

周德刚, 黄刚, 马耀明. 2012. 中国西北干旱区戈壁下垫面夏季的热力输送[J]. 大气科学学报, 35(5): 541-549.

Zhou De-gang, Huang Gang, Ma Yao-ming. 2012. Summer heat transfer over a Gobi underlying surface in the arid region of Northwest China[J].

Trans Atmos Sci, 35(5): 541-549. (in Chinese)

中国西北干旱区戈壁下垫面夏季的热力输送

周德刚¹, 黄刚¹, 马耀明²

(1. 中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085)

摘要:以敦煌戈壁站 2004 年 6 月和 2008 年 8 月的常规观测和超声观测为例, 分析了西北干旱区戈壁下垫面夏季热力输送的一般过程及特征。首先评价了湍流通量的观测质量以及仪器观测的地表能量通量闭合问题, 结果表明敦煌戈壁站的观测在白天总体较好。夏季地表能量通量的平均日变化显示, 潜热通量整天都很小, 可以忽略, 白天到达地表的短波辐射以及地表向上的长波辐射非常强, 地表净辐射主要转化为感热输送(敦煌戈壁站在中午时平均分别达 $380 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上和 $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上); 夜间土壤释放热量以平衡地表的辐射冷却, 感热通量略低于 0。白天时地表大气经常触发自由对流活动, 影响动量通量的观测质量, 并有效输送地表热力至上层大气中, 有助于形成超厚大气边界层。分析了戈壁下垫面的动量粗糙度特征和热力粗糙度特征(敦煌戈壁站动量粗糙度约为 0.6 mm), 热力粗糙度基本小于动量粗糙度一个量级, 这符合目前对干旱区戈壁下垫面热力输送特征的初步认识。

关键词:戈壁下垫面; 热力输送; 湍流通量; 地表粗糙度

中图分类号: P425.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7097(2012)05-0541-09

Summer heat transfer over a Gobi underlying surface in the arid region of Northwest China

ZHOU De-gang¹, HUANG Gang¹, MA Yao-ming²

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Using the routine meteorological measurements and supersonic measurements at Dunhuang Gobi site in June 2004 and August 2008 as an example, This paper analyses the general process of summer heat transfer and its characteristics over a Gobi underlying surface in the arid region of Northwest China. Observation qualities of turbulent fluxes and measured surface energy closure are first evaluated, indicating that the system in the site measures well during the daytime overall. The typical diurnal variations of surface energy fluxes in summer show that the latent heat flux is generally little and can be ignored. In the daytime, both downward solar radiation and upward longwave radiation near surface are strong, and surface net radiation is mainly transformed into sensible heat flux (e. g., mean surface net radiation and sensible heat flux at noon at Dunhuang Gobi site can reach more than $380 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively). Soil releases energy to balance surface radiation cooling in the nighttime, and sensible heat flux is a little less than 0. The frequently occurred free convection activity near-ground is found in the daytime, which influences the observation quality of momentum flux. It can effectively transfer near-ground heat into upper air and contributes to the super depth of the atmospheric boundary

收稿日期: 2012-05-03; 改回日期: 2012-07-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421405; 2011CB309704); 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201006021)

作者简介: 周德刚(1978—), 男, 湖北广水人, 博士, 副研究员, 研究方向为西北干旱区陆—气相互作用, degangzhou@163.com.

layer. The characteristics of momentum roughness length and thermodynamic roughness length over the Gobi surface are further researched. The momentum roughness length at Dunhuang Gobi site is determined as 0.6 mm. The thermodynamic roughness length is an order of magnitude lower than the momentum roughness length, which agrees with the primary understanding of thermodynamic transport characteristics over the arid region.

Key words: Gobi surface; thermodynamic transport; turbulence flux; surface roughness length

0 引言

我国西北干旱区,一般指我国 106°E 以西、 35°N 以北的内陆区域,面积约占我国国土面积的四分之一。由于地处大陆腹地,同时受多种因素的影响,如青藏高原动力和热力过程(徐国昌和张志银,1983)、ENSO(王国荣等,2007)等,西北干旱区大部分地区的年降水量在 200 mm 以下。这致使此区域地表主要为沙漠、戈壁和稀疏植被所占据。在春夏季,到达地表的太阳辐射很强,地—气间的感热交换也非常强烈,此区域是整个欧亚大陆的高感热区(布和朝鲁等,2002;周连童,2010)。初步研究表明,西北干旱区地表的高感热输送及其变化,对东亚夏季环流以及我国华北地区和长江流域的气候异常有重要影响(周连童和黄荣辉,2006)。

由于对西北干旱区陆面热力输送过程认识的不够,气候模式尚不足以重现此区域的水热循环过程。为此,自 20 世纪 80 年代末以来,在西北干旱区相继开展了一些观测试验,如 1987—1993 年开展了“黑河地区地气相互作用野外观测试验研究”(HEIFE);此后,为了进一步加深对典型干旱区陆面过程的理解,自 2000 年起,又在敦煌戈壁、藏北高原五道梁和巴丹吉林临则设站进行了“中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验”(NWC-ALIEX),该试验已经连续观测 10 多年。通过这些观测试验,在干旱区典型下垫面的辐射收支、地表参数等方面取得了许多非常有意义的研究成果(胡隐樵等,1994;张强等,2002;张强和曹晓彦,2003;张强等,2005;韦志刚等,2006)。

戈壁下垫面是西北干旱区主要的下垫面之一。在夏季时,此下垫面地—气间存在较大的温度差异和很强的感热交换(张强等,2005)。再分析资料和气候模式不能再现出西北地气如此大的地气温差,其中,不合理的热力学参数化方案是一个重要的原因(Yang et al., 2007)。因此,需要进一步分析戈壁下垫面的湍流输送过程,特别是与感热输送相关的近地面大气活动。NWC-ALIEX 试验在敦煌双墩子

