

南疆沙漠腹地夏季晴天与 沙尘日小气候观测对比分析

王敏仲 魏文寿 何 清 杨莲梅 刘新春

(中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

提 要: 利用塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站 2006 年 8 月 13—31 日近地层微气象资料以及常规地面观测资料, 选取晴天与沙尘日个例, 采用波文比能量平衡方法, 对比分析了晴天与沙尘日沙漠腹地的小气候和地表能量平衡特征。结果表明, 晴天气温、地温日变化幅度均大于沙尘日, 各深度地温极值出现时间滞后于沙尘日; 晴天夜间近地层存在逆温, 沙尘日具有等温性; 晴天夜间比湿较大, 白天较小, 沙尘日夜间比湿变化平缓, 在沙尘暴发生时, 比湿急剧增大, 并有弱的逆湿现象存在; 沙尘日总辐射、反射辐射、净辐射和感热通量比晴天明显偏小, 向下长波辐射却大于晴天, 但潜热变化差异不太明显。

关键词: 塔克拉玛干沙漠 小气候特征 地表能量平衡

Contrast Analysis on Microclimate Characteristic of Clear Day and Sand-dust Day in Tazhong Station of Desert Hinterland of South Xinjiang in Summer

Wang Minzhong Wei Wenshou He Qing Yang Lianmei Liu Xinchun

(Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002)

Abstract: By using the micrometeorology data and conventional observation data from the Taklimakan desert atmospheric environment observation station on 13~31 August 2006, and choosing the case of typical clear day and sand day, the microclimate characteristic and ground surface energy balance of two different weather conditions in Taklimakan desert hinterland were comparatively analyzed with Bowen Ratio Heat Budget Method. The results show that there has a obvious difference in microclimate characteristic and ground surface energy balance between clear day and

基金项目: 国家自然科学基金项目(40475041); 中国沙漠气象研究基金课题(Sqj2006004); 国家自然科学基金项目(40775019)共同资助

收稿日期: 2008年4月18日; 修定稿日期: 2008年7月14日

sand day. The diurnal variation in air temperature, humidity and sand layer temperature on clear day was larger than that on sand day. The temperature inversion occurred near the surface layer at night of clear day, the temperature increasing with the height within certain altitude range. However, it presented isothermal during the night of sand day, the temperature changed little with increasing height. Desert hinterland surface heat equilibrium was influenced greatly by sand weather. The global radiation, reflected radiation, net radiation and sensible heat flux of sand day were obviously smaller than those of clear day. But the atmosphere down long wave radiation was larger than clear day. No matter how for sand day or clear day, the latent heat variation difference was very small.

Key Words: Taklimakan desert hinterland microclimate characteristic ground surface energy balance

引 言

陆面过程对气候有着重要的作用^[1]。从 1980 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 多项陆面过程试验。我国自 1980 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^[2-11]。

塔克拉玛干沙漠位于北半球中纬度欧亚大陆腹地,面积 $33.76 \times 10^4 \text{ km}^2$,是世界第二、我国第一大流动沙漠,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,国内外尤其是我国学者做了大量的工作^[12-25]。但由于沙漠区气象站稀少,受观测手段和资料的限制,沙漠腹地的小气候和地表能量平衡等方面的研究尚不充分。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试验站,布设了 80 米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,利用该站 2006 年 8 月 13—31 日取得的微气象观测资料,选取晴天和沙尘日个例,对比分析了两种天气条件下沙漠腹地气温、地表温度、沙层温度、比湿、风速、地表辐射平衡和热量平衡的日变化特征,揭示两者的小气候及能量平衡变化差异,以期得出一些有意义的结论,为今后沙漠陆面过程和沙漠气候的研究奠定基础。

1 试验场地、观测仪器和资料

选用的资料是塔克拉玛干沙漠大气环境观测实验站(简称塔中站)2006 年 8 月 13—31 日 80 米铁塔风温湿梯度资料、辐射资料、土壤热通量资料以及常规地温资料。该站地理位置为 $39^{\circ}00' \text{ N}$ 、 $83^{\circ}40' \text{ E}$,平均海拔高度为 1099.3m。观测场地四周开阔,地表均为沙丘组成的流动沙漠,试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、80m。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、湿度传感器产自芬兰

