

文章编号:1004-4574(2013)02-0091-08

台风影响下福州地区的风廓线特征

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:对台风影响下福州地区的风廓线特征进行了研究。资料来源于福州气象站的无线电探空数据, 涉及2005-2009年期间严重影响福州地区的15个台风、共91条风廓线。首先求出梯度风速及其对应的高度, 在此基础上采用指数律对梯度风高度以下的风廓线进行拟合, 并对幂指数以及10 m高度的地表风速和梯度风速的风速比进行了计算。结果表明: 幂指数的平均值为0.43, 风速比的平均值为0.12; 随着梯度风高度的增大, 幂指数减小, 风速比增大; 风速比按指数律随幂指数的增大而衰减。以台风中心到福州气象站的距离为参数, 还对风廓线各特征参数在台风登陆过程中的变化趋势进行了分析。

关键词:风廓线; 幂指数; 风速比

中图分类号: P447

文献标志码: A

Study on characteristics of wind profiles affected by landed typhoons in Fuzhou area

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

(1. Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 2. Institute of Urban Meteorology of China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

Abstract: With the radiosonde data from Fuzhou Weather Station, the characteristics of the wind profiles affected by landed typhoons in Fuzhou area were studied. Totally 91 wind profiles were obtained, which involved 15 typhoons that severely affected Fuzhou area during the year of 2005-2009. The gradient wind speed and the corresponding levels were first obtained, which were then used by the power law to fit the wind profiles below the gradient wind level. Exponential index and wind speed ratio between the surface wind speed at 10m height and the gradient wind speed were calculated. Results show that the mean value of the exponential index is 0.43, and the mean value of the wind speed ratio is 0.12. The exponential index decreases and the wind speed ratio increases with the increasing of the gradient wind level. The wind speed ratio decays in an exponential way with the increasing of the exponential index. Then, the characteristics of the wind profiles were analyzed by considering the variation of the distance between Fuzhou Weather Station and the typhoon center during the landfall process.

Key words: wind profile; exponential index; wind speed ratio

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, 以及保险业的台风风灾评估

收稿日期: 2012-07-14; 修回日期: 2012-09-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421501); 国家自然科学基金资助项目(90815028; 40905029)

作者简介: 方平治(1974-), 男, 博士, 主要从事台风边界层观测和计算风工程研究. E-mail: freedompz@yahoo.com.cn

等^[1-5]。台风风场模型是台风灾害模型的重要组成部分^[2-3],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^[6-8]。Vickery等^[9-10]的研究结果表明:在洋面上,地表风速和梯度风速的风速比在0.70-0.72之间;在海岸线上,上述比值减小14%~20%;在距离海岸50 km处的内陆区,上述比值减小23%~28%。Sparks等^[11]的研究结果表明:在洋面上,风速比为0.65;在沿海地带,上述比值有30%的减小量。通过对1997-2003年期间大西洋、墨西哥湾和太平洋上的成熟飓风进行观测,Vickery等^[12]对飓风的平均风廓线特征进行了研究,结果表明:平均风廓线的梯度风(即最大风)高度一般在1000 m以下(在300~1000 m之间,根据文献中表6和表7,由 $H^*/1.12$ 得到);梯度风高度随500 m以下风速平均值的增大而降低,随最大风圈半径的增大而增大。由1997-1999年期间大西洋、东太平洋和中太平洋上成熟飓风,采用相同的方法,Powell等^[13]的研究结果表明:平均风廓线的梯度风高度可达500 m。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} m量级(0.03 m),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^[12]。

地表风速和梯度风速的比值,以及梯度风高度和下垫面粗糙度密切相关。我国华东沿海地形和美国东部沿海地形明显不同,以丘陵山地为主,复杂地形必然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特征。利用福州气象站L波段(I型)高空气象探测系统提供的无线电探空数据,本文对福州地区的台风风廓线特征进行研究,涉及2005-2009年期间严重影响福州地区的15个台风,共91条风廓线。首先求出梯度风速及其对应的高度,在此基础上采用指数律对梯度风高度以下的风廓线进行拟合,并对幂指数,以及10 m高度的地表风速和梯度风速的风速比进行计算;以台风中心到福州气象站的距离为参数,本文还对风廓线各特征参数在台风登陆过程中的变化趋势进行了分析。

