

朱昱璇,杨薇,罗义菊,等.景迈山古茶园不同林下茶树叶片光合特性与荧光参数分析[J].江苏农业科学,2023,51(22):138-144.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.22.020

景迈山古茶园不同林下茶树叶片光合特性 与荧光参数分析

朱昱璇¹,杨薇¹,罗义菊¹,陶燕蓝^{2,3},蓝增全^{2,3}

(1.西南林业大学园林园艺学院,云南昆明 650224; 2.西南林业大学古茶树研究中心,云南昆明 650224;

3.西南林业大学绿色发展研究院,云南昆明 650224)

摘要:比较景迈山古茶园多依、南酸枣、川梨 3 种不同林下茶树的光合特性差异,预测其发育趋势,为古茶树的保护及可持续利用提供参考。应用 Imaging-PAM 叶绿素荧光成像系统和 CI-340 手持式光合作用测量系统测定景迈山大平掌古茶园多依林下栽培茶树、南酸枣林下栽培茶树、川梨林下栽培茶树和纯茶园栽培茶树光合特性及荧光参数,测量数据包括 PS II 的最大量子产量(F_v/F_m)、PS II 的实际量子产量(Y_{II})、光化学淬灭系数(q_L 、 q_P)、非光化学淬灭系数(q_N 、NPQ)、PS II 处非调节性能量耗散的量子产量(Y_{NO})、PS II 处调节性能量耗散的量子产量(Y_{NPQ})、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间隙二氧化碳浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、水分利用率(WUE)。结果表明,不同林下种植茶树均会使茶树净光合速率降低,但同时能提高茶树的 PS II 的最大量子产量(F_v/F_m)、PS II 的实际量子产量(Y_{II}),即光量子效率。南酸枣-茶复合种植能提高水分利用率,但同时会降低茶树光化学淬灭系数(q_L 、 q_P)、非光化学淬灭系数(q_N 、NPQ),这意味着南酸枣树下种植茶树的光能吸收、传递能力较弱,容易受光损伤,不宜种植于光照度过高的地区。川梨-茶复合系统茶树净光合速率显著下降,可能更易造成减产,不推荐在景迈山地区采用。综合来看,多依-茶复合种植效果最好。从光合特性上看,林茶复合系统在一定程度上会降低茶叶产量,但对于古茶树树势恢复有一定好处。根据本研究结果,景迈山地区推荐采用多依-茶复合种植模式。本试验在一定程度上可以预测茶树发育趋势,但 3 种不同林下种植茶树对茶叶品质及茶产量的具体影响有待后续研究。

关键词:景迈山;光合特性;叶绿素荧光参数;林茶复合系统

中图分类号:S571.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)22-0138-07

茶树[*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze]为山茶属灌木或小乔木,发源于我国西南地区森林,由于森林中天然具有立体式多层次的自然环境,造就了茶树喜阴蔽、喜湿润的生长特性,最适生长温度为 20~30℃^[1]。林下种植茶树,灌木和乔木可占据不同生态位,此时光照和养分可以充分地循环利用,尤其在温度较高、太阳辐射较强的地区,能控制温差,提高水分的有效性,形成对低矮茶树的保护^[2-3]。天然林下种植的茶园和与高大乔木套作的茶园,由于上层林木遮蔽,净光合速率(P_n)会受到影响,通常情况下比单作的茶树净光合速率低,根

据上层林木种类和密度的不同,茶树净光合速率受到的影响程度也不同。茶树净光合速率会直接影响到茶树的干物质积累,而间接引起茶叶品质和产量的改变^[1,4]。因此,科学地选择套作树种,建立能保产增质的林茶复合系统是一个研究热点。研究茶树光合特性和荧光参数,可以预测茶树的生长状态和发育趋势,从而为古茶园、古茶树的保护和可持续利用提供理论依据^[5]。目前关于茶树光合特性及荧光参数的研究主要集中在不同栽培措施^[6-14]、逆境响应^[15-20]、品种间差异^[21-25]几个方面。Yang 等研究了外源褪黑素(MT)对茶树光合作用的调控机制,认为 MT 可以减轻 PS II 的抑制作用,提高光化学效率^[13]。Zaman 等研究认为,寒冷胁迫下,使用遮阴网可以保护叶片免受伤害,同时可调节光化学能力和效率^[14]。Oh 等研究认为,冬季低温下茶树的 PS II 光化学效率和光合能力受到限制,光补偿点降低,水分利用率提高,以适应冬季较低的降水量和光照度^[17]。肖正东等研究了板

