

# 极端干旱条件下锡林河流域羊草草原净生态系统碳交换特征

黄祥忠<sup>1</sup> 郝彦宾<sup>1,2</sup> 王艳芬<sup>1,2\*</sup> 周小奇<sup>1</sup> 韩喜<sup>3</sup> 贺俊杰<sup>3</sup>

(1 中国科学院研究生院生物系, 北京 100049) (2 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

(3 内蒙古锡林郭勒盟牧业气象试验站, 锡林郭勒 026000)

**摘要** 采用涡度相关法对 2005 年生长季内蒙古锡林河流域羊草(*Leymus chinensis*)草原净生态系统交换(Net ecosystem exchange, *NEE*)进行了观测。观测结果表明, 作为生长季降雨量仅有 126 mm 的干旱年, 锡林河流域羊草草原生态系统受到强烈的干旱胁迫, 其净生态系统碳交换的日动态表现为具有两个吸收高峰, 净吸收峰值出现在 8:00 和 18:00 左右。最大的 CO<sub>2</sub> 吸收率为  $-0.38 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在 6 月底, 与丰水年相比生态系统最大 CO<sub>2</sub> 吸收率下降了 1 倍。就整个生长季而言, 不管是白天还是晚上 2005 年都表现为净 CO<sub>2</sub> 排放, 整个生长季 CO<sub>2</sub> 净排放量为  $372.56 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ , 是一个明显的 CO<sub>2</sub> 源。土壤含水量和土壤温度控制着生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的大小, 尤其是在白天, CO<sub>2</sub> 通量和土壤含水量的变化呈现出显著的负相关关系, 和土壤温度表现为正相关关系。

**关键词** 极端干旱 涡度相关法 净生态系统交换 羊草草原

## IMPACT OF EXTREME DROUGHT ON NET ECOSYSTEM EXCHANGE FROM *LEMUS CHINENSIS* STEPPE IN XILIN RIVER BASIN, CHINA

HUANG Xiang-Zhong<sup>1</sup> HAO Yan-Bin<sup>1,2</sup> WANG Yan-Fen<sup>1,2\*</sup> ZHOU Xiao-Qi<sup>1</sup> HAN Xi<sup>3</sup> HE Jun-Jie<sup>3</sup>

(1 Department of Biology, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

(3 Inner Mongolia Xilingole League Pasture Meteorological Research Station, Xilingole, Inner Mongolia 026000, China)

**Abstract Background and Aims** Many reports on global change have predicted major change in the temporal and spatial pattern of precipitation, which may have significant effects on temperate grasslands in arid and semi-arid regions. The responses of grasslands to environmental changes, especially amount and timing of precipitation, can be very different. Some studies indicate that drought may result in degradation of ecosystem function in *NEE*, even changing the ecosystem from a carbon sink to a carbon source.

**Methods** In order to quantify net ecosystem carbon exchange in *Leymus chinensis* steppe and its response to precipitation, we used the eddy covariance technique to measure carbon dioxide flux during the 2005 growing season in Xilin River Basin of Inner Mongolia Plateau in 2005. Only 126 mm precipitation fell during this growing season, far less than average; therefore, the steppe was in an extreme drought condition.

**Key Results** The daily pattern of CO<sub>2</sub> uptake in this drought year was consistent bimodal, with peaks at 8:00 and 18:00. In normal years, the bimodal pattern occurred only when soil water stress occurred. Maximum half-hourly average CO<sub>2</sub> uptake was  $-0.38 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  in 2005, which was half that in typical growing seasons. Moreover, the ecosystem was a CO<sub>2</sub> source most of the growing season, releasing about  $0.05 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  at nighttime.

**Conclusions** The seasonal pattern of CO<sub>2</sub> uptake closely followed that of aboveground biomass and was strongly affected by soil temperature and soil water content. The ecosystem emitted  $372.56 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$  during the growing season in 2005. The partial explanation is that much plant litter accumulated on the ground surface due to enclosure of the grassland since 1979, and this litter decomposed and resulted in a net release of CO<sub>2</sub> to atmosphere.

