

药静宇, 王国印, 黄建平, 等. 黄土高原半干旱区净碳交换量的特征分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 88-95. [YAO Jingyu, WANG Guoying, HUANG Jianping, et al. Characteristics of Net Carbon Exchange over the Semi-arid Loess Plateau in Northwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(1): 88-95], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-01-0088

## 黄土高原半干旱区净碳交换量的特征分析

药静宇, 王国印, 黄建平, 闭建荣

(兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**利用涡动相关技术对黄土高原半干旱区 SACOL 站 2007~2012 年连续 6 a 的 CO<sub>2</sub> 通量进行观测, 并结合气象观测数据, 分析兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL 站)净生态系统碳交换量(NEE)的变化特征以及环境影响因子。结果表明:(1)黄土高原半干旱区 SACOL 站 NEE 年累积平均值为  $-214.50 \pm 43 \text{ gC/m}^2$ , 其中生长季节累积平均值为  $-171.58 \pm 41 \text{ gC/m}^2$ , 非生长季节累积平均值为  $-42.92 \pm 5 \text{ gC/m}^2$ ; (2) SACOL 站 NEE 的日变化呈“U”型, 净辐射是影响 NEE 日变化的主要因子。NEE 日平均值为  $-1.15 \text{ gC/m}^2$ , 表现为明显的 CO<sub>2</sub> 吸收, 即黄土高原半干旱区是重要的碳汇区; (3) NEE 值有明显的年际差异和季节变化特征, 生长季节比非生长季节变化幅度大; NEE 在生长季节主要受到土壤湿度的影响, 而土壤温度会影响非生长季节 NEE 的变化。

**关键词:**黄土高原半干旱区; 净生态系统碳交换; 净辐射; 土壤湿度

**文章编号:**1006-7639(2016)-01-0088-08 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-01-0088

**中图分类号:**X171

**文献标识码:**A

### 引言

气候变化是当今全球面临的重大挑战, 人类社会生产生活引起的温室气体排放是全球气候变暖的主要原因<sup>[1]</sup>。政府间气候变化委员会(IPCC)第五次报告中指出“温室气体继续排放将造成全球气候进一步增暖, 并导致气候系统的组成成分发生改变, 大幅度地减少温室气体的排放有利于控制气候的变化”。旨在限制发达国家温室气体排放量、抑制全球范围内气候持续变暖的《京都协议书》已于 2005 年 2 月 16 日正式生效。在温室气体中, CO<sub>2</sub> 浓度的增加对气候变化产生的影响尤其引人关注, 因此, 大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的变化一直是气候变化研究的重点之一<sup>[2]</sup>。

近几年来, 国内外对于不同生态系统开展了大量关于碳循环方面的研究工作<sup>[3]</sup>。其中草地生态系统是全球陆地生态系统的主要类型, 在全球碳循环研究中占有十分重要的地位。我国草地生态系统覆盖了陆地面积的 20%, 其净初级生产力约占全球

陆地生物区净初级生产力的 1/3<sup>[4-5]</sup>。因此, 开展我国草地生态系统的碳收支及其影响因素的研究, 对于全球陆地生态系统碳循环至关重要。国内许多学者已经陆续开展了我国草地碳储量的研究<sup>[6-8]</sup>, 其中涡度相关法是测定大气与生态系统 CO<sub>2</sub> 交换最直接的方法, 已经广泛应用于陆地生态系统中 CO<sub>2</sub> 的测量<sup>[9]</sup>。岳广阳等<sup>[10]</sup>在总结生态系统碳通量主要研究方法的基础上, 对青藏高原不同植被类型碳循环的源、汇效应及其时空变化以及其影响因素等研究领域取得的重要进展进行了综合评述。为定量确定干旱区土地利用变化对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响, 杜群等<sup>[11]</sup>研究发现生长季有效降水开始的时间、降水总量和时间分布决定了半干旱草地生态系统净碳吸收功能和吸收持续时间。沈晓坤等<sup>[12]</sup>利用 SACOL 站 2012~2013 年的数据分析围封与自然放牧对碳交换特征的影响。Xie 等<sup>[13]</sup>研究发现云和气溶胶对黄土高原半干旱区净碳交换产生影响。王国印<sup>[14]</sup>研究认为土壤湿度和温度会影响黄土高原半干旱地区碳通量变化。黄土高原半干旱区是气候

收稿日期: 2015-04-29; 改回日期: 2015-06-18

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB955302)、国家自然科学基金项目(4140050023)及兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2014-102)共同资助

作者简介: 药静宇(1991-), 女, 山西太谷人, 硕士研究生, 主要从事陆气相互作用研究. E-mail: yaojy10@lzu.edu.cn

通讯作者: 黄建平, E-mail: hip@lzu.edu.cn

变化和人类活动的敏感地带,过度放牧、开垦农田等造成严重的土地沙漠化,影响到陆地生态系统碳交换过程,而且其下垫面不均匀,使陆面与大气之间能量、水分以及 CO<sub>2</sub> 等交换过程非常复杂<sup>[15]</sup>,导致该区域的农业生态对全球气候变化反应十分敏感<sup>[16]</sup>。之前对黄土高原半干旱区碳通量的研究所选取的时间尺度比较小,故本文利用涡动相关技术对兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL 站)连续 6 a 的碳通量进行观测,定量分析了黄土高原半干旱区的固碳能力,研究净生态系统碳交换量(NEE)在不同时间尺度上的变化特征和净辐射、土壤温度、土壤湿度等环境变量对碳交换的影响。通过对 SACOL 站碳通量特征和碳收支平衡的分析,可以了解黄土高原半干旱区陆地生态系统碳源汇的性质和能力。

