

# 科尔沁沙地流动沙丘与玉米地辐射特性比较分析\*

王 凯<sup>1)</sup> 张宏升<sup>1)</sup> 刘辉志<sup>2)</sup> 杜金林<sup>1)</sup> 胡 非<sup>2)</sup> 陈家宜<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (北京大学物理学院大气科学系,暴雨与旱涝灾害教育部重点实验室,北京 100871)

<sup>2)</sup> (中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室,北京 100029)

## 摘 要

利用 2001 年夏季内蒙古科尔沁沙地地区大气边界层实验观测资料,对比分析了流动沙丘和临近流动沙丘的玉米地两种典型下垫面的辐射通量特征。结果表明:流动沙丘和玉米地地区的总辐射与大气逆辐射相近,差异不足 2%。净辐射、地表反照率、有效辐射存在较大差异,流动沙丘的净辐射明显小于玉米地,其中反照率差异的贡献约为 60%,长波辐射差异的贡献约为 40%。流动沙丘的反照率、有效辐射明显大于玉米地,反照率高出中国西北 HEIFE 实验沙漠地区约 10%,有效辐射则小于沙漠地区。

关键词:辐射 流动沙丘 人类活动 观测法

## 引 言

地球表面与大气之间相互作用的重要过程之一是地表与大气之间能量交换。太阳活动、地核能量释放、生态环境改变和人类活动等因素对气候变化的影响主要通过对地表热量和辐射的改变来实现,对气候变化的响应是通过地表热量和辐射过程来传递。因此,在不同下垫面开展辐射及其传输特征的观测研究,对于解释气候变化中的许多现象和变化机理有十分重要的作用<sup>[1]</sup>。几十年来,中外学者对地-气交换过程开展了大量的实验研究和理论工作,并取得了一系列研究成果。例如,世界气候研究计划组织的一系列陆面过程野外观测试验<sup>[2]</sup>:如在法国南部潮湿地区开展的 HAPEX 实验<sup>[3]</sup>和在美国 Kansas 半干旱地区进行的 FIFE 实验<sup>[4]</sup>等。国内,1979 年第一次青藏高原气象科学实验(QXP MEX)和 1998 年开展的第二次青藏高原气象科学实验(TIPEX),在高原气候和辐射特征研究方面取得重要进展<sup>[5~6]</sup>。随着全球荒漠化问题的日益突现,针对生态系统脆弱的干旱、半干旱地区,加强地气系统间物质、能量交换实验和研究显得尤为重要。我国对西部干旱、半干旱地区热量和辐射平衡过程的研究自 20 世纪中期逐渐展开<sup>[7~8]</sup>,如 20 世纪 90 年代初,由中日两国科学家合作开展的黑河地区地气相互作用的观测实验研究(HEIFE),研究了西北干旱地区典型下垫面辐射能收支和辐射物理性质等,并且对干旱地区陆面过程提出了一些新认识<sup>[9]</sup>。

本文利用 2001 年夏季在内蒙古科尔沁沙地地区进行的大气边界层实验资料,对比分

\* 本研究获国家自然科学基金委员会(40175005)和国家重点基础研究项目资助(G1999043400)。

2003-04-01 收到,2004-07-26 收到修改稿。

析流动沙丘和临近流动沙丘的玉米地地区两种典型下垫面的辐射通量特征,研究不同下垫面状况对地面辐射平衡的影响,为研究农牧交错地区的辐射特征、能量输送和农田小气候特征提供基本事实。

## 1 资料获取与处理

### 1.1 实验场地和仪器概况

实验观测站位于内蒙古哲里木盟赫亦乌苏村附近的流动沙丘和玉米地地区。地理位置为  $42^{\circ}58' N, 120^{\circ}43' E$ , 平均海拔高度 363 m, 全年降水量为 200 ~ 300 mm 左右, 属于典型半干旱地区。其中, 流动沙丘观测站所在的沙丘呈带状分布, 基本代表科尔沁沙地流动沙丘的下垫面特征。玉米地观测站位于流动沙丘观测场西约 5 km 处的玉米地中央, 植株平均高度约为 1.5 m。流动沙丘和玉米地两个实验站的观测平台、仪器、系统, 观测方法和资料处理方法等完全相同。辐射观测仪器采用美国 Eppley 公司生产的短波辐射表和红外辐射表各 4 台, 流动沙丘和玉米地的仪器架设高度分别为 1.5 m 和 2.3 m, 分辨率为 1%。

