中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 8 期: 1087 ~ 1094
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

春季内蒙古草原地区湍流强度及其相似性函数

岳平[①②③*], 牛生杰[②], 胡隐樵[④], 张强[①]

① 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020;
② 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044;
③ 张掖国家气候观象台, 张掖 734000;
④ 中国科学院寒区旱区环境工程研究所, 兰州 730000
* E-mail: jqyueping@126.com

收稿日期: 2009-08-24; 接受日期: 2010-03-05
科技部公益专项(编号: 2005DIB3J108)、国家自然科学基金(批准号: 40830957, 40765001)和甘肃省第五批十人计划资助

摘要 流体湍流发展的宏观原因是速度剪切效应和温度剪切效应共同作用的结果. 从这一观点出发, 利用内蒙古草原地区春季近地层通量观测资料, 得到了描述不同稳定度条件的湍流强度的相似性函数, 计算了当地春季晴天湍流强度, 并与实验观测湍流强度进行比较分析. 结果表明, 内蒙古草原地区春季层结不稳定时, 相似性函数与稳定度之间满足"2/3 规律"; 中性条件下结构函数为常数; 层结稳定时结构函数形式比较复杂. 计算的湍流强度与实际测量湍流强度之间存在良好的相关性, 体现了相似性函数的准确性及湍流强度定理在草原地区的适用性.

关键词
湍流强度
速度方差
相似性函数
草原

湍流是边界层大气的主要运动形态, 对地表面与大气间的动量、热量、水汽和其他物质的输送起着重要作用[1]. 人们很早就认识到湍流是外强迫条件下流体剪切效应产生的一种涡旋运动[2]. 在系统地总结了 20 世纪上半叶湍流的研究进展的基础上, Hizone[3]认为对于流体湍流应用最广的仍是Taylor和Kármán在 1937 年给出的湍流定义: 湍流为一种空间和时间上的随机无规则流体运动. 1922 年Richardson首先发现了大气湍流[4]. 1941 年前苏联科学家Kolmogorov[5]将量纲分析原理用于湍流的研究, 得出了著名的结构函数"2/3 律". 之后较长一段时间内, 大气湍流研究对热力层结是不做考虑的, 1959 年Priestley[6]提出了自由对流大气湍流理论. 20 世纪 60 年代, 为了克服湍流研究面临的一些棘手问题, 人们不断在湍流理论研究中开辟新途径. 1963 年Lorenz[7]利用他自己建立的微分方程, 计算了非周期轨道, 使湍流发生机制的研究出现了新的可能途径. 20 世纪 70~80 年代, 大气湍流研究进入了一个高峰期. 在系统研究大气湍流的基础上, 取得了重要进展[8~18].

Monin和Obukhov[12]提出的大气边界层相似性理论为建立大气边界层湍流理论奠立了基础, 该理论对于大气边界层Bénard热力湍流的研究也极为重要; 他们首先引入Monin-Obukhov大气稳定度长度($L = (-u_*^3\theta)/\ kg\overline{w'\theta'}$)和大气稳定度参数($\zeta=z/L$), 并采用大气稳定度长度来度量大气温度热力层结稳定度. 式中θ, θ', u_*和 $\overline{w'\theta'}$ 分别是大气位温、位温脉动分量、摩擦速度和垂直湍流输送热通量, k为Kármán常数. 根据Monin-Obukhov大气边界层相似性理论和大量野外观测实验得到了湍流强度经验关系[13~15]:

引用格式: Yue P, Niu S J, Hu Y Q, et al. Turbulent intensity and its similarity function over an Inner Mongolian grassland during spring. Sci China Earth Sci, 2010, 53: 773–780, doi: 10.1007/s11430-010-0064-5

$$\frac{\overline{U_{ii}'^2}}{u_*^2}=\phi_{ii}\left(\frac{z}{L}\right),$$

$\overline{U_{ii}}(i=1, 2, 3)$分别对应$u$, v, w, $\phi_{ii}(z/L)$ (i=1, 2, 3)是Monin-Obukhov相似性函数. 观测事实证明湍流强度相似性函数和大气稳定度之间存在如下关系:

$$\phi_{ii}\left(\frac{Z}{L}\right)=C_{ii}\left(a_{ii}+b_{ii}\frac{z}{L}\right)^{2/3}.$$

1971 年Businger等[8]利用Kansas实验资料第一次给出了半经验M-O相似性函数的表达式, 标志着湍流理论的进一步完善. 而Louis等[16], Högström[17]和De Bruin等[18]指出, Dyer给出的相似性函数通常只有在不稳定层结和弱稳定条件下(Ri<0.25)与观测结果比较吻合, 在强稳定层结时湍流交换显著偏大, 导致u_*和θ_*计算结果偏小. Beljaars和Holtslag[19]对强稳定条件下的ϕ_m和ϕ_h函数进行了修正, 得到了强稳定层结时更为平缓的相似性函数曲线. Delage[20]对稳定条件下的多种ϕ_m参数化方案综合研究显示, Ri_B对ϕ_m计算结果的影响最为直接. 据此提出了一种仅用Ri_B显式表达ϕ_m的计算方案, 形式简单且容易计算, 但没有体现出不同稳定条件下湍流扩散过程的差异. Poulos和Burns[21]对Delage参数化方案的验证表明, 该参数化方案在强稳定条件下仍然存在u_*计算结果偏低现象.