**Key words** Extreme drought, Eddy covariance, CO<sub>2</sub> flux, *Leymus chinensis* steppe

收稿日期: 2006-03-31 接受日期: 2006-06-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2002cb412501)

感谢中国科学院内蒙古草原生态系统定位站提供的 1982~2000 年降雨数据和白音锡勒牧场气象站提供的 1970~1982 年的降雨数据

\* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: yfwang@gucas.ac.cn

E-mail of the first author: huangxiangz@mails.gucas.ac.cn

草原是世界上分布最广的植被类型,也是陆地-大气之间碳、能量和水分交换重要的生态系统(Hunt *et al.*, 2002)。与其它生态系统类型相比,草地生态系统表现出较大的年际间总生产力的波动,这使得在确定草原生态系统作为碳源或碳汇方面存在较大的不确定性(Kim & Verma, 1990; Baldocchi, 2003)。同时,草地生态系统对环境要素变化的响应存在着非常大的不对称性,特别是对年度降雨量和降雨的时间分布的响应(Ojima *et al.*, 1993; Goulden *et al.*, 1996)。在这些要素中,降水作为草原植被形成和土壤发育的关键因子,其变化将对草原生态系统碳的源汇功能产生重要影响。许多的气候模型预测本世纪全球降雨变化会更加剧烈,其中包括极端天气的增加、低频率降雨事件的增加和干旱早期的延长,这将会对生态系统产生更深远的影响(Weltzin *et al.*, 2003),尤其是草原生态系统的响应尤为强烈而迅速(Fay *et al.*, 2003)。因此,草原生态系统对未来全球气候变化的响应值得引起足够的重视。

净生态系统交换(Net ecosystem exchange, *NEE*)是生态系统光合化作用与呼吸作用之间的平衡。在影响草原生态系统 *NEE* 诸多因子中,降雨量及其频度变化是一个重要的驱动因子,主要通过影响草原生态系统的光合作用(表现为生物量或者生产力)或者呼吸作用(包括植物呼吸和土壤呼吸)来影响 *NEE*。已有研究表明,草原生产力的大小和降雨量有很好的正相关关系(Xiao *et al.*, 1996),而干旱导致生产力的下降(杜占池和杨宗贵, 1990)和土壤呼吸的降低(李明峰等, 2004)。因此,有学者指出干旱能够引起生态系统 *NEE* 的降低,而且还可能使生态系统由碳汇变为碳源(Hunt *et al.*, 2002; Meyers, 2001)。

对锡林河流域草原生态系统碳相关过程与水分的不关系的研究很多,但多集中在单一过程,如土壤呼吸(李明峰等, 2004; 陈全胜等, 2003, 2004)和光合作用(杜占池和杨宗贵, 1988, 1989, 1990; 崔骁勇等, 2000)等。这些过程目前还不足以对 *NEE* 进行准确估算,缺乏系统数据来阐明其变化特征及控制机制,尤其对该地区经常出现的干旱胁迫与 *NEE* 的关系缺乏定量描述。涡度相关技术使精确的测定净生态系统交换成为可能,并且对评价全球陆地生态系统碳汇/碳源的特征起了非常大的作用(Valentini *et al.*, 2000)。本研究以涡度相关技术所获得的通量数据和生物量等野外观测数据为基础,分析锡林河流域羊草草原生态系统 *NEE* 对极端干旱胁迫的响

应,希望能为内蒙古草原生态系统碳收支估算和相关碳模型参数修正提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域自然概况

研究地点(43°32' N, 116°40' E)位于内蒙古锡林郭勒盟锡林河流域。这里发育了欧亚大陆典型草原中最具代表性的羊草(*Leymus chinensis*)草原,该类型草原是锡林河流域面积最大分布最广的草原。气候属大陆性半干旱温带草原气候,年平均气温 -0.4 °C,年降水量为 350 ~ 450 mm,其中 70% 集中于 7、8 月份。冬春寒冷干燥多风,夏秋温暖湿润,无霜期仅为 90 ~ 110 d。地带性土壤为栗钙土,有典型栗钙土和暗栗钙土两个亚类。以羊草、小禾草为主的群落和以大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*S. krylovii*)和蒿类为主的群落,构成典型草原的主体。建群种为羊草、优势种为冰草(*Agropyron cristatum*)、大针茅、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和寸草苔(*Carex duriuscula*)。

