

我国草原下垫面低层大气湍流结构*

刘树华 刘和平 洪钟祥 李 军 刘辉志

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

那景阳 吴志明

(中国人民解放军 89871 部队)

摘 要 利用超声风速仪资料分析了科尔沁草原下垫面低层大气的湍流谱结构, 无量纲化湍流速度分量及温度脉动的标准偏差, 和湍流通量与稳定度参数的关系。结果表明, 草原下垫面低层大气湍流速度谱, 在较宽的稳定度范围内, 符合 Kolmogorov 相似理论, 在惯性副区接近局地各向同性, 无量纲化湍流速度分量及温度脉动的标准偏差服从 $A(1 - B\zeta)^{-1/3}$ 和 $A(-\zeta)^{-1/3}$ 规律, 湍流热通量与稳定度参数 ζ 存在较好的相关性。

关键词 大气湍流谱分析 局地各向同性 湍流脉动方差 湍流通量

1 引言

大气湍流结构与下垫面特征及大气边界层的热力和动力状况有关。均匀下垫面近地面层大气湍流结构的研究, 已由 Kaimal 等人^[1]及 Kaimal^[2]以 Kansas 实验 (1968) 和 Minnesota 实验 (1973) 的湍流测量值为基础, 进行了系统研究, 已成为平坦下垫面湍流结构研究的参考范例^[3]。但他们的观测是在贴地面层进行的, 所观测的湍流结构及尺度仅代表贴地面层的热力和动力特征。特别是垂直速度分量的湍流结构特征不能反应较大尺度热力和动力作用的影响。所以, 他们得到的垂直速度谱, 在低频端随稳定度变化不明显。

本项研究超声风速仪观测高度为 75 m, 主要目的是研究草原下垫面低层大气的湍流谱结构, 无量纲化速度、温度脉动方差和湍流通量与大气稳定度热力层结的关系。

2 实验场地和资料处理

观测铁塔位于科尔沁草原东南沿铁塔南 200 m, 西南 1000 m 有零星住房和树木, 南至西南 2000 m 外为住宅区, 东南为 10 km 的开阔草原, 东 1000 m 外为 8 m 以下的树林, 东北至西为 80 km 的开阔草原, 草原草高为 40 cm 左右。

1994 年 7 月, 我们利用该铁塔进行了湍流观测, 超声风速、温度脉动仪的按装高度为 75 m。

资料采样频率为 16 次/s, 总长度为 59 min, 共采样 152 组。原始资料按下列步

1995-02-28 收到, 1995-08-09 收到修改稿

* 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资助

骤进行处理:

- (1) 由 u 和 v 计算出瞬时风速模值和瞬时风向。
- (2) 对风速模值和风向时间变化序列用二次曲线拟合出其平均时间变化趋势, 并消除低频脉动影响。
- (3) 将坐标系 x 轴调整到平均风方向, 并计算出气流的纵向、横向和垂直方向的风速脉动值 u' , v' , w' 。
- (4) 计算 u' , v' , w' 和 T' 的均方根, 摩擦速度 $u_* = (-u'w')^{1/2}$ 、特征温度 θ 、以及莫宁-奥布霍夫长度 L 等湍流统计特征量。
- (5) 对数据序列进行野点和数字滤波的预处理后, 再用 FFT 计算出各湍流脉动量的能谱曲线。
- (6) 根据 Kolmogorov 相似理论, 在惯性副区, 归一化风速能谱可表示为

$$\frac{nS(n)}{u_*^2} = \frac{\alpha}{(2\pi k)^{2/3}} \times \left(\frac{k\epsilon z}{u_*^3}\right)^{2/3} \times \left(\frac{nz}{u}\right)^{-2/3}, \quad (1)$$

式中 α 为普适常数, 取值 0.5; $k\epsilon z / u_*^3 = \varphi_\epsilon$, 是无因次湍流能量耗散率; $nz / u = f$, 是无因次频率, 其中, n 是频率, z 是观测高度, u 是平均风速。

- (7) 对归一化风速能谱进行分段和加权滑动平均。
- (8) 由无因次频率 f 和归一化风速能谱 $nS(n) / u_*^2 \varphi_\epsilon^{2/3}$ 作图。

