中国科学: 地球科学 2012 年 第 42 卷 第 5 期: 711 ~ 722
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

半干旱区草原生态系统的碳交换特征

杜群[①②], 刘辉志[①*], 冯健武[①②], 王雷[①②], 黄建平[③], 张武[③], Christian BERNHOFER[④]

① 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;
② 中国科学院研究生院, 北京 100049;
③ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000;
④ Institute of Hydrology and Meteorology, Dresden University of Technology, Dresden 01737, Germany
* 联系人, E-mail: huizhil@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2011-05-04; 接受日期: 2011-07-13
国家重点基础研究发展计划(编号: 2010CB951801, 2006CB400501)和国家自然科学基金创新群体项目(批准号: 41021004)资助

摘要 利用 2007~2008 年内蒙古锡林浩特羊草草原(1979 年开始围封, 简称 UG79 站)、甘肃黄土高原草原(SACOL 站)以及吉林半干旱通榆退化草原(TY 站)三个站的涡动相关法取得的观测资料, 分析了半干旱区不同地点草原生态系统的碳交换特征及其主要环境影响因子. 2007 年 UG79 站和 TY 站降水均偏少(与气候平均年降水量相比); 特别是 TY 站, 2007 年降水不足多年平均降水量一半; SACOL 站 2007 年降水基本正常, 2008 年降水偏少. 净碳吸收速率月平均日变化表明, TY 站平均净碳吸收速率较高, 其次为 UG79 站, SACOL 站平均净碳吸收速率较低; 但 SACOL 站净碳吸收过程持续时间较长. UG79 站两年间净碳收过程相似, 净碳吸收作用均在生长季(5~9 月)6~8 月份较明显, 2008 年 8 月最大净碳吸收速率接近 0.08 mg C m^{-2} s^{-1}; SACOL 站 2007 年净碳吸收速率高于 2008 年, 2007 年 9 月最大净碳吸收速率接近 0.07 mg C m^{-2} s^{-1}. TY 站 2007 年净碳吸收作用持续时间较短, 只在生长季 7~8 月份表现出明显的净碳吸收作用; 2008 年净碳吸收速率较高, 最大净碳吸收速率接近 0.12 mg C m^{-2} s^{-1}. 三个站点生态系统呼吸受土壤温度和土壤水分共同影响. SACOL 站和 UG79 站 2007~2008 年生长季期间均表现为碳库作用. UG79 站两年间生长季累积净碳交换总量分别为–68, –50 g C m^{-2}; SACOL 站两年间累积净碳交换总量分别为–109, –55 g C m^{-2}. TY 站 2007, 2008 年累积净碳交换总量分别是 0.32, –73 g C m^{-2}, 分别表现为碳源和碳汇功能. 生长季有效降水开始的时间、总降水量及其时间分布决定了半干旱区草原生态系统净碳吸收功能和净碳吸收作用持续的时间.

关键词
半干旱区
草原生态系统
碳交换通量
涡动相关法

中纬度半干旱草原是全球陆地生态系统的重要类型, 也是中国主要的地表类型之一[1]. 大陆性温带半干旱典型草原生态系统约占中国草原面积的 10.5%[2]. 中纬度半干旱草原属于气候-生态系统过渡带, 对气候变化和人类活动响应很敏感[3]. 在半干旱地区, 过度放牧和开垦农田已经造成草原退化和荒

英文引用格式: Du Q, Liu H Z, Feng J W, et al. Carbon dioxide exchange processes over the grassland ecosystems in semiarid areas of China. Sci China Earth Sci, 2012, 55: 644–655, doi: 10.1007/s11430-011-4283-1

漠化[4]. 土地利用方式的改变已经影响到陆地生态系统的碳循环和水循环过程, 生态系统物质和能量交换过程的改变对区域和全球气候变化产生重要负反馈[5,6]. 中国北方半干旱地区面积广阔, 其地表通量的总体贡献不仅对全球气候和大气环流的变化有较重要的影响, 而且对东亚季风环流和西北干旱气候的形成也有不可忽视的作用[7].

目前长期的碳通量研究主要以森林生态系统较多, 如温带落叶阔叶林[8]、热带雨林[9]和北方针叶林[10,11]等. 关于草原生态系统碳交换过程的报道多集中在地中海草原[12]、高草草原[13]、热带稀树大草原[14]等. 地中海草原在不同季节, 草原生态系统的碳汇和碳源功能会发生转变, 草原生态系统总初级生产力(GPP)的季节变化与叶面积指数有密切关系, 土壤微生物呼吸与降水关系密切, 在降水后生态系统的呼吸作用往往出现跳跃, 特别是在有凋落物的干旱季节尤为明显[12]. 在地中海草原, 生长季有效降水开始的时间比降水量对草原 GPP 和 NEE(净碳交换速率)的影响更显著[12]. 在加拿大北方温带草原, 土壤湿度是影响草原生态系统碳吸收能力最重要的生态因子, 植被光合作用与叶面积指数和土壤 N 含量显著相关[15]. 在不同放牧条件下的内蒙古半干旱草原, 土壤水分状况是影响草原生态系统 CO_2 交换的重要因子; 随着土壤湿度的减小, 羊草和冬季放牧观测点的 CO_2 交换都有由 CO_2 的吸收向释放转变的趋势[16]. 但对于半干旱地区不同地点草原生态系统净碳交换过程的特征及其主要控制因子仍有待深入研究.

本文基于 2007~2008 年内蒙古锡林浩特 79 围封羊草草原样地、兰州大学黄土高原半干旱气候与环境观测站草原以及吉林通榆观测实验站退化草原生态系统涡动相关法取得的观测资料, 分析中国半干旱区不同地点草原生态系统净碳交换速率的时空变化, 探讨半干旱区草原生态系统碳交换过程的不同时间尺度上的主要控制因子.

1 观测站点及资料处理

1.1 观测站点

本文选取的三个通量站点均属于半干旱区草原生态系统, 观测站点的情况介绍如下:

内蒙古锡林浩特 79 围封样地(UG79 站)位于内蒙古锡林郭勒盟锡林河流域(43°33′N, 116°40′E), 平均海拔 1200 m. 气候类型属于大陆性温带半干旱草原气候, 四季分明. 年平均气温–0.4℃, 1 和 7 月是当地最冷和最热的月份. 年平均降雨量 350 mm 左右, 降水多集中在 6~8 月份. 主导风向为西南风, 年平均风速 4~5 m s^{-1}. 主要土壤类型是栗钙土, 腐殖层厚度一般在 30~45 cm 之间, 有机质含量 2.0%~4.0%之间. 下垫面植被以抗低温的旱生草本植物区系为主导成分, 优势物种是旱生根茎型禾草羊草(*Leymus chinensis*), 其次分别为大针茅(*Stipa grandis*)、潜草(*Agropyron cristatum*)和冰草(*Cleistogenes squarrosa*)等旱生密丛禾草, 草丛高度约 50~60 cm[16].

兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL 站)位于黄土高原的半干旱地区(35°57′N, 104°08′E), 海拔 1961 m, 气候类型属于温带半干旱大陆性季风气候. 年平均气温为 6.7℃, 1 月平均气温为–8℃, 7 月平均气温为 19℃. 平均年降雨量 381.8 mm, 8 月份降雨量最大, 年平均蒸发量 1528.5 mm, 相对湿度 63%. 全年盛行东南风和西北风, 年平均风速约 1 m s^{-1}. 土壤类型为第四纪风蚀黄土、灰钙土, 下垫面属于典型的黄土高原地貌, 下垫面植被为天然荒漠草原, 优生植被为多年生草本长芒草, 伴生植被为赖草和冷蒿等[17].

