

内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流 输送特征初步研究^{*}

刘辉志¹⁾ 洪钟祥¹⁾ 张宏升²⁾
陈家宜²⁾ 胡 非¹⁾ 陈红岩²⁾

1) (中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)
2) (北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

摘 要 分析了 2000 年 7 月 21 日~8 月 10 日在内蒙古奈曼流动沙丘下垫面取得的近地面层湍流及辐射观测资料, 讨论了无量纲湍流方差与稳定度参数 z/L 的关系, 发现无量纲速度分量方差及无量纲温度、湿度脉动方差在不稳定层结下, 均满足莫宁—奥布霍夫相似理论; 同时还讨论近地面层能量的收支。发现流动沙丘下垫面感热通量与地表热通量最大值分别为 170 W m^{-2} 及 100 W m^{-2} ; 潜热通量通常小于 50 W m^{-2} ; 流动沙丘净辐射最大值为 400 W m^{-2} 左右。 $(H_s + H_l)$, 与 $(R_n - G)$ 的比值在晴天白天平均值为 0.78 左右, 流动沙丘下垫面近地面层能量不平衡现象存在, 其原因有待进一步研究。

关键词: 流动沙丘; 湍流方差; 近地面层能量收支

1 引言

土地沙漠化是当前世界上极为严重的生态环境问题之一, 主要发生在干旱、半干旱地区。我国北方沙漠化土地面积已达 $176\,000 \text{ km}^2$, 而且还有 $158\,000 \text{ km}^2$ 的土地正在受到沙漠化的威胁^[1]。内蒙古东部的科尔沁沙地自 20 世纪 80 年代以来, 沙漠化问题非常突出; 土地沙漠化不仅破坏了当地草地生态系统, 同时也给当地农牧业生产造成了巨大损失, 甚至还威胁到一些国家重要基础设施如铁路及公路的运行安全。土地资源的不合理利用, 过度开垦及放牧等人类活动的影响是造成该地区沙漠化的主要原因^[2]。不过至今, 导致生态系统发生不可逆转变化的机理尚不清楚, 人类活动对生态环境的影响机理也未完全弄清。开展干旱半干旱沙漠化地区地表—大气间物理交换过程及机理的研究, 从微气象学的角度揭示地表—大气间水热交换等规律, 可为沙漠化地区的治理与防治, 为人类活动的有序进行及社会的可持续发展提供科学的依据。目前, 有关半干旱沙漠化地区地表—大气间物质与能量交换过程系统的研究尚不多见, 急需深入研究。

在国家重点基础研究发展规划项目“我国生存环境演变的北方干旱化趋势预测研

2001-08-09 日收到, 2001-12-13 收到修改稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 G1999043404 和中国科学院知识创新工程重点项目 KZCX2—204 共同资助

究”支持下,中国科学院大气物理研究所和北京大学于 2000 年 7 月 21 日~8 月 10 日在内蒙古奈曼流动沙丘及玉米地等典型生态系统下垫面进行了为期近三周的地面过程观测实验,两站的观测基本同步。本次实验主要目的就是研究半干旱地区不同下垫面地表一大气间物质和能量交换特征,为研究人类活动对半干旱地区生态环境的影响提供翔实的基础,同时也可为中尺度大气—水文模式或气候模式中地表过程参数化方案的改进提供科学依据。本文主要讨论流动沙丘下垫面近地面层湍流输送特征。

2 实验场地及观测仪器

本次实验于 2000 年 7 月 21 日~8 月 10 日在内蒙古奈曼旗中国科学院寒区旱区环境与工程研究所奈曼站的固沙试验区附近的流动沙丘及玉米地上进行。实验点地理位置为 (42°58'N, 120°43'E), 平均海拔高度为 363 m, 属于半干旱地区, 全年降雨量为 400 mm 左右。选择有缓慢起伏的流动沙丘, 流动沙丘以前是草地, 由于过牧和农垦现已严重沙漠化, 只零星地生长着沙蓬 (*Agrcophyllum squarrosum*), 植被盖度不到 10%。地面基本裸露, 沙丘高度一般 6~8 m, 沙丘走向与盛行风向垂直; 迎风坡缓, 背风坡稍陡, 沙丘形状以沙丘链为主, 呈带状分布。玉米地观测点离流动沙丘水平距离 1.5 km 左右, 有关其下垫面特征这里不作详细介绍。流动沙丘观测站地形和下垫面的特性基本上代表了科尔沁沙地此类型下垫面的特征。

