

王慧, 胡泽勇, 马伟强, 等. 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. 大气科学, 2008, 32 (6): 1458~1470
Wang Hui, Hu Zeyong, Ma Weiqiang, et al. The seasonal variation of microclimate characteristics and energy transfer in the surface layer over Dingxin Gobi. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (6): 1458~1470

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

王慧^{1, 2} 胡泽勇¹ 马伟强¹ 李栋梁²

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

2 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 利用在甘肃酒泉金塔地区进行的“绿洲系统能量与水分循环过程观测与数值研究”野外试验中的鼎新戈壁下垫面近地层 2 年的微气象观测资料, 分析了鼎新戈壁下垫面近地层小气候和能量平衡特征的季节变化规律。结果表明: 鼎新戈壁地区四季的平均风速在 2~6 m/s 之间, 没有明显的地方性风, 局地环流和局地相互作用可忽略; 冬季 8 m 向上比湿梯度垂直减小, 其他季节接近等比湿分布。7 月, 典型晴天天气下, 能量平衡各量表现出标准的日循环形态, 白天感热通量峰值达到 574 W/m², 地热流量峰值为 101 W/m², 潜热很小, 在夜间和正午时刻存在负水汽输送现象; 然而降水天气下, 地气之间能量传输却以潜热蒸发为主, 感热很小, 地热流量为负值; 无论晴天和阴天, 地表和浅层 (5 cm 和 10 cm) 土壤温度都表现为准正弦曲线变化; 与敦煌戈壁相同, 土壤温度的活动层基本在 10 cm 范围以内, 40 cm 以下地温已不存在日变化特征; 降水天气下, 地表和浅层土壤温度有随时间减小的趋势。能量平衡各分量均具有明显的季节变化规律, 感热通量季节平均的峰值在 250~400 W/m² 之间, 在夏季最大, 冬季最小; 潜热通量季节平均的最大值只有 15 W/m²; 地气之间能量传输全年都以感热输送为主; 云和降水使夏季能量平衡各分量与晴天相比减少 25% 左右, 这种影响程度比极端干旱的敦煌荒漠戈壁地区稍大, 而小于半干旱的陇中黄土高原地区。另外, 在这一地区干旱情况很严重, 夏季的 Bowen 比极值达到 62.4, 季节平均值也高达 16.5。

关键词 戈壁 小气候特征 地表能量平衡 Bowen 比

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1458-13

中图分类号 P463

文献标识码 A

The Seasonal Variation of Microclimate Characteristics and Energy Transfer in the Surface Layer over Dingxin Gobi

WANG Hui^{1, 2}, HU Zeyong¹, MA Weiqiang¹, and LI Dongliang²

1 Cold and Arid Regions Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract By using the field data during the “Oasis System Energy and Water Cycle Field Experiment” in the surface layer over Dingxin Gobi in Jinta County of Jiuquan, Gansu Province, the characteristics of micrometeorological and energy budget are studied. Following conclusions are obtained based on the studies. The seasonal variation of wind velocity is weak with its average value being between 2 m/s and 6 m/s in four seasons, and there is no obvious effect

收稿日期 2007-04-05, 2007-06-15 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-229, 国家自然科学基金资助项目 40633014

作者简介 王慧, 女, 1982 年出生, 在读博士, 主要从事大气边界层和陆面过程研究。E-mail: jinger0517@163.com

of local wind, so the local circulation and local interaction can be ignored. The vertical gradient of specific humidity decreases with height above 8 m in winter. However, it changes little in other seasons and expresses an isentropic distribution. The peak values of sensible heat flux and soil heat flux reach 574 W/m^2 and 101 W/m^2 , respectively, and the latent heat flux is very small in the typical clear-sky day of July. But for the heat exchange processes between land and air in rainy days, the latent heat flux is great, the sensible heat flux is small, and the soil heat flux is negative. There is a phenomenon of negative water-vapor transfer in the afternoon and at night. The surface and shallow-layer (5 cm and 10 cm) soil temperatures present accurate sine curve changes regardless of clear-sky days and overcast days. The soil temperature active layer is in the 10 cm scope, and there are no diurnal variation characteristics below 40 cm, which is the same as Dunhuang Gobi. The surface and shallow-layer soil temperatures have the tendency of reducing with time under the precipitation weathers. Each component of surface energy balance shows obvious seasonal variation. The peak value of sensible heat flux reaches $250 - 400 \text{ W/m}^2$ on the average, and it is biggest in summer and smallest in winter. The seasonal mean maximum of latent heat flux is less than 15 W/m^2 . So the primary component of heat exchange processes between land and air is sensible heat in a whole year. The cloud and precipitation cause about 25% disturbances to each component of energy balance in the studied area, which is slightly higher than that in Dunhuang Gobi and much lower than that in the loess plateau of middle Gansu Province. Furthermore, the arid situation is very serious in this region, the peak value of Bowen ratio is 62.4 and the seasonal mean value is 16.5 in summer.

Key words gobi, microclimate characteristics, surface energy balance, Bowen ratio

1 引言

地气间的动量、热量和水汽交换以及相互作用过程的研究是大气环流和气候数值模拟的重要基础,为此,自 1970 年代以来,国内外气象学家就开始不断致力于大气边界层和陆面过程的观测试验研究,先后组织了一系列大型的陆面过程野外观测试验。国外的试验大多数是在湿润的森林和农田以及半干旱地区的大草原上进行的,而国内主要是对干旱地区的研究,如黑河地区地气相互作用观测试验(HEIFE)、西北干旱区陆气相互作用试验(DHEX)和内蒙古草原试验(IMGRASS)等。沙漠、戈壁和绿洲是我国西北干旱区典型的三种下垫面,近年来,利用 HEIFE 试验资料对干旱地区绿洲下垫面小气候特征已做了比较多的研究^[1~3],对绿洲下垫面地气交换和水热循环过程取得了一些基本的认识^[4~7]。由于人们逐渐认识到荒漠和戈壁与其附近的绿洲之间水汽和能量输送对局地大气环流和小气候影响的重要性,对荒漠戈壁下垫面微气象特征和水热输送的研究也越来越多。左洪超等^[8]对黑河地区绿洲和戈壁小气候特征的季节变化特征进行对比分析;胡隐樵等^[9, 10]分析了临近绿洲的沙漠

上空近地层水汽输送特征,以及河西地区^①化音戈壁小气候和能量平衡特征;张强等^[11, 12]对敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征以及河西戈壁地区不同天气背景下微气象状况进行分析;郑海雷等^[13]分析了河西走廊沙漠和绿洲下垫面生态条件下能量交换的若干特征。另外,刘树华等^[14]和阎宇平等^[15]对黑河实验区沙漠戈壁上空“逆湿”和大气边界层温、湿结构进行了数值模拟。但是以前的许多研究大都集中在黑河的中上游地区,并且是对很短时间尺度的资料进行分析,只得到一些较为粗略的结论,到目前为止,对黑河下游地区典型戈壁下垫面进行长时间尺度观测,利用长期的观测资料对边界层小气候和能量输送特征的分析研究还是十分缺乏的。为此,本文选用了两年的观测资料,分春、夏、秋、冬四个季节定量给出鼎新戈壁下垫面近地面的风速、风向、温度和湿度等小气候特征的季节变化规律,并对典型天气条件和季节平均的能量平衡特征进行详细的分析,揭示了黑河下游干旱区整体的气候背景特征,了解此地区近地层水汽输送与热量交换特征的季节变化规律,为分析黑河下游地区沙漠、戈壁和绿洲整体系统地气相互作用和区域小气候变化提供一些理论依据。