通榆退化草原观测实验站(TY 站)位于吉林省白城市通榆县行政地域内(44°25′N, 122°52′E). 实验站处在冲积平原区, 平均海拔高度为 184 m, 实验区地形非常平坦. 年平均气温 5.1℃. 实验区平均年降水量 404.3 mm, 生长季(5~9 月)降水占到全年降水量的 89%, 年蒸发量 1762.9 mm, 相对湿度 58%. 年平均盛行风 SSW 为 4.2 m s^{-1}. 退化草原下垫面地处松嫩平原中西部边缘, 气候类型属于中温带半干旱大陆性季风气候. 退化草原下垫面土壤主要有盐碱土、草甸土和淡黑钙土, 主要植物群落组成有西伯利亚蒿和野谷草等. 退化草原上的草在夏季一般在 10 cm 以下, 冬春季在 5 cm 以下[18].

观测项目主要包括近地面层涡动相关湍流观测、气象要素观测场、辐射观测以及土壤温度、土壤湿度观测. 气象要素包括温度、湿度、风速及风向; 辐射观测包括向上、向下太阳辐射及向上、向下长波辐射. 湍流通量观测仪器由超声风速温度仪(Campbell Scientific, CSAT3)、湿度和 CO_2 脉动仪(LI-COR, CS7500)组成. 有关仪器设备和实验观测的具体内容请见参考文献[16, 17, 19].

1.2 涡动相关资料数据处理

湍流原始资料后处理采用 EdiRe 软件(John Moncrieff, School of Geosciences, University of Edinburgh), 每个样本的时间长度为 30 min. 资料处理步骤简述如下: (1) 剔除由于仪器故障、天气影响和随机噪音等造成远超合理值、明显存在错误的野点; (2) 进行二维坐标轴旋转, 计算平均量、脉动量、方差、协方差等一系列的统计量, 然后计算湍流通量的初步结果; (3) 对通量进行必要的修正, 如高频损失订正[20]、密度脉动订正(WPL)[21]等; (4) 对通量资料进行质量控制, 包括物理上的合理范围检验、湍流平稳性检验和湍流发展的充分性检验等[22]. 基于上述处理得到的湍流通量资料, 本文按照 Papale 等[23]提出标准订正方法对三个站点的 CO_2 通量资料进行数据质量控制.

由于仪器故障和质量控制往往会造成观测资料的缺失, 有时缺失数据能占到年度数据的 30%~40%[13]. 为研究生态系统生长季的碳收支情况, 需要对缺失数据进行填补. 对于缺失时间长度小于 2 h 的数据采用线性插值法进行填补, 缺失时间尺度小于 2 d 的数据采用 MDV 法(mean diurnal variation)[13]进行填补, 大于 2 d 以上的采用 MDS 法(marginal distribution sampling)[24]进行填补.

1.3 生态系统呼吸 R_{eco} 模型

生态系统呼吸(R_{eco})主要受土壤温度和土壤水分影响[25], 很多研究报道在土壤水分充足时, 生态系统呼吸会随温度升高而增加[24]. 生态系统呼吸(R_{eco})与土壤温度常用的关系模型有:

Lloyd&Taylor 模型[26]:

$$R_{eco} = R_{10} e^{\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)}. \quad (1)$$

Arrhenius 模型[26]:

$$R_{eco} = R_{10} e^{E_0\left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0}\right)}. \quad (2)$$

指数模型[26,27]:

$$R_{eco} = a \cdot e^{(b \cdot T_s)}. \quad (3)$$

Q_{10} 模型:

$$R_{eco} = R_{10} \cdot Q_{10}^{\frac{(T - T_{ref})}{10}}. \quad (4)$$

其中, R_{10} 为参考温度下(10℃)的生态系统呼吸速率, E_a 为活化能, 又称温度敏感系数. R 为气体常数, E_0=E_a/R. T_{ref} 为参考温度(10℃), T 为气温或土壤温度, T_0 为生态系统呼吸为 0 时对应的温度; T_s 为土壤温度. Q_{10} 是反映生态系统呼吸的温度敏感性指标, 表示反应温度每改变 10℃时呼吸速率改变的范围. Arrhenius 模型是在 Lloyd & Taylor 模型基础上改进的模型. Q_{10} 模型可变形为 $R_{eco} = B = \ln(Q_{10}/10)$, $R_{10} \cdot e^{B \cdot (T - T_{ref})}$, 与指数模型等效.

R_{eco} 与土壤水分常用的关系模型有:

线性模型:

$$R_{eco} = a \cdot vwc + b, \quad (5)$$

连乘模型:

$$R_{eco} = a \cdot e^{(b \cdot T)} \cdot vwc^{c}, \quad (6)$$

其中, vwc 为土壤体积含水量, a, b, c 为待拟合参数.

夜间植被/大气间净生态系统碳交换仅仅来源于生态系统呼吸. 本文分别采用(2), (3), (5), (6)方程对夜间 R_{eco} 与土壤温度、土壤水分关系进行拟合. UG79 站因 2007 年 5~8 月土壤体积含水量资料缺失, 拟合时只采用方程(2)和(3). 考虑到 R_{eco} 对温度的敏感性存在一定的时空变化[12], 将 NEE 夜间资料分别按月份进行拟合. 利用夜间生态系统呼吸数据建立的生态系统呼吸函数关系外延到白天以获得白天生态系统呼吸数据[12]. 为了综合土壤温度、土壤水分对 R_{eco} 的影响, 本文最终选择方程(6)估算白天的 R_{eco}.

生态系统呼吸 R_{eco} 可以定义为

$$R_{eco} = R_{eco,night} + R_{eco,day}, \quad (7)$$

其中, $R_{eco,night}$ 为夜间生态系统呼吸, $R_{eco,day}$ 为白天生态系统呼吸.

总生态系统交换量 GEE 可以定义为

$$GEE = NEE - R_{eco}. \quad (8)$$

总生态系统交换量与总生态系统生产力 GEP 绝对值相等符号相反. 在生态系统尺度上, 可以认为总生态系统生产力 GEP 与生态系统总初级生产力 GPP 相等, 即

$$GPP = GEP = -GEE. \quad (9)$$

2 结果与讨论

2.1 气象要素

UG79 站 2007 年气温(2 m)和土壤温度(5 cm)均高于 2008 年, SACOL 站两年间气温和土壤温度变化较小, TY 站 2008 年气温和土壤温度均高于 2007 年

(见图 1). SACOL 站两年间平均气温和土壤温度最高, 分别是 8.30, 10.64℃; 其次是 TY 站, 两年间平均气温和土壤温度分别是 7.72, 5.27℃; UG79 站平均气温和土壤温度最低, 分别是 2.17, 4.13℃. 各站年平均气温均高于气候年平均值.

三个站点降水年际变化和季节变化差异较大(见图 2). UG79 站和 TY 站 2007 年降水均偏少, TY 站 2007 年降水仅为多年平均降水量 50%; 2008 年降水接近平水年. UG79 站生长季(5~9 月)降水占全年降水量 80%左右; TY 站生长季降水更为集中, 5~9 月降水接近全年降水量 88%. SACOL 站 2007 年接近平水年, 5~9 月降水占全年降水量 68%; 2008 年 SACOL 站降水偏少, 5~9 月降水占全年降水量 80%.