在 2005 年整个生长期(5 ~ 9 月),降雨量仅为 126 mm,远低于多年平均值,从 5 到 9 月,0 ~ 0.2 m 土壤含水量由  $0.16 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  下降到  $0.11 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ,土壤严重干旱(图 1),植被长期处于枯黄状态。

### 1.2 研究方法

通量观测塔位于中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站 1979 年围封的羊草样地(姜恕, 1985)。从 2003 年 5 月开始连续的观测,并用以下公式计算  $\text{CO}_2$  通量:

$$F_c = \frac{w'}{\rho_c'} = \frac{1}{T} \int_1^T w_i \rho_c' dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \rho_{ci} \quad (1)$$

式中,  $F_c$  为  $\text{CO}_2$  通量,  $w'$  为瞬时垂直风速脉动,  $\rho_c'$  为空气  $\text{CO}_2$  脉动量。  $T$  为取样时间,通常取 30 ~ 60 min,  $T/N$  为取样频率,通常取 10 Hz。测量系统主要包括一套开路涡度相关系统和一套常规气象要素测量系统。涡度相关系统主要测量离地面 2.5 m 高的  $\text{CO}_2$  通量、潜热和感热通量,包括一个开路  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  远红外  $\text{CO}_2$  气体分析仪(LI-7500, LI-COR, Lincoln, NE, USA)和一个三维超声波测风仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc, MS, USA)。采样频率是 10 Hz,每 30 min 平均值记录在数据采集器中(CR5000, CSI)。常规气象要素测定系统包括安装在离地面 1.5 m 的辐射测定仪(CNR-1, Kipp & Zonen, NY, USA)和光量子测定仪(LI90SB, LI-COR, Lincoln, NE, USA),用于测量净辐射和光合有效辐射。温

度、相对湿度、土壤温度、土壤含水量和降水量等要素也同时监测。每 30 min 输出一组平均值记录在数据采集器( CR23X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA )。

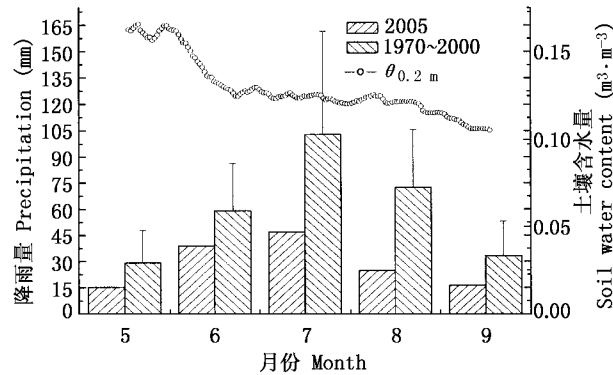


图1 2005 年生长季降雨量与多年平均(1970~2000)的比较及 0.2 m 处土壤含水量的变化

Fig.1 Precipitation of the growing season in 2005 and means of 1970-2000 and the variation in soil water content in 0.2 m

### 1.3 数据处理与分析

采用传统的三次坐标轴旋转对测定的 30 min  $\text{CO}_2$  通量数据进行了校正,以消除地形倾斜对通量计算的影响(Wilczak *et al.*, 2001),同时也校正了由于空气水热传输引起的  $\text{CO}_2$  和水汽密度波动造成的通量计算误差(Webb *et al.*, 1980)。剔除摩擦风速临界值  $u^*$  (本文选择  $0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 以下的夜间观测数据,以保证涡度相关测定处于强湍流的条件下,消除在夜间大气较稳定时,涡度相关技术可能对净生态系统  $\text{CO}_2$  交换量的低估。由于降雨、仪器标定和故障等原因必然会导致数据缺失和一些异常点的出现。通量数据经筛选后剩余的有效数据约占总数据量的 80%。

短时段(小于 2 h)的缺失数据采用线性内插法进行插补,较长时段的缺失数据插补主要采用了平均日变化方法(Falge *et al.*, 2001; Baldocchi, 2003),该方法一般取白天 14 d,夜间 7 d 的步长时偏差最小。定义  $NEE$  正值为  $\text{CO}_2$  净释放,负值为净吸收。

