0577-6619/2012/70(6)-1188-99 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

2009 年“莫拉克”台风登陆过程阵风特征分析*

李永平 郑运霞 方平治
LI Yongping ZHENG Yunxia FANG Pingzhi

中国气象局上海台风研究所/台风预报技术重点开放实验室，上海，200030
Shanghai Typhoon Institute/Laboratory of Typhoon Forecast Technique/CMA, *Shanghai* 200030, *China*
2011-01-17 收稿，2012-01-27 改回.

Li Yongping, Zheng Yunxia, Fang Pingzhi. 2012. Analysis of the characteristics of gusts during the landing of Typhoon Morakot (2009). *Acta Meteorologica Sinica*, 70(6): 1188-1199

Abstract The dynamic nature of gust and turbulence is similar to each other, both containing seemingly random and complex motion with multi-scale interaction. However, there is a fundamental difference between these two. The gust scale both on time and space is far greater than that of turbulence, so generally the gust looks like a kind of weather phenomena. So far there have been some researches on turbulence for typhoon, but less on gust for typhoon which has yet to be explored. From 7 to 10 August 2009 an observational experiment with the mobile vehicle for Typhoon Morakot near the coast of Ningde City in Fujian Province was carried out by Shanghai Typhoon Institute. In this paper, the diagnostic analysis for gusts at the 10 m height is made based on the ultra-sound anemometer thermometer monitoring data with 0.1 s sampling frequency. The results show that the gust along the direction of mean wind flow with 3 – 7 min period is superimposed on the basic wind current, which has obvious coherent structures along the direction of mean air flow, i. e., there is descending (ascending) motion in the period of wind speed peak (wind speed valley). Different from the isotropic characteristics of turbulent kinetic energy, the kinetic perturbation energy of gust is anisotropy with larger value on the direction of mean air flow and smaller one on the lateral and vertical. And the change of wind direction of gust during stronger wind is small, while it shows big variations during weaker wind. The vertical momentum flux by gust on the direction of mean air flow near the ground spreads downward, while its overall contribution by gust on the lateral direction of mean air flow is close to zero. The vertical sensitive heat flux has also a very small value. The integral scales both on space and time are larger in the principal wind direction compared to smaller one along the lateral direction and vertical wind direction, which are much larger than the scales of turbulent. The gust disturbance shows some characteristics of iner-gravity wave as shown by dynamic analysis. The convergence and divergence movement is one of the main features of gust disturbances. The period of iner-gravity wave estimated by the GPS sounding data is consistent with the observed gust period.
Key words Typhoon, Gust, Coherent structure, Anisotropic, Iner-gravity wave

摘 要 利用上海台风研究所移动观测车获取的“莫拉克”台风登陆过程中超声风、温等观测资料对地面阵风特性进行了诊断分析。结果表明，在风速时间序列中叠加有周期为 3—7 min 的阵风扰动，显现出明显的相干结构，即沿顺风方向阵风风速峰期有下沉运动，谷期有上升运动；阵风扰动的各向异性特征明显，沿顺风方向的阵风扰动能量最大，其次是沿侧向和垂直方向的扰动能量；沿顺风方向的阵风垂直动量通量向下传播，而沿侧风方向阵风扰动动量垂直通量总体贡献接近于 0。阵风扰动沿顺风方向的积分空间尺度和时间尺度最大，沿侧风方向和垂直方向其次，均明显大于湍流的积分空间和时间尺度。此外，阵风扰动的其他特征还包括：感热垂直通量极小；当平均风速较大时阵风风向变化幅度较小，而风速较小时阵风风向变化幅度则较大；动力学分析表明，阵风扰动主要表现出重力内波的一些特性。

---

* 资助课题：国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目（2009CB421500）、国家自然科学基金项目（40921160381）。
作者简介：李永平，主要从事海气相互作用研究。E-mail：liyp@mail.typhoon.gov.cn

关键词 台风阵风,相干结构,各向异性,重力内波
中图法分类号 P435

1 引 言

阵风是指风速在短暂时间内,有突然出现忽大忽小变化的风,通常是指“瞬间极大风速”(大气科学名词审定委员会,2009)。根据不同的应用需要,阵风还有多种不同的定义和定量化表述,其间的主要区别是对阵风的时间尺度定义不同,长的有 1 至数分钟(世界气象组织,1992),短的为几秒(董双林,2001),有研究人员(曾庆存等,2007;程雪玲等,2007a,2007b)将前者称为阵风,后者称为湍流,并通过滤波和分形特征分析等方法将两者从多时间尺度的风时间序列中分离开,并认为阵风是指常与中小尺度天气系统对应、时间尺度为分钟量级的风的阵性现象,以区别于湍流现象,从动力学本质来看,阵风虽然与湍流有相似之处,都是在外界环境或边界不稳定激发下产生的、包含多尺度相互作用、貌似随机属性的复杂运动状态,但二者有一个根本区别,即阵风的尺度远大于湍流。因此,阵风是作为一种天气现象进行研究的。

作为天气现象的阵风常常伴随灾害性天气系统一起出现,在雷暴前和飑线等系统中通常有强阵风,其持续时间短,出现时瞬时风速突增,风向突变,气象要素随之剧烈变化,这与所谓的阵风锋以及其中有组织的小尺度涡旋有关(Katja, et al, 2005;Kevin,2006;李国翠等,2006)。中国从 20 世纪 80 年代开始,研究人员就利用北京 325 m 气象塔对冷锋过镜时的边界层阵风结构进行了系统的分析。曾庆存等(2007)指出,沙尘暴发生前后,阵风结构的水平传播与上升、下沉气流的关系密切,并造成局地起沙和扬沙的过程。程雪玲等(2007a)分析了中国北方春季大风起沙扬尘期间冷锋过后的阵风,指出阵风有 3—6 min 为主的周期,叠加在周期不很稳定的平均流(基流)上,基流的峰值时间间隔约为 1 至数小时一次,是更低频和更大振幅的阵风,阵风风速波峰期(即阵风时)伴随着下沉气流,波谷期(即阵风间歇时)伴随着上升气流,阵风与湍流相比,其结构和对动力能量的输送存在较大的差异。阵风特征分析通常需要采样频率为秒级的风速资料,常规的分钟级平均风速资料不能用于周期为 1 至数分钟的阵风分析。关于西风带锋面系统中形成阵风的主要物理成因,目前的研究结论主要归因于动量的垂直湍流输送和不同尺度垂直运动造成的辐合、辐散,在波动力学方面它显示出低频次声波和重力内波的一些特征(程雪玲等,2007a)。

