

文章编号:1000-0550(1999)增-0840-06

沙漠层辐射热量传输的界面过程研究

——以古尔班通古特沙漠为例^①

魏文寿^{1,2} 董光荣³

1(中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐,830011) 2(中国科学院兰州冰川冻土研究所,兰州,730000)

3(中国科学院兰州沙漠研究所 兰州 730000)

摘要 根据古尔班通古特沙漠的自然与气候条件,对不同下垫面区域的太阳短波辐射量和地表与大气的长波辐射热量以及沙层热通量收支状况进行了测量分析。结果表明,流动沙漠层和固定沙漠层的热量传输差异主要是由地表状况、沙层性质和气温等因素决定的。流动沙漠区反射率和长波辐射大于固定沙漠区。沙漠层热通量随着沙层深度的增加而增大,而热量传输则随其深度的增加而减小,不同类型沙漠区地—气之间的热量传输过程,白天以感热、夜间以潜热的形式向大气传输,形成了沙漠地区对辐射热量特有的响应与反馈交换传输过程。同时,依据实测资料和地球表面热量平衡方程讨论了沙漠区域物理气候参数的变化特征,并进行了地—气界面热量过程耦合作用的模拟分析。

关键词 地—气界面 热通量 古尔班通古特沙漠

第一作者简介 魏文寿 男 1954年出生 博士 研究员 沙漠环境与气候变化研究

中图分类号 P931.3 **文献标识码** A

1 引言

近年来,陆面过程研究越来越多地受到地理学和气象学界的重视。地表面接受太阳短波辐射而加热,同时又以长波形式向大气辐射。在不同区域环境条件下的陆面状况,感热和潜热通量输送对区域气候变化都有重大的影响。尤其在大陆腹地中的干旱区,冬季积雪覆盖产生的冷源效应,使地表干而寒冷,低空形成逆温层;夏季沙漠产生的热源效应,使地表干而酷热,低空形成一层浅薄的热低压。这种效应对区域的气候影响起着非常重要的作用。特别是在沙漠区,热量交换表现出它独有的传输方式,也成为干旱区气候变化研究的重要因素。

目前国内外对陆面热量过程研究,一是采用整体输送系数方法计算通量,二是采用现代仪器直接测量热通量。前者计算应用范围广,但不能表征特殊区域实况;后者测量精度高,代表性强,而观测难度大,迄今为止,对于干旱沙漠层的地—气相互作用在温度场方面已有一定的研究^{1~3},但对于干旱区不同沙漠类型的热量交换以及表层热量传输则研究较少,特

别是在不受季风影响,四季均有降水,而蒸散远大于降水13倍之多的古尔班通古特沙漠的研究还是空白。

古尔班通古特沙漠,由于特殊的区域气候环境,使该沙漠形成了以固定半固定沙丘为主,又有流动沙丘组成的沙漠类型。作者根据不同沙丘类型进行的能量观测,较真实地反映了沙漠腹地的热量交换与传输,探讨了沙漠下垫面太阳辐射能量传输的界面过程,并对地—气界面相互作用以及不同沙丘类型之间热量正—逆反馈变化和沙漠影响气候的热力因素进行定量分析和模拟讨论。

2 实验区和仪器设备

本实验观测在古尔班通古特沙漠中进行,测量点分别设在沙漠腹地东部彩南油田流动沙丘区和沙漠东南缘阜康北部的固定沙丘区。

实验观测中仪器采用日本生产的EKO系列,有MS-42总辐射仪,MR-21反射率仪,CN-81热流板,MS-120光度仪,Eppley长波辐射仪,Victor VC-98数字微伏表以及温、压、湿、风等气象观测仪器。