实验主要观测项目包括平均场、湍流场及辐射通量的观测。平均场观测仪器主要由架设在 6 个独立观测杆上的轻型低阈值风杯风速计 (美国 Teledyne 公司, M-50.1B) 组成, 架设高度为 0.40 m、0.6 m、1.0 m、2.0 m、4.3 m 和 7.5 m。辐射观测包括太阳总辐射、反射辐射、天空长波辐射和地面长波辐射, 辐射表均采用从美国 Eppley 公司进口的 PIR 型精密红外辐射仪和短波辐射仪, 架高设高度为 1.5 m; 正式观测前还在平坦下垫面上进行了辐射仪器的平行比较, 结果非常一致。湍流观测仪器主要有美国生产的 SAT-311/2K 型超声风速温度仪、Lyman-Alpha 湿度计和细丝温度脉动仪, 架设高度为 2 m, 采样频率为 20 Hz; 同时还有一套波文比自动观测系统, 温度、湿度梯度采用波文比自动观测系统的干湿球温度计测量, 波文比自动观测系统的干湿球温度计在 0.6 m 和 2.6 m 两个高度上每 10 分钟自动翻转一次。此外还测量土壤温度、湿度和土壤热通量。土壤温度采用热电偶测量, 土壤湿度采用称重法测量, 其测量深度均为地表以下 1 cm、5 cm、10 cm、20 cm、40 cm 和 80 cm; 土壤热通量采用热流量板, 置于地表以下 1 cm 处。所有观测仪器都安装在顶部较平坦些的流动沙丘顶上。流动沙丘观测点周围有固定、半固定沙丘、草地及稀疏防护林, 下垫面类型较多。

平均场、湍流场及辐射资料每个样本取样时间长度均为 30 min, 这里主要分析流动沙丘下垫面湍流方差及近地面层能量收支特征。湍流资料的选取要求每个样本内风向变化小于 45°。另外, 对于垂直风速不为零的样本 (可能受到上坡或下坡风影响的样本), 分析时予以去掉。

涡动相关法计算的动量通量 Q_m 、感热通量 H_s 和潜热通量 H_l 公式为

$$Q_m = -\rho_0 \overline{u'w'}, \quad (1)$$

$$H_s = \rho_0 c_p \overline{w'T'}, \quad (2)$$

$$H_1 = \lambda_1 \rho_0 \overline{w'q'}.$$

(3)

波文比 $r_B = H_s/H_1 = c_p \Delta T / (\lambda_1 \Delta q)$ ，这里假设 $K_{H_s} = K_q$ 。由波文比 r_B 计算感热通量 H_s 和潜热通量 H_1 公式为

$$H_s = \frac{r_B}{1 + r_B} (R_n - G),$$

(4)

$$H_1 = \frac{1}{1 + r_B} (R_n - G),$$

(5)

其中 R_n 为太阳净辐射， G 为地表热通量；波文比是一种基于能量平衡求感热通量 H_s 和潜热通量 H_1 的方法。

3 结果分析

3.1 近地面层湍流方差特征

根据莫宁—奥布霍夫相似理论，在近地面层中无量纲形式湍流方差 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 和 σ_w/u_* 仅是大气稳定度参数 z/L 的函数。近中性情况下，在近地面层湍流主要由机械湍流生成，热力作用几乎没有。上述无量纲速度方差在近中性时分别近似等于一常数，即 $\sigma_u/u_* = A$ ， $\sigma_v/u_* = B$ ， $\sigma_w/u_* = C$ 。图 1 给出无量纲速度方差与稳定度 z/L 的关系，由图可见，无量纲风速分量方差在近中性 ($-0.02 < z/L < 0.02$) 条件下接近于常数，表 1 列出本次实验及其他作者得到 A 、 B 、 C 值。

表 1 各种不同下垫面近中性条件下无量纲风速分量方差

作者	$\sigma_u/u_* = A$	$\sigma_v/u_* = B$	$\sigma_w/u_* = C$	下垫面
Panosfky 和 Dutton ^[3]	2.3±0.03	1.92±0.05	1.25±0.03	10 多种平坦下垫面平均值
Panosfky 和 Dutton ^[3]	3.50	3.80	1.24	起伏地形山地下垫面
Panosfky 和 Dutton ^[3]	3.20	2.90	1.24	起伏地形非山地下垫面
刘树华等 ^[4]	1.20	1.23	1.02	科尔沁草原
刘辉志等 ^[5]	3.21	2.69	1.46	青藏高原改则
本文	2.90	2.90	1.45	科尔沁沙地流动沙丘

