

不同苜蓿 (*Medicago sativa* L.)品种光合速率对 光和 CO₂ 浓度的响应特征

董志新, 韩清芳, 贾志宽*, 任广鑫

(西北农林科技大学干旱半干旱农业研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要 :以 6 个紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.)品种为对象,用 Licor-6400 型便携式光合作用测定系统测定了紫花苜蓿光合作用对光、CO₂ 的响应曲线,阐述了光合作用对光和 CO₂ 浓度的响应特征。结果表明,各品种光合速率随光强或 CO₂ 浓度的提高而增大,均可用指数方程来模拟,并得出一些光合响应特征参数:表观量子效率、羧化效率、光补偿点、近光饱和点、暗呼吸速率、光呼吸速率、CO₂ 补偿点、CO₂ 饱和点等,品种间差异显著;巨人 201 + Z、路宝具较高的近光饱和点、表观量子效率及羧化效率,较低的 CO₂ 补偿点,是具有较高的光能生产潜力的苜蓿品种;秋眠级数与表观量子效率、羧化效率、光补偿点、近光饱和点、暗呼吸速率、光呼吸速率均成不同程度的负相关,与 CO₂ 补偿点、CO₂ 饱和点成微弱正相关,均未达到显著水平。

关键词 紫花苜蓿;响应曲线;指数方程

文章编号:1000-0933(2007)06-2272-07 中图分类号:Q142,Q945,Q948 文献标识码:A

Photosynthesis rate in response to light intensity and CO₂ concentration in different alfalfa varieties

DONG Zhi-Xin, HAN Qing-Fang, JIA Zhi-Kua*, REN Guang-Xin

The Agricultural Research Center in Arid and Semiarid Areas, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (6) 2272 ~ 2278.

Abstract :The response of photosynthesis rate to light intensity and CO₂ concentration in 6 varieties were measured with Licor-6400 in the sixth year after being planted. The results indicated that exponential equation was fitted for these responses. Characteristic parameters calculated from those exponential equations were found to differ significantly among different varieties. Two of the varieties, Ameristand201 + Z and Lobo, may possess high yield potential as they displayed higher light saturation estimate (L_k), apparent quantum yield (AQY), carboxylation efficiency (CE) and lower CO₂ compensation point (CCP), compared with the remaining varieties. Fall dormancy level had negative correlations with AQY , CE , light compensation point (LCP), L_k , dark respiration rate (R_d) and photorespiration rate (R_p), while insignificant positive correlation was observed with CCP and CO₂ saturation point (CSP).

Key Words :alfalfa; response curves; exponential equations

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2006C105);西北农林科技大学植物育种专项资助项目(05YZ019);国家农业部农业结构调整重大技术研究专项资助项目(2002-09-02A)

收稿日期:2006-09-18;修订日期:2007-03-06

作者简介:董志新(1983~),女,山东人,硕士生,从事生态学研究. E-mail:zhixinruwo@163.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail:zhikuan@tom.com

Foundation item :The project was financially supported by Shaanxi Natural Science Foundation Plan (No. 2006C105), Northwest A&F University Plant Breeding Special Item (No. 05YZ019) and Key Technology Research Special Item Plan on Agricultural Structure Adjustment of Ministry of Agriculture

Received date 2006-09-18; **Accepted date** 2007-03-06

Biography :DONG Zhi-Xin, Master candidate, mainly engaged in ecology. E-mail:zhixinruwo@163.com

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.)简称苜蓿 ,是一种深根性多年生豆科牧草 ,具有适应性广、高产优质、经济效益高、生态功能齐全的特性 ,在中国乃至整个世界的农牧业发展和生态环境建设中 ,发挥着越来越重要的作用。我国有关苜蓿的研究多集中在品种资源、引种试验、水分利用、干物质积累动态、品种区域试验、生态建设等方面 ,并取得了一系列进展^[1~3]。光合作用与牧草产量密切相关^[7] ,目前国内外苜蓿光合方面的研究尚少。本文拟对几个不同休眠级的苜蓿品种的光合响应曲线进行研究分析 ,以确定不同品种的光合能力指标 ,如光补偿点、近光饱和点及呼吸速率等 ,为生产实践中确定合理的叶面积指数、间作方式及种质资源开发提供基本的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地自然概况