土壤体积含水量(5 cm)与降水关系十分密切, 土壤体积含水量的变化与降水的时间分布较一致. 土壤体积含水量年际差异较小, SACOL 站 2007, 2008 年平均土壤体积含水量保持在 13.7%左右, 生长季为 15%左右, 土壤体积含水量较高; TY 站两年间平均土壤体积含水量在 11%~12%之间, 生长季为 14%左右; UG79 站土壤体积含水量较低.

2.2 NEE 的日变化和季节变化

图 3 给出了三个站点 2007, 2008 年生长季净碳交换速率 NEE 的平均日变化特征. SACOL 站和 TY 站 2007, 2008 年的 NEE 表现出明显的日变化特征. SACOL 站 2007 年白天 NEE 基本上高于 2008 年. TY

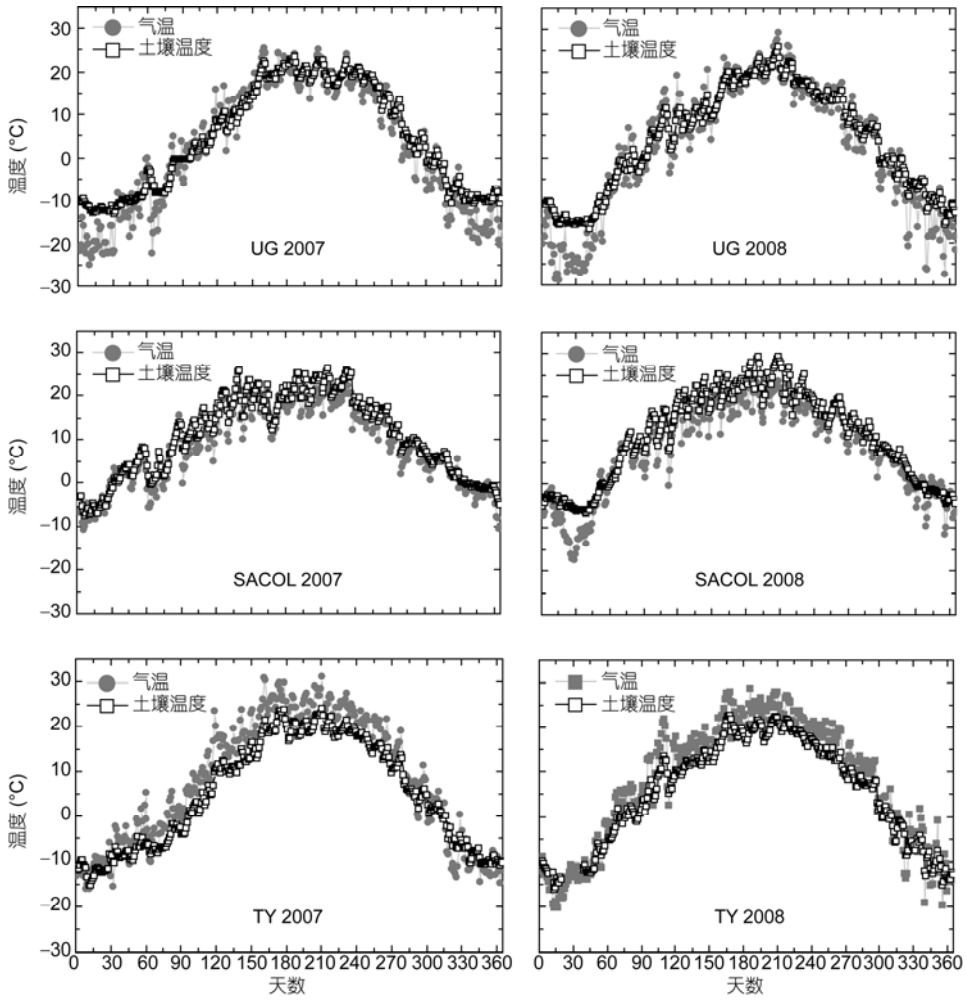

图 1 UG 站、SACOL 站、TY 站的气温(T_a)和 5 cm 土壤温度(T_s)的季节变异(2007~2008)

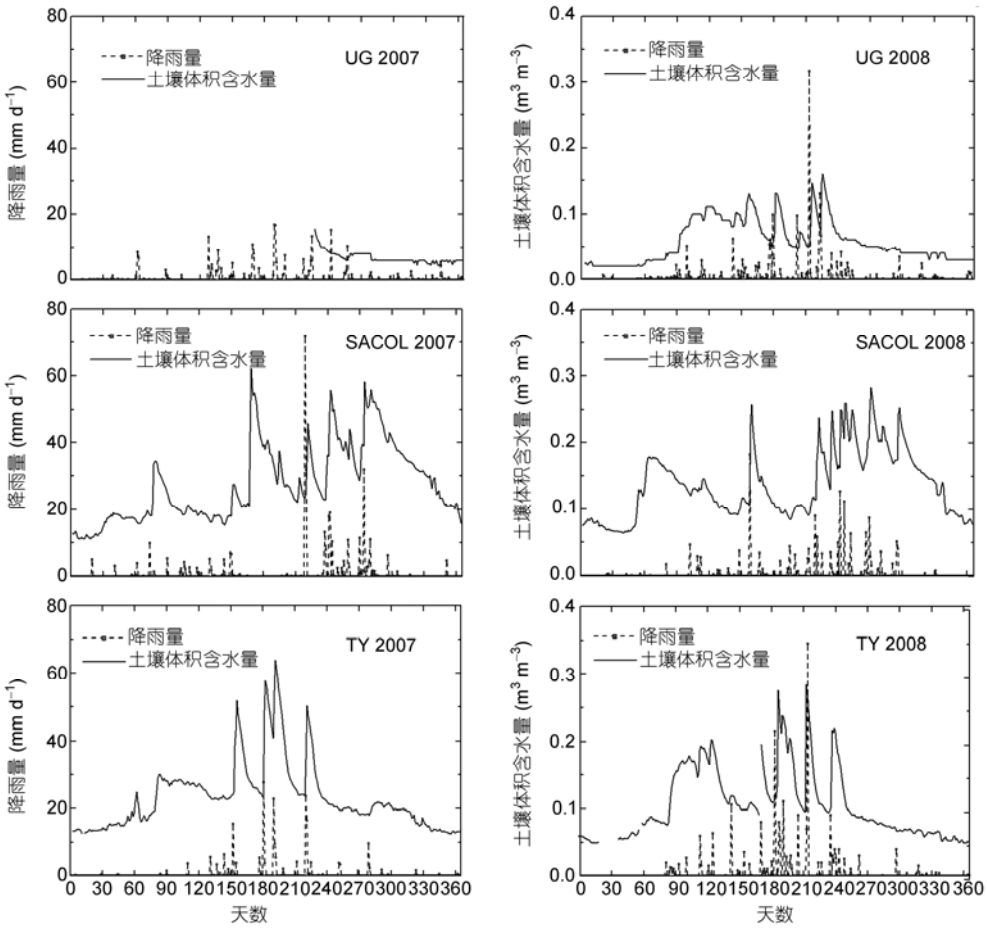

图 2　UG 站、SACOL 站、TY 站降水和土壤体积含水量的季节变异(2007~2008)

站 2007 年净碳交换速率是三个站点中最低的, 最大 NEE 仅为–0.02 mg C m^{-2} s^{-1}; 2008 净碳交换速率与另外两个站点接近, NEE 最大值为–0.04 mg C m^{-2} s^{-1}. UG79 站 2007, 2008 年 NEE 变化趋势相似, NEE 最大值均接近–0.04 mg C m^{-2} s^{-1}. 2007 年 UG79 站 NEE 最大值较高, 但最大值出现后净碳吸收速率下降较快; SACOL 站最大净碳吸收速率出现时刻较晚, 但下降速率较慢. 一天之中, NEE 最高值一般出现在上午 9~10 点, 随后快速下降, 在下午 18 点左右接近碳平衡状态.

