

# 黄土高原半湿润区不同生长年限苜蓿叶片光合性能研究

胡守林<sup>1,2</sup>, 万素梅<sup>1,2</sup>, 贾志宽<sup>1\*</sup>, 王勇<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学干旱半干旱农业研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 塔里木大学植物科技学院, 新疆 阿拉尔 843300; 3. 甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**利用 Li-6400 型光合作用测定系统, 测定了不同生长年限苜蓿叶片的光合参数。结果表明, 1) 生长年限对苜蓿光合特性有较大的影响, 对气孔导度的影响最大, 其次是蒸腾速率和叶绿素相对含量。2) 苜蓿叶片净光合速率、蒸腾速率日变化均呈现“双峰”曲线, 有明显的光合“午休”现象。3) 净光合速率与光合有效辐射、气孔导度、叶绿素相对含量呈极显著正相关, 与蒸腾速率呈显著正相关, 与田间 CO<sub>2</sub> 浓度呈极显著负相关。蒸腾速率与叶绿素相对含量、光合有效辐射呈极显著或显著正相关, 与田间 CO<sub>2</sub> 浓度呈极显著负相关。4) 从苜蓿的光合特性综合分析, 苜蓿的最佳利用期为 6 年。

**关键词:**紫花苜蓿; 生长年限; 环境因子; 光合性能

**中图分类号:** S551<sup>+</sup>.7; Q945.11      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-5759(2008)05-0060-08

\* 紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 是世界上栽培历史最悠久、种植面积最广泛的多年生豆科牧草<sup>[1,2]</sup>, 由于其高产、优质、抗逆性强及蛋白质含量高<sup>[3-5]</sup>, 素有“牧草之王”和“饲料皇后”之美誉<sup>[6,7]</sup>, 在农业产业结构调整 and 优质、高效农业发展中具有重要作用。然而, 由于苜蓿生产管理粗放, 连续种植多年后单产水平普遍较低, 因此在实际生产中从光合生理生态角度探索苜蓿生育特性, 为紫花苜蓿高产栽培及适宜的利用年限提供理论依据显得尤为重要。

光合作用是植物生长发育和产量形成的基础。前人对小麦 (*Triticum aestivum*)<sup>[8,9]</sup>、玉米 (*Zea mays*)<sup>[10,11]</sup>、水稻 (*Oryza sativa*)<sup>[12-14]</sup>、大豆 (*Glycine max*)<sup>[15,16]</sup> 以及牧草<sup>[17,18]</sup> 等作物的光合生理特性进行了较多研究, 对其所涉及的生理生化过程有了较深刻的认识。近年来, 许多学者在苜蓿种质资源的开发利用、优良品种的引进和培育等方面进行了大量的工作, 并从栽培和育种角度阐明了提高苜蓿产草量的途径, 取得了许多进展<sup>[19-22]</sup>。温度、CO<sub>2</sub> 浓度等环境因素对苜蓿光合作用的影响也作了一些探讨<sup>[23-27]</sup>。植物的光合性能可以通过光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度等得到衡量。研究植物的光合特性, 有利于了解植物对光能的利用效率, 阐明植物光合的生态学特征。不同作物之间光合性能差异较大, 同一作物不同品种之间光合性能也存在显著差异。对于多年生的紫花苜蓿, 不同生长年限之间光合性能是否存在差异还未见系统报道。因此研究不同生长年限苜蓿的光合特性, 并进一步分析比较它们之间的差异, 对苜蓿生物产量累计能力及利用年限具有非常重要的意义。

通过对黄土高原旱作条件下生长年限分别为 4, 6, 8, 12, 14, 18 和 26 年的紫花苜蓿叶片光合生理特性进行研究, 分析不同生长年限紫花苜蓿净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率、气孔导度及胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化进程, 比较分析不同生长年限苜蓿光合作用的共性和特性, 探索紫花苜蓿光合作用的规律, 以期从光合生理生态角度为紫花苜蓿高产栽培及适宜的利用年限提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区自然概况

试验在甘肃省农业科学院镇原试验站进行。该试验站地处北纬 35°30', 东经 107°29', 海拔 1 279 m, 属北方

\* 收稿日期: 2007-11-24; 改回日期: 2008-04-16

基金项目: 国家农业部 948 项目 (2001-372), 农业部农业结构调整重大技术研究专项项目 (2002-09-02A) 和国家“十一五”科技支撑计划 (2006BAD29B03) 资助。

作者简介: 胡守林 (1968-), 男, 新疆阿拉尔人, 副教授, 硕士。E-mail: hushoulinghu@163.com

\* 通讯作者。E-mail: wansumei510@163.com, zhikuan@tom.com

半湿润偏旱一熟区。区域日照充足,年总辐射量  $5.54\sim 5.65\times 10^5\text{ J/cm}^2$ ,多年平均降水量 540 mm,降水量年内分布不均匀,降水季节短而集中,54%以上的降水量集中在 7—9 月。地下水埋深 60~100 m,旱源水资源贫乏,无地表水来源,是典型的旱作雨养农业区<sup>[28]</sup>。

## 1.2 供试材料

供试材料为 4 年(4yrs)、6 年(6yrs)、8 年(8yrs)、12 年(12yrs)、14 年(14yrs)、18 年(18yrs)和 26 年(26yrs)紫花苜蓿。各年限苜蓿草地面积分别为 10 m×20 m。试验地地势平坦,自播种至今,均未施肥。

