

塔克拉玛干沙漠腹地近地边界层温湿廓线与热量平衡分析

魏文寿^①, 王敏仲^①, 何清^①, 雷加强^②, 艾力·买买提明^①

① 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002;

② 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

E-mail: weiwsh@idm.cn

2007-09-02 收稿, 2008-06-02 接受

公益性行业(气象)科研专项(编号: GYHY200706008)和国家自然科学基金项目(批准号: 40475041, 40775019)资助

摘要 利用塔克拉玛干沙漠大气环境观测实验站 2006 和 2007 年 7~8 月取得的微气象观测资料, 采用组合法、对数回归等方法, 分析了沙漠腹地夏季近地层大气温湿廓线、沙层温度、地表辐射及热量平衡等微气象特征的日变化规律. 结果表明: 夏季夜间近地层存在逆温现象, 在一定高度范围内气温随高度的升高而增加, 日间气温变化情况与此相反. 塔克拉玛干沙漠地表辐射平衡以正值为主, 除大气向下长波辐射以外, 其他各辐射分量(总辐射、反射辐射、地表向上长波辐射、净辐射)均有明显的日变化特征, 呈现出标准的日循环形态. 沙漠腹地地表热量交换以湍流感热占主导地位, 只有一少部分热量以潜热形式输送给近地层大气, 地表感热和潜热随着太阳高度角的升高和降低而变化, 潜热最大值出现在凌晨, 感热峰值出现在正午, 观测分析还表明夏季沙漠下垫面对大气的加热作用较为显著, 白天地面为强热源, 晚上为弱冷源.

关键词

塔克拉玛干沙漠
温湿廓线
辐射平衡
热量平衡

由于气候变暖和人类生存环境的恶化, 以整体地球为对象的全球变化研究成为当代世界科学的一个前沿研究领域^[1]. 从 20 世纪 80 年代中期开始, 在 WCRP 和 IGBP 的协调下, 国际上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. 目前, 对陆-气相互作用的观测和陆-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)的重点内容^[2]. 中国自 20 世纪 80 年代末也相继开展了“黑河地区地-气相互作用观测试验研究(HEIFE)”、“内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)”、“第二次青藏高原大气科学实验(TIPEX)”、“西北干旱区陆-气相互作用的观测试验研究(NWC-ALIEX)”及“亚洲季风实验-青藏高原实验(GAME-Tibet)”等科学研究项目, 取得了一系列重要的研究成果. 左洪超等人^[3]首先研究了黑河沙漠和戈壁地区的总体输送系数; 卞林根等人^[4]、李

国平等人^[5~7]、刘辉志等人^[8]、钱泽雨等人^[9]分别研究了青藏高原地区的湍流输送及总体输送系数; 吕达仁等人^[10]分析了内蒙草原的地表特征变化与气候相互作用的问题; 张强等人^[11]计算分析了敦煌戈壁的动量和感热总体输送系数; 韦志刚等人^[2]、王澄海等人^[12]曾分别研究了黄土高原的地表能量特征; 但是对于中国第一大流动沙漠——塔克拉玛干沙漠陆-气相互作用和地表能量平衡方面的研究尚不多见.

塔克拉玛干沙漠位于北半球中纬度欧亚大陆腹地, 坐落于新疆塔里木盆地中央, 平均海拔高度在 1000 m 以上, 面积 $33.76 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是世界第二、中国第一大流动沙漠; 该区年平均降水量不足 40mm, 风沙灾害频繁, 属于典型的极端干旱气候区.