收稿日期:2023-02-18

基金项目:云南省重大科技专项(编号:202002AA100007);国家林业和草原局科技项目(编号:2019130004-149)。

作者简介:朱昱璇(1995—),女,云南昆明人,硕士研究生,从事茶生态研究。E-mail:675291590@qq.com。

通信作者:蓝增全,硕士,教授,硕士生导师,从事古茶树保护与利用研究。E-mail:lanzengquan@tsinghua.org.cn。

栗-银杏-茶、板栗-茶、纯茶种植模式下茶树的光合特性,结果显示板栗-银杏-茶和板栗-茶模式下茶树净光合速率下降,但茶叶品质提升^[8]。阮旭等研究了柑橘-茶、板栗-茶、杨梅-茶、枇杷-茶、银杏-茶 5 种果茶间作模式,结果为枇杷-茶间作模式较有利于茶树生长^[9]。王婉等研究了南酸枣-茶复合系统下的茶树光合特性差异,南酸枣的种植未对茶树光能利用率产生显著影响^[10]。季琳琳等研究了油茶-茶复合模式,从整体上看纯茶模式茶树叶片净光合速率高于复合模式^[11]。由此可以看出,不同林下茶树的叶绿素荧光参数研究鲜见报道,且由于不同地区气候差异很大,适合与茶树共同种植建立林茶复合系统的树种也有不相同^[26]。本研究以不同林下种植茶树叶片为研究对象,运用

Imaging-PAM 叶绿素荧光成像系统和 CI-340 手持式光合作用测量系统对茶树叶片的光合能力进行评估,以期预测景迈山古茶树的生长趋势,可以给景迈山当地茶园选择树种用于推广林茶复合种植提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点选取景迈山大平掌古茶园,试验对象分别为多依林下栽培茶树、南酸枣林下栽培茶树、川梨林下栽培茶树和纯茶园栽培茶树。古茶园均为不施肥、不施农药的生态茶园,试验茶园基本情况见表 1。

表 1 试验地茶园基本情况

茶园类型	套种密度 (m×m)	套种树种平均 树高(m)	套种树种平均 胸径(cm)	枝下高 (m)	上层林分郁闭度	茶树平均树高 (m)
多依-茶(DY)	8×10	4.2	12.6	4.3	0.5	4.2
南酸枣-茶(NS)	6×7	3.7	16.6	5.7	0.5	3.7
川梨-茶(CL)	5×6	9.8	15.8	3.7	0.6	1.5
纯茶园(CK)						2.3

1.2 研究方法

试验于 2022 年 8 月 16—19 日 09:00—11:00 进行,晴天偶见云天气下在野外开展试验。选取生长状态一致的茶树进行光合特性和荧光参数测定,测定茶树新梢鱼叶往上第 4 张成熟叶。每种类型划定 3 块试验样地,每块样地选取生长健康、长势一致的 3 个新梢备测,除纯茶园外,备测新梢均处于套种树种树冠正下方,并在测定过程中保持叶片所处环境适宜且相对稳定^[27]。

1.3 叶绿素荧光参数测定

茶树叶片叶绿素荧光参数采用 Imaging-PAM 叶绿素荧光成像系统(上海泽泉科技股份有限公司),对叶片进行暗适应 30 min,保持暗适应叶夹不动进行测定,测定参数包括 PS II 的最大量子产量(F_v/F_m)、PS II 的实际量子产量(Y_{II})、光化学淬灭系数(q_L 、 q_P)、非光化学淬灭系数(q_N 、NPQ)、PS II 处非调节性能量耗散的量子产量(Y_{N0})、PS II 处调节性能量耗散的量子产量(Y_{NPQ})。

茶树叶片快速光曲线测定采用上海泽泉科技股份有限公司 Imaging-PAM 叶绿素荧光成像系统,对叶片进行 5 min 光适应,然后连续暴露在光照

度梯度为 0、60、90、120、190、280、420、630、820、1 150、1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下,每步 20 s。

1.4 光合特性测定

茶树叶片光合特性采用 CI-340 手持式光合作用测量系统(上海泽泉科技股份有限公司)测定,测定光照度为 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、叶室流速为 550 $\mu\text{mol}/\text{s}$ 、 CO_2 浓度为 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,温度为 16.1~28.4 $^{\circ}\text{C}$,质量流量 0.3 L/min。叶片到空气的水气压差为 1.0~1.2 kPa,测定参数包括净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间二氧化碳浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)。

水分利用率(WUE)由以下公式获得: $\text{WUE} = P_n/T_r$ 。

1.5 数据处理

统计分析采用 IBM SPSS Statistics 27,使用单因素方差分析(ANOVA)检验不同林下茶树光合特性及荧光参数的差异显著性,使用线性回归分析方法找出对不同林下茶树净光合速率影响最明显的因子,图表绘制采用 GraphPad Prism 9,使用 Pearson 相关分析检验各参数的相关显著性,最后使用主成分分析找出不同林下茶树的光合特征参数。

