

武瑞瑞, 黄家雄, 杨阳, 李亚男, 张晓芳, 吕玉兰, 何红艳, 李贵平. 4种咖啡叶片叶绿素荧光参数日变化研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(5): 16-24.

4种咖啡叶片叶绿素荧光参数日变化研究

武瑞瑞, 黄家雄, 杨阳, 李亚男, 张晓芳, 吕玉兰, 何红艳, 李贵平
(云南省农科院热带亚热带经济作物研究所, 云南保山 678000)

摘要:【目的】研究不同咖啡品种叶绿素荧光日变化规律及其与环境因子的相关性, 探讨咖啡对环境的适应性, 为培育适应本地气候的咖啡品种提供基础。【方法】以大粒种咖啡、中粒种咖啡、小粒种咖啡卡蒂姆2和卡蒂姆3为材料, 利用调制叶绿素荧光仪(英国汉莎 FMS-2)和手持叶绿素测定仪分别测定叶绿素荧光参数和 SPAD。【结果】大粒种和卡蒂姆2的 F_o 日变化呈“M”型, 中粒种和卡蒂姆3的 F_o 日变化呈倒“V”型。在 15:00, 大粒种的 F_o 有明显的下降, 达到其低谷 183.20, 中粒种达到其顶峰 262.60; 卡蒂姆3在 17:00 达到其顶峰 199.44; 卡蒂姆2在全天大部分时间低于其他3个品种。4个咖啡品种的 F_v/F_m 日变化均呈“V”型, 除了中粒种最低点 0.65 出现在 13:00 外, 其余均在 15:00, 分别为 0.60、0.66、0.65。相关性分析显示, 中粒种和卡蒂姆3与环境因子温度、相对湿度、太阳辐射强度都有相关性, 而大粒种与相对湿度呈显著负相关, 卡蒂姆2与相对湿度呈显著正相关。这4个品种与 SPAD 值的相关性均未达到显著水平。【结论】在一天中, 强光、高温、低湿条件下, 大粒种主要以增加热耗散进行自我保护, 中粒种、卡蒂姆2和卡蒂姆3则主要以 PS II 反应中心可逆失活和损坏为主要保护机制, 且4个咖啡品种的 F_v/F_m 先降低后升高, 说明卡蒂姆2、卡蒂姆3和中粒种的 PSII 反应中心可逆性失活; 卡蒂姆2的 F_o 全天大部分时刻低于其他3个品种, 且 F_v/F_m 值也较高, 因此用于光反应的能量较多。

关键词: 卡蒂姆; 大粒种; 中粒种; 叶绿素荧光参数; 日变化; 相关性分析

中图分类号: S571.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2019)05-0016-09

Diurnal Variation of Chlorophyll Fluorescence Parameters of Four Varieties of *Coffea* Leaves

WU Ruirui, HUANG Jiexiong, YANG Yang, LI Yanan, ZHANG Xiaofang,

LYU Yulan, HE Hongyan, LI Guiping

(Institute of Tropical and Sub-tropical Cash Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Baoshan 678000, China)

Abstract: 【Objective】The objective was to study the diurnal variation of chlorophyll fluorescence of different *Coffea* varieties and its correlation with environmental factors, and to explore the adaptability of *Coffea* to the environment for providing a basis for the cultivation of *Coffea* varieties adapted to local climate. Study the adaptation of *Coffea* to their environment in order to provided references for breed varieties. 【Method】The chlorophyll fluorescence parameters and SPAD of four *Coffea* cultivars(*Coffea liberica*, *Coffea robusta*, *Coffea arabica* Catimor 2 and Catimor 3) were measured by modulated chlorophyll fluorescence fluorometer (pulse-amplitude-modulation FMS-2) and hand-held chlorophyll analyzer

收稿日期: 2019-02-26

基金项目: 云南省现代农业咖啡产业技术体系建设项目(2017KJTX009-1); 国家重点研发计划项目(2018YFD0201108); 云南省重点研发计划项目(2018ZG015)

作者简介: 武瑞瑞(1985—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为咖啡化学分析, E-mail: 524150167@qq.com

通信作者: 李贵平(1975—), 男, 白族, 副研究员, 研究方向为咖啡病虫害研究, E-mail: lgp2007007@163.com

respectively. 【Results】The diurnal variation of F_o of *Coffea liberica* and *Coffea arabica* Catimor 2 is in “M” shape, the diurnal variation of F_o of *Coffea liberica* and *Coffea arabica* Catimor 2 is in “M” shape, while that of *Coffea robusta* and *Coffea arabica* Catimor 3 is in “V” shape. At 15:00, F_o of *Coffea liberica* decreased significantly, with the minimum value 183.20, and that of *Coffea robusta* reached the maximum value of 262.60. At 17:00, F_o of *Coffea arabica* Catimor 3 reached the maximum value of 199.44. F_o of *Coffea arabica* Catimor 2 was lower than that of the other three *Coffea* varieties for most of the day session. The diurnal variation of F_v/F_m of four *Coffea* varieties is in “V” type curve. Except that the lowest point of *Coffea robusta* was 0.65 at 13:00, the other varieties were 0.60, 0.66 and 0.65 at 15:00 respectively. The correlation analysis showed that, *Coffea robusta* and *Coffea arabica* Catimor 3 have correlation with environmental factors such as temperature, relatively humidity and solar radiation intensity while *Coffea liberica* has a significant negative correlation with relative humidity and *Coffea arabica* Catimor 2 has a significant positive correlation with relative humidity. The correlation between SPAD and four varieties is not significant. 【Conclusion】In the day, under strong solar radiation, high temperature and low air humidity conditions, *Coffea liberica* protect itself mainly by increasing thermal dissipation, *Coffea robusta*, *Coffea arabica* Catimor 2 and Catimor 3 mainly take the reversible inactivation and damage of PSII reaction center as the protection mechanism. And F_v/F_m of four *Coffea* varieties decreases first and then increases, showing the reversible inactivation of PS II reaction centre of *Coffea arabica* Catimor 2, Catimor 3 and *Coffea robusta*. F_o of *Coffea arabica* Catimor 2 is lower than that of the other three varieties for most of the day and its F_v/F_m is higher, so more energy is used for photoreaction.