## 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 光合指标测定** 本试验于 2006 年 5 月 18 日进行,此时苜蓿处于第 1 茬初花期。采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合仪田间活体测定苜蓿叶片的光合生理生态指标。在不同生长年限苜蓿草地,分别选择生长健康、长势一致、无病斑、光照均一的同一叶位(从顶部向下第 1 片完全展开叶)苜蓿叶片作为测定对象,并以其三出复叶的中间小叶作为该节位的代表叶片测定其光合日进程。每次每年限测定均随机选取 5 个叶片重复测定,8:00~19:00 每隔 1 h 测定 1 次。主要测定指标包括:叶片的光合速率( $P_n, \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )、蒸腾速率( $T_r, \text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )、气孔导度( $G_s, \text{cm/s}$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i, \mu\text{mol/mol}$ )等生理因子以及大气温度( $T_a, ^\circ\text{C}$ )、田间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_a, \mu\text{mol/mol}$ )、相对湿度(RH, %)、光合有效辐射(PAR,  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )、饱和蒸汽压差(VPD, kPa)等环境因子<sup>[29]</sup>。

**1.3.2 叶绿素相对含量测定** 叶绿素相对含量采用 SPAD-502 型叶绿素仪测定。在不同生长年限苜蓿草地,分别选择生长健康、长势一致、无病斑、光照均一的同一叶位(从顶部向下第 1 片完全展开叶)苜蓿叶片作为测定对象,并以其三出复叶的中间小叶作为该节位的代表叶片测定其叶绿素相对含量。每次每年限测定均随机选取 10 个叶片测定,取其平均值作为一个重复,每年限各重复 5 次。

**1.3.3 数据处理与分析** 试验数据采用 Excel 进行统计处理,SAS 8.0 进行方差分析和新复极差测验<sup>[30]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生长年限苜蓿叶片光合功能比较

植物的光合性能可以通过光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率和胞间  $\text{CO}_2$  浓度等得到衡量。研究植物的光合特性,有利于了解植物对光能的利用效率,阐明植物光合的生态学特征。

研究不同生长年限苜蓿在初花期叶片的光合特性指标。结果显示(表 1),苜蓿生长年限不同,光合性能各指标存在极显著差异。从净光合速率看,最大的是 6 年生苜蓿,为  $26.92\ \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ,光合速率最小的是 18

表 1 不同生长年限苜蓿光合性能比较

Table 1 Compare with photosynthetic characteristics of alfalfas growing for different lengths of time

| 处理<br>Treatment                | $P_n$<br>( $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ) | $T_r$<br>( $\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ) | WUE<br>( $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol}$ ) | Cond<br>( $\text{cm/s}$ ) | $C_i$<br>( $\mu\text{mol/mol}$ ) | Chlorophyll content<br>(%) |
|--------------------------------|---|--|---|---------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 4yrs                           | 23.76 B   | 9.20 B   | 2.53 ABC                                    | 0.496 B                   | 281.86 A                         | 392 A                      |
| 6yrs                           | 26.92 A   | 14.06 A  | 1.95 C                                      | 0.58 A                    | 285.89 A                         | 402 A                      |
| 8yrs                           | 23.83 B   | 9.27 B   | 2.52 BC                                     | 0.58 A                    | 291.64 A                         | 345 A                      |
| 12yrs                          | 26.78 A   | 12.75 A  | 2.20 BC                                     | 0.49 B                    | 272.04 A                         | 361 A                      |
| 14yrs                          | 24.94 AB  | 9.20 B   | 2.87 AB                                     | 0.47 B                    | 273.67 A                         | 351 A                      |
| 18yrs                          | 18.27 C   | 5.33 C   | 3.20 A                                      | 0.23 B                    | 232.37 B                         | 237 B                      |
| 26yrs                          | 23.68 B   | 8.48 B   | 2.56 ABC                                    | 0.30 B                    | 168.79 C                         | 221 B                      |
| 均值 Average                     | 24.03   | 9.76   | 2.55  | 0.45                      | 258.04                           | 330                        |
| 标准差 Standard deviation         | 2.89  | 2.87   | 0.41  | 0.13                      | 43.85                            | 72.09                      |
| 变异系数 Variation coefficient (%) | 12.03   | 29.46  | 16.10                                       | 29.98                     | 16.99                            | 21.85                      |

注:多重比较采用 Duncan 新复极差法,不同大写字母表示差异达极显著水平( $P<0.01$ )。

Note: Statistical multiple comparison based on the Duncan's, the different letter at the same column indicated significance at level of  $P<0.01$ .

