

苏打盐碱胁迫下羊草光合速率日变化及其与影响因子的关系

黄立华^{1,2}, 梁正伟^{1,2}, 马红媛^{1,2}

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2.中国大安碱地生态试验站, 吉林 大安 131317)

摘 要: 采用 Li-6400 型光合作用测定系统对苏打盐碱化草地羊草光合速率和蒸腾速率的日变化进行测定, 并对影响羊草光合和蒸腾速率的诸因子间相互关系进行了分析。结果表明, 羊草光合速率和蒸腾速率日变化均呈“双峰”曲线, 在苏打盐碱胁迫下, “双峰”出现时间提前。羊草光合速率日变化与蒸腾速率日变化间呈极显著正相关($r=0.932\ 3, P<0.01$), 水分利用效率在 1 d 中基本保持不变。影响羊草光合作用和蒸腾作用的诸因子间都具有显著的相关性, 但水分利用效率与气温、叶温的相关性不显著。羊草具有较高的水分利用效率, 并且受温度的影响较小, 这是羊草适应松嫩平原干旱气候和土壤苏打盐碱化胁迫的重要生理机制。

关键词: 羊草; 苏打盐碱胁迫; 光合速率; 蒸腾速率; 水分利用效率

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)08-1645-06

Relationship Between Diurnal Changes of Photosynthetic Rate and Affecting Factors of *Leymus chinensis* Under Saline Sodic Stress

HUANG Li-hua^{1,2}, LIANG Zheng-wei^{1,2}, MA Hong-yuan^{1,2}

(1.Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China; 2.Da'an Sodic Land Experiment Station, Da'an 131317, China)

Abstract: Diurnal changes of photosynthetic rate and transpiration rate of *Leymus chinensis* were investigated by Li-6400 in saline sodic grassland, and relationship among the factors affected Pn and Tr was analysed. The results showed that change of photosynthetic rate and transpiration rate all was a double-peak curve in a day under saline-sodic stress, and the time appeared double peak was headed. The relationship between diurnal change of photosynthetic rate and transpiration rate of *Leymus chinensis* indicated highly significantly positive correlation ($r=0.932\ 3, P<0.01$), and water use efficiency of *Leymus chinensis* was basically unchanged in a day. There were a significantly correlation among the factors affected Pn and Tr, but the relationship between WUE and temperature was not significantly. High WUE was an important physic-ecological mechanism of *Leymus chinensis* adapting to conditions of arid climate and saline-sodic soils.

Keywords: *Leymus chinensis*; saline-sodic stress; photosynthetic rate; transpiration rate; WUE

羊草(*Leymus chinensis*)是一种耐碱性较强的优质牧草,在土壤 pH8.5~11.5 的条件下能够生长^[1],土壤 pH8.5 左右为羊草生长的最适范围^[2-3]。盐碱胁迫是植物生长最主要的非生物胁迫之一,对大多数植物的

生长以及产量的形成都具有重大影响^[4-5]。此前,笔者等^[2-3,6-7]系统地研究了苏打盐碱胁迫对羊草生物学及生理特征的影响,发现羊草虽然是松嫩草甸草原的优势建群植物,但过高的盐碱胁迫同样会对其生长发育产生较大的抑制作用。从光合生理生态角度探讨羊草对苏打盐碱胁迫的响应,对于深入揭示羊草耐盐碱机理具有重要意义。

光合作用是绿色植物生长发育和产量形成的基础,提高植物叶片光合效率是增加植物生物产量的重要途径^[8-9]。关于羊草的光合生理生化过程,杜占池^[10]、祖元刚^[11]等均有报道指出,羊草光合速率的日变化为

收稿日期:2008-12-21

基金项目: 国家科技部 973 项目(2007CB106800); 国家科技支撑重大项目(2006BAC01A08); 中科院知识创新工程前沿领域项目(KZCX3-SW-NA3-05); 中科院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-13)

