

陇东旱地果园地表覆盖方式对苹果光合特性的影响

孙文泰, 赵明新, 尹晓宁, 董 铁, 刘兴禄, 牛军强, 马 明*

(甘肃省农业科学院 林果花卉研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为筛选出适宜陇东旱塬地区苹果园的土壤耕作模式, 以 20 年生苹果树为试材, 研究不同地表覆盖方式对苹果叶片光合特性的影响, 并从经济效益方面进行比较分析。结果表明: 清耕(F4)净光合速率(P_n)日变化为双峰型, 地膜覆盖(F1)、麦草覆盖(F2)和覆砂(F3)为单峰型; 其中覆草净光合速率最高, 10:00 达到峰值, 并显著提高水分利用效率(WUE)($P < 0.01$)。净光合速率(P_n)与大气相对湿度(RH)呈极显著正相关, 与气温(T_a)、叶温(T_l)呈显著负相关; 蒸腾速率(Tr)则与 T_a 与 T_l 呈显著正相关。覆草后光补偿点(LCP)显著降低, 光饱和点(LSP)显著提高, 表明对光照的适应范围较宽; 并且 $P_{n_{max}}$ 显著高于 CK, CO_2 补偿点显著低于 F1、F3 和 F4。经济效益分析表明, 覆膜果园的收入与产投比均较高。可见, 陇东旱地果园覆草和覆膜均可显著提高富士苹果叶片光合作用, 增强光能与 CO_2 的利用能力, 有利于干物质形成, 增加产量。

关键词: 覆盖方式; 富士苹果; 光合特性; 经济效益

中图分类号: S661.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)03-0019-07

Effects of different mulch modes on apple photosynthesis in dry-land orchards of east Gansu Province

SUN Wen-tai, ZHAO Ming-xin, YIN Xiao-ning, DONG Tie, LIU Xing-lu, NIU Jun-qiang, MA Ming*

(Institute of Forestry, Fruits and Floriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to select the proper soil tillage model for apple orchard in dry highland of Longdong, different surface mulch modes were tested on twenty-years old 'Fuji' apple. The photosynthetic characters of apple trees in different modes were analyzed, and economic efficiency was compared also. The results showed that diurnal changes of photosynthetic rate (P_n) presented double-peak curve in clean tillage treatment(F4). The diurnal changes of photosynthetic rate (P_n) in film mulch, straw mulch, and gravel mulch showed one-peak curve. The highest net photosynthetic rate gained in grass cover mode, peaked at 10:00 am. Water use efficiency (WUE) was significantly increased ($P < 0.01$) as well. Photosynthetic rate (P_n) was significantly positively correlated with atmospheric relative humidity (RH), and was significantly negatively correlated with air temperature (T_a) and leaf temperature (T_l). There was significant positive correlation between transpiration rate (Tr) and air temperature (T_a) and leaf temperature (T_l). After covered with straw, LCP was significantly decreased but LSP was increased. $P_{n_{max}}$ in straw cover mode was greater than in CK. CCP in straw cover mode was significantly lower than in F1、F3 and F4. The economic analysis showed that film mulch mode had high income to cost ratio. In conclusion, in dry land orchard, straw cover and film mulch significantly increased photosynthesis and the yield of 'Fuji' apple, enhanced the dry matter formation, and improved light and CO_2 utilization capacity of apple trees.

Keywords: cover mode; 'Fuji' apple; photosynthesis; economic benefit

甘肃陇东地处陕、甘、宁三省(区)交汇处, 位于黄土高原西端, 光照充足, 昼夜温差大, 是苹果优势产区, 但由于该区春旱及伏旱严重, 水资源不足, 降

水分布不均, 果园土壤耕作多采用传统的清耕制方法, 导致土壤水分大量蒸发, 严重影响果树生长和果实发育。干旱少雨与水分利用率低成为制约该地区

收稿日期: 2013-02-14

基金项目: 国家苹果产业技术体系专项资金(CARS-28); 甘肃省苹果产业科技攻关项目(2010-429); 甘肃省农业综合开发科技推广项目(2008-1); 国家科技支撑课题(2007BAD52B03)

作者简介: 孙文泰(1983—), 女, 山东潍坊人, 实习研究员, 硕士, 主要从事果树栽培研究工作。E-mail: swt830312@126.com。

* 通信作者: 马 明(1965—), 男, 甘肃秦安人, 研究员, 主要从事果树栽培与生理研究。E-mail: maming65118@163.com。

果树产业发展的主要障碍^[1-2]。因此,实施果园地面覆盖,减少地表水分蒸散,充分利用有限的降水资源成为挖掘果树增产优质潜力的一个重要方面。为研究不同的地表覆盖方式对苹果树光合特性的影响,本试验以红富士苹果为对象,研究不同地表覆盖条件下苹果树叶片的光合特性,并进行相关经济效益分析,为该区域筛选出适宜的地表覆盖模式提供参考,为当地苹果园科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于甘肃省平凉市泾川县飞云乡元朝村(35°30.807'N,107°60.118'E),属黄土高原雨养旱地,海拔 1 286 m,年降水量 553.4 mm,年蒸发量 1 339.6 mm。冬春干旱较重,降雨多集中于 7—9 月。年均气温 10℃,无霜期 174 d,年均日照时数 2 274 h。试验地为覆盖黑垆土,土壤有机质含量 10.2 g·kg⁻¹,pH 8.2,100 cm 土层内土壤容重为 1.35 g·cm⁻³。该区无灌溉条件,属完全雨养型农业区。