与其他作者观测结果相比，我们在流动沙丘得到 C 值与青藏高原改则观测结果相近，比刘树华^[4]等在科尔沁草原下垫面得到 C 值大一些，这可能与超声风速温度仪架设在流动沙丘顶上有关。 A 、 B 值比 Panosfky 和 Dutton^[3]在平坦下垫面得到的 A 、 B 大一些，接近起伏地形下垫面的 A 、 B 值，这与流动沙丘观测点周围地形较复杂相一致， A 、 B 值大小主要反映局地观测点周围地形的影响。

根据图 1 可得到在不稳定层结下， σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 和 σ_w/u_* 满足如下关系式：

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.45 \left(1 - 5 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \frac{z}{L} < 0;$$

(6)

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = \frac{\sigma_v}{u_*} = 2.90 \left(1 - 7 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \frac{z}{L} < 0.$$

(7)

在不稳定层结下，无量纲垂直风速分量方差与稳定度 z/L 之间的关系，过去有不少观测研究工作，如 Panofsky 等^[6]用美国明尼苏达城的铁塔观测资料建议应用以下关系式：

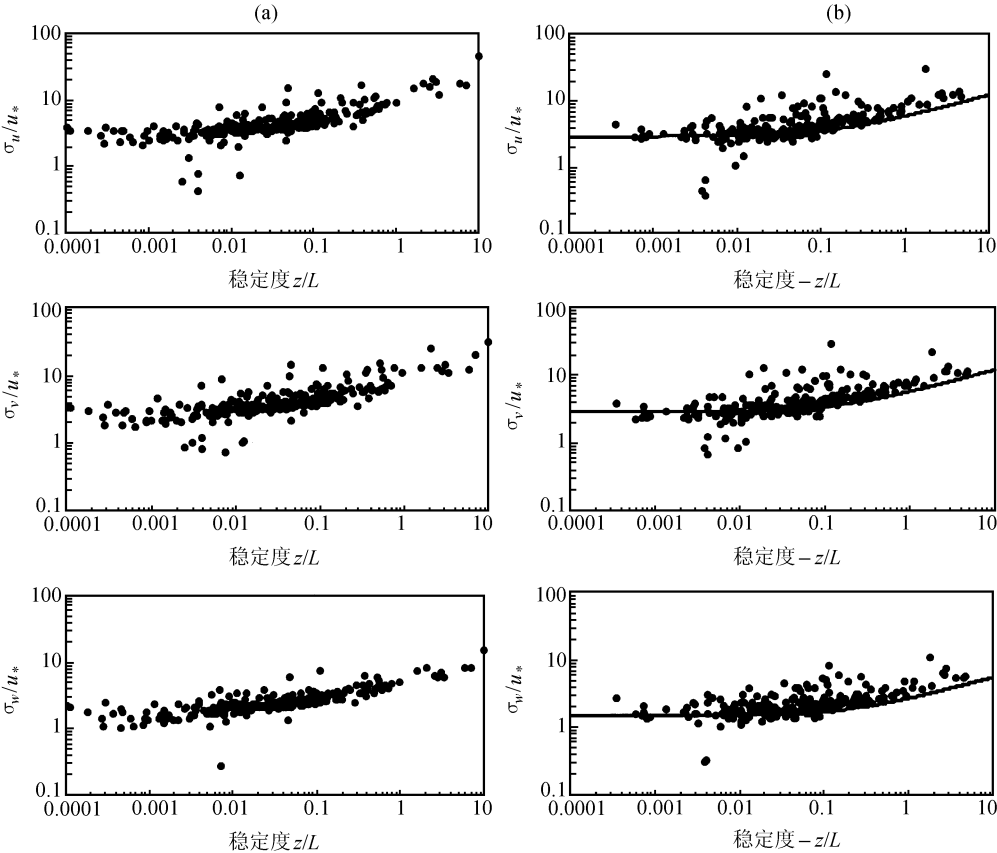


图 1 无量纲风速分量方差 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 和 σ_w/u_* 与稳定性 z/L 的关系
(a) 稳定; (b) 不稳定

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.3 \left(1 - 3 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \frac{z}{L} < 0. \tag{8}$$

比较 (6) 式与 (8) 式, 在较不稳定层结条件下, 流动沙丘观测得到 σ_w/u_* 与 $-z/L$ 满足 1/3 次方律, 与平坦下垫面关系式基本一致; 关系式中系数的不同可能反映观测点局地地形的影响。