混沌现象是 20 世纪最重要的科学发现之一, 对大气湍流机理研究有极大的借鉴和促进作用, 增进了对湍流本质的认识[22,23]. 杨培才等[24~26]通过研究湍流的非线性混沌动力学特征, 给出了不同下垫面近地层湍流速度、温度、湿度和动能的相关维和Lyapunov指数, 探讨了湍流的非线性动力学特征与传统的宏观统计量(Monin-Obukhov稳定度长度L)之间的半经验关系. 研究发现, 当引入连续时间混沌系统所具有的幂指数, 结合指数函数形式的谱函数来拟合近地层湍流谱, 其结果在稳定和不稳定层结时, 均更加符合实验观测结果[27].

最近, Li等[28,29]利用提取湍流相干结构的方法, 区分出大气湍流中均匀各向同性小涡成分和大尺度含能涡旋成分, 并成功识别出了湍流中的斜坡结构, 定量给出了斜坡结构对湍流通量的影响. 陈炯等[30]用连续子波变换研究了城市层大气湍流的相干结构. 陈子赟等[31]为研究夹卷层的湍流特性, 在用对流槽模拟大气对流边界层对湍流温度测量的基础上, 利用离散正交小波对其湍流脉动信号进行去噪和尺度分解, 将原始信号分成均匀各向同性小尺度涡旋成分和大尺度涡旋成分,并对分解后的信号做了能谱分析, 揭示出小涡在混合层和夹卷层都能很好地满足Kolmogorov的“–5/3”次律.

截止目前, 建立在湍流理论发展基础之上的大气边界层气象学虽然已成为一门独立的分支学科, 但其理论基础和研究体系仍然不是十分完备[4,32,33]. 习惯上多采用统计方法和闭合理论的近似截断理论来刻画湍流的特征, 但对湍流的各种特征的描述及其形成机制尚未得到完好解决. 胡隐樵等[4]在大气非平衡态热力学的基础上, 将Reynolds湍流和Bénard湍流统一地表述在动量湍流输送定理和湍流强度定理之中, 从理论上证明了流体湍流发展的宏观原因是速度剪切效应和温度剪切效应共同作用的结果, 并用实验资料得到湍流强度相似性函数的形式. 湍流强度与速度梯度和温度梯度之间关系的建立, 使得利用平均资料估算速度方差成为可能, 这在传统大气湍流理论中是不可能的. 但定理的真实性必须用更多实验证明, 相似性函数的一些系数与下垫面性质有关, 更是要通过不同实验来确定. 本文试图利用内蒙古草原近地面层湍流观测资料, 研究春季当地湍流强度及相似性函数, 以进一步证实湍流强度定理的真实性和湍流强度相似性函数形式的普适性.

1 资料说明及质量控制

锡林郭勒草原地处锡林河流域, 所处地理位置43°26′~44°39′N, 115°32′~117°12′E, 总面积约 10786 km^2, 草原地势起伏平缓, 拔海高度在 1000~1200 m 之间. 该区域属于温带大陆性草原气候, 年平均气温为–0.4℃, 年降雨量约为 350 mm. 草原生长期6~9月的降雨量占全年总量的 80%, 10 月到翌年 5 月的降水量约占年总量的 20%左右. 锡林浩特国家气候观象台(44°08′N, 116°18′E)位于内蒙古自治区锡林浩特市东北 25 km处的锡林郭勒典型草原中心(区域保护区中心纬度和经度分别为44°04′N和116°37′E), 周围10 km^{2}属于“国家天然草原保护工程”项目区, 是我国北方保持最完整、最具代表性的典型草原. 该区域被联合国教科文组织纳入国际生物圈网络的草地类自然保护区, 也是CCOS(China Climatic Observatory System)建议的中国气候多圈层综合监测 16 个关键区之一. 通量观测设备架设在锡林浩特国家气候观象

