

9 个茶树品种的光合特性研究

杨丽冉^{1,2}, 和明珠², 周大鹏², 蒋 宾^{1,2}, 杨广容^{2*}

1. 宜宾职业技术学院现代农业学院, 四川宜宾 644000; 2. 云南农业大学茶学院, 云南昆明 650201

摘要: 为研究不同茶树品种的光合特性差异, 在自然条件下测定云南省 9 个主要栽培茶树品种叶片的光合与生理参数, 并绘制相应光响应曲线。通过统计分析、主成分分析、聚类判别分析和相关性分析方法, 对不同茶树品种的光合特征参数进行综合评价。结果表明, 叶片净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的品种间差异较大, 其中, ‘云山’和‘云抗 10 号’的 P_n 和 T_r 显著高于其他茶树品种 ($P<0.05$), ‘天生’‘宝洪’和‘十里香’的 G_s 显著低于其他茶树品种 ($P<0.05$), ‘昌宁大叶种’的 C_i 显著低于其他茶树品种 ($P<0.05$); 在低光合有效辐射 (PAR) 条件下, 9 个茶树品种的 P_n 差异较小, 随 PAR 增大各品种表现出较大差异; G_s 和 T_r 随 PAR 增大呈现 2 种变化趋势, ‘香归银毫’表现出先上升后趋于平稳的变化趋势, 其他品种总体呈上升趋势; 各茶树品种 C_i 总体呈先急速下降后趋于平稳的变化趋势; 水分利用效率 (WUE) 和内禀水分利用效率 (iWUE) 随 PAR 增加呈先上升后下降的总体趋势, ‘昌宁大叶种’和‘香归银毫’的 WUE、iWUE 相对较高, 耐干旱能力强, 可应用于耐旱茶树品种选育; ‘云抗 10 号’‘香归银毫’和‘云山’的最大净光合速率 (P_{nmax}) 高于其他茶树品种, 光合潜力较强, 可应用于高光效茶树品种选育; ‘十里香’‘昌宁大叶种’和‘紫娟’的光饱和点 (LSP) 显著高于其他茶树品种 ($P<0.05$), 利用强光能力较强; ‘香归银毫’和‘十里香’的光补偿点 (LCP) 显著低于其他茶树品种 ($P<0.05$), 具有较强的适应弱光能力; 主成分和聚类分析将 9 个茶树品种划分为 4 个类群; 相关性分析表明, P_n 与 G_s 、 T_r 呈极显著正相关 ($P<0.01$)。

关键词: 茶树; 光合特性; 光响应曲线; 耐阴性; 耐干旱性

中图分类号: S571.1 文献标识码: A

Photosynthetic Characteristics of Nine Tea (*Camelli sinensis*) Cultivars

YANG Liran^{1,2}, HE Mingzhu², ZHOU Dapeng², JIANG Bin^{1,2}, YANG Guangrong^{2*}

1. College of Modern Agriculture, Yibin Vocational and Technical College, Yibin, Sichuan 644000, China; 2. College of Tea Science, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China

Abstract: This article aims to study the differences in the photosynthetic characteristics of different tea cultivars. The photosynthetic parameters in the leaves of nine tea cultivars were determined under field conditions, and the light response curves were drawn. The photosynthetic indicators of different tea cultivars were comprehensively evaluated by statistical analysis, principal component analysis, cluster, discrimination analysis and correlation analysis. There were great differences in net photosynthesis rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i). Among them, P_n , T_r of ‘Yunshan’ and ‘Yunkang 10#’ were significantly higher than those of the other tea cultivars ($P<0.05$), G_s of ‘Tian’, ‘Baohong’ and ‘Shilixiang’ was significantly lower than that of the other tea cultivars ($P<0.05$), C_i of ‘Changningdayezhong’ was significantly lower than that of the other tea cultivars ($P<0.05$). At the beginning of photosynthetically active radiation (PAR), differences in the P_n between tea cultivars were not distinct. However, with the increase in PAR, great differences in P_n between tea cultivars appeared. The G_s and T_r of the nine tea cultivars showed two trends with the increase of PAR, ‘Xiangguiyin hao’ showing a first upward and then trend till to be stable, while other tea cultivars showing an overall upward trend. The C_i of the nine tea cultivars decreased rapidly at first and then tended to be stable. The WUE and iWUE increased first and then decreased with the increase of PAR, and

收稿日期 2022-03-17; 修回日期 2022-04-08

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31660225); 宜宾职业技术学院院级科研项目 (No. ZRKY21YB-06, ZRKY21YB-07)。

作者简介 杨丽冉 (1996—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 茶树栽培生理生态、茶树种质资源与茶叶品质。*通信作者 (Corresponding author): 杨广容 (YANG Guangrong), E-mail: 2452739538@qq.com。

the ability to tolerance of strong drought for ‘Changningdayezhong’ and ‘Xiangguiyin hao’ was better than that of the other tea cultivars with a higher WUE and iWUE, and both of them could be used as the drought tolerance tea cultivars suitable for breeding needs. The photosynthetic potential for ‘Yunkang 10[#]’, ‘Xiangguiyin hao’, ‘Yunashan’ was better than the other tea cultivars with a higher P_{nmax} , and they could be used as the high-light-efficiency tea cultivars suitable for breeding needs. The LSP of ‘Shilixiang’, ‘Changningdayezhong’ and ‘Zijuan’ was significantly higher than that of other tea cultivars ($P < 0.05$), and had a strong ability to use strong light. The strong ability to use low light for ‘Xiangguiyin hao’ and ‘Shilixiang’ was better than that of the other tea cultivars with a lower LCP ($P < 0.05$). The nine tea cultivars were divided into four groups by principal components and cluster analysis. Correlation analysis indicated that P_n was significantly positively correlated with G_s and T_r ($P < 0.01$).

Keywords: tea plant; photosynthetic characteristic; light response curve; shade tolerance; drought tolerance

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.01.015

光合作用是植物生长发育的基础,决定着植物生产力的高低。研究植物光合性能对提高植物光合效率和科学育种具有重要的意义^[1-6]。

茶树 (*Camellia sinensis* L.) 是一种常绿叶用经济作物,在我国栽培广泛,品种丰富^[7-9]。有研究表明,光合作用为植物的生理活动提供必需能量,并作为信号分子参与茶树体内有机物质糖、茶多酚、咖啡碱等的生物合成和代谢活动,光合效率的高低直接影响茶叶产量和质量^[8-9]。研究茶树及其品种间的光合特性,可为选择高光效茶树品种,改善栽培技术措施,提高茶叶产量和质量提供理论依据^[10-11]。同时,光合特性也可作为评价茶树生产力和适应性的重要指标^[12-13]。

据中国茶叶学会数据统计,2020年我国主要产茶省茶园面积316.51万 hm^2 ,干毛茶产量298.60万t,总产值2626.58亿元。全国832个国家级贫困县中有337个县域以茶产业为脱贫产业和支柱产业^[14]。云南是茶树的中心原产地,2019年茶园种植面积超过45万 hm^2 ,综合产值超936亿元,作为云南省的特色优势产业,茶产业对云南经济发展具有重要作用^[15]。目前茶树光合作用研究主要集中于不同品种光合特性^[16-17]、逆境生理^[18-20]、净光合速率日变化和季节变化^[21-22]、种植模式对光合特性的影响^[23-24]等方面,然而,对云南生态环境条件下主要茶树栽培品种光合特征参数的系统性研究较少。鉴于此,本研究通过测定云南9个主要茶树栽培品种的光合参数和叶绿素含量,探究不同茶树品种间光合特性的差异,为云南茶树品种的栽培管理和良种培育提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验地设在位于昆明市的云南农业大学茶学

