

涂钢, 刘辉志, 董文杰. 2009. 半干旱区不同下垫面近地层湍流通量特征分析 [J]. 大气科学, 33 (4): 719–725. Tu Gang, Liu Huizhi, Dong Wenjie. 2009. Characteristics of the surface turbulent fluxes over degraded grassland and cropland in the semi-arid area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 719–725.

半干旱区不同下垫面近地层湍流通量特征分析

涂钢¹ 刘辉志² 董文杰³

1 吉林省气象科学研究所中高纬度环流系统与东亚季风研究实验室, 长春 130062

2 中国科学院大气物理所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

3 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘 要 本文分析了 2003~2005 年半干旱区退化草地和农田下垫面近地层湍流通量日、季、年的变化特征, 探讨了不同年份的气候背景和不同下垫面土地覆被对地气交换过程的影响。结果表明: 半干旱区退化草地和农田近地层湍流通量具有明显的日变化、季变化周期; 地气间通量交换年际间的差异主要受当年的气候背景影响, 尤其是降水的影响; 同时还受到下垫面覆被的影响。潜热通量和感热通量的能量分配比率呈反位相变化, 且农田和退化草地的变化趋势相似, 在夏季潜热通量所占比例均超过感热通量; 两种下垫面的波恩比月均值变化趋势十分相似, 量级接近, 夏季低, 春、秋季高; 夏季退化草地和农田下垫面波恩比均小于或等于 1。

关键词 近地层湍流通量交换 下垫面 半干旱区

文章编号 1006-9895 (2009) 04-0719-07

中图分类号 P404

文献标识码 A

Characteristics of the Surface Turbulent Fluxes over Degraded Grassland and Cropland in the Semi-Arid Area

TU Gang¹, LIU Huizhi², and DONG Wenjie³

1 *Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation System and East Asia Monsoon, Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun 130062*

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

3 *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Ecology Resource, Beijing Normal University, Beijing 100875*

Abstract The seasonal and diurnal variations of the surface turbulent fluxes over the degraded grassland and the cropland are investigated, based on the turbulent flux data measured with Eddy Covariance (EC) method and radiation and meteorological data collected from 2003 to 2005 in the semi-arid area. The influence of different meteorological backgrounds on the turbulent fluxes between land and atmosphere over different land surfaces is also discussed. It is shown that there are clear seasonal and diurnal variations for the components of surface energy balance over the degraded grassland and the cropland in the semi-arid area. The interannual variability of the components of surface energy balance is mainly influenced by meteorological backgrounds in the same year, especially by precipitation. The ratios of net radiation to latent heat flux and to sensible heat flux show an opposite phase change over both degraded grassland and cropland, and the ratio for the latent heat flux is higher than that for the sensible heat flux in

收稿日期 2007-12-13, 2008-04-28 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400501, 国家自然科学基金资助项目 40775050

作者简介 涂钢, 女, 1968 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向: 地气相互作用及气候变化。E-mail: shenxintu@yahoo.com.cn

summer. The trends of mean monthly Bowen ratios over two types of underlying surfaces are almost the same, and the magnitudes of the Bowen ratios are near. The Bowen ratio in summer is not larger than 1.0 over both degraded grassland and cropland.

Key words surface turbulent flux, sensible heat flux, semi-arid area

1 引言

地气间的能量通量,是局地到全球尺度气候的驱动力,反过来气候变化也将对地气间的能量、物质交换产生影响(Raupach, 1998; Eugster et al., 2000; Kellner, 2001; 周连童等, 2008)。干旱、半干旱地区几乎占世界陆地面积的 40% (Verhoef et al., 1999), 且半干旱区以其气候的敏感性和脆弱性,成为全球变化研究的热点地区。已有的研究表明,半干旱区人类活动引起的自然植被破坏可以影响夏季风的强度,减少水汽向内陆的输送,使干旱化进一步加剧,导致那里沙尘暴发生的频率和强度增加(符淙斌等, 1995, 2002)。不过到目前为止,我们对半干旱地区陆面过程还缺乏深刻的认识,致使现有的气候模式对半干旱区的模拟能力最差(Fu et al., 2005)。过去的许多陆面过程试验大多是在湿润地区和半湿润区进行的(王介民, 1999),通过开展半干旱区的长期野外观测试验,研究干旱、半干旱地区的地气交换特征及其影响因子,对于发展和验证半干旱区陆面模式参数化方案,提高模式在半干旱区的模拟能力,揭示干旱化机理,具有十分重要的意义。

