

# HEIFE 戈壁地区近地层大气的湍流

## 结构和输送特征\*

王介民 刘晓虎 马耀明

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 730000)

### 提 要

根据黑河地区地气相互作用实验研究(HEIFE)1988年POP和1990年PIOP实验的观测资料,分析了戈壁地区近地层大气的湍流结构,主要是风速分量和温度方差的相似关系,以及各有关量的功率谱和湍流通量的协谱。1988年POP期间发现的戈壁近地层大气中白天经常出现的水汽由上而下输送等特殊现象,在1990年PIOP中得到进一步的验证。文中分析了有关物理机制,认为这一现象和众所周知的“绿洲效应”是戈壁-绿洲这一地区性中尺度环流影响的两个侧面。

**关键词:** 戈壁,近地层,湍流结构,湍流输送。

## 1 引 言

“黑河地区地气相互作用实验研究”(HEIFE)中含有绿洲、戈壁和沙漠地区共五个基本站。下垫面的差异,造成各站间边界层结构和能量、水汽等湍流输送特征的明显不同。对这些特征及其相互作用的研究,是黑河实验和国际上几个同类型实验相比的主要特点之一。鸟瞰整个实验区,其基本图象是在大面积戈壁沙漠之上沿河流和灌渠散布着片片绿洲。绿洲上有农田林网,城镇村庄,下垫面是相当复杂的。相对来说,戈壁下垫面较简单,观测研究较易入手。因此,HEIFE 1988年9月先行性实验(POP)和1990年8月预备性加强观测期实验(PIOP),都重点在戈壁站进行;一方面检验各种设备及方法,同时分析研究观测结果,为HEIFE的正式大规模实验提供必要的基础。POP之后,我们曾根据涡旋相关方法的测量结果,对戈壁地区的湍流输送特征进行了一些分析,并注意到一个异常现象,即白天的多数时段,戈壁上近地层的水汽输送是由上而下的<sup>[1]</sup>。本文结合1990年PIOP资料,进一步研究戈壁近地层大气结构,并对该地区湍流输送的某些基本特征进行验证和分析。

## 2 实验和数据处理

HEIFE 戈壁站位于临泽县城西南平坦开阔的戈壁沙滩上(39°09'N, 100°06'E, 海拔

\* 1991年2月23日收到原稿,1991年8月3日收到修改稿,本文是国家自然科学基金资助课题。

1480 m)。其北面为临泽绿洲,与绿洲边缘的稀疏林地相距约 2 km;南与西南面为大片戈壁,地形以约  $1^\circ$  的坡度由北向南略有抬升,30 km 以远即进入祁连山系。戈壁地面主要为粗沙和砾石覆盖,散布有少量骆驼刺一类植物。实验场地的地形和下垫面基本上代表了黑河流域南部大面积戈壁带的特征(图 1)。

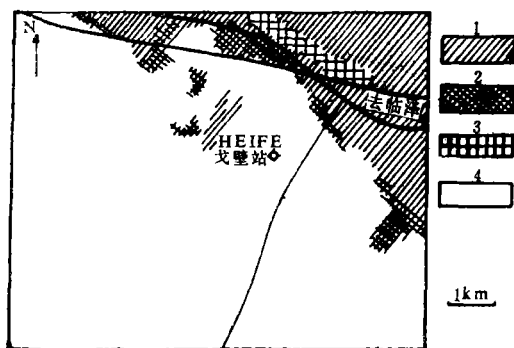


图 1 戈壁站周围土地利用图  
(1. 农田, 2. 林地, 3. 村庄, 4. 戈壁)

实验现场装有 20 m 风温湿梯度塔,各项辐射计和地热流板等平均量观测设备。近地层大气风温湿湍流脉动的测量,主要应用超声风速温度计(Kaijo Denki DAT-300 型)以及相配套的  $12\ \mu\text{m}$  钨丝温度计和细线热电偶( $80\ \mu\text{m}$ )干湿计(Kaijo Denki PY-100 型)。1990 年 8 月观测期间现场装有两套类似的湍流测量系统,包括一台 Lyman-Alpha 湿度计,以及配合的短期系留气球和声雷达边界层探测。湍流数据的采集和处理由一台 PC 机完成,采样

