

李奇龙, 程雪玲, 曾庆存. 2016. 大气边界层阵风相干结构的产生条件 [J]. 气候与环境研究, 21 (6): 725–736. Li Qilong, Cheng Xueling, Zeng Qingcun. 2016. Conditions for the formation of the coherent structure of gusty disturbances in the atmospheric boundary layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (6): 725–736, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16063.

大气边界层阵风相干结构的产生条件

李奇龙^{1,2} 程雪玲¹ 曾庆存³

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 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 壁湍流相干结构的发现是近代湍流研究的重大进展之一, 从 20 世纪 50 年代开始, 在大气边界层湍流中也发现了相干结构——对流云街, 并进行了系统的研究。近些年来, 人们发现在近地层湍流中也存在相干结构。利用北京 325 m 气象塔对城市下垫面中大风和小风天气的风速分析, 发现较有规律的周期 3~6 min 的阵风, 且有明显的相干结构, 而对不同下垫面的阵风研究, 均发现存在这种相干结构, 这种阵风相干结构对通量输送有不可忽视的作用。本文利用 2012 年 4 月甘肃省民勤县巴丹吉林沙漠观测塔的超声风速和平均场风速、温度观测资料, 对阵风相干结构的产生条件进行了分析。采用傅立叶变换, 将三维超声风速按频率分成基流 (周期 10 分钟以上)、阵风扰动 (周期 1 到 10 分钟)、湍流脉动 (周期小于 1 分钟) 三部分, 结合平均场的资料分析发现: 阵风相干结构出现在静力中性、不稳定甚至略微稳定的条件下, 或者说机械作用主导的大气边界层, 阵风区就会出现相干结构, 热力作用对其有抑制和干扰的作用。从而, 阵风的相干结构和壁面相干结构都出现在中性条件下, 是机械湍流的现象, 都主导着动量能量的输运。阵风区的相干结构并不等同于对流云街, 他们出现在不同的大气稳定度条件下且尺度不同。

关键词 大气边界层 阵风 相干结构 稳定度 湍流

文章编号 1006-9585 (2016) 06-0725-12

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16063

Conditions for the Formation of the Coherent Structure in Gusty Disturbances in the Atmospheric Boundary Layer

LI Qilong^{1,2}, CHENG Xueling¹, and ZENG Qingcun³

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The discovery of coherent structures in wall turbulence is one of the significant progresses in modern research of turbulence. The coherent structure was found in the atmospheric boundary layer in the 1950s, which was called cloud

收稿日期 2016-03-25; **网络预出版日期** 2016-06-24

作者简介 李奇龙, 男, 1989 年出生, 博士研究生, 主要从事大气边界层阵风和湍流研究。E-mail: 277069190@qq.com

通讯作者 程雪玲, E-mail: chengxl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 40830103、41375018, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2010CB951804, 中国科学院战略先导专项 XDA10010403

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 40830103 and 41375018), National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2010CB951804), Strategic Priority Program of Chinese Academy of Sciences (Grant XDA10010403)

street and has been studied extensively. In recent years, a coherent structure was also found in the surface layer. Based on analysis of strong wind and light wind data in the urban boundary layer collected at the 325 m meteorological tower in Beijing, it is revealed that gusty disturbances have a period equal to around 3–6 min and possess coherent structure. The coherent structure is also found in disturbances over different underlying surfaces and makes downward transport of momentum more effectively. Conditions for the formation of the coherent structure in gusty disturbances was investigated using the turbulent data from the ultrasonic anemometer–thermometers and the mean wind and temperature data collected at the monitoring tower in the Badan Jilin Desert in Minqin County of Gansu Province in April 2012. The time series of three dimensional atmospheric velocity were analyzed using conventional Fourier spectral analysis. The atmospheric velocity was decomposed into three components: basic mean flow (period > 10 min.), gusty disturbance (1 min < period < 10 min.) and turbulence fluctuation (period < 1 min.). The results show that the coherent structure occurs in neutral, unstable and even slightly stable boundary layer. In other words, the coherent structure occurs under the condition that the turbulence is mainly generated by mechanical action, and it can be suppressed or disturbed by buoyancy. Thus, the coherent structure in the gusty wind and that in wall turbulence occur in neutral boundary layer. It is generated by mechanical action and plays a major role in energy and momentum transport. The coherent structure in the gusty wind is not the same as cloud street, and it appears under different atmospheric stability conditions and has different scales.

Keywords Atmospheric boundary layer, Gusty wind, Coherent structure, Stability, Turbulence

1 引言

由于受到地面的摩擦和热力作用,大气边界层内大气的流动形式为湍流,湍流造成了垂直方向上的热量、动量、物质的交换,是地面和高层大气联系的纽带。早期,人们多认为湍流是不规则的随机过程,并以此建立了 K 理论、均匀各向同性湍流理论 (Kolmogorov, 1941) 等。直到 20 世纪 60 年代 Kline 等利用氢气泡实验发现壁面湍流边界层存在相干结构——大尺度拟序结构 (Kline et al., 1967),改变了人们对湍流运动的认识,相干结构的发现是近代湍流研究的重大进展之一 (张兆顺, 2002),相干结构主宰湍流的动量能量输运并且是高频湍流产生的原因。

在大气湍流中,20 世纪 50 年代末到 70 年代注意到一种相干结构——对流云街 (Kuettnner, 1959, 1971; Faller, 1965; Faller and Kaylor, 1966; Lemone, 1973, 1976a; Streten, 1975),并在 70 到 90 年代作为边界层研究的热点 (Lemone and Pennell, 1976b; Melfi et al., 1985; Miura, 1986; Atlas et al., 1986; Weckwerth et al., 1996; Müller et al., 1999)。近些年来,通过研究寒潮过境后大风情况下的城市边界层 (程雪玲等, 2007; Zeng et al., 2010) 发现,在平均风上叠加有较有规律的周期 3~6 min 的阵风,阵风谱区存在相干结构:阵风顺风方向水平速度与垂直速度不是完全独立的,而表现出反相相干性,这

种相干性有利于动量下传,使得阵风扰动在动量的传输中与湍流的作用相当且有利于物质的输送,是阵风扬尘的机理 (曾庆存等, 2007)。由于阵风区有时出现相干结构,有时不出现相干结构,我们将“阵风”和“相干结构”两词分开,阵风或者阵风扰动指阵风谱区 (1~10 min) 的风速扰动,而相干结构指阵风谱区出现的顺风方向和垂直方向反相相干的扰动。

进一步,通过分析城市边界层非大风情况下阵风谱区 (1~10 min) 的特性发现 (Li et al., 2016),阵风谱区的相干结构是一种普遍现象:非大风情况下阵风谱区仍然存在相干结构,这种相干结构使得阵风扰动对动量通量的贡献占到了约 80%。

此外,通过对不同下垫面阵风研究发现:鄱阳湖 (Liu et al., 2013)、南海 (Cheng et al., 2015b) 等地在大风天气下阵风区都存在相干结构;郭云谦等 (2012) 利用南京郊区超声风速仪、风廓线雷达资料分析发现每隔 6 个边界层厚度的水平位置出现一个高风速相干结构 (high-speed coherent structure); Zheng et al. (2013) 利用沙漠地区的资料分析发现近壁区的速度场和温度场都存在相干结构,其流向尺度可达 10 倍边界层厚度,他们认为这属于高雷诺数壁湍流的超大尺度相干结构。