① 河西地区是指甘肃省黄河流域以西的大部分地区。一般来说,习惯上只指内外流域分界线到乌鞘岭以西的地区,属于“河西走廊”。

2 观测场地与仪器介绍

本文选用 2003 年 8 月~2004 年 8 月以及 2006 年 3 月~2007 年 2 月在甘肃酒泉金塔地区进行的“绿洲系统能量与水分循环过程观测与数值研究”野外观测试验中,鼎新戈壁下垫面近地层微气象梯度观测资料和辐射通量观测资料。观测站位于甘肃酒泉金塔县东北部、河西走廊的西北端、巴丹吉林沙漠边缘,地势相对比较平坦,受祁连山地形影响也较小。观测点位置为(40.202°N, 99.437°E),海拔高度为 1192 m,戈壁滩上有零星的骆驼刺等植被,观测场地内平坦开阔,地表面为粗沙和小卵石的混合物。试验场地西偏北面约 1 km 左右是一条宽约 4 km 的带状绿洲,其他方向均为开阔的戈壁和荒漠。观测场地基本符合近地层理论中水平均匀下垫面的要求。观测场内设有一座 20 m 高的微气象观测塔和一个辅助自动气象站,主要观测项目包括:六层(0.5 m、1 m、2 m、4 m、8 m、20 m)风速(014A-L 型探头, CAMPBELL 公司,精度:±0.11 m/s),并且在 1 m、4 m 和 20 m 设有风向观测(034B-L 型探头, CAMPBELL 公司,精度:±4°);五层(1 m、2 m、4 m、8 m、20 m)空气温度和空气湿度(HMP45C 探头, CAMPBELL 公司,温度精度:±0.2°C;湿度精度:±2%);五层(-5 cm、-10 cm、-20 cm、-40 cm、-80 cm)土壤温度(107 热敏电阻探头, CAMPBELL 公司,精度±0.2°C)、土壤水分(CS616, CAMPBELL 公司,精度:±2%);-5 cm 土壤热通量(HFT3 探头, CAMPBELL 公司,精度:±2%)。另外,从 2006 年 1 月份开始在 1.5 m 处增设了短波辐射(MS801 型辐射表, EKO 公司,精度:±2.5%)和长波辐射(MS200-2 型辐射表, EKO 公司,精度:±2.5%)观测,还有大气压(CS105 型探头,精度:±0.5 hPa)和降水量观测等。试验前对仪器都进行了标定,精度符合要求。以上观测项目每 10 min 记录一次,在实际分析中为 1 小时的平均数据。

3 风、温、湿度场时空剖面特征

为了得到鼎新戈壁下垫面近地层小气候特征的季节变化规律,我们将 2003 年 8 月~2004 年 8 月的微气象梯度观测资料按常规的方法分为春、夏、

秋、冬四个季节,其中 3、4、5 月代表春季,6、7、8 月代表夏季,9、10、11 月代表秋季,12、1、2 月代表冬季。需要说明的是,这里所用资料均剔除了有仪器故障和降水的资料。

图 1~3 给出了全年季节平均的风速、温度和湿度的时间-高度剖面图。

从风速时间-高度剖面图(图 1)可以看出,风速白天大于夜间,垂直风速梯度却是夜间大于白天。这是因为白天太阳辐射较强,地表增温很快,近地面湍流混合加强,使近地层空气得以充分混合,风速梯度较小;日落后,地表辐射冷却,近地层发展为稳定的边界层,稳定层结内有一定的能量积累,产生较大的风速切变,所以风速梯度变大。最大风速出现的时间有所不同,春季在 18 时(北京时间,下同)前后的 8 m 和 20 m 高度处出现两个风速高值中心,夏季的高值中心延后到 19 时前后,秋季只在 19 时前后的 20 m 高度处有一个高值中心,冬季的高值中心出现在 16 时前后,风速高值区出现时间的差异可能与日落时间的早晚(太阳辐射效应)有一定的关系。

从全年来看,风速变化不大,平均最小风速为 2 m/s 左右,最大为 6 m/s 左右;在 06~10 时和 16~21 时之间层结发生转变的时刻,垂直风速梯度以冬季最大夏季最小;在 10~16 时和 21~06 时之间大气处于超绝热不稳定状态和稳定状态时刻,垂直风速梯度以春季最大、秋季最小。通过对其全年 8 m 高度处风向观测资料的分析表明:风向没有明显的日变化特征,但是有一定的季节变化规律,即春、秋季节盛行正北风(图略);冬季有两个主风向:西南风和东北风;夏季的风向比较复杂,多分布在东北风至正东风之间(30°~110°),还有一部分西风。风向日变化规律不明显也说明了鼎新戈壁地区没有明显的地方性风,这可能是因为鼎新戈壁滩平坦开阔,几乎没有植被,地形作用对风向没有影响,附近的绿洲面积又较小,绿洲效应对风向的影响也就相应较弱,所以这里的局地环流和局地相互作用可被忽略,平流作用主要是大中尺度平流^[9]。

图 2 的温度时间-高度剖面表明:温度白天随高度降低,夜间整层大气处于稳定的逆温状态,这是因为白天随着太阳加热地表,使底层的大气温度增加高于较高层大气温度,所以温度梯度随高度降

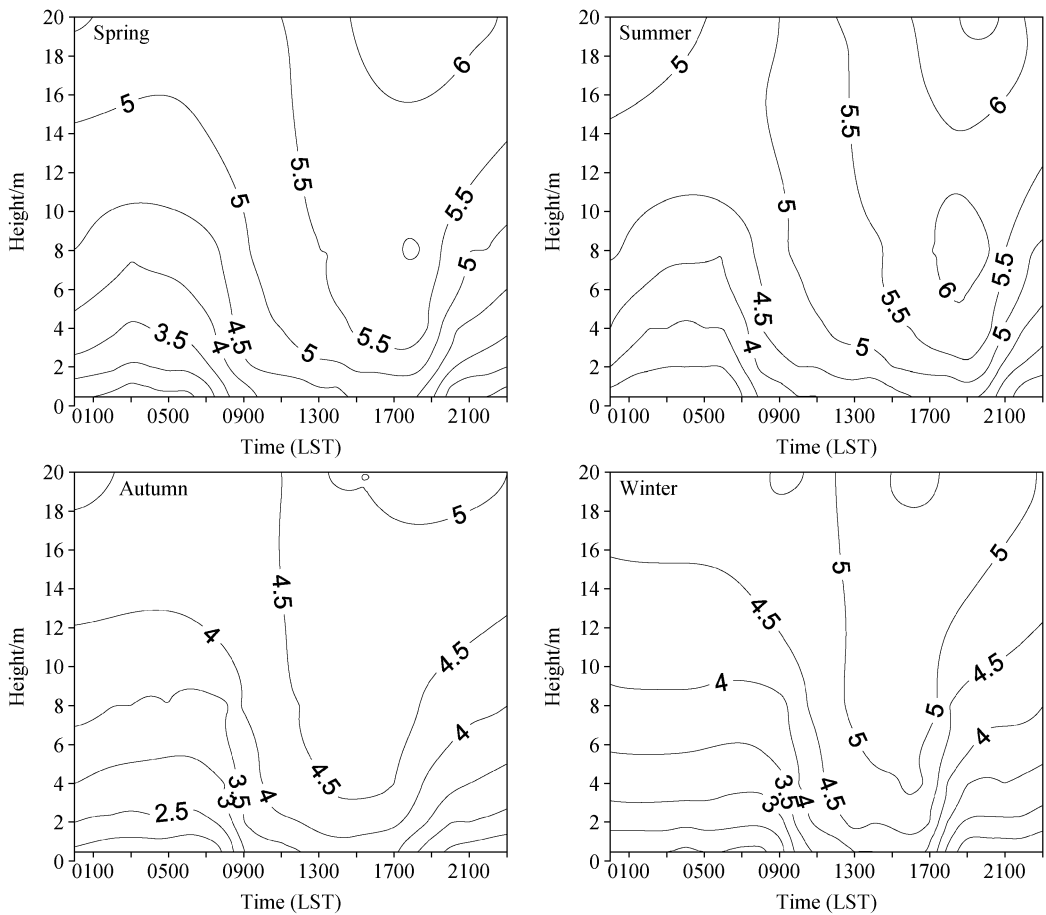


图1 季节平均风速的时间-高度剖面图(单位: m/s)
Fig. 1 Height-time cross sections of seasonal mean wind speed (m/s)

低, 由于地表的不断加热, 大气由稳定状态发展为超绝热不稳定状态; 夜间由于地表冷却, 大气处于稳定状态。春季从 19 时出现逆温; 夏季从 20 时开始出现; 秋冬季节从 18 时就开始出现逆温, 一直到凌晨 04、05 时前后逆温都很强, 05 时以后到 08 时逆温减弱, 其中以冬季的 22 时为最强, 20 m 和 1 m 两层的温度梯度此时达到 $20.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。白天的超绝热不稳定层结以夏季的 13 时为最强, 此时的温度递减率达到 $-9.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