院实践教学茶园基地,茶园的地理位置、海拔高度、气候和土壤类型等信息与课题组前期研究一致^[9]。

所选植物材料为云南省主要栽培的茶树品种,包括‘云抗10号’‘紫娟’‘十里香’‘昌宁大叶种’‘宝洪’‘香归银毫’‘云山’‘天生’‘乌龙’共9种,测试叶片要求当季萌发,展叶在30~60d,叶面积不再增加,且无病虫害、无损伤、营养状况良好、长势相近的定型叶。

1.2 方法

1.2.1 光响应曲线的测定 2019年3月,选择晴天偶见云天气下,于上午9:00—12:00进行,使用Li-6400XT便携式光合系统测定光合指标,每叶记录6次数据,重复5叶。在光照强度(photosynthetically active radiation, PAR)为800 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 下先诱导15min,以LED红蓝光源,将PAR设定为1800、1700、1600、1400、1200、1000、750、550、400、200、100、50、20、10、0 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 15个梯度,CO₂浓度设置为400 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$,叶室流速500 $\mu mol/s$,测定净光合速率 [P_n , $\mu mol/(m^2 \cdot s)$]、气孔导度 [G_s , $mol/(m^2 \cdot s)$]、胞间CO₂浓度 (C_i , $\mu mol/mol$)和蒸腾速率 [T_r , $mmol/(m^2 \cdot s)$]等光合指标,并计算出WUE(叶片瞬时水分利用效率)和iWUE(内禀水分利用效率)的数值^[25-26]。

1.2.2 光合色素含量测定 采用分光光度法测定9个茶树品种的叶绿素和类胡萝卜素含量^[27],每个品种重复测定6次。

1.3 数据处理

采用SPSS 22.0软件进行多重比较和相关性分析,根据WEBB等^[28]的非直角双曲线模型方法,采用Sigma Plot 10.0科学绘图软件包(美国)分析拟合光合-光曲线,采用SIMCA 14.1软件进行主成分分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同茶树品种光合特征参数分析

对参试 9 个茶树品种的光合特征参数进行比较分析, 由表 1 可知, 9 个茶树品种的 P_n 存在明显差异, 按照大小依次为: ‘云抗 10 号’ > ‘云山’ > ‘乌龙’ > ‘昌宁大叶种’ > ‘紫娟’ > ‘香归银毫’ > ‘十里香’ > ‘宝洪’ > ‘天生’。其中 ‘云抗 10 号’ 和 ‘云山’ 的 P_n 显著高于其他茶树品种 ($P<0.05$), ‘天生’ ‘宝洪’ 和 ‘十里香’ 的 P_n 显著低于其他茶树品种 ($P<0.05$), 而三者之间的差异不显著。 G_s 表现为: ‘云抗 10 号’ > ‘乌龙’ > ‘紫娟’ > ‘云山’ > ‘香归银毫’ > ‘昌宁大叶种’ > ‘宝洪’ ‘十里香’ > ‘天生’, 其中

‘云抗 10 号’ 的 G_s 显著高于其他品种 ($P<0.05$), 是最低 ‘天生’ 的 5.8 倍, ‘乌龙’ 和 ‘紫娟’ 的 G_s 也显著高于除 ‘云抗 10 号’ 外的其他茶树品种 ($P<0.05$)。 C_i 为 ‘云抗 10 号’ > ‘紫娟’ > ‘乌龙’ > ‘云山’ > ‘香归银毫’ > ‘十里香’ > ‘宝洪’ > ‘天生’ > ‘昌宁大叶种’, 其中 ‘云抗 10 号’ ‘紫娟’ 和 ‘乌龙’ 的 C_i 显著高于其他茶树品种 ($P<0.05$), 而 ‘昌宁大叶种’ 的 C_i 显著低于其他品种 ($P<0.05$)。不同茶树品种的 T_r 存在明显差异, 其中, ‘云抗 10 号’ 和 ‘云山’ 的 T_r 显著高于其他品种 ($P<0.05$), 属于强蒸腾植物。而 ‘天生’ ‘宝洪’ 和 ‘十里香’ 的 T_r 显著低于其他品种 ($P<0.05$)。

表 1 不同茶树品种的光合特性指标

Tab. 1 Comparison of photosynthetic characteristic parameters of different tea cultivars' functional leaves

品种 Tea cultivars	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	气孔导度 $G_s/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	胞间 CO_2 浓度 $C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	蒸腾速率 $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
云山	12.28±0.36 ^a	0.17±0.02 ^e	261.94±8.46 ^b	5.53±0.61 ^a
天生	4.94±0.01 ^d	0.05±0.00 ^e	211.48±7.23 ^{cd}	1.67±0.10 ^d
云抗 10 号	13.08±0.98 ^a	0.29±0.01 ^a	307.74±7.23 ^a	6.21±0.81 ^a
宝洪	5.41±0.13 ^d	0.06±0.00 ^e	223.66±5.56 ^c	2.05±0.03 ^{cd}
十里香	5.73±0.15 ^d	0.06±0.00 ^e	227.93±8.69 ^c	2.18±0.04 ^{cd}
乌龙	10.63±0.37 ^b	0.21±0.03 ^b	301.29±6.58 ^a	3.52±0.32 ^b
紫娟	9.43±0.26 ^c	0.19±0.03 ^{bc}	302.72±9.57 ^a	3.36±0.37 ^b
香归银毫	9.19±1.04 ^c	0.12±0.03 ^d	256.65±19.11 ^b	3.42±0.38 ^b
昌宁大叶种	10.49±0.29 ^b	0.09±0.01 ^d	202.80±10.62 ^d	2.57±0.19 ^c

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.2 不同茶树品种光响应曲线分析

2.2.1 不同茶树品种 P_n 的光响应曲线比较 9 个茶树品种的 P_n 在 PAR 由 0~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时都随着 PAR 的增强而基本呈线性上升趋势 (图 1); 之后茶树品种的 P_n 随 PAR 增加表现不一, ‘宝洪’ 和 ‘乌龙’ 的光响应曲线在 PAR 为 550 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 后基本趋于平稳; 而 ‘云抗 10 号’ ‘香归银毫’ ‘云山’ ‘云山’ 和 ‘紫娟’ 在 550 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之后 P_n 继续上升至最高点并不再增加; ‘十里香’ 和 ‘昌宁大叶种’ 直到 PAR 为 1800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时才趋于平稳。1800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 后 9 个茶树品种均处于一个平台期, 无明显光抑制现象。此外, 9 个茶树品种的 P_n 差异较大, ‘云抗 10 号’ 和 ‘香归银毫’ 的 P_n 明显高于其他 7 个品种, 而 ‘宝洪’ 较早就达到饱和光强, P_n 也低于其他品种。