Key words: *Coffea arabica* Catimor; *Coffea robusta*; *Coffea liberica*; chlorophyll fluorescence parameters; diurnal variation; correlation analysis

【研究意义】影响植物正常生长的环境因素有很多, 如光照、温度及 CO_2 浓度等。环境胁迫对植物光合作用的影响是多方面的。而叶绿素荧光是光合的探针, 能更加真实的反应植物的光合作用。植物叶片叶绿素荧光特性已被广泛应用到植物光合机理和逆境生理等研究领域^[1-2]。光合日变化是维持植物光合机构内不同组分响应和适应环境条件的一种平衡能力的反应, 叶绿素荧光参数则反映光合机构内一系列重要的适应调节过程^[3]。开展咖啡叶绿素荧光日变化的研究有助于了解环境对咖啡光合作用的影响及咖啡对环境的适应方式。【前人研究进展】朱弘等^[4]对不同竹龄毛竹冠层叶片叶绿素荧光参数日变化的研究发现, 适当提高4年生毛竹在竹林中的比重, 通过优化毛竹立竹结构和林肥管理可提高毛竹林经营综合效益。习玉森等^[5]研究了不同生长型观赏桃叶的叶绿素荧光日变化, 发现生长季内8月上旬PSII中心出现可逆失活, 不同生长型叶绿素荧光有一定差异。王直亮等^[6]通过研究不同菜心品种叶绿素荧光参数日变化规律, 发现随着光强和温度的变化, 在一定范围内, PSII可逆性功能失活, 且耐热性强的菜心品种恢复速率较高。乔梅梅等^[7]研究了不同种植处理与不同环境下黑果枸杞叶绿素荧光参数的日变化, 发现垄栽各荧光参数变化幅度小, 且荧光参数与光强和温度等环境因子的

相关性低, 所以黑果枸杞高效种植采取垄栽。韦阳连等^[8]研究了龙船花属3种植物叶绿素荧光参数的日变化, 发现3种龙船花的光合性能及耐阴性为龙船花>大王龙船花>大叶黄龙船花。【本研究切入点】对大粒种、中粒种以及小粒种咖啡卡蒂姆2和卡蒂姆3的叶绿素荧光日变化进行比较, 了解它们荧光特性的差异及与气象因子的相关性。【拟解决的关键问题】测定5月份咖啡叶片叶绿素荧光参数 F_o 的日变化规律及其与温度、湿度、太阳光照强度等影响因子间的关系, 有助于了解咖啡对环境的适应性, 为选育适宜本地气候特点的咖啡提供研究基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所潞江坝基地(98°53' E, 21°59' N), 海拔720 m, 具有典型的干热河谷气候, 干湿季节非常分明, 雨热同期, 冬无严寒, 夏无酷暑; 11月至次年5月为干季, 6~10月为湿季, 7、8、9月雨量最多, 占全年80%。

1.2 试验材料

大粒种咖啡(*Coffea liberica*): 咖啡三大原生种之一, 原产地为西非的利比里亚, 环境适应力强, 亦耐病虫害, 却是咖啡原生种中品质最差。

苦味强烈是其特征。

中粒种咖啡 (*Coffea robusta*)：非洲刚果原产的原生种,较阿拉比卡种(Arabica)耐病虫害(特别是叶锈病),环境适应力亦强,具有特别的“罗布味”(类似烧焦麦子的味道)。

小粒种咖啡 (*Coffea arabica*)：原产地非洲埃塞俄比亚,为三大原生种中质量最佳者,其香味和质量是3种之中最好。卡蒂姆是小粒咖啡中的波旁种系分支卡杜拉与中粒种的混种,种植这个品种的原因是由于卡蒂姆拥有中粒种基因,在抗病性方面比单一老品种强,且产量也好。选取了卡蒂姆系列的2个品种,分别为卡蒂姆系列品种2(以下简称卡蒂姆2)、卡蒂姆系列品种3(以下简称卡蒂姆3)。

大粒种咖啡、中粒种咖啡、小粒种咖啡的卡蒂姆系列品种试材均采自云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所潞江坝基地。

1.3 试验方法

1.3.1 叶绿素荧光参数和叶绿素相对含量的测定
取中上部枝条,每个枝条从顶端数第4对叶子为测定对象,每个品种测定5片叶。(1)手持叶绿素测定仪(浙江托普TYS-B)测定SPAD值,于早上9:00进行,每个叶片重复测10次。(2)

叶绿素荧光参数用调制叶绿素荧光仪(英国汉莎FMS-2)测定,于9:00开始每隔2h测定1次,19:00结束。测定时暗适应15min,测量荧光参数 F_0 与 F_v/F_m 从仪器FMS-2中直接导出。

