

文章编号:1001-8166(2010)增-0050-14

# 中国北方半干旱区二氧化碳通量的对比分析\*

解 静,黄建平\*,王国印,闭建荣,赵钱飞,张明明

(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:**采用涡动相关方法连续观测的 CO<sub>2</sub> 通量,常规气象要素和辐射观测资料,分别对比分析了 2008 年 7 月至 2009 年 10 月 SACOL 站和兴隆山观测点,2007 年 SACOL 站和通榆退化草地站的 CO<sub>2</sub> 通量,及其与各气象要素间的关系。研究表明:SACOL 站和兴隆山观测点虽受同一气候系统的影响,但因其下垫面状况不同,2 个站点 CO<sub>2</sub> 通量的月平均变化却存在明显的差异。兴隆山观测点农作物的碳交换变化主要依赖于植被的物候,而在 SACOL 站则主要是受降水的影响。此外,SACOL 站和兴隆山观测点影响 CO<sub>2</sub> 通量变化的各气象要素的临界值都比较低,当某一气象要素超过临界值时,就会对碳交换产生相反的作用。SACOL 站和通榆退化草地站 CO<sub>2</sub> 通量的月变化特征基本一致。虽然通榆站 2007 年的降水量较其他年份偏少,但退化草地对 CO<sub>2</sub> 的吸收能力仍然大于 SACOL 站。此外,当通榆站退化草地对 CO<sub>2</sub> 的吸收达到峰值时,各气象要素所对应的临界值都明显大于 SACOL 站,这表明通榆站的退化草地可能比 SACOL 站的稀疏草地对气候变化(如全球变暖)的调节能力更强。

**关 键 词:**北方半干旱区;CO<sub>2</sub> 通量;陆—气相互作用

**中图分类号:**P404 **文献标志码:**A

## 1 引 言

陆面作为下垫面,与其上的大气进行着物质、能量和动量的交换,是大气重要的能量来源,陆—气间的相互作用也在不同的时间和空间尺度上影响着区域和全球的气候变化。人类活动和地表变化对气候系统的影响以及全球变化的区域响应,也是通过陆—气间的能量和物质交换过程得以实现的。因而,深入研究陆地上各种下垫面与大气之间相互作用的物理、生化过程,精确地预报陆—气间动量、能量、物质(水汽及 CO<sub>2</sub> 等)、辐射等的交换,以及模拟地表温度、湿度和大气边界层的发展变化等与气候研究密切相关的信息,已成为全球气候变化研究的迫切需要。20 世纪 80 年代中后期,陆面过程及其与气候的相互作用也越来越多地引起了人们的广泛

关注,并且逐渐发展成为了一个重要的科学研究领域,在 WCRP 和 IGBP 的协调下,在全球具有代表性的主要气候或生态区相继进行了 50 多项陆面过程实验研究,使得陆—气相互作用观测和陆—气相互作用对季风和气候影响的研究已成为国际气候变化及其可预测性研究计划(CLIVAR)和全球能量和水循环研究计划(GEWEX)的重点内容<sup>[1]</sup>。

干旱和半干旱区约占全球陆地面积的 30%,气候变化和气候变率可能会对这些地区产生显著的影响。人类活动和全球气候变化在我国北方干旱化成因中的作用,是当前研究全球变化和区域响应的重要课题。已有相关研究表明,人类活动对我国北方干旱化可能有重要的影响,甚至有加速作用<sup>[2]</sup>。在我国,地表与大气之间的能量和物质通量的交换研究已经引起诸多关注<sup>[3~7]</sup>。过去 30 年在我国北方

\* 收稿日期:2010-10-12;修回日期:2010-11-15.

\* 基金项目:国家自然科学基金项目“黄土高原半干旱区气溶胶对陆—气间相互作用影响的观测实验研究”(编号:40633017);国家自然科学基金杰出青年基金项目“沙尘气溶胶对西北地区云和降水的影响”(编号:40725015)共同资助。

作者简介:解静(1984-),女,河北石家庄人,博士研究生,主要从事陆—气相互作用的研究。E-mail:jiej05@lzu.cn

\* 通讯作者:黄建平(1962-),男,福建漳平人,教授,主要从事气候变化和大气遥感的研究。E-mail:hjp@lzu.edu.cn

干旱和半干旱区已经陆续开展了陆面过程大气边界层观测实验,如 HEIFE<sup>[8,9]</sup>、IMGRASS<sup>[5,10]</sup>、NWC-ALIEX<sup>[11~13]</sup>等,获得了大量宝贵的野外观测实验资料和研究成果。不过,上述实验一般只在夏季进行加强观测,缺少长期连续的地—气间物质和能量交换的监测。

在国家重点基础研究发展计划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测”的支持下,中国科学院大气物理研究所在吉林通榆建立了“干旱化和有序人类活动”长期观测实验站<sup>[14]</sup>。该站于2002年10月正式建成,并开始连续观测。而后2005年兰州大学利用国家“973”计划、国家教育部“211工程”和“985工程”资金投资建成了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)。这2个站点目前都被批准加入国际CEOP项目,其中SACOL站还作为参加此项计划的全球协同加强观测站之一。目前通榆观测站和SACOL站都已经进行了4年以上的长期定位连续观测,并取得了一系列研究成果<sup>[7,15~21]</sup>。

大气中CO<sub>2</sub>浓度的相对增加对气候<sup>[22]</sup>以及光合作用和植被群落的结构和功能已经产生了深远的影响,因此植被在全球碳平衡中起着重要的作用<sup>[23,34]</sup>。地气系统的水汽和CO<sub>2</sub>交换对于理解我国由于水资源严重短缺和污染的快速增加造成气候和环境变化的机制尤为重要。人类活动释放的温室气体会造成地表温度的增加(温室效应),并对气候乃至社会福利产生深远影响。在全球变暖的背景下半干旱黄土高原地区的急剧增温<sup>[25,26]</sup>,已经导致这些地区原本脆弱的植被生态资源快速退化<sup>[27]</sup>。

本文主要对SACOL站和其附近的兴隆山观测点,以及通榆退化草地站CO<sub>2</sub>通量的日变化和月变化特征,及其与各气象要素的关系进行了对比分析。旨在通过半干旱区不同下垫面地气交换及生态过程的长期定位连续监测,获得地气界面物质和能量交换的日、月、季及年变化特征,进而分析在不同生态系统条件下各气象要素对碳交换的影响机制,评估人类活动在北方干旱化中的作用,为北方干旱化的预测提供科学的依据。

## 2 观测站点介绍

### 2.1 SACOL观测站

兰州大学半干旱气候与环境观测站<sup>[7]</sup>位于我国西北部甘肃省兰州大学榆中校区的翠英山顶

(35.946°N, 104.137°E),距离兰州市大约48 km,海拔高度约1 965.8 m。观测场占地约120亩,其下垫面为典型的黄土高原地貌,塬面梁峁基本为原生植被(图2)。属温带半干旱气候,受大陆季风影响,年平均气温6.7℃,地表观测的最高气温出现在7月,年平均值为19℃,最低气温出现在冬末,年平均值为0.8℃。年平均降雨量381.8 mm,蒸发量1 528.5 mm,相对湿度63%。山顶全年盛行西北和东南风,年平均风速约为1.6 m/s。全年日照时数2 607.2小时左右。由于该测站位于地表平坦的山顶,受周围建筑物和人类活动的影响较小,对方圆几百公里半干旱地区的气候状况具有很好的代表性。

### 2.2 兴隆山观测点

兴隆山观测点(35°46'N, 104°03'E)坐落在黄土高原中西部,位于兰州市东南45 km的榆中境内,距离兰州大学榆中校区SACOL观测站约25 km,海拔2 481 m。兴隆山是目前黄土高原上仅存的几个森林岛之一。地处季风气候区与非季风气候区的过渡地带,是典型的温带半湿润大陆性季风气候区,属高寒半湿润性多雨气候,年降水量500 mm以上。台站为农耕地,2008年种植的农作物为胡麻,2009年为小麦,其附近东面山体为原始森林区,北面山体为矮小灌木、稀疏草甸,西面山体因靠近马衔山为高寒草甸,测站附近仍有农作物。南面10 km左右为马衔山,高寒草甸。