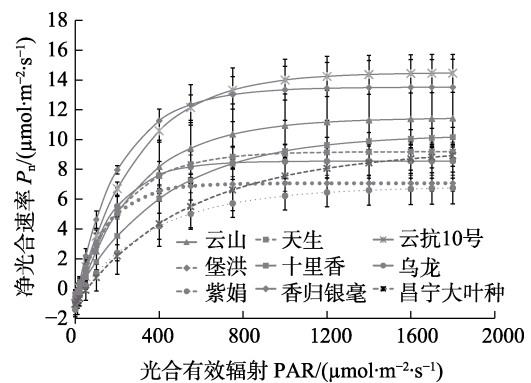


图 1 9 个茶树品种 P_n 的光响应曲线

Fig. 1 P_n -light response curve of nine varieties of tea cultivars

2.2.2 不同茶树品种 G_s 、 T_r 的光响应曲线比较 9 个茶树品种的 G_s 随 PAR 的变化呈现 2 种变化趋势 (图 2), 除 ‘香归银毫’ 外, 8 个茶树品种的 G_s 随 PAR 的升高总体呈上升趋势, 1600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

后上升趋势明显，而‘香归银毫’逐渐趋于平稳；‘云抗 10 号’和‘香归银毫’的 G_s 明显高于其他 7 个品种。9 个茶树品种蒸腾速率 (T_r) 的光响应曲线与 G_s 的光响应曲线变化趋势基本相同 (图 3)，说明二者相关性很高， G_s 是影响植物蒸腾的主要因子之一。

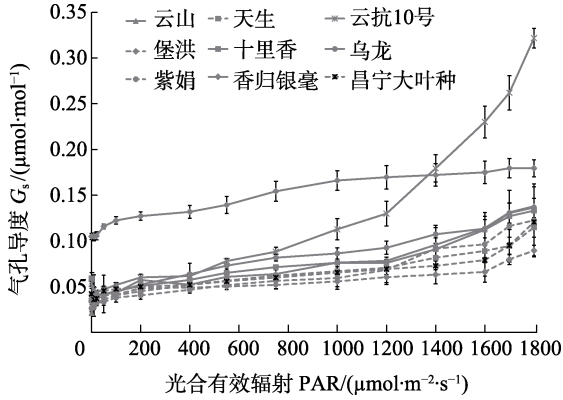


图 2 9 个茶树品种 G_s 的光响应曲线

Fig. 2 G_s -light response curve of nine varieties of tea cultivars

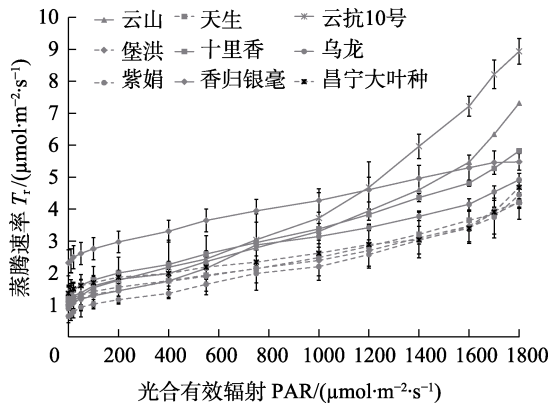


图 3 9 个茶树品种 T_r 的光响应曲线

Fig. 3 T_r -light response curve of nine varieties of tea cultivars

2.2.3 不同茶树品种 C_i 的光响应曲线比较 由图 4 可知，随着 PAR 的增加，9 个茶树品种的 C_i 总体呈先急速下降后趋于平稳的变化趋势，PAR 在 0~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围内，下降速度较快，可能与此阶段 G_s 较小有关，叶片光合作用消耗 CO_2 的量要大于从外界吸收 CO_2 的量。同样地，‘云抗 10 号’的 C_i 明显高于其他茶树品种。

2.2.4 不同茶树品种 WUE、iWUE 的光响应曲线比较 由图 5、图 6 可知，9 个茶树品种的 WUE 和 iWUE 随 PAR 的增加均呈先上升后下降的总体趋势。当 PAR 为 0~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时，各茶树品

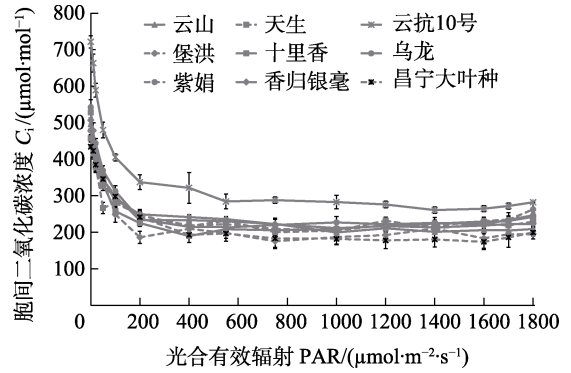


图 4 9 个茶树品种 C_i 的光响应曲线

Fig. 4 C_i -light response curve of nine varieties of tea cultivars

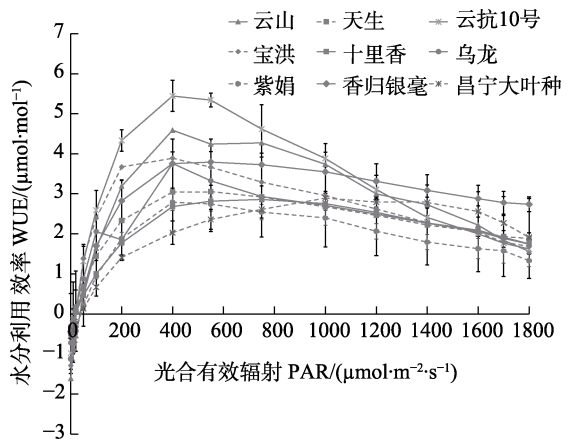


图 5 9 个茶树品种 WUE 的光响应曲线

Fig. 5 WUE-light response curve of nine varieties of tea cultivars

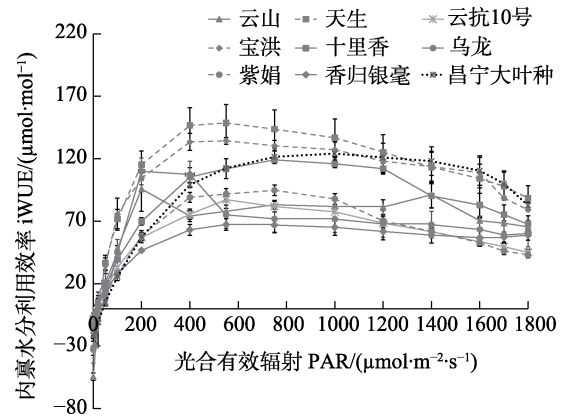


图 6 9 个茶树品种 iWUE 的光响应曲线

Fig. 6 iWUE-light response curve of nine varieties of tea cultivars

种的 WUE 增长最快。‘云抗 10 号’‘云山’‘宝洪’‘乌龙’和‘紫娟’在 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时 WUE 达到峰值；‘香归银毫’‘天生’和‘十里香’在 PAR 为 550 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时 WUE 达到峰值，此后呈下降趋势；‘昌宁大叶种’在 PAR 为 1000 $\mu\text{mol}/$

($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)时 WUE 达到峰值; 总体而言, ‘香归银毫’和 ‘昌宁大叶种’的 WUE 相对较高, ‘紫娟’的 WUE 较低。此外, ‘云山’和 ‘乌龙’的 iWUE 在 PAR 为 0~200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时增长最快, 其余 7 个茶树品种的 iWUE 在 0~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时增长最快; ‘云山’和 ‘乌龙’在 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时 iWUE 达到峰值, ‘天生’和 ‘宝洪’在 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时 iWUE 达到峰值; ‘云抗 10 号’和 ‘昌宁大叶种’分别在 PAR 为 550 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 1000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时 iWUE 达到峰值, 此后呈下降趋势; ‘天生’‘昌宁大叶种’和 ‘宝洪’的 iWUE 相对较高, ‘云抗 10 号’和 ‘紫娟’的 iWUE 较低。