## 1 资料与方法

### 1.1 站点概况

兰州大学半干旱气候与环境观测站(Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL)<sup>[17]</sup>位于黄土高原的半干旱区兰州大学榆中校区萃英山顶(35°57'N, 104°08'E),海拔 1 965.8 m,观测场占地约 8 hm<sup>2</sup>。气候类型属于温带半干旱气候,年平均气温为 6.7 °C,1 月平均气温为 8 °C,7 月平均气温为 19 °C。平均年降雨量为

381.8 mm,8 月降雨量最大,年平均蒸发量 1 528.5 mm,相对湿度 63%。山顶全年盛行东南风和西北风,年平均风速约为 1.6 m·s<sup>-1</sup>,全年日照时数 2 607.2 h 左右。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<sup>[18]</sup>。

### 1.2 观测资料和数据处理

采用 SACOL 站 2007~2012 年连续 6 a 的观测资料,利用的物理量主要是 2 m 处空气温度、10 cm 土壤湿度、土壤温度、降水量、水汽压差、净辐射量、太阳短波辐射和 CO<sub>2</sub> 通量。其中湍流通量数据资料频率为 10 Hz,其他数据资料频率均采用 30 min 制。

采用涡动相关法计算碳通量值,将数据按如下步骤进行处理:(1)在计算通量之前剔除由于仪器故障、天气影响等造成的远远超过合理值、明显存在错误的野点;(2)在计算过程中做相关修正,首先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;(3)对碳通量进行必要的修正,如高频损失订正、密度脉动订正(WPL)、超声虚温修正等;(4)最后对碳通量资料进行质量控制,包括湍流平稳性检验、总体湍流特征检验和总体质量评价和分级等。基于上述处理得到数据质量较高的湍流通量资料<sup>[19]</sup>。

表 1 SACOL 站观测仪器简介

Tab. 1 Introduction of the observation instruments at SACOL

观测项目	安装高度或深度/m	仪器型号	厂家
空气温度	1, 2, 4, 8, 12, 16 和 32	HMP45C-L	Vaisalla, 芬兰
空气湿度	1, 2, 4, 8, 12, 16 和 32	HMP45C-L	Vaisalla, 芬兰
向下/向上短波辐射	1.50	CM21	Kipp&Zonen, 荷兰
向下/向上长波辐射	1.50	CG21	Kipp&Zonen, 荷兰
土壤温度	0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 0.80	STP01-L50	Hukseflux, 荷兰
土壤湿度	0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.80	CS616-L	Campbell, 美国
降水	0.50	TE525MM-L	R. M Young, 美国
CO <sub>2</sub> 通量	2.88	CSAT3, LICOR 7500	Campbell, 美国

### 1.3 数据计算方法

净生态系统碳交换量(Net Ecosystem Exchange, NEE)主要指生态系统中植物光合作用、冠层空气中的碳储存和生物及非生物呼吸消耗的碳排放综合引起的陆地生态系统与大气系统间碳交换的变化<sup>[20]</sup>。生态系统与大气间的净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换

量 NEE 包括 2 部分:草地之上穿过观测平台传输的湍流涡动通量( $F_e$ )以及草地之上空气柱中储存的 CO<sub>2</sub> 通量的变化( $F_{\Delta s}$ )。在仪器观测平台高度上的 CO<sub>2</sub> 通量是用垂直风速( $w$ )和 CO<sub>2</sub> 浓度( $c$ )扰动的平均协方差进行计算<sup>[21]</sup>:

$$F_e = \overline{\rho(w'c')} \quad (1)$$

式中  $\rho$  是空气密度。

$\text{CO}_2$  存储的变化通量 ( $F_{\Delta s}$ ) 可表示为:

$$F_{\Delta s} = \frac{\Delta C}{\Delta t} H \quad (2)$$

式中  $\frac{\Delta C}{\Delta t}$  是单位时间内  $\text{CO}_2$  浓度的变化,  $H$  是仪器安装平台的高度。NEE 是涡动通量和储存通量之和, 一般定义 NEE 为正值时, 陆地生态系统为碳源; 反之, 则为碳汇。NEE 的值越大, 陆地生态系统吸收  $\text{CO}_2$  的能力越低; 反之, NEE 的负值越小, 则陆地生态系统吸收  $\text{CO}_2$  的能力越高<sup>[22]</sup>。