1 台风影响下风廓线的基本特征

在台风生命周期内,从气象站连续得到的风廓线序列中选出台风影响下的风廓线是本文进行研究的前提。以“莫拉克”台风为例,来说明台风登陆过程中风廓线的变化特征。“莫拉克”台风的生命周期为2009年8月4-10日;福州气象站(26°5'N,119°17'E,海拔85m)每天在1时、7时和19时三个时刻各释放一个气球,因此,在台风生命周期内共得到21条风廓线。图1(左图)表明:在台风靠近福州气象站过程中,最大风高度 z_{\max} 降低,同时,最大风速 U_{\max} 增加。本文以上述两个参数的变化来识别风廓线是否受到台风的影响;并且仅考虑最大风速大于15 m/s,同时,最大风高度低于6 km的风廓线。根据上述两个标准,针对“莫拉克”台风,可以得到11条台风风廓线,即从图中第9条风廓线开始,对应的时间为8月6日19时。图1(右图,图中的时间为世界时)的卫星云图表明:在8月6日20时,台风已经影响到福州气象站。

2 风廓线的描述方法

由于包括台湾岛在内的陆地过程的影响,福建省沿海地带由对数律定义的边界层高度一般在200 m以下;同时,最大风高度(即梯度风高度)远大于边界层高度。福州气象站位于距离海岸线50 km左右的内陆区,高空气象探测系统提供的探空数据的采样频率为1/60 Hz,降雨条件下探空气球的平均上升速率在350 m/min左右,因此,由福州气象站提供的风廓线已不能使用对数律对梯度风高度以下的风廓线进行描述,本文采用指数律进行描述。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,以最大风高度 z_{\max} 及其对应的最大风速 U_{\max} 为参考,指数律风廓线可定义为:

$$\frac{U}{U_{\max}} = \left(\frac{z}{z_{\max}} \right)^{\alpha}, \quad (1)$$

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。Tamura等^[14]指出:幂指数受到风速的影响,本文不对该问题进行深入研究。陆地上复杂的风廓线还可能出现多个最大风速,由下至上依次为第1最大风速、第2最大风速等,当第2最大风速存在时,上述最大风速就是第1最大风速,并将其对应的最大风高度定义为梯度风高度。