VAISALA 公司;型号分别为 WAA151、WAV151、QMH102 (HMP45D)、QMH102 (HMP45D)。风、温、湿瞬时探测数据采集频率为每 10 秒一组,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、160cm 深度装有土壤热流板,型号为 HFP01SC,这里使用 1cm 的土壤热通量进行计算。沙层温度共 7 层,深度分别为 0、5、10、20、40、80、160cm。

选取 8 月 17 日(沙尘日)、31 日(晴天)作个例分析,对比分析气温、地表温度、大气比湿、风速、沙层温度、地表辐射和热量平衡的日变化特征,分析沙尘天气对地表热量和辐射平衡的影响。其中 8 月 17 日 12:15~16:15 为浮尘;16:15~17:10 为沙尘暴,最小能见度为 700m;17:10~23:55 为扬沙。晴天选取 8 月 31 日,总、低云量全天均为 0。

2 计算方法

2.1 波文比能量平衡法

波文比能量平衡法是计算近地面层湍流通量的理论基础,其能量平衡方程为^[26]:

$$R_n - G = H + L_E + Q + C \quad (1)$$

式中 Q 和 C 分别为植物光合作用所消耗的能量和下垫面贮存的能量。与净辐射通量 R_n 相比,一般 Q 和 C 可忽略不计,则

$$R_n - G = H + L_E \quad (2)$$

式中 R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, H 为感热通量, L_E 为潜热通量。

波文比(Bowen ratio, β)的表达式是:

$$\beta = H/L_E = C_p(\theta_2 - \theta_1)/L(q_2 - q_1) \quad (3)$$

这里 C_p 为定压比热, L 为水的汽化潜热, θ_2 、 θ_1 、 q_2 、 q_1 分别为两层的位温和比湿。

用波文比能量平衡法计算感热、潜热通量的公式为:

$$H = (R_n - G)\beta/(1 + \beta) \quad (4)$$

$$L_E = (R_n - G)\beta/(1 + \beta) \quad (5)$$

由(3)式首先可以计算出波文比 β ,再由式(4)和式(5)即可求得感热通量 H 和潜热通量 L_E 。

3 分析与讨论

3.1 小气候特征对比分析

3.1.1 地表温度和气温

晴天地表温度和气温均有明显的日变化,0cm 地表温度最高值为 61.9℃,出现在午后 16:00,最低值为 13.1℃,出现在早上 8:00;气温的最高值为 34.3℃,出现在下午 17:00 至 18:00,气温最低值为 13.7℃,也出现在早上 8:00(图 1a)。晴天夜间地表温度和气温较为接近,二者差值不是很大,但在早晨 9:00 以后,由于太阳辐射迅速增大,使地表温度很快升高,远远高于了气温值。沙尘日地表温度和气温的日变化形态(图 1b)与晴天大致相似,不同之处在于变化幅度明显小于晴天,其地表温度峰值为 53℃,最低值为 26.5℃,气温的最高值为 35.7℃,最低值为 27.7℃。值得注意的是,在 17 日沙尘天气发生前的一段时间内,地表温度和气温远远高于同时间晴天地表温度和气温,沙尘暴发生时,气温又低于晴天气温。这可以说明两个问题,一是沙漠区晴天夜间地面辐射冷却较快,使得地表温度和气温相对较低;二是沙尘天气发生前,地表面对大气加热显著,产生了一个小的扰动,大气层结接近不稳定状态,在风力的驱动下,促使沙尘天气发生,当沙尘暴发生时由于平流输送热量,能量得到释放,气温降低,小于晴天气温。从图 1c 我

们还可以看到,沙尘日白天 11:00 至 20:00 地表温度低于晴天地表温度,这主要是因为沙尘天气发生时空中的沙尘粒子减弱了到达地面的太阳辐射,使得地表温度低于晴天。