试验地设在陕西杨陵西北农林科技大学农作一站。该站位于秦岭北麓、渭河平原西部的头道塬上 ,北纬 34°21′、东经 108°10′ ,海拔 455m ,年均日照时数 2150h ,年平均气温 12 ~ 14℃ ,极端最高气温 39 ~ 40℃ ,极端最低气温 - 15 ~ - 21℃ ,年均降水量 622mm ,春季降水偏少、干旱 ,属暖温带半湿润气候。土壤为黑垆土 ,土层深厚、通气良好 ,有机质 1.59% ,全氮 0.055%。

1.2 试验材料及田间试验设计

试验所用的 6 个不同苜蓿品种特性见表 1 ,其中引进苜蓿品种种子全部购自美国赛贝科种子公司 ,国内品种来自新疆。

参试品种田间随机排列 ,小区面积 90m² (9.0m × 10m) ,行距 30cm。2001 年 5 月 4 ~ 6 日 3d 播种 ,人工开沟、条播 ,播深 2cm ,播量 15kg/hm²。整个生育期全部旱作 ,不施肥、不喷洒农药 ,完全自然状态生长 ,仅进行田间人工除草。

1.3 试验方法

测定于 2006 年 4 月 25 ~ 30 日 (晴天)进行 ,此时苜蓿处于第一茬旺盛生长期。9 :30 ~ 11 :00 时 ,采用美国 Li-cor 公司生产的 Licor-6400 型便携式光合作用测定系统 ,开放式气路 ,设定温度为 25℃ ,CO₂ 浓度为 400μmol/mol ,空气相对湿度为 50% ~ 70% ,应用 Li-6400-02B 红蓝光光源提供不同的光合有效辐射强度 ($PAR \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ,分别在 PAR 为 2000、1500、1200、1000、800、600、400、200、150、100、50、20、0μmol·m⁻²·s⁻¹ 下测定不同苜蓿品种功能叶片净光合速率 ($P_n \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ,设定 PAR 为 800μmol·m⁻²·s⁻¹ 作为测定光强 ,采用 Li-6400-01 液化 CO₂ 钢瓶提供不同的 CO₂ 体积分数 ,分别在 CO₂ 浓度为 400、300、200、150、100、50、20、400、400、600、800、1000、1200μmol·mol⁻¹ 的条件下测定叶片 P_n 。测定 P_n 前使用 800μmol·m⁻²·s⁻¹ 冷光源诱导 10min ,在每个光照强度或 CO₂ 浓度下平衡 60 ~ 200s 后测定 P_n ,当测量变异率小于 0.05 时由红外气体分析仪自动记录。测定时每品种随机选 2 个典型植株 ,取从顶部数第 1 片完全展开叶片 ,以每片复叶的中部小叶作为测试叶 ,结果取平均值。

1.4 数据统计分析

应用 Excel 2003、SAS V8、SPSS 12.0 统计分析软件对数据进行作图、方差分析、相关分析与回归分析 ,并采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同苜蓿品种光合作用的光响应曲线

由配置红蓝光源设定不同光合有效辐射强度下测定的净光合速率 (图 1)可知 ,光强在 0 ~ 600 μmol·m⁻²·s⁻¹ 左右时 P_n 快速上升 ,超过 500 ~ 700μmol·m⁻²·s⁻¹ P_n 升幅减弱 ,但在 PAR 为 2000μmol·m⁻²·s⁻¹ 以内均未达到完全饱和 ,说明苜蓿品种潜在光合能力很大。

表 1 试验苜蓿品种来源和休眠级数

Table 1 The source and fall dormancy of alfalfa varieties			
编号	紫花苜蓿品种 Varieties	原产地 Source	休眠级数 Fall dormancy
1	巨人 201 + Z Ameristand201 + Z	美国	2 级
2	爱菲尼特 + Z Affiniy + Z	美国	4 级
3	新疆大叶 Xinjiangdaye	新疆	4 级
4	牧歌 401 + Z AmriGraze401 + Z	美国	4 级
5	路宝 Lobo	美国	6 级
6	超级 13 R 13 R Supreme	美国	8 级