## 2 NEE 的时间变化特征

从图 1 中看出, 在观测的 6 a 里, NEE 的变化有明显的差异。2007、2008、2009、2012 年变化幅度较大, 2010、2011 年变化幅度较小。各年 NEE 月平均变化曲线呈“双峰”型, 各年达到峰值的月份不同, 其中 2008、2009、2011 年均在 9 月达到峰值, 分别为  $-45.81 \text{ gC/m}^2$ ,  $-49.09 \text{ gC/m}^2$ ,  $-29.51 \text{ gC/m}^2$ , 与解静等<sup>[23]</sup>对北方半干旱区  $\text{CO}_2$  通量在 9 月达到  $\text{CO}_2$  吸收峰值的结果一致。2007 年和 2012 年 7 月 NEE 达到峰值, 分别为  $-59.44 \text{ gC/m}^2$ ,  $-41.64 \text{ gC/m}^2$ , 2010 年 6 月达到峰值为  $-34.62 \text{ gC/m}^2$ 。

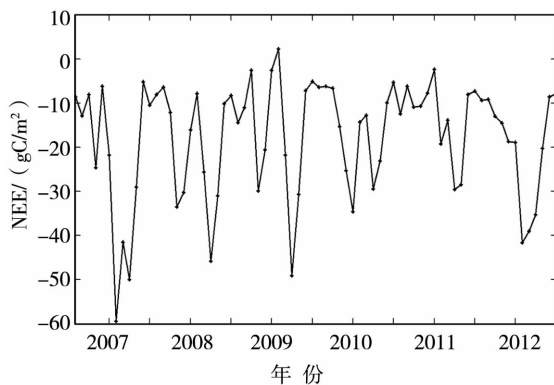


图 1 SACOL 站 2007 ~ 2012 年 NEE 月平均变化

Fig. 1 Average monthly changes of NEE at SACOL during 2007 - 2012

表 2 为 SACOL 站 2007 ~ 2012 年生长季和非生长季 NEE 累积值, 生长季 (5 ~ 9 月) NEE 累积值对全年净碳累积量的贡献要比非生长季 (10 ~ 12 月及次年 1 ~ 4 月) 大 60%, 说明生长季要比非生长季生态系统吸收更多的  $\text{CO}_2$ ; 且 NEE 累积量 2007 年 > 2012 年 > 2008 年 > 2009 年 > 2010 年 > 2011 年。

图 2 给出 SACOL 站连续 6 a 春、夏、秋、冬季 NEE 的平均日变化。可以看出, NEE 的日变化有明显的季节差异, 总体表现为秋季最大, 其次是夏季和春季, 冬季最小。各年份 NEE 达到日峰值的季节不同, 变化幅度也不同。夏季 NEE 平均日变化幅度为  $4.4 \text{ gC/m}^2$ , 秋季为  $4.1 \text{ gC/m}^2$ , 说明夏季植被的光合作用能力比秋季强。研究期间, SACOL 站 NEE 的日变化均呈“U”型曲线, 在 08:00 (北京时, 下同) 左右, NEE 由正值转为负值,  $\text{CO}_2$  通量由释放转为吸收, 光合作用吸收的  $\text{CO}_2$  超过土壤微生物和植物根系呼吸作用释放的  $\text{CO}_2$  量; 10:30 左右出现碳吸收的峰值; 随着净辐射的下降, 光合作用强度开始下降, 20:00 左右 NEE 由负值转为正值, 从碳吸收转为碳排放。生长季各年份 NEE 在夜间差别不大, 而日间差异显著。

## 3 气象要素对 NEE 的影响

### 3.1 NEE 日变化的影响因素

从相关性分析 (表 3、图 3) 可知, 净辐射是 NEE 日变化的主要控制因子。从图 4 可以看出, 净辐射日变化曲线呈单峰型, 每天在 07:00 左右净辐射开始由负值转为正值, 12:00 左右达最大为  $353.283 \text{ W/m}^2$ 。之后逐渐减小, 20:00 左右降为 0, 夜晚净辐射为负值, 波动比较小。

大气中主要能量来源是太阳短波辐射, 温度变化主要受太阳短波辐射影响。净辐射由观测的长波辐射和短波辐射计算得到, 从变化趋势看, NEE 与净辐射有明显的相反变化, 在净辐射由负值转为正值时, 植被吸收能量开始光合作用, 此时光合作用大于呼吸作用,  $\text{CO}_2$  由释放转为吸收。随着净辐射的

表 2 SACOL 站 2007 ~ 2012 年 NEE 的累积量 (单位:  $\text{gC/m}^2$ )

Tab. 2 The accumulation of NEE at SACOL from 2007 to 2012 (Unit:  $\text{gC/m}^2$ )

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	平均值
总累积量	-277.69	-235.03	-192.37	-189.14	-156.61	-236.17	-214.5
生长季累积量	-232.52	-190.05	-152.08	-154.76	-111.76	-188.30	-171.58
非生长季累积量	-45.17	-44.98	-40.29	-34.38	-44.85	-47.87	-42.92

