

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

刘辉志¹ 涂 钢^{2,4} 董文杰³ 符淙斌² 石立庆¹

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 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

3 国家气候中心, 北京 100081

4 吉林省气象科学研究所, 长春 130062

摘 要 采用涡动相关方法连续观测 2002 年 10 月到 2003 年 12 月半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量变化, 分析水汽和二氧化碳通量的季节和日变化规律, 同时比较农田和退化草地两种不同下垫面物质和能量通量交换过程的差异, 得到如下一些主要结果: (1) 半干旱地区湿季, 相距 5 km 的两种不同下垫面, 即使在同一天气过程控制下, 不同植被下垫面的降雨分布仍不尽相同, 甚至相差很大。这表明降雨空间的分布是很不均匀的, 具有很强的局地特征。(2) 在干季近地面层能量收支中, 两种不同下垫面上的有效能量(净辐射与地表热流量之差) 主要分配为感热通量, 潜热通量在非生长季(干季) 通常很小。在湿季(生长季), 潜热通量与感热通量相当, 但农田下垫面的潜热通量大于退化草原下垫面。(3) 土壤的温度和湿度日变化主要集中在 0~20 cm 土壤层内, 在湿季农田下垫面土壤的湿度有明显的跳跃, 这与降雨过程有很好的相关。(4) 在非生长季, 两种不同下垫面地气间二氧化碳通量差别不大, 都很小。白天由于光合作用, 在生长季农田下垫面吸收 CO₂ 通量较退化草原大, 但比湿润地区稻田下垫面小一个量级, 远小于森林生态系统。

关键词 季节变化 水汽通量 二氧化碳通量 半干旱地区 涡动相关法

文章编号 1006-9895(2006)01-0108-11

中图分类号 P463

文献标识码 A

Seasonal and Diurnal Variations of the Exchange of Water Vapor and CO₂ Between the Land Surface and Atmosphere in the Semi-Arid Area

LIU Hui-Zhi¹, TU Gang², DONG Wen-Jie³, FU Cong-Bin², and SHI Li-Qing¹

1 *Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *National Meteorological Center, Beijing 100081*

4 *Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun 130062*

Abstract Based on the eddy covariance (EC) observation from October 2002 to December 2003 over the semi-arid area (44°25'N, 122°52'E, 184 m ASL) in Tongyu, Northeast China over the degraded grassland and the cropland surface, the seasonal and diurnal variations of the exchange of the water vapor and CO₂ are investigated. Tongyu observation station is also one of the reference sites of the CEOP (Coordinated Enhanced Observing Period). Accord-

收稿日期 2004-12-29, 2005-05-08 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400501

作者简介 刘辉志, 男, 1967 年出生, 博士, 研究员, 主要从事大气边界层物理和大气环境的研究。E-mail: huizhil@mail.iap.ac.cn

ing to the soil volumetric water content in the surface soil layer, the wet and dry seasons in one year observation are very distinct in the semi-arid area. So the annual cycle observation is divided into the two seasons. The wet season is from June to September, while the other is the dry season. The main results are in the following.

1) The rainfall is strongly influenced by the land cover in the semi-arid area and has strong heterogeneity in the wet season, especially during the convective weather system in summer.

2) The latent heat flux is larger over the cropland surface than that over degraded grassland surface in the growing season, while in the dry season their difference is few. The sensible heat flux is the main part of the available energy except that in the wet season in the semi-arid area. In the wet season the latent heat flux has the same order as the sensible heat flux. The albedo over the cropland surface is less than that over the degraded grassland surface in the wet season, while there is no distinct difference over the two land surfaces in the dry season. The net radiation flux has seasonal variation, while in winter it is less than the half of that in summer. The soil heat flux at the ground surface over the cropland surface is smaller than that over the degraded grassland surface in the wet season. The available energy over the cropland surface is larger than that over the degraded grassland surface in the wet season, while in the dry season there is few difference.

3) The soil volumetric water content is less than 15% in the surface soil layer (0–20 cm) in the dry season. In the wet season (growing season) the soil volumetric water content has a good correlation with the rainfall. The soil volumetric water content has a rapid increase during the soil thawing period (from March to April).

4) The CO₂ flux is less than 0.2 mg · m⁻² · s⁻¹ over two ecosystems except the growing season. During the growing season, the carbon dioxide flux over the cropland ecosystem is a little larger than that over the degraded grassland ecosystem.

Key words seasonal variations, water vapor flux, carbon dioxide flux, semi-arid area, eddy covariance

1 引言

自 20 世纪 80 年代以来, 人们就已经认识到“土壤-植被-大气”之间进行的物理、化学及生物等过程的相互作用对全球气候、环境变化影响的重要性^[1]。20 世纪 90 年代, 随着涡动相关技术和仪器的日益成熟, 涡动相关法被广泛地应用于直接测量陆地生态系统植被与大气间的 CO₂、水汽及能量通量。目前, 全球通量观测网中, 美洲及欧洲的地面观测点连续观测界面通量的时间都已经超过 5 年, 有的地面观测站连续观测时间在 10 年以上^[2]。而长期定位连续观测地气界面物质和能量交换过程, 在我国则刚刚开始^[3]。

在全球, 用涡动相关法对于干旱和半干旱地区的能量和物质通量的连续观测并不太多^[4~6], 主要集中在北美及非洲的草原和森林生态系统。过去, 我国曾在半干旱地区开展陆面过程大气边界层观测实验, 如 HEIFE^[7] 和 IMGRASS^[8]; 国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候灾害形成机理和预测理论研究”也在我国西北干旱区开展了干旱区陆气相互作用的野外观测实验^[9], 获得了宝贵的干旱半干旱区陆气相互作用野外观测实验资料。不过,

上述这些试验一般仅在夏季加强期进行湍流通量的观测, 没有连续观测地气间物质和能量通量的季节变化。

在国家重点基础研究发展规划项目“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。该站于 2002 年 10 月正式建成, 并开始连续观测。这是目前除中国科学院碳循环重大项目^[10]外, 我国为数不多的对地气界面间物质和能量交换过程进行长期监测的野外实验站。

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^[11]。吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测站的建立, 旨在通过在吉林西部选择不同下垫面进行地气交换及生态过程的长期定位观测, 获得地气界面物质和能量交换过程的日、月、季及年变化特征, 分析不同土地利用和水资源利用对区域能量和水分循环的影响机理, 试图定量分析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。