有关塔克拉玛干沙漠天气和气候方面的研究, 国内外尤其是中国学者做了大量的工作^[13~24]. 20 世纪 80 年代, 塔克拉玛干科学考察组首次对该沙漠进

行了 4 年多的科学考察, 积累了大量宝贵的气象资料, 应用许多新理论、新方法, 形成了一大批有特色的新观点和新结论^[13]. 但由于沙漠区气象站稀少, 受观测手段和资料的限制, 沙漠地面的一些重要物理过程, 如地面能量平衡情况缺少详细、连续的观测, 从而导致在沙漠地表辐射及热量平衡、近地层大气结构、地面热源强度、总体输送系数等一些基本科学问题上的研究还尚不充分. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所于 2003 年在沙漠腹地建立了塔克拉玛干沙漠大气环境观测实验站, 布设了 80 m 铁塔梯度通量观测系统、辐射观测系统, 对沙漠大气边界层进行连续性观测; 基于此, 本文利用该站 2006 和 2007 年 7~8 月取得的微气象观测资料, 深入分析了沙漠腹地近地层大气温湿结构和地表能量平衡特征, 这些问题的研究将有助于提高对于干旱沙漠区陆面过程的认识, 同时也为进一步探讨沙漠边界层的大气物理过程以及沙尘暴等自然灾害的防御和治理奠定良好的基础.

1 实验场地、观测仪器和资料

本文分析的资料是塔克拉玛干沙漠大气环境观测实验站 2006 和 2007 年 7~8 月 80 m 铁塔风温湿梯度资料、辐射观测资料以及常规地温资料. 该站地理位置为 39°00'N, 83°40'E, 海拔高度为 1099.3 m. 观测场地四周开阔, 地表均为沙丘组成的流动沙漠, 实验场地附近生活区有少量人工栽培的沙生灌木植物, 实验场下垫面特性基本代表了塔克拉玛干沙漠地表特征. 铁塔系统共有 10 层梯度观测平台, 高度分别为 0.5, 1, 2, 4, 10, 20, 32, 47, 63 和 80 m. 探测仪器均采用国际公认的先进探测传感器, 风速、风向、温度和湿度传感器产自芬兰 VAISALA 公司; 型号分别为 WAA151, WAV151, QMH102(HMP45D)和 QMH102(HMP45D). 风、温、湿瞬时探测数据采集频率为每 10 s 一组, 每分钟计算一次 6 组瞬时数据的平均值, 每小时再求得一次 60 组分钟数据的平均值获得小时统计数据. 辐射分量有总辐射、直接辐射、反射辐射、大气向下长波辐射、地表向上长波辐射, 它们安装在 1.5m 高的观测架上. 辐射仪器产自于荷兰 Kipp&Zone 公司, 型号为 CM21, CG4. 在沙层 1, 10, 20, 40, 80 和 160 cm 深度装有土壤热流板, 型号为 HFP01SC, 本文使用 1 cm 的土壤热通量进行计算. 沙层温度共 5 层, 深度分别为 0, 5, 10, 20 和 40 cm.

2 计算方法

2.1 组合法

组合法是由风、温、湿梯度资料、地表辐射分量资料和土壤热通量资料联合计算地表湍流通量的间接方法^[3,11,25], 本文这里利用 2006 年 8 月 13~31 日微气象塔的风、温、湿梯度资料、辐射资料和土壤热通量资料, 采用该方法计算得到感热通量 H 和潜热通量 λE , 具体计算过程如下:

根据风、温、湿的梯度资料, 首先可以计算出未经层结订正的感热通量 H_0 和潜热通量 λE_0 ,

$$H_0 = -\rho C_p k^2 Z_A^2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (1)$$

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

其中, k 是 Karman 常数, 取 $k=0.40$, C_p 是空气定压比热, λ 是水的汽化潜热, 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

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

定义地表净辐射与土壤热通量的差近似为地表面可利用能量 A , 写为

$$A = R_n - G_0, \quad (3)$$

这里 R_n 是净辐射, 由辐射平衡各分量观测值计算得到, G_0 为 1 cm 的土壤热通量.

常通量层条件下, 地表面能量平衡方程为

$$A = H + \lambda E, \quad (4)$$

引入层结影响函数

$$F = \frac{A}{H_0 + \lambda E_0}. \quad (5)$$

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, 得到地面感热通量 H 和潜热通量 λE 的计算公式

$$H = H_0 F, \quad (6)$$

$$\lambda E = \lambda E_0 F. \quad (7)$$

利用土壤热通量和净辐射资料, 可从(3)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)式计算得到未经层结订正的 H_0 和 λE_0 ; 再由(5)式得出层结影响函数 F ; 最后由(6)和(7)式计算得到地面感热通量 H 和潜热通量 λE .

