

# 青海省三江源区人工草地生态系统 CO<sub>2</sub> 通量\*

赵亮 古松 周华坤 徐世晓 赵新全 李英年

(中国科学院西北高原生物研究所, 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 西宁 810001)

**摘要** 了解三江源人工草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换 (Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange, *NEE*) 的季节变化规律和主要生物因子及环境因子对这些过程的影响将有助于认识青藏高原人工草地生态系统碳循环、生态价值、功能, 以及对三江源区的生态安全的重要意义。该研究利用涡度相关技术, 于 2005 年 9 月 1 日至 2006 年 8 月 31 日对位于青海腹地的垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 人工草地的 *NEE* 及生物和环境因子进行观测, 阐明 *NEE* 及其组分的动态变化特征和影响因子。三江源区人工草地生态系统的日最大吸收量为 2.38 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 出现在 7 月 30 日。日间最大吸收率和最大排放率都出现在 8 月, 分别为 -6.82 和 2.95 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。在生长季, 白天的 *NEE* 主要受光合有效辐射 (Photosynthetically active radiation, *PAR*) 变化控制, 同时又与叶面积指数和群落多样性交互作用, 共同调节光合速率和光合效率的强度。最大光合同化速率为 2.46 ~ 10.39 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 表观初始光能利用率为 0.013 ~ 0.070 μmol CO<sub>2</sub> μmol<sup>-1</sup> *PAR*。在碳交换日过程中, *NEE* 并不完全随着 *PAR* 的增加而增大, 当 *PAR* 超过某一值 (>1200 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) 时, *NEE* 随 *PAR* 的增加而降低。受温度的影响, 生长季的生态系统的呼吸商 *Q*<sub>10</sub> (1.8) 小于非生长季节的 (2.6)。生态系统呼吸主要受温度的控制, 同时也受到叶面积指数的显著影响。生长季昼夜温差大并不利于生态系统的碳获取。三江源区人工草地生态系统是一个较强的碳汇, 为 -49.35 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。

**关键词** 人工草地生态系统 CO<sub>2</sub> 通量 昼夜温差

## CO<sub>2</sub> FLUXES OF ARTIFICIAL GRASSLAND IN THE SOURCE REGION OF THE THREE RIVERS ON THE QINGHAI-TIBETAN PLATEAU, CHINA

ZHAO Liang, GU Song, ZHOU Hua - Kun, XU Shi - Xiao, ZHAO Xin - Quan, and LI Ying - Nian

<sup>1</sup>Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

**Abstract** **Aims** It is important to the study of the carbon cycle and ecological issues to understand seasonal variation in CO<sub>2</sub> flux and the influence of environmental factors on the artificial grassland in the source region of the three rivers on the Qinghai - Tibetan Plateau.

**Methods** We utilized the eddy covariance method to observe net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (*NEE*) and biological and environmental factors and their variation at the *Elymus nutans* artificial grassland from September 1, 2005 to August 31, 2006.

**Important findings** The daily maximum uptake of CO<sub>2</sub> was 2.38 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> on July 30. The ratio of daily uptake and emission in August were observed, -6.82 and 2.95 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectively. In the growing seasons, daily *NEE* was dominated by the variation of photosynthetically active radiation (*PAR*). At the same time, daily *NEE* combined with leaf area and community diversity to control photosynthetic rate and photosynthetic efficiency. Maximum photosynthetic rate was 2.46 - 10.39 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, and the apparent quantum yield (denoting the maximum efficiency of light utilization in photosynthesis) was 0.013 - 0.070 μmol CO<sub>2</sub> μmol<sup>-1</sup> *PAR*. The influence of temperature, *Q*<sub>10</sub> (1.8) in the growing season was less than in the non - growing season. The respiration of the ecosystem was mainly dominated by temperature and leaf area. Carbon absorption was not dominated by the larger temperature difference of the day and night in the growing season. Our study proved that the artificial grassland ecosystem was a carbon sink with a carbon absorption of -49.35 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. Our study also proved that the source and sink function of carbon was influenced by the amount, intensity and seasonal allocation of annual precipitation, as well as by plant community diversity.

收稿日期: 2007-01-05 接受日期: 2007-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(30770419)、中国科学院“百人计划”项目(0429091211)、国家重点基础研究发展计划项目(2005CB422005 - 01)和国家科技支撑计划项目(2006BAC01A02)

E-mail: lzhaol@nwipb.ac.cn

**Key words** artificial grassland ecosystem, CO<sub>2</sub> fluxes, temperature difference of day and night

DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.03.003

迄今为止对青藏高原草地生态系统的碳收支、水汽平衡研究多集中于天然草地,认为草地生态系统的碳源/汇效应存在时空变化(如矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸和金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸是一个碳汇(Kato *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2006),沼泽化草甸是一个碳源(Zhao *et al.*, 2005a))。近年来,为了恢复三江源区退化草地,三江源区的人工草地面积在不断扩大,约 160 000 km<sup>2</sup>(王启基等, 2005; 马玉寿等, 1999)。一些研究表明,青藏高原气温在不断提高,季节冻土及多年冻土随之退化(Cheng, 1999),生态系统水热条件的这种变化无疑会进一步影响土壤有机质以及其它温室效应气体的动态。然而,关于人工草地生态系统对青藏高原水热及其水分利用可能会引起的变化几乎一无所知。生态学家迫切需要知道三江源区人工草地的碳/水循环情况。所以探讨该类生态系统的碳循环对认识人工草地生态系统碳/水循环、生态价值、功能,以及对三江源区的生态安全都具有重要的意义。

另外,源区气候为典型的高原大陆性气候,表现为冷热两季交替、干湿两季分明,年温差小、日温差大、日照时间长、辐射强烈,无四季区分。冷季为青藏冷高压控制,长达 7 个月,热量低、降水少、风沙大;暖季受西南季风影响产生热气压,水汽丰富、降水量多。由于海拔高,绝大部分地区空气稀薄,植物生长期短,无绝对无霜期。年平均气温为 -5.6~3.8。其中最热月(7月)平均气温为 6.4~13.2,极端最高气温为 28;最冷月(1月)为 -6.6~-13.8,极端最低气温为 -48。年降水量为 262.2~772.8 mm,其中 6~9 月降水量约占全年降水量的 75%,而夜雨量比例则达 55%~66%。年蒸发量在 730~1 700 mm 之间。日照百分率为 50%~65%,年日照时数为 2 300~2 900 h,年太阳辐射量为 5 500~6 800 MJ m<sup>-2</sup>。沙暴日数一般为 19 d 左右,最长达 40 d。这样的温度环境有利于白天的光合、碳吸收而不利于夜间的碳分解,结果是生态系统可能具有较高的碳蓄积能力,这一结果已经得到证实,即较大的昼夜温差有利于高寒草甸的碳积累(Gu *et al.*, 2003; 赵亮等, 2006)。但是,现在还不清楚人工草地生态系统是否具有同样的响应。