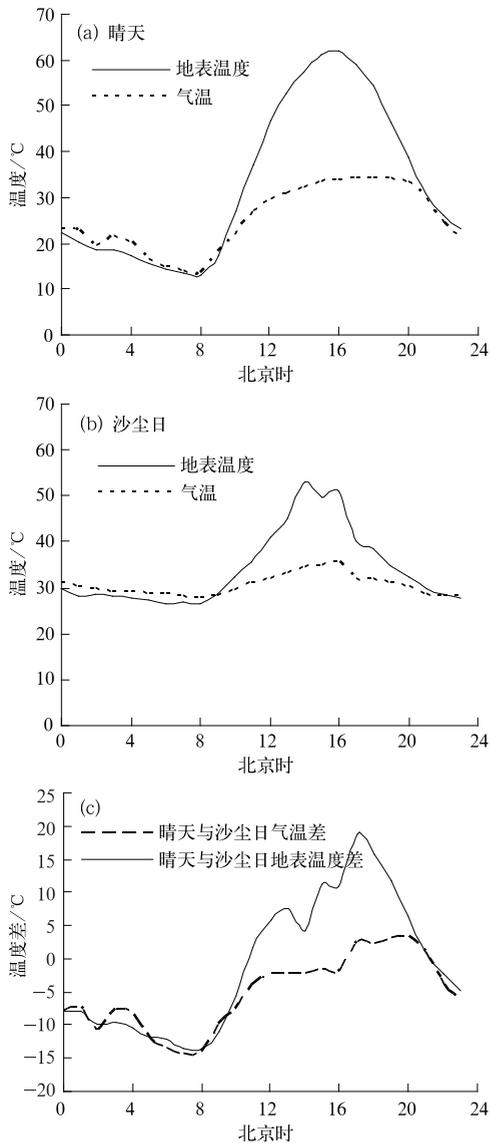


图 1 2006 年 8 月 31 日(晴天)与 17 日(沙尘日)塔中站地表温度、气温日变化曲线

3.1.2 大气比湿

晴天近地层 32 米以下比湿随高度升高而减小,32 米以上随高度升高有略微增大的

趋势,但变化幅度较小。夜间各高度比湿均大于白天,凌晨 6:00 至 8:00 左右达到一天中的最大值,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(图 2)。另外的一种可能性是在沙层表面和沙层中水汽量

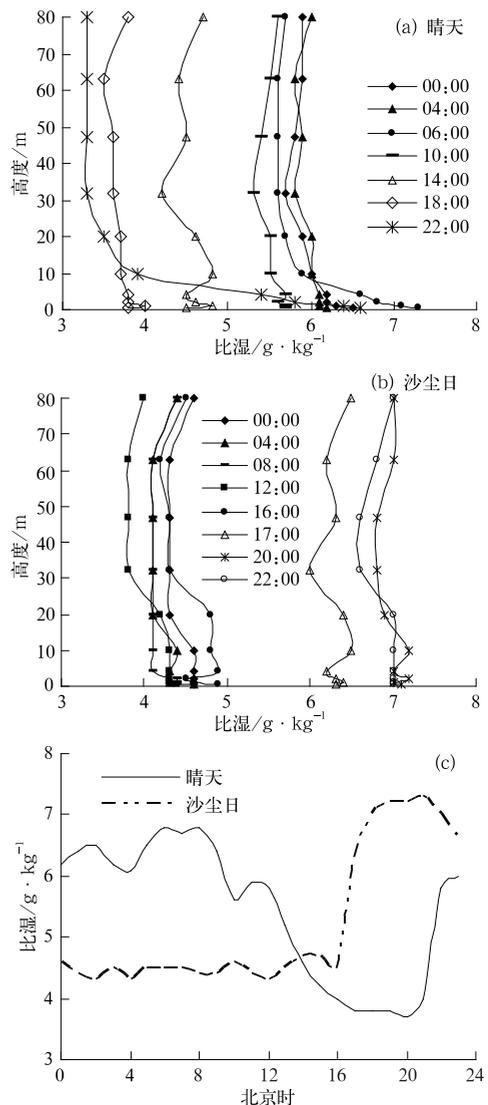


图 2 2006 年 8 月 31 日(晴天)与 17 日(沙尘日)塔中站大气比湿对比曲线

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 时前,沙层中的水分含量一定会达到一个最大值,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^[12],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升高,各梯度比湿迅速减小。沙尘日夜间近地层比湿相对较小,其值在 $3.5 \sim 5 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间变动,说明沙尘暴天气发生前,近地层较为干燥,易于起沙,当沙尘暴发生时,各梯度比湿急剧增大,并且在近地层 10 米高度内出现了轻微的逆湿现象。