三个站点 2007, 2008 年生长季净碳交换速率(NEE)的月平均日变化见图 4. UG79 站非生长季碳释放速率很小, 且几乎无变化, 6~8 月份碳吸收作用最强, 2008 年 8 月份最大净碳吸收速度接近 0.08 mg C m^{-2} s^{-1}. SACOL 站在非生长季仍表现出微弱的碳吸收作用, 且碳吸收作用持续的时间较长, 2008 年 4~10 月份一直表现出较明显碳吸收过程, 2007 和 2008 年均在 9 月份出现较高净碳吸收速率, NEE 接近–0.07 mg C m^{-2} s^{-1}, 最大净碳交换速率低于另外两个站点. TY 站 2007 年只在生长季 7~9 月期间表现为净碳吸收, 其余月份均表现为微弱的碳源, 净碳吸收持续时间较短; 2008 年 6~9 月份均为净碳吸收时期, 净碳吸收持续时间长于 2007 年, 7 月份最大净碳吸收速率接近 0.12 mg C m^{-2} s^{-1}, 是三个站点中的最高值.

2007 和 2008 年三个站点的最大 NEE 是–0.07~–0.11 mg C m^{-2} s^{-1}, 与其他草原生态系统的研究相比较, 三个站点的净碳吸收速率与内蒙古羊草草原生态系统干旱年份 2005 年的 NEE 为–0.12 mg C m^{-2} s^{-1}[28]、加拿大北部温带草原 1998~2000 年的净碳吸收速率最大值在 0.06~0.17 mg C m^{-2} s^{-1}[15]研究结果接近.

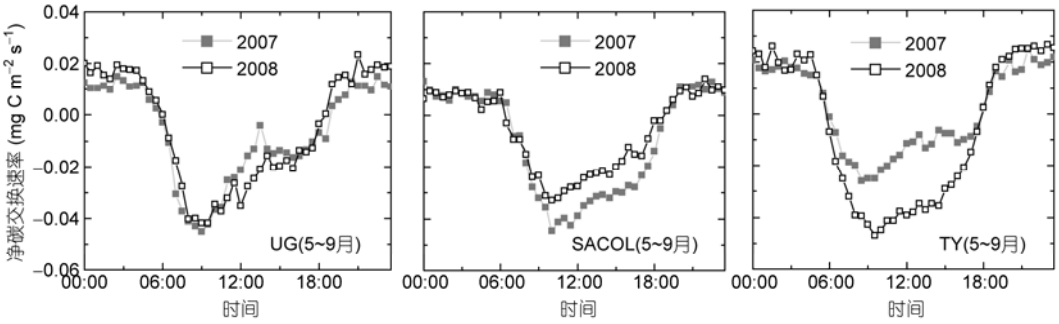

图 3　三个站点 2007~2008 生长季 NEE 的平均日变化

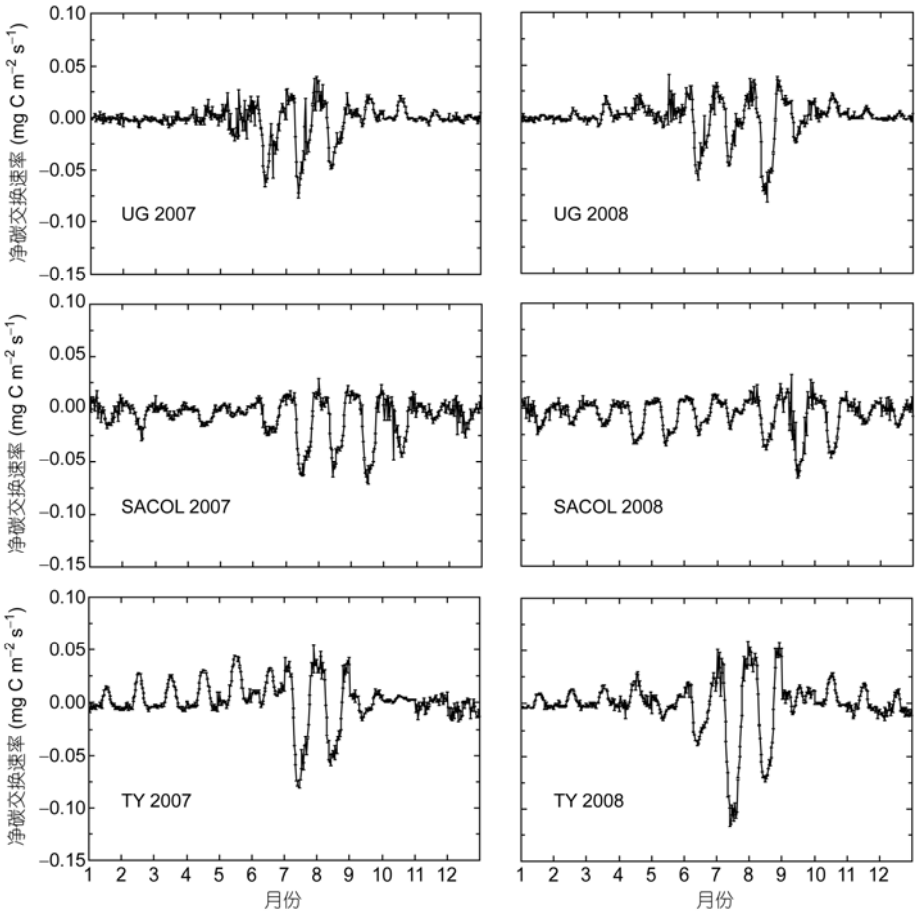

图 4　三个站点 2007~2008 年 NEE 的月平均日变化特征

2.3　生态系统呼吸

三个站点 2007~2008 年生长季夜间 NEE 与土壤温度(5 cm)、土壤水分(5 cm)的响应关系如图 5 所示, 其中 UG79 站、TY 站的夜间 NEE 均呈随温度呈指数增长的趋势, 呼吸速率在 15~20℃时增长最快, 最大呼吸速率大约在土壤温度为 20℃时出现. 当土壤温度大于 20℃时, 夜间 NEE 出现下降且离散点逐渐增多. SACOL 站夜间 NEE 与土壤温度的响应关系并不明显, 从图中可以看到, SACOL 站生长季期间土壤温度一直保持较高水平, 5~8 月期间土壤温度一般保持在 20℃以上. 土壤水分含量较高时, 生态系统呼吸速率大. 综上表明, 三个站点生态系统呼吸既受到