本文通过分析吉林“通榆长期观测实验站”获得的 2003~2005 年长序列 30 min 间隔的不同下垫面近地层通量、及其相关的辐射和常规气象观测资料,讨论半干旱区地气交换日、季、年际变化特征,探讨不同年份的气候背景对地气交换过程的影响以及不同下垫面之间地气交换过程的差异。

2 实验场地和资料

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境内,本实验站是在国家重点基础研究发展规划项目(973)“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”的支持下,于 2002 年 10 月正式建成并连续运行至今,同时,它也是国际观测计划 CEOP (www. CEOP. net) 的地面观测基准站。该实验站地理位置为 ($44^{\circ}25'N$, $122^{\circ}52'E$),

通榆县地形非常平坦,平均海拔 184 m,无长年流水的河流,年平均气压 996.8 hPa,气温 $5.2^{\circ}C$,湿度 57%,年降水量 404.3 mm,年平均盛行风西南偏南(SSW),年平均风速为 4.2 m/s。实验站分别在退化草地和农田设置两个观测点:退化草地草的覆盖度大约在 60%左右,夏季一般在 10 cm 以下,冬春季在 5 cm 以下,覆盖度只有 40%左右,属严重退化的草地。农田非生长季下垫面无作物,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。观测项目主要包括近地面层的物质(CO_2 、 H_2O)和能量通量,近地面层基本气象要素、辐射,土壤温度、湿度以及土壤热通量等,具体仪器型号、安置高度等参阅刘辉志等(2004)。

3 结果与讨论

3.1 典型天气条件下的湍流通量日变化

图 1 给出夏季典型天气条件下近地面层能量平衡的日变化(时间间隔 30 min)(农田下垫面略)。选择退化草地 2003 年 8 月 4~8 日,包括晴天、多云(阴)、雨天,其中 8 月 5、6 日降雨量分别为 7.5 mm、28.5 mm。图 1 中通量值的正负表示能量的传播方向,净辐射(R_n)、地热流通量(G ,此处采用地表下 5 cm 的观测)为正,表示向下传播;而潜热通量(LE)、感热通量(H)为正,表示向上传播,为负表示向下传播(下同)。

图 1 十分清楚地显示出能量平衡各分量日变化周期,变化趋势上潜热通量、感热通量与净辐射相似,但由于它们的变化还受着平流、下垫面等复杂因素的影响,即使晴天它们的变化也不如净辐射那样光滑。地热流通量同样存在清楚的日变化,幅度相对小些,到达日最大值时间滞后于净辐射。由于云、降水的影响,阴天能量平衡各分量曲线波动很大,幅度减小;到了雨天几乎看不到日变化曲线。

统计晴天正午时段[10:00~14:00(北京时)]各湍流通量占净辐射的比例:潜热通量为 46%,感热通量约为 19%,与极端干旱区(沙漠或戈壁)的观测结果基本一致(张强等, 2003),夏季极端干旱

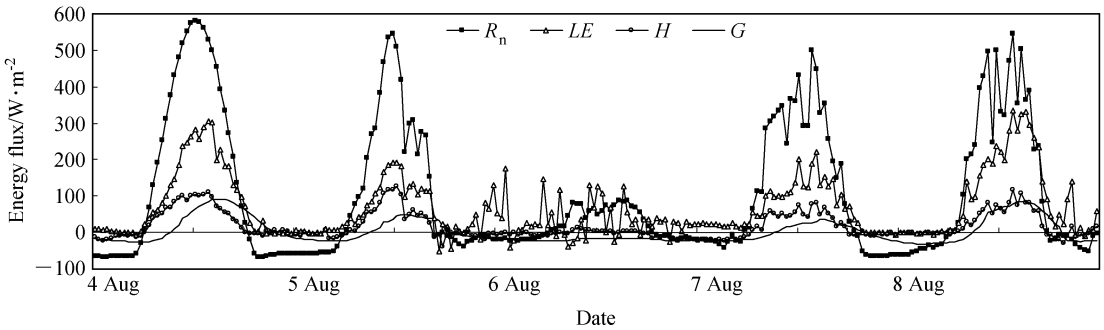


图 1 2003 年 8 月 4~8 日退化草地近地面层能量平衡的日变化 (时间间隔 30 min)