对插补后的数据划分白天(总辐射  $\geq 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )和晚上(总辐射  $< 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )。选取每个月晴朗无云天气下的数据作代表,分析整个生长季  $NEE$  和其它变量的日动态变化,并且把白天和晚上每 30 min 的通量进行积分求和,分别代表生态系统白天和晚上的  $\text{CO}_2$  累积吸收量和累积释放量。

## 2 研究结果

### 2.1 干旱胁迫下 $NEE$ 的变化特征

锡林河流域羊草草原净生态系统交换日变化表现为具有两个  $\text{CO}_2$  吸收高峰(图 2),一个出现在 8:00 左右( $NEE_{\max} = -0.13 \text{ mg CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),另一个出现在 18:00 左右,在多数时间生态系统是释放而非吸收  $\text{CO}_2$ 。从季节动态看,各月  $NEE$  的振幅并没有明显的区别。虽然在 6 月初有微弱的  $\text{CO}_2$  吸收,但直到 8 月才真正出现生态系统  $\text{CO}_2$  净吸收(图 3)。从 9 月初生态系统又开始释放  $\text{CO}_2$ ,成为净  $\text{CO}_2$  排放源。夜间  $\text{CO}_2$  的释放表现出两个释放高峰,一个是在 7 月,另一个是在 8 月,最大的释放值为  $4.0 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

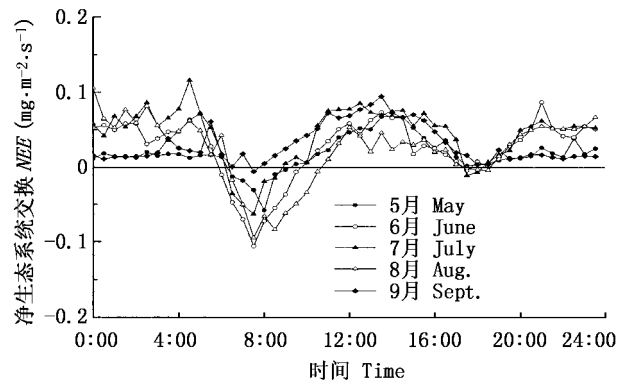


图2 2005 年生长季内蒙古羊草草原净生态系统交换( $NEE$ )日变化(每月选取有代表性的 1 天)

Fig.2 The diurnal change of net ecosystem exchange ( $NEE$ ) in 2005's growing season (we choose a typical day's data for each month)

从生态系统  $\text{CO}_2$  通量月积分值看,由于生态系统在生长季处于严重的干旱条件下,生态系统从 5 到 9 月都在排放  $\text{CO}_2$ ,最大的排放值(白天+晚上)为  $115.50 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mon}^{-1}$ ,出现在 7 月。整个生长季  $\text{CO}_2$  净排放量为  $372.56 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ ,是一个明显的  $\text{CO}_2$  源(图 4)。

### 2.2 $NEE$ 与地上生物量

内蒙古草原植物一般在 4 月中旬前后开始生长,干物质从植物返青开始积累,并随植物生长发育节律和气温升高、降雨量的增加而逐渐增大。净生态系统碳交换和地上生物量呈正相关关系(图 5),地上生物量越大,净生态系统碳交换越多(即  $NEE$  的值越小)。虽然由于 2005 年较少的降雨量引起生态系统整个生长季都在排放  $\text{CO}_2$ ,但是在生物量达到最大时,生态系统的净  $\text{CO}_2$  吸收也达到了最大

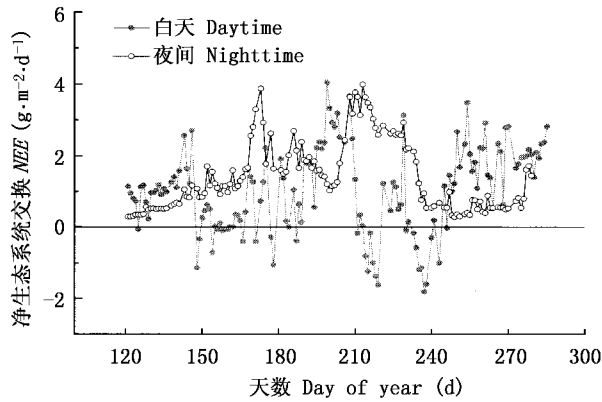


图3 2005年生长季内蒙古羊草草原净生态系统交换(NEE)季节变化

Fig.3 The seasonal change of net ecosystem exchange (NEE) in 2005's growing season

