

刘亚娜,刘世增,王芳,等.穴贮肥水和秸秆覆盖对苹果树光合及叶绿素荧光特性的影响[J].江苏农业科学,2023,51(14):164-172.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.14.023

穴贮肥水和秸秆覆盖对苹果树光合 及叶绿素荧光特性的影响

刘亚娜¹,刘世增²,王芳²,赵通²

(1.甘肃农业大学林学院,甘肃兰州 730070; 2.甘肃省林业科学研究院,甘肃兰州 730070)

摘要:为研究并筛选适用于秦安黄土高原旱地苹果园保墒的穴贮肥水不同处理,从而为当地的黄土高原旱地苹果园保墒技术提供理论参考依据,设计了4种穴贮肥水处理和秸秆覆盖处理,以清耕为对照。以黄土高原旱地苹果园为试材,研究秦安黄土高原旱地果园苹果树叶片光合及叶绿素荧光特性。结果表明,6个不同处理的叶片净光合速率和气孔导度由早晨最高降至下午最低;没有出现“午休”现象,可能因为中午的温度没有达到1d中的最高温度而导致的;叶片胞间CO₂浓度总体呈升高趋势,13:00—17:00达到最高。各处理的光系统Ⅱ(PSⅡ)最大光化学效率(F_v/F_m)和最大荧光(F_m)的变化趋势一致;净光合速率(P_n)与气孔导度(G_s)存在极显著正相关关系($P<0.01$),与胞间CO₂浓度(C_i)存在极显著负相关关系;水分利用效率(WUE)与蒸腾速率(T_r)存在极显著负相关关系;有效光化学量子产量(F_v'/F_m')与 F_v/F_m 存在极显著正相关($r=0.346$);最大荧光(F_m)与初始荧光(F_o)、 F_v'/F_m' 、 F_v/F_m 也呈极显著正相关关系,相关性因苹果树处理不同而达到显著或不显著水平。通过隶属函数法对6个处理的苹果树光合及叶绿素荧光特性进行综合评价,结果表明,在光合和叶绿素荧光特性方面,除A-2和秸秆(C)处理外,其他3个处理的光合能力均高于对照。

关键词:苹果树;光合作用;叶绿素荧光参数;穴贮肥水;秸秆覆盖;日变化;评价

中图分类号:S661.106 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)14-0164-09

植物光合作用因子是直接影响植物生长和对外界环境温度变化的重要化学决定因子之一^[1],它不仅能准确判断植物叶片能否在特定光照温度的环境条件下长久存活和继续生长,还能准确说明植

物长期对外界环境温度变化的适应性和潜力。叶片是植物对外界环境温度变化最敏感的光合器官之一,因此叶片因子被广泛认为最能体现其对环境因子的影响及植物对环境的适应^[2]。植物叶绿荧光参数研究已成为近几年来植物生态学领域研究的一个热点,它能够响应生存环境的气候变化并对各类生态系统中的功能生态有一定量的影响,其中叶功能生态性状与各类植株生物量对自然资源的生态获得、利用及资源利用效率的影响关系最为密切,能够准确反映出植物适应外界环境气候变化所形成的生存对策^[3-4]。研究黄土高原果园不同旱作

收稿日期:2022-09-16

基金项目:中央财政林业科技推广示范项目(编号:[2020]ZYT040号)。

作者简介:刘亚娜(1996—),女,甘肃平凉人,硕士研究生,研究方向为果树生理研究。E-mail:1516409739@qq.com。

通信作者:刘世增,博士,研究员,研究方向为荒漠化防治研究。E-mail:shzliu@126.com。

[10]谢雪迎,王贻莲,扈进冬,等.葡萄霜霉病拮抗细菌BMJBN02的筛选及其抑菌效果研究[J].山东科学,2015,28(3):39-44,73.

[11]陈浩,胡梁斌,唐春平,等.枯草芽孢杆菌B-FS01对葡萄霜霉病的防治效果[J].植物保护,2011,37(6):194-197.

[12]李迪秦,任铮,祝利,等.土壤调理剂与枯草芽孢杆菌菌剂配施对烟草生长发育及病害的影响[J].江苏农业科学,2022,50(10):88-94.

[13]董艳辉,于宇凤,温鑫,等.基于高通量测序的藜麦连作根际土壤微生物多样性研究[J].华北农学报,2019,34(2):205-211.

[14]尉天春,薛婧,姜晓东,等.藜麦穗腐病病原鉴定及其生物学特性[J].福建农林大学学报(自然科学版),2022,51(3):322-328.

[15]张淑梅,沙长青,王玉霞,等.枯草芽孢杆菌ZH-8对黄瓜霜霉病防治效果的研究[J].生物技术,2004,15(4):56-57.

[16]申红纱,李正楠,贾招閃,等.内生枯草芽孢杆菌JL4在葡萄叶上的定殖及其对葡萄霜霉病的防治[J].应用生态学报,2016,27(12):4022-4028.

[17]李戊彦,葛亚琪,杨忠义,等.3种抑菌剂对葡萄叶片霜霉病的影响差异分析[J].山西农业科学,2021,49(2):224-228.

处理技术对植物叶片光合特性和叶绿素荧光参数有着显著的影响。

苹果树目前是我国黄土高原经济产业区主要果树,其品种多、栽植面积广,而且果树光合作用的日变化受到多种外界环境因素的影响,出现不同幅度的变化(如种类、水分和养分状况等)^[5]。果树的净光合速率在不同地区、不同环境地势和不同气候条件下的变化不一致^[5]。牛俊玲等研究发现,苹果树的净光合速率(P_n)日变化为单峰形曲线^[6-7]。而王继和等则一致认为,果树的 P_n 日变化是双峰形曲线^[8-9]。国内外的研究表明,在夏季自然光照条件下,果树的净光合速率日变化一般以单峰形和双峰形 2 种类型存在^[10]。影响植物光合作用的 2 个关键因素是 CO_2 和胞间 CO_2 浓度,能够从侧面反映出果树的光合能力^[11-12]。水分利用率可以综合反映果树叶片光合和蒸腾特性,其大小可以反映植物对逆境的适应能力^[13-14]。本研究利用穴贮肥水不同处理对果树光合的影响分析叶片光合特性和叶绿素荧光参数,研究有效的黄土高原旱地保墒处理对将来黄土高原优质、晚熟、耐贮的旱地苹果在不同土壤旱作处理工艺技术和自然环境变化条件下净光合速率和叶绿素荧光参数日变化规律的影响。本研究以黄土高原旱地苹果园为试材,布置不同的穴贮肥水试验处理,对比分析其叶片光合特性与叶绿素荧光参数在 1 d 内光照下的变化,探讨秦安县黄土高原旱地果树在穴贮肥水和秸秆覆盖处理下叶片的光合特性及叶绿素荧光的响应机制,为黄土高原旱地果园的优质果实品质和技术利用提供一定的科学依据。