Fig. 1 Diurnal variation of the energy budget at the surface layer over degraded grassland (30 min interval). R_n : net radiation, LE : latent heat flux, H : sensible heat flux, G : soil heat flux

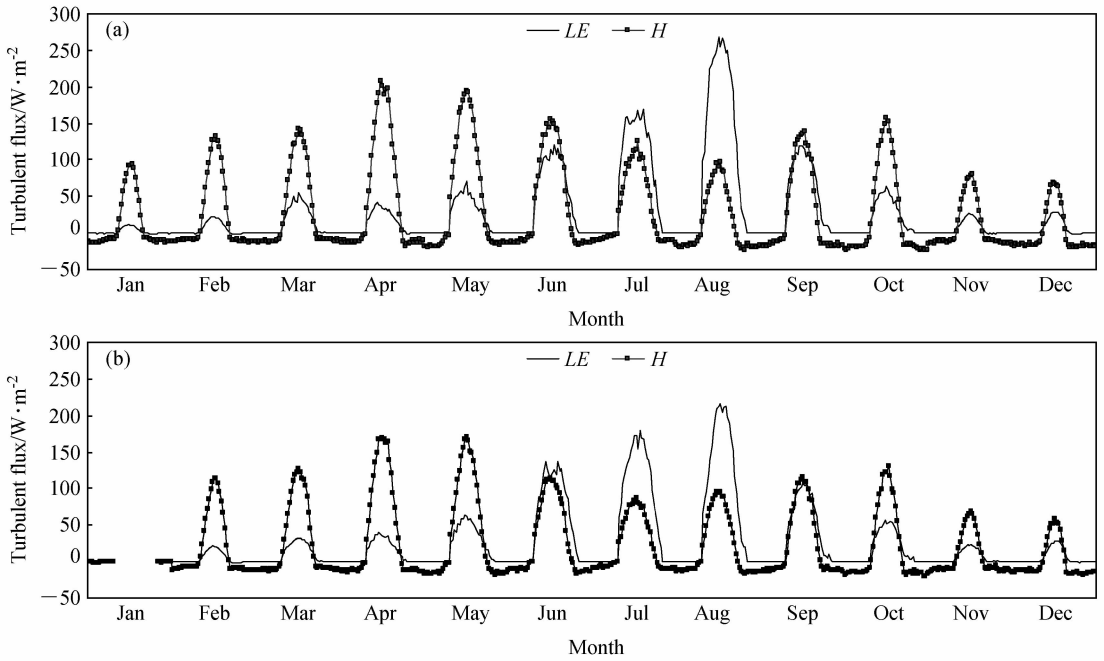


图 2 2003 年 1~12 月近地层湍流通量月平均的日变化: (a) 农田下垫面; (b) 退化草地下垫面

Fig. 2 Month-averaged diurnal variation of the turbulent flux at the surface layer over (a) cropland and (b) degraded grassland in 2003

区的地表平衡以感热通量为主,敦煌夏季晴天日总量潜热通量、感热通量、地热流通量占净辐射 2%、84%、11%。

晴天能量平衡的日变化曲线中,白天,净辐射方向向下,太阳总辐射起主导作用,潜热通量和感热通量方向向上,表明热量和水汽都是由地面向上输送的,此时地热流通量也为正值,即向下传导的热量从暖地面进入地下。夜晚,净辐射为负,即地表长波辐射成为主导,感热通量方向向下表明空气的热通量向下输送,而在夜晚潜热通量方向仍向上,表明此段时间有很小的蒸发潜热通量,地热流

通量方向向上表明热量从土壤层向地表传输。

3.2 近地面湍流通量月平均的日变化

图 2 为 2003 年 1~12 月农田和退化草地下垫面近地面层湍流通量的月平均的日变化,从中可见,潜热通量、感热通量全年均有相似的日变化过程,幅度随季节而变化,类似晴天的能量收支日变化曲线,但是幅度有所减少,这是由于云、雨、雪等天气的影响。

