

# 黄土高原 4 种豆科牧草的净光合速率和蒸腾速率日动态及水分利用效率

谢田玲, 沈禹颖\*, 邵新庆, 高崇岳

(兰州大学草地农业科技学院, 农业部草地农业生态系统学重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:**在晴天条件下,研究了 4 年生甘肃红豆草(*Onobrychis viciaefolia scop.* cv. ‘Gansu’),沙打旺(*Astragalus adsurgens*),东方山羊豆(*Galega orientalis*)和多年生香豌豆(*Lathyrus latifolius*)人工种群花期(5 月 31 日)和再生期(7 月 10 日)的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率以及土壤贮水量和水分利用特征。结果表明,自 5 月 31 日(花期)至 7 月 10 日(再生期),4 种牧草对土壤水分消耗由大到小依次为:沙打旺 119.2 mm、多年生香豌豆 91.6 mm、山羊豆 81.9 mm 和红豆草 73.8 mm。红豆草在花期和再生期的净光合速率分别为 12.41 和 9.06  $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,沙打旺为 10.10 和 7.01  $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;红豆草在花期和再生期的日均蒸腾速率 8.13 和 9.05  $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,沙打旺刈割前和刈割后蒸腾速率分别为 7.40 和 6.54  $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,属于高光合、高蒸腾型。而山羊豆和多年生香豌豆则属于低蒸腾、低光合类型,花期和再生期,山羊豆的日均光合速率分别为 4.74 和 4.88  $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,多年生香豌豆为 4.41 和 4.64  $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,相应的蒸腾速率分别达到 3.75 和 5.42  $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,4.74 和 4.34  $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。山羊豆(3.96  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ )和多年生香豌豆(3.63  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ )花期的日均水分利用效率高于红豆草(2.98  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ )和沙打旺(2.06  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ ),4 种牧草花期的日均水分利用效率均高于再生期。

**关键词:**豆科牧草;净光合速率;蒸腾速率;水分利用效率;贮水量;气孔导度;日变化

## Differences in photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency between four legume species on the Loess Plateau

XIE Tian-Ling, SHEN Yu-Ying, SHAO Xin-Qing, GAO Chong-Yue (College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystem, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1678~1685.

**Abstract:** In a field experiment in Qingyang on the Loess Plateau. Daily changes in photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), water use efficiency ( $WUE$ ) and stomatal conductance ( $G_s$ ) were determined for four legume species, namely, *Onobrychis viciaefolia* cv. ‘Gansu’, *Astragalus adsurgens*, *Galega orientalis* and *Lathyrus latifolius* at the flowering and regeneration stages after the first cutting during fine weather in the fourth growth year. Soil water storage was calculated by measuring soil volumetric water content at the same time. The soil water consumption by plant from May 31 to July 10 was 119.2 mm for *A. adsurgens*, 91.6 mm for *L. latifolius*, 81.9 mm for *G. orientalis* and 73.8 mm for *O. viciaefolia*. Among the four species, *O. viciaefolia* had the highest  $P_n$  at both flowering and regeneration stages at 12.41 and 9.06  $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , respectively. For *A. adsurgens*,  $P_n$  was 10.10 and 7.01  $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  respectively. At flowering, higher  $T_r$  was observed from *O. viciaefolia* (8.13  $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) and *A. adsurgens* (7.40  $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) than from *G.*

**基金项目:**国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018602);科技部优质饲草高效生产关键技术研究产业化开发专题资助项目(2002BA518A03)

**收稿日期:**2003-09-23;**修订日期:**2004-05-10

**作者简介:**谢田玲(1979~),女,山东省蓬莱市人,研究生,主要从事草地农业生态系统研究。

\* **通讯联系人** Author for correspondence, E-mail: yy.shen@lzu.edu.cn

**Foundation item:** National Key Basic Research Special Funding Project of China (No. G2000018602) and Key Techniques for Quality Forage Production and Industrialization (2002BA518A03)

**Received date** 2004-05-10 **Accepted date** 2004-05-10

**Biography:** XIE Tian-Ling, Master candidate, mainly engaged in pastoral agriculture ecosystem.

*orientalis* ( $3.75 \text{ m mol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) and *L. latifolius* ( $4.74 \text{ m mol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ). The average WUE for *G. orientalis*, *L. latifolius*, *O. viciaefolia* and *A. adsurgens* at flowering was 3.96, 3.63, 2.98 and  $2.06 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ , respectively. The introduced legume species, *G. orientalis* and *L. latifolius* are considered to have productive potential on the Loess Plateau.

**Key words:** legume species; photosynthetic rate; transpiration rate; water use efficiency; water storage; stomatal conductance

文章编号:1000-0933(2004)08-1678-08 中图分类号:S162.5 文献标识码:A

黄土高原传统农业方式以小麦单作为主,产业结构单一,水土流失严重,生产力低下是当地农业存在的现实问题。实施草田轮作,增加豆科牧草的种植比例,通过豆科牧草的生物固氮,可以增加土壤含氮量,有利于作物产量的提高,并可减少化肥投入,是改善农业生产状况、提高系统稳定性的有效途径之一。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)在我国黄土高原已有千年的种植历史,已成为我国黄土高原新产业带一个重要的作物组分,但每生产 1g 紫花苜蓿干物质约需 800g 水分<sup>[1]</sup>,引进、开发其他需水较少且具有生态、经济、社会效益的豆科牧草,丰富物种仍然是面临的任务之一。