1 研究区概况

试验地点位于甘肃省秦安县五营乡牛蹄湾合作社新建的优质果品标准化苹果园基地,该地所在区域属陇中温带半干旱半湿润气候,地貌是山地阳坡,坡度为 26° 。陇中黄土高原干旱果园地区主要以黄绵土为主,但还有少量的山地褐色土,为典型的大陆性气候特征,冬冷无严寒,夏热无酷暑,四季分明,年平均气温均在 $10.4\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 的平均有效积温 $3\,382.8\text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量 507.3 mm ,且分布极不均匀,秋季最多,夏季次之,冬季最少,春旱频繁,伏旱时有发生,并有冰雹、霜冻、低温等自然灾害^[15]。

2 材料与方法

2.1 供试果园

供试果园为标准化苹果园,品种红富士,株行距 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,树龄 5~10 年,树高 $2.5\sim 3\text{ m}$,长势基本一致。阳坡,坡度 26° ,水平梯田,土壤黄绵土。

2.2 试验材料

仪器:采用 LI-6400XT 型便携式光合仪,为美国 LI-COR 公司生产。

地膜:黑色地膜,厚 0.008 mm ,宽 1.50 m ,透射率 $70\%\sim 80.5\%$,采用果农自购。

玉米秸秆,当地生产。切短节捆成草把,草把长 45 cm ,直径 35 cm ,清水中浸泡 48 h (浸泡透为止)备用。

BJ2101-L 保水剂(北京汉力森公司生产),超大白色颗粒,粒径 $6\sim 10\text{ mm}$,pH 值 $6.5\sim 6.8$,吸水倍率 $1\,300\sim 1\,800$ 倍,最大持水量为 405 kg 。

肥料自购,其中磷酸二铵总养分含量 $\geq 64.0\%$,施可丰化工股份有限公司生产。有机肥以牛羊粪为主要原料,并合理添加富含活性钙和生物磷的骨粉与腐殖酸,利用复合有益菌发酵而成的复合有机肥(贝尔克生物制品有限公司生产)。

2.3 试验方法

2.3.1 试验设计 在试验地进行试验处理,随机布置,每个处理 3 次重复。试验处理包括低量穴贮肥水处理(施入磷酸二铵 340 g/穴 、有机肥 $1\,020\text{ g/穴}$,由 A-1 表示)、高量穴贮肥水处理(施入磷酸二铵 400 g/穴 、有机肥 $1\,200\text{ g/穴}$,由 A-2 表示)、低量穴贮肥水处理(施入磷酸二铵 340 g/穴 、有机肥 $1\,020\text{ g/穴}$ 、保水剂 150 g/穴 ,由 B-1 表示)、高量穴贮肥水处理(施入磷酸二铵 400 g/穴 、有机肥 $1\,200\text{ g/穴}$ 、保水剂 150 g/穴 ,由 B-2 表示)、秸秆覆盖处理(由 C 表示)、对照(由 D 表示)。

2.3.2 试验布设 2021 年 3 月布设试验。供试果园清除杂草,平整地面。穴贮肥水布置在以树冠投影边缘下方根系密集区内,挖穴(2 株 6 穴),直径 45 cm 、深 50 cm (根据土层薄厚程度确定),草把的长度比穴深短 5 cm 。将浸泡的草把垂直插入挖好的贮养穴中,在草把周围施入肥料及草把下施入保水剂,二胺和有机肥按 $1:3$ 比例与土壤混合拌匀,回填于草把周围空隙中,最后用土回填穴口压实,穴顶比周围的地面略低,成为锅底形,便于积水。随即浇水 3.5 kg/株 为宜,穴上覆盖黑色地膜,周围

用土压实,并在处于穴中心的地膜上戳 1 个洞,便于日后浇水和雨水的渗入,用石子压住洞,防止里面土壤水分蒸发^[16]。

2.4 项目测定

2.4.1 光合参数测定 于 2021 年 7 月上旬晴朗无风天气,用 Li-6400 便携式光合仪测定光合参数,时间为 09:00—17:00,每 2 h 测定 1 次,每次测定向阳成熟的 3~5 张叶片,每张叶片重复测定 3 次,取平均值。测定参数包括叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和水分利用率(WUE)等^[17]。

$$WUE = P_n / T_r \quad (1)$$

2.4.2 叶绿素荧光参数测定 利用脉冲调制式 LI-6400XT 荧光叶室测定各处理果树叶片荧光参数日变化(测定时间与光合时间相同),光照度测定模式参数设为 Mod-2^[13]。选取树体向阳上、中、下 3 个部位成熟的叶片进行活体测定,测定前叶片均先暗适应 30 min,每次测定 3 张,3 次重复,取均值。测定叶绿素荧光基本参数^[18]:初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、光系统 II (PS II) 最大光化学效率(F_v/F_m)、有效光化学量子产量(F_v'/F_m')和电子传递速率(ETR),这些参数都是在果树枝条生长角度不变时测定的。

2.5 数据统计分析

采用 SPSS 18.0 软件对所测的数据进行统计分析^[19],采用 Microsoft Excel 对数据进行整理并绘制光合参数与荧光参数日变化折线图。对不同处理的光合能力采用隶属函数法进行综合评价。