无论退化草地和农田一年中感热通量日变化幅度远大于潜热通量,只有在夏季潜热通量才与感热通量相当,甚至超过感热通量,主要原因在于当地

降水多集中在夏季,而且也是植被的生长旺盛期。潜热通量在夏季(7、8月)有最大的日变化幅度,而感热通量最大日变幅出现在春季(4、5月);日极值感热通量可达 200 W/m^2 以上,潜热通量可达 150 W/m^2 以上;冬季两通量的日变化幅度各自都是一年中最小的,感热通量日极值普遍大于 50 W/m^2 ,而潜热通量低于 30 W/m^2 。

从图2中还可以看到,农田和退化草地下垫面的差异主要表现在夏季(6~8月)潜热通量日变化幅度,8月份农田潜热通量日变化最大值为 267.0 W/m^2 ,而退化草地只有 216.3 W/m^2 ;6月份的日变化中,退化草地潜热通量已经超过了感热通量,但农田仍然是感热通量处于主导。同时还看到,全年除夏季外,农田的感热通量日变化要稍高于退化草地,夏季的差异与其他季节相比偏小。这种差异主要是由于地表覆被差异造成的,与两种下垫面上植被的生长发育、耗水的不同有关。

3.3 近地层湍流通量的年变化和年际变化

图3为2003~2005年退化草地下垫面湍流通量日均值的年变化(农田下垫面略),从中可见清楚的年循环,各年间年变化形态相似,幅度稍有差异。感热通量2004年与2003、2005年的双峰年变化形态有些不同,春、秋季双峰不明显,原因是2004年降水偏少的影响结果。

从2月初开始,感热通量随净辐射增加而增加,而潜热通量的增长相对缓慢。分析其原因,在半干旱的退化草原地区,此时正值干季,虽然净辐射在增加,但土壤正在逐渐解冻从而吸收了较多的热量,地气温差大,且此时的土壤湿度比较低,因此,潜热通量小而感热通量相对大。而后,感热通量仍随着净辐射增加不断增大,到5月下旬~6月

上旬,达到了最大,这段时期感热通量占主导地位。随后,感热通量开始明显下落,潜热通量迅速增加,到6月中旬~8月上旬潜热通量达到最大,此段时间潜热通量迅速增加并占主导地位,一个原因是雨季的到来,另一个原因是草已经返青、生长,此段时间应该是植被生长最旺盛的时期,蒸发有所加强。从8月中旬开始净辐射逐渐减小,潜热通量略微滞后,也随之减小,但速度较辐射要快,而感热通量没有明显减小,到9月,呈现感热通量一年中的第二个峰值,直到10月上旬开始逐渐减弱。

平均而言,潜热通量在夏季达到最大值 120 W/m^2 左右,春、秋季次之,冬季最小值约 5 W/m^2 ;感热通量春季最大值达 70 W/m^2 左右,夏、秋季次之,冬季最小值约 -5 W/m^2 ;潜热通量的年变化幅度约为 115 W/m^2 ,感热通量达 75 W/m^2 左右。

为了更清楚地看到年际间的变化,对湍流通量作了月总量统计,图4给出2003~2005年农田(nt)和退化草地(cy)下垫面潜热通量和感热通量的月总量。同样可清楚地看到两湍流通量的年变化周期,潜热通量最大在7月,感热通量在5月;而且由于2004年干旱少雨,三年中2004年的潜热通量最小,月总量明显低于2003、2005年,而感热通量恰好表现为2004年高于其他两年,且2004年的感热通量没有呈现双峰的年变化,潜热通量的单峰变化也较2003、2005年弱。生长季农田下垫面的潜热通量只有2003年明显大于退化草地下垫面,其他两年两下垫面相当,而感热通量三年的结果均是农田下垫面大于退化草原下垫面。