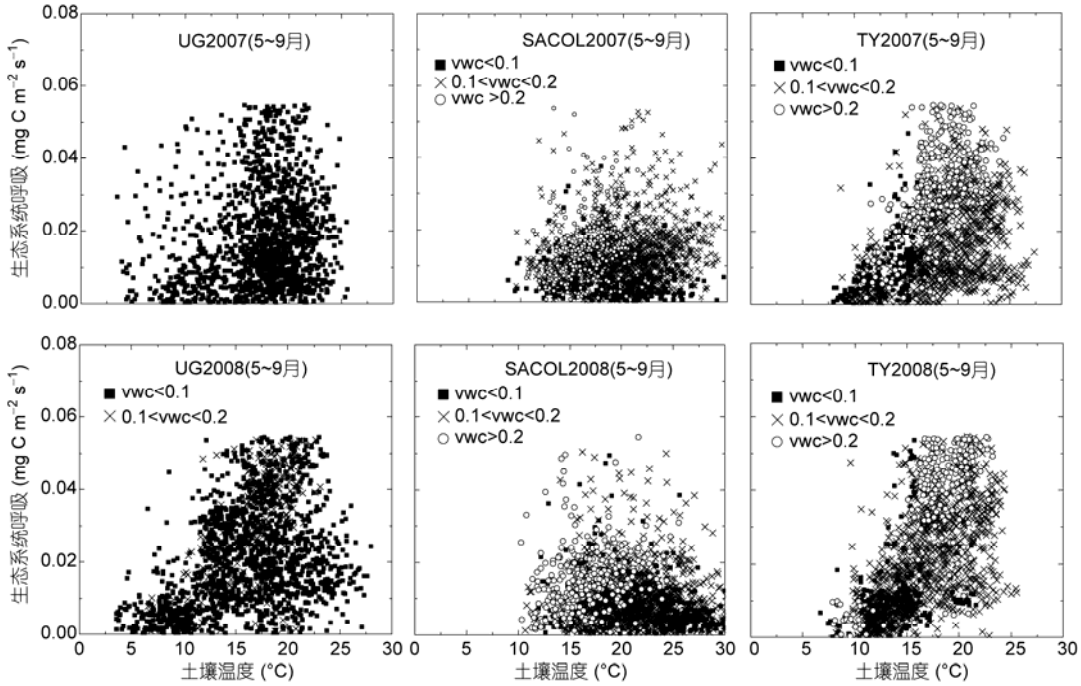

图 5　三个站点生长季夜间 NEE 半小时观测值与土壤温度和土壤体积含水量的响应关系

其中 UG 站 2007 年土壤体积含水量资料缺失. vwc 为 5 cm 土壤体积含水量

土壤温度的影响也受到土壤水分的影响. 生态系统呼吸随土壤温度升高而升高, 只有在不受土壤水分限制情况下. SACOL 站平均温度比另外两个站点高 5℃左右, 土壤水分成为该站最重要的限制因子.

三个站点生态系统呼吸响应方程的拟合结果如图 6 所示, 拟合方程估算的 R_{eco} 与夜间 NEE 的变化趋势比较一致. 估算结果的相对均方根误差(Relative RMSE)如表 1 所示.

2.4　碳交换的季节变化

净碳交换各组分 NEE, GPP, R_{eco} 的季节变化趋势如图 7 所示. UG79 站 6~8 月期间表现为明显的碳吸收时期; 在生长季中期无降水出现时, 受土壤水分胁迫, 植被光合作用在 2007 和 2008 年 7 月份出现快速下降; 日最大 NEE 接近−5 g C m^{-2} d^{-1}. SACOL 站 2007 和 2008 年净碳交换过程有很大差异, 从 2007 年 6 月份开始, SACOL 站 GPP 开始超过 R_{eco}, 净碳吸收能力逐渐增强, NEE 逐渐增大并在 7 月中旬达到最大值, 持续到 9 月份净碳吸收作用开始下降; SACOL 站 2008 年 3, 5 月份出现降水, 草原萌芽较早, 5 月份时 GPP 已经超过 R_{eco}, 表现为净碳吸收时期, 由于 6, 7 月降水偏少, NEE 逐渐减小, 此后伴随降水出现, 草原又表现出明显的净碳吸收作用, 并持续到 9 月底. TY 站 2007, 2008 年的净碳交换作用也存在一定差异, 2007 年降水量只有气候平均的一半, 草原萌芽时间较晚, 到 7 月份草原光合作用逐渐增强, NEE 出现负值, 但在 8 月份受土壤水分亏缺影响, 净碳吸收作用受到明显抑制, 随后继续增长并在 9 月净碳吸收过程结束; 2008 年净碳吸收能力较强, 最大 NEE 接近−5 g C m^{-2} d^{-1}(与 TY 站最大值一致).

三个站点 2007~2008 生长季(5~9 月)生态系统呼吸 R_{eco} 与总初级生产力 GPP 的关系见图 8. 生态系统呼吸 R_{eco} 均与 GPP 呈正比关系, 且拟合直线斜率均小于 1, 直线截距均不等于 0. 由于陆地生态系统总体上是一个具有固碳功能的有效碳库, 不同生态系统类型的综合 R_{eco}/GPP 比值应该小于 1[29]. 如果生态系统的异养呼吸为 0, 则 R_{eco}/GPP 应该与 dR_{eco}/dGPP 相同[30]. 理论上, 当 GPP=0 时, 生态系统的自养呼吸为 0; 而三个站点拟合直线的截距均不为 0 且为正值, 表示的含义是当没有植被存在时, 生态系统本身固有的异养呼吸的本底值[30]. 三个站点的 dR_{eco}/dGPP 比值均为正值, 表明 R_{eco} 都具有随 GPP 增加而增加的趋