年生苜蓿,只有  $18.27 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,比 6 年生苜蓿低  $8.65 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。不同生长年限之间蒸腾速率最大的是 6 年生苜蓿,达到  $14.06 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,最低的是 18 年生苜蓿,仅  $5.33 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,其次是 26 年生苜蓿,为  $8.48 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。从水分利用效率看,18 年生苜蓿最高,最低的是 6 年生苜蓿。从气孔导度看,6 和 8 年最高,均为  $0.58 \text{ cm/s}$ ,4,12 和 14 年之间相差不大,为  $0.49 \text{ cm/s}$  左右,最低的是 18 和 26 年生苜蓿,只有  $0.23$  和  $0.30 \text{ cm/s}$ 。不同生长年限之间胞间  $\text{CO}_2$  浓度以 4,6 和 8 年较大,超过  $281 \mu\text{mol}/\text{mol}$ ,12 和 14 年为  $272 \mu\text{mol}/\text{mol}$  左右,18 和 26 年低于  $232.5 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。叶绿素相对含量在不同生长年限之间差异极显著,4,6,8,12 和 14 年之间差异不显著,但它们极显著地高于 18 和 26 年苜蓿,18 与 26 年之间差异不显著。

从不同生长年限苜蓿的变异系数看,生长年限对苜蓿光合特性的影响较大,变异系数都超过 12%。其中,生长年限对苜蓿初花期叶片的气孔导度和蒸腾速率影响最大,变异系数分别达到 29.98% 和 29.46%,生长年限对叶绿素相对含量的影响也较大,变异系数达 21.85%。胞间  $\text{CO}_2$  浓度和水分利用率的变异系数为 16.99% 和 16.10%,对光合速率的影响相对较小,变异系数为 12.03%。可以看出,由于苜蓿生长年限的影响,导致苜蓿的光合特性在年限之间差异较大,这是造成同一紫花苜蓿品种在不同生长年限光合速率存在差异的主要原因。

## 2.2 不同生长年限苜蓿叶片气孔导度日变化

结果显示(图 1),一日中随着时间的推进,不同生长年限苜蓿气孔导度( $G_s$ )的变化曲线均为“双峰”曲线。所有生长年限苜蓿  $G_s$  在早晨 8:00 左右达到全天的最大值,其后随着温度的增加和湿度的下降, $G_s$  迅速降低。4,8 和 14 年在 16:00 左右,6,12,18 和 26 年在 13:00~14:00 出现第 2 个峰值,且第 2 峰值远小于第 1 峰值。4,6,8,12 和 14 年苜蓿  $G_s$  在 13:00~15:00 出现低谷,18 和 26 年苜蓿在 12:00 左右出现低谷。

$G_s$  日平均值的方差分析结果表明(表 1),不同年限之间存在极显著差异。6 与 8 年之间差异不显著,但它们极显著地高于其余生长年限,4,12 和 14 年之间差异不显著,但它们极显著地高于 18 和 26。18 与 26 年之间差异不显著。

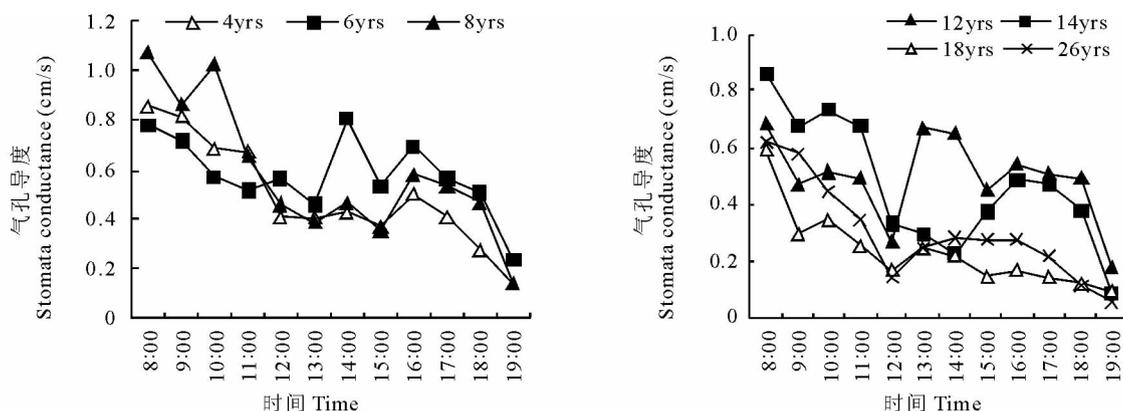


图 1 不同生长年限苜蓿叶片气孔导度的日变化

Fig. 1 Diurnal courses of stomata conductance( $G_s$ ) in leaves of alfalfas growing for different lengths of time

## 2.3 不同生长年限苜蓿叶片胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ )变化

结果显示(图 2),不同生长年限苜蓿  $C_i$  的日变化呈现规律性的变化,表现出随着时间的推移, $C_i$  逐渐下降,在 12:00 左右达到全天的最低值( $218.46 \mu\text{mol}/\text{mol}$ ),以后又逐渐上升,在 19:00 左右达到全天的最高值( $338.27 \mu\text{mol}/\text{mol}$ )。

除 26 年苜蓿外,其余生长年限苜蓿叶片  $C_i$  在早晨 8:00 左右非常接近,在  $307.4 \sim 327.6 \mu\text{mol}/\text{mol}$ ,年限之间差异不大。26 年苜蓿在早晨 8:00 左右  $C_i$  为  $204.2 \mu\text{mol}/\text{mol}$ ,比 4~18 年苜蓿低  $103.2 \sim 123.4 \mu\text{mol}/\text{mol}$ ,远低于其他年限苜蓿。在 9:00~18:00 内,4,6,8,12 和 14 年苜蓿叶片  $C_i$  值非常接近,为  $260 \mu\text{mol}/\text{mol}$  左右,18 年苜蓿叶片  $C_i$  值低于 4,6,8,12 和 14 年,而高于 26 年苜蓿。