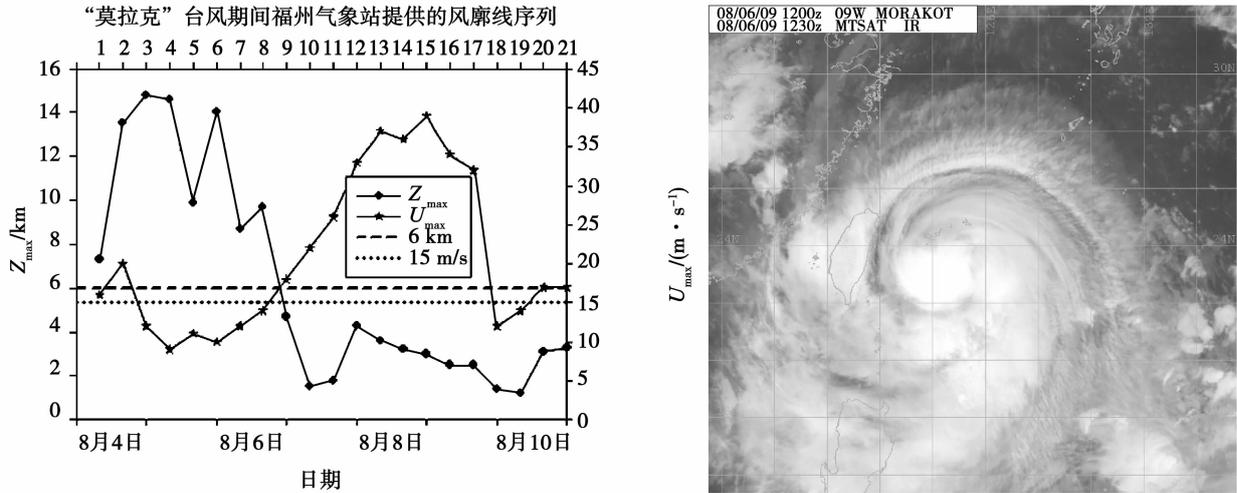


图 1 “莫拉克”台风靠近福州气象站过程中,最大风高度降低,同时,最大风速增加(左图);
8月6日20时的卫星云图表明:台风已经影响到福州气象站(右图)
Fig. 1 Height of the maximum wind speed decreases, meanwhile, the maximum wind speed increases as Morakot Typhoon approaches Fuzhou Weather Station (left); Satellite cloud imagery at 20 o'clock on Aug. 6 from MTSAT IR shows that the typhoon has affected Fuzhou Weather Station (right)

3 台风风廓线资料简介

台风风廓线来源于福州气象站的 L 波段(I 型)高空气象探测系统,该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。在中国气象局的气象业务中,气象站通常每天释放 2~4 个气球。本文主要以 2005-2009 年期间严重影响福州地区的 15 个台风为研究对象。台风移动路径和福州气象站的位置如图 2 所示。由图可见:10 个台风在台湾岛首次登陆,而另外 5 个台风也不同程度受到台湾岛的影响。根据前述给出的台风风廓线的识别方法,共鉴别出 91 条风廓线。登陆台风及台风风廓线等相关信息见表 1。

表 1 2005-2009 年严重影响福州地区的台风及风廓线^[15]

Table 1 Typhoons severely affecting Fuzhou area during the year of 2005-2009 and the corresponding wind profiles^[15]

台风名称	起讫日期	登陆地点	登陆时间	登陆最大风速/(m·s ⁻¹) [#]	风廓线/条
海棠	2005-07-11-2005-07-21	福建连江	7月19日17时	33	4
麦莎	2005-07-30-2005-08-09	浙江玉环	8月6日3时	45	6
泰利	2005-08-26-2005-09-03	福建莆田	9月1日14时	35	7
龙王	2005-09-25-2005-10-03	福建厦门	10月2日23时	30	6
珍珠	2006-05-08-2006-05-19	广东饶平	5月18日02时	35	2
碧利斯	2006-07-08-2006-07-17	福建霞浦	7月14日12时	30	15
格美	2006-07-18-2006-07-29	福建晋江	7月25日15时	33	10
桑美	2006-08-05-2006-08-12	浙江苍南	8月10日17时	60	4
圣帕	2007-08-13-2007-08-19	福建惠安	8月19日2时	33	7
韦帕	2007-09-16-2007-09-19	浙江苍南	9月19日2时	45	2
罗莎	2007-10-02-2007-10-08	浙闽交界	10月7日15时	33	6
海鸥	2008-07-15-2008-07-19	福建霞浦	7月18日18时	25	2
凤凰	2008-07-25-2008-07-29	福建福清	7月28日22时	33	8
莲花	2009-06-18-2009-06-22	福建晋江	6月21日22时	26	1
莫拉克	2009-08-04-2009-08-10	福建霞浦	8月9日17时	33	11