从图 2 中还可以看出, 四季的热中心均出现在 16 时前后; 冷中心的出现时间有些差异, 春、夏季冷中心在 06 时前后出现, 秋、冬季有所延后, 秋季在 07 时前后, 冬季延后到了 08 时前后。这可能是因为秋、冬季日出时间较春、夏季晚, 所以冷中心出现的时间也有所延后。就全年而言, 垂直温度梯度从大到小依次为冬季、秋季、春季和夏季。

湿度剖面图(图 3)较为复杂, 春、夏、秋季形

式相似, 白天比湿的垂直梯度变化不大, 接近等比湿分布, 这与农田下垫面^[2]的比湿总是随高度递减不同; 而冬季比湿剖面从 8 m 向上垂直减小, 这是因为冬季天气干冷, 空气中的水汽主要来自于地表面水汽的蒸发, 所以靠近地面的空气相对较湿, 越向上空气就相对越干, 因而比湿梯度垂直减少。从全年来看, 戈壁下垫面比湿夜间大于白天, 全年以 4 m 高度处比湿最大, 下层出现逆湿。在下午 17 时左右的 8 m 高度处有一个干中心, 这是由于 8 m 高度以上出现逆湿造成的; 在夜里和清晨, 2~4 m 之间有一个湿中心。这一湿中心没有出现在地表而是在 2~4 m 之间, 是因为戈壁下垫面在经过了一天的加热蒸发后, 土壤变得非常干燥, 所以在夜间随着温度的降低, 土壤水分蒸发减弱或消失, 这时的土壤由于非常干燥就会通过冷却凝结作用吸收一部分贴近地表面的大气中的水分, 所以使靠近地表面的 1~2 m 的空气湿度反而比其上层的要稍小一

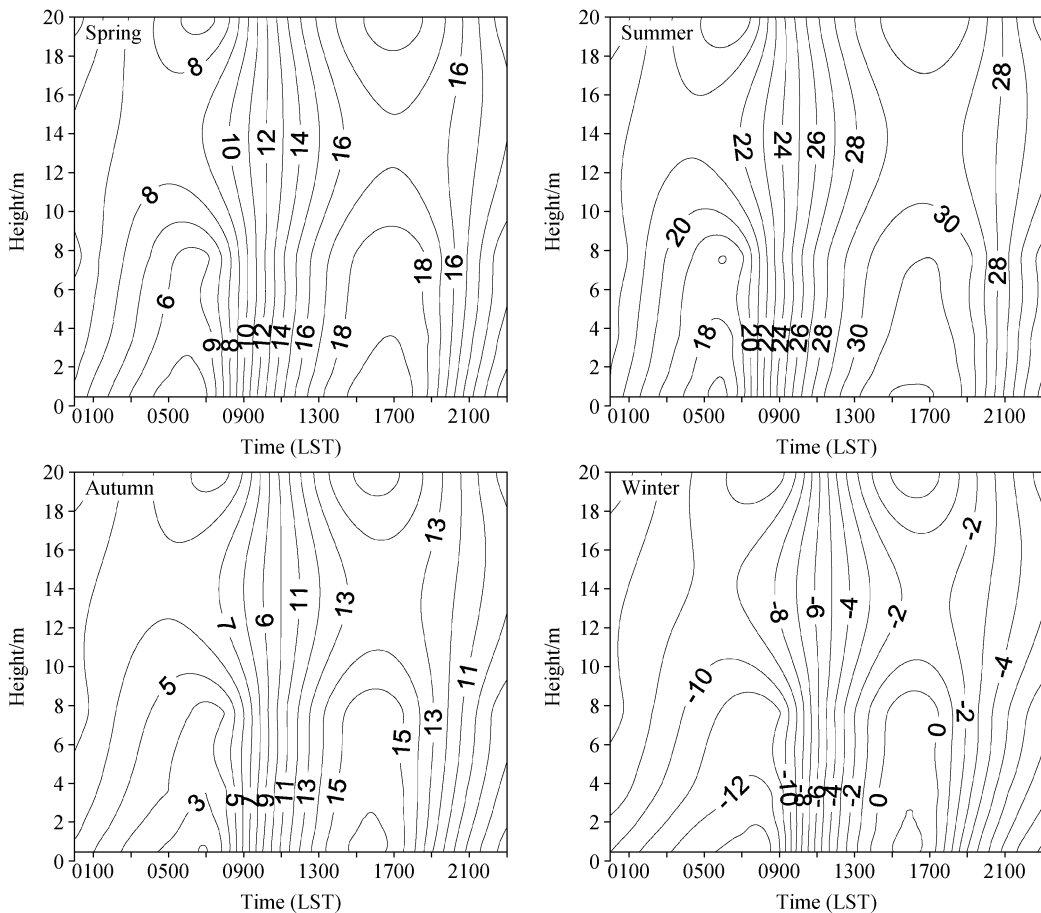


图2 同图1, 但为温度(单位: °C)

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the air temperature (°C)

些,以至于在2~4 m处出现一个湿中心,这一过程与白天土壤水分的蒸发过程共同构成了戈壁下垫面土壤对大气水分的“呼吸”过程,这是在临近绿洲的荒漠戈壁地区土壤与近地层大气水分交换的一种特殊现象,这在文献[16]中有专门的研究,并且为了证明这一结果的可靠性,我们专门做了一个仪器对比试验,结果证明“逆湿”出现的量级要比仪器的测量误差大得多。出现这样的结果应该是可信的,而并非仪器误差造成的。在夜间下层春、夏和秋季均可见逆湿,白天春、夏季节有逆湿出现,秋、冬季节逆湿消失。戈壁地区逆湿^[14]的形成主要是大尺度平流作用的结果,当有风从绿洲吹向戈壁时,平流作用能够将绿洲上空较湿的空气带到戈壁上空,戈壁的下沉气流又将湿空气输送到地表附近,从而使近地面空气湿度大于地表湿度,形成“逆湿”。秋、冬季节由于“绿洲效应”的减弱和消失从而使戈壁下垫面的逆湿也随之消失。

4 地表能量平衡特征

4.1 计算方法介绍

利用2006年3月~2007年2月微气象塔的风速、温度、湿度梯度观测资料和辐射观测资料,采用组合法^[17~19]计算各种湍流量。

根据风温湿的梯度可以计算未经层结订正的感热 H_0 和潜热 λE_0 ,

$$H_0 = -\rho c_p u_{*0} \theta_{*0} = -\rho c_p k^2 Z_A^2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\lambda E_0 = -\rho \lambda u_{*0} q_{*0} = -\rho \lambda k^2 Z_A^2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (2)$$

其中, k 是Kaman常数,取 $k=0.40$; c_p 是空气等压比热; λ 是水的汽化潜热; E_0 为未经层结订正的水汽通量; Z_A 为两层观测高度 Z_i 和 Z_{i+1} 的几何平均值, $Z_A = \sqrt{Z_i Z_{i+1}}$ 。其他均为通用符号,其中位温 θ 和比湿 q 可以写成:

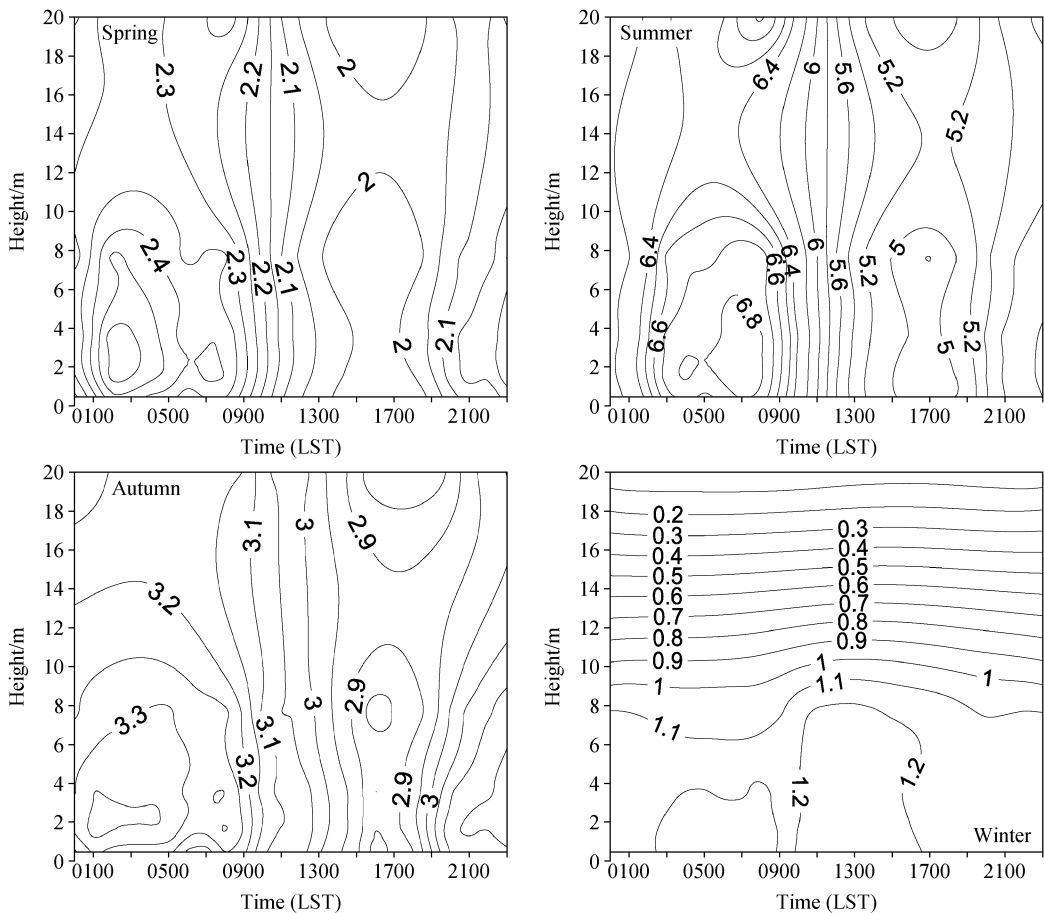


图 3 同图 1，但为比湿（单位：g/kg）
Fig. 3 Same as Fig. 1, but for the air specific humidity (g/kg)

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{0.286},$$
$$q = \frac{0.622e}{p - 0.378e}.$$

地表土壤热通量 G_0 可以表示为：

$$G_0 = G + C_w \frac{\partial T_s}{\partial t} \delta Z, \tag{3}$$

其中， G 为地下 5 cm 处观测的土壤热通量， C_w 为土壤容积热容量，取 $C_w = 1.28 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ [20]； T_s 为地温； $\partial T_s / \partial t$ 为地温随时间的变化率； δZ 为地表到地热流量观测处的土壤厚度。

定义地表净辐射与土壤热流的差为地表面可利用能量 A ，

$$A = R_n - G_0, \tag{4}$$

这里， R_n 是净辐射，由辐射平衡 4 分量观测值计算得到。

常通量层条件下，地表面能量平衡方程为

$$A = H + \lambda E. \tag{5}$$

引入层结影响函数：

$$F = \frac{A}{H_0 + \lambda E_0}. \tag{6}$$

在地表能量平衡及热量和水汽层结影响函数相同的条件下，得到地面感热和潜热的计算公式：

$$H = H_0 F, \tag{7}$$

$$\lambda E = \lambda E_0 F. \tag{8}$$

根据 (3) 式，利用地温资料可计算出地表土壤热通量 G_0 ；再利用地热流量和净辐射资料，可从 (4) 式求出地表可利用能量 A ；利用风速、温度、湿度梯度观测资料，由 (1) 和 (2) 式计算 H_0 和 λE_0 ；再由 (6) 式得出层结影响函数 F ；最后由 (7) 式和 (8) 式得出地面感热和潜热通量。

4.2 典型天气条件下地表能量平衡特征

为了分析典型天气背景下辐射平衡各分量的日变化特征，选取 2006 年 7 月的观测资料作为研究对象。因为 7 月是当地一年中天气过程最丰富、变

化较大的一个月。根据观测资料统计表明:2006年7月共有7天降水天气,降水量占一年降水总量的48.1%。这里选取晴天、阴天和雨天为个例,比较其日变化特征。

图4给出7月12日(晴天)、7月20日(阴天)、7月21日(雨天)和7月平均的地表能量交换日变化特征,从图中可以看出:在晴天和平均状况下,净辐射通量、感热通量和地表土壤热通量均有明显的日变化规律,即在日出后开始增大,到14时达到最大值后又开始减弱,在夜间出现最小值;潜热通量全天都比较小,并且在夜间也有正值出现,这说明在夜间同样存在蒸发现象。7月12日晴天天气(图4a),白天感热通量峰值达到 574 W/m^2 ;地热流量峰值达到 101 W/m^2 ;感热、潜热、地热流量的日积分值分别为 13.119 、 1.235 、 $0.051 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,它们分别占到净辐射的86.8%、8.1%、5.1%。可以看出地气之间的能量传输主要以感热

交换为主,用于潜热和土壤热量交换的部分很小。阴天时(图4b),能量平衡各分量不再保持标准的日变化规律,净辐射、感热和地热流量都有不同程度的削减,净辐射和感热通量都减少了 100 W/m^2 以上,地热流量减少了 40 W/m^2 左右。感热、潜热和地热流量的日积分值分别为 9.203 、 -0.568 和 $0.365 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,它们分别占到净辐射的102.2%、6.3%和4.1%。雨天(图4c),地表感热、潜热、地热流量的日积分值分别为 0.743 、 2.698 、 $-0.926 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,它们分别占到净辐射的29.4%、106.9%、36.7%,由此可以看出,在降水天气,地气之间能量传输以潜热蒸发为主,感热很小,地热流量为负值,说明土壤在不断地释放热量。7月份月平均(图4d)的地表能量的日变化特征与晴天天气相比,在形状上保持一致,但是由于降水和多云天气的影响,净辐射峰值只有 477 W/m^2 ,比晴天天气减少了 200 W/m^2 ,感热通