2.2 算术平均数和对数回归分析法

本文对铁塔探测系统每小时统计出的温、湿梯度资料以及常规地温资料,用算术平均数法计算出各个梯度在每一时刻的月平均气温、地温和月平均比湿,计算出各个梯度的月白天平均气温、月夜间平均气温(这里我们将20:00~08:00作为夜间,08:00~20:00作为白天);给出了近地层80 m高度内的温湿廓线,并对夜间温度随高度的变化进行了对数回归分析,讨论了沙漠腹地近地层湍流感热交换和温度变化之间的关系。

3 结果分析

3.1 80 m 铁塔温度廓线特征

图1给出了塔克拉玛干沙漠腹地2006,2007两年7~8月近地层80 m高度内的平均温度廓线。如图1所示,温度廓线具有明显的日变化特征,其分布规律从总体上可以分为两个阶段,白天(日射型),温度随高度升高而减小;夜间(辐射型),温度随高度升高而增加。温度随高度递增转变为递减的时间约在清晨日出后09:00~10:00时。温度随高度递减转变为递增的时间约在日落后20:00~21:00时。日间地面在太阳辐射作用下受热,并主要以湍流感热交换形式将热量输送给近地气层,使整个近地层气温很快升高;离地面越近,大气获得的热量就越多,温度就越高;离地面越远,大气获得的热量少,温度就越低。所以,空气温度的铅直分布是由地面向上递减。夜间地面辐射冷却,热量反过来由近地层大气输送给沙面,这样近地面的气层就随之降温,空气越靠近地面,受地表的影响越大,降温越多,离地面越远,降温越少,因而形成了自地面开始的逆温,气温铅直分布正好与日射型相反,由下而上递增。

图2给出了塔克拉玛干沙漠大气环境观测实验站2006,2007两年7月和8月夜间和白天近地层80 m高度内的平均温度廓线。从图2我们可以清楚地看到,两月夜间平均温度廓线和白天温度廓线刚好相反,夜间温度随高度的升高而升高,呈现出逆温现象;白天温度随高度的升高而降低。在近地层20 m以内,夜间平均气温梯度变化较大,8月夜间气温递增率达11.4°C/100 m,7月夜间气温递增率达7.5°C/100 m;20 m以上,平均气温梯度逐渐变小。本文对两年7月和8月夜间温度廓线进行回归分析后,发现对数函数与

实际情况拟合的较好,其回归式为

$$Y = b_0 + b_1 \ln x.$$

7月份气温对数回归方程拟合式为

$$Y = 27.084 + 0.383 \ln x,$$

其中Y是因变量,表示温度;x为自变量,表示高度。该方程的方差解释量为99.0%,F检验值为798.75,达到0.001的显著性水平。

8月份气温对数回归方程拟合式为

$$Y = 27.391 + 0.599 \ln x,$$

该方程的方差解释量为99.4%,F检验值为1276.64,也达到0.001的显著性水平。

曾有研究表明:塔克拉玛干沙漠地区气温最高的月份是7月,而通过塔克拉玛干沙漠大气环境观测实验站80m铁塔观测资料显示(图2),沙漠腹地8月白天和夜间各梯度的平均气温均高于7月白天和夜间各梯度的平均气温。