从不同生长年限苜蓿  $C_i$  的日平均值大小看,苜蓿生长年限低于 8 年(含 8 年),表现出随着苜蓿生长年限的延长, $C_i$  逐渐升高,苜蓿生长超过 8 年, $C_i$  逐渐降低。方差分析结果表明(表 1),不同年限之间差异极显著。4,6,8,12 和 14 年之间差异不显著,但它们极显著地高于 18 和 26 年,18 年极显著地高于 26 年。

2.4 不同生长年限苜蓿叶片净光合速率变化

结果显示(图 3),所有生长年限苜蓿叶片净  $P_n$  的日变化曲线均为典型的“双峰”曲线,在 9:00~10:00, $P_n$  出现第 1 峰值,14:00 左右出现第 2 峰值,在 12:00 左右均有明显的光合“午休”现象出现。但苜蓿生长年限不同,叶片净  $P_n$  出现高峰和低谷的时刻和高低有明显差异。

4 年生苜蓿第 1 峰值出现在 9:00 左右,为  $33.02 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,第 2 峰值出现在 16:00 左右,为  $25.74 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,在 13:00 左右  $P_n$  处于低谷,为  $18.70 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。6 和 8 年生苜蓿第 1 高峰值都出现在 10:00,低谷值都出现在 11:00,但第 2 峰值出现的时刻有差异,6 年生苜蓿第 2 高峰值在 14:00,而 8 年生苜蓿出现在 16:00。苜蓿生长超过 8 年,叶片净  $P_n$  出现高峰和低谷的时刻和高低与 3,4,6 和 8 年生苜蓿有明显差异,12 和 14 年生苜蓿第 1 峰值都出现在 10:00,第 2 峰值都出现在 13:00,而 12 年生苜蓿的最低值出现在 11:00,14 年生苜蓿出现在 12:00。苜蓿生长至 18 和 26 年,第 1 峰值提前至 9:00,第 2 峰值 18 年生出现在 13:00,26 年生出现在 15:00,而低谷值都出现在 12:00,分别为  $19.22$  和  $17.45 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

对 7 种生长年限紫花苜蓿各个测定时刻净光合速率的平均值进行分析,可以看出,中午 10:00~12:00 紫花苜蓿的净光合速率平均下降了  $5.29 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,而下午 12:00~13:00 净光合速率平均回升了  $4.91 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,表明苜蓿净光合速率的第 1 峰值高于第 2 峰值,且中午净光合速率下降的速率大于下午净光合速率回升的速率,即净光合速率中午降低快而恢复慢。苜蓿生长至 26 年,净  $P_n$  高于 18 年苜蓿。

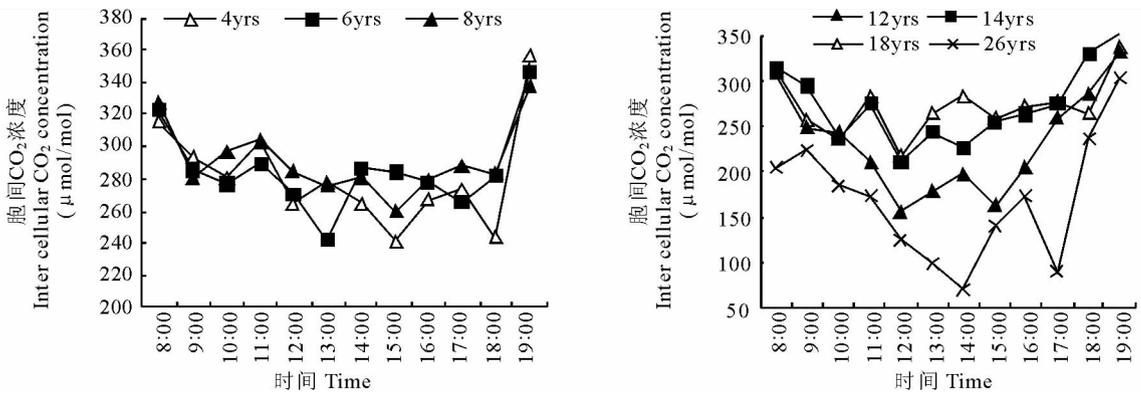


图 2 不同生长年限苜蓿叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度的日变化

Fig. 2 Diurnal courses in inter cellular  $\text{CO}_2$  concentration( $C_i$ )in leaves of alfalfas growing for different lengths of time

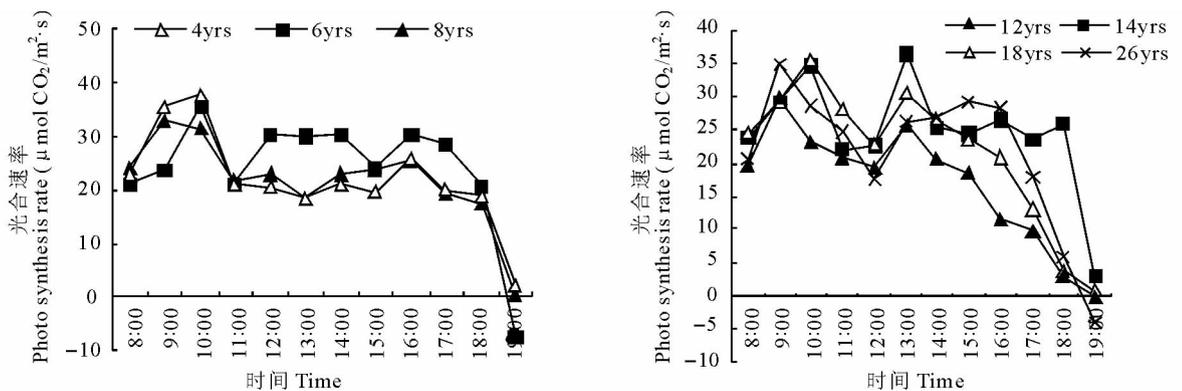


图 3 不同生长年限苜蓿叶片光合速率日变化

Fig. 3 Diurnal courses of photo synthesis rate( $P_n$ )in leaves of alfalfas growing for different lengths of time