观测表明,作为热带天气系统的台风,其边界层大气中同样存在一些与阵风时、空尺度相当的小尺度波动现象,如台风眼墙外普遍存在的波长为几千米、时间尺度为 10 min 左右的小尺度雨带或云带(Gall, et al, 1998);台风边界层中还普遍存在一种有组织的空间尺度为 1 至几千米的“滚云”云系,对应的是沿水平面方向有序排列的次级环流,并产生较大的扰动通量(Morrison, et al, 2005)。Romine 等(2006)曾对台风边界层中的小尺度波动力学进行过系统的总结,指出,虽然目前还不能用某一种波动理论完全解释清楚台风眼墙外的小尺度波动现象,但其主要呈现出重力波类的特征。

由于台风是热带天气系统,动力学性质与西风带中雷暴阵风锋和沙尘暴等天气系统的动力学性质有着很大区别,例如:后者近地面边界层大气通常为系统性的下沉气流,而台风边界层大气则以上升气流为主。因此,对于能否从台风边界层的风时间序列中分辨出所谓的阵风分量,以及它是否与锋面系统中阵风具有相近的结构是值得探讨的问题。此外,对于台风阵风的各向异性特征和能量输送等特征也不甚清楚,阵风的动力学特征也有待进一步探讨。本文通过对 2009 年“莫拉克”台风在登陆过程中单点地面特种观测资料的分析,围绕这些问题开展研究。

2 台风观测试验概述

2009 年 8 月上旬上海台风研究所移动观测车开往福建省北部的宁德市三沙镇对登陆台风“莫拉克”进行了强化观测,精确的观测位置在(26.66°N,119.55°E),观测地点紧邻海边,地势相对平坦。“莫拉克”台风 8 月 7 日 23 时 45 分(北京时,下同)登陆台湾花莲,登陆时最大风速 40 m/s,8 月 9 日 16 时 20 分登陆福建霞浦,近中心最大风速 33 m/s。观测车位于台风登陆点西南方向约 60 km 处(图 1)。

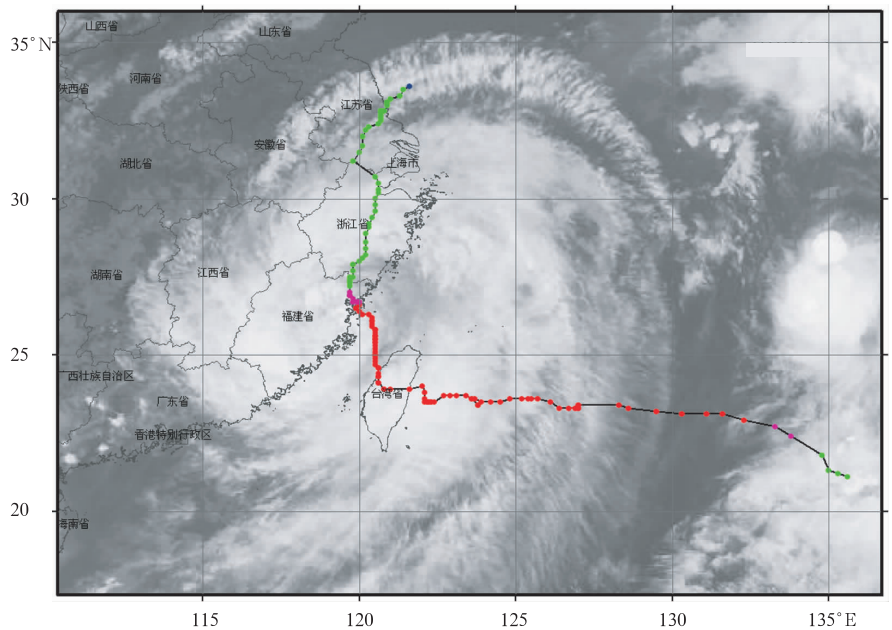

图 1 2009 年台风"莫拉克"移动路径和卫星云图
(8 月 9 日 16 时;红色三角形指示观测车位置)
Fig. 1 Best track positions for Typhoon Morakot (2009) and the satellite image at 16:00 BT 09 August (The red triangle indicates the position of the observational vehicle)

实施强化探测的时段为 2009 年 8 月 7—10 日,正好处于台风登陆前后。投入观测的车载设备有超声风温仪、风廓线仪、GPS 探空、微波辐射计和自动气象站等。其中超声风温仪由美国 Applied Technologies 公司生产,主要由 3 组相互垂直的超声波发射和接收器构成,当不同流速空气流经其间时,可对超声波的传播时间产生不同影响,基于此原理可以计算获取大气三维风速,进一步根据风速可以计算出声速,再由声速计算出虚温。因此,三维超声风温仪可以高频快速地测定三维风速和温度的脉动,具有很高的时间分辨率和测量精度,采样频率 10 Hz,风速测量精度 ± 0.03 m/s,风向精度 ± 0.1°,超声温度精度 ± 0.1℃,被广泛应用于边界层湍流和结构风工程的测量。该仪器在输出数据的同时,能自动给出判别码,以识别观测数据的有效性。仪器使用环境温度 −40—60 ℃,水平方向风速量程 ± 60 m/s,垂直方向量程 ± 15 m/s。本文对风温仪原始资料作了一定的质量控制,主要采用陈红岩等(2000)的方法剔除因电源不稳定及其他不明原因造成的可疑数据,然后采用线性插值方法进行补全。另外,本文也用到在同一地点施放的 GPS 探空资料。

图2是GPS探空仪探测到的莫拉克台风登陆

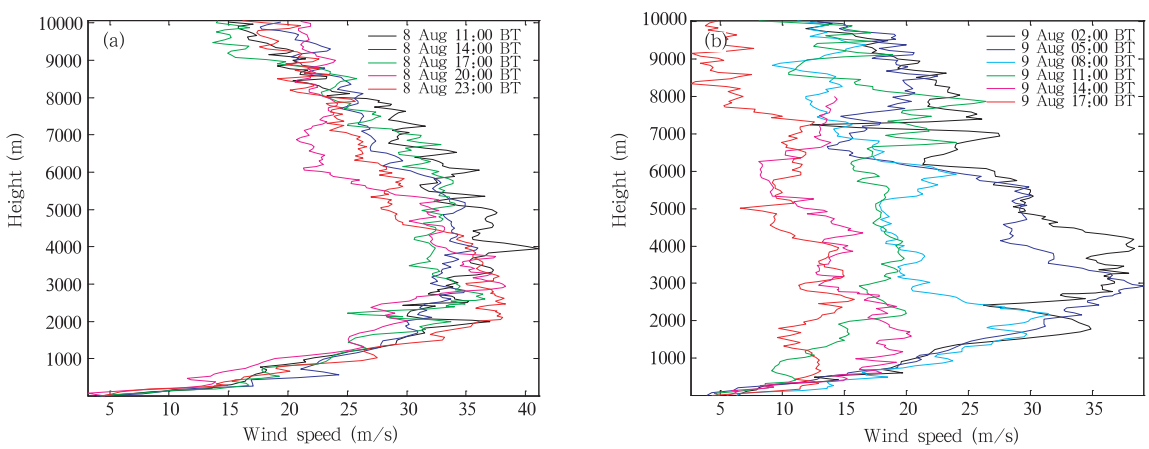

图 2 GPS 探空探测到的"莫拉克"台风登陆前后风随高度变化(a. 登陆前;b. 主体登陆后)
Fig. 2 Wind speed distribution with the height detected by the GPS sounding for Typhoon Morakot (a. before landing, and b. after landing)

