

方平治, 赵兵科, 鲁小琴, 等. 2013. 华东沿海地带台风风廓线特征的观测个例分析 [J]. 大气科学, 37 (5): 1091–1098, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12104. Fang Pingzhi, Zhao Bingke, Lu Xiaoqin, et al. 2013. Case studies on the characteristics of the coastal wind profiles of three typhoons landing along East China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1091–1098.

华东沿海地带台风风廓线特征的观测个例分析

方平治¹ 赵兵科¹ 鲁小琴¹ 梁旭东² 汤杰¹

¹ 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

² 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘 要 利用 2007 年的“韦帕”、2009 年的“莫拉克”、2010 年的“凡亚比”和 2011 年的“梅花”四个台风的 GPS 探空数据, 本文对华东近海和沿海地带的台风风廓线特征进行分析。首先求出梯度风速及其对应的高度, 在此基础上利用指数律和对数律对风廓线进行拟合, 并对幂指数、10 米高度的地表风速和梯度风速的风速比, 以及由对数律定义的常通量层高度等参数进行计算, 并对梯度风高度和常通量层高度进行比较。结果表明: 登陆台风沿海地带风廓线的梯度风高度和常通量层高度有明显差异。本文还对登陆台风平均风廓线的各参数进行了计算, 并对梯度风高度以下风廓线偏离对数律的原因进行了讨论。

关键词 梯度风高度 常通量层高度 对数律 指数律

文章编号 1006-9895(2013)05-1091-08

中图分类号 P425

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12104

Case Studies on the Characteristics of the Coastal Wind Profiles of Three Typhoons Landing along East China

FANG Pingzhi¹, ZHAO Bingke¹, LU Xiaoqin¹, LIANG Xudong², and TANG Jie¹

¹ Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030

² Institute of Urban Meteorology of China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstracts Characteristics of wind profiles were studied using the Global Positioning System (GPS) sonde data from typhoons Wipha in 2007, Morakot in 2009, Fanapi in 2010, and Muifa in 2011. The gradient wind speed and corresponding level were first obtained. The wind profiles were then fitted by the power law and the logarithmic law. The exponential index, the ratio between the wind speed at 10 m and the gradient wind speed, and the height of the constant flux layer defined by the logarithmic law were further calculated. The possible difference between the gradient wind level and the height of the constant flux layer was investigated. The results show an obvious difference between the height of the constant flux layer and the gradient wind level for the typhoons landing along East China. Moreover, the parameters of the mean wind profiles from the typhoons were calculated, and the reason for the deviation of the wind profile below the gradient wind level from the logarithmic law was discussed.

Keywords Gradient wind level, Height of the constant flux layer, Logarithmic law, Power law

1 引言

台风灾害模型逐渐成为对台风风险进行评估

的常用手段, 其应用范围包括台风影响区域内建筑结构的风荷载和风荷载规范的基本风速估计、海岸地区风暴潮潮位和海浪高度的预测, 以及保险业的

收稿日期 2012-07-03, 2013-03-08 收修定稿

基金资助 国家重点基础研究发展计划 2009CB421501, 国家自然科学基金项目 90815028、40905029, 上海台风研究基金

作者简介 方平治, 男, 1974年出生, 博士, 副研究员, 主要从事台风边界层观测和计算风工程方面的研究, E-mail: freedomfpz@163.com

台风风灾评估等 (Vickery et al., 2009a)。台风风场模型是台风灾害模型的重要组成部分,而台风边界层模型将台风风场模型中的梯度风速和 10 米高度的地表风速(包括陆地和洋面)在统计意义上建立联系 (Holland, 1980; Vickery et al., 2000; McConochie et al., 2004; Levinson et al., 2010)。地表风速和梯度风速的比值受到大气稳定性、下垫面粗糙度,以及距离台风中心位置的影响;另外,对梯度风高度的认识也是一个逐步深入的过程。在早期阶段,通常认为洋面上梯度风高度在 1500~3000 米之间 (Powell et al., 1996; Willoughby and Rahn, 2004),代表性的研究结果给出地表风速和梯度风速的比值在最大风圈附近为 0.825,在台风外围为 0.75;在近海及海岸线上,上述风速比值保持不变 (Georgiou, 1985; Vickery and Twisdale, 1995)。在下投式探空仪出现之后,观测结果表明洋面上梯度风高度在 500~2000 米之间 (Powell et al., 1996; Willoughby and Rahn, 2004),代表性的研究结果给出地表风速和梯度风速的比值为 0.73 (Powell et al., 2005) 和 0.71 (Vickery et al., 2009b);在近海及海岸线上,风速比值逐渐减小,前者减小的幅度为 15%~20%,而后者减小的幅度为 18%~20%。