利用涡度相关法技术定量分析三江源垂穗披碱

草(*Elymus nutans*)人工草地生态系统的 CO<sub>2</sub> 通量的变化规律,主要探讨:1)温度和光合有效辐射对生态系统呼吸的影响;2)生长季昼夜温差是否有利于生态系统的碳固定;3)土壤湿度对土壤呼吸的影响,降水时间格局是怎样改变土壤水分的变化而对生长系统呼吸产生影响的;4)三江源区人工草地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换(Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange, NEE)的季节和日变化规律,以及碳的源汇功能。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地点概况

研究区位于青海省果洛州玛沁县境内大武镇的东南部 25 km 处格多牧委会草场,地处 100°26'~100°41' E, 34°17'~34°25' N, 海拔为 3 980 m。属高原寒冷气候类型,年均温为 -2.6, 0 年积温为 914.3,日照时间为 2 576.0 h,年降水量为 513.02 mm,5~9 月降水为 437.10 mm,占年降水量的 85.20%。无绝对无霜期,牧草生长期为 110~130 d。土壤类型以高山草甸土和高山灌丛草甸土为主。本研究观测的人工草地于 2002 年 5 月建成,是以垂穗披碱草单播,冬季放牧。

### 1.2 观测方法及资料处理

CO<sub>2</sub> 通量观测塔(涡度相关观测系统)设置于地势平坦,地形开阔,具有足够大的“风浪区”的中心带,观测系统离地面 300 cm 高,主要部分有 CSAT 型超声风速仪温度计(CSI)和 Li-7500CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 红外分析仪(Li-Cor, Inc.),其它观测项目见表 1。每年 7 月运用高纯氮(99.999%)标定 Li-7500CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 红外分析仪的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的零点,用露点仪(Li-610)标定 H<sub>2</sub>O 的量程,运用 450~460 mg·kg<sup>-1</sup>的标准 CO<sub>2</sub> 气体标定 CO<sub>2</sub> 的量程。仪器采样频率为 10 Hz,每 15 min 输出 1 组平均值。

数据取自 2005 年 9 月 1 日至 2006 年 8 月 31 日。所有微气象数据和通量数据,均进行数据质量控制。通量原始数据在进行分析之前,先进行预处理,主要包括野点支除(±3)、三维坐标旋转和 Webb-Pearman-Leuning 校正(Webb *et al.*, 1980)等。当有降水或清晨有露水时,因在 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪的探头上常存在水珠,对通量有一定的影响。出现类似现象的数据以及出现较大异常值的数据在统计时

表1 观测要素及安装高度  
Table 1 Meteorological parameters and instruments used

观察要素 Meteorological parameters	仪器介绍 Instruments or sensor	设置高度 Location (cm)
CO <sub>2</sub> 和 H <sub>2</sub> O 浓度 CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O concentrations	Li - 7500, Li - Cor, USA	300
三维风速和空气 Vertical wind and air temperature	CSAT3, CSI, USA	300
净辐射 Net radiation	CNR - 1, Kipp and Zonen, Netherlands	150
光量子通量 Photosynthetic photon flux density	Li - 190SB, Li - Cor, USA	150
风速和风向 Wind speed and direction	014A and 034A - L, CSI, USA	110, 300
空气温度和湿度 Air temperature and humidity	HUMP45C, CSI, USA	110, 300
地表面温度 Soil surface temperature	107, CSI, USA	0
土壤热通量 Soil heat flux	HFT - 3, CSI, USA	- 2
土壤温度 Soil temperature	105T, CSI, USA	- 3, - 10, - 20, - 30, - 40, - 50, - 60, - 70
土壤含水量 Soil water content	TDR, CS615, CSI, USA	- 3, - 20, - 50
降雨量 Precipitation	TE525MM, CSI, USA	50

剔除,可用通量数据达 96%。土壤热通量是两块热通量板平均值。 $LE + H = 0.64 \times (Rn - G) + 25.04$  ( $R^2 = 0.82, p < 0.01$ ), 这个能量闭合斜率在已发表的能量闭合(0.55 ~ 0.90) (Wilson *et al.*, 2002) 范围内,考虑到本研究地点通量贡献区大且平坦开阔,但是闭合斜率偏小,这可能由于温度较低和风速较小造成的,是否由此原因引起,有待于今后进一步研究。

对于数据中缺失部分一般是通过建立起的碳通量值与环境因子之间的非线性经验关系进行插补,非生长季(11月至翌年4月20日)全日和生长季(4月20日至10月30日)夜间(光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR) < 20  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),取摩擦速度阈值  $U_* > 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的生态系统呼吸(Ecosystem respiration,  $R_{\text{eco}}$ )与5 cm 土壤温度( $T_{\text{soil}}$ )拟合得到的指数方程(1)式来插补夜间  $U_* < 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和丢失的通量数据。生长季白天,利用通量( $F_c$ )与 PAR 和  $T_{\text{soil}}$  拟合得到的方程(2)式来插补白天丢失的通量数据。

$$R_{\text{eco}} = R_{e, T_{\text{ref}}} \exp\left[\left(\frac{E_a}{R}\right) \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_{\text{soil}}}\right)\right] \quad (1)$$

$$F_c = \frac{a_1 \cdot \text{PAR}}{a_2 + \text{PAR}} + a_3 \cdot T_{\text{soil}}^{a_4} \quad (2)$$

(1)式中  $R_{e, T_{\text{ref}}}$  是温度在  $T_{\text{rep}} = 273.14 \text{ K}$  时的系统呼吸量,  $R$  是气空常数 ( $8.134 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $R_{10}$  是温度每升高 10 的系统呼吸量,  $E_a$  是常数; (2)式中  $a_1, a_2, a_3$  和  $a_4$  是拟合常数。

涡度相关技术测得的 CO<sub>2</sub> 通量是 NEE,即生态系统光合作用所固定的 CO<sub>2</sub> (Gross primary production, GPP) 与  $R_{\text{eco}}$  间的收支差额。利用夜间的有效观测数据和方程(1)可获得  $R_{\text{eco}}$  与  $T_{\text{soil}}$  之间的关系

函数,再利用此函数估算生长季白天的生态系统呼吸。用日间的 NEE 加上日间的  $R_{\text{eco}}$ ,则可得到生态系统的光合生产力,即生态系统的光合固碳量:

$$GPP = NEE + R_{\text{eco}} \quad (3)$$

生态系统日总呼吸量是生态系统昼夜呼吸量的总和。

### 1.3 生物量及土壤有机质的测定

在生物季每月30日测定了地上、地下生物量和土壤有机质等。地上生物量采用收割法,随机选择6个50 cm × 50 cm 的样方,用剪刀齐地面剪下装入纸袋;地下生物量在取过地上生物量的样方内再随机选择3个25 cm × 25 cm 的二级样方,垂直分0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 3个层次,用铁铲和切刀分层取出,并及时筛选出草根装入袋,再到河边分样冲洗干净。然后在 65 °C 恒温烘箱内烘干至恒重后称重,单位取  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。土壤有机质测定是在取地下生物量的同时,分层收回少量土壤样品,送至中国科学院西北高原生物研究所测试中心分析,采用重铬酸钾氧化-外加热法。