作者简介: 黄立华(1974—),男,吉林梨树人,博士,助研,主要从事植物营养与土壤生态研究。E-mail: huanglihua@neigae.ac.cn

通讯作者: 梁正伟 E-mail: liangzw@neigae.ac.cn

双峰型曲线。各种环境胁迫因子如土壤水分、 CO_2 浓度等对羊草的光合速率均具有一定的影响^[12-14],可见,羊草的光合作用很大程度上受环境条件的制约。目前,有关苏打盐碱胁迫对羊草光合作用的影响少有报道。因此,本研究针对松嫩平原西部盐碱地移栽羊草的光合速率和蒸腾速率的日变化进行了监测,并对光合作用诸影响因子以及水分利用效率等进行了分析,以期从光合生理生态角度阐明羊草对苏打盐碱胁迫的适应机制。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验在中国大安碱地生态试验站(吉林省大安市, $45^{\circ}35'58''\text{N}$ ~ $45^{\circ}36'28''\text{N}$, $123^{\circ}50'27''\text{E}$ ~ $123^{\circ}51'31''\text{E}$)站区内进行,土壤 pH9.0~9.5,属中度盐碱土,供试羊草为移栽羊草第二年返青苗。

1.2 试验方法及测试指标

试验羊草于 2005 年 7 月在温室内采用风沙土育苗,9 月末移栽到室外中度盐碱地上,人工定期浇水 2~3 遍,保证其成活。2006 年春季返青时浇水 1~2 次,返青后自然生长。光合作用的测定于 2006 年 7 月初选择晴朗的天气进行,采用 Li-6400 型便携式光合作用测定系统(美国产),从 7:00 至 18:00 间选择整点测定,测定羊草叶片为顶端第 2 片展开叶,随机选取 5 株作为重复。测定指标包括叶片光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)以及叶片蒸汽压亏缺(V_{pdL})。羊草水分利用效率(WUE)以各叶片光合速率与蒸腾速率的比值即 P_n/T_r 表示,式中 P_n 和 T_r 分别为同一叶片的净光合速率和蒸腾速率的测定值。羊草气孔限制值(L_s)计算公式为 $L_s=1-C_i/C_a$, 式中 C_i 为胞间 CO_2 浓度, C_a 为空气 CO_2 浓度。

1.3 数据处理与分析

全部试验数据采用 Microsoft Excel 软件进行整理和统计分析,采用 DPS 统计软件中 Duncan 新复极差法进行显著性分析,最后用 Microsoft Excel 软件进行相关分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 羊草光合速率的日变化

羊草光合速率测定当日的温度和光照条件如图 1 所示。当日天气晴朗,平均气温为 29.9°C ,羊草叶片平均温度为 32.2°C ,平均日光强度为 $1\,670.1\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,最高光强出现在 12:00 时,为 $2\,065\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,温光条件良好,有利于羊草光合速率的测定。在上述条件下,测得中度盐碱化土壤上羊草光合速率日变化呈双峰曲线(图 2)。从 7:00 测定开始,羊草的光合速率一直呈下降的趋势,至 9:00 到达峰谷,当时的光强为 $2\,000\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,可能由于突然的高光强引起羊草光合速率暂时性降低。尔后随着光强不断升高,羊草叶片的光合速率也逐渐升高。至中午 12:00,当日光强达到最大值,羊草的光合速率也达到最大峰值,为 $20.3\,\mu\text{mol}\,\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此后,随着日光强度的逐渐减小,羊草叶片光合速率呈缓慢下降。在 14:00 以后,随着光强的迅速下降,羊草光合速率呈快速下降,至 18:00 左右,光强仅为 $275\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,羊草叶片的光合过程基本停止。