通过对 1997~2003 年期间大西洋、墨西哥湾和西太平洋上的飓风进行观测, Vickery et al. (2009b) 对飓风的平均风廓线进行了研究。首先根据下投式探空仪的释放地点,将风廓线分为最大风圈及其附近的风廓线以及远离最大风圈的风廓线;然后根据最大风圈半径的大小,以及 500 米以下风廓线的风速平均值将风廓线进一步分类;最后将同类风廓线求和平均得到平均风廓线。结果表明:平均风廓线的梯度风(即最大风)高度一般在 1000 米以下(在 300~1000 米之间,由文献中表 6 和表 7 的 $H^*/1.12$ 得到);梯度风高度随风速平均值的增大而降低,随最大风圈半径的增加而增加;梯度风高度以下的平均风廓线满足对数律。由 1997~1999 年期间大西洋、东太平洋和中太平洋上成熟飓风最大风圈及其附近的风廓线,采用相同的方法, Powell et al (2003) 的研究结果表明:平均风廓线的梯度风高度可达 500 米。美国东部海岸沿海地带以开阔场地为主,特征粗糙长度在 10^{-2} 米量级 (0.03 米),和飓风条件下近海的特征粗糙长度基本相当,因此,对于沿美国东部海岸登陆的飓风,通常假定梯度风速保持不变,仅梯度风高度上升

20%~30%左右 (Vickery et al., 2009b)。

我国华东沿海地形和美国东部海岸地形不同,特别是福建省和浙江省交界处,以丘陵山地为主。复杂地形导致其特征粗糙长度不同于开阔场地对应的特征粗糙长度,从而影响登陆台风的风廓线;另外,台湾岛对华东登陆台风的影响也不可忽略。因此,对于受到台湾岛影响并登陆我国华东沿海的台风,在台风登陆前后,由于粗糙度以及内部环流等边界条件和动力机制的变化,地表风速和梯度风速的比值、梯度风高度,以及梯度风高度以下的风廓线是否满足对数律等登陆台风沿海地带风廓线的基本特征可能和洋面上成熟台风、近海台风,以及沿美国东部海岸登陆的飓风等风廓线特征存在差异。利用上海台风研究所移动观测系统获得的“韦帕”、“莫拉克”、“凡亚比”和“梅花”四个台风的 GPS 探空数据,本文对华东近海和沿海地带的台风风廓线特征进行初步分析。首先求出梯度风速及其对应的高度,在此基础上利用指数律和对数律对风廓线进行拟合,并对幂指数、10 米高度的地表风速和梯度风速的风速比,以及由对数律定义的常通量层高度等参数进行计算,并对梯度风高度和常通量层高度进行比较。本文还通过平均风廓线对上述各参数进行计算,对梯度风高度以下风廓线的变化规律和可能原因进行了讨论。

2 风廓线的描述方法

土木工程中常用指数律对风廓线进行描述。指数律是经验模型,幂指数是其重要的参数,由来流方向的地形因素决定。对于一条典型的风廓线,取风廓线中的最大风速为梯度风速,其对应的高度为梯度风高度,指数律可定义为:

$$U/U_g = (z/H_g)^\alpha, \quad (1)$$

式中: U 表示 z 高度处的流向平均风速, α 为风廓线的幂指数, U_g 和 H_g 分别为梯度风速和梯度风高度。风廓线还可以用对数律来描述。对数律是理论模型,适宜于距离地面较小的范围。对数律可定义为:

$$U = u_* \times \ln(z/z_0)/\kappa, \quad (2)$$

式中: u_* 表示摩擦风速, $\kappa = 0.40$ 为 von Karman 常数, z_0 为粗糙长度。理论上,上述对数律适用于中性大气边界层。台风条件下,特别是洋面上,由于风速较大,机械混合作用较强,最大风高度以下的风廓线可以用对数律进行描述,从而最大风高

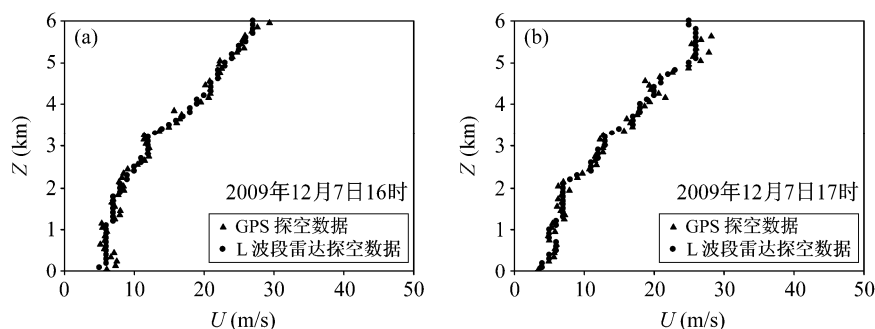


图 1 L 波段雷达探空数据和 GPS 探空数据给出的风廓线对比：(a) 16 时；(b) 17 时

Fig. 1 Comparisons between the wind profiles from the L-band radar data and the GPS sonde data at (a) 1600 BT (Beijing time) and (b) 1700 BT 7 Dec 2009