3 结果与分析

3.1 不同处理对苹果树光合参数日变化的影响

3.1.1 不同处理对苹果树净光合速率日变化的影响 植物内部光合作用主要受外界内部环境条件变化和其他植物内部环境因素的作用影响,其中 P_n 通常是用来表示一种植物内部光合作用速度变化的重要测量指标^[20-21]。从图 1 可以看出,不同处理对苹果树的 P_n 有不同程度上的影响。各处理的 P_n 日变化曲线均为单峰形。各处理的最高值出现在 11:00;之后随着光合辐射、气温和叶温的下降,各处理的 P_n 均处于下降状态,17:00 时 P_n 降到 1 d 中的最低值;由表 1 可知,各处理的 P_n 日均值表现为 A-1 处理 > C(秸秆)处理 > A-2 处理 > B-1 处理 > D(对照)处理 > B-2 处理,分别为 21.49、

20.53、19.73、19.31、18.33、18.25 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。且各处理的 P_n 之间差异不显著($P > 0.05$)。

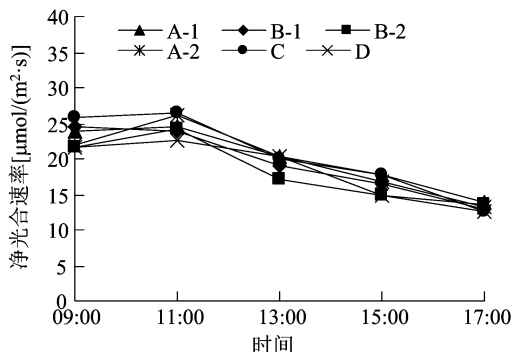


图1 不同处理净光合速率日变化

3.1.2 不同处理对苹果树气孔导度日变化的影响

G_s 不仅是调节苹果树叶片 CO_2 浓度和水分交换过程中的重要指标,也是呼吸作用与蒸腾作用的首要因素。气孔也是苹果树叶片与外界环境进行气体交换的主要渠道,同时植物蒸腾作用的调节也主要由气孔的开度来影响,对植物的生长起着关键作用^[22-23]。气孔关闭能减少植物体内部分水分的耗散,主要是由于植物体内水分过度流失而导致植物处于危险状态;气孔开放程度有利于叶片进行光合作用碳固定,蒸腾作用缓慢降低,促使叶片在极度高温的气候下避免热损伤^[24-25]。由图 2 可知,各处理的 G_s 呈不断降低或先下降再上升的趋势,各处理的 G_s 差异不明显,09:00 出现最大值,之后随着气孔的关闭, G_s 逐渐降低,B-1 和 C 处理在 13:00 降到最低。其主要原因可能是这段时间的温度过高和光照度太强,叶片自身为了避免这些因素而表现出来的应激反应。由表 1 可知,A-1 处理显著大于 C、D 处理以外的其他处理。

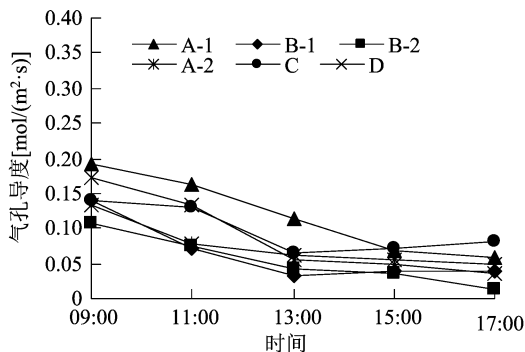


图2 不同处理气孔导度日变化

3.1.3 不同处理对苹果树蒸腾速率日变化的影响

影响蒸腾速率变化的主要因子是光照^[26-27],不同处理下叶片 T_r 日变化均呈不规则的半弧形曲线,具

体如图 3 所示。D 处理的日变化峰值出现在 11:00, 此后开始下降, 并在 17:00 时降至最低值。而各处理 09:00 和 17:00 的 T_r 均较小, 说明这 2 个时刻的光照度较弱; 而 10:00—15:00 的光照度较强。D 处理的蒸腾速率在 11:00 达到最高, 为 $7.93 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, A-1、C、A-2 和 B-2 处理居中, B-1 处理最低, 为 $3.53 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由表 1 可知, A-1 与 C、D 处理之间无显著差异, 但是显著大于其他处理。

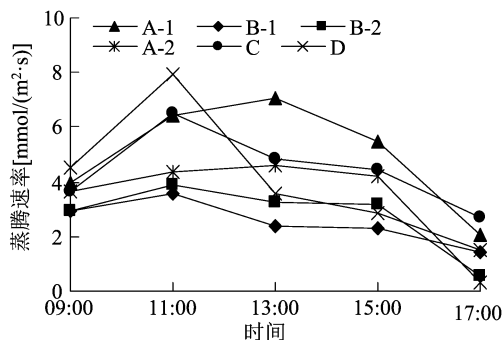


图3 不同处理蒸腾速率日变化

3.1.4 不同处理对苹果树胞间 CO_2 浓度日变化的影响 C_i 日变化与 P_n 、 G_s 日变化趋势相反, 总体呈不断上升趋势, 这是因为果树光合作用合成的主要原料是胞间 CO_2 [28]。当 P_n 越大时, 所需 CO_2 就越多, 从而引起植物 C_i 的降低, 此外 C_i 还受空气、温度和 G_s 等变化的影响 [29-30]。外界空气、温度的变化会影响果树叶片内 CO_2 浓度, 而 G_s 的变化会影响 CO_2 进入叶绿体的流动速度 [30-31]。由图 4 可知, 6 个处理的 C_i 在 $56.70 \sim 331.00 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间, 各处理在 09:00 时则维持在相对较低水平, 这可能是因为早晨的温度和光照度相对较低的关系, 可能也与叶片 P_n 参数的变化有关。而除了 B-1 处理外, 其他处理的 C_i 在 15:00—17:00 时开始升高, 这可能与叶片的呼吸作用 (即呼吸 CO_2 、释放 O_2 以增加呼吸底物) 有关, 也可能与净光合速率降低, 叶片所需 CO_2 减少有关。

3.1.5 不同处理对苹果树叶片水分利用效率日变化的影响 WUE 从实质上讲, 是指植物单位内消耗的水分含量生产干物质的量, 如果水分被同化, 则要通过科学研究测量来判断植物生长过程的综合生理生态指标 [32]。水分利用效率主要受植物自身特性、环境条件和栽培措施的影响 [33], 其环境条件和栽培措施对水分有很大影响, 因为还会影响到光