图 2c 给出了沙漠腹地晴天与沙尘日 2 米高度大气比湿日变化对比曲线,晴天大气比湿的最高值出现在早上 8:00,最低值出现在 20:00,说明白天以水汽耗散为主,而夜间是水汽聚集阶段;在 7—13 时水汽消耗最快,以后由于地表湿度减小和湍流混合使湿度分布均匀化,水汽消耗趋缓。从图 2c 也可以看出,在沙尘日沙尘暴天气发生之前,比湿变化较为平缓,沙尘暴发生时,比湿急剧升高,由 $4.5 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增大到 $7.3 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,到 23:00 沙尘天气减弱结束时,比湿开始减小。

3.1.3 近地层温度廓线

图 3 给出了沙漠腹地晴天与沙尘日近地层大气温度的白天(08:00—20:00)与夜间(20:00—08:00)平均垂直分布廓线图。从图 3 可见,晴天温度廓线的分布规律从总体上可以分为两个阶段,白天温度随高度的升高而降低,在贴地层 2 米内随高度升高温度降低较快,2 米以上温度梯度变化不是很明显。这主要是因为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,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且贴地层温度梯度变化较大。而夜间温度的变化情况刚好与日间

相反,随高度的升高而升高,呈现出逆温现象,在近地层 20 米以内,气温梯度变化较大,20 米以上,气温梯度逐渐变小。夜间,由于地面长波辐射冷却,热量反过来由近地层大气输给地面,这样近地面的气层就随之降温,空气愈靠近地面,受地表的影响愈大,降温愈多,离地面愈远,降温愈少,因而形成了自地面开始的逆温。温度廓线随高度递增转变为递减的时间约在清晨日出后的 09—10 时;温度廓线随高度递减转变为递增的时间约在日落后的 20—21 时。

从图 3 也可以看出,沙尘日白天温度廓线与晴天白天温度廓线近似平行,在近地层 2 米高度内温度随高度升高降低较快,2 米以上温度梯度变化较小。沙尘日夜间温度随高度升高几乎不变,具有等温性,这可能是因为沙尘天气发生时,空中的沙尘粒子阻碍了夜间地面长波辐射冷却效应,减弱了由近地气层输送给地面的热量,从而导致近地层气温随高度变化较小。

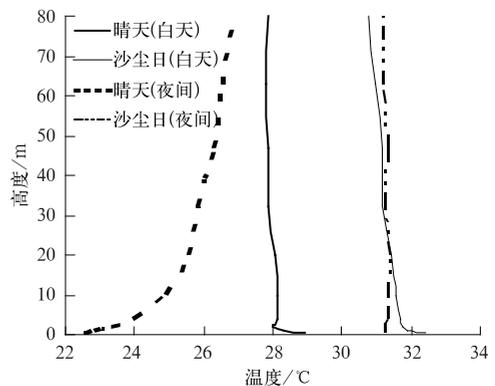


图 3 2006 年 8 月 31 日(晴天)与 17 日(沙尘日)塔中站白天和夜间平均温度垂直廓线

3.1.4 水平风速

图 4 给出了晴天与沙尘日水平风速的日变化对比曲线。由图 4 可见,晴天夜间风速较小,在 06 时达到最小值,基本为静风或微风,日间风速变化较大,在中午 13 时左右达

到最大值。沙尘日的水平风速总体上大于晴天风速,沙尘日 12—16 时主要以浮尘天气为主,对应的水平风速相对较小,其值约为 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;当 16 时沙尘暴发生时,风速急剧增大,由 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增大到 $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,并维持到 17 时左右,此后风速开始减弱,沙尘暴转变为扬沙天气。