前后风随高度变化。观测间隔时间为 3 h。

由图 2 可见,在台风主体登陆前(8 日 11—23 时),2500 m 以下的大气边界层内风速随高度迅速增大,35—40 m/s 的大风速出现在距地面 2500—3000 m 高度,且各时次的风速廓线形状稳定少变。当台风主体开始登陆后,各时次大气边界层内风速随高度分布特征发生较大的改变,主要表现在边界层风速随高度逐渐均匀化,且边界层内风速迅速减小。由此反映出地面摩擦对边界层大气上下层动量交换的加强和对风速的减弱作用。

图 3 是莫拉克台风登陆前后地面—400 m 高度的风廓线。

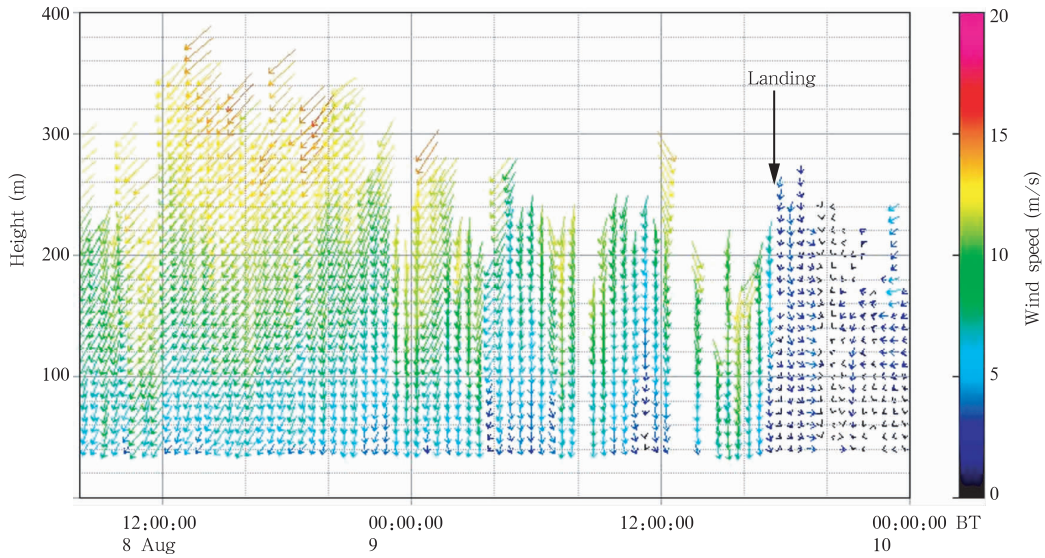

图 3 莫拉克台风登陆前后的近地面层风廓线(时间间隔 30 min)

Fig. 3 Wind profiling distribution of Typhoon Morakot before and after landing with 30 min time interval

台风登陆前后,观测地点的近地面风速大致经历了 3 个阶段,第 1 阶段在台风登陆前风速逐级增大(7 日 18 时—8 日 02 时),400 m 以下近地面边界层内风速较大,且 400 m 高度处风速比地面风大许多,风向东北,根据车载自动气象站的 2 min 平均海平面气压显示(原始数据的采样频率为 0.2 Hz),气压逐渐下降,气压由最初的990 hPa下降到 986 hPa(图 4)。第 2 阶段是台风临近登陆(8 日 02—22 时),风速维持较大,风向偏北,但 400 m 处风速与地面风速相差不大,气压继续下降。第 3 阶段是台风中心登陆后(8 日 23 时—10 日 05 时),近地面层风速明显减弱,垂直方向风速均匀,风向凌乱。气压从最低的 978 上升到 988 hPa。

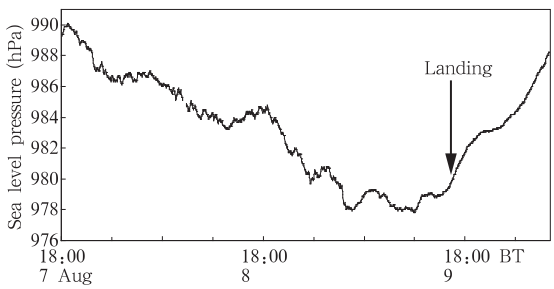

图 4 2009 年 8 月 7 日 18 时至 10 日 05 时 2 min 平均海平面气压

Fig. 4 Time series of the 2-min averaged sea level pressure from 18:00 BT 7 to 05:00 BT 10 August

3 阵风特征分析

超声风温仪实测三维风速 u、v 和 w 是在 x、y、z 三个坐标方向上的实数序列,观测时将仪器坐标旋转,使仪器所测 u 分量与主风向一致。所得坐标 x、y、z 轴分别对应主风 u、侧风 v 和垂直风 w。

3.1 阵风的检出

为了从采样频率为 10 Hz 的风速资料中分离出时间尺度为 1 至数分钟周期的阵风分量,首先将风速分量(u,v,w)分别做时间长度为 τ 的滑动平均,以滤去周期小于 τ 的扰动。

记 τ 时段各风分量的平均值为 $\overline{f}$,扰动值为 f',则有

$$f(t) = \overline{f}(t) + f'(t) \tag{1}$$

其中

$$\overline{f}(t) = \frac{1}{\tau}\int_{t-\tau/2}^{t+\tau/2} f(t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

根据文献(程雪玲等,2007a),通过对 $f(t)$ 做每分钟的滑动平均,得到 $\widetilde{f}(t)$,通常 $\widetilde{f}(t)-\overline{f}(t)$ 与由频谱展开法所得的阵风几乎完全重合。所以,本文也取 $\widetilde{f}(t)-\overline{f}(t)$ 作为阵风扰动 $f_g(t)$。

3.2 阵风的相干结构

根据图 3 台风平均风速大小演变的不同阶段,取几个有代表性时段的阵风扰动进行分析。其中 8 月 7 日 22—23 时代表早期风速较小时段,8 日 23 时 01 分—9 日 00 时、9 日 05 时 01 分—06 时、9 日 14 时 01 分—15 时和 9 日 17 时 01 分—18 时代表中期风速较大时段,10 日 06 时 01 分—07 时代表后期风速较小时段。图 5—10 给出这些时段水平顺风方向风速扰动分量和垂直速度扰动分量时间序列。