作物的光响应曲线可用指数曲线来描述 ,Xu H L^[4]、郭江^[5]利用指数模型模拟了玉米光合速率随光强的变化 ,并取得了满意的结果。本研究应用指数方程对不同苜蓿品种叶片的净光合速率和光强的关系进行拟合 :

$$P_n = P_{\max} (1 - e^{\frac{-\varepsilon PAR}{P_{\max}}}) - R_d$$

(1)

式(1)中 PAR 为光强 P_n 为不同 PAR 对应的叶片净光合速率 $P_{\max}$ 是叶片的最大净光合速率。公式(1)可以较好地模拟光合速率随光强的变化 ,各品种光响应曲线拟合方程的决定系数 (R^2) 都在 0.975 以上 ,拟合程度均达到极显著水平 ,模拟结果能够反映实际情况。利用公式(1)对测定数据进行拟合 ,可以求出不同苜蓿品种叶片光反应曲线的特征参数 (表 2)。表观量子利用效率 ($AQY, CO_2 \cdot photon^{-1}$) 是用光响应曲线中光强在 $200 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 以下时的初始直线部分 (图 2) 的斜率表示^[6] ,拟合方程为 :

$$P_n = -R_d + AQY \cdot PAR$$

(2)

当 $P_n = 0$ 时 , PAR 即为光合作用的光补偿点 ($LCP, \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) ,这里 R_d 为暗呼吸速率。方程拟合效果较好 , R^2 均在 0.951 以上。将 $200 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 以下的线性方程 (式 2) 与指数模型计算出的 $P_{\max}$ 值这条平行直线相交 ,得出交点 ,该交点在 x 轴上的数值即为近光饱和点 ($Lk, \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)^[5,7]。

2.1.1 表观量子效率

不同苜蓿品种的表现量子效率有较大差异 ,其中牧歌 401 + Z 表观量子效率最低 ,极显著低于其它品种 ,仅为 $0.046 CO_2 \cdot photon^{-1}$ ($p < 0.01$) ;巨人 201 + Z AQY 最高 ,可达 $0.065 CO_2 \cdot photon^{-1}$,显著高于 (除路宝、新疆大叶外) 其它品种 ,路宝 ($0.062 CO_2 \cdot photon^{-1}$) 次之 ;除牧歌 401 + Z 外 ,其它品种均稍高于自然条件下一般植物的表观量子效率 ($0.03 \sim 0.06 CO_2 \cdot photon^{-1}$)^[8]。

2.1.2 光补偿点和近光饱和点

不同苜蓿品种的光补偿点和近光饱和点均存在极显著差异 ($p < 0.01$)。由表 2 可知 ,巨人 201 + Z 和新疆大叶 Lk 最高 ,二者差异不显著 ,路宝、牧歌 401 + Z 次之 ,爱菲尼特 + Z 最低 (仅为 $518 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) ,与其它品种差异极显著 ;各品种间 LCP (除新疆大叶和超级 13 R 之间外) 均存在极显著差异 ,其大小顺序为 :爱菲尼特 + Z > 牧歌 401 + Z > 巨人 201 + Z > 新疆大叶 > 超级 13 R > 路宝。综合分析表明 ,新疆大叶、巨人 201 + Z、路宝光能利用范围可塑性较大 ,牧歌 401 + Z、超级 13 R 次之 ,爱菲尼特 + Z 光能利用范围较窄。

2.1.3 光饱和和下最大净光合速率和暗呼吸速率

不同苜蓿品种光饱和下 $P_{\max}$ 差异较明显 ,巨人 201 + Z 最高 ,路宝和新疆大叶次之 ,超级 13 R 再次之 ,牧歌 401 + Z 和爱菲尼特 + Z 最低 ,不同品种间 $P_{\max}$ 差异在 $1.842 \sim 6.769 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 之间。光合产物的合成与运输都需要由呼吸来提供能量 ,从表 2 可以看出 ,不同苜蓿品种暗呼吸速率差异极显著 ($p < 0.01$) ,巨人 201 + Z、爱菲尼特 + Z R_d 显著高于其它品种 ,新疆大叶、