对于水平风速分量, 过去有些学者根据平坦下垫面观测资料, 认为它们与稳定性不满足 1/3 次方律, 周明煜等^[7]根据青藏高原三个不同观测站观测资料分析发现, 不稳定层结下, σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 与 $-z/L$ 同样满足 1/3 次方律。De Bruin 等^[8]根据平坦下垫面观测资料建议应用以下关系式:

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = 2.3 \left(1 - 3 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \frac{z}{L} < 0, \tag{9}$$

流动沙丘结果证明水平风速分量与 z/L 在不稳定层结满足 1/3 次方律, 比较 (7) 式与 (9) 式, 我们得到关系式与平坦下垫面基本一致, 系数的差异反映出观测点的局地地形的影响。

在稳定层结时, 湍流运动受到抑制, 同时存在重力波、湍流间歇性等影响, 至今人们对其研究不是很透彻, 这里不作深入讨论。

对于无量纲温度方差 $\sigma_T / |T_*|$ ，在对流状态下可以表示为

$$\frac{\sigma_T}{|T_*|} = \alpha \left(-\frac{z}{L}\right)^{-\frac{1}{3}}, \quad \frac{z}{L} < 0, \tag{10}$$

式中， α 为常数， $T_* = \overline{w'T'}/u_*$ 。

流动沙丘观测的无量纲温度方差与稳定度 z/L 的关系见图 2。在不稳定层结下， $\sigma_T / |T_*|$ 与 $-z/L$ 满足 $-1/3$ 次方律，此时 $\alpha = 1.45$ 。Wyngaard 等^[9] 利用美国平原地区 Kansas 野外资料得到系数 $\alpha = 0.95$ 。从图 2 还可以发现，在稳定和不稳定层结下， $\sigma_T / |T_*|$ 随 $|z/L|$ 减小而增大，这与周明煜等^[7] 在青藏高原观测到的结果一致。

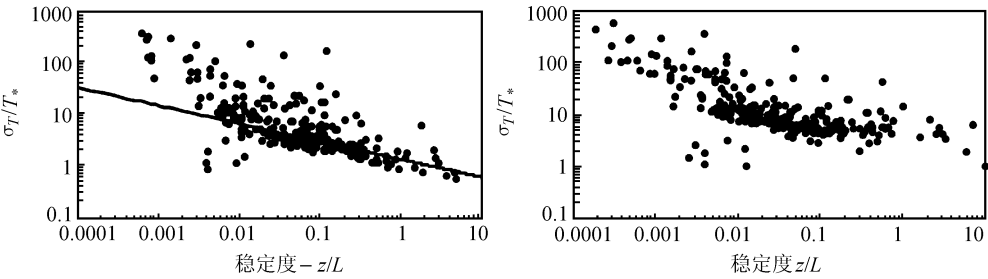


图 2 无量纲温度方差 $\sigma_T / |T_*|$ 与稳定度 z/L 的关系

无量纲化湿度脉动方差 σ_q/q_* 与温度脉动方差相类似，在对流情况下可写成，

$$\frac{\sigma_q}{q_*} = \beta \left(-\frac{z}{L}\right)^{-\frac{1}{3}}, \quad \frac{z}{L} < 0, \tag{11}$$

式中， β 为常数， $q_* = -\overline{w'q'}/u_*$ 。

图 3 结果表明在不稳定层结下， σ_q/q_* 与稳定度 $-z/L$ 满足 $-1/3$ 次方律，此时 $\beta = 2.75$ 。与温度脉动方差相比，湿度脉动方差离散度大些。Hogstrom 等^[10] 根据在农业区平坦下垫面得到如下关系式，

$$\frac{\sigma_q}{q_*} = 1.04 \left(-\frac{z}{L}\right)^{-\frac{1}{3}}, \quad \frac{z}{L} < -0.1. \tag{12}$$