计算图 5—10 各时间序列的周期,表明阵风主周期主要集中在 3—7 min,阵风峰期或停歇一般持续 2—3 min。

图 5—10 显示各时段阵风都有明显的相干结构,即风速峰期有下沉气流,谷期(阵风间歇时)有上升气流。计算各时段顺风方向风速扰动与垂直速度扰动的相关系数分别为 −0.65、−0.69、−0.49、−0.63、−0.79 和 −0.69,两者存在明显的负相关。

台风阵风在分钟时间尺度上周期性变化和三维流场相干特征可能与台风边界层大气内某类波动有关。对此本文第 4 节还将作深入的分析。

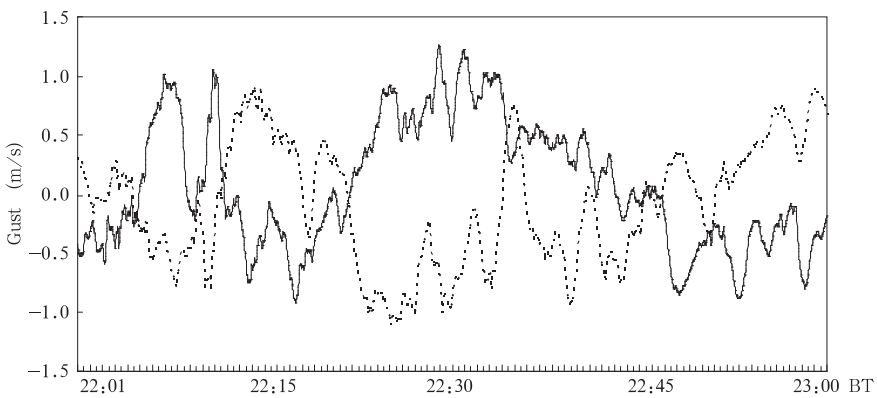

图 5 2009 年 8 月 7 日 22 时 01 分—23 时阵风扰动

(实线:水平风速,虚线:垂直速度)(下同)

Fig. 5 Gust disturbance from 22:01 to 23:00 BT 7 August

(Solid line is for horizontal speed and dotted line is for vertical one; the same below)