甘肃红豆草(*Onobrychis viciaefolia* cv. ‘Gansu’)和沙打旺(*Astragalus adsurgens*)均为优良豆科牧草<sup>[2~5]</sup>,20 世纪 80 年代,曾在干旱、半干旱区广泛种植,关于它们水分状况、需水或耗水规律、产量、栽培技术及其与水肥的关系有过一些报道<sup>[6~18]</sup>。近年来,东方山羊豆(*Galega orientalis*)在加拿大、前苏联、芬兰等国成为有生产优势的豆科牧草之一<sup>[19~23]</sup>,我国也开始引进试种<sup>[24~29]</sup>,多年生香豌豆(*Lathyrus latifolius*)近年引入我国黄土高原<sup>[30]</sup>,但是有关上述 4 个种在大田条件下净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率的日动态、这些变化所代表的水分利用效率及其在干旱半干旱地区草地农业生态系统中的作用尚未见报道。本文通过研究 4 种豆科牧草在黄土高原生境下的生理生态特性以及对环境的适应性,结果可为开发利用豆科牧草,建立适宜的草田轮作系统提供科学依据,这对于在黄土高原积极开展生态治理和恢复,建立可持续草地农业系统,具有重要的指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地自然概况

研究在兰州大学草地农业科技学院(甘肃省草原生态研究所)庆阳黄土高原试验站进行,地处甘肃省庆阳市西峰区什社乡( $107^{\circ}51'E, 35^{\circ}39'N$ ),海拔 1298 m。冬春寒冷干燥,春季多风,夏季炎热。平均温度为  $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ ,极端最高温度为  $39.6^{\circ}\text{C}$ ,极端最低温度  $-21.3^{\circ}\text{C}$ 。年降雨量在  $480\sim 660 \text{ mm}$  之间,年蒸发量为  $1100\sim 1500 \text{ mm}$ ,年日照时数为  $2300\sim 2700\text{h}$ ,无霜期  $150\sim 190\text{d}$ 。土壤为黑垆土,机械组成中粉粒含量 70%。

### 1.2 试验材料

甘肃红豆草(*Onobrychis viciaefolia* cv. ‘Gansu’)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、东方山羊豆(*Galega orientalis*)和多年生香豌豆(*Lathyrus latifolius*)为供试草种,均于 1998 年春季播种,长势良好,其中,甘肃红豆草来自甘肃通渭,沙打旺为本地种,东方山羊豆来自白俄罗斯,多年生香豌豆来自西峰水保站。

草地建植后常规管理,自第 2 年起 5 月底或 6 月初刈割头茬,除沙打旺不能开花以外,其余 3 个种均为盛花期,每年刈割 2 次。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 土壤贮水量变化的测定** 在草地生长第 4 年,即 2002 年 5 月 24 日(花期)和 7 月 10 日(再生花期)测定上述 4 种豆科牧草地土壤含水量。表层土壤( $0\sim 10 \text{ cm}$ )含水量用烘干法, $10 \text{ cm}$  以下土壤含水量用中子水分测定仪测定(CPN,HP 503),测定层次依次为  $10\sim 30 \text{ cm}$ 、 $30\sim 60 \text{ cm}$ 、 $60\sim 90 \text{ cm}$ 、 $90\sim 120 \text{ cm}$ 、 $120\sim 150 \text{ cm}$  和  $150\sim 200 \text{ cm}$ ,每种牧草重复 4 次。为纠正中子仪测定  $10\sim 20 \text{ cm}$  土壤水分的偏差,为  $10\sim 30 \text{ cm}$  和  $30 \text{ cm}$  以下土层各制备了一根中子仪校正曲线,将中子仪读数转为体积含水量。

某层土壤贮水量( $\text{mm}$ )=某层土壤体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) $\times$ 土层厚度( $\text{mm}$ ),2m 剖面内各层土壤贮水量相加即得出总土壤贮水量。

**1.3.2 净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率日变化进程的测定** 田间测定于 2002 年 5 月 31 日(花期)和 2002 年 7 月 10 日(再生期)两个晴天进行。用美国 CID 公司生产的 CI-301 PSCO<sub>2</sub> 便携式光合作用分析系统测定瞬时光合速率( $P_n$ )与蒸腾速率( $T_r$ ),同时测定气孔导度( $G_s$ ),叶室温度及光合有效辐射( $PAR$ )。从  $7:30\sim 19:30$ ,每间隔 2h 测定 1 次,选取从上向下数第 3 片叶子,重复测定 10 次。由于无法在同一时间同时测定 4 种牧草,所以采取轮流测定的方法,即第 1 次以甘肃红豆草→沙打旺→东方山羊豆→多年生香豌豆的顺序来测定,第 2 次就以相反的顺序来测定,第 3 次的测定顺序又与第 1 次的相同,以此类推,以消除 4 种牧草在测定时间上的误差。水分利用效率  $WUE = P_n/T_r$  ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ ),反映了  $\text{CO}_2$  同化作用和水分消耗的关系。叶面积测定用称重法。

### 1.4 数据分析

光合仪所测数据经 RS232 口转出,所有数据由 Excel 软件整理后,用 Statistica for windows (Release 4.5, Statsoft Inc. 1993)进行统计处理,单因素方差分析比较同一测定项目在不同牧草品种间的差异。

2 结果

2.1 不同豆科牧草利用的土壤水分

2002 年 4、5、6 月降水分别比同月 40a 平均值(1961~2002 年)高 26.1、38.8、64.2 mm,而 7 月份则低 12.4 mm。自 5 月 31 日至 7 月 10 日的累计降水为 162.6 mm。

4 种牧草花期 0~200 cm 土壤贮水量之间相差不大,但表现出分层的差异,土壤贮水量在 0~60 cm 层次随土壤深度的增加而迅速增加,60~150 cm 土层基本稳定,135~200cm 以下又显著增加。沙打旺、多年生香豌豆、山羊豆和红豆草 0~200 cm 土壤贮水量在花期显著比再生期高约 33 %,29 %,21 %和 18 %。从花期到再生期的水分消耗由高到低依次为:沙打旺(119.2 mm),多年生香豌豆(91.6 mm),山羊豆(81.9 mm),红豆草(73.8 mm)(表 1)。