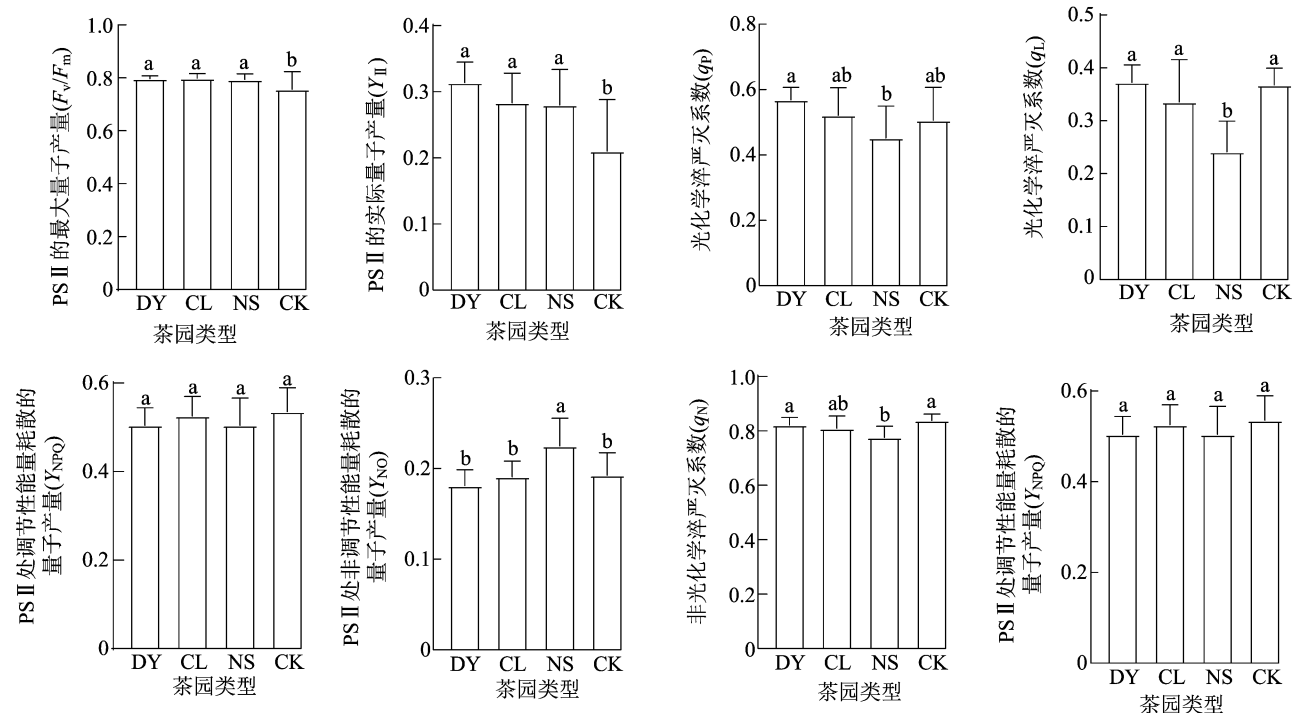
2 结果与分析

2.1 不同林下茶树叶片叶绿素荧光参数分析

PS II 的最大量子产量(F_v/F_m)反映了植物潜在的最大光合活性,同时也反映 PS II 复合体本身的活性,当植物受到胁迫时,该参数会明显下降;实际光量子效率(Y_{II})与线性电子传递相关,某些情况下可间接反映线性电子传递的活性。PS II 调节性能量耗散的量子产量(Y_{NPQ})反映了植物耗散过剩光能为热能的能力,即光保护能力;PS II 非调节性能量耗散的量子产量(Y_{NO})反映了入射光强超过植物所能接受程度,即光损伤指标。光化学淬灭系数(q_P 、 q_L)即由光合作用引起的荧光淬灭,反映了光合活性的高低,也能反映光合反应中心的活性;非光化学淬灭系数(q_N 、NPQ)反映植物耗散过剩光能为热的能力,反映了植物的光保护能力。

由图 1 可知,对照(CK) F_v/F_m 显著低于其他 3

组,南酸枣树下茶树(NS)及对照(CK) Y_{II} 低于多依(DY),反映了林下种植茶树可提高茶树的潜在光合能力,且不同种林下种植的效果也不同。南酸枣树下种植茶树(NS) q_P 显著低于多依树下茶树(DY), q_L 显著低于其他 3 组,说明南酸枣树下种植茶树(NS)光合反应中心活性较低,且多依树下茶树(DY)光合反应中心活性最高。南酸枣树下茶树(NS) q_N 显著低于多依树下茶树(DY)和对照(CK),南酸枣树下茶树(NS)与对照茶树(CK) Y_{NPQ} 显著低于川梨树下茶树(CL),反映了南酸枣树下栽培的茶树(NS)光保护能力较其他 3 组更弱。 Y_{NPQ} 在 4 组间差异不显著,南酸枣树下栽培茶树(NS) Y_{NO} 显著高于其他组,这可能意味着南酸枣树下栽培茶树(NS)受到了一定程度的光损伤。总体上看,林下种植茶树与非林下种植茶树荧光参数差异显著,且不同树种的林下种植茶树荧光参数也会产生差异。