频率 10 Hz, 每次运行 30 至 50 min。

大气湍流的测量和涡旋相关方法的应用,除要求响应较快、精度较高的风温湿测量仪器外,还要有精细安排的现场操作,和对大量数据的恰当处理。实验中多数时次的测量之前,都对超声风温计的探头取向和垂直度进行核查校正。各信号通道都加有 10 Hz 低通有源滤波器,以减小外界杂散干扰。数据处理中,除进行一般的去野点、去趋势处理外,还采用适当方法对超声头的“阴影效应”和细线干湿计较大的时间常数进行修正<sup>[2,3]</sup>。每次测量期间,采集所得风温湿脉动信号有屏幕图形显示,以便实时监视数采质量。数据处理,采用改进后的软件,大约在每次采集完毕 10 min 之内即可完成,包括全部涡旋相关计算和湍流谱分析,并以适当形式输出风、温、湿的各种统计量,动量、感热和潜热通量,以及各主要量的功率谱和协谱等。原始数据用微型数据流磁带机转存,备以后再分析使用。

分析表明 POP 和 PIOP 两次实验的湍流数据质量都是较高的。以下主要据之分析戈壁近地层大气湍流结构和湍流输送的某些特征。

### 3 方差的相似性分析

近 20 年来 Monin-Obukhov 近地层相似理论得到了广泛的研究和应用。其中垂直风速标准差( $\sigma_w$ )和位温标准差( $\sigma_\theta$ )的相似关系

$$\sigma_w/u_* = \phi_w(z/L) \quad (1)$$

$$\sigma_\theta/|T_*| = \phi_\theta(z/L) \quad (2)$$

一直引起很大的注意。上二式中

$$u_* = (-\overline{u'w'})^{1/2} \quad (3)$$

$$T_* = -\overline{w'\theta'}/u_* \quad (4)$$

$$z/L = -k(g/T)(\overline{w'\theta'})z/u_*^3 \quad (5)$$

分别为摩擦速度、温度尺度和稳定度参数( $z$ 为高度, $L$ 为 $MO$ 长度, $k$ 为卡曼常数,其他为常用符号)。如函数 $\phi_w$ 和 $\phi_\theta$ 的形式被确定,则可较容易地由垂直速度和温度的测量得到切应力( $\tau = \rho u_*^2$ )和感热通量( $H = \rho c_p \overline{w'\theta'}$ )。

根据自由对流近地层的渐近分析, $\phi_w$ 和 $\phi_\theta$ 分别与 $(-z/L)^{1/3}$ 和 $(-z/L)^{-1/3}$ 成正比。观测表明比例系数分别约为1.90和0.96<sup>[4]</sup>。Panofsky等总结了多次观测结果,对不稳定和中性层结推荐如下经验公式

$$\sigma_w/u_* = 1.25(1 - 3z/L)^{1/3} \quad (z/L \leq 0) \quad (6)$$

并认为稳定层结下 $\sigma_w/u_*$ 仍可取中性时的常数值1.25<sup>[5]</sup>。对于 $\phi_\theta$ 的研究资料相对较少。Panofsky等从混合长概念出发导得不稳定情况下

$$\phi_\theta(z/L) = c\phi_h(z/L) \approx c(1 - 16z/L)^{-1/2} \quad (z/L \leq 0) \quad (7)$$

( $\phi_h$ 为温度梯度相似函数),并与一些资料相比得到常数 $c \approx 5$ <sup>[5]</sup>。但此式与自由对流下的渐近分析结果是不一致的。

HEIFE观测得到的 $\sigma_w/u_*$ 和 $\sigma_\theta/|T_*|$ 随 $z/L$ 的变化如图2和图3所示。由之可见,资料点离散较小;不稳定一段, $\sigma_w/u_*$ 和 $\sigma_\theta/|T_*|$ 二者在 $z/L < -0.35$ 之后就都可和自由对流下的分析结果很好符合。 $-0.1 < z/L < 0$ 一段,Panofsky等的拟合结果(式(6))偏高5%—10%,而稳定情况下的实测值仍有随稳定度增大而上升的趋势。无量纲垂直速度方差相似函数的实际拟合结果如下式(图中实践)所示:

$$\sigma_w/u_* = \phi_w(z/L) \begin{cases} = 1.90(-z/L)^{1/3} & (z/L \leq -0.35) \\ = 1.14(1 - 1.5z/L)^{1/3} & (-0.35 < z/L \leq 0) \\ = 1.14(1 + 0.6z/L)^{1/3} & (z/L > 0) \end{cases} \quad (8)$$

