

敦煌地区荒漠戈壁地表热量和 辐射平衡特征的研究^{*}

张 强^{1,2)} 曹晓彦^{2,3)}

1) (中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020)

2) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

3) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 利用 2000 年 5 月 25 日~6 月 17 日“敦煌试验”在戈壁的微气象观测资料, 分析了极端干旱地区晴天、阴天和降水等天气条件下的地表辐射平衡、热量平衡和土壤温度等微气象特征的日变化规律。发现在不同天气条件微气象特征有很大变化。但观测期间的平均微气象特征与晴天比较接近, 天气过程的影响不是很大, 平均的总辐射、净辐射和感热通量与晴天的比值在白天基本大于 0.8。观测期间的平均 Bowen 比全天大于 1, 在白天都在 10 以上, 最大超过 100。

关键词: 敦煌; 荒漠戈壁; 辐射平衡; 热量平衡;

1 引言

以地表热量平衡和辐射平衡为主的地表能量交换过程是地—气之间相互作用的主要内容, 它集中反映了地气耦合过程的能量纽带作用。不仅太阳活动、地核能量释放、生态环境和人类活动等自然或人为因素等对气候变化的影响主要通过对地表热量和辐射平衡的改变来实现, 而且它们对气候变化的响应也是通过地表热量和辐射平衡过程来传递。所以地表热量和辐射平衡的表现是全球变化和气候异常研究中极为关注的方面。正因为如此, 目前兴起了以最终实现准确描述陆面热量和辐射平衡过程为主要目标的陆面过程及其参数化的研究^[1]。事实表明, 目前的陆面过程参数方案对陆面热量和辐射平衡的估算并不理想^[2], 并且要解决这一问题也并不像最初想象的那么容易^[3]。

全球干旱荒漠地区(包括沙漠、干旱和半干旱草地)占到陆地表面的 1/4, 几乎分布于各大洲, 是具有全球性的陆面类型。在我国干旱和半干旱地区约占到国土面积的 40%^[4]。由于荒漠地区特殊的地表反射率和土壤对太阳辐射的响应过程, 其表面热量和辐射平衡过程将会很不同于一般的湿润地区, 陆面通过对太阳辐射的响应对大气的加热作用会很突出, 这无疑将深刻地影响着我国西北干旱气候的形成和季风环流的活动, 同时也会在一定程度上作用于全球气候和大气环流的变化过程。

在国际上, 干旱荒漠地区观测试验相对比较稀少。我国由于研究发展水平的限制,

对于干旱地区热量和辐射平衡过程的研究比较滞后，直到 20 世纪 80 年代才逐渐开始这方面的研究工作^[5]。但真正以研究干旱地区热量和辐射平衡过程为主的陆面过程试验是 20 世纪 80 年代末至 90 年代初中日合作在甘肃黑河流域开展的“HEIFE”试验^[6]，它是国际上首次真正的干旱区陆面过程观测试验。该试验给出了荒漠地表典型晴天的热量平衡和辐射平衡的特征^[7,8]，并且对于干旱区陆面过程也提出了一些新认识^[9]。不过以往的试验只分析了典型晴天的特征，并没有注意阴天和降水等其他天气条件下的特征，对于云和降水对于干旱区地表热量和辐射平衡的影响程度并不清楚。同时，以往野外试验只研究了年平均降水大于 150 mm 的干旱气候区的特征，而对敦煌这样种极端干旱气候区（年平均降水在 50 mm 以下）的特征并未涉及。

本文试图利用“敦煌试验”在甘肃敦煌戈壁的陆面过程野外观测资料，分析极端干旱气候区的地表热量平衡和辐射平衡特征以及云和降水的影响。

2 观测试验介绍

“国家重点基础研究发展规划”首批启动的“我国重大气候和天气灾害形成机理和

预测理论的研究”项目在与我国气候密切相关的区域规划了陆上和洋面两大野外试验，其中在跨甘肃和青海两省的广大干旱和高寒地区设置了“我国西北干旱区陆气相互作用野外观测试验”，该试验在甘肃的敦煌、临泽和青海的五道梁各设有一个常年微气象观测站。2001 年 5 月 25 日至 6 月 17 日已在甘肃敦煌观测站进行了 20 余天的以陆面过程为目标的加强观测试验（简称“敦煌试验”）。“敦煌试验”不仅在敦煌双墩子戈壁设有微气象中心站，而且在绿洲内的敦煌气象站观测场设置了 PAM 站，在绿洲西部靠近戈壁的过渡带设立了自动气象站，它们的地理分布如图 1 所示。期间还在戈壁微气象中心站配有 10 多天的系留气球观测，在敦煌气象站配有 10 多天的小球探空观测。