吉林通榆观测站已被纳入国际计划“全球协同加强观测期”(CEOP)的观测网^[12],是CEOP计划的一个地面观测基准站^[13]。这也是该计划目前在国内唯一由我国自己设计、自己投资并独立承担的地面观测基准站。CEOP主要通过在全球陆地不同区域,尤其是季风区设立的地面观测基准站,结合卫星资料,研究陆地不同区域水分和能量通量循环,以及陆地在全球气候系统中的作用,加深对陆地-大气相互作用的了解。

吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测站连续运行近两年多,已获得近两年的连续地气界面能量和物质通量观测资料。除仪器故障、下雨及太阳能供电故障造成的资料缺失外,总有效资料长度达到全年的75%以上。本文主要分析在CEOP-EOP3(第3加强期,其中EOP1、EOP2为实验准备和预实验期,正式连续加强观测期从EOP3开始)期间(2002年10月~2003年12月),地气界面能量和物质(水汽、CO₂)通量的季节及日变化特征。

2 实验场地和仪器

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。实验站地理位置为(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,实验区地形非常平坦。实验区平均年降水量404.3 mm,1999~2002年的年降水量只有340 mm左右。通榆属中温带半干旱大陆性季风气候,植被主要为半干旱气候条件下的草原植被,现在基本已被开垦,沙化、退化和盐碱化严重。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。实验区以新华乡为中心,分别针对半干旱区农业和退化草地生态系统建立了两个观测点,两点空间距离在5 km左右。

实验观测项目包括平均场和湍流场两部分,主要观测近地面层基本气象要素、土壤温度、土壤湿度以及近地面层的物质和能量通量。详细的仪器设备情况参阅文献^[14]。在两个观测点各建立20 m近地面层气象观测塔,塔上安装了5层(2 m、4 m、8 m、12 m、17 m)风速(Metone, 034A-C)、温度和湿度传感器(Vaisala, HMP45C-L),以及1层风向传感器(17 m, Metone, 014A-L)。地面观测包括地表温度(红外测温计, APOGEE, IRTSO-P)、气

压和雨量计。辐射观测包括向上、向下太阳辐射(Kipp&ZONEN, CM21)及向上、向下长波辐射(Kipp&ZONEN, CG4),辐射仪器在农田和退化草地下垫面被分别安装于1.5 m和3.0 m高度上。同时还测量0~80 cm(2 cm、5 cm、10 cm、20 cm、50 cm、80 cm)6层土壤温度(STP01-L50, 107-L)以及0~80 cm(5 cm、10 cm、20 cm、40 cm、80 cm)5层土壤体积含水量(CS616-L)。采用热流量板测土壤热通量,每个观测站测地表以下5 cm及10 cm处2层的土壤热通量(HFP01SC-L50)。所有平均场采样频率为2 s取一次,10 min给出一组平均值,平均值存在CR23X采样器中。湍流观测仪器由超声风速温度仪(CSAT3)、湿度和CO₂脉动仪(LI-COR, CS7500)组成,测量动量、热量、水汽及CO₂湍流通量。湍流仪器在农田和退化草地下垫面被分别安装于距地面2.0 m及3.0 m高度上,采样频率为10 Hz。采用CR5000采集器采样,用1G PCMCIA卡储存,每20天换卡。所有仪器采用两组128 W太阳能电池供电。除仪器出现故障、仪器检修,或因天气、供电等原因出现的缺测外,观测几乎一直连续进行。

在非生长季农田下垫面无作物,地表为裸土覆盖;生长季主要作物为玉米,最高可达1.8 m左右;退化草地下垫面的草地退化非常严重,草的覆盖度大约在60%左右,夏季草最高也不超过10 cm,仍在放牧;在干季,草的长度在5 cm左右,草的覆盖度只有40%左右。另外,退化草地土壤盐碱化明显,这也影响了土壤体积含水量仪器的测量结果。目前,如何消除土壤盐碱化对土壤体积含水量仪器测量值的影响,尚未找到订正的办法。利用自动测量仪器准确测量盐碱化土壤的体积含水量仍然是一个难题。

观测资料在进行分析以前,先进行资料质量控制,去掉不合理或因仪器出现故障,或天气等原因产生的野点。平均场、湍流场及辐射资料每个样本取样时间长度均为30 min,湍流资料的选取要求每个样本内风向变化小于45°。CO₂通量根据文献^[15]进行了水汽及感热通量影响的订正,CO₂通量负号表示(由于光合作用等)地表吸收大气中的二氧化碳,正号表示地表(土壤及作物)向大气释放二氧化碳。本文分析的湍流通量结果均由涡动相关测量系统测得。

3 观测结果与分析

3.1 基本气象要素

吉林通榆长期观测站两个观测点所在的退化草地和农田下垫面的空间距离为 5 km 左右, 两个观测点观测到气压日变化表明, 观测期间两个观测点总是处在同一天气系统控制下(2003 年 4 月 16 日~5 月 16 日由于采集器出现故障, 资料缺测); 气压除了有日变化外, 存在明显的季节变化特征; 非生长季气压比生长季高些。该观测站干、湿季非常明显, 全年降雨主要 85% 左右集中在每年 6 月至 9 月(生长季)。在干季, 降雨过程很少, 降雨量很小。从图 1 的降雨分布可以发现, 在湿季, 降雨具有很强的局地特征, 两个不同下垫面测得的日降雨量有时候相差较大, 最大可以相差一倍。这可能是由于降水, 尤其是对流性降水, 受下垫面不同生态系统影响较大, 地表植被的分布影响局地的降水分布。因此, 目前准确预报因局地小尺度引起的对流性降水过程还存在很大的困难。

图 2 给出退化草地 2 m 高度风及 1.5 m 高度上温度和湿度日变化(2003 年 4 月 16 日~5 月 16

日由于采集器出现故障, 资料缺测)。农田下垫面基本气象要素——风速、温度和湿度日变化与退化草地相同(图略)。从图 2 可以发现除了湿季, 退化草地近地层空气湿度通常小于 5 g/kg。退化草地在生长季(湿季)空气湿度明显大于干季, 1 月空气绝对湿度最小, 8 月空气绝对湿度达到最大, 可达 16 g/kg 以上。空气绝对湿度在湿季和干季相差很大。湿度变化存在明显日变化和季节变化特征。

