梁莉，崔晓鹏，王成鑫，等. 2018. 我国登陆热带气旋引起的大陆地面风场分布 [J]. 大气科学, 42 (1): 96−108. Liang Li, Cui Xiaopeng, Wang Chengxin, et al. 2018. Characteristic distribution of surface winds associated with landfalling tropical cyclones in mainland China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 96−108, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1708.16224.

我国登陆热带气旋引起的大陆地面风场分布

梁莉[1, 2, 3, 4] 崔晓鹏[1, 2] 王成鑫[5] 白莉娜[6]

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴科学院重点实验室，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049
3 中国气象局公共气象服务中心，北京 100081
4 国家气象中心，北京 100081
5 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室，北京 100081
6 中国气象局上海台风研究所，上海 200030

摘 要 利用逐小时风速观测资料以及台风年鉴资料，分析了 2008～2014 年登陆我国大陆地区的 51 次热带气旋（TC）的地面风场分布特征，包括 TC 登陆期间大陆地面风场演变和大风分布特征、海岛站和内陆站的风速差异以及海拔对风力造成的影响等。结果表明：6 级及以上大风主要发生在距离 TC 中心 300 km 内、TC 强度达到台风（TY）以上时，并主要位于 TC 移动方向的右侧，尤其是右前象限；华南区 TC 风场分布主要由在此区域登陆的 TC（I 类）造成，较大风速区包括广东西南部沿海、雷州半岛附近和海南西部沿岸；华东区 TC 风场分布主要由在此区域登陆的 TC（II 类）造成，杭州湾出海口以及浙闽沿海是较大风速区；6 级及以上大风广泛分布在华南和华东沿海，6～7 级地面大风高频站主要位于杭州湾附近，8 级及以上地面大风高频站点在杭州湾和福建沿海分布比广东西南部更为密集；TC 登陆前后均可能造成大风，大风出现时间与站点至 TC 中心的距离密切相关；同等强度 TC 在海岛站造成的风速比陆地站更大，对高海拔站点造成的风力大于低海拔站点。本文研究结论对于 TC 大陆地面风场的预报具有一定参考价值。

关键词 登陆热带气旋 大陆地面风场分布 大风频数 风速演变
文章编号 1006-9895(2018)01-0096-13 **中图分类号** P425 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1708.16224

Characteristic Distribution of Surface Winds Associated with Landfalling Tropical Cyclones in Mainland China

LIANG Li[1, 2, 3, 4], CUI Xiaopeng[1, 2], WANG Chengxin[5], and BAI Lina[6]

1 *Key Laboratory of Cloud−Precipitation Physics and Severe Storms*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *Public Meteorological Service Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
4 *National Meteorological Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
5 *State Key Laboratory of Severe Weather*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081
6 *Laboratory of Typhoon Forecast Technique*, *Shanghai Typhoon Institute*, *China Meteorological Administration*, *Shanghai* 200030

Abstract Based on hourly wind observations in combination with the Chinese Tropical Cyclone (TC) Year Book,

收稿日期 2016-09-01；**网络预出版日期** 2017-08-30
作者简介 梁莉，女，1985 年出生，博士研究生，工程师，主要从事热带气旋大风统计和数值模拟、专业气象预报方法研究。E-mail: liangli@cma.cn
通讯作者 崔晓鹏，E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目 2015CB452804
Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2015CB452804)

characteristic distribution and evolution of surface winds associated with 51 landfalling TCs in mainland China in 2008–2014 and the frequency distribution of strong winds during the landing time are analyzed. Differences in wind speed between inland and island stations and the impact of altitude on wind speed are also investigated. Results show that strong winds exceeding the Beaufort scale 6 mainly occur within a radius of 300 km from the TC center when the TC intensity reaches the level of typhoon (TY) or above. Such strong winds are mostly located on the right side of the moving direction of TC, especially in the right front quadrant divided by the center and moving direction of the TC. The distribution of surface winds in southern and/or eastern China is mainly associated with TCs that are classified as type I or II based on their landing locations. The region of large wind speeds in eastern China mainly includes the coastal region of southwestern Guangdong, the coastal portion of Leizhou Peninsula and western Hainan, while that in southern China mainly includes the Hangzhou Bay and the coastal region of Zhejiang and Fujian. Stations where the wind-force ranges from the Beaufort scale 6 to 7 are mainly located around the Hangzhou Bay. Stations where wind-force could exceed the Beaufort scale 8 are more densely distributed in the Hangzhou Bay and coastal area of Fujian than in the coastal region of southwestern Guangdong. Strong winds may occur before or after TC landfall, and the time of occurrence is highly related with the distance between the observational station and TC center. For TCs with the same intensity, the wind speed is lager at island stations than that at inland stations, and stronger at high altitude stations than at low altitude stations. The conclusions of this study have valuable implications for surface wind forecast of TC.

Keywords Landfalling tropical cyclones, Distribution of surface wind in Mainland China, Frequency of strong wind, Wind speed evolution

1 引言

我国是世界上热带气旋（Tropical Cyclone，简称 TC）登陆最多，受影响最为严重的国家（陈联寿等，2002）。TC（尤其是登陆 TC）可带来大风、暴雨和风暴潮，引发严重灾害。TC 造成的暴雨一直是大气科学界关注的研究热点和难点，而针对 TC 引起的风场分布和变化（尤其是具有较强致灾性的 6 级以上大风分布特征）的相关研究却十分缺乏。随着沿海 TC 大风主要影响区域经济的飞速发展以及观测手段的多样化、精细化，TC 风场（尤其是大风分布）特征和相关预报问题逐渐得到重视。已有研究中，对 TC 大风频数、极值时间和空间分布、周期变化等的气候学统计分析工作较多。梁必骐等（1993）利用 1949～1986 年资料，对影响和登陆珠江三角洲附近地区的台风及其造成的大风开展了统计分析，得到了一些可供业务预报参考的气候特征和统计关系。田辉等（1999）和乐群等（2000）分别利用不同时间序列的数据，分析了我国东部和南部沿海登陆台风引起的暴雨和大风分布特征，认为华东登陆台风造成的暴雨和大风不亚于华南。杨玉华和雷小途（2004）统计分析指出，引起我国境内大风天气的台风中，有 62%在我国登陆，而登陆我国的台风中，有 89%会引起大风过程。可见，TC（尤其是登陆 TC）引起的大风过程具有普遍性，其影响值得重视。此外，还有部分研究不仅分析了 TC 大风的统计特征，还进一步尝试分析其成因（何洁琳和管兆勇，2006；周惠文等，2007；董彦，2014；Ni et al.，2015）。针对 TC 大风预报问题，大多数研究（董美莹和俞燎霓，2006；曾欣欣等，2006；刘晓波等，2008；洪展等，2012）均指出，TC 大风的预报，除了要考虑 TC 自身因素外，还要考虑多系统、多因素之间的相互作用。

从以上简要回顾可以看出，TC 造成的风场变化（尤其是大风分布）已经逐渐得到重视，但以往相关研究以区域性气候特征、个例特征居多，而对登陆我国的 TC 风场变化和大风分布特征的整体研究偏少。本文利用高分辨率的地面观测资料结合台风年鉴资料，统计研究了 2008～2014 年登陆我国的 TC 造成的大陆地面风场分布特征，包括 TC 登陆期间的大陆地面风场演变和大风分布特征、海岛站和内陆站的风速差异以及海拔对风力造成的影响等。

2 所用资料简介

本文使用到的地面观测资料来自国家气象信息中心提供的 2008～2014 年我国国家级地面气象观测站（以下简称国家站，全国共 2417 站）和区域自动站（以下简称区域站，约 40000 站，包含海南岛的部分岛屿站，不含台湾岛以及浮标站）的 2 min 平均风速、极大风速，资料时间分辨率为 1 h。TC 相关资料取自中国气象局上海台风研究所整编的台风年鉴资料（Ying et al.，2014）。

应用上述资料，选取研究时段内（2008～2014 年）登陆我国大陆地区的共 51 次 TC 过程作为研究

对象，平均每年约 7.3 个。

3 距离 TC 中心 500 km 半径内大陆地面风场分布统计特征

根据所选 TC 个例逐 6 h 的中心位置，提取距离 TC 中心 500 km 半径内的所有观测站点，以这些站点对应时刻的 2 min 平均风速为样本，分析大陆地面风场分布统计特征。这里提取的样本所处的时间段包含 TC 登陆前和登陆后，由于观测站点均位于大陆和沿海岛屿，分析得到的结论仅为 TC 登陆前后大陆上呈现的地面风场特征，对于 TC 在登陆前海面上更完整的风场特征，则需要获取更丰富的海面观测资料来分析，这里不作讨论。