### 1.2 资料处理和质量控制

各辐射通量连续观测, 采样间隔为 10 min。在实际分析时, 对资料进行 30 min 滑动平均。长波辐射观测采取了强制通风措施和罩温修正, 以提高数据质量。本文选取了基本为晴朗少云天气的 2001 年 8 月 9 日至 14 日共 6 天的观测数据进行分析(见图 1)。

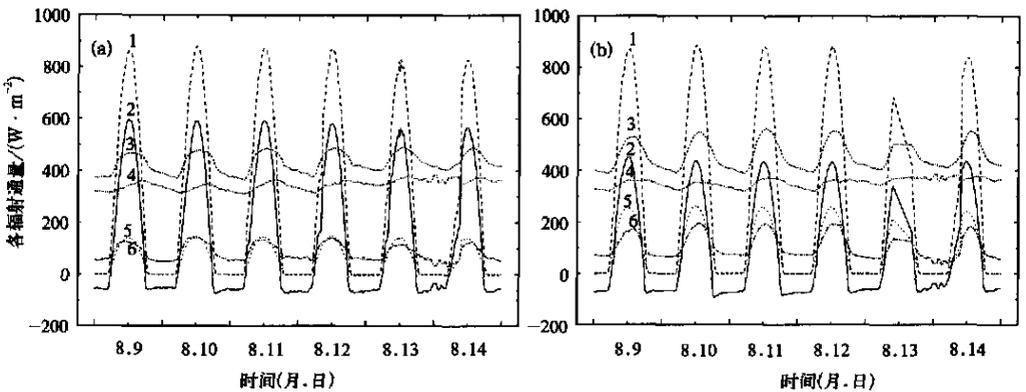


图 1 各辐射通量随时间的变化关系 (a) 玉米地地区, (b) 流动沙丘地区  
(1 总辐射, 2 净辐射, 3 地面长波辐射, 4 大气逆辐射, 5 地面反射辐射, 6 有效辐射)

所有观测仪器在野外观测现场进行了严格的水平比较, 图 2 给出了两个观测站使用的 4 台短波辐射表和 4 台长波辐射表在同一水平高度上的比较结果。同时, 每个实验站涉及的 2 台短波辐射表和 2 台长波辐射表, 分别在各自实验场地再次实施了相应的水平对比观测(图略)。可以看出不同辐射表之间的相对误差小于 2%, 基本符合仪器性能指标, 各辐射表具有较好的互换性和一致性。

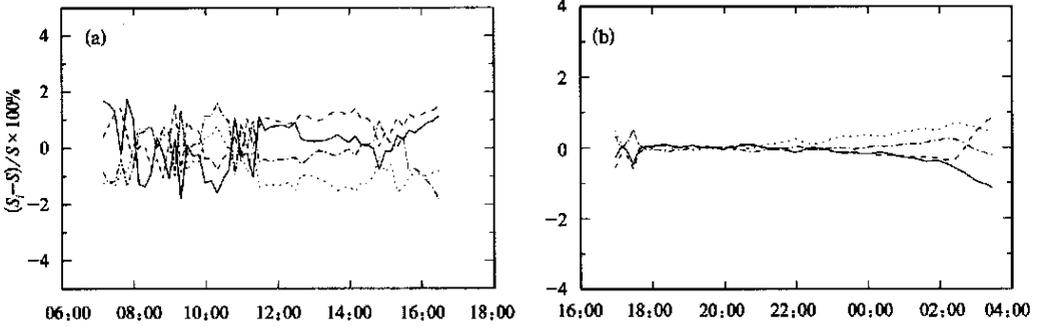


图2 辐射表水平比较相对误差的时间序列曲线  
(a) 4台短波辐射表,(b) 4台长波辐射表

## 2 结果分析

### 2.1 总辐射

到达地球表面的太阳总辐射由直接辐射和散射辐射组成,与太阳高度角有直接关系,并受大气透明度状况和云量、云状的影响。在晴天少云的天气条件下,散射辐射很小,总辐射受直接辐射影响而有明显的日变化。