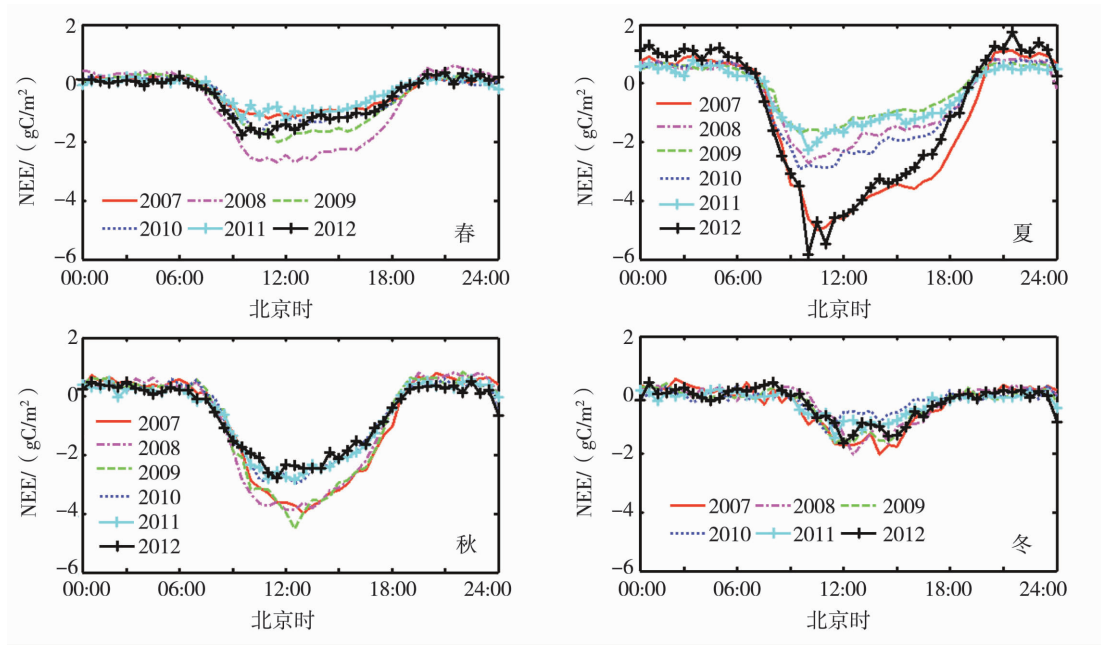


图 2 SACOL 站 2007 ~2012 年 NEE 四季平均的日变化特征

Fig. 2 Mean diurnal variation characteristics of NEE in four seasons from 2007 to 2012 at SACOL

表 3 SACOL 站 2007 ~2012 年 NEE 日变化与环境影响因子的偏相关系数

Tab. 3 The partial correlation coefficients between diurnal NEE and environment factors from 2007 to 2012 at SACOL

	空气湿度	空气温度	短波辐射	净辐射	土壤温度	水汽压差
2007	-0.013 *	-0.007 **	-0.692 **	-0.745 **	-0.027 *	0.214 **
2008	-0.092 **	-0.150 **	-0.818 **	-0.842 **	-0.209 **	0.338 **
2009	-0.099 **	-0.136 **	-0.691 **	-0.721 **	-0.155 **	0.280 **
2010	-0.262 **	-0.117 **	-0.756 **	-0.782 **	-0.090 *	0.152 **
2011	-0.248 **	-0.068 *	-0.551 **	-0.596 **	-0.035 *	0.103 **
2012	-0.082 **	0.028	-0.547 **	-0.615 **	-0.029	0.164 **

注: \*\* 表示相关系数通过 0.01 显著性检验, \* 表示通过 0.05 显著性检验

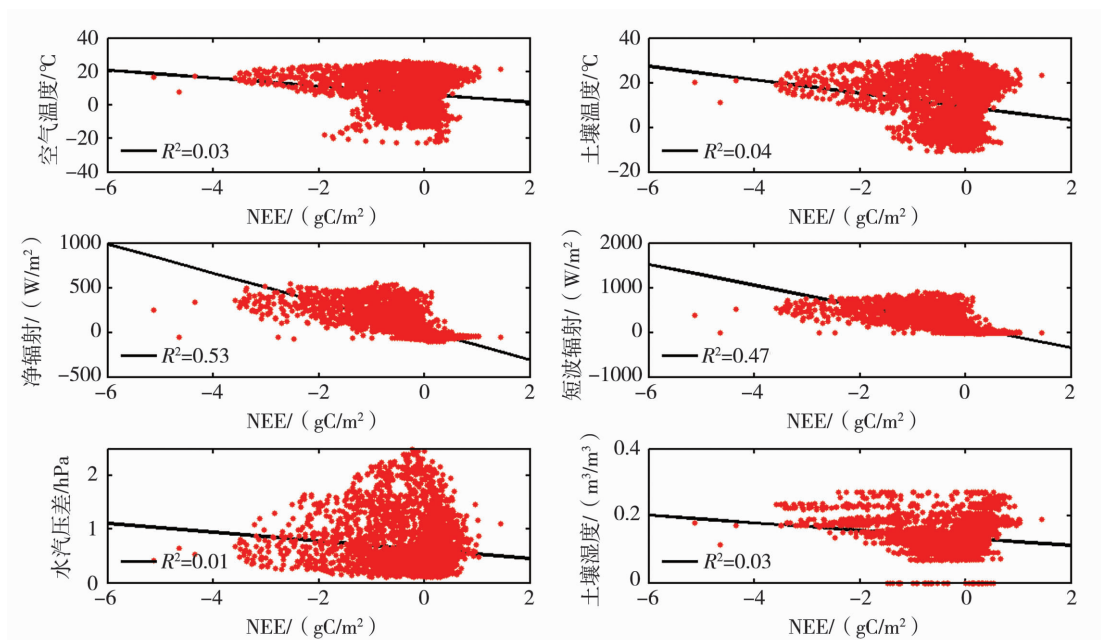


图 3 2007 ~2012 年 SACOL 站 NEE 与环境因子的线性拟合关系 ( $n = 3\ 456, p < 0.01$ )