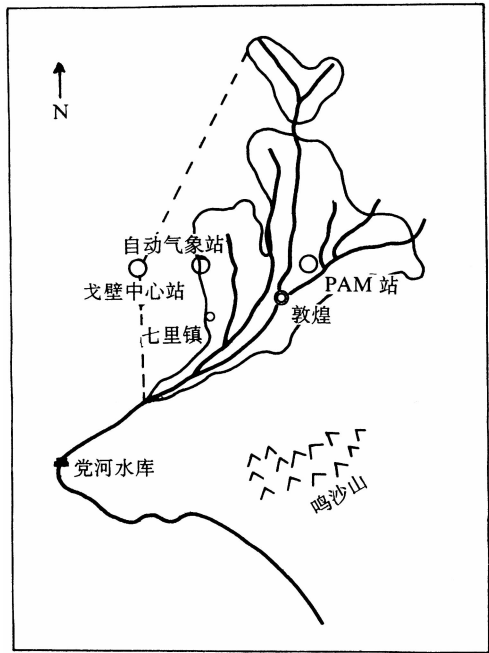


图 1 “敦煌试验”观测站分布示意图

本文所用资料仅是“敦煌试验”在敦煌双墩子戈壁微气象中心站的观测资料。

戈壁微气象中心站在“敦煌试验”期间的观测项目主要包括铁塔的风、温、湿梯度观测，地表各辐射分量观测，地表和土壤温度观测，土壤气湿观测和土壤热流量观测；还有超声观测的风、温、湿脉动量，系留气球观测的数百米高度内的气压、风速、风向、温度、湿度。铁塔的风、温、湿共有 4 层，分别在 18、8、4、2 m（4 m 和 2 m 在 6 月 5 日后分别移到 2 m 和 1 m 高处），并在 10 m 高处有风向观测；辐射分量有直接辐

射、总辐射、反射辐射、大气向下长波辐射、地表向上长波辐射，它们安装在约 1.5 m 高的架子上；地表有三个温度感应头，互为 120°；土壤温度共六层，其深度分别为 5、10、20、40、80、180 cm；土壤气湿感应头在 20、40、80 cm 三层；土壤热流板在 2.5 和 7.5 cm；超声仪感应头在 2.9 m 高，与之配套的实时处理系统能直接得到半小时或 1 小时的平均动量、感热和潜热通量。系留气球的探测高度视当时风速而定。辐射分量的观测精度在 5% 以内，其他仪器的观测精度与文献 [10, 11] 介绍的相当。

敦煌双墩子戈壁微气象中心站位于 (40°10'N, 94°31'E)。如图 1 所示。该站在敦煌绿洲西侧的双墩子戈壁，距敦煌绿洲边缘的最近距离大约为 7 km，距偏南方的鸣沙山大约 20 ~ 30 km。该站观测仪器和附近建筑物分布如图 2 所示。该站海拔高度为 1 150 m，地表年平均大气压为 873 hPa，年平均降水大约为 39 mm，年平均蒸发潜力为 3 400 mm。由于其盆地地形，盛行西风在其西侧安西县境内受阻回旋，如图 3 所示，观测站主要以东风为主，占到总频数的 49%，而北风、东风和南风分别为 21%、18% 和 12%。