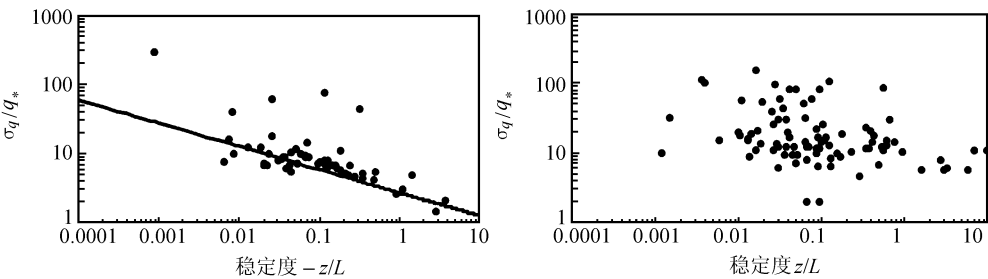


图 3 无量纲化湿度脉动方差 σ_q/q_* 与稳定度 $-z/L$ 的关系

由于精确测量半干旱地区水汽脉动本身存在较大困难， β 值差异较大并不奇怪；同时水汽的精确测量到现在仍然是大气探测的难题之一，有关湿度脉动方差观测报导并不多见，流动沙丘观测资料在对流状态下，湿度脉动方差类似温度脉动方差，满足相似理论，即与稳定度 $-z/L$ 满足 $-1/3$ 次方律。

3.2 近地面层能量平衡

在流动沙丘观测点测量温度脉动传感器有超声虚温及细丝温度脉动仪，图 4 比较了两种不同温度脉动传感器测量得到的感热通量。从图 4 可以看出，两者十分吻合，误差在 10% 以内。一般情况下利用超声虚温测得的感热通量略大于细丝温度脉动仪的观测结果，这也证实了利用超声虚温测量感热通量的可靠性。

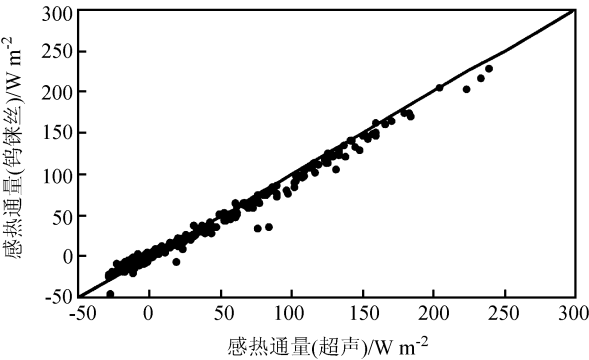


图 4 超声虚温及细丝温度脉动仪测量得到的感热通量

观测期间只有 7 月 27 日有一次降雨，降雨量为 20 mm 左右。天空云量一般不多，在每天的午后，云量有所增加。图 5 给出了 2000 年 7 月 29 日~8 月 1 日，流动沙丘观测点太阳总辐射、地表太阳反射辐射、天空长波辐射和地面长波辐射的日变化。7 月 29 日~8 月 1 日天气状况为晴天，天空云量不多。太阳总辐射 R_s 最大值为 960 W m^{-2} ，比李胜功等^[11]1993 年 6 月 17~18 日在流动沙丘上观测的 R_s 最大值略小些。从图 5 可以看出，天空长波辐射日变化很小，地面长波辐射午后最大，这与地表温度午后达到最大相一致。

图 6 给出晴天地表反射率的日变化。日出后 3 小时到日落前 3 小时平均地表反射率为 0.32，与李胜功等^[11]1993 年在流动沙丘得到的平均反射率为 0.34 相比，两者基本一致，这反映流动沙丘下垫面特性这些年来基本上无变化。