3 结果分析

3.1 速度谱

图 1 是归一化风速能谱的计算结果, 由图 1 可以看出:

- (1) 在惯性副区, 能谱与频率之间符合“-2/3”次率。并且, 这种关系在中性和非中性层结都符合。这与 1968 年美国 Kansas 草原观测得到的结果相一致。
- (2) 能谱曲线的低频段适合一般含能涡区的分布规律, $nS(n) / u_*^2 \varphi_\epsilon^{2/3} f$, 在图 1 的坐标系中, 谱曲线的峰值频率 f_m 与稳定度有明显的关系, ζ 从 17.98 变化到 -22.12 时, 在 u 方向, f_m 从 1.26 变化到 0.04; 在 v 方向, f_m 从 0.76 变化到 0.03, 而在 w 方向, f_m 则从 1.98 变化到 0.08。
- (3) 在同一稳定度条件下, 垂直向速度谱峰值小于纵向和横向速度谱峰值, 但对应的频率 f_{wm} 比纵向和横向速度谱峰值对应的频率 f_{um} 和 f_{vm} 高, 这与超声风速仪的安装高度和探测到的湍流涡旋尺度有关。
- (4) 在速度谱低频端, 谱曲线的斜率近似为 +1; 不稳定条件下谱密度值明显大于稳定条件下谱密度值, 并且在同一稳定度下, 垂直方向谱密度值小于纵向和横向速度谱密度值。但谱值与 z/L 之间的关系没有很好的规律性, Kaimal^[2]和 Hjstrup^[8]认为, 在对流边界层中, 对湍流速度能谱来说, z_i/L 可能是另一个重要的稳定度参数, 它与 z/L 一起决定低频段能谱值的大小, 其中 z_i 是对流边界层厚度。本文没有对其进行研究。

为了进一步研究大气稳定度对湍流结构的影响, 下面将讨论一些湍流宏观特征量与 ζ 的关系。

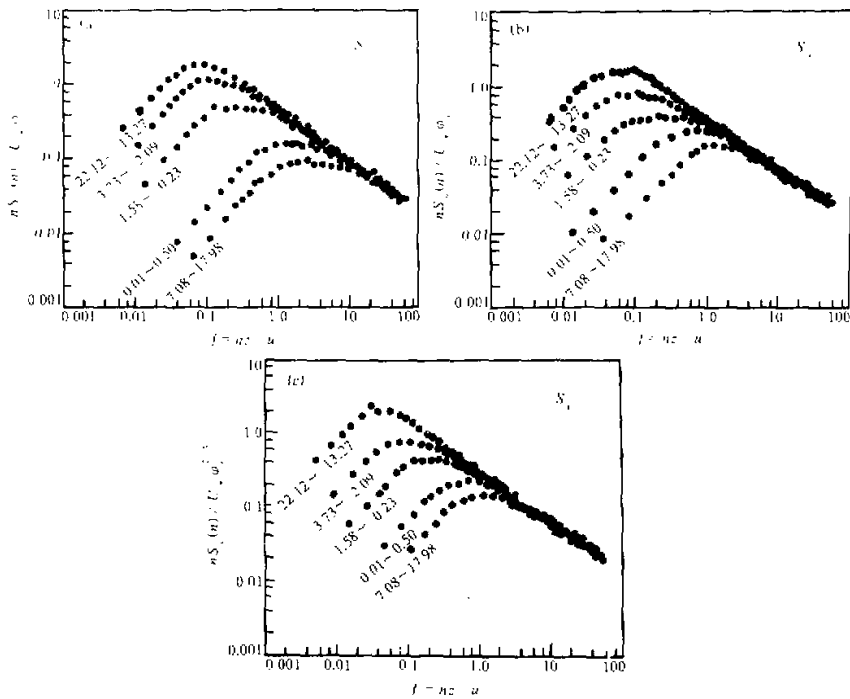


图 1 归一化三维湍流速度谱, 图中数字是 $\zeta = Z/L$ 的值

3.2 湍流宏观量与大气稳定度的关系

根据莫宁-奥布霍夫相似理论, 在低层大气中, 湍流速度分量均方根值以 u_* 无量纲化后和温度脉动均方根值以 θ_* 无量纲化后, σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 、 σ_w/u_* 和 σ_θ/θ_* 仅为稳定度参数 $Z/L = \zeta$ 的函数, L 为莫宁-奥布霍夫长度,