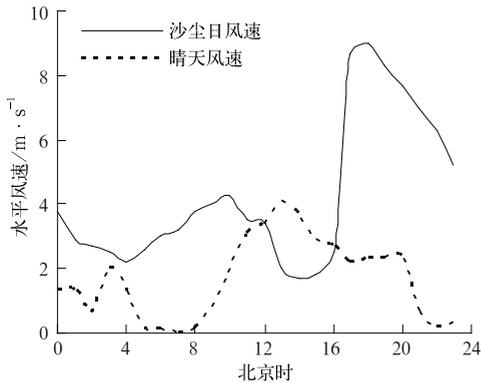


图 4 2006 年 8 月 31 日(晴天)与 17 日(沙尘日)塔中站水平风速对比图

3.1.5 沙层温度

图 5 给出了晴天和沙尘日沙层温度日变化曲线。从图 5 可以看出,无论是晴天还是沙尘日,沙层温度均有日变化特征,0cm 和 5cm 特征最为明显,随着深度的增加,位相、振幅发生变化,40cm 深度温度的日变化特征已经不明显。日间,沙层吸收太阳直接辐射和散射辐射,温度上升,各深度的地温一般在午后至日落时达到最大值,下层沙土的温度上升较慢,达到最大值的时间比上层滞后。其中晴天沙层温度日变化特征比沙尘日明显,各深度的温度变化振幅均大于沙尘日,各深度极值出现时间滞后于沙尘日。晴天 0cm 沙层温度 16 时达到最大值;5cm 沙层温度在 18 时达到最大,10cm 在 20 时仍有较小的上升趋势;沙尘日 0cm 沙层温度最大峰值出现在 14 时左右,5cm 沙层温度在 16 时左右达到最大,随着深度的增加,极值出现时间滞

后。晴天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,地面依靠来自深层的热量输出,使其表层温度逐渐下降。热量随着时间的变化,不断地在沙层中上传下导,热能也就不断地在沙层中重新分配。当有沙尘天气发生时,空中的沙尘粒子阻碍了太阳辐射,导致到达地面的净辐射减小,减弱了地-气之间的热量交换,使得白天沙层温度不会升高得很高,夜间沙层温度不会降低得很低,促使沙层温度日变化幅度小于晴天。

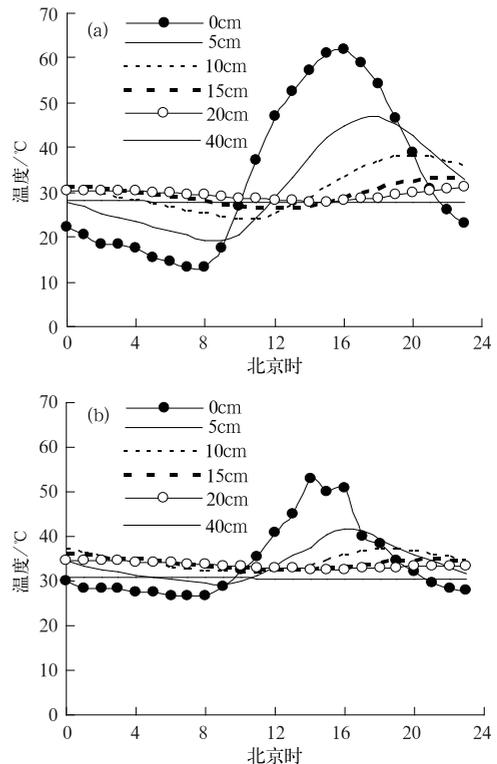


图 5 2006 年 8 月 31 日(晴天)与 17 日(沙尘日)塔中站地温日变化曲线
a. 晴天地温日变化; b. 沙尘日地温日变化

3.2 地表能量平衡对比分析

3.2.1 辐射平衡特征

图 6 给出了塔克拉玛干沙漠晴天和沙尘日辐射平衡变化情况(以下时间均为地方时)。从图 6a 中可以看到,晴天地表辐射平衡表现出标准的日循环形态,总辐射最大达到 $890 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,地表反射辐射的峰值可超过 $197 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,大气向下长波辐射基本上稳定地维持在 $330 \sim 370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,在白天稍微有点增加,地表向上长波辐射基本在 $370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,白天峰值可超过 $660 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,最大变幅近 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。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 6 时左右,最大值出现在 13~15 时左右,最大值出现时间也是沙漠地表温度最高时。