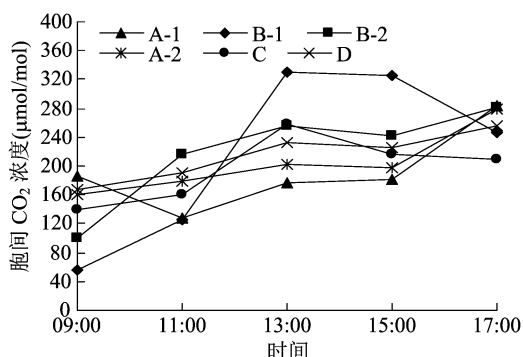


图4 不同处理胞间 CO_2 浓度日变化

合作用和蒸腾作用。由图 5 可知, 不同处理的 WUE 均呈 W 形日变化趋势, 5 种处理的变化趋势与对照基本一致, 都是先降后升再降再升的变化趋势, 第 1 个峰值在 09:00, 第 2 个峰值出现在 13:00 左右, 最后一个峰值出现在 17:00, 并且每次的降幅和增幅都较小。由表 1 可知, B-1 和 B-2 处理叶片水分利用效率的日均值仅次于 A-2 处理, 说明低量穴贮肥水结合保水剂和高量穴贮肥水结合保水剂能有效地提高苹果树的水分利用效率和增强树体的抗旱能力。各处理 WUE 之间存在显著差异, 日均值表现为 A-2 处理 > B-2 处理 > B-1 处理 > D 处理 > A-1 处理 > C 处理。

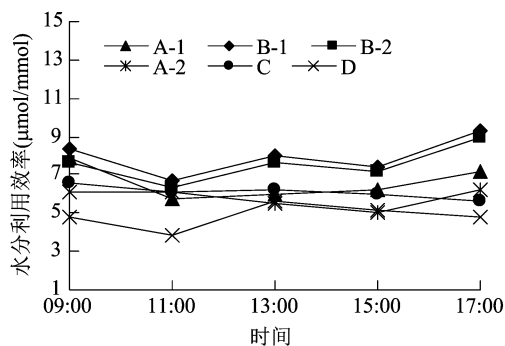


图5 不同处理水分利用效率日变化

由表 1 可知, 光合参数多重日均值比较 [22] 结果表明, P_n 和 C_i 在 6 个处理间均无显著差异; G_s 、 T_r 和 WUE 在不同处理间存在显著差异。A-1 处理的 G_s 和 T_r 高于其他处理, 且与 B-1、B-2、A-2 处理差异显著; A-2 处理的 WUE 高于其他处理, 且与 A-1、C、D 处理差异显著; B-2 处理的气孔导度低于其他处理, 比 A-1 处理低 53.78%。B-2 处理的胞间 CO_2 浓度最高 ($219.09 \mu\text{mol}/\text{mol}$), 比 A-1 处理高 14.91%; 在净光合速率方面, A-1 处理最高, 高达 $21.49 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, B-2 处理最低, 为 $18.25 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最高值比最低值高 17.75%。

表 1 不同处理光合参数的日平均值

处理	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	G_s [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	WUE ($\mu\text{mol}/\text{mmol}$)
A-1	21.49 ± 1.73a	0.119 ± 0.015a	190.67 ± 16.73a	4.99 ± 0.54a	4.99 ± 0.60b
B-1	19.31 ± 1.25a	0.064 ± 0.111bc	216.81 ± 32.07a	2.52 ± 0.21c	7.98 ± 0.36ab
B-2	18.25 ± 1.15a	0.055 ± 0.010c	219.09 ± 19.09a	2.77 ± 0.37c	9.70 ± 1.92ab
A-2	19.73 ± 1.24a	0.076 ± 0.009bc	203.87 ± 17.74a	3.41 ± 0.44bc	13.00 ± 4.66a
C	20.53 ± 1.54a	0.097 ± 0.011ab	197.07 ± 15.73a	4.44 ± 0.40ab	4.91 ± 0.45b
D	18.33 ± 1.15a	0.089 ± 0.015abc	214.53 ± 11.29a	4.08 ± 0.58ab	5.43 ± 0.54b

注:同列数据后标有不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表 2 同。

3.2 不同处理对苹果树叶绿素荧光参数日变化的影响

叶绿素荧光参数指标反映植物叶片对光合系统日变化重要的调节过程。叶绿素荧光参数的变化与苹果树各项指标有着密不可分的关系,外界环境中的各种因素对光合作用的影响都可以通过叶绿素荧光表现,因此,通过叶绿素荧光分析评估光合机制的光合能量^[34-35]。

3.2.1 不同处理对苹果树初始荧光日变化的影响

F_o 。又称零水平荧光,表示叶片气孔处于完全开放时的光化学反应中心释放出的荧光产量^[36],PS II 反应中心受到破坏或出现逆失活现象都会表现出 F_o 。处于上升状态^[37-40]。因此,光化学反应中心的状况和光保护机制的变化可根据 F_o 的日均值变化来推

测^[41]。由图 6-a 可知,各处理的初始荧光日均值变化趋势不一致,B-1 处理的最大值在 15:00 出现, F_o 的变化趋势呈“倒 W”形,在 17:00 时处于最低,可能是因为植物经历高温和强光的照射,PS II 反应中心出现了失活现象;其中 B-2 处理的 F_o 从早晨开始总体呈不断降低趋势,这说明该处理的 PS II 反应中心失活比较严重,也表明该处理耐不住高温和强光的照射;而 B-1、A-1 和 D(对照)处理的 F_o 总体呈先上升后下降趋势,这表明叶片光合系统受到强光破坏或出现可逆失活现象时这都是光抑制导致的结果。由表 2 可知,B-1 处理的 F_o 日均值在 6 个处理中最高,表明该处理较耐强光和高温直射。各处理苹果树的 F_o 日均值间差异不显著。