### 2.3 通榆观测站

吉林通榆长期观测实验站位于吉林省白城市通榆县新华乡的行政地域内。观测站地理位置为(44°25' N, 122°52' E),处在白城至双辽沙丘覆盖的冲积平原区,平均海拔高度为184 m,观测区地形非常平坦。通榆属中温带半干旱大陆性季风气候,多年平均气温为5.2℃,气压为996.8 hPa,平均年降水量404.3 mm。土壤主要有风沙土、淡黑钙土、盐碱土和草甸土,风沙土是最主要的土壤,土壤质地较粗,有机质含量低,风蚀严重。植被主要为半干旱气候条件下的草原植被,地势高的地方主要以羽茅(*Achnatherum sibiricum* (Linn.) Keng)、西伯利亚蒿(*Artemisia verbenacea* (Komar.) Kitagawa)、红毛公(*Spodiopogon sibiricus* Trin)、野古草(*Arundinella anomala* Steud)等为主;低湿洼地主要以芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、苔草(*Carex dispalata* Boott ex A. Gray)、碱蓬(*Herba Suaedae Glaucae Suaeda glauca* Bge.)和碱蒿(*Artemisia anethifolia* Web. ex Stechm.)为主;而风沙地带植

被稀疏,主要生长蒙古杏(*Armeniaca sibirica* (Linn.) Lam.)、家榆(*Ulmus pumila* Linn.)等灌丛及麻黄(*Ephedra intermedia* Schrenk ex Mey.)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.)等旱生草本群落。草地退化严重,草的覆盖度大约在60%,夏季草最高也不超过10 cm,仍在放牧;在干季,草的高度在5 cm左右,草的覆盖度只有40%左右。

3个站点的基本情况及其下垫面和植被状况分别见表1和图1。

### 3 资料

我们采用了SACOL站和兴隆山观测点2008年7月至2009年10月的CO<sub>2</sub>通量观测资料、边界层气象资料和辐射观测资料,以及SACOL站和通榆退化草地站2007年的CO<sub>2</sub>通量观测资料、边界层气象资料和辐射观测资料。3个站点所采用的仪器型号一致,为对比分析的进行提供了条件(表2)。其中通榆站的观测数据有部分缺失,约占总数据量的6.4%。

表1 SACOL站、兴隆山观测点和通榆退化草地站的基本状况

Table 1 Site information at the SACOL, Xinglong mountain (XM) and Tongyu during the measurement periods

站点	SACOL站	兴隆山观测点	通榆退化草地站
经纬度	35°57' N, 104°08' E	35°46' N, 104°03' E	44°25' N, 122°52' E
海拔	1 965.8 m	2 481 m	184 m
气候类型	温带半干旱气候	温带半湿润大陆性季风气候	中温带半干旱大陆性季风气候
年平均气温	6.7 °C	--	5.2 °C
年平均降水量	381.8 mm	500 mm 以上	404.3 mm
下垫面植被类型	稀疏草地	农作物;2008年为胡麻,2009年为小麦	退化草地
观测时间	2008年7月至2009年10月	2008年7月至2009年10月	2007年1月至2007年12月

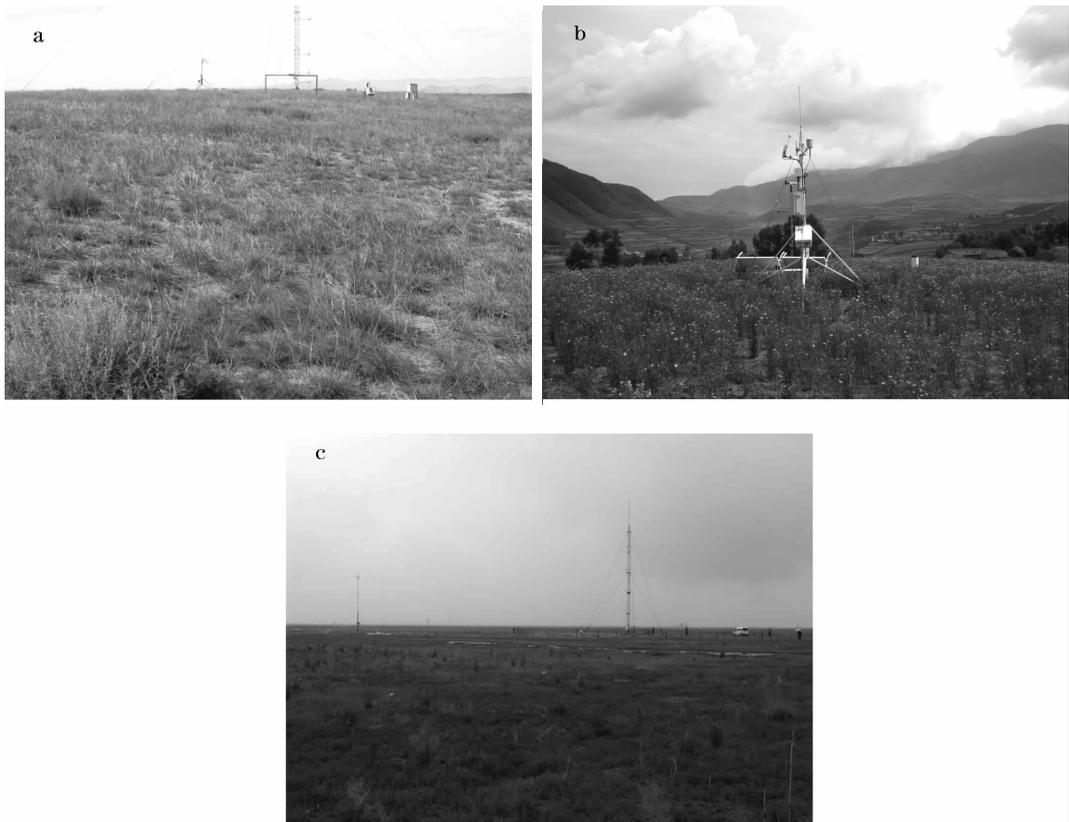


图1 3个站点的下垫面和植被状况 (a) SACOL站, (b) 兴隆山观测点, (c) 通榆退化草地站

Fig.1 Vegetation views (a) SACOL, (b) Xinglong mountain, (c) Tongyu degraded grassland site

表 2 SACOL 站、兴隆山观测点和通榆退化草地站所采用的观测仪器、观测高度和仪器型号

Table 2 Instruments and parameters measured from SACOL, Xinlong mountain and Tongyu sites

站点	仪器名称	仪器型号	观测项目	观测高度	制造商
SACOL 站和 兴隆 山观 测点	开路涡动相关系统	CSAT3, Li-CS7500	CO <sub>2</sub> 、感热、潜热通量等	3.0 m	Campbell, Li-Cor
	空气温/湿度传感器	HMP45C-L	空气温度、相对湿度	1, 2, 4, 8, 12, 16, 32 m	Vaisala
	土壤温度仪	STP01-L50	土壤温度	5, 10, 20, 40, 80 cm	Hukseflux
	土壤湿度仪	CS616-L	土壤湿度	5, 10, 20, 40, 80 cm	Campbell
	风速传感器	O14AL	风速	1, 2, 4, 8, 12, 16, 32 m	Met One
通榆 退化 草地 站	雨量筒	TE525MM-L	降水量	0.5 m	R. M Young
	辐射强度计	CM21	太阳短波辐射	1.5 m	Kipp & Zonen
	开路涡动相关系统	CSAT3, Li-CS7500	CO <sub>2</sub> 、感热、潜热通量等	2.0 m	Campbell, Li-Cor
	空气温/湿度传感器	HMP45C-L	空气温度	2, 4, 8, 12, 17 m	Vaisala
	土壤温度仪	STP01-L50, 107-L	土壤温度	2, 5, 10, 20, 50, 80 cm	Hukseflux
站	土壤湿度仪	CS616_L	土壤湿度	5, 10, 20, 40, 80 cm	Campbell
	雨量筒	TE525MM_L	降水	1.0 m	R. M Young
	辐射强度计	CM21	太阳短波辐射	3.0 m	Kipp & Zonen

CO<sub>2</sub>通量数据是由涡动相关通量观测系统的观测计算得到的,该系统主要由三维超声风速温度仪(CSAT3, Campbell)、红外气体分析仪(LI-7500, LI-COR)和数据采集器(CR5000, Campbell)组成,SACOL站的观测高度为3.0 m,兴隆山观测点为2.82 m,通榆退化草地站为3.5 m。原始数据的采样频率为10 Hz,经过涡动相关处理后得到的CO<sub>2</sub>通量数据的时间间隔为30 min。在获得湍流通量之前,各个站点的数据都经过了严格的质量控制<sup>[28,29]</sup>,去掉了不合理或因仪器出现故障,或天气等原因产生的野点。另外,SACOL站2007年6月和7月降水量数据因仪器损坏而缺失,利用榆中县气象站数据代替,该气象台站距离SACOL站约7 km。