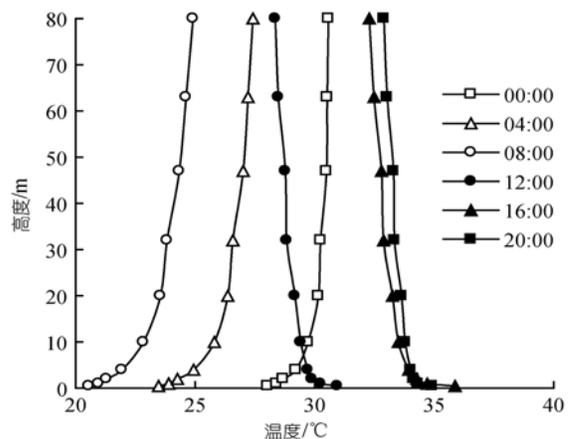


图1 2006和2007年7~8月平均温度廓线

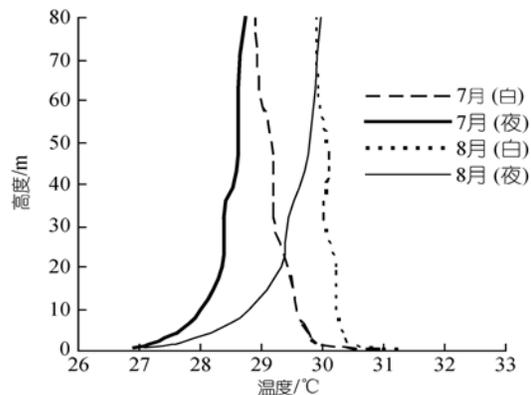


图2 白天与夜间平均温度廓线

3.2 沙层温度廓线特征

根据塔克拉玛干沙漠大气环境观测实验站地温观测值绘出地温的日变化过程(图3)。由图3可见,沙层温度具有十分明显的日变化,0和5 cm特征最为明显,随着深度的增加,位相、振幅发生变化,40 cm深度温度的日变化特征已经不明显,这与古尔班通古特沙漠地温的变化略有区别^[26]。沙层温度在昼夜变化中,5 cm沙层温度最大峰值约出现在15:00~16:00左右,最低值出现在早晨07:00左右,随着深度的增加,极值出现时间滞后。温度垂直梯度随深度的增加而减小,日间当地面获得大量辐射热量时,地面温度急剧上升,热量由上层向下输送,此时,温度的铅直分布由上层向下递减;夜间,当地面温度由于辐射冷却而下降时,就会出现与日间恰好相反的情况,即沙层温度随深度的增加而递增,热通量方向由地中指向地面。沙层温度无论在递增还是递减过程中,增减速率和增减深度都依温度日变化中的最高和最低临界值而变化,即温度最高时,向下的递减速率最大,沙层递减深度最深;温度最低时,向上的递增速率亦最大,沙层的递增深度也最深。该过程由沙层垂直温度廓线图(图3)看出,热量随着时间的变化,不断地在沙层中上传下导,热能也就不不断地在沙层中重新分配。观测表明,塔克拉玛干沙漠沙层表面感热通量最大时热量在沙层的传输深度零界面层出现在20 cm。根据塔克拉玛干沙漠沙层温度廓线与古尔班通古特沙漠以及奈曼沙漠沙层温度廓线^[26]的比较,发现塔克拉玛干沙漠与古尔班通古特沙漠沙层温度变化较为一致,增温快,降温也快,但是温度传输深度小于奈曼沙漠。从沙层温度廓线看,塔克拉玛干沙漠与古