^① 国家自然科学基金项目(批准号:49871004)资助

收稿日期:1999-04-06

实验观测资料整理中选取全晴天无云状况和微风、浮尘小的时期。数据选取时间为1996年9月18~23日,1997年7月17~25日,测量资料以每小时间隔采集一次。

3 观测结果分析

沙漠区辐射热量传输界面,分为太阳辐射热通量、长波辐射热通量和沙漠表层热通量传输过程。

3.1 沙漠区太阳辐射通量

测量结果表明(表1),古尔班通古特沙漠中的流动沙丘和固定沙丘区太阳总辐射日变化规律非常相似,但辐射通量大小表现各异,彩南流动沙丘最大辐射通量 837.36 W/m^2 ,阜北固定沙丘区 823.40 W/m^2 ,7月份日平均辐射通量则分别为 24.80 MJ/m^2 和 21.19 MJ/m^2 。在沙漠区由于太阳辐射作用,使地表温度迅速变化,对地表5 cm深处观测的温差绝对值可达 30°C 以上。同时由于大气长波辐射通量的大量支出,沙漠区形成较大的有效辐射,一般地面有效辐射的年总量可达 2757.8 MJ/m^2 。因此使沙漠地表昼夜产生巨大的温差效应,据实地观测统计结果,日最大温差可达 27°C 。

沙漠区的长波辐射通量,无论地表或是大气长波辐射,日总量均都远大于短波辐射日总量。从彩南和阜北测点的长波辐射观测资料分析来看,两区域长波辐射通量变化过程基本相近,但辐射通量彩南明显大于阜北(图1、图2),这种差异表现在流动沙

影响要大于天气状况日变化所产生的影响^[6]。实测也证明,长波有效辐射随着下垫面的增高而增大,反之亦然;因此,沙漠区不仅总辐射量大、反射率高,而且有极强的长波辐射。

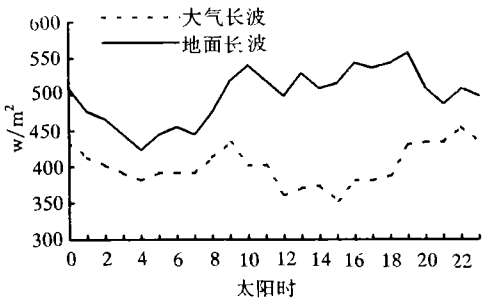


图2 阜北固定沙丘区长波辐射日变化
Fig. 2 Diurnal variation of long wave radiation on Fubei sand-fixed area

沙漠与冰雪地表反射率曲线表现形状基本都是“U”形,但在不同的下垫面条件下,却有明显变化规律。根据观测资料分析,流动沙漠反射率高而曲率变化明显^[7]。如流动沙丘、固定沙丘与荒漠草原区比较,由于地表状况不同,表现为越是干旱流沙区,反射率和日变化曲率越大(见表1)。

表1 阜北和彩南沙漠总辐射与反射
辐射通量日变化(1997. 7. 17~25)

Table 1 Diurnal variation of total radiation flux and reflective radiation flux on Fubei sand-fixed area and Cainan sand-shifting area

时间 (太阳时)	阜北沙漠			彩南沙漠		
	总辐射 /W·m ⁻²	反射辐射 /W·m ⁻²	反射率 /%	总辐射 /W·m ⁻²	反射辐射 /W·m ⁻²	反射率 /%
5	27.91	13.96	50	41.87	13.96	56
6	139.56	21.91	20	174.45	69.78	40
7	320.99	55.82	17	324.97	104.67	32
8	495.44	83.74	17	446.59	132.58	30
9	607.09	97.69	16	628.02	174.45	28
10	725.71	118.63	16	718.73	188.41	26
11	648.95	104.67	16	795.49	202.36	25
12	632.67	90.71	17	823.40	209.34	25
13	814.10	125.60	16	823.40	209.34	25
14	548.94	83.74	18	781.54	195.38	25
15	511.72	69.78	16	530.33	146.54	29
16	404.72	62.80	18	495.44	160.49	33
17	265.16	41.87	23	418.68	118.63	28
18	76.76	6.98	23	230.27	62.80	27
19	34.89	6.98	17	83.74	27.91	34