中性情况下本结果 $\phi_w(0) = 1.14$ ,比较公认的Panofsky等的结果(1.25)偏低。但后者实际上是对多个不同条件的观测结果的算术平均,有关实验的 $\sigma_w/u_*$ 值其实从1.10到1.40不等。最近Högström根据Löfvsta实验资料确认,中性情况下的 $\sigma_w/u_*$ 随高度增大而增大,该实验的3.6和14 m的 $\sigma_w/u_*$ 平均值分别为1.14,1.23和1.33<sup>[6]</sup>,其3 m处的结果与本实验一致。

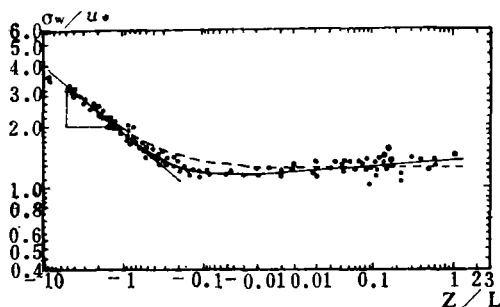


图2 戈壁实验站 $\sigma_w/u_*$ 随稳定度的变化

(虚线为Panofsky等的拟合线,实线为本实验的最佳拟合((8)式))

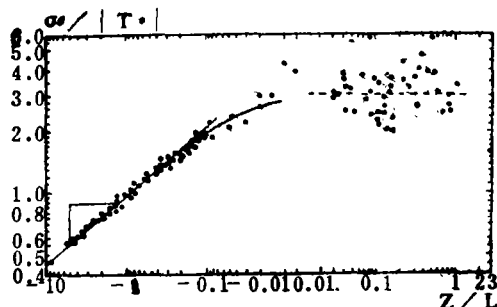


图3 戈壁实验站 $\sigma_\theta/|T_*|$ 随稳定度的变化

(实线为本实验数据的最佳拟合式(9))

本实验得到的 $\phi_\theta$ 的最佳函数形式为:

$$\sigma_\theta/|T_*| = \phi_\theta(z/L) \begin{cases} = 0.96(-z/L)^{-1/3} & (z/L \leq -0.35) \\ = 3.0(1-25z/L)^{-1/3} & (-0.35 < z/L \leq 0) \\ = 3.0 & (z/L > 0) \end{cases} \quad (9)$$

注意到近中性和稳定情况下,和其他许多实验一样,数据点离散很大,很难进行适当的拟合。最近,Shao等根据局地相似理论得到的结果和式(9)非常接近<sup>[7]</sup>。

纵向( $u$ )和横向( $v$ )速度分量方差的分析结果,如文献[1]所述,随着不稳定性增大,数据点离散很大,近地层相似律不再成立。这是更大高度上边界层结构影响所致,从下节湍流谱分析也可看出。

#### 4 湍流谱基本特征

图4给出PIOP期间五个不同时刻(稳定度 $z/L = -0.32 \sim -0.31$ )的风速分量 $w$ 和 $u$ 的功率谱。横坐标为常用的约化频率 $n = fz/\bar{u}$ ,纵坐标为按Kaimal方法<sup>[8]</sup>归一化的谱。以 $u$ 分量为例,惯性子区的谱 $S_u(f)$ 可按自然频率 $f$ 以及近地层相似性设想写为:

$$\frac{f S_u(f)}{u_*^2 \phi_\epsilon^{2/3}} = \frac{\alpha_u}{(2\pi k)^{2/3}} n^{-2/3} \quad (10)$$

式中 $\alpha_u$ 为Kolmogorov常数(本实验求得值为 $0.50 \pm 0.04^1$ ), $\phi_\epsilon = kz\epsilon/u_*^3$ 为湍流动能耗散率通用相似函数。取 $k=0.40$ ,则式(10)及相应的 $w$ 、 $v$ (横向)和 $T$ (温度)的惯性子区谱可分别求得:

$$f S_u(f)/u_*^2 \phi_\epsilon^{2/3} = 0.27 n^{-2/3} \quad (11)$$

$$f S_w(f)/u_*^2 \phi_\epsilon^{2/3} = 0.36 n^{-2/3} \quad (12)$$

$$f S_v(f)/u_*^2 \phi_\epsilon^{2/3} = 0.36 n^{-2/3} \quad (13)$$

$$f S_T(f)/T_*^2 \phi_N \phi_\epsilon^{-1/3} = 0.38 n^{-2/3} \quad (14)$$

( $\phi_N$ 为无量纲温度方差耗散率)。这样归一化的主要优点是在双对数坐标图上各种稳定

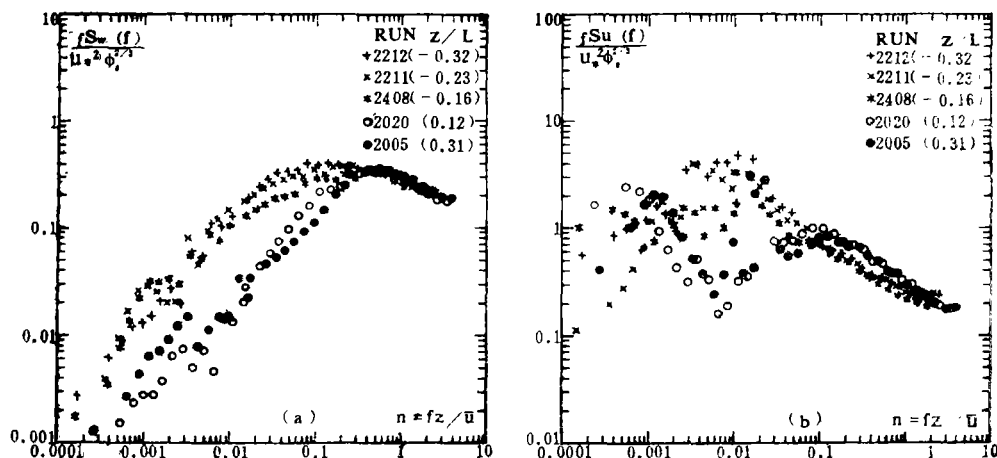


图4 不同稳定度下5个时次的垂直速度谱(a)和纵向速度谱(b)

1) 刘晓虎, 戈壁地区湍流谱特征的初步研究(硕士学位论文), 中国科学院兰州高原大气物理所, 1989。

度下的谱都应在惯性子区归一为斜率 $-2/3$ 的一条直线,从而可以更清楚地分析谱的低频特性。实际计算中我们取 $\phi_e$ 和 $\phi_N$ 为以下函数形式

$$\phi_e = \phi_m - z/L \quad (15)$$

$$\phi_N = \phi_h \quad (16)$$

而无量纲风速梯度和温度梯度函数 $\phi_m$ 和 $\phi_h$ 采用了常用的Businger-Dyer关系式。

实际谱的惯性子区特性与式(11)~(14)的理论分析很一致( $v$ 和 $T$ 谱为节约篇幅未给出)。低频含能区谱曲线随不稳定性增大而逐渐左偏,在 $w$ 谱图上表现得最为规整。水平速度谱的含能区,不稳定情况下,不同稳定度的谱相互混淆,且所含能量比份比 $w$ 谱明显增高;稳定情况下,绝大多数时次出现明显双峰。计算表明其第二峰频率与Brunt-Vaisala频率相近,可能是地形诱发重力波的影响。温度谱的特性与 $u$ 谱相近。

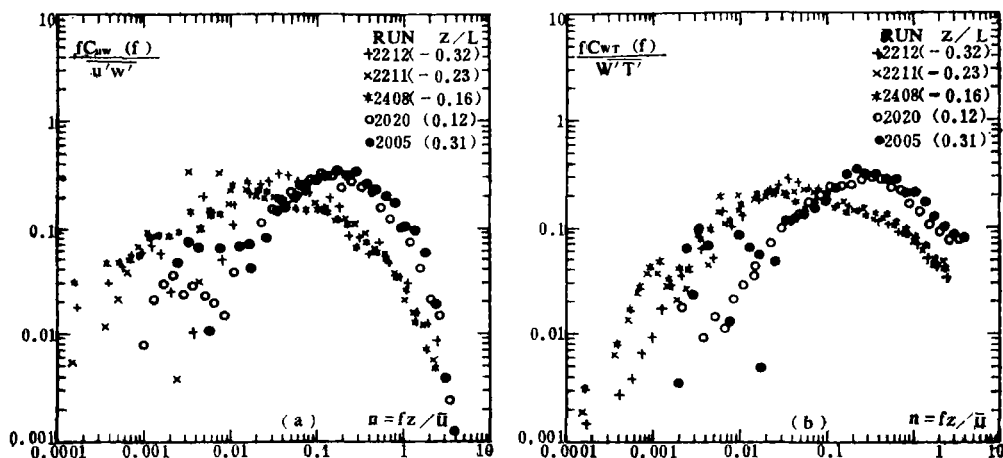


图 5 与图 4 相同时次的动量通量协谱(a)和感热通量协谱(b)