表 1 生长 4a 红豆草、沙打旺、山羊豆、多年生香豌豆于花期和再生期土壤贮水量( mm )  
Table 1 Water storage in 0~150cm, 0~200 cm soil profile for four legume species at flowering and regeneration stage at Qingyang Loess Plateau

| 层次    | 土层厚度  | 红豆草                   |           | 沙打旺                 |           | 山羊豆                  |           | 多年生香豌豆               |           |
|-------|-------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Layer | Depth | <i>O. viciaefolia</i> |           | <i>A. adsurgens</i> |           | <i>G. orientalis</i> |           | <i>L. latifolius</i> |           |
| (cm)  | (cm)  | 2002-5-31             | 2002-7-10 | 2002-5-31           | 2002-7-10 | 2002-5-31            | 2002-7-10 | 2002-5-31            | 2002-7-10 |
| 0~150 | 150   | 346.1                 | 290.3     | 349.1               | 262.0     | 355.2                | 294.5     | 310.1                | 242.2     |
| 0~200 | 200   | 472.9                 | 399.1     | 478.6               | 359.4     | 472.8                | 390.9     | 407.4                | 315.8     |

2.2 净光合速率的日变化进程

红豆草和沙打旺的净光合速率具有明显的日变化,均为单峰曲线,在 11:30 达到峰值,花期红豆草净光合速率在 9:30~13:30 之间有一较宽的峰,之后随着气温和光合有效辐射的降低而逐渐降低。山羊豆和多年生香豌豆的净光合速率则属于“平台型”,其午间日变化较为平稳。红豆草和沙打旺的日均净光合速率显著高于山羊豆和多年生香豌豆。花期和再生期日均净光合速率表现为一致的规律,即红豆草>沙打旺>山羊豆>多年生香豌豆( $P<0.05$ )。花期红豆草和沙打旺的日均净光合速率显著高于再生期( $P<0.05$ ),而山羊豆和多年生香豌豆在 5 月 31 日的日均净光合速率与 7 月 10 日相比,二者之间无差异。5 月 31 日测定的山羊豆净光合速率在 11:30 有一“午休”低谷,而 7 月 10 日则无此现象(图 1 a,b)。

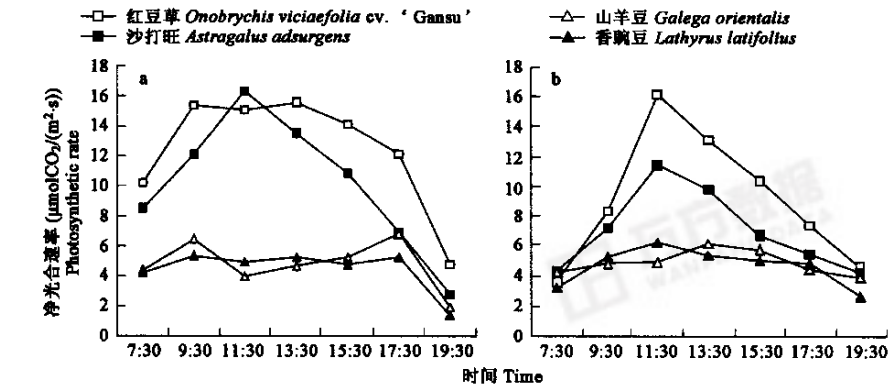


图 1 4 种豆科牧草在 2002 年 5 月 31 日(a)和 2002 年 7 月 10 日(b)的净光合速率日变化进程  
Fig. 1 The daily changes of photosynthetic rate of four legume species in May 31,2002 (a) and July 10,2002 (b) at the Qingyang Loess Plateau

2.3 蒸腾速率的日变化进程

4 种豆科牧草蒸腾速率日变化基本呈现为午间高峰的单峰曲线(图 2),红豆草和沙打旺单位叶面积的蒸腾速率显著高于山羊豆和多年生香豌豆,沙打旺和多年生香豌豆的花期日均蒸腾速率高于再生期,而红豆草和山羊豆则表现出相反的趋势。总体上花期山羊豆和多年生香豌豆的蒸腾速率曲线较再生草的更为平直,起伏变化不大。花期日平均蒸腾速率从大到小依次为红豆草>沙打旺>多年生香豌豆>山羊豆(图 2a),而再生草的顺序为:红豆草>沙打旺>山羊豆>多年生香豌豆(图 2b)。

2.4 水分利用效率的日变化进程

4 种豆科牧草的水分利用效率在 7:30 表现为一天中最高,随着光合有效辐射和叶温的增加而迅速降低,9:30 以后基本稳

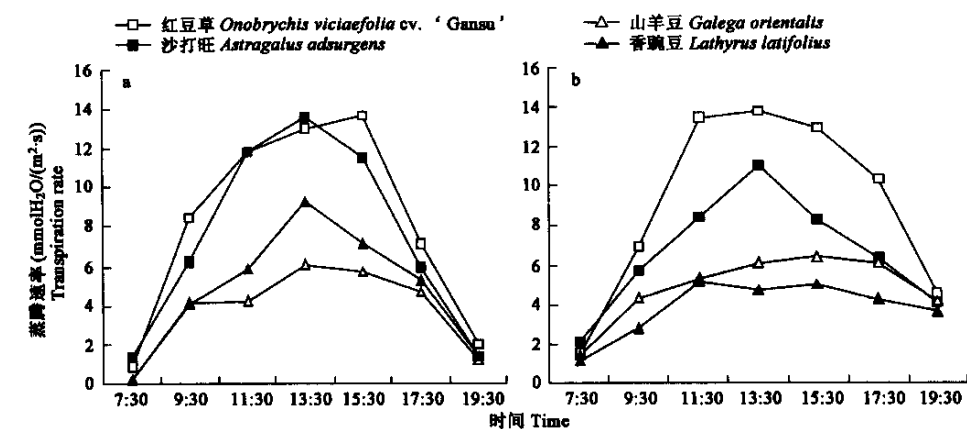


图 2 4 种豆科牧草在 2002 年 5 月 31 日(a)和 2002 年 7 月 10 日(b)的蒸腾速率日变化进程

Fig. 2 The daily changes of transpiration rate of four legume species in May 31,2002 (a) and July 10,2002 (b) at Qingyang Loess Plateau