无论是退化草地和农田下垫面,湍流通量月总量的季节变化明显,潜热通量变现为夏季最高、春秋次之、冬季最低,感热通量表现为春季最高、夏

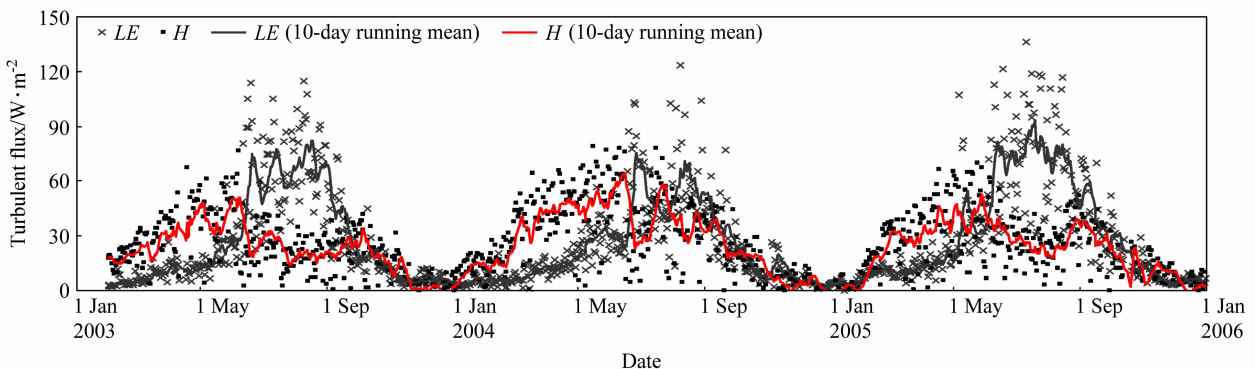


图3 2003~2005年退化草地下垫面近地层湍流通量日均值的年变化

Fig. 3 Annual cycle of the mean daily turbulent flux at the surface layer over degraded grassland from 2003 to 2005

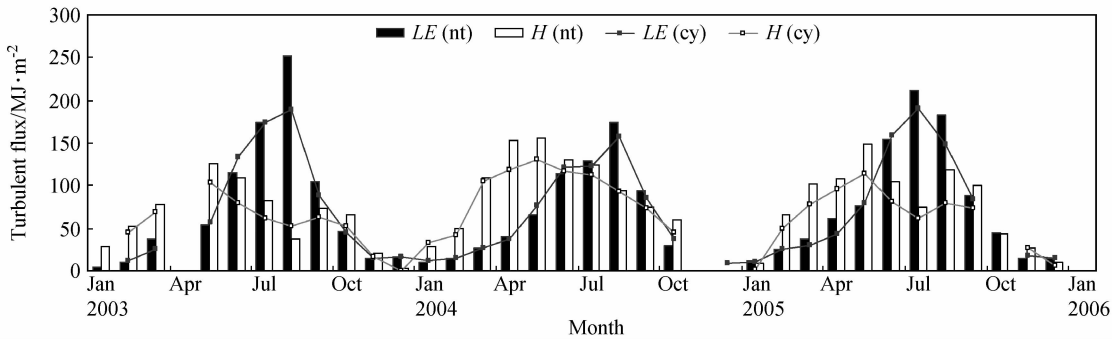


图 4 2003~2005 年农田 (nt) 和退化草地 (cy) 下垫面湍流流量月总量变化
Fig. 4 Variations of monthly total turbulent fluxes over cropland (nt) and degraded grassland (cy) from 2003 to 2005