1.3.2 气象资料的搜集 太阳辐射强度、温度和相对湿度由保山潞江坝气象站提供。

试验数据利用Excel2003进行处理,用SPSS19.0软件进行分析,采用Origin8.0作图。

2 结果与分析

2.1 太阳辐射强度和温度的日变化

太阳辐射强度的变化呈单峰曲线(图1),在14:00时达到峰值,9:00—10:00和16:00—17:00分别为光照强度快速上升和快速下降的两个阶段;温度的变化呈“M”型曲线,在14:00和16:00超过42℃,9:00—14:00为温度上升阶段,其中9:00—10:00为温度快速上升阶段,温度快速上升阶段和光照强度快速上升阶段相同,在15:00温度稍稍下降,16:00后为温度下降阶段。从表1相对湿度日变化呈现先降低后升高的趋势,最低值出现在14:00,之后逐渐上升。相对湿度变化规律与太阳辐射强度变化规律相同。

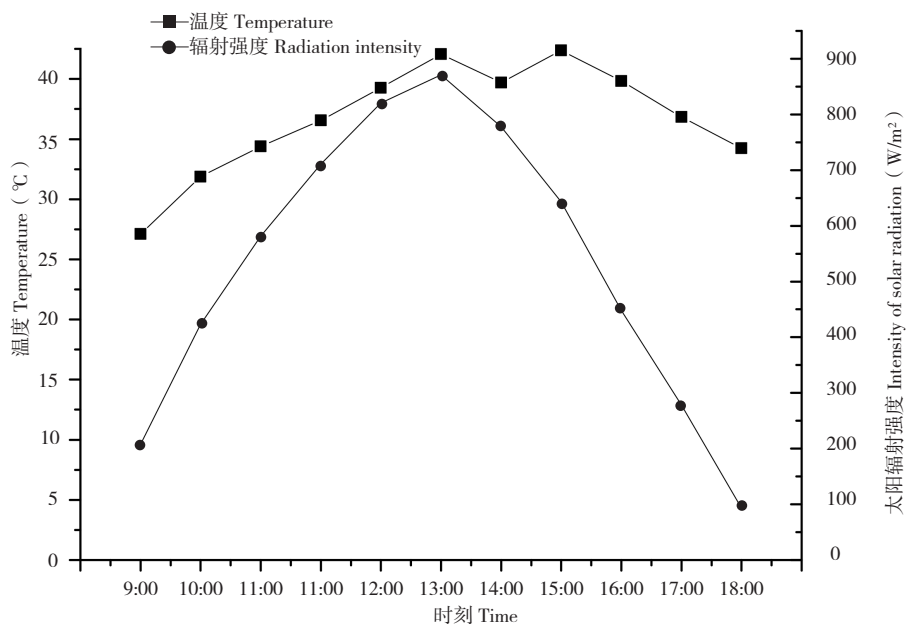


图1 温度和太阳辐射强度的日变化(5月10日)

Fig. 1 Diurnal variation of temperature and the intensity of the solar radiation on May 10

表 1 不同时间点空气湿度
Table 1 Relatively humidity in different time points

时刻 Time	相对湿度 RH (%)
9:00	59.758
10:00	42.682
11:00	31.454
12:00	28.229
13:00	21.959
14:00	18.297
15:00	19.826
16:00	20.337
17:00	18.758
18:00	20.648
19:00	24.335

2.2 4 个咖啡品种叶绿素相对含量的比较

叶绿素是绿色植物参与光合作用的重要色素，其含量高低反映了植株的光合能力和生长状况^[9]。叶绿素含量较高时，有利于植物对光能的吸收利用和转化。SPAD 值是一项表征叶片光合活性的指标，与单位叶面积的叶绿素含量显著正相关^[10-11]，因此常用其大小来衡量叶片中叶绿素的含量^[12]。

从 4 个咖啡品种在 5 月份的叶片 SPAD 测定值（图 2）可以看出，中粒种咖啡叶片的 SPAD 值最高为 66.04，大粒种咖啡叶片的 SPAD 值最低为 52.84，卡蒂姆 2 和卡蒂姆 3 分别为 64.70 和 64.54，相差不大。邓肯差异性分析表明，中粒种、卡蒂姆 2、卡蒂姆 3 的 SPAD 值无显著差异，大粒种与这个 3 个品种均差异显著。

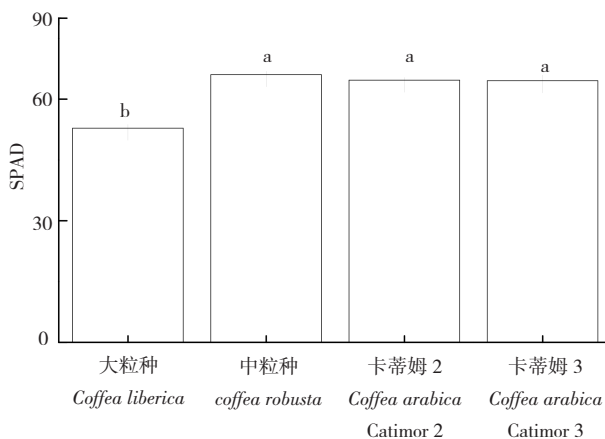


图 2 不同咖啡品种 SPAD 值的比较
Fig. 2 SPAD in leaves of the various types of coffee

2.3 4 个咖啡品种叶绿素荧光参数日变化

2.3.1 初始荧光 F_0 的日变化 F_0 为初始荧光，

代表不参与光系统 II (PSII) 光化学反应的光能辐射部分，其数值与叶绿素浓度和激发光强度有关，而与光合作用光化学反应无关^[13]。一般 F_0 越大，能量利用越低。从图 3 可以看出，大粒种和卡蒂姆 2 的 F_0 日变化趋势呈“M”型，都于 11:00 达到第 1 个峰值，分别为 330.20 和 192.20，较 9:00 分别上升 55.35% 和 12.89%，之后呈下降趋势，其中大粒种于 15:00 降至波谷 183.20，17:00 上升，之后又开始下降；卡蒂姆 2 第 2 个峰值 163.21 出现在 15:00，但上升幅度小，之后下降。中粒种和卡蒂姆 3 的 F_0 日变化呈倒“V”型，但各自的变化规律又不完全一致，这两个品种达到峰值的时间各不相同，分别在 15:00 和 17:00 达到最高值，分别为 262.60 和 199.44，较 9:00 分别上升 36.14% 和 63.27%。