戈壁设站对戈壁下垫面进行观测,该站观测对认识西北干旱区戈壁下垫面的一般湍流输送特征具有一定的代表性。为此,本研究以敦煌双墩子戈壁站为例,分析戈壁下垫面近地表的湍流动量和热力输送过程,这将有助于进一步认识戈壁下垫面地表特征参数的变化规律和进行参数化。

1 观测资料和分析方法

所用观测资料来自 NWC-ALIEX 试验敦煌双墩子戈壁微气象站(以下简称戈壁站, $94^{\circ}31'\text{E}$, $40^{\circ}10'\text{N}$),该站地处敦煌绿洲西部的双墩子戈壁滩,海拔高度为 1 150 m,下垫面主要由沙、砾石、砾砂和中粗沙组成。测站周围为平坦的沙石戈壁,在观测站正南部 255 m 左右为敦煌市第二水厂,距东部最近的绿洲为 7 km。在夏季时,白天的主要风向为东偏北风和西风,夜间的主要风向为东偏北风和西南风(图 1)。因此白天的观测对戈壁下垫面基本上有较好的代表性,夜间可能在一定程度上会受到观测站南部建筑物的干扰。观测站周围详细的下垫面分布和 footprint 模拟评价详见 Zhou and Huang (2011)。总的来说,该站基本上能较好地观测戈壁下垫面的大气湍流过程。

敦煌戈壁站目前已有 10 多年的观测资料,主要为常规观测资料。考虑到超声仪器观测的湍流量比常规观测有更高的精度和质量,这里取 2004 年 6 月和 2008 年 8 月这两个同时拥有常规观测和超声观测的时段。常规观测包括 4 层(18、8、2、1 m)风温湿梯度资料、地表温度和 6 层(地下 5、10、20、40、80、180 cm)土壤温度资料,以及向上向下的四分量辐射通量观测(约 1.5 m 高度处)资料、4 层(地下 5、10、20、80 cm)土壤湿度观测资料和 2 层(2.5、7.5 cm)土壤热通量观测资料。常规观测每 30 min 记录一次。超声观测仪器包括 CSAT3 (Campbell) 三维超声风温仪和 KH20 (Campbell) 水汽分析仪,观测频率为 10 Hz,观测应头在 2004 年设置超南,距离地面 2.5 m 高,在 2008 年设置为超北,距离地面 3.0 m 高。考虑资料的连续性,舍弃每次超声观测

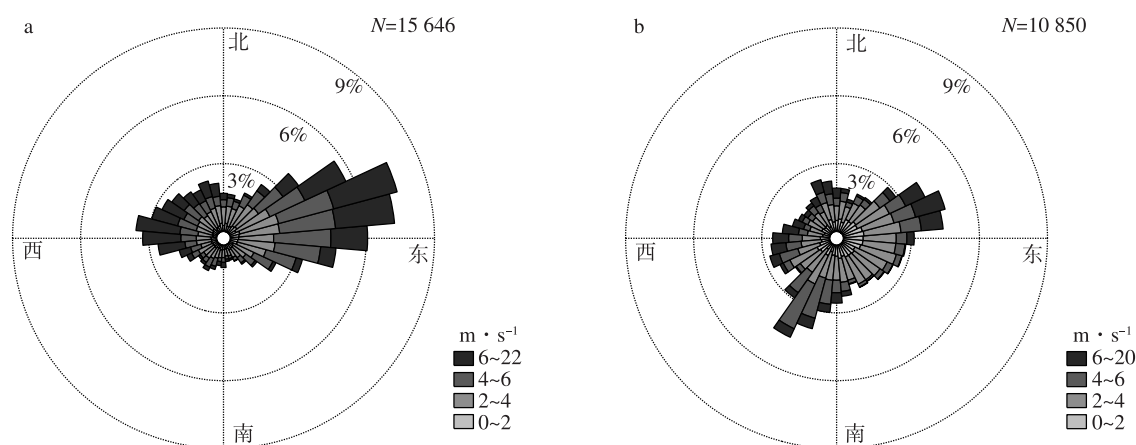


图 1 戈壁站在 2004—2009 年夏季白天(a)和夜间(b)的风向风速频次统计(N 为样本数)

Fig. 1 Statistics of wind direction and wind speed in summer of 2004—2009 at the Gobi site during (a) the day-time and (b) the nighttime (N is the sample number)

期开始几天的资料,实际分析时分别选取 2004 年 6 月 10—30 日和 2008 年 8 月 10—25 日的观测数据。

超声观测所采用的涡度相关法是目前对地表能量和物质输送通量观测的一种比较好的方法,具有很高的观测精度,被广泛应用于 Ameriflux、EUROFLUX 和 Asia Flux 通量网 (Baldocchi et al., 2001)。随着质量控制和测站代表性分析软件的发展,这种观测方法不仅可以在均匀下垫面进行观测,也逐渐应用于复杂下垫面。超声仪器配套的湍流数据采集系统(如 CR5000)也可以处理并输出通量资料,并且对湍流观测也进行了质量订正(如:超声温度交叉风订正、氧交叉订正、WPL 订正、二次旋转坐标订正和超声温度订正等),但是缺乏相应的质量评价。质量评价和质量控制有助于减少观测分析的不确定性,如 Zhou and Huang (2011) 在基于质量评价和质量控制下确定的戈壁下垫面的动量粗糙度小于此前对其的认识 (Zhang et al., 2002)。这里应用德国 Bayreuth 大学发展的综合处理软件 TK3 (Marder and Foken, 2011) 进行质量控制和质量评价 (Foken and Wichura, 1996; Foken et al., 2004),选取平面订正以消除可能存在的仪器安装倾斜对观测的影响,获得了相应的高质量的能量通量数据集。在此基础上,进一步分析敦煌戈壁下垫面的地表热力输送过程和参数特征。