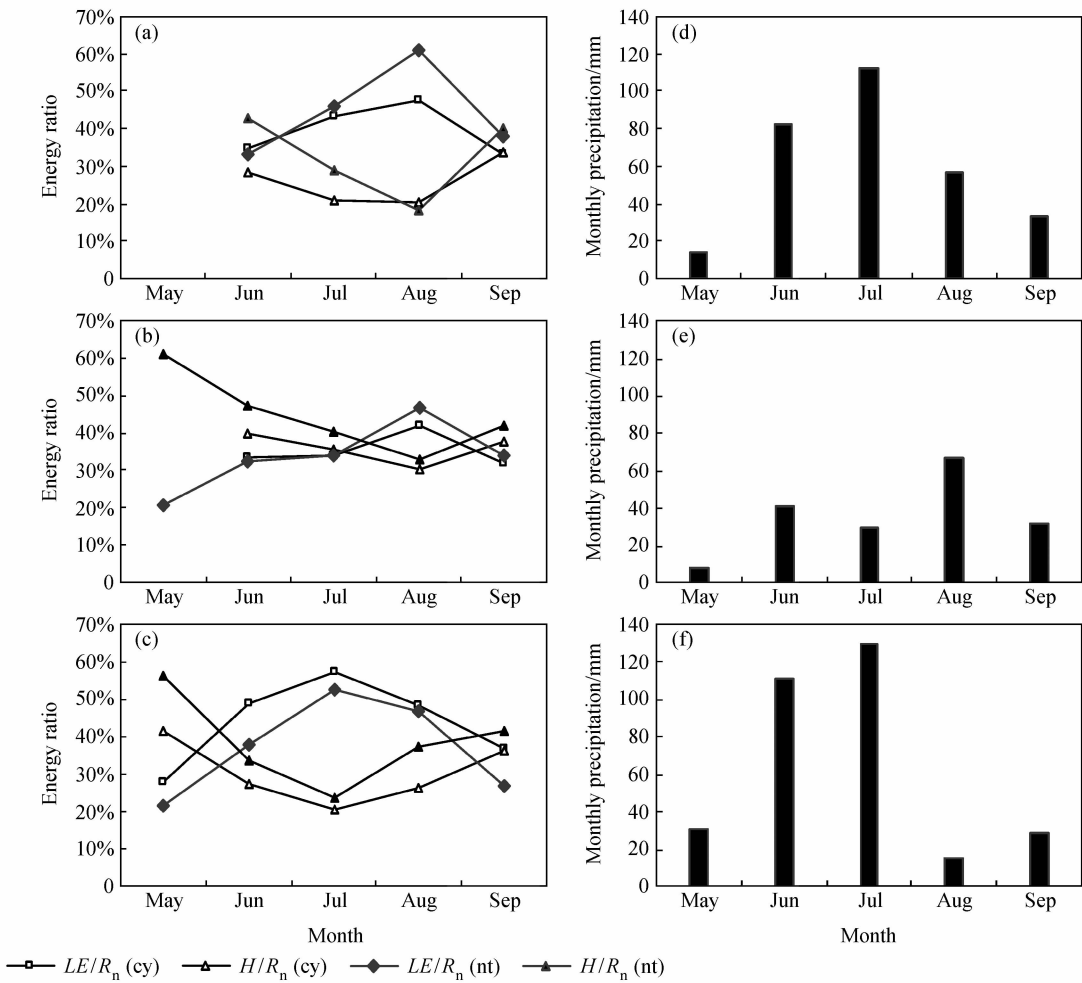


图 5 生长季退化草地和农田能量分配比例 (a~c) 及同期月降水 (d~f): (a, d) 2003 年; (b, e) 2004 年; (c, f) 2005 年
Fig. 5 Monthly (a~c) energy partition proportion and (d~f) precipitation over degraded grassland and cropland in the growing season in (a, d) 2003, (b, e) 2004, (c, f) 2005

秋次之、冬季最低;感热通量和潜热通量呈现反位相变化;潜热通量的年变化幅度大于感热通量的年变化幅度。

3.4 生长季能量分配和波恩比的变化特征

图 5 给出 2003~2005 年退化草地和农田生长季 (5~9 月) 能量分配月平均值以及同期月降水,

由图可见,无论是退化草地还是农田,潜热通量和感热通量占净辐射比例呈反位相变化,而且农田和退化草地的变化趋势相似,均只在夏季潜热通量所占比例超过感热通量;生长季潜热通量占净辐射比率最高可达 55% 以上,而此时对应于感热通量所占比例的最低值,只有 20% 左右。

同时,可以看到这三年能量分配变化曲线存在一定差异。首先,2003 年和 2004 年潜热、感热能量分配差异最大是在 8 月,而 2005 年出现在 7 月;其次,2004 年潜热、感热占净辐射的比例接近。对比同期的降水可以看到,2004 年是旱年,而 2005 年生长季的降水分配很不均匀,尤其是 8 月份降水很少。可以认为,生长季的降水量对下垫面的能量分配影响很大,能量交换年际间的差异主要受气候条件,尤其是降水的影响。

图 6 给出了农田和退化草地下垫面 2003~2005 年植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) (来自 NASA, 250 m 分辨率 MODIS 产品)。对比图 4 可以看到,农田的 NDVI

在 7、8 月份明显高于草地,同期农田的潜热通量也高于草地,且潜热分配比例也基本高于草地,因此,两下垫面湍流通量的差异主要由地表植被差异而产生。再有,2004 年 NDVI 整体偏低;NDVI 变化形态有所差异:2003、2004 年农田 NDVI 出现高值并超过草地是在 7、8 月,而 2005 年只在 7 月末出现一个高值,这与降水年际差异和年内分配的多少有关。因此可以说,降水直接影响植被的生长,进而对能量交换产生影响。