注: #:最大风速为距离地面 10 m,平均时距为 2 分钟的风速。

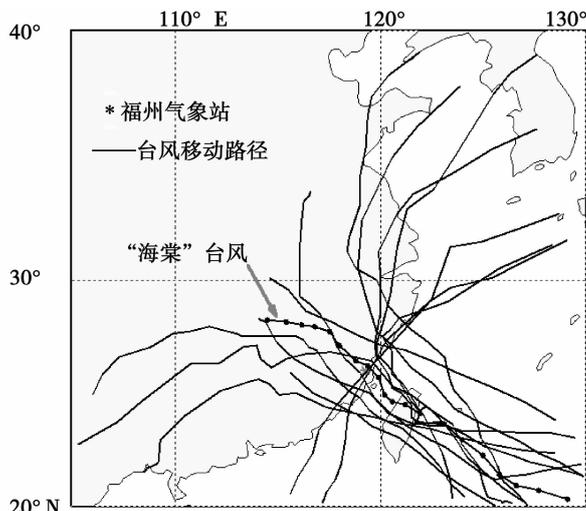


图 2 台风移动路径及观测地点示意图

Fig. 2 Tracks of the studied typhoons and the corresponding observation sites

4 台风风廓线特征的观测和计算结果及其分析

利用 L 波段 (I 型) 高空气象探测系统本身提供的数据处理软件, 可以得到等间隔高度上的风速和风向。本文以 100 m 为间隔, 可以得到从地面到高空每隔 100 m 的探空数据 (根据沿高度方向上每 min 的观测数据采用插值方法得到); 为了降低周围杂物及局部地形的影响, 剔除风廓线中 100 m 以下的的数据。梯度风速和梯度风高度, 以及幂指数和风速比各特征参数的观测和计算结果及其分析如图 3 所示。

图 3(a) - (c) 分别给出梯度风高度、幂指数以及风速比随梯度风速变化的观测和计算结果。由图可见: 各特征参数和梯度风速没有明显的依赖关系。总体而言, 梯度风速小于 45 m/s, 平均值为 23.60 m/s; 梯度风高度低于 6 km, 平均值为 2.90 km; 幂指数主要分布在 0.1 ~ 0.7 范围内, 平均值为 0.43; 风速比主要分布在 0.3 以下, 平均值为 0.12。Vickery 等^[9-10]以及 Sparks 等^[11]的研究结果表明: 在距离海岸 50 km 处的内陆区, 风速比为 0.46 ~ 0.56。福州气象站位于距离海岸线 50 km 左右的内陆区, 相对于开阔场地, 复杂地形条件下的风速比大幅度减小。另外, 由于华东沿海以丘陵山地为主, 地形复杂, 梯度风高度的平均值也高于 Vickery 等^[12]给出的结果。图 3(d) 和 (e) 分别给出幂指数和风速比的计算结果及其与梯度风高度的相互关系。由图可见: 幂指数和风速比与梯度风高度之间存在明显的函数关系。分别采用线性函数和指数函数进行拟合, 拟合结果以及相关系数 R 如图所示。随着梯度风高度的增加, 幂指数减小, 风速比增大。幂指数的减小和风速比的增大有一定的内在联系: 在梯度风高度和梯度风速保持不变的条件下, 幂指数减小, 必然导致风速比增大。特别指出: 图 3(e) 的拟合关系式未考虑风速比大于 0.3 的 3 个数据。一方面是因为这 3 个数据远远大于其它数据; 另一方面, 与这 3 个数据对应的梯度风速较小, 不超过 20 m/s, 从致灾的角度而言, 不具有特殊性。图 3(f) 给出风速比和幂指数之间的联系。由图可见: 随着幂指数的增大, 风速比呈指数衰减趋势。采用指数衰减函数进行拟合, 结果如图所示。理论上, 风速比和幂指数都是由相同的观测数据给出的导出结果; 对于一条风廓线, 拟合出幂指数, 风速比同时被确定; 但图 3(f) 表明: 对于不同的台风以及相同台风的不同的风廓线, 尽管梯度风高度变化很大, 但风速比和幂指数的关系可以用指数衰减函数很好地拟合出来, 这可能与梯度风高度和幂指数之间存在某种复杂的函数关系有关。目前尚不明确其他站点的数据是否有类似的指数衰减规律, 以及所有的站点是否满足相同的指数衰减规律。该拟合关系提供了一种获得梯度风速和梯度风高度的可能方法。

为了对台风影响下福州地区的梯度风速、梯度风高度及其对应的幂指数有一个更详细的了解, 表 2 和表 3 分别给出幂指数和梯度风速, 以及幂指数和梯度风高度的联合分布表。如前所述, 幂指数的主要