图中不同小写字母表示不同林下种植茶树差异显著($P < 0.05$)

图1 不同林下茶树叶片荧光参数

2.2 不同林下茶树叶片快速光曲线分析

有研究表明,未达到光饱和前 rETR (光合电子传递速率) 与 PAR (光合有效辐射) 的强度呈线性相关,当光能超过植物所能接受的最大值时, rETR 与 PAR 不再呈现线性关系,将逐渐低于线性关系的估计值^[7]。由图 2 可知,4 个组初始斜率相同,且变化

趋势相似,到 PAR 约为 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时斜率开始下降。对照茶树(CK)斜率下降最快,多依树下的茶树(DY)快速光曲线斜率下降最慢,南酸枣树下的茶树(NS)和川梨树下的茶树(CL)斜率差异不大。当 PAR 约为 $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,对照茶树(CK)达到 rETR 的最大值;当 PAR 约为

800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,南酸枣树下的茶树(NS)和川梨树下的茶树(CL)达到 rETR 的最大值;当 PAR 约为 1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,多依树下的茶树(DY)达到 rETR 的最大值。且 rETR_{max} 显示为多依树下茶树(DY) > 南酸枣树下茶树(NS) \approx 川梨树下茶树(CL) > 对照茶树(CK)。

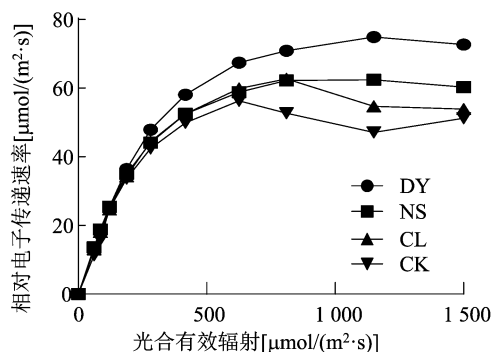


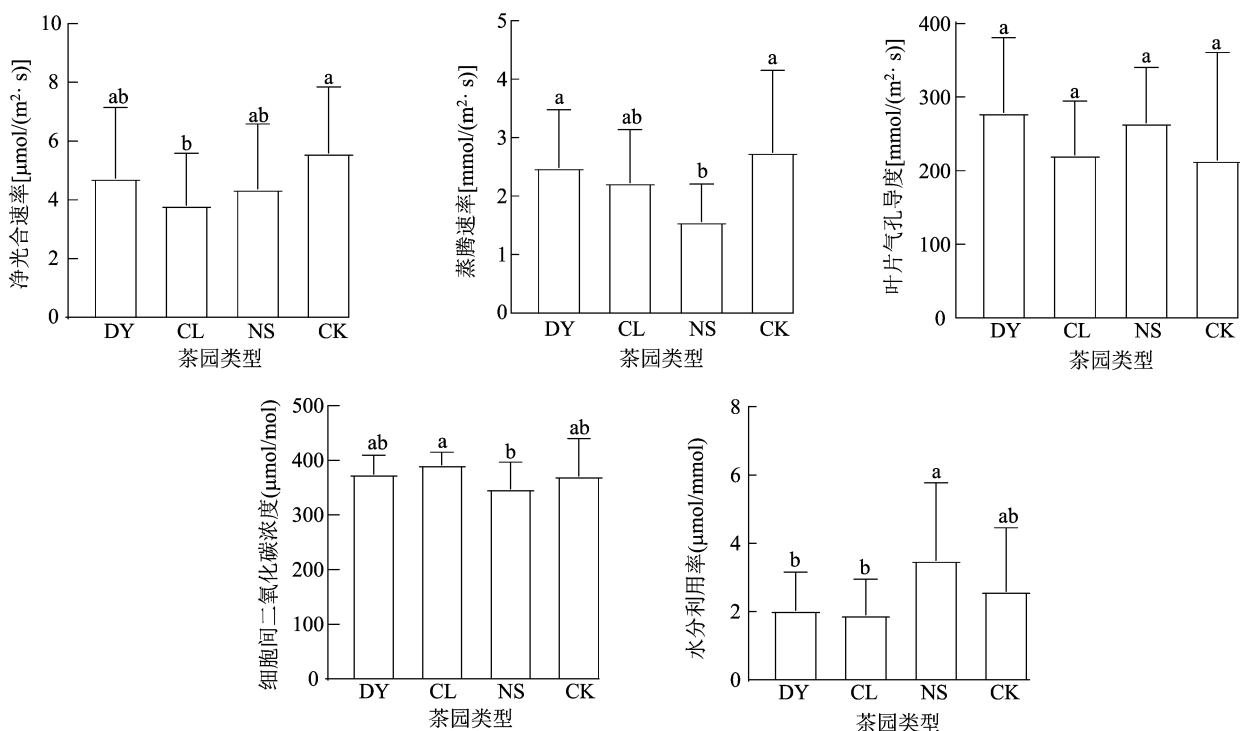
图2 不同林下茶树叶片快速光响应曲线分析

2.3 不同林下茶树叶片光合特性分析

光合特性分析结果(图3)表明,川梨树下的茶树(CL)净光合速率(P_n)最低,为 3.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对照茶树(CK)净光合速率(P_n)最高,为 5.59 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对照净光合速率显著高于川梨组(CL);南酸枣树下的茶树(NS)蒸腾速率(T_r)最低,为 1.57 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,显著低于多依(DY)