3.1 平均地面风速

将观测站点到 TC 中心的距离划分为 5 个区间（单位：km）：[0，100）、[100，200）、[200，300）、[300，400）、[400，500）；同时，将每一时刻的 TC 强度分为六个等级：热带低压（TD）、热带风暴（TS）、强热带风暴（STS）、台风（TY）、强台风（STY）以及超强台风（Super TY）。对每个圆环区域内所有观测站点的地面风速求平均。

由图 1 可以看出，当 TC 强度小于等于 STY 时，各半径内的平均地面风速均随 TC 强度的增大而增强，距离 TC 中心越近，增大趋势越明显，特别是距离 TC 中心 100 km 半径内，增大趋势最显著。当 TC 强度由 STY 增大到 Super TY 时，除了[0，100）以及[400，500）两个半径区域外，其他区域内的平均地面风速均随 TC 强度增大而减小，说明超强台风造成的地面大风更加集中在近TC中心附近。总体看来，距 TC 中心 200 km 范围内，平均地面风速要显著大于 200 km 外。当距离大于 200 km 后，各圆环区域内平均地面风速相差不大，最大不超过 3 m s^{-1}，平均地面风速随 TC 强度增大而增大的趋势也显著变缓。

3.2 各级别地面风速与距 TC 中心距离的关系

51 个 TC 登陆期间，距中心 500km 半径范围内，地面风速最强可达 12 级以上，但 11 级及以上的样本数明显少于其他风力级别（表 1），仅占 6 级及以上大风样本数（16173）约 0.73%，占 8 级及以上大风样本数（2570）约 4.6%。8 级及以上大风样本数也仅占 6 级及以上大风样本数（16173）约 15.9%。平均每个 TC 登陆期间，可造成约 317 个地面观测站出现具有潜在破坏性的 6 级及以上大风，约 50（7）个地面观测站出现 8（10）级及以上大风。

根据上述各级别地面风速样本分布特征（表 1），进一步将风速按级别划分为四个区间：5 级及以下、6～7 级、8～9 级、10 级及以上，对各风力区间内站点与 TC 中心的距离作盒须图分析(图 2)。

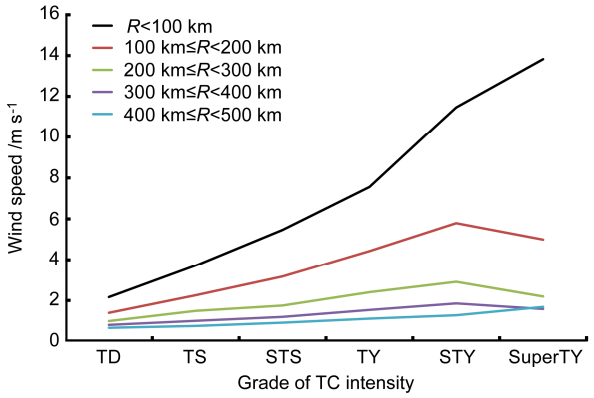

图 1 圆环区域内平均地面风速随热带气旋（TC）强度等级和距 TC 中心距离（R）而变化的折线图

Fig. 1 Distribution of average surface wind speed associated with the TC (tropical cyclone) intensity scale and radius (R) from the TC center

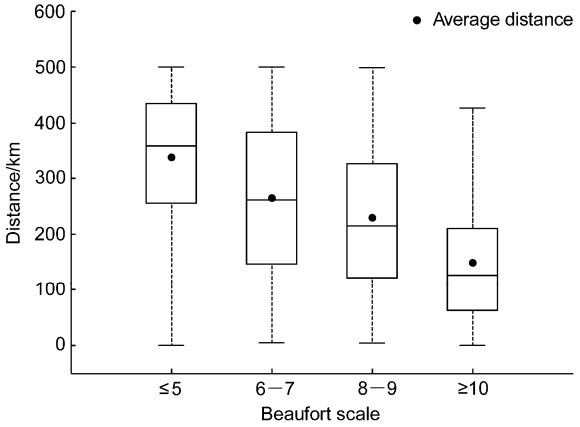

图 2 各级别地面风力的站点与 TC 中心距离的盒须图

Fig. 2 Box plot of surface winds at various Beaufort scales and distances from surface observational sites to TC center

表 1 2008～2014 年登陆我国大陆地区的 51 个热带气旋登陆期间距中心 500 km 范围内地面观测站风力分级及样本数

Table 1 Classifications and the sample numbers of wind from surface observational sites within 500km from TC centers of 51 TCs making landfall in mainland China in 2008–2014

风力等级	1～5 级	6 级	7 级	8 级	9 级	10 级	11 级	≥12 级
风速/m s^{-1}	≤10.8	(10.8, 13.9]	(13.9, 17.2]	(17.2, 20.8]	(20.8, 24.5]	(24.5, 28.5]	(28.5, 32.6]	>32.6
样本数	991217	9479	4124	1681	546	225	79	39

从距离平均值的大小来看，风力越强，距离 TC 中心越近（图 2）。出现 5 级及以下风速的站点距离 TC 中心的平均距离约为 337 km，而出现 6～7 级大风、8～9 级大风和 10 级以上大风的站点与 TC 中心的平均距离分别约为 265 km、230 km 和 149 km。结合盒须图的有效区间（第 25～75 百分位）可以看出，出现 5 级及以下、6～7 级、8～9 级、10 级及以上风速的站点大部分位于 256～435 km、146～384 km、121～327 km、62～210 km 范围内。

3.3　各级别地面风力的频数分布

对各风力区间的样本作频数分布图，分析样本在不同 TC 强度、不同方位（相对于 TC 移动方向）以及与 TC 中心不同距离的分布特征。在计算方位角时，以 TC 移动方向为起始线，逆时针旋转划分四个象限，即方位角由 TC 中心和 TC 移动方向决定（图 4e）。

从图 3 来看，距离 TC 中心越远，5 级及以下风力的样本越多，此类样本主要出现在 TC 等级小于 STS 的各个距离上，极值出现在 500 km 附近且 TC 强度为 TS 时。6～7 级大风发生频数比前一级别显著减少，主要发生在 200 km 附近且 TC 强度为 TY 时；在 500 km 附近，TC 强度为 TS 时还存在另外一个较小的极值中心。8～9 级大风主要发生在 200～300 km 附近且 TC 强度为 TY 时。10 级及以上大风主要发生在距 TC 中心 100～200 km 附近且 TC 强度处于 TY 或 STY 时。由此可见，随着风力增加，样本高频区对应的 TC 强度增大，且有向 TC 中心贴近的趋势；当 TC 强度达到 TY 以上时，6 级及以上大风发生频数最大。

从发生频数随方位和距离的分布来看（图 4），5 级及以下风力最多出现在 TC 移动方向前侧象限的 400～500 km，且在两个前侧象限的分布相当，这可能与本文仅使用了陆地观测数据有关；6～7 级风力主要发生在 300～500 km 附近，高频区位于 TC 移动方向的右前侧象限；8～9 级风力主要发生在右前侧象限的 200～300 km 附近；10 级及以上风力主要