气孔是植物光合作用过程中 CO_2 进出叶片和水分散失的门户,气孔导度的变化直接影响光合作用和蒸腾作用。一般在逆境条件下,植物可通过气孔调节

2.2 羊草气孔导度、胞间 CO_2 浓度和气孔限制值的日变化

气孔是植物光合作用过程中 CO_2 进出叶片和水分散失的门户,气孔导度的变化直接影响光合作用和蒸腾作用。一般在逆境条件下,植物可通过气孔调节

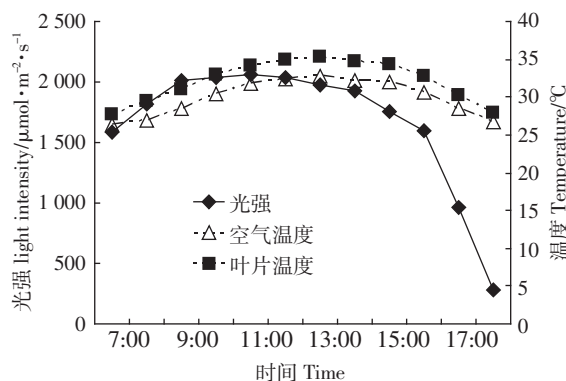


图 1 测定当天的温度和光强

Figure 1 Temperature and light intensity when measuring

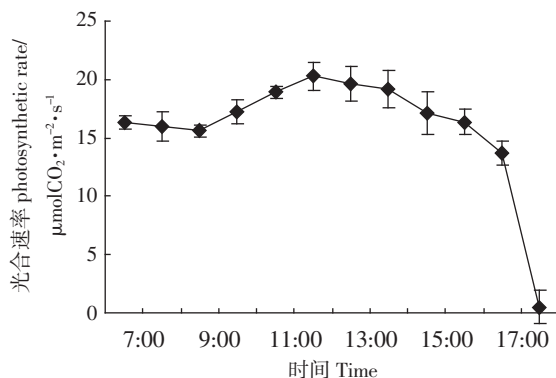


图 2 苏打盐碱胁迫下羊草叶片光合速率的日变化

Figure 2 The diurnal changes of photosynthetic rate in *Leymus chinensis* leaves under saline-sodic stress

保持较高的光合速率,同时可以防止体内水分的过度散失,这是植物对逆境最常见的适应性反应。在苏打盐碱胁迫下,羊草叶片气孔导度和胞间 CO_2 浓度日变化均呈 V 型曲线,与叶片净光合速率的日变化趋势相反(图 3 和图 4),而叶片气孔限制值日变化则与光合速率日变化趋势基本一致(图 5)。羊草叶片气孔导度、胞间 CO_2 浓度的日变化最小值以及气孔限制值日变化的最大值均出现在午后 13:00 左右,三者较叶片光合速率日变化的最大峰值向后推迟了 1 h。此后,随着光合速率的逐步降低,叶片气孔导度和胞间 CO_2 浓度则缓慢升高,气孔限制值逐渐减小。

2.3 羊草蒸腾速率的日变化

从图 6 可以看出,羊草叶片蒸腾速率的日变化与光合速率日变化过程相似,基本也呈现为双峰曲线。从 7:00 测定开始,羊草叶片的蒸腾作用有所提高,8:00 出现第一个高峰值。此后蒸腾作用略有降低,但随着光照增强和气温的升高,叶片蒸腾速率迅速上升,至中午 12:00 达到最大峰值,然后随着气温

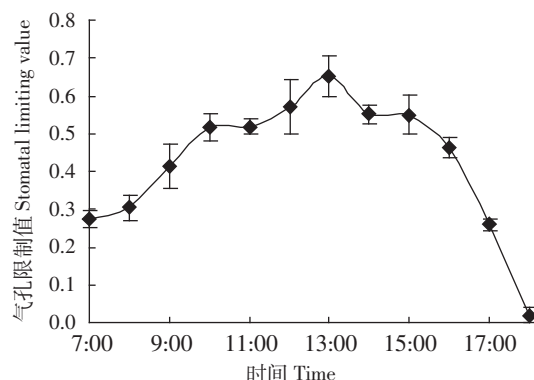


图 5 苏打盐碱胁迫下羊草气孔限制值的日变化

Figure 5 The diurnal changes of stomatal limiting value in *Leymus chinensis* leaves under saline-sodic stress