开展相干结构研究的最终目的是通过研究相干结构的动力学行为和规律,建立符合相干结构机理的数学模型,在工程中更加准确地进行预报,因此,判断和检测相干结构的出现条件是一个重要的

研究内容。比如, 壁湍流中采用的条件采样法、子波分析等 (Blackwelder and Kaplan, 1976; Yamada and Ohkitani, 1990); 在大气边界层中, 以往对阵风相干结构的检测也进行过大量研究, 如工程中采用阵风因子的方法确定阵风的出现 (Jungo et al., 2002; Boettcher et al., 2003; Paulsen and Schroeder, 2005)。这些方法多是从应用角度出发, 利用风场自身的变化进行判断, 大气边界层不同于普通的平板边界层, 影响流场运动的因素除了有动力的, 还有热力的。比如, 区别于城市边界层常观测到相干结构, 在沙漠地区的边界层风场, 阵风扰动有时出现较有规律的相干结构, 有时扰动显得杂乱无章。因此, 阵风区相干结构的出现可能不只与风速、下垫面粗糙度等动力学因素有关, 还与热力学因素有关。本文将通过分析 2012 年 4 月在甘肃省民勤县巴丹吉林沙漠超声风速观测资料, 找出阵风谱区相干结构出现的条件。

2 数据和方法

2.1 数据来源

本文分析的资料来自于甘肃省民勤县巴丹吉林沙漠野外实验, 观测时间为 2012 年 4 月 1 日至 2012 年 5 月 9 日, 实验场地位于民勤县城的西南方向。观测塔位于民勤县治沙站 3 号塔监测站 ($38^{\circ}37'44''\text{N}$, $102^{\circ}55'11''\text{E}$) 东南约 800 m, 塔高 70 m, 在观测塔 16 m 高度处装有中国科学院大气物理研究所研制的 UAT-2 型超声风速仪, 其采样频率为 100 Hz, 量程为 $0\sim 45\text{ m s}^{-1}$, 分辨率为 0.01 m s^{-1} ; 2 m, 8 m, 16 m, 32 m 和 62 m 上还装有平均场 (风速、风向、温度) 测量装置。

2.2 倾角校正和质量控制

超声风速仪的倾斜可以引起垂直方向湍流通量的测量误差 (Contini et al., 2006), 如 Cheng et al. (2015a) 分析发现, 未进行倾角校正可以造成巴丹吉林沙漠新观测塔 16 m 处垂直风速的测量偏差达到 0.12 m s^{-1} 。本次观测中, 双轴倾角传感仪被安装于塔上用以记录风速仪的倾角, 其采样频率 (100 Hz) 与超声风速仪相同, 利用 GPS (global positioning system) 将两者时基信号校准实现同步测量。倾角校对方程为

$$\begin{cases} u = u_0 \cos(\beta), \\ v = v_0 \cos(\alpha), \\ w = w_0 + u_0 \sin(\beta) + v_0 \sin(\alpha), \end{cases} \quad (1)$$

其中, (u_0, v_0, w_0) 为倾角校正前风速, β 和 α 分别为校正前坐标轴 x_0 方向和 y_0 方向与水平面的夹角。

(u, v, w) 为倾角校正后风速。此外, 在数据质量控制中对野点进行了剔除, 用以去除明显不符合事实和超出变量阈值的数据 (比如风速超出超声风速仪量程 45 m s^{-1} 的数据)。同时, 由于传感器上的水汽凝结等原因会导致数据接收系统和数据传输系统产生一些随机脉冲, 因此需要剔除这些随机脉冲。考虑到大气湍流概率密度分布存在很多不对称的情况 (全利红等, 2007), 以及非 Gauss 分布的情况 (马晓光和胡非, 2004), 为了最大限度的保护原有资料, 将置信区间取为 5σ (σ 表示标准差), 即视在 $[\mu-5\sigma, \mu+5\sigma]$ 区间外的为随机脉动 (μ 表示期望)。

2.3 坐标旋转和阵风的提取

对于每个小时的风速数据, 我们将 x 轴旋转到顺风方向, 使得旋转后的坐标系的 u_r 表示顺风方向的风速大小, v_r 表示垂直于顺风方向的风速大小, w_r 就是垂直风速。为了方便, 本文后面部分提到的 (u, v, w) 即是指旋转后的风速分量 (u_r, v_r, w_r) 。

我们对风速 (u, v, w) 等气象要素时间序列 $f(t)$ 做分析, 一般的, 可以把 $f(t)$ 分为两部分, 低频信号 $\bar{f}(t)$ 和叠加在低频信号上的脉动值 $f'(t)$:

$$f(t) = \bar{f}(t) + f'(t), \quad (2)$$

Zeng et al. (2010) 指出阵风的周期一般为 3~6 min, 保守起见, 我们将阵风谱区取为 1~10 min, 这也符合世界气象组织对阵风的定义 (WMO, 2008)。根据此, 我们将 f' 细分为两部分: 周期小于 1 min 的湍流脉动 $f_i(t)$, 和周期大于 1 分钟且小于 10 分钟的阵风扰动 $f_g(t)$, 从而, 我们按周期 (频率) 将 $f(t)$ 做傅立叶展开分成三部分:

$$f(t) = \bar{f}(t) + f_g(t) + f_i(t), \quad (3)$$

其中, $\bar{f}(t)$ 就是所谓的“基流”或者“平均流”, 它的周期大于 10 分钟; $f_g(t)$ 是阵风扰动, 其周期介于 1 到 10 分钟之间; $f_i(t)$ 是湍流脉动, 它是周期小于 1 分钟的高频脉动。

因此, 对于水平风速有

$$u(t) = \bar{u}(t) + u_g(t) + u_i(t), \quad (4)$$

$$v(t) = \bar{v}(t) + v_g(t) + v_i(t), \quad (5)$$

对于比较稳定的基流来说, $\bar{u}(t)$ 基本上代表了水平风速, 而 $\bar{v}(t)=0$; $u_g(t)$ 、 $v_g(t)$ 、 $u_i(t)$ 、 $v_i(t)$ 分别为顺风方向、垂直于顺风方向的阵风扰动和湍流脉动。