## 4 SACOL站和兴隆山观测点CO<sub>2</sub>通量的对比分析

### 4.1 CO<sub>2</sub>通量的季节变化和日变化特征

图2给出了SACOL站和兴隆山观测点CO<sub>2</sub>通量月平均的日变化时间序列。从图2可以看出在夏秋生长季节,CO<sub>2</sub>通量都表现出明显的日变化。白天CO<sub>2</sub>的吸收(负值表示植被吸收CO<sub>2</sub>,即碳汇)随着太阳辐射增强而增大,达到最大值后开始减小。两个站点最大的碳吸收均能达到0.3 mg/(m<sup>2</sup>·s),但远远小于森林生态系统<sup>[30]</sup>。夜间SACOL站植被的呼吸作用比兴隆山站要强,尤其在夏秋季节更显著。这主要是由于SACOL站温度比兴隆山略高的原因,在后面的分析中会得到证实。此外,通观整个时间序列,2个站点的CO<sub>2</sub>通量在2008年和2009年都各自显示出比较一致的年变化特征。SACOL站8月开始进入植被光合作用较强烈的时期,9月植被

的碳吸收达到峰值,10月碳交换开始有所减弱但其值仍比较大;而在兴隆山观测点植被的碳交换从5月开始增强,6月达到峰值,而后逐渐减弱至9月。值得注意的是,SACOL站CO<sub>2</sub>通量最大的吸收值出现在9月,而兴隆山站则出现在6月。2008年兴隆山观测点种植的作物为小麦,2009年为胡麻,这两种农作物在6月都处于生长的中期,也就是它们进行光合作用最强烈的阶段,所以碳交换能力达到峰值,而后随着农作物的生长直至收获,碳交换作用逐渐减弱<sup>[31,32]</sup>,由此可见该站点的CO<sub>2</sub>交换主要依赖于农作物的物候。另外,从7~9月植被生长季CO<sub>2</sub>通量的月平均的日变化(图3),可以看出2个站点7~8月植被对CO<sub>2</sub>吸收的最大值通常都出现在上午而不是中午,此后碳吸收缓慢减弱;而9月由于太阳辐射强度的减弱,植被碳吸收的最大值推迟到了中午。

### 4.2 CO<sub>2</sub>通量与气象要素的关系

SACOL站和兴隆山观测点2.0 m处的空气温度以及5 cm深处的土壤温度对比表明(图4a和图4b),2个站点的温度都显示出几乎完全一致的变化特征,但由于兴隆山的海拔高于SACOL站,使得其空气和土壤温度都明显略低于SACOL站。SACOL站与兴隆山观测点2.0 m处的饱和水汽压差的年变化特征仍然一致(图3d),但SACOL站的值明显大于兴隆山,并且随着水汽压差的增大,站点的差异也逐渐增大。此外,2个站点5 cm深处的土壤湿度和月总降水量变化特征也基本一致,但兴隆山观测点的值都明显大于SACOL站(图4c和4e)。作为土壤中水分的主要来源,2个站点土壤湿度对降水的强度及降水频次都非常敏感。这里要特别指出的

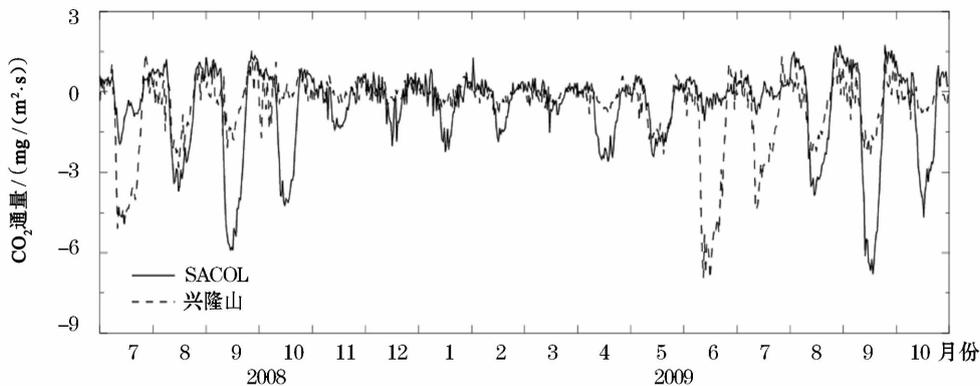


图2 2008年7月至2009年10月SACOL站和兴隆山观测点CO<sub>2</sub>通量月平均的日变化的时间序列

Fig. 2 Time series of monthly average diurnal cycle of CO<sub>2</sub> flux at SACOL and Xinglong mountain sites

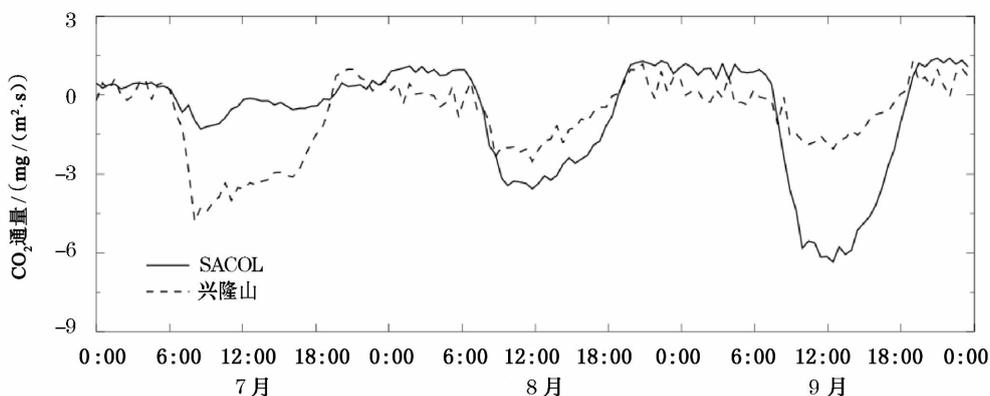


图3 2008年和2009年7~9月SACOL站和兴隆山观测点CO<sub>2</sub>通量的月平均的日变化时间序列

Fig. 3 Time series of monthly mean diurnal cycle of CO<sub>2</sub> flux at SACOL and Xinglong mountain sites from July to September in 2008 and 2009

是,SACOL站CO<sub>2</sub>通量的月平均变化与土壤湿度和降水量的变化表现出较好的一致性(图2,图4c和图4e)。2个站点气象要素变化特征的一致性说明它们受到同一气候系统的影响,但由于兴隆山周围独特的地形和环境,使得该地区雨水丰富,空气中水汽含量也较高,形成了特有的小气候。同时也正是降水条件的差异造成这2个站点所适宜生长的植被不同,例如,兴隆山观测点较小的饱和水汽压差更有利于植被叶面气孔的打开,从而增强了植被的光合作用<sup>[33]</sup>;而SACOL站草地的生长状况与降水的关系更为密切。

由于兴隆山观测点夏末(8月中旬)农作物已经收获,地表几乎没有植被覆盖,使得秋季CO<sub>2</sub>通量(绝对值)比植被生长季小得多,所以CO<sub>2</sub>通量与各气象要素的关系很弱,可以不予考虑。如图5a~d所示,兴隆山观测点的CO<sub>2</sub>通量随温度的变化趋势与SACOL站基本一致,两个站点植被的CO<sub>2</sub>吸收都

先随着温度的增加而增大到峰值,而后减小(秋季温度较低,而夏季温度较高)。这与许多生态系统碳同化与温度关系的研究结果是一致的<sup>[34]</sup>,但SACOL站CO<sub>2</sub>吸收达到峰值所需要的温度要低得多(空气温度约在15~20℃之间)。不过,2个站点的土壤湿度对CO<sub>2</sub>通量的影响却不同(图5e和f):SACOL站地处干旱区域土壤湿度较低,无论夏秋季,CO<sub>2</sub>吸收都随着土壤湿度的增大而增大,而兴隆山观测点植被的碳吸收先随着土壤湿度的增大先增大后减小,这说明当土壤湿度增大到一定程度时CO<sub>2</sub>的吸收也会达到饱和(但SACOL站的土壤湿度小于该临界值)。由于兴隆山空气中的水汽含量较高,饱和水汽压差较小,使得它对CO<sub>2</sub>吸收的影响并不明显。SACOL站的CO<sub>2</sub>通量与水汽压差之间的关系(图5g和h)则表现出与温度和湿度相似的性质。综合温度、湿度、饱和水汽压差与CO<sub>2</sub>通量的关系,可以看出它们对碳吸收的影响都存在一定的临