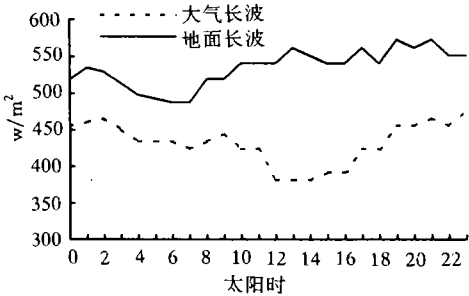


图1 彩南流动沙丘长波辐射日变化
Fig. 1 Diurnal variation of long wave radiation on Cainan sand-shifting area

丘水份含量小,表层5 cm深度中含水率仅有0.5%^[5],相应沙漠层蒸散水汽少,加之昼夜温差明显。所以昼夜的长、短波辐射交替变化,加强了沙漠对大气的热量反馈效应。同时,下垫面温度的日变化对长波有效辐射通量日变化影响也非常大,观测结果表明,日温差越大,有效辐射越高,并且有效辐射

3.2 沙漠表层热量传输

沙漠表层热通量是随着太阳辐射的增加而增

大,它既受短波辐射的制约,又受长波辐射的影响。而且无论短波辐射通量还是长波辐射通量,在沙漠与大气界面的能量传输过程中,都存在吸收热量和释放热量。这种热量收支状况,从微观看,日变化比较明显,它直观地显示了不同下垫面与大气间的热量交换量级,具体反映了不同下垫面在日变化过程中的响应与反馈机制;从宏观看气候变化,不仅受大气环流和区域影响。而且受热力因素影响。从古尔班通古特沙漠的观测(图3、4)中可看出,无论是流

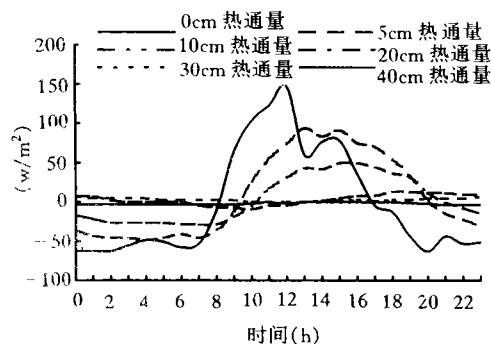


图3 阜北固定沙层热通量日变化

Fig. 3 Diurnal variation of long wave radiation in Fubei sand-fixed layer

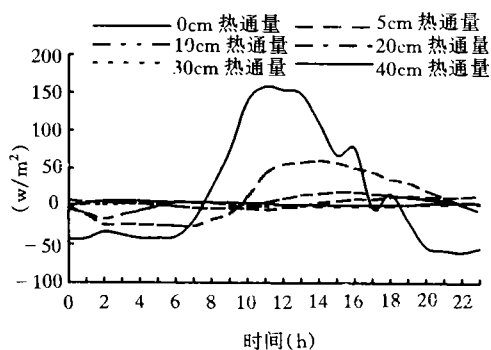


图4 彩南流动沙层热通量日变化

Fig. 4 Diurnal variation of long wave radiation in Cainan sand-shifting layer

动沙层还是固定沙层,热通量的最高位相对出现在沙层升温最快时期,而在正午温度最高时,由于沙区热低压辐射作用使沙漠下垫面显热减弱,并且随沙层深度的增加热通量传输出现滞后,而热通量值也逐渐减小,并有较好的递减规律。从表层两种不同沙质的热量分析,彩南流动沙层0~10 cm深度处,热通量为正平衡,其0 cm比值为38%,到40 cm深度热通量比值为75%。而阜康固定沙层0~10 cm深度处热通量为负平衡,其0 cm比值为-43%,到

40 cm深度比值为正平衡的8%。因此不同沙层的热量传输强度随着沙质和水分的变化而异,同时,也反映出不同沙质条件下的沙层热量昼夜变化分明,其反馈效应不同。如有短波辐射时,沙漠吸热,以感热交换为主,夜间沙漠释放热量以潜热交换为主。所以在干旱沙漠区,当沙层温度明显上升时,在该区低空形成浅薄的热低压,促使沙漠对大气的反馈作用形成了昼夜分明的感热和潜热交换机制,使干旱沙漠的气候效应更为显著,这与Cunnington M^[8,9]等人在撒哈拉大沙漠研究的结论基本一致。