2.3 不同茶树品种光响应曲线的特征参数比较

2.3.1 最大净光合速率 ($P_{n\max}$) 和暗呼吸速率 (R_d) 由表 2 可知, 在 CO_2 浓度为 400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 时 9 个茶树品种间的 $P_{n\max}$ 存在明显差异, 表现为 ‘宝洪’的 $P_{n\max}$ 显著低于其他品种 ($P < 0.05$), 仅为 7.24 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。‘云抗 10 号’的 $P_{n\max}$ 显著高于其他品种 ($P < 0.05$), 为 14.50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是最低 ‘宝洪’的 2 倍。总体来看, ‘云抗 10 号’‘香

归银毫’和 ‘云山’的 $P_{n\max}$ 高于其他茶树品种, 说明其光合潜力较强。9 个茶树品种的 R_d 也存在一定差异, ‘云抗 10 号’的 R_d 显著高于其他品种 ($P < 0.05$), ‘十里香’的 R_d 最低, 与 ‘紫娟’差异不显著。

2.3.2 光补偿点 (LCP) 和光饱和点 (LSP) 由表 2 可知, 9 个茶树品种 LSP 的高低依次为: ‘十里香’ > ‘昌宁大叶种’ > ‘紫娟’ > ‘云山’ > ‘云抗 10 号’ > ‘天生’ > ‘香归银毫’ > ‘宝洪’ > ‘乌龙’, 在 408.93~1029.07 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间, 其中 ‘十里香’ ‘昌宁大叶种’和 ‘紫娟’的 LSP 显著高于其他茶树品种 ($P < 0.05$)。对比 9 个茶树品种的 LCP, ‘香归银毫’的 LCP 最低, 为 18.69 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, ‘十里香’与 ‘香归银毫’无显著差异。

2.3.3 表观量子效率 (AQY) 9 个茶树品种 AQY 的高低依次为: ‘香归银毫’ ‘十里香’ > ‘云抗 10 号’ ‘宝洪’ ‘乌龙’ > ‘云山’ ‘天生’ > ‘昌宁大叶种’ > ‘紫娟’, ‘香归银毫’和 ‘十里香’的 AQY 为 0.06 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 是 AQY 最低 ‘紫娟’的 6 倍 (表 2)。

表 2 9 个茶树品种的光响应特征参数

Tab. 2 Parameters of light response characteristic to light intensity of nine varieties of tea cultivars

品种 Tea cultivars	最大净光合速率 $P_{n\max}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	暗呼吸速率 $R_d/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光饱和点 $LSP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光补偿点 $LCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	表观量子效率 $AQY/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$
云山	12.44±1.09 ^b	1.04±0.03 ^{bc}	854.54±27.56 ^b	37.93±5.29 ^{bc}	0.04±0.01 ^{ab}
天生	9.57±0.05 ^{cd}	0.83±0.06 ^c	529.70±35.33 ^{cd}	20.02±2.22 ^{ef}	0.04±0.00 ^b
云抗 10 号	14.50±0.93 ^a	2.56±0.87 ^a	691.16±24.24 ^{bc}	44.69±8.86 ^b	0.05±0.01 ^{ab}
宝洪	7.24±0.26 ^e	1.27±0.32 ^b	427.25±98.49 ^d	21.96±4.15 ^{def}	0.05±0.01 ^{ab}
十里香	10.64±0.46 ^c	0.41±0.08 ^d	1029.07±110.76 ^a	18.72±1.40 ^f	0.06±0.00 ^a
乌龙	9.05±0.30 ^{cde}	1.02±0.24 ^{bc}	408.93±49.66 ^d	58.11±13.59 ^a	0.05±0.01 ^{ab}
紫娟	7.91±0.93 ^{de}	0.44±0.03 ^d	971.81±296.52 ^a	32.06±4.31 ^{cde}	0.01±0.00 ^d
香归银毫	13.53±2.21 ^{ab}	0.85±0.12 ^c	515.11±112.07 ^{cd}	18.69±2.73 ^f	0.06±0.01 ^a
昌宁大叶种	9.64±1.14 ^{cd}	0.88±0.12 ^c	1027.97±65.78 ^a	33.04±8.57 ^{bcd}	0.03±0.01 ^c

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).

2.4 主成分分析和聚类分析

基于 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、WUE 和 iWUE 6 个光合参数指标对 9 个茶树品种进行主成分分析 (图 7A), 由图 7A 可知, 第一主成分对于总方差的贡献率为 67.9%, 第二主成分的贡献率为 19.9%, 二者累加达到 87.8%, 说明前 2 个主成分代表了数据的大部分信息, 可以作为主成分分析的依据。采用欧氏距离—离差平方和法基于 6 个光合特征参数对 9 个茶树品种进行系统聚类分析 (图 7B),

可以发现, 2 种判别方式表现出相似的特征, 9 个茶树品种共分为 4 类, I 类为 ‘昌宁大叶种’, 为较高光合速率、中等气孔阻力、低气孔导度、中等蒸腾速率、高水分利用效率型; II 类包括 ‘十里香’ ‘天生’ 和 ‘宝洪’, 为低光合速率、低气孔阻力气孔导度、低蒸腾速率、较高水分利用效率型; III 类为 ‘云抗 10 号’, 为高光合速率、高气孔阻力气孔导度、高蒸腾速率、低水分利用效率型; IV 类包括 ‘香归银毫’ ‘紫娟’ ‘云山’ 和

‘乌龙’，为中等光合速率、中等蒸腾速率、较高气孔阻力气孔导度、除‘紫娟’外为中等水分利用效率型。此外，由图 7A 可知，WUE 和 iWUE

位于‘昌宁大叶种’附近，这说明其在‘昌宁大叶种’中相对较高； P_n 、 T_r 和 G_s 在‘云抗 10 号’附近，其在‘云抗 10 号’中相对较高。

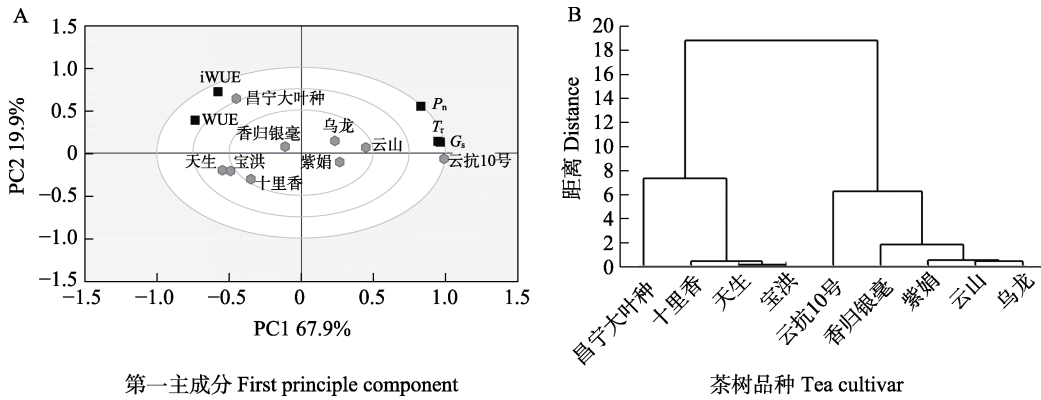


图 7 9 个茶树品种光合参数主成分分析和聚类分析

Fig. 7 Principal component and cluster analysis based on parameters of light response characteristic to light intensity of nine varieties of tea cultivars