和光强的降低不断回落。与之相比,叶片表面蒸汽压亏缺变化则为倒 V 型单峰曲线(图 7),表现为早、晚时段蒸汽压亏缺小,中午时段蒸汽压亏缺最大,这是由于羊草叶片光合速率和蒸腾速率均在午时达到最大,造成了叶片蒸汽压的亏缺较大。

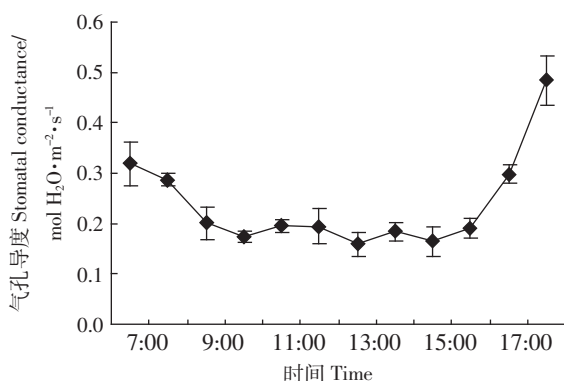


图 3 苏打盐碱胁迫下羊草叶片气孔导度的日变化

Figure 3 The diurnal changes of stomatal conductance in *Leymus chinensis* leaves under saline-sodic stress

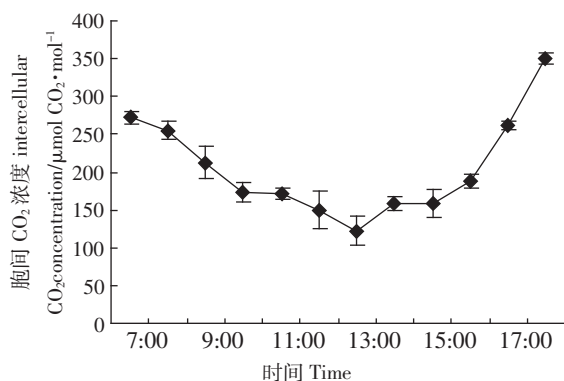


图 4 苏打盐碱胁迫下羊草叶片胞间 CO_2 浓度的日变化

Figure 4 The diurnal changes of intercellular CO_2 concentration in *Leymus chinensis* leaves under saline-sodic stress

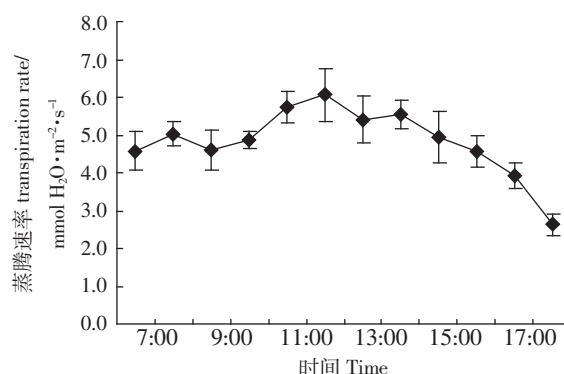


图 6 苏打盐碱胁迫下羊草叶片蒸腾速率的日变化

Figure 6 The diurnal changes of transpiration rate in *Leymus chinensis* leaves under saline-sodic stress

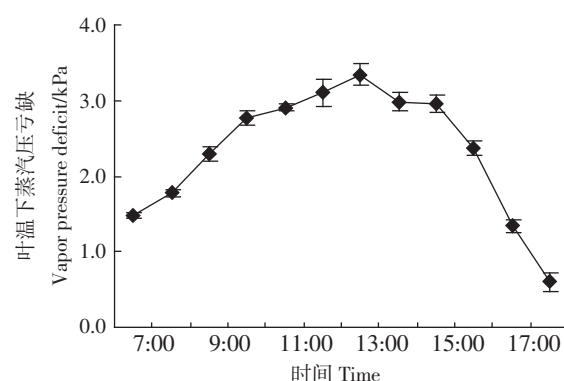


图 7 苏打盐碱胁迫下羊草叶片蒸汽压亏缺的日变化

Figure 7 The diurnal changes of vapor pressure deficit in *Leymus chinensis* leaves under saline-sodic stress

