

# 不同下垫面上近地层湍流的多尺度属性研究<sup>\*</sup>

许丽人 李宗恺

(南京大学大气科学系, 南京, 210093)

张宏昇

(北京大学地球物理系, 北京, 100871)

## 摘 要

文中利用统计和多尺度分析方法分析了几种复杂下垫面情况下的风、温湍流脉动观测资料, 结果表明: 下垫面结构的差异明显地影响湍流量, 如: 戈壁地区的热力作用明显大于雪面和城郊面, 表现在湍流时间尺度上也明显地大于雪面和城郊面。但复杂下垫面下的湍谱在惯性区仍满足“ $-\frac{2}{3}$ ”次律; 多尺度方法研究湍流, 可以更简捷地分析湍流的多尺度结构及其在湍流输送中的作用。由此可看出, 多尺度方法是发展湍流统计理论的一种有效工具。

关键词: 复杂下垫面, 多尺度分析方法, 湍流时间尺度, 湍流输送特征。

## 1 引 言

大气湍流问题是大气边界层物理研究的核心问题。大气湍流的研究包括外场观测、理论研究、数值模拟等, 不论是理论研究, 还是数值模拟, 都要以外场实际观测数据为基础。目前, 人们对于水平足够均匀地形条件下的近地面湍流结构的认识已比较成熟, 如1968年和1973年美国分别在堪萨斯州和明尼苏达州开展了两次平坦地形的大规模综合观测实验, 取得了大量的湍流实验数据和大批的研究成果<sup>[1, 2]</sup>, 为研究大气边界层湍流结构提供了框架。但对其它地形, 如: 戈壁、雪面、城郊等复杂地形的湍流实验观测与研究并不多。因此对复杂下垫面的大气湍流结构进行研究, 对于深入研究大气湍流的结构和输送特征有重要意义。湍流运动的突出特点在于它有明显的混合现象, 这种混合现象表现为湍流脉动速度所引发的物理属性的输送, 对于大气中动量、热量、水份等的输送和平衡, 具有极其重要的意义。因此湍流输送问题是边界层气象乃至整个大气科学所关心的问题, 研究这些次网格尺度的物理过程及参数化问题, 对于进一步改进大气边界层模式和气候模式等都是很有必要的。

研究用了3种下垫面的湍流观测资料, 其中黑河化音站代表戈壁下垫面、南极测站是

<sup>\*</sup> 初稿时间: 1998年1月27日; 修改稿时间: 1998年7月22日。

资助课题: 国家自然科学基金(49475247)。

雪面、北京香河测站代表城郊下垫面,研究了复杂下垫面下的大气湍流属性特征。

## 2 实验场地与资料

黑河化音测站位于黑河西南方向(39°09'N, 100°06'E),地处大面积戈壁滩之中,气候干燥。北面及东北面距绿洲边缘的林地和农田约2km;南与西南面为大片戈壁,地形以大约1°的坡度由北向南略有抬升,到30km以远进入祁连山系。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,地势平坦<sup>[3]</sup>。化音测站基本上代表了黑河流域南部大面积戈壁的地形和下垫面的特征。黑河化音站资料取自1992年8月 HEIFE 实验,观测高度为4.9 m,采样频率为16 Hz,采样长度为30 min;超声风速仪为日产 DAT-300型,探头为 TR-61C 型,温度脉动资料为“自制铂丝温度脉动仪”测量值;并有平均风、温廓线资料。

南极测站位于69°22'S, 76°22'E,由雪面覆盖,周围比较开阔。资料取自1994年12月,观测高度为4 m,采样频率为10 Hz,采样长度为30 min;超声风速仪测得湍流脉动资料;平均风、温廓线资料是逐时的。

香河测站位于北京城郊,下垫面是草地,离观测场地很远的四周是低矮围墙,边缘有稀少树木,在测站的南部略有点坡度,属典型的开阔农村地形。资料取自1994年8月下旬和9月上旬,观测高度有两层,分别为8 m 和16 m,超声风速仪测得的湍流脉动资料,采样频率为10 Hz,采样长度为109 min;平均风、温廓线资料是每隔20 s 测一次。

## 3 分析方法

### 3.1 统计理论

研究大气湍流的一个重要途径是利用大气湍流的统计理论<sup>[4]</sup>,通过研究湍流脉动的统计特征量及其概率分布,来研究湍流的结构及其对各种物理属性的输送特征。用统计理论方法计算后,分析方差、湍强、摩擦速度  $u^*$ 、特征温度  $\theta^*$ 、莫宁-奥布霍夫长度  $L$ 、理查孙数  $Ri$ 、无量纲高度  $Z/L$  等湍流统计特征量,以及湍流相关系数、湍流的时间尺度与湍谱等等。由统计理论出发,可以得到一系列有价值的结果。

其中  $u^*$  的求法采用下式:

$$u^* = \left( \overline{(-w u)^2} + \overline{(-w v)^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

### 3.2 多尺度分析方法

统计理论方法将湍流时间尺度定义为  $T = \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau$ ,  $R(\tau)$  为湍流的自相关系数,反映了湍流的平均寿命。统计理论方法还将相关系数和谱密度利用傅氏变换联系起来,一旦相关系数已知,便可求出湍流的能谱分布,但由于不同尺度湍能之间的混淆和迭加影响,从谱图中只能分析连续尺度谱的湍流的作用。

实际上大气湍流的尺度范围很广,在不同的大气过程中,湍流能量往往集中在某几个不连续的尺度范围内,即湍流是多尺度的。不同尺度的湍流在不同的大气过程中所起的作用不一定相同。而统计理论方法除连续谱之外,只能给出一个平均的湍流尺度,不能定量地区分不同尺度湍流对湍流交换过程的作用。因此,就需要发展一个明确表达湍流多尺度性的物理模型。