2.5 不同茶树品种的光合色素含量分析

采用分光光度法测定了 9 个茶树品种的叶绿素和类胡萝卜素含量 (表 3)。由表 3 可知，‘乌龙’‘云抗 10 号’和‘云山’的 Chla 含量显著高于其他品种 ($P<0.05$)，‘昌宁大叶种’的 Chla 含量最低，仅为 2.51 mg/g；‘云抗 10 号’和‘乌龙’的 Chlb 含量显著高于其他品种，‘香归银毫’、‘紫娟’的 Car 含量显著高于其他品种 ($P<0.05$)，‘昌宁大叶种’的 Car 含量最低，仅为 0.30 mg/g；叶绿素总量表现为‘乌龙’>‘云抗 10 号’>‘云山’>‘香归银毫’>‘紫娟’>‘十里香’>‘宝洪’>‘天生’>‘昌宁大叶种’，9 个茶树品种的 Chla/Chlb 值在 2.42~3.10 之间，其中 Chla/Chlb 值大于 2.9 的有‘天生’和‘昌宁大叶种’，其余茶树品种的 Chla/Chlb 值均小于 2.9。

2.6 不同茶树品种光合参数指标的相关性分析

9 个茶树品种各项光合气体交换参数的相关性分析结果表明 (表 4)， P_n 与 G_s 、 T_r 呈极显著正相关； G_s 与 C_i 、 T_r 、Chla、Chlb、Chl 呈极显著正相关，与 WUE 呈极显著负相关； C_i 与 T_r 、Chla、Chlb、Chl 呈极显著正相关，与 WUE 呈极显著负相关； T_r 与 Chla、Chlb、Chl 呈极显著正相关；iWUE 与 Chlb 呈极显著负相关，与 Chla/b 呈极显著正相关；Chla 与 Chlb、Chl 呈极显著正相关。WUE 与光合色素含量相关关系不显著。

3 讨论

光合作用是作物生长的能量来源，为作物产量的形成提供了重要基础^[6, 17, 29]。茶树是叶用植物，90%以上的生物产量均来自叶片光合作用，

表 3 9 个茶树品种的光合色素含量

Tab. 3 Photosynthetic pigment content comparisons of nine varieties of tea cultivars

品种 Tea cultivars	叶绿素 a Chla/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chlb/(mg·g ⁻¹)	类胡萝卜素 Car/(mg·g ⁻¹)	叶绿素总量 Chl/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b Chla/b
云山	3.22±0.53 ^{abc}	1.17±0.30 ^{ab}	0.34±0.03 ^{bc}	4.38±0.80 ^{abc}	2.75±0.34 ^{ab}
天生	2.63±0.27 ^{cd}	0.85±0.20 ^{bc}	0.31±0.07 ^c	3.48±0.47 ^{cd}	3.10±0.51 ^a
云抗 10 号	3.27±0.32 ^{ab}	1.28±0.28 ^a	0.45±0.07 ^{ab}	4.55±0.60 ^{ab}	2.56±0.36 ^{ab}
宝洪	2.58±0.35 ^{cd}	1.07±0.18 ^{abc}	0.34±0.06 ^{bc}	3.65±0.36 ^{bcd}	2.42±0.55 ^b
十里香	2.63±0.51 ^{cd}	1.04±0.17 ^{abc}	0.42±0.08 ^{abc}	3.67±0.66 ^{bcd}	2.53±0.26 ^b
乌龙	3.60±0.22 ^a	1.27±0.02 ^a	0.37±0.07 ^{abc}	4.87±0.20 ^a	2.83±0.22 ^{ab}
紫娟	2.85±0.29 ^{bcd}	0.99±0.10 ^{abc}	0.46±0.04 ^a	3.84±0.38 ^{bcd}	2.88±0.02 ^{ab}
香归银毫	3.03±0.22 ^{abc}	1.12±0.09 ^{abc}	0.48±0.07 ^a	4.15±0.31 ^{abc}	2.70±0.04 ^{ab}
昌宁大叶种	2.51±0.08 ^d	0.81±0.03 ^c	0.30±0.05 ^c	3.32±0.11 ^d	3.09±0.02 ^{ab}

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

表 4 光合参数的相关性
Tab. 4 Correlation of photosynthetic parameters

光合参数 Photosynthetic Parameter	P_n	G_s	C_i	T_r	WUE	iWUE	Chla	Chlb	Chl	Chla/b
P_n	1									
G_s	0.85**	1								
C_i	0.64	0.92**	1							
T_r	0.89**	0.87**	0.70*	1						
WUE	-0.35	-0.75*	-0.83**	-0.50	1					
iWUE	-0.13	-0.40	-0.49	-0.56	0.49	1				
Chla	0.69*	0.80**	0.81**	0.71*	-0.49	-0.42	1			
Chlb	0.52	0.72*	0.76*	0.71*	-0.48	-0.69*	0.86**	1		
Chl	0.66	0.80**	0.82**	0.73*	-0.50	-0.52	0.98**	0.93**	1	
Chla/b	0.07	-0.13	-0.22	-0.24	0.16	0.68*	-0.13	-0.62	-0.29	1

注: *表示显著相关 ($P < 0.05$); **表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

就茶树育种工作而言, 提高茶树光合效率及光合产物转化效率是促进茶叶提质增效的最理想途径^[8-9, 11]。茶树的光合能力既受环境影响, 更受遗传因素制约, 在相同的环境条件下, 茶树品种基因型是决定光合能力的主要原因^[30]。本研究比较了云南 9 个主要栽培茶树品种的光合特征参数, 发现 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ PAR 下, 9 个茶树品种的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 等光合参数存在显著差异, 表明茶树光合性状在品种间存在遗传变异, 这与高光效甘薯和玉米筛选的研究结果一致^[6, 31], 说明可将光合参数作为筛选高光效茶树品种的参考指标。

前人研究认为, 植物的光合速率在到达最高点后有 2 种变化趋势, 一种是光强继续增加, 光合速率保持不变, 另一种是光强继续增加, 光合速率反而降低^[32]。本研究中, 9 个茶树品种的光合—光响应曲线都属于第一种, 且存在“快速响应阶段”和“平稳阶段”2 个过程, 但各茶树品种 2 个阶段对应的 PAR 范围有所差异。‘宝洪’“快速响应阶段”对应的 PAR 为 0~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 较早就达到饱和光强, P_n 也低于其他品种; ‘乌龙’和‘天生’对应的 PAR 为 0~550 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 此后 3 个茶树品种的 P_n 增幅逐渐变小, 处于一个“平稳阶段”。其他 6 个茶树品种“快速响应阶段”的 PAR 为 0~750 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 此后增幅减小达到“平稳阶段”, ‘云抗 10 号’和‘香归银毫’的 P_n 明显高于其他 7 个品种。各茶树品种的 P_n 随 PAR 升至最高点后都能稳定下来, 并未出现明显的光抑制现象, 说明本研究的