表 2 不同处理叶绿素荧光参数日平均值

处理	F_o	F_v'/F_m'	F_v/F_m	F_m	ETR
A-1	554.43 ± 21.35a	0.350 ± 0.025c	0.667 ± 0.032a	1 906.45 ± 173.35b	31.70 ± 3.55ab
B-1	617.73 ± 29.56a	0.356 ± 0.028c	0.660 ± 0.036a	2 086.13 ± 154.45ab	40.06 ± 6.54a
B-2	564.61 ± 16.41a	0.424 ± 0.016b	0.678 ± 0.021a	1 899.22 ± 126.81b	29.17 ± 4.10abc
A-2	581.74 ± 16.38a	0.456 ± 0.019ab	0.731 ± 0.010a	2 251.42 ± 112.63ab	30.75 ± 4.61ab
C	606.45 ± 24.43a	0.505 ± 0.024a	0.718 ± 0.032a	2 458.66 ± 163.02a	21.00 ± 1.63bc
D	599.97 ± 21.81a	0.422 ± 0.011b	0.657 ± 0.034a	2 021.97 ± 154.01ab	17.76 ± 2.27c

3.2.2 不同处理对苹果树 PS II 最大光化学量子产量日变化的影响 F_v/F_m 是反映苹果树叶片经过一定时间暗反应后的测定值,也是表明植物叶片受环境胁迫程度的探针和指标^[42],变化规律的研究中最为广泛的光抑制指标。由图 6-c 可知,各处理的 F_v/F_m 日变化规律不一致,在 15:00—17:00 时 A-1 处理以外的 5 个处理 F_v/F_m 变化幅度不大,但 C 处理一直高于其他处理;在 09:00—11:00 时,B-1、D 和 C 处理的 F_v/F_m 随着温度的升高和强光的照

射而迅速下降,11:00 时降至最低值,11:00—13:00 时,这 3 个处理随着光照度和温度的降低, F_v/F_m 急剧上升;之后, F_v/F_m 逐渐恢复,但各处理的降幅、恢复幅度及时间也不尽相同;17:00 时 A-2 处理恢复至各处理中最高,B-1、B-2、C 和 D 处理次之,A-1 处理最低。 F_v/F_m 的下降表明所有处理苹果树叶片在强光及高温下,表现为 PS II 光化学效率值降低,出现光抑制;而到下午时随着光强度的变弱和温度的降低, F_v/F_m 值逐渐恢复,由此可以说明中午

时 PS II 的下降是短暂可逆的,而中午时 PS II 降低应该是植物因避免强光伤害叶片的一种适应调节方式。由表 2 可知,各处理之间均差异不显著。

3.2.3 不同处理对苹果树最大荧光日变化的影响

F_m 是表示苹果树叶片气孔处于完全关闭状态下的光化学荧光产量,而 F_m 下降的特征就表明光受抑制^[43]。由图 6-d 可知,C 和 B-1 处理的 F_m 日变化规律较为一致,呈不规则的单谷形,最大值出现在 15:00,分别为 2 912.17 和 2 655.50,最小值出现在 11:00 时,分别为 1 536.86 和 1 147.36;但 D 处理的 F_m 日变化规律成双谷形,最大值出现在 13:00 时,之后出现第 2 个低谷,且在第 1 个低谷出现最小值(1 279.00);而 A-1 处理的 F_m 值呈双峰形,2 个峰值分别出现在 11:00 和 15:00,分别为 2 543.00 和 2 475.50。由表 2 可知,各处理存在显著差异。

3.2.4 不同处理对苹果树 PS II 有效光化学量子产量日变化的影响

F_v'/F_m' 是指叶片不经过暗适应

条件可直接测得,反映开放的光化学反应中心原初光能捕获效率^[44]。从图 6-b 中看出,A-1 处理的 F_v'/F_m' 日变化呈现的是双峰曲线;B-2 处理的 F_v'/F_m' 日变化基本形成一条直线;13:00 时 A-2、B-2、C、D 处理明显高于 A-1、B-1 处理,其他几个处理之间没有明显差异。而且 09:00—17:00 时 A-1、B-1 处理的 F_v'/F_m' 变化起伏相对较大,13:00—17:00 时 C 处理的 F_v'/F_m' 最高,A-1 处理最低,13:00 和 17:00 时 F_v'/F_m' 最高值比最低值分别高 119.92% 和 125.31%。

3.2.5 不同处理对苹果树光合电子传递速率日变化的影响

ETR 是反映实际光照度下的表观光合电子传递速率。由图 6-e 可知,6 个处理的 ETR 日变化趋势均不一致,A-1、A-2、C 和 D 处理的 ETR 在 15:00—17:00 不断增高,说明光照度在不断减小,其中 B-1 处理在 13:00—15:00 最高,D 处理最低,B-1 处理分别比 D 处理高 369.26% 和 375.28%。由表 2 可知,各处理间存在显著差异。