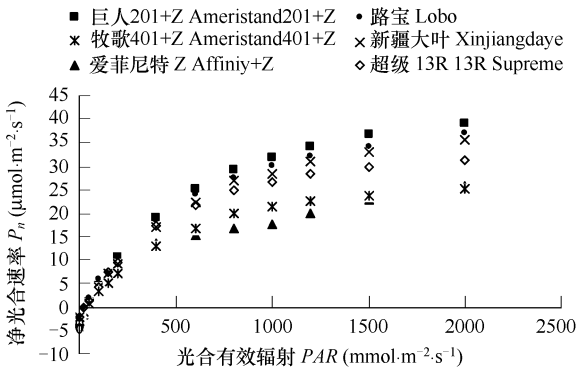


图1 不同苜蓿品种叶片光合-光强响应曲线

Fig. 1 Light response of photosynthesis in alfalfa leaves of different species

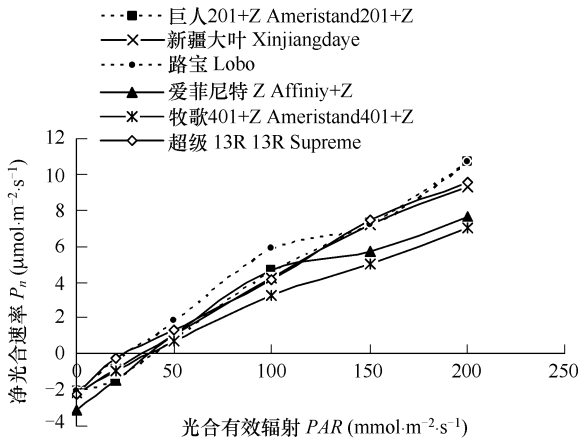


图2 不同苜蓿品种叶片光合-低光强响应曲线

Fig. 2 Light response of photosynthesis in alfalfa leaves of different species ($PAR < 200 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

牧歌次之 ,超级 13 R 再次之 ,路宝最小 ,仅为巨人 201 + Z 的 64.47%。

2.2 不同品种苜蓿光合作用的 CO₂ 响应曲线

随着 CO₂ 浓度升高 ,不同苜蓿品种光合速率的变化也呈现一定趋势 (图 3)。CO₂ 响应曲线的方程拟合方法同光响应曲线 ,且各品种曲线拟合方程决定系数均在 0.994 以上 ,拟合程度达极显著水平 (超级 13R 的 CO₂ 响应方程拟合去除最后一个点 ,拟合情况较好 , $R^2 = 0.994$,且不影响所求参数) ,并在细胞间隙 CO₂ 浓度 (C_i $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 为 0 ~ 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 内对叶片 P_n 和 C_i 进行直线回归 ,其斜率为 RuBP 羧化效率 (CE $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ^[9] ,拟合方程为 :

$$P_n = -R_p + CE \cdot C_i$$

(3)

当 $P_n = 0$ 时 , C_i 即为光合作用的 CO₂ 补偿点 (CCP $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) ,这里 R_p 为光下呼吸速率。

由于光下暗呼吸很小 ,可以近似将光下叶片向无 CO₂ 的空气中释放 CO₂ 的速率看作光呼吸速率 ^[10]。将式 (3) 与指数模型计算出的 P_{max} 值这条平行直线相交 ,得出交点 ,该交点在 x 轴上的数值即为 CO₂ 饱和点 (CSP $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

2.2.1 羧化效率及光呼吸速率

巨人 201 + Z、爱菲尼特 + Z 羧化效率较高 ,显著高于牧歌 401 + Z ($p < 0.05$) ,与其它品种差异不显著。爱菲尼特 + Z 光呼吸速率最高 ,显著高于路宝 ($p < 0.05$) ,与其它品种差异不显著。CO₂ 饱和下路宝 P_{max} 最高 ,达 52.065 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 2)。