除了卡蒂姆 2 外，其他 3 个品种的 F_0 在 19:00 均高于早晨水平，说明卡蒂姆 2 叶片色素吸收的能量用于光化学反应较多。卡蒂姆 2 在 11:00 以后 F_0 低于其他品种，且峰值较低，说明该品种叶片色素吸收的能量用于光化学反应较多，对强光胁迫具有较强的耐受性。在 9:00，大粒种的 F_0 值最大，说明此刻叶片色素吸收的能量用于光化学反应较其他 3 个品种少。由表 2 可知，在全天时段中，各品种的 F_0 差异性不同：11:00，4 个品种的 F_0 品种间存在显著差异；15:00，中粒种与其他 3 个品种存在显著差异；17:00，中粒种和卡蒂姆 3 与其他两个品种间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

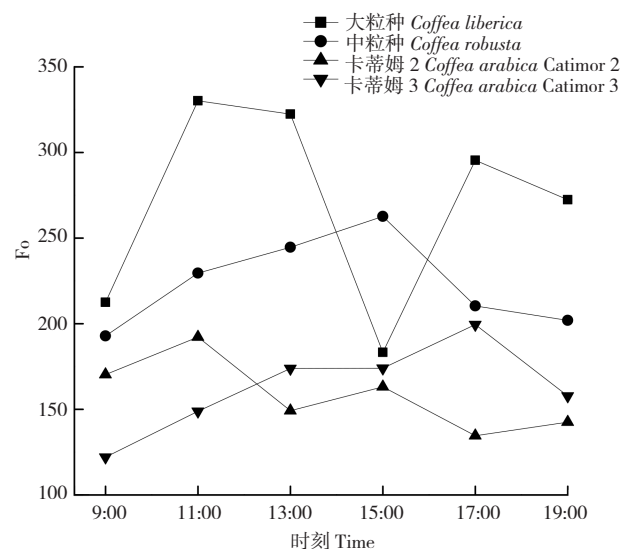


图 3 不同咖啡品种叶绿素荧光参数 F_0 的日变化
Fig. 3 Diurnal variation of F_0 in leaves of the various types of coffee

表 2 不同咖啡品种同一时刻 F_o 的差异性Table 2 Difference of F_o in the different varieties of coffee at the same time

品种 Variety	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
大粒种咖啡 <i>Coffea liberica</i>	212.56 ± 64.52a	330.20 ± 33.51a	322.40 ± 41.09a	183.20 ± 23.04b	295.40 ± 49.63a	272.38 ± 45.54a
中粒种咖啡 <i>Coffea robusta</i>	192.89 ± 28.71ab	229.56 ± 32.74b	244.70 ± 18.70b	262.60 ± 99.95a	210.30 ± 28.55b	201.89 ± 30.41b
卡蒂姆 2 <i>Coffea arabica</i> Catimor 2	170.25 ± 29.19bc	192.20 ± 21.22c	149.20 ± 21.15c	163.21 ± 23.63b	134.50 ± 27.00c	142.60 ± 25.47c
卡蒂姆 3 <i>Coffea arabica</i> Catimor 3	122.15 ± 23.11d	148.90 ± 37.93d	173.89 ± 33.24c	174.00 ± 18.47b	199.44 ± 68.79b	157.82 ± 25.69c

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant difference.

2.3.2 PS II 最大光化学效率 F_v/F_m 的日变化 由图 4 可知，4 种咖啡的 F_v/F_m 变化趋势相同，均呈倒“V”型变化，但具体的变化情况不同。在 9:00，4 个品种的 F_v/F_m 值均在 0.70 以上；大粒种的 F_v/F_m 值在 13:00 前为 0.72，降幅最小，较 9:00 的 0.74 降低 2.73%，在 15:00 急剧下降，下降为 0.60，降幅为 18.63%，之后先快速上升然后缓慢上升；中粒种的 F_v/F_m 值在 13:00 达到最低（0.65），较 9:00 的 0.77 下降 15.43%，之后缓慢上升，15:00 的 F_v/F_m 值（0.67）是 4 个品种中最高的；卡蒂姆 2 和卡蒂姆 3 的 F_v/F_m 值在 15:00 降到最低值，分别为 0.66 和 0.65，较 9:00 分别下降 11.45% 和 14.85%，15:00 后 F_v/F_m 值开始上升，卡蒂姆 2 先快速上升后上升减缓，而卡蒂姆 3 先缓慢上升再快速上升，卡蒂姆 2 和卡蒂姆 3 的 F_v/F_m 值在 19:00 高于 9:00。

从表 3 可以看出，4 个咖啡品种的 F_v/F_m 值在 9:00 和 17:00 均无显著性差异；11:00 和 19:00，大粒种的 F_v/F_m 值与卡蒂姆 3 差异显著；

13:00，大粒种的 F_v/F_m 值与其他 3 个品种差异显著；15:00，大粒种的 F_v/F_m 值与中粒种差异显著。纵观全天不同时刻，中粒种的 F_v/F_m 值与卡蒂姆 2 和卡蒂姆 3 无显著差异。