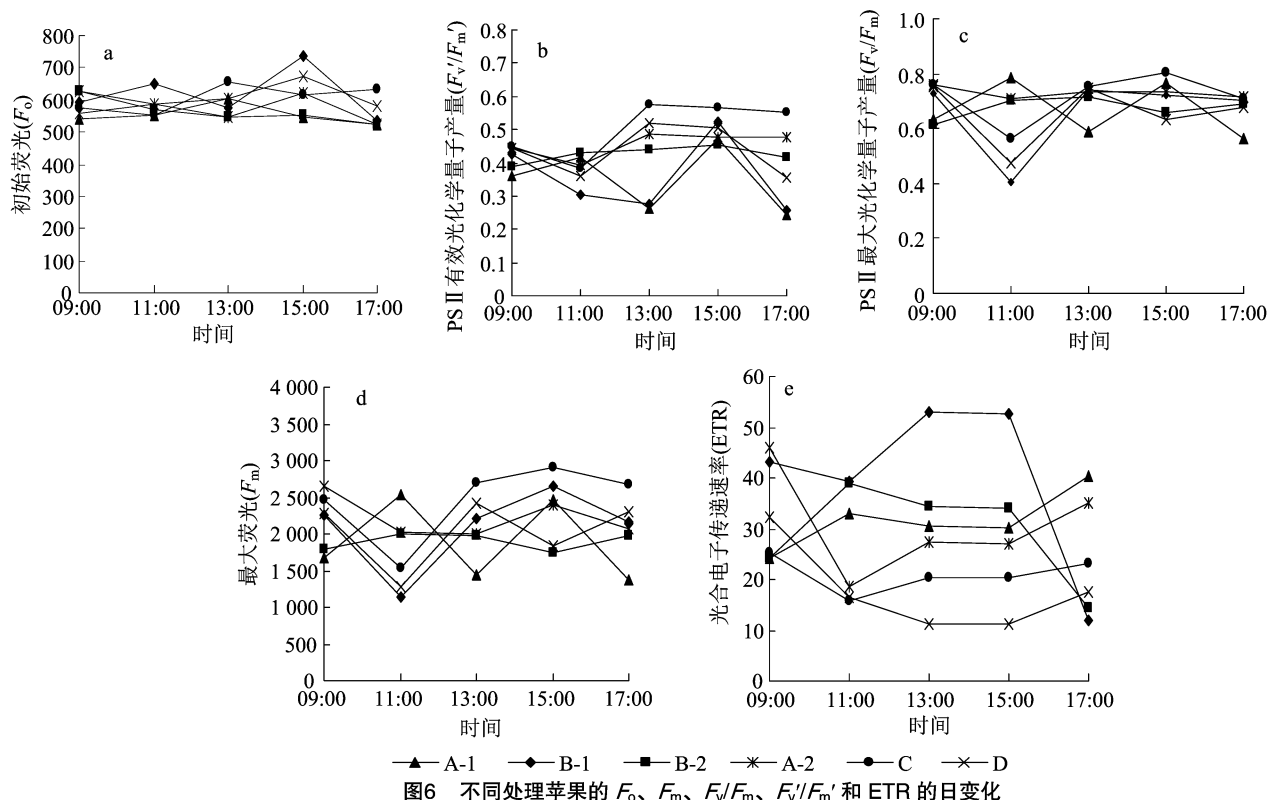


图6 不同处理苹果的 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 和 ETR 的日变化

多重比较结果(表 2)显示,C 处理的 F_m 最大且显著高于 A-1 和 B-2 处理;各处理的 F_0 差异均不显著,其中 B-1 处理的日均值最高,为 617.73;各处理的 F_v/F_m 也差异不显著;各处理的 F_v'/F_m' 存在显著差异,其中 C 处理的日均值最高,且显著

高于 A-2 处理以外的其他处理;B-1 处理的 ETR 日均值显著高于 C、D 处理,但与 A-1、B-2 和 A-2 处理差异不显著,而 A-1 和 A-2 处理差异不显著。C 处理叶绿素荧光参数中的 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 的日均值均处于较高水平,只有 F_m 、 F_v'/F_m'

与其他处理存在显著差异,表明在相同的环境因子条件下,采用 C 处理有利于提高苹果树叶片的捕捉能力和光能利用率,其更有利于苹果树的生长。穴贮肥水施入保水剂处理的叶绿素荧光参数中个别参数的日均值高于穴贮肥水处理和对照,说明施入保水剂有利于光能效率和水分的提高以及积累更多的营养物质,同时也增强了抗旱性。

3.3 不同处理对光合与荧光参数影响情况的相关性与综合评价

3.3.1 相关性分析结果 对不同处理的光合特性

与荧光参数日均值间进行相关性分析(表 3), P_n 与 G_s 和 T_r 、 G_s 与 T_r 、 C_i 与 WUE 、 F_o 与 F_m 、 F_v/F_m 与 F_m 、 F_v'/F_m' 与 F_v/F_m 和 F_m 存在极显著正相关关系 ($P<0.01$); P_n 与 C_i 和 WUE 、 G_s 与 C_i 、 C_i 与 T_r 、 T_r 与 WUE 存在极显著负相关关系 ($P<0.01$); P_n 与 F_v'/F_m' 、 G_s 与 WUE 存在显著负相关关系 ($P<0.05$); C_i 与 F_v/F_m 存在显著正相关关系 ($P<0.05$)。这一结果说明苹果树叶片光合与荧光各参数之间存在一定的联系,对此尚需借助数学隶属函数法加以综合评价。

表 3 各光合与荧光参数间的相关性分析

相关参数	相关系数									
	P_n	G_s	C_i	T_r	WUE	F_o	F_v'/F_m'	F_v/F_m	F_m	ETR
P_n	1.000									
G_s	0.716 **	1.000								
C_i	-0.492 **	-0.586 **	1.000							
T_r	0.578 **	0.597 **	-0.306 **	1.000						
WUE	-0.279 **	-0.247 *	0.306 **	-0.560 **	1.000					
F_o	-0.182	-0.107	-0.113	-0.217 *	0.059	1.000				
F_v'/F_m'	-0.248 *	-0.113	0.095	-0.185	0.108	0.061	1.000			
F_v/F_m	-0.117	-0.035	0.209 *	-0.211 *	0.044	-0.058	0.346 **	1.000		
F_m	-0.176	-0.040	0.121	-0.207	0.001	0.278 **	0.386 **	0.878 **	1.000	
ETR	-0.015	0.048	0.065	-0.100	0.041	-0.079	-0.268 *	0.062	-0.007	1.000

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

3.3.2 不同处理苹果树光合能力综合评价 利用模糊数学隶属函数法对黄土高原旱地果园苹果树 6 个处理叶片光合与荧光参数等 10 个指标进行综合分析,综合评价 6 个处理苹果树对光合作用能力的强弱。

计算 6 个不同处理各指标的隶属函数值,求取平均值。

用以下公式计算每个处理各项指标的具体隶属函数值:

$$U_{in} = \frac{x_{in} - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}}。$$

(2)

与净光合速率呈负相关的指标,则利用反隶属函数计算。

$$U_{in}' = 1 - \frac{x_{in} - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}}。$$

(3)

式中: U_{in} 和 U_{in}' 均为第 n 个处理第 i 个指标原始值转化后的隶属函数值; x_{in} 指第 n 个处理第 i 个指标的原始测定值; x_{imax} 和 x_{imin} 分别指处理组中第 i 个指标的最大值与最小值。

把每个处理各项指标的隶属函数值 (U_{in}) 累加,取平均值,根据各处理平均值大小确定光合作用强弱,即平均值越大,光合作用越强。

由表 4 可知,6 个处理苹果树光合能力表现为 A-1 处理 > B-2 处理 > B-1 处理 > D (对照) 处理 > C (秸秆) 处理 > A-2 处理。除 C 和 A-2 处理光合能力较 D 处理弱之外,其他处理苹果树的光合能力均强于 D 处理。这一结果还有待于下一步深入研究。