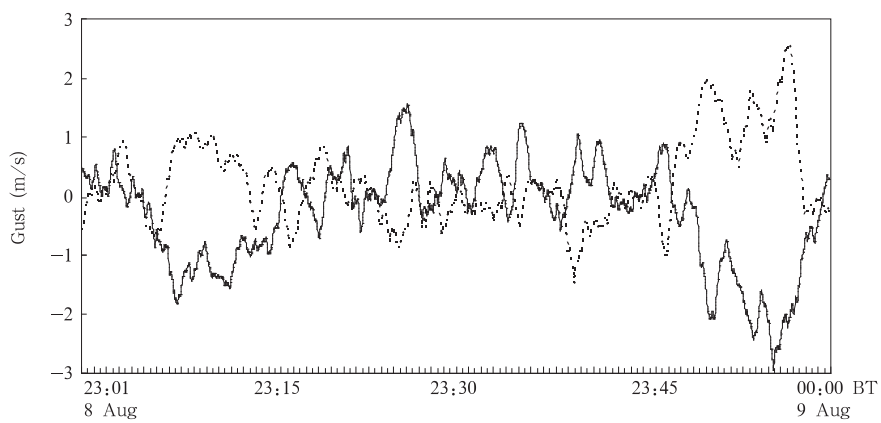

图 6 2009 年 8 月 8 日 23 时 01 分—9 日 00 时阵风扰动

Fig. 6 As Fig. 5 but for the period from 23:01 BT 8 August to 00:00 BT 9 August

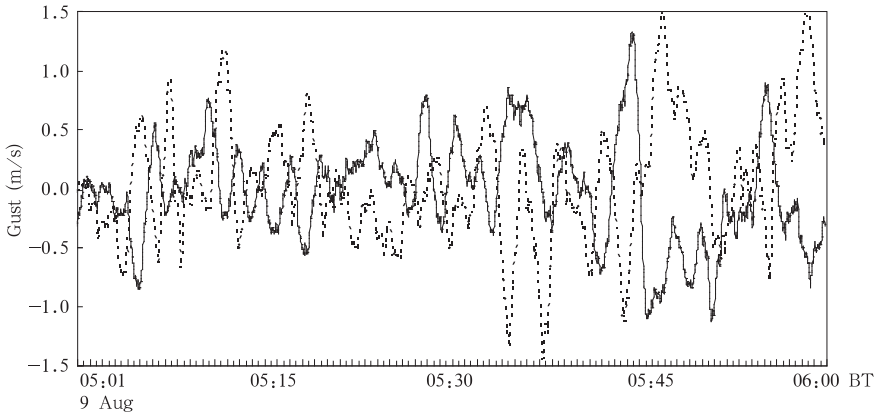

图 7 2009 年 8 月 9 日 05 时 01 分—06 时阵风扰动

Fig. 7 As Fig. 5 but for the period from 05:01 to 06:00 BT 9 August

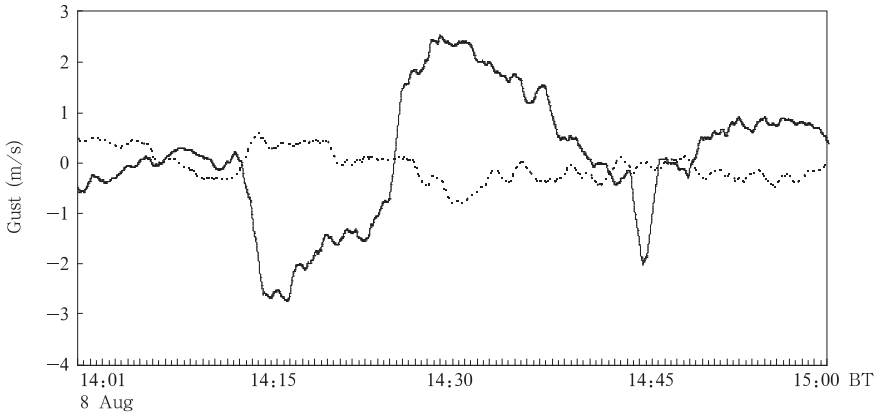

图 8 2009 年 8 月 9 日 14 时 01 分—15 时阵风扰动

Fig. 8 As Fig. 5 but for the period from 14:01 to 15:00 BT 9 August

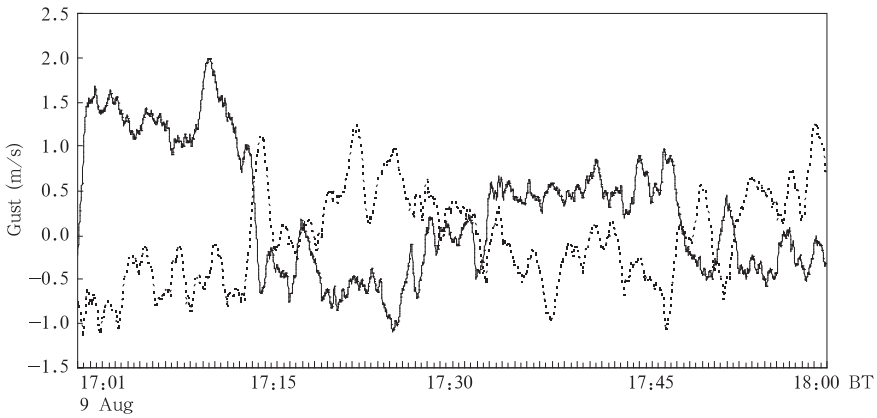

图 9 2009 年 8 月 9 日 17 时 01 分—18 时阵风扰动

Fig. 9 As Fig. 5 but for the period from 17:01 to 18:00 BT 9 August

3.3 阵风的风向变化

图 11 和 12 分别给出上述 6 个时段经过阵风时间序列的风向相对 15 min 平均风向的偏差。由图可见,阵风的风向变化频繁,风向变化幅度与平均风的大小有一定的关联,风速较小时其风向变化幅度较大,即风向多变,风速较大时阵风风向变化幅度则较小,即风向相对稳定。例如在风速较小的 7 日 22 时 01 分—23 时和 10 日 06 时 01 分—07 时风向摆动平均分别为 20°和 13°,而在风速较大的 8 日 23 时 01 分—9 日 00 时、9 日 05 时 01 分—06 时、9 日 14 时 01 分—15 时和 9 日 17 时 01 分—18 时,风向摆动平均分别为 6°、11°、6°和 5°。

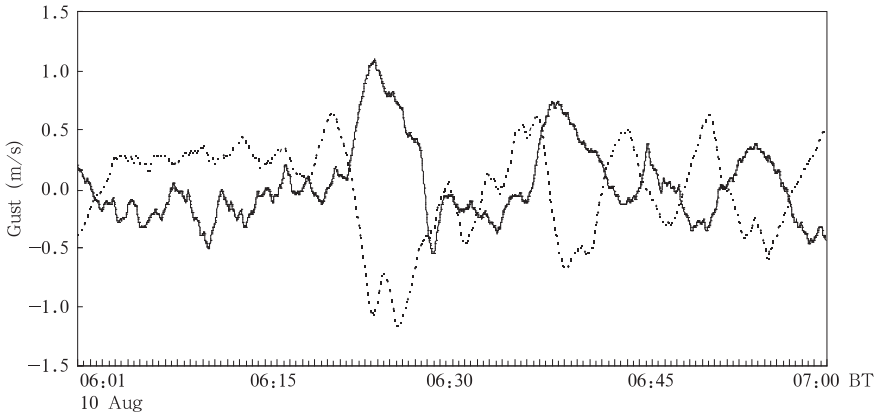

图 10 2009 年 8 月 10 日 06 时 01 分至 07 时阵风扰动

Fig. 10 As Fig. 5 but for the period from 06:01 to 07:00 BT 10 August

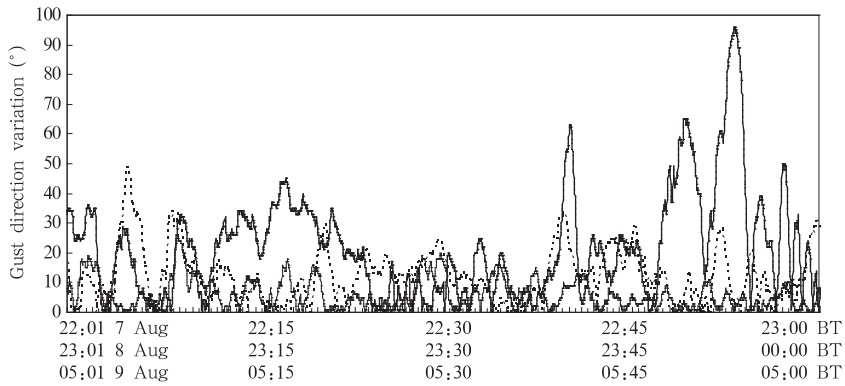

图 11 阵风风向与 15 min 平均风向的偏差

(粗实线:2009 年 8 月 7 日 22 时 01 分—23 时;

细实线:8 日 23 时 01 分至 9 日 00 时;点线:9 日 05 时 01 分至 06 时)

Fig. 11 Direction variation of gust for 22:01 BT to 23:00 BT 7 August (heavy solid line), 23:01 to 24:00 BT 8 August (solid line) and 05:01 BT to 06:00 BT 9 August (dot line) (unit: degree)

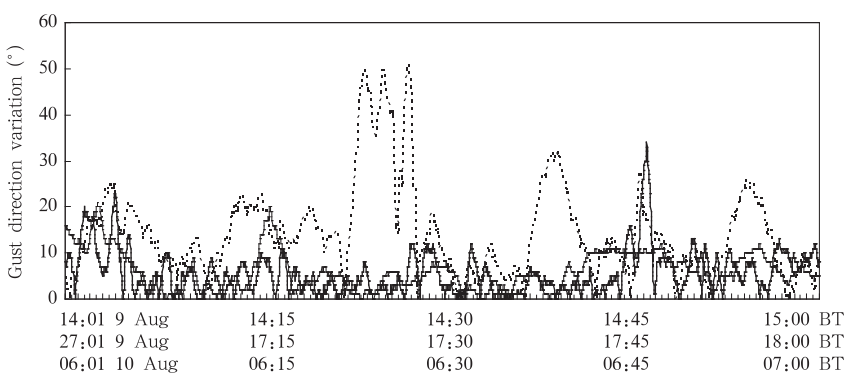

图 12 阵风风向与 15 min 平均风向的偏差

(粗实线:2009 年 8 月 9 日 14 时 01 分—15 时;

细实线:9 日 17 时 01 分至 18 时;点线:10 日 06 时 01 分至 07 时)

Fig. 12 As Fig. 11 but for 14:01 to 15:00 BT 9 August (heavy solid line), 17:01 to 18:00 BT 9 August (thin solid line), and 06:01 to 07:00 BT 10 August (dot line)

3.4 阵风能量

根据阵风空间 3 个方向上的扰动(u_g,v_g,w_g)分量,分别计算顺风方向、侧风方向和垂直方向的扰动动能,即 $e_{gu}=u_g^2$,$e_{gv}=v_g^2$ 和 $e_{gw}=w_g^2$,以及水平方向动能 $e_{gh}=u_g^2+v_g^2$。图 13 是 2009 年 8 月 7 日 18 时—10 日 08 时离地 10 m 高度上阵风 15 min 平均扰动动能。图 13a 为 e_{gu} 和 e_{gv} 时间序列,图 13b 为 e_{gh} 和 e_{gw} 时间序列。