地面空气温度在 1 月最小、8 月最大, 夏季温度的日较差大于冬季。半干旱地区地面空气温度的年较差很大, 超过 60°C, 所以在该地区进行连续的长期观测, 对传感器要求很高, 同时需要更加细致地维护仪器设备, 才能保证观测资料的质量。

近地面风速冬春季较大, 存在明显日变化, 也存在阵性。一般最大风速出现在白天。即使在空间距离相差不到 5 km 左右的同一区域, 退化草原和农田下垫面近地面层风特性也不尽相同, 近地面层(10 m 高度)年平均风速的差别可达 2 m/s 以上(图略)。这主要是由于农田区周围有零星的防护林, 同时反映风速的分布受局地粗糙元分布影响很大, 具有很强的局地特征。

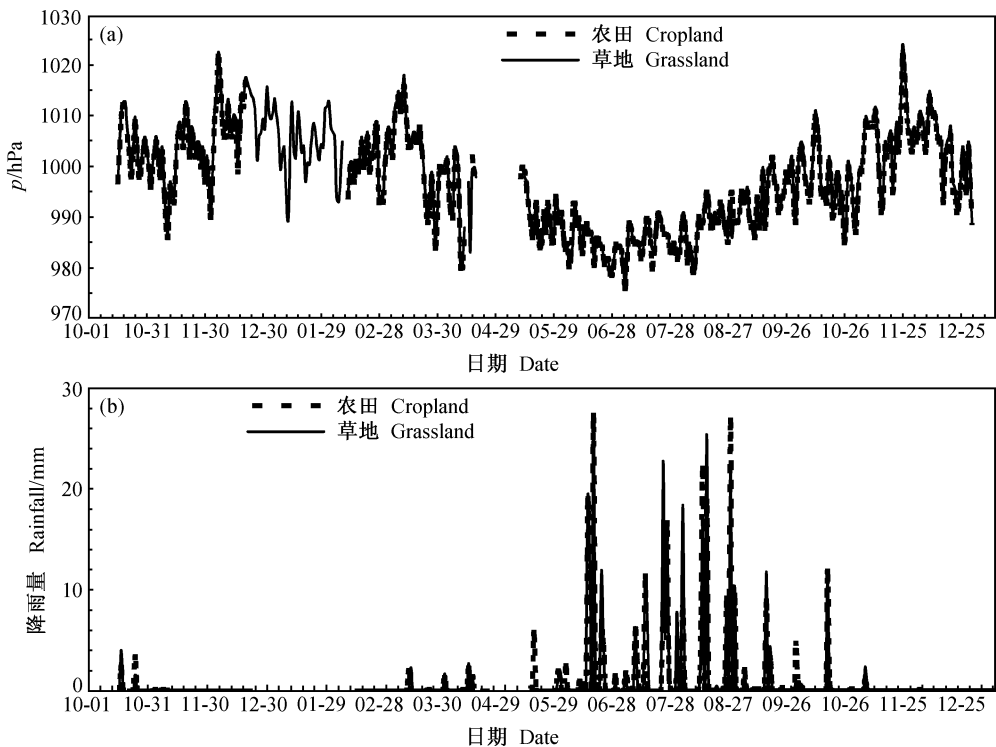


图 1 2002 年 10 月~2003 年 12 月两观测点日降雨量及日平均气压的逐日变化

Fig. 1 The daily total rainfall and daily averaged pressure over two stations from Oct 2002 to Dec 2003

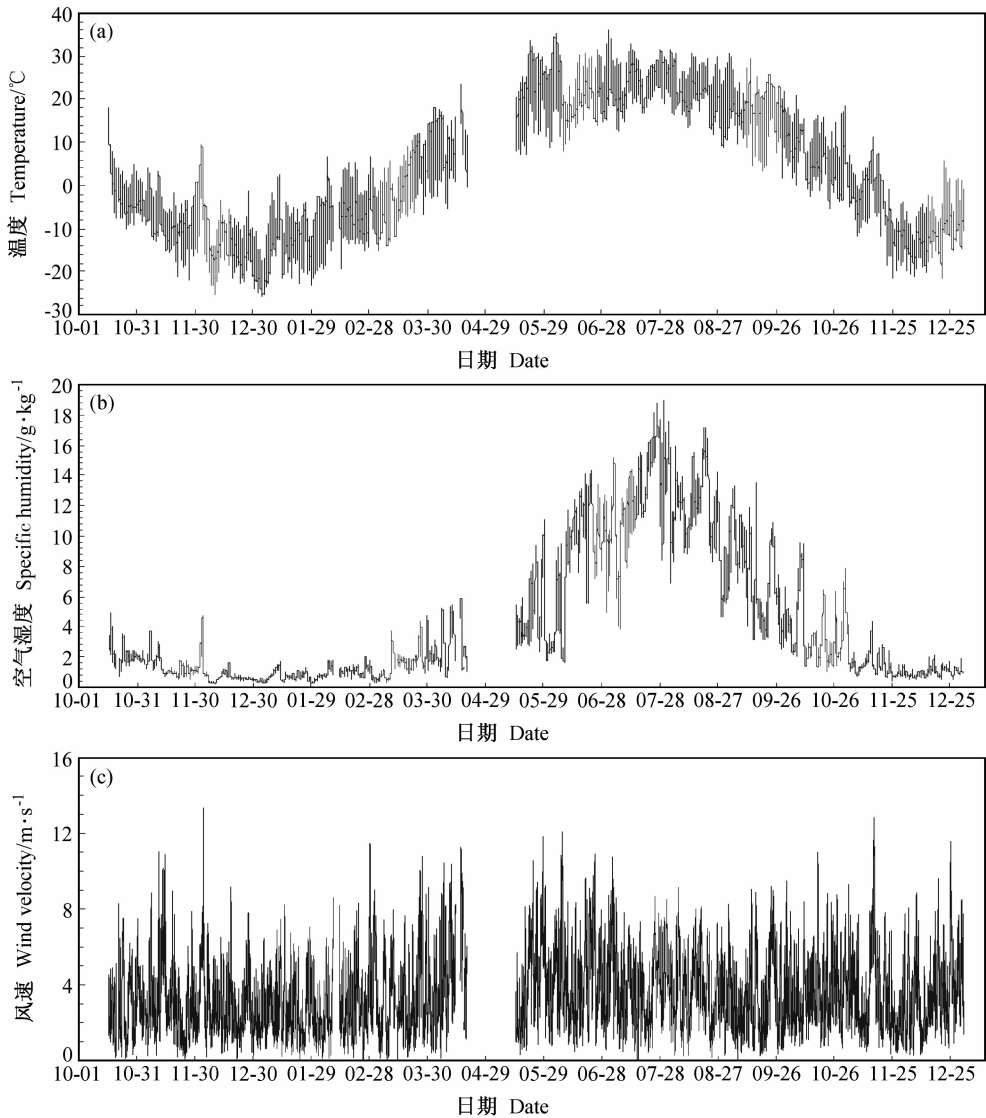


图2 2002年10月~2003年12月温度、湿度和风速(30 min 间隔)的逐日变化(退化草地)