Fig. 3 Relationship between NEE and environment factors from 2007 to 2012 at SACOL ( $n = 3\ 456, p < 0.01$ )

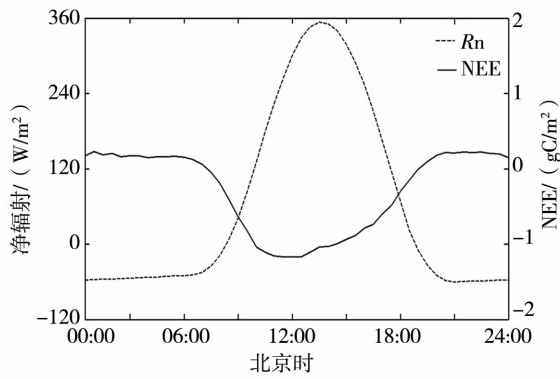


图4 SACOL 站净辐射和 NEE 日变化趋势  
Fig. 4 Mean diurnal trends of NEE and net radiation at SACOL

增加,CO<sub>2</sub> 吸收量逐渐增加,13:00 达到净辐射峰值,而 NEE 在 12:00 达到峰值,之后两者开始逐渐下降,19:00 净辐射变为负值,NEE 变为正值。两者有比较明显的线性关系,相关系数为  $-0.727 (p < 0.01)$ ,但是当  $R_n$  增加到  $450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时,NEE 不再降低反而增加,说明当净辐射增加到一定程度,光合作用达到饱和。从图 3 看出,当净辐射继续增大时,NEE 变化不明显反而变小。有研究表明<sup>[24-25]</sup>,在较低光合有效辐射条件下,碳吸收量随着光合有效辐射迅速增大,而在较高的光合有效辐射条件下,碳吸收量几乎不随光合有效辐射的增大而增大。

冬季由于气温较低,草地枯萎,生态系统以呼吸为主;在正午时刻 NEE 出现负值,说明有 CO<sub>2</sub> 从大气进入生态系统,但相对比较小。春季随着气温升

高,生态系统呼吸作用加强,此时植被开始生长,生态系统初级生产力开始增强,但由于温度升高对呼吸作用的影响大于光合作用,所以 NEE 的变化幅度在冬季和春季差别不大。夏季,随着温度的进一步升高和降雨量的增加,植被进入生长高峰期,NEE 的变化幅度加大,其日变化呈单峰型,正午时刻达到吸收高峰;白天 NEE 为负值,碳吸收,夜间 NEE 为正值,碳排放。秋季,植物进入成熟期,光合作用和呼吸作用能力有所下降,但仍然有明显的碳吸收能力,NEE 达到峰值的时刻相对夏季延迟了 1 h 左右。

### 3.2 NEE 季节变化影响因素

NEE 的变化易受生态系统所处环境的影响,图 5 给出 SACOL 站 2007 ~ 2012 年影响植被生长的物理量的月平均变化,环境影响因子包括净辐射、土壤湿度、水汽压差、土壤温度和空气温度。结合图 1 可以看出,各物理量的变化有明显的季节差异,与 NEE 的变化趋势相反。

在生长季节,植被处于生长发育期,有较强的光合作用和呼吸作用。从相关性分析(表 4 和图 6)可以看出,土壤湿度对 NEE 的变化起主要作用。随着土壤湿度变大,NEE 呈线性减小趋势,SACOL 站降水多发生在生长季节,由于受径流等影响,降水多也不一定不会对土壤水分有很好的改善作用。如 2010 年虽然降水量比较多,但土壤水分仍然相对较低。有研究表明<sup>[26]</sup>,由于黄土高原半干旱区降水量少且时空分布不均匀,降水对植被生长的促进作用不大。