2.2.2 CO₂ 补偿点与 CO₂ 饱和点

不同苜蓿品种 CCP 、 CSP 差异极显著 ($p < 0.01$)。路宝、巨人 201 + Z CCP 最低 ,极显著低于其它品种 ,牧歌 401 + Z 最高 ,极显著高于其它品种。牧歌 401 + Z、路宝、超级 13R CSP 较高 ,显著高于其它品种 ,新疆大叶、巨人 201 + Z CSP 显著低于其它品种 (表 2)。

3 讨论与结论

3.1 光饱和点与光补偿点

植物叶片的光饱和点与光补偿点反映了植物对光照条件的要求 ,一般情况下光饱和点和光补偿点均较低的植物属于耐阴植物 ,反之属于阳性植物。光补偿点较低、光饱和点较高的植物对光环境的适应性较强 ,而光补偿点较高、光饱和点较低的植物对光照的适应性较弱。光饱和点的高低 ,反映了光合机构暗反应过程对同化力最大需求量的多少。暗反应能力越强所需要的同化力越多 ,光饱和点也相应越高 ^[11]。从分析结果看苜蓿的光补偿点较低 ,且在 0 ~ 2000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光合有效辐射范围内 ,净光合速率未达到最大净光合速率 ,说明苜蓿对光的适应性较强 ,另一方面也反映了苜蓿在强光下光合速率在更大程度上受 CO₂ 供应的限制 ^[12]。

根据供试品种的光补偿点 ,可以初步确定它们的耐阴性的大致顺序 :路宝 > 超级 13R > 新疆大叶 > 巨人 201 + Z > 牧歌 401 + Z > 爱菲尼特 + Z。光补偿点高 ,可部分说明叶肉细胞光合活性低。光补偿点低的植株其下部或株丛内部的叶片可利用较弱的光线进行光合作用 ,保持生长 ,提高整株植物的光合能力。

国外品种巨人 201 + Z 和国内品种新疆大叶近光饱和点相对较高 ,而补偿点较低 ,光饱和点与光补偿点之间较宽的光能利用区间 ,在一定程度上解释了二者生产力高的原因 (茎叶干物质累积量的大小顺序 :巨人 201 + Z (0.583 kg/m^2) > 新疆大叶 (0.550 kg/m^2) > 路宝 (0.546 kg/m^2) > 超级 13R (0.516 kg/m^2) > 爱菲尼特 + Z (0.469 kg/m^2) > 牧歌 401 + Z (0.459 kg/m^2))。培育广幅光强适应性苜蓿品种 ,对提高苜蓿产量的具有积极意义。