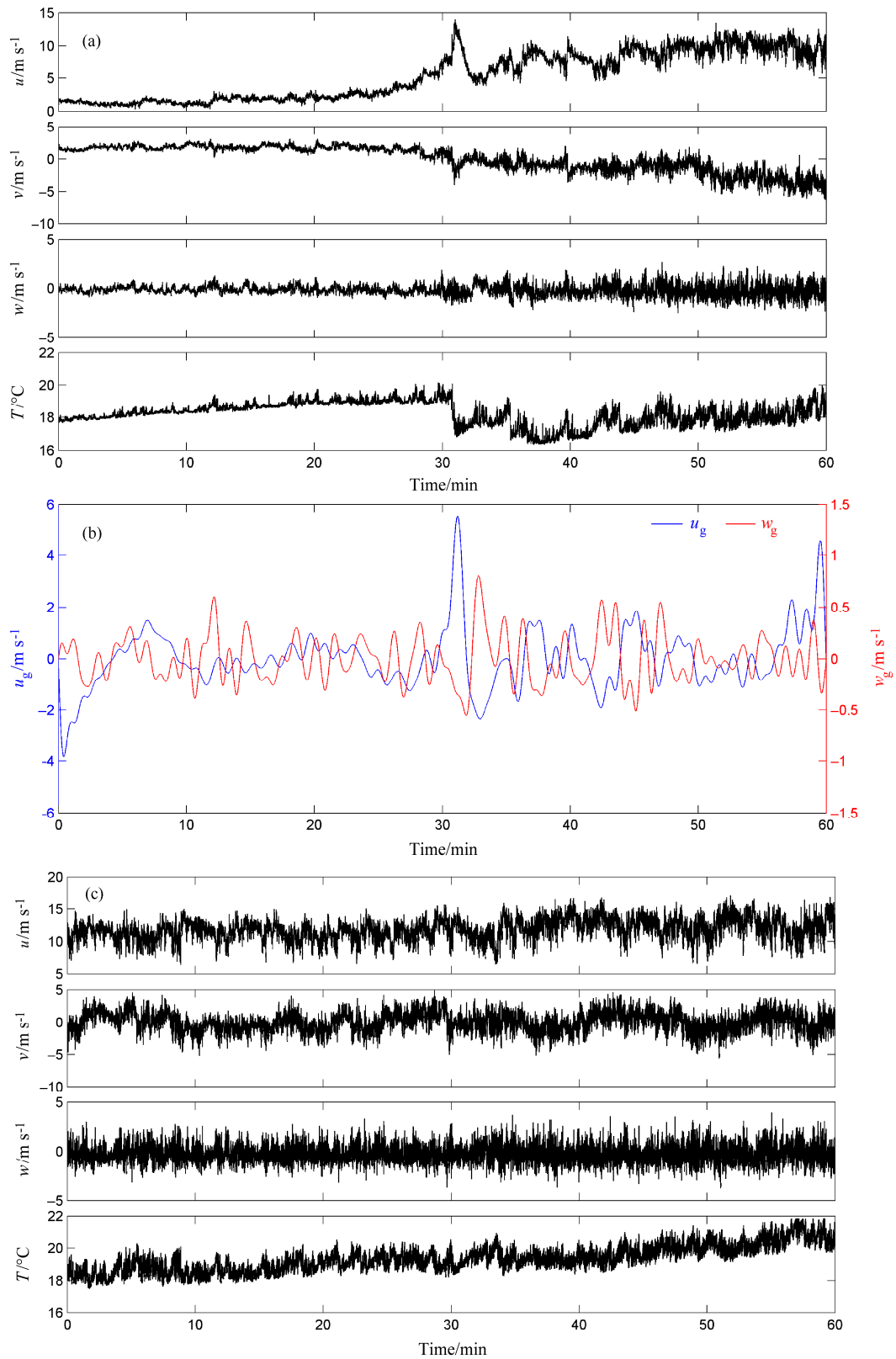


图1 2012年4月10日09~10时(大风爆发前)的(a)风速(u , v , w)、温度(T)和(b)顺风方向的阵风扰动(u_g)、垂直方向的阵风扰动(w_g)时间序列。(c)、(d)同(a)、(b), 但为10~11时(大风时段)。(e)、(f)同(a)、(b), 但为11~12时(大风时段)

Fig. 1 Time series of (a) wind speed (u , v , w) and temperature (T), (b) gusty wind disturbances (u_g , w_g) for 0900–1000 BJT (Beijing time, before the occurrence of strong wind) on 10 April 2012. (c), (d) As in Figs. (a), (b), but for 1000–1100 BJT (the period of strong wind). (e), (f) As in Figs. (a), (b), but for 1100–1200 BJT (the period of strong wind)

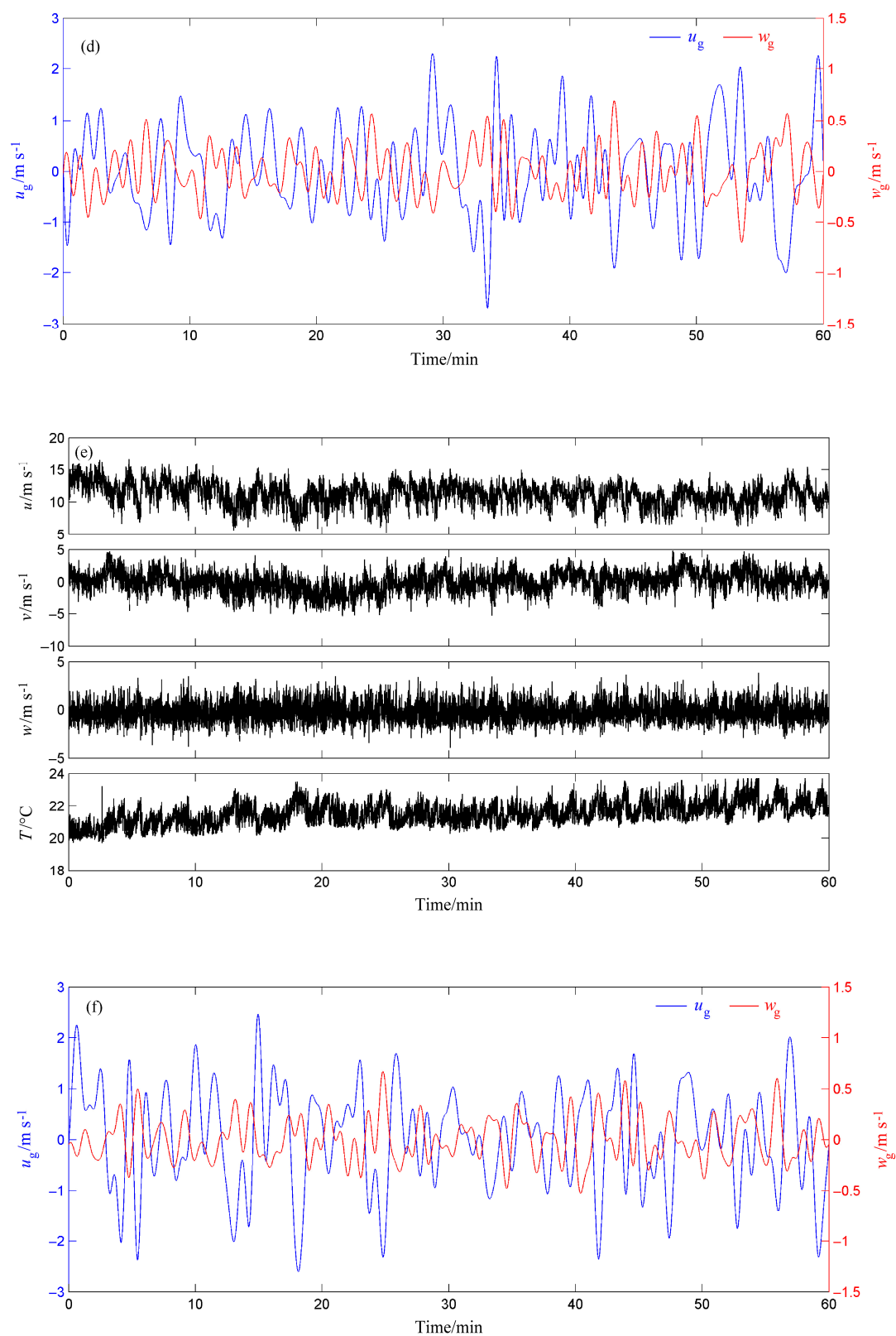


图1 (续)
Fig.1 (Continued)