Fig. 2 The annual course of the temperature, specific humidity (1.5 m) and the wind speed (2.0 m) over degraded grassland from Oct 2002 to Dec 2003 (30 min average)

3.2 近地面层能量收支

通榆观测站处在半干旱区,干季空气非常干燥,所以潜热通量通常很小。图3给出草地和农田近地面层能量月平均的日变化特征,其中感热通量和潜热通量是由涡动相关法测得的。在非生长季(干季),农田下垫面是裸土覆盖,两种不同下垫面近地面层能量收支基本一致。有效能量(净辐射 R_n - 地表热流量 H_{soil})主要分配为感热通量 Q_H , 占净辐射 R_n 的70%, 潜热通量 Q_E 通常小于 50 W/m^2 , 地热流也通常小于 50 W/m^2 , 此时波文比 $B (= Q_H / Q_E)$ 远大于1。净辐射从10月开始下降,12月到达

最小(12月净辐射 R_n 最大值只有 100 W/m^2 左右), 7、8月达到最大,存在明显季节变化特征。冬季的近地面层能量不平衡程度要比春季好。在生长季(湿季),两种不同下垫面潜热通量与感热通量基本相当,此时的波文比 B 小于或等于1;但农田的潜热通量比退化草原大,即农田下垫面的实际蒸散大于退化草原下垫面。地表热流量农田下垫面在生长季比退化草原下垫面小。两种下垫面在湿季的能量不平衡要比干季严重。

图4是退化草地太阳辐射及长波辐射逐日变化(2003年4月16日~5月16日由于采集器出现故

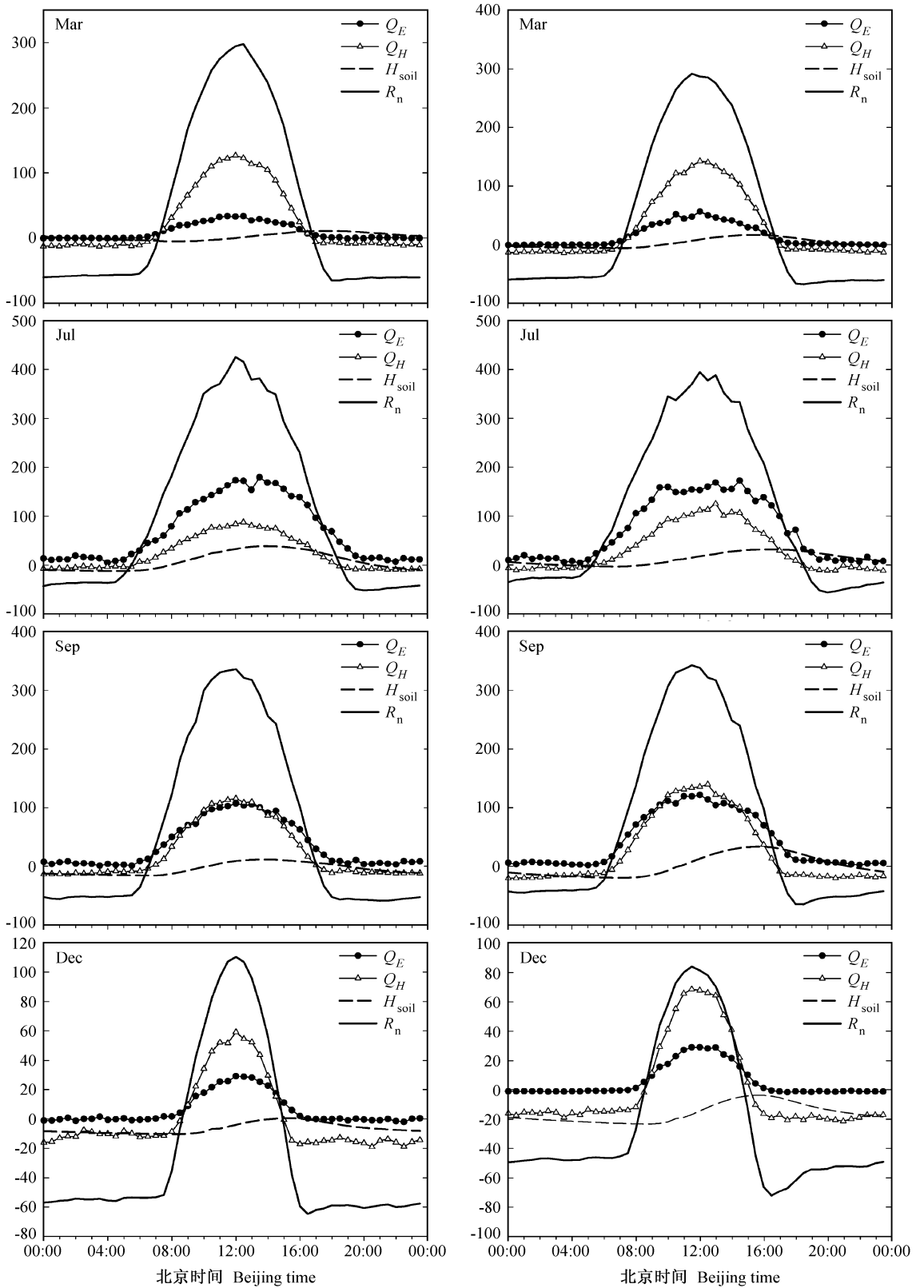


图 3 农田(左列)和退化草地(右列)近地面层能量收支月平均的日变化(单位: W/m²)