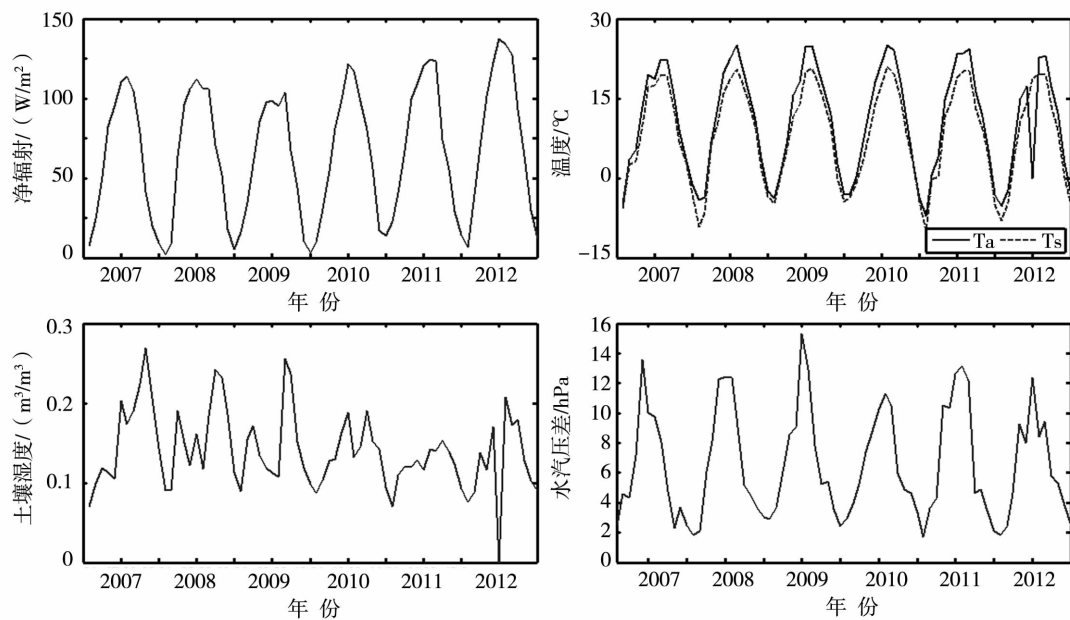


图5 SACOL 站 2007 ~ 2012 年各环境物理量月平均变化

Fig. 5 The monthly mean changes of environment factors at SACOL during 2007 - 2012

表 4 生长季节和非生长季节 NEE 与环境因子相关系数

Tab.4 The correlation coefficients between NEE and environment factors during growing season and non - growing season at SACOL

	土壤湿度	空气温度	降水量	净辐射	土壤温度	水汽压差
生长季节	-0.643 **	-0.174	-0.192 *	0.200	-0.250	0.239
非生长季节	-0.356 **	-0.430 *	-0.177	-0.159 **	-0.570 **	0.201