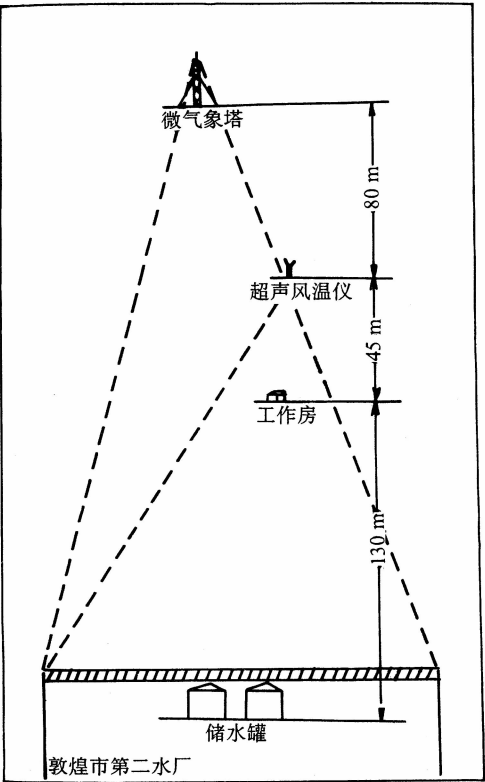


图2 戈壁中心站示意图

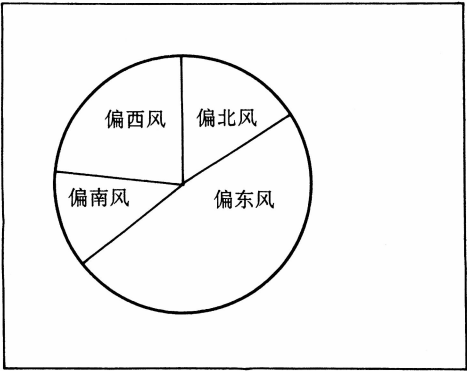


图3 戈壁站风速统计图

3 不同天气条件下热量和辐射平衡

本文选择典型晴天、阴天和降水天的个例，比较它们的地表热量平衡、辐射平衡和土壤温度的日变化特征，分析不同天气对地表热量和辐射平衡的影响。其中晴天选 6 月 3 日，阴天选 6 月 11 日，降水天气选 6 月 12 日。

图 4 是敦煌戈壁夏季典型晴天、阴天和降水天气的地表辐射平衡的日变化比较。晴天时，表现出了标准的地表辐射平衡的日循环形态。总辐射最大几乎接近 1 000 W m⁻²，这是以往观测^[7]很少见到的；大气向下长波辐射基本上稳定地维持在 300

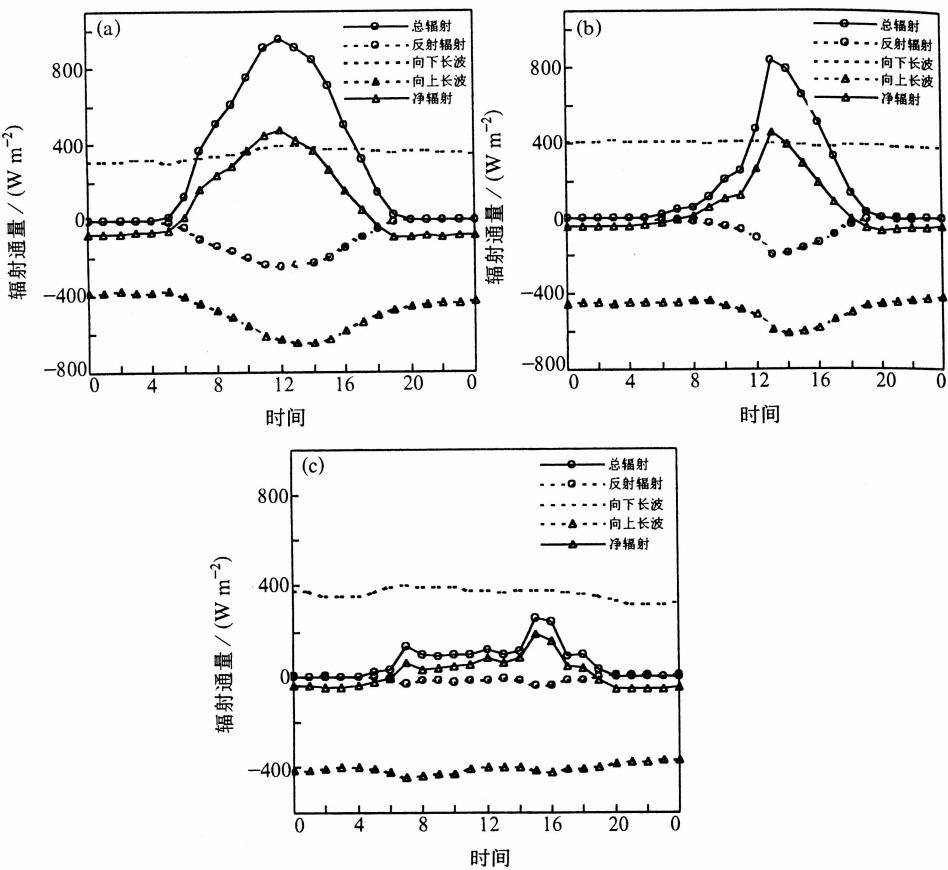


图4 敦煌戈壁夏季典型天气的地表辐射平衡的日变化比较
(a) 晴天; (b) 阴天; (c) 降水

W m^{-2} 过些, 在白天稍微有点增加; 地表向上长波辐射基本在 400 W m^{-2} 以上, 白天峰值可超过 600 W m^{-2} 以上, 最大变幅在 200 W m^{-2} 以上; 地表反射辐射的峰值可超过 200 W m^{-2} ; 净辐射的峰值接近 400 W m^{-2} 。总辐射、大气向下长波辐射、地表向上长波辐射和地表反射辐射的日积分值分别为 28.68 、 32.42 、 44.06 和 $7.42 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 净辐射的日积分值则为 $10.33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 是总辐射的 $1/3$ 多些。