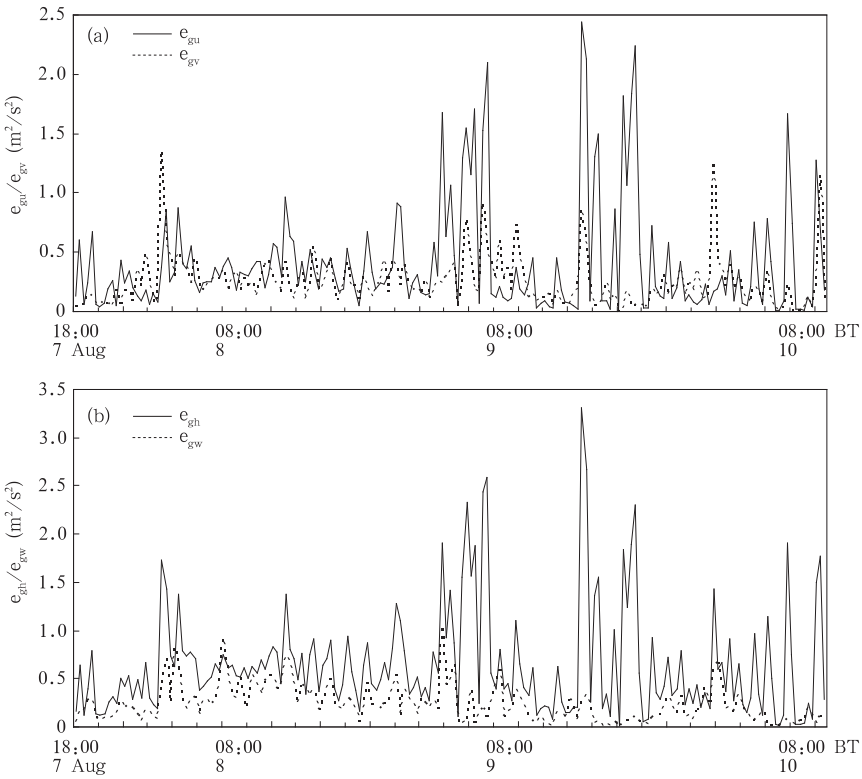

图 13 2009 年 8 月 7 日 18 时—10 日 08 时阵风能量变化

(a. 顺风方向(实线),侧风方向(虚线);b. 水平动能(实线),垂直动能(虚线))

Fig. 13 Time series of disturbance kinetic energy from 18:00 BT 7 to 08:00 BT 10 August 2009

((a) for the wind direction (solid line) and the side-wind one (dashed line) and (b) for the horizontal kinetic energy (solid line) and the vertical one (dashed line))

由图 13 阵风扰动动能三维空间统计特性看,阵风扰动动能不是各向同性的,阵风在沿顺风方向的扰动能量最大,侧向和垂直方向的扰动能量大小接近,水平方向扰动能量明显大于垂直方向的扰动能量。

3.5 阵风的动量和感热通量

近地面的垂直动量通量可以表示为

$$F_u=\rho_a\overline{uw},\ F_v=\rho_a\overline{vw} \tag{3}$$

式中,ρ_a 为空气密度,F_u、F_v 分别表示沿顺风方向和侧风方向的垂直动量通量。动量通量可以分解为基流、阵风和湍流 3 部分动量通量,这里只计算阵风动量通量,并表示为

$$F_u/\rho_a=\overline{u_g w_g},\ F_v/\rho_a=\overline{v_g w_g} \tag{4}$$

图 14 是 2009 年 8 月 7 日 18 时—10 日 08 时 10 m 高度上 15 min 平均的阵风动量通量。

图 14 表明,沿顺风方向的阵风垂直动量通量在绝大部分时刻都为负值,显然这与沿顺风方向阵风的相关结构特征有关,它表示动量通量是向下传播的。而侧风方向阵风扰动垂直通量呈正、负波动分布,在垂直方向输送的总体贡献接近于 0。

计算阵风扰动上传感热通量

$$F_H/\rho_a c_p=\overline{T'w_g} \tag{5}$$

图 15 是 8 月 7 日 18 时至 10 日 08 时阵风扰动的感热垂直通量时间序列。

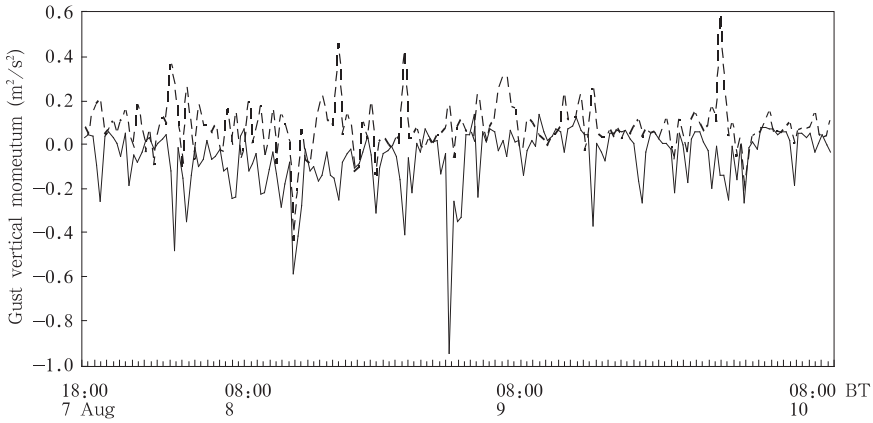

图 14 2009 年 8 月 7 日 18 时—10 日 08 时阵风动量通量

(实线:顺风方向,虚线:侧风方向)

Fig. 14 Time series of vertical momentum flux of gust from 18:00 BT 7 August 08:00 BT 10 August

(solid line: along the wind direction, and dotted line: along the side-wind direction)

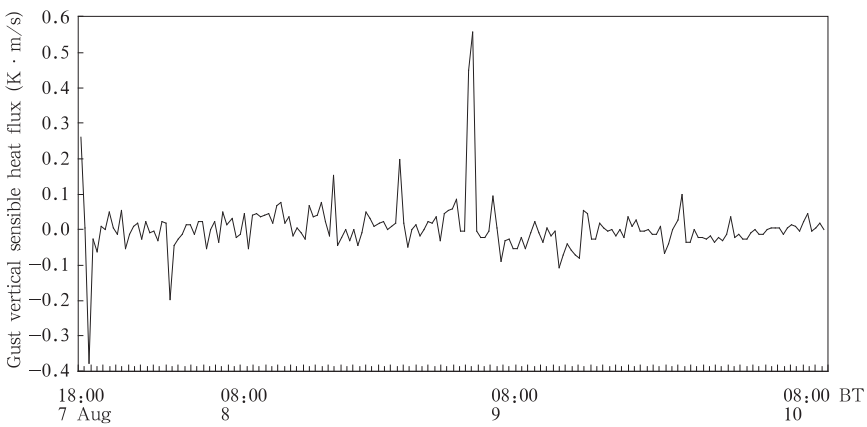

图 15 2009 年 8 月 7 日 18 时—10 日 08 时阵风扰动的感热垂直通量

Fig. 15 Time series of vertical sensible heat flux of gust from 18:00 BT 7 August to 08:00 BT 10 August