2 湍流通量的质量评价和地表能量的日变化特征

通过 TK3 软件对原始超声资料的后处理,得到了每半小时平均的动量通量、能量通量以及相应的质量等级。在这两次观测期,动量通量和感热通量

的观测质量有相似的日变化过程。图 2 给出了 2004 年 6 月 10—30 日超声观测的动量通量和感热通量的质量评价。评价标准采用了 Rebmann et al. (2005) 的质量评价方法,综合考虑了湍流的平稳性和湍流发展充分性,质量等级在 1—2 表示观测的质量很好,该数据可以用作进一步的基础研究,质量等级为 3—4 表示质量一般,质量等级为 5 表示质量很差,应当舍弃。图 2a 表明,动量通量(摩擦速度)的质量总体较好,但是在白天也存在质量一般甚至质量很差的观测结果。图 2b 表明,虽然感热通量在夜间的观测质量不高,但是在白天特别是在 10:00—17:30 这段时间内的观测质量总体非常好。在白天(取向短波辐射大于 30)时,动量通量质量等级为 5 的一共有 17 个,其中 10 个与风速的平稳性有关,与风向没有明确的统计关系,出现的时刻也没有特别的规律。白天感热通量的质量等级为 5 的一共有 36 个,主要分布在日出后/日落前的一段时间内,其中有 10 个质量标识为差的只是与感热输送的总体湍流特性(即湍流的发展状况)有关,另有 24 个受湍流的平稳性和湍流发展充分性的共同影响,这可能是由于此时(日出后/日落前)的感热通量(摩擦温度)较小从而导致偏离湍流统计特征。在 2008 年湍流通量观测中,也有相似的现象(图略)。湍流发展可能受环流系统调整、湍流组织结构、自由对流等现象的影响 (Eigenmann et al., 2009),对于戈壁站观测的湍流输送在白天出现质量较差的现象,可能还与戈壁下垫面的特性有一定关系。

分析了这两个观测期的地表能量通量的封闭率(图 3)。对于土壤热通量,考虑到热通量板观测的土壤热通量与实际值一般存在偏差 (Sauer et al.,

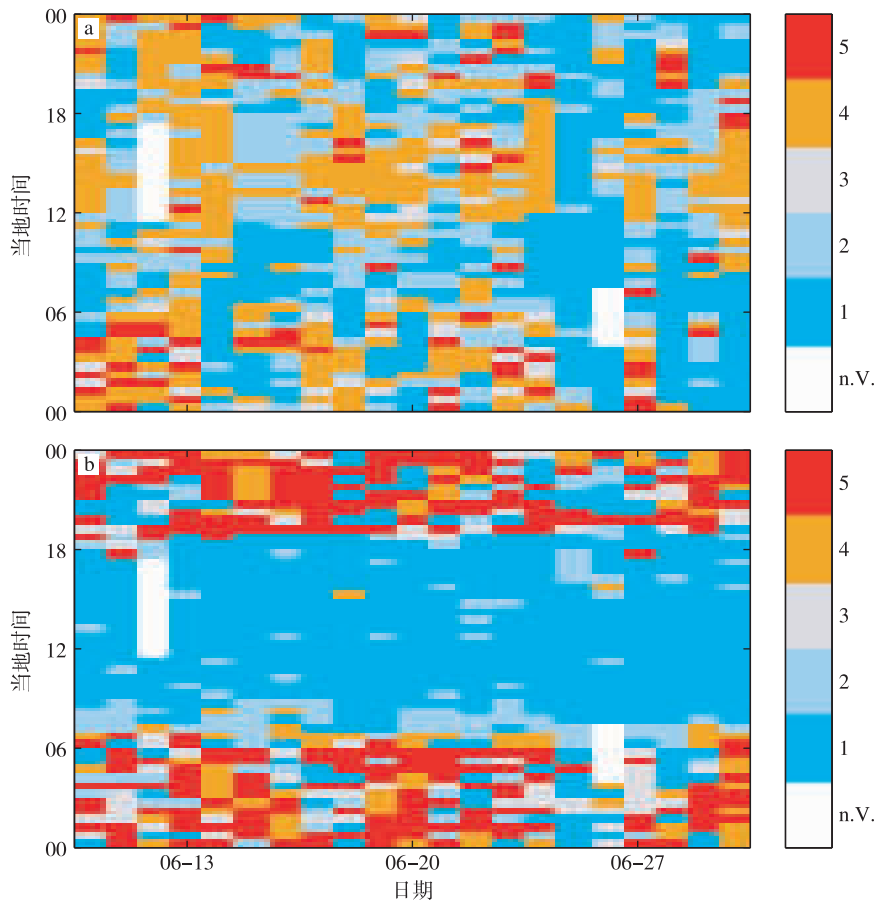


图 2 2004 年 6 月 10—30 日超声观测的动量通量(a)和感热通量(b)质量评价
Fig. 2 Quality assessment of (a) momentum flux and (b) sensible heat flux in supersonic measurements during 10—30 June 2004

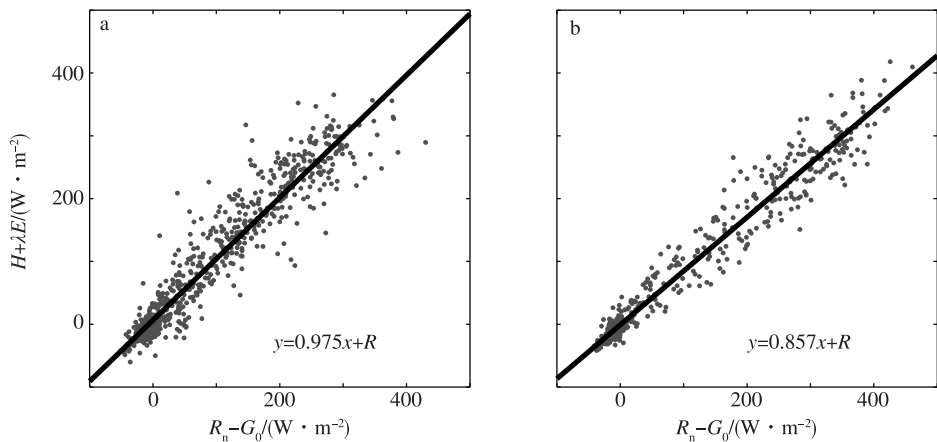


图 3 戈壁站在 2004 年 6 月 10—30 日(a)和 2008 年 8 月 10—25 日(b)两个观测期的地表能量通量封闭率
Fig. 3 Surface energy flux closure ratios of measurements at the Gobi site during two periods of (a) 10—30 June 2004 and (b) 10—25 August 2008