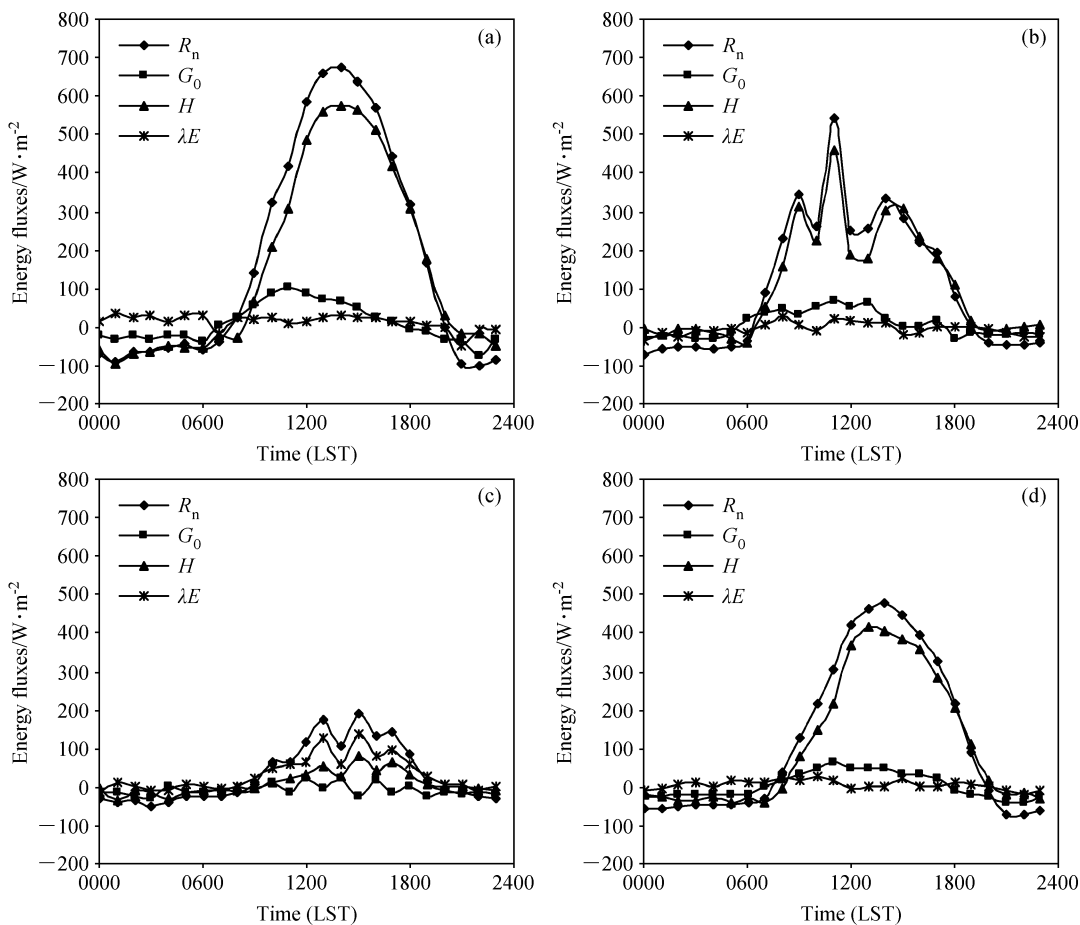


图4 2006年7月典型天气条件下地表能量的日变化特征:(a)12日(晴天);(b)20日(阴天);(c)21日(雨天);(d)月平均

Fig. 4 Diurnal variations of surface energy fluxes under typical weather conditions in Jul 2006: (a) 12 Jul (clear sky); (b) 20 Jul (overcast); (c) 21 Jul (rainy day); (d) monthly average

量的峰值也只有 414 W/m^2 ，比晴天减少 150 W/m^2 左右，地热流量也减少了大约 40 W/m^2 ，地表感热、潜热、地热流量的平均日积分值分别为 9.573 、 0.404 、 $0.224\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，它们分别占到净辐射的 91.5% 、 3.9% 、 2.1% 。从图 4 平均潜热通量 λE 的变化曲线可以看出，从 21 时到凌晨 01 时以及 12~14 时 λE 值为负，表明在这段时间内地表不仅蒸发为零，反而有水汽向下输送，即戈壁干热的地表面一直在不断地吸收水汽；在清晨和下午 λE 为正值，表明在这段时间内有自地表向大气的水汽蒸发过程；且蒸发大于吸收。

云和降水对地表能量收支的影响在地表和土壤温度的日变化特征上也可以清楚地反映出来。图 5 给出 2006 年 7 月典型晴天、阴天、雨天和平均状况下地表和土壤温度的日变化特征。由图 5 可以看出：晴天地表最高温度达到 51°C ，平均状况下地表最高温度为 43°C ；晴天和平均状况下 0 cm 、 5 cm

和 10 cm 深度的温度变化特征基本一致，表现为准正弦曲线；地表温度在 14 时达到最大值，在 06 时降到谷底；由于太阳辐射先加热地表，地表吸收了热量以后才下传，所以 5 cm 和 10 cm 的土壤温度的峰值出现时间要比地表温度的滞后 4 h 和 7 h ，谷值出现时间滞后 2 h 和 5 h ；到了 20 cm 深度处土壤温度在 17 时温度达到最低，而在 05 时达到最高，呈现出幅度很小的反位相变化。与敦煌戈壁^[12]相同，土壤温度的活动层基本在 10 cm 范围以内， 40 cm 以下地温已不存在日变化特征，这与戈壁地区热扩散很小有关。虽然阴天土壤温度日变化仍然比较清楚，但变化幅度明显小于晴天。7 月 21 日降水天气下，地表和土壤温度日变化不再表现为日循环规律，而是有随时间减小的趋势，地表最高温度仅为 21°C ，由于降水较少的缘故，在地表和土壤浅层 (5 cm 和 10 cm) 温度日变化由降水引起的凹陷并不太明显，在 5 cm 、 10 cm 和 20 cm 土壤温

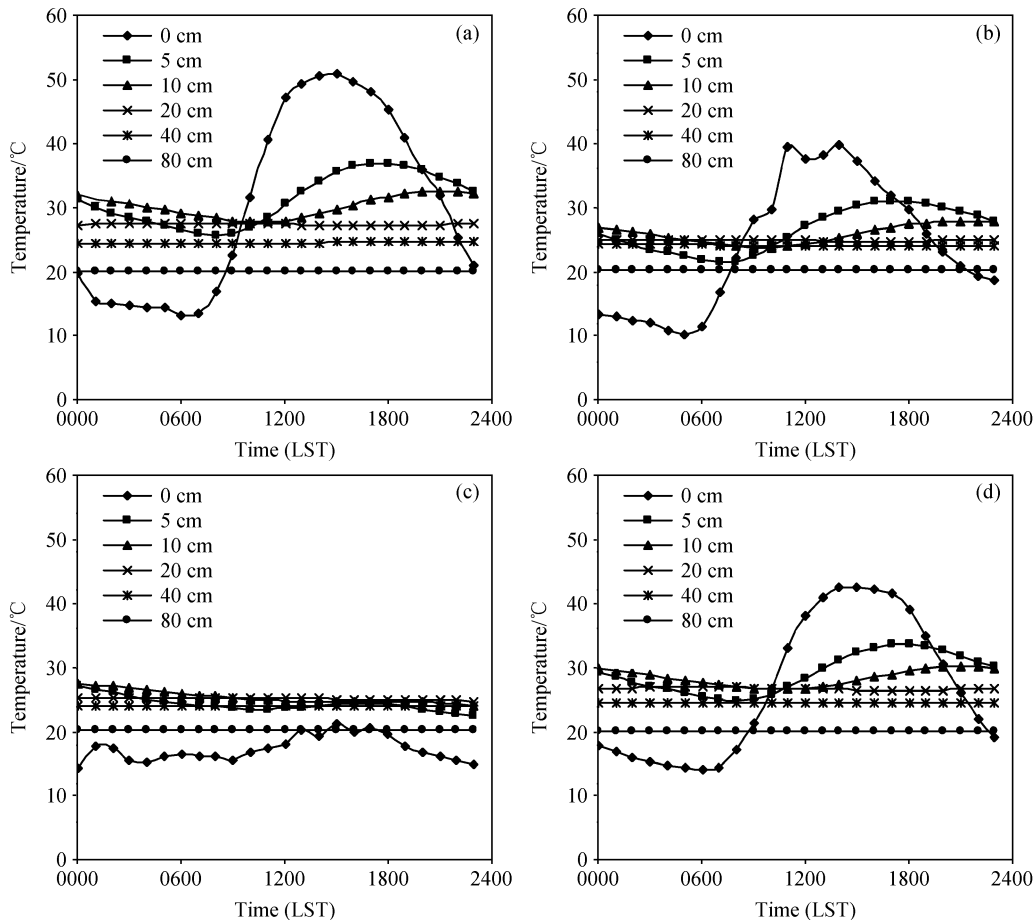


图 5 同图 4，但为地表和土壤温度

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the surface and soil temperature

度均表现出近似线性递减。

4.3 能量平衡的季节变化特征

图 6 为试验期间典型晴天（每个季节选一天）天气条件下的净辐射通量、感热通量、潜热通量和地表土壤热通量日变化曲线特征，从图中可以看出：各分量均具有单峰型日变化特征，8 月 15 日晴天天气下净辐射峰值超过 600 W/m^2 ，感热通量峰值达到了 544 W/m^2 ，2 月 2 日净辐射峰值只有 351 W/m^2 ，感热通量峰值为 303 W/m^2 ，比夏季晴天天气下的值均小 250 W/m^2 左右；土壤热通量峰值变化不大，均在 100 W/m^2 以下。

图 7 为试验期间季节平均的能量平衡各分量日变化曲线特征，从图中可以看出：各分量具有明显的季节变化规律，感热通量季节平均的峰值在 $250\sim 400\text{ W/m}^2$ 之间，夏季的最大值为 403 W/m^2 ；潜热通量全年都比较小，季节平均的最大值只有 15 W/m^2 ，

地表热通量夏季最大，白天峰值为 83 W/m^2 ，冬季最小，峰值最大只有 57 W/m^2 ，夜晚均为负值；地表热通量 G_0 的峰值要比净辐射 R_n 和感热 H 的峰值出现时间超前 $2\sim 3$ 小时，这主要是 $0\sim 5\text{ cm}$ 之间土壤贮藏的热量的贡献，清晨日出后太阳加热地表，地表温度升高，土壤开始贮存热量并迅速增加，当上层土壤温度超过下层土壤温度时，热量才往下输送，所以地热量峰值会超前。