由图 15 可见,阵风扰动的感热通量随时间呈正、负相间分布,计算其平均值接近于 0,说明阵风扰动感热通量的整体效应极小。

3.6 阵风的时空尺度

为了估算阵风扰动传播在空间和时间上的尺度,这里采用类似于湍流积分尺度的概念(Flay,1984),分别定义阵风扰动的空间尺度和时间尺度如下:

$$L = V\int_0^{\infty} R_x(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{6}$$

$$T = \int_0^{\infty} R_x(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{7}$$

式中,V 为平均风速,$R_x(\tau)$为 30 s 平均的风速时间序列 $x(t)$自相关函数,定于为

$$R_x(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)]/s_x^2 \tag{8}$$

式中,s_x^2 为阵风风速时间序列的方差。

图 16 为逐时平均的阵风扰动沿顺风、侧风和垂直方向积分长度尺度的时间序列。由图 16 可见,阵风扰动沿顺风方向的空间尺度较大,极大值可达 6 km,而侧风方向和垂直方向积分长度尺度则较小,计算 3 个方向的平均积分长度尺度分别为 1211、798 和 476 m,而有关文献(宋丽莉等,2005)中,台风湍流在以上 3 个方向的最大平均空间尺度分别为 455、288 和 15 m,显然,前者比后者要大很多。此外,阵风扰动空间尺度随时间变化的幅度较大,这与平均风速和阵风脉动的方差随时间变化较大有关。

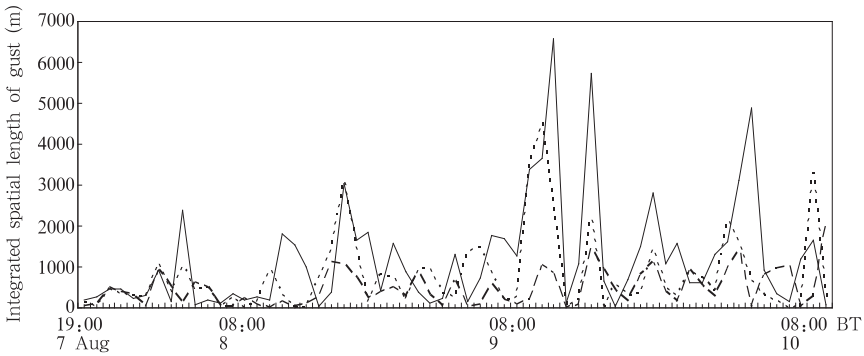

图 16 2009 年 8 月 7 日 19 时—10 日 08 时阵风空间积分尺度

(实线:顺风方向,虚线:侧风方向,断线:垂直方向)

Fig. 16 Time series of integrated spatial length of gust from 19:00 BT 7 August to 08:00 BT 10 August (solid line: along the wind direction, and dashed line: along the side-wind direction, and dotted line: along the vertical one)

图 17 为逐时平均的阵风扰动沿顺风方向、侧风方向和垂直方向积分时间尺度序列。与图 16 阵风扰动空间尺度相对应,阵风扰动沿顺风方向的时间尺度也最大,最长可达 65 min,其次为沿侧风方向和垂直方向的积分时间长度,计算它们的平均积分时间尺度分别为 13.5、8.2 和 6.0 min,而在有关文献(宋丽莉,2005)指出,湍流的 3 个方向的最大积分时间尺度分别为 36.2、23.0 和 2.8 s,显然前者比后者要长很多。同样,阵风扰动的积分时间尺度的变化幅度也较大,这与阵风脉动的方差随时间的变化较大有关。

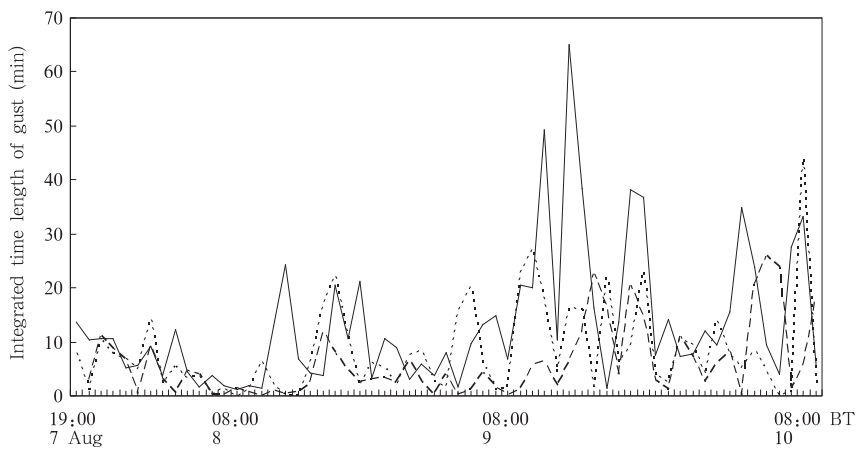

图 17 2009 年 8 月 7 日 19 时—10 日 08 时阵风扰动积分时间尺度

(实线:顺风方向,虚线:侧风方向,断线:垂直方向)

Fig. 17 Time series of integrated time length of gust from 19:00 BT 7 August to 08:00 BT 10 August (solid line: along the wind direction, dashed line: along the side-wind one, and, dotted line: along the vertical one)

4 阵风的波动力学分析

从阵风要素的周期变化特征和要素之间的位相关系,可知阵风扰动带有明显的大气波动特征。对此,依据取包辛内斯克近似的三维大气扰动方程组作简单的波动力学分析

$$\frac{\partial u'}{\partial t}+\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial p'}{\partial x}=0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial w'}{\partial t}+\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial p'}{\partial z}-\frac{\theta'}{\bar{\theta}}g=0 \tag{10}$$

$$\lambda\frac{\partial u'}{\partial x}+\frac{\partial w'}{\partial z}=0 \tag{11}$$

$$\frac{1}{\bar{\theta}}\frac{\partial \theta'}{\partial t}+\frac{N^2}{g}w'=0 \tag{12}$$

式中，u'、w'分别为沿顺风方向的水平风扰动和垂直风速扰动，p'为气压扰动，θ'为位温扰动，$N^2=g\mathrm{d}\ln\bar{\theta}/\mathrm{d}z$ 为浮力振荡频率。

经消元后得到关于 w'的方程

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\lambda\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)+\lambda N^2\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right]w'=0 \tag{13}$$

取 w'的波动形式解，其他变量类似。

$$w'=W\mathrm{e}^{\mathrm{i}(kx+mz-\omega t)} \tag{14}$$

将式(14)代入式(13)，得频率方程

$$\omega=\pm\frac{\lambda^{1/2}Nk}{(\lambda k^2+m^2)^{1/2}} \tag{15}$$

式中，$N\geqslant 0$。若取 $\lambda=0$，则 $\omega=0$，表明水平无辐散则没有重力内波。也说明重力内波对应有大气辐合、辐散运动。若 $N=0$，或 $N<0$ 时，即中性层结或不稳定层结大气也无重力内波。