## 2 结果与分析

### 2.1 PAR、空气温度 ( $T_a$ ), $T_s$ 和实际水汽压 (Vapor pressure deficit, VPD) 变化特征

图1列出了实验地区从2005年9月1日至2006年8月31日的 PAR、 $T_a$ 、 $T_s$ 、VPD、PPT 和 5 cm 土壤体积含水量 (Volumetric soil, moisture, SWC) 的季节变化曲线。这些气象参数的变化特征与青海省海北地区的趋势相似 (Zhao *et al.*, 2006; Kato *et al.*, 2006)。该实验区同样因海拔高,大气透明,太阳总辐射强烈, PAR 最大值为  $62.19 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,

出现在2006年6月28日。PAR最大值一般都出现在6月下旬,后随降雨量增加或太阳高度角的降低而逐渐下降,在12月底或者1月初下降至最小值(图1a),这一变化趋势与西藏高原草原化生态系统的PAR变化趋势一致(石培礼等,2006),并且高于青藏高原北部地区的草甸生态系统(Zhao et al.,

2006; Kato et al., 2006)。尽管PAR较高,但T<sub>a</sub>和T<sub>s</sub>比较低,平均气温分别为-0.22和4.36。T<sub>a</sub>和T<sub>s</sub>的最高分别为23.83和23.07,出现在7月下旬;最低温度分别为-25.38和-12.11,出现在12月下旬。植被区气温日较差大,如在植物生长茂盛期的7月,日间最低可降至-2.2以下,最高可升到23.8。气温不仅在日间变化强烈,而且在月内也同样出现强烈变化,如7月日平均气温在6.4~15.4之间变化。日较差最大值出现在1月,可达到24.07,而日较差最低值出现在生长中期的6月,在10左右。研究期的实验区降雨量为544.9 mm,主要集中在6~9月。SWC在3月15日左右开始增加,一般在5月中旬至10月底的生长季基本上可以达到0.4左右,11月上旬以后随着降水量减少,SWC迅速降低,温度较低的12月和1月的SWC均在0.1以下(图1e)。VPD变化范围较小(图1e),0.10~1.57 kPa。

### 2.2 生物量及叶面积指数

生长季生物量和叶面积指数(Leaf area index, LAI)与其它生态系统一样,随着时间变化呈“S”型生长,生物量和LAI一般在5月中旬开始增长,7~8月增长最快,8月下旬达到最大值,尔后由于9月中下旬草丛开始枯萎而出现下降,10月中旬基本接近零(图2),但是在研究期的7月生长量低于6月,这是由于7月的降水较少,土壤水分偏低阻碍植物生长,导致生物量偏低(图1e)。生物量和LAI的最大值分别为271.84 g·m<sup>-2</sup>(出现在8月25日)和2.46 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>(出现在8月12日),介于青藏高原北部天然草地生物量在238.5~339.39 g·m<sup>-2</sup>之间(Kato et al., 2004; Zhao et al., 2006),但高于西藏高原草原

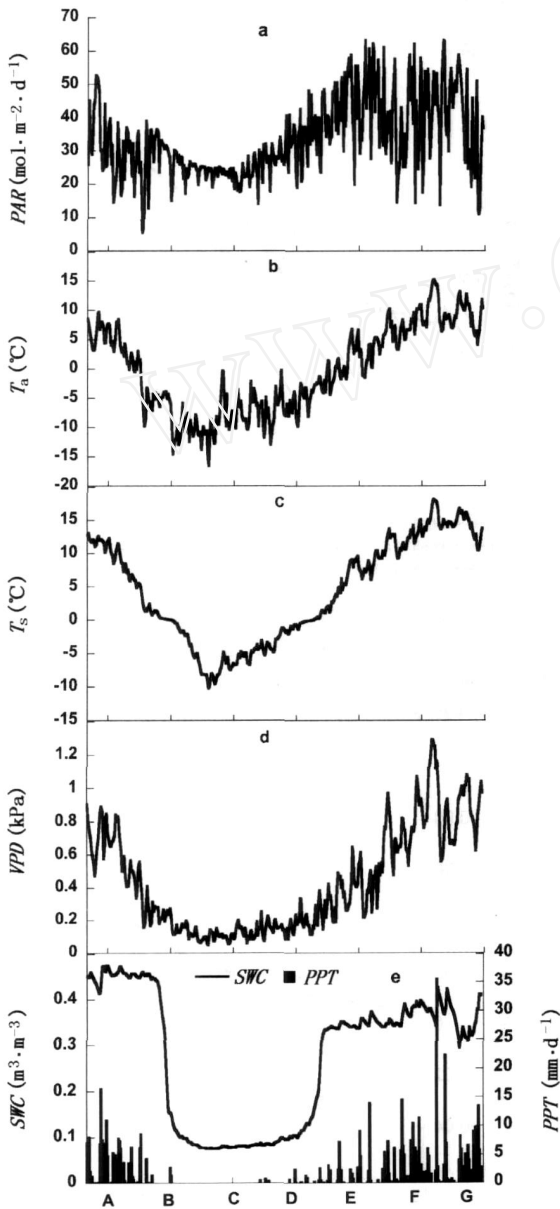


图1 光合有效辐射 (PAR)、250 cm 的空气温度 (T<sub>a</sub>)、5 cm 的土壤温度 (T<sub>s</sub>)、250 cm 的饱和水汽压 (VPD)、5 cm 土壤体积含水量 (SWC) 和日降雨量 (PPT) 的季节变化

Fig.1 Seasonal variability of photosynthetically active radiation (PAR), average daily air temperature (T<sub>a</sub>), soil temperature at a 5 cm depth (T<sub>s</sub>), vapor pressure deficit (VPD), and daily total precipitation (PPT) and daily average volumetric soil moisture (SWC)

A:2005年9月19日 September 19, 2005 B: 2005年11月16日 November 16, 2005 C:2006年1月13日 January 13, 2006 D: 2006年3月12日 March 12, 2006 E:2006年5月9日 May 9, 2006 F:2006年7月6日 July 6, 2006 G:2006年9月2日 September 2, 2006

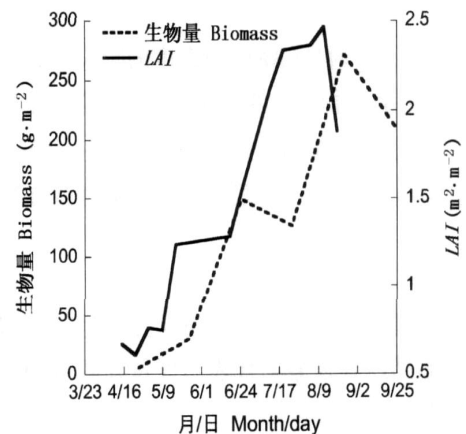


图2 三江源人工草地上生物量和叶面积(LAI)动态  
Fig.2 Averages of aboveground biomass and leaf area index (LAI) for the artificial grassland in the source region of the three rivers