阴天时, 地表辐射平衡虽然仍然有明显的日循环规律, 但远不如晴天的规则。如果以晴天为基准, 总辐射和反射辐射明显减弱; 向上长波辐射夜间有所增加, 白天有所减少; 向下长波辐射增加较多, 日变化不再明显; 净辐射的变化追随总辐射, 但减弱不如总辐射明显。总辐射、向下长波辐射、向上长波辐射和地表反射辐射的日积分值分别为 15.62 、 33.61 、 41.12 和 $3.96 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 净辐射的日积分值则为 $4.03 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 不到总辐射的 $1/3$ 。

降水天时, 辐射平衡会有很大改变, 已不再有平时日循环规律。总辐射和地表反射辐射都已变得很小; 大气向下长波辐射比晴天时大, 比阴天时小; 地表向上长波辐射夜间差别不明显, 在白天比晴天和阴天都小得多; 净辐射也非常小, 最大值不超过 200 W m^{-2} 。总辐射、向下长波辐射、向上长波辐射和地表反射辐射的日积分值分别为

5.14、31.81、34.52 和 1.18 MJ m⁻² d⁻¹；净辐射的日积分值则为 1.2 MJ m⁻² d⁻¹，大体为总辐射的 1/4。

图 5 是敦煌戈壁夏季典型晴天、阴天和降水天气的地表热量平衡的日变化比较。可见，晴天时，地表热量平衡主要以感热输送为主，潜热通量比其小两个量级，黑河

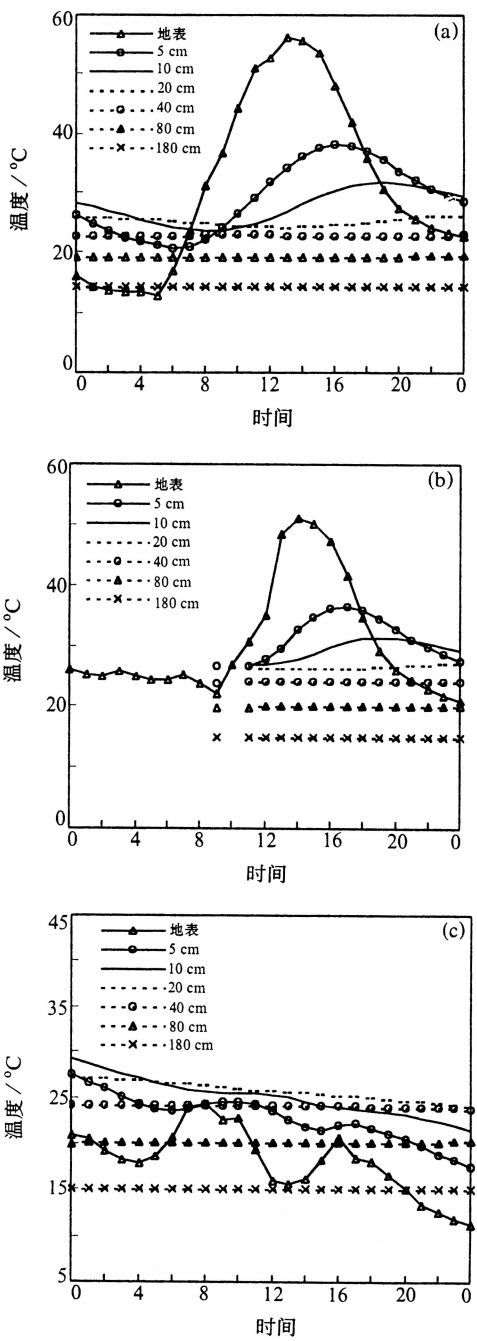
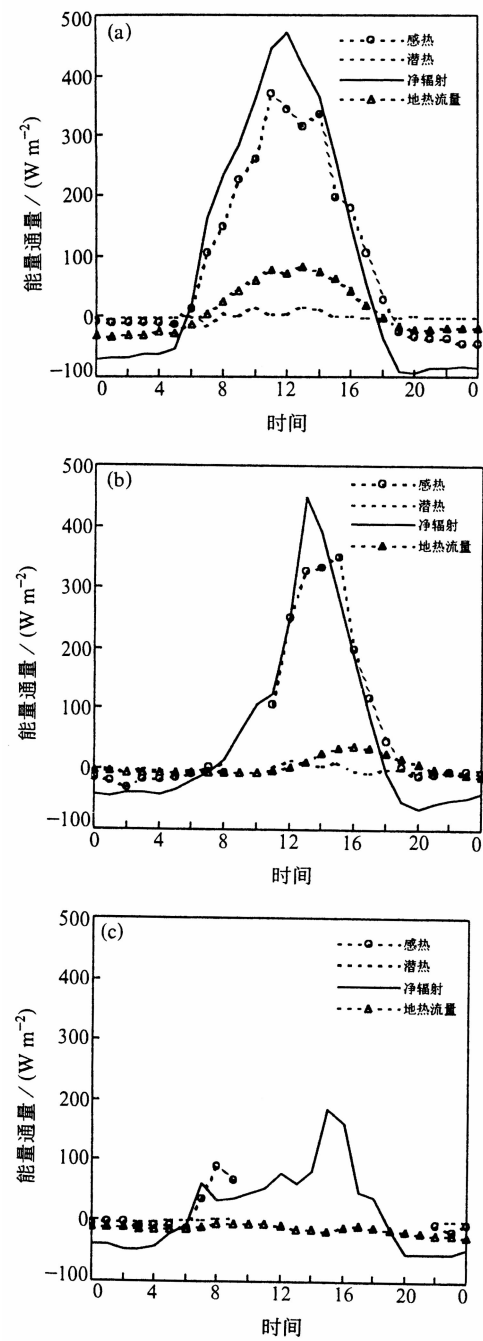