1.2 试验材料

试材为同一果园 20 a 生红富士苹果树,品种为长富 2 号,基砧为山定子,中间砧为 M26,主要授粉品种为新红星、秦冠,株行距为 3 m×4 m。园区果树生长健壮,树体差异小,无病虫害,果树生长管理状况在该区域具有代表性。

1.3 试验设计及方法

本试验于 2011 年春季进行试验处理设置,8 月进行光合指标测定。试验共设置 4 个处理:覆膜(F1):每年 3 月,在树冠投影处内侧 20~30 cm,挖宽、深各 40 cm 的沟,施入基肥(腐熟有机肥 50 kg·株⁻¹)后回填。在施肥坑外顺行向,贴施肥坑外缘做宽、深分别为 10 cm 的集雨沟。沟土覆盖于行内,高 10 cm,垄面距主干处高,呈斜面,主干周围 3~5 cm 处不埋土,上覆黑色地膜(厚度 0.02 mm,宽 1.2 m,山西迎太塑料有限公司生产,用膜费用 900 元·hm⁻²);覆草(F2):麦草覆盖,厚 15 cm,折合重量 22.5 kg·株⁻¹,每公斤 0.15 元,以 18 562.5 kg·hm⁻²的麦草覆于全园整个行间及树盘下,用 1% 的尿素喷湿,麦草上覆土防止被风吹散;覆砂(F3):水洗河砂覆盖,厚 5 cm,60 元·m⁻³,每公顷覆盖量 468.75 m³;清耕 CK(F4):当地传统耕作方式。处理间其它管理一致。每处理选取 4 株生长一致的试材,每株选取树冠外围长势中庸的长枝中部叶片,每叶重复测定 3 次。各试验小区施肥量一致,树体管理统一按常规方法进行,全部进行套袋生产。

选择典型晴天进行光合指标的测定。每植株选取树冠外围长势中庸的长枝中部 6 片叶,采用开放式气路,根据当时环境条件设定参数:大气 CO₂ 含量 400 μL·L⁻¹,光强 1 000 μmol·m⁻²·s⁻¹,叶室温度 25℃。仪器选用光合作用分析仪(Li-6400, Li-cor Inc., Lincoln, USA),测定时间为 9:00~11:00,重复 3 次。测定叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)及光合有效辐射(PAR)等参数,测定时间 8:00~19:00,每整点测量 1 次,每片叶测定 3 次,进行各参数日变化的测定。水分利用率(WUE) = 净光合速率(P_n)/蒸腾速率(T_r)。

9:00~11:00,通过控制光照和 CO₂ 摩尔分数进行光曲线和 CO₂ 曲线的测定。

光响应曲线($P_n - PAR$)的测定:观测过程中将叶温设置为 25℃,相对湿度 60%,由人工钢瓶提供的 CO₂ 浓度设置为 400 μmol·mol⁻¹,用 Li-6400 的人工光源(Li-6400-02B 红蓝光源),并手动设置 PAR 梯度为 0、20、40、60、80、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 500、2 000 μmol·m⁻²·s⁻¹,3 次重复。以 PAR 为横轴绘制 $P_n - PAR$ 响应曲线,求得光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)和暗呼吸速率(R_d)等参数。用直线回归求得该响应曲线的初始斜率(以 PAR 低于 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 的数据进行回归),即为表观量子效率(AQY)。

CO₂ 响应曲线的($A - C_i$ curve)测定采用 Li-6400-01 CO₂ 注入器和液化 CO₂ 钢瓶,设置 CO₂ 浓度梯度为 50、80、100、150、200、400、600、800、1 000、1 200、1 500、1 800、2 000 μmol·mol⁻¹,在 $A - C_i$ 曲线测定过程中, PAR 设置为 1 500 μmol·m⁻²·s⁻¹,叶温控制在 25℃左右。以 CO₂ 摩尔分数为横轴制作 $P_n - CO_2$ 响应曲线,求得 CO₂ 补偿点(CCP)、CO₂ 饱和点(CSP)及饱和点时净光合速率($P_{n,max}$)。以 $A - C_i$ 中直线部分的斜率来衡量此时的 CO₂ 羧化效率(CE)。

1.4 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2003 软件、SPSS17.0 软件进行数据分析和非直角双曲线模型进行曲线拟合。

2 结果与分析

2.1 不同地表覆盖处理的苹果树光合特性比较

由表 1 可知,不同覆盖条件下富士苹果净光合速率(P_n)不同,CK(F4)苹果叶片的 P_n 最低,为 15.49 μmol·m⁻²·s⁻¹;各覆盖处理均可有效提高叶片 P_n ,其中以 F2 的效果最佳,为 17.63 μmol·m⁻²·s⁻¹,是 F4 的 113.82%,说明覆草可增加果树的光合

原料,增大了叶片的气孔开度,有利于叶片 P_n 提高;覆草阻挡太阳光直接照射地面,具有降温的作用,可达到光合酶最适宜温度,增强酶促反应,有利于 P_n 的增强;胞间 CO_2 (C_i)随 P_n 的增加而下降。可能是因为光合作用增强,消耗的 CO_2 增多, C_i 得不到及时补充,含量下降;反之增加^[3]。F2 水分利用率最大,F4 最小,说明覆草抑制了土壤水分的蒸发,增加了水分利用效率。

表 1 富士苹果净光合速率及相关光合参数
Table 1 The photosynthesis and related parameter of 'Fuji' apple in different covers

处理 Treatment	P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	G_s /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	C_i /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	T_r /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	WUE /($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
F1	16.93ABab	0.30Aab	301.36Bb	3.04Ab	5.57Bb
F2	17.63Aa	0.31Aa	294.44Bc	2.86 Aa	6.16Aa
F3	17.01Bb	0.29Ab	294.72Bc	2.93Aa	5.80Ab
F4	15.49Cc	0.27Ab	321.08Aa	3.83Bc	4.04Cc

注:同列中不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$),不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。
Note: Within each column, different capital letters mean significant difference($P < 0.01$), and different small letters mean significant difference($P < 0.05$).