定。山羊豆、多年生香豌豆、红豆草和沙打旺在花期的日均水分利用效率分别为 3.96、3.63、2.98 和 2.06  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ ，再生期分别为 1.21、1.42、1.16 和 1.18  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ ，比花期分别低 227 %、156 %、157 %、75 %。山羊豆和多年生香豌豆的日均水分利用效率显著高于红豆草和沙打旺( $P<0.05$ ) (图 3 a,b)。

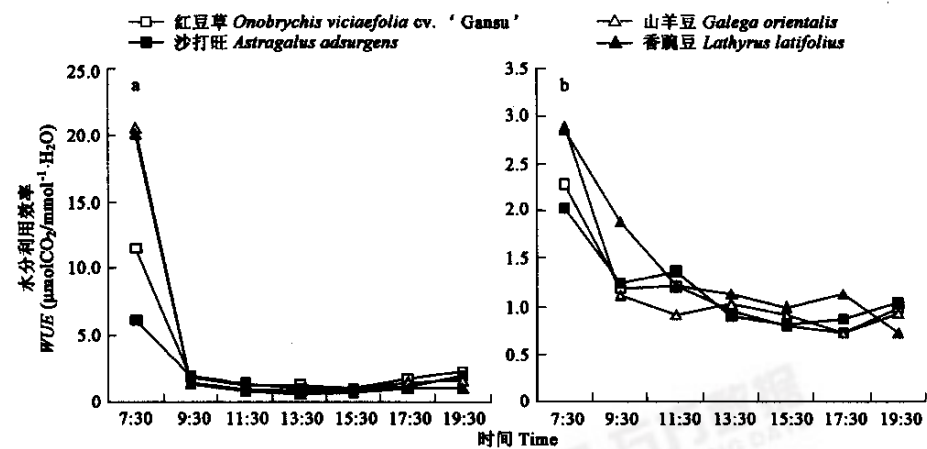


图 3 4 种豆科牧草在 2002 年 5 月 31 日(a)和 2002 年 7 月 10 日(b)的水分利用效率日变化进程

Fig. 3 The daily changes of water use efficiency in leaves of four legume species in May 31,2002 (a) and July 10,2002 (b) at the Qingyang Loess Plateau

2.5 气孔导度的日变化进程

4 种牧草气孔导度在 9:30 以前都呈现迅速上升的趋势,9:30 达到峰值后,迅速下降到一定程度保持较为平稳的波动(图 4 a)。红豆草和沙打旺花期的日均气孔导度高于山羊豆和多年生香豌豆,刈割前沙打旺的气孔导度无明显峰值,7:30~13:30 一直保持较高的气孔导度,之后虽然逐渐下降,但 15:30 以后变化不大(图 4 a)。7 月 10 日的日均气孔导度明显高于 5 月 31 日,平均高出约 27 % (图 4 b)。

2.6 4 种豆科牧草光合有效辐射和叶温的日变化进程

在晴朗无云的情况下,花期和再生期的光合有效辐射从早晨开始呈线性增加(图 5 a,b),都在 13:30 达到峰值,分别为 1788.05  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、1457.19  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,随后逐渐降低。5 月 31 日的日均光合有效辐射比 7 月 10 日高出约 7 %。

叶片温度随有效光辐射的增加而增加,5 月 31 日在 15:30 达到峰值,而 7 月 10 日在 13:30 达到峰值,之后一直到 17:30 叶温都较稳定,随后迅速下降。从整体上看,这 4 种牧草在 7 月 10 日的叶温曲线较 5 月 31 日的变化更为平缓,日平均叶温也更高,山羊豆、多年生香豌豆、红豆草和沙打旺大约分别高出 15 %、15 %、8 % 和 4 % (图 6 a,b)。

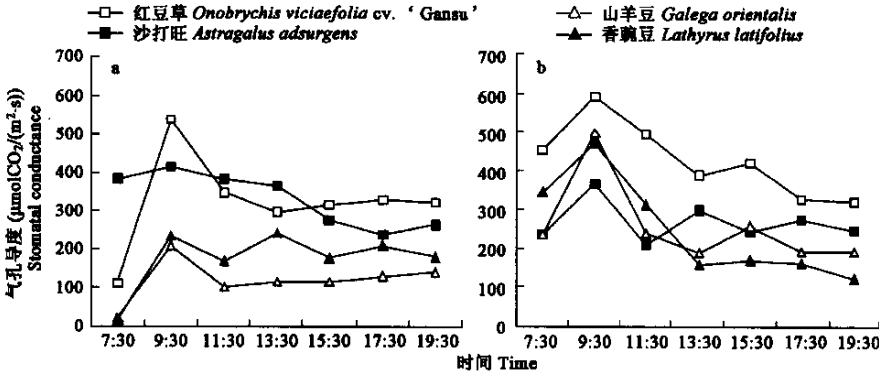


图 4 4 种豆科牧草在 2002 年 5 月 31 日(a)和 2002 年 7 月 10 日(b)的气孔导度日变化进程

Fig. 4 The daily changes of stomatal conductance in leaves of four legume species in May 31, 2002 (a) and July 10, 2002 (b) at the Qingyang Loess Plateau

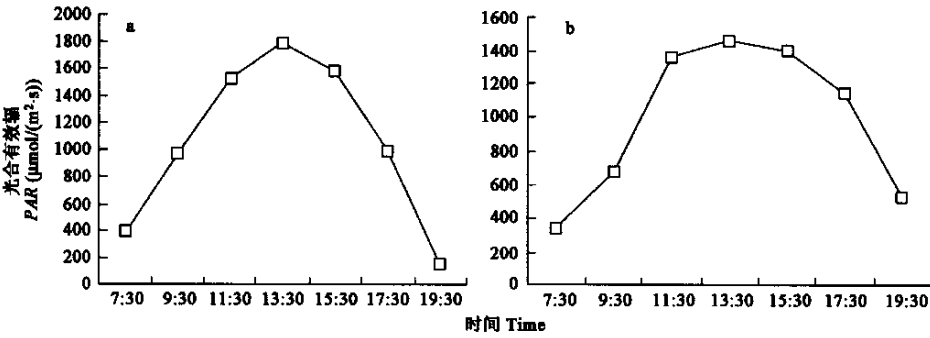


图 5 2002 年 5 月 31 日(a)和 2002 年 7 月 10 日(b)的光合有效辐射日变化进程

Fig. 5 The daily changes of PAR in May 31, 2002 (a) and July 10, 2002 (b) at Qingyang Loess Plateau