不同生长年限苜蓿叶片净光合速率的方差分析结果表明(表 1),年限之间差异极显著。6,12 与 14 年之间差异不显著,但极显著地高于其余生长年限,4,8 和 26 年之间差异不显著,但极显著地高于 18 年。

## 2.5 不同生长年限苜蓿叶片蒸腾速率变化

蒸腾速率  $T_r$  的日变化进程与  $P_n$  基本一致,呈现“双峰”曲线(图 4),但苜蓿生长年限不同, $T_r$  出现高峰和低谷的时刻有明显差异。

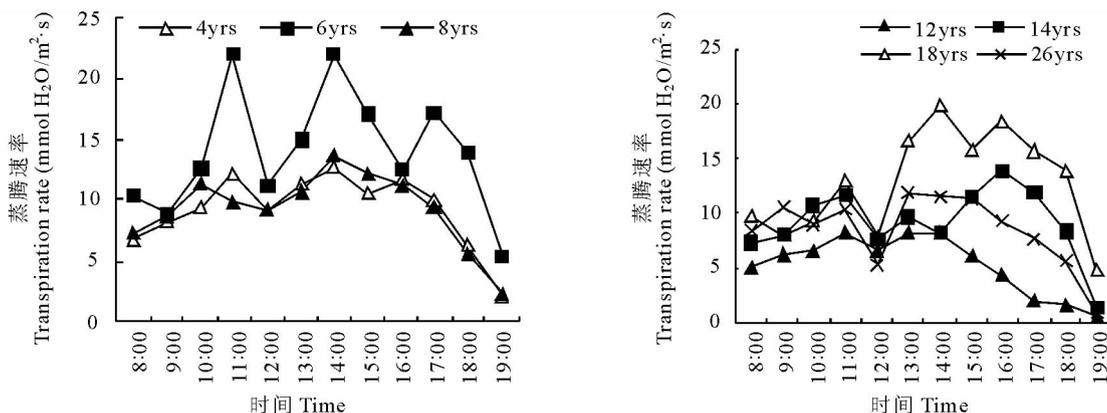


图 4 不同生长年限苜蓿蒸腾速率日变化

Fig. 4 Diurnal courses of transpiration rate( $T_r$ )in leaves of alfalfas growing for different lengths of time

结果显示(图 4),4 和 6 年生苜蓿第 1 峰值出现在 11:00 左右,分别为 12.14 和 21.97  $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,8 年生苜蓿的第 1 峰值出现在 10:00 左右,为 11.33  $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,3 种生长年限的第 2 峰值都出现在 14:00 左右,分别为 12.70,22.07 和 13.58  $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,低谷值都在 12:00 左右,分别为 9.28,11.23 和 9.15  $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。苜蓿生长超过 12 年(含 12 年),除 26 年生苜蓿外,蒸腾速率第 1 高峰出现的时刻都为 11:00,低谷出现的时刻都为 12:00 左右,但第 2 峰值在不同年限之间存在差异,12 年生苜蓿在 14:00 时、14 年生苜蓿在 16:00 点出现,18 与 26 年生第 2 峰值都出现在 13:00,分别为 8.30 和 11.92  $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

从以上分析可以看出,所有生长年限苜蓿  $T_r$  的第 1 峰值均低于第 2 峰值,且在苜蓿出现第 2 峰值后,蒸腾速率迅速下降。

比较不同生长年限苜蓿蒸腾速率的日变化平均值,可以看出蒸腾速率表现出中间高、两头低的规律,即 6 和 8 年生苜蓿的蒸腾速率高,4,12,14,18 和 26 年低。与 12 和 14 年生相比,18 和 26 年生苜蓿的蒸腾速率下降迅速,苜蓿生长至 18 年,蒸腾速率仅为 5.33  $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,但苜蓿生长至 26 年, $T_r$  高于 18 年生苜蓿。

方差分析结果表明(表 1),不同年限之间  $T_r$  存在极显著差异:6 与 12 年生之间差异不显著,但极显著地高于其余生长年限,4,8,14 和 26 年生之间差异不显著,但极显著地高于 18 年。

## 2.6 不同生长年限苜蓿叶片光合指标之间的相关性

以 7 种生长年限紫花苜蓿各个测定时刻光合特征参数的平均值进行相关分析(表 2)。结果表明,紫花苜蓿净光合速率日变化与光合有效辐射、气孔导度、叶绿素相对含量呈极显著正相关( $r=0.8433^{**}$ ,  $0.8223^{**}$ ,  $0.8361^{**}$ ,  $P<0.01$ ),与蒸腾速率呈显著正相关( $r=0.6613^*$ ,  $P<0.05$ ),与田间  $\text{CO}_2$  浓度呈极显著负相关( $r=-0.8125^{**}$ ,  $P<0.01$ ),与其他环境因子相关性不显著。蒸腾速率与叶绿素相对含量呈极显著正相关( $r=0.8361^{**}$ )、与光合有效辐射呈显著正相关( $r=0.6486^*$ )、与大气温度有较高的正相关( $r=0.5316$ ),与田间  $\text{CO}_2$  浓度呈极显著负相关( $r=-0.8399^{**}$ )。