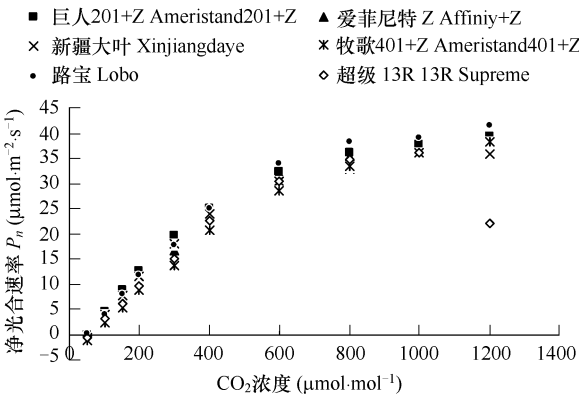


图3 不同苜蓿品种叶片光合-CO₂ 响应曲线

Fig. 3 CO₂ response of photosynthesis in alfalfa leaves of different species

表 2 不同苜蓿品种光合响应特征参数

Table 2 Parameters of photosynthetic rate in response to light intensity and CO ₂ concentration of different varieties of Alfalfa						
项目 Item	巨人 201 + Z Ameristand 201 + Z	爱菲尼特 + Z Affiniy + Z	新疆大叶 Xinjiangdaye	牧歌 401 + Z AmriGraze 401 + Z	路宝 Lobo	超级 13 R 13 R Supreme
光饱和最大净光合速率 $P_{\max}$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	42.177	25.408	38.106	27.350	38.610	33.218
CO ₂ 饱和最大净光合速率 $P_{\max}$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	48.206	49.300	45.114	50.767	52.065	50.281
表观量子效率 AQY ($\text{CO}_2\cdot\text{photon}^{-1}$)	0.065 ^{aA}	0.053 ^{bA}	0.059 ^{abA}	0.046 ^{cB}	0.062 ^{aA}	0.058 ^{abA}
RuBP 羧化效率 CE ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.130 ^{aA}	0.127 ^{aA}	0.123 ^{abA}	0.109 ^{bA}	0.118 ^{abA}	0.117 ^{abA}
暗呼吸速率 R_d ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	2.288 ^{aA}	2.194 ^{aA}	1.963 ^{bAB}	1.809 ^{bcB}	1.475 ^{dC}	1.687 ^{cBC}
光呼吸速率 R_p ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	6.390 ^{abA}	7.142 ^{aA}	6.684 ^{abA}	6.991 ^{abA}	5.746 ^{bA}	6.666 ^{abA}
近光饱和点 Lk ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	684.08 ^{aA}	518.84 ^{cD}	684.95 ^{abAB}	636.65 ^{cdBC}	647.57 ^{bcABC}	601.80 ^{dC}
光补偿点 LCP ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	35.20 ^{cC}	41.25 ^{aA}	33.56 ^{dD}	39.49 ^{bB}	23.82 ^{eE}	29.08 ^{dD}
CO ₂ 饱和点 CSP ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	421.27 ^{cB}	445.48 ^{bB}	420.10 ^{cB}	530.86 ^{aA}	491.18 ^{aAB}	485.48 ^{abAB}
CO ₂ 补偿点 CCP ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	49.31 ^{dC}	56.37 ^{bcB}	54.21 ^{cB}	64.25 ^{aA}	48.82 ^{dC}	56.83 ^{bB}

表中数据由拟合方程计算而来,为两个重复的平均值。不同小写字母表示品种间差异显著,大写字母表示差异极显著 Data were calculated from simulated equations and based on two replicates. Data with different small letters are significantly different ($p < 0.05$), while capital letters mean very significantly different ($p < 0.01$)

3.2 光量子利用效率

表观量子效率是植物对 CO₂ 同化的表观光量子效率,反映了植物光合作用的光能利用效率,尤其是对弱光的利用能力^[8]。 AQY 值高,说明其叶片光能转化效率高,暗呼吸速率则与叶片的生理活性有关。试验研究发现 AQY 与光饱和下 $P_{\max}$ 存在显著正相关,相关系数为 0.882 ($p = 0.020 < 0.05$)。从方差分析(表 2)可知,不同苜蓿品种 AQY 、 R_d 均有极显著差异。几个品种的表观量子效率,即单位光量子同化固定的 CO₂ 分子数差异显著,说明不同苜蓿品种对弱光的利用存在较大差异,巨人 201 + Z、路宝、新疆大叶 AQY 较高,对弱光利用能力较强。此外,巨人 201 + Z R_d 为 $2.288\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,其叶片生理活性也较高。

3.3 RuBP 羧化效率、CO₂ 补偿点及 CO₂ 饱和点

植物的光合速率受植物体内叶绿体的光合速率和 CO₂ 供应的控制。叶绿体的光合速率分为受 Rubisco 活性限制的光合速率和由 RuBP 再生速率限制的光合速率控制。一般认为 CO₂ 响应曲线中初始斜率与 RuBPCase (核酮糖 1,5-二磷酸羧化酶)的活性呈正相关,巨人 201 + Z CE 最高,达到 $0.130\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 具有较高的 RuBPCase 酶活性。Björkman 提出光饱和净光合速率与 Rubisco 活性有很好的相关性^[13]。对 CE 与 $P_{\max}$ 进行相关分析也发现,二者存在一定正相关关系(相关系数为 0.397 $p = 0.436 > 0.05$)。