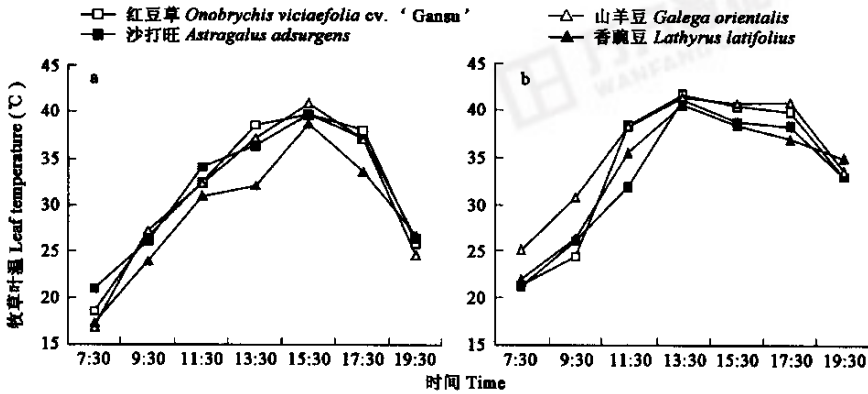


图 6 4 种豆科牧草在 2002 年 5 月 31 日(a)和 2002 年 7 月 10 日(b)的叶温日变化进程

Fig. 6 The daily changes of leaf temperature of four legume species in May 31, 2002 (a) and July 10, 2002 (b) at Qingyang Loess Plateau

3 讨论

(1) 生长 4a 的山羊豆、多年生香豌豆、红豆草和沙打旺表层土壤贮水量都较低,说明在黄土高原半干旱地区潜在蒸发能力较强。花期土壤 200cm 剖面贮水量显著高于再生期,这与 2001 年秋季和 2002 年春季降水较高有关,同时表明它们在花期生长旺盛,根系能在吸收水分的同时将土壤深层贮藏的水分提升上来。而 7 月 10 日再生期的牧草一方面还处于幼苗阶段,不能有效



的吸收利用深层贮水,另一方面,植物生长的再生机制决定了再生牧草本身的吸水能力就较差。文献表明,在干旱半干旱区,土壤 100 cm 层以上的贮水量对植物水分利用影响较大<sup>[31]</sup>,像红豆草、沙打旺、多年生香豌豆这样的深根性植物,能够有效吸收 100 cm 以下的土壤水分。山羊豆的根系浅,只有 0.6~1 m 左右<sup>[23]</sup>,从表 1 可以看出,无论在花期还是再生期,0~150 cm 山羊豆土壤贮水量高于其他 3 种牧草生长的土壤,反映出同样的降水条件下,山羊豆对土壤水分的消耗低于其他 3 种牧草。另外,5 月 31 日沙打旺草地 0~200 cm 土壤贮水量比其他 3 个种的都高(478.6 mm),说明在此之前沙打旺的耗水量不多于其它几种豆科牧草,而从 5 月 31 日到 7 月 10 日沙打旺耗水量最高(119.2 mm),一方面可能是由于蒸腾高,另一方面,可能是沙打旺刈割前不开花,消耗能量较低,耗水也较少。刈割后进入再生期,使得再生期的能量消耗较高,耗水也较高。

(2)红豆草和沙打旺的净光合速率呈典型的单峰型,早晨光强和气温低,净光合速率也很低<sup>[32]</sup>,由于光合有效辐射在午间的持续增强,气温和光照强度上升,气孔开放,净光合速率增高,在 11:30 达到峰值,说明这两种牧草对高光合有效辐射及高温有较强的忍受能力,这也受益于它们具有的深根系,可充分吸收土壤深层水分来满足生长需要。有资料表明,沙打旺对水分十分敏感,需水量较多,水分供应对其植株生长和产量影响很大,当土壤湿度由 57 % 上升到 80 % 时,产草量增加一倍<sup>[12]</sup>。也有资料表明,红豆草虽然耐旱,但对水分反应仍比较敏感,灌溉对其越冬率和翌年头茬产草量有显著的效果<sup>[1]</sup>。本研究中,沙打旺和红豆草花期 0~200 cm 土壤贮水量高于再生期,分别高约 33 % 和 18 %,这两个种的叶片花期的日均净光合速率比再生期分别高 44 % 和 37 %。山羊豆和多年生香豌豆的净光合速率日变化表现为“平台型”,说明它们对午间的光合有效辐射和叶温的变化不敏感,全天光合产量较稳定,花期和再生期的日均净光合速率差异不大,这可能是山羊豆和多年生香豌豆的再生性能比红豆草和沙打旺好的原因之一。孙庆亮曾报道沙打旺再生能力较差<sup>[5]</sup>。无论花期还是再生期,红豆草和沙打旺的日均气孔导度都高于山羊豆和多年生香豌豆,这是红豆草和沙打旺的净光合速率及蒸腾速率显著高于山羊豆和多年生香豌豆的主要原因。

花期山羊豆净光合速率在 11:30 有一“午休”低谷,而再生期则无此现象,这与山羊豆喜欢生长在阴凉地区的特性有关,山羊豆蒸腾低,而且花期的土壤贮水量又较高,所以由于蒸腾强烈水分供应不足,缺水导致叶片局部水分胁迫而引起其光合“午休”的可能性较小。花期日均光合有效辐射比再生期高出约 7 %,PAR 和温度二者皆高可能是引起山羊豆光合“午休”现象的最主要原因。