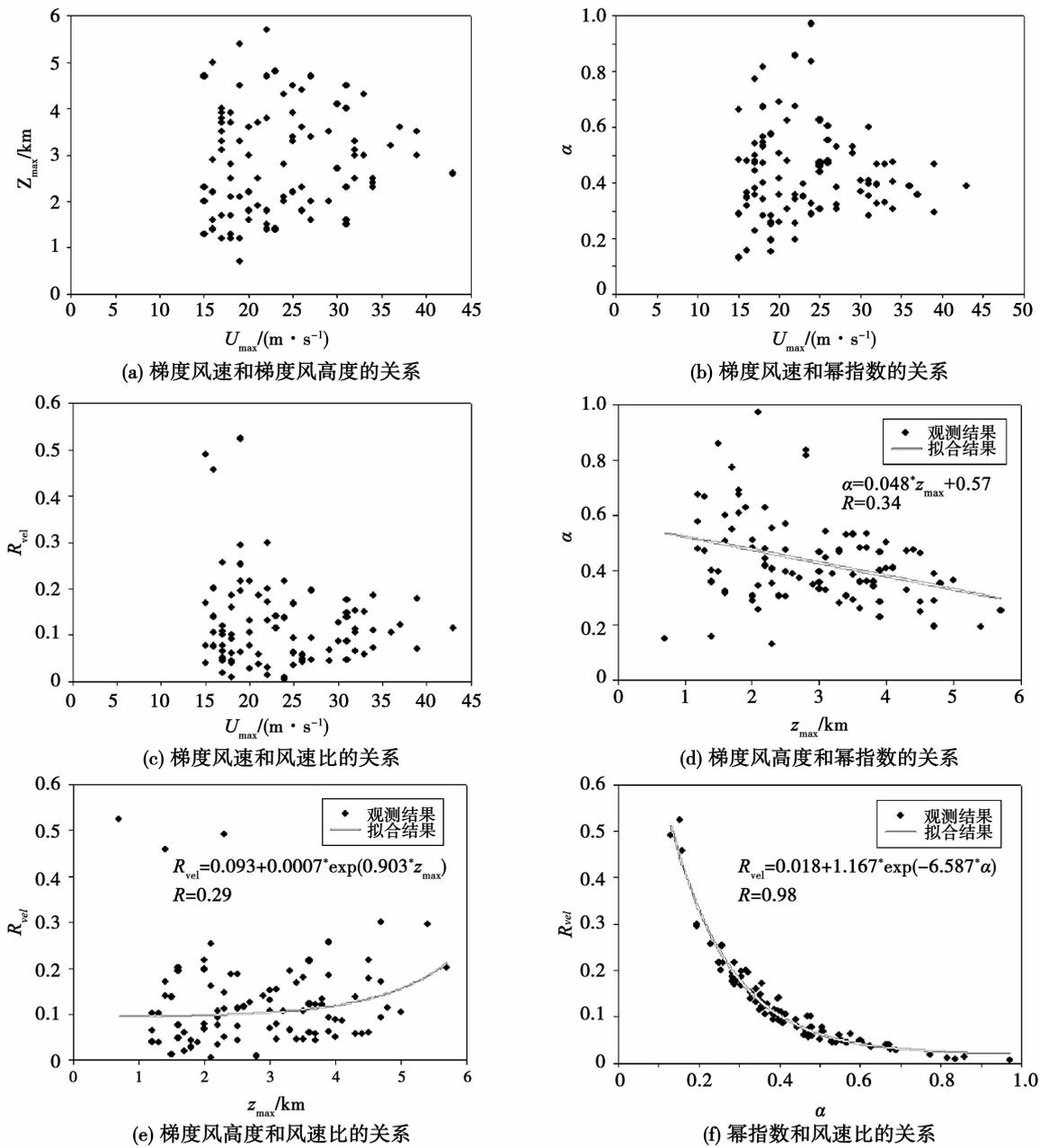


图 3 梯度风速、梯度风高度、幂指数和风速比的观测和计算结果及其相互关系

Fig. 3 Observation and calculation results of gradient wind speed, gradient wind level, exponential index and wind speed ratio, and their mutual relationship