2.4 羊草水分利用效率的日变化

植物的水分利用效率(WUE)是植物吸收利用水分的一个非常重要的指标,常用来评价植物在逆境生长的适应性。环境因子的不断变化直接或间接地影响植物的水分利用效率。羊草水分利用效率的日变化随着叶片光合速率和蒸腾速率的变化呈现波动状态,但不同时刻的水分利用效率没有显著差异,基本呈一条水平线(图 8),即表示羊草在一天中水分利用效率基本保持不变。羊草叶片水分利用效率的这种变化是羊草对苏打盐碱地适应的一种方式。一天之中,随着光照增强和气温的升高,羊草叶片光合速率和蒸腾速率不断增大,但羊草叶片的气孔导度却表现为下降,即表明羊草的气孔开放程度在减小,防止叶片内水分的过度蒸腾,进而维持植株体内水分的均衡。

2.5 各因子相关分析

为了进一步了解羊草叶片光合作用和蒸腾作用

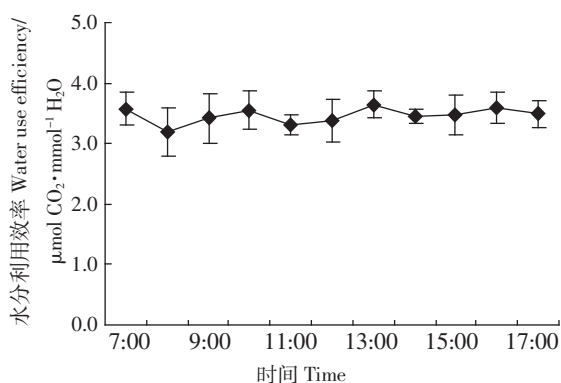


图 8 苏打盐碱胁迫下羊草叶片水分利用效率的日变化

Figure 8 The diurnal changes of water use efficiency in *Leymus chinensis* leaves under saline-sodic stress

与环境因子(温度、光强)之间的关系,对羊草叶片光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔限制值(L_s)、蒸腾速率(T_r)、蒸汽压亏缺(V_{pdL})、水分利用效率(WUE)和气温(T_{air})、叶温(T_{leaf})及光强(Li)的关系进行了相关分析。从表 1 可以看出,除气温、叶温与水分利用效率、气温与光强等少数指标之间相关性不显著外,羊草叶片光合作用和蒸腾作用各项指标间均呈显著相关,部分指标甚至呈极显著相关。说明羊草叶片的水分利用效率受气温等外界环境因子变化的影响较小。

3 讨论与结论

研究表明,在苏打盐碱胁迫下,羊草叶片光合速率日变化呈双峰型,这与杜占池^[10,15]、祖元刚^[11]等研究结论基本一致。所不同的是在苏打盐碱胁迫下,羊草光合“午休”现象提前,且不明显,光合速率日变化的最大峰值出现在正午 12:00,较杜占池等^[10]报道的时间提前,与阎秀峰等^[16]结果基本相同,但光合速率日变化曲线并非单峰曲线形式。究其原因可能是羊草光合特性测定时正值盛夏,日出时间较早,气温和叶温偏高导致光合速率最大峰值和午休现象提前。在苏打盐碱胁迫下,羊草叶片蒸腾速率日变化基本与光合速率具有相同趋势,最大峰值也出现在正午,羊草的气孔导度和胞间 CO_2 浓度日变化与光合速率日变化趋势相反,表明苏打盐碱胁迫下气孔发挥的作用是一种主动调节,由于气孔的这种调节作用,羊草没有出现蒸腾过快而导致叶片严重失水现象,水分利用效率在一天之中维持基本恒定状态,推断羊草能够主动适应苏打盐碱逆境。