多尺度分析方法是近年来发展起来的分析湍流统计性质的一种新方法<sup>[5]</sup>。按自相关系数的定义:

$$R(\tau) = \frac{\overline{u(t)u(t+\tau)}}{u^2} \quad (2)$$

对相关系数的确切形式及性质知道得并不多,一般地说它在初始时刻为1,随时间的推移而趋向于0。统计理论方法是将它表达成单指数衰减函数,然而通过实测资料的分析,发现这种模拟形式并不够理想。这与湍流的属性有关,湍流的突出特点在于流速与压强等值的无规则脉动,从而使湍流动力场的瞬时值在空间上和时间上的变化过程非常复杂。事实上大气湍流是多尺度性的,因此自然而然地想到将相关系数模拟成多指数的和。这样的模拟通过实测资料的检验,表明这种多指数的拟合更能反映出湍流的特性。基本方法如下:

利用ESFT<sup>[6]</sup>方案,将相关系数定义为一组衰减指数函数和的拟合,即:

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^n a_i e^{-\tau T_i} \quad (3)$$

其中 $a_i, T_i$ 满足条件: (1)  $a_i > 0, T_i > 0$ , (2)  $\sum a_i = 1$ 。

按文献[5],  $a_i$ 是权重函数,表示第 $i$ 阶湍流动能对总湍流动能的贡献大小。 $T_i$ 为第 $i$ 阶湍流的自相关时间。它与自身的长度成正比,与分裂为小涡的能力成反比。

由时间积分尺度的定义及式(3),  $T$ 可以简化为:

$$T = \sum_i a_i T_i \quad (4)$$

能量谱密度是自相关系数的傅里叶变换,其定义式为:

$$\begin{aligned} \Phi(n) &= 4 \int_0^\infty R(\tau) e^{i2\pi n\tau} d\tau \\ &= a_1 \Phi_1 + a_2 \Phi_2 + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

将相关系数的表达式(3)代入(5),得

$$\Phi(n) = \frac{4a_1 T_1}{(2\pi n)^2 T_1^2 + 1} + \frac{4a_2 T_2}{(2\pi n)^2 T_2^2 + 1} + \dots \quad (6)$$

利用多尺度分析方法不仅能得到谱方法的所有信息,而且还能看出湍流的多尺度性:湍流是由哪几种尺度的湍涡构成的,它们的能量分配,以及哪种湍涡对湍流输送过程起主导作用。

## 4 计算结果及分析

### 4.1 统计理论方法分析

#### 4.1.1 戈壁、雪面、城郊3种下垫面下湍强的比较

湍强是无量纲化后的标准差,表示湍流脉动量的相对大小,用它可以定量地表示湍流脉动发展的强弱。对黑河化音测站、南极测站、北京香河测站3种下垫面的湍强进行了计算,结果列于表1中。

从表1中可以看出:对同一地区,随着不稳定度的增加,3个方向的湍强都在增大。无论在稳定或不稳定空气中垂直方向湍强都要比其它方向小,这一点与前人的研究结果一致,这也反映了垂直方向的湍流运动以小尺度高频湍涡为主,受稳定度的影响相对较小;

在相同稳定度下,随着地表粗糙度的增加,湍强逐渐增大。下垫面地形的差异对湍强有很大的影响,从粗糙度小的南极雪面到粗糙度较大的城郊下垫面,湍流强度逐渐增大。

#### 4.1.2 $u^*$ 和 $T^*$ 的比较

$u^*$  的变化反映了湍流脉动速度的大小。对3种下垫面所测数据分析,得出:城郊下垫面的  $u^*$  量级比戈壁、雪面的大;在夜间戈壁地区  $u^*$  最小,但在白天戈壁地区  $u^*$  要比南极测站的  $u^*$  大;南极测站个别时次出现大的峰值,此时正好对应于大的平均风速。

对于  $T^*$  的日变化曲线,在戈壁地区其特征比较明显,出现典型的“漏斗状”曲线,夜晚大气稳定,  $T^*$  为正;白天大气不稳定,  $T^*$  为负。在城郊也有类似的变化趋势,但在不稳定情况下(白天),  $T^*$  的变化幅度不如戈壁的大。这是由于戈壁地表的加热冷却明显,日夜稳定度的过渡转折较快<sup>[7]</sup>。而相比于城郊和戈壁地区,南极雪面的  $T^*$  日变化幅度最小,这与雪面的下垫面有关,这一地区受热力作用相对较弱一些。

以上得出的各物理量的变化规律与前人得出的结果相一致<sup>[8]</sup>。对其它一些宏观统计量的性质也做了分析,其结果将在有关文中阐述。

#### 4.1.3 湍流尺度

湍流尺度与相关系数之间存在着密切关系。湍流积分尺度表示的是各种尺度湍流的平均尺度或平均寿命,它表示总体湍流的平均大小,表2是3个测站在不同稳定度下的湍流积分尺度。

表2 3个测站在不同稳定度下欧拉时间尺度

下垫面	时间尺度	稳定	中性	不稳定
城郊	$T_u$	8.23	12.47	14.74
	$T_v$	2.87	16.58	18.89
	$T_w$	1.99	2.04	2.77
戈壁	$T_u$	21.53	21.32	55.85
	$T_v$	14.86	20.66	55.48
	$T_w$	4.95	6.85	7.09
雪面	$T_u$	12.07	14.19	18.70
	$T_v$	11.62	15.47	15.96
	$T_w$	2.00	2.43	2.02

从表2中可以看出,总体上  $T_u > T_v > T_w$ ,黑河戈壁地区的时间尺度要比南极雪面和北京城郊地区的时间尺度大。随着不稳定度的增加,热力作用逐渐增大,大湍涡占主导地位,平均尺度逐渐增加;稳定情况下,机械作用起主导作用,小湍涡占主导地位,平均尺度较小。

#### 4.1.4 不同下垫面的大气湍流谱

图1给出了香河站傅氏变换得到的  $u, v, w$  谱,其中横坐标代表归一化频率  $f = \frac{nz}{u}$ ,纵坐标表示归一化的谱密度,即  $\frac{ns(n)}{\sigma_x^2}$ ,  $x = u, v, w$ ,横坐标和纵坐标均取对数坐标,以下的图说明相同,将不再描述。从图1可见:

(1) 在惯性区,不同的稳定度下能谱与频率之间均符合“-2/3”次方定律。

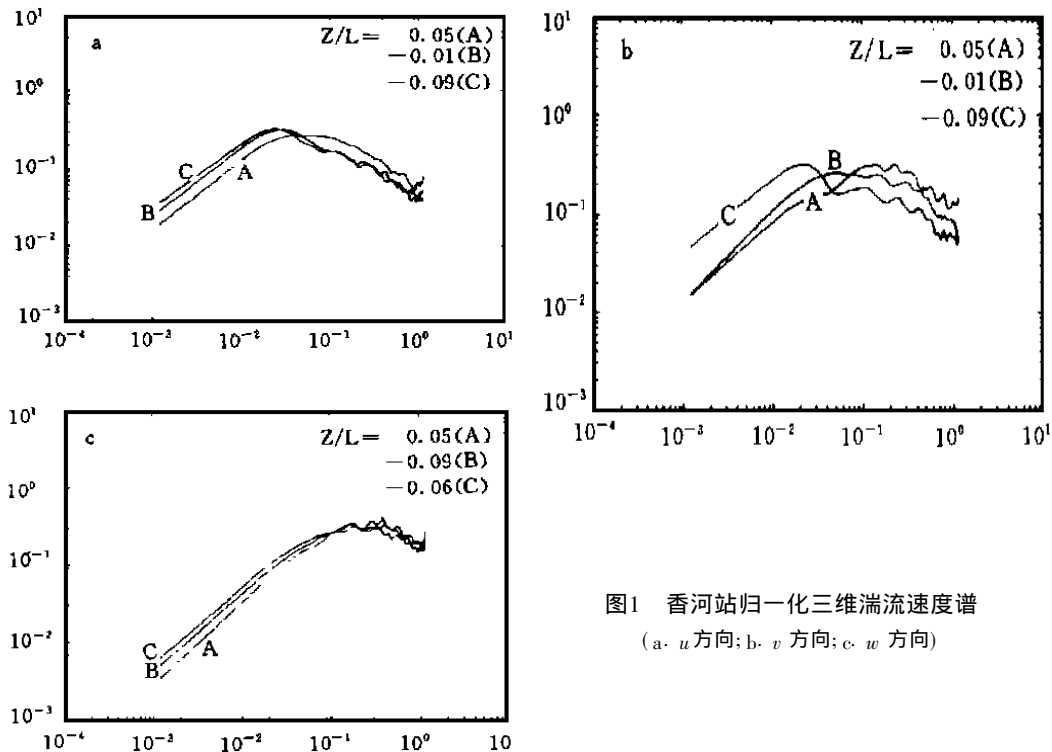


图1 香河站归一化三维湍流速度谱  
(a.  $u$ 方向; b.  $v$ 方向; c.  $w$ 方向)

(2) 对3个方向的风速谱, 随不稳定度的增加峰值频率偏向低频, 且峰值增高。在相同的稳定度下, 水平速度谱的峰值频率要比垂直方向的峰值频率低, 这是由于地面对垂直运动的限制, 使垂直方向运动以小涡流为主, 小涡流主要影响高频端, 从而使垂直速度谱的能量集中在较高频率段, 而且垂直方向谱受稳定度的影响不如水平方向明显。这些物理量的变化规律与前人得出的结果一致<sup>[1,2,9]</sup>。

(3) 化音站归一化湍流速度谱的规律与香河站一致。此处只给出  $v$  方向速度谱, 其它方向速度谱图与香河站相似, 不再列出。图2为化音站归一化湍流  $v$  方向速度谱, 从图2中可发现在不稳定较弱的条件下  $v$  方向谱出现双峰。正如前人所指出的, 在不稳定层结条件下, 由于动力和浮力的双重作用, 在  $Z/L$  处于近中性和极不稳定之间的条件下, 谱曲线的低频端出现双峰。其中一个为动力峰, 偏低频的一个为浮力峰<sup>[10]</sup>。化音站归一化湍流温度谱、湿度谱随稳定度的变化规律基本与速度谱的变化规律相同, 温度谱的谱峰比较尖锐, 而湿度谱的谱峰则较宽。

(4) 南极测站归一化湍流速度谱的变化规律基本与以上两区的变化规律相同。速度谱的特征: 在惯性区接近“ $2/3$ ”次方律; 低频端随不稳定度的增加, 谱峰增大且向低频端移动等等。

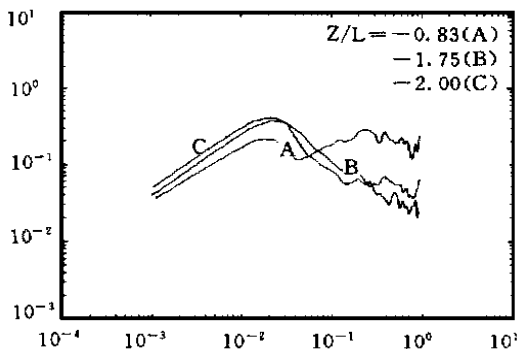


图2 化音站归一化  $v$  方向速度谱  
(纵、横坐标同图1)

## 4.2 多尺度分析方法

### 4.2.1 多尺度分析方法拟合的相关系数

图3是化音站两个不同时刻的  $u$  方向相关系数随时间的变化。从图3 a 中可以看到在相关系数随时间的增加下降较为平缓的情况下,用单指数拟合的结果比较接近实测值,但用多指数拟合的结果更好,基本上与实测值重合;对于图3b 中随着时间的增加,相关系数下降过程中出现较大的起伏情况下,单指数拟合值偏离实测值很大,而多指数拟合结果较单指数拟合更合理。