净辐射、感热通量、潜热通量、地表热通量的季节平均日积分值如图 8 所示，从图中可以看出全年感热通量都占绝对优势，夏季的净辐射季节平均日积分值为 $9.94\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，感热通量的季节平均日积分值就达到 $8.61\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，潜热通量只有 $0.51\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，地热流量的季节平均日积分值在春、夏季节为正，秋、冬季节均为负，这表明春、夏季节土壤贮藏了一部分的热量，而秋、冬季

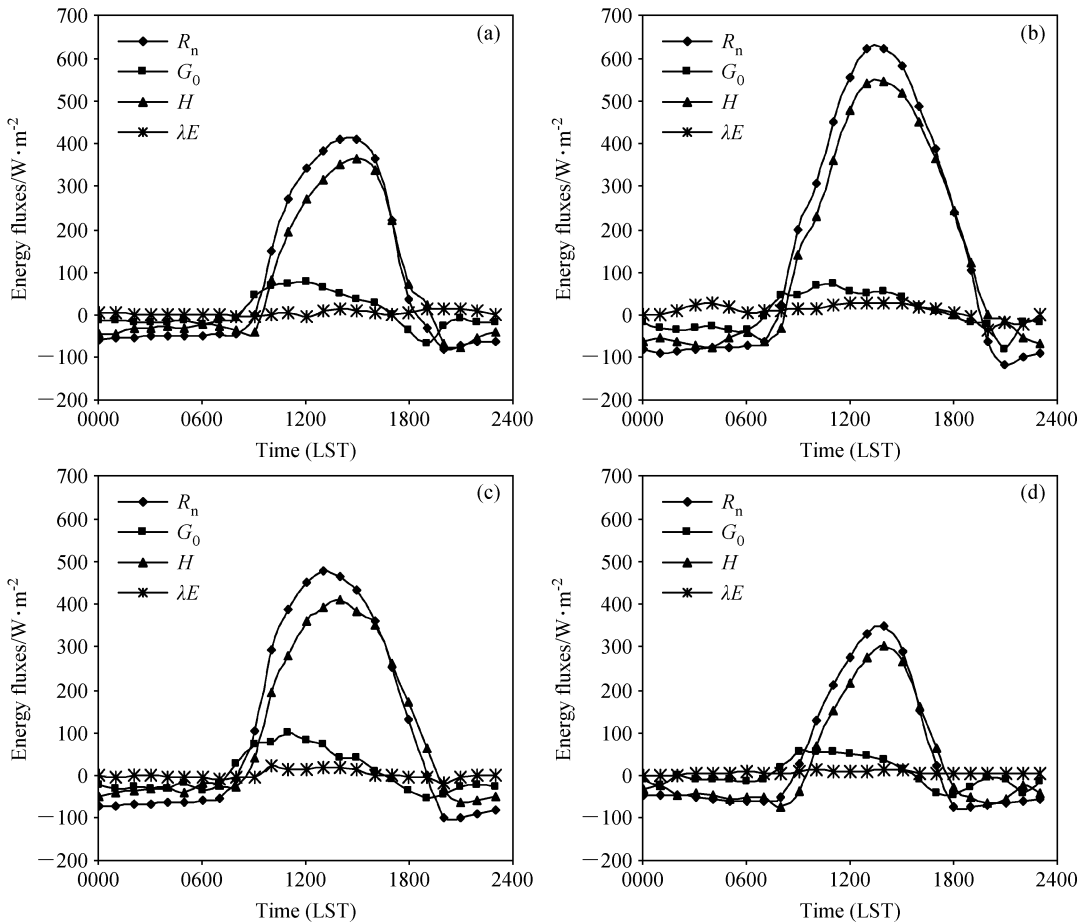


图 6 不同季节典型晴天地表能量平衡各分量的日变化：(a) 2006 年 3 月 2 日；(b) 2006 年 8 月 15 日；(c) 2006 年 9 月 11 日；(d) 2007 年 2 月 2 日

Fig. 6 Diurnal variations of energy fluxes in typical clear-sky days of different seasons: (a) 2 Mar 2006; (b) 15 Aug 2006; (c) 9 Nov 2006; (d) 2 Feb 2007

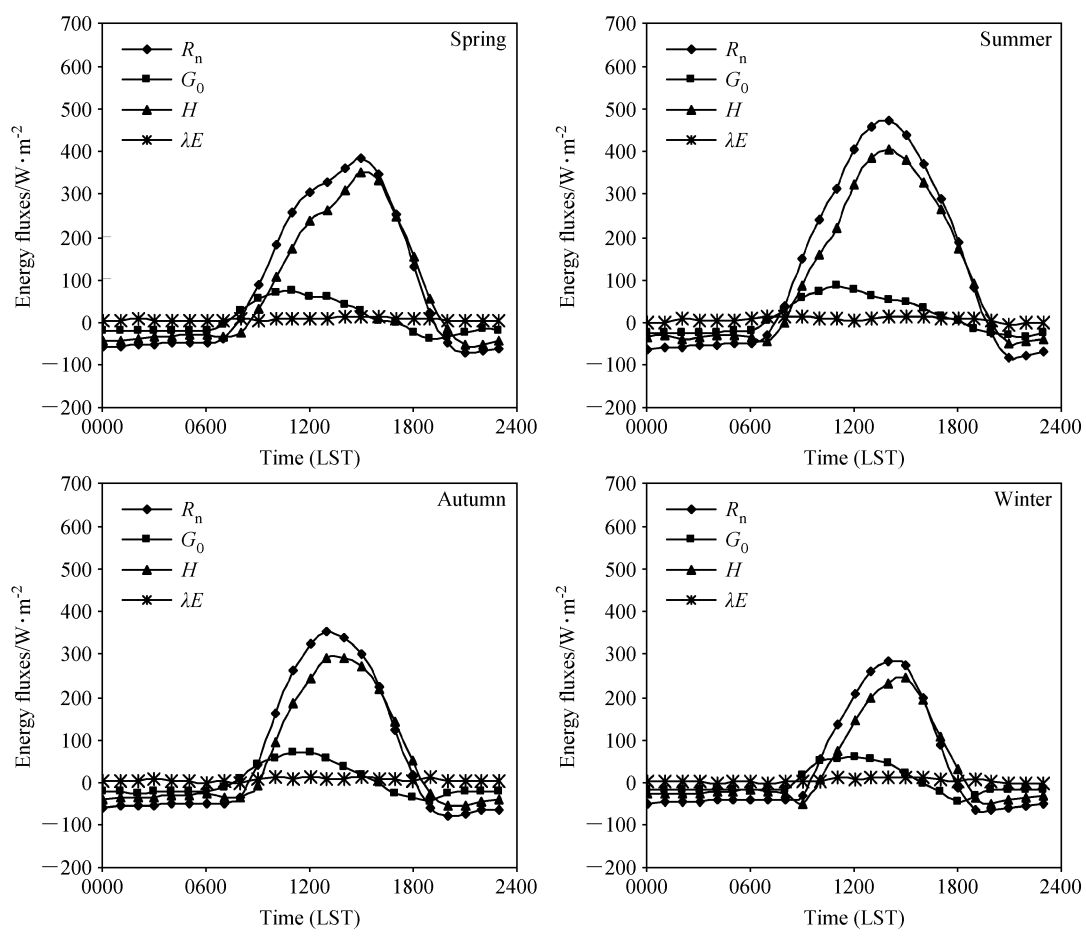


图 7 不同季节平均地表能量平衡各分量的日变化
Fig. 7 Diurnal variations of seasonal mean energy fluxes

节有少量的土壤热通量放出。表 1 是夏季不同下垫面感热通量、潜热通量所占净辐射的百分比以及 Bowen 比值的比较,从表 1 中可以看出鼎新戈壁感热通量所占净辐射的百分比与敦煌戈壁和张掖沙漠的相近,潜热通量所占百分比比敦煌的稍大而远小于绿洲和春小麦下垫面条件下的值,这也说明在极端干旱和干旱区内,地表与大气的能量传输主要通过感热输送来完成,而在绿洲和农田下垫面地气之间能量传输是由感热和潜热输送共同完成的。Bowen 比反映了因水分条件不同而引起的热平衡分配的变化,感热大、蒸散少则 Bowen 比就大,反之, Bowen 比就小。从表 1 可以看出鼎新戈壁地区 Bowen 比值与张掖沙漠区的相近,而比敦煌戈壁的值小,这也反映了夏季黑河试验区的干旱程度要小于极端干旱的敦煌地区^[12]的整体气候学特征。在绿洲和农田内 Bowen 比值较小,这是很容易理解的。