2.2 不同地表覆盖处理苹果树的光合日变化

多数研究结果表明自然条件下苹果 P_n 日变化为双峰型^[4]。本试验中不同地表覆盖模式下的 P_n 变化特点存在差异。由图 1a 可见,F4 的 P_n 日变化呈双峰型,随光照度增加,叶片 P_n 迅速上升,峰值出现在 10:00 和 14:00 前后,分别为 16.24 与 13.55 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,于 12:00 前后达最低值 8.134 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,出现明显的“午休”现象。这是由于中午气温过高,光合有效辐射(PAR)较大,蒸腾作用过盛,大气相对湿度(RH)较低,导致叶温(T_l)升高,气孔关闭而引起的^[5]。各覆盖处理的 P_n 日变化为单峰型,于 10:00 达到峰值,明显高于 F4,分别增加了 5.67%、10.18%与 6.16%,随后逐渐降低,14:00 较 10:00 分别降低了 28.74%、37.56%和 21.63%。其中 F2 的 P_n 在全天内始终高于 F4。不同地表覆盖条件下 P_n 日均值 F2 (11.85 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > F3 (11.18 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > F1 (10.87 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > F4 (9.21 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

覆沙、麦草覆盖与清耕、覆膜相比,差异达显著水平。说明覆沙和麦草覆盖能更有效减少土壤水分的蒸发,改善土壤水分状况及冠层大气的温、湿度,从而使果树叶片的 CO_2 日同化量增多,增大了果树叶片的气孔开度,提高了果树对光能的利用率。

蒸腾速率(T_r)受外界因子及植物体内部结构、生理状况的影响与调节。光照和土壤水分是影响 T_r 的主要外界条件。光照可引起气孔开放,提高大气和植物体温度,增加叶内外蒸汽压差加速蒸腾;叶片气孔导度(G_s)对土壤水分的变化非常敏感,通过 G_s 的变化影响叶片蒸腾速率。由图 1b 可知,不同地表覆盖条件下,果树 T_r 日变化与 P_n 相同,峰值大小及出现早晚均有所差异。F4 的 T_r 随着光合作用

的增强而增加,通过蒸腾作用降低叶片温度,防止灼伤。随后伴随“光合午休”现象的发生, T_r 降低,出现低谷,峰值出现在 12:00 和 16:00 左右,F1、F2、F3 的峰值均提前 1 h,出现在 11:00 和 15:00 左右,并没有出现明显的“午休”现象。全天 F1、F2、F3、F4 平均 T_r 分别为:2.795、2.738、2.787 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 2.917 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

气孔导度(G_s)对土壤水分的变化非常敏感,是植物气孔传导 CO_2 和水汽的途径。植物通过改变气孔的开度控制与外界的 CO_2 和水汽交换,从而调节光合速率和蒸腾速率^[6]。由图 1c 可知,F4 的叶片 G_s 日变化呈明显的双峰曲线,在 12:00 出现低谷,可见在光合午休期时同时存在 G_s 低谷期;而 F1、F2、F3 的 G_s 日变化趋势为先升高再降低,以 F2 的变化最为平缓,其峰值出现的时间均较光合峰值滞后。这种变化可能是由于覆草有效减少土壤水分的蒸发,改善了大气中的温、湿度,使气孔导度一直保持较高水平,随着光照逐渐减弱,植物体内水分减少,气孔部分关闭。F2 (3.603 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > F3 (3.416 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > F1 (3.371 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > F4 (2.977 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

叶片水分利用率(WUE)的大小反映了果树树体对逆境适应能力的强弱。 WUE 的变化趋势与 T_r 的正好相反,说明 WUE 是随着 PAR 、叶温(T_l)和 T_r 的增大而降低^[7-9]。由图 1 可知,F4 的 WUE 变化表现为下降-上升-下降的趋势,在 8:00 左右出现最高值,为 6.452 $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$,之后均随 PAR 和 T_l 的增加而迅速下降,在 12:00 光合“午休”时出现低谷,15:00 以后基本趋于稳定。不同覆盖处理显著影响苹果的 WUE ,其日变化呈现迅速下降的趋势,F1、F2 和 F3 的总平均值均显著性高于 F4。这一结