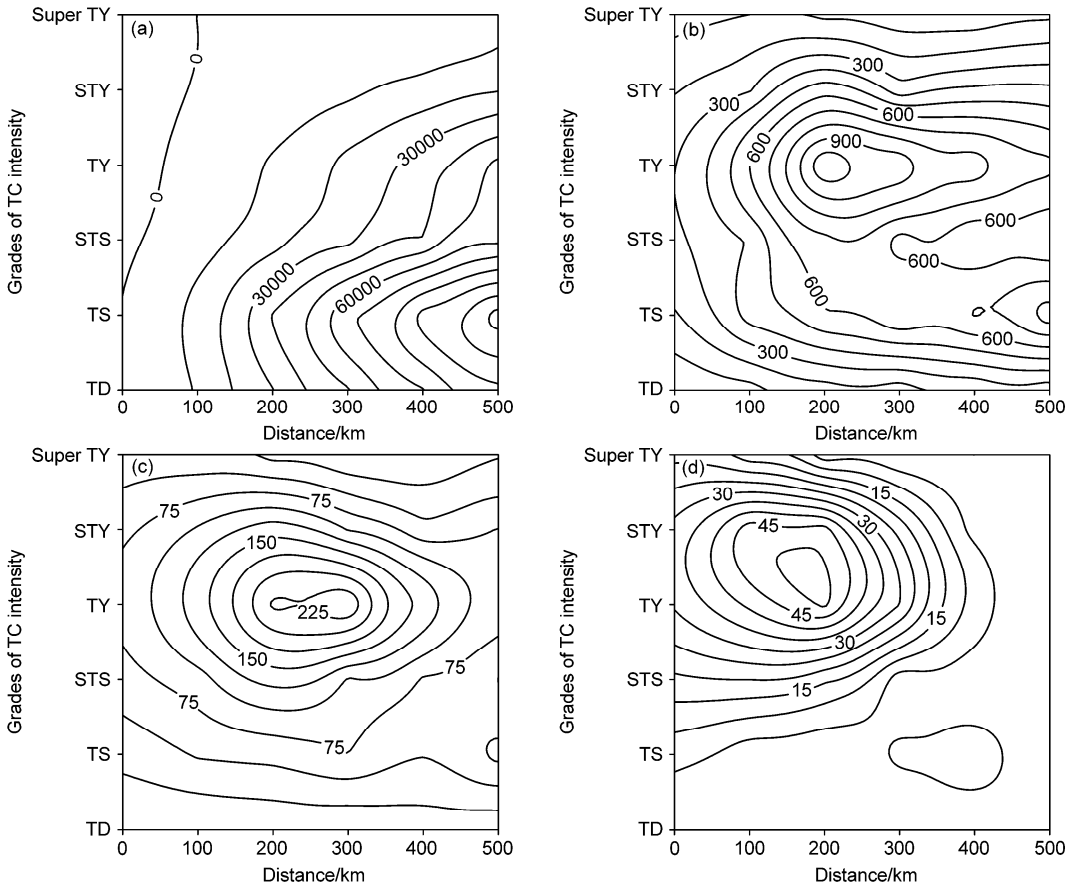

图 3　地面观测站点发生（a）5 级及以下、（b）6～7 级、（c）8～9 级和（d）10 级及以上风力的频数随距 TC 中心距离和 TC 强度的分布

Fig. 3　Relationships between frequency distributions of surface observation sites where wind speed (a) are below or equal to Beaufort scale 5, (b) reach the Beaufort scales 6 to 7, (c) reach the Beaufort scales 8 to 9, (d) reach or exceed the Beaufort scale 10 and their distances to the TC center as well as the TC intensity

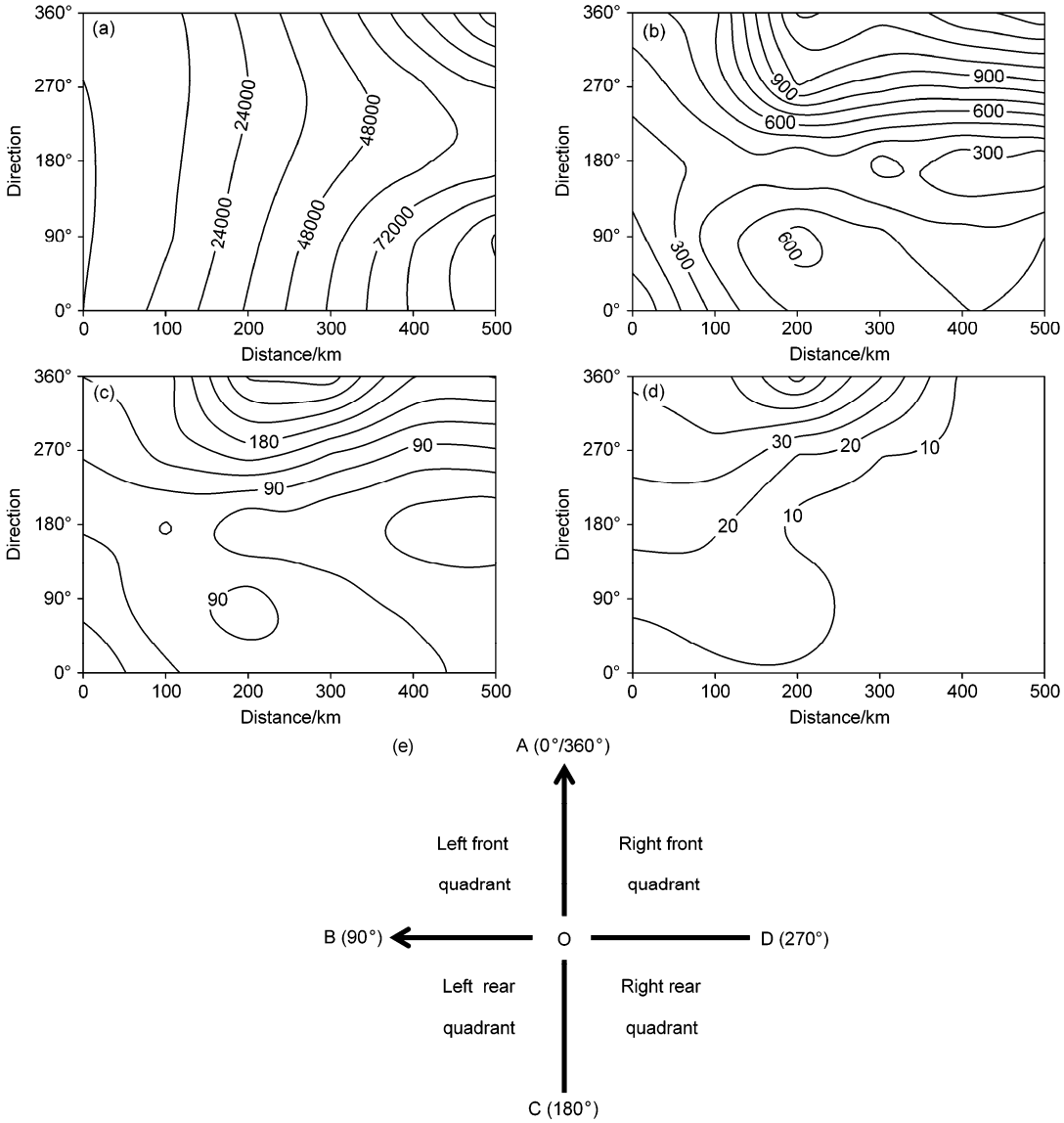

图 4 地面观测站点发生（a）5 级及以下、（b）6～7 级、（c）8～9 级和（d）10 级及以上风力的频数随距 TC 中心距离、方位的分布以及（e）方位角示意图（“O”为 TC 中心，“ $\overrightarrow{OA}$ ”为 x 轴正方向即 TC 移动方向，“ $\overrightarrow{OB}$ ”为 y 轴正方向，∠AOB= 90°）

Fig. 4 Relationships between frequency distributions of surface observation sites where wind speed (a) are below or reach the Beaufort scale 5, (b) reach the Beaufort scales6 to 7, (c) reach the Beaufort scales 8 to 9, (d) reach or exceed the Beaufort scale 10 and their distances to the TC center as well as the directions; (e) sketch map of directions determined by the TC center and TC moving direction (“O” represents for TC center, “ $\overrightarrow{OA}$ ” points the positive way of x direction and also TC moving direction, “ $\overrightarrow{OB}$ ”points the positive way of y direction, ∠AOB=90°)

发生在右前侧象限的 100～200 km 附近。可见，大风样本多位于 TC 移动方向的右前侧象限，这应与 TC 移动速度的叠加增大了移动方向右侧象限的风速有关，还与本文大部分使用的是陆地观测数据有关。

3.4 各级别风力站点的海拔分布

由于测站的海拔高度不均匀，高海拔与低海拔测站数量多少不一，加上与 TC 距离各不相同，很难得到 TC 造成的地面风力大小与海拔高度的具体关系。但从图 5 中有效区间的分布可以看出，6 级及以上大风主要发生在相对更为平坦的区域，这与登陆 TC 主要位于我国沿海相对平坦的地区有关，发生 5 级以下、6～7 级、8～9 级及 10 级及以上风力站点的海拔主要集中在 27～221 m、16～90.75 m、24～95.9 m、22～97 m 范围内。

