苹果品种均是高光合、高蒸腾速率、高水分利用效率的树种。光合有效辐射直接影响着植物净光合速率的变化,该变化

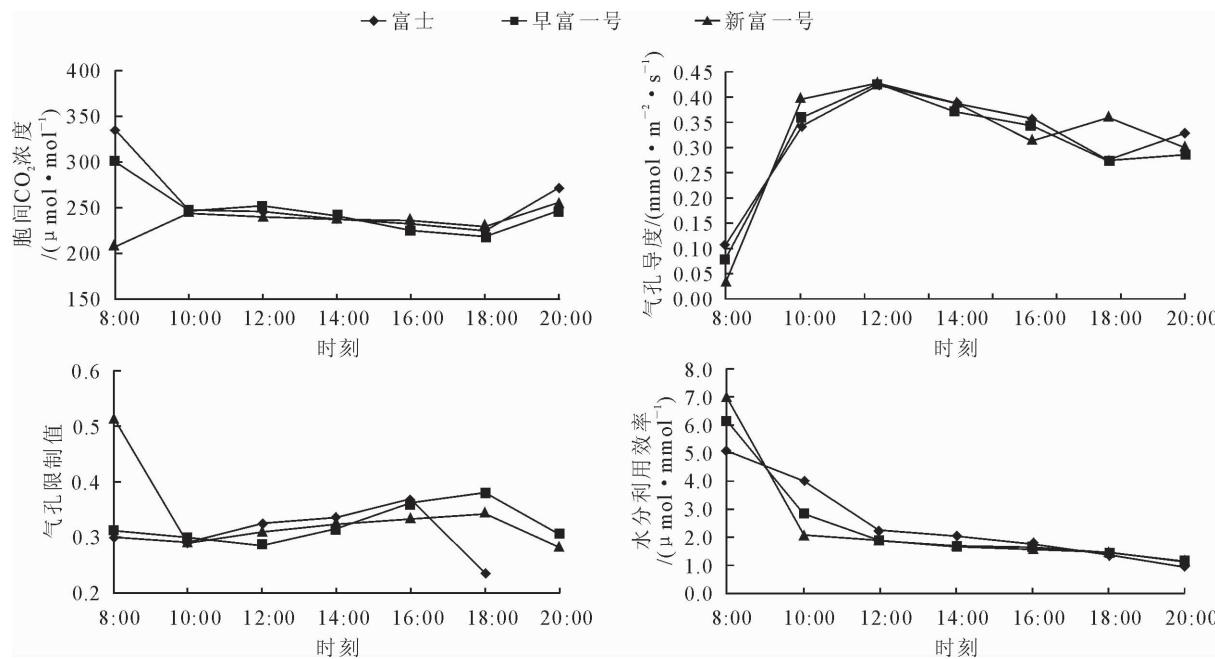


图 3 3 个苹果品种气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、气孔限制值以及水分利用效率日变化

Fig. 3 The diurnal change of stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration ,stomatal limitation and water use efficiency of three varieties

表 3 内外因子与 3 个苹果品种净光合速率和蒸腾速率相关性分析

Table 3 The correlation analysis between photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and outer and inner factors of three varieties

品种	项目	气孔导度 (G_s)	空气相对湿度 (RH)	气温 (T_{air})	光辐射强度 (PPFD)	空气 H ₂ O 浓度
富士	P_n	0.896 **	-0.422 *	0.293	0.911 **	-0.236
	T_r	0.809 **	-0.986 **	0.961 **	0.682 **	-0.569 *
早富一号	P_n	0.919 *	-0.646 **	0.495	0.939 **	-0.454
	T_r	0.835 **	-0.982 **	0.920 **	0.796 *	-0.594
新富一号	P_n	0.909 *	-0.733 **	0.637 *	0.958 **	-0.348
	T_r	0.895 **	-0.961 *	0.935 **	0.724 **	-0.427