3 结果分析

3.1 相干结构出现的条件

3.1.1 大风条件下出现阵风相干结构

图 1 是 2012 年 4 月 10 日上午 09~12 时（北京时间，下同）风速、温度以及阵风扰动随时间演变曲线，由图可见，2012 年 4 月 10 日上午 09 时 30 分左右冷空气入侵，大风降温。图 1d 和图 1f 给出冷空气到达后 10 到 11 时和 11 时到 12 时的阵风扰动时间序列，可以看出，大多数情况下，当 u_g “上升”时， w_g 便“下降”， u_g “上升”到波峰时， w_g “下降”到波谷；当 u_g “下降”时， w_g 便“上升”，当 u_g “下降”到波谷时， w_g “上升”到波峰，这就说明 u_g 与 w_g 不是完全独立的，具有相干结构，而且反相相干。有些时候相干结构会受到一定干扰，比如图 1d 中 10 时 45 分左右，可能是受到热对流的影响，出现短时间的同相。采用 R_g 定量描述阵风水平分量和垂直分量的相干程度（程雪玲等，2007）：

$$R_g = \frac{\overline{u_g w_g}}{\left(\overline{u_g^2} \times \overline{w_g^2}\right)^{1/2}} \quad (6)$$

10 时到 11 时的 R_g 为 -0.72，11 时到 12 时的 R_g 为 -0.62，相关系数较大，可见大风期间阵风的相干性很好，这和在城市边界层观测到的结果一致（程雪玲等，2007）。

3.1.2 各层温度相近时出现阵风相干结构

除了大风期间，阵风出现明显的相干结构之外，各层温度近似相等时，阵风也出现相干结构，图 2 给出相干结构的典型日变化。其中，图 2a 和图 2b 为 4 月 8 日 22 时到 23 时，图 2c 和图 2d 为 4 月 9 日 08 时到 09 时，图 2e 和图 2f 是 4 月 9 日 14 时到 15 时，图 2g 和图 2h 是 4 月 9 日 18 时到 19 时，分别代表了夜间，日出，中午，日落。

图 2a 和图 2b 为夜间稳定边界层，阵风受到热力抑制，风速较平缓，阵风扰动的强度很小；图 2c 和图 2d 为日出前后，各层温度出现短时间的近似相等，风速表现阵性和相干性，相关系数达到 -0.60；图 2e 和图 2f 是正午，是典型的不稳定边界层，太阳加热地面，浮力对阵风做功（温度也出现较大的扰动），出现热对流和热泡，打乱了阵风的相干结构，相关系数为 -0.03。图 2g 和图 2h 是日落前后，各层温度又出现短暂的相等，阵风又表现出相干

性，相关系数为 -0.42。

总之，当各层温度出现近似相等时，风速就表现出阵性和相干性。对于夜间稳定的边界层，其阵性受到热力抑制，扰动强度较小，而对于沙漠中午强不稳定的边界层，相干结构被打乱，相干性较小。

3.2 相干结构出现条件的统计分析

由上节分析可知，阵风的相干结构出现在大风或者各层温度近似相等时，这两点可以归结于一点，阵风的相干结构出现在近中性条件下，因为无论大风条件或者各层温度近似相等时，大气边界层都为近中性层结，此时机械作用相对于热力作用强。因此，可以得出如下结论：近中性条件下，就会出现阵风相干结构，或者说机械作用主导的大气边界层，就会出现阵风相干结构。此外，根据图 2，我们可看出热力作用会产生热力湍流或者抑制阵风扰动的发展，如果热力作用（相对于机械）很强，对流和热泡就会使相干性变得很弱；而在夜间稳定边界层热力作用又会阻止阵风扰动的形成。

图 3 中，横坐标为 $-(g/\bar{\theta}) \times (\partial\bar{\theta}/\partial z)$ 表示热力作用强度，其中， g 表示重力加速度， $\bar{\theta}$ 表示平均位温， z 表示高度。纵坐标为 $\overline{U^2}$ 表示动力作用强度， $-(g/\bar{\theta}) \times (\partial\bar{\theta}/\partial z)$ 为负为稳定边界层（图 3a）， $-(g/\bar{\theta}) \times (\partial\bar{\theta}/\partial z)$ 为正为不稳定边界层（图 3b），统计的对象是此次巴丹吉林沙漠观测站的观测时段（2012 年 4 月 1 日至 2012 年 4 月 30 日）。图中叉号表示出现相干结构，三角形表示不出现相干结构。可以看出，叉号基本都出现在靠近纵坐标处，三角形基本都出现在靠近横坐标处，即当机械作用占优时，阵风是相干的；热力作用占优时，阵风是不相干的。即机械作用主导的大气边界层，阵风就会出现相干结构或者说近中性条件下出现相干结构。

3.3 不同稳定度下的阵风分类

我们将上述结果列表归纳阵风相干强度与稳定度的关系。图 3a 中， $-(g/\bar{\theta}) \times (\partial\bar{\theta}/\partial z)$ 为负，为稳定边界层，三角形表示阵风扰动的强度很小，为表 1 中稳定度中的稳定情况，对应图 4a。图 3b 中， $-(g/\bar{\theta}) \times (\partial\bar{\theta}/\partial z)$ 为正，为不稳定边界层，三角形表示阵风扰动强度很大但是不相干，为表 1 中的强不稳定情况，对应图 4e。因此，我们把阵风按稳定度分为 5 种情况，5 种情况依次对应图 4a-e。其中，中性条件下，机械作用就会产生阵风，表现出阵性和相干性，如图 4c， $R_g = -0.72$ ；弱稳定条件下，阵