古尔班通古特沙漠热量变化的时间序列与其它干旱区沙漠有着明显的差异,最突出的表现是冬季积雪期能量以负平衡为主,夏季干旱期,能量以正平衡为主,同样在对应的日波动振幅中,昼夜的辐射过程与下垫面性质,反映出沙漠对气候变化的随机反馈影响。

通过对该沙漠的热量日变化过程实测,初步结果表明,该沙漠热量变化具有以下特征:沙面反射辐射较强,升降温度较快,虽然总辐射强,但是净辐射值不大,随着沙丘的固定和植被覆盖度的增大,净辐射增大,潜热通量增加,而感热通量减小。因此在热量交换中,湍流交换表现的非常突出。

通过沙层温度廓线和位相分析,夏季(7月份)一般表现为16时最高,沙层表面(0cm)温度在清晨为最冷,而午后则最暖。从滞后的时间和变化的剧烈程度上,则远远超过了一般土壤的变化规律^[10]。沙层温度廓线在昼夜变化中,(图5),以白天日照吸热

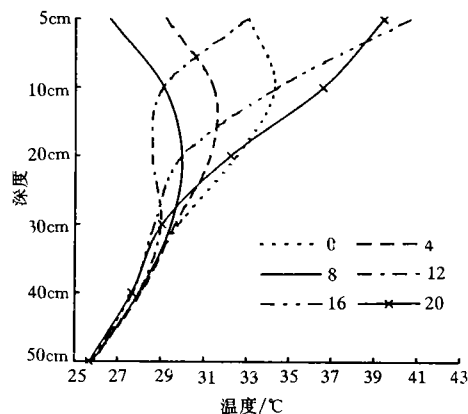


图5 彩南沙层温度廓线

Fig. 5 Temperature outline of Cainan sand-shifting layer

和夜间蒸散发热的形式过渡。白天沙丘表层接收太

阳辐射增热,热量由上向下传输,温度由上向下迅速递减,当达到某临界值后便又稳定递减,时间为12~20时;夜间沙丘表面长波辐射散热,热量由下向上传输,温度由下向上递减,当温度递减到翌日出后,便又恢复到表层增热过程。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随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,温度最低时,向上的递增速率亦最大。据古尔班通古特沙漠与奈曼沙漠沙层温度廓线^[11]的比较,发现古尔班通古特沙漠沙层增温快,但是温度传输深度小于奈曼沙漠的沙层。古尔班通古特沙漠沙层在40 cm以下,地温基本稳定递减,但是奈曼沙漠沙层在50 cm以下还有明显的热量交换效应。其主要原因是沙层导温率(湿沙与干沙导温率之比为11:1)所造成^[12]。

4 模拟与讨论

热量由太阳提供给陆地,再由陆地向大气扩散,这是一个连续而统一的过程。在这个过程中,不断变化着的天气条件、下垫面温度、下垫面结构和性质等都对这一过程的定量描述起着关键性作用^[13]。因此,对沙漠区地—气热量传输的模拟,是干旱区域气候变化研究的主要参变量。

根据地表面能量平衡方程:

$$A = H_s + \lambda E_s \quad (1)$$

式中 H_s 为地表面感热通量, λE_s 为地表面潜热通量,地表面可利用能量则为 A_s :

$$A_s = R - G - S \quad (2)$$

式中 R 是净辐射, G 为地下某深度地热流量, S 为地表至该深度地层的热贮藏量。

由于在干旱沙漠区近裸地情形下净辐射相对小,感热净辐射中占主导地位,并且沙层含水率少,沙面蒸散少而潜热变化也小,因此,根据, Monteith^[14]提出了简化动力学感热通量近似方程:

$$H_s = C_p \rho / r_a (T_s - T_a) \quad (3)$$

式中 ρ 是空气密度(在标准温度及压力下为 $1.13 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$); C_p 是定压比热($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); r_a 是空气动力学阻尼(s/m); T_s 是地面温度; T_a 是空气温度; H_s 为感热通量。