台观测场内, 其中 3.5 km^{2}天然草场用于草原生态系统的观测. 锡林郭勒草原及通量观测站的地理位置如图 1 所示. 场地周围无建筑物和其他障碍物, 观测场地地势平坦, 方圆 100 km内无高大山脉. 图 2 给出了 5 月下旬草原植被状况. 观测试验中, 三维超声风速温度仪架设在梯度观测系统的正北方向, 观测高度距地 4.0 m. 虽然三维超声风速温度仪和梯度观测塔之间有 10.0 m的水平距离, 但观测场地属于典型草原, 植被稠密, 覆盖度好, 10.0 m距离对观测结果产生的影响不大. 春季 5 月下旬植被最高, 但其

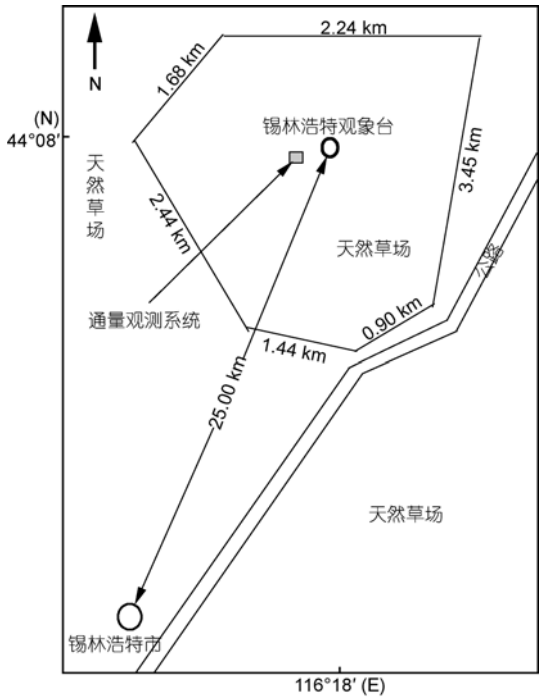

图 1　锡林郭勒草原和通量观象台地理位置

高度仍然不超过 0.1 m, 此时的零位移高度约 0.07 m; 中性条件下的地表粗糙约为 0.02 m.

三维风速温度脉动量采用美国CAMPBELL公司生产的CSAT3 三维超声风速温度仪观测. CSAT3 允许工作温度范围–30~50℃, 测量范围风速 0~30 m/s, 误差<2%, 分辨率U_x和U_y为 0.01 m/s, U_z为 0.005 m/s, 风向±170°, 采样频率为 10 Hz; 温度、湿度和风速传感器分别安装在 2.0, 4.0, 10.0, 20.0 和 30.0 m左右高度处, 风向设置在 10.0 m处; 温长、湿度传感器均采用芬兰VAISALA公司生产的HMP45A传感器. 风向和风速传感器采用芬兰VAISALA公司生产的WAA151 和 WAV151. WAA151 的测量范围 0.4~75 m/s, 启动风速 0.35 m/s, 测量精度±0.17 m/s, 扫描频率 10 Hz.

为尽可能避免因降水等天气带来的观测误差, 需要对资料严格筛选. 野点剔除: 对于 m 个数据, 先将其前后 5 个数据求平均, $\overline{x_m}=\sum_{j=-5}^{5}x_{m+j}/11$, 并得到该点的涨落方差 $\sigma_m^2=\sum_{j=-5}^{5}(x_{m+j}-\overline{x_m})^2/11$, 对于 $x_m\in[\overline{x}_m-3\sigma_m,\overline{x}_m+3\sigma_m]$ 的数据认为是正确的, 该范围之外的数据当作野点剔除, 并以第 m–1 个数据代替; 另外, 还需对风速分量进行水平旋转, 将 x 轴调整到与主风向一致, 使满足 $\overline{U}\neq 0$, $\overline{V}=0$, 从而求得 u', v' 和 w'等脉动值.

2　草原地区湍流相似性函数及湍流强度

2.1　湍流相似性函数及湍流强度

胡隐樵等[4]从非平衡态热力学观点出发, 导出三



图 2　锡林浩特观象台 5 月下旬通量观测场自然状况

维方向上湍流强度分别为

$$\overline{u'^2}=-K_{11}\left(\frac{\partial U}{\partial x}-\frac{U}{T}\frac{\partial T}{\partial x}\right), \tag{1}$$

$$\overline{v'^2}=-K_{22}\left(\frac{\partial V}{\partial y}-\frac{V}{T}\frac{\partial T}{\partial y}\right), \tag{2}$$

$$\overline{w'^2}=-K_{33}\left(\frac{\partial W}{\partial z}-\frac{W}{T}\frac{\partial T}{\partial z}\right), \tag{3}$$

其中K_{ii} (i =1, 2, 3)是湍流唯象系数. 由非平衡态热力学观点出发得到的湍流强度定理表明了湍流强度同流体速度和温度场剪切的关系. 由于缺少平均水平梯度观测资料, 因此, 根据实验观测的平均垂直速度梯度资料来求湍流强度$\overline{w'^2}$.