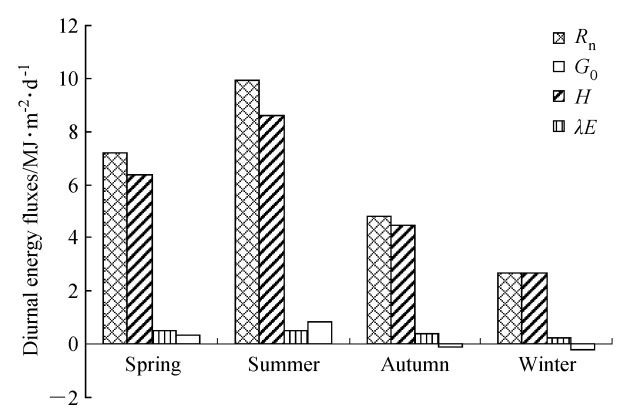


图 8 能量平衡各分量四季季节平均日积分值
Fig. 8 The seasonal mean diurnal integral values of different surface energy components

根据微气象观测资料统计表明,2006 年 3 月~2007 年 2 月有降水记录的共有 20 天,其中 6~8 月有降水记录的为 13 天,占降水总量的 64.7%,所

表 1 夏季不同下垫面条件下 $\lambda E/R_n$ 、 H/R_n 和 Bowen 比的比较

Table 1 The comparisons among $\lambda E/R_n$, H/R_n and Bowen ratio under different surface conditions in summer

下垫面类型	$\lambda E/R_n$ (%)	H/R_n (%)	Bowen 比
鼎新戈壁	5.2	86.5	16.5
敦煌戈壁 ^[11]	3.8	86	22.6
张掖沙漠 ^[13]	6.7	88	13.1
早作春小麦 ^[21]	55.5	42.9	0.8
敦煌绿洲 ^[4]	27.2	30	1.1
黑河下游绿洲 ^[5]	33.6	44.6	1.3

以，由此造成了平均能量通量各分量特征与典型晴天天气条件下能量特征的一定差异。从 8 月 15 日与夏季季节平均的能量通量各分量的日变化特征的比较可以看出：虽然各通量与典型晴天的日变化特征在形态上保持了一致，但是由于云和降水天气的扰动，使净辐射通量值有一定的减小，由此也造成了其他能量通量不同程度的削减，与晴天相比，平均净辐射的峰值比晴天的值低了 150 W/m^2 ，感热通量也低了将近 150 W/m^2 ；其他季节影响不大。净辐射、感热通量、潜热通量夏季的季节平均日积分值与 8 月 15 日典型晴天相比分别为 78%、72%、76%，云和降水对能量平衡的影响程度与极端干旱的敦煌荒漠戈壁^[12]地区相比要稍微大一些，敦煌戈壁地区夏季平均热量通量与晴天的热量通量的比值在 0.8 以上，而这里平均在 0.75 左右，所以，夏季鼎新戈壁地区云和降水对季节平均的能量平衡特征会产生一定的影响，这种影响程度达到 25% 左右；在半干旱的陇中黄土高原地区夏季云和降水对能量平衡的影响程度却非常严重^[21]，平均净辐射的峰值要比晴天的值低将近 300 W/m^2 ，影响程度接近 50%。

图 9 给出 Bowen 比季节平均的日变化曲线，从图中可以看出 Bowen 比日变化具有一定的规律，即日出以后 Bowen 比会逐渐增大，到正午达最大值，以后又逐渐减小。不过，由于云和降水的影响，在白天并不太规则，夜间的 Bowen 比均较小或为负值。夏季的 Bowen 比极值达到 62.4，季节的平均值也高达 16.5，可以看出这一地区干旱情况还是很严重的，春、秋、冬季 Bowen 比极值分别为 33.1、43.2、25.8。

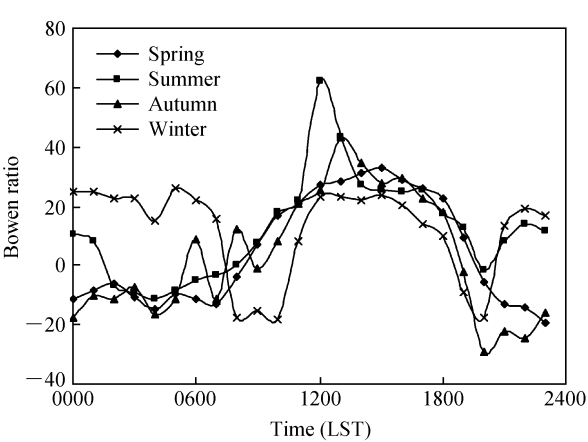


图 9 Bowen 比季节平均日变化
Fig. 9 The diurnal variations of seasonal mean Bowen ratios

5 结论与讨论

通过以上的分析，可以得到以下几点结论：

(1) 鼎新戈壁下垫面四季的平均风速在 $2\sim 6\text{ m/s}$ 之间，白天大于夜间，垂直风速梯度夜间大于白天；由全年 8 m 处风向来看，没有明显的地方性风，局地环流和局地相互作用可忽略；温度白天随高度降低，夜间整层大气处于逆温状态；比湿夜间大于白天，从 $0\sim 20\text{ m}$ 微气象梯度资料来看，全年以 4 m 高度处比湿最大，春、夏和秋季下层均可见逆湿，冬季比湿剖面从 8 m 向上比湿梯度垂直减小，其他季节湿度的垂直梯度变化不大，接近等比湿分布。

(2) 7 月典型晴天天气下，能量平衡各量表现出标准的日循环形态，白天感热通量峰值达到 574 W/m^2 ，地热流量峰值达到 101 W/m^2 ；阴天与晴天相比，净辐射和感热通量都减少 100 W/m^2 以上，地热流量减少 40 W/m^2 左右；在降水天气下地气之间能量传输以潜热蒸发为主，感热很小，地热流量为负值；在夜间和正午时刻存在负水汽输送现象；在清晨和下午有自地表向大气的水汽蒸发过程，且蒸发大于吸收。晴天地表最高温度达到 51°C ；无论晴天和阴天，地表和浅层土壤深度 (5 cm 和 10 cm) 的温度表现为准正弦曲线变化；地表温度在 14 时达到最大值，在 06 时降到谷底；5 cm 和 10 cm 的土壤温度的峰值出现时间要比地表温度的滞后 4 h 和 7 h；到了 20 cm 深度处土壤温度呈现幅度很小的反位相变化；与敦煌戈壁相同，土壤温度的活动层基本在 10 cm 范围以内，

40 cm 以下地温已不存在日变化特征。降水天气下, 地表和浅层土壤温度有随时间减小的趋势, 地表最高温度仅为 21℃。

(3) 能量平衡各分量均具有明显的季节变化规律, 感热通量季节平均的峰值在 250~400 W/m² 之间, 夏季的最大为 403 W/m²; 地热流量季节平均峰值为 83 W/m², 在夏季最大, 冬季最小; 潜热通量全年都比较小, 季节平均的最大值只有 15 W/m²; 夏季净辐射季节平均的日积分值为 9.94 MJ·m⁻²·d⁻¹, 感热通量的季节平均日积分值就达到 8.61 MJ·m⁻²·d⁻¹, 潜热通量只有 0.51 MJ·m⁻²·d⁻¹, 地气之间的能量传输主要通过感热输送来完成; 春、夏季土壤会贮藏一部分的热量, 而秋、冬季有少量的土壤热通量放出; 云和降水对能量平衡的影响程度达到 25% 左右, 比极端干旱的敦煌荒漠戈壁地区要稍大, 而小于半干旱的陇中黄土高原地区。另外, 在这一地区干旱情况很严重, 夏季的 Bowen 比极值达到 62.4, 季节平均值也高达 16.5。