度、梯度风高度和由对数律定义的常通量层高度一致 (Kepert, 2001; Powell et al., 2003; Vickery et al., 2009b); 因此, 洋面上采用上述任意参数定义的边界层高度基本一致。

3 GPS 探空数据概述

本文的 GPS 探空数据来源于 Win-9000 气象处理系统, 该系统为上海台风研究所移动观测系统的一部分。Win-9000 气象处理系统由美国 Sippican 公司提供, 采用 Mark II GPS 微型探空仪, 可以获得风速和风向、温度、气压以及湿度等基本气象数据沿高度的变化, 采样频率为 1 赫兹。为了考察 GPS 探空数据的可靠性, 将由 GPS 探空数据得到的风廓线和 L 波段 (I 型) 雷达探空数据得到的风廓线进行比较。L 波段 (I 型) 雷达高空气象探测系统在中国气象局的高空气象探测业务中广泛使用, 采用国产 GTS-I 型数字式探空仪, 采样频率为 1/60 赫兹。2009 年 12 月 7 日 16 时 (北京时间, 下同) 和 17 时, 上海台风研究所在上海市气象局宝山气象站进行了由两种系统获得的探空数据而得到的风廓线的对比试验, 如图 1 所示。由图可见: 由两组探空数据给出的风廓线基本一致, 相关系数均达到 0.996 以上。另外, 在相同时刻给出的观测数据的差异不超过 10%。探空气球的“漂移”问题在探空数据应用中需要特别注意, 和时间尺度和大气稳定度紧密联系。根据 Vickery et al. (2009b) 和 Powell et al. (2003) 的研究, 由探空仪得到的风廓线对应的时间尺度在 10 分钟至 1 小时之间。

4 台风风廓线资料概述

本文选择“韦帕”、“莫拉克”、“凡亚比”和“梅花”四个台风的风廓线资料进行分析。观测位

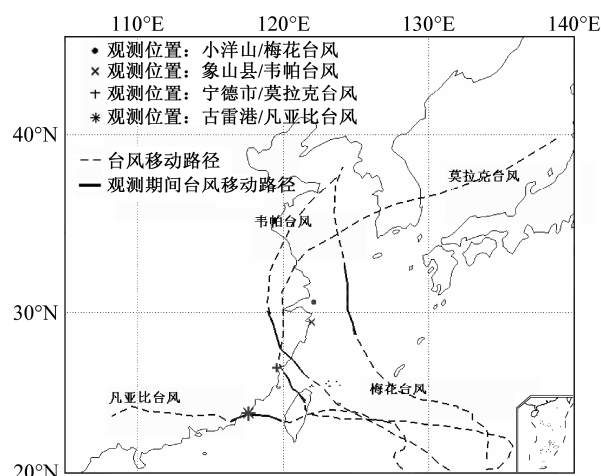


图 2 观测位置、台风移动路径以及观测期间台风移动路径示意图

Fig. 2 Observation sites, tracks of the typhoons (dashed lines), and the corresponding tracks of the typhoons during the observations (solid lines)

置分别位于浙江省象山县 (29.429°N, 121.959°E, 海拔高度 5 米)、福建省宁德市 (26.663°N, 119.550°E, 海拔高度 10 米)、福建省古雷港 (23.771°N, 117.586°E, 海拔高度 21 米), 以及浙江省小洋山 (30.607°N, 122.094°E, 海拔高度 4 米)。台风基本信息如表 1 所示。由表可见: “韦帕”台风的登陆最大风速, 以及“莫拉克”和“凡亚比”台风首次登陆的最大风速接近。观测位置、台风移动路径, 以及观测期间台风移动路径如图 2 所示。由图可见: “梅花”台风近海北上, “韦帕”、“莫拉克”和“凡亚比”三台风登陆; “韦帕”台风首次在浙江苍南登陆, “莫拉克”和“凡亚比”两台风首次均在台湾花莲登陆; “莫拉克”台风二次在福建霞浦登陆, “凡亚比”台风二次在福建漳浦 (古雷港) 登陆。另外, “莫拉克”和“凡亚比”两台风的观测位置均靠近台风登陆点。探空气球释放的时刻、观测地点到该时刻台风中心的距离, 以