(3)Aniszewski 等报道,东方山羊豆的最佳 NPP(净初级生产力)出现在最低 PAR 为 726  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,夜间最高温度为 15  $^{\circ}\text{C}$  的条件下,其性喜白天温度温和,夜间温度较低的地区<sup>[33]</sup>,在年降水为 454 mm 的加拿大萨斯卡通,其干物质产量仅为 2 t/hm<sup>2</sup><sup>[20]</sup>,在本研究的气候条件下,东方山羊豆干物质产量高达 7 t/hm<sup>2</sup>,据此,东方山羊豆在黄土高原仍然有相当的生产潜力。

(4)有研究表明,皇甫川流域人工植被沙打旺蒸腾速率日变化呈单峰型,一般全天最大值出现在 10:00~14:00<sup>[13]</sup>,本研究中沙打旺蒸腾速率日变化曲线也呈单峰型,最大值出现在 13:30,与上述研究结果一致。另外,红豆草的蒸腾速率日变化呈单峰型也与海棠等的报道一致<sup>[6]</sup>。同一时期各牧草间以及不同时期同一种牧草间蒸腾速率的日变化差异是由牧草不同的生理特点、气孔构造特点及其自身生长节律决定的。

(5)植物的水分利用效率大小取决于  $\text{CO}_2$  净同化效率与蒸腾效率,受植物根、茎、叶组织生物结构特征的影响,也与光强、大气温度、叶温、湿度、气压、气孔导度以及土壤水分等环境因子密切相关<sup>[34]</sup>,山羊豆、多年生香豌豆、红豆草和沙打旺的水分利用效率在测定当天的日变化曲线基本上呈“L”型。Fitter 等认为干旱可促进水分利用效率<sup>[35]</sup>,但本研究的结果与 Fitter 的结果相反,4 种牧草的日均水分利用效率在土壤贮水量较高的花期显著高于土壤贮水量较低的再生期,表明这 4 种牧草对不同环境有弹性适应,在花期以较低的水分消耗换取生物量,在再生期以较高的水分消耗来维持生命。另外,红豆草和沙打旺属于高光合、高蒸腾的牧草,而山羊豆和多年生香豌豆属于低光合、低蒸腾的牧草,以公式  $WUE = P_n / Tr$  ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ ) 计算得到的红豆草和沙打旺的水分利用效率低于山羊豆和多年生香豌豆,由于开始测定时,PAR 已经超出光补偿点 10 倍左右,结束测定时 PAR 也高出光补偿点 4~10 倍左右,净光合速率和蒸腾速率已经很大了,因此根据二者比值计算的日均水分利用效率与实际情况有所偏差,这可能从另一个角度说明,在大田中以产量与蒸腾、蒸散之比计算植物水分利用效率更为真实可信。

3.6 气孔导度是指植物气孔传导  $\text{CO}_2$  和水汽的能力<sup>[36]</sup>。植物通过改变气孔的开度等方式来控制与外界的  $\text{CO}_2$  和水汽交换,从而调节光合速率和蒸腾速率,以适应不同的环境条件,特别是土壤供水状况和空气湿润程度<sup>[37]</sup>。因为气孔导度下降或关闭直接减少水分蒸腾,几乎所有的中生和旱生植物都可以通过关闭气孔来适应午间叶片过度蒸腾失水或低水势的土壤环境<sup>[34]</sup>。有关于气孔导度变化规律的报道很多,但都不尽相同,王玉辉等认为早晨和傍晚光合有效辐射低导致羊草(*Leymus chinense*)气孔导度在早晨和傍晚较低<sup>[38]</sup>。温达志等也发现墨西哥玉米(*Zea mays* subsp. *mexican*)、杂交狼尾草(*Pennisetum glaucum*  $\times$  *P. purpureum*)和皇草(*Pennisetum purpureum*  $\times$  *P. glaucum*)的气孔导度随光强和气温的增加而增加,正午前后保持一天中的最高值<sup>[34]</sup>,而黄振英等发现生长在毛乌素沙地的沙柳,其气孔导度并没有随光照强度的增加而增加,特别是在早晨和傍晚甚至出现了相反的关系,此时土壤水分亏缺可能是限制气孔导度变化的最主要的环境因子<sup>[39]</sup>。本研究中山羊豆、多年生香豌豆、红豆草和沙打旺的气孔导度日变化与上述结果都不相同,它们气孔导度的日变化总体趋势较平稳,说明气孔导度对环境因子的变化

十分敏感,凡是影响植物光合作用和叶片水分状况的各种因素都有可能对气孔导度造成影响<sup>[38,40]</sup>。

#### 4 结论

水土流失严重,降水分布不均,且变率大,是黄土高原的自然特征,实施草田轮作可以有效地利用光、热、水资源,改变单一农作物为主的生产格局,提高系统的有机性。因此,豆科牧草的开发利用一直是草地农业系统研究中广受关注的问题,传统栽培牧草红豆草和沙打旺虽有较高的产量,但属于高光合、高蒸腾的类型,需水也相对较多,而山羊豆和多年生香豌豆则属于低光合、低蒸腾的类型,作为新引进的牧草它们在黄土高原表现出较高的水分利用效率及较低的水分消耗,有一定的生产潜力,具有大面积推广的价值和一定的发展前景。