由以上分析可知，TC 登陆期间的大陆地面风场（尤其是大风分布）与距 TC 中心距离、TC 强度和移动方向有一定关系，这种分布关系对于预报员开

展相关预报具有重要意义。

4　TC 登陆期间的大陆地面风场演变特征

根据 3.3 节分析可知，6 级及以上大风主要发生在距离 TC 中心 300 km 内，因此本节根据 TC 登陆前后 12 h 的位置，提取距中心 300 km 的站点进行分析（图略）。由于 TC 登陆后强度一般会急剧减弱，这些站点大部分位于华东和华南沿海省份，因此本节重点分析 TC 登陆前 12 h、6 h、3 h、登陆时（0 h，时间四舍五入）、登陆后 3 h、6 h、12 h，我国华东区和华南区平均地面风速分布特征及演变。其中，华东区包括上海、江苏、浙江、福建，华南区包括广东、广西、海南。

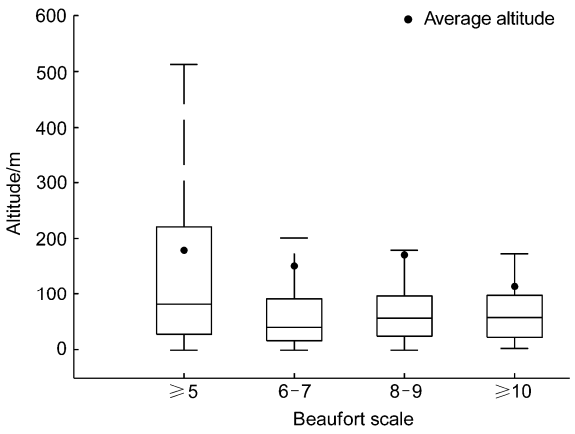

图 5　各级别风力地面观测站点海拔分布盒须图

Fig. 5　Box plot of altitude of surface sites with different Beaufort scales of winds

为了深入探究 TC 登陆地点以及登陆时强度与地面风速分布的关系，将 TC 中心位置由 6 h 插值为 1 h，根据登陆时间找到登陆地点的具体经纬度，并采用 K 均值聚类法对登陆点进行聚类，将 51 次 TC 的路径按照登陆点分为 5 类（图 6）。由于 III、IV、V 3 类 TC 样本量不足，因此下文只分析 I 和 II 两类 TC 造成的平均地面风速分布（表 2）。

结合 3.3 节的分析可知，达到台风及以上强度的 TC 造成的大风频数更多，将上述两类 TC 按登陆时强度进一步分为两类：台风及以上、台风以下，分别分析 TC 登陆期间平均地面风速分布和演变。

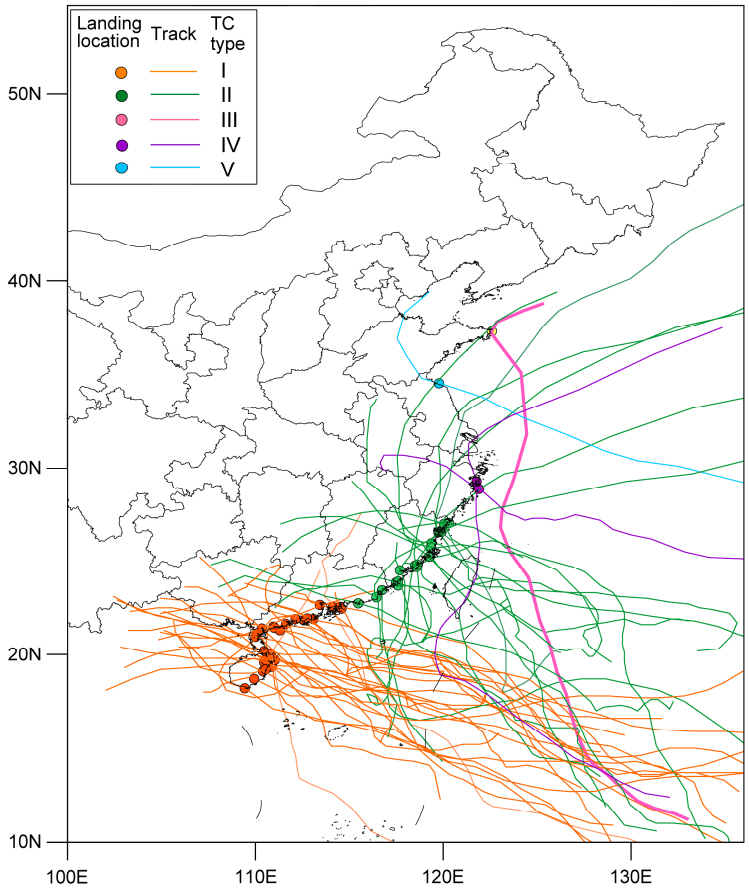

图 6　2008～2014 年登陆我国大陆地区的 TC 登陆点及路径

Fig. 6　TC Landing locations and tracks in mainland China during 2008–2014

表 2 I、II 类 TC 频数统计

Table 2 Statistics of frequency of typeI and type II TCs

类别	总数	按登陆时 TC 强度分类	
		台风及以上个数（占比）	台风以下个数（占比）
I 类	28	11（39%）	17（61%）
II 类	19	8（43%）	11（57%）

由图 6 可见，I 类 TC 登陆点集中在华南沿海。登陆期间，华南地区较大风速区主要位于广东西南部、雷州半岛、海南西部沿岸。其中，10 ms^{-1} 以上风速区集中分布在广东西南部沿海；平均地面风速随 TC 登陆一致呈现出先增后减的趋势。登陆时处于台风及以上强度的 TC 造成的强风区范围（图 7b1–b7）明显大于登陆时处于台风以下强度的 TC（图 7c1–c7）。可见，TC 强度是造成地面平均风力大小的重要因素。而海南西部和珠江三角洲附近的较强风速分布，与海南五指山地形以及珠三角附近相对平坦和低洼的地形可能有一定关系。II 类 TC 登陆期间，华南地区较大风速区主要位于广东潮州—汕尾一带（图略）。

从 I、II 类 TC 登陆期间华南地区平均地面风速分布和演变可以看出，登陆点不同会导致较大风速区位置不同，TC 强度越强，所造成的风力也越强。

图 8 中，II 类 TC 登陆期间，浙江—福建东部沿岸地区平均地面风速随 TC 登陆先增后减，江苏南部、杭州湾附近的较大风速区随 TC 登陆有较明显扩大。登陆时处于台风及以上强度的 TC 登陆期间在浙江—福建东部沿岸地区，造成的风速沿海岸线向内陆急剧减小。其中，福建宁德—浙江温州一带在登陆前 12 h 至登陆时平均风速达到 11 ms^{-1}。I 类 TC 登陆期间，华东区的江苏南部、杭州湾附近存在相对较大风速区（图略）。由于 I 类 TC 登陆点集中在华南区，因此，靠近华南的福建漳州沿岸平均风速较大，此外，福建九仙山附近受观测站点地势较高的影响仍然有一大值区。

以上分析表明，TC 登陆点和登陆时的强度均是影响地面平均风力强弱的重要因素：TC 登陆时强度越强，离登陆点越近，地面风力也越强。因此，对于登陆 TC 大风的预报，登陆点（包括路径）和登陆时刻的 TC 强度十分重要。

5 TC 登陆期间地面大风频数分布

上节分析给出了 TC 登陆过程中地面风速的平均特征，但防台减灾更为关注的是具有潜在破坏性和致灾性的 6 级及以上大风，因此，本节根据登陆前后 12 h 内逐小时观测的 2 min 平均风速分析 6～7 级、8～9 级、10 级及以上大风的累计频数分布（图 9）。

从图 9a 可看出，华南区、华东区沿海呈现出大片的 6～7 级地面大风高发区，山东半岛渤海湾沿海也有部分的大风分布。6～7 级大风频数最高站点主要位于杭州湾附近，分别为浙江舟山市大黄龙站 320 次、北鼎星站 320 次、海礁站 321 次、东亭站 330 次。除沿海附近地区外，内陆也有多处 6～7 级大风高频区，并在一定程度上受到观测站点海拔高度的影响。例如，福建九仙山站海拔 1653.5 m，6～7 级大风频数达 383 次；广西玉林北流大容山山顶站海拔 1256 m，达 335 次。