湍流通量的协谱特征与典型情况相近。由图 5 可见,其高低频两端的衰落都比功率谱明显加快(高频端近似符合 $-4/3$ 律),表明对通量的贡献主要是主导尺度涡旋。如果单为测量通量,每次运行时间可以相对短些;特别在稳定情况下,取平均时间为 15 至 20 分钟(约相当 $f \geq 0.001$ )测得的感热或动量通量即有足够的代表性了。

由细线干湿计得到的比湿谱一般离散较大,且高频端(约为 $f > 1$ )明显上翘。后者可能是干湿球二者时间常数不同从而配合失衡所致。但水汽通量协谱特性与图 5 相近,在比湿功率谱的上翘部分,协谱已明显衰落,故不会给水汽通量的测量或计算结果带来太大影响。

## 5 能量平衡特征与白天向下的水汽通量

1988 年 9 月实验期曾发现,戈壁上连续多天白天的近地层水汽通量大都是由上而下的<sup>[1]</sup>。1990 年 PIOP 期间,陆续下过几次小雨,上述现象不象 POP 期间那样明显和连续;但其出现仍占白天观测时次一半以上。当有几天连续干燥天气时,能量平衡各分量的正

变化就和文献[1]图示的非常相似。图 6 给出一天为例。作为验证,图 7 给出当天中午 11 时和 12 时的比湿和气温的垂直廓线;8 m 以下比湿由塔上测得,下低上高的“逆湿”倾向明显可见。系留气球探测 500m 以下低空基本为等湿,但靠近地面的几个测点也还是逆湿的,趋势与塔上的一致。

白天水汽通量向下或逆湿形成的物理机制,还需要进一步的分析和数值模拟;但其反复的大量出现,显然反映了戈壁-绿洲系统一个内在的相互作用。戈壁地区的昼夜风向转换很有规律。如图中说明所示,白天多为西北风(由绿洲到戈壁),夜间则反向;这很可能是由祁连山驱动的一个较大的山谷风系统。白天,戈壁地面温度高且较干燥,由绿洲吹来的较潮湿空气会使得下风方某一个距离内的戈壁近地层中,上部较下部更为湿润,从而形成由上而下的水汽湍流输送。夜间,来自祁连山北坡及大片荒漠的干燥空气吹到靠近绿洲的戈壁站上空,白天被地面沙石层吸收的湿气可能被迫释放,从而形成一个向上的水汽通量;尽管其量值比白天小得多。

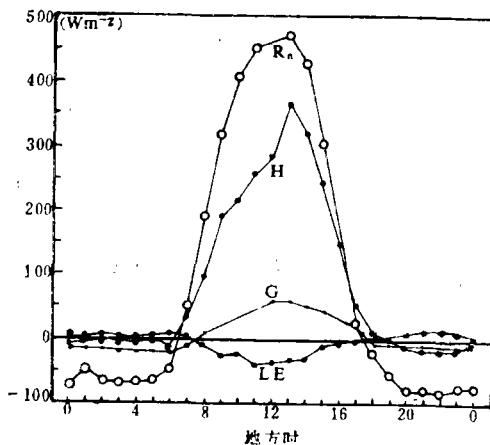


图 6 1990 年 8 月 20 日近地层能量平衡各分量变化情况  
(当天晴,8 时—18 时风向 NNW,风速 4—7 m/s,夜间风速减弱,20 h 起风向转为 S)

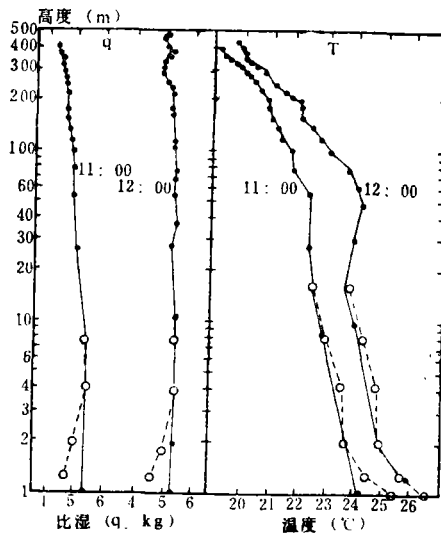


图 7 与图 6 同日 11 时和 12 时的比湿(左)和温度(右)廓线图  
(圆圈为铁塔测量结果,圆点为系留气球探测结果)