Fig. 3 The monthly-average diurnal variation of the energy budget in the surface layer (units; W/m²) for cropland (left panel) and degraded grassland (right panel)

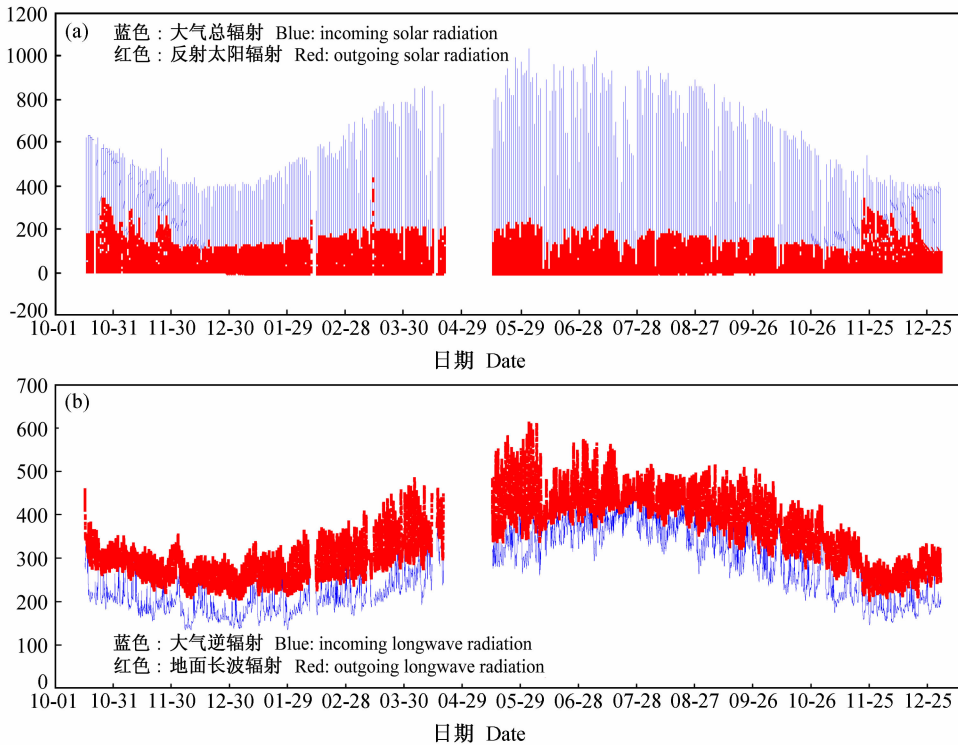


图 4 2002 年 10 月~2003 年 12 月退化草地太阳辐射和长波辐射的逐日变化(30 min 间隔, 单位: W/m^2)

Fig. 4 The annual course of the short wave and long wave radiation flux over degraded grassland from Oct 2002 to Dec 2003 (30 min average, units: W/m^2)

障, 资料缺测)。两种不同下垫面太阳辐射及长波辐射在干季基本一致, 在湿季, 由于两种下垫面地表反照率及地面温度的差异, 太阳反射辐射及长波辐射略有不同, 但变化趋势完全一致(图略)。从图 4 可以发现, 太阳总辐射与太阳反射辐射变化基本同位相, 除了有通常的单调单峰日变化外, 存在单调的季节变化。太阳总辐射每年从 10 月进入冬季开始下降, 到第 2 年 2 月底开始上升, 季节变化特征与温度、湿度相同。干季 12 月太阳总辐射最大值只有 $500 W/m^2$, 是湿季 7 月太阳总辐射最大值的一半(夏季太阳总辐射最大值可超过 $1000 W/m^2$)。地面长波辐射主要与地面的温度有关, 同时与地表的比辐射率有关。由于在干季地表温度日较差小于夏季, 所以干季地面长波辐射日变化幅度小于湿季。另外, 长波辐射同样存在季节变化, 但其变化的幅度远小于短波辐射。

地表反照率与地表植被覆盖状况有关, 存在季节变化。在非生长季(干季), 由于农田是裸土覆盖, 退化草地和农田下垫面的地表反照率差别不大, 农田平均为 0.30, 草地为 0.31, 接近沙地的地

表反照率(图 5)。在生长季(湿季), 农田下垫面的地表反照率随作物的生长而变小, 庄稼成熟收割后又变为裸土覆盖下的地表反照率。退化草原下垫面的地表反照率变化幅度略小于农田下垫面。两种不同下垫面的地表反照率在湿季存在明显差异, 这也导致农田下垫面获得的太阳净辐射在湿季比退化草原大, 湿季农田的潜热通量比退化草原的大一些。

3.3 土壤温度和土壤体积含水量

土壤温度、湿度变化是研究地气相互作用的重要参数, 土壤湿度同时还是表征干旱化程度的重要指标。在干季(非生长季), 退化草地和农田下垫面, 土壤温度日变化主要集中在 $0\sim 20$ cm 土壤层。20 cm 以下(50 cm 和 80 cm)的土壤温度日变化很小, 但存在明显季节变化特征。20 cm 以下(50 cm 和 80 cm)的土壤温度在冬季开始下降, 到春季慢慢上升, 1 月达到最小值, 8 月达到最大值, 季变化特征和空气温度一致。图 6(见文后彩图)给出草地与农田 2 cm、5 cm 及 10 cm 土壤温度日均值的年变化(由于采集器和太阳能电池出现故障缺测, 草地为 2003 年 1~2 月、4~5 月, 农田为 2002 年 11 月~

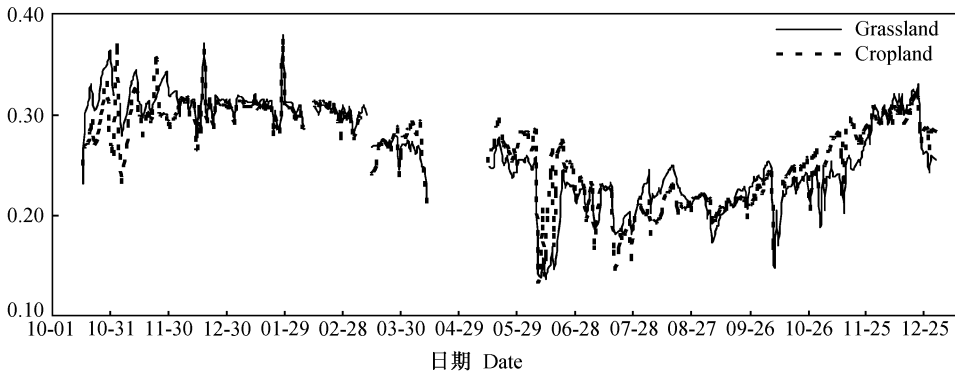


图5 2002年10月~2003年12月地表反照率日均值的变化(农田和退化草地)