2003), 所以采用阳坤和王介民(2008)的 TDEC 法, 利用土壤温度和湿度观测来计算地表的土壤热通量。结果显示, 2004 年 6 月的能量通量封闭率可以

达到 0.975, 2008 年 8 月为 0.857。2008 年 8 月的能量通量封闭率相对略低, 除了可能存在的观测误差外, 可能主要受土壤热通量计算方法的影响, 需要

进一步研究。能量不闭合是地面观测中的一个普遍现象,在青藏高原上能量不闭合率甚至可以高达 33% (Tanaka et al., 2001)。因此,戈壁站这两次的观测结果表明,动量通量和感热通量的观测质量在白天总体较好,且观测系统总体能够较好地观测到戈壁下垫面的能量通量,观测资料可以用来进一步分析戈壁下垫面的一般湍流输送特性。

对 TK3 软件计算的 2004 年 6 月和 2008 年 8 月的感热通量和潜热通量日变化取平均,同样地对辐射通量和土壤热通量日变化取平均,则戈壁下垫面近地表能量通量的平均日变化见图 4。结果显示,戈壁站在夏季不同月份的地表能量通量基本具有相似的日变化特征。向下短波辐射在近中午时十分强烈,多日平均值可超过 $800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,在晴好天气下,观测到的向下短波辐射最大值可达 $1\,043\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (2004 年 6 月 13 日 12:00)。在 2008 年 8 月 15 d 的观测中,塔站 8 m 处观测的风速日平均值有 4 d 超过 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这使得向下短波辐射可能受局地沙尘的影响;此外,由于云对辐射的影响,图 4b 中平均的向下短波辐射在近中午时存在起伏变化。由于向下短波辐射强烈,向上短波辐射在近中午平均超过 $180\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。向上长波辐射具有较大的日变化,在白天中午时可超过 $600\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,在夜间最低值小于 $400\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在地表能量通量中,可以

看到向上长波辐射的日平均值最大,这是干旱区辐射输送的一个典型特征 (张强和曹晓彦,2003)。相对向上长波辐射而言,向下长波辐射的日变化较小,基本在 $330\sim400\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。净辐射在 2004 年 6 月中午的平均值超过 $380\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,2008 年 8 月中午的平均值达 $420\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,这种差异可能与观测月份以及云的影响有关。在净辐射能的地表分配中,感热通量明显处于支配地位,大于表层土壤热通量和潜热通量。潜热通量基本接近于 0,变化很小,可以忽略不计。感热通量的最大值出现在当地时间 12:30 左右,平均达 $250\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,在 2008 年 8 月其值高达 $300\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上;感热通量在夜间略小于 0。土壤热通量的最大值出现在上午 10:00 左右,多日平均的日最大值达 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上;在夜间,土壤释放热量以平衡地表向大气的长波辐射冷却。此外,计算了两个观测期平均的净辐射通量和感热通量,在 2004 年 6 月它们分别为 77.6 和 $76.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,在 2008 年 8 月分别为 95.6 和 $83.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;地表土壤热通量相对很小 (小于 $2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)。这表明,在日、月的时间尺度上,净辐射通量主要转变为感热通量以加热大气。

3 典型晴天的湍流输送

图 2 显示,动量通量在白天的观测质量存在着

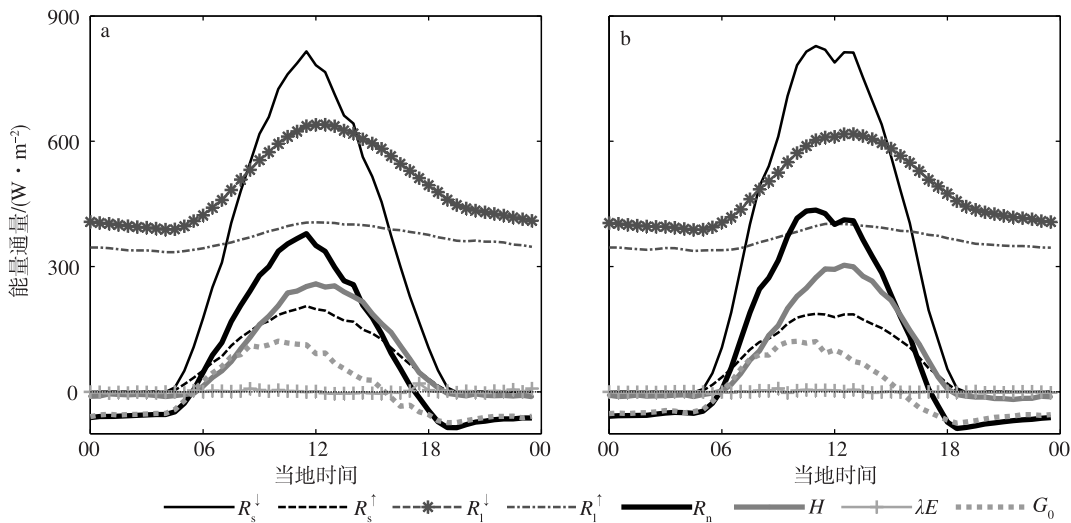


图 4 戈壁下垫面夏季能量通量的平均日变化(单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; $R_s^{\downarrow}$ 、 $R_s^{\uparrow}$ 、 $R_l^{\downarrow}$ 、 $R_l^{\uparrow}$ 、 R_n 、 H 、 λE 、 G_0 分别为向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射、向上长波辐射、净辐射、感热、潜热、地表土壤热通量)
a. 2004 年 6 月 10—30 日; b. 2008 年 8 月 10—25 日