注: \*\* 表示相关系数通过 0.01 显著性检验, \* 表示通过 0.05 显著性检验

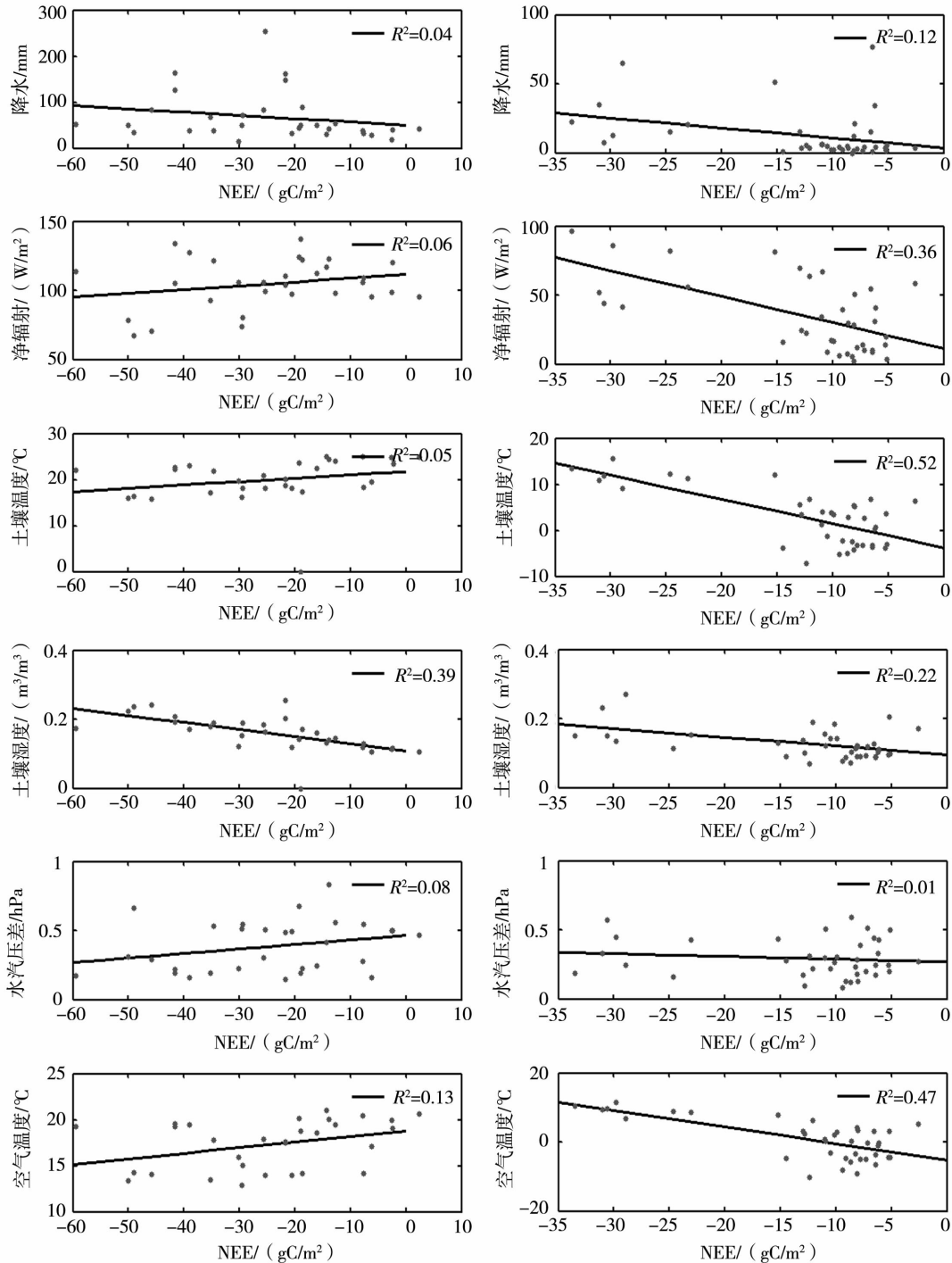


图 6 生长季节(左)和非生长季节(右)NEE 与环境因子之间的相关性  
Fig.6 Relationship between NEE and environment factors during growing season(the left) and non - growing season(the right) at SACOL

而土壤环境条件对生态系统碳交换起重要作用,在土壤水分条件相对较好的年份,碳吸收量相对比较大。在观测的 6 a 期间里,土壤湿度年平均值 2007 > 2008 > 2009 > 2010 > 2012 > 2011 年,NEE 的绝对值变化 2007 > 2012 > 2008 > 2009 > 2010 > 2011 年。2012 年由于降水相对比较多,同时空气温度和土壤温度在 6 a 中最低,抑制了土壤和植被的呼吸作用,故 2012 年 NEE 值相对比较大。其余年份 NEE 和土壤湿度的变化趋势均一致。从表 5 中各年降水、土壤湿度和 NEE 月累积量最大值出现的月份看出,土壤湿度出现峰值之后,NEE 的累积值达到最大,所以 NEE 受土壤湿度变化的影响很大。

表 5 SACOL 站 2007~2012 年降水、土壤湿度和 NEE 月累积量峰值出现月份

Tab. 5 The month occurring the maximum cumulative precipitation, maximum mean soil moisture and NEE at SACOL during 2007–2012

	2007	2008	2009	2010	2011	2012
NEE	7 月	9 月	9 月	6 月	9 月	7 月
降水量	6 月	8 月	8 月	5 月	6 月	7 月
土壤湿度	6 月	9 月	8 月	6 月	9 月	7 月

在非生长季节,植被生长基本停止,光合作用和呼吸作用基本为 0。NEE 的变化主要受存储在空气中的 CO<sub>2</sub> 变化的影响。从相关性分析来看,NEE 与土壤温度和空气温度的相关性最大,NEE 随着空气温度和土壤温度的增加而减小。有研究表明,冬季由于空气温度和土壤温度很低,土壤微生物和根系呼吸和光合作用基本停止,但是 CO<sub>2</sub> 在水中的溶解度随温度下降而升高,此时土壤孔隙中的 CO<sub>2</sub> 易被土壤水分吸收而积聚在冻土层中,大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度因高于土壤孔隙中的 CO<sub>2</sub> 浓度而向土壤扩散,导致冬季出现 NEE 负值现象<sup>[27]</sup>。可见土壤温度和空气温度是影响非生长季节 NEE 变化的主要因子。

## 4 结 论

(1)黄土高原半干旱区 NEE 的日变化呈“U”型曲线,白天以碳吸收为主,夜间以碳释放为主,正午前为碳吸收峰值,总体表现为生态系统的碳汇。NEE 的日变化有很大的季节差异,四季 NEE 累积值依次是秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季。各年份达到 CO<sub>2</sub> 吸收峰值的月份不同,NEE 的累积量也不同,有明显的年际差异。

(2)黄土高原半干旱区 NEE 的日变化主要受

净辐射的影响,随着净辐射的增加,CO<sub>2</sub> 的吸收量逐渐增加,净辐射影响植被的光合作用,两者有比较明显的负相关关系。当净辐射增加到 450 W/m<sup>2</sup> 时,光合作用达到饱和,NEE 不再降低反而增加。

(3)黄土高原半干旱区 NEE 在生长季节变化幅度大,非生长季节变化幅度小。土壤条件限制生长季节 NEE 的变化,黄土高原半干旱区降水少,植被生长所需水分受限制,土壤水分影响 NEE 在生长季节的变化。在非生长季节,植被生长基本停止,空气温度和土壤温度会影响空气中 CO<sub>2</sub> 浓度的变化。致谢:感谢兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)提供数据资料以及相关人员对仪器的维护和管理。