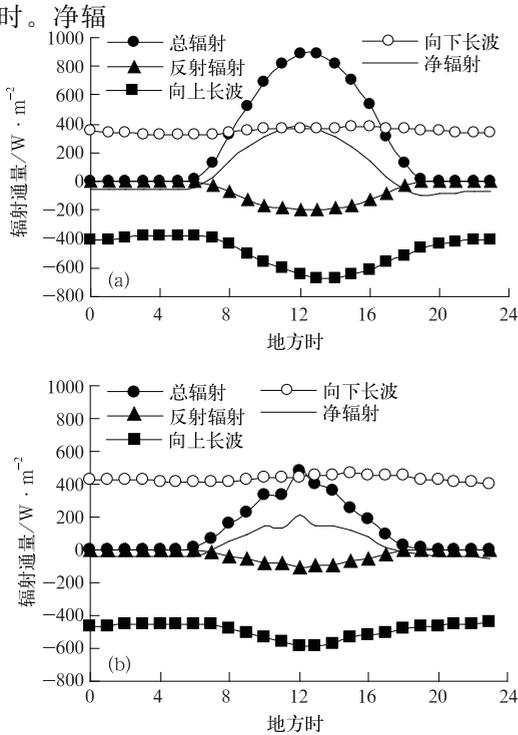


图 6 2006 年 8 月 31 日(晴天)与 17 日(沙尘日)塔中站辐射平衡日变化曲线
a. 晴天辐射平衡图; b. 沙尘日

射的峰值出现在白天 12 时左右,达到 $391 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,净辐射由负值变为正值和由正值变为负值的时间,分别出现在 06 时和 18 时左右。

从图 6b 可以看出,沙尘日沙漠腹地辐射平衡虽然仍然有日循环规律,但远不如晴天的规则。如果以晴天为基准,沙尘日总辐射、反射辐射、净辐射明显减弱,总辐射最大只有 $481 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,反射辐射的峰值也只有 $112 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,大气向下长波辐射比晴天的长波值大,峰值可达 $466 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,地表向上长波辐射白天较晴天有所减小,夜间略微有所增大。由此可见,沙尘日由于空中沙尘粒子对太阳辐射的影响,导致辐射平衡发生了明显变化。

3.2.2 热量平衡特征

图 7 是利用波文比能量平衡法分别求出的塔克拉玛干沙漠 8 月 17 日(沙尘日)和 31 日(晴天)的地表感热和潜热日变化结果。从图 7 可以看出,无论是晴天还是沙尘日,在白天,感热通量都要大于潜热通量,净辐射主要以湍流感热形式扩散,剩余部分热量通过沙层供给地中热流,只有一少部分以潜热的形式输送给近地层大气。值得注意的是,晴天白天的感热通量远远大于沙尘日白天的感热通量,呈现出一个标准的波峰,最大值出现在 13 时左右(地方时),为 $241 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而沙尘日白天的感热值相对较小,最大值为 $124 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,出现时间相对滞后,约在 15—17 时

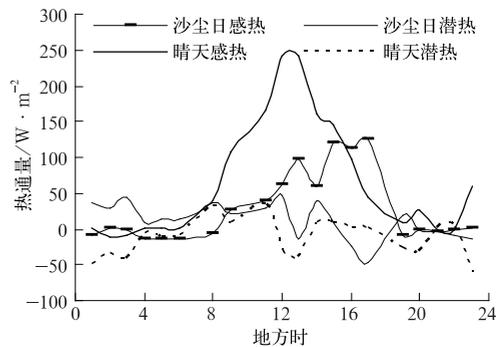


图 7 2006 年 8 月 31 日(晴天)与 17 日(沙尘日)塔中站感热、潜热对比曲线

(地方时)。从图 7 也可以看出,无论是晴天还是沙尘日,潜热通量都非常小,在夜间二者差异不太明显;在白天,潜热通量大致与同时感热通量呈反位相变化,当感热呈现出一个波峰时,潜热呈现出一个小的波谷。在整个日变化过程中,地表感热随着太阳高度角的变化出现升高和下降,感热是以峰的形态、而潜热是以反位相的形态反映出沙漠下垫面日变化的特殊形式。