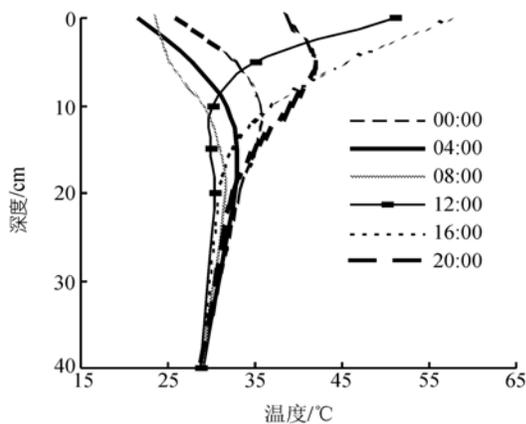


图3 2006, 2007年7月平均沙层温度廓线

尔班通古特沙漠沙层在40 cm以下,地温基本稳定递减,不再有日变化信号,但是奈曼沙漠沙层在50 cm以下还有明显的热量传输效应^[26]。

3.3 比湿廓线特征

塔克拉玛干沙漠地处亚欧大陆腹地,离海洋较远,属极端干燥的内陆性气候。图4给出了2006年8月近地层大气的平均比湿廓线。从图4可以看出,近地面32 m以下比湿随高度升高而减小,32 m以上随高度升高有增大的趋势,但变化幅度较小。20:00时0.5 m高度的平均比湿并不是很大,但随着时间的推移,近地面10 m以下愈近地面湿度急剧增大,到凌晨08:00时达到一天中的最大湿度;这可能由于夏季沙漠区白天温度高,湍流强,水汽相对较少;而早晨日出后产生的少量蒸发进入上层大气后,这部分水汽在日出前受到微弱下沉气流作用进入近地面层中,使之凌晨水汽量增大。另外的一种可能性是在沙层表面和沙层中水汽量很少,经过蒸发使沙层中水分减少;夜间停止蒸发,深层水分通过沙层慢慢上移,至08:00前,沙层中的水分含量一定会达到一个最大值^[13],由此再有些蒸发,水汽量上升,再加上原有水汽量,早晨即达到最大值,这种解释有待进一步验证。10:00左右,由于太阳升起后地表温度迅速升高,贴地层湿度迅速降低,平均比湿梯度减小。

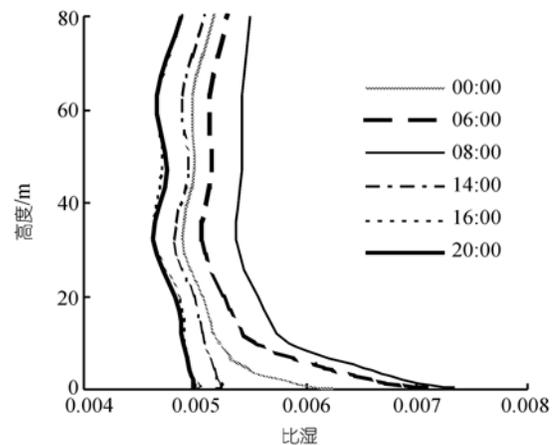


图4 2006年8月各梯度平均比湿廓线

3.4 地表辐射平衡特征

图5给出了塔克拉玛干沙漠2006年8月13~31日辐射各分量的平均日变化特征(以下时间均为地方时)。需要说明的是所选的19天资料中,共有10天发生了不同程度的浮尘、扬沙和沙尘暴天气,有2天出

现阵性降水,有7天无天气现象.从图5可以看到,地表辐射差额白天以正平衡为主,夜间表现为弱的负平衡,呈现出标准的日循环形态;总辐射最大达到 $709 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,地表反射辐射的峰值可超过 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,大气向下长波辐射基本上稳定地维持在 $350 \sim 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,在白天稍微有点增加;地表向上长波辐射在 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,白天峰值可超过 $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,最大变幅在 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上.由此可见,地表向上长波辐射是长波辐射中的主要部分,其表现为夜间小,白天大,最小值出现在凌晨 06:00,最大峰值出现在 13:00,峰值出现的时间也是沙漠地表温度最高的时刻.净辐射的峰值出现在白天 12:00 左右,达到 $317 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,其日均值只有 $60.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,净辐射由正值变为负值和由负值变为正值的时间,分别出现在 06:00 和 18:00.由此可见,塔克拉玛干沙漠虽然总辐射值很大,但由于沙漠区白天的反射率很大,地表向上长波辐射也较大,使得净辐射值相对较小.