$$L = u_* T / (kg\theta_*), \quad (2)$$

式中 k 为卡曼常数, g 为重力加速度。

在低层不稳定大气中, 控制湍流脉动以及相应引起的动量传输机制将主要受控于浮力因子。由参考文献[4]可得

$$\sigma_u/u_* = A(1-\zeta)^{1/3}, \quad (3)$$

$$\sigma_v/u_* = B(1-\zeta)^{1/3}, \quad (4)$$

$$\sigma_w/u_* = C(1-\zeta)^{1/3}. \quad (5)$$

在近中性条件下, 无量纲特征量分别近似为常数, 即 $\sigma_u/u_* = A$, $\sigma_v/u_* = B$, $\sigma_w/u_* = C$ 。此结论已被许多平坦均匀下垫面的观测结果所证实。Panofsky 和 Dutton^[3] 的著作中归纳了这方面的研究结果, 得到其值分别为: $A = 2.39 \pm 0.03$, $B = 1.92 \pm 0.05$, $C = 1.25 \pm 0.03$ 。作者于 1989 年春天在开阔草原上 11 m 处所得 $\sigma_u/u_* = 1.24$ ^[5]。本文研究结果为: $\sigma_u/u_* = \sigma_v/u_* = 1.2$, $\sigma_w/u_* = 1.0$ 。Panofsky 等人^[6]推

荐上述 3 个无因次特征量在不稳定层结时与稳定度参数的关系如下:

$$\sigma_u / u_* = \sigma_v / u_* = 2.29(1 - 0.22\zeta)^{1/3}, \quad (6)$$

$$\sigma_w / u_* = 1.23(1 - 3\zeta)^{1/3}, \quad (7)$$

本文所得结果如图 2 所示。在图 2 的双对数坐标系中, 当 $\zeta < -0.2$ 后, 拟合所得方程中的斜率满足 $1/3$ 次幂规律。其拟合关系为

$$\sigma_u / u_* = 1.20(1 - 3.9\zeta)^{1/3}, \quad (8)$$

$$\sigma_v / u_* = 1.23(1 - 3.2\zeta)^{1/3}, \quad (9)$$

$$\sigma_w / u_* = 1.02(1 - 4.4\zeta)^{1/3}. \quad (10)$$

式 (8) ~ (10) 说明, 在不稳定条件下, 热力对 σ_w / u_* 的影响最大, 其次是 σ_u / u_* , 对 σ_v / u_* 的影响最小, 这也充分说明了 σ_v / u_* 主要受地形等扰动影响敏感。对垂直湍流脉动能来说, 当 $-4.4\zeta \ll 1$ 时, 主要由动力因子控制, 然而当 $-4.4\zeta \gg 1$ 时, 热力影响开始起主导作用。其湍流脉动能主要来自热力浮力。

对无因次温度脉动标准差 σ_T / θ_* , 在对流状态下表达式可写为

$$\sigma_T / \theta_* = \alpha(-\zeta)^{-1/3}. \quad (11)$$

Wyngard 等人^[4]和 Monji^[7]得到的 α

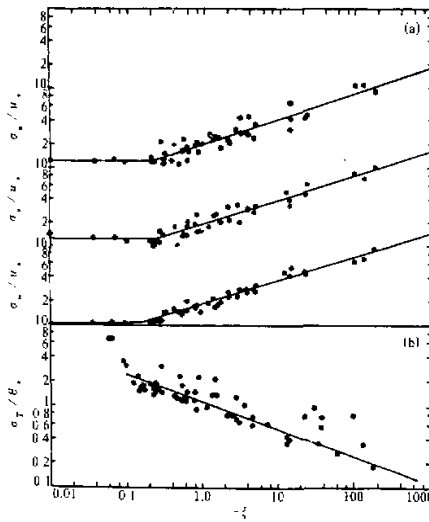


图 2 湍流宏观量 σ_u / u_* , σ_v / u_* , σ_w / u_* 和 σ_T / θ_* 与 ζ 的关系

值分别为 0.95 和 0.90。本文的结果如图 2 所示。拟合得到 α 值为 1.08。与文献[5]作者所得 $\alpha = 0.92$ 接近。由图 2b 可见, 当 $-Z/L \geq -0.1$ 时, σ_T / θ_* 值出现非线性变化, 即偏离 $\sigma_T / \theta_* = 1.08(-\zeta)^{-1/3}$ 规律。这反映了在近中性时, 测量微弱湍流热通量的不准确性。也说明此时大气运动缺乏定常性, 因为中性条件经常是在稳定度转换期才能得到。