图3b 的相关系数多尺度拟合曲线为:

$$R_u(\tau) = 0.466e^{-\tau/2.22} + 0.534e^{-\tau/60.31} + \dots$$

用多指数拟合得出的相关系数与实测结果较接近,说明多尺度方法求相关系数是比较有效的。

### 4.2.2 多尺度分析方法拟合的时间尺度

湍流积分尺度表示的是各种尺度湍流的平均尺度或平均寿命,它表示总体湍流的平均大小。表3是利用多尺度方法拟合的3个测站在不同稳定度下的湍流多尺度特征值。

从表3中可以看到,稳定情况下的湍流尺度小于中性和不稳定时的湍流尺度。同一稳定度下,  $T_u > T_v > T_w$ , 即水平方向湍流时间尺度大于垂直方向的时间尺度。因受地表面的限制,湍流的铅直尺度一般不大,湍流的垂直尺度大致与高度同量级,而水平范围由于不受边界约束,湍流的尺度范围无明确的界限,因此水平方向湍流尺度一般大于垂直方向

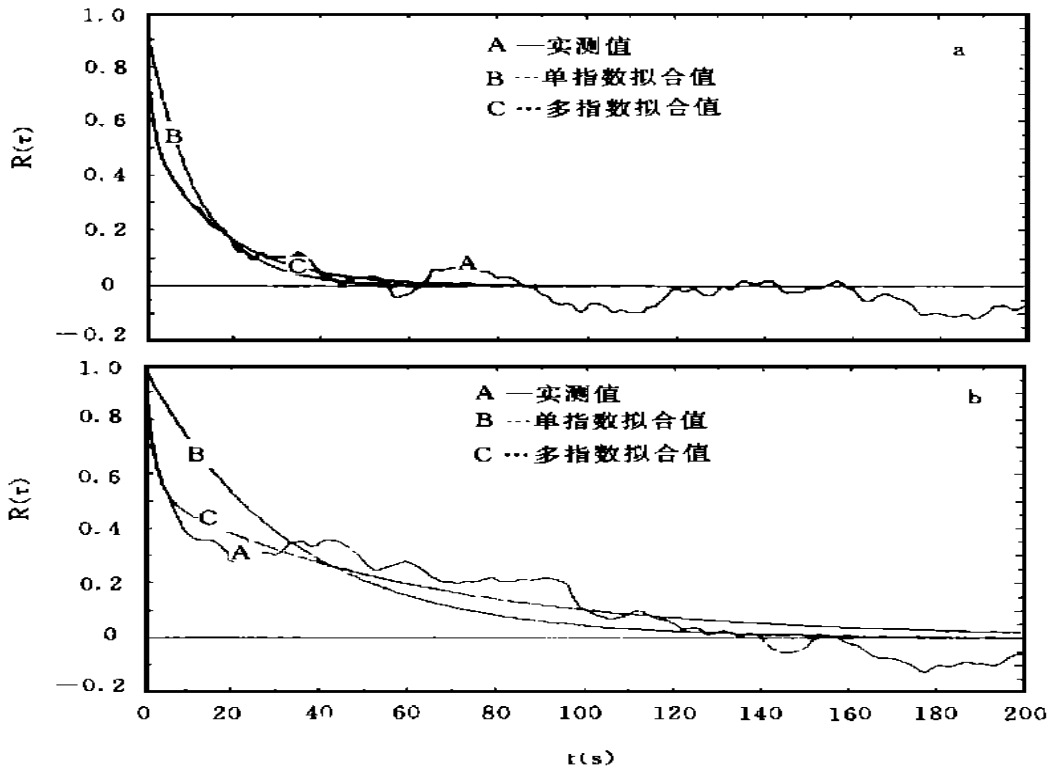


图3 化音站两个不同时刻的  $u$  方向相关系数随时间的变化

表3 3个测站在不同稳定度下的多尺度特征值

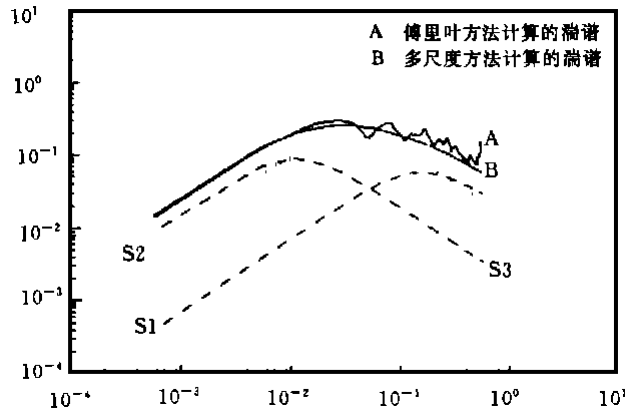
测 站		香 河			化 音			南 极		
稳定度	特征值	$T_u$	$T_v$	$T_w$	$T_u$	$T_v$	$T_w$	$T_u$	$T_v$	$T_w$
稳定	$a_1$	0.739	0.889	0.947	0.467	0.353	0.953	0.538	0.569	0.658
	$T_1$	5.44	2.91	1.72	2.23	2.09	0.89	2.91	4.20	0.40
	$a_2$	0.261	0.111	0.053	0.534	0.535	0.030	0.462	0.367	0.292
	$T_2$	39.66	100.4	18.63	60.28	17.95	21.47	27.30	29.8	3.22
	$T$	14.37	13.73	2.62	33.23	10.34	1.49	14.10	13.32	1.20
中性	$a_1$	0.268	0.614	0.727	0.05	0.00	0.09	0.405	0.343	0.504
	$T_1$	2.05	2.41	1.99	0.60	0.00	0.77	2.76	4.64	0.88
	$a_2$	0.732	0.385	0.273	0.948	1.00	0.90	0.594	0.518	0.438
	$T_2$	15.98	40.85	4.73	42.92	20.45	6.67	25.61	22.79	1.78
	$T$	12.25	17.25	2.74	40.72	20.45	6.07	16.35	13.40	1.22
不稳定	$a_1$	0.075	0.294	0.454	0.00	0.229	0.214	0.191	0.141	0.198
	$T_1$	5.33	2.00	3.88	0.00	8.40	1.42	1.69	4.80	0.05
	$a_2$	0.918	0.704	0.546	1.00	0.771	0.786	0.809	0.705	0.762
	$T_2$	16.22	33.69	3.81	52.08	75.18	17.21	23.23	20.04	1.73
	$T$	15.29	24.31	3.84	52.08	59.89	13.83	19.12	14.81	1.33