果表明苹果叶片的 WUE 对 PAR 和 Tl 的变化均比较敏感。气孔控制着叶片与大气间 CO_2 、水蒸汽的扩散与传导,减少水分损失响应的同时也降低光合作

用,增加光合作用响应的同时也增加了水分损失。

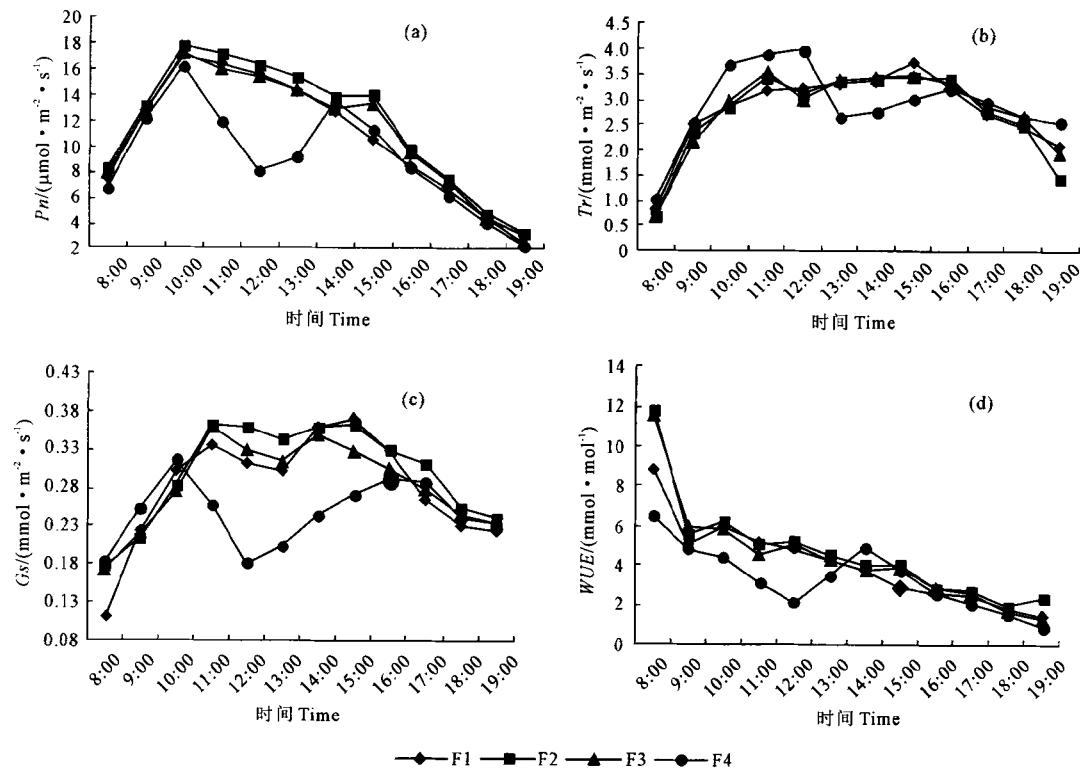


图 1 苹果净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、水分利用率 (WUE) 日变化

Fig.1 Diurnal variation of P_n , T_r , G_s and WUE of apple

2.3 不同地表覆盖处理苹果树光合作用与生态因子的关系

2.3.1 净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 与环境因子的关系 从表 2 可知,光合有效辐射 (PAR) 是植物进行光合作用的主要能量来源,直接影响叶片 P_n 的变化 ($r = 0.986^{**}$),并通过调节与光合作用相关的生理过程影响蒸腾特性,是植物进行蒸腾作用的主要驱动力之一。分析结果表明二者之间呈极显著相关 ($r = 0.678^{**}$),当 PAR 增强时,大气温度 (T_a) 和叶片温度 (T_l) 随着升高,导致叶肉细胞间隙的水汽压与叶表面大气压差增大,蒸腾速率 (T_r) 随之提高。

光合作用是由酶系统参与的生物化学过程,酶的活性受温度的影响,因此温度是影响植物光合生产力的一个主要生态因子^[3]。由表 2 可知, T_l 的变化受 T_a 的直接影响 ($r = 0.998^{**}$); P_n 与 T_a 、 T_l 呈负相关;同时与大气相对湿度 (RH) 呈极显著正相关 ($r = 0.812^{**}$),表明苹果的净光合速率可随大气相对湿度的增大、温度的下降而提高。

叶片 T_r 与 RH 呈负相关 ($r = -0.206^{*}$),与 T_a 、 T_l 呈正相关 ($r = 0.584^{*}$, 0.527^{*}),这是由于 T_a 、 T_l 与 RH 呈极显著负相关 ($r = -0.942^{**}$, $r = -0.957^{**}$),过高的 RH 将导致 T_a 和 T_l 的降低,进而降低了蒸腾速率。

表 2 苹果叶片净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 与环境因子的相关分析

Table 2 The correlation analysis between P_n , T_r and environmental factors

指标 Indexes	P_n	T_r	PAR	T_a	T_l	RH
P_n	1.000					
T_r	0.594 [*]	1.000				
PAR	0.986 ^{**}	0.678 [*]	1.000			
T_a	-0.553 [*]	0.584 [*]	-0.158	1.000		
T_l	-0.571 [*]	0.527 [*]	-0.186	0.998 ^{**}	1.000	
RH	0.812 ^{**}	-0.206 [*]	0.450 [*]	-0.942 ^{**}	-0.957 ^{**}	1.000

2.3.2 光合作用光响应曲线及特征参数 采用非直角双曲线模型对覆盖处理的光响应曲线进行模拟,结果显示各方程的决定系数均在 0.95 以上。说明该模型能较好地反映叶片光合对光的响应过程。如图 2 所示,4 个处理的光响应曲线的变化趋势一致。 PAR 在 $0 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, P_n 与光合有效辐射基本呈线性关系,随 PAR 的增强而增大,在 $200 \sim 1\,600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 叶片的 P_n 随 PAR 增大趋势逐渐减弱,达到光饱和点后, P_n 不再增加,且有下降趋势。在有效光强范围内, P_n 平均值由大到小的顺序为: $F2(12.20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) > F1(11.29 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) > F3(10.10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) > F4(8.60 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

分别对图 2 的每一组 $P_n - PAR$ 响应曲线进行拟合,计算出叶片的光补偿点 (LCP)、光饱和点 (LSP)、 $P_{n\max}$ 及表观光合量子速率 AQY 。表 3 中可见, $F2$ 处理的 LCP 最低而 LSP 最高,而 $F4$ 处理正好相反,说明 $F2$ 对光环境适应性最强,而 CK 对光照