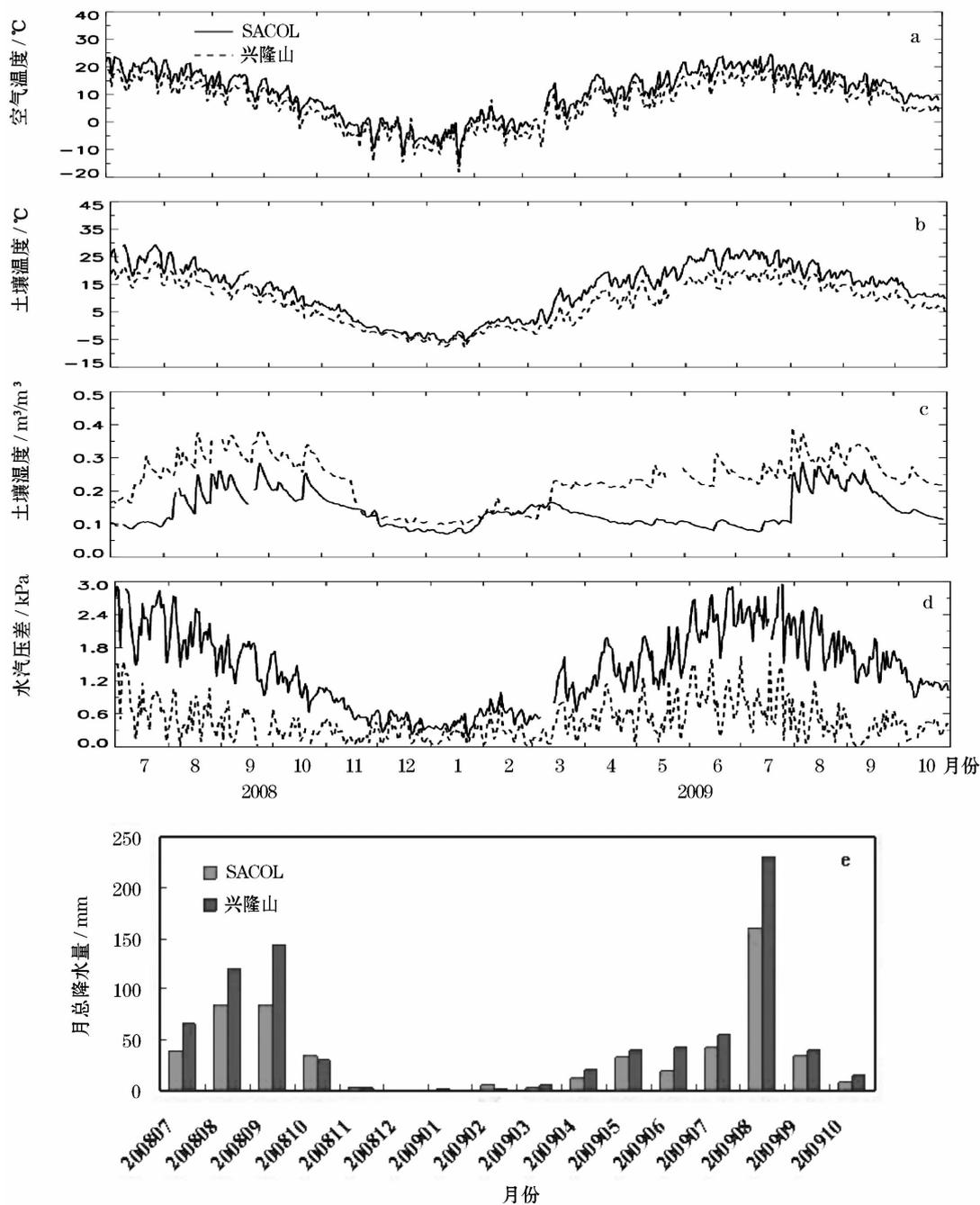


图4 2008年7月至2009年10月SACOL站和兴隆山观测点(a)空气温度、(b)土壤温度、(c)饱和水汽压差和(d)土壤湿度日平均值的时间序列以及(e)月总降水量的时间序列

Fig. 4 Time series of daily average (a) air temperature, (b) soil temperature, (c) VPD and (d) soil moisture, and (e) total monthly precipitation at SACOL and Xinglong mountain sites from July 2008 to October 2009

界值。当某一气象要素超过该值时,不但不会增强生态系统的碳吸收反而会起到负反馈作用。比如,半干旱黄土高原地区的增温可能会降低该地区的碳吸收。

表3给出了各个季节白天和夜间CO<sub>2</sub>通量与各气象要素变化的相关系数,总体来说夏秋季节CO<sub>2</sub>通

量与温度、湿度和水汽压差之间都存在着显著的相关关系。夜间,植被的呼吸作用与温度的关系明显优于湿度和水汽压差。白天,SACOL站的CO<sub>2</sub>通量与土壤湿度的相关性最好,而兴隆山站CO<sub>2</sub>通量与温度和土壤湿度之间都有较好的相关性。

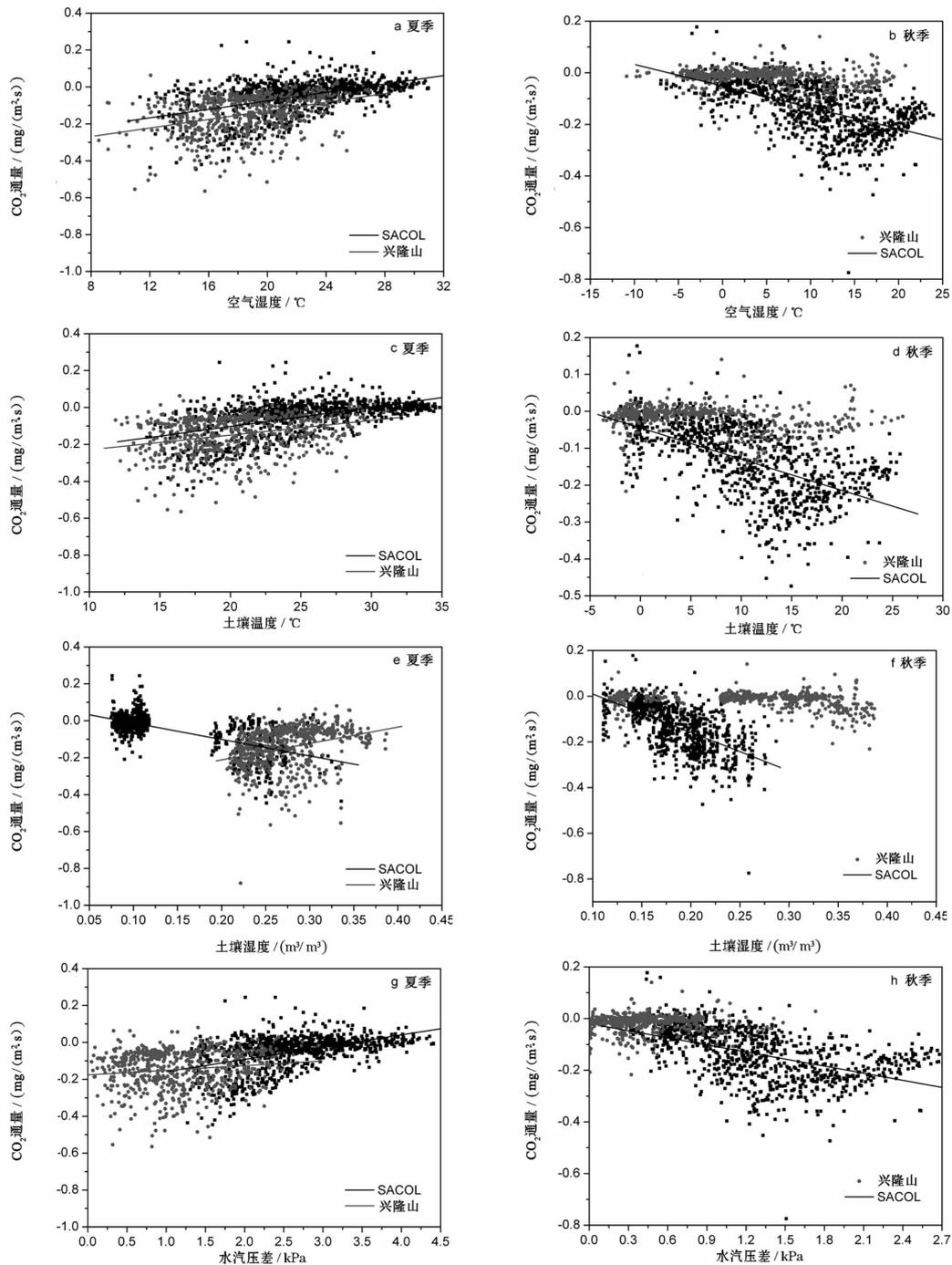


图5 SACOL站和兴隆山观测点夏秋季季节CO<sub>2</sub>通量与各气象要素之间的关系

Fig. 5 Relationships between CO<sub>2</sub> flux and meteorological elements

(a)和(b)空气温度,(c)和(d)土壤温度,(e)和(f)土壤湿度,(g)和(h)饱和水汽压差。对所有数据进行线性拟合((a)SACOL: $r^2=0.23$ , $n=892$ ,兴隆山: $r^2=0.13$ , $n=631$ ;(b)SACOL: $r^2=0.31$ , $n=925$ ;(c)SACOL: $r^2=0.27$ , $n=892$ ,兴隆山: $r^2=0.09$ , $n=631$ ;(d)SACOL: $r^2=0.31$ , $n=906$ ;(e)SACOL: $r^2=0.44$ , $n=892$ ,兴隆山: $r^2=0.10$ , $n=631$ ;(f)SACOL: $r^2=0.36$ , $n=905$ ;(g)SACOL: $r^2=0.22$ , $n=892$ ;  
兴隆山: $r^2=0.02$ , $n=631$ ;(h)SACOL: $r^2=0.26$ , $n=925$ )