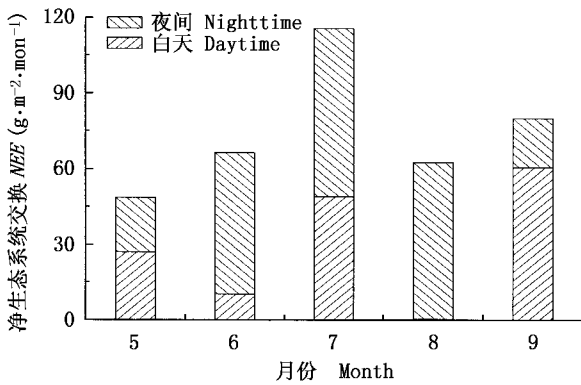


图4 2005年生长季CO<sub>2</sub>通量月累积变化

Fig.4 The variation in the accumulative monthly NEE in 2005's growing season  
NEE: Net ecosystem exchange

( $-1.8 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )

### 2.3 NEE 与环境因子

光合有效辐射(Photosynthetic active radiation, PAR)是控制光合作用的主要因素之一,因此 PAR 的大小也强烈影响 NEE 的大小。日出后(6:00 左右),随着 PAR 的增加,光合作用逐渐增强,草原 NEE 逐步从净排放(正值)转为净吸收(负值)。8:00 左右达到一天的最大净吸收( $-0.06 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。但随着 PAR 的继续增加(12:00 达到一天的最大值),生态系统在 10:00 左右又开始排放 CO<sub>2</sub>,13:30 达到一天最大的净排放值( $0.07 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。随后排放又逐渐下降,到 18:00 左右 NEE 接近于 0,NEE 的最大净吸收与 PAR 的最大值出现的时间并不一致(图 6b)。在生长季无论是白

天还是晚上,NEE 与温度之间都具有很好的相关性,且达到了显著水平(白天: $R = 0.88, n = 23, p < 0.01$ ;晚上: $R = -0.70, n = 25, p < 0.01$ )。但是白天表现为正相关,晚上则表现为负相关。也就是说白天温度越高,NEE 的值越大,即生态系统吸收 CO<sub>2</sub> 的能力越低。夜间的 NEE 为生态系统 CO<sub>2</sub> 的净释放值,NEE 和温度的负相关说明温度越高,CO<sub>2</sub> 排放量越低(图 6a)。与温度对 NEE 的影响相反的是,NEE 和土壤含水量的关系在白天为负相关( $R = -0.71, n = 23, p < 0.01$ ),而在晚上为正相关( $R = 0.56, n = 25, p < 0.05$ )。这说明:白天在光照充足的条件下,土壤含水量越高时,生态系统固定碳的能力就越大(NEE 值越小);而夜间土壤含水量越高,CO<sub>2</sub> 净释放量则越大。在生长季极端干旱的条件下,锡林河流域羊草草原夜间的 NEE 的净排放稳定在  $0.05 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  左右(图 6)。

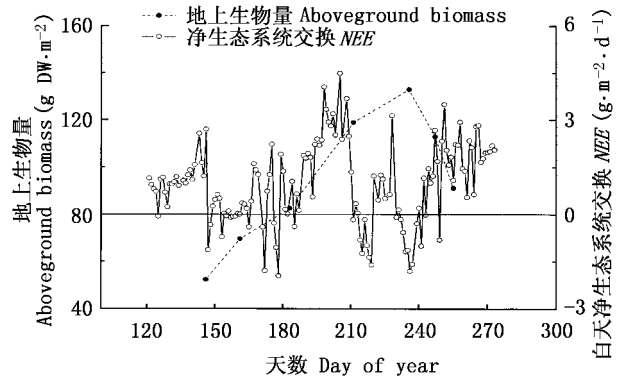


图5 2005年地上生物量和白天净生态系统交换的关系

Fig.5 The relationship between aboveground biomass and net ecosystem exchange of daytime(NEE) in 2005's growing season