Fig. 5 The annual course of the daily-average surface albedo over two stations from Oct 2002 to Dec 2003

2003年1月、2003年4~5月)。表层土壤温度日变振幅大于深层土壤, 2 cm、5 cm及10 cm土壤温度日变化基本同位相。冬季2 cm最低温度达-20℃以下。表层土壤温度的年较差比空气温度的年较差小些。两种不同下垫面土壤温度变化基本一致, 但农田下垫面表层土壤温度日变化振幅比退化草地大, 这反映退化草地下垫面——土壤热容量比农田下垫面大, 这也与土壤特性不同有关。从湿季土壤体积含水量变化可以发现, 草地土壤雨水渗透深度远小于农田。

由于退化草地盐碱化非常严重, 土壤体积含水量测量仪器(CS-616)在退化草地测得的结果很高。目前还没有很好的办法订正测量结果。下面, 主要讨论农田土壤湿度的变化规律。图7(见文后彩图)是农田表层和深层土壤体积含水量日均值的年变化(由于采集器和太阳能电池出现故障缺测2002年11月~2003年1月、2003年4~5月), 在干季(非生长季), 土壤的湿度(m^3/m^3)达到最小, 表层小于15%, 从冬季冻结到春季融化, 土壤湿度有明显的跳跃增大。冬季农田下垫面80 cm与40 cm土壤体积含水量相差不大, 春季解冻后, 0~80 cm土壤体积含水量逐渐升高, 但20~40 cm厚度层的土壤体积含水量在春季(3月中下旬)增大的速率大于表层和深层土壤。在生长季, 每一次降雨过程后, 农田下垫面土壤的湿度有明显的跳跃, 土壤湿度在湿季的快速升涨变化与降水过程有非常好的相关。图7同样表明表层土壤湿度升高的幅度大于深层的土壤, 降雨后不同深度土壤湿度的跳跃存在位相滞后, 深层滞后的时间长些。

3.4 二氧化碳通量

在半干旱地区农田和退化草原下垫面, 通常二氧化碳通量在干季(非生长季)很小。在干季, 农田地表基本为裸土, 退化草地退化很严重, 两种下垫面差别不是很明显, CO₂通量日变化特征基本相同。白天由于光合作用吸收CO₂通量最大值在 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 夜间土壤呼吸等释放到大气中的CO₂通量通常小于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在生长季农田下垫面白天由于光合作用吸收CO₂通量最大值可达 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。退化草原与农田下垫面相比, 在生长季白天由于光合作用吸收CO₂通量小于农田, 最大值 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。半干旱区农田与退化草原地气二氧化碳通量, 与水稻下垫面生长季相比^[16], 相差一个量级, 远小于森林生态系统^[17]。

从年变化来看, 干季两种不同下垫面CO₂通量都较小, 相差不大。在湿季, 地气间二氧化碳通量变化幅度明显增大, 农田生态系统二氧化碳通量比退化草地略大, 这也表明该地区草地退化已经非常严重。图8中两种不同下垫面地气二氧化碳通量日变化出现几个峰值, 这主要与降雨等气象条件及作物的生长有关。地气界面二氧化碳通量与土壤温度、湿度、气象条件等的定量关系, 将是下一步深入分析的重点。

4 小结

本文分析2002年10月~2003年12月在半干旱地区农田和退化草原下垫面用涡动相关法测得的连续观测资料, 得到了以下一些主要结果。

(1) 即使在空间距离相差不到5 km左右的同

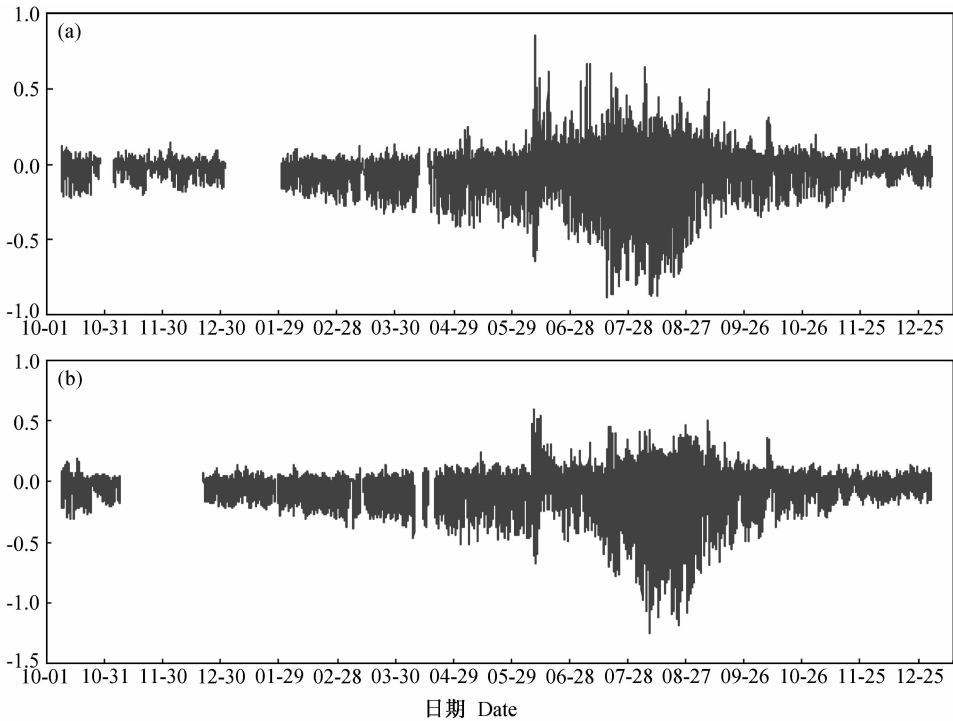


图 8 2002 年 10 月~2003 年 12 月退化草地 (a) 和农田下垫面 (b) CO_2 通量的年变化 (30 min 间隔, 单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 The annual course of the carbon dioxide flux over the degraded grassland (a) and cropland (b) from Oct 2002 to Dec 2003 (30 min average, units: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