利用π量纲原理、Monin-Obukhov相似性原理以及Businger-Dyer关系, 得到了湍流强度唯象系数的表达式[4]:

$$K_{33}=-u_*^2\varphi\left(\frac{z}{L}\right)\left(\frac{\partial W}{\partial z}-\frac{W}{T}\frac{\partial T}{\partial z}\right)^{-1}. \tag{4}$$

可见, 湍流唯象系数不仅是速度剪切的函数, 同时也是大气温度热力层结稳定度的函数. 将归一化资料按照$z/L<-0.01$, $-0.01\leqslant z/L\leqslant 0.01$ 和$z/L>0.01$ 分为不稳定层结、中性层结和稳定层结, 并根据Businger-Dyer关系确定u_*和L等参数后, 将式(4)代入式(3), 则得到

$$\frac{\overline{w'^2}}{u_*^2}=\varphi\left(\frac{z}{L}\right). \tag{5}$$

由湍流强度定理和野外观测资料推导出的式(5)与根据Monin-Obukhov大气边界层相似性理论和野外观测实验资料得到的湍流经验关系($\overline{w'^2}/u_*^2=\varphi_{ii}(z/L)$)形式上完全一致(详细推导过程见文献[4]). 利用瑞典Uppsala大学 1986 年近地面层湍流观测资料得到不同稳定度条件下的相似性函数形式[4]为

$$\varphi\left(\frac{z}{L}\right)=\begin{cases}1.35\left(1-1.9\dfrac{z}{L}\right)^{\frac{2}{3}}, & -3.0\leqslant\dfrac{z}{L}<-0.01;\\ 1.3, & -0.01\leqslant\dfrac{z}{L}\leqslant 0.01;\\ 1.8+\left(8.1\dfrac{z}{L}\right)^{\frac{5}{2}}, & 0.01<\dfrac{z}{L}\leqslant 1.0.\end{cases} \tag{6}$$

从而利用式(5)和(6)可以得到

$$\overline{w_c'^2}=\begin{cases}1.35\left(1-1.9\dfrac{z}{L}\right)^{\frac{2}{3}}u_*^2, & -3.0\leqslant\dfrac{z}{L}<-0.01;\\ 1.3u_*^2, & -0.01\leqslant\dfrac{z}{L}\leqslant 0.01;\\ 1.8+\left(8.1\dfrac{z}{L}\right)^{\frac{5}{2}}u_*^2, & 0.01<\dfrac{z}{L}\leqslant 1.0.\end{cases} \tag{7}$$

将内蒙古草原近地面层观测资料代入式(7), 对计算的湍流强度与实测湍流强度资料进行对比, 如图 3 所示. 其中, R 为相关系数; SD 为标准偏差; D 为资料拟合线的斜率. 可以发现, 在显著性水平为 0.1‰, 层结不稳定时, 计算的湍流强度与实测湍流强度拟合线的斜率为 0.96, 相关系数达到 0.97, 标准偏差为 0.04; 层结为中性时, 计算的湍流强度和观测结果之间拟合线的斜率为 0.86, 相关系数为 0.91, 标准偏差为 0.75; 稳定条件下, 由湍流强度资料得到的拟合线的斜率为 0.51, 相关系数为 0.72, 而标准偏差为 0.06. 可见, 在层结不稳定时, 根据式(7)计算的结果与实测值相关性较好; 稳定层结时, 计算的湍流强度与实测湍流强度之间存在较大的差异. 造成这种差异的可能原因是, 不同下垫面特性的热力动力特征不同, 因而对大气边界层湍流的影响不同.

将归一化资料按照不稳定层结($-3.0<z/L<-0.01$)、中性层结($-0.01\leqslant z/L\leqslant 0.01$)和稳定层结($z/L>0.01$)分类处理之后, 依据文献[4]中的方法, 分别计算π_2和K_{33}, 最后由式(4)求得湍流唯象系数的相似性函数$\varphi(z/L)$. 图 4 是利用内蒙古草原地区春季近地层通量观测资料确定的湍流唯象系数的相似性函数和大气温度热力层结的稳定度绘制而成的. 可以得出, 湍流强度相似性函数$\varphi(z/L)$在不稳定层结、中性层结和稳定层结条件下的表达式:

$$\varphi\left(\frac{z}{L}\right)=\begin{cases}1.2\left(1-3.5\dfrac{z}{L}\right)^{\frac{2}{3}}, & -3.0\leqslant\dfrac{z}{L}<-0.01;\\ 1.2, & -0.01\leqslant\dfrac{z}{L}\leqslant 0.01;\\ 1.2+\left(2.0\dfrac{z}{L}\right)^{\frac{5}{2}}, & 0.01<\dfrac{z}{L}\leqslant 1.0.\end{cases} \tag{8}$$