化嵩草草甸的生物量在 106.2 ~ 150.9 g · m<sup>-2</sup> (石培礼等, 2006), 此时, 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 的土壤有机质分别为 58.6、61.6 和 44.4 g · kg<sup>-1</sup>。

### 2.3 昼夜温差对 NEE 的影响

图 3 给出了生长季 (5 ~ 9 月) 每个月和整个生长季节的昼夜温差对 NEE 形成的影响。可见, 在生长季, 昼夜温差对 NEE 形成的影响, 因植物生长期和叶面积大小不同而存在差异 (图 3a), 但均没有达到显著性水平。从整个生长季来看, 随着昼夜温差增大, NEE 减少 ( $NEE = 1.03 - 0.07 \times (T_{day} - T_{night})$ ),  $R^2 = 0.05$ ,  $p < 0.05$ , 图 3b), 即在生长季, 大的昼夜温差不利于生态系统碳吸收。

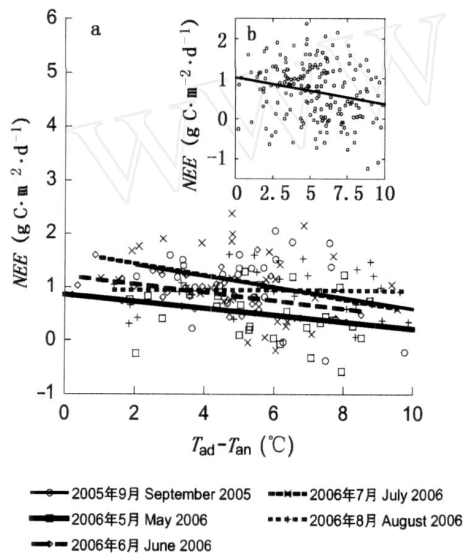


图 3 每个月 (a) 和整个生长季 (b) 昼夜温差 (T<sub>ad</sub> - T<sub>an</sub>) 与净 CO<sub>2</sub> 日交换量 (NEE) 的关系  
Fig. 3 Relationships between net daily CO<sub>2</sub> exchange (NEE) and day/night temperature (T<sub>ad</sub> - T<sub>an</sub>) in each month (a) and whole growing season (b)

### 2.4 夜间 CO<sub>2</sub> 通量 (NEE) 对温度的响应特征

R<sub>eco</sub> 包括植物地上部分呼吸和土壤表观呼吸。温度和水分是控制 R<sub>eco</sub> 的主要因子。一些研究表明, 青藏高原的 R<sub>eco</sub> 与温度的关系遵循指数方程 (4) 式:

$$R_{eco} = a e^{bT_s} \quad (4)$$

式中, a、b 是两个经验常数。由 (4) 式得到生态系统的温度敏感性参数 Q<sub>10</sub>, 代表温度每升高 10 生态系统呼吸的相对增长量:

$$Q_{10} = \exp(10b) \quad (5)$$

本研究中利用夜间 U<sub>\* > 0.15 m · s<sup>-1</sup> 的观察数据, 分析生长季不同月份的 R<sub>eco</sub> 的温度敏感性的效</sub>

应 (图 4)。结果显示, 每个月的 R<sub>eco</sub> 都随温度升高而指数增加, 但呼吸强度及其随温度升高的增加速率显著不同。在土壤温度小于 15 时, 相同土壤温度的呼吸强度在 8 月较大, 而大于 15 时, 7 月较大。Q<sub>10</sub> 变化范围为 1.08 ~ 2.64。在非生长季节, R<sub>eco</sub> 与土壤温度之间关系和生长季一样满足指数关系 (图 5), Q<sub>10</sub> 为 2.59。

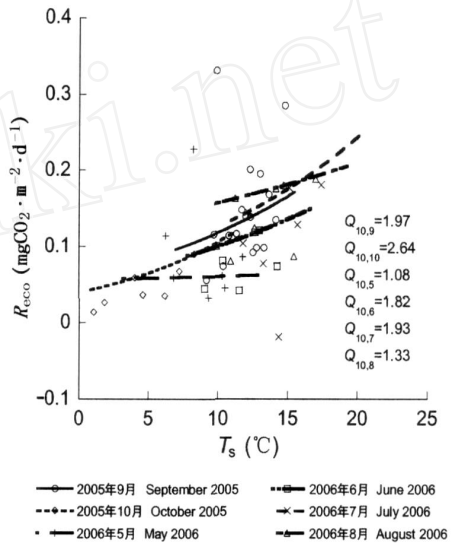


图 4 生长季夜间的生态系统呼吸 (R<sub>eco</sub>) 对 5cm 土壤温度 (T<sub>s</sub>) 的响应

Fig. 4 Response of ecosystem respiration (R<sub>eco</sub>) to change in soil temperature at the depth of 5 cm (T<sub>s</sub>) during growth season

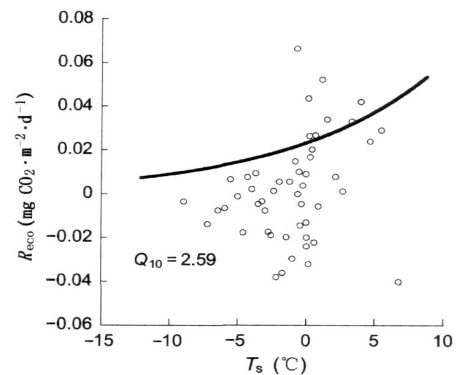


图 5 非生长季的生态系统呼吸 (R<sub>eco</sub>) 对 5 cm 土壤温度 (T<sub>s</sub>) 的响应

图 5 非生长季的生态系统呼吸 (R<sub>eco</sub>) 对 5 cm 土壤温度 (T<sub>s</sub>) 的响应

Fig. 5 Response of ecosystem respiration (R<sub>eco</sub>) to change in soil temperature at the depth of 5 cm (T<sub>s</sub>) during non - growing season

### 2.5 白天 CO<sub>2</sub> 通量 (NEE) 对 PAR 的响应特征

白天垂穗披碱草人工草地 NEE 和 PAR 之间的关系与青藏高原其它生态系统一样。首先随着

PAR 增加 NEE 的吸收量呈增大的趋势(图 6), 当增加至最大值后略微下降(图 7)。这些增大和下降趋势随着月份的变化现存在差异。根据 Michaelis - Menten 动力学, NEE 对 PAR 的响应曲线可由直角双曲线方程(6)式描述(Hollinger *et al.*, 1994):