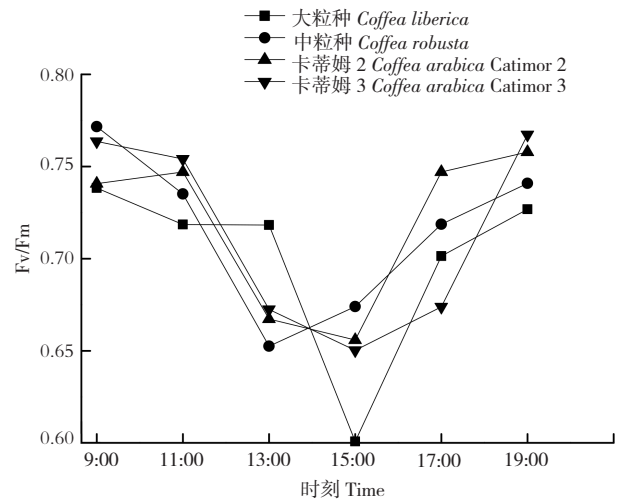


图 4 不同咖啡品种叶绿素荧光参数 F_v/F_m 的日变化
Fig. 4 Diurnal variation of F_v/F_m in leaves of the various types of coffee

表 3 不同咖啡品种同一时刻 F_v/F_m 的差异性Table 3 Difference of F_v/F_m in the different varieties of coffee at the same time

品种 Variety	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
大粒种咖啡 <i>Coffea liberica</i>	0.738 ± 0.0269a	0.719 ± 0.00786b	0.718 ± 0.0394a	0.601 ± 0.0588b	0.701 ± 0.0540a	0.727 ± 0.0491c
中粒种咖啡 <i>Coffea robusta</i>	0.772 ± 0.0331a	0.735 ± 0.0363ab	0.653 ± 0.0282b	0.674 ± 0.0133a	0.719 ± 0.0523a	0.741 ± 0.0420bc
卡蒂姆 2 <i>Coffea arabica</i> Catimor 2	0.741 ± 0.0296a	0.747 ± 0.0355ab	0.667 ± 0.0639b	0.656 ± 0.0410ab	0.747 ± 0.0362a	0.758 ± 0.0385bc
卡蒂姆 3 <i>Coffea arabica</i> Catimor 3	0.764 ± 0.0346a	0.754 ± 0.0315a	0.672 ± 0.0430b	0.650 ± 0.0714ab	0.674 ± 0.0979a	0.767 ± 0.0366ab

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant difference.

2.4 气象因子与4个咖啡品种咖啡叶绿素荧光参数的相关性分析

从表4可以看出,大粒种的 F_o 与相对湿度呈显著负相关;中粒种的 F_o 与温度、太阳辐射强度呈极显著正相关,与相对湿度呈显著负相关;

卡蒂姆2的 F_o 与相对湿度呈显著正相关;卡蒂姆3的 F_o 与温度呈极显著正相关,与太阳辐射强度呈显著正相关,与相对湿度呈极显著负相关。各品种的 F_o 与SPAD值存在一定的相关性,但未达到统计学上的显著相关关系。

表4 4个咖啡品种叶绿素荧光参数 F_o 及其环境因子的相关性
Table 4 The correlation of chlorophyll fluorescence parameters and environmental factors of four varieties of coffee

品种 Variety	温度 Temperature(°C)	SPAD	相对湿度 RH (%)	太阳辐射强度 Intensity of solar radiation (W/m ²)
大粒种咖啡 <i>Coffea liberica</i>	0.284	0.063	-0.337*	0.153
中粒种咖啡 <i>Coffea robusta</i>	0.335**	-0.094	-0.277*	0.420**
卡蒂姆2 <i>Coffea arabica</i> Catimor 2	-0.227	0.062	0.276*	0.113
卡蒂姆3 <i>Coffea arabica</i> Catimor 3	0.544**	0.166	-0.518**	0.277*

注: *表示显著相关, **表示极显著相关。

Note: * represents significantly correlation, ** represents extremely significantly correlation.

从表5可以看出,4个咖啡品种的 F_v/F_m 均与温度和太阳辐射强度呈极显著负相关,大粒种和卡蒂姆2的 F_v/F_m 与相对湿度均呈显著正相关,中粒种和卡蒂姆3的 F_v/F_m 与相对湿度均呈极显著正相关。SPAD只与卡蒂姆3呈显著负相关,

与其他3个品种均未达到统计学上的显著相关关系。可见,这4个咖啡品种均对高温、强光敏感,但是采取光保护措施不同,因此对环境的耐受性不同。

表5 4个咖啡品种叶绿素荧光参数 F_v/F_m 及其环境因子的相关性
Table 5 The correlation of chlorophyll fluorescence parameters and environmental factors of four varieties of coffee

品种 Variety	温度 Temperature(°C)	SPAD	相对湿度 RH (%)	太阳辐射强度 Intensity of solar radiation (W/m ²)
大粒种咖啡 <i>Coffea liberica</i>	-0.456**	0.003	0.373*	-0.456**
中粒种咖啡 <i>Coffea robusta</i>	-0.634**	-0.002	0.539**	-0.641**
卡蒂姆2 <i>Coffea arabica</i> Catimor 2	-0.434**	0.079	0.281*	-0.649**
卡蒂姆3 <i>Coffea arabica</i> Catimor 3	-0.566**	-0.380*	0.428**	-0.534**

注: *表示显著相关, **表示极显著相关。

Note: * represents significantly correlation, ** represents extremely significantly correlation.