及该时刻台风的最大风圈半径（数据源于 JTWC）等台风风廓线的基本信息见表 2。

5 台风风廓线特征的观测事实分析

5.1 数据处理的基本方法

首先，为避免周围杂物等的影响，以及气球释放初期阶段信号的不稳定，风廓线中 20 米以下的数据不予考虑；其次，沿高度方向，由下至上，将每条风廓线数据分成三段，即 20~500 米、500~1000 米，以及 1000 米以上，对应每段数据，将每 20 米、50 米，以及 100 米内所包含数据点的风速、风向及其对应的高度进行平均，得到新的风速、风向和高度，由此形成新的风廓线，在此基础上进行风廓线特征分析。本文中 GPS 探空数据的采样频率为 1 赫兹，在实际观测中，探空气球的上升速率在 300~400 米/分钟，即每 20 米大约包括 3~4 个数据点。上述过程能够消除或降低由技术原因导致的数据波动，可以得到较为平滑的风廓线。针对新的风廓线，首先求出梯度风速 U_g 和梯度风高度 H_g ，

在此基础上采用指数律和对数律对风廓线进行拟合，并对幂指数 α 、地表风速和梯度风速的风速比 R_{vel} ，由对数律定义的常通量层高度 H_c ，以及梯度风高度和常通量层高度的比值 R_{hei} 进行计算。在计算风速比时，10 米高度的地表风速由指数律得到。

理论上，风廓线最下部的两个数据点可以完全确定对数律。由于观测过程包含很多不确定性以及技术原因，由此得到的对数律不一定很好描述风廓线底部风速的变化规律；因此，针对每条风廓线，有必要利用更多的数据点采用拟合方法求对数律，并引入相关系数来控制拟合精度。随着数据点的增多，对应的相关系数逐渐减小，同时，对数律的适用范围越大。本文的目标相关系数 R 为 0.995，即拟合结果必须满足对数律和观测数据的相关系数大于或等于 0.995。需额外说明的是：当拟合结果出现相关系数为 1.0，对应的常通量层高度低于 60 米时，说明拟合结果仅用到风廓线最下部的两个数据点，此时，风廓线可能不满足对数律，相应地，与对数律相关的常通量层高度也没有意义，相关的

表 1 台风基本信息（中国气象局，2006~2011 年）

Table 1 Fundamental data of the studied typhoons (China Meteorological Administration, 2006–2011)

台风名称	中央台编号	起讫日期	登陆地点	登陆时间	登陆最大风速 [#] (m/s)
梅花 (Muifa)	1109	7 月 28 日~8 月 8 日	朝鲜	8 月 8 日 18 时	23
韦帕 (Wipha)	0713	9 月 16~19 日	浙江苍南	9 月 19 日 02 时	45
莫拉克 (Morakot)	0908	8 月 4~10 日	台湾花莲	8 月 7 日 24 时	40
			福建霞浦	8 月 9 日 17 时	33
凡亚比 (Fanapi)	1011	9 月 15~20 日	台湾花莲	9 月 19 日 09 时	45
			福建漳浦	9 月 20 日 07 时	35

[#]：最大风速为距离地面 10 米，平均时距为 2 分钟的风速。

表 2 台风风廓线基本信息

Table 2 Fundamental data of the wind profiles for the typhoons

“梅花”台风			“韦帕”台风		“莫拉克”台风		“凡亚比”台风	
序号	时刻	距离/半径 (km)	时刻	距离/半径 (km)	时刻	距离/半径 (km)	时刻	距离/半径 (km)
1	6 日 15 时 37 分	355.5/46.30	18 日 21 时 33 分	347.6/18.75	8 日 05 时 51 分	318.7/65.63	19 日 19 时 13 分	241.6/27.78
2	6 日 17 时 02 分	331.2/46.30	18 日 23 时 25 分	327.0/28.13	8 日 11 时 16 分	259.6/65.63	19 日 22 时 16 分	199.4/27.78
3	6 日 20 时 20 分	299.0/46.30	19 日 03 时 50 分	287.0/28.13	8 日 14 时 00 分	226.4/84.38	20 日 01 时 17 分	155.3/27.78
4	6 日 22 时 50 分	261.7/46.30	19 日 10 时 41 分	253.3/28.13	8 日 16 时 58 分	205.2/84.38	20 日 04 时 18 分	104.1/27.78
5	7 日 01 时 46 分	226.2/46.30	19 日 12 时 37 分	253.6/28.13	8 日 19 时 45 分	184.3/84.38	20 日 07 时 08 分	22.01/37.04
6	7 日 04 时 47 分	223.1/46.30	19 日 15 时 53 分	276.9/56.25	8 日 22 时 49 分	167.8/84.38	20 日 10 时 27 分	66.87/37.04
7	7 日 08 时 15 分	256.5/55.56	19 日 17 时 57 分	304.5/56.25	9 日 01 时 45 分	151.3/84.38	20 日 13 时 09 分	131.8/37.04
8	7 日 10 时 36 分	320.9/55.56			9 日 05 时 16 分	134.6/84.38		
9					9 日 07 时 44 分	119.7/84.38		
10					9 日 10 时 34 分	105.1/84.38		
11					9 日 13 时 39 分	67.82/112.5		
12					9 日 16 时 36 分	45.22/93.75		