从其他因子间的相关关系看,光合有效辐射除与田间  $\text{CO}_2$  浓度呈显著负相关( $r=-0.6765^*$ )外,与所有因子均为正相关关系,且与蒸腾速率、气孔导度、叶绿素相对含量呈显著正相关( $r=0.6486^*$ ,  $0.6383^*$ ,  $0.6187^*$ );大气温度与饱和蒸汽压差呈极显著正相关( $r=0.9727^{**}$ ),与大气相对湿度呈极显著负相关( $r=$

-0.929 7\*\*), 与气孔导度、田间  $\text{CO}_2$  浓度呈负相关。大气相对湿度与饱和蒸汽压差呈极显著负相关 ( $r = -0.882 8^{***}$ ), 与气孔导度呈显著正相关 ( $r = 0.652 5^*$ )。气孔导度与田间  $\text{CO}_2$  浓度呈显著负相关 ( $r = -0.633 85^*$ ), 与叶绿素相对含量呈极显著正相关 ( $r = 0.903 5^{***}$ )。

从相关系数的大小来看, 对叶片光和速率影响最大的因子是光合有效辐射, 其次是叶绿素相对含量、气孔导度、田间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率、大气相对湿度、大气温度与饱和蒸汽压差。对蒸腾速率影响最大的因子是田间  $\text{CO}_2$  浓度, 其次是叶绿素相对含量、光合有效辐射、大气温度、气孔导度、大气相对湿度与饱和蒸汽压差。

表 2 紫花苜蓿光合速率与蒸腾速率和环境因素之间的相关系数

Table 2 Correlative coefficients between photosynthesis rate and transpiration rate in leaves of alfalfa and environmental factors

| 项目<br>Item             | 光合速率<br>Pn | 光合有效辐射<br>PAR | 蒸腾速率<br>Tr | 大气温度<br>Ta | 相对湿度<br>RH | 饱和蒸汽压差<br>VPD | 气孔导度<br>Gs | 田间 $\text{CO}_2$<br>浓度 Ca |
|------------------------|------------|---------------|------------|------------|------------|---------------|------------|---------------------------|
| 光合有效辐射 PAR             | 0.843 3**  |               |            |            |            |               |            |                           |
| 蒸腾速率 Tr                | 0.661 3*   | 0.648 6*      |            |            |            |               |            |                           |
| 大气温度 Ta                | -0.061 4   | 0.142 0       | 0.531 6    |            |            |               |            |                           |
| 大气相对湿度 RH              | -0.285 7   | 0.207 4       | -0.276 3   | -0.929 7** |            |               |            |                           |
| 饱和蒸汽压差 VPD             | -0.045 0   | 0.221 2       | -0.170 0   | 0.972 7**  | -0.882 8** |               |            |                           |
| 气孔导度 Gs                | 0.822 3**  | 0.638 3*      | 0.436 0    | -0.417 6   | 0.652 5*   | -0.394 8      |            |                           |
| 田间 $\text{CO}_2$ 浓度 Ca | -0.812 5** | -0.676 5*     | -0.839 9** | -0.291 6   | 0.005 9    | -0.279 6      | -0.633 8*  |                           |
| 叶绿素相对含量 Chl            | 0.836 1**  | 0.618 7*      | 0.723 9**  | -0.468 6   | -0.192 6   | -0.932 6**    | 0.903 5**  | 0.500 0                   |

注: \* 表示 0.05 水平显著; \*\* 表示 0.01 水平显著。

Notes: \* indicated significance at level of 0.05; \*\* indicated significance at level of 0.01.

### 3 讨论与结论

**3.1** 研究结果表明, 在自然晴天条件下, 不同生长年限紫花苜蓿净 Pn 的日变化曲线均为典型的“双峰”曲线, 第 1 峰值大于第 2 峰值。早晨光强和 Ta 低, 净 Pn 也很低, 随着 PAR 的增大, Ta 的升高, 气孔的开放, 苜蓿叶片 Pn 明显提高, 在 9:00~10:00 净 Pn 达到最大值。在 11:00~12:00 期间, 所有生长年限苜蓿均处于光合“午休”阶段。在 13:00~16:00, 出现第 2 峰值, 但由于强光、高温的条件提高了叶片的光呼吸强度, 增加了呼吸消耗, 这是净 Pn 下午的峰值低于上午峰值的一个重要原因。

**3.2** 苜蓿生长至一定年限, 光合速率降低, 本试验研究结果表明, 叶片净光合速率的下降是由于叶片衰老引起叶绿素含量下降而导致的。12 和 26 年生苜蓿叶片叶绿素相对含量仅为 237% 和 221%, 分别比 4, 6, 8, 12 和 14 年苜蓿低 108%~181% 叶片的气孔特征表现也证明了这一点, 苜蓿生长至 12 年, 功能叶片的气孔导度为 0.49  $\text{cm}^2/\text{s}$ , 苜蓿生长至 18 和 26 年, 气孔导度下降至 0.230 和 0.299  $\text{cm}^2/\text{s}$ 。叶绿素是光合作用中将光能转变为化学能并用于物质合成的关键物质, 其含量的高低决定叶片功能期的长短。相关分析结果表明, 苜蓿叶片的平均叶绿素含量与净光合速率呈极显著正相关。