分布范围在 0.1 ~ 0.7 之间;表 2 和表 3 表明:幂指数在 0.3 ~ 0.4 之间的风廓线最多,在 0.2 ~ 0.5 范围内的风廓线占样本总数的近 70%,并且包括了所有大梯度风速的风廓线。由于受地形因素的影响,最大梯度风速的风廓线不一定直接导致最大的地表风速,但从预防灾害的角度来看,大梯度风速的风廓线,以及幂指数等特征参数的观测和计算结果及其统计特征需要特别关注。表 2 表明:随着梯度风速的增加,风廓线的样本数目逐渐减小;表 3 表明:梯度风高度在 3.0 ~ 4.0 km 之间的风廓线最多,其次是在 2.0 ~ 3.0 km 之间以及在 1.0 ~ 2.0 km 之间的风廓线;1.0 ~ 4.0 km 范围的风廓线占样本总数的 80% 以上。作为特例,本文给出样本中最大梯度风速所对应的风廓线特征参数的观测和计算结果。该风廓线源于 2005 年的“海棠”台风,最大梯度风速出现的时间为 7 月 18 日 19 时,约登陆时刻的前一天;风廓线的各特征参数为:梯度风速为 43 m/s,梯度风高度为 2.6 km,幂指数为 0.388,风速比为 0.116。“海棠”台风的移动路径如图 2 所示。

表 2 幂指数和梯度风速联合分布表

Table 2 Joint distribution table for the exponential index and the gradient wind speed

梯度风高速 ($m \cdot s^{-1}$)	幂指数							0~1.0
	<0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	≥ 0.7	
<20	4	6	8	7	5	2	2	34
20~25	1	3	7	2	1	3	3	20
25~30	--	--	5	6	4	2	--	17
30~35	--	1	7	6	--	1	--	15
35~40	--	1	2	1	--	--	--	4
≥ 40	--	--	1	--	--	--	--	1
0~50	5	11	30	22	10	8	5	91

表 3 幂指数和梯度风高度联合分布表

Table 3 Joint distribution table for the exponential index and the gradient wind level

梯度风速高度/km	幂指数							0~1.0
	<0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	≥ 0.7	
0~1.0	1	--	--	--	--	--	--	1
1.0~2.0	1	--	5	2	3	7	2	20
2.0~3.0	1	2	9	6	3	1	3	25
3.0~4.0	--	5	12	8	4	--	--	29
4.0~5.0	1	3	3	6	--	--	--	13
5.0~6.0	1	1	1	--	--	--	--	3
0~6.0	5	11	30	22	10	8	5	91