郭连旺、沈允钢^[14]认为,C3 植物的光呼吸可能是耗散过剩光能,保护光合机构免于强光破坏的一个途径,同时,光呼吸途径在消耗多余能量的同时,能释放被 PGA 结合的 Pi 元素,缓解由于 Pi 暂时亏缺而引起的

对电子传递和光合磷酸化过程的限制。表 2 中爱菲尼特 + Z、牧歌 401 + Z R_p 较高,饱和 CO₂ 时的 P_n 也较高,表明 Pi 亏缺对电子传递和光合磷酸化过程的限制也相对较小。

当 CO₂ 浓度从 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 增加到 600 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,净光合速率可提高 6.70 ~ 8.90 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,为最大净光合速率的 14.85% ~ 17.10%,CO₂ 饱和浓度下最大净光合速率较光饱和最大净光合速率高(表 2),这进一步证实了苜蓿强光下光合速率在更大程度上受 CO₂ 供应的限制。其中,路宝增加幅度最大,且其 CCP 最低、CSP 较高,对 CO₂ 利用幅度较广。

CO₂ 补偿点低的作物常具有净光合速率高、产量高的特点,因此低 CO₂ 补偿点也常被用作选育高产品种的指标^[15]。路宝、巨人 201 + Z 具有较高的 L_k 、AQY 及 CE,较低的 CCP,因此具有高光效和高 CO₂ 利用率等光合特性,是具有较高光能生产潜力的苜蓿品种。

3.4 秋眠级数等与光合响应特征参数相关性

苜蓿秋眠性的不同是苜蓿生长习性的差异。在秋季,北纬地区由于光照减少和气温下降,导致苜蓿形态类型和生产能力发生变化。美国育种家将苜蓿品种的秋眠性划分为 9 个等级,1 ~ 3 级为秋眠型,4 ~ 6 级为半秋眠型,7 ~ 9 级为非秋眠型^[16]。本试验对 4 个不同秋眠级数苜蓿光合响应特征进行了测定,通过相关分析发现,秋眠级数与 AQY、CE、LCP、 L_k 、 R_d 、 R_p 均成负相关,与 R_d 、LCP 相关性较高,相关系数分别为 -0.782、-0.616,但均未达到显著水平($p=0.066$ $p=0.193$)。秋眠级数与 CCP、CSP 成微弱正相关,相关系数分别为 0.110、0.480。秋眠级数的差异在光合特征参数上仅有一定程度的反映,初步证实光强和 CO₂ 浓度的变化对苜蓿品种秋眠性差异影响较小,从侧面反映了秋眠性差异的主要因素是光照减少和气温下降,而苜蓿秋眠性与品种自身光合特性的关系有待加强研究。

References :

[1] Xu H Z , Yang Z P , Xian C Z , *et al.* Research report of an alfalfa introduction trial. Pratacultural Science ,2005 ,22 (4) :47 — 51.

[2] Han L , Jia Z K , Han Q F. Study on ecological adapt ability of the three introduced alfalfa cultivars in semi-arid area. Agricultural Research in the Arid Areas ,2004 ,22 (1) :114 — 117.

[3] Xu C M , Jia Z K , Han Q F , *et al.* Biomass characteristics of different fall dormancy level alfalfa varieties. Acta Pratacultural Science ,2003 ,12 (6) :70 — 73.

[4] Xu H L. Effects of a microbial inocuant and organic fertilizers on the growth , photosynthesis and yield of weet corn. Nature farming and microbial applications. Food Products Press , NewYork. London. Oxford. Vol.3 , No. 1 (#5) ,2000 ,3 (1) :183 — 214. .

[5] Guo J , Guo X Y , Wang J H , *et al.* Characteristic parameters of light responses of corn varieties with different plant shapes. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica ,2005 ,25 (8) :1612 — 1617.

[6] Farquhar G D , Sharky T D . Stomatal conductance and photosynthesis. Ann Rev Plant Physiol ,1982 ,33 :317 — 345. .

[7] Liu Y F , Xiao L T , Tong J H , *et al.* Primary application on the non-rectangular hyperbola model for photosynthetic light-response curve. Chinese Agricultural Science Bulletin ,2005 ,21 (8) :76 — 79.