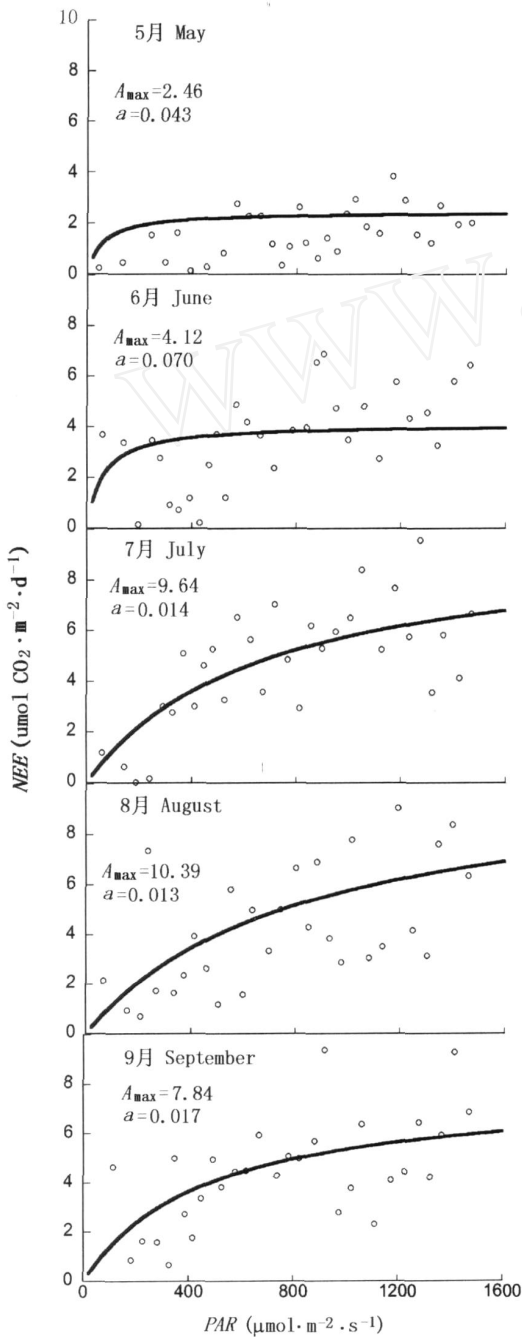


图 6 三江源人工草地的净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换量(NEE)与光合有效辐射(PAR)的关系

Fig. 6 Relationship between photosynthetically active radiation (PAR) and the net CO<sub>2</sub> exchange (NEE) measured in each month over a growth season

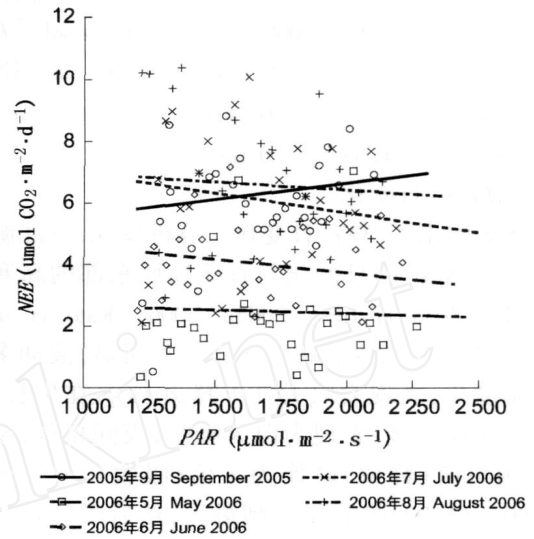


图 7 净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换量(NEE)与 PAR 的关系

Fig. 7 Linear regression of daytime net carbon exchange rate (NEE) on incident photosynthetically active radiation (PAR) on photosynthetically active radiation (PAR) > 1 200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> Date were PAR > 1 200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>

$$NEE = \frac{A_{max} PAR}{K_m + PAR} \tag{6}$$

式中,  $A_{max}$  是 PAR 趋向无穷大时的最大光合同化速率,  $K_m$  是 Michaelis - Menten 常数(光合速率达到  $A_{max}$  一半时的 PAR)。由以上参数得到表观初始光能利用率  $a$  (Hollinger *et al.*, 1999):

$$a = A_{max} / K_m \tag{7}$$

由于 PAR 较大, NEE 下降, 因此, 选择 PAR < 1 500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 来确定  $A_{max}$  与  $a$ 。从分析结果看, 三江源区人工草地生态系统的  $A_{max}$  范围是 2.46 ~ 10.39 μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 在 8 月达到最大, 5 月的最小,  $a$  变化范围为 0.013 ~ 0.070 μmol CO<sub>2</sub> μmol<sup>-1</sup> PAR, 6 月最大, 最小则出现在处于草盛期的 8 月。进入枯黄初期的 10 月时, 由于温度降低, 绿叶枯死, LAI 显著降低, 生态系统光合显著下降,  $A_{max}$  和  $a$  达到最小分别为 1.18 μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 0.006 9 μmol CO<sub>2</sub> μmol<sup>-1</sup> PAR。整个生长期分别为 6.20 μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 0.027 3 μmol CO<sub>2</sub> μmol<sup>-1</sup> PAR。当 PAR > 1 200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, NEE 与 PAR 之间呈显著线性关系 ( $NEE = a \times PAR + b$ ), 5 ~ 8 月的 NEE 随着 PAR 增加而减小(图 7), 斜率  $a$  分别为 0.000 2 μmol CO<sub>2</sub> μmol<sup>-1</sup> PAR ( $F_{(2,278)} = 10.13, p < 0.01$ )、0.000 9 μmol CO<sub>2</sub> μmol<sup>-1</sup> PAR ( $F_{(2,260)} = 7.93, p <$

0.01)、0.0013  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{PAR}$  ( $F_{(2,539)} = 18.39$ ,  $p < 0.01$ ) 和 0.0005  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{PAR}$  ( $F_{(2,288)} = 3.71$ ,  $p > 0.05$ ), 而在9月,  $NEE$  随着  $\text{PAR}$  增加而增加, 斜率为 0.0011  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{PAR}$  ( $F_{(2,279)} = 4.63$ ,  $p < 0.05$ )。

## 2.6 $NEE$ 的日变化

图8给出了  $NEE$  日变化。分析发现, 三江源区人工草地  $NEE$  的日变化与青藏高原东部的高寒草甸相似 (Zhao *et al.*, 2005a, 2006; Kato *et al.*, 2006)。在非生长期,  $NEE$  日变化不明显, 波动多且变化幅度小, 表现为向大气中释放  $\text{CO}_2$ ; 在生长期, 日变化规律明显, 表现为白天吸收, 夜间排放, 凌晨  $NEE$  由负值 (释放) 转换为正值 (吸收), 中午前后 (11:00~12:00) 吸收量达到最大, 然后吸收量开始减少, 傍晚 19:00 左右  $NEE$  由正值转换为负值,

21:00左右正在达到最大。正负转换时间月际变化明显。日间最大吸收率和最大排放率都出现在8月, 分别为6.82和  $-2.95 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