数据分析将剔除这些数据。

5.2 观测事实分析

各台风相同参数的比较如图 3 所示。图中横坐标表示台风风廓线的序号, 对应的风廓线可根据表 2 的序号确定。

图 3a 是台风各风廓线中梯度风速的比较。由图可见: (1) 由于“莫拉克”和“凡亚比”两台风的观测位置位于台风登陆点附近, 在台风靠近时, 梯度风速较低 (低于 20 米/秒); (2) “凡亚比”台风的梯度风速相对较低, 而其他三个台风梯度风速较高而且接近。梯度风速的大小基本反映了台风强度。

图 3b 是台风各风廓线中与梯度风速对应的梯度风高度的比较。总体而言, “梅花”台风的梯度风高度明显低于其他三个登陆台风。“梅花”台风梯度风高度的平均值为 1.579 公里, “韦帕”、“莫拉克”和“凡亚比”三个台风的平均值分别为 4.121 公里、2.862 公里和 3.171 公里。对于“梅花”

台风, 其移动路径表现为近海北上, 从观测位置获得的梯度风高度也很少受到陆地过程的影响, 因此, 梯度风高度可以认为接近深海台风的特征; 而其他三个台风的风廓线均受到包括台湾岛在内的陆地过程的影响, 从而梯度风高度较大。

图 3c 是台风各风廓线中由梯度风速及其对应的梯度风高度通过最小二乘法拟合得到的幂指数的比较。对于登陆台风, 观测位置位于沿海地带, 风廓线不仅受到台湾岛以及台湾海峡海域的影响, 也可能受到观测位置所处的局部地形的影响, 并在幂指数上有所反映。对于“莫拉克”台风, 其登陆地点的局部地形在华东沿海最为复杂。由图可见: 登陆台风的幂指数明显大于近海台风; “莫拉克”台风的幂指数大于“韦帕”和“凡亚比”两台风。“梅花”台风幂指数的平均值为 0.189, “韦帕”、“莫拉克”和“凡亚比”三个台风的平均值分别为 0.348、0.450 和 0.274。

图 3d 是台风各风廓线中由指数律风廓线得到

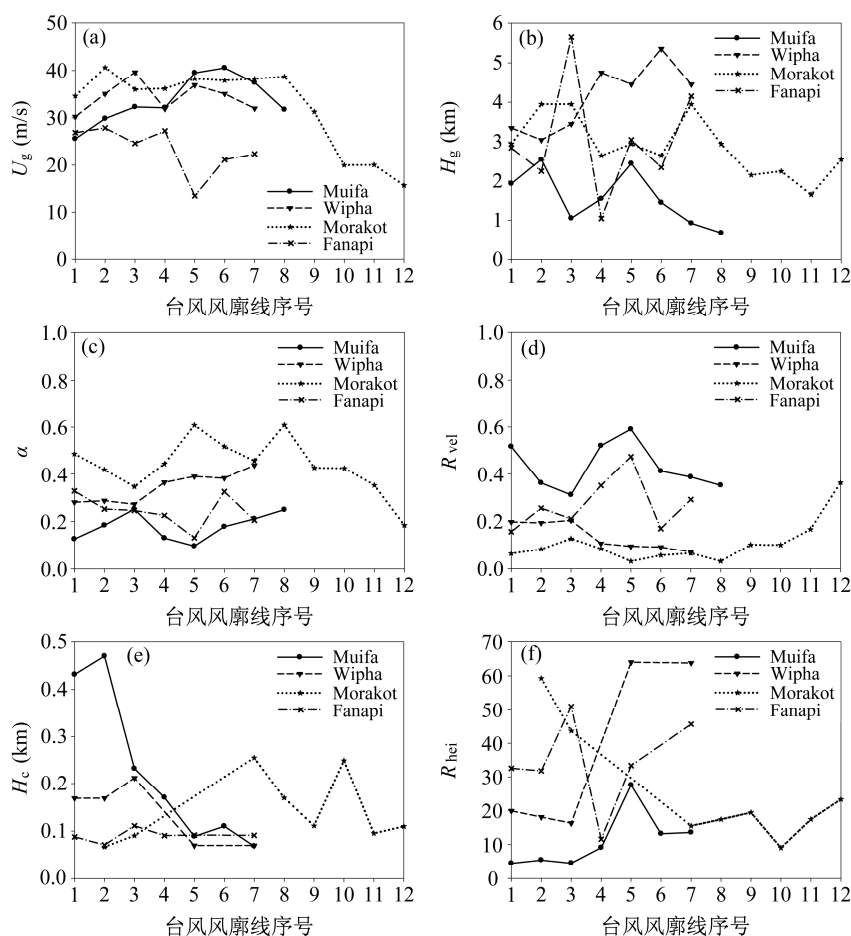


图 3 近海台风和登陆台风风廓线各参数比较: (a) 梯度风速; (b) 梯度风高度; (c) 幂指数; (d) 风速比; (e) 常通量层高度; (f) 高度比