(a) and (b) air temperature; (c) and (d) soil temperature; (e) and (f) soil moisture; (g) and (h) VPD in summer and autumn at SACOL and Xinglong Mountain sites. The linear fits are shown ((a) SACOL:  $r^2=0.23$ ,  $n=892$ , Xinglong Mountain:  $r^2=0.13$ ,  $n=631$ ); (b) SACOL:  $r^2=0.31$ ,  $n=925$ ; (c) SACOL:  $r^2=0.27$ ,  $n=892$ , Xinglong Mountain:  $r^2=0.09$ ,  $n=631$ ); (d) SACOL:  $r^2=0.31$ ,  $n=906$ ; (e) SACOL:  $r^2=0.44$ ,  $n=892$ , Xinglong Mountain:  $r^2=0.10$ ,  $n=631$ ); (f) SACOL:  $r^2=0.36$ ,  $n=905$ ; (g) SACOL:  $r^2=0.22$ ,  $n=892$ ;  
Xinglong Mountain:  $r^2=0.02$ ,  $n=631$ ; (h) SACOL:  $r^2=0.26$ ,  $n=925$ )

## 5 SACOL 站和通榆退化草地站 CO<sub>2</sub> 通量的对比分析

### 5.1 CO<sub>2</sub> 通量的季节变化和日变化特征

图 6 给出了 2007 年 SACOL 站和通榆退化草地站 CO<sub>2</sub> 通量月平均的日变化时间序列。2007 年 1~8 月通榆退化草地站的 CO<sub>2</sub> 通量(绝对值)明显大于 SACOL 站。通榆退化草地站夏季 CO<sub>2</sub> 交换最活跃的时期出现在 7~8 月,峰值约为 0.5 mg/(m<sup>2</sup>·s),而 SACOL 站 7~9 月 CO<sub>2</sub> 的吸收较强,到 10 月后开始逐渐减弱。夜间通榆退化草地站植被的呼吸作用也较 SACOL 站要大,尤其在夏季植被生长季节。

我们仍然选取 6~9 月植被生长季来进行分析

(图 7),可以看出 7~8 月通榆退化草地站 CO<sub>2</sub> 吸收的峰值出现的时间都比 SACOL 站晚, SACOL 站一般出现在上午 10 点左右(由于经度差异相当于通榆站上午 11 点左右),且 CO<sub>2</sub> 通量在达到峰值后有一个缓慢减少的阶段,这说明 SACOL 的矮草冠层在达到光饱和后,太阳辐射的继续增强反而抑制了其光合作用的进行。相比而言,通榆站 CO<sub>2</sub> 吸收的峰值则大约出现在正午 12 点前后,与太阳辐射的日变化基本一致。通过上述对比分析,通榆站草地虽然退化严重<sup>[19]</sup>,但生态系统的 CO<sub>2</sub> 交换能力仍比 SACOL 站的草地要强,这一点也将在后面对 CO<sub>2</sub> 吸收与太阳辐射之间的关系的分析中得到进一步的证实。

表 3 SACOL 站和兴隆山观测点各个季节 CO<sub>2</sub> 通量和各气象要素的相关性

Table 3 Relationship between CO<sub>2</sub> flux and meteorological elements for four seasons at SACOL and Xinglong mountain sites

气象要素				春季		夏季		秋季		冬季	
				相关系数	置信度	相关系数	置信度	相关系数	置信度	相关系数	置信度
二氧化碳通量	空气温度	SACOL	白天	-0.186	0.001	0.478	0.001	-0.556	0.001	0.096	0.01
			夜间	0.045	---	-0.125	0.001	0.353	0.001	0.086	0.01
		兴隆山	白天	-0.145	0.001	0.358	0.001	-0.206	0.001	0.069	0.05
			夜间	0.124	0.001	0.229	0.001	0.093	0.02	-0.076	0.02
	土壤温度	SACOL	白天	-0.327	0.001	0.518	0.001	-0.556	0.001	0.070	0.05
			夜间	0.001	---	-0.316	0.001	0.341	0.001	-0.022	---
		兴隆山	白天	-0.262	0.001	0.296	0.001	-0.273	0.001	0.039	---
			夜间	0.156	0.001	0.199	0.001	0.132	0.001	-0.035	---
	土壤湿度	SACOL	白天	0.561	0.001	-0.666	0.001	-0.603	0.001	0.071	0.05
			夜间	0.013	---	0.471	0.001	0.188	0.001	-0.014	---
		兴隆山	白天	-0.199	0.001	0.323	0.001	-0.238	0.001	0.022	---
			夜间	0.083	0.01	0.003	---	0.058	---	-0.019	---
水汽压差	SACOL	白天	-0.146	0.001	0.464	0.001	-0.506	0.001	0.074	0.05	
		夜间	0.052	---	-0.129	0.001	0.359	0.001	0.085	0.01	
	兴隆山	白天	-0.035	---	0.134	0.001	0.019	---	0.061	0.1	
		夜间	0.063	0.05	0.131	0.001	0.022	---	-0.049	---	

注: --- 表示未通过显著性检验

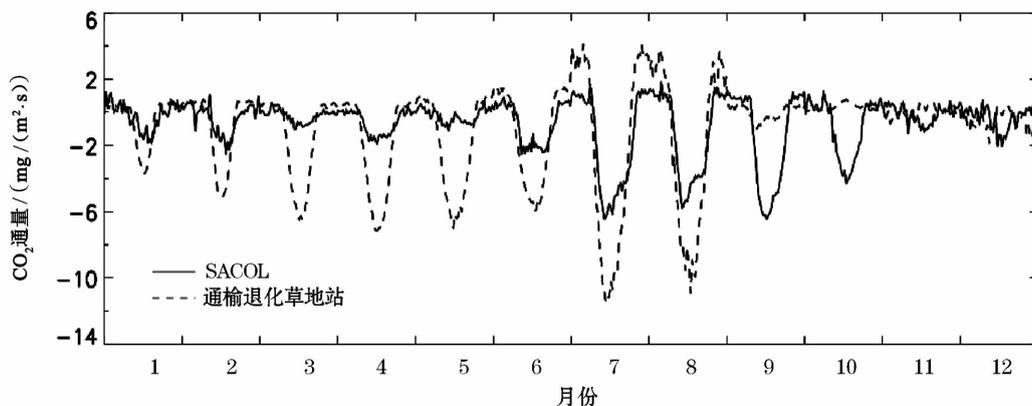


图 6 2007 年 SACOL 站和通榆退化草地站 CO<sub>2</sub> 通量月平均的日变化的时间序列

Fig. 6 Time series of monthly mean diurnal cycle of CO<sub>2</sub> flux at SACOL and Tongyu degraded sites in 2007

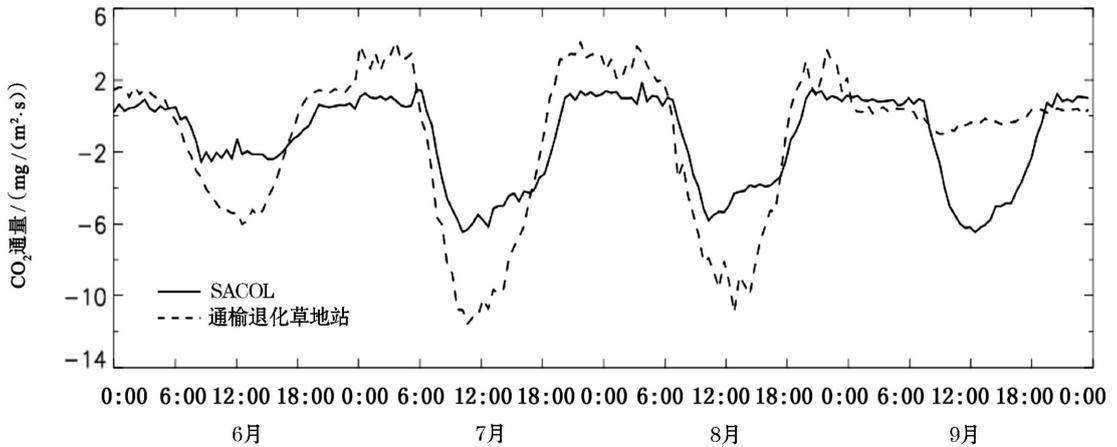


图7 2007年6~9月SACOL站和通榆退化草地站CO<sub>2</sub>通量月平均的日变化

Fig. 7 Time series of monthly mean diurnal cycle of CO<sub>2</sub> flux at SACOL and Tongyu degraded sites from June to September in 2007