一区域, 退化草原和农田下垫面近地面层风特性也不相同, 近地面层 (10 m 高度) 年平均风速的差别可达 2 m/s 以上。这主要是由于农田区周围有零星的防护林, 同时反映风速的分布受局地粗糙元分布影响很大, 具有很强的局地特征。

(2) 在通榆半干旱地区除了湿季 (每年 6 月初~9 月底), 近地面层 (2 m) 空气湿度通常小于 5 g/kg , 全年降雨 85% 左右集中在 6~9 月 4 个月。在湿季两个不同下垫面测得的日降雨量有时候相差较大, 最大可以相差一倍; 但有些天基本一致。这也反映降雨的空间分布是很不均匀的, 具有很强的局地特征。地表植被影响局地的降水分布。降水尤其是对流性降水, 受下垫面不同生态系统影响较大。即使在同一天气过程控制下, 不同植被下垫面的降雨分布有时候是不相同的, 甚至相差很大。

(3) 太阳总辐射有很强的季变化特征, 净辐射日、季变化与太阳总辐射日、季变化有很好的一致性。在冬季太阳总辐射最大值只有 500 W/m^2 左右, 夏季最大可达 1000 W/m^2 以上。在非生长季, 由于农田是裸土覆盖, 退化草原和农田下垫面的地表反照率差别不大; 在生长季, 农田下垫面的地表

反照率随作物的生长而变小, 成熟收割后变为裸土覆盖下的地表反照率。退化草原下垫面的地表反照率同样具有季节变化特征, 夏季最小, 但变化幅度略小于农田。

(4) 在干季, 近地面层能量收支中, 有效能量 (净辐射与地表热流量之差) 主要分配为感热通量 Q_H , 潜热通量 Q_E 通常很小, 即波文比 B 远大于 1。在生长季, 退化草原和农田下垫面波文比均小于或等于 1, 此时潜热通量与感热相当。但农田下垫面的潜热通量 Q_E 大于退化草原下垫面, 即农田下垫面的实际蒸散大于退化草原下垫面。在生长季, 农田下垫面的地表热流量比退化草原下垫面小。

(5) 土壤的温度和湿度日变化主要集中在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤层内, 20 cm 以下土壤温度和湿度几乎没有日变化, 随季节变化。冬季, 土壤的湿度达到最小, 表层土壤的体积含水量 (m^3/m^3) 通常小于 15%。从冬季冻结到春季融化, 土壤湿度有明显的跳跃增大。在湿季 (生长季), 土壤温度和湿度在一年中处于最大, 表层土壤湿度存在明显快速变化。这种快速变化与降雨过程有很好的相关。每一次降雨过程后, 农田下垫面土壤的湿度有明显的跳跃,

过2~3天快速回落。农田与退化草原由于土壤组成及垂直分布不同,退化草原土壤温度及湿度变化幅度小于农田。

(6) 在干季,农田地表基本为裸土,退化草地退化很严重,两种下垫面地气二氧化碳通量差别不是很明显,CO₂通量日变化特征基本相同。在生长季,农田下垫面由于白天光合作用吸收CO₂通量比退化草原大。半干旱区农田与退化草原地气二氧化碳通量,与水稻下垫面生长季相比,相差一个量级,远小于森林生态系统。在湿季,两种不同下垫面地气二氧化碳通量存在明显的日变化,干季日变化幅度很小。

“干旱化和有序人类活动”吉林通榆长期观测实验已经取得近两年多的连续观测资料。通过与遥感资料的结合,可以研究如何从单点的观测结果上升到面平均通量。通榆长期观测实验的连续观测资料可以验证不同半干旱地区陆气相互作用参数化方案,对于改进半干旱地区陆气相互作用参数化方案有重要作用。下一步将研究界面能量和物质通量的年际变化,试图回答气候变化和人类活动对北方干旱化成因的相对作用,这对半干旱地区的可持续发展有参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-TIBET/TIPEX. 高原气象, 1999, **18**(3): 281~294.
Wang Jiemin. Land surface process experiments and interaction study in China—from HEIFE to IMGRASS and GAME-TIBET/TIPEX, *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18**(3): 281~294
- [2] Baldochi D, Falge E, Gu Lianhong, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **82**(11): 2415~2434
- [3] <http://www.chinaflux.org>
- [4] Veenendaal E M, Kolle O, Lloyd J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane Woodland) in Southern Africa. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 318~328, doi: 10.1046/j.1529-8817.2003.00699.x
- [5] Scott R L, Edwards E A, Shuttleworth W J, et al. Interannual and seasonal variation in fluxes of water and carbon dioxide from a riparian woodland ecosystem. *Agric. For. Meteorol.*, 2004, **122**(1): 65~84
- [6] Baldochi D, Xu L, Kiang N. How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland. *Agric. For. Meteorol.*, 2004, **123**(1): 13~39
- [7] 胡隐樵, 高由禧. 黑河实验(HEIFE)——对干旱区陆面过程的一些新认识. 气象学报, 1994, **52**(3): 285~296
Hu Yinqiao, Gao Youxi. Some new understandings of processes at the land surface in arid area from the HEIFE. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **52**(3): 285~296
- [8] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草地土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)综合研究. 地学前缘, 2002, **9**(2): 295~306
Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, et al. Composite study on Inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmosphere interaction (IMGRASS). *Earth Science Frontiers*, 2002, **9**(2): 295~306
- [9] 张强, 卫国安, 黄荣辉. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数. 中国科学, 2001, **31**(9): 783~792
Zhang qiang, Wei Guoan, Huang Ronghui. Bulk transfer coefficients of the atmosphere momentum and sensible heat over desert and Gobi in arid climate region of Northwest China. *Science in China* (in Chinese), 2001, **31**(9): 783~792
- [10] <http://www.chinaflux.org>
- [11] 符滨斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题. 气候与环境研究, 2002, **7**(1): 22~29
Fu Congbin, Wen Gang. Several issues on aridification in the northern China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7**(1): 22~29
- [12] Bosilovich M G, lawford R. Coordinated Enhanced Observation Period (CEOP) international workshop. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, **83**(10): 1495~1499
- [13] <http://www.ceop.net>
- [14] 刘辉志, 董文杰, 符滨斌, 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. 气候和环境研究, 2004, **9**(2): 378~389
Li 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. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9**(2): 378~389
- [15] Webb E K, Pearman G I, Lenning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 85~100
- [16] Gao Zhiqiu, Bian Lingen, Zhou Xiuji. Measurements of turbulent transfer in the near-surface layer over a rice paddy in China. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D13): 4387~4399
- [17] Saigusa N, Oikawa T, Liu Sha. Seasonal variations of the exchange of CO₂ and H₂O between a grassland and the atmosphere: An experimental study. *Agric. For. Meteorol.*,