Fig. 3 Comparisons of the parameters of the wind profiles for the offshore and landing typhoons: (a) Gradient wind speed; (b) gradient wind level; (c) exponential index; (d) wind speed ratio; (e) height of the constant flux layer; (f) height ratio

的风速比的比较。由图可见：登陆台风的风速比明显小于近海台风的风速比。“梅花”台风风速比的平均值为 0.405，“韦帕”、“莫拉克”和“凡亚比”台风的平均值分别为 0.134、0.098 和 0.229。根据 Powell et al. (2005) 和 Vickery et al. (2009b) 的研究结果，在近海及海岸线上，该比值在 0.57~0.62 之间。计算结果表明：“梅花”台风的风速比略低于上述研究成果；“韦帕”、“莫拉克”和“凡亚比”登陆台风的风速比远小于上述研究结果。其原因可能是后者经过台湾岛或者受到台湾岛，以及二次登陆的影响，梯度风高度增加，梯度风速受地形的影响较小或保持不变 (Vickery et al., 2009b)；而地表风速由于复杂地形引起的摩擦大幅度减小，从而风速比值大幅度减小。

图 3e 是台风各风廓线中由对数律定义的常通量层高度的比较。根据前述关于常通量层高度低于 60 米的数据处理说明，“梅花”台风的第 8 数据点、“韦帕”台风的第 4 和第 6 数据点、“莫拉克”台风的第 1、第 4~6 数据点，以及“凡亚比”台风的第 6 数据点不存在常通量层高度，在数据分析中不予考虑。由图可见：在早期观测阶段（前两条风廓线），“梅花”台风的常通量层高度最高可达 450 米左右，这可能与局部地形以及观测位置和台风中心的相对位置等因素有关。小洋山北部是最高海拔高度约 50 米左右的起伏地形，东北方向的地形相对平坦；在观测早期，主导风向为东北风，局部地形的影响微弱，而远处为开阔海面，因此风廓线具有深海成熟台风的特征，从而常通量层高度较高。总体而言，对于登陆台风，常通量层高度基本在 200 米以下，“韦帕”、“莫拉克”和“凡亚比”三个台风的平均值分别为 138 米、143 米和 90 米。图 3f 是台风各风廓线中梯度风高度和常通量层高度比值的比较。总体说来，台风的梯度风高度均大于常通量层高度；但登陆台风梯度风高度和常通量层高度的差异更为明显。

在台风风廓线研究中经常用到平均风廓线，因此，有必要考察平均风廓线的特征值和风廓线特征值的平均值之间的差异。针对每一个台风，将所有风廓线进行求和，得到平均风廓线。平均风廓线各参数的计算结果和风廓线各参数平均值的比较如表 3 所示。由表可见：两种方法得到的梯度风速、梯度风高度、幂指数和风速比差别不大；对于常通量层高度，“梅花”和“凡亚比”两台风的差别较

大。对于近海的“梅花”台风，由于观测过程包含诸多不确定因素，导致单个风廓线的常通量层高度较低，而通过平均过程，可以降低或消除一些不确定因素，将风廓线中对数律部分更加明显地表现出来。总体而言，通过平均风廓线可以对登陆台风沿海地带风廓线进行初步了解，如图 4 所示。通过和 Vickery et al. (2009b) 的研究结果进行比较可以发现：“梅花”台风的平均风廓线特征和深海成熟台风的风廓线特征基本相似，即平均风廓线的梯度风高度在 1000 米以下，以及梯度风高度以下的风廓线满足对数律；对于“莫拉克”台风，由对数律定义的常通量层高度大幅度降低，维持在 200 米左右，而梯度风高度大幅度上升，最后维持在 3000 米左右，即随高度的增加，风廓线逐渐偏离对数律。“韦帕”台风的平均风廓线特征和“莫拉克”台风相似。

表 3 平均风廓线各参数的计算结果和风廓线各参数平均值的比较

Table 3 Comparisons of the parameters between the values from the mean wind profiles and the mean values from the wind profiles of the typhoons