### 3 讨论

一般情况下,NEE 的日变化是在 PAR 达到最大时出现吸收的最大值。徐世晓等(2004)与 Sims 和 Bradford(2001)分别对青藏高原的高寒灌丛和美国俄克拉荷马州的混合草原生长季不同时间段的 CO<sub>2</sub> 通量观测表明,两个不同草原生态系统 CO<sub>2</sub> 通量存在明显的日变化规律:8:00 以后逐步增加,12:00 左右达到吸收高峰,夜间 CO<sub>2</sub> 排放稳定在一定值。但是干旱可能会改变这种规律,如 Hunt 等(2002)对生长季仅有 45 mm 降雨条件下的新西兰簇丛草原的研究就表明,簇丛草原在 12:00 以后也存在着向大气排放 CO<sub>2</sub> 的现象,而且一直持续到第二天的黎明,也就

是说在极端干旱条件下新西兰簇丛草原只有在 8:00~9:00 存在着  $\text{CO}_2$  吸收。羊草草原在 2005 年生长季极端干旱的情况下和新西兰簇丛草原具有相似的  $NEE$  日变化规律,在 6:00~12:00 为净  $\text{CO}_2$  吸收,12:00 以后开始排放  $\text{CO}_2$ ,但是到 18:00 左右有轻微的吸收,然后一直到第二天早晨  $\text{CO}_2$  净排放量稳定在一定值。

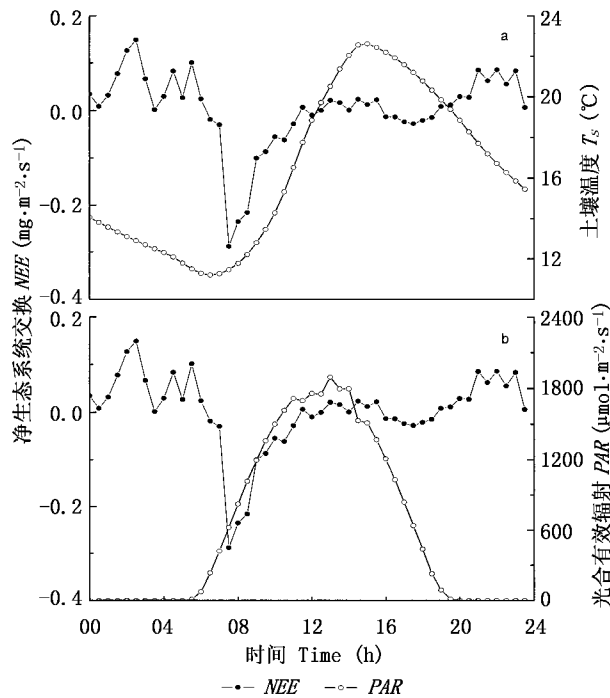


图6 2005年羊草草原生长季(8月18日)净生态系统交换和土壤温度( $T_s$ )、光合有效辐射(PAR)的关系

Fig.6 The relationship between net ecosystem exchange ( $NEE$ ) and soil temperature ( $T_s$ ), photosynthetic active radiation ( $PAR$ )

$\text{CO}_2$  通量和生物量具有很强的正相关关系(Xu & Baldocchi, 2004; Sims & Bradford, 2001),草原生态系统的生物量控制着碳通量交换的大小,最大的  $\text{CO}_2$  吸收率和最大的生物量累积率相吻合(Dugas *et al.*, 1999; Kim & Verma, 1990)。Xiao等(1996)曾经报道,在内蒙古羊草草原生产力的大小和降雨量有很好的正相关关系,大的降雨量产生更大的生产力,也就是更大的光合生产能力(杜占池等,1990)。在2005年生长季的降雨量只有126 mm,远远低于同期的平均值(315.1 mm),特别是在植物生长盛期的8月降雨量只有25.1 mm,这使得羊草草原2005年生长季的最大的净  $\text{CO}_2$  吸收值仅为  $-0.38 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高于新西兰草原( $-0.22 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和巴西塞拉多草原在旱季时的最大  $\text{CO}_2$  通量

( $-0.19 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , Miranda *et al.*, 1997)。但与2004年丰水年(生长季降雨量为344 mm)相比较,羊草草原最大净  $\text{CO}_2$  吸收值降低了近1倍(2004,  $NEE_{\text{max}} = -0.68 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。在2005年,虽然羊草草原生长季的降雨量偏少,但是最大的  $\text{CO}_2$  通量值仍然出现在地上生物量最大的时期。