注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。

主要通过光响应曲线来表达。对植物光响应曲线的分析,可知植物的光饱和点与光补偿点,植物光饱和点反映的是植物利用强光能力的大小,光饱和点较大的植物其在强光条件下不易发生光抑制,同时该植物喜光性较强;植物光补偿点反映的是植物利用弱光能力的大小,光补偿点较小的植物其利用弱光的能力较大,同时该植物的耐阴性较强^[12-13]。富士、早富一号、新富一号的光补偿点依次为 30.41、26.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 41.8 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;光饱和点依次为 1 542.8、1 618.8 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 1 189.4 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

富士的 P_n 、 T_r 日变化呈“单峰”曲线;早富一号、新富一号的 P_n 、 T_r 日变化均呈“双峰”曲线分布,并且存在光合“午休”现象。早富一号与新富一号的 T_r 均在下午时分出现最大值,并且新富一号的第一个峰值、“午休”点、第二个峰值出现的时间均比早富一号晚约 2 h,可见新富一号对外界环境反映

较缓慢,相比之下富士更能适应南疆阿克苏地区午间高光辐射、高温度的环境。

3 个苹果品种在 12:00—14:00 时 3 个苹果品种的 P_n 和 G_s 均呈下降趋势,该时段胞间 CO₂ 浓度降低、气孔限制值增大(L_s 增大, C_i 降低),导致 2 苹果品种的 P_n 和 T_r 减弱,即此时段主要受到气孔限制的影响导致光抑制。18:00—20:00 时段 3 个品种的 P_n 和 T_r 再次出现减弱,该时段胞间 CO₂ 浓度增加、气孔限制值降低(L_s 降低, C_i 增加),此时段主要导致 3 个品种 P_n 和 T_r 降低的原因是受到非气孔限制的影响,即外界有效光合辐射强度降低引起的光抑制。3 个品种的 P_n 增加的同时 T_r 也随之增加,相比之下 T_r 增加的比率较 P_n 大,导致了 WUE 逐步下降,这也是 3 个品种为了更好适应外界自然环境,通过调整 T_r 来应对外界高温、高光环境;9:00—16:00 富士的 WUE 较早富一号、新富一号大,此时段富士通过高光合高蒸腾的特性来充分的利用地

下水,进而减少干旱对其的伤害。

影响富士 P_n 日变化的主要内外界环境因子及作用大小的顺序为 $PPFD > G_s$;影响 T_r 日变化的主要内外界环境因子为 $RH > T_{air} > G_s$ 。影响早富一号 P_n 日变化的主要内外界环境因子以及作用大小的顺序为 $PPFD > G_s > RH$;影响 T_r 日变化的主要内外界环境因子为 $RH > T_{air} > G_s > PPFD$ 。影响新富一号 P_n 日变化的主要内外界环境因子以及作用大小的顺序依次为 $PPFD > G_s > RH > T_{air}$;影响 T_r 日变化的主要内外界环境因子依次为 $RH > T_{air} > G_s > PPFD$ 。

参考文献:

- [1] 王继和,张晓明,吴春荣,等.金冠、毛里斯、新红星苹果光合特性的研究[J].西北植物学报,2000,20(5):802-811.
WANG J H, ZHANG D M, WU C R, et al. A research on the photosynthetic characteristics of Jinguan, Molios and Strimson apple (*Malus pumila* Mill) [J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 2000, 20(5):802-811. (in Chinese)
- [2] 王小伟,金则新,柯世省,等.乌药光合特性日进程与其环境因子的相关分析[J].西北林学院学报,2010,25(2):5-10.
WANG X W, JIN Z X, KE S X, et al. Diurnal photosynthetic characteristics of *Lindera aggregata* and its correlation with environmental factors [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(2):5-10. (in Chinese)
- [3] 赵玲珍,朱首军.三种树莓光合特性的研究[J].西北林学院学报,2006,21(4):39-42.
ZHAO L Z, ZHU S J. Photosynthetic characteristics of three *Rubus idaeus* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4):39-42. (in Chinese)
- [4] 任建武,王雁,彭镇华.3种温室栽培石斛冬季光合特性研究[J].西北林学院学报,2009,24(1):39-43.
REN J W, WANG Y, PENG Z H. Characteristics of photo-synthesis in three *Dendrobium* species cultivated in greenhouse during winter [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(1):39-43. (in Chinese)
- [5] 宋于洋,塔依尔,王炳举.沙棘叶片光合速率与其环境因子的日变化规律研究[J].西北林学院学报,2007,22(1):8-11.
SONG Y Y, TA Y E, WANG B J. The study of sea buckthorn leaf photosynthetic rate and its environmental factors diurnal variation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22 (1):8-11. (in Chinese)
- [6] 刘建军,王得祥,雷瑞德,等.美国黄松、奥地利黑松和油松光合、蒸腾及生长特性分析[J].西北林学院学报,2002,17(3):1-4.
LIU J J, WANG D X, LEI R D, et al. Photosynthesis, transpiration and growth features of *Pinus ponderosa*, *P. nigra* var. *austriaca* and *P. tabulaeformis* [J]. Journal of Northwest For-
- estry University, 2002, 17(3):1-4. (in Chinese)
- [7] 李宏,张志刚,郑朝辉,等.南疆红枣林地不同流量对滴灌土壤水分运移特征的影响[J].江苏农业科学,2013,41(8),171-174.
LI H, ZHANG Z G, ZHENG Z H, et al. Study on effects of different dripper discharge on water movement under drip irrigation in south Xinjiang of Jujube [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(8):171-174. (in Chinese)
- [8] 张志刚,李宏,李疆,等.地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗过程的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):53-58.
ZHANG Z G, LI H, LI J, et al. Effects of different dripper discharge on soil water infiltration under drip irrigation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(4): 53-58. (in Chinese)
- [9] 张志刚,李宏.塔里木河中游胡杨与灰叶胡杨气体交换特性对比研究[J].西北植物学报,2012,32(12):2506-2511.
ZHANG Z G, LI H. Comparative study on gas exchange characteristics of *Populus euphratica* and *P. pruinosa* in the middle reaches of Tarim River [J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 2012, 32(12):2506-2511. (in Chinese)
- [10] SCHREIBERU, BERRY J A. Heat-induced changes of chlorophyll fluorescence in intact leaves correlates with damage of the photosynthetic apparatus [J]. Planta, 1977, 136: 233-238.
- [11] 孙广玉,蔡淑燕,胡彦波,等.盐碱地马蔺光合生理特性的研究[J].植物研究,2006(1):74-78.
SUN G Y, CAI S Y, HU Y B, et al. Study of saline iris quinone photosynthetic physiological characteristics [J]. Plant Research, 2006(1):74-78. (in Chinese)
- [12] 王森,郝古庆,姬兰柱,等.高CO₂浓度对温带三种针叶树光合响应特性的影响[J].应用生态学报,2002,13(6):646-650.
WANG M, HAO G Q, JI L Z, et al. High CO₂ concentration on the temperate conifer three characteristics of photosynthetic [J]. Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (6):646-650. (in Chinese)
- [13] 许大全,沈允钢.植物光合作用的效率的日变化[J].植物学报,1997,23(4):410-416.
XU D Q, SHEN Y G. The efficiency of plant photosynthesis diurnal variation [J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 1997, 23 (4):410-416. (in Chinese)
- [14] 李菁,刘应迪,陈功锡,等.蜡梅光合与蒸腾速率日变化的初步研究[J].广西植物,2000,20(1):52-58.
LI J Q, LIU Y D, CHEN G X, et al. Study on *Chimonanthus* photosynthesis and transpiration rate changes in the initial [J]. Guangxi Plant, 2000, 20 (1):52-58. (in Chinese)
- [15] SALVUCCI, MICHAEL E, CRAFTS B, et al. Minireview inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of rubisco as a limiting factor in photosynthesis [J]. Physiologia Plantarum, 2004, 120(2):179-187.