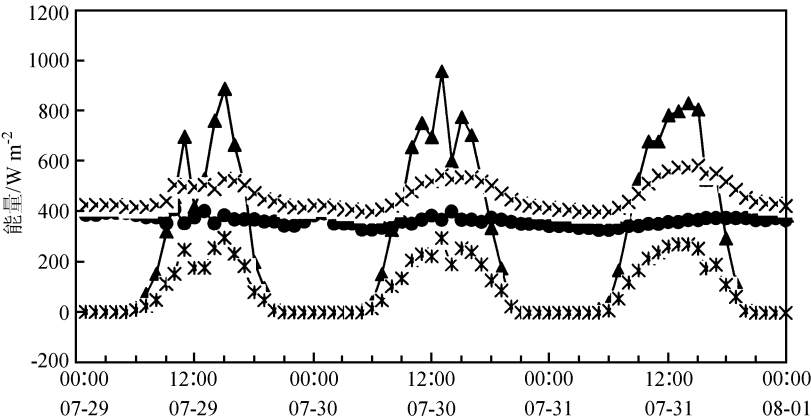


图 5 太阳总辐射、反射辐射、天空长波辐射及地面长波辐射日变化

▲：太阳总辐射；*：反射辐射；●：天空长波辐射；×：地面长波辐射

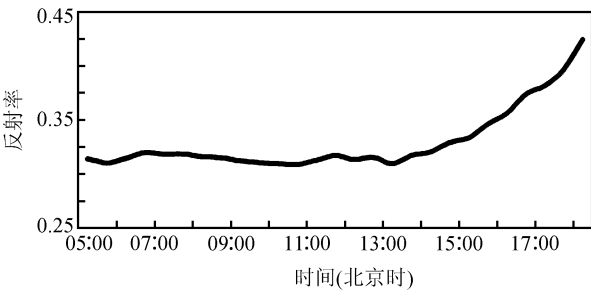


图6 地表反射率日变化

7月29日~8月1日地表能量收支各项日变化见图7。感热通量 H_s 和潜热通量 H_l 是由涡动相关法得到的。由图7可以发现净辐射 R_n 在中午12:00左右达到最大,最大值为 400 W m^{-2} 左右;地表热通量 G 最大值出现在午后13:00左右,最大值为 100 W m^{-2} 左右;感热通量 H_s 在午后13:00左右达到最大,最大值为 170 W m^{-2} 左右;潜热通量 H_l 在流动沙丘下垫面一般小于 50 W m^{-2} ,这主要是由于流动沙丘比较干燥的缘故。 (H_s+H_l) 与 (R_n-G) 的比值在晴天白天平均值为0.78左右,也就是说地表能量存在不平衡现象。当然地表热通量的测量误差不可忽视。由于土壤热流量板置于地表以下1 cm处,沙丘表面的沙受到风的吹动会发生移动,测量得到的土壤热通量有误差。如何准确测量地表热通量,是目前从事微气象研究学者关注的问题之一。不过,青藏高原、内蒙古草原、国外的森林及农田下垫面等近地面层观测也发现过这种能量不平衡现象的存在^[12~14],由于解释上的困难,一般未作深入讨论。

目前,近地面层能量不平衡现象已引起国际上许多从事边界层及陆气交换过程实验研究的专家的关注。能量收支不平衡出现是由于观测仪器本身误差造成的,还是传统的涡动相关测量理论存在缺陷,或者是由于近地层中大气存在有组织的运动?这些有待于从观测资料、理论及数值模式进行更深入的研究。对于流动沙丘能量不平衡现

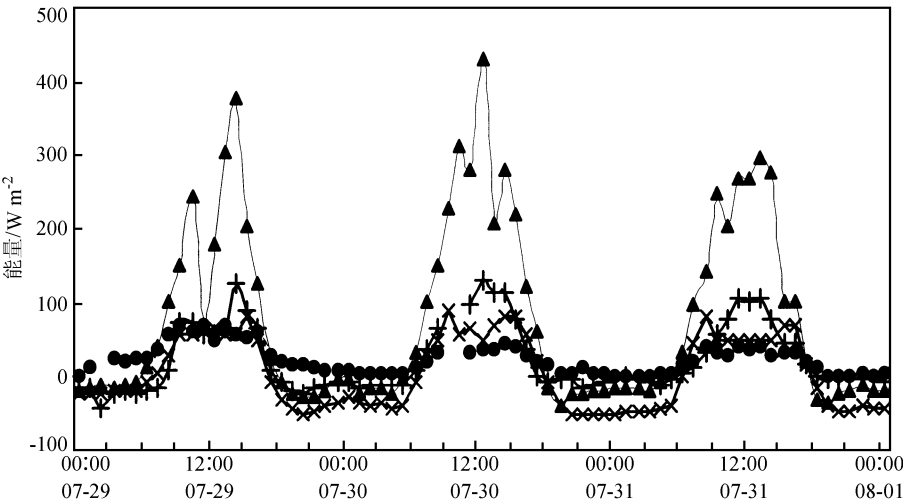


图7 近地面层能量收支各项日变化

—+—: 感热通量; —●—: 潜热通量; —▲—: 净辐射; —×—: 地表热通量

象的存在，也有待进一步的深入研究。

波文比是基于能量平衡理论分配 $(R_n - G)$ ，从而得到感热通量 H_s 和潜热通量 H_l 。图 8 表示观测期间晴天波文比日变化特征。由图 8 可以看出，波文比在午后达到最大，最大值可达 4.0 左右，在日出、日落前后，波文比还会出现跳跃，这主要由于转换期湍流通量本身变小，测量误差较大所致。