Fig. 4 Daily variations of energy fluxes over Gobi surface in summer (units: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; $R_s^{\downarrow}$, $R_s^{\uparrow}$, $R_l^{\downarrow}$, $R_l^{\uparrow}$, R_n , H , λE , G_0 mean downward solar radiation, upward solar radiation, downward longwave radiation, upward longwave radiation, net radiation, sensible heat flux, latent heat flux and surface soil heat flux, respectively)
a. during 10—30 June 2004; b. during 10—25 August 2008

等级较差的现象。挑选了一个典型晴天(2004 年 6 月 30 日)进行分析,如图 5 所示,其中 a—f 分别为这一天的稳定度 ζ 、风向、向下短波辐射、感热和潜热通量、摩擦速度、动量通量观测质量的日变化。这里的稳定度、风向、感热和潜热以及摩擦速度均为每 5 min 的统计值,以辨认大气活动的细微变化过程。结果表明,在整个白天出现了很多次自由对流活动($\zeta < -1$),即图 5a 中的灰色竖线所示。自由对流反映了在湍流的发展中,湍流从地面加热中获得的能量超过从平流中获得的能量,换言之,主要是由地面的强烈加热来驱动湍流的发展。Foken(2008)指出,当满足 $\zeta < -1$ 的条件时,地面超声仪器可以观测到近地面的自由对流现象。向下短波辐射的变化

(图 5c)显示,当天是一个典型的晴天,基本可以忽略云对太阳辐射的影响,因而不存在由于太阳辐射急剧变化而触发局地环流的情况。当天风向(图 5b)在夜间为南风,在白天主要为西风,风向存在小的变动,这也显示出自由对流不是局地的较大尺度环流调整的结果。白天的摩擦速度(图 5e)平均约在 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 附近,存在很大的波动;同样地,感热通量也存在很大的波动(图 5d)。当戈壁近地面自由对流触发时,摩擦速度较小,而且动量输送的质量一般较差(图 5f)。在这一天的白天,当自由对流触发时动量通量的质量等级多数为 4,而且大多与湍流的发展非充分有关。而在接近傍晚时分(17:00—18:00),自由对流发生时的质量等级为 5,

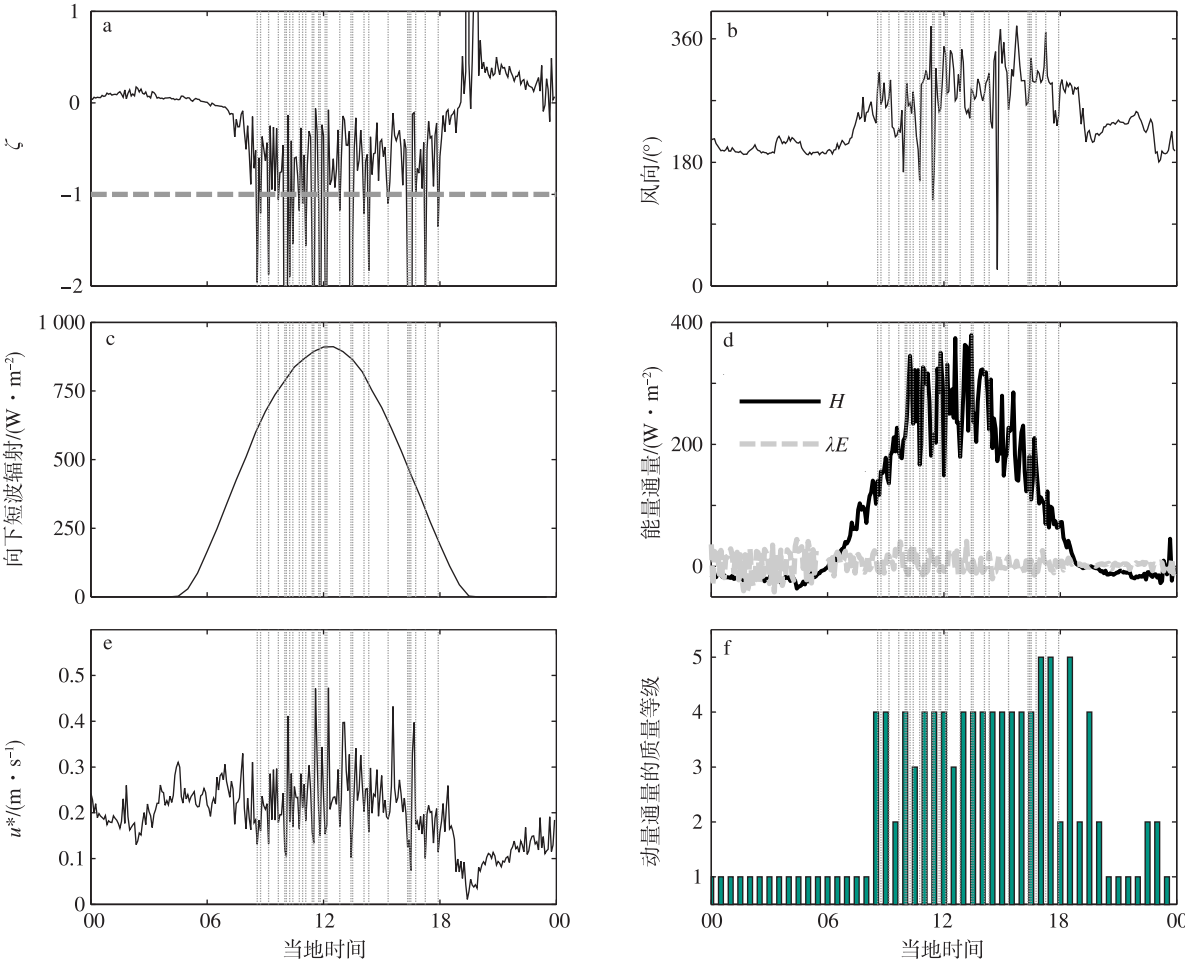


图 5 2004 年 6 月 30 日典型晴天下能量输送的日变化特征(图中灰色竖线表示有自由对流发生) a. 稳定度; b. 风向($^{\circ}$); c. 向下短波辐射($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); d. 感热和潜热通量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); e. 摩擦速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); f. 动量通量观测质量