的适应范围较窄。 $F1$ 、 $F2$ 和 $F3$ 处理的 AQY 与 $F4$ 差异极显著,说明其光能利用效率较高。 $F1$ 、 $F2$ 和 $F3$ 处理暗呼吸速率 (R_d) 与 $F4$ 差异显著,反映了其叶片生理活性高。 $F2$ 处理的 $P_{n\max}$ 高于其它处理,比 $F1$ 、 $F3$ 、 $F4$ 分别高 7.09%、19.88%、25.86%。

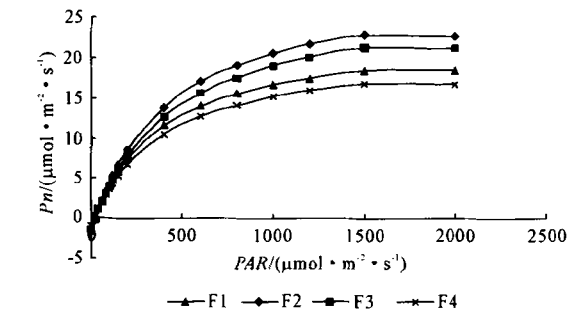


图 2 不同覆盖处理下的富士叶片净光合速率对光照强度的响应

Fig.2 The response of net photosynthetic rate of 'Fuji' leaves to light intensity in different cover

表 3 光响应曲线参数

Table 3 The photosynthetic light-response curve parameters

处理 Treatment	LCP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	LSP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$P_{n\max}$ $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	AQY	R_d $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
F1	22.70Aa	1873.87Bb	22.53Bb	0.0487Bb	1.1053Aa
F2	21.84Cc	2059.72Aa	24.25Aa	0.0505Aa	1.1035Aa
F3	22.31Bb	1762.98Cc	19.43Cc	0.0484Bb	1.0791Aa
F4	20.67Dd	1750.98Cd	17.98Dd	0.0458Cc	0.9662Ab

注:同列中不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$),不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Within same column, different capital letters mean significant difference ($P < 0.01$), and different small letters mean significant difference ($P < 0.05$).

2.3.3 光合作用 CO_2 响应曲线及特征参数 如图 3 对 $P_n - \text{CO}_2$ 进行曲线拟合, R^2 均大于 0.95,说明这两段曲线能很好模拟 P_n 与 CO_2 的关系。 $P_n - \text{CO}_2$ 响应与 $P_n - PAR$ 响应具有相似性,可分为 3 个阶段:当 CO_2 浓度为 $0 \sim 800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时, P_n 随 CO_2 浓度上升而增加较快,此阶段为初始线性响应阶段;当 CO_2 浓度由 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 增至 $1\,400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时, P_n 增长幅度变小;当升至 CO_2 饱和点后, P_n 随 CO_2 浓度上升而下降,出现了明显的 CO_2 饱和现象。在有效 CO_2 浓度范围内, P_n 值由大到小的顺序为: $F2 > F1 > F3 > F4$ 。

通过对 $P_n - \text{CO}_2$ 曲线进行模拟后计算出的主要 $P_n - \text{CO}_2$ 响应参数列于表 4。 $F2$ 处理的 CO_2 补偿点 (CCP) 和 CO_2 饱和点 (CSP) 均极显著低于其它处理,其由大到小次序为 $F4 > F3 > F1 > F2$,试验结果表明,在较低的 CO_2 浓度下覆草能促进光合速率

的提高。 $F2$ 处理下的 $P_{n\max}$ 均高于其它处理,分别比 $F1$ 、 $F3$ 和 $F4$ 处理高 12.02%、12.14%、17.00%。 $F1$ 、 $F3$ 和 $F4$ 处理下的 CE 均较 $F2$ 显著降低,降幅分别为 14.38%、11.43%、22.48%。

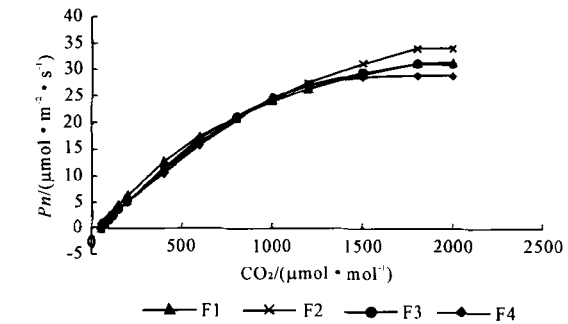


图 3 不同覆盖处理下的富士叶片净光合速率对 CO_2 的响应

Fig.3 The response of net photosynthetic rate of 'Fuji' leaves to CO_2 in different cover

表 4 CO₂ 响应曲线参数
Table 4 CO₂ response curve parameters

处理 Treatment	CO ₂ 补偿点 CCP/(μmol·mol ⁻¹)	CO ₂ 饱和点 CSP/(μmol·mol ⁻¹)	CO ₂ 饱和点最大 P _n P _{nmax} /(μmol·mol ⁻¹)	羧化效率 CE/(mol·mol ⁻¹)
F1	48.70781Bb	1788.699Cc	32.03745Bb	0.0479Bb
F2	43.53501Cc	1768.315Dd	36.41335Aa	0.055942Aa
F3	48.83256 Bb	1996.923Bb	31.99292Bb	0.049547Bb
F4	56.36012Aa	2368.364Aa	30.22444Bc	0.043369Cc

注:同列中不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$),不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。
Note: Within same column, different capital letters mean significant difference($P < 0.01$), and different small letters mean significant difference ($P < 0.05$).