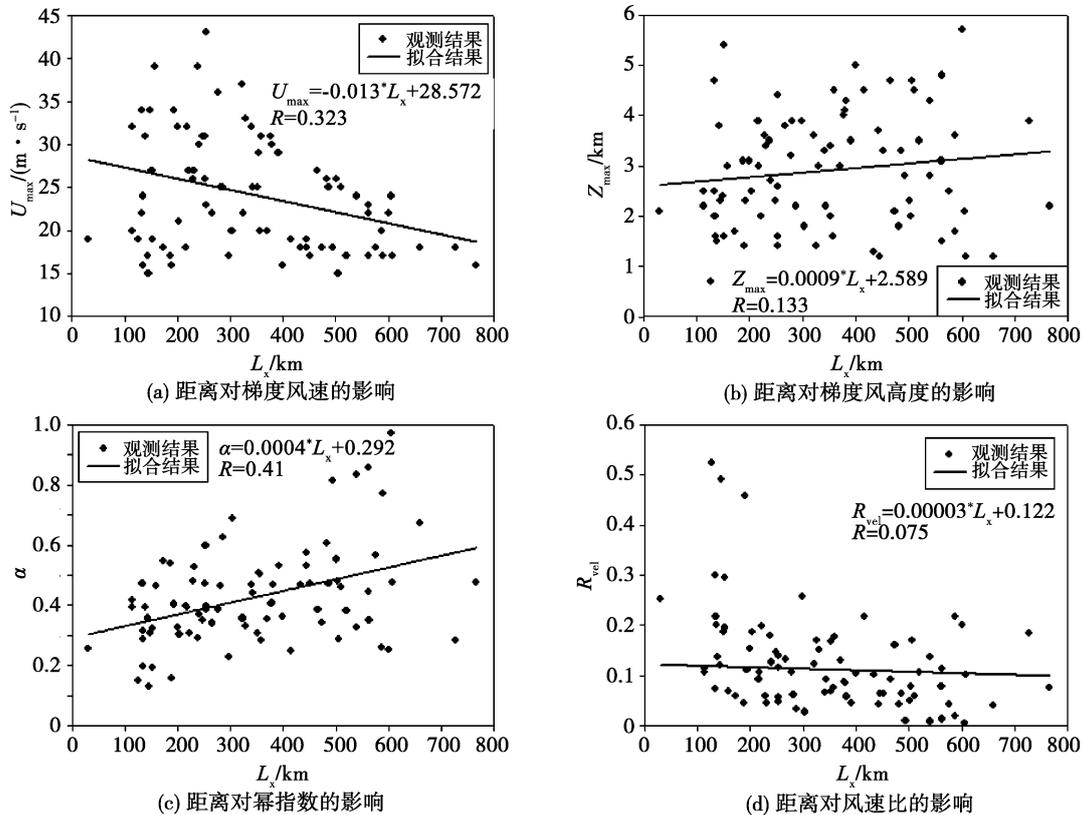


图 4 台风中心到观测地点的距离 (L_x) 对梯度风速、梯度风高度、幂指数和风速比的影响
 Fig. 4 Effects of distance between typhoon center and observation site on gradient wind speed, gradient wind level, exponential index and wind speed ratio

在洋面上,台风处于发展和成熟阶段,结构比较完整,通常有明显的眼区、云墙(最大风速区)、螺旋雨带等,因此,在对台风风廓线特征研究中,可以用风廓线到云墙的距离为参数来考察各特征参数的变化规律^[12]。台风登陆以后,由于下垫面复杂,以及处于衰减阶段,台风各结构区分不明显,本文以台风中心到观测地点的距离(L_x)为变量,考察各特征参数的变化规律。以台风中心到福州气象站的距离为参数,梯度风速、梯度风高度、幂指数和风速比的变化如图 4 所示。由于 800 km 以外的数据比较离散且对福州地区的影响弱,本文仅考虑 800 km 以内共 83 条风廓线。由图 4(a) - (c)可见:随距离的增加,梯度风速减小、梯度风高度和幂指数增大。通过对 Vickery 等^[12]的研究结果进行分析,本文的陆地观测结果和洋面上成熟台风风廓线特征的变化趋势一致。根据图 4(b)和(c),理论而言,随距离的增加,风速比减小;由图 4(d)可见:虽然随距离的增加,风速比有减小趋势,但距离对风速比的影响很小。图中还给出距离对各特征参数影响的线性拟合结果。考虑到台风结构的非均匀性,对福州地区而言,距离和风向对各特征参数的影响很复杂,由于数据有限,本文的线性函数拟合仅用来提供各特征参数的变化趋势。

5 结语

本文研究了福州地区的台风风廓线特征,涉及 2005 - 2009 年期间严重影响福州地区的 15 个台风,共 91 条风廓线。由于包括台湾岛在内的陆地过程的影响,并考虑到福建省沿海地带的复杂地形,本文采用基于梯度风速和梯度风高度的指数律对梯度风高度以下的风廓线进行描述,在此基础上对幂指数,以及 10 m 高度的地表风速和梯度风速的风速比进行了计算。以台风中心到福州气象站的距离为参数,本文还对风廓线各特征参数在台风登陆过程中的变化趋势进行了分析。结果表明:

(1) 台风影响下福州地区风廓线的梯度风速小于 45 m/s,平均值为 23.60 m/s;梯度风高度低于 6 km,平均值为 2.90 km;幂指数主要分布在 0.1 ~ 0.7 范围内,平均值为 0.43;风速比主要分布在 0.3 以下,平均值为 0.12。