Fig. 5 Daily variations of energy transport in a typical fair day (on 30 June 2004, the free convections are indicated by the gray dotted lines in each plot) a. the stability parameter; b. the wind direction ($^{\circ}$); c. the downward shortwave radiation ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); d. the sensible and latent heat fluxes ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); e. the friction velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); f. the quality flags of momentum

此时的风向存在北向西和南向西的转换,并且较差的质量等级与湍流运动的平稳性相关,即可能存在着微小尺度环流的调整;由于戈壁观测站离绿洲较远,风向和风速的变化显然不是绿洲与戈壁之间局地环流系统的调整,这种尺度应当小于绿洲戈壁间的尺度。因此,在白天的大部分时间(除去日出不久以及日落前的一小段时间)中,自由对流发生时不是由一个持续的风向转变为另一个持续的风向,即自由对流活动不是由于系统环流调整触发,这意味着,自由对流活动是由于湍流在几分钟内的迅速发展变化或对流释放而触发,这可能与近地面不同大小的小尺度大气活动相关,例如很小尺度的对流涡旋或局地自组织结构。这种小尺度大气活动对动量通量的输送有较大影响,然而对感热通量的影响不大。因此,尽管此时的动量通量质量较差,仍建议保留而非舍弃。这种自由对流现象在戈壁下垫面应当具有普遍性,它是西北干旱区湍流发展和热力输送的一个典型特征,区别于 Eigenmann et al. (2009) 和 Zhou et al. (2011) 指出的由于局地环流系统调整而触发的自由对流现象。

由于戈壁下垫面在夏季白天有很强的感热输送,明显大于季风区同季节的感热输送,在此背景下的自由对流活动可以有效地将地表能量输送到较高层的大气中,影响大气边界层的结构,并有助于该地区形成超厚的大气边界层。观测发现,该地区在夏季的大气边界层可以高达 4 000 m 以上(张强和王胜,2008;韦志刚等,2010),明显高于季风区的大气边界层高度。因此,近地面的高感热和热力的这种湍流输送活动,可以影响局地的大气环流,进而影响

周围区域的气候变化。

4 地表粗糙度特征

动量粗糙度和热力粗糙度是表征陆面过程的基本参量,动量粗糙度是指由相似理论外推出风速为零的高度,热力粗糙度则是由相似理论外推出空气温度等于地表温度的高度,它们均不能直接观测,常常通过风温观测资料来推算。动量粗糙度受地表摩擦和形状曳力的共同影响,而热力学粗糙度则主要受地表摩擦的影响(Chamberlain, 1968),它们的大小因此存在一定差异。Zhou and Huang(2011)根据 2004 年 6 月的湍流资料分析了戈壁下垫面的粗糙度特征,这里只利用 2008 年 8 月的湍流量资料计算地表粗糙度,并与 2004 年 6 月的结果进行比较。

动量粗糙度 z_{0m} 可根据相似理论方程由高度 z 处的风速 u 计算

$$z_{0m} = \exp \left(\ln z - \frac{\kappa u}{u_*} - \psi_m(\zeta) \right) \quad (1)$$

式中: u_* 为摩擦速度; L 为 Monin-Obukhov 长度尺度, u_* 和 L 均由 TK3 软件计算得到; κ 为 Karman 常数; $\psi_m(\zeta)$ 为动量的稳定度修正函数;稳定度 $\zeta = z/L$ 。考虑到非戈壁下垫面(即形状曳力)可能会干扰对戈壁下垫面 z_{0m} 的确定,选择白天盛行风向(东北风和西风)时的湍流资料进行计算。结果显示,在 2008 年 8 月,计算的动量粗糙度大约为 0.63 mm(图 6a),这与 2004 年 6 月的结果(0.59 mm)基本相当(Zhou and Huang, 2011)。

同样地,热力粗糙度 z_{0h} 可以根据温度的相似理论来计算

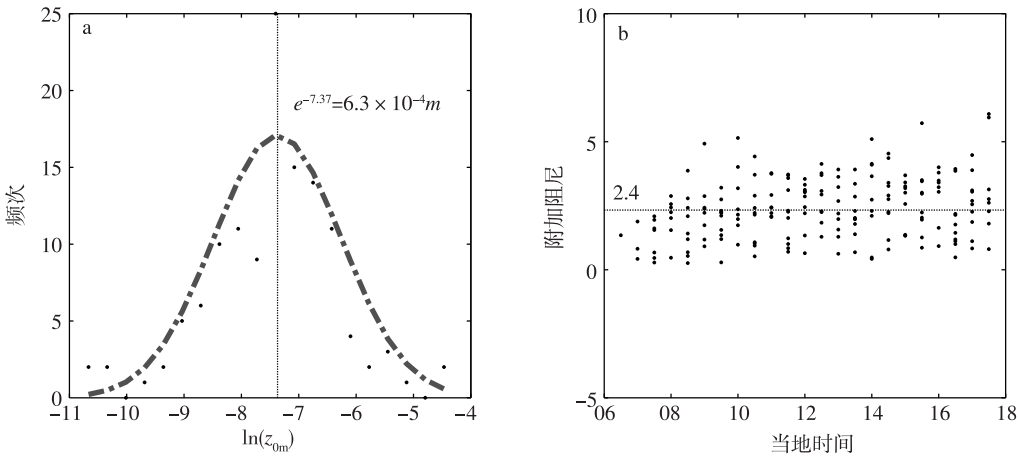


图 6 戈壁下垫面的粗糙度特征 a. $\ln(z_{0m})$ 的频次分布; b. 白天附加阻力的变化

Fig. 6 The characteristic of roughness length over the Gobi surface a. frequency distribution of $\ln(z_{0m})$; b. variation of additional resistance during the daytime

$$z_{0h} = \exp \left(\ln z - \frac{\kappa(\theta_a - \theta_s)}{\theta_*} - \psi_h(\zeta) \right). \quad (2)$$