图 5 敦煌戈壁夏季典型天气的地表热量平衡的日变化比较，(a) 晴天；(b) 阴天；(c) 降水

图 6 敦煌戈壁夏季典型天气的地表和土壤温度的日变化比较，(a) 晴天；(b) 阴天；(c) 降水

流域戈壁观测结果与此不同的是潜热通量比感热输送大约小一个量级^[8]；地热流量峰值不超过 100 W m^{-2} 。感热、潜热和地热流量的日积分值分别为 8.64、0.17 和 $1.17 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，它们分别占到净辐射的 83.6%、1.64% 和 11.32%，不平衡部分不到净辐射 4%。

阴天时，感热、潜热和地热流量的日积分值分别为 6.29、0.11 和 $-0.37 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，它们分别占到净辐射的 155.6%、2.73% 和 9.18%，不平衡部分占到净辐射 40% 左右，这是土壤释放热贮存量的结果。降水天气时，热流量几乎一直是负值，有更多的土壤热贮存量释放，感热和潜热虽然停止了观测，但从以往的研究^[12]看它们的值都非常小，潜热比感热大些。

地表辐射和热量平衡的结果必然反映在地表和土壤温度的变化上。图 6 给出了敦煌戈壁夏季典型晴天、阴天和降水天地表和土壤温度的日变化比较。晴天，地表温度峰值超过 55°C ，这是相当高的；地表、5 cm 和 10 cm 深土壤温度日变化表现为正午为峰值的准正弦曲线，随深度增加峰值滞后时间增长，而 20 cm 深土壤温度日变化却表现为振幅很小的反位向变化；40 cm 以下土壤温度几乎不再有明显的日变化信号，这比通常认为的 100 cm 深度要浅。地表和土壤温度的日变化的基本形态非常符合经典的观测结果^[13]。但敦煌戈壁土壤温度的活动层基本在 10 cm 范围以内，这一活动层比以往在其他地区观测到的要薄（一般在 20 cm 范围以内^[13]）；在同样深度下，土壤温度变化比地表温度变化滞后的时间也要长。这都与敦煌戈壁热扩散很小有关^[14]。

阴天时，地表和土壤温度日变化的振幅明显减小，但日变化特征仍然清晰，并与晴天时的规律相似。降水天时，地表和土壤浅层温度剧降，其最大值不超过 30°C ，地表和土壤温度日变化不再表现为日循环规律，而是随时间减小；并且在地表和土壤浅层（5 cm 和 10 cm）温度日变化明显出现降水引起的凹陷，在 20 cm 和 40 cm 表现出的是近似线性递减。