8～9 级地面大风频数（图 9b）较 6～7 级（图 9a）显著减少，华南区、华东区沿海仍然是高发区。其中，浙江南部沿海、海南北部的个别测站频数最高，福建九仙山仍是高频站。8～9 级地面大风频数大于 40 次的站点在杭州湾和福建沿海分布比广东西南部更为密集，这一特征在 10 级及以上大风频次分布中更显著（图 9c）。虽然本文选取的 TC 个例中，登陆华南沿海的 TC 个数（28 个，表 2）更多，但登陆时刻处于台风及以上强度的 TC 占比却是华东区更大（43%，表 2），这可能是造成上述分布差异的原因之一，这需要未来更多个例的进一步验证。此外，登陆期间 TC 尺度的大小也可能有一定影响。

6 TC 登陆期间代表站点的风速演变特征

前述分析表明，大风主要出现在沿海和岛屿站，对于内陆站点，其海拔高度对风力有一定影响，但这种影响到底有多大，还需要针对具体站点进行分析。基于前文的结果，选取福建九仙山（海拔 1653.5m）与邻近的低海拔站点安溪（海拔 69 m）进行对比，分析海拔对风力造成的可能影响。另选取位于南海的广东上川岛站（海拔 21.9 m）与陆地站茂名（海拔 33.5 m）进行对比，分析海陆差异的可能影响。

为两组站点挑选的 TC 个例分别为：在福建登陆的 1003 号台风“灿都”、1311 号强台风“尤特”；在广东登陆的 0808 号台风“凤凰”、1011 号台风“凡亚比”。图 10 和图 11 为两组站点处于登陆时间前后 12 h 且距离 TC 中心 500 km 范围内时的风速变化序

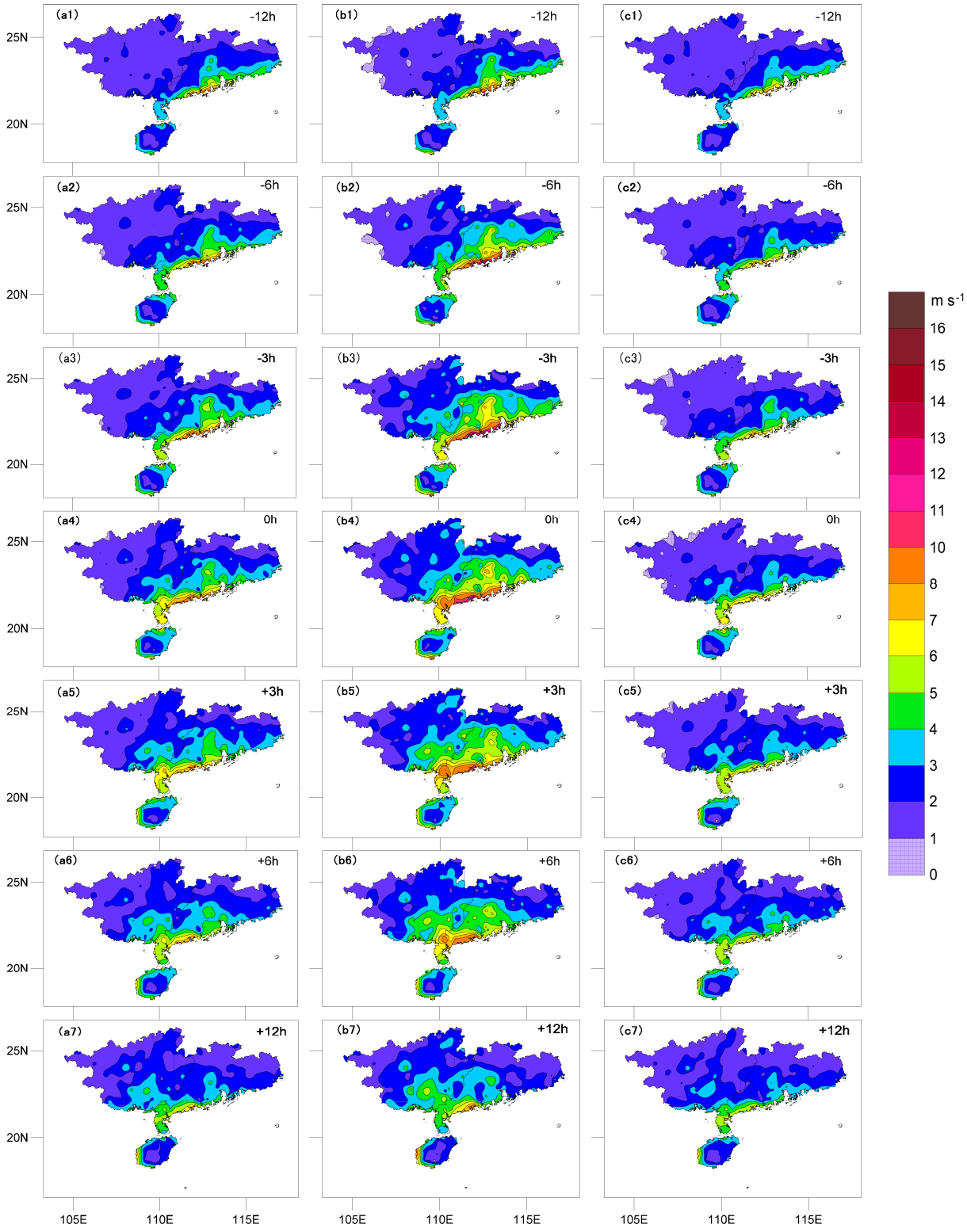

图 7 全部（左列）、登陆时强度为台风及以上级别（中间列）和登陆时强度为台风以下级别（右列）的 I 类 TC 登陆期间华南地区平均地面风速分布及演变

Fig. 7 Distributions and evolutions of average surface wind speed in South China during the landing period for all the type I TCs (left column), for type I TCs with intensity reaching or exceeding the typhoon intensity (middle column), and for type I TCs with intensity weaker than typhoon intensity (right column)