的湍流尺度。从表3中还可看出,随着不稳定度的增加,当 $T_i$ 增大时与之相对应的 $a_i$ 值增大,表明大湍流占主导地位,同时,小尺度湍流作用逐渐减小;在稳定情况下,小尺度湍流占主导作用。

戈壁的湍流时间尺度比下垫面为雪面的南极测站的湍流时间尺度要大。这是因为戈壁受热力作用的影响比南极地区更为明显,热力作用显著时,对大尺度湍流的发展有利,表现为平均尺度也较大。

#### 4.2.3 多尺度方法分析湍谱

用多尺度分析方法研究湍流时间尺度时,将总时间尺度分离成各湍流尺度加权和,傅里叶谱恰为各相关尺度谱的能量权重和,并可看出湍流能量在各尺度上的分布,这比传统的傅里叶方法更清晰、直观。图4是化音站用多尺度方法计算的归一化湍流谱。图中纵坐标表示 $\frac{v^2(n)}{\alpha^2}$ ,即归一化功率谱,取对数坐标,横坐标为无因次频率 $f = nz/u$ ,也为对数坐标。图中曲线A代表傅氏变换求得的湍谱,曲线B代表多尺度方法求得的湍谱。图中两条曲线能够很好地吻合在一起,这也进一步说明了多尺度方法的有效性,并且从图中还可以看到湍流运动是由几种尺度湍流组成的,而且它们对整个能量影响的大小也表现得很清晰,图中曲线S1, S2, S3分别代表了3种尺度湍流的能量谱,图中这一时次的关系数可以写为:

图4 化音站多尺度方法求得的归一化 $u$ 方向湍流速度谱

$$R_u(\tau) = 0.174e^{-\tau^{1.13}} + 0.559e^{-\tau^{4.84}} + 0.267e^{-\tau^{16.13}} \quad (7)$$

S1为式(7)中第一项产生的功率谱, S2为第二项产生的功率谱, S3为第三项产生的功率谱, 从图中可以看到多尺度方法求得的功率谱与傅里叶方法求的谱符合得很好, 满足谱的一般规律, 而且从图中还可以直观地看到 S3线主要是影响谱的低频段, S2线主要是影响谱的峰值部分, 而 S1线对谱的高频端起主要作用, 这能从式(7)中看出来, 第一项表示高频项, 小湍涡起主要作用, 占总能量的17.4%。第三项表示低频项, 大湍涡起主要作用, 占总能量的26.7%, 第二项是中间尺度湍涡占总能量的55.9%。可见, 影响水平方向速度谱的主要是大尺度和较大尺度湍涡。

图5是化音站多尺度方法求得的归一化湍流谱。从图5中可见: 对于  $u$  方向速度谱是由3种尺度湍涡组成的, 较小尺度和中间尺度湍涡对整个湍能的贡献比较大, 而大尺度湍涡对湍能的贡献很小。对于  $v$  方向速度谱从图5b中可以看到, 横向速度谱上出现了低频峰。当出现低频峰时, 横向速度谱的形状是两边高中间低<sup>[11]</sup>, 谱峰反映了风向的大幅度摆动, 这种情况的出现可能是由于这一地区存在戈壁和绿洲的不均匀下垫面以及受祁连山地形的影响所造成的。而  $w$  方向谱虽然也是由两种尺度谱组成的, 但都是小尺度湍涡, 这也证明了前面所讲的  $w$  方向谱主要受小尺度湍涡的影响。对于温度谱, 由两种尺度湍涡组成, 所占比重相差不大, 温度谱出现了双峰。