4 结 语

(1) 晴天气温、地表温度日变化幅度大于沙尘日,晴天夜间近地层呈现出明显的逆温现象,沙尘日夜间近地层具有等温性,温度随高度几乎不变。

(2) 晴天夜间比湿较大,白天较小,沙尘日夜间比湿变化平缓,在沙尘暴发生时,比湿急剧增大,并有弱的逆湿现象存在。

(3) 沙层温度日变化的基本形态非常符合经典的观测结果,明显变化层基本在 10cm 范围以内,40cm 以下沙层温度不再有日变化信号。晴天沙层温度日变化振幅大于沙尘日,各深度极值出现时间滞后于沙尘日。

(4) 沙尘日总辐射、反射辐射、净辐射、感热通量比晴天明显要小,向下长波辐射却大于晴天,无论是沙尘日还是晴天,其潜热变化差异不太显著。

参 考 文 献

- [1] 王澄海,董文杰,韦志刚,等.典型干旱地区陆面特征的模拟及分析[J].高原气象,2002,21(5):466-472.
- [2] 左洪超,胡隐樵.黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数[J].高原气象,1992,11(4):371-380.
- [3] 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[J].应用气象学报,2001,12.(1):1-13.
- [4] 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[J].地理科学,2003,23(1):13-18.
- [5] 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[J].气象学报,2002,60(4):453-460.
- [6] 李国平,赵邦杰,卢敬华.青藏高原总体输送系数的特征[J].气象学报,2002,60(1):60-67.
- [7] 刘辉志,洪钟祥.青藏高原改则地区近地层湍流特征[J].大气科学,2000,24(3):289-300.
- [8] 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[J].高原气象,2005,24(1):43-48.
- [9] 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[J].地学前缘,2002,9(2):307-320.
- [10] 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[J].中国科学(D辑),2001,31(9):783-792.
- [11] 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[J].高原气象,2007,26(1):30-38.
- [12] 李江凤主编.塔克拉玛干沙漠和周边山区天气气候[M].北京:气象出版社,2003.
- [13] 何清,徐俊荣.塔克拉玛干沙漠散射辐射观测研究[J].干旱区地理,1996,19(4):38-44.
- [14] 胡列群,袁玉江.塔克拉玛干沙漠辐射平衡研究[J].干旱区地理,1996,19(3):16-23.
- [15] 胡列群.塔克拉玛干沙漠地面有效辐射研究[J].干旱区地理,1997,20(1):25-32.
- [16] 杨佐涛,陈渭南,陈广庭,等.塔克拉玛干沙漠腹地的气候表现[J].中国沙漠,1995,15(3):293-298.
- [17] 张杰.塔克拉玛干沙漠腹地沙丘表面温度特征初探[J].中国沙漠,2003,23(5):592-595.
- [18] 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[J].中国沙漠,2000,20(3):289-292.
- [19] 李生字,雷加强,徐新文,等.塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴特征[J].自然灾害学报,2006,15(2):14-19.
- [20] 杨莲梅.塔克拉玛干地区气候变化对全球变暖的响应[J].中国沙漠,2003,23(5):497-502.
- [21] 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[J].中国沙漠,2003,23(5):596-599.
- [22] 王旭,马禹,陶祖钰.南疆沙尘暴气候特征分析[J].中国沙漠,2003,23(2):147-151.
- [23] 陈洪武,王旭,马禹.塔里木盆地局地性和区域性沙尘暴天气过程研究[J].中国沙漠,2003,23(5):533-538.
- [24] 王旭,陈洪武,马禹.塔里木盆地一次浮尘天气的卫星云图特征[J].气象科技,2003,31(2):80-83.
- [25] 阿不力米提·塔西,王旭.塔里木盆地一次特大暴雨过程的分析[J].新疆气象,2002,25(1):12-14.
- [26] 刘树华,刘和平.不同下垫面湍流输送计算方法的比较[J].应用气象学报,1996,7(2):229-237.