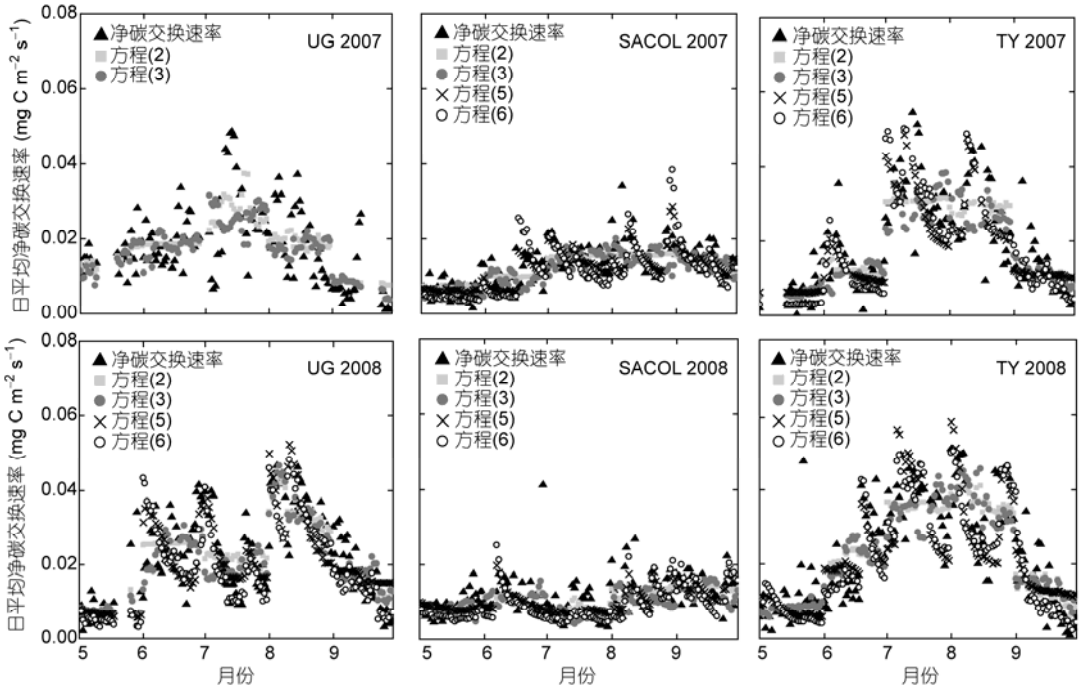

图 6　夜间 NEE 的日平均变化特征

观测值 vs.预测值

表 1　不同生态系统呼吸响应方程估算结果的相对均方根误差

站点	2007				2008			
	月份	方程(2)	方程(3)	方程(5)	方程(6)	方程(2)	方程(3)	方程(5)	方程(6)
UG	5	0.250	0.278			0.618	0.621	0.666	0.718
	6	0.280	0.326			0.305	0.321	0.399	0.442
	7	0.384	0.456			0.384	0.458	0.209	0.275
	8	0.404	0.453			0.141	0.144	0.320	0.275
	9	0.686	0.680			0.397	0.391	0.395	0.387
SACOL	5	0.370	0.478	0.332	0.440	0.317	0.337	0.322	0.424
	6	0.326	0.379	0.393	0.632	0.462	0.480	0.490	0.571
	7	0.229	0.311	0.187	0.265	0.335	0.535	0.423	0.443
	8	0.306	0.375	0.359	0.480	0.337	0.460	0.362	0.427
	9	0.216	0.234	0.169	0.244	0.269	0.345	0.271	0.337
TY	5	0.516	0.521	0.573	0.709	0.652	0.655	0.711	0.788
	6	0.452	0.547	0.399	0.440	0.429	0.428	0.306	0.293
	7	0.258	0.305	0.313	0.355	0.180	0.236	0.259	0.206
	8	0.338	0.362	0.310	0.323	0.258	0.264	0.273	0.264
	9	0.434	0.432	0.481	0.464	0.447	0.476	0.471	0.484

势; UG79 站 2007~2008 年的 $dR_{eco}/dGPP$ 比值分别为 0.49, 0.57, SACOL 站 2007~2008 年的 $dR_{eco}/dGPP$ 比值分别为 0.36, 0.37, TY 站 2007~2008 年的 $dR_{eco}/dGPP$ 比值分别为 0.67, 0.58. 结果表明同一草原生态系统由于环境因子的年际变化, 生态系统功能也会发生变化. TY 站 2007 年由于降水稀少, 生长季开始时间较晚, 站点的异养呼吸值较高, 其中 5, 6, 9 月三个月份的总初级生产力均小于生态系统呼吸, 尽管在 7, 8 月降水出现后生态系统固碳功能恢复, 但在整个生长季为弱的碳源. 这表明半干旱区退化草原碳收支情况受生长季降水量及其分布的影响较大.

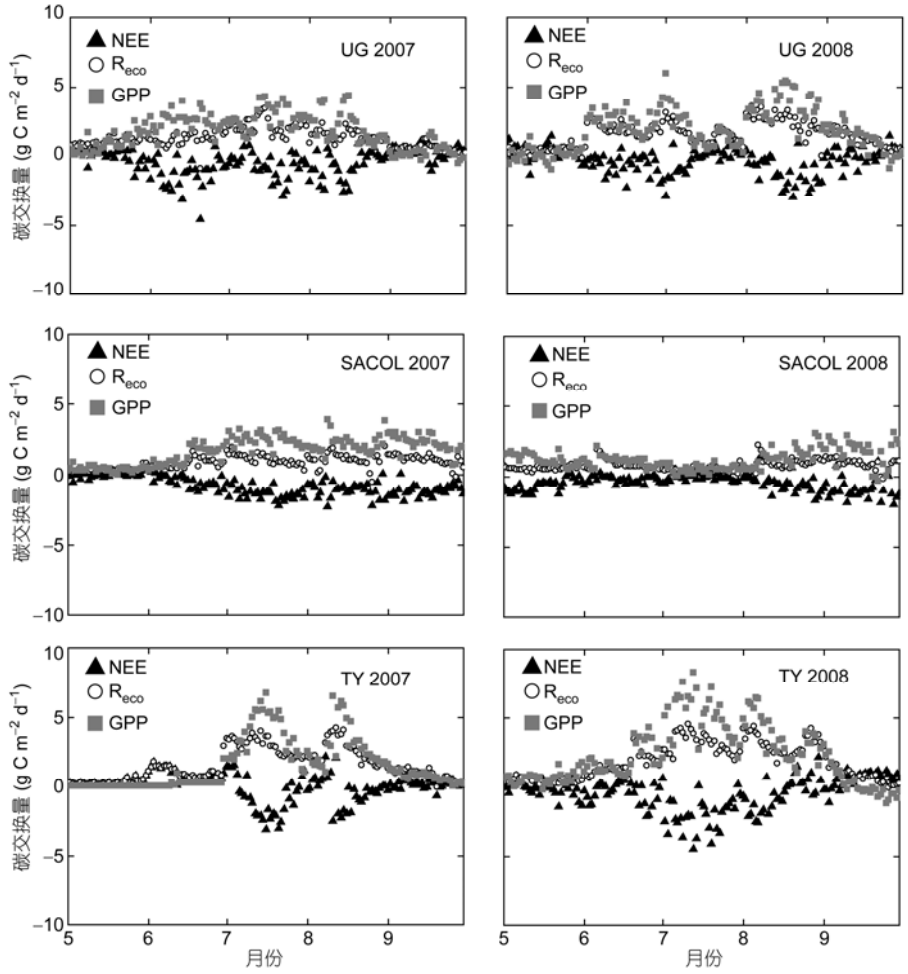

图 7　2007~2008 年生长季三个站点 GPP, R_{eco}, NEE 的季节变化特征

图 9 给出的是三个站点 2007 年和 2008 年生长季累积的 GPP, R_{eco}, NEE. UG79 站 2007, 2008 年生长季的 NEE 分别是–68, –50 g C m^{-2}; 2007 和 2008 年的净碳交换变化趋势较一致, GPP 最大值接近 270 g C m^{-2}, R_{eco} 最大值约为 218 g C m^{-2}; 从 6 月份开始 GPP 超过 R_{eco}, UG79 站表现为净的碳库; UG79 站 2008 年 7~8 月 GPP 比 2007 年同期增长速度慢, 在 9 月份达到最大值. SACOL 站 2007 年净碳交换能力较强, 2007 和 2008 年 R_{eco} 较一致, 在生长季期间一致呈增长趋势, 最大值约为 109 g C m^{-2}; SACOL 站 2007 年、2008 年生态系统初级生产力 GPP 的最大值分别约为 245, 163 g C m^{-2}; 最大 NEE 分别约为–109, –55 g C m^{-2}, 与生长季 NEE 的日变化趋势一致, 2008 年 NEE 日平均净碳吸收效率也较低; 通过 NEE 的变化趋势可以看出, 9 月份净碳吸收作用还处于增长状态, SACOL 站净碳吸收过程较长, 在生长季表现为明显的碳库. TY 站 2007, 2008 年的净碳交换过程有较大差异, 两年生长季期间 NEE 分别为 0.32, –73 g C m^{-2}, 由于 2007 年降水异常偏少, 2007 年日均净碳交换速率较低且生长季期间净碳吸收过程较短, 2007 年生长季只有 6~8 月存在较明显的碳吸收过程; 2007 年 TY 站 R_{eco} 也较低, 但 2007 年和 2008 年 R_{eco} 的差异比 GPP 小, 两年 GPP 分别接近 218, 354 g C m^{-2}; 由于 2007 年较低的净碳吸收速率和较短的净碳吸收过程, TY 站 2007 年生长季表现为弱的碳源, 2008 年生长季则为明显的碳库. Ma 等[30]对热带稀疏大草原和疏林草原的研究表明, 热带稀疏大草原和疏林草原 2001~2006 年的净碳交换 NEE 分别在–144 ~ –35 和–6 ~ 189 g C m^{-2} a^{-1} 之间, 除特别干旱的年份外, 草原生态系统一般表现为净碳吸收作用. 热带稀疏大草原和疏