上式表明,沙区地表面感热通量输送主要是由湍流交换中的空气动力学阻尼所影响。空气动力学阻尼又依赖于大气的热力及动力学状态^[15],因此方程(3)中空气动力学阻尼(r_a)可写为如下形式:

$$r_a = \frac{\ln(Z - D_0/Z_{om}) + (Z_{om}/Z_{oh}) - \psi_s}{K^2 u} \times \frac{[\ln(Z - D_0)/Z_{om}] - \psi_s}{K^2 u} \quad (4)$$

式中 D_0 为零平面位移, Z_{om} 为动量的粗糙长度, Z_{oh} 为热量标量粗糙长度, K 为 V_{om} Kaxman 常数($k = 0.4$), u 为风速(本文为1.5 m高度的风速) ψ_s 和 ψ_m 分别为热量和动量的稳定度订正函数。

Thom 通量研究得出^[16],热量的传输主要取决于土壤和植被表面的湍流扩散,动量的传输不仅由粘性力也由气压力产生。在干旱流动沙漠区,由于表层植被影响较小,而且沙面温度升高和降低迅速,引起 Z_{om} 和 Z_{oh} 与植被的差异较大。据郭学良等^[17]对沙漠区的分析, $Z_{om} = 3.0 \times 10^{-2} \text{ m}$,由于沙漠区地面起伏基本为一流线型,因此 D_0 可视为零。如果不考虑风速影响时,感热通量与地面—空气温度之差存在如下关系:

$$H = 26.24(T_s - T_a)^{0.7193} + 1.0 \quad (5)$$

考虑风速时,感热通量与地面—空气温度之差存在如下关系:

$$H = 10.107[u(T_s - T_a)^{0.7842} + 1.0] \quad (6)$$

通过方程(5)与(6)的相关分析和模拟比较,结果是沙漠区感热通量风速影响较大,所以白天一般都处于超绝热不稳定状态,净辐射主要用于湍流的发展。由于地面干燥,致使出现逆温和负水汽通量现象,也就是说在地表湍流输送作用下水汽从上往下输送。夜间大气逆辐射明显增强,导致有效辐射减小,因此抑制了潜热输送。根据感热通量的参数化方程(3)和(6),再利用地表面能量平衡方程(1),即可得到不稳定条件下的潜热通量。

根据实测和模拟的感热和潜热通量,在日变化中表现出感热通量占绝对优势,但干旱流沙层潜热通量在土质表层中能量交换最大。有日照时,基本没有潜热通量,净辐射主要以湍流形式扩散,剩余部分热量储集在沙层中。通过古尔班通古特沙漠与黑河地区沙漠和干旱荒漠区的比较^[18],也证明在沙漠下垫面极端干旱,缺乏携带潜热的水份,虽然沙漠区低层大气极不稳定,湍流活动较强,但是蒸散潜热在地表能量平衡中所占比例还是较小。同时,由于盆地效应,古尔班通古特沙漠地表加热产生的能量和物质主要是通过低层的湍流输送。盆地边缘绿洲上空的逆温层抑制了沙漠区能量继续向上输送,造成沙漠区大气向地表的负水汽输送。所以在盆地中夏季形

成一个热汇区,冬季形成一个冷源区。

5 结 论

根据对古尔班通古特沙漠晴天状况不同下垫面地一气之间热量传输过程以及变化特征分析,得出以下结论

(1)由于沙漠地表高反射率和较强的湍流运动,使地表向大气传输较强和长波辐射,并且表现出长波辐射日总量大于短波辐射日总量的沙漠区域特征。

(2)在相对均质的沙漠地表层,白天以感热,而夜间以潜热形式向大气输送能量,感热通量占热通量的主导地位,但干旱流沙层潜热通量为土质表层中能量交换最大,从而使沙漠对大气反馈作用加强。

(3)在干旱沙漠裸地,辐射差额以正平衡为主,湍流感热交换越强,负平衡值越大,因干旱沙漠区总辐射大,而辐射平衡值小(这一结论只是对于裸地沙漠而言,如果与沙土地相比,负平衡值则远小于沙漠)所以,干旱区沙漠的热交换通量大于相对湿润区。