苏打盐碱胁迫下,羊草光合作用和蒸腾作用诸

表 1 羊草光合作用日变化各项指标间的相关分析

Table 1 Correlation analysis of photosynthetic indexes of *Leymus chinensis*

相关系数	P_n	G_s	C_i	L_s	T_r	V_{pdL}	T_{air}	T_{leaf}	Li
G_s	-0.893 7**								
C_i	-0.858 0**	0.955 8**							
L_s	0.880 0**	-0.960 2**	-0.997 7**						
T_r	0.932 3**	-0.813 4**	-0.849 4**	0.866 9**					
V_{pdL}	0.837 3**	-0.932 8**	-0.989 9**	0.990 4**	0.870 6**				
T_{air}	0.643 7*	-0.792 0**	-0.915 1**	0.890 8**	0.706 9*	0.909 0**			
T_{leaf}	0.697 1*	-0.849 5**	-0.949 3**	0.928 9**	0.753 8**	0.946 6**	0.991 5**		
Li	0.916 0**	-0.882 3**	-0.829 9**	0.858 2**	0.909 6**	0.852 0**	0.575 0	0.658 9*	
WUE	0.921 1**	-0.828 9**	-0.704 3*	0.728 8*	0.723 6**	0.644 5*	0.434 3	0.492 8	0.791 3**

注:**表示二者间差异极显著($P<0.01$);*表示二者间差异显著($P<0.05$)。

因子的相关分析表明,羊草光合速率与蒸腾速率日变化呈极显著正相关($r=0.932\ 3^{**}$, $P<0.01$,下同),这与周婵等^[17]对虎尾草的研究结论相同。光合速率与气孔导度和胞间 CO_2 浓度日变化呈极显著负相关($r=-0.893\ 7^{**}$ 和 $-0.858\ 0^{**}$),与气孔限制值的日变化呈极显著正相关($r=0.880\ 0^{**}$)。国内外一些报道认为,植物光合速率和气孔导度之间具有正相关关系^[18-19],而本试验结果与其相反,原因不详。

关于植物光合作用的限制因子,有学者^[20]认为植物的光合速率在环境处于胁迫条件下可能受到气孔因素和非气孔因素的双重影响,为判定一定胁迫下光合的主要限制因子,Farquhar 和 Sharkey (1982)提出了气孔限制值 L_s 的方法。当叶内细胞间隙 CO_2 浓度 C_i 减小, L_s 增大时,气孔限制为光合下降的主要原因;而当 C_i 增加, L_s 减少时,非气孔限制为光合下降的主要原因^[21-22]。本试验中羊草叶片光合速率 P_n 日变化与气孔导度 G_s 和胞间 CO_2 浓度 C_i 日变化呈负相关,与气孔限制值 L_s 呈正相关,表明在苏打盐碱胁迫下,羊草光合速率主要受到非气孔因素的影响。孔东等^[23]通过对不同盐碱胁迫下油葵光合作用的研究指出,轻度盐碱胁迫下植物 P_n 的下降主要受气孔因素的影响,中重度盐碱胁迫下 P_n 的下降主要是受非气孔因素和气孔与非气孔因素的协同作用。本试验中羊草叶片光合速率 P_n 日变化与气孔导度 G_s 和胞间 CO_2 浓度 C_i 日变化呈负相关,与气孔限制值 L_s 呈正相关,表明在中度苏打盐碱胁迫下,羊草光合速率同样受到非气孔因素的影响。

此外,在苏打盐碱胁迫下,羊草叶片光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸汽压亏缺(V_{pdL})与气温、光强等环境因子之间均呈显著或极显著相关关系,水分利用效率与气温、叶温间相关性不显著,说明羊草光合作用和蒸腾作用受环境影响较大^[12,24],叶片水分利用效率受环境影响较小。杨福等^[19]对水稻光合作用的研究也发现,在盐碱胁迫下,对光合速率影响最大的因子是光强,其次是空气温度,这些非气孔因素占主导地位。至于羊草在 $1\ 500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的高光强条件下仍能保持较高的光合速率,有学者认为这与羊草本身是喜光植物,光补偿点和饱和点较高有关^[25-26]。总之,在苏打盐碱胁迫下,羊草能够高效利用水分,这在一定程度上既满足了自身生长对水分的需求,又有效避免环境干旱、盐碱胁迫等对其生长的抑制,起到了对逆境的一种主动调节作用。