		梯度 风速 (m/s)	梯度 风高度 (m)	幂指 数	风速比	常通量 层高度 (m)
梅花	平均风廓线计算结果	31.095	1449.672	0.127	0.532	826.1
	各风廓线平均值	33.633	1573.145	0.178	0.431	224.4
凡亚比	平均风廓线计算结果	21.638	2250.039	0.207	0.325	290.0
	各风廓线平均值*	25.046	3049.177	0.264	0.238	90.1
韦帕	平均风廓线计算结果	31.112	3349.364	0.320	0.155	210.7
	各风廓线平均值	34.393	4122.059	0.344	0.136	137.7
莫拉克	平均风廓线计算结果	32.191	3050.428	0.429	0.086	171.2
	各风廓线平均值#	33.798	2913.718	0.462	0.082	148.1

*“凡亚比”台风的各风廓线平均值不包括第 5 条风廓线；#“莫拉克”台风的各风廓线平均值不包括第 12 条风廓线

6 讨论

梯度风高度以下风速偏离对数律的原因可能和陆地过程有关。以“莫拉克”台风为例，台风路径存在首次登陆和二次登陆。由于观测点在海岸线附近，二次登陆对平均风廓线的影响较小 (Powell et al., 1996; Sempreviva et al., 1990)，因此，首次登陆台湾岛可能是一个重要原因。随着台风首次登陆，一方面在梯度风速保持不变或变化不大条件下梯度风高度大幅度上升 (Vickery et al., 2009b)，另一方面会形成和较大粗糙度相适应的陆地条件下的

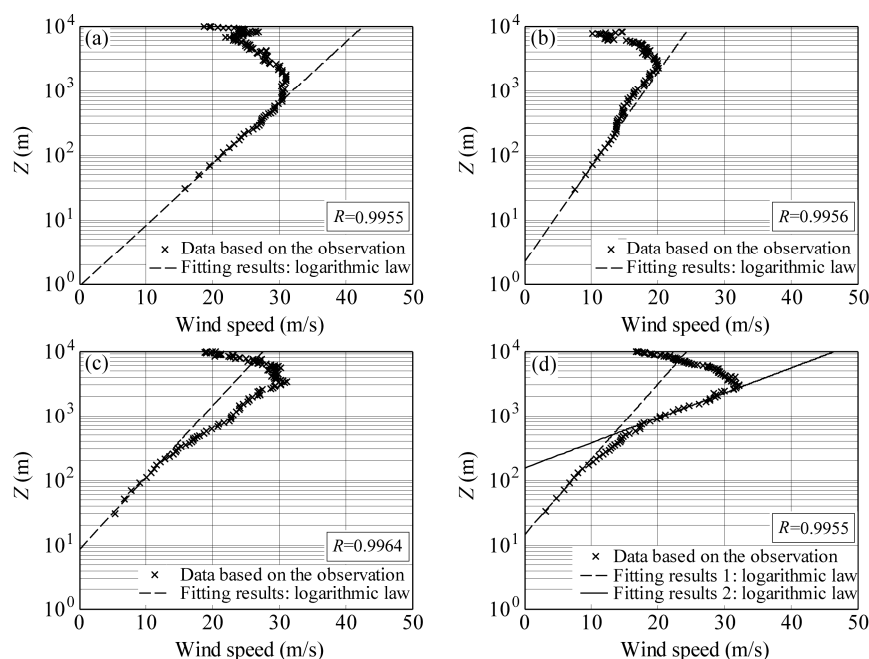


图4 平均风廓线: (a) “梅花”台风; (b) “凡亚比”台风; (c) “韦帕”台风; (d) “莫拉克”台风

Fig. 4 Mean wind profiles of typhoons: (a) Muifa; (b) Fanapi; (c) Wipha; (d) Morakot

常通量层; 随着台风再次进入海域, 由于粗糙度减小, 常通量层底部的风速重新变大 (Masters et al., 2010), 从而导致沿高度方向, 风廓线逐渐偏离对数律。Vickery et al. (2009b) 和 Powell et al. (2003) 也观测到类似的现象, 特别是对于风速较大的平均风廓线, 并推测是由于海浪泡沫等引起的“滑移” (“slip”) 边界条件导致的。事实上, 在深海中, 同样存在粗糙度由大变小的过程: 台风外围的风速较小, 海浪泡沫等尚未形成, 粗糙度较大; 随着台风的移动, 当遇到最大风圈时, 由于风速较大, 形成了海浪泡沫等, 从而形成“滑移”边界条件。单独的“滑移”边界条件很难形成上述现象。