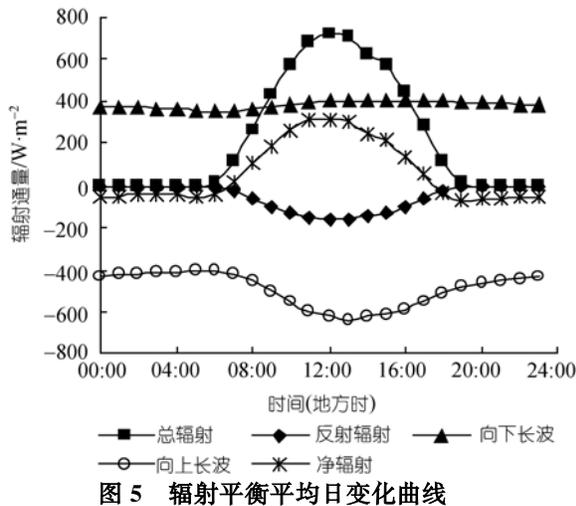


图5 辐射平衡平均日变化曲线

3.5 感热通量(H)和潜热通量(λE)日变化特征

(i) 感热通量(H)日变化. 图6是利用组合法求出的塔克拉玛干沙漠 2006年8月13~31日的地表感热和潜热平均日变化结果.从图6可以看出,塔克拉玛干沙漠腹地感热通量的平均日变化情况与常见的

情形一致,上午逐渐增大,在 12:00(地方时)左右达到最大,之后开始减小.这是因为日出后随着太阳高度角的增大,地面得到的太阳辐射增加,加之午后湍流运动较强,地面温度也达到一天中的最高值,向近地层大气传送的热量随之达到最大.随后,由于太阳高度角的降低,地面获得的太阳辐射能逐渐减少,地表温度随之下降,感热通量也逐渐变小.一日内感热通量最大值和最小值分别为 $152.51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $-24.94 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,日平均值为 $44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

(ii) 潜热通量(λE)日变化. 从潜热通量平均日变化曲线(图6)可以看出塔克拉玛干沙漠腹地潜热通量变化较为复杂,但分别有一个最大值和最小值,出现在 08:00 和 20:00(地方时).一天总体上表现出以地表向大气输送潜热为主,这跟地表温度高于近地层大气温度有关.但潜热通量一天最大值仅为 $58.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,日平均值为 $11.31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.这与塔克拉玛干沙漠地区地表干燥、空气含水量少是分不开的.

通过与 1991年黑河试验区3种不同下垫面上的感热通量和潜热通量日均值的比较(表1)^[27]可以看出,塔克拉玛干沙漠感热通量和潜热通量日均值都要比黑河戈壁、沙漠试验区小,但感热通量大于黑河绿洲试验区,潜热通量小于黑河绿洲试验区.

3.6 地表热量平衡特征

从图6也可以看出,感热通量和潜热通量的平均日变化中,感热通量占主导地位,净辐射主要以湍流感热形式扩散,一日之内感热通量、潜热通量和土壤热通量所占净辐射通量的比例分别为 72.5%, 18.6% 和 8.9%,说明塔克拉玛干沙漠获得的太阳辐射能量大部分以感热的形式输送给近地层大气,其余一部分以地热流的形式向地下传输,只有 18.6%的能量以潜热的方式释放掉.值得注意的是,在凌晨 07:00(地方时)左右,地表潜热表现出一个小的波峰,达到一天中的最大值,值为 $58.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;而此时感热的变化方向却与此相反,表现为一小的波谷,其值为 $-24.94 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;在整个日变化过程中,地表感热和潜热随着

表1 塔克拉玛干沙漠与黑河实验区3种不同下垫面上的感热通量和潜热通量对比

地名		时间	日平均 $H/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	日平均 $\lambda E/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
黑河	戈壁	1991-08-17	66.2	30.5
试验	沙漠	1991-08-17	62.2	30.2
区	绿洲	1991-07-08	22.4	145
塔克拉玛干沙漠		2006-08-13—31	44	11.31