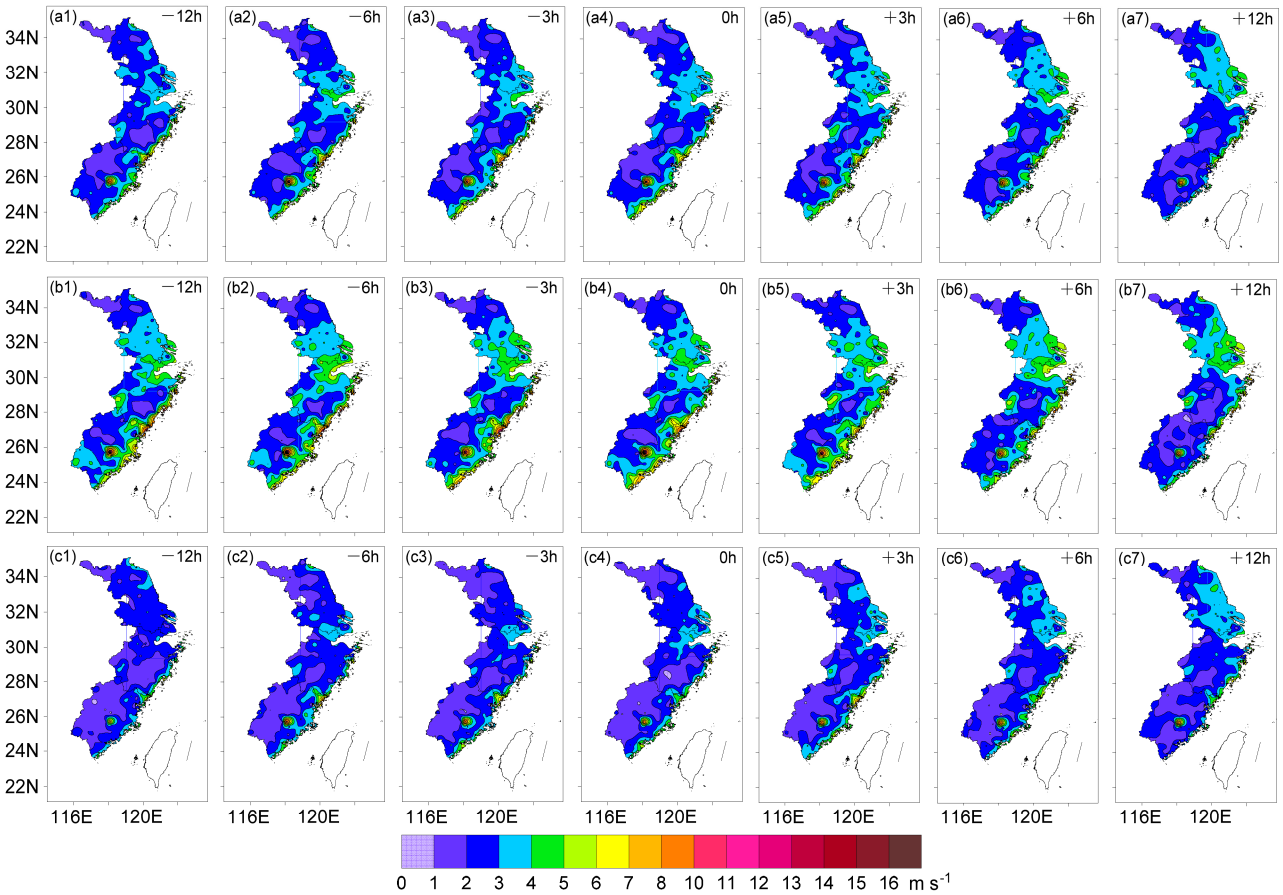

图 8 全部（第一行）、登陆时强度为台风及以上级别（第二行）和登陆时强度为台风以下级别（第三行）的 II 类 TC 登陆期间华东地区平均地面风速分布及演变

Fig. 8 Distributions and evolutions of average surface wind speed in East China during the landing period for all the type II TCs (the first line), for type II TCs with intensity reaching or exceeding the typhoon intensity (the second line), and for type II TCs with intensity weaker than typhoon intensity (the third line)

列图。距离和方位角的计算方法与第 2 节相同，时间分辨率为 6 h；风速包含整点时刻的 2 min 平均风速和极大风速，时间分辨率为 1 h。

台风“灿都”在登陆前 12 h 至 6 h 期间（图 10a，7 月 21 日 18:00 至 22 日 00:00（协调世界时，下同），上川岛和茂名站位于 TC 移动方向右侧且距离 TC 中心 200 km 左右，所处方位与距离基本一致，图 10 明显可以看出上川岛站的风速整体大于茂名站。在此期间，上川岛和茂名站的 2 min 平均风速（极大风速）平均值分别为 10.5 m s^{-1}（20.9 m s^{-1}）和 4.0 m s^{-1}（9.2m s^{-1}），可以看出，同等强度 TC 在海岛站造成的风速比陆地站大。

图 10 中明显可以看出，两站风速趋势均呈现出与距离趋势相反的规律，且均在距离最近时风速达到最大。以图 10b 为例，上川岛的 2 min 平均风速（极大风速）在登陆前 5 h 达到最大，位于移动方向右侧且距离 TC 中心 100 km 左右；茂名站的 2 min 平均风速（极大风速）在登陆后 1 h（3 h）达到最大，位于移动方向左侧且距离 TC 中心 100 km 左右。可见，两个测站的最大风速均出现在受 TC 内核区影响期间。

由于九仙山和安溪站距离较近，两站相对于 TC 的距离和方位角基本一致（图 11）。台风“凤凰”登陆期间，九仙山和安溪站的 2 min 平均风速（极大风速）平均值分别为 12.5 m s^{-1}（19.6 m s^{-1}）和 2.5 m s^{-1}（6.2 m s^{-1}）；台风“凡亚比”登陆期间，九仙山和安溪站的 2 min 平均风速（极大风速）平均值分别为 19.9 m s^{-1}（30.7 m s^{-1}）和 4.4 m s^{-1}（11.9 m s^{-1}）。可见，在距离、方位基本一致的条件下，高海拔站点风速远大于低海拔站点。

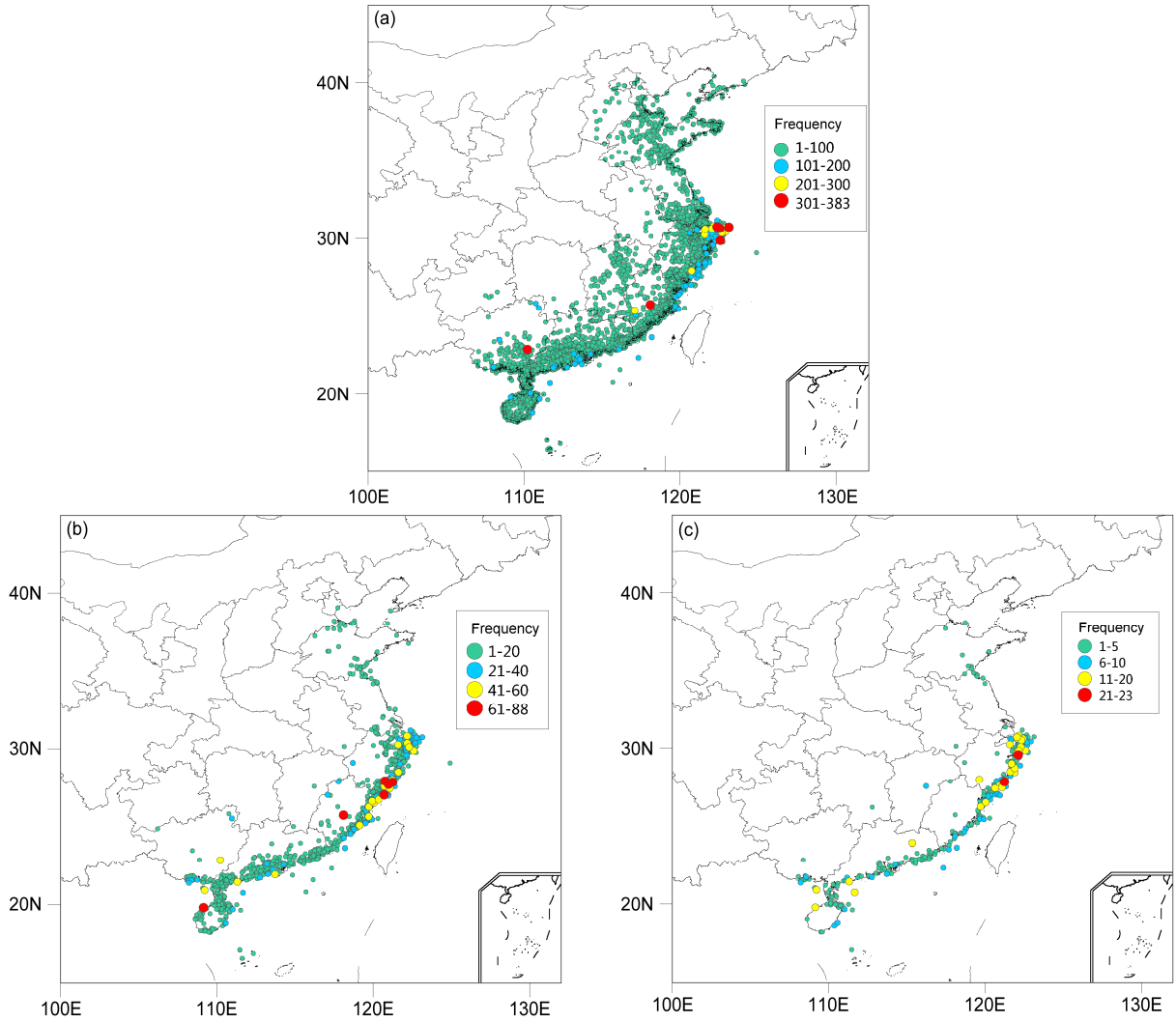

图 9 TC 登陆前后 12h 距离 TC 中心 300km 站点（圆点）的大风频数分布：（a）6～7 级；（b）8～9 级；（c）10 级及以上

Fig. 9 Frequency distributions of winds (a) at Beaufort scales 6 to 7, (b)at Beaufort scales 8 to 9, (c)at or above the Beaufort scale 10 respectively based on observations from sites (dots) within 300km from the TC center during the period from 12 h before to12h after the landing of TCs

虽然在 TC 登陆期间所处的距离、方位角都基本一致，两站的风速演变仍然有差异。以图 11a 为例，除了风速远大于安溪站外，九仙山站大风的持续时间从登陆前一直持续到登陆后 4 h（7 月 28 日 18:00）。安溪站在台风登陆期间风速一直较小。另外，两站风速衰减的时间也不一致。九仙山站在登陆后 4 h，与 TC 距离降到 100 km 左右后，风速反而急速降低，这可能与站点进入了台风风眼区以及台风登陆后的迅速减弱有关；安溪站在 TC 登陆前 2 h（7 月 28 日 12:00），距离降到 100 km 左右后，风速就明显降低，比九仙山提前衰减，这也与站点进入台风风眼区有关。