2.4 地表覆盖下红富士苹果经济效益分析

当地果园每公顷栽植苹果树 825 株,每株平均增产 6 kg(表 5),市场批发价为 5 元·kg⁻¹,每公顷增收 21 450 元;地表覆盖后苹果园平均每年减少灌水 3 ~ 4 次、除草 4 次,全年节约成本 2 500 ~ 3 650 元;经

济效益分析显示:F2 纯收入最高,达到 219 340.63 元·hm⁻²,但由于其麦草用量投入较高,其产投比为 78.97,F1 处理,纯收入为 217 700 元·hm⁻²,产投比为 241.22,从经济学角度分析,F1 显著优于其它三个处理。

表 5 富士苹果经济效益比较
Table 5 Comparative analysis of the economic efficiency of 'FuJi' apple

指标 Indexes	平均株产量 /(kg·株 ⁻¹)	产量 /(kg·hm ⁻²)	产值 /(元·hm ⁻²)	覆盖物投资 /(元·hm ⁻²)	节水效益 /(元·hm ⁻²)	纯收入 /(元·hm ⁻²)	产投比
F1	52.6	43420	217100	900.0	1500	217700.0	241.22
F2	53.3	43975	219875	2784.4	2250	219340.6	78.97
F3	52.0	42900	214500	28125.0	1875	188250.0	7.63
F4	46.5	38430	192150	0	0		

3 讨 论

植物光合作用的日变化类型,因植物种类和生态环境的不同而异,据其峰谷变化,可归纳为单峰型^[10-11]、双峰型^[12-14]、多峰型即波动型^[15]和平坦型四类^[16-17]。不同地表覆盖处理改变了光辐射吸收、转化和热量传导过程,影响了土壤水分含量及大气湿度^[18-19],从而改变了果树叶片的光合特性。本试验中 F4 在 10:00 以前,P_n 上升迅速,这可能是由于此期 PAR、Ta 与 Tl 为主要限制因子,使 G_s 较大且呈上升趋势,CO₂ 和水汽交换通畅;随着 PAR、Ta 与 Tl 进一步上升,不再是光合作用限制因子,但蒸腾速率持续上升,细胞内相对湿度继续下降,G_s 下降,这些因素综合作用下 P_n 增势减缓,并逐步达峰值;随着 PAR、Ta 与 Tl 高峰的出现,T_r 高峰发生,G_s 进一步下降,出现“光合午休”;午后 PAR、Ta 与 Tl 下降,导致 T_r 下降,G_s 回升,P_n 于 14:00 左右出现次高峰;而后 PAR、Ta 与 Tl 进一步下降,成为光合作用的限制因子,T_r 和 G_s 持续下降,P_n 迅速降低,达到一天中的最低值^[20-21]。可见 F4 的 P_n 日变化呈双峰曲线,峰值出现在 10:00 和 14:00,中午有“光合午休”现象。有研究表明光合午休现象的发

生,可使植物光合生产损失达 30% ~ 50%,甚至更多^[22]。所以在果树生产过程中,有必要寻找减轻或消除光合午休现象的措施,以达到增产优质的目的。本实验中 F1、F2 和 F3 三种土壤管理模式下,P_n 日变化为单峰型,10:00 达到峰值,并均有效提高 P_n,随后平缓下降,无“光合午休”现象。这可能是由于地表覆盖能有效改善土壤水分状况及冠层大气温湿度,营造较适宜的小气候环境,最大限度减小 PAR、Ta 与 Tl 的变化对叶片造成的影响,使叶片 T_r 一直保持较平缓变化水平,增大 G_s,减少正午叶片气孔的关闭数量及程度,提高果树对光能的利用率,有效增加果树的光合作用,增加光合产量。

矿质元素是果树光合作用不可缺少的,除构成叶绿体的结构外,光合作用中的一系列生化反应及能量转换都需要它们的参与,矿质元素的不足或过量都会导致果树光合作用降至较低水平^[23-28]。有研究表明,施钾可增强荔枝的光合作用,在光照强度弱和 CO₂ 浓度低的条件下,效果更加明显^[29]。还有研究表明,干旱条件下土壤 Ca²⁺ 可提高芒果幼苗对土壤水分的吸收,改善叶片水分状况,并减缓叶片 SOD 活性下降,使叶片保持较高的光合能力^[30]。本实验中麦草等覆盖物的矿化腐烂可释放出大量的

N、P、K、S等矿质营养元素,可促进土壤耕作层团粒结构的形成与稳定,提高土壤有机质含量,增强土壤肥力,有利于根系的吸收运输,从而保证了地上部的生长发育、碳素营养与激素等合成所需的水分和无机营养的供给,促使果树光合速率增加,与吴佳和张自常等的研究结果一致^[31-32]。

光合作用和蒸腾作用是植物两个重要的生理过程,植物处在一定生态条件下,外界环境因子包括光合有效辐射(PAR)、气温(T_a)、叶温(T_l)及大气相对湿度(RH)等,它们是不断变化且相互影响^[22]。本研究结果表明陇东旱地果园富士苹果叶片 P_n 与 PAR 、 RH 之间呈正相关,覆草提高 P_n 的效果优于覆膜与覆砂,与前人研究结果相一致^[33-34],其原因可能是覆草能够更有效地增加 RH ,改善土壤水分状况,随 RH 的增加,植物叶片 G_s 增大,增加了 CO_2 的吸收,导致光合作用增强;同时 P_n 与 T_a 、 T_l 呈负相关,这可能是随着 T_l 的升高,使光合系统 PS II 活性降低,一旦由温度诱导的 PS II 放氧复合体活性下降,光合电子传递就势必会受到抑制,导致 P_n 下降^[10]; T_r 与 T_l 、 T_a 呈正相关,与 RH 呈负相关,并且覆膜提高 T_r 的效果优于覆草,与前人研究报道一致^[35],这可能是由于虽然覆草能有效提高土壤含水量,但不具有地膜反射光线升高气温的能力,使得小气候中温度较低, RH 较高,因而 T_r 较覆膜小。