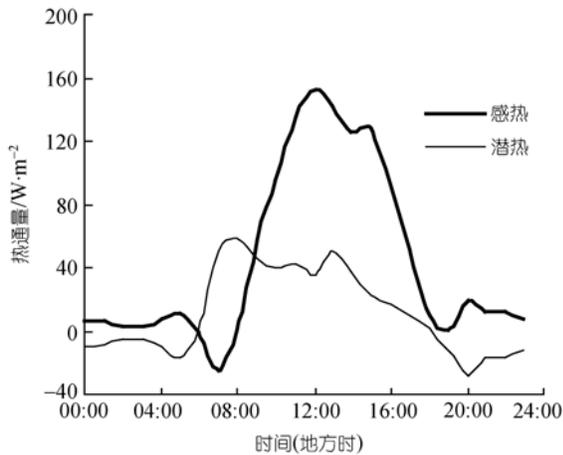


图6 感热和潜热平均日变化曲线

太阳高度角的变化出现升高和下降,潜热是以小的波峰、而感热是以大的波峰与小的波谷的形态反映出沙漠下垫面热量日变化的特殊形式。

3.7 地面加热场

塔克拉玛干沙漠下垫面对大气的加热作用,对中国西北地区的天气气候有重要影响。沙漠下垫面对大气的加热作用是由湍流过程和辐射过程来决定的^[27]。定义 $R_n - G_0$ 为地面加热强度(R_n 为净辐射通量, G_0 为土壤热通量), 即当 $R_n - G_0 > 0$ 时, 地面向大气输送热能, 地面对大气而言为热源; 反之, 当 $R_n - G_0 < 0$ 时, 地面对大气而言则为冷源。图 7 是塔克拉玛干沙漠地面加热场强度日变化规律, 从图中可以看出, 地表白天是强热源, 白天地面对大气的加热作用明显。

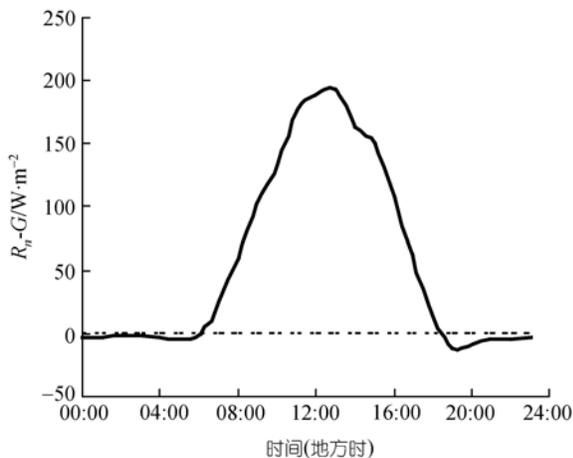


图7 地面加热场强度平均日变化曲线

早上日出后, 地面加热场逐渐加强, 尤其是在 13:00 (地方时)左右, 其热源强度达到最大, 可达 $192 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。而后地面加热场逐渐减弱, 傍晚日落 19:00 (地方时)以后, 地面就转变为弱的冷源。

4 结论

通过对塔克拉玛干沙漠大气环境观测实验站 2006 和 2007 年 7~8 月 80 m 铁塔风温湿梯度资料、地温资料、辐射及热量资料的计算分析, 可以得到以下几点结论。

(i) 在夏季夜间, 由于沙漠下垫面辐射冷却较快, 近地层存在逆温现象, 在一定高度范围内气温随高度的升高而增加; 20 m 以下, 温度梯度变化较大; 20 m 以上, 温度梯度明显变小。近地层大气平均比湿在 32 m 以下随高度升高而减小, 32 m 以上随高度升高有增大的趋势, 但变化幅度相对较小。

(ii) 沙层温度具有明显的日变化特征, 白天沙层温度的铅直分布由上层向下递减, 夜间的变化状况恰好与白天相反, 其中 0 和 5 cm 处沙层温度日变化最为显著, 40 cm 以下不再有日变化信号。观测分析表明, 沙层表面感热通量最大时热量在沙层的传输深度零界面层出现在 20 cm。

(iii) 塔克拉玛干沙漠地表辐射平衡以正值为主, 除大气向下长波辐射以外, 其他各辐射分量(总辐射、反射辐射、地表向上长波辐射、净辐射)均有明显的日变化特征, 呈现出标准的日循环形态; 总辐射最大值在 $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上; 净辐射峰值达 $317 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其日平均值为 $60.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(iv) 塔克拉玛干沙漠地-气间感热交换是沙漠地表能量交换的主要形式, 潜热交换相对较小。感热和潜热随着太阳高度角的变化反映出流动沙漠热量的正负交换过程; 感热是以正平衡为主、凌晨为负平衡的形态体现出沙漠下垫面日变化的特殊形式, 在正午 12:00(地方时)左右达到一天中的最大值; 而潜热是以昼夜交替的形式反映出日间为正平衡、夜间为负平衡的变化过程, 凌晨 07:00 和傍晚 20:00 左右, 分别达到一天中的最高和最低值。