3.3 湍流热通量与稳定的关系

在研究大气混合层发展的预测模式中, 湍流感热通量是一个重要的湍流特征量。图 3 给出了感热通量与稳定度参数之间的关系。由图 3 可见, 虽然观测高度达 75 m, 但是, 感热通量与 ζ 的关系还是非常密切, 当稳定度参数 $\zeta = -96.25$, 甚至 $\zeta = -127.38$ 时仍有很好的相关性。在

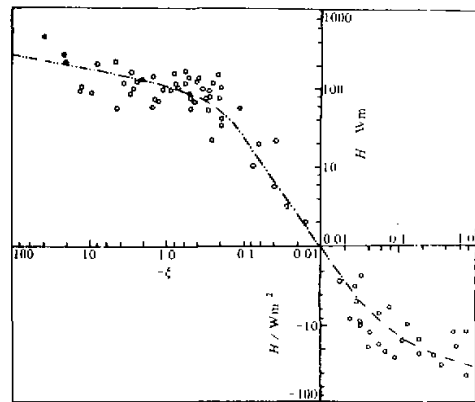


图 3 湍流热通量与稳定度的关系

以往的研究中还没有发现在如此宽的稳定性范围内仍存在这么好的相关性。

4 结论

(1) 莫宁-奥布霍夫相似理论在很宽的归一化频率 ($0.001 \leq f \leq 100$) 和稳定性范围 ($-22.12 \leq Z/L \leq 17.98$) 内, 仍可适用于速度谱。

(2) 在我国草原下垫面低层大气中, 大气湍流结构的基本特征与前人所得的结论极为相似。在惯性副区, 纵向、横向和垂直向速度谱符合“ $-2/3$ ”次率, 在低频端也基本符合+1次幂规律。

(3) 在 $-127.38 \leq \zeta \leq -0.2$ 范围内, 湍流宏观特征量 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 和 σ_w/u_* 与稳定性之间存在“ $1/3$ ”次方率; σ_T/θ_* 与稳定性之间存在“ $-1/3$ ”次方率关系, 但在近中性时, σ_T/θ_* 与稳定度的关系出现非线性。

(4) 在 $-127.38 \leq \zeta \leq -0.649$ 范围内, 湍流热通量与稳定性之间仍存在较好的相关性。

参 考 文 献

- 1 Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and Cote, O.R., 1972, Spectral characteristics of surface layer turbulence, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, **98**, 563~589.
- 2 Kaimal, J.C., 1978, Horizontal velocity spectra in an unstable surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 18~24.
- 3 Panofsky, H.A. and Dutton, J.A., 1984, Atmospheric turbulence, John Wiley and Sons, 156~226.
- 4 Wyngaard, J.C., Cote, D.R. et al., 1971, Local free convection similarity and the budgets of shear stress and heat flux, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1171~1182.
- 5 刘树华等, 1994, 东北林网地区廓线分布和湍流输送特征, *地理学报*, **49**, 167~173.
- 6 Panofsky, H.A. et al., 1977, The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions, *Boundary-Layer Meteor.*, **11**, 350~361.
- 7 Monji, N., 1972, Budgets of turbulent energy and temperature variance in the transition zone from forced to free convection, Ph.D. Thesis, University of Washington.
- 8 Hjstrup, J., 1982, Velocity spectra in the unstable planetary layer, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2239~2248.