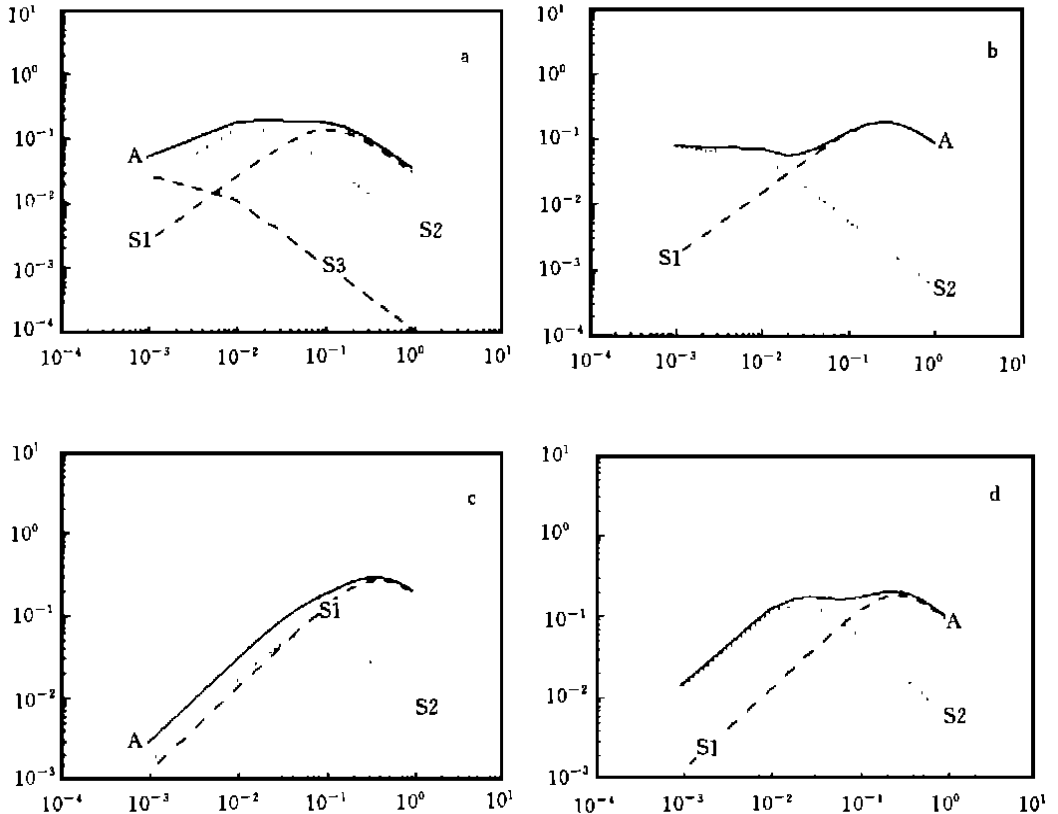


图5 化音站多尺度方法求得的归一化湍流谱  
(a.  $u$  方向; b.  $v$  方向; c.  $w$  方向; d. 温度谱。坐标同图1)



对香河站和南极测站也同化音站一样用多尺度方法进行了分析,其规律大致与化音站相同。因篇幅有限,此处不再给出其图形。下面以中性情况下的速度谱为例,对3个测站的湍谱进行对比分析。图6为在中性情况下用多尺度分析方法计算的3个测站的速度谱对比分析图。图中纵坐标表示  $\frac{ns(n)}{O_n^2}$ , 取对数坐标, 横坐标分别为  $u, v, w$  方向的自然频率  $n$ , 也取对数坐标。

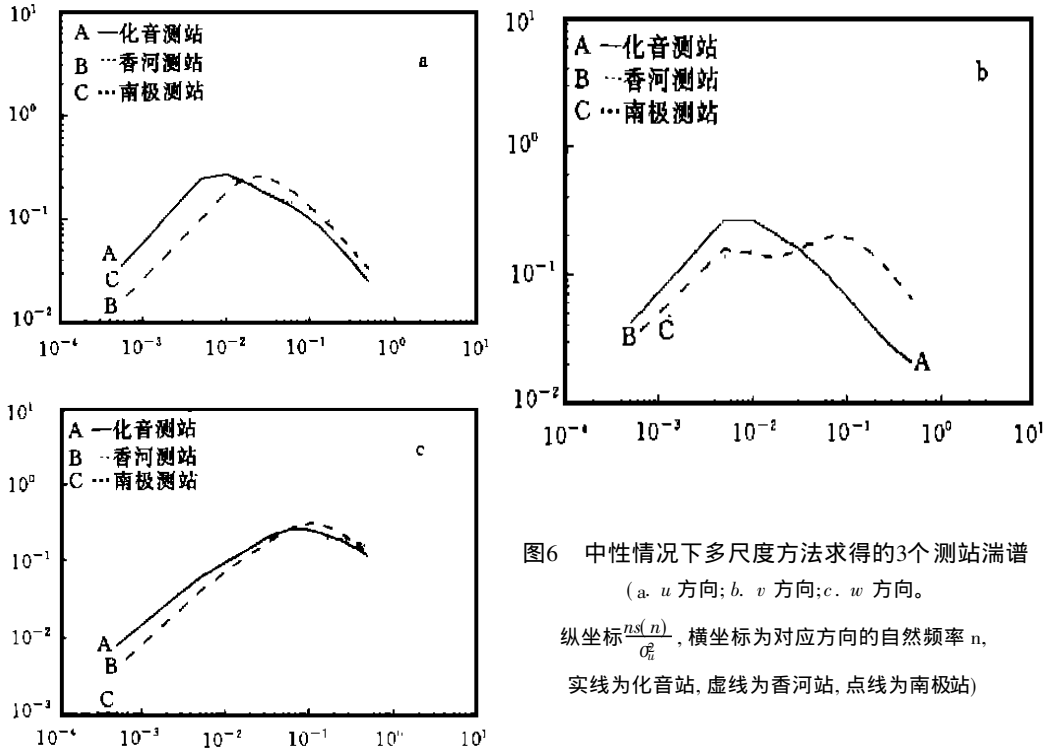


图6 中性情况下多尺度方法求得的3个测站湍谱 (a.  $u$  方向; b.  $v$  方向; c.  $w$  方向。

纵坐标  $\frac{ns(n)}{O_n^2}$ , 横坐标为对应方向的自然频率  $n$ , 实线为化音站, 虚线为香河站, 点线为南极站)

由图6中可以看出: 在中性情况下, 总体上戈壁地区的低频能谱密度较大, 而南极雪面的  $w$  方向速度谱更偏向于高频端。图6中的每一条曲线都可以分为某几个尺度谱的和。对于  $u$  方向速度谱(图6a), 分别给出3个测站的相关尺度谱, 见图7。黑河戈壁地区的  $u$  方向速度谱由两个尺度谱组成, 分别为2.49 s和20.06 s, 所占比重分别为21.5%, 78.5%。南极雪面的  $u$  方向速度谱由3种尺度谱组成: 分别为0.05 s(占4.2%), 1.53 s(占24%), 15.08 s(占70%)。北京香河站的  $u$  方向速度谱由两种尺度谱组成, 分别为1.42 s(占7.3%), 6.61 s(占76.2%)。由此可以看出: 戈壁地区的  $u$  方向速度谱湍流尺度最大, 所占比重也最大。因此, 戈壁地区的  $u$  方向速度谱较其它两区更偏向于低频, 而香河测站  $u$  方向速度谱的湍流最小。因此香河站的  $u$  方向速度谱较其它两区更偏向于高频, 而南极测站恰好介于两者之间。对于  $v$  方向速度谱, 戈壁地区由3种尺度谱构成, 最大尺度湍流占总能量的80.1%, 比其它两区大得多, 南极最大尺度湍流占31%, 香河占43%。因此戈壁地区的  $v$  方向速度谱比其它两区偏向低频, 大尺度的湍流起主导作用。而香河站由两种尺度湍流构成, 小尺度湍流所占比重较大, 占57%。因此, 香河测站的高频端作用较大, 小尺度湍流起主要作用。对于  $w$  方向速度谱, 戈壁地区小尺度湍流占92%, 南极占96%, 香河占95%。因