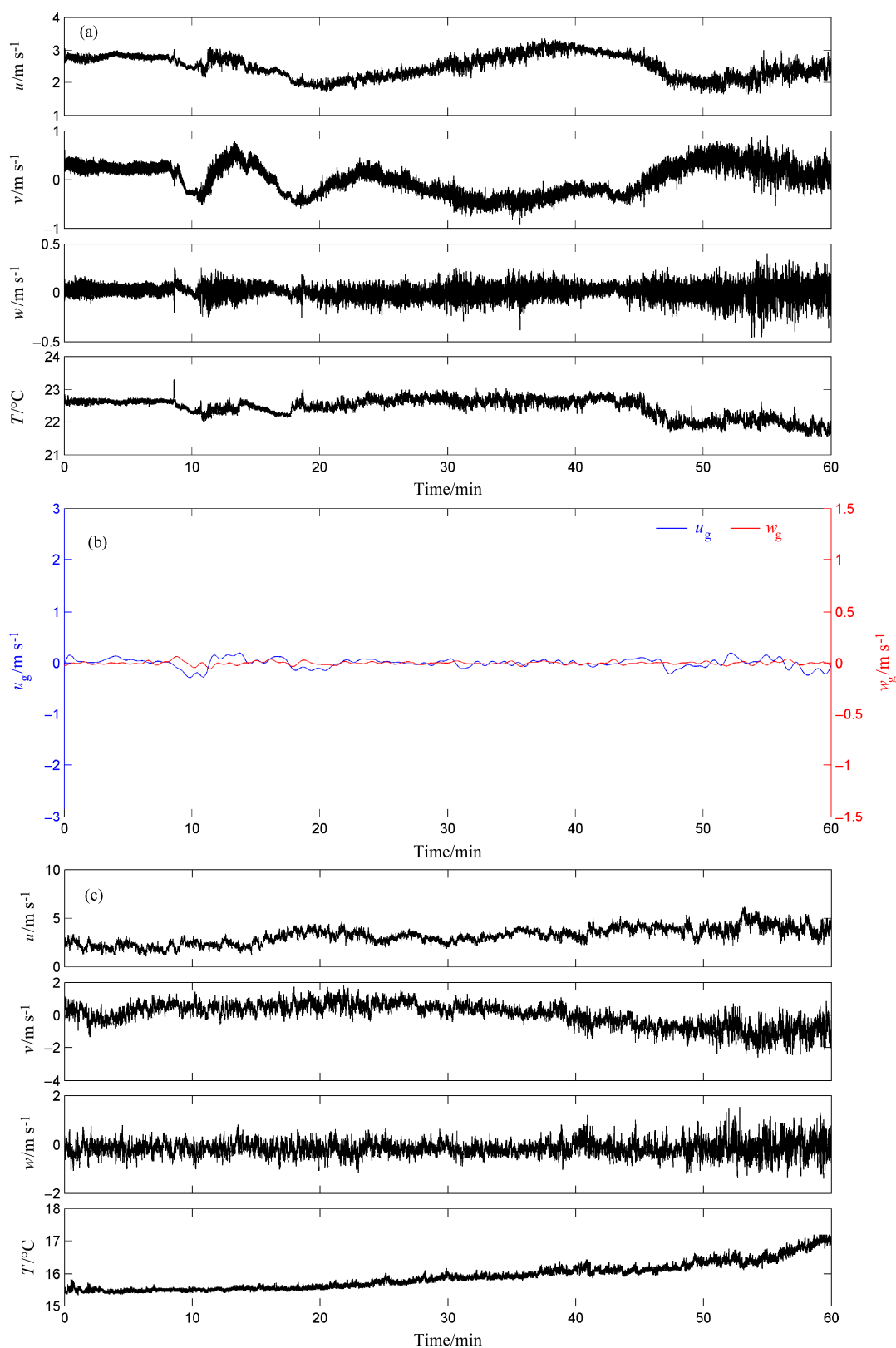


图2 2012年4月8日22时至23时 (a) 风速 (u, v, w)、温度 (T) 和 (b) 顺风方向的阵风扰动 (u_g)、垂直方向的阵风扰动 (w_g) 时间序列。(c)、(d) 同 (a)、(b)，但为4月9日08时至09时。(e)、(f) 同 (a)、(b)，但为4月9日14时至15时。(g)、(h) 同 (a)、(b)，但为4月9日18时至19时
Fig. 2 Time series of (a) wind speed (u, v, w) and temperature (T), (b) gusty wind disturbances (u_g, w_g) for 2200–2300 BJT (before the occurrence of strong wind) on 8 April 2012. (c), (d) As in Figs. (a), (b), but for 0800–0900 BJT 9 April. (e), (f) As in Figs. (a), (b), but for 1400–1500 BJT 9 April. (g), (h) As in Figs. (a), (b), but for 1800–1900 BJT 9 April

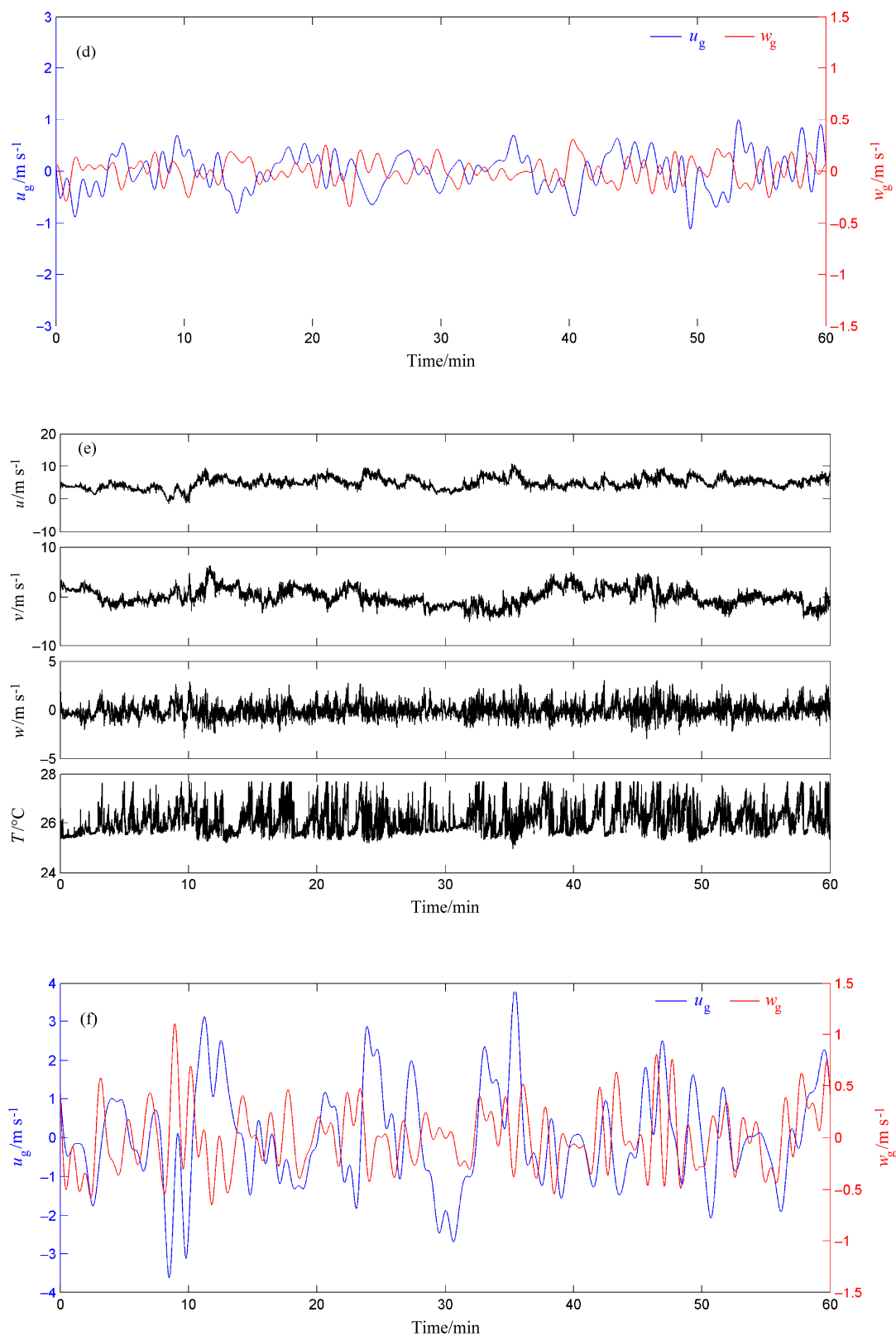


图2 (续)