图3给出流动沙丘和玉米地两种下垫面辐射通量的平均日变化。可见,流动沙丘和

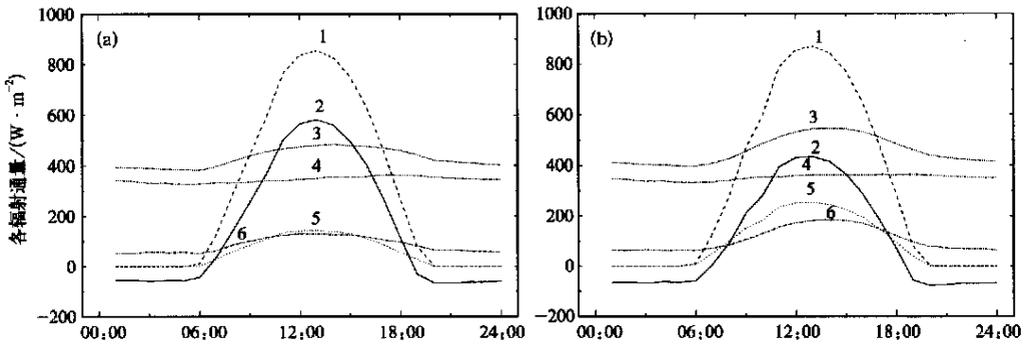


图3 各辐射通量观测值的平均日变化 (a) 玉米地地区和 (b) 流动沙丘地区  
(1 总辐射,2 净辐射,3 地面长波辐射,4 大气逆辐射,5 地面反射辐射,6 有效辐射)

玉米地的太阳总辐射日峰值分别为  $870 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $855 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,因两观测站相距很近,可以忽略影响到地面太阳辐射的纬度因子;晴天条件下两观测站的整层大气中影响入射短波辐射的大气成分基本相同,从而到达地面的短波辐射也基本相同。虽然两观测站的太阳总辐射的日变化规律非常接近,但比较两下垫面总辐射的日总量值(见表1),可以发现流动沙丘略高于玉米地,考虑到观测仪器精度限制,总辐射观测值存在差异尚未有充分理由解释。流动沙丘地区的总辐射日总量与 HEIFE 实验的沙漠站相当,而玉米地地区则略高于 HEIFE 实验的绿洲站(见表1),其差异应与两地的大气透明度和水汽含量等因素有关。

表 1 夏季晴天状况下本研究和 HEIFE 实验的沙漠站和临泽站(绿洲)辐射平衡

	日总量观测结果比较				
	$Q$	$F$	$B$	$F/Q$	$B/Q$
流动沙丘地区	25.6	8.9	8.8	0.35	0.34
玉米地地区	24.9	7.2	13.2	0.29	0.53
沙漠 <sup>[10]</sup>	25.4	11.4	7.8	0.45	0.31
临泽(绿洲) <sup>[10]</sup>	23.4	3.9	16.4	0.17	0.70

注:  $Q$ :总辐射,  $F$ :有效辐射,  $B$ :净辐射。

## 2.2 地表反照率

地表反照率是控制地面吸收短波辐射和可能转化为感热和潜热通量的净能量的一个重要因子。图4给出流动沙丘和玉米地两种下垫面地表反照率的平均日变化规律。可见,两种不同下垫面的反照率虽然在量值上相差较大,但有相似的日变化规律,均呈现U字型。在下垫面性质和植被条件变化不大的情况下,土壤湿度是决定反照率的关键因素,比较两种下垫面在晴天和阴天的反照率变化情况(见表2),说明阴天土壤湿度增加,地表的吸收辐射增加,使反照率降低。流动沙丘的反照率日平均值为0.342,与1993年李胜功等人在类似下垫面的观测结果相符合<sup>[11]</sup>,反映流动沙丘下垫面地表特征的变化很小;玉米地地区的反照率日平均值为0.200。流动沙丘的观测结果高于黑河地区沙漠的观测结果,反照率最小值为0.29比黑河沙漠区的0.26高约10%,与季国良等人给出的8%的差异相差不大<sup>[12]</sup>,而玉米地的反照率明显低于流动沙丘,这将对科尔沁沙地地区两种典型下垫面的净辐射特征的差异有很大影响,反映了人类活动对沙地的影响。

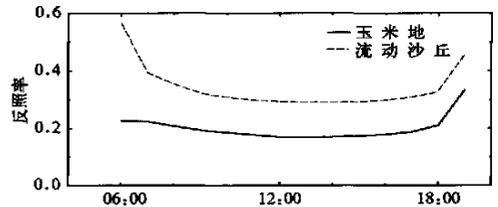


图 4 流动沙丘和玉米地地区地表反照率平均日变化曲线

表 2 流动沙丘与玉米地晴天和阴天的日平均反照率和长波辐射

	天气状况	日总量的观测结果比较			
		$A$	$L_i$	$L_o$	$F$
玉米地地区	晴天	0.200	28.7	35.9	7.2
	阴天	0.181	33.5	35.8	2.3
流动沙丘	晴天	0.342	29.2	38.1	8.9
	阴天	0.286	33.6	36.4	2.8