和对照(CK);叶片气孔导度差异不显著;川梨树下的茶树(CL)细胞间隙二氧化碳浓度(C_i)最高,为 395.18 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,南酸枣树下茶树(NS)细胞间隙二氧化碳浓度(C_i)最低,为 343.89 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,川梨组(CL)显著高于南酸枣组(NS);南酸枣树下的茶树(NS)水分利用率(WUE)最高,为 3.18 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,显著高于多依树下的茶树(DY)和川梨树下的茶树(CL)。总体上,在林茶复合系统中上层林木遮阴降低了林内光照度,使茶树净光合速率及蒸腾速率减小,同时不同林下种植的茶树光合特性也有一定差异。

运用逐步回归分析,建立多因子线性回归最优方程,探索不同林下对茶树净光合速率影响最显著的因子,结果见表2。所有回归方程因变量和自变量相关性均为极显著水平,3种林下茶树 P_n 的回归分析结果 R^2 值均大于 0.85,纯茶园回归分析结果 R^2 值为 0.552。证明在林下栽培的种植模式下,回归方程可以很好地反映茶树各生理因子与净光合速率的关系,而纯茶种植模式下, P_n 更容易受到其他因素的影响。据表2可知,4种不同茶园类型均显示为 T_r 和 WUE 对 P_n 的影响显著,而 G_s 和 C_i 对 P_n 的影响较小。



图中不同小写字母表示不同林下种植茶树差异显著($P < 0.05$)

图3 不同林下茶树叶片光合特性

表 2 不同林下茶树光合特性与净光合速率(P_n)的回归分析结果

茶园类型	回归方程	R^2
多依-茶	$P_n = -3.095 + 1.311T_r - 0.001G_s + 0.001C_i + 2.152WUE$	0.851 **
南酸枣-茶	$P_n = -0.448 + 2.492T_r - 0.002G_s - 0.011C_i + 1.109WUE$	0.876 **
川梨-茶	$P_n = -0.268 + 1.016T_r + 0.004G_s - 0.005C_i + 1.621WUE$	0.867 **
纯茶园	$P_n = 4.352 + 1.441T_r - 0.004G_s - 0.011C_i + 0.805WUE$	0.552 **

注: ** 表示在 0.01 水平上影响显著。

2.4 茶树叶片光合特性与叶绿素荧光参数相关性分析

针对不同林下茶树光合特性及荧光参数进行 Pearson 相关性分析,结果见表 3, F_v/F_m 和 G_s 呈显著负相关; Y_{II} 和 q_P 呈显著正相关,和 Y_{NPQ} 呈显著负相关; q_P 和 q_L 呈显著正相关,和 Y_{NPQ} 、 Y_{NO} 呈显著负

相关; q_L 和 q_N 、 C_i 呈显著正相关,和 Y_{NO} 呈显著负相关; q_N 和 Y_{NPQ} 呈显著正相关,和 Y_{NO} 呈显著负相关; NPQ 和 Y_{NPQ} 、 C_i 呈显著正相关,和 Y_{NO} 呈显著负相关; Y_{NPQ} 和 WUE 呈显著负相关; Y_{NO} 和 C_i 呈显著负相关; P_n 和 WUE 呈显著正相关,和 C_i 呈显著负相关; T_r 和 G_s 、 WUE 呈显著负相关。