## 5.2 CO<sub>2</sub>通量与气象要素的关系

为了对SACOL站和通榆退化草地站的气象要素变化进行对比,我们首先给出了2007年空气温度、土壤温度和土壤湿度日平均值,以及月总降水量的变化。由图8a和b可以看出,2个站点的温度相差不大。但月平均土壤湿度和月总降水量有明显的差异(图8c和d)。此外,图8d可以看出,通榆退化草地站2007年的总降水量只有189.3 mm,远小于该地区的多年平均值(404.3 mm),为干旱年,且大部分降水集中在6~8月;而SACOL站2007年总降水量为555.1 mm,明显高于多年平均的水平(381.8 mm),为相对湿润年,春季降水偏少,但出现在夏季的强降水,不仅改变了浅层的土壤湿度,而且也改变了深层的土壤湿度及植被的覆盖状况。但2个站点土壤湿度的最大值相当,甚至在4~5月,SACOL站的土壤湿度要低于通榆站。SACOL站和通榆退化草地站虽然都处于北方干旱半干旱地区,且地表均被稀疏草地覆盖,但由于所处地理位置、环境和气象条件的不同,使得它们的生态系统碳交换能力也存在一定的差异。

由于秋季通榆退化草地站的CO<sub>2</sub>吸收(绝对值)很小,与各气象要素间的关系并不明显(图9),所以不做考虑。图9a和b给出了2个站点空气温度与CO<sub>2</sub>通量的关系,结果表明:CO<sub>2</sub>吸收都随着空气温度的升高先增大而后减小,只是碳吸收的峰值出现的温度不同。SACOL站CO<sub>2</sub>吸收最大值所对应的温度约为15~20℃,小于通榆站最大CO<sub>2</sub>吸收所对应的温度区间25~30℃。虽然2个站点的土

壤温度在夏季相差较小,但其与CO<sub>2</sub>通量之间的关系也表现出类似的性质(图9c和d)。图9e和9f给出了CO<sub>2</sub>通量与土壤湿度之间的关系。夏季2个站点的CO<sub>2</sub>吸收与土壤湿度的关系比较一致,但SACOL站的CO<sub>2</sub>吸收仍较通榆站先达到峰值。秋季SACOL站的CO<sub>2</sub>吸收与土壤湿度的关系与夏季一致。到达地表的太阳辐射是植被进行光合作用的主要驱动力。植被冠层的光合作用随着太阳辐射的增强非线性增长,并在较高的辐射条件下达到光饱和。图9g表明SACOL站草地达到光饱和所需要的太阳辐射要比通榆退化草地站小得多。SACOL站的CO<sub>2</sub>吸收在太阳辐射较低时(<500 W/m<sup>2</sup>)就已经达到饱和<sup>[15]</sup>,而通榆退化草地的CO<sub>2</sub>吸收几乎在太阳辐射增大的整个阶段都在增强。

综上所述,所有气象要素与CO<sub>2</sub>通量之间关系的对比分析都表明通榆退化草地站生态系统的碳交换能力要大于SACOL站。当通榆站退化草地对CO<sub>2</sub>的吸收达到峰值时,各气象要素(如空气温度,土壤温度,土壤湿度等)所对应的临界值都明显大于SACOL站,这表明通榆站的退化草地可能比SACOL站的稀疏草地对气候变化(如全球变暖)的调节能力更强。

## 6 结论

本文主要对比了SACOL站与兴隆山观测点和通榆退化草地站CO<sub>2</sub>通量的日变化和季节变化特征及其与各气象要素之间的关系。主要结果包括:

(1) SACOL站和兴隆山观测点的CO<sub>2</sub>通量在

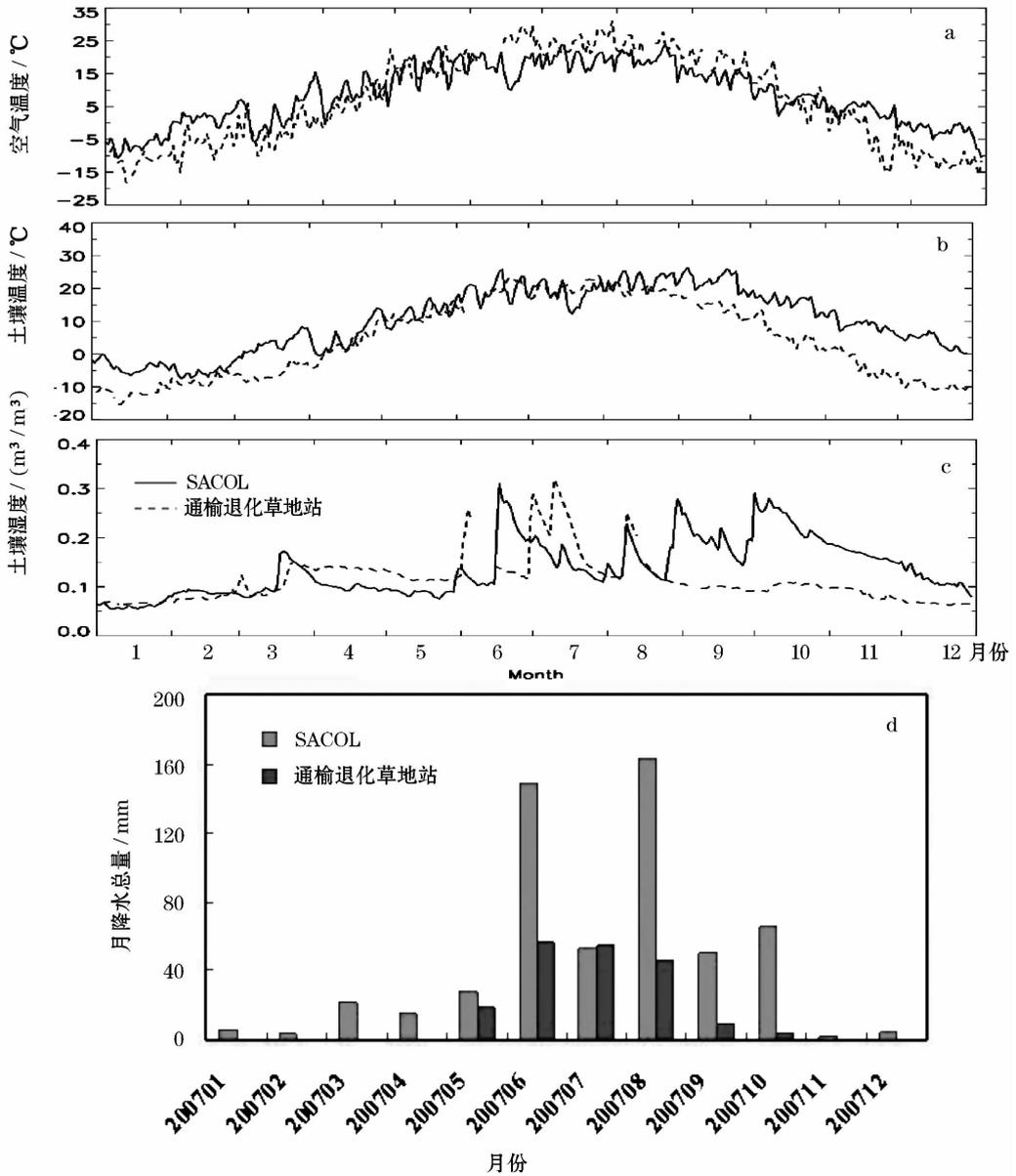


图8 2007年SACOL站和通榆退化草地站(a)空气温度、(b)土壤温度、(c)空气湿度月平均的时间序列,以及(d)月总降水量的时间序列

Fig. 8 Time series of monthly mean (a) air temperature, (b) soil temperature, (c) air moisture and (d) total monthly precipitation at SACOL and Tongyu degraded grassland sites in 2007

2008年和2009年都各自显示出比较一致的月平均变化趋势。2个站点 $\text{CO}_2$ 通量的峰值相差不大,都约为 $0.3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,远远小于森林生态系统,但2个站点之间 $\text{CO}_2$ 通量的月平均变化存在明显的差异。SACOL站 $\text{CO}_2$ 通量最大的吸收值出现在九月,而兴隆山站则出现在六月。其中兴隆山观测点 $\text{CO}_2$ 通量的季节变化特征主要依赖于农作物的物候。