表明在不稳定层结下, 相似性函数满足“2/3 规律”. 与文献[4]利用 Uppsala 大学 1986 年近地面层湍流观测资料结果相比, 相似性函数形式非常一致,

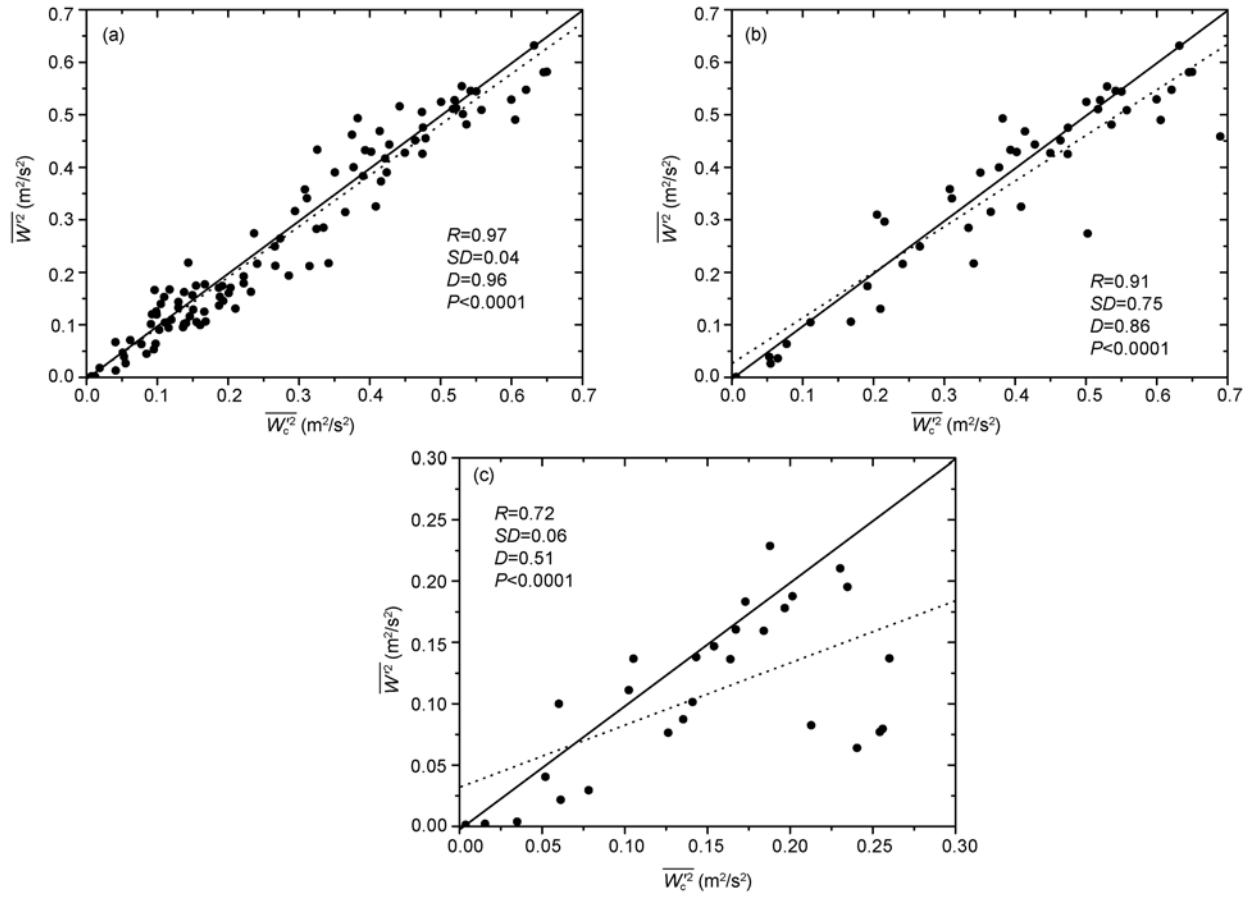

图 3　用式(7)方案计算的湍流强度与实测湍流强度的相关性

(a) 不稳定; (b) 中性; (c) 稳定

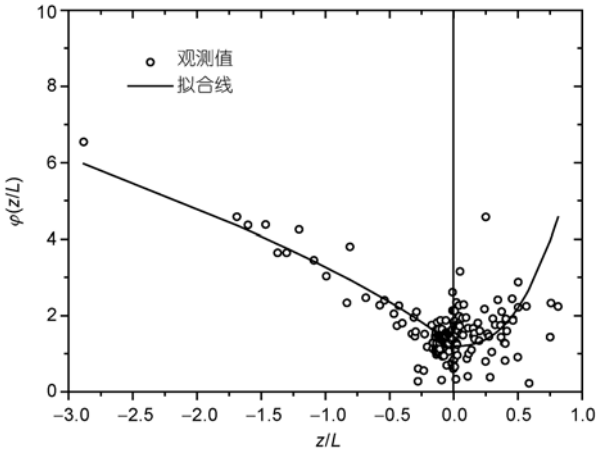

图 4　湍流强度相似性函数同稳定度的关系

$\varphi_{33}(z/L)=c\left(a+bz/L\right)^{2/3}$，且 a 均为 1; 但常数 b 和 c 存在差异, 本文中 b 和 c 分别为 1.2 和–3.5, 而根据 Uppsala 大学 1986 年近地面层湍流观测资料所得结果分别是 1.35 和 –1.9. 在中性条件下, 本文 $\varphi(z/L)=1.2$，文献[4]中为 $\varphi(z/L)=1.3$; 在层结稳定条件下, 仍然得到了形式一致的相似性函数, 即 $\varphi_{33}(z/L)=\alpha+\left(\beta z/L\right)^{5/2}$，本文得出的$\alpha$和$\beta$值为 1.2 和 2.0, 而由 Uppsala 大学 1986 年观测资料得出的值为 1.8 和 8.1.

由于湍流强度相似性函数的一些常系数与下垫面性质有关, 所以本文结果与文献[4]有差异是正常的. 值得关注的是, 不稳定层结和中性条件下, 相似性函数的一些常系数差异不大, 说明这些常系数有一定的普适性. 但大气层结稳定时, 相似性函数的常系数差异较大, 普适性略差. 造成上述现象的原因是, 不稳定层结大气混合好, 使相似性函数的常系数普适性好; 而层结稳定时, 大气混合差, 相似性函数局

地特征强, 使相似性函数的常系数差异较大, 普适性略差.