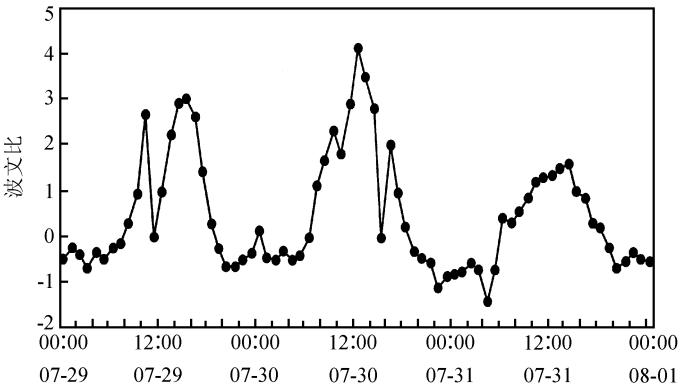


图 8 晴天波文比日变化

由于能量收支不平衡的存在，根据波文比得到感热、潜热通量，与涡旋相关法结果相比，波文比得到感热通量最大值达 300 W m^{-2} ，远大于实际测得的感热通量，潜热通量两者相差不大。

图 9 表示空气动力学法求得的感热通量和潜热通量，与涡旋相关法结果相比，基本一致，证明空气动力学法求感热通量和潜热通量是可行的。这也表明涡动相关测量得到的感热通量和潜热通量是可信的，近地面层能量不平衡可能与大气中有组织的上

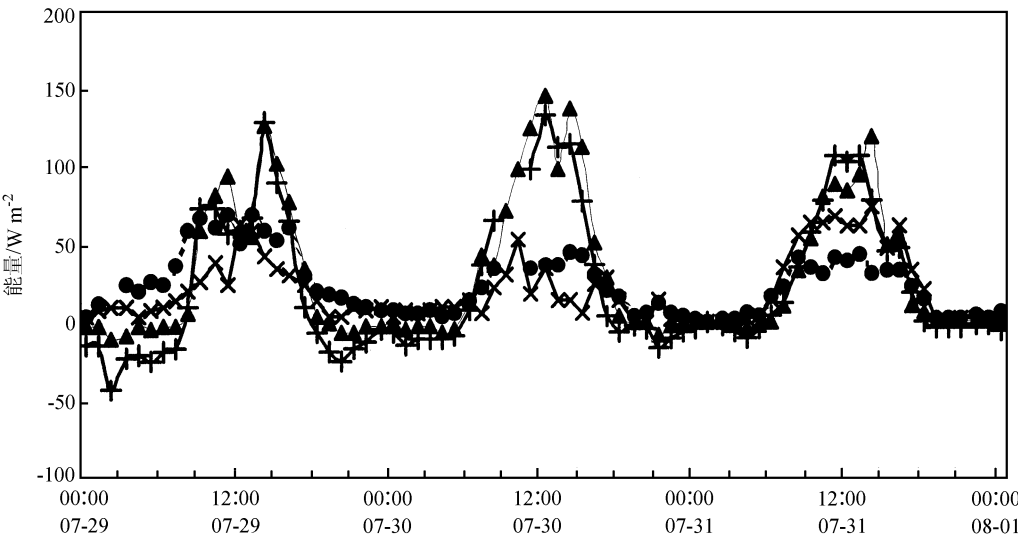


图 9 空气动力学法与涡旋相关法求得的感热通量和潜热通量

—+—：感热通量（超声）；—●—：潜热通量（Lyman- α ）；
—▲—：感热通量（廓线）；—×—：潜热通量（廓线）

升或下沉运动的存在有关，或者是由于中尺度过程的影响。

4 结果与讨论

本文分析了 2000 年 7 月 21 日~8 月 10 日在内蒙古奈曼流动沙丘下垫面取得的观测资料，讨论了无量纲湍流方差与稳定度的关系，同时还分析近地面层能量的收支平衡，得到主要结果如下：

(1) 无量纲风速分量 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 和 σ_w/u_* 在不稳定层结与稳定度 $-z/L$ 满足 $1/3$ 次方律，符合 Monin-Obkuhov 相似理论。在近中性时 σ_w/u_* 值比平坦下垫面的稍大些，这可能与观测点位于沙丘顶上有关，无量纲水平风速分量 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 在近中性时值与在起伏地形下测得的结果相近。

(2) 无量纲温度脉动方差和湿度脉动方差在对流状态下与 $-z/L$ 满足 $-1/3$ 次方律，在稳定和不稳定层结下，随 $|z/L|$ 减小而增大，这与周明煜等^[7]在青藏高原的观测结果一致。