## 2.7 $NEE$ 的季节变化

图9为三江源区人工草地2005年9月到2006年8月一个完整年的  $NEE$  动态。从逐日来看, 从2005年10月初 (约10月3日左右) 到2006年5月初 (约5月4日) 均表现为碳排放, 从5月中旬开始整个生态系统转变为碳吸收, 一直持续到9月底。就整年而言, 碳排放量出现两个高峰期, 分别在5和10月, 日最大吸收量出现在7月30日, 为  $2.38 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  年  $NEE$ 、 $R_{\text{eco}}$  和  $GPP$  总量分别为 49.35、470.60 和  $519.95 \text{ g C m}^{-2}$ ,  $R_{\text{eco}}/GPP$  为 0.91, 可见三江源区人工草地生态系统是一个碳汇。

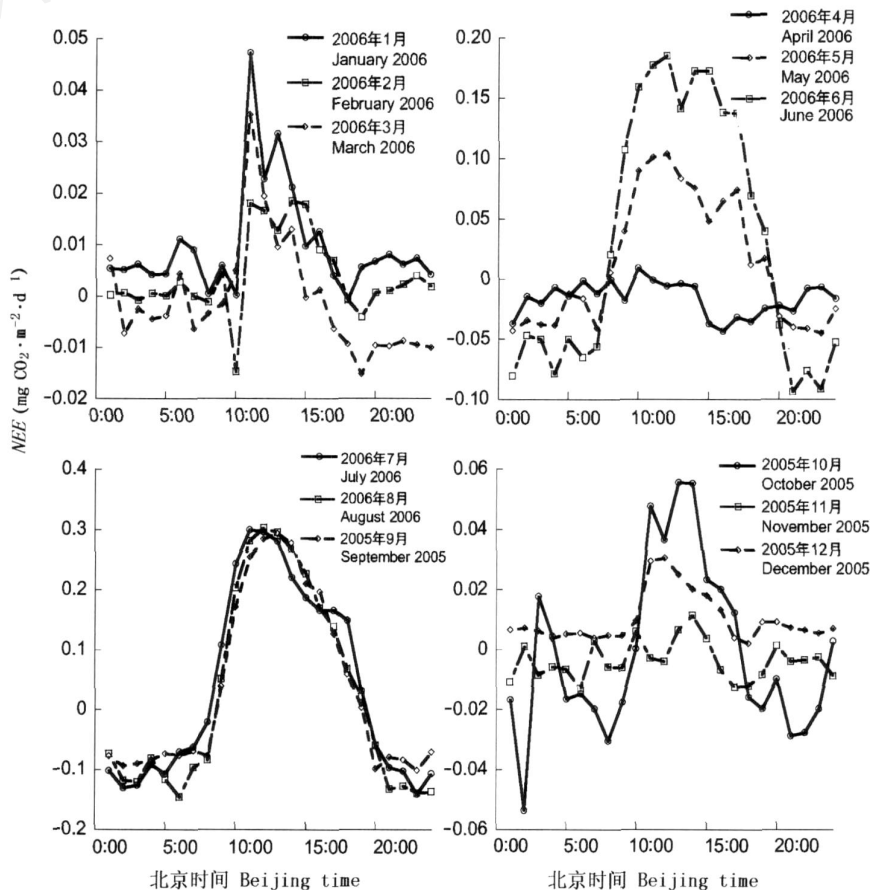


图8 各月逐时平均净生态系统  $\text{CO}_2$  交换量 ( $NEE$ )

Fig. 8 Average monthly diurnal trends in net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange ( $NEE$ )

## 3 讨论

虽然青藏高原具有较大的昼夜温差, 但是在生

长季, 大的昼夜温差不利于三江源区人工草地生态系统碳吸收和累积, 这一结果与位于青藏高原原化蒿草 (*Kobresia*) 草甸 (石培礼等, 2006) 和位于青藏

高原东北部的海北金露梅灌丛草甸 (Zhao *et al.*, 2005b) 观测结果一致,而与赵亮等 (2006) 和 Gu 等 (2003) 仅用 8 月观测数据得出的结论相反。二者观测结果表明,昼夜温差越大越有利于形成生态系统碳汇。这差异主要由所取分析数据时间段不一致造成的,如在本研究中,仅从 8 月的数据分析来看,昼夜温差对 *NEE* 基本没有影响,斜率 ( $a=0.002$ ) 接近零 (图 3b),这个现象也在海北的金露梅灌丛草甸观察到 (Zhao *et al.*, 2005b)。不少研究表明,生长季昼夜温差大利于植物光合作用和光合产物的积累 (周兴民, 2001)。从本文研究结果可以看出,生长季昼夜温差对 *NEE* 的影响因植物生长期不同而存在差异。这主要因为:一方面在初期和末期的叶面积指数小导致较小的生态系统固碳能力,即低的 *GPP*。在草盛期高的叶面积指数较高,具有较大的 *GPP*,并且此时的最低温度达到  $-2.2$  ;另一方面,在这 3 个生长期中  $Q_{10}$  基本相似。

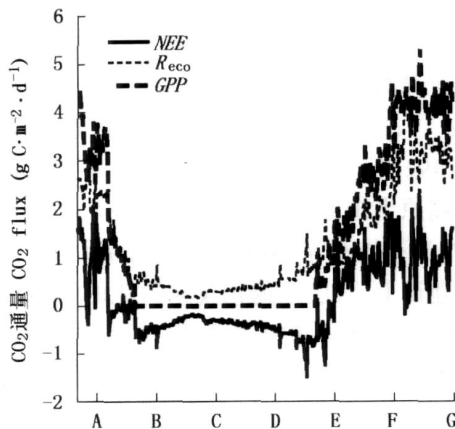


图9 净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换量 (*NEE*)、生态系统呼吸 (*R<sub>eco</sub>*) 和生态系统光合产物 (*GPP*) 的季节变化

Fig.9 Seasonal pattern of daily total gross primary production (*GPP*), net ecosystem exchange (*NEE*), and ecosystem respiration (*R<sub>eco</sub>*)

A~G: 见图 1 See Fig. 1

大量研究表明,青藏高原天然草地的 *R<sub>eco</sub>* 与 5 cm 深处的土壤温度有很显著的指数关系 (Zhao *et al.*, 2005a, 2005b, 2006; Kato *et al.*, 2006; 石培礼等, 2006), 三江源区人工草地的 *R<sub>eco</sub>* 与 5 cm 深处的土壤温度同样遵循指数关系,这是因为地表排放的 CO<sub>2</sub> 主要来源于微生物和植物根系的代谢活动,因此 *R<sub>eco</sub>* 对土壤温度的变化比较敏感 (赵亮等, 2006)。  $Q_{10}$  值是衡量土壤呼吸速率对温度敏感性的一个指