7 结论与讨论

本文利用 2008～2014 年我国国家站及区域自动站的逐小时实测风速资料以及中国气象局上海台风所整编的台风年鉴资料，分析了登陆我国大陆地区的 51 次热带气旋的大陆地面风场分布和演变，主要结论如下：

（1）总体上，距离 TC 中心越近，TC 强度越强，平均地面风速越大。距离 TC 中心 100 km 范围内，TC 强度为 Super TY 时，平均地面风速最大；发生 6～7 级、8～9 级和 10 级及以上大风的观测站点距 TC 中心的平均距离分别为 265、230 和 149 km；6

级及以上大风主要发生在距离 TC 中心 300 km 内、TC 强度达到 TY 以上时，并主要位于 TC 移动方向的右侧象限，尤其是右前象限。

（2）平均大陆地面风场分布与 TC 登陆点、路径和登陆时强度有紧密的关系。本文关注的 51 个 TC 登陆点绝大多数位于我国华东和华南沿海，且登陆时处于较强强度（台风及以上强度）的个例约占 40%。华南区 TC 风场分布主要由在此区域登陆的 TC（I 类）造成（共 28 次），较大风速区主要包括广东西南部沿海、雷州半岛附近和海南西部沿

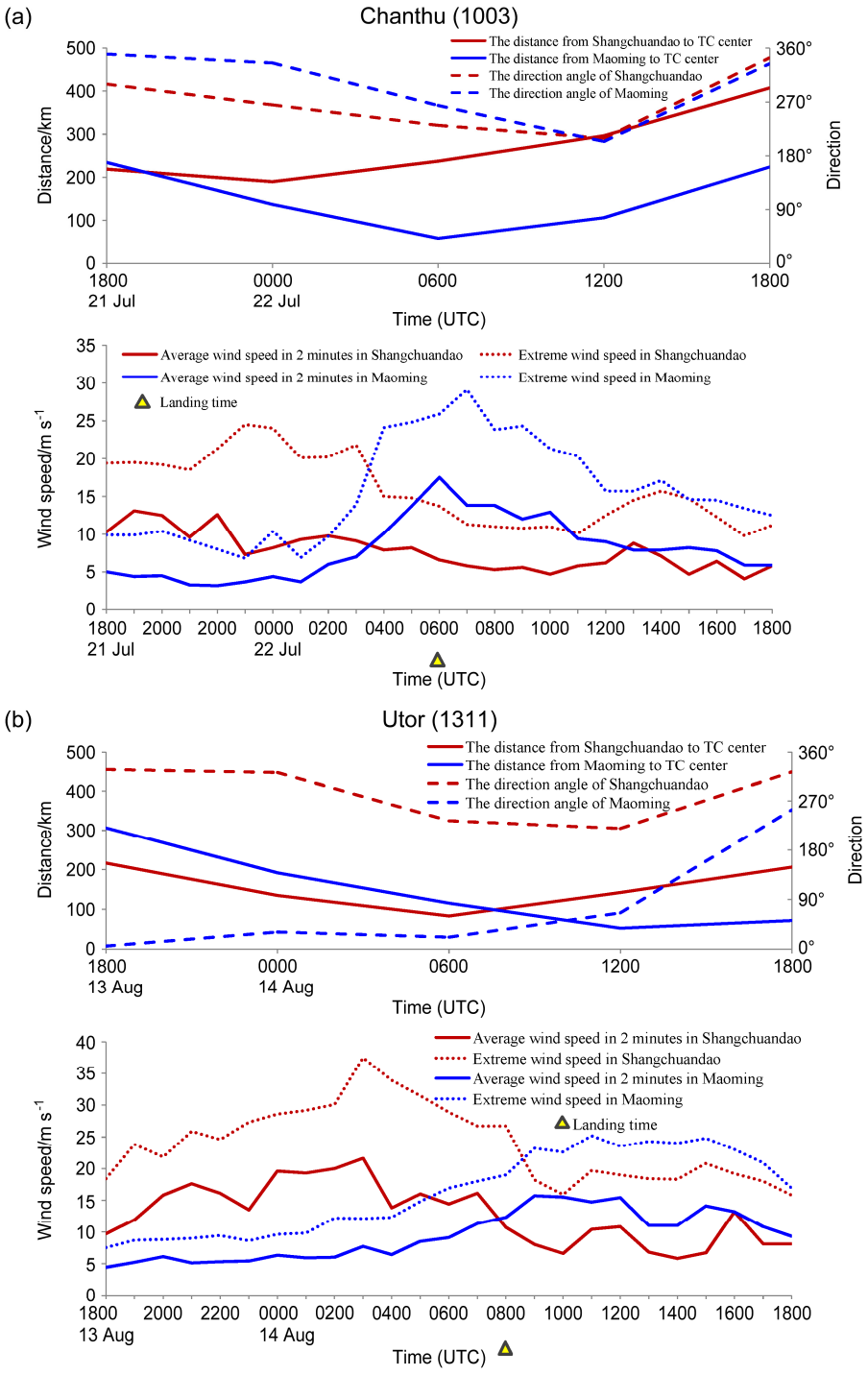

图 10　TC 登陆期间广东上川岛站和茂名站风速的演变：（a）1003 号“灿都”；（b）1311 号“尤特”

Fig. 10　Wind speed evolutions at sites Shangchuandao and Maoming in Guangdong Province during the landing periods of typhoons (a) “Chanthu (1003)” and (b) “Utor (1311)”