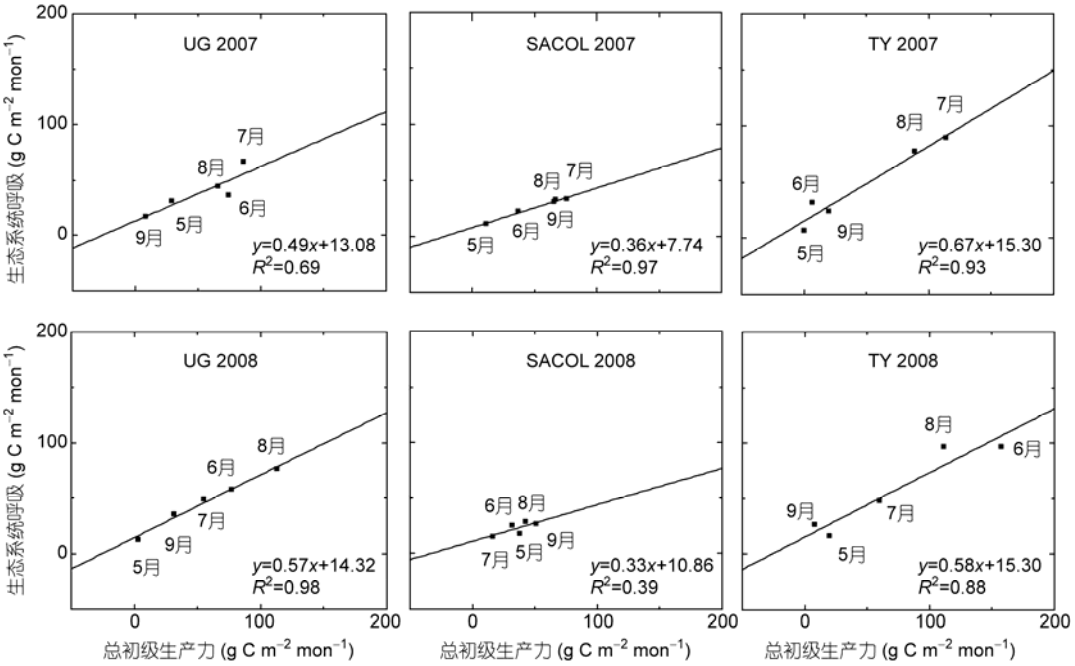

图 8　三个站点 2007~2008 生长季生态系统呼吸(R_{eco})与总初级生产力(GPP)的线性关系

林草原年生态系统总初级生产力 GPP 在 600~1500 g C m^{-2} a^{-1}之间, 半干旱地区草原生态系统的总初级生产力比热带草原低很多.

总体上, 三个站点 R_{eco} 与 GPP 的比值均小于 1, 但净碳交换过程年际变化较大, 受天气影响, 草原的碳汇功能与碳源功能作用会发生转变. 这样的功能转变在加拿大温带草原[15]和欧洲草原[31]研究中也曾报道, 生态系统碳源碳汇功能的转变并不少见, 特别当生态系统遭遇极端气候事件或扰动发生时[32]. 由于降水差异, TY 站 2007 和 2008 年生长季期间分别为弱的碳源和较强的碳汇. 净碳吸收功能与生长季净碳吸收持续时间的长短有很大关系[33]. 植被生理特征决定了生长季的长度, 受环境因素影响, 植被生理特征存在一定的年际变化[34]. 降水出现的时间决定了生长季开始的时间和持续的长度[12]. SACOL 站和 TY 站 2007 年降水出现时间较晚, 导致生长季净碳吸收作用开始的时间也较晚.

3　结论

本文利用涡动相关法取得的资料分析了半干旱地区三个草原生态系统(UG79 站、SACOL 站、TY 站)2007~2008 年的碳交换主要过程及其主要影响因子. 结果表明三个草原生态系统的净碳交换过程存在明显的时空差异. 净碳吸收速率(NEE)最高值一般出现在每日上午 9~10 点, 并在生长季 7~9 月达到最大值. TY 站 2007, 2008 年平均总初级生产力和生态系统呼吸最高, 分别是 286 和 249 g C m^{-2}; 其次为 UG79 站, GPP 和 R_{eco} 分别是 270 和 209 g C m^{-2}; SACOL 站最低, GPP 和 R_{eco} 分别是 208 和 109 g C m^{-2}.

降水量和降水的时间分布对半干旱地区草原生态系统净碳交换过程影响很大. TY 站 2007 年由于降水严重偏少, 降水不足多年平均降水量一半, 生长季表现为弱的碳源; 且 2007 年降水出现时间较迟, 从 7 月份开始才表现为明显的净碳吸收时期. TY 站 2008 年降水接近平水年, 生长季从 5 月份开始, 表现出明显的碳汇功能. SACOL 站 2007 和 2008 年净碳吸收速率较低, 但生长季期间净碳吸收持续过程较长, 两年间均表现出明显的碳汇作用. 生长季中期无有效降水出现时, 植被受水分胁迫净碳吸收作用受到抑制, 生长季中期也会表现为弱的碳源, UG79 站和 TY 站 2007, 2008 年净碳吸收过程均呈现“双峰”趋势. 生态系统总初级生产力 GPP 比生态系统呼吸 R_{eco} 对降水的响应更敏感. SACOL 站 2008 年降水偏少, 2008 年 SACOL 站 GPP 比 2007 年低很多, 但两年间 R_{eco} 差异较小. TY 站 2007, 2008 年降水存在明显差异, 2008 年