1998, **89**(1): 131~139

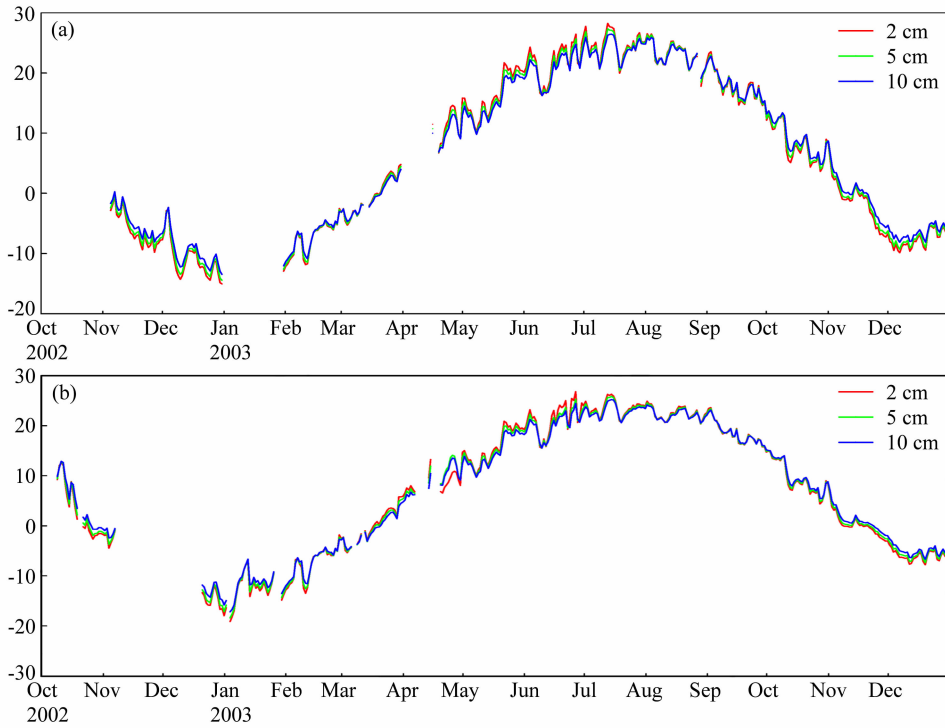


图 6 2002 年 10 月~2003 年 12 月草地(a)与农田(b) 2 cm、5 cm 及 10 cm 土壤温度日均值的年变化(单位: °C)
Fig. 6 The annual course of daily average 2-cm, 5-cm and 10-cm soil temperature (units: °C) over the degraded grassland (a) and cropland (b) from Oct 2002 to Dec 2003

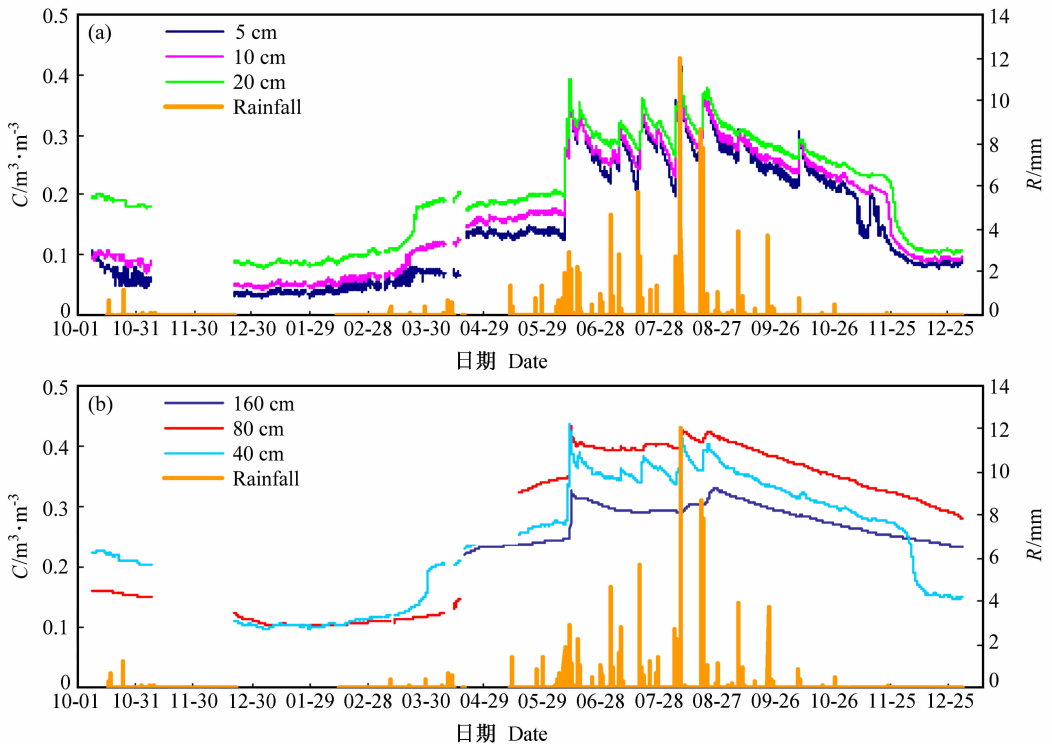


图 7 2002 年 10 月~2003 年 12 月农田表层(a)和深层(b)土壤体积含水量 (C) 及降雨量 (R) 的年变化(30 min 间隔)
Fig. 7 The annual course of daily average soil volumetric water content (C) and daily total rainfall (R) for the surface layer (a) and the deep layer (b) of cropland from Oct 2002 to Dec 2003 (30 min average)