$P_n - PAR$ 响应曲线可估算植物的 LCP 、 LSP 、 $P_{n_{max}}$ 、 AQY 等重要光合参数。光补偿点和光饱和点能够反映植物叶片对弱光和强光的利用能力,是指示植物光响应特征的重要指标。 $P_n - CO_2$ 响应曲线可估算植物的 CCP 、 CSP 、 $P_{n_{max}}$ 、 CE 等光合参数。 $P_{n_{max}}$ 反映了植物光合作用的最大电子传递速率或最大光合能力,羧化效率是反映叶片中 Rubisco 含量及活性和 CO_2 利用效率的重要指标^[36]。本研究结果表明,F2 处理的 CCP 和 CSP 均显著低于其它处理,其羧化效率最高。F2 的 LCP 较低而 LSP 较高, $P_{n_{max}}$ 也显著高于其它处理,表明果园地表覆草使苹果叶片对光环境的适应性增强,增大了光补偿点和光饱和点范围,提高了光能利用率,提高了光合速率。

有研究表明地表覆盖可促使早春地温上升,新根发生早,利于水分、养分及时吸收,增加果实大小^[37-40]。本试验结果表明地表覆盖可使果园产量增加,获得较高收益,尤以覆草效果最佳,但从各覆盖处理的产投比分析,覆膜优于其它处理。因此陇东旱地苹果产区可根据各地的农业可利用资源及经

济条件自行选择覆盖方式,充分利用有限的降水资源,达到增产优质的目的,并为创造适宜的果树生理条件 and 环境适应性机制奠定基础。

参考文献:

- [1] 吴普特,高建恩.基于水分胁迫系数的枣树园土壤含水率估算[J].中国水土保持科学,2008,6(1):107-111.
- [2] 张继澍.植物生理学[M].西安:世界图书出版社,1999:108-110.
- [3] 谷艳芳,高志英,邢倩,等.黄淮海平原冬小麦(*Triticum aestivum*)旗叶的生理生态特性[J].生态学报,2007,27(8):3465-3471.
- [4] 束怀瑞.果树栽培生理学[M].北京:农业出版社,1993:6-8.
- [5] 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].山西农业大学学报,2002,30(1):57-60.
- [6] 许大全.光合作用“午睡”现象的生态生理与生化[J].植物生理学报,1990,14(6):5-10.
- [7] 曹慧,许雪峰,韩振海,等.水分胁迫下抗旱性不同的两种苹果属植物光合特性的变化[J].园艺学报,2004,31(3):285-290.
- [8] 王中英,牛铁泉.根外施氮对苹果树光合速率的影响[J].园艺学报,1994,21(4):398-400.
- [9] 周凌云,李卫民.黄淮海中部平原水资源失衡问题与对策[J].土壤通报,2002,33(4):253-255.
- [10] 郭继英,严大义,王秉昆,等.巨峰葡萄光合特性的研究[J].北京农业科学,1994,12(2):30-32.
- [11] 谢建国,李嘉瑞,赵江.猕猴桃若干光合特性研究[J].北方园艺,1999,2:26-28.
- [12] 陶俊,陈鹏.银杏光合特性的研究[J].园艺学报,1999,26(3):157-160.
- [13] 文晓鹏,朱维藩,向显衡,等.刺梨光合生理的初步研究(一)[J].贵州农业科学,1991,(6):27-31.
- [14] 张国良,王文凤,杨建民,等.骆驼黄杏幼树的光合特性[J].果树科学,1999,16(3):224-226.
- [15] 王文江,刘永居,王永惠.大磨盘柿树光合特性的研究[J].园艺学报,1993,20(2):105-110.
- [16] Xu Daquan, Shen Yungang. Diurnal variations in the photosynthetic the efficiency in plants[J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 1997, 23(4):410-416.
- [17] 杜占池,杨宗贵.羊草光合作用日进程类型的研究[J].资源科学,1992,(6):32-37.
- [18] Cook H F, Valdes G S B, Lee H C. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L[J]. Soil and Tillage Research, 2006,91:227-235.
- [19] Meng Chunlei. A review of soil evaporation and moisture and heat transport[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2):374-378.
- [20] 邹琦.作物抗旱生理生态研究[M].济南:山东科学技术出版社,1993.
- [21] 杨洪强,接玉玲.果树根系对地上部的调控及其与水分利用效率的关系[J].园艺学报,2001,28(增刊):603-608.
- [22] 郑小华,廖明安,李明章,等.猕猴桃叶片光合日变化与环境因子关系的研究[J].中国南方果树,2008,(5):67-69.

(下转第60页)

参考文献:

- [1] Gauch H G, Zobel R W. AMMI analysis of yield trials. Genotype – environment Interaction[M]. Florida: CRC Press, 1995.
- [2] Williams E J. The interpretation of interactions in factorial experiments [J]. Biometrika, 1952, 39: 65-81.
- [3] 郭天财, 马冬云, 朱云集, 等. 冬播小麦品种主要品质性状的基因型与环境及其互作效应分析[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 948-953.
- [4] 常磊, 柴守玺. AMMI 模型在旱地春小麦稳定性分析中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3677-3684.
- [5] 杨志平, 何凤发, 王季春, 等. AMMI 模型在马铃薯品种区试中的适用性分析[J]. 西南农业大学学报, 2006, 28(2): 322-325.
- [6] 孙计平, 李雪君, 吴照辉, 等. 应用 AMMI 模型分析烤烟区试品种稳定性[J]. 中国农学通报, 2011, 27(19): 263-267.
- [7] 李艳艳, 丰震, 赵兰勇. 用 AMMI 模型分析玫瑰品种产花量的稳定性[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1761-1766.
- [8] Bilbro J D, Ray L L. Environmental stability and adaptation of several cotton cultivars[J]. Crop Sci, 1976, 16: 821-824.
- [9] Francis T R, Kannenberg L W. Yield stability studies in short-season maize I. A descriptive method for grouping Genotypes[J]. Can J Plant Sci, 1978, 58: 1029-1034.
- [10] Samonte, S O P B, Hernandez, J E. Genotype $\times$ Environment interactions of irrigated lowland rice II. Stability and adaptability analysis [J]. Crop Sci, 1991, 26(1): 7-14.
- [11] Misra R C, Das S, Patnaik M C. AMMI model analysis of stability and adaptability of late duration finger millet (*Eleusine coracana*) genotypes[J]. World Applied Sciences Journal, 2009, 6(12): 1650-1654.
- [12] Thangavel P, Anandan A, Eswaran R. AMMI analysis to comprehend genotype – by – environment ($G \times E$) interactions in rainfed grown mungbean (*Vigna radiata* L.) [J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(13): 1767-1775.
- [13] Hugh G. Gauch. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE [J]. Crop Sci, 2006, 46(1): 488-500.
- [14] 王磊, 杨仕华, 谢美贤, 等. AMMI 模型及其在作物区试数据分析中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 1997, 5(1): 39-46.
- [15] 王磊, McLaren C G, 杨仕华. 利用双标图分析作物区试数据[J]. 生物数学学报, 1997, 12(5): 557-563.
- [16] 张泽, 鲁成, 向仲怀. 基于 AMMI 模型的品种稳定性分析[J]. 作物学报, 1998, 24(3): 304-309.
- [17] Nachit M M, Nachit G, Ketata H, et al. Use of AMMI and linear regression models to analyze genotype-environment interaction in durum wheat[J]. Theor Appl Genet, 1992, 83: 597-601.
- [18] Yan W K, Hunt L A, Sheng Q L, et al. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot [J]. Crop Sci, 2000, 40: 597-605.
- [19] 金文林. 作物区试中品种稳定性评价的秩次分析模型[J]. 作物学报, 2000, 26(6): 926-930.
- [20] 林华, 高金锋, 高小丽, 等. 不同基因型芸豆品种丰产性及稳定性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 108-113.
- [21] 温振民. 用高温系数分析玉米杂交种高产、稳产性的探讨[J]. 作物学报, 1994, (4): 508-512.
- [22] 沈希宏, 杨世华, 谢美贤, 等. 水稻品种区域试验的品种 $\times$ 环境互作及其与气候因子的关系[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(1): 31-36.
- [23] 李延, 刘星辉, 庄卫民, 等. 缺镁对龙眼光合作用的影响[J]. 园艺学报, 2001, 28(2): 102-106.
- [24] 张上隆, 郭延平, 陈屏昭, 等. 不同供磷水平对温州蜜柑叶片光合作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 186-191.
- [25] 肖祥希, 刘星辉, 杨宗武, 等. 铝胁迫对龙眼幼苗光合作用的影响[J]. 热带作物学报, 2005, 26(1): 63-69.
- [26] Pereira W E, Siqueira D L D, Martinez C A, et al. Gas exchange and chlorophyll fluorescence in four citrus rootstocks under aluminium stress[J]. J Plant Physiol, 2000, 157(5): 513-520.
- [27] 郭延平, 陈屏昭, 张良诚, 等. 缺磷胁迫加重柑橘叶片光合作用的光抑制及叶黄素循环的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 359-363.
- [28] 谷镜, 程晓建, 张敏. 环境因子对常绿树光合作用的影响[J]. 福建林业科技, 2009, 36(3): 270-274.
- [29] 邓义才, 陈荣. 钾对荔枝光合作用和呼吸作用的影响[J]. 华南农业大学学报, 1994, 15(4): 80-83.
- [30] 贾虎森, 蔡世英. 土壤干旱胁迫下钙处理对芒果幼苗光合作用的影响[J]. 果树学报, 2000, 17(1): 52-56.
- [31] 吴佳, 孙丙寅, 王敏. 地面覆盖对花椒林生理生态效应的影响[J]. 西北林学院学报, 2005, (4): 27-30.
- [32] 张自常, 李鸿伟, 王学明, 等. 覆草对旱稻直播稻产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1809-1818.
- [33] 柯世省, 陈模舜. 紫荆光合日变化及其与环境因子的关系[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2004, 24(3): 30-33.
- [34] 吴炫柯, 李永健, 李杨瑞. 不同生长期木薯品种气体交换特性的研究[J]. 西南农业学报, 2006, 19(3): 456-459.
- [35] 张义, 谢永生, 郝明德, 等. 地表覆盖及生理生态因子对苹果树光合特性的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 125-130.
- [36] 张守仁, 高荣孚, 王连军. 杂种杨无性系的光系统 II 放氧活性、光合色素及叶绿体超微结构对光胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 143-149.
- [37] 张坤, 王发林, 刘小勇, 等. 地面覆盖对果园土壤水分分布和果实品质的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(11): 125-130.
- [38] 尹晓宁, 马明, 等. 不同覆盖条件对陇东旱塬苹果园土壤水分及果实品质的影响[J]. 经济林研究, 2012, 30(1): 134-139.
- [39] 刘克长, 任中兴, 李中安, 等. 不同覆盖措施下龙廷杏梅园地小气候效应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 1145-1148.
- [40] 徐胜利, 陈小青. 荒漠绿洲新梨 7 号梨园覆草节水效应的研究[J]. 新疆农业科学, 2003, 40(5): 257-261.

(上接第 25 页)