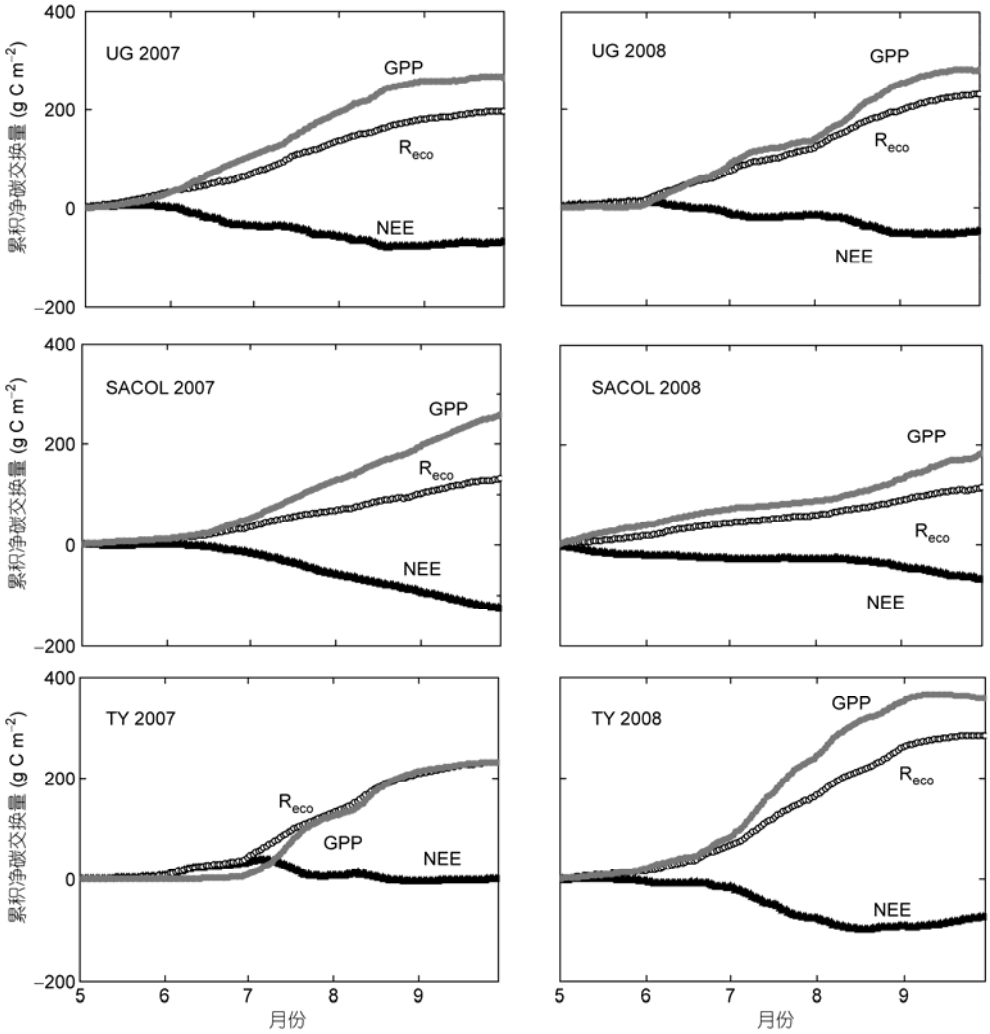

图 9　2007~2008 生长季三个站点累积的总初级生产(GPP)、生态系统呼吸(R_{eco})和净碳交换(NEE)

生长季 GPP 比 2007 年高约 130 g C m^{-2}, R_{eco} 只高 60 g C m^{-2}. 三个站点生长季期间的 $dR_{eco}/dGPP$ 比值均小于 1, $dR_{eco}/dGPP$ 比值的年际变化和区域差异既受气象因子年际变异的影响, 也由每个站点生态系统的土壤特征和植被功能所决定. 半干旱地区生态系统的碳交换和水热交换是密切相关的, 分析半干旱区草原生态系统碳通量和水热通量的相互关系将是下一步的工作重点.

致谢　感谢所有参加上述三站日常维护的所有高级工程师和研究生, 感谢德国德累斯顿理工大学参加内蒙古中德合作项目(MAGIM -P6)的科学家、高级工程师及研究生们, 同时还要感谢审稿专家提出宝贵意见.

参考文献

1　吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用综合研究. 气象学报, 2005, 63, 5: 571–593
2　郝彦宾, 王艳芬, 孙晓敏. 内蒙古羊草草原碳交换季节变异及其生态学解析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(增刊 1): 174–182
3　叶笃正, 陈泮勤. 中国的全球变化预研究. 第二部分. 北京: 气象出版社, 1992. 24–59
4　Li S G, Harazono Y, Oikawa T, et al. Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. Agr Forest Meteorol, 2000, 102: 125–137

5 Ham J M, Knapp A K. Fluxes of CO_2 water vapor, and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source. Agr Forest Meteorol, 1998, 89: 1–14
6 Schaeffer M, Eickhout B, Hoogwijk M, et al. CO_2 and albedo climate impacts of extratropical carbon and biomass plantations. Global Biogeochem Cy, 2006, 20: GB2020, doi: 10.1029/2005GB002581
7 张强, 黄荣辉, 王胜. 西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展. 地球科学进展, 2005, 27: 673–679
8 Greco S, Baldocchi D D. Seasonal variations of CO_2 and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. Global Change Biol, 1996, 2: 183–197
9 Vourlitis G L, Priante N, Hayashi M M S, et al. Seasonal variations in the net ecosystem CO_2 exchange of a mature Amazonian transitional tropical forest (cerradao). Funct Ecol, 2001, 15: 388–395
10 Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO_2 and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. Agr Forest Meteorol, 2001, 108: 183–197
11 Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem. Global Change Biol, 1999, 5: 169–182
12 Xu L K, Baldocchi D D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. Agr Forest Meteorol, 2004, 123: 79–96
13 Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agr Forest Meteorol, 2001, 107: 43–69
14 Leuning R, Cleugh H A, Zegelin S J, et al. Carbon and water fluxes over a temperate Eucalyptus forest and a tropical wet/dry savanna in Australia: Measurements and comparison with MODIS remote sensing estimates. Agr Forest Meteorol, 2005, 129: 151–173
15 Flanagan L B, Wever L A, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. Global Change Biol, 2002, 8: 599–615
16 王雷, 刘辉志, Ketzer B, 等. 放牧强度对内蒙古半干旱草原地气间能量和物质交换的影响. 大气科学, 2009, 33: 1201–1211
17 Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. An Overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau. Adv Atmos Sci, 2008, 25: 906–921
18 刘辉志, 涂钢, 董文杰, 等. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化. 大气科学, 2006, 30: 108–118
19 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验. 气候与环境研究, 2004, 9: 378–389
20 Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. Bound Lay Meteorol, 1986, 37: 17–35
21 Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Q J Roy Meteor Soc, 1980, 106: 85–100
22 Foken T, Göckede M, Mauder M, et al. Post-field data quality control. In: Lee X, Massman W, Law B, eds. Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 181–208
23 Papale D, Reichstein M, Aubinet M, et al. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation. Biogeosciences, 2006, 3: 571–583
24 Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. Global Change Biol, 2005, 11: 1424–1439
25 Lee X, Wu H J, Sigler J, et al. Rapid and transient response of soil respiration to rain. Global Change Biol, 2004, 10: 1017–1026
26 Lloyd J, Taylor J A. On the temperature-dependence of soil respiration. Funct Ecol, 1994, 8: 315–323
27 Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. Global Change Biol, 1998, 4: 217–227
28 Hao Y B, Wang Y F, Mei X R, et al. CO_2, H_2O and energy exchange of an Inner Mongolia steppe ecosystem during a dry and wet year. Acta Oecol, 2008, 33: 133–143
29 Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. Agr Forest Meteorol, 2002, 113: 97–120
30 Ma S, Baldocchi D D, Xu L, et al. Inter-annual variability in carbon dioxide exchange of an oak/grass savanna and open grassland in California. Agr Forest Meteorol, 2007, 147: 157–171
31 Gilmanov T G, Soussana J E, Aires L, et al. Partitioning European grassland net ecosystem CO_2 exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. Agr Ecosyst Environ, 2007, 121: 93–120
32 Barr A G, Black T A, Hogg E H, et al. Climatic controls on the carbon and water balances of a boreal aspen forest, 1994–2003. Global Change Biol, 2007, 13: 561–576
33 Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. Global Change Biol, 1996, 2: 169–182
34 Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biol, 2006, 12: 1969–1976