图 7 为 2003~2005 年 4~10 月退化草地和农田波恩比的月均值,可见,两种下垫面的波恩比月均值变化趋势十分相似,量级接近;夏季退化草原和农田下垫面波恩比均小于或等于 1,此时潜热通量与感热通量相当;干旱的 2004 年波恩比只在夏季稍高些。从以往在 HEIFE 试验结果,夏季气候平均的波恩比在 10 左右,敦煌试验结果比黑河大一个量级左右,这反应了半干旱区与极端干旱区、干旱区的气候差异 (左洪超等, 1994; 张强等, 2003; 王慧等, 2008)。

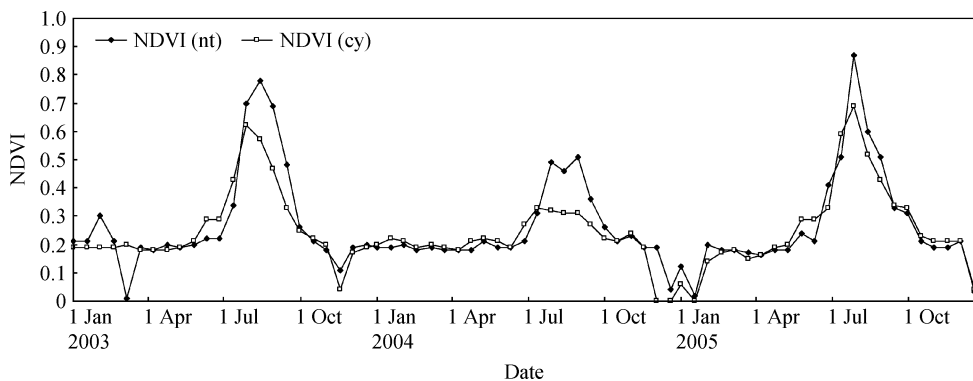


图 6 2003~2005 年退化草地和农田 NDVI (间隔 16 天)

Fig. 6 NDVIs of degraded grass and cropland from 2003 to 2005 (16 d interval)

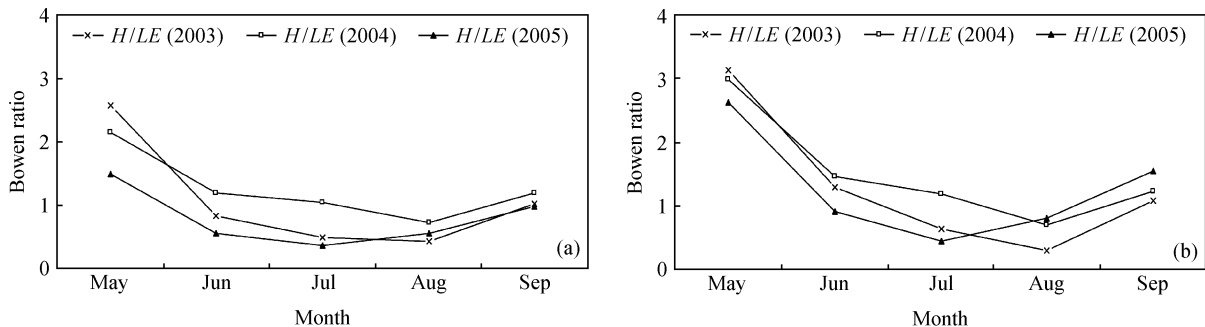


图 7 2003~2005 年 (a) 退化草地和 (b) 农田波恩比月均值

Fig. 7 Mean monthly Bowen ratios over (a) degraded grassland and (b) cropland for 2003-2005

4 结论

本文通过分析 2003~2005 年长序列 30 min 间隔的近地层湍流流量观测资料, 讨论了退化草地和农田下垫面地气交换日、季、年、年际间变化特征, 探讨了不同年份的气候背景对地气交换过程的影响以及不同下垫面之间地气交换过程的差异, 主要结论如下:

(1) 半干旱区退化草地和农田近地层湍流流量表现出明显的日变化、季变化、年变化周期。潜热通量在夏季达到最大, 春、秋季次之, 冬季最小; 感热通量春季最大, 冬季最小(降水正常年份会呈现双峰的年变化形态); 日均值的年变化中只有净辐射有明显的方向转换期, 潜热通量几乎没有方向的改变, 感热通量在冬季会出现负值; 潜热通量和感热通量的日变化幅度同样具有显著的季节性, 潜热通量日变化幅度夏季最强, 感热通量春季最强; 日变化周期中除生长季外, 感热通量占主导地位。

(2) 半干旱区退化草地和农田近地层湍流流量年变化形态年际间相似, 幅度稍有差异, 年际间差异主要受当年的气候背景影响, 尤其是降水的影响; 两下垫面湍流交换的差异主要由下垫面植被差异而产生; 降水直接影响植被的生长, 进而对能量交换产生影响。

(3) 无论是退化草地还是农田, 潜热通量和感热通量的分配比率呈反位相变化, 且农田和退化草地的变化趋势相似, 均只在夏季潜热通量所占比例超过感热通量; 两种下垫面的波恩比月均值变化趋势十分相似, 量级接近, 夏季低, 春、秋季高; 夏季退化草原和农田下垫面波恩比均小于或等于 1。

参考文献 (References)

Eugster W, Rouse W R, Pielke R A Sr, et al. 2000. Land-atmosphere energy exchange in arctic tundra and boreal forest: Available data and feedbacks to climate [J]. *Global Change Biol.*, 6 (Suppl. 1): 84-115.

符淦斌, 叶笃正. 1995. 全球变化和我国未来的生存环境 [J]. *大气科学*, 19 (1): 116-126.

Fu Congbin, Ye Duzheng. 1995. Global change and the future trend of ecological environment evolution in China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 19 (1): 116-126.

符淦斌, 温刚. 2002. 中国北方干旱化的几个问题 [J]. *气候与环境研究*, 7 (1): 22-29.

Fu Congbin, Wen Gang. 2002. Several

issues on aridification in the northern China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 7 (1): 22-29.

Fu Congbin, Wang Shuyu, Xiong Zhe, et al. 2005. Regional climate model intercomparison project for Asia [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86 (2): 257-266.

Kellner E. 2001. Surface energy fluxes and control of evapotranspiration from a Swedish Sphagnum mire [J]. *Agric. For. Meteorol.*, (110): 101-123.

刘辉志, 董文杰, 符淦斌, 等. 2004. 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]. *气候与环境研究*, 9 (2): 378-389.

Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. 2004. 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* (in Chinese), 9 (2): 378-389.

Raupach M R. 1998. Influences of local feedbacks on land-air exchanges of energy and carbon [J]. *Global Change Biol.*, (4): 477-494.

Verhoef A, Allen S J, Lloyd C R. 1999. Seasonal variation of surface energy balance over two Sahelian surface [J]. *International Journal of Climatology*, (19): 1267-1277.

王介民. 1999. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX [J]. *高原气象*, 18 (3): 281-294.

Wang Jiemin. 1999. Land surface process experiments and interaction study in China—From HEIFE to IMGRASS and GAME-TIBET/TIPEX [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 18 (3): 281-294.

王慧, 胡泽勇, 马伟强, 等. 2008. 鼎新戈壁下垫面近地层小气候及地表能量平衡特征季节变化分析 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1458-1470.

Wang Hui, Hu Zeyong, Ma Weiqiang, et al. 2008. The seasonal variation of microclimate characteristics and energy transfer in the surface layer over Dingxin Gobi [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 32 (6): 1458-1470.

张强, 曹晓彦. 2003. 敦煌地区荒漠化戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究 [J]. *大气科学*, 27 (2): 245-254.

Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. 2003. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or Gobi [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 27 (2): 245-254.

周连童, 黄荣辉. 2008. 中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1276-1288.

Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2008. Interdecadal variability of sensible heat in arid and semi-arid regions of Northwest China and its relation to summer precipitation in China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 32 (6): 1276-1288.

左洪超, 胡隐樵. 1994. 黑河地区绿洲和戈壁小气候特征的季节变化及其对比分析 [J]. *高原气象*, 13 (3): 246-256.

Zuo Hongchao, Hu Yingqiao. 1994. Seasonal variation of microclimate characteristics of the oasis and the Gobi in Heihe region and comparative analysis [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 13 (3): 246-256.