2.2 湍流强度定理适用性验证

利用式(5)和(8), 可以得到湍流强度:

$$\overline{w_c'^2}=\begin{cases}1.2\left(1-3.5\dfrac{z}{L}\right)^{\frac{2}{3}}u_*^2, & -3.0\leqslant\dfrac{z}{L}<-0.01;\\ 1.2u_*^2, & -0.01\leqslant\dfrac{z}{L}\leqslant 0.01;\\ 1.2+\left(2.0\dfrac{z}{L}\right)^{\frac{5}{2}}u_*^2, & 0.01<\dfrac{z}{L}\leqslant 1.0.\end{cases}\quad(9)$$

将式(9)计算的湍流强度与观测的湍流强度进行相关分析, 以检验湍流唯象系数结果在内蒙古草原地区的适用性以及湍流强度相似性函数的准确性.

图 5 给出了不稳定层结(–3.0<*z*/*L*<–0.01)、中性层结(–0.01≤*z*/*L*≤0.01)和稳定层结(*z*/*L*>0.01)条件下根据式(9)计算的湍流强度和实际观测的湍流强度的相关情况. *R* 为相关系数, *SD* 为标准偏差, *D* 为湍流强度拟合线的斜率. 可以发现, 在显著性水平为 0.1‰, 层结不稳定时, 计算的湍流强度与实测湍流强度拟合线的斜率为 1.04, 相关系数达到 0.97, 标准偏差为 0.04; 层结为中性时, 湍流强度拟合线的斜率为 0.97, 相关系数为 0.96, 标准偏差为 0.048; 稳定条件下, 由湍流强度资料得到的拟合线的斜率为 0.87, 相关系数为 0.84, 标准偏差为 0.046. 结果表明, 采用本文所得相似性函数计算的蒙古草原地区春季典型晴天的湍流强度与实测湍流强度总体上具有相当好的一致性. 无论是在不稳定、中性还是稳定条件下, 相关性都非常高. 从而证实了采用速度梯度和温度梯度估