Fig. 2 (Continued)

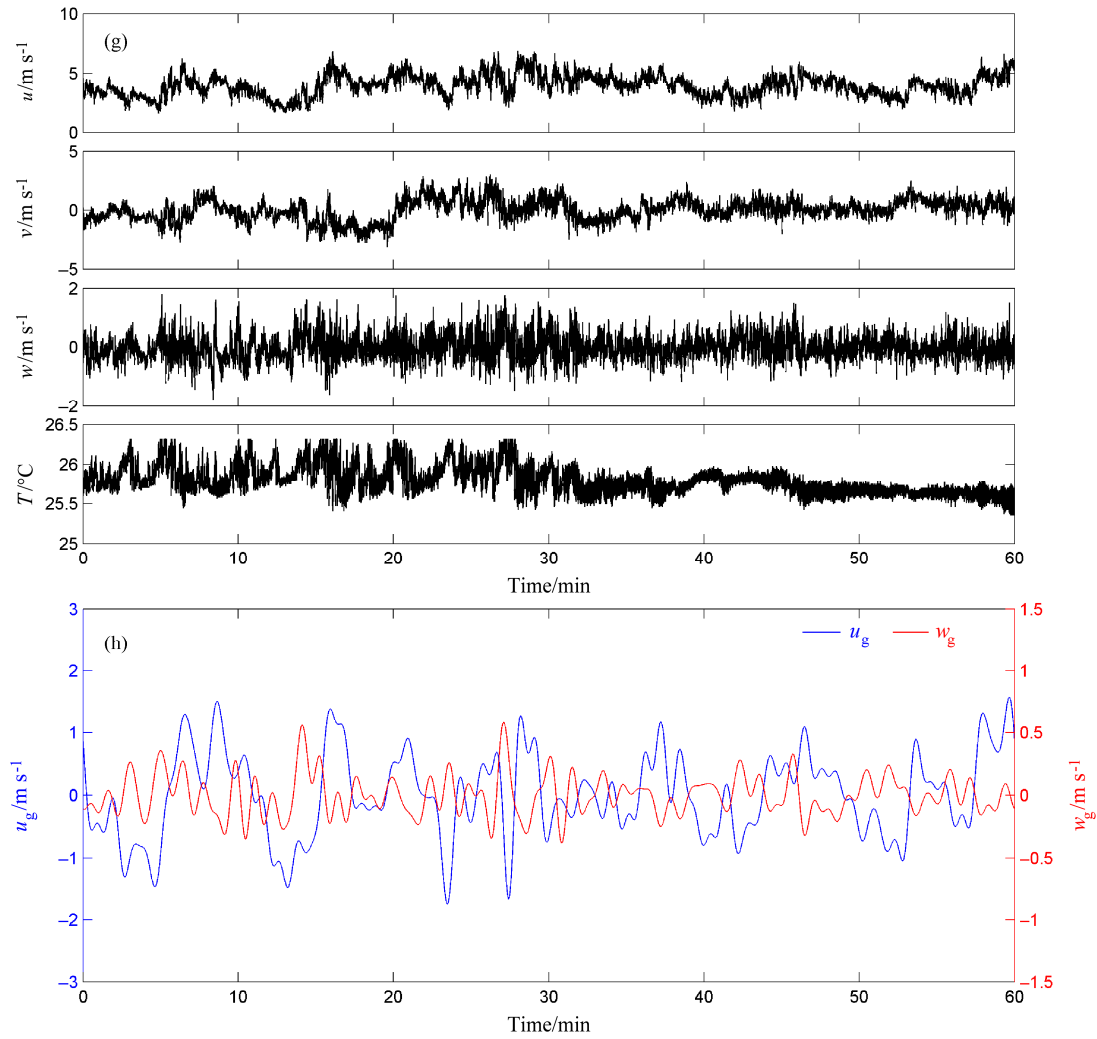


图2 (续)

Fig. 2 (Continued)

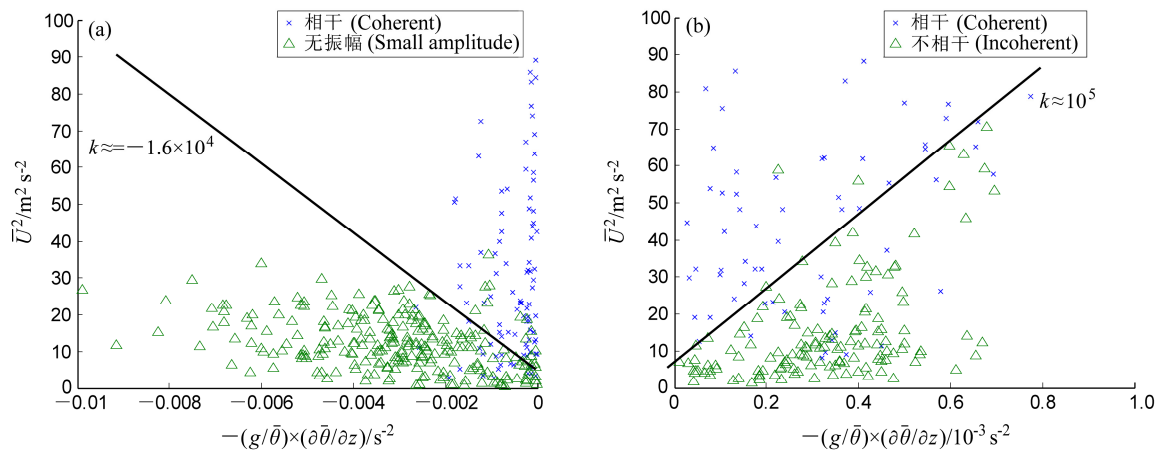


图3 热力作用和机械作用下阵风的相干性, k 为直线的斜率

Fig. 3 The coherence of wind gusts under buoyancy effects and mechanical effects, k is the slope of the line