[8] Lian H Y , Zhou S H Q. The photosynthetic characteristics in leaves of carpenter grass — *Axonopus compressus*. Guihaia ,2003 ,23 (2) :181 — 184 in Chinese.

[9] Hodgson R A J , Raison J K. Inhibition of photosynthesis by chilling in moderate light :a comparison of plants sensitive and insensitive to chilling. Planta ,1989 ,178 :545 — 552.

[10] Cai S Q , Xu D Q. Relationship between CO₂ compensation point and photorespiration in soybean leaves. Acta Photophysiological Sinica ,2000 ,26 (6) :545 — 550.

[11] Yang X H , Zou Q , Zhao S J. Photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence in leaves of cotton plants grown in full light and 40% sunlight. Acta Phytoecologica Sinica ,2005 ,29 (1) :8 — 15.

[12] Zou Q , Sun G Y , Cheng B S , *et al.* Comparative studies on response of photosynthesis to light temperature and CO₂ concentration in common and small-grain soybean cultivars. Journal of Shandong Agricultural University ,1991 ,22 (4) :311 — 316.

[13] Bj rkman O. Responses to different quantum flux densities. In : Lange O L , Nobel P S , Osmond C B , Ziegler H eds. Encyclopedia of Plant Physiology , NS , Vol12A : Interaction with the Physiolgy , New York : Springer Verlag 57 – 107.

[14] Guo L W , Shen Y G. Protective Mechanisma Against Photodamage in Photosynthetic Apparatus of Higher Plants. Plant Physiology Communications ,1996 ,32 (1) :1 – 8.

[15] Medrano H , Keys A J , Lawlor D W , *et al.* Improving plant production by selection for survival at low CO₂ concentrations. J Exp Bot ,1995 ,46 , 1389 – 1396.

[16] Han Q F , Jia ZH K. Evaluation and Selection of Germ Plasm Resource on Alfafa. Northwest A&F University Press ,2004. 8 :19 – 20. .

参考文献：

[1] 徐怀忠 杨自平 先晨钟 ,等. 苜蓿引种试验研究. 草业科学 2005 ,22 (4) :47 ~ 51.

[2] 韩路 ,贾志宽 韩清芳. 引进苜蓿品种在半干旱地区的生态适应性研究. 干旱地区农业研究 2004 ,22 (1) :114 ~ 117.

[3] 徐春明 ,贾志宽 韩清芳 ,等. 不同秋眠级数苜蓿品种生物量特性的研究. 草业学报 2003 ,12 (6) :70 ~ 73.

[5] 郭江 郭新宇 王纪华 ,等. 不同株型玉米光响应曲线的特征参数研究. 西北植物学报 2005 ,25 (8) :1612 ~ 1617.

[7] 刘宇锋 萧浪涛 童建华 ,等. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用. 中国农学通报 2005 ,21 (8) :76 ~ 79.

[8] 蹇洪英 邹寿青. 地毯草的光合特性研究. 广西植物 2003 ,23 (2) :181 ~ 184. .

[10] 蔡时青 ,许大全. 大豆叶片 CO₂ 补偿点和光呼吸的关系. 植物生理学报 2000 ,26 (6) :545 ~ 550.

[11] 杨兴洪 邹琦 赵世杰. 遮荫和全光生长的棉花光合作用和叶绿素荧光特征. 植物生态学报 2005 29 (1) :8 ~ 15.

[12] 邹琦 孙广玉 程炳嵩 ,等. 小粒大豆与普通大豆光合对光、温度、CO₂ 响应特性的比较研究. 山东农业大学学报 ,1991 22 (4) :311 ~ 316.

[14] 郭连旺 沈允钢. 高等植物光合机构避免强光破坏的保护机制. 植物生理学通讯. 1996 32 (1) :1 ~ 8.

[16] 韩清芳 ,贾志宽. 紫花苜蓿种质资源评价与筛选. 陕西杨陵 :西北农林科技大学出版社 2004. 19 ~ 20.