式中: θ_a 为高度 z 处的气温; θ_s 为地表温度; θ_* 为摩擦温度; $\psi_h(\zeta)$ 为热力的稳定度修正函数。一般常用附加阻尼 $\kappa B^{-1} = \ln(z_{0m}/z_{0h})$ 来表征热力粗糙度的大小特征。由于夜间感热通量的观测质量普遍较差, 这里只分析在白天盛行风向下附加阻尼的特征。结果显示, 附加阻尼在白天的值比较离散(图 6b), 并没有发现 Yang et al. (2008) 指出的明显的日变化规律。附加阻尼的平均值约为 2.4, 这与 Zhou and Huang (2011) 根据 2004 年 6 月观测计算的结果(3.1)差别不是很大, 与 Brutsaert (1982) 对均一植被表面的研究结果大致相当。贾立等(2000)分析了黑河试验化音站(戈壁下垫面)的 κB^{-1} , 由于其研究中动量粗糙度的取值(约 3 mm)高于本文, κB^{-1} 的值也相应大于本文的结果。可能的解释是: 1) 由于两站的降水量存在差异(敦煌戈壁和化音戈壁的年降水量分别在 40 mm 和 150 mm 左右), 下垫面可能因此也有差异, 例如化音戈壁站存在稀疏骆驼刺等植被; 2) 敦煌戈壁站计算的动量粗糙度剔除了形状曳力对动量粗糙度计算的影响, 化音戈壁站观测中如果存在地形和稀疏植被(如稀疏骆驼刺等)的影响, 计算的动量粗糙度可能会大一些, 并将影响 κB^{-1} 的大小。这两种不同的动量粗糙度和对应的 κB^{-1} 都可用来计算感热通量。而实际上, 由于局地感热的输送基本不受形状曳力的影响, 选用只受地表摩擦作用的动量粗糙度可能更有助于估算感热通量。总之, 根据敦煌戈壁站计算的戈壁下垫面附加阻尼的大小特征基本与目前对戈壁下垫面热力输送特征的认识相一致, 即热力学粗糙度比动量粗糙度小一个量级(Braud et al., 1993), 这样的初步结果同样适用于西北干旱区。一般认为, 附加阻尼依赖于表面的性质, 与粗糙度、雷诺数有密切的关系, 但在本文的研究中, 并没有发现它们之间存在很好的统计关系。因此, 还需要更多的观测并结合对微气象过程的模拟, 以进一步理解典型戈壁下垫面的热力学特征。

5 结论和讨论

以敦煌戈壁站 2004 年 6 月和 2008 年 8 月的常规观测和超声观测为例, 分析了西北干旱区戈壁下垫面在夏季湍流输送的一般过程和粗糙度特征。对敦煌戈壁站观测资料的质量评价和质量控制显示, 动量通量的观测质量在白天总体较好, 但也存在一

些质量等级较差的观测, 这主要是受地表大气活动的影响; 感热通量的观测除了在日出后以及日落前的一段时间存在较差的质量等级外, 白天大部分时间的质量都非常好。此外, 观测系统能够较好观测地表各能量通量, 2004 年 6 月和 2008 年 8 月的能量封闭率分别为 0.975 和 0.857。因此, 该站对戈壁下垫面有较好的观测, 该站的湍流输送过程和特征对西北干旱区戈壁下垫面而言具有一定的代表性。

戈壁站地表能量通量的平均日变化显示, 潜热通量整天都很小, 可以忽略。白天时, 到达地面的向下短波辐射很强(中午可达 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上), 地表向上长波辐射也非常强烈(中午平均可达 $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上), 平均的净辐射(中午时可达 $380 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上)主要用于感热的输送(中午时可达 $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上); 夜间时, 土壤释放热量以平衡地表向大气的辐射冷却, 感热通量在夜间略小于 0。在日、月尺度上, 净辐射主要转化为感热输送, 这是干旱区戈壁下垫面夏季的典型热力输送特征。此外, 由于白天的高感热输送, 以及地表经常触发的自由对流活动, 使得大气边界层在白天发展很快, 有助于形成超厚大气边界层。分析了戈壁站下垫面的动量粗糙度和热力粗糙度。根据这两个时期的观测, 在剔除非戈壁下垫面对观测的干扰后, 戈壁下垫面的动量粗糙度约为 0.6 mm, 附加阻尼在白天的变化比较离散, 初步表明热力学粗糙度比动量粗糙度小一个量级, 这符合当前对戈壁下垫面热力输送特征的初步认识。

本文的分析只是选取了一个戈壁站点的观测, 如果对西北干旱区戈壁下垫面进行更多的观测试验和热力输送特征分析, 将有助于进一步认识戈壁下垫面的粗糙度特征。尽管如此, 本研究所示的能量日变化特征、地表大气活动对湍流输送的影响和粗糙度特征, 对戈壁下垫面应当具有一定的共性。贾立等(2000)计算了黑河地区化音戈壁站的动量粗糙度和附加阻尼, 均大于本研究的结果, 这可能是由于动量粗糙度没有剔除地形等形状曳力和非戈壁下垫面对计算的干扰。这种差异在数值模拟应用时, 选取较大的动量粗糙度可能使计算的摩擦速度偏大, 进而影响感热的模拟。例如 ERA-40、NCEP/NCAR、NCEP/DOE、JRA-25 等再分析资料, 由于考虑地形的不同影响, 各再分析资料中的动量粗糙度大小设置各异且明显高于野外的观测值, 感热通量也因此存在显著差异, 而实际上地形等形状曳力基本不影响局地的感热输送, 这是它们不能很好再现