表 3 不同林下茶树叶片光合特性及荧光参数相关系数

参数	相关系数											
	F_v/F_m	Y_{II}	q_P	q_L	q_N	NPQ	Y_{NPQ}	Y_{NO}	P_n	T_r	G_s	C_i
Y_{II}	0.101											
q_P	0.114	0.415 *										
q_L	-0.149	0.106	0.744 **									
q_N	-0.286	-0.189	0.060	0.351 *								
NPQ	0.149	0.083	0.034	0.189	0.308							
Y_{NPQ}	-0.027	-0.582 **	-0.587 **	-0.188	0.534 **	0.407 *						
Y_{NO}	-0.086	-0.064	-0.557 **	-0.627 **	-0.693 **	-0.510 **	-0.270					
P_n	0.083	0.024	-0.049	-0.066	-0.210	-0.276	-0.204	0.215				
T_r	0.214	-0.202	-0.063	0.159	0.157	0.118	0.265	-0.157	0.055			
G_s	-0.351 *	0.212	0.047	-0.008	0.042	0.012	-0.136	0.093	-0.112	-0.362 *		
C_i	0.111	0.291	0.235	0.374 *	0.213	0.436 **	0.091	-0.421 *	-0.413 *	0.190	-0.128	
WUE	-0.060	0.254	0.084	-0.124	-0.274	-0.276	-0.422 *	0.224	0.603 **	-0.564 **	0.131	-0.223

注: *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

2.5 茶树叶片光合特性与叶绿素荧光参数主成分分析

由表 4 可知,第 1 和第 2 主成分对方差的贡献率分别为 26.65%、20.72%,二者累计贡献率为 47.37%。在第 1 主成分中 Y_{NO} 的系数最大,为 0.831,表明 Y_{NO} 在第 1 主成分中具有较大载荷。对第 2 主成分而言, q_P 的载荷值最大,为 0.868,表明 q_P 在第 2 主成分中具有较大载荷。

不同林下茶树光合特性与荧光参数的主成分双标图见图 4,川梨树下的茶树第 1 主成分得分较高,可通过 PC 1 与其他 3 组进行区分。第 2 主成分在不同林下的茶树间差异不明显。

3 结论与讨论

研究表明,PS II 的最大量子产量(F_v/F_m)反映的是 PS II 反应中心叶片光化学反应的能力范围, F_v/F_m 值越低,植物光抑制程度越高^[17]。不同林下种植茶树均可提高茶树 F_v/F_m 值,即降低茶树光抑制程度。PS II 的实际量子产量(Y_{II})反映 PS II 反应中心部分关闭情况下实际原初光能捕获效率,可作为植物光合电子传递速率的相对指标, Y_{II} 值较高则植物能为暗反应积累更多能量,促进碳同化和有机物积累^[24]。不同林下种植茶树均可提高茶树的 Y_{II} 值,其中多依树下种植茶树效果最好。荧光淬灭指

表 4 不同林下茶树光合特性指标及荧光参数主成分分析

主成分	载荷值													贡献率 (%)
	F_v/F_m	Y_{II}	q_P	q_L	q_N	NPQ	Y_{NPQ}	Y_{NO}	P_n	T_r	G_s	C_i	WUE	
y_1	-0.042	0.093	-0.291	-0.571	-0.698	-0.641	-0.482	0.831	0.503	-0.422	0.157	-0.620	-0.621	26.65
y_2	0.016	0.711	0.868	0.589	-0.120	-0.030	-0.771	-0.307	0.092	-0.314	0.221	0.258	0.403	20.72