(v) 塔克拉玛干沙漠下垫面对大气的加热作用显著, 白天地面为强热源, 晚上转变为弱冷源。

参考文献

- 1 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究. 高原气象, 1999, 18(3): 281—294
- 2 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. 高原气象, 2005, 24(4): 545—555
- 3 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
- 4 卞林根, 陆龙骅, 程彦杰, 等. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究. 应用气象学报, 2001, 12(1): 1—13
- 5 李国平, 段廷扬, 吴贵芬. 青藏高原西部的地面热源强度及地面热量平衡. 地理科学, 2003, 23(1): 13—18
- 6 李国平, 段廷扬, 巩远发, 等. 青藏高原近地层通量特征的合成分析. 气象学报, 2002, 60(4): 453—460
- 7 李国平, 赵邦杰, 卢敬华. 青藏高原总体输送系数的特征. 气象学报, 2002, 60(1): 60—67
- 8 刘辉志, 洪钟祥. 青藏高原改则地区近地层湍流特征. 大气科学, 2000, 24(3): 289—300
- 9 钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 等. 青藏高原北麓河地区近地层能量输送与微气象特征. 高原气象, 2005, 24(1): 43—48
- 10 吕达仁, 陈佐忠, 王庚辰, 等. 内蒙古半干旱草原气候生态相互作用问题——IMGRASS 计划初步结果. 地学前缘, 2002, 9(2): 307—320
- 11 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 D 辑: 地球科学, 2001, 31(9): 783—792
- 12 王澄海, 黄宝霞, 杨兴国. 陇中黄土高原植被覆盖和裸露下垫面地表通量和总体输送系数研究. 高原气象, 2007, 26(1): 30—38
- 13 李江凤主编. 塔克拉玛干沙漠和周边地区天气气候. 北京: 气象出版社, 2003
- 14 何清, 徐俊荣. 塔克拉玛干沙漠散射辐射观测研究. 干旱区地理, 1996, 19(4): 38—44
- 15 胡列群, 袁玉江. 塔克拉玛干沙漠辐射平衡研究. 干旱区地理, 1996, 19(3): 16—23
- 16 胡列群, 李江凤. 塔克拉玛干沙漠及周围地区地表反射率. 干旱区研究, 1993, 10(1): 33—38
- 17 胡列群. 塔克拉玛干沙漠地面有效辐射研究. 干旱区地理, 1997, 20(1): 25—32
- 18 杨佐涛, 陈渭南, 陈广庭, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地的气候表现. 中国沙漠, 1995, 15(3): 293—298
- 19 俎瑞平, 张克存, 屈建军, 等. 塔克拉玛干沙漠地面风场特征及周边地区沙丘排列关系分析. 应用气象学报, 2005, 16(4): 468—474
- 20 马志福, 谭芳, 侯勤东, 等. 塔克拉玛干沙漠地区温压湿分布规律研究. 中国沙漠, 2000, 20(3): 289—292
- 21 李生宇, 雷加强, 徐新文, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴特征. 自然灾害学报, 2006, 1(2): 14—19
- 22 张杰. 塔克拉玛干沙漠腹地沙丘表面温度特征初探. 中国沙漠, 2003, 23(5): 592—595
- 23 杨莲梅. 塔克拉玛干地区气候变化对全球变暖的响应. 中国沙漠, 2003, 23(5): 497—502
- 24 崔彩霞, 杨青, 杨莲梅. MODIS 资料用于塔克拉玛干沙漠地表温度计算方法初探. 中国沙漠, 2003, 23(5): 596—599
- 25 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
- 26 魏文寿. 现代沙漠对气候变化的响应与反馈. 北京: 中国环境科学出版社, 2000. 96—98
- 27 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