(4)沙漠地表面的空气湍流感热输送效率比分子扩散要大得多。在地面1.5m之内,湍流输送系数与分子输送系数的比值 K_n/a 约为 10^4 ,这说明,近沙漠地表极薄地静止空气层内,存在着十分陡峭的(热量差)温度梯度。所以,沙漠区小气候波动主要是受辐射流与热流两种变量的扰动。

参 考 文 献

- Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1975, 101: 193~202
- Smith E A. Transition of surfaces energy budget in Gobi desert between spring and summer season. [J] J. Climate Appl. Met., 1986, 25: 1725~1740
- Henry N, Le Houerou. Climate Change, drought and desertification[J]. J. Arid Environments, 1996, 34: 133~185
- 季国良, 邹基玲. 干旱地区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化[J]. 高原气象, 1992, 13(3): 323~329.
- 魏文寿. 沙漠表层粒度与水热变化的环境效应分析[J]. 沉积学报, 1998, 16(1): 152~155
- 王可丽, 钟强. 辐射传输模式中地表参数对大气长波辐射的影响[J]. 大气科学, 1995, 19(5): 606~613
- 魏文寿, 董光荣. 古尔班通古特沙漠的辐射热量交换分析[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 335~341
- Cunnington M, Rowntree P R. Simulation of the Saharan atmosphere—dependence on moisture and albedo[J]. Q. J. Roy. Meteor. Soc., 1986, 112: 971~999
- Kimyra F, Shimzu Y. Estimation of sensible and latent heat fluxes from soil surface temperature using a linear air—land heat transfer model[J]. J. Appl. Met., 1994, 33(4): 344~356
- Norman J R. Microclimate: The biological environment[M]. John Wiley and Sons. Second Edition, 1983. 1~8
- 何宗颖, 申建友, 李胜功. 奈曼地区流动沙丘的地中热状况, 科尔沁沙地生态环境综合整治研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993. 141~147
- 马庆芳, 方荣生, 项立成等. 实用热物理手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986. 955
- 董光荣, 申建友, 金炯. 试论全球气候变化与沙漠的关系[J]. 第四纪研究, 1990, 1: 91~98
- Monteith J L. Principles of environmental physics[M]. Edward Arnold. London, 1973. 238~245
- Mabbutt J A. Desertification indicators [J]. Climate Change, 1986, 9: 113~122
- Thom A S. Momentum, mass and heat exchange of vegetation[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1972, 98: 124~134
- 郭学良, 王介民. 利用简化动力学近似分析黑河实验区的感热通量[J]. 高原气象, 1993, 12(2): 133~140
- 张强. 西部干旱环境同绿洲的相互作用及其与大气环流的关系, 中国西部区域气候变化及其相关问题的研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1995. 50~55

Radiant Heat Transportation at the Interface of Desert ——Taking Gurbantunggut desert for example

WEI Wen-shou^[1,2] DONG Guang-rong³

1(Xinjiang Institute of Ecology & Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

2(Lanzhou Institute of Glaciology & Geocryology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

3(Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract

The radiant heat transportation at desert interface includes solar radiant heat flux, long wave radiant heat flux and desert surface heat flux. Based on the natural and climatic conditions of Gurbantunggut Desert, the author has measured and analyzed the heat budget on different underlying areas. The following results are mainly obtained:

(1) The heat transportation on sand—shifting desert and on sand—fixed desert is different limited by individual surface feature, sand layer nature and air temperature etc.

(2) The reflectivity and the long wave radiation on sand—shifting area are all larger than that on sand—fixed area.

(3) The heat flux through sand layer increases with the layer going down; while heat transportation value changes with an inverse trend.

(4) The heat transportation from earth to atmosphere on different desert types are in forms of sensible heat at daytime and latent heat at night which constitutes special response and feedback transfer process to solar radiant heat on desert area.

In the meantime, the author has analyzed the changing properties of physical climate parameters in desert region according to measured data and heat balance equation of earth surface; and modeled the heat transfer process at earth—atmosphere interface.

Key words earth-atmosphere interface heat flux Gurbantunggut Desert