9 个茶树品种具有较强的耐强光能力^[33]。此外, 9 个茶树品种的 G_s 在低 PAR [0~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 条件下, 随 PAR 的增幅加大, 表明各茶树品种在弱光环境下将作为光合反应底物的 CO_2 迅速消耗, 这也解释了为何各茶树品种的 C_i 在低 PAR 条件下迅速下降, 这是因为茶树为了补充反应底物进而提高茶树叶片与大气之间的气体交换速率, 同时造成了 T_r 上升^[33]。随着 PAR 的继续增加, 各茶树品种 G_s 、 C_i 和 T_r 的变化趋势表现出较大差异, 说明受遗传因素的影响, 在相同环境情况下, 不同茶树品种表现出不同的环境适应机制。此外, 逆境胁迫研究认为 P_n 的下降伴随着 G_s 和 C_i 的降低, 光合作用的下降则主要受气孔限制^[34]。本研究发现 P_n 与 G_s 和 C_i 的变化趋势并不一致, 提示茶树光合作用的改变可能受非气孔限制, 具体原因需要进一步研究。

高水分利用效率是作物抗干旱能力的重要指标, 茶树水分利用效率不仅受众多外界因素的影响, 也与自身的遗传基础密切相关^[17]。相同条件下, WUE 和 iWUE 高的茶树品种更能适应干旱环境且具有更高的生长潜力^[17, 35]。本研究中, PAR 在 0~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 范围内, ‘云抗 10 号’和‘云山’的 WUE 高于其他茶树品种, 说明在低 PAR 条件下这 2 个茶树品种的抗干旱能力较强; 随着 PAR 增强各树种的 WUE 总体呈下降趋势, 但‘香归银毫’和‘昌宁大叶种’依然维持较高 WUE。同样, PAR 在 0~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 范围内, ‘天生’和‘宝洪’的 iWUE 较高, 随着 PAR 增强, 二者

的 $iWUE$ 均高于其他茶树品种。总体而言‘香归银毫’‘昌宁大叶种’‘天生’和‘宝洪’的水分利用效率较高,可作为抗干旱能力较好的茶树品种开展选育。

通过光响应模型计算植物的 $P_{n\max}$ 、LSP、LCP、 R_d 和 AQY 等光合参数是研究植物光合特性的重要途径^[36]。 $P_{n\max}$ 反映了植物叶片的最大光合能力,是代表植物光合潜能的重要参数^[37],通过比较分析可知,9 个茶树品种的耐强光能力主要分为 3 个等级,即光合潜能较大的‘云抗 10 号’‘香归银毫’和‘云山’,光合潜能稍低的‘十里香’‘天生’‘乌龙’和‘昌宁大叶种’,以及光合潜能最低的‘宝洪’和‘紫娟’。LSP 代表了植物适应强光的能力,LSP 越高的植物可在越强的光下正常生长发育^[38]。本研究中,9 个茶树品种 LSP 的高低依次为:‘十里香’>‘昌宁大叶种’>‘紫娟’>‘云山’>‘云抗 10 号’>‘天生’>‘香归银毫’>‘宝洪’>‘乌龙’,且‘十里香’‘昌宁大叶种’和‘紫娟’的 LSP 显著高于其他茶树品种 ($P<0.05$),说明其耐强光能力较强。LCP、 R_d 和 AQY 是植物利用弱光能力的重要参数,即可代表植物的耐阴性能力^[39]。LCP 和 R_d 越低、AQY 越高,说明植物利用弱光的能力越强,耐阴能力越强^[1, 40-41],综合 3 个指标发现,‘十里香’为耐弱光能力强、呼吸消耗少和对光的利用效率高类型;‘香归银毫’为耐弱光能力较强、呼吸消耗较少和对光的利用效率高类型;‘昌宁大叶种’为耐弱光能力弱、呼吸消耗少和对光的利用效率低类型,其他 6 个茶树品种的 LCP、 R_d 和 AQY 也均存在差异,说明茶树光合特征参数在品种间表现出了较高的多样性。叶绿素是植物的光合色素,具有吸收和传递光量子的作用,一般来说,叶绿素含量高、Chla/Chlb 小于 2.9 的植物,具有较强的耐阴性^[5, 42]。本研究中叶绿素含量高低排序为:‘乌龙’>‘云抗 10 号’>‘云山’>‘香归银毫’>‘紫娟’>‘十里香’>‘宝洪’>‘天生’>‘昌宁大叶种’,Chla/Chlb 为:‘天生’>‘昌宁大叶种’>‘紫娟’>‘乌龙’>‘云山’>‘香归银毫’>‘云抗 10 号’>‘十里香’>‘宝洪’,其中‘天生’和‘昌宁大叶种’的叶绿素含量最低,Chla/Chlb 高于 2.9,与 LCP、 R_d 和 AQY 的判定结果存在差异。因此,仅由叶绿素含量高低是不能判断茶树耐阴性的,应结合光合指标进行综合判定。根据 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、WUE 和 $iWUE$

6 个指标将 9 个茶树品种分为 4 类,可以较好地反映不同茶树品种的综合性状和自然类型。对 9 个茶树品种的光合参数进行相关性分析,发现 P_n 与 G_s 、 T_r 呈极显著正相关,说明茶树自身的生理状态是影响 P_n 的主要因素。

综上,本研究 9 个茶树品种的耐阴能力、耐强光能力、抗干旱能力和光合潜能等光合特性既具有相似性也存在物种特异性。除‘云抗 10 号’和‘乌龙’外,其他品种对弱光利用能力较强,具有较强的适应弱光的能力,‘香归银毫’的耐阴性较强,在茶园管理上可以采取适度遮阴来促进茶树光合作用,提高茶叶品质。‘昌宁大叶种’和‘紫娟’耐强光能力较强。‘十里香’既有最强的耐阴能力,又能适应较强的阳光辐射,对光适应的生态幅度较宽,因此在生产上可以考虑在全光照条件下栽培或者在经济林果中进行套种,提高茶园的综合效益。‘昌宁大叶种’和‘香归银毫’更能适应干旱环境且具有更高的生长潜力,可应用于茶树耐旱品种选育,‘云抗 10 号’的光合潜能最大,可应用于高光效茶树品种选育。

参考文献

- [1] 沈立明,戴中武,钟惠,代晓雨,翟俊文,吴沙沙. 3 种独蒜兰属植物的光合特性[J]. 热带作物学报, 2021, 42(5): 1355-1360.
SHEN L M, DAI Z W, ZHONG H, DAI X Y, ZHAI J W, WU S S. Photosynthesis characteristics of three *Pleione* species[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(5): 1355-1360. (in Chinese)
- [2] CALVIN M. Photosynthesis as a resource for energy and materials[J]. Photochemistry & Photobiology, 2010, 23(6): 425-444.
- [3] MCDOWELL S. Photosynthetic characteristics of invasive and noninvasive species of *Rubus* (Rosaceae)[J]. American Journal of Botany, 2002, 89(9): 1431-1438.
- [4] 莫凌,姚月锋,白坤栋,顾大彤,曾丹娟,黄玉清. 茶树新品种桂绿 1 号光合特性初步研究[J]. 茶叶科学, 2015, 35(5): 443-448.
MO L, YAO Y F, BAI K D, GU D X, ZENG D J, HUANG Y Q. A preliminary study on photosynthetic characteristics for new tea cultivar Guiluyu-I[J]. Journal of Tea Science, 2015, 35(5): 443-448. (in Chinese)
- [5] 陆鑫眉,阎光宇,杜晓娜,卞阿娜. 8 种园林植物耐阴性与光合特性的研究[J]. 热带作物学报, 2011, 32(7): 1249-1254.