注:(1)  $A$ :反照率,  $L_i$ :大气逆辐射,  $L_o$ :地面长波辐射,  $F$ :有效辐射;(2) 阴天资料取自2001年8月3日。

## 2.3 长波辐射和有效辐射

### 2.3.1 长波辐射

地面长波辐射可表示为:

$$L \uparrow = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式(1)中,  $\varepsilon$ 为地表比辐射率,仅与地表特征有关;  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 为 Stefan

Boltzmann 常数;  $T$  为地表温度。

流动沙丘和玉米地两种下垫面地面长波辐射的平均日变化规律与各自的地表温度日变化规律一致(见图3)。流动沙丘下垫面地面长波辐射的最小值为  $397 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 出现在太阳升起的 05:00; 玉米地的最小值为  $382 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 也出现在 05:00, 与地表温度最低出现时刻相一致。地面长波辐射最大值出现的时间也与地表温度最大值出现的时刻一致, 流动沙丘的最大值为  $546 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 出现在 13:00; 玉米地的最大值为  $483 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 亦出现在 13:00, 且午后时段的数值大于午前时段。由于两观测站下垫面性质的巨大差异, 地表温度日变化也存在很大不同。流动沙丘上的地表温度日变化较大, 地面长波辐射的日变化幅度达  $149 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 玉米地地面长波辐射大部分时间内的变化均较为平缓, 日较差仅为  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。与阴天比较结果(见表2), 可以明显地看出由于地表温度的降低, 阴天两观测站的地面长波辐射值均小于晴天值。

在晴天条件下, 流动沙丘与玉米地两站的大气逆辐射日峰值非常接近, 最大值分别为  $364 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $363 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最小值分别为  $334 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $328 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。两观测站大气逆辐射的日峰值均出现在午后, 最小值出现在日出前, 但峰值出现的时间较地面长波辐射滞后 2~3 h。由于影响大气逆辐射的主要因子是气温、水汽含量和云量, 在水汽含量很小且日变化较小的情况下, 大气逆辐射峰值滞后现象只能解释为云的影响, 验证了大气逆辐射随云量(特别是低云量)增加而增加的这一结论。因此, 午后多云的特点很大程度上影响了大气逆辐射, 从而影响有效辐射。由于阴天云量增多, 空气中水汽含量增大, 流动沙丘和玉米地的大气逆辐射均大于各自在晴天状况下的数值(见表2)。

### 2.3.2 有效辐射

有效辐射为地面长波辐射和大气逆辐射之差, 与下垫面的性质和大气状况有密切关系。图3中同时给出流动沙丘和玉米地两种下垫面的有效辐射平均日变化曲线。有效辐射的日变化规律与地面长波辐射相近, 最小值和最大值分别出现在凌晨 02:00~03:00 和正午前后, 流动沙丘和玉米地的最小值分别为  $63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最大值分别为  $184 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $130 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 玉米地的有效辐射全天小于流动沙丘。流动沙丘的有效辐射日变化较为剧烈, 而玉米地要平缓很多, 变化幅度分别为  $121 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。流动沙丘有效辐射平均日总量明显大于玉米地地区, 远小于同期黑河沙漠站的观测值, 而玉米地的值则远大于黑河绿洲站的观测值(表1)。另外, 阴天有效辐射值较晴天有大幅的减小(见表2), 与前文关于大气逆辐射和地面长波辐射的分析相一致。

### 2.4 净辐射

由图3可见, 流动沙丘和玉米地两种不同下垫面的净辐射变化规律一致, 只是数值存在差异。净辐射  $R_n$  可由下式计算得到:

$$R_n = S \downarrow (1 - \alpha) - F \quad (2)$$

式(2)中,  $S \downarrow$  为太阳总辐射,  $\alpha$  为地表反照率,  $F$  为有效辐射。

由于地表反照率和地面有效辐射的显著差异, 使得流动沙丘和玉米地不同下垫面的净辐射值存在明显差异。流动沙丘的净辐射值远小于玉米地, 流动沙丘和玉米地的日总量分别为  $8.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $13.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  (见表1)。两观测站到达地面的总辐射和大气逆辐射基本相同, 净辐射的差异主要是由两地地面反照率和地面长波辐射的差异造成的,

即:流动沙丘和玉米地地区净辐射的差异是由地表状况和地表热力性质的差异造成的。由于地表反照率不同而导致短波净辐射差异的贡献约为 60%,地面热力性质不同而导致的地面长波辐射的差异其贡献约为 40%,前者大于后者。

### 3 结 论

本文主要利用 2001 年夏季内蒙古科尔沁沙地地区的大气边界层实验的晴天资料,对比分析了人类活动区和无人活动区下垫面各辐射平衡分量的特征,结论如下:

(1) 流动沙丘与玉米地两种下垫面的太阳总辐射相近,流动沙丘太阳总辐射观测值与中国西北戈壁沙漠地区相近,玉米地观测值则大于 HEIFE 实验的绿洲地区。

(2) 流动沙丘与玉米地的地表反照率存在明显差异,流动沙丘的反照率大于玉米地地区近 1 倍,高于 HEIFE 实验的沙漠地区。

(3) 流动沙丘与玉米地有效辐射的最大值出现在中午前后,而地面长波辐射出现在午后,流动沙丘的有效辐射大于玉米地地区,且均低于同季节的 HEIFE 实验沙漠地区;并且流动沙丘与玉米地的阴天有效辐射值较晴天均有大幅的减小。

(4) 流动沙丘与玉米地地区的净辐射平均日总量存在较大差异,分别为  $8.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $13.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其中反照率差异的贡献约占 60%,长波辐射差异的贡献约占 40%。

致 谢:在本文完成过程中,曾得到中国科学院寒区旱区工程与环境研究所赵哈林研究员、张东会研究员,中国科学院奈曼生态网络实验站全体工作人员,以及北京大学毛节泰教授、张霏琛教授、康凌博士的大力支持和热情帮助,在此表示诚挚的感谢和敬意。

### 参 考 文 献

- 1 Garratt J R. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary layer treatments — A review. *J Climate*, 1993, **6**: 419 ~ 449.
- 2 WMO: Report of the Third Session of the JSC Working Group on Land Surface Processes and Climate (Manhattan, Kansas, 29 June — 3 July 1987), 1987, WCRP-8, WMO/ TD- No. 232.
- 3 Andre J C, Goutorbe P, Perrier A. HAPEX-MOBILHY. *Bull Amer Meteor Soc*, 1986, **67**: 138 ~ 144.
- 4 Leo Fritschen, Ping Qian. Net radiation, sensible and latent heat flux densities on slopes computed by the energy balance method. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, **53**: 163 ~ 171.
- 5 章基嘉,朱抱真,朱福康,等. 青藏高原气象学进展. 北京: 科学出版社, 1988. 1 ~ 268.
- 6 卞林根,陆龙骅,逯昌贵,等. 1998 年夏季青藏高原辐射平衡分量特征. *大气科学*, 2001, **25**: 577 ~ 587.
- 7 李晓文,李维亮,周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究. *应用气象学报*, 1998, **9**(1): 24 ~ 31.
- 8 陆龙骅,周国贤,张正秋. 1992 年夏季珠穆朗玛峰地区的太阳直接辐射和总辐射. *太阳能学报*, 1995, **16**(3): 229 ~ 233.
- 9 胡隐樵,高由禧. 黑河实验(HEIFE) —— 对干旱地区陆面过程的一些新认识. *气象学报*, 1994, **52**: 285 ~ 296.
- 10 邹基玲,侯旭宏,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**: 381 ~ 387.
- 11 李胜功,原圃芳信,何宗颖,等. 奈曼沙漠化对草原地微气象特征性影响的研究. *大气科学*, 1994, **18**: 758 ~ 763.
- 12 季国良,邹基玲. 干旱地区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化. *高原气象*, 1994, **13**: 323 ~ 328.

## CHARACTERISTICS OF RADIATION BALANCE OVER MOVING DUNE AND FIELD AREA IN KEERQIN DESERT REGION OF CHINA

Wang Kai<sup>1)</sup> Zhang Hongsheng<sup>1)</sup> Liu Huizhi<sup>2)</sup> Du Jinlin<sup>1)</sup> Hu Fei<sup>2)</sup> Chen Jiayi<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ( *Department of Atmospheric Physics, Peking University, Key Laboratory of the Rain Storm, Drought and Waterlog of Ministry of Education, Beijing 100871* )

<sup>2)</sup> ( *LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029* )

### Abstract

The characteristics of the surface radiation components are analyzed by using the measurement data obtained over the moving dune and the field area in the Keerqin desert region of Nei Mongol, China in the summer of 2001. The results show that the characteristics of the radiation, such as global solar radiation and long wave radiation, over the moving dune area are similar to those over the field area. The value of net radiation over the moving dune area is obviously lower than that over the field area. Meanwhile, the value of albedo and the effective radiation over the moving dune are higher than those over the field respectively. The value of albedo over the moving dune exceeds that of the Desert station in HEIFE by 10%, and the effective radiation is lower than that of the Desert station.

**Key words:** Radiation Moving dune Human activity Observational method