#### References:

- [1] Wand D, Ren J Z. *Forage species*(New edition). Jiangsu:Jiangdu Scientific and Technology Press,1989. 165~166, 242~242.
- [2] Sun S Z. Quality forage-Sainfoin. *Fodder Vision*, 1995, **26**(1): 26~26.
- [3] Sun Q L. The queen of forage-Sainfoin. *Beijing Agriculture*, 2002, (4) : 30~31.
- [4] Gao N. A special forage species-milkvetch. *Henan Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2002, (23) : 1.
- [5] Sun Q L. An Introduction of milk vetch. *Beijing Agriculture*, 2001, (1) : 30~30.
- [6] Hai T, Wang C F, Wu Y F, *et al.* Study on moisture physiology of meng nong *Onobrychis viciaefolia*. *Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture & Animal Husbandry*, 1997, **18**(2) : 38~41.
- [7] Wei X H, Miao Y J, Li P W, *et al.*. A study on adaptability of *Onobrychis viciaefolia* Scop. cv. "Gansu" in Linzhi prefecture, Tibet, China. *Pratacultural Science*, 2001, **18**(4) : 27~29.
- [8] Han D L. Result on produce properties of primary compare with sainfoin and alfalfa in Tongren area. *Qinghai Prataculture*, 2001, **10**(2) : 14~16.
- [9] Wu G Z. Yield dynamics, cultivation, management and utilization of the alfalfa (*Medicago sativa*) and sainfoin (*Onobrychis sativa*) in different seeding ways in forage grain crop rotation. *Grassland of China*, 1997, (5) : 33~38.
- [10] Ma J X, Zhou Z J, Li X G. Technique for planting, *Fodder Vision*, 2001, (9) : 33~34.
- [11] Chen B S. Sainfoin (*Onobrychis viciaefolia*) . Lanzhou:Gansu Scientific and Technology Press, 1992.
- [12] Wei G X, Feng G C, Song X H, *et al.* Study on water required rule of artificial forage *Astragalus adsurgens* in semi- arid wind-sand area. *Pratacultural Science*, 1994, **11**(5):46~51.
- [13] Cao Y, Yang J, Li G Q. A study on the water regime of artificial vegetation *Astragalus adsurgens* Pall. cv. in Huangfuchuan watershed. *Acta Scienliarum Naturalium Universalis Nei Mongol*, 2002, **33**(4) :439~442.
- [14] Zhang J P. Studies on the transpiration of *Astragalus adsurgens*. *Inner Mongolia Forestry Science & Technology*, 1997, (1) :1~6.
- [15] Lu M J, Du F C, Yang Z A, *et al.* Growing conditions and productivity of annual erect milk vetch planted on wasted land of loess hilly areas in cool temperate semi-arid region. *Grassland of China*, 1994,(4):21~24, 28.
- [16] Mu X M, Chen G L, Jia H Y. The relationships of the morphological characters with *Astragalus adsurgens* between its forage yield and soil moisture and fertilizer. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1995, **15**(1) : 23~28.
- [17] Zeng X J, Cai D Z, Tao Y S. The effect of water and fertility of sandy soil by planting of *Astragalus adsurgens*. *Journal of China Agricultural University*, 1997, **2**(3) : 59~67.
- [18] Jia H Y, Mu X M, Yong S P. Effect of Moisture and fertilizer coordination upon *Astragalus adsurgens* for N, P, K absorption. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1996, **14**(4) : 17~21.
- [19] Carreck N L, Mand M, Williams I H. Goat's rue. *Bee World*, 2001, **82**(3): 142~146.
- [20] Fairey N A, Coulman B E, Fairey D T, *et al.* Cross-Canada comparison of the productivity of fodder galega (*Galega orientalis* Lam.) with traditional herbage legumes. *Canadian Journal of Plant Science*, 2000, **80**(4): 793~800.
- [21] Dorofejuk M T, Dorofejuk V F, Addrusewitsch V T. Cultivation of eastern goat's rue (*Galega orientalis* Lam.) as a perennial fodder plant on turf-podzol soils in the republic of Belarus. *M Archives of Agronomy and Soil Science*, 1999, **44**(2) : 131~148.
- [22] Moller E, Hostrup S B, Boelt B. Yield and quality of fodder galega (*Galega orientalis* Lam.) at different harvest managements compared with lucerne (*Medicago sativa* L. ). *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil & Plant Science*, 1997, **47**(2) : 89~97.
- [23] Arapetyan E, Martyniak L, Gorb L, *et al.* *Galega orientalis* Lam. as fodder . Proc. Plant.in;Scannerini S, *et al* Ed. *Biotechnology as a tool for the exploitation of mountain lands*, 1998. *Acta Hort.* : 21~25.
- [24] Zhang Z H. *Galega orientalis* growth on black soil in Middle Russia. *Grassland and Turf*, 1996, (2): 7~11.
- [25] Nomm H, Zeng Y J, translateds. Forage galega. *Grassland and Turf*, 1998, (1): 40~42.
- [26] Ning B, Chen F L. A potential forage species——*Galega orientalis*. *Inner Mongolia Prataculture*, 2000, (3): 64~64.
- [27] Liu F T, Yang Z Z, Zhang Q B, *et al.* Legume forage——*Galega orientalis*. *Herbivores*, 2000, (2): 42~42.
- [28] Zhang Q B, Yang Z Z, Jia N T, *et al.* Preliminary introduction study on *Galega orientalis* L. *Grassland of China*, 2001, **23**(4) : 17~20.
- [29] Zhang Z H. Biological characteristics and planting technology of Goat's-rue. *Grassland and Turf*, 2002, (1) : 19~21.
- [30] Hu J Z, Yan X L, Lei Q X, *et al.* Introduction & cultivation test of perennial pea in the Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2002, **19**(3):17~23.
- [31] Guo K, Dong X J, Liu Z M. Characteristic of soil moisture content on sands in MUUS sandy grassland why *Artemisia ordosica* declines on old fixed sand dunes. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24** (3) : 275~279.

[32] Den X, Li X M, Zhang X M, *et al.* The studies about the photosynthetic response of the four desert plants *Acta Ecologica Sinica*,2003, **23**(3): 598~605.

[33] Aniszewski T D, rozdov S N, Kholoptseva E S, *et al.* Effects of light and temperature on net primary productivity of fodder galega (*Galega orientalis* Lam. ). *Acta Agriculture Scandinavica*, Section B, *Soil and Plant Science* ( Denmark ), 1998, **48**(1) : 34~40.

[34] Wen D Z, Zhou G Y, Zhang D Q, *et al.* A comparison on transpiration rate and water use efficiency in leaves of four forage grasses. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2000, supplementary Ⅲ :67~76.

[35] Fitter A H, Hay R K M. *Environmental physiology of plants*. London: Academic Press, 1981.