**3.3** 从不同生长年限苜蓿的变异系数看, 生长年限对苜蓿光合特性的影响较大, 变异系数都超过 12%。其中, 生长年限对苜蓿初花期叶片气孔导度的影响最大, 变异系数达到 29.98%, 生长年限对蒸腾速率和叶绿素相对含量的影响也较大, 变异系数分别为 29.46% 和 21.85%。说明 Gs 对环境因子的变化是非常敏感的, 波动性很大, 这一结论与项斌等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。

**3.4** 关于净光合速率和气孔导度、蒸腾速率、胞间  $\text{CO}_2$  浓度等因子之间的关系各学者持不同的观点。张美善和徐克章<sup>[32]</sup>报道, 西洋参 (*Panax quinquefolius*) 叶片净光合速率与气孔导度和蒸腾速率之间呈正相关。翁晓燕等<sup>[33]</sup>研究证明, 水稻叶片光合速率与气孔导度的变化一致, 呈正相关, 与胞间  $\text{CO}_2$  浓度呈负相关。陶汉之<sup>[34]</sup>和许大全等<sup>[35]</sup>认为气孔导度对净光合速率的影响并不明显; 温度是影响杂花苜蓿光合作用最主要的环境因子<sup>[36]</sup>。

刘玉华等<sup>[37]</sup>的研究结果则表明苜蓿净光合速率与气孔导度呈显著正相关;笔者对不同生长年限紫花苜蓿光合特性的研究结果表明,紫花苜蓿净光合速率日变化与光合有效辐射、气孔导度、叶绿素相对含量呈极显著正相关,与蒸腾速率呈显著正相关,与田间 CO<sub>2</sub> 浓度呈极显著负相关,与其他环境因子相关性不显著。蒸腾速率与叶绿素相对含量呈极显著正相关、与光合有效辐射呈显著正相关,与田间 CO<sub>2</sub> 浓度呈极显著负相关。这一结果与翁晓燕等<sup>[32]</sup>和刘玉华等<sup>[36,37]</sup>的研究结果一致。

**3.5 光合能力的强弱在相当程度上取决于物种的遗传特性,但是适宜的外部生态条件会促使其固有的光合潜能的发挥。**研究结果表明,苜蓿生长年限不同,苜蓿叶片光合性能存在极显著差异。苜蓿生长 6 年,植株代谢旺盛,叶片光合性能强,净光合速率最大(26.92 μmol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·s),气孔导度最高(0.58 cm/s),叶绿素相对含量最高(402%),胞间 CO<sub>2</sub> 浓度也较高(285.89 μmol/mol),表明同化能力强,具有丰产的潜力,表现出明显的高光合性能。苜蓿生长至 18 年,叶片光合性能差,苜蓿草地严重衰败。因此,从苜蓿的光合特性看,苜蓿的最佳利用期为 6 年。