(3) 观测期间晴天流动沙丘下垫面地表净辐射最大值为 400 W m^{-2} ，近地面层感热通量在 13:00 达到最大，其值为 170 W m^{-2} ；地表热通量在 13:00 达到最大，其最大值 100 W m^{-2} ，潜热通量一般均小于 50 W m^{-2} 。这主要是由于流动沙丘比较干燥的原因。

(4) 流动沙丘上，近地面层 $(H_s + H_l)$ 与 $(R_n - G)$ 比值在晴天白天平均为 0.78 左右，在近地面层能量存在不平衡现象。近地面层能量收支不平衡原因有待进一步研究，可能与观测仪器误差及大气中有组织上升与下沉运动的存在有关。

参 考 文 献

1 朱震达，中国沙漠化研究的进展，中国沙漠，1989，**9** (1)，1~13.
2 朱震达、刘恕，中国北方农牧交错沙漠化地区农业发展战略问题的研究，中国沙漠，1982，**2** (4)，1~5.
3 Panofsky, H. A., and J. A. Dutton, *Atmospheric Turbulence*, Newpork: John Wiley and Sons, 1984, 1~397.
4 刘树华、刘和平、洪钟祥等，我国草原下垫面低层大气湍流结构，大气科学，1996，**20** (3)，378~383.
5 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.
6 Panofsky, H. A., H. Tenekes, D. H. Lenschow et al., The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions, *Bound. -Layer Meteor.*, 1977, **11**, 355~361.
7 周明煜、徐祥德、卞林根等，青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究，北京：气象出版社，2000，36~54.
8 De Bruin, H. A. R., W. Kohisiek, and J. M. Van Den Hink, A verification of some methods to determine the flux of momentum, sensible heat and water vapor using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities, *Bound. -Layer Meteor.*, 1993, **63**, 231~257.
9 Wyngaard, J. C., and O. R. Cote, The budgets of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Soc.*, 1971, **28**, 190~201.
10 Hogstrom, U., and A. S. Semdman—Hogstrom, Turbulence mechanics at an agricultural site, *Bound. -Layer Meteor.*, 1974, **7**, 373~389.
11 李胜功、原茴芳信、何宗颖等，奈曼沙漠化对草地微气象特性影响的研究，大气科学，1994，**18** (6) 758~

763.

- 12 Christian Bernhofer and Voget Roland, Energy balance closure gaps—A methodical problem of eddy covariance measurements? Proceeding of the Conference ICB—ICUC99, Sydney, Australia, 8—12 Nov. , 1999, 199~203.
- 13 Shin Miyazaki, Osukamoto, Ichiro Kaihostu, Tadashi Miyamoto et al. , The energy imbalances observed in Tibetan Plateau and Monogolian Plateau, Proceedings of the Second Session of international Wordshop on TIPEX-GAME/Tibet, Kunming, China, July 20~22, 2000, 1~3。
- 14 Kim, J. , and T. J. Choi et al. , On measuring and modeling surface energy partitioning on the Tibetan Plateau, Proceedings of the 5th International Study Conference On GEWEX in Asia and GAME, Nagoya, Japan, 3~5, Oct. , 2001, 18~25.

The Turbulent Characteristics in the Surface Layer over Dune at Naiman in Inner Mongolia

Liu Huizhi¹⁾, Hong Zhongxiang¹⁾, Zhang Hongsheng²⁾,
Chen Jiayi²⁾, Hu Fei¹⁾, and Chen Hongyan²⁾

1) (*State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)
2) (*Department of Atmospheric Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract The turbulent and radiation data obtained over dune in Naiman from July 21 to August 10, 2000 have been analyzed. It has been discussed the relation between the non-dimensional turbulent variances and the stability parameter z/L . The result shows that the changes of the non—dimensional velocity components, temperature, and humidity variances with the stability in the surface layer under unstable stratification satisfy the Monin-Obukhov similarity theory. The energy budget in the surface layer over the movable dune has been studied also. The maximum sensible heat flux is 170 W m^{-2} . The maximum soil heat flux in the surface layer is 100 W m^{-2} . The maximum net radiation flux is 400 W m^{-2} . The latent heat flux is always smaller than 50 W m^{-2} . The average ratio between $(H_s + H_l)$ and $(R_n - G)$ is 0.78 in the daytime during clear day. The energy imbalance has been found in the surface over the movable dune. The reason why the energy imbalance appears over heterogeneous surface needs to be studied more carefully in the next.

Key words: moveable dune; turbulent variance; surface energy imbalance