- LU L M, YAN G Y, DU X N, BIAN A N. Photosynthetic and shade-tolerance characteristics of eight ornamental plants[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(7): 1249-1254. (in Chinese)
- [6] 苏春桃, 杨浩, 高秀梅, 朱宏波. 高光效甘薯种质筛选及光合特性分析[J]. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2462-2466. SU C T, YANG H, GAO X M, ZHU H B. Screening of high-light-efficiency sweet potato germplasm and analysis of photosynthetic characteristics[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(12): 2462-2466. (in Chinese)
- [7] 李治鑫, 李鑫, 范利超, 韩文炎. 高温胁迫对茶树叶片光合系统的影响[J]. 茶叶科学, 2015, 35(5): 415-422. LI Z X, LI X, FANG L C, HAN W Y. Effect of heat stress on the photosynthesis system of tea leaves[J]. Journal of Tea Science, 2015, 35(5): 415-422. (in Chinese)
- [8] 俞少娟, 王婷婷, 陈寿松, 林宏政, 金心怡. 光对茶树生产与茶叶品质影响及其应用研究进展[J]. 福建茶叶, 2016, 38(5): 3-5. YU S J, WANG T T, CHEN S S, LIN H Z, JIN X Y. Effects of light on tea production and tea quality and its application[J]. Tea in Fujian, 2016, 38(5): 3-5. (in Chinese)
- [9] 杨丽冉, 杨广容, 马会杰, 李家华, 吕才有, 文勤枢. 云南茶树品种光合特性及其影响因素的研究[J]. 西南农业学报, 2021, 34(1): 19-26. YANG L R, YANG G R, MA H J, LI J H, LV C Y, WEN Q S. Photosynthetic characteristics and its influential factors of tea cultivars in Yunnan province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(1): 19-26. (in Chinese)
- [10] 孙君, 朱留刚, 林志坤, 张文锦. 茶树光合作用研究进展[J]. 福建农业学报, 2015, 30(12): 1231-1237. SUN J, ZHU L G, LIN Z K, ZHANG W J. Research progression on photosynthesis of tea plants[J]. Fujian Journal of Agricultural Science, 2015, 30(12): 1231-1237. (in Chinese)
- [11] 张兰, 魏吉鹏, 沈晨, 颜鹏, 张丽平, 李鑫, 韩文炎. 秋茶光合作用与品质成分变化的分析[J]. 茶叶科学, 2018, 38(3): 271-280. ZHANG L, WEI J P, SHEN C, YAN P, ZHANG L P, LI X, HAN W Y. Analysis of the photosynthesis and quality components changes in autumn tea[J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(3): 271-280. (in Chinese)
- [12] 王飞权, 吴淑娥, 冯花, 赵升云, 张见明, 洪永聪, 曾志军, 陈安夏, 游晓冰, 罗盛财. 部分武夷名丛叶片解剖结构特性研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(4): 130-135. WANG F Q, WU S E, FENG H, ZHAO S Y, ZHANG J M, HONG Y C, ZENG Z J, CHEN A X, YOU X B, LUO S C. The characteristics studies of tea leaves' anatomical structure on parts of Wuyi Ming Cong tea[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(4): 130-135. (in Chinese)
- [13] 王飞权, 李纪艳, 冯花, 罗盛财, 林美菁, 李少华, 张见明, 张渤, 陈荣冰. 武夷名丛茶树种质资源叶片解剖结构分析[J]. 热带作物学报, 2019, 40(12): 2375-2389. WANG F Q, LI J Y, FENG H, LUO S C, LIN M J, LI S H, ZHANG J M, ZHANG B, CHEN R B. Analysis of leaf anatomical structure of Wuyi Mingcong tea germplasm resources[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(12): 2375-2389. (in Chinese)
- [14] 梅宇. 2020 年度中国茶业扶贫发展报告[J]. 中国茶叶加工, 2021(1): 25-31. MEI Y. 2020 annual report on the role of China's tea industry in poverty alleviation campaign[J]. China Tea Processing, 2021(1): 25-31. (in Chinese)
- [15] 闻长城. 云南茶产业供应链构建关键技术及发展路径研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021. WEN C C. Research on the key technology and development path of Yunnan tea industry supply chain construction[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [16] 刘建福, 钟书淳, 黄安民, 黄寿生, 王明元, 唐源江, 刘春冬, 张斌, 陈钦, 傅建卿, 陈汝顶. 武夷岩茶光合特性及品质成分比较[J]. 热带作物学报, 2014, 35(6): 1148-1152. LIU J F, ZHON S C, HUANG A M, HUANG S S, WANG M Y, TANG Y J, LIU C D, ZHANG B, CHEN Q, FU J Q, CHEN R D. Comparison of photosynthetic characteristics and biochemical components of Wuyi (Oolong) rock tea[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(6): 1148-1152. (in Chinese)
- [17] 郭春芳, 孙云, 陈常颂, 陈荣冰, 张木清. 茶树品种光合与水分利用特性比较及聚类分析[J]. 作物学报, 2008(10): 1797-1804. GUO C F, SUN Y, CHEN C S, CHEN R B, ZHANG M Q. Comparison and cluster analysis of photosynthetic characters and water use efficiency in tea (*Camellia sinensis*) cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008(10): 1797-1804. (in Chinese)
- [18] 林郑和, 钟秋生, 陈常颂, 陈志辉, 游小妹. 不同供钾水平对茶树幼苗叶片光合作用的影响[J]. 茶叶科学, 2013, 33(3): 261-267. LIN Z H, ZHON Q S, CHEN C S, CHEN Z H, YOU X M. Effects of different potassium level on leaf photosynthesis of tea seedling[J]. Journal of Tea Science, 2013, 33(3): 261-267. (in Chinese)
- [19] 林郑和, 钟秋生, 陈常颂, 游小妹, 陈志辉. 缺氮条件下不同品种茶树叶片光合特性的变化[J]. 茶叶科学, 2013, 33(6): 500-504. LIN Z H, ZHON Q S, CHEN C S, YOU X M, CHEN Z H. Photosynthetic characteristic of different tea cultivars in re-