4 气候平均的热量和辐射平衡特征

以往认为干旱区多为晴天，典型晴天的地表热量和辐射平衡特征基本可以代表其季节性气候特征，但到底有多大的代表性我们并不清楚。事实上，晴天的特征只代表了干旱区地表热量和辐射平衡的背景特征，上一节已表明云和降水产生的扰动会使背景特征有较大改变，这也会造成平均的气候特征与作为背景的晴天特征的差异。为此，给出了敦煌地区 5 月 25 日~6 月 17 日地表辐射平衡、热量平衡和土壤温度（包括地表）的平均日变化比较（图 7）。平均的地表辐射平衡、热量平衡和土壤温度的日变化与晴天时的特征在形态上保持了较好的一致性，这说明晴天时的地表辐射平衡、热量平衡和土壤温度有一定代表性，云和降水的影响是有限的。但是由于云和降水天气的扰动，使平均地表总辐射和反射辐射明显地被削弱，总辐射峰值削弱了 150 W m^{-2} 以上；向上长波辐射也相对小一些，大概低于晴天 50 W m^{-2} 左右；向下长波辐射所受影响不大。由于对平均总辐射的削弱，平均净辐射和感热通量也比晴天明显减弱，峰值减弱幅度大约分别为 70 W m^{-2} 和 50 W m^{-2} 。地表和浅层土壤平均温度也显著比晴天

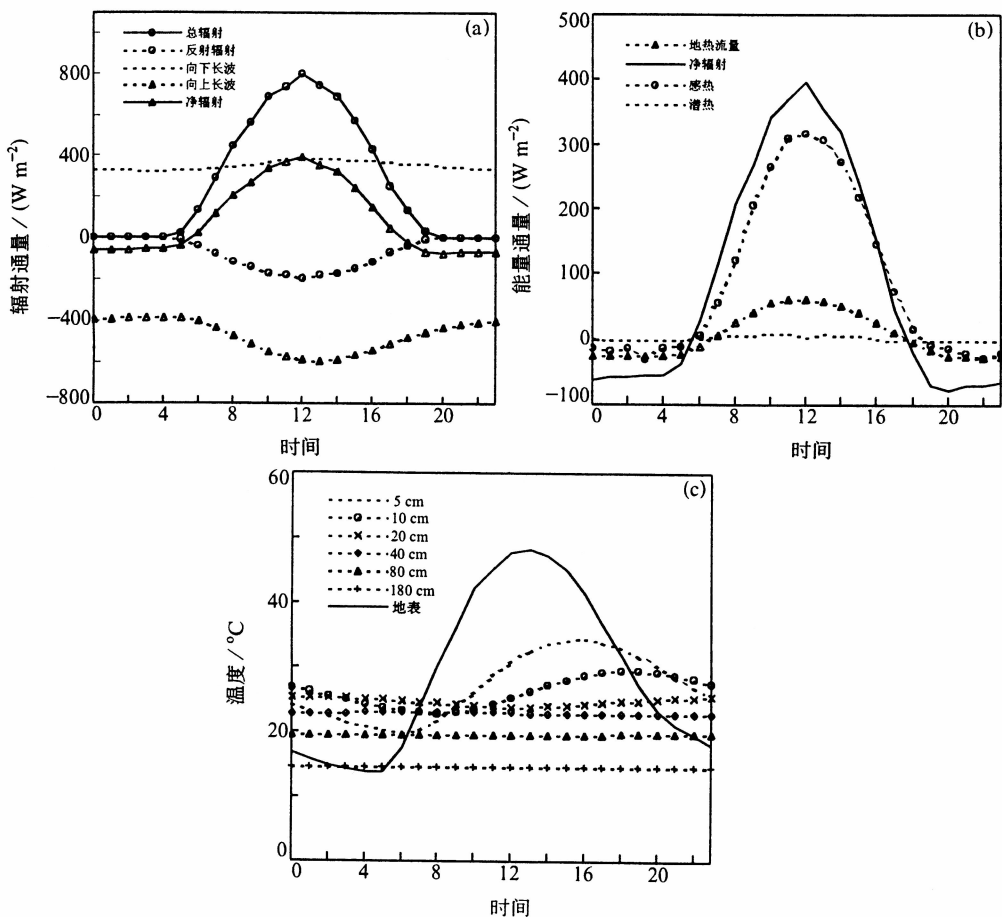


图7 敦煌地区5月25日~6月17日地表辐射平衡(a)、热量平衡(b)和土壤温度(c)的平均日变化比较

减小，地表温度日变化峰值低于晴天8℃左右。

地表总辐射、向下长波辐射、向上长波辐射、反射辐射的平均日积分值分别为23.92、26.73、36.67和5.98 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ；地表净辐射、感热、潜热和地热流量的平均日积分值分别为9.10、7.8、0.35和0.87 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ，不平衡部分约为总辐射的