西北干旱区能量循环的一个重要原因。鲍艳等(2004)结合站点实测的动量粗糙度对我国展开气候模式模拟,结果表明,选取实际的较小的动量粗糙度对西北干旱区的模拟有明显改进。这意味着,对我国西北干旱区(戈壁下垫面)进行气候模拟时,与动量输送相关的计算建议用大尺度的动量粗糙度(包括地形),而与热力输送相关的计算建议选取实际的局地动量粗糙度(即只考虑地表摩擦对粗糙度的影响),并考虑戈壁下垫面的热力粗糙度特征,将会有助于改进对此区域感热通量的模拟。这有待于未来的数值模拟验证。

致谢:韦志刚研究员和侯旭宏高工为本研究提供了资料,谨致谢忱!

参考文献:

鲍艳,左洪超,吕世华,等. 2004. 干旱区陆面过程参数改进对气候模拟结果的影响[J]. 高原气象, 23(2): 220-227.

布和朝鲁,纪立人,崔茅常. 2002. 夏季我国干旱半干旱区陆面过程能量平衡及其局地大气环流[J]. 气候与环境研究, 7(1): 61-73.

胡隐樵,高由禧,王介民,等. 1994. 黑河试验(HEIFE)的一些研究成果[J]. 高原气象, 13(3): 225-236.

贾立,王介民,胡泽勇. 2000. 干旱区热力学粗糙度特征及对感热通量估算的影响[J]. 高原气象, 19(4): 495-503.

王国荣,罗哲贤,赵东. 2007. 西北地区3—9月降水量与ENSO的联系[J]. 南京气象学院学报, 30(6): 849-856.

韦志刚,黄荣辉,陈文. 2006. 敦煌戈壁不同近地层大气稳定度下的感热交换系数[J]. 高原气象, 25(5): 834-839.

韦志刚,陈文,黄荣辉. 2010. 敦煌夏末大气垂直结构和边界层高度特征[J]. 大气科学, 34(5): 905-913.

徐国昌,张志银. 1983. 青藏高原对西北干旱气候的形成作用[J]. 高原气象, 2(2): 8-15.

阳坤,王介民. 2008. 一种基于土壤温湿资料计算地表土壤热通量的温度预报校正法[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(2): 243-250.

张强,曹晓彦. 2003. 敦煌地区荒漠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.

张强,王胜. 2008. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征[J]. 气象学报, 66(4): 599-608.

张强,卫国安,黄荣辉. 2002. 绿洲对其临近荒漠大气水分循环的影响——敦煌试验数据分析[J]. 自然科学进展, 12(2): 170-175.

张强,黄荣辉,王胜,等. 2005. 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, 20(4): 427-441.

周连童. 2010. 欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的时空变化特征[J]. 大气科学学报, 33(3): 299-306.

周连童,黄荣辉. 2006. 我国华北地区春季降水的年代际变化特征及其可能原因的探讨[J]. 气候与环境研究, 11(4): 441-450.

Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. 2001. FLUXNET: A new tool to stud-

y the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities [J]. Bull Amer Meteor Soc, 82: 2415-2434.

Braud I, Noilhan J, Bessemoulin P, et al. 1993. Bare-ground surface heat and water exchanges under dry conditions: Observations and parameterization [J]. Bound-Layer Meteor, 66: 173-200.

Brutsaert W H. 1982. Evaporation into the atmosphere [M]. Dordrecht, Holland: Reidel D Publishing Company: 121-127.

Chamberlain A C. 1968. Transport of gases to and from surfaces with bluff and wave-like roughness elements [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 94: 318-332.

Eigenmann R, Metzger S, Foken T. 2009. Generation of free convection due to changes of the local circulation system [J]. Atmos Chem Phys, 9: 8587-8600.

Foken T. 2008. The energy balance closure problem: An overview [J]. Ecological Applications, 18(6): 1351-1367.

Foken T, Wichura B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 78: 83-105.

Foken T, Göckede M, Mauder M, et al. 2004. Post-field data quality control [M]//Lee X, Massman W, Law B. Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis. Dordrecht, Kluwer: 181-208.

Mauder M, Foken T. 2011. Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK3 [M]. Bayreuth, Germany: Department of Micrometeorology, University of Bayreuth.

Rebmann C, Göckede M, Foken T, et al. 2005. Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modeling [J]. Theor Appl Climatol, 80: 121-141.

Sauer T J, Meek D W, Ochsner T E, et al. 2003. Errors in heat flux measurement by flux plates of contrasting design and thermal conductivity [J]. Vadose Zone Journal, 2: 580-588.

Tanaka K, Ishikawa H, Hayashi T, et al. 2001. Surface energy budget at Amdo on the Tibetan Plateau using GAME/Tibet IOP98 data [J]. J Meteor Soc Japan, 79(1b): 505-517.

Yang K, Rasmy M, Rauniyar S, et al. 2007. Initial CEOP-based review of the prediction skill of operational general circulation models and land surface models [J]. J Meteor Soc Japan, 85A: 99-116.

Yang K, Koike T, Ishikawa H, et al. 2008. Turbulent flux transfer over bare-soil surfaces: Characteristics and parameterization [J]. J Appl Meteor Climatol, 47: 276-290.

Zhang Q, Cao X Y, Wei G A, et al. 2002. Observation and study of land surface parameters over Gobi in typical arid region [J]. Adv Atmos Sci, 19(1): 121-135.

Zhou D G, Huang R H. 2011. Characterization of turbulent flux transfer over a Gobi surface with quality-controlled observations [J]. Sci China Ser D: Earth Sci, 54(5): 753-763.

Zhou D G, Eigenmann R, Babel W, et al. 2011. The study of near-ground free convection conditions at Nam Co station on the Tibetan Plateau [J]. Theor Appl Climatol, 105: 217-228.