## 参考文献:

- [1] 张玉铭,胡春胜,张佳宝. 农田土壤主要温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(4):966–975.
- [2] 方精云. 全球生态学:气候变化和生态响应[M]. 北京:高等教育出版社,2000. 1–12.
- [3] 马虹,陈亚宁,李卫红. 陆地生态系统 CO<sub>2</sub> 与水热通量的研究进展[J]. 新疆环境保护,2012,34(2):1–8.
- [4] 耿元波,董云社,齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述[J]. 地理科学进展,2004,23(3):74–81.
- [5] 卫亚星,王莉雯,石迎春,等. 青海省草地资源净初级生产力遥感监测[J]. 地理科学,2012,32(5):621–627.
- [6] 徐素娟,刘景双,王洋,等. 1980–2007 年三江平原主要农作物碳蓄积量变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(10):179–183.
- [7] 张林,王礼茂. 三北防护林体系森林碳密度及碳储量动态[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(8):136–140.
- [8] 马文红,韩梅,林鑫. 内蒙古温带草地植被的碳储量[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(3):192–195.
- [9] Yu G R, Sun X M. Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystem[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 189–192.
- [10] 岳广阳,赵林,赵拥华,等. 青藏高原草地生态系统碳通量研究进展[J]. 冰川冻土,2010,32(1):166–174.
- [11] 杜群,刘辉志,冯健武,等. 半干旱区草原生态系统的碳交换特征[J]. 中国科学(地球科学),2012,42(5):711–722.
- [12] 沈晓坤,刘明惠,张燕堃,等. 黄土高原围封与自然放牧草地碳交换特征[J]. 西北植物学报,2014,34(9):1869–1877.
- [13] Xie J, Huang J, Wang G, et al. The effects of clouds and aerosols on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange over semi-arid Loess Plateau of Northwest China[J]. Atmos Chem Phys, 2010(10):8205–8218.
- [14] 王国印. 半干旱区陆气相互作用的观测与研究[D]. 兰州:兰州大学,2013. 131–138.
- [15] 杨兴国,牛生杰,郑有飞. 陆面过程观测试验研究进展[J]. 干旱气象,2003,21(3):83–89.
- [16] 王胜,王毅荣. 甘肃春小麦产量时空分布及其气候响应[J].

- 干旱气象,2013,31(2):298-302.
- [17] Huang J, W Zhang, Zuo J, et al. An overview of the Semi - Arid Climate and Environment Research Observatory over the Loess Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009,25(6):1-16.
- [18] Wang G, Huang J, Guo W, et al. Observation analysis of land - atmosphere interactions over the Loess Plateau of northwest China [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115D00K17, doi: 10. 1029/2009JD013372.
- [19] Zuo J, Huang J, Wang J, et al. Surface turbulent flux measurements over the Loess Plateau for a semi - arid climate change study [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009,26(4):674-691.
- [20] Sun C, Jiang H, Zhou G M, et al. Variation characteristics of CO<sub>2</sub> flux in *Phyllostachys edulis* forest ecosystem in subtropical region of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10):2717-2724.
- [21] Baldoechi D D, Hieks B B, Meyers T P. Measuring biosphere - atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods[J]. *Ecology*, 1988(69):1331-1340.
- [22] 张晴,李力. 我国净生态系统碳交换量(NEE)的时空变化特征研究[J]. *安徽农业科学*,2009,37(7):3108-3109,3140.
- [23] 解静,黄建平,王国印,等. 中国北方半干旱区二氧化碳通量的对比分析[J]. *地球科学进展*,2010(24):50-63.
- [24] Reya Pegoraro, Tedeschiv. Annual Variation in Soil Respiration and Its Components in a Coppice Oak Forest in Central Italy[J]. *Global Change Biology*,2002,8(9):851-866.
- [25] 赵亮,徐世晓,李英年,等. 青藏高原矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸 CO<sub>2</sub> 通量变化与环境因子的关系[J]. *西北植物学报*, 2006,26(1):133-142.
- [26] Guan X, Huang J, Guo N, et al. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(9):692-700.
- [27] Zhang J X, Cao G M. The carbon storage and carbon cycle among the atmosphere, soil vegetation and animal in the *Kobresia humilis* alpine meadow ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4):627-634.

## Characteristics of Net Carbon Exchange over the Semi - arid Loess Plateau in Northwest China

YAO Jingyu, WANG Guoying, HUANG Jianping, BI Jianrong

(College of Atmospheric Sciences, Key Laboratory for Semi - Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the continuous observation data of carbon dioxide flux using eddy covariance technique (ECT) at the Semi - Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL) during 2007 - 2012, and combined meteorological observations, the variation characteristics of net ecosystem carbon exchange (NEE) and environment factors influencing NEE there were analyzed. Results are as follows: (1) The annual cumulative average NEE value at SACOL was  $-214.50 \pm 43 \text{ gC/m}^2$ , thereinto,  $-171.58 \pm 41 \text{ gC/m}^2$  during growing season, and  $-42.92 \pm 5 \text{ gC/m}^2$  during non - growing season. (2) The diurnal variation curve of NEE at SACOL presented an asymmetrical U shape, and net radiation was the main influencing factor. The SACOL was an obvious sink of carbon with daily average NEE value of  $-1.15 \text{ gC/m}^2$ . (3) The variation of carbon dioxide flux showed significant seasonal and interannual differences. The amplitude of variation was bigger in growing season, which was affected by soil conditions.

**Key words:** semi - arid Loess Plateau; net ecosystem carbon exchange; net radiation; soil moisture