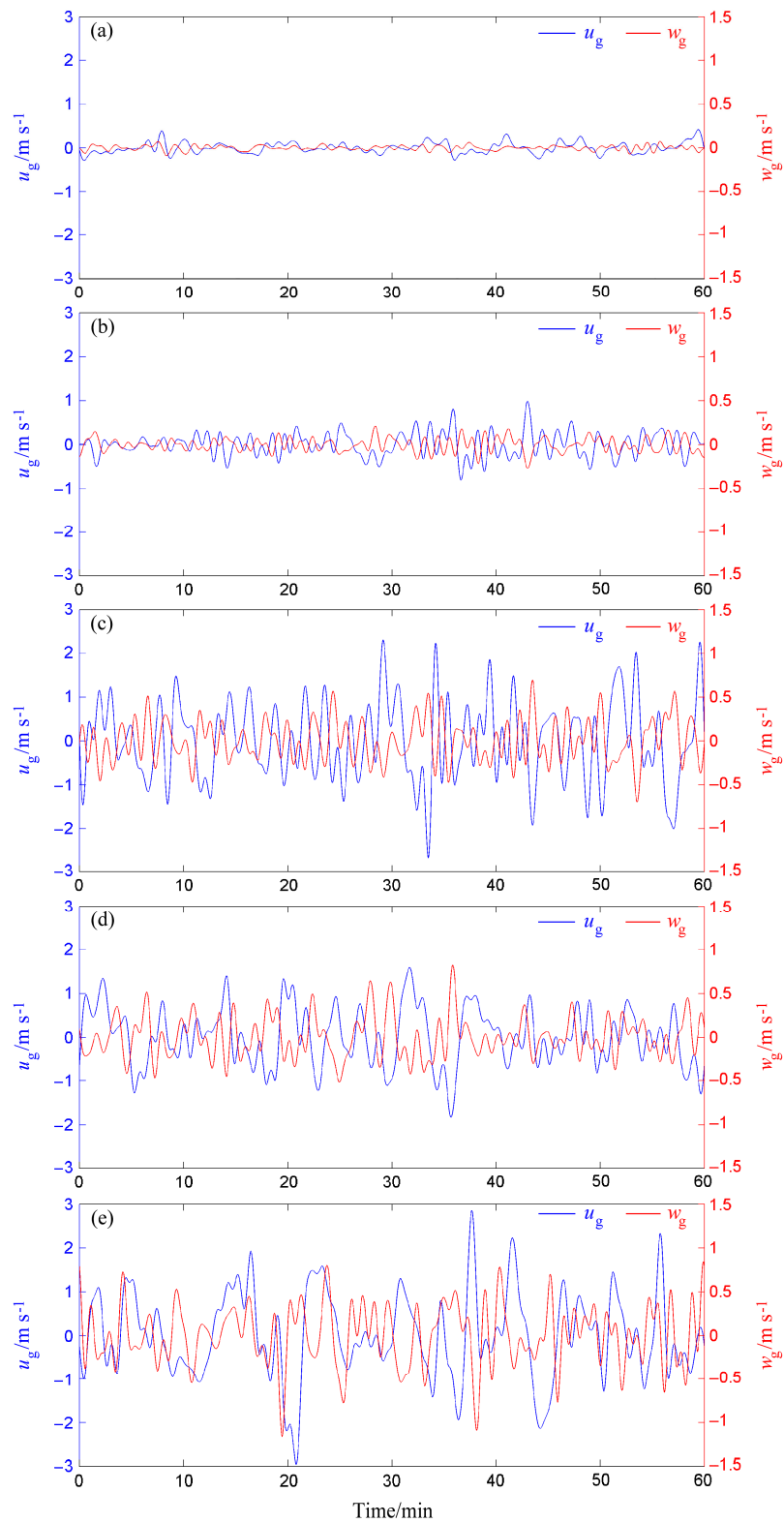


图4 不同稳定度情况下的阵风扰动的时间序列: (a) 2012年4月6日05~06时(稳定); (b) 2012年4月10日00~01时(弱稳定); (c) 2012年4月10日10~11时(中性); (d) 2012年4月6日10~11时不稳定; (e) 2012年4月17日12~13时(强不稳定)

Fig. 4 Time series of gusty wind disturbances under different stabilities: (a) 0500–0600 BJT April 2012 (statically stable); (b) 0000–0100 BJT 10 April 2012 (slightly stable); (c) 1000–1100 BJT 10 April 2012 (neutral); (d) 1000–1100 BJT 6 April 2012 (unstable); (e) 1200–1300 BJT 7 April 2012 (highly unstable)

风会受到热力抑制，表现在阵风扰动的强度减小，如图 4b， $R_g=-0.59$ ；达到一定的稳定程度，阵风扰动强度就会变得很小，如图 4a， $R_g=-0.05$ ；不稳定条件下，热力作用产生的湍流或者对流使相干性一定程度的减弱，如图 4d， $R_g=-0.49$ ；如果热力作用（相对于机械）很强，热力湍流或者对流就会完全打乱相干结构，使相干性变得很弱，相关系数非常小，如图 4e， $R_g=-0.05$ 。

表 1 阵风相干性与稳定度对照表

Table1 The coherence and stability of wind gusts		
稳定度	能量	R_g （相干性）
稳定	弱	—
弱稳定	中等（受抑制）	强
中性	强	强
不稳定	强	中等
强不稳定	很强	弱

4 结论和讨论

本文利用 2012 年 4 月甘肃省民勤县巴丹吉林沙漠新塔的超声资料分析了不同稳定度下阵风扰动的特性。阵风区的相干结构出现在近中性的条件下，或者说阵风区的相干结构出现在机械作用主导的大气边界层，从而阵风的相干结构是机械作用的结果，它在不同的热力作用下，有不同的表现：（1）在弱稳定的条件下，阵风的相干结构会受到抑制，扰动强度减小。稳定条件下，阵风的扰动强度会变得很小；（2）在不稳定条件下，阵风的相干结构会受到热力湍流的干扰，表现为相干性降低。如果热力作用很强，则阵风的相干结构完全被打乱，相干性非常弱。这与小风（Li et al., 2016）、大风条件下（程雪玲等，2007）对相干结构的观测结果是吻合的，城市白天热力作用没有沙漠强烈，夜间较难形成稳定边界层，所以常观测到相干结构；冷锋过境后的大风条件自然是近中性层结，所以出现明显的相干结构。

阵风的相干结构和壁面相干结构都出现在中性条件下，是机械湍流的现象，都主导着动量能量的输运。阵风区的相干结构并不等同于对流云街，他们出现在不同的条件下：阵风区的相干结构出现在弱稳定、中性和不稳定的条件下，是一种较普遍的现象；对流云街是沿近顺风方向排列的滚轴涡，垂直高度为 1~2 公里，横向“波长”为 2~20 公里，出现在中等不稳定条件下，时间尺度为小时量

级（Etling and brown, 1993）。阵风的相干结构之于大气边界层是否等同于壁湍流相干结构之于壁面边界层，阵风区的相干结构与对流云街有什么关系，阵风区的相干结构背后是否有清晰的物理图像，我们将在以后进行讨论。

参考文献（References）

Atlas D, Walter B, Chou S H, et al. 1986. The structure of the unstable marine boundary layer viewed by lidar and aircraft observations [J]. J. Atmos. Sci., 43 (13): 1301–1318, doi: 10.1175/1520-0469(1986)043<1301:TSOTUM>2.0.CO;2.

Blackwelder R F, Kaplan R E. 1976. On the wall structure of the turbulent boundary layer [J]. J. Fluid Mech., 76 (1): 89–112, doi:10.1017/S0022112076003145.

Boettcher F, Renner C, Waldl H P, et al. 2003. On the statistics of wind gusts [J]. Bound.-Layer Meteor., 108 (1): 163–173, doi:10.1023/A:1023009722736.

Cheng X L, Huang J, Wu L, et al. 2015b. Structures and characteristics of the windy atmospheric boundary layer in the south China sea region during cold surges [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32 (6): 772–782, doi:10.1007/s00376-014-4228-7.

Cheng X L, Peng Z, Hu F, et al. 2015a. Measurement errors and correction of the UAT-2 ultrasonic anemometer [J]. Science China-Technological Sciences, 58 (4): 677–686, doi:10.1007/s11431-014-5728-5.

程雪玲, 曾庆存, 胡非, 等. 2007. 大气边界层强风的阵性和相干结构 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 227–243. Cheng Xueling, Zeng Qingcun, Hu Fei, et al. 2007. Gustness and coherent structure of strong wind in the atmospheric boundary layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 227–243, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2007.03.03.