### 参考文献:

- [1] 杜文华,田新会,曹致中. 播种行距和灌水量对紫花苜蓿种子产量及其构成因素的影响[J]. 草业学报,2007,16(3):81-87.
- [2] 魏臻武,符昕,曹致中,等. 苜蓿生长特性和产草量关系的研究[J]. 草业学报,2007,16(4):1-8.
- [3] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报,2002,39(3):404-411.
- [4] 樊军,邵明安,王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复[J]. 草地学报,2006,14(3):262-264.
- [5] Kelner D J, Vessey J K, Entz M H. The nitrogen dynamics of 1-, 2- and 3-year stands of alfalfa in a cropping system[J]. *Agricultural Ecosystem Environment*, 1997, 64: 1-10.
- [6] 孙洪仁,张英俊,历卫宏,等. 北京地区紫花苜蓿建植当年的耗水系数和水分利用效率[J]. 草业学报,2007,16(1):41-46.
- [7] 黄迎新,周道玮,岳秀泉,等. 不同苜蓿品种再生特性的研究[J]. 草业学报,2007,16(6):14-22.
- [8] 隋娜,李萌,田纪春,等. 超高产小麦品种(系)生育后期光合特性的研究[J]. 作物学报,2005,31(6):808-814.
- [9] 刘洪展,郑凤荣,赵世杰. 不同衰老类型小麦品种在衰老过程中光合特性的变化[J]. 华北农学报,2006,21(3):13-15.
- [10] 王群,李潮海,栾丽敏,等. 不同质地土壤夏玉米生育后期光合特性比较研究[J]. 作物学报,2005,31(5):628-633.
- [11] 马国胜,薛吉全,路海东,等. 不同品种青贮玉米光合作用与光合特性比较[J]. 西北植物学报,2005,25(3):536-540.
- [12] 马文波,马均,明东风,等. 不同穗粒重水稻品种旗叶光合特性研究[J]. 作物学报,2003,29(2):236-240.
- [13] 李霞,焦德茂,刘友良. 不同水稻品种各层叶片光合能力的比较[J]. 江苏农业学报,2004,20(4):213-219.
- [14] 欧志英,彭长连,林桂. 田间条件下超高产水稻培矮 64S/E32 及其亲本旗叶的光合特性[J]. 作物学报,2005,31(2):209-214.
- [15] 徐冉,陈存来,邵历,等. 夏大豆叶片光合作用与光强的关系[J]. 作物学报,2005,31(8):1080-1085.
- [16] 苍晶,王学东,崔琳,等. 大豆豆荚与叶片的光合特性比较[J]. 中国农学通报,2005,21(2):85-87.
- [17] 张国芳,王北洪,孟林,等. 四种偃麦草光合特性日变化分析[J]. 草地学报,2005,13(4):344-348.
- [18] 赵则海,曹建国,王文杰,等. 不同生长年限栽培甘草与野生甘草光合特性对比研究[J]. 草业学报,2005,14(3):111-116.
- [19] 赵姚阳,刘文兆,濮励杰. 黄土丘陵沟壑区苜蓿地土壤水分环境效应[J]. 自然资源学报,2005,20(1):85-91.
- [20] 韩清芳,贾志宽. 紫花苜蓿种质资源评价与筛选[M]. 杨凌:西北农林科技大学出版社,2004. 68-137.
- [21] 郝明德,张春霞,魏孝荣,等. 黄土高原地区施肥对苜蓿生产力的影响[J]. 草地学报,2004,12(3):195-198.
- [22] 曹致中. 优质苜蓿栽培与利用[M]. 北京:中国农业出版社,2002. 50-75.
- [23] 孙同兴,张昕,张长胜. CO<sub>2</sub> 倍增对紫花苜蓿叶片形态结构的影响[J]. 莱阳农学院学报,1999,16(1):1-5.
- [24] 张其德,卢从明,冯丽洁,等. CO<sub>2</sub> 富集对紫花苜蓿光合作用原初光能转换的影响[J]. 植物学报,1996,38(1):77-82.
- [25] Cure J D, Acock B. Crop responses to CO<sub>2</sub> doubling: a literature survey[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1986, 38: 127-145.
- [26] Goudriaan J, DeRuiter H E. Plant growth response to CO<sub>2</sub> enrichment at two levels of nitrogen and phosphorus supply. Dry matter, leaf area and development[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1983, 31:157-169.
- [27] Ziska L H, Bunce J A. Direct and indirect inhibition of single leaf respiration by elevated CO<sub>2</sub> concentrations: Interaction with temperature[J]. *Physiological Plant*, 1994, 90:130-138.

- [28] 胡恒觉,张仁陟,黄高宝,等. 黄土高原旱地农业——理论、技术、潜力[M]. 北京,中国农业出版社,2002. 30-47.
- [29] 刘玉华,贾志宽,史纪安,等. 旱作条件下不同苜蓿品种光合作用的日变化[J]. 生态学报,2006,26(5):1468-1477.
- [30] 胡小平,王长发. SAS 基础及统计实例教程[M]. 西安:西安地图出版社,2001. 68-993.
- [31] 项斌,林舜华,高雷明. 紫花苜蓿对 CO<sub>2</sub> 倍增的反应:生态生理研究和模型拟合[J]. 植物学报,1996,38(1):63-71.
- [32] 张美善,徐克章. 西洋参叶片光合日变化与内生节奏的关系[J]. 吉林农业大学学报,2003,25: 595-597.
- [33] 翁晓燕,蒋德安,陆庆,等. 影响光合速率日变化的主要因素[J]. 中国水稻科学,1998,12(2): 105-108.
- [34] 陶汉之. 茶树光合日变化的研究[J]. 作物学报,1991,17: 444-452.
- [35] 许大全,丁焕根,苏丙英,等. 红豆草和苜蓿的光合效率比较研究[J]. 生态学报,1991,11(1):89-91.
- [36] 王建丽,张永亮,朱占林,等. 杂花苜蓿叶片光合生理生态特性[J]. 草地学报,2006,14(2): 138-141.
- [37] 刘玉华,史纪安,贾志宽,等. 旱作条件下紫花苜蓿光合蒸腾日变化与环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2006,17(10): 811-1814.

### A study on photosynthetic characteristics of alfalfas grown for different lengths of time in the semi-humid region of the Loess Plateau

HU Shou-lin<sup>1,2</sup>, WAN Su-mei<sup>1,2</sup>, JIA Zhi-kuan<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>3</sup>

(1. Research Center of Dryland Farming in Arid and Semi-arid Area, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Plant Sciences, Tarim University, Alar 843300, China; 3. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The daily dynamics of photosynthetic characteristics of alfalfas grown for different lengths of time in the Loess Plateau were monitored using a Portable LI-6400 Photosynthesis System. The results showed: 1) Alfalfas grown for different lengths of time had considerable influence on photosynthetic characteristics of which the most important was stomatal conductance followed by transpiration rate and the chlorophyll relative content. 2) Diurnal variation in Pn and Tr had two peaks, and an obvious midday depression. 3) The net photosynthetic rate was significantly positively correlated with photosynthetic radiation, stomatal conductance, the relative chlorophyll content, and transpiration rate. The net photosynthetic rate was significantly negatively correlated with intercellular CO<sub>2</sub> concentration. The transpiration rate was significantly positively correlated with the relative content of chlorophyll and photosynthetic radiation but significantly negatively correlated with intercellular CO<sub>2</sub> concentration. Analysis of the photosynthetic characteristics showed the best length of time to grow alfalfa was six years.

**Key words:** alfalfa; growing year; environmental factors; photosynthetic characteristics