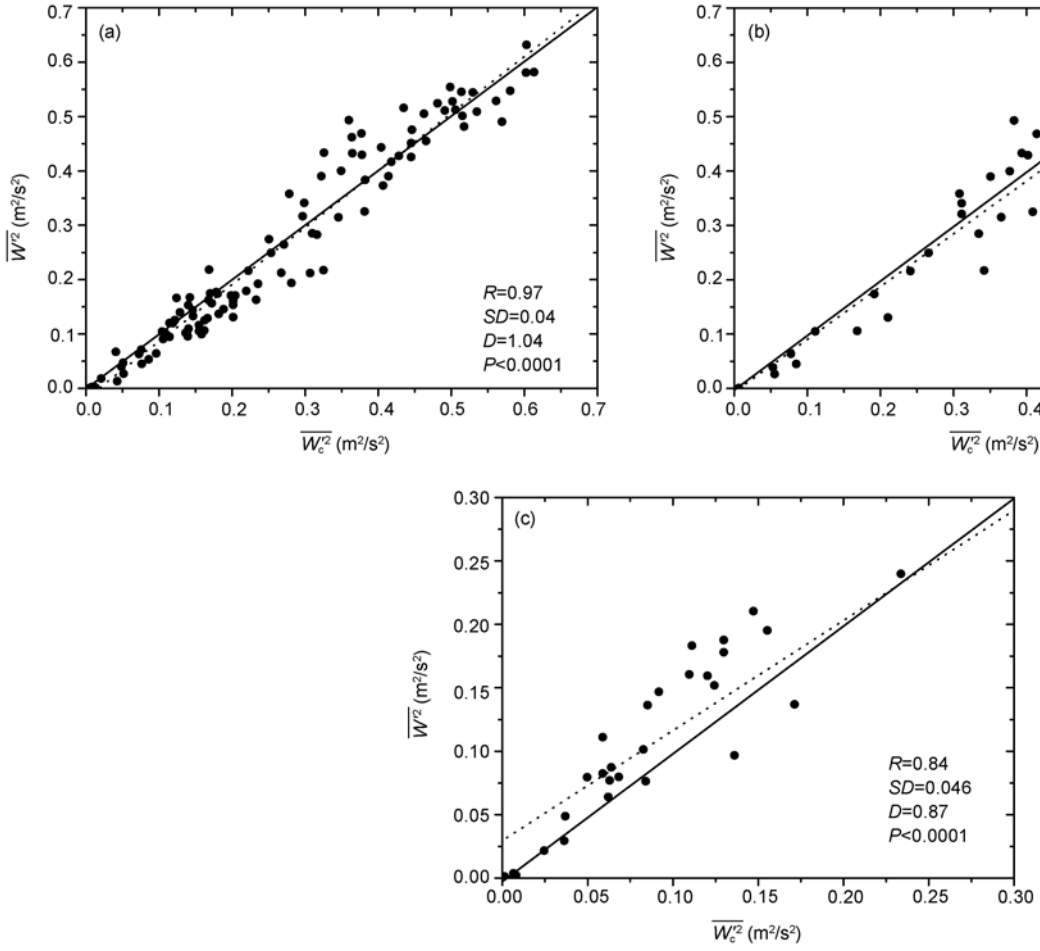

图 5 式(9)计算的湍流强度与实测湍流强度的相关性

(a) 不稳定; (b) 中性; (c) 稳定

算速度方差公式在内蒙古草原地区春季近地层湍流研究中的实用性.

3 讨论与结论

(1) 湍流的发生发展带有高度无序性和随机性, 影响大气湍流运动强弱和时空结构的因子比较复杂, 要精确描述存在一定的难度. 因此, 通常借助于统计学的方法以及动力学的观点认识湍流的微观结构和微观机制. 文献[4]利用非平衡态热力学证明了湍流强度定理, 并用实验资料得到湍流强度相似性函数的形式. 本文利用内蒙古草原通量资料, 证实了利用速度梯度和温度梯度估算速度方差的公式的适用性.

(2) 本文结果表明, 在层结不稳定时, 相似性函数满足 $\varphi_{ii}(z/L)=c(a+bz/L)^r$, a, b 和 c 均为常数, r=2/3, 即结构函数 $\varphi_{ii}(z/L)$ 的"2/3 规律"; 在中性条件下, $\varphi(z/L)=1.2$; 在层结稳定时得到的相似性函数为 $\varphi_{33}(z/L)=\alpha+(\beta z/L)^{5/2}$. 虽然相似性函数在形式上带有普适性, 但是由于湍流运动的高度无序性和随机性, 时间尺度和空间尺度的变化, 要精确描述必然与下垫面的性质和大气层结稳定度等密切相关. 因此, 本文结果与文献[4]有差异是正常的. 值得关注的是, 不稳定层结和中性条件下, 相似性函数的一些常系数差异不大, 说明这些常系数有一定的普适性. 但稳定层结条件下, 相似性函数的常系数差异较大, 普适性较差. 其原因是, 不稳定层结大气混合好, 使相似性函数的常系数普适性好; 而稳定层结大气混合差, 相似性函数局地特征强, 导致相似性函数的常系数差异较大, 普适性略差一些.