(2) 幂指数和风速比与梯度风高度之间存在明显的函数关系:随着梯度风高度的增加,幂指数减小,风速比增加。

(3) 对于不同的台风以及相同台风的不同的风廓线,尽管梯度风高度变化很大,但风速比和幂指数的关系可以用指数衰减函数很好地拟合出来,这可能与梯度风高度和幂指数之间存在某种复杂的函数关系有关。目前尚不明确其他站点的数据是否有类似的指数衰减规律,以及所有的站点是否满足相同的指数衰减规律。该拟合关系提供了一种获得梯度风速和梯度风高度的可能方法。

(4) 随台风中心到观测地点距离的增加,梯度风速减小、梯度风高度和幂指数增大;距离对风速比的影响很小,仅有减小趋势。

致谢: 本文使用了福州气象站的探空数据;福建省气象科学研究所的蔡义勇研究员和余永江在探空资料的收集过程中提供了大量帮助,表示感谢。

参考文献:

- [1] Vickery P J, Masters F J, Powell M D, et al. Hurricane hazard modeling: the past, present, and future [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(7/8): 392 - 405.
- [2] Vickery P J, Lin J, Skerlj P F, et al. HAZUS - MH hurricane model methodology. I: hurricane hazard, terrain and wind load modeling [J]. *Natural Hazards Review*, 2006, 7(2): 82 - 93.
- [3] Vickery P J, Skerlj P F, Lin J, et al. HAZUS - MH hurricane model methodology II: damage and loss estimation [J]. *Natural Hazards Review*, 2006, 7(2): 94 - 103.
- [4] 宋芳芳, 欧进萍. 台风“黑格比”对城市建筑物破坏调查与成因分析 [J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(4): 8 - 16.
SONG Fangfang, OU Jinping. Investigation and analysis of structures damage caused by typhoon “Hagubit” [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(4): 8 - 16. (in Chinese)
- [5] 段忠东, 肖玉凤, 肖仪清, 等. 基于数值模拟的台风危险性分析综述(II) - 随机抽样模拟与极值风速预测 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(2): 1 - 8.
DUAN Zhongdong, XIAO Yufeng, XIAO Yiqing, et al. Review of numerical simulation - based typhoon hazard analysis: random sampling simulation and extreme wind speed prediction [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(2): 1 - 8. (in Chinese)

- [6] Levinson D H, Vickery P J, Resio D T. A review of the climatological characteristics of landfalling Gulf hurricanes for wind, wave, and surge hazard estimation [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(1): 13–25.
- [7] 肖玉凤, 段忠东, 肖仪清, 等. 基于数值模拟的台风危险性分析综述(1) – 台风风场模型 [J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(2): 82–89.
XIAO Yufeng, DUAN Zhongdong, XIAO Yiqing, et al. Review of numerical simulation – based typhoon hazard analysis: typhoon wind – field model [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(2): 82–89. (in Chinese)
- [8] Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108 (8): 1212–1218.
- [9] Vickery P J, Skerlj P F, Steckley A C, et al. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(10): 1203–1221.
- [10] Vickery P J, Skerlj P F, Twisdale Jr L A. Simulation of hurricane risk in the US using an empirical track model [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126 (10): 1222–1237.
- [11] Sparks P R, Huang Z. Gust factors and surface – to – gradient wind speed ratios in tropical cyclones [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89 (11/12): 1047–1058.
- [12] Vickery P J, Wadhwa D, Powell M D, et al. A hurricane boundary layer and wind field model for use in engineering applications [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(2): 381–405.
- [13] Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones [J]. *Nature*, 2003, 422, 20 March: 279–283.
- [14] Tamura Y, Iwatani Y, Hibi K, et al. Profiles of mean wind speeds and vertical turbulence intensities measured at seashore and two inland sites using Doppler sodars [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(6): 411–427.
- [15] 中国气象局. 热带气旋年鉴 (2005–2009) [M]. 北京: 气象出版社, 2006–2010: 12.
China Meteorological Administration. *Yearbook of Tropical Cyclone (2005–2009)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006–2010: 12. (in Chinese)