锡林河流域羊草草原在2005年白天的  $\text{CO}_2$  通量和土壤含水量正相关,也就是说随着土壤含水量的下降,  $NEE$  由负变正,生态系统排放  $\text{CO}_2$ ,表明土壤水分明显的控制了  $NEE$  的动态变化。其原因可能是在2005年生长季草原生态系统的水热不同步,造成植物在白天的 高温下受到水分胁迫的作用,控制气孔开关的保卫细胞膨胀的降低,引起气孔关闭,并且影响了光合酶的活性(杜占池和杨宗贵,1990; Kim & Verma, 1990)。从而限制了  $\text{CO}_2$  交换,使得一天中随着时间的推移  $NEE$  先由负变正,又变为负。

涡度相关法测定的夜间  $\text{CO}_2$  通量实际上就是生态系统呼吸,包括土壤呼吸和植物呼吸。土壤呼吸与温度和水分的关系在锡林河流域已有若干研究,但其内在机理尚未明晰。董云社等(2000)和杜睿等(2001)利用静态箱法研究了该区  $\text{CO}_2$  通量的日变化和季节变化,并且分析了  $\text{CO}_2$  通量和温度与土壤水分的关系,指出它们之间具有很好的指数关系。李明峰等(2004)研究在极端干旱条件下  $\text{CO}_2$  通量的变化表明,羊草草原的  $\text{CO}_2$  通量比正常年份降低了80%。陈全胜等(2004)在锡林河流域的研究表明,在土壤水分降低的情况下,土壤呼吸和温度敏感性( $Q_{10}$ )都存在着明显的降低。用涡度相关法测得的夜间的  $\text{CO}_2$  通量和静态箱法相比较的优点是对植物的影响较少,而且是连续观测。在2005年,土壤呼吸与温度表现为负相关,很可能是在出现土壤水分胁迫的情况下,尤其是长期的土壤干旱,加上高的空气和土壤温度影响了植物的生理功能,抑制了土壤微生物的活性或者使呼吸酶钝化。从而引起土壤呼吸随着土壤温度的增加而出现降低的现象。另外,观测地点位于围栏封育25年的草场内,没有放牧和割草的影响,地面上枯落物较厚,这可能是造成土壤呼吸与土壤温度之间的相关关系发生变化的原因。同时,大量枯落物的存在可能会释放出大量的  $\text{CO}_2$ ,使得羊草草原作为碳源而存在。而内蒙古草原普遍处于放牧条件下,地表枯落物很少,因放牧踩踏植物的生长状况也不一样,在推广应用羊草草原的结论时应该注意这点。