(3) 文献[4]利用 Uppsala 大学 1986 年近地面层风速和温度梯度平均资料, 确定了相似性函数形式. 首次得到湍流强度与速度梯度和温度梯度的关系, 从而使得用速度梯度和温度梯度估算速度方差成为可能, 这在传统大气湍流理论中是不可能的. 本文则利用 2008 年内蒙古草原近地面层通量观测资料, 确定了春季当地湍流强度及相似性函数. 国内外观测资料均证实了湍流强度定理的真实性和湍流强度相似性函数形式的普适性.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

1 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学. 北京: 气象出版社, 1991. 139—142
2 Grosiman A, Steinberg V. Elastic turbulence in a polymer solution flow. Nature, 2000, 405: 53—55
3 Hizone J O. Turbulence. New York: McGraw-hill Book Company, Inc, 1959. 586
4 胡隐樵, 陈晋北, 左洪超. 湍流强度定理和湍流发展的宏观机制. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 272—281
5 Kolmogorov A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid at very large Reynolds number. C R Acad Sci SSSR, 1941, 30: 301—305
6 Priestley C H B. Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere. Chicago: University of Chicago Press, 1959
7 Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. J Atmos Sci, 1963, 28: 130—141
8 Businger J A, Wangaard J C, Izumi Y, et al. Flux profile relationships in the atmospheric surface layer. J Atmos Sci, 1971, 28: 181—189
9 Dyer A J, Bradley E F. An alternative analysis of flux gradient relationship at the 1976 ITCE. Bound-Layer Meteorol, 1982, 22: 3—19
10 Wangaard J C, Cote O R, Izumi Y. Local free convection, similarity, and the budgets of shear stress and heat flux. J Atmos Sci, 1971, 28: 1171—1182
11 周明煜, 吕乃平. 大气对流边界层中热力湍流过程研究. 气象学报, 1987, 45: 451—458
12 Monin A S, Obukhov A M. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. Tr Akad Nauk SSSR Geofiz Inst, 1954, 24: 163—187
13 Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric Turbulence. New York: John Wiley and Sons, 1983. 163—187
14 Sorbjan Z. Structure of the Atmospheric of Boundary Layer. London: Prentice-Hall, 1989. 70—76
15 Zhang Q, Hunag R H, Tian H. A parameterization scheme of surface turbulent momentum and sensible heat over the Gobi underlying surface. Adv Atmos Sci, 2003, 20: 111—118
16 Louis J F, Tiedtke M, Geleyn J F. A short history of the operational PBL parameterization of ECMWF. In: Workshop on Planetary

Boundary Layer Parameterization. London: European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 1982. 59—79
17 Högström U. Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation. Bound-Layer Meteorol, 1988, 42: 55—78
18 De Bruin H A R, Ronda R J, van de Wiel B J H. Approximate solutions for the Obukhov length and the surface fluxes in terms of bulk Richardson numbers. Bound-Layer Meteorol, 2000, 95: 145—157
19 Beljaars A C M, Holtslag A A M. Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models. J Appl Meteorol, 1991, 30: 327—341
20 Delage Y. Parameterising sub-grid scale vertical transport in atmospheric models under statically stable condition. Bound-Layer Meteorol, 1997, 82: 23—48
21 Poulos G S, Burns S P. An evaluation of bulk Ri-based surface flux formulas for stable and very stable conditions with intermittent turbulence. J Atmos Sci, 2003, 60: 2523—2537
22 张强, 胡隐樵. 大气边界层物理学的研究进展和面临的科学问题. 地球科学进展, 2003, 16: 526—532
23 胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 大气边界层和大气环境研究进展. 大气科学, 2003, 27: 712—728
24 杨培才, 刘锦丽, 杨硕文. 低层大气运动的混沌吸引子. 大气科学, 1990, 14: 335—341
25 杨硕文, 麻益民, 杨培才. 大气湍流的非线性动力学参量与其经典统计量之间的关系. 大气科学, 1994, 18: 30—36
26 赵松年. 大气非线性与湍流过程中动力学复杂性的研究与进展. 力学进展, 1995, 25: 1—33
27 卞建春, 乔劲松, 吕达仁. 大气近地层湍流能谱的再分析. 大气科学, 2002, 26: 474—480
28 Li X, Hu F, Pu Y F, et al. Identification of coherent structures of turbulence at the atmospheric surface layer. Adv Atmos Sci, 2001, 18: 787—792
29 Li X, Hu F, Liu G, et al. Mitule-scale fractal characteristics boundary-layer turblence. Adv Atmos Sci, 2002, 19: 687—698
30 陈炯, 郑永光, 胡非. 用连续子波变换提取城市冠层大气湍流的相干结构. 大气科学, 2003, 27: 39—47
31 陈子赟, 孙鉴泞, 袁仁民, 等. 对流槽湍流涡旋结构特征的小波分析. 地球物理学报, 2004, 47: 25—31
32 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMAGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX. 高原气象, 1999, 18: 280—294
33 胡隐樵, 张强. 论大气边界层的局地相似性. 大气科学, 1993, 17: 10—20