4 讨论与结论

光合作用产生效率可能是直接决定每张苹果树落叶植物机体生长和繁殖发育作用结果的重要生理基础,苹果树各器官受光干扰性的有害物质 90% 以上都可能直接来自每张苹果树叶片的 光合产物,也是一个复杂的苹果树植物机体生理功能转化利用过程,苹果树经济利用价值和产量的高低、果实具有营养品质的保证是否优劣都与它的运动光合作用存有一定的相关性,其中苹果树叶片上的运

表 4 不同处理果树光合能力综合评价

处理	隶属函数值											排序
	P_n	G_s	C_i	T_r	WUE	F_o	F_v'/F_m'	F_v/F_m	F_m	ETR	均值	
A-1	1.00	0.86	0.00	0.52	0.51	0.91	1.00	0.52	0.78	0.50	0.66	1
B-1	0.98	0.42	1.00	0.26	0.22	1.00	0.59	0.08	0.36	0.00	0.49	3
B-2	0.10	0.04	0.92	0.01	0.13	0.96	0.29	1.00	1.00	1.00	0.55	2
A-2	0.14	0.25	0.13	0.27	0.50	0.00	0.38	0.01	0.00	0.90	0.28	6
C	0.37	0.00	0.60	0.00	0.00	0.67	0.45	0.00	0.15	0.66	0.29	5
D	0.00	1.00	0.28	1.00	1.00	0.52	0.00	0.09	0.27	0.66	0.48	4

动光合作用产生效率与自身外界环境因素,比如叶片中的叶绿素含量、叶片的薄厚度、叶片成熟速率的影响程度密切交互相关,又直接反映受到自然光照度、气温、空气相对湿度、土壤生物含水量等各种自身外界环境因子影响^[45]。 P_n 作为衡量植物光合特性中最重要的几个参数之一,可以直接反映植物气孔同化 CO_2 的能力, CO_2 的进入和水分的排出主要是通过气孔,而 P_n 和 T_r 的变化主要与气孔开度有密切的关系^[36]。本研究结果表明,6 个处理的苹果树叶片的 P_n 、 G_s 总体呈下降趋势,D(对照)处理的净光合速率日均值低于其他处理,说明穴贮肥水不同处理和秸秆覆盖均能提高苹果树叶片的光合作用。6 个处理均没出现“午休”时间,说明中午的光照度、温度等没有达到最高, T_r 降低,引起了 G_s 和 C_i 的增大,从而使 P_n 降低,叶片的固有物质转运速度下降,从而形成气孔半开状态。

植物叶绿素荧光参数与光合作用之间存在紧密的关系,其叶绿素荧光参数成为研究植物光合作用的有效探针^[46-47]。本研究表明,6 个处理苹果树叶片的叶绿素荧光参数存在差异,说明果树叶片光合作用受到一定程度上的外界环境因素影响。叶片靠叶绿素吸收到的全部光能大多数用于光合作用,少量的是以热量的形式消耗出来。 F_v/F_m 用来反映苹果树叶片对光化学反应的能力^[43],值越低,表明植物光抑制的能力越高^[48-49]。本试验结果表明,D 处理(对照)光化学反应的最大光合效率最低,光抑制程度较高。A-2 处理的 F_v/F_m 日均值最高,且它的日变化趋势较为平稳,说明该处理对苹果树耐光抑制有明显的优势。PS II 反应中心的可逆失活也会使 F_o 升高。该研究表明,A-1 处理的 F_o 日均值比其余处理低,上午随着光照度的增加,非辐射耗能增加,以保护光合系统不受强光伤害。而中午后,光照度越来越大, F_o 急剧升高,说明 PS II 反应中心出现可逆失活或破坏。整体表明,荧光参

数的变化说明植物的光合作用在强光及高温下其光合活性受到了抑制,随着温度及光照度的下降,其光合机构的功能得以恢复,但也有部分因被破坏而不能恢复。

通过隶属函数法综合评价了 5 个处理和对照苹果树叶片的光合荧光特征,其综合评价 A-1 处理最高,B-2、B-1 处理次之,C(秸秆)、D 处理(对照)再次,A-2 处理最低。从光合及叶绿素荧光特性综合评价方面来看,除 A-2 处理和 C(秸秆)处理外,其他处理的光合能力均较高于 D 处理(对照)。A-2 和 C(秸秆)处理的光合能力低于对照,可能是与果园的地势条件有关,但是具体的原因这还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] Murchie E H, Horton P. Contrasting patterns of photosynthetic acclimation to the light environment are dependent on the differential expression of the responses to altered irradiance and spectral quality [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1998, 21 (2): 139 - 148.
- [2] 郭玉华,蔡志全,曹坤芳,等. 四种热带雨林树种光合和形态解剖特征对不同生长光强的适应[J]. *武汉植物学研究*, 2004, 22 (3): 240 - 244.
- [3] Vendramini F, Díaz S, Gurvich D, et al. Leaf traits as indicators of resource - use strategy in floras with succulent species [J]. *New Phytologist*, 2002, 154: 147 - 157.
- [4] Westoby M. Aleaf - height - seed (LHS) plant ecology strategy scheme [J]. *Plant and Soil*, 1998, 199: 213 - 227.
- [5] 郑文君,范崇辉,韩明玉. 不同天气对苹果叶片光合特性的影响 [J]. *西北农业学报*, 2007, 16 (6): 124 - 127.
- [6] 牛俊玲,解思敏. 果园生草对苹果树光合特性影响的研究 [J]. *山西农业大学学报*, 2000, 20 (4): 353 - 355.
- [7] 程来亮,罗新书. 覆草、覆膜对苹果叶片光合速率日变化的影响 [J]. *果树科学*, 1991, 8 (3): 135 - 138.
- [8] 王继和,张吨明,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.
- [9] 曹冬梅,康黎芳,王云山,等. 根外施钾对苹果幼树气孔特性及光合速率的影响 [J]. *山西农业科学*, 2002, 30 (1): 57 - 60.
- [10] 杨广远. 三个品种络石的光合生理特性及耐旱性研究 [D]. 杭