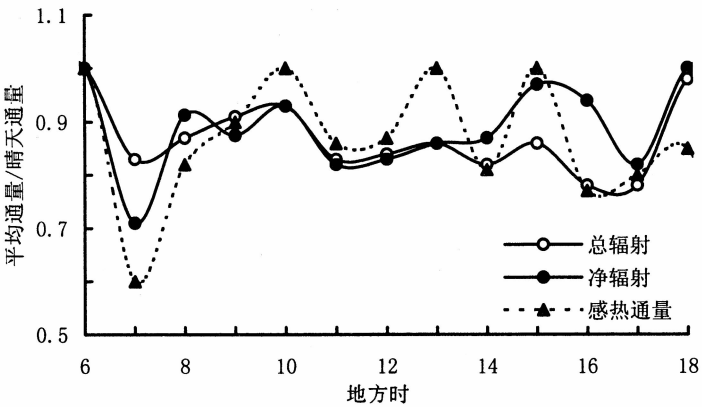


图8 敦煌戈壁5月25日~6月17日平均的总辐射、净辐射和感热通量与典型晴天的比值日变化

3%左右。

图8给出了5月25日~6月17日平均的总辐射、净辐射和感热通量与典型晴天的比值日变化。可见，对总辐射的比值最小，净辐射次之，感热相对较大。这是由于云和降水对总辐射削弱引起的净辐射和感热通量损失能通过对有效辐射增加来补偿，感热损失还能通过地热流的释放进一步补偿。在白天，除总辐射较弱的日出和日落前后，其余时间的比值都大于0.8，这说明云和降水对该地区气候平均的辐射能量的扰动并不很强。

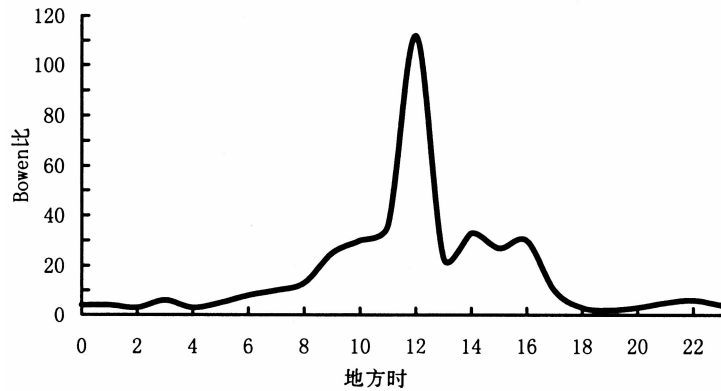


图9 敦煌戈壁5月25日~6月17日平均的Bowen比日变化

图9给出的敦煌戈壁5月25日~6月17日平均的Bowen比日变化特征表明Bowen比全天基本大于1，白天Bowen比基本在10~100范围之内，从感热和潜热通量的日积分值估算的晴天平均Bowen比约为52。而从以往在黑河地区观测的夏季气候平均的感热和潜热通量^[15]估算，其夏季气候平均的Bowen比应该在10左右，几乎小敦煌地区Bowen比近一个量级。

季气候平均的Bowen比应该在10左右，几乎小敦煌地区Bowen比近一个量级。

5 结论和讨论

敦煌戈壁地区的地表辐射平衡、热量平衡及表面和土壤浅层温度随天气条件有很大变化。晴天时，表现出了标准的地表辐射和热量平衡的日循环形态。总辐射日变化峰值最大接近 $1\,000\text{ W m}^{-2}$ ，这是其他区域很少见到的。晴天地表辐射平衡分量中总辐射、向下长波辐射、向上长波辐射和地表反射辐射的日积分值分别为28.68、32.42、44.06和 $7.42\text{ MJ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ，净辐射的日积分值则为 $10.33\text{ MJ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ，是总辐射的1/3多些；地表热量平衡分量中感热、潜热和地热流量的日积分值分别为8.64、0.17和 $1.17\text{ MJ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ，它们分别占到净辐射的83.6%、1.64%和11.32%，不平衡部分很小。晴天的这些特征实际上表示了干旱区的背景特征。

阴天时，地表辐射和热量平衡虽然仍然表现明显的日循环规律，但不如晴天时规则，总辐射、净辐射和感热都比晴天明显减弱；向上长波辐射夜间有所增加，白天有所减少；向下长波辐射增加较多，日变化不再明显；长波有效辐射比晴天有所增加，但远不足以补偿对短波辐射的损失。降水天时，地表辐射平衡已不再有平时的日循环规律；除长波辐射变化很小而外，总辐射、反射辐射和地表热通量都已很小；净辐射的日积分值仅为总辐射的1/4左右；地表热量不平衡部分很大，这是土壤释放热贮存量的结果。阴天和降水天时的日变化特征表示了在晴天背景特征基础上的扰动大小。