本文利用组合法对地表感热、潜热通量进行计算, 这个方法价格低廉, 并减少了仪器的感应头及其支架对气流扰动所造成的湍流通量的观测误差, 计算结果也能达到足够的精度, 是一种得到广泛应用的不错的方法。但是这个方法是在假定地面能量平衡的基础上进行的, 最近的野外观测^[6,12,22~24] 研究表明, 在一些地区存在地表能量不平衡现象, 这可能是由于一部分净辐射转换为热能贮存于土壤中, 或者通过水平热平流散失掉的缘故, 同时也不排除仪器测量和计算误差的影响。具体原因至今尚无定论。所以对该地区地表能量平衡与否的验证及其原因的分析具有重要的意义, 这也将是我们下一步工作的重点。

参考文献 (References)

[1] 苏从先, 胡隐樵, 张永丰, 等. 河西地区绿洲的小气候特征和“冷岛效应”. 大气科学, 1987, **11** (4): 390~396
Su Congxian, Hu Yinqiao, Zhang Yongfeng, et al. The microclimate character and “cold island effect” over the oasis in Hexi region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1987, **11** (4): 390~396

[2] 张强, 胡隐樵, 王喜红. 黑河地区绿洲内农田微气象特征. 高原气象, 1992, **11** (4): 361~370
Zhang Qiang, Hu Yinqiao, Wang Xihong. The characters of micrometeorology on farmland in oasis in Heihe region. *Plat-*

eau Meteorology (in Chinese), 1992, **11** (4): 361~370

[3] 郑海雷, 赵松岭, 王介民, 等. 黑河地区绿洲生态条件下麦田生物气象若干特征. 生态学报, 2000, **20** (3): 357~362
Zheng Hailei, Zhao Songling, Wang Jiemini, et al. Some biometeorological features of wheat field in the ecological conditions of oasis at the Heihe region. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 2000, **20** (3): 357~362

[4] 胡隐樵, 高由禧. 黑河实验(HEIFE)——对于干旱地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

[5] 朱治林, 陈发祖, 孙晓敏, 等. 绿洲边缘地带温湿风的廓线特征及其通量计算. 干旱区地理, 1995, **18** (2): 77~83
Zhu Zhilin, Chen Fazu, Sun Xiaomin, et al. The characteristics of profile of wind speed, temperature&humidity, and their flux estimations in wheat field by the border of oasis. *Arid Land Geography* (in Chinese), 1995, **18** (2): 77~83

[6] 张强, 周毅. 敦煌绿洲夏季典型晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征. 植物生态学报, 2002, **26** (6): 717~723
Zhang Qiang, Zhou Yi. The characteristics of budget of radiation and energy as well microclimate of Dunhuang oasis on a typical clear day in summer. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2002, **26** (6): 717~723

[7] 张艳武, 冯起, 黄静, 等. 黑河下游绿洲地表辐射平衡及小气候特征分析. 冰川冻土, 2006, **28** (2): 191~198
Zhang Yanwu, Feng Qi, Huang Jing, et al. Ground energy balance and microclimate characteristics in the oasis of lower reaches of Heihe River. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2006, **28** (2): 191~198

[8] 左洪超, 胡隐樵. 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. 高原气象, 1994, **13** (3): 246~256
Zuo Hongchao, Hu Yinqiao. Seasonal variation of microclimatic characteristics for oasis and gobi in HEIFE and their comparative analysis. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1994, **13** (3): 246~256

[9] 胡隐樵, 奇跃进, 杨选利. 河西戈壁(化音)小气候和热量平衡特征的初步分析. 高原气象, 1990, **9** (2): 113~119
Hu Yinqiao, Qi Yuejin, Yang Xuanli. Preliminary analyses about characteristics of microclimate and heat energy budget in Hexi Gobi (Huayin). *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1990, **9** (2): 113~119

[10] 胡隐樵, 王俊勤, 左洪超. 临近绿洲的沙漠上空近地面层内水汽输送特征. 高原气象, 1993, **12** (2): 125~132
Hu Yinqiao, Wang Junqin, Zuo Hongchao. Character of water vapour transportation in the surface layer over desert near oasis. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1993, **12** (2): 125~132

[11] 张强, 赵鸣, 刘志权, 等. 河西戈壁地区不同天气背景下微

- 气象状况的初步分析. 南京大学学报(自然科学版), 1997, **33** (1): 112~121
- Zhang Qiang, Zhao Ming, Liu Zhiquan, et al. A preliminary analysis of micrometeorological characters under different conditions of meteorology. *Journal of Nanjing University* (Natural Sciences), (in Chinese), 1997, **33** (1): 112~121
- [12] 张强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究. 大气科学, 2003, **27** (2): 245~254
- Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or gobi. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (2): 245~254
- [13] 郑海雷, 王介民, 米谷俊颜, 等. 河西走廊沙漠和绿洲下垫面生态条件下能量交换若干特征. 生态学报, 2000, **20** (1): 88~92
- Zheng Hailei, Wang Jiemin, Maitani Toshihiko, et al. Some characteristics of energy exchange at the underlying surface of desert and oasis in Hexi Corridor. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 2000, **20** (1): 88~92
- [14] 刘树华, 洪钟祥, 李军, 等. 戈壁下垫面大气边界层温、湿结构的数值模拟. 北京大学学报(自然科学版), 1995, **31** (3): 345~350
- Liu Shuhua, Hong Zhongxiang, Li Jun, et al. The two dimensional numerical simulation of temperature and humidity profiles structure of atmospheric boundary layer over gobi underlying surface. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 1995, **31** (3): 345~350
- [15] 阎宇平, 王介民, 玛·曼乃提, 等. 黑河实验区沙漠戈壁上空“逆湿”的数值模拟. 气象科学, 2001, **21** (1): 36~43
- YanYuping, Wang Jiemin, Menenti M, et al. Numerical simulation of “inverse humidity” over desert/gobi in Heihe area. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **21** (1): 36~43
- [16] 张强, 卫国安. 邻近绿洲的荒漠表层土壤逆湿和对水分“呼吸”过程的分析. 中国沙漠, 2003, **23** (4): 379~384
- Zhan Qiang, Wei Guo'an. Analysis of inverse humidity and moisture respiration process of surface soil in desert near oasis. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2003, **23** (4): 379~384
- [17] Thom A S, Stewart J B, Oliver H R, et al. Comparison of aero-dynamical and energy budget estimates of fluxes over a pine forest. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1975, **101**: 93~105
- [18] 胡隐樵, 奇跃进. 组合法确定近地面层湍流通量和通用函数. 气象学报, 1991, **49** (1): 46~53
- Hu Yinqiao, Qi Yuejin. The combinatory method to determine the turbulent fluxes and the universal functions in the surface layer. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1991, **49** (1): 46~53
- [19] 左洪超, 胡隐樵. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数. 高原气象, 1992, **11** (4): 371~380
- Zuo Hongchao, Hu Yinqiao. The bulk transfer coefficient over desert and Gobi in the Heihe region. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1992, **11** (4): 371~380
- [20] Oke T R. *Boundary Layer Climate*. New York: London Methuen and COLTD, 1978. 31~60
- [21] 杨兴国, 张强, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究. 高原气象, 2004, **23** (6): 828~834
- Yang Xingguo, Zhang Qiang, Wang Runyuan, et al. Experimental study on surface energy balance over loess plateau of middle part Gansu in summer. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (6): 828~834
- [22] 马耀明, 塚本修, 吴晓明, 等. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征. 大气科学, 2000, **24** (5): 715~722
- Ma Yaoming, Osamu Tsukamoto, Wu Xiaoming, et al. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (5): 715~722
- [23] 郭晓峰, 康凌, 蔡旭晖, 等. 华南农田下垫面地气交换和能量收支的观测研究. 大气科学, 2006, **30** (3): 453~463
- Guo Xiaofeng, Kang Ling, Cai Xuhui, et al. An observation study of surface-air exchanges and energy budget at an agricultural site in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3): 453~463
- [24] 仲雷, 马耀明, 李茂善. 珠穆朗玛峰绒布河谷近地层大气湍流及能量输送特征分析. 大气科学, 2007, **31** (1): 48~56
- Zhong Lei, Ma Yaoming, Li Maoshan. An analysis of atmosphere turbulence and energy transfer characteristics of surface layer over Rongbu valley in Mt. Qomolangma area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 48~56