2.5 不同时刻间咖啡叶绿素荧光参数的差异性

从表6可以看出, F_o 在一天不同时刻的差异性,大粒种在9:00、15:00与11:00、13:00、17:00和19:00有显著差异,中粒种在15:00与9:00、17:00、19:00有显著差异,卡蒂姆2在11:00与13:00、15:00、17:00、19:00有显

著差异,卡蒂姆3在17:00与9:00、11:00、19:00有显著差异,且这4个品种的 F_o 差异性均无相同之处。

从表7可以看出,大粒种咖啡在9:00、11:00、13:00、17:00、19:00的 F_o/F_m 无显著差异,但均与15:00有显著差异;中粒种在

表 6 同一咖啡品种不同时刻间 F_o 的差异性
Table 6 Difference of F_o in the same variety at different times

品种 Variety	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
大粒种咖啡 <i>Coffea liberica</i>	212.56 ± 64.52b	330.20 ± 33.51a	322.40 ± 41.09a	183.20 ± 23.04b	295.40 ± 49.63a	272.38 ± 45.54a
中粒种咖啡 <i>Coffea robusta</i>	192.89 ± 28.71b	229.56 ± 32.74ab	244.70 ± 18.70ab	262.60 ± 99.95a	210.30 ± 28.55b	201.89 ± 30.41b
卡蒂姆 2 <i>Coffea arabica</i> Catimor 2	170.25 ± 29.19ab	192.2 ± 21.22a	149.20 ± 21.15bcd	163.21 ± 23.63bc	134.50 ± 27.00d	142.60 ± 25.47cd
卡蒂姆 3 <i>Coffea arabica</i> Catimor 3	122.15 ± 23.11c	148.9 ± 37.93bc	173.89 ± 33.24ab	174.00 ± 18.47ab	199.44 ± 68.79a	157.82 ± 25.69b

注：同行数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same row represent significant difference.

表 7 同一咖啡品种不同时刻间 F_v/F_m 的差异性
Table 7 Difference of F_v/F_m in the same variety at different times

品种 Variety	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
大粒种咖啡 <i>Coffea liberica</i>	0.738 ± 0.0269a	0.719 ± 0.00786a	0.718 ± 0.0394a	0.601 ± 0.0588b	0.701 ± 0.0540a	0.727 ± 0.0491a
中粒种咖啡 <i>Coffea robusta</i>	0.772 ± 0.0331a	0.735 ± 0.0363ab	0.653 ± 0.0282c	0.674 ± 0.0133c	0.719 ± 0.0523b	0.741 ± 0.0420ab
卡蒂姆 2 <i>Coffea arabica</i> Catimor 2	0.741 ± 0.0296a	0.747 ± 0.0355a	0.667 ± 0.0639b	0.656 ± 0.0410b	0.747 ± 0.0362a	0.758 ± 0.0385a
卡蒂姆 3 <i>Coffea arabica</i> Catimor 3	0.764 ± 0.0346a	0.754 ± 0.0315a	0.672 ± 0.0430b	0.650 ± 0.0714b	0.674 ± 0.0979b	0.767 ± 0.0366a

注：同行数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same row represent significant difference.

9:00 与 13:00、15:00、17:00 有显著差异；卡蒂姆 2 在 9:00、11:00、17:00、19:00 与 13:00、15:00 均有显著差异；卡蒂姆 3 在 9:00、11:00、19:00 与 13:00、15:00、17:00 均有显著差异。

3 讨论

叶绿素荧光仪能够快速灵敏、非破坏性的反映植物生理状态及其与环境的关系，是一种理想的光系统探针，可以直接或间接地了解光合作用过程^[11]，提供许多有关植物光合生理变化的信息。正常情况下，叶绿素吸收的光能主要通过光合电子传递、叶绿素荧光发射和热耗散 3 种途径来耗散，这 3 种途径之间存在着此消彼长的关系^[14]。

导致 F_o 变化的因素有 PSII 反应中心的可逆失活和破坏，导致 F_o 上升， F_o 升高越多，表明植物受损伤程度越重；PSII 天线的热耗散增加，导致 F_o 降低， F_o 降低说明在叶黄素的循环过程中非辐射能量的耗散有所增强，是植物的保护机制之

一^[15]。因此 F_o 值变化可推测反应中心的状况和可能的光保护机制^[16-17]。 F_v/F_m 对环境胁迫较为敏感^[17-18]，常用 F_v/F_m 的降低来表示植物叶片的光抑制，其大小可反映植物 PSII 受伤害的程度^[19-20]。一般来说，在非胁迫条件下，大多数植物健康叶片的 F_v/F_m 在 0.7 以上，遭受胁迫的叶片 F_v/F_m 值下降^[21-22]。本研究发现，9:00—11:00，4 个咖啡品种的 F_o 均上升，较 9:00 上升幅度分别为 55.34%、19.01%、12.89% 和 21.89%，此时大粒种受到的损坏程度较大，对温度较敏感，其保护机制可能主要是光系统 II 反应中心可逆失活或损伤；在 15:00，大粒种的 F_o 急剧下降到最低值，且在这段时间大粒种的 F_v/F_m 也下降，说明大粒种发生了光抑制，这可能是增加热耗散增加的原因，15:00 后开始上升说明随着光强的减弱，光化学部分的能量减少，导致 F_o 开始回升。卡蒂姆 2 的 F_o 在 11:00—15:00 先降低在升高，说明植物在温度和太阳辐射强度达到最高值的过程中，主动采取措施降低对自身的伤害；在 15:00—17:00 降低，说明在此