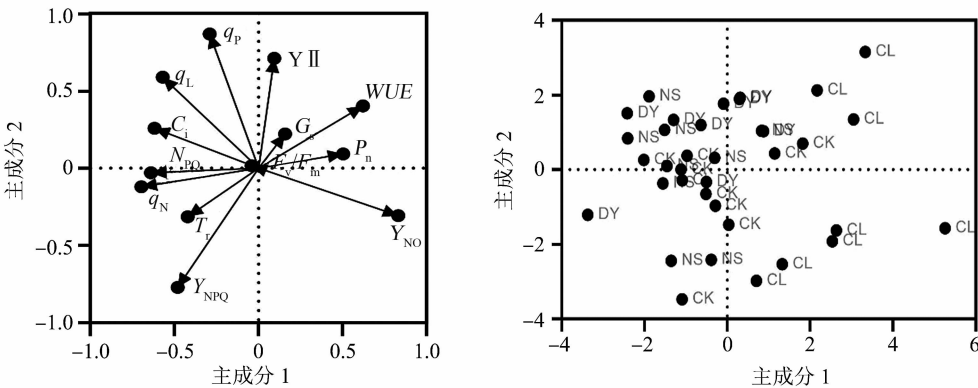


图4 不同林下茶树叶片光合特性与叶绿素荧光参数主成分分析

叶绿素荧光产量下降,其中由热耗散引起的荧光淬灭称为非光化学淬灭(Y_{NPQ}),反映了植物耗散过剩光能为热能的能力,即光保护能力;PS II 非调节性能量耗散(Y_{NO})反映了入射光照度超过植物所能接受程度,即光损伤指标^[28]。在试验结果中 Y_{NPQ} 并无明显差异,但南酸枣组 Y_{NO} 显著高于其他3组,推断南酸枣树下的茶树可能受到光胁迫。化学淬灭系数(q_P 、 q_L)即由光合作用引起的荧光淬灭,反映的是PS II 天线色素吸收光能用于光化学电子传递的比例,可以直接反映植物的光合效率^[29]。非光化学淬灭系数(q_N 、NPQ)指的是植物耗散过剩光能为热的能力,即反映了PS II 天线色素所吸收光被热耗散掉的部分,是一种抵御光破坏的自我保护机制^[29]。研究表明,南酸枣组用于光化学电子传递的光能比例较小,且叶片热耗散也较小,推测为南酸枣组光合效率较弱,光保护机制也较弱。

快速光曲线未达到光饱和前 rETR(光合电子传递速率)与 PAR(光合有效辐射)的强度呈线性相关,当 rETR 下降时,表明植物光合作用受到抑制,该参数可用于比较不同植物间的光合性能^[30-33]。研究表明,不同树下种植茶树均可提高茶树光合电子传递速率(即快速光曲线斜率)及可接受的最大光合有效辐射(即 rETR_{max}所对应的 PAR),其中多依树下种植茶树效果最好。

从光合特性来看,不同林下种植茶树均会使茶

树净光合速率(P_n)降低,其中川梨树下的茶树 P_n 显著低于纯茶园;同时,林下种植茶可降低茶树蒸腾速率(T_r),其中多依树下的茶树 T_r 显著低于纯茶园;不同林下种植模式对茶树的水分利用率有着不同的影响,其中,南酸枣树下种植茶树可提高水分利用率,而多依树及川梨树下种植茶树会降低水分利用率。茶树水分利用率提高时,抗高温、干旱的能力也会相应提高。3种不同林下茶树 P_n 回归分析结果 R^2 值均大于0.85,纯茶园回归分析结果 R^2 值相对较低。植物净光合速率主要受到光照、二氧化碳浓度、大气温度、相对湿度等外因影响^[22]。回归方程反映了纯茶园 P_n 更易受到其他外因影响,侧面反映了林下种植茶树使茶树净光合速率更稳定。

综上所述,本研究中多依-茶复合种植能提高茶树的潜在光合活性,且效果显著。南酸枣-茶复合种植能提高水分利用率,适用于干旱地区;但同时南酸枣-茶复合系统中的茶树荧光参数不佳,意味着南酸枣树下种植茶树的光能吸收、传递能力较弱。川梨-茶复合系统对于茶树 P_n 影响较大,推测更易造成减产,不推荐在景迈山地区采用。本研究对景迈山茶园不同林下茶树光合特性及荧光参数进行研究,在一定程度上可用于预测茶树发育趋势,但不同林下种植茶树对茶叶品质及产量的具体影响有待后续研究。

参考文献:

- [1] 陈美丽, 王熙富. 茶林复合栽培模式及应用现状[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(13): 10–11, 16.
- [2] 马占霞, 林小兵, 尚宇梅, 等. 云南省生态茶园建设现状及其对生态环境的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(24): 36–38, 42.
- [3] 刘志龙, 方建民, 虞木奎, 等. 3 种林茶复合系统小气候特征日变化研究[J]. 林业科技开发, 2009, 23(2): 55–59.
- [4] 程 鹏, 马永春, 肖正东, 等. 不同林分内茶树光合特性及其影响因子和小气候因子分析[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(2): 79–83.
- [5] 罗义菊, 陈洪宇, 胡 月, 等. 无量山典型古茶树叶片光合特性[J/OL]. 分子植物育种. (2021–11–17) [2023–02–15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211117.1010.002.html>.
- [6] 向 芬, 李 维, 刘红艳, 等. 氮素水平对不同品种茶树光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(6): 1138–1145.
- [7] 孙映波, 于 波, 黄丽丽, 等. 不同栽培环境对耐冬山茶生长及荧光参数的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(8): 1553–1560.
- [8] 肖正东, 程 鹏, 马永春, 等. 不同种植模式下茶树光合特性、茶芽性状及茶叶化学成分的比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 15–19.
- [9] 阮 旭, 张 玥, 杨忠星, 等. 果茶间作模式下茶树光合特征参数的日变化[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(5): 53–57.
- [10] 王 婉, 沈 汉, 舒 骏, 等. 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.
- [11] 季琳琳, 余诚棋, 肖正东, 等. 油茶–茶复合模式对茶树光合特性的影响[J]. 经济林研究, 2013, 31(1): 39–43.
- [12] 徐 辉, 李 磊, 李庆会, 等. 大气 CO₂ 浓度与温度升高对茶树光合系统及品质成分的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(4): 550–556.
- [13] Yang N, Han M H, Teng R M, et al. Exogenous melatonin enhances photosynthetic capacity and related gene expression in a dose – dependent manner in the tea plant [*Camellia sinensis* (L.) Kuntze] [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022 (23): 6694.
- [14] Zaman S, Shen J Z, Wang S S, et al. Effects of shading nets on reactive oxygen species accumulation, photosynthetic changes, and associated physiochemical attributes in promoting cold – induced damage in *Camellia sinensis* (L.) Kuntze[J]. Horticulturae, 2022, 8(7): 637.
- [15] 李治鑫, 李 鑫, 范利超, 等. 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.
- [14] 王铭涵, 丁 玎, 张晨禹, 等. 干旱胁迫对茶树幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 茶叶科学, 2020, 40(4): 478–491.
- [15] 李庆会, 徐 辉, 周 琳, 等. 低温胁迫对 2 个茶树品种叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(2): 26–31.
- [16] Dai F J, Rong Z Y, Wu Q S, et al. Mycorrhiza improves plant growth and photosynthetic characteristics of tea plants in response to drought stress[J]. Biocell, 2022, 46(5): 1339–1346.
- [17] Oh S, Koh S C. Photosystem II photochemical efficiency and photosynthetic capacity in leaves of tea plant (*Camellia sinensis* L.) under winter stress in the field[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2014, 55(5): 363–371.
- [18] Cai H M, Dong Y Y, Li Y Y, et al. Physiological and cellular responses to fluoride stress in tea (*Camellia sinensis*) leaves[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(6): 144.
- [19] Zhang C Y, Yi X Q, Gao X Z, et al. Physiological and biochemical responses of tea seedlings (*Camellia sinensis*) to simulated acid rain conditions [J]. Ecotoxicology and Environmental, 2020, 192: 110315.
- [20] Huang L Y, Yuan J, Wang H, et al. Aluminum stress affects growth and physiological characteristics in oil tea[J]. HortScience, 2017, 52(11): 1601–1607.
- [21] 王 坤, 韦晓娟, 李宝财, 等. 12 种金花茶组植物光合生理特性比较[J]. 经济林研究, 2019, 37(1): 80–86.
- [22] 涂淑萍, 黄 航, 杜 曲, 等. 不同品种茶树叶片光合特性与叶绿素荧光参数的比较[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(5): 1098–1106.
- [23] 谢文钢, 陈 玮, 谭礼强, 等. 四川 3 个特色茶树品种芽叶性状及光合特性分析[J]. 茶叶科学, 2021, 41(6): 813–822.
- [24] 韩 楠, 唐 茜, 赖云松, 等. 四川引进的茶树特色品种黄金芽、金光、郁金香的光合特性[J]. 西南农业学报, 2015, 28(4): 1600–1605.
- [25] 许 燕. 6 个特色茶树品种(系)光合特性及叶绿体超微结构研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [26] 唐 敏, 翟秀明, 罗红玉, 等. 茶树叶绿素荧光参数叶位差异及其稳定性分析[J]. 南方农业, 2018, 12(31): 11–14.
- [27] 王 峰, 陈玉真, 王秀萍, 等. 不同品种茶树叶片功能性状及光合特性的比较[J]. 茶叶科学, 2016, 36(3): 285–292.
- [28] van Kooten O, Snel J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology[J]. Photosynthesis Research, 1990, 25(3): 147–150.
- [29] Sarijeva G, Knapp M, Lichtenthaler H K. Differences in photosynthetic activity, chlorophyll and carotenoid levels, and in chlorophyll fluorescence parameters in green sun and shade leaves of *Ginkgo* and *Fagus*[J]. Journal of Plant Physiology, 2007, 164(7): 950–955.
- [30] 郑友峰, 陈家兰, 肖 昉, 等. 不同温度对苋菜光合特性及光合作用相关基因表达的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(5): 50–57.
- [31] Fouqueray M, Mouget J L, Morant – Manceau A, et al. Dynamics of short – term acclimation to UV radiation in marine diatoms[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology (B: Biology), 2007, 89(1): 1–8.
- [32] Perkins R G, Mouget J L, Lefebvre S, et al. Light response curve methodology and possible implications in the application of chlorophyll fluorescence to benthic diatoms[J]. Marine Biology, 2006, 149(4): 703–712.
- [33] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: a powerful tool to assess photosynthetic activity[J]. Aquatic Botany, 2005, 82(3): 222–237.