## 参 考 文 献

- Baldocchi DD (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystem: past, present and future. *Global Change Biology*, 9, 479 – 492.
- Chen QS(陈全胜), Li LH(李凌浩), Han XG(韩兴国), Yan ZD(阎志丹), Wang YF(王艳芬) (2004). Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 24, 831 – 836. (in Chinese with English abstract)
- Chen QS(陈全胜), Li LH(李凌浩), Han XG(韩兴国), Yan ZD(阎志丹), Wang YF(王艳芬), Yuan ZY(袁志友) (2003). Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica(植物生态学报)*, 27, 202 – 209. (in Chinese with English abstract)
- Cui XY(崔晓勇), Du ZC(杜占池), Wang YF(王艳芬) (2000). Photosynthetic characteristics of a semi-arid sandy grassland community in Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica(植物生态学报)*, 24, 541 – 546. (in Chinese with English abstract)
- Dong YS(董云社), Zhang S(章申), Qi YC(齐玉春), Chen ZZ(陈佐忠), Geng YB(耿元波) (2000). The synchronous measurement and diurnal change of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> over a typical steppe in Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin(科学通报)*, 45, 318 – 322. (in Chinese)
- Dugas WA, Heuer ML, Mayeux HS (1999). Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93, 121 – 139.
- Du R(杜睿), Wang GC(王庚辰), Lu DR(吕达仁), Kong QX(孔琴心), Liu GR(刘广仁), Wan XW(万小伟), Zhang B(张斌), Wang YF(王艳芬), Ji BM(季宝明) (2001). A study of chamber method for in-site measurements of greenhouse gases emissions from grassland. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(大气科学)*, 25, 61 – 70. (in Chinese with English abstract)
- Du ZC(杜占池), Yang ZG(杨宗贵) (1988). A research on internal cause of photosynthetic reduction during midday period in *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* under drought soil condition. *Research on Grassland Ecosystem(草原生态系统研究)*, 2, 82 – 92. (in Chinese with English abstract)
- Du ZC(杜占池), Yang ZG(杨宗贵) (1989). The reasons of midday photosynthetic depression in *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* under sufficient moisture in the soil. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica(植物生态学与地植物学学报)*, 13, 106 – 113. (in Chinese with English abstract)
- Du ZC(杜占池), Yang ZG(杨宗贵) (1990). Reasons for midday photosynthetic depression for *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis*. *Reports from the Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station of Academia Sinica(中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站报告)*. Science Press, Beijing, 181 – 185. (in Chinese with English abstract)
- Falge E, Baldocchi DD, Olson R (2001) Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 43 – 69.
- Fay PA, Carlisle JD, Knapp AK, Blair JM, Collins SL (2003). Productivity responses to altered rainfall patterns in a C<sub>4</sub>-dominated grassland. *Oecologia*, 137, 245 – 251.
- Goulden, ML, Munger JW, Fan SM (1996). Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability. *Science*, 271, 1576 – 1578.
- Hunt JE, Kelliher FM, McSeveny TM, Byers JN (2002). Evapotranspiration and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 11, 65 – 82.
- Jiang S(姜恕) (1985). An introduction on the Inner Mongolia grassland ecosystem research station, academia sinica. *Reports from the Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station of Academia Sinica(中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站报告)*. Science Press, Beijing, 1 – 11. (in Chinese with English abstract)
- Kim J, Verma SB (1990). Carbon dioxide exchange in a temperate grassland ecosystem. *Boundary-Layer Meteorology*, 52, 135 – 149.
- Li MF(李明峰), Dong YS(董云社), Qi YC(齐玉春), Geng YB(耿元波) (2004). Impact of extreme drought on the fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from temperate steppe ecosystems. *Resources Science(资源科学)*, 26(3), 89 – 95. (in Chinese with English abstract)
- Meyers TP (2001). A comparison of summertime water and CO<sub>2</sub> fluxes over rangeland for well watered and drought conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 205 – 214.
- Miranda AC, Miranda HS, Lloyd J, Grace J, Francey RJ, McIntyre JA, Meir P, Riggan P, Lockwood R, Brass J (1997). Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant, Cell and Environment*, 20, 315 – 328.
- Ojima DS, Dirks BOM, Glenn EP, Owensby CE, Scurlock JO (1993). Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world. *Water, Air, Soil Pollution*, 70, 95 – 109.
- Sims PL, Bradford JA (2001). Carbon dioxide fluxes in a southern

- plains prairie. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109, 117 – 134.
- Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 404, 861 – 865.
- Webb EK, Pearman GI, Leuning R (1980). Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 85 – 100.
- Weltzin JF, Loik ME, Williams SD, Fay PA (2003). Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 53, 941 – 952.
- Wilczak JM, Oncley SP, Stage SA (2001). Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 99, 127 – 150.
- Xiao XM, Jiang S, Wang YF, Ojima DS, Bonham CD (1996). Temporal variation in aboveground biomass of *Leymus chinense* steppe from species to community levels in Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Vegetatio*, 123, 1 – 12.
- Xu LK, Baldocchi DD (2004). Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. *Agriculture and Forest Meteorology*, 123, 79 – 96.
- Xu SX(徐世晓), Zhao XQ(赵新全), Li YN(李英年), Zhao L(赵亮), Cao GM(曹广明), Tang YH(唐艳鸿), Gu S(古松), Wang QX(王勤学), Du MY(杜明远) (2004). Carbon dioxide exchange during growing season and dormant season of an alpine shrub on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science in China Ser. D(中国科学 D 辑)*, 34(Suppl. II), 118 – 124.

责任编辑: 郭 柯 责任编辑: 张丽赫