时段内,热耗散增加;17:00以后有所上升,说明光照强度减弱,光反应降低,从而使 F_o 小范围上升;而 F_v/F_m 在15:00达到最低值,下降幅度为11.45%。卡蒂姆3的 F_o 在9:00—13:00上升,说明其光系统II反应中心可逆失活或损伤,而在13:00—15:00基本没变,这是由于13:00和15:00的温度、相对湿度、太阳辐射强度相差不大;15:00—17:00急速上升,只是由于17:00的相对湿度更低,而温度又有增加,而卡蒂姆3的 F_o 与温度显著正相关,与相对湿度显著负相关。4个品种的 F_v/F_m 全天变化趋势是先降低再升高,说明高温和强光下,它们的光合活性受到了抑制,随着温度和光强的降低,其光合机制得到恢复,说明之前受到的伤害是可逆的,是光合机构的保护性反应。

中粒种和卡蒂姆3的 F_o 与环境因子温度、相对湿度、太阳幅度强度相关性基本相同,卡蒂姆2的 F_o 只与环境因子相对湿度达到统计学的显著正相关,其余均未达到显著水平。这与中粒种和卡蒂姆3与环境因子的相关性不同,其原因需要进一步探讨。大粒种的 F_o 只与环境因子相对湿度达到统计学的显著负相关,其余均未达到显著水平。而4个咖啡品种的 F_v/F_m 均与温度和太阳辐射强度呈极显著正相关,大粒种和卡蒂姆2呈显著正相关,而中粒种和卡蒂姆3呈极显著正相关,且卡蒂姆3的 F_v/F_m 还与SPAD值呈显著负相关。

SPAD植物营养测定仪是通过测量叶片在两种波长范围内的透光系数来确定叶片当前叶绿素的相对数量,具有实时、快速和无损等特点。本试验结果表明,4个咖啡品种的叶片SPAD值依次为中粒种>卡蒂姆2>卡蒂姆3>大粒种,而一天中大部分时刻的 F_o 依次为大粒种>中粒种>卡蒂姆3>卡蒂姆2,这与SPAD值高低不一致,且相关性分析显示 F_o 与SPAD含量的相关性并未达到显著水平。因此荧光参数和光合色素之间的关系需进一步探讨。

4 结论

本试验通过对4种咖啡品种的叶片 F_o 和 F_v/F_m 在5月份日变化的研究发现,大粒种主要通过增加热耗散,保护光合机构;其他3种主要是通过PSII反应中心的可逆失活。卡蒂姆2的叶片

F_o 全天最低,且 F_v/F_m 降低幅度最小,表明卡蒂姆2的光合效率较高,且卡蒂姆2对温度、太阳辐射强度不敏感,因此更适应潞江坝气候。

参考文献 (References):

- [1] 向成华,朱秀志,张华,邱东海.濒危植物峨眉含笑遗传多样性研究[J].西北林学院学报,2009,24(5):66-69.
XIANG C H, ZHU X Z, ZHANG H, QIU D H. Genetic diversity of endangered plant *Michelia wilsonii* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(5): 66-69.
- [2] 李鹏民,高辉远,Reito J Strasser.快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J].植物生理与分子生物学学报,2005,31(6):559-566.
LI P M, GAO H Y, RETO J S. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamic analysis in photosynthesis study [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005,31(6):559-566.
- [3] 徐德聪,吕芳德,潘晓杰.叶绿素荧光分析技术在果树研究中的应用[J].经济林研究,2003(3):88-91. doi:10.14067/j.cnki.1003-8981.2003.03.029.
XU D C, LYU F D, PAN X J. Application of chlorophyll fluorescence analysis technique to research of fruit trees [J]. *Economic Forest Researches*, 2003(3):88-91. doi:10.14067/j.cnki.1003-8981.2003.03.029.
- [4] 朱弘,温国胜.不同竹龄毛竹冠层叶片PSII叶绿素荧光特性的比较[J].中南林业科技大学学报,2017,37(1):12-19. doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.01.003.
ZHU H, WEN G S. Comparison of PSII chlorophyll fluorescence characteristic at canopy layers in different aged *Phyllostachys edulis* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017,37(1):12-19. doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.01.003.
- [5] 习玉森,姜卫兵,文杨,韩键,张斌斌,马瑞娟.不同生长型观赏桃叶绿素荧光特性比较[J].南京农业大学学报,2017,40(2):234-241. doi:10.7685/jnau.201607032.
XI Y S, JIANG W B, WEN Y, HAN J, ZHANG B B, MA R J. Comparison of leaf chlorophyll fluorescence characteristics of different growth types of ornamental peach [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017,40(2):234-241. doi:10.7685/jnau.201607032.
- [6] 王直亮,陈静芳,林静怡,夏岩石,李荣华,郭培国,张华,李光光,郑岩松, Kadambot Siddique.不同菜心品种叶绿素荧光参数日变化的研究[J].分子植物育种,2017,15(9):3654-3659. doi: 10.13271/j.mpb.015.003654.
WANG Z L, CHAN J F, LIN J Y, XIA Y S, LI R H, GUO P G, LI G G, ZHENG Y S, KADAMBOT S. Study on diurnal changes of chlorophyll fluorescence parameters of different cultivars of flowering chinese cabbage [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(9):3654-3659. doi: 10.13271/j.mpb.015.003654.
- [7] 乔梅梅,刘翔,罗龙,吕国华.黑果枸杞叶绿素荧光参数日变化研究[J].北方园艺,2017(12):167-173. doi:10.11937/bfy.201712037.