The Turbulence Structure in the Near-surface Atmospheric Layer over the Horqin Grassland

Liu Shuhua and Liu Heping

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Hong Zhongxiang, Li Jun and Liu Huizhi

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Na Jingyang and Wu Zhiming

(Military Unit 89871, Chinese People's Liberation Army)

Abstract The turbulence spectrum structure, normalized variances of wind components and the relationship of turbulence heat flux with the atmospheric stability in the lower atmospheric layer over the Horqin grassland are studied using data from an ultra-sonic anemometer (Model DAT-300). The re-

sults show that in the lower layer atmosphere over the grassland, for a wide stability range, the turbulence spectrum structure behaviour is nearly consistent with the laws of local isotropy in the inertial subrange. The velocity spectra conforms to Kolomogorov's similarity theory. Normalized variances of wind components and temperature obey $A(1 - B_0^2)^{1/3}$ and $A(-\zeta)^{-1/3}$ laws. Under the near neutral stratification condition, $\sigma_u / u_* = 1.20$, $\sigma_v / u_* = 1.23$, $\sigma_w / u_* = 1.02$. Turbulent heat flux correlates well to the atmosphere stability.

Key words atmospheric turbulent spectrum analysis local isotropy turbulent fluctuation variance turbulent heat flux

全国季风学术讨论会在杭州举行

由国家基础性研究重大关键项目“气候动力学和气候预测理论的研究”发起,并与大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室、中国气象学会动力气象委员会、热带气象委员会、气候学委员会、以及杭州大学联合举办的全国季风学术讨论会,于1995年12月7~11日在杭州召开。陶诗言、曾庆存、黄荣辉3位院士和著名季风学者黄仕松教授出席了会议并在会上做了专题报告。国家海洋局第二研究所所长苏纪兰院士、浙江省教委及杭州大学领导出席了开幕式。中国气象学会动力气象委员会主任李崇银研究员主持了开幕式,曾庆存院士在开幕词中特别强调,中国科学家应该而且有能力在季风研究中取得更大成就。

这次全国季风学术讨论会共受到学术论文67篇,有57位学者在会上作了报告。这些学术论文充分反映了近年来我国学者关于亚洲季风的研究成果,表明近年来我国在夏季风活动的年际变异和季风的定义、季风与ENSO的关系、冬季风与夏季风的相互关系、暖池与青藏高原对季风的影响以及东亚季风降水的数值模拟和预测等方面的研究都有很大的进展。这些研究成果反映了近年来我国对季风的研究更加深入,范围更加扩大,有不少研究是高水平的,并且有我们自己的特色和创新。本次学术讨论会学术气氛浓厚、讨论热烈,充分反映了大家对季风研究的重视和兴趣。

当前国际上正掀起一个季风研究的热潮,在今后几年,国际上要实施全球能量和水份循环研究计划(GEWEX)和国际气候变动及可预报性研究计划(CLIVAR)等重大研究计划,而季风研究正是其中极重要的组成部分。为了更好地推动我国季风研究,以便在国际季风研究作出我们应有的贡献,黄荣辉院士在闭幕式上代表本次全国季风学术讨论会筹委会向大家提出如下研究建议:

1) 需加强对90年代季风活动特征的研究。90年代无论ENSO事件的发生还是东亚季风活动都发生了严重异常,它引起了我国严重旱涝,因此,我们必须从特征、成因和模拟方面进行详细分析和研究。

2) 加强对TOGA-COARE、南海季风以及江淮流域的能量水份循环的观测研究以及分析、诊断研究。在这方面,我国正在酝酿两个重大研究计划,这两个重大研究计划将对我国季风的观测研究起很大推动作用,大家应积极支持和参加这两个计划的实施。

3) 在加强分析亚洲季风(特别是东亚季风)变化的时空特征的基础上,不断完善季风的数值模式、数值模拟和可预报性研究。为了更好地加强这方面的研究,中国WCRP委员会已成立一个以曾庆存院士为组长,丁一汇研究员和李崇银研究员为副组长的气候变动及可预报性研究计划(CLIVAR)工作小组,并报请有关上级主管部门批准。我们将组织中国科学院、国家教委有关院校、中国气象局、国家海洋局和国家自然科学基金委员会有关学者来共同起草中国的CLIVAR研究计划,以便促进我国关于气候变动与预测的研究,特别是关于东亚季风的变化与预测的研究,为“九五”以后我国季风研究打下基础。

(利波)