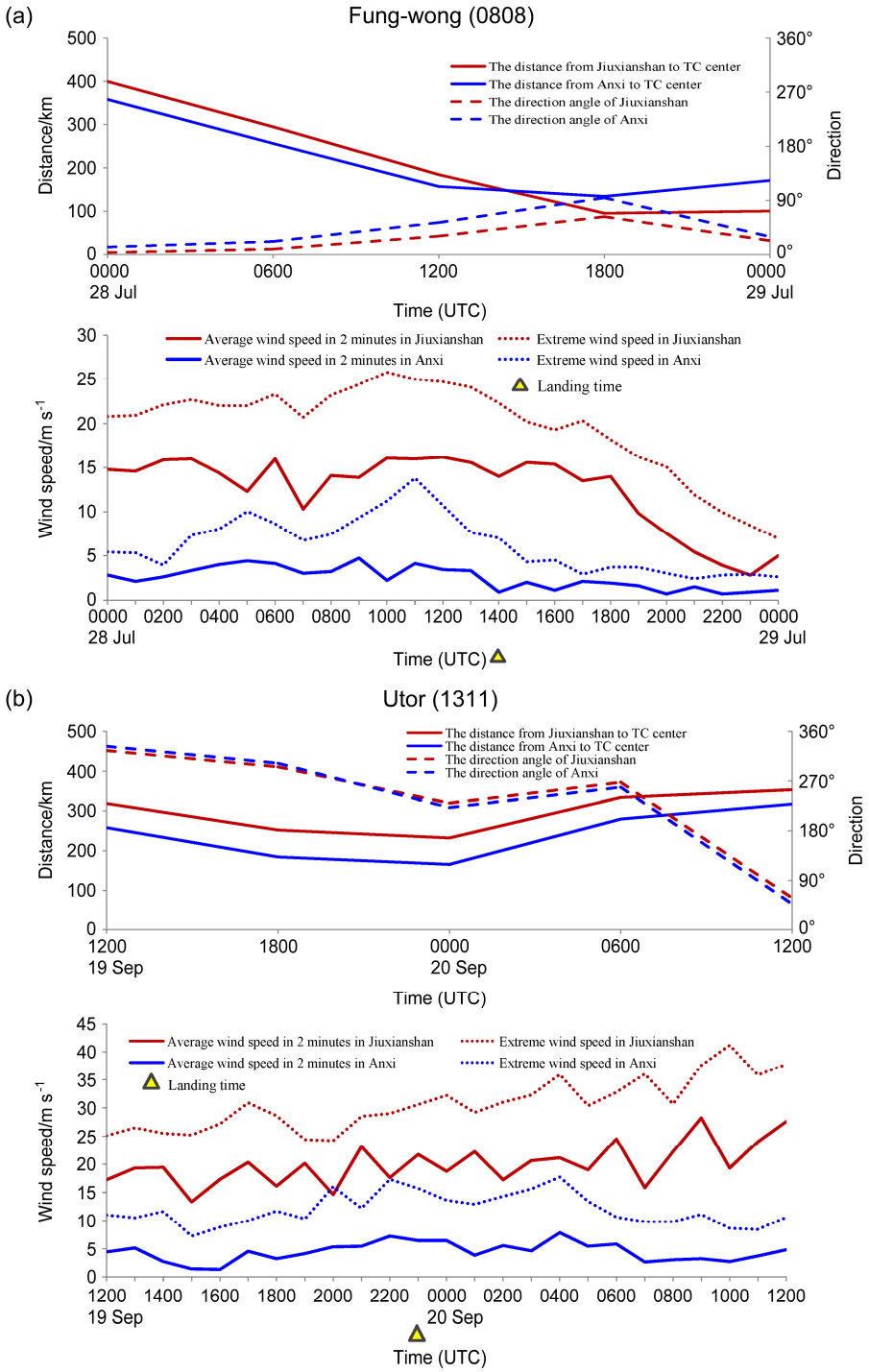

图 11 TC 登陆期间福建九仙山站和安溪站风速演变图：（a）0808 号“凤凰”；（b）1011 号“凡亚比”

Fig. 11 Wind speed evolutions at sites Jiuxianshan and Anxi in Fujian Province during the landing periods of typhoons (a) “Fung-wong (0808)” and (b) “Fanapi (1011)”

岸，且随着登陆进程呈现明显演变，随 TC 登陆先增强后减弱；华东区 TC 风场分布主要由在此区域登陆的 TC（II 类）造成（共 19 次），杭州湾出海口以及浙闽沿海是较大风速区。TC（I 类和 II 类）登陆时处于台风及以上强度的 TC 造成的平均地面风速分布范围明显大于登陆时处于台风以下强度的 TC。

（3）6 级及以上大风广泛分布在华南和华东沿海，

6～7 级大风高频站主要位于杭州湾附近，8 级及以上大风高频站点在杭州湾和福建沿海分布比广东西南部更为密集。这可能与本文所选择的华东区登陆 TC 个例中，登陆时强度较强的个例占比偏多有关。

（4）从代表站点的分析可知，TC 登陆前后均可能造成大风，大风出现时间与站点至 TC 中心的距离密切相关。代表站点的风速演变说明同等强度 TC 在海岛站造成的风速比陆地站更大。对于同处于大陆的站点来说，在距离、方位基本一致的条件下，同等强度的 TC 对高海拔站点造成的风力大于低海拔站点。

本文的研究显示，在登陆 TC 的大风业务预报中，应更关注 TC 中心（包括登陆点和路径）、TC 强度对大风分布和演变的影响。全文分析得到的登陆 TC 大陆地面风场的分布特征和演变规律对于 TC 风场预报具有一定借鉴意义，借助 TC 路径主观预报水平、精细化数值预报技术以及订正技术的不断进步，将有利于预报员做出更好、更精细化的 TC 风场预报。值得指出的是，本文仅仅选取了近 7 年登陆我国大陆地区的 51 次 TC 个例，所得结论需结合未来更多个例进行检验。同时，受观测资料获取等的限制，我国台湾省受 TC 大风影响的情况以及未在我国登陆但对沿海地区造成影响的 TC 个例均未在分析之列，这些都需要未来进一步分析和完善。

参考文献（References）

陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等. 2002. 热带气旋动力学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 2002. 19–21. Chen Lianshou, Xu Xiangde, Luo Zhexian, et al. 2002. An Introduction to Tropical Cyclone Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press,2002. 19–21.

董美莹, 俞燎霓. 2006. “麦莎”台风影响期间浙江的大风分布特征和成因分析 [J]. 科技导报, 24 (4): 29–32. Dong Meiying, Yu Liaoni. 2006. Study on Matsa’sgale characteristics occurred in Zhejiang Province and their formation [J]. Science & Technology Review (in Chinese), 24 (4): 29–32, doi:10.3321/j.issn:1000-7857.2006.04.008.

董彦. 2014. 广西热带气旋大风的分布特征及预报研究 [D]. 南宁: 广西师范学院硕士学位论文, 65pp. Dong Yan.2014. Research on distribution characteristics and forecast for tropical cyclone gale in Guangxi [D]. M. S. thesis (in Chinese), Guangxi Teachers Education University, Nanning, 65pp.

何洁琳, 管兆勇. 2006. 桂东南热带气旋大风的统计特征及典型个例研究 [J]. 热带气象学报, 22 (2): 184–191. He Jielin, Guan Zhaoyong. 2006. A study on the gale events caused by tropical cyclones in south–eastern Guangxi [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (2): 184–191, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.02.011.

洪展, 胡勇林, 梁毅进. 2012. 强台风“黑格比”造成桂东南大风浅析 [J]. 气象研究与应用, 33 (1): 13–15, 20. Hung Zhan, Hu Yonglin, Liang Yijin. 2012. Analysis on the southeastern Guangxi gale caused by strong typhoon “Hagupit” [J]. Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese), 33 (1): 13–15, 20, doi:10.3969/j.issn.1673-8411.2012.01.004.

乐群, 董谢琼, 马开玉. 2000. 西北太平洋台风活动和中国沿海登陆台风暴雨及大风的气候特征 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 36 (6): 741–749. Yue Qun, Dong Xieqiong, Ma Kaiyu. 2000. Climatic characteristics of northwestern Pacific typhoon activity and Chinese coastal landfall typhoon rain and gale [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 36 (6): 741–749, doi:10.3321/j.issn: 0469-5097.2000.06.011.

梁必骐, 梁少卫, 梁经萍. 1993. 珠江三角洲台风大风的统计特征 [J]. 中山大学学报论丛, (1): 75–81. Liang B, Liang Shaowei, Liang Jingping. 1993. Statistical features of the typhoon gale in the Delta of Pearl River [J]. Supplement to the Journal of Sun Yatsen University (in Chinese), (1): 75–81.

刘晓波, 邹兰军, 夏立. 2008. 台风罗莎引发上海暴雨大风的特点及成因 [J]. 气象, 34 (12): 72–79. Liu Xiaobo, Zou Lanjun, Xia Li. 2008. Analysis on the characteristics andreason of heavy rain and strong wind in Shanghai caused by typhoon Krosa [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (12): 72–79, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.12.009.

Ni X, Zhang Q H, Ma D, et al. 2015.Climatology and trends of tropical cyclone high wind in mainland China: 1959–2011 [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 120 (24): 12378–12393, doi:10.1002/2015JD024031.

田辉, 马开玉, 林振山. 1999. 华南、华东沿海登陆台风暴雨和大风的分析 [J]. 应用气象学报, 10 (S1): 148–152. Tian Hui, Ma Kaiyu, Lin Zhenshan.1999. Analysis of the heavy rain and strong wind of landing typhoon on the coasts of South and East China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 10 (S1): 148–152, doi:10.3969/j.issn. 1001-7313.1999.z1.018.

杨玉华, 雷小途. 2004. 我国登陆台风引起的大风分布特征的初步分析 [J]. 热带气象学报, 20 (6): 633–642. Yang Yuhua, Lei Xiaotu. 2004. Statistics of strong winddistribution caused by landfall typhoon in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (6): 633–642, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2004.06.003.

Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China Meteorological administration tropical cyclone database [J].J. Atmos. Oceanic Technol., 31 (2): 287–301, doi:10.1175/JTECH-D-12-00119.1.

曾欣欣, 吕静, 沈翊. 2006. 0515 台风“卡努”影响浙江的强风分析 [J]. 海洋预报, 23 (4): 13–20. Zeng Xinxin, LüJing, Shen Yi. 2006. Analysis on strong wind caused by landing typhoon 0515 in Zhejiang [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 23 (4): 13–20, doi:10.3969/j.issn. 1003-0239.2006.04.002.

周惠文, 陈冰廉, 苏兆达, 等. 2007. 广西台风灾害性大风的气候特征 [J]. 灾害学, 22 (1): 13–17. Zhou Huiwen, Chen Binlian, Su Zhaoda, et al. 2007. Characteristics of disastrous gale in Guangxi [J].Journal of Catastrophology (in Chinese), 22 (1): 13–17, doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2007.01.003.