- QIAO M M, LIU X, LUO L, LYU G H. Diurnal changes in the chlorophyll fluorescences of *Lycium ruthenicum* [J]. *Northern Horticulture*, 2017(12):167-173. doi:10.11937/bfy.201712037.
- [8] 韦阳连, 吴宪, 王雪兵, 王瑛. 龙船花属三种植物叶绿素荧光参数的日变化研究 [J]. *天津农业科学*, 2017, 23 (12) : 1-4. doi:10.3969/j.issn.1006-6500.2017.12.001.
- WEI Y L, WU X, WANG X B, WANG Y. Study on diurnal variation of chlorophyll fluorescences parameters of three *Ixora species* [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2017,23(12):1-4. doi:10.3969/j.issn.1006-6500.2017.12.001.
- [9] 苏晓琼, 王美月, 束胜, 孙锦, 郭世荣. 外源亚精胺对高温胁迫下番茄幼苗快速叶绿素荧光诱导动力学特性的影响 [J]. *园艺学报*, 2013, 40(12) : 2409-2418. doi:10.16420/j.issn.0513-353x.2013.12.011.
- SU X Q, WANG M Y, SHU S, SUN J, GUO S R. Effects of exogenous spd on the fast chlorophyll fluorescences induction dynamics in tomato seedling under high temperature stresses [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(12):2409-2418. doi:10.16420/j.issn.0513-353x.2013.12.011.
- [10] 张铭. 不同花生品种对于旱胁迫与复水的响应及其机理 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- ZHANG M. Study on response of different peanut cultivars to drought stress and rewatering and its mechanisms [D]. *Taian: Shandong Agricultural University*, 2017.
- [11] ARUNYANARK A, JOGLOY S, AKKASAENG C. Chlorophyll stability is an indicator of drought tolerance in peanut [J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2010, 194(2):113-125. doi: 10.1111/j.1439-037X.2008.00299.x.
- [12] 朱丽丽, 李井会, 宋述尧. 大白菜叶片 SPAD 值与叶绿素含量及含氮量的关系 [J]. *北方园艺*, 2010 (23) : 15-17.
- ZHU L L, LI J H, SONG S Y. Relationships between SPAD readings and contents of chlorophyll and nitrogen in chinese cabbage leaves [J]. *Northern Horticulture*, 2010(23):15-17.
- [13] 陈贻竹, 李晓萍, 夏丽, 郭俊彦. 叶绿素荧光技术在植物环境胁迫研究中的应用 [J]. *热带亚热带植物学报*, 1995 (4) : 79-86.
- CHEN Y Z, LI X P, XIA L, GUO J Y. The application of chlorophyll fluorescence technique in the study of responses of plants to enviromental stresses [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1995(4):79-86.
- [14] 吴长艾, 孟庆伟, 邹琦, 赵世杰, 王玮. 小麦不同品种叶片对光氧化胁迫响应的比较研究 [J]. *作物学报*, 2003, 29 (3) : 339-344.
- WU C A, MENG Q W, ZOU Q, ZHAO S J, WANG W. Comparative study on the photooxidative response in different wheat cultivar leaves [J]. *Acta Agronomica Siniva*, 2003, 29(3):339-344.
- [15] 温国胜, 田海涛, 张明如, 蒋文伟. 叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17 (10) : 1973-1977.
- WEN G S, TIAN H T, ZHANG M R, JIANG W W. Application of chlorophyll fluorescence analysis in forest tree cultivation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006. 17(10):1973-1977.
- [16] 应叶青, 郭璟, 魏建芬, 邹奕巧, 胡冬春, 方伟. 水分胁迫下毛竹幼苗光合及叶绿素荧光特性的响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31 (6) : 128-133. doi:10.13332/j.1000-1522.2009.06.028.
- YING Y Q, GUO J, WEI J F, ZOU Y Q, HU D C, FANG W. Photosynthetic and chlorophyll fluorescent responses of *Phyllostachys pubescens* seedlings to water deficiency stress [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009,31(6):128-133. doi:10.13332/j.1000-1522.2009.06.028.
- [17] 齐书香, 马成仓, 魏亚冉. 内蒙古高原荒漠区几种锦鸡儿属优势植物叶绿素荧光参数的比较研究 [J]. *天津师范大学学报 (自然科学版)*, 2009, 29 (4) : 61-66.
- QI S X, MA C C, WEI Y R. The comparison studies of chlorophyll fluorescence parameters of four dominant *Caragana* species in the desert area of Inner Mongolia plateau [J]. *Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition)*, 2009,29(4):61-66.
- [18] GUO Y P, ZHOU H F, ZHANG L C. Photosynthetic characteristics and protective mechanisms against photooxidation during high temperature stress in two citrus species [J]. *Scientia Horticulturae*, 2006,108(3):260-267.
- [19] PINHERO R G, PALIYATH G, YADA R Y. Chloroplast membrane organization in chilling tolerant and chilling-sensitive maize seedlings [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1999,155(6):691-698.
- [20] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论 [J]. *植物学通报*, 1999, 16 (4) : 444-448.
- ZHANG S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999,16(4):444-448.
- [21] 何炎红, 郭连生, 田有亮. 白刺叶不同水分状况下光合速率及其叶绿素荧光特性的研究 [J]. *西北植物学报*, 2005, 25 (11) : 2226-2233.
- HE Y H, GUO L S, TIAN Y L. Photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence of *Nitraria tangutorum* at different leaf water potential [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005,25(11):2226-2233.
- [22] 刘芳, 张小青, 吴三林, 付秦超. 峨眉含笑精油对大枣保鲜的研究 [J]. *长春师范大学学报*, 2008, 27 (6) : 65-69.
- LIU F, ZHANG X Q, WU S L, FU Q C. Study of the essential oil of *Michelia wilsonii* Finet et Gagnep on the preservation of *Zizyphusjujuba* Mill [J]. *Journal of Changchun Normal University(Natural Science)*, 2008, 27(6):65-69.

(责任编辑 邹移光)