地表和土壤温度的日变化的基本形态非常符合经典的观测结果。但土壤活动层即

土壤温度明显变化层基本在 10 cm 范围以内, 40 cm 以下土壤温度几乎不再有日变化信号, 这都比以往认为的要浅近一倍 (一般认为土壤活动层在 20 cm 范围以内, 并且在 100 cm 以下没有温度日变化信号)。在晴天时, 地表高温和大温度日较差也是平时其他观测很少见到的。

虽然在干旱地区多为晴天, 但平均的地表和热量平衡还是受到云和降水的一定扰动影响, 总辐射、反射辐射、净辐射、感热和向上长波辐射比晴天要小, 对向下长波辐射的影响则不太大。平均辐射和热量通量与晴天的辐射和热量通量的比值在 0.8 以上。这说明: 在敦煌戈壁, 云和降水天气对气候平均的地表辐射和热量平衡的在扰动不很大。敦煌戈壁的气候平均 Bowen 比比黑河和其他干旱区大一个量级左右, 这反映了该地区极端干旱的气候特点。

致谢: 本文研究过程中, 卫国安研究员和胡泽勇副研究员提供了资料, 黄荣辉院士和胡隐樵研究员给予了指导, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Dickinson, R. E., Land-atmosphere interaction, U. S. Nation Report international Union of Geodesy and Geophysics 1991 ~ 1994, 1995, 917 ~ 922.
- 2 Henderson - Sellers, A., The project for intercomparison of land - surface paramterization schemes, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **74** (7), 1335 ~ 1348.
- 3 张强, 简评陆面过程模式, *气象科学*, 1998, **18** (3), 295 ~ 304.
- 4 胡隐樵、张强, 开展干旱环境动力学研究的若干问题, *地球科学进展*, 2002, **16** (1), 18 ~ 23.
- 5 苏从先、胡隐樵、江灏等, 河西地区热量平衡和蒸散的初步观测研究, *高原气象*, 1987, **6** (3), 217 ~ 224.
- 6 高由禧, “HEIFE” 专刊 (1) 前言, *高原气象*, 1992, **9** (2), 前言.
- 7 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*, 1992, **11** (2), 113 ~ 119.
- 8 邹基玲、候旭宏、季国良, 黑河地区夏末太阳辐射特征的初步分析, *高原气象*, 1992, **11** (4), 381 ~ 388.
- 9 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.
- 10 张强、胡隐樵, “HEIFE” 中 “中方” 微气象塔的仪器精度观测误差, *高原气象*, 1992, **11** (4), 460 ~ 469.
- 11 王介民、崔铁民、玉川一郎, 一种湍流数据采集与实时处理系统, *高原气象*, 1992, **11** (4), 451 ~ 459.
- 12 张强、胡隐樵, 降水强迫对戈壁局地气候系统水、热输送的影响, *气象学报*, 1997, **55** (4), 492 ~ 498.
- 13 Stull, R. B., 杨长新译, *边界层气象导论*, 北京: 气象出版社, 1991, 300 ~ 304.
- 14 Zhang Qiang, Gao Xiaoyan, Wei Guoan, and Huang Ronghui, Observation and study of land surface parameters over Gobi in typical arid region, *Advance of Atmospheric Sciences*, 2002, **19**, 121 ~ 135.
- 15 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.

The Influence of Synoptic Conditions on the Averaged Surface Heat and Radiation Budget Energy over Desert or Gobi

Zhang Qiang^{1,2)}, and Cao Xiaoyan^{2,3)}

1) (*Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020*)

2) (*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

3) (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract By using the micrometeorology data of “the Dunhuang Experiment” carried out during the period from May 25 to June 17, 2000 in Gobi in the Northwest arid region, the characteristics of the daily variations of the surface radiation budget, heat budget, and soil temperature over Gobi under different types of synoptic conditions including a clear day, a cloudy day and precipitation day in a extreme arid region are analyzed. It is shown that, on their daily variations, there is a typical regular daily circle on a clear day, there is a irregular daily circle on a cloudy day, and there is no daily circle on precipitation day. The comparison of micrometeorological characteristics under the three types of synoptic conditions shows that there is much different among features of radiation and heat budget under the three synoptic conditions, the characteristics of the averaged daily variation during the period of the experiment is very close to ones under the condition of a clear day. It means that the influence of special synoptic processes on climatic character of radiation and heat budget. The ratio of the values of the global radiation, the net radiation, and the sensible heat flux averaged during the experiment to ones on a clear day are all bigger than 0.8. The Bowen ratio is bigger than 1 on the full averaged daily variation, is bigger than 10 in the daytime, and the biggest value of Bowen ratio in the daytime exceeds 100.

Key words: Dunhuang Experiment; desert or Gobi; radiation budget; heat budget