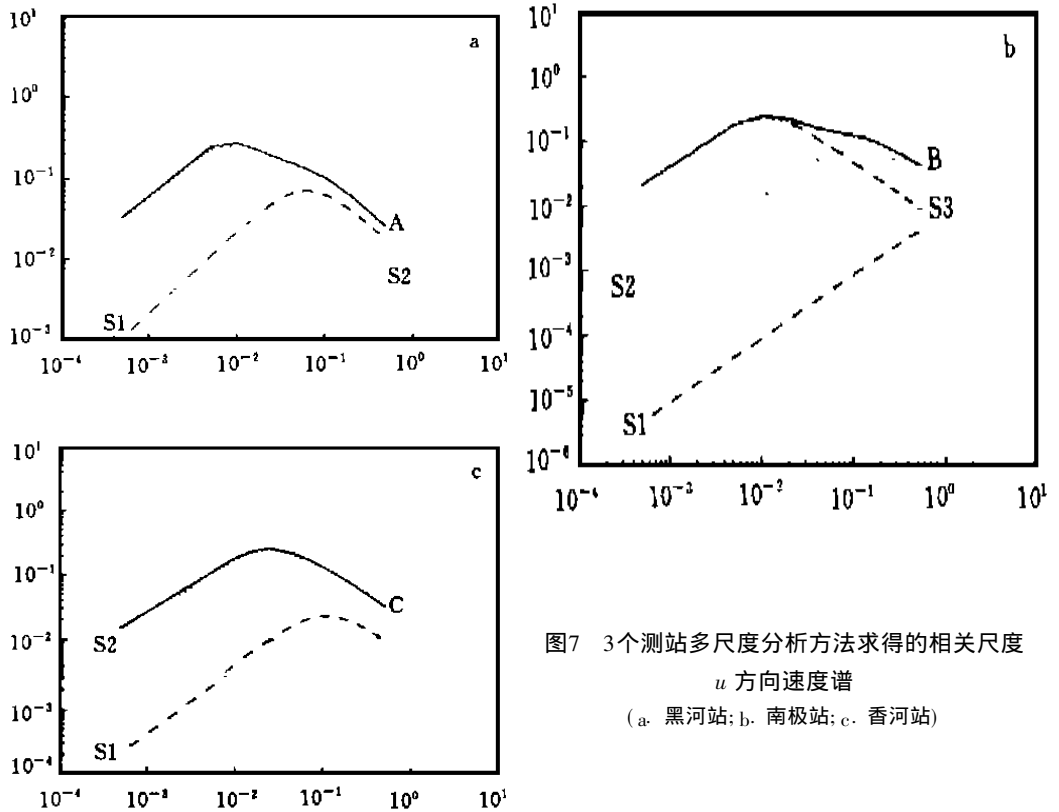


图7 3个测站多尺度分析方法求得的相关尺度  
 $u$  方向速度谱  
 (a. 黑河站; b. 南极站; c. 香河站)

此, 南极测站的  $w$  方向速度谱较其它两区更偏向于高频, 小尺度湍涡占主要作用。图7中还给出了不同尺度谱的峰值和对应的频率。由于不同尺度湍涡对不同尺度湍流扩散的作用不相同, 利用上述多尺度分析的结果, 可以为分析湍流扩散的机理提供更完备的信息。这些都是常规分析方法所不能实现的。

以上用多尺度分析方法研究了湍流的一些性质, 从实测资料的分析中可看到此方法有其可行性和可靠性, 它适合研究大气湍流的多尺度现象。事实上, 大气湍流运动是非均匀非定常的, 它具有十分宽广的尺度范围, 湍涡小到毫米量级, 大到千公里量级, 湍流运动可以看做是这些大小不同涡旋的组合。空间某固定点观测到的速度不规则起伏是由大小不同的湍涡经过该点造成的, 大湍涡造成的起伏频率低, 小湍涡造成的起伏频率高, 而脉动量的统计平均值则是多种不同尺度湍涡叠加的结果。但影响不同大气现象的主要尺度范围不同, 因此研究的重点也不同, 所以用多尺度方法来分析湍流将更有意义。我们可以将不同尺度的湍涡分离出来, 分析哪种尺度的湍涡占主导地位, 哪种居次要地位, 这种方法可以更直观地表现不同尺度湍涡作用的大小, 这是多尺度分析方法的一个重要优点。

## 5 结 论

利用戈壁、雪面、城郊3种下垫面上的风速、温度等湍流脉动资料, 通过统计理论方法和多尺度分析方法, 研究了不同下垫面上近地层湍流的结构和属性特征。用统计理论方法, 可以得到:

(1) 3种下垫面上的湍流结构和输送特征均符合一般规律: 随不稳定度的增加, 3个方向的湍强都增大; 随地表粗糙度的增大, 3个方向的湍强也都增大。对于湍流时间尺度: 稳定情况下的湍流尺度小于中性和不稳定情况下的湍流尺度。同一稳定度下, 水平方向湍流尺度大于垂直方向湍流尺度。3种下垫面上的湍谱在惯性区都满足“ $-\frac{2}{3}$ ”次律。但不同的下垫面又有各自的特点, 表现在湍流尺度上, 戈壁和城郊的湍流尺度要比雪面的大, 这是由于雪面的热力影响不如戈壁、城郊大。

(2) 戈壁地区的热力性质比较显著, 南极地区全天日照, 且为雪面, 其物理量的日变化不如戈壁、城郊地区明显, 城郊的一些性质则更符合平坦地形的规律。

用多尺度分析方法, 除可以得到以上结论, 还可以获得更多的信息:

(1) 用多尺度分析方法拟合相关系数, 所模拟的结果与实测值吻合的程度比单指数拟合的结果更好。

(2) 除湍流强度外, 湍流的尺度在输送物质或热量方面起着重大作用。湍流尺度大, 对水汽和热量的输送有利。统计理论方法研究的湍流时间尺度是一个平均尺度的概念, 它表示总体湍流的平均大小。而用多尺度分析方法分析湍流微结构时, 将组成湍流运动的各个尺度的湍流分离出来, 通过比较不同稳定度下各种尺度湍流所占比例的大小分析出不同尺度湍流作用的大小。而总的时间尺度为不同尺度湍流的加权和, 这样不仅可获得统计理论方法中获得的信息, 还可分析不同尺度湍流的作用大小: 对这3个地区稳定情况下, 小湍流占的比例比不稳定时大, 随着不稳定度的增强, 大尺度湍流逐渐占据主导地位。在同一稳定度下, 对于水平方向, 戈壁地区大尺度所占比重比其它两区明显偏大, 戈壁地区的总时间尺度也比其它两区的大。对于垂直方向, 南极雪面的小尺度比其它两区偏小。

(3) 用多尺度分析方法分析湍谱, 可以看到: 统计理论方法中的傅里叶谱恰为各相关尺度谱的能量权重和, 并可看出湍流能量在各尺度上的分布, 这克服了傅里叶方法由于不同尺度湍能之间的混淆和迭加影响, 更直观地看出哪种尺度湍流在湍流运动中占主导地位, 哪种尺度湍流占次要地位, 这是多尺度分析方法比统计方法的又一个优越性。从图6中可以得到: 中性情况下,  $u$  方向速度谱中, 大尺度湍流占总湍能的比重较大。戈壁地区大尺度湍流作用明显大于其它两区。 $v$  方向速度谱, 戈壁地区、南极地区的多尺度比较明显, 都是由3种尺度构成的, 而香河站则由两种尺度的湍流构成。对于  $w$  方向速度谱, 南极地区的小湍流对总湍能的贡献比其它两区的大。

大气湍流中存在着多种尺度的相关过程。而多尺度分析方法是一种能明确描述这一现象的物理模型。在多尺度分析方法中, 相关系数被模拟成一组衰减实指数函数的线性组合, 系数为各尺度湍能对总湍能的比。进一步的分析还可以对扩散参数做出尺度分解, 将扩散参数表达为湍流参数的函数, 使其物理意义更加明确。进而言之, 在多尺度概念的基础上, 深入研究湍流的微结构, 可以得到由不同尺度湍流表达的湍流交换系数  $K$ , 从理论上分析负粘性存在的条件, 这将在有关文中进一步阐述。总之, 此模型能反映出大气湍流中的一些物理内涵。不仅可得到统计方法中规律, 还可获得比统计方法更多的信息。

致谢: 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(LAPC)在本文的完成中给予了大力帮助, 北京大学地球物理系陈家宜教授提供了数据。中国气象科学研究院徐大海研究员给予了帮助。

## 参考文献

- 1 Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Spectral characteristics of surface layer turbulence. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1972, 98: 563- 589
- 2 Kaimal J C. Horizontal velocity spectra in an unstable surface layer. *J Atmos Sci*, 1978 35: 18- 24
- 3 王介民, 刘晓虎, 马耀明. HEIFE 戈壁地区近地层大气的湍流结构和输送特征. *气象学报*, 1993, 51(3): 343 ~ 350
- 4 Roland B Stull. *边界层气象学导论*. 杨长新译. 北京: 气象出版社, 1991. 738pp
- 5 徐大海. 多尺度大气湍流的扩散及扩散率. *气象学报*, 1989, 47(3): 302 ~ 311
- 6 Wiscombe W J, Evans J W. Exponential- sum fitting of radiative transmission functions. *J Comput phys*, 1976, 24: 416- 444
- 7 陈家宜, 王介民, 光田宁. 一种确定地表粗糙度的独立方法. *大气科学*, 1993, 17(1): 21 ~ 26
- 8 赵鸣, 苗曼倩, 王彦昌. *边界层气象学教程*. 北京: 气象出版社, 1991. 466pp
- 9 王存忠, 曹文俊. 天津市郊大气边界层湍谱特征分析. *气象学报*, 1994, 52(4): 484 ~ 491
- 10 张霭琛, 陈家宜, 林雪兰等. 绿洲和戈壁近地层大气湍流结构. *高原气象*, 1994, 13(3): 291 ~ 298
- 11 李宗恺, 孙润桥, 潘云仙. *空气污染气象学原理及应用*. 北京: 气象出版社, 1985. 598pp

## A STUDY ON MULTI-SCALE CHARACTERISTICS OF THE SURFACE-LAYER TURBULENCE ON DIFFERENT UNDERLYING SURFACE

Xu Liren    Li Zongkai

*(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093)*

Zhang Hongsheng

*(Department of Geophysics, Peking University, Beijing, 100871)*

### Abstract

The observational data of turbulent velocity, temperature fluctuation on several complex underlying surfaces are used to analyze the microstructure and transfer characteristics of turbulence near the surface by statistical method and multi-scale analysis scheme. The results show that different underlying surface structures affect evidently turbulence, for example: Gobi underlying surface's thermal affection is more obvious than another regions. This causes turbulent time scale in Gobi to be very larger than those in another regions. However turbulence spectra on complex underlying surfaces in the inertial subrange conform to " $-\frac{2}{3}$ " power law; It is simple to analyze turbulent multi-scale structures and their action on turbulent transfer with multi-scale analysis method. It shows that multi-scale method is a valid tool to develop turbulent statistical theory.

**Key words:** Complex underlying surface, Multi-scale analysis method, Turbulent time scale, Turbulent transfer characteristics.