(2) SACOL站和兴隆山观测点气象要素变化特征的一致性说明它们受到同一气候系统的影响,

但由于兴隆山周围独特的地形和环境,使得该地区雨水丰富,空气中水汽含量也较高,形成了特有的小气候。同时也正是降水条件的差异造成这2个站点所适宜生长的植被不同。而SACOL站草地的生长状况与降水的关系更为密切。

(3) 2007年1~8月通榆退化草地站的 $\text{CO}_2$ 通量(绝对值)明显大于SACOL站。通榆退化草地站夏季 $\text{CO}_2$ 交换最活跃的时期出现在7~8月,峰值约为 $0.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。通榆站草地虽然退化严重,但

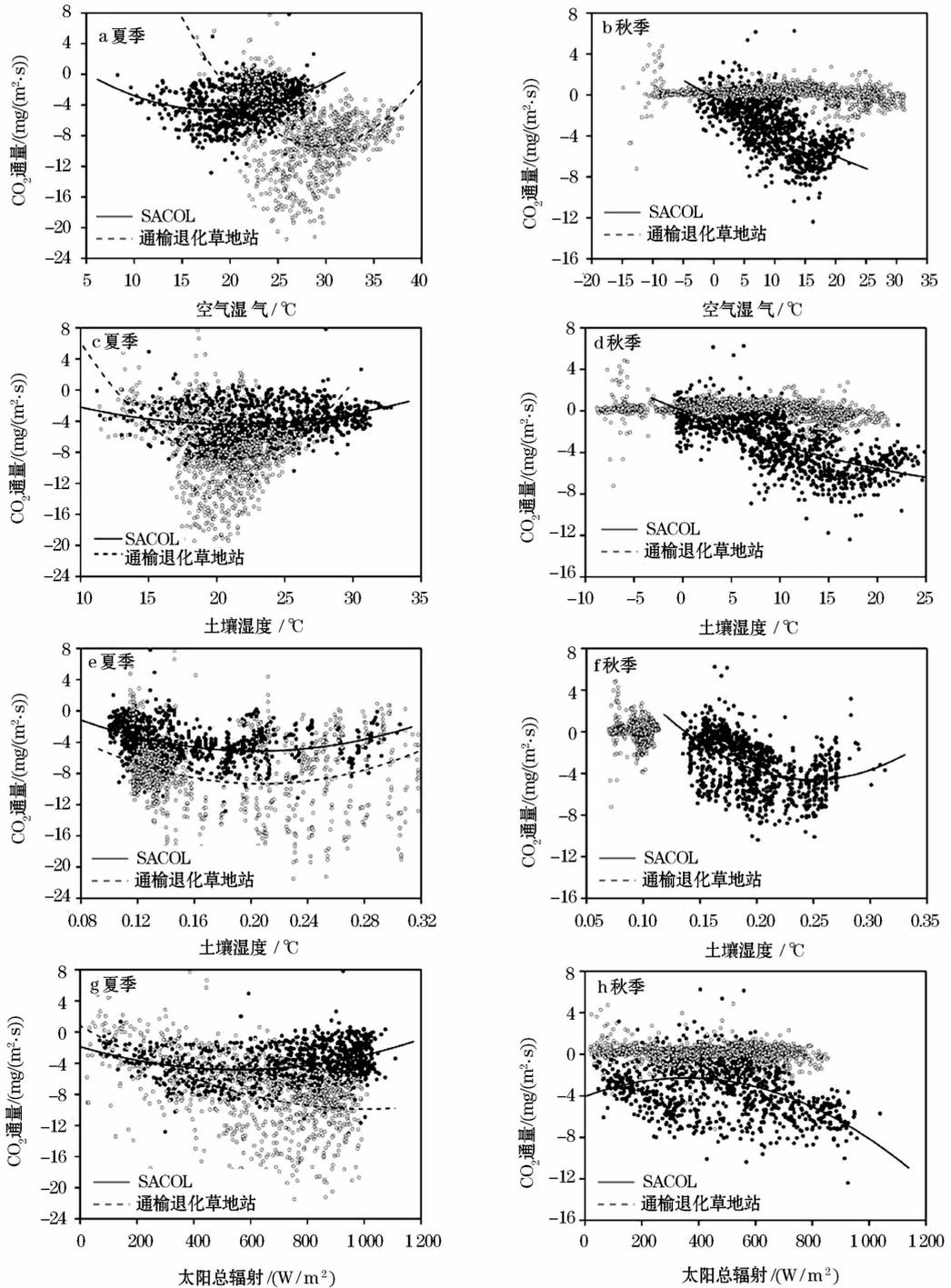


图9 SACOL 站和通榆退化草地站夏秋季节  $\text{CO}_2$  通量与各气象要素之间的关系

Fig. 9 Relationships between  $\text{CO}_2$  flux and meteorological elements

(a) 和 (b) 空气温度, (c) 和 (d) 土壤温度, (e) 和 (f) 土壤湿度, (g) 和 (h) 太阳总辐射。对所有数据进行二次拟合 (SACOL: 夏季  $n=962$ , 秋季  $n=996$ ; 通榆草地站: 夏季  $n=874$ )。 (a) SACOL:  $r^2=0.09$ , 通榆草地站:  $r^2=0.17$ ; (b) SACOL:  $r^2=0.38$ ; (c) SACOL:  $r^2=0.04$ , 通榆草地站:  $r^2=0.14$ ; (d) SACOL:  $r^2=0.45$ ; (e) SACOL:  $r^2=0.13$ , 通榆草地站:  $r^2=0.05$ ; (f) SACOL:  $r^2=0.23$ ; (g) SACOL:  $r^2=0.08$ , 通榆草地站:  $r^2=0.26$ ; (h) SACOL:  $r^2=0.18$ )

(a) and (b) air temperature; (c) and (d) soil temperature; (e) and (f) soil moisture; (g) and (h) total radiation in summer and autumn at SACOL and Tongyu degraded grassland sites. The 2nd fits are shown (SACOL: summer  $n=962$ , autumn  $n=996$ ; Tongyu: summer  $n=874$ ). (a) SACOL:  $r^2=0.09$ , Tongyu:  $r^2=0.17$ ; (b) SACOL:  $r^2=0.38$ ; (c) SACOL:  $r^2=0.04$ , Tongyu:  $r^2=0.14$ ; (d) SACOL:  $r^2=0.45$ ; (e) SACOL:  $r^2=0.13$ , Tongyu:  $r^2=0.05$ ; (f) SACOL:  $r^2=0.23$ ; (g) SACOL:  $r^2=0.08$ , Tongyu:  $r^2=0.26$ ; (h) SACOL:  $r^2=0.18$ )

生态系统的 CO<sub>2</sub> 交换能力仍比 SACOL 站的草地要强。两个站点虽然都处于我国北方半干旱地区,且地表均被稀疏草地覆盖,但由于所处地理位置、环境和气象条件的不同,使得它们的生态系统碳交换能力也存在一定的差异。

(4) 所有气象要素与 CO<sub>2</sub> 通量之间关系的对比分析都表明,SACOL 站和兴隆山观测点影响 CO<sub>2</sub> 通量变化的各气象要素的临界值都比较低,当某一气象要素超过临界值时,就会对碳交换产生相反的作用;当通榆站退化草地对 CO<sub>2</sub> 的吸收达到峰值时,各气象要素(如空气温度,土壤温度,土壤湿度等)所对应的临界值都明显大于 SACOL 站,这表明通榆站的退化草地可能比 SACOL 站的稀疏草地对气候变化(如全球变暖)的调节能力更强。

**致谢:**感谢中国科学院大气物理研究所刘辉志研究员在本论文完成中所给予的帮助,以及通榆长期观测实验站对数据资料的支持。

## 参考文献 (References):

[1] Wei Zhigang, Wen Jun, Lü Shihua, *et al.* A primary field experiment of land-atmosphere interaction over the Loess Plateau and its ground surface energy in clear day [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(4):545-555. [韦志刚, 文军, 吕世华, 等. 黄土高原陆—气相互作用预试验及其晴天地表能量特征分析[J]. 高原气象, 2005, 24(4):545-555.]

[2] Fu Congbin, Wen Gang. Several issues on aridification in the northern China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2002, 7(1): 22-29. [符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(1):22-29.]

[3] Zhu Z, Sun X, Zhang R. Statistical analysis and comparative study of energy balance components estimated using micrometeorological techniques during HUBEXIOP 1998/99 [J]. *Advances Atmospheric Science*, 2003, 20:285-291.