如图 6 所示,白天戈壁地区感热通量  $H$  明显较高。地热流量  $G$  是 5 cm 深处热流板的实测值。根据 POP 期间不同深度热流板资料推算,实际的地表热流量可能比图示  $G$  值大 20%—100%,即能达到净辐射  $R_n$  值的 40%。特别是上午,由于浅层沙土温度升高,贮热明显,实际地热流比图示更高。这样感热和地热流二者可基本与净辐射平衡。至于由上而下的水汽,在到达干燥而又高温的地表后,不会发生凝结相变过程,而很可能是被有相当空隙度的沙石层吸收,以分子扩散等机制输送到地表下某个深度;故而实际上不参与上述的能量平衡过程。

戈壁白天的水汽通量向下的现象,其实与众所周知的“绿洲效应”相互对应。白天,绿

洲上低层空气较为湿凉而上层则较为干热。此时大量的潜热向上输送,而感热通量则常为负(向下)。其情况正和戈壁上的相反。“绿洲效应”和戈壁上的负水汽通量、高感热通量,是戈壁-绿洲这一地区性中尺度环流影响的两个侧面。

## 6 结 论

1988年9月和1990年8月在HEIFE戈壁站的两次实验,取得质量较高的近地层湍流及其他配套数据。以此为基础,本文进一步分析了近地层大气湍流结构的某些特征。垂直速度和温度方差以及某些谱特征,符合近地层相似理论。谱及协谱分析有助于检验数据代表性及了解参与输送的主要涡旋尺度。1990年的实验进一步证实了戈壁地区白天的负水汽通量现象。文中对其物理机制做了进一步分析,指出它和众所周知的“绿洲效应”是戈壁-绿洲这一地区性环流影响的两个侧面。

## 参考文献

- [1] 王介民, 刘晓虎, 祁永强. 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究. 高原气象, 1990, 9 (2): 120—129.
- [2] Grant A L M, Watkins R D. Errors in turbulence measurements with a sonic anemometer. Boundary-Layer Meteor, 1989, 46:181—189.
- [3] Tsukamoto O. Dynamic response of the fine wire psychrometer for direct measurement of water vapor flux. J Atm Ocean Technology, 1986, 3:453—461.
- [4] Wyngaard J C. On surface layer turbulence. in Micrometeorology, AMS, Boston, MA, 1973, 101—149.
- [5] Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric turbulence. John Wiley & sons, New York, 1984.
- [6] Hogstrom U. Analysis of turbulence structure in the surface layer with a modified similarity formulation for near neutral conditions. J Atm Sci, 1990, 47(16):1949—1972.
- [7] Shao Y, Hacker J M. Local similarity relationship in a horizontally inhomogeneous boundary layer. Boundary-Layer Meteor, 1990, 52(1—2):41—68.
- [8] Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, Cote O R. Spectral characteristics of surface layer turbulence. Quart J Roy Meteor Soc, 1972, 98:563—589.

# TURBULENCE STRUCTURE AND TRANSFER CHARACTERISTICS IN THE SURFACE LAYER OF HEIFE GOBI AREA

Wang Jiemin    Liu Xiaohu    Ma Yaoming

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Academia  
Sinica, Lanzhou 730000)

## Abstract

In Sept. 1988 and Aug. 1990, two observational experiments have been carried out in the HEIFE Gobi station. A data set on the surface layer turbulence has been collected, which is proved to be of high quality. An analysis on the surface layer structure shows that turbulence statistics such as the variances of vertical wind component and temperature are in good agreement with the surface

layer similarity theory. The relevant forms of similarity function are presented. The characteristics of spectra and cospectra are mainly similar to that of flat and horizontal terrain. The phenomenon of downward water vapor flux over Gobi desert in daytime, which was noticed in 1988, was confirmed in the PIOP of 1990. An analysis on its physical mechanism is given. As the well-known 'oasis effect', this phenomenon is closely related to a local 'Gobi desert-oasis' circulation system.

**Key words:** Gobi, Surface layer, Turbulence structure, Turbulence transfe