把变量波动形式解代入式(11)，可知 u'与 w'相差 π 位相，即两者是反位相关系，由此可以解释 3.2 节中图 5 中 u'与 w'总是表现出负相关的相干特征。根据式(15)可求得重力内波群速度 c_g，它在垂直方向是向下的。因此，地面阵风的扰动能量可能来自较高层边界层大气中的波动能量的下传。

图 18 是 8 日 23 时、9 日 05、14 和 17 时 4 个时刻在观测点由 GPS 探空资料计算获得的位温随高度的分布，资料的垂直分辨率为 4—12 m 不等。可见这 4 个时刻距地面 1000 m 以下的低层大气位温 θ 基本上都是随高度增加的，表明对于未饱和大气而言层结是稳定的，这与 Romine 等(2006)关于台风环流内底层大气位温的垂直分布特征一致。

根据图 18 位温随高度的分布数据，由频率方程(15)可以计算得到重力内波的周期 T，结果表明，图 18 各时刻垂直方向 1—3 波和水平方向 1—3 波的周期在 4—12 min，它们比较接近于图 5—10 中的 3—7 min 的阵风周期。

因此，地面阵风的一些观测事实可以用重力内波的动力学属性给予解释。

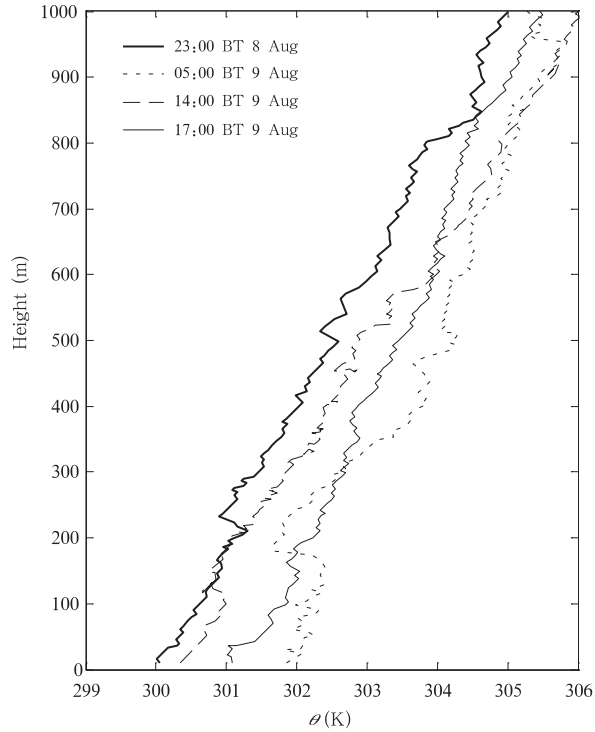

图 18 8 日 23 时、9 日 05、14 和 17 时 4 个时次位温随高度的变化

Fig. 18 Vertical profiles of the potential temperature at 23:00 BT 8, 05:00 BT 9, 14:00 BT 9 and 17:00 BT 9 August

5 结 论

利用上海台风研究所移动观测车超声风温仪测得的“莫拉克”台风登陆过程中的风温数据、以及风廓线仪和 GPS 探空等资料对地面阵风的特性进行了诊断分析，并结合简单的动力学分析，得出的主要结论有：

(1)台风登陆过程中的地面阵风显现出与西北带锋面系统中阵风相近的特征，它们主要呈 3—7 min 周期性变化，且存在明显的相干结构，沿顺风方向阵风水平风速扰动与垂直速度扰动呈负相关，表明阵风峰期有下沉运动，谷期有上升运动。

(2)台风阵风各向异性特征明显，沿顺风方向的扰动动能最大，其次是沿侧向和垂直方向；沿顺风方向的阵风动量垂直通量一致向下传播，而沿侧风方向阵风扰动动量垂直通量总体贡献接近于 0；阵风扰动的感热垂直通量极小；阵风扰动沿顺风方向的积分空间尺度和时间尺度较大，沿侧风方向和垂直方向较小，他们比湍流的积分空间尺度和时间尺度

大几倍。另外,平均风速较大时阵风风向变化幅度较小,平均风速较小时阵风风向变化幅度则较大。

(3)阵风扰动主要表现出重力内波的一些特性,辐合、辐散运动是阵风扰动主要特征之一,其扰动动能可能来自较高层边界层大气中重力内波能量的下传。根据 GPS 探空资料估算的理想化的重力内波周期与观测的阵风周期基本符合。

参考文献

陈红岩,胡非,曾庆存. 2000. 处理时间序列提高计算湍流通量的精度. 气候与环境研究,5(3):304-311

程雪玲,曾庆存,胡非等. 2007a. 大气边界层强风的阵性和相干结构. 气候与环境研究,12(3):227-243

程雪玲,全利红,胡非等. 2007b. 阵风的分形与混沌特征研究. 气候与环境研究,12(3):256-266

大气科学名词审定委员会. 2009. 大气科学名词. 北京:科学出版社,11

董双林. 2001. 中国的阵风极值及其统计研究. 气象学报,59(3):327-333

李国翠,郭卫红,王丽荣等. 2006. 阵风锋在短时大风预报中的应用. 气象,32(8):36-41

世界气象组织. 1992. 气象仪器和观测方法指南. 北京:气象出版社,131pp

宋丽莉,毛慧琴,黄浩辉等. 2005. 登陆台风近地层湍流特征观测分析. 气象学报,63(6):915-921

曾庆存,程雪玲,胡非. 2007. 大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理. 气候与环境研究,12(3):244-250

Flay R G J, Stevenson D C. 1984. Integral length scales in strong winds below 20 m. J Wind Engineer Indust Aerodynami, 28(1-3): 21-30

Gall R, Tuttle J, Hildebrand P. 1998. Small-scale spiral bands observed in hurricanes Andrew, Hugo, and Erin. Mon Wea Rev, 126(7): 1749-1766

Katja F, Kingsmill D E, Young C R. 2005. Misocyclone characteristics along Florida gust fronts during CAPE. Mon Wea Rev, 133(11): 3345-3367

Kevin K. 2006. Observational analysis of a gust front to bore to solitary wave transition within an evolving nocturnal boundary layer. J Atmos Sci, 63(8): 2016-2035

Morrison I, Businger S, Marks F, et al. 2005. An observational case for the prevalence of roll vortices in the hurricane boundary layer. J Atmos Sci, 62(8): 2662-2673

Romine G S, Wilhelmson R B. 2006. Finescale spiral band features within a numerical simulation of hurricane Opal (1995). Mon Wea Rev, 134(4): 1121-1139