7 结语

利用 2007 年的“韦帕”、2009 年的“莫拉克”、2010 年的“凡亚比”和 2011 年的“梅花”四个台风的 GPS 探空数据, 对我国华东近海和沿海地带的风廓线特征进行分析。首先求出梯度风速及其对应的高度, 在此基础上利用指数律和对数律对风廓线进行拟合, 并对幂指数、地表风速和梯度风速的风速比, 以及由对数律定义的常通量层高度等参数进行计算, 对梯度风高度和常通量层高度进行比较。本文还通过四个台风的平均风廓线对上述各参数进行计算, 并和风廓线各参数的平均值进行对比。最后对梯度风高度以下风速沿高度偏离对数律

的原因进行了讨论。结果表明:

(1) 华东沿海地带登陆台风平均风廓线的地表风速和梯度风速比值的平均值在 0.2 左右, 明显低于 Vickery et al. (2009b) 的研究结果。主要原因是随着台风经过台湾岛以及二次登陆, 梯度风高度增加, 梯度风速受地形的影响较小或保持不变; 而地表风速由于复杂地形引起的摩擦大幅度减小, 从而风速比值大幅度减小。需要特别指出的是: 如果采用常通量层高度对应的风速, 本文的风速比值和 Vickery et al. (2009b) 的研究结果基本相当。

(2) 华东沿海地带登陆台风平均风廓线的梯度风高度平均值在 3000 米左右, 常通量层高度平均值在 200 米左右, 两者之间存在明显差异; 梯度风高度以下, 随高度的增加, 风廓线逐渐偏离对数律, 和 Vickery et al. (2009b) 关于深海台风的研究结果存在明显差异。

(3) 由于台湾岛的存在, 导致在梯度风速保持不变或变化不大条件下梯度风高度上升, 同时形成和较大粗糙度相适应的陆地条件下的常通量层; 随着台风进入台湾海峡, 下垫面对应的粗糙度经历由大变小的过程, 相应地, 边界层底部的动量通量减小, 风速变大, 从而使风廓线沿高度方向逐渐偏离对数律。风廓线偏离对数律的原因需要进一步验证。

(4) 对于沿我国华东登陆,特别是受台湾岛影响较大的台风,单独的对数律已难以全面描述梯度风高度以下风速沿高度的变化规律,有必要同时引入指数律。

致谢 本文 GPS 探空数据和无线电探空数据的对比试验由上海市气象局宝山气象站协助完成,特表示感谢。

参考文献 (References)

- Georgiou P N. 1985. Design wind speeds in tropical cyclone-prone regions [D]. Ph. D. Thesis, Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
- Holland G J. 1980. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108 (8): 1212–1218.
- Keprt J D. 2001. The dynamics of boundary layer jets within the tropical cyclone core. Part I: Linear theory [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (17): 2469–2484.
- Levinson D H, Vickery P J, Resio D T. 2010. A review of the climatological characteristics of landfalling Gulf hurricanes for wind, wave, and surge hazard estimation [J]. *Ocean Eng.*, 37 (1): 13–25.
- Masters F J, Vickery P J, Bacon P, et al. 2010. Toward objective, standardized intensity estimates from surface wind speed observations [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (12): 1665–1681.
- McConochie J D, Hardy T A, Mason L B. 2004. Modelling tropical cyclone over water wind and pressure fields [J]. *Ocean Eng.*, 31: 1757–1782.
- Powell M D, Houston S H, Reinhold T A. 1996. Hurricane Andrew's landfall in South Florida. Part I: Standardizing measurements for documentation of surface wind fields [J]. *Wea. Forecasting*, 11 (3): 304–328.
- Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. 2003. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones [J]. *Nature*, 422 (6929): 279–283.
- Powell M D, Soukup G, Cocke S, et al. 2005. State of Florida hurricane loss projection model: Atmospheric science component [J]. *J. Ind. Aerodyn.*, 93 (8): 651–674.
- Sempreviva A M, Larsen S E, Mortensen N G, et al. 1990. Response of neutral boundary layers to changes of roughness [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 50: 205–225.
- Vickery P J, Twisdale L A. 1995. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions [J]. *J. Struct. Eng., ASCE*, 121 (11): 1700–1709.
- Vickery P J, Skerlj P F, Steckley A C, et al. 2000. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations [J]. *J. Struct. Eng.*, 126 (10): 1203–1221.
- Vickery P J, Masters F J, Powell M D, et al. 2009a. Hurricane hazard modeling: The past, present, and future [J]. *J. Wind Eng. Ind. Aerodynam.*, 97: 392–405.
- Vickery P J, Wadhera D, Powell M D, et al. 2009b. A hurricane boundary layer and wind field model for use in engineering applications [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48 (2): 381–405.
- Willoughby H E, Rahn M E. 2004. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I: Observations and evaluation of the Holland (1980) model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (12): 3033–3048.
- 中国气象局. 2006–2011. 热带气旋年鉴 (2005–2010) [M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2006–2011. Yearbook of Tropical Cyclone (2005–2010) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.