参考文献:

- [1] Jin H, Plaha P, Park J Y, et al. Comparative EST profiles of leaf and root of *Leymus chinensis*, a xerophilous grass adapted to high pH sodic soil[J]. *Plant Science*, 2006, 170: 1081-1086.
- [2] 马红媛, 梁正伟. 不同 pH 值土壤及其浸提液对羊草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *植物学通报*, 2007, 24(2): 181-188.
MA Hong-yuan, LIANG Zheng-wei. Effects of different soil pH and soil extracts on the germination and seedling growth of *Leymus chinensis*[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(2): 181-188.
- [3] 黄立华, 梁正伟, 马红媛, 等. 直播羊草在不同 pH 土壤环境下的生物学特性和生理反应[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1084-1088.
HUANG Li-hua, LIANG Zheng-wei, MA Hong-yuan, et al. Biological characteristics and physiological responses of *Leymus chinensis* seeded in soils with different pH[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1084-1088.
- [4] Grover A, Sanan N, Sahi C. Genetic engineering for high-level tolerance to abiotic stresses through over-expression of transcription factor genes: the next frontier[J]. *Curr Sci*, 1998, 75: 178-179.
- [5] Zhu J K. Plant salt tolerance[J]. *Trends Plant Sci*, 2001(6): 66-71.
- [6] 黄立华, 梁正伟, 马红媛. 不同盐分对羊草种子萌发和根芽生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5): 1974-1979.
HUANG Li-hua, LIANG Zheng-wei, MA Hong-yuan. Effects of different salts on seed germination and growth of *Leymus chinensis* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1974-1979.
- [7] 黄立华, 梁正伟. 直播羊草在不同 pH 土壤环境下的离子吸收特性[J]. *中国草地学报*, 2008, 30(1): 35-39.
HUANG Li-hua, LIANG Zheng-wei. Ionic absorption characteristics of *Leymus chinensis* seeded in various pH soils[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(1): 35-39.
- [8] HAO Nai Bin, DU Wei Guang, GE Qiao Ying, et al. Progress in the breeding of soybean for high photosynthetic efficiency[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(3): 253-258.
- [9] Ashraf M, Alweena Bashir. Relationship of photosynthetic capacity at the vegetative stage and during grain development with grain yield of two hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars differing in yield[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 19(2): 277-287.
- [10] 杜占池, 杨宗贵. 羊草光合生态特性的研究[J]. *植物学报*, 1983, 25(4): 370-379.
DU Zhan-chi, YANG Zong-gui. Studies on characteristics of photosynthetic ecology in *Leymus chinensis*[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1983, 25(4): 370-379.
- [11] 祖元刚. 羊草种群净光合速率的日变化及其与环境条件之间的相互关系[J]. *植物研究*, 1987(2): 153-162.
ZU Yuan-gang. The relation between diurnal change of net photosynthetic rate of *Leymus chinensis* population and its environmental condition[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 1987(2): 153-162.
- [12] 王云龙, 许振柱, 周广胜. 水分胁迫对羊草光合产物分配及其气体交换特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(6): 803-809.
WANG Yun-long, XU Zhen-zhu, ZHOU Guang-sheng. Changes in biomass allocation and gas exchange characteristics of *Leymus chinensis*