- sponse to nitrogen deficiency[J]. Journal of Tea Science, 2013, 33(6): 500-504. (in Chinese)
- [20] 郭春芳, 孙云, 张木清. 土壤水分胁迫对茶树光合作用-光响应特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008(6): 1413-1418.
- GUO C F, SUN Y, ZHANG M Q. Effect of soil water stress on photosynthetic light response curve of tea plant (*Camellia sinensis*)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008(6): 1413-1418. (in Chinese)
- [21] 邹瑶, 陈盛相, 许燕, 谭礼强, 唐茜. 茶树光合特性季节性变化研究[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(2): 210-216.
- ZOU Y, CHEN S X, XU Y, TAN L Q, TANG Q. Seasonal changes of photosynthetic characteristics in tea cultivars[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, 36(2): 210-216. (in Chinese)
- [22] 柯世省, 金则新, 李钧敏. 浙江天台山茶树光合日变化及光响应[J]. 应用与环境生物学报, 2002(2): 159-164.
- KE S X, JIN Z X, LI J M. Diurnal variations of photosynthesis and response to light of *Camellia sinensis* leaves in Tiantai mountain in Zhejiang China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002(2): 159-164. (in Chinese)
- [23] 王婉, 沈汉, 舒骏, 虞木奎, 成向荣, 吴统贵. 林茶复合条件下茶树光合特性与荧光参数的研究[J]. 湖南农业科学, 2013(5): 101-104.
- WANG W, SHEN H, SHU J, YU M K, CHENG X R, WU T G. Photosynthetic and fluorescent parameters of tea tree in forest-tea compound system[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2013(5): 101-104. (in Chinese)
- [24] 张国林. 茶树-乔木间种对茶叶产量和品质的影响及机理[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.
- ZHANG G L. Mechanism and effect of the tea yield and quality affected by the inter-cropping trees[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [25] 张文标, 金则新, 柯世省, 陈彤. 木荷光合特性日变化及其与环境因子相关性分析[J]. 广西植物, 2006(5): 492-498.
- ZHANG W B, JIN Z X, KE S X, CHEN T. Diurnal photosynthetic characteristics of *Schima superba* and its correlation with environment[J]. Guihaia, 2006(5): 492-498. (in Chinese)
- [26] 赵福年, 杨红燕, 王润元, 张凯, 齐月, 陈斐, 王鹤龄, 赵鸿. 作物内禀水分利用效率变化[J]. 核农学报, 2019, 33(9): 1873-1881.
- ZHAO F N, YANG H Y, WANG R Y, ZHANG K, QI Y, CHEN F, WANAG H L, ZHAO H. Variation of intrinsic water use efficiency for crop[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(9): 1873-1881. (in Chinese)
- [27] 向芬, 李维, 刘红艳, 周凌云, 丁玎, 曾振. 茶树叶绿素测定方法的比较研究[J]. 茶叶通讯, 2016, 43(4): 37-40.
- XIANG F, LI W, LIU H Y, ZHOU L Y, DING D, ZENG Z. Comparison methods of chlorophyll extraction in *Camellia sinensis*[J]. Journal of Tea Communication, 2016, 43(4): 37-40. (in Chinese)
- [28] WEBB W L, STARR N D. Carbon dioxide exchange of *Alnus rubra*[J]. Oecologia, 1974, 17(4): 281-291.
- [29] NGUYEN M, RANJBARI A, CATALA L. Implementing molecular catalysts for hydrogen production in proton exchange membrane water electrolyzers[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2012, 256(21/22): 2435-2444.
- [30] 唐茜, 叶善蓉, 单虹丽, 罗学平. 引进茶树品种光合特性的比较研究[J]. 四川农业大学学报, 2006(3): 303-308.
- TANG Q, YE S R, SHAN H L, LUO X P. Comparative study on photosynthetic characteristics of the introducing tea cultivars[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2006(3): 303-308. (in Chinese)
- [31] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 王荣焕, 陈传永, 刘月娥, 刘秀芝, 王元东, 刘春阁. 玉米生产上 3 个主推品种光合特性、干物质积累转运及灌浆特性[J]. 作物学报, 2018, 44(3): 414-422.
- XU T J, LYU T F, ZHAO J R, WANG R H, CHEN C Y, LIU Y E, LIU X Z, WANG Y D, LIU C G. Photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and translocation, grain filling parameter of three main maize varieties in production[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(3): 414-422. (in Chinese)
- [32] 董合忠, 李维江, 唐薇, 李振怀. 大田棉花叶片光合特性的研究[J]. 山东农业科学, 2000(6): 7-9, 15.
- DONG H Z, LI W J, TANG W, LI Z H. Photosynthetic characters of field grown cotton leaves[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2000(6): 7-9, 15. (in Chinese)
- [33] 张迎辉, 王雪梅, 连巧霞. 5 个彩叶树种光响应曲线特性研究[J]. 热带作物学报, 2019, 40(9): 1737-1741.
- ZHANG Y H, WANG X M, LIAN Q X. Light response curve of photosynthesis of five colored-leaf trees[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(9): 1737-1741. (in Chinese)
- [34] 董星光, 曹玉芬, 田路明, 王昆, 张莹, 齐丹. 中国野生山梨叶片形态及光合特性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1327-1334.
- DONG X G, CAO Y F, TIAN L M, WANG K, ZHANG Y, QI D. Leaf morphology and photosynthetic characteristics of wild ussurian pear in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1327-1334. (in Chinese)
- [35] 孔文娟. 四个油茶品种的光合特性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- KONG W J. Study on the photosynthetic properties of the

- four camellia oil varieties [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [36] 李雪琴, 卢艺苗, 黄爱梅, 袁荣斌, 李锦隆, 胡丹丹, 钟全林, 程栋梁. 亚热带 10 种蕨类植物的光响应模型拟合及光合特性研究[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3333-3344.
LI X Q, LU Y M, HUANG A M, YUAN R B, LI J L, HU D D, ZHONG Q L, CHEN D L. Light response model fitting and photosynthetic characteristics of ten different fern species in subtropics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3333-3344. (in Chinese)
- [37] 徐金忠, 魏琳, 徐洪亮, 高德武. 不同生态因子对荚果蕨生长和光合特性的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(8): 19-24.
XU J Z, WEI L, XU H L, GAO D W. Effects of different ecological factors on growth and photosynthetic characteristics of *Matteuccia struthiopteris*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(8): 19-24. (in Chinese)
- [38] 叶子飘, 胡文海, 闫小红, 段世华. 基于光响应机理模型的不同植物光合特性[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2544-2552.
YE Z P, HU W H, YAN X H, DUAN S H. Photosynthetic characteristics of different plant species based on a mechanistic model of light-response of photosynthesis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(9): 2544-2552. (in Chinese)
- [39] 丁宇晖, 杨再强, 徐超, 郑芊彤, 李佳佳, 黄琴琴, 王明田. 低温胁迫对设施三七叶片光响应曲线拟合的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(3): 41-49, 55.
DING Y H, YANG Z Q, XU C, ZHENG Q T, LI J J, HUANG Q Q, WANG M T. Effect of low temperature stress on light response curve fitting of *Panax notoginseng* leaves[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(3): 41-49, 55. (in Chinese)
- [40] 李英浩, 刘景辉, 赵宝平, 田露, 米俊珍, 王琦, 戴云仙. 干旱胁迫下腐植酸肥料对燕麦光响应曲线的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(11): 34-44.
LI Y H, LIU J H, ZHAO B P, TIAN L, MI J Z, WANG Q, DAI Y X. Effect of humic acid fertilizer on the light response curve of oat under drought stress[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(11): 34-44. (in Chinese)
- [41] 陈新微, 魏子上, 刘红梅, 杨殿林, 王慧, 皇甫超河. 云南菊科入侵物种与本地共生物种光合特性比较[J]. 环境科学研究, 2016, 29(4): 538-546.
CHEN X W, WEI Z S, LIU H M, YANG D L, WANG H, HUANGFU C H. Comparison of photosynthetic characteristics between invasive and co-occurring native Asteraceae plants in Yunnan province, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(4): 538-546. (in Chinese)
- [42] POORTER L. Growth responses of 15 rain-forest tree species to a light gradient: the relative importance of morphological and physiological traits[J]. Functional Ecology, 1999, 13(3): 396-410.