Contini D, Donato A, Belosi F. 2006. Accuracy of measurements of turbulent phenomena in the surface layer with an ultrasonic anemometer [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 23 (6): 785–801, doi:10.1175/JTECH1881.1.

Etling D, Brown R A. 1993. Roll vortices in the planetary boundary layer: A review [J]. Bound.-Layer Meteor., 65 (3): 215–248, doi: 10.1007/BF00705527.

Faller A J. 1965. Large eddies in the atmospheric boundary layer and their possible role in the formation of cloud rows [J]. J. Atmos. Sci., 22 (2): 176–184, doi:10.1175/1520-0469(1965)022<0176:LEITAB>2.0.CO;2.

Faller A J, Kaylor R E. 1966. A numerical study of the instability of the laminar ekman boundary layer [J]. J. Atmos. Sci., 23 (5): 466–480, doi:10.1175/1520-0469(1966)023<0466:ANSOTI>2.0.CO;2.

郭云谦, 袁仁民, 罗涛, 等. 2012. 高风速相干结构对通量输送影响的实验研究 [J]. 大气科学, 36 (4): 733–743. Guo Yunqian, Yuan Renmin, Luo Tao, et al. 2012. Research on relationships between high-speed coherent structure and turbulence flux [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 733–743, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11164.

Jungo P, Goyette S, Beniston M. 2002. Daily wind gust speed probabilities over Switzerland according to three types of synoptic circulation[J].

- International Journal of Climatology, 22(4): 485–499, doi:10.1002/joc.741.
- Kline S J, Reynolds W C, Schraub F A, et al. 1967. The structure of turbulent boundary layers[J]. J. Fluid Mech., 30 (4): 741–773, doi:10.1017/S0022112067001740.
- Kolmogorov A N. 1941. The local structure of turbulence in an incompressible fluid at very high Reynolds number [J]. Soviet Physics Uspekhi, 30 (4): 301–305.
- Kuettner J. 1959. The band structure of the atmosphere [J]. Tellus, 11 (3): 267–294, doi:10.1111/j.2153-3490.1959.tb00033.x.
- Kuettner J P. 1971. Cloud bands in the Earth's atmosphere: Observations and theory [J]. Tellus, 23 (4–5): 404–426, doi:10.1111/j.2153-3490.1971.tb00585.x.
- Lemone M A. 1973. The structure and dynamics of the horizontal roll vortices in the planetary boundary layer [J]. J. Atmos. Sci., 30 (6): 1077–1091, doi:10.1175/1520-0469(1973)030<1077:TSADOH>2.0.CO;2.
- Lemone M A. 1976a. Modulation of turbulence energy by longitudinal rolls in an unstable planetary boundary layer [J]. J. Atmos. Sci., 33 (7): 1308–1320, doi:10.1175/1520-0469(1976)033<1308:MOTEBL>2.0.CO;2.
- Lemone M A, Pennell W T. 1976b. The relationship of trade wind cumulus distribution to subcloud layer fluxes and structure[J]. Mon. Wea. Rev., 104 (5): 524–539, doi:10.1175/1520-0493(1976)104<0524:TROTWC>2.0.CO;2.
- Li Q L, Cheng X L, Zeng Q C. 2016. Gustiness and coherent structure under weak wind period in atmospheric boundary layer [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 9 (1): 52–59, doi:10.1080/16742834.2015.1086176.
- Liu X M, Cheng X L, Wu Q, et al. 2013. Some characteristics of the surface boundary layer of a strong cold air process over southern China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 30 (1): 210–218, doi:10.1007/s00376-012-1223-8.
- 马晓光, 胡非. 2004. 利用支撑向量机预报大气污染物浓度 [J]. 自然科学进展, 14 (3): 349–353. Ma Xiaoguang, Hu Fei. 2004. Prediction of air pollutant concentration using support vector machine [J]. Advances in Natural Science (in Chinese), 14 (3): 349–353, doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2004.03.018.
- Melfi S H, Spinhirne J D, Chou S H, et al. 1985. Lidar observations of vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean [J]. J. Appl. Meteor., 24 (8): 806–821, doi:10.1175/1520-0450(1985)024<0806:LOOVOC>2.0.CO;2.
- Miura Y. 1986. Aspect ratios of longitudinal rolls and convection cells observed during cold air outbreaks [J]. J. Atmos. Sci., 43 (1): 26–39, doi:10.1175/1520-0469(1986)043<0026:AROLRA>2.0.CO;2.
- Müller G, Brümmer B, Alpers W. 1999. Roll convection within an arctic cold-air outbreak: Interpretation of in situ aircraft measurements and spaceborne sar imagery by a three-dimensional atmospheric model [J]. Mon. Wea. Rev., 127 (3): 363–380, doi:10.1175/1520-0493(1999)127<0363:RCWAAC>2.0.CO;2.
- Paulsen B M, Schroeder J L. 2005. An examination of tropical and extratropical gust factors and the associated wind speed histograms[J]. J. Appl. Meteor., 44 (2): 270–280, doi:10.1175/JAM2199.1.
- 全利红, 胡非, 程雪玲. 2007. 大气边界层湍流标量场的概率分布及其特征分析 [J]. 气象学报, 65 (1): 105–112. Quan Lihong, Hu Fei, Cheng Xueling. 2007. Analyses of probability distribution and its statistical characters of turbulent scalars in atmospheric boundary layer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (1): 105–112, doi:10.11676/qxxb2007.010.
- Streten N A. 1975. Cloud cell size and pattern evolution in arctic air advection over the North Pacific[J]. Arch. Meteor. Geophys. Bioklimatol. Ser. A, 24 (3): 213–228, doi:10.1007/BF02245365.
- Weckwerth T M, Wilson J W, Wakimoto R M. 1996. Thermodynamic variability within the convective boundary layer due to horizontal convective rolls [J]. Mon. Wea. Rev., 124 (5): 769–784, doi:10.1175/1520-0493(1996)124<0769:TVWTCB>2.0.CO;2.
- World Meteorological Organization (WMO). 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [R]. Seventh edition, WMO-No. 8, 249–294.
- Yamada M, Ohkitani K. 1990. Orthonormal wavelet expansion and its application to turbulence [J]. Progress of Theoretical Physics, 83 (5): 819–823, doi:10.1143/PTP.83.819.
- Zeng Q C, Cheng X L, Hu F, et al. 2010. Gustiness and coherent structure of strong winds and their role in dust emission and entrainment[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (1): 1–13, doi:10.1007/s00376-009-8207-3.
- 曾庆存, 胡非, 程雪玲. 2007. 大气边界层阵风扬尘机理 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 251–255. Zeng Qingcun, Hu Fei, Cheng Xueling. 2007. The mechanism of dust entrainment by gustwind [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12(3): 251–255, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2007.03.05.
- 张兆顺. 2002. 湍流 [M]. 北京: 国防工业出版社, 329pp. Zhang Zhaoshun. 2002. Turbulence [M] (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 329pp.
- Zheng X J, Zhang J H, Wang G H, et al. 2013. Investigation on very large scale motions (VLSMs) and their influence in a dust storm [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 56 (2): 306–314, doi:10.1007/s11433-012-4985-1.