- sis in response to soil water stress[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, 28(6):803-809.
- [13] 高素华, 郭建平. CO₂浓度和土壤湿度对羊草光合特性影响机理的初探[J]. 草业科学, 2004, 21(5):23-27.
- GAO Su-hua, GUO Jian-ping. Initial study into the CO₂ concentration and soil moisture effects on the photosynthesis impact mechanism of *Leymus chinensis*[J]. *Pratacultural Science*, 2004, 21(5):23-27.
- [14] 陈效述, 周 萌, 郑 婷, 等. 呼伦贝尔草原羊草(*Leymus chinensis*)光合速率的季节变化[J]. 生态学报, 2008, 28(5):2003-2012.
- CHEN Xiao-qiu, ZHOU Meng, ZHENG Ting, et al. Examining seasonal variations of *Leymus chinensis* photosynthetic rates in the Hulun-beier Grassland: a case study of a grassland meteorological experiment station in Ewenke[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5):2003-2012.
- [15] 杜占池, 杨宗贵. 羊草叶片光合作用日进程类型的研究[J]. 植物学通报, 1993, 10(S1):12-22.
- DU Zhan-chi, YANG Zong-gui. The leaf types of *Aneurolepidium Chinense* classified according to their photosynthetic diurnal course[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1993, 10(S1):12-22.
- [16] 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[J]. 植物研究, 1994, 14(3):287-291.
- YAN Xiu-feng, SUN Guo-rong, LI Jing-lan, et al. A comparative study on photosynthesis and transpiration diurnal variation of *Aneurolepidium chinense* and *Puccinellia tenuiflora*[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 1994, 14(3):287-291.
- [17] 周 婵, 郭晓云, 王仁忠, 等. 松嫩草地虎尾草光合与蒸腾作用的研究[J]. 草业学报, 2001, 10(1):42-47.
- ZHOU Chan, GUO Xiao-yun, WANG Ren-zhong, et al. Photosynthesis and evaporation of *Chloris virgata* in alkalized meadow on Songnen plain of China[J]. *Acta Pratacultural Science*, 2001, 10(1):42-47.
- [18] 王玉辉, 周广胜. 松嫩草地羊草叶片光合作用生理生态特征分析[J]. 植物生态学报, 2001, 12(1):75-79.
- WANG Yu-hui, ZHOU Guang-sheng. Analysis on ecophysiological characteristics of leaf photosynthesis of *Aneurolepidium chinense* in Songnen grassland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1):75-79.
- [19] 杨 福, 梁正伟, 王志春, 等. 苏打盐碱胁迫下水稻净光合速率日变化及其与影响因子的关系[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(4):386-390.
- YANG Fu, LIANG Zheng-wei, WANG Zhi-chun, et al. Relationship between diurnal changes of net photosynthetic rate and affecting factors in flag leaves of rice under saline sodic stress[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2007, 21(4):386-390.
- [20] 关义新, 戴俊英, 林 艳. 水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(4):293-297.
- GUAN Yi-xin, DAI Jun-ying, LIN Yan. The photosynthetic stomatal and nonstomatal limitation of plant leaves under water stress[J]. *Plant Physiology Communications*, 1995, 31(4):293-297.
- [21] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1982, 33:317.
- [22] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4):241-244.
- XU Da-quan. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis[J]. *Plant Physiology Communications*, 1997, 33(4):241-244.
- [23] 孔 东, 史海滨, 李延林, 等. 不同盐分条件下油葵光合日变化特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1):111-115.
- KONG Dong, SHI Hai-bin, LI Yan-lin, et al. Studies on photosynthetic rate of oil sunflower under difference salt stresses[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(1):111-115.
- [24] 刘惠芬, 高玉葆, 张 强, 等. 土壤干旱胁迫对不同种群羊草光合及叶绿素荧光的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):209-213.
- LIU Hui-fen, GAO Yu-bao, ZHANG Qiang, et al. Effects of soil drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence for different *Leymus chinensis* Populations[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(2):209-213.
- [25] 杜占池, 杨宗贵. 不同土壤型羊草光合和蒸腾作用特性的比较研究[J]. 植物学报, 1995, 37(1):66-73.
- DU Zhan-chi, YANG Zong-gui. Comparative study on the characteristics of photosynthesis and transpiration in *Aneurolepidium Chinense* of different soil types[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1995, 37(1):66-73.
- [26] 许大全, 徐宝基, 沈允钢. C₃植物光合效率的日变化[J]. 植物生理学报, 1990, 16(1):1-5.
- XU Da-quan, XU Bao-ji, SHEN Yun-gang. Diurnal variation of photosynthesis efficiency in C₃ plants[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1990, 16(1):1-5.