[36] Coombs J (eds), Qiu G W translated. *Techniques for measuring photo productivity and photosynthesis rate*. Science Press, 1986. 63~96.

[37] Yan X F, Sun G R, Li J L, *et al.* A comparative study on photosynthesis and transpiration diurnal variation of *Aneurolepidium chinense* and *Puccinellia tenuiflora*. *Bulletin of Botanical Research*, 1994, **14**(3): 287~291.

[38] Wang Y H, Zhou G S. Analysis on ecophysiological characteristics of leaf photosynthesis of *Aneurolepidium* Chinese in Songnen grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(3): 12~19.

[39] Huang Z Y, Dong X J, Jiang G M, *et al.* Primary studies on the daily dynamic changes of photosynthesis and transpiration of *Salix psammophila*. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* , 2002, **22**(4) : 817~823.

[40] Sharkey T D. Estimation the rate of photorespiration in leaves. *Physiol. plant*, 1988, **73**:147~152.

参考文献:

[ 1 ] 王栋原著. 任继周,等修订. 牧草学各论. 江苏:江苏科学技术出版社,1989. 165~166, 242~242.

[ 2 ] 孙守琢. 优质牧草——红豆草的优良特性. 饲料博览, 1995, **26** (1) : 26~26.

[ 3 ] 孙庆亮. 牧草皇后红豆草. 北京农业, 2002, (4): 30~31.

[ 4 ] 高农. 国产特有草种——沙打旺. 饲草饲料, 2002, (23) : 1~1.

[ 5 ] 孙庆亮. 优良牧草品种介绍沙打旺. 北京农业, 2001, (1) : 30~30.

[ 6 ] 海棠, 王翠芬, 乌云飞, 等. 蒙农红豆草水分生理的研究. 内蒙古农牧学院学报, 1997, **18**(2) : 38~41.

[ 7 ] 魏学红, 苗彦军, 李朋伟, 等. 甘肃红豆草在西藏林芝地区的适应性研究. 草业科学, 2001, **18**(4) : 27~29.

[ 8 ] 韩德林. 红豆草和紫花苜蓿在同仁县生产性状的初步比较结果. 青海草业, 2001, **10**(2): 14~16.

[ 9 ] 吴国芝. 草田轮作中苜蓿、红豆草不同播种方式的产草量动态及栽培管理与利用. 中国草地, 1997, (5) : 33~38.

[10] 马景新, 周振江, 李新贵. 红豆草引种栽培技术. 饲料博览, 2001, (9) : 33~34.

[11] 陈宝书. 红豆草. 兰州:甘肃科学技术出版社, 1992.

[12] 魏广祥, 冯草尘, 宋晓华, 等. 半干旱风沙区人工牧草沙打旺需水规律的研究. 草业科学, 1994, **11**(5) : 46~51.

[13] 曹云, 杨颜, 李国强. 皇甫川流域人工植被沙打旺水分状况研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2002, **33**(4): 439~442.

[14] 张季平. 沙打旺蒸散量研究. 内蒙古林业科技, 1997, (1) : 1~6.

[15] 芦满济, 杜福成, 杨志爱, 等. 冷温半干旱黄土丘陵区荒坡沙打旺的种植条件和生产力研究. 中国草地, 1994, (4): 21~24, 28.

[16] 穆兴民, 陈国良, 贾恒义. 沙打旺形态指数与产草量及水肥关系研究. 水土保持通报, 1995, **15**(1) : 23~28.

[17] 曾宪亮, 蔡朵珍, 陶益寿. 栽培沙打旺对沙荒地水分状况影响的研究. 中国农业大学学报, 1997, **2**(3) : 59~67.

[18] 贾恒义, 穆兴民, 雍绍萍. 水肥协同效应对沙打旺吸收氮磷钾的影响. 干旱地区农业研究, 1996, **14**(4) : 17~21.

[24] 张自和, 译. 俄罗斯中部黑土带的东方山羊豆. 国外畜牧学:草原与草坪, 1996, (2) : 7~11.

[25] Nomm H, 曾彦军, 译. 饲用山羊豆. 国外畜牧学:草原与草坪, 1998, (1) : 40~42.

[26] 宁布, 陈凤林. 有希望的草种——东方山羊豆. 内蒙古草业, 2000, (3) : 64~64.

[27] 刘法涛, 杨志忠, 张清斌, 等. 优良豆科牧草——东方山羊豆. 草食家畜, 2000, (2) : 42~42.

[28] 张清斌, 杨志忠, 贾纳提, 等. 东方山羊豆引种研究初报. 中国草地, 2001, **23**(4) : 17~20.

[29] 张自和. 东方山羊豆的生物学特性与栽培技术. 草原与草坪, 2002, (1) : 19~21.

[30] 胡建忠, 闫晓玲, 雷启祥, 等. 多年生香豌豆在黄土高原地区的引种栽培试验. 草业科学, 2002, **19**(3) : 17~23.

[31] 郭柯, 董学军, 刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点——兼论老固定沙地上油蒿衰退原因. 植物生态学报, 2000, **24**(3) : 275~279.

[32] 邓雄, 李小明, 张希明, 等. 四种荒漠植物的光合响应. 生态学报, 2003, **23**(3): 598~605.

[34] 温达志, 周国逸, 张德强, 等. 四种禾本科牧草植物蒸腾速率与水分利用效率的比较. 热带亚热带植物学报, 2000, 增刊 Ⅲ :67~76.

[36] Coombs J, 等主编. 邱国维, 等译. 生物生产力和光合作用测定技术. 北京:科学出版社, 1986. 63~96.

[37] 阎秀峰, 孙国荣, 李敬兰, 等. 羊草和星星草光合蒸腾日变化的比较研究. 植物研究, 1994, **14**(3): 287~291.

[38] 王玉辉, 周广胜. 松嫩平原盐碱化草地羊草叶片生理生态特性分析. 应用生态学报, 2000, **11**(3): 12~19.

[39] 黄振英, 董学军, 蒋高明, 等. 沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究. 西北植物学报, 2002, **22**(4) : 817~823.