标。本研究发现,三江源区人工草地生态系统生长季  $Q_{10}$  具有较大的变化范围,这个变化趋势在青藏高原东部金露梅灌丛草甸也存在 (Zhao *et al.*, 2006), 可能是由较大的温度变化引起的。整个生长季的  $Q_{10}$  为 1.8, 该值在生态系统  $Q_{10}$  的平均幅度范围是 1.3~3.3 之间 (Ruimy *et al.*, 1995), 接近青藏高原东部金露梅灌丛草甸的 1.63~2.0 (Zhao *et al.*, 2006) 和加拿大北方温带草原的 1.83 (Valentini *et al.*, 1995), 远低于西藏高原草原化嵩草草甸的 3.3 (石培礼等, 2006) 和加利福利亚 Sperate 草原的 4.6 (Valentini *et al.*, 1995)。在非生长季节  $Q_{10}$  为 2.59, 低于青藏高原东部金露梅灌丛草甸的 4.45 (Zhao *et al.*, 2006)。比较不同季节的  $Q_{10}$ , 非生长季节高于生长季节, 这一结果与 Zhao 等 (2006) 报道一致, 因此进一步表明, 青藏高原高寒草地生态系统对升温的响应更加敏感, 全球变暖背景下的气候温暖化会导致该类生态系统更多的有机碳分解释放, 尤其是非生长季节 CO<sub>2</sub> 释放增加可能导致的草地生态系统源/汇效应改变。另外, 已有研究表明,  $Q_{10}$  随着温度升高而降低。非生长季较高的  $Q_{10}$  可能是由非生长季的低温引起的, 在温度比较低的环境中, *R<sub>eco</sub>* 对温度上升的反应更敏感, 致使  $Q_{10}$  增大。

与已报道的草地生态系统相比, 三江源区人工草地生态系统的  $\lambda$  值为  $0.0273 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{ PAR}$ , 介于 C3 草地值中间 (Ruimy *et al.*, 1995), 并且接近于用涡度相关法测得的 C3 草地  $\lambda$  值为  $0.018 \sim 0.025 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{ PAR}$  (Flanagan *et al.*, 2002), 但是低于 Andrew 和 Shashi (2001) 在美国俄克拉荷马州高草草原的  $\lambda$  值 ( $0.0348 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{ PAR}$ )。究其原因可能由于高的海拔、较低的温度、相对偏低的 LAI 引起的, 因为同一种植物在自然条件下测定时, 随海拔升高光合作用和  $\lambda$  值的降低可能与空气中的 CO<sub>2</sub> 分压有关。三江源区人工草地生态系统海拔在 4000 m 以上, 高原环境恶劣, 降雨量少, 温度低, 限制了植物的生长。另外, 本研究发现,  $A_{\text{max}}$  变化与植物生长和叶面积变化趋势是同步, 但是生态系统的  $\lambda$  值变化过程与植物生长和叶面积变化趋势不一致, 最小值出现在草盛期, 而最大值出现在生长初期的 6 月, 这一结果与已有的报道 (石培礼等, 2006) 草盛期的  $\lambda$  值最大结论相反。

三江源人工草地生态系统在碳交换日过程中, *NEE* 并不完全随着 *PAR* 的增加而增大, 当 *PAR* 超过某一值时, *NEE* 随 *PAR* 的增加而降低。发生这种现象的原因: 一方面可能与土壤温度有关。土壤温



度随  $PAR$  增加而增加,由于土壤呼吸与土壤温度呈指数增长,因而此时由于单位时间内呼吸增长量大于吸收量,导致  $NEE$  下降;另一方面可能与水分胁迫有关。在水分胁迫条件下低的叶水势降低了保卫细胞的膨胀,限制了气孔的开张,同时也影响了与光合作用有关的酶的活性,降低了植被与大气之间的  $CO_2$  交换。这种现象出现在青藏高原北部的金露梅灌丛草甸(Zhao *et al.*, 2006),但是在青藏高原北部的矮嵩草草甸没有发现这种现象(Kato *et al.*, 2006)。

青藏高原三江源垂穗披碱草人工草地生态系统  $CO_2$  日最大吸收率和最大呼吸率分别为  $-6.82$  和  $2.95 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与青藏高原天然草地相比,低于当雄草原化草甸  $-8.3 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (石培礼等, 2006)、金露梅灌丛草甸  $-8.22 \sim -10.87 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Zhao *et al.*, 2006) 和矮嵩草草甸  $-10.8 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Kato *et al.*, 2006), 这可能由于三江源区人工草地生态系统群落比较单一,并且  $LAI$  较低引起的;与世界上其它的草地生态系统相比,明显偏小。例如,在北美大草原生态系统中最大  $CO_2$  吸收速率普遍较高,都在  $-20 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,如最高可以分别达到  $-23 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Ham & Knapp, 1998)、 $-27 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Dugas *et al.*, 1999)、 $-30 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Kim & Verma, 1990) 和  $-34 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Verma *et al.*, 1992)。究此原因,可能是这些温带草原植被具有较高的  $LAI$ , 可达  $4 \sim 5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , 且含有  $C_4$  植物成分。高于新西兰的丛生草地  $-5 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Hunt *et al.*, 2002)。最大呼吸速率接近青藏高原当雄草原化草甸的  $2.4 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (石培礼等, 2006), 但低于青藏高原东部的金露梅灌丛草甸的  $4.50 \sim 5.43 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Zhao *et al.*, 2006) 和矮嵩草草甸的  $4.4 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Kato *et al.*, 2004)。二者出现的时间是在地上生长量和  $LAI$  达到最大的季节,即在 8 月达到最大。

许多研究表明,生态系统光合能力与  $PAR$  和  $LAI$  呈现显著的正相关,本研究结果也印证了这一点,日净吸收量随着  $PAR$  和  $LAI$  的增加而逐渐增大,在 7 月末或 8 月初达到最大。随后,随着  $PAR$  和土壤水分的降低,以及地上生物量和  $LAI$  降低,生态系统日净吸收量也随之下降。生态系统的光合能力受  $PAR$  的控制,普遍呈非线性的直角双曲线关

系,但光合潜力的大小,即生态系统的  $A_{\text{max}}$  和 是受  $LAI$  所调节的, $LAI$  的大小决定了光合潜力大小。 $LAI$  高的生态系统,如前面提到的北美大草原温带草地生态系统的  $LAI$  很大,其日  $CO_2$  吸收速率就高。青藏高原东部的高寒草甸  $LAI$  和光合速率也高于本研究结果。青藏高原当雄草原化草甸  $LAI$  小于本研究结果,但是其日最大光合速率高于本研究观察结果。比较这两个生态系统,发现除了  $LAI$  存在差异外,群落组成也存在很大差异,如三江源人工草地的群落比较单一,多样性低,而青藏高原当雄草原化草甸多样性相对较高。可见,生态系统的日最大光合速率除了是受到  $PAR$  和  $LAI$  的综合控制,还可能受到群落多样性的影响,这一点有待于我们做进一步的研究。