- 州:浙江农林大学,2013.
- [11]姚甲宝,楚秀丽,周志春,等. 3 个与杉木混植木荷种源幼苗对光照响应的差异[J]. 林业科学研究,2018,31(6):144–153.
- [12]吴泽珍,温 玥,胡 真,等. 红富士芽变类型及芽变品种叶片特征与光合特性[J]. 新疆农业科学,2021,58(6):1086–1094.
- [13]孙 猛,吕德国,刘威生. 杏属植物光合作用研究进展[J]. 果树学报,2009,26(6):878–885.
- [14]王直亮,陈静芳,林静怡,等. 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.
- [15]辛 娟. 秦安花椒产业发展存在的问题及对策探讨[J]. 农业科技与信息,2018(24):82–83.
- [16]赵海亮,赵文东,孙凌俊,等. 不同架式巨峰葡萄光合特性与叶绿素荧光参数研究[J]. 西南农业学报,2015,28(6):2691–2695.
- [17]李月灵,金则新. 玉兰叶片光合速率和叶绿素荧光参数的日变化[J]. 江苏农业科学,2012,40(9):164–168.
- [18]陈学森,韩明玉,苏桂林,等. 当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见[J]. 果树学报,2010,27(4):598–604.
- [19]林世青,许春辉,张其德,等. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用[J]. 植物学通报,1992,27(1):1–16.
- [20]杨华应,刘桂虎,周应兵,等. 干旱胁迫下 5 个烤烟品种的生理指标变化及抗旱性比较[J]. 安徽农业科学,2017,45(13):20–23.
- [21]金则新,熊 能. 千岛湖次生林优势种幼苗光合特性及其对群落演替的指示意义[J]. 浙江大学学报(理学版),2011,38(5):570–578.
- [22]韩多红,周德峰,孟好军,等. 河西走廊干旱荒漠区 9 个梨品种光合特性的比较研究[J]. 西部林业科学,2020,49(3):36–40.
- [23]陈 彤,柯世省,张阿英. 木荷夏季气体交换、光能和水利用效率的日变化[J]. 天津师范大学学报(自然科学版),2005,25(4):28–31.
- [24]李 惠,梁曼曼,赵 丹,等. 不同砧木对‘绿岭’核桃叶片光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北林学院学报,2017,32(2):90–96.
- [25]莫 凌,黄玉清,覃家科,等. 西南喀斯特地区四种植物水分生理的初步研究[J]. 广西植物,2008,28(3):402–406.
- [26]任永福,陈国鹏,蒲 甜,等. 玉米–大豆带状种植中套作高光效玉米窄行穗位叶光合特性对弱光胁迫的响应[J]. 作物学报,2019,45(5):728–739.
- [27]刘建福. 澳洲坚果叶片光合速率和叶绿素荧光参数日变化[J]. 西南农业大学学报(自然科学版),2006,28(2):271–274.
- [28]章华婷,金则新,赵 喆,等. 盐胁迫对濒危植物夏蜡梅生长及光合生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(7):142–146.
- [29]董 乔. 不同光照强度下温室黄瓜对 CO₂ 浓度需求的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [30]朱昌春,管 铭,李月灵. 不同品种牡丹光合生理特性及叶绿素荧光参数比较[J]. 江苏农业科学,2015,43(6):143–147.
- [31]杨玉珍,张云霞,彭方仁. 干旱胁迫对不同种源香椿苗木光合特性的影响[J]. 北京林业大学学报,2011,33(1):44–48.
- [32]田再民,龚学臣,祁利潘,等. 不同种植密度对冀张薯 8 号光合特性的影响[J]. 湖北农业科学,2014,53(13):2995–2998.
- [33]李林光,李芳东,王 颖,等. 苹果四倍体品种叶绿素荧光参数的日变化[J]. 果树学报,2011,28(1):129–133.
- [34]彭星星,郭 正,张玉娇,等. 长期有机肥与化肥配施对渭北旱塬苹果园水分生产力和土壤有机碳含量影响的定量模拟[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(1):33–43.
- [35]王建华,李立颖. 连翘叶片光合速率日变化特征的研究[J]. 林业建设,2018(1):34–38.
- [36]朱志花,马 明,金高明,等. 五个苹果品种的光合特性及叶绿素荧光比较研究[J]. 北方园艺,2015(20):6–12.
- [37]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.
- [38]潘 越,王 明,马合木提·阿不来提,等. 不同配方叶面肥对苹果光合特性日变化规律的影响[J]. 经济林研究,2019,37(1):87–93,116.
- [39]潘 越,郭 靖,韩政伟,等. 不同配方叶面肥处理下苹果光响应模型选择及综合评价[J]. 西南农业学报,2021,34(4):806–813.
- [40]许大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002.
- [41]牛莹莹,廖 康,赵世荣,等. 不同栽植密度库尔勒香梨光合及叶绿素荧光特性比较[J]. 经济林研究,2017,35(1):8–14.
- [42]柯世省,张文标,林恒琴. 光照强度对七子花苗期光合蒸腾特性的影响[J]. 台州学院学报,2002,24(3):60–65.
- [43]徐 灿,孙建波,宋建辰,等. 滴灌水肥一体化不同施氮量对玉米叶绿素含量和荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(10):54–58.
- [44]徐崇志,全绍文,朱 玲,等. 不同核桃品种叶绿素荧光动力学参数比较研究[J]. 中国农学通报,2015,31(7):6–12.
- [45]黄丽芳,李金芹,王晓阳,等. 基于幼苗光合及叶绿素荧光参数的 3 种咖啡耐低温胁迫的综合评判[J]. 福建农业学报,2020,35(10):1063–1070.
- [46]梁宗锁,康绍忠. 植物水分利用率及其提高途径[J]. 西北植物学报,1996,16(6):79–84.
- [47]里程辉,于 辉,吕德国,等. 干湿交替下不同中间砧对岳冠苹果叶片光合特性及叶绿素荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(2):108–114.
- [48]Ball J T, Woodrow I E, Berry J A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions[M]//Biggins J. Progress in photosynthesis research. Dordrecht:Springer,1987:221–224.
- [49]冀中锐,李 建,史根生,等. 不同植物生长调节剂对“汾核 1 号”核桃光合特性的影响[J]. 安徽农业科学,2018,46(26):108–109.