[4] Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, *et al.* The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu, northeast China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(2): 378-389. [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[J]. 气候和环境研究, 2004, 9(2):378-389.]

[5] Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, *et al.* Study on soil-vegetation-atmosphere interaction in Inner Mongolia semiarid grassland [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63:33-55. [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[J]. 气象学报, 2005, 63:33-55.]

[6] Yu G R, Wen X F, Tanner B D, *et al.* Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 125-137.

[7] 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 [J]. *Advance Atmospheric Science*, 2008, 25(6): 906-921.

[8] Hu Yinqiao. Research advance about the energy budget and transportation of water vapor in the HEIFE area [J]. *Advances in Earth Science*, 1994, 9: 30-34. [胡隐樵. 黑河实验(HEIFE)能量平衡和水汽输送研究进展[J]. 地球科学进展, 1994, 9: 30-34.]

[9] Hu Yinqiao, Gao Youxi. Some new understandings of processes at the land surface in arid area from the HEIFE [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 52(3): 285-296. [胡隐樵, 高由禧. 黑河实验(HEIFE)——对于旱区陆面过程的一些新认识[J]. 气象学报, 1994, 52(3):285-296.]

[10] Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, *et al.* Composite study on Inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmosphere interaction (IMGRASS) [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 295-306. [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(IMGRASS)综合研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2):295-306.]

[11] Huang Ronghui. Advances of the project of the formation mechanism and predication theory of severe climatic disasters in China [J]. *China Basic Science*, 2004, 4: 6-16. [黄荣辉. 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论综述[J]. 中国基础科学, 2004, 4:6-16.]

[12] Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, *et al.* NWC-ALIEX and its advances [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20: 60-74. [张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆—气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20: 60-74.]

[13] Bao Yan, Lü Shihua. Review of land-atmosphere interaction research in arid and semi-arid regions [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 3: 134-140. [鲍艳, 吕世华. 干旱、半干旱陆—气相互作用的研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 3: 134-140.]

[14] Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, *et al.* The Long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Fongyu, Northeast China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(2): 378-389. [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[J]. 气候和环境研究, 2004, 9(2):378-389.]

[15] 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]. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2010, 10: 8205-8218, doi:10.5194/acp-10-8205-2010.

[16] Wang G, Huang J, Guo W, *et al.* Observation analysis of land-atmosphere interactions over the Loess Plateau of northwest China [J]. *Journal of Geophysic Research*, 2010:115, D00K17, doi: 10.1029/2009JD013372.

[17] Guan X D, Huang J P, Guo N, *et al.* Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau [J]. *Advance Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 692-700.

[18] Zuo Jinqing, Wang Jiemin, Huang Jianping, *et al.* Estimation of

- ground heat flux for a semi-arid grassland and its impact on the surface energy budget[J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(4): 840-848. [左金清, 王介民, 黄建平, 等. 半干旱草地地表土壤热通量的计算及其对能量平衡的影响[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 840-848.]
- [19] Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie, *et al.* Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO<sub>2</sub> between the land surface and atmosphere in the semi-arid area[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(1): 108-118. [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[J]. 大气科学, 2006, 30(1): 108-118.]
- [20] Jiang Jifeng, Yan Xiaodong, Huang Yao, *et al.* Simulation of CO<sub>2</sub> and sensible/latent heat fluxes exchange between land surface and atmosphere over cropland and grassland in semi-arid region[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(3): 413-424. [姜纪峰, 延晓冬, 黄耀, 等. 半干旱区农田和草地与大气间二氧化碳和水热通量的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(3): 413-424.]
- [21] Liu H Z, Wang B M, Fu C B. Relationships between surface albedo, soil thermal parameters and soil moisture in the semi-arid area of Tongyu, northeastern China[J]. *Advance Atmospheric Sciences*, 2008, 25(5): 757-764, doi:10.1007/s00376-008-0757-2.
- [22] Houghton J T, Meira Filho, Callander L G, *et al.* Ntergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 1995: The Science of Climate Change[M]. New York: Cambridge University Press, 1995.
- [23] Woodward F L, Lomas M R, Betts R A. Vegetation-climate feedbacks in a greenhouse world[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1998, 353: 29-39.
- [24] Mielnick P C, Dugas W A, Johnson H B, *et al.* Net grassland carbon flux over a subambient to superambient CO<sub>2</sub> gradient[J]. *Global Change Biological*, 2001, 7: 747-754.
- [25] Yao Yubi, Li Yaobang, Zhang Moucao, *et al.* Response on climate in Longdong loess plateau to globe warming and fruit development impacted [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2005, 29(4): 73-77. [姚玉璧, 李耀邦, 张谋草, 等. 陇东黄土高原气候对全球变暖的响应及其对林果的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2005, 29(4): 73-77.]
- [26] Yao Yubi, Wang Yirong, Li Yaohui, *et al.* Climate warming and drying and its environmental effects in the Loess Plateau[J]. *Resour. Sciences*, 2005, 27(5): 146-152. [姚玉璧, 王毅荣, 李耀辉, 等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 146-152.]
- [27] Liu Dexiang, Bai Huzhi, Ning Huifang, *et al.* Response of arid meteorological disaster to climatic warming in Gansu province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 707-712. [刘德祥, 白虎志, 宁惠芳, 等. 气候变暖对甘肃干旱气候灾害的影响[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 707-712.]
- [28] Zuo J Q, Huang J P, Wang J M, *et al.* Surface turbulent flux measurements over the Loess Plateau for a semi-arid climate change study[J]. *Advance Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 679-691.
- [29] Webb E K, Pearman G I, Lenning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85-100.
- [30] Niyogi D, Chang H, Saxena V K, *et al.* Direct observations of the effects of aerosol loading on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchanges over different landscapes[J]. *Geophysics Research Letters*, 2004, 31: L20506, doi:10.1029/2004GL020915.
- [31] Pu Jinyong, Deng Zhenyong, Yao Xiaoying, *et al.* An analysis of ecoclimatic factors on linsees and normaol region demarcation for linseed in Gansu[J]. *Chinese Journal of oil Crop Sciences*, 2004, 26(3): 37-42. [蒲金涌, 邓振镛, 姚小英, 等. 甘肃省胡麻生态气候分析及其种植区划[J]. 中国油料作物学报, 2004, 26(3): 37-42.]
- [32] Lin Tongbao, Wang Zhiqiang, Song Xuelei, *et al.* CO<sub>2</sub> flux and impact factors in winter wheat field ecosystem[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1 458-1 463. [林同保, 王志强, 宋雪雷, 等. 冬小麦农田二氧化碳通量及其影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1 458-1 463.]
- [33] Collatz G J, Ball J T, Grivet C, *et al.* Physiological and environmental regulation of stomata conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer [J]. *Agriculture Forest Meteorology*, 1991, 54: 107-136.
- [34] Norman J M, Arkebauer T J. Predicting canopy light-use efficiency from leaf characteristics [C] // *Modeling Plant, Soil Systems*. Hanks J, Ritchie J, edited Agronomy Monograph, ASA-CSSA-SSSA, 1991: 125-143.

# The Analysis of CO<sub>2</sub> Flux over the Semi-arid Area of North China

XIE Jing, HUANG Jianping, WANG Guoyin, BI Jianrong,  
ZHAO Qianfei, ZHANG Mingming

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

**Abstract:** Based on the Eddy Covariance (EC) observation at the SACOL and Xinglong Mountain sites from July 2008 to October 2009, and at the SACOL and Tongyu degraded sites in 2007, the CO<sub>2</sub> flux and its relationships with meteorological elements at these sites are compared and investigated. The result shows that both the SACOL and Xinglong sites are under the same climate system, but there are significant differences between the monthly mean variations of the CO<sub>2</sub> fluxes. The carbon exchange of the crops at the Xinglong site is mainly due to vegetation phenology, while it is mostly dependent on the precipitation at the SACOL site. Furthermore, the critical values of meteorological elements which have influences on the CO<sub>2</sub> fluxes at the both sites are low, and it will have some negative effect on the CO<sub>2</sub> exchange if the meteorological element exceeds its critical value. The CO<sub>2</sub> uptake in daytime and respiration in night at the Tongyu degraded grass site are obviously greater than that at the SACOL site during the period from January to August in 2007. Although the less precipitation at Tongyu in 2007, the CO<sub>2</sub> uptake is not less than that at SACOL site as expected. Additionally, the critical value of each meteorological element is significantly greater at the SACOL site than that at Tongyu, when the CO<sub>2</sub> uptake reaches the peak. This indicates that the regulating capacity of the degraded grassland to the climate change (e. g. global warming) at the Tongyu site is stronger than that for the sparse vegetation at the SACOL site.

**Key words:** Semi-arid area of north China; CO<sub>2</sub> flux; Land-atmosphere interaction.