三江源区人工草地生态系统的年  $NEE$ , 为  $-49.35 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ , 可见,三江源区人工草地生态系统是一个较强的碳汇。因此,在三江源建人工草地,不但可以解决草地退化问题,而且解决了草原生态系统碳的泄漏并增加碳封存问题。与青藏高原天然草地相比,三江源区人工草地生态系统的碳汇能力低于青藏高原东部金露梅灌丛草甸 ( $58.5 \sim 75.5 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) (Zhao *et al.*, 2006) 和矮嵩草草甸 ( $78.5 \sim 192.5 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) (Kato *et al.*, 2006), 高于青藏高原当雄草原化草甸 ( $-14.84 \sim 9.52 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) (石培礼等, 2006)。因此作者认为,在人工草地的建设上,对已经退化及未退化的天然草地进行保护,加强自然保护区的建设,尽可能依靠自然力恢复轻度退化草场的生态服务功能,对重度退化且不能自然恢复草场和“黑土滩”退化草地进行人工草地重建,在重建人工草地时应注意提高人工草地群落结构的多样性。因此,加强对三江源区人工草地建设,不但可以使我国人工草地的巨大“碳库”在“晚碳贸易”市场中争取更多的碳减排额度,而且可以使我国北方草原尽快走出困境。

## 4 结 论

通过一年的碳收支研究,初步表明青藏高原三江源垂穗披碱草人工草地生态系统是一个碳汇,年固定碳约  $49.35 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ , 从而说明三江源区人工草地的建设,不仅可以固碳,而且可以解决三江源区草-畜矛盾。由于  $LAI$  和群落多样性的综合调节作用,生态系统植物的光合能力和光合效率都较低。夜间  $NEE$  与  $5 \text{ cm}$  的土壤温度呈明显的指数关系,生长季的  $Q_{10}$  小于非生长季的。生态系统  $CO_2$  日最

大吸收率和最大呼吸率分别 - 6.82 和 2.95  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。生长季内昼夜温差大并不利于生态系统的碳获取和碳汇的形成。生态系统的源汇功能受到年降水量、强度和季节分配的影响。

### 参 考 文 献

- Andrew ES, Shashi BV (2001). Year - round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tall grass prairie. *Global Change Biology*, 7, 279 - 289.
- Cheng GD (1999). Glaciology and geocryology of china during the past 40 years: progress and prospects. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 21, 289 - 309.
- Dugas WA, Heuer ML, Mayeux HS (1999). Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93, 121 - 139.
- Flanagan LB, Wever LA, Carson PJ (2002). Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 8, 599 - 615.
- Gu S, Tang YH, Du MY, Kato T, Li YN, Cui XY, Zhao XQ (2003). Short - term variation of CO<sub>2</sub> flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai - Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 108, 4670 - 4679.
- Kato T, Tang YH, Gu S, Cui XY, Hirota M, Du MY, Li YN, Zhao XQ, Oikawa T (2004). Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai - Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 121 - 134.
- Kato T, Tang YH, Gu S, Hirota M, Du MY, Li YN, Zhao XQ (2006). Temperature and biomass influences on interannual changes in CO<sub>2</sub> exchange in an alpine meadow on the Qinghai - Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 12, 1285 - 1298.
- Kim J, Verma SB (1990). Carbon dioxide exchange in a temperate grassland ecosystem. *Boundary - Layer Meteorology*, 52, 135 - 149.
- Ham JM, Knapp AK (1998). Fluxes of CO<sub>2</sub>, water vapor, and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89, 1 - 14.
- Hollinger DY, Kelliher FM, Byers JN, Hunt JE, McSeveny TM, Weir FL (1994). Carbon dioxide exchange between an undisturbed old - growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, 75, 134 - 150.
- Hollinger DY, Goltz SM, Davidson EA, Lee JT, Tu K, Valentine HT (1999). Seasonal patterns and environmental control of carbon dioxide and water vapor exchange in an ecotonal boreal forest. *Global Change Biology*, 5, 891 - 902.
- Hunt JE, Kelliher FM, McSeveny TM, Byers JN (2002). Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 65 - 82.
- Ma YS (马玉寿), Lang BN (郎百宁), Wang QJ (王启基) (1999). Review and prospect of the study on 'black soil type' deteriorated grassland. *Pratacultural Science (草业科学)*, 16(2), 5 - 8. (in Chinese with English abstract)
- Ruimy A, Jarvis PG, Baldocchi DD, Saugier B (1995). CO<sub>2</sub> fluxes over plant canopies and solar radiation: a review. *Advances in Ecological Research*, 26, 1 - 68.
- Shi HL (石培礼), Sun XM (孙晓敏), Xu LL (徐玲玲), Zhang XZ (张宪洲), He YT (何永涛), Zhang DQ (张东秋), Yu CR (于贵瑞) (2006). Experimental study on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in the alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau. *Science in China (Series D) (中国科学 (D 辑))*, 26(Suppl. ), 194 - 203. (in Chinese)
- Valentini R, Gamon JA, Field CB (1995). Ecosystem gas exchange in a California grassland: seasonal patterns and implications for scaling. *Ecology*, 76, 1940 - 1952.
- Verma SB, Kim J, Clement R (1992). Momentum, water vapor, and carbon dioxide exchange at a centrally located prairie site during FIFE. *Journal of Geophysics Research*, 97, 18629 - 18639.
- Wang QJ (王启基), Lai DZ (来德珍), Jing ZC (景增春), Li SX (李世雄), Shi HL (史惠兰) (2005). The present of resource, ecological environment and sustainable development in the source region of yangtze, yellow and yalu tsangpo rivers. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition) (兰州大学学报(自然科学版))*, 41(4), 1 - 7. (in Chinese with English abstract)
- Webb EK, Pearman GI, Leuning R (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transport. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 85 - 100.
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law BE, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223 - 243.

- Zhao L, Li YN, Zhao XQ, Xu SX, Tang YH, Yu GR, Gu S, Du MY, Wang QX (2005a). Comparative study of the net exchange of CO<sub>2</sub> in 3 types of vegetation ecosystems on the Qinghai - Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 50, 1767 - 1774.
- Zhao L, Li YN, Gu S, Zhao XQ, Xu SX, Ru GR (2005b). Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine shrubland meadow during the growing season on the Qinghai - Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 47, 271 - 282.
- Zhao L (赵亮), Xu SX (徐世晓), Li YN (李英年), Tang YH (唐艳鸿), Zhao XQ (赵新全), Gu S (古松), Du MY (杜明远), Yu GR (于贵瑞) (2006). Relations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of *Kobresia humilis* meadows and *Potentilla fruticosa* meadows on the Qinghai - Tibetan Plateau. *Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 26, 133 - 142. (in Chinese with English abstract)
- Zhao L, Li YN, Xu SX, Zhou HK, Gu S, Yu GR, Zhao XQ (2006). Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of an alpine shrubland on the Qinghai - Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 12, 1940 - 1953.
- Zhou XM (周兴民) (2001). *The Kobresia Meadow of China* (中国嵩草草甸). Science Press, Beijing. (in Chinese)

责任编辑: 杨 劼 责任编辑: 张丽赫