薛霖，李英，王丙兰，等. 2018. 海南岛附近区域热带气旋低层风场的变化特征 [J]. 气候与环境研究, 23 (3): 299−310. Xue Lin, Li Ying, Wang Binglan, et al. 2018. Characteristics of tropical cyclone-induced low-level wind fields over Hainan [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (3): 299−310, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17180.

海南岛附近区域热带气旋低层风场的变化特征

薛霖[1, 2]　李英[1]　王丙兰[3]　周荣卫[3]

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室，北京 100081
2 南京信息工程大学，南京 210044
3 中国气象局公共气象服务中心，北京 100081

摘　要　利用 1979～2015 年 JTWC（Joint Typhoon Warning Center）最佳路径资料（2001～2015 年资料用于台风风圈结构分析）及 ERA-interim（0.5°×0.5°）再分析数据，统计分析我国海南岛附近区域（15.5°N～23.5°N，106°E～116°E）热带气旋（Tropical Cyclone，简称 TC）低层风场的变化特征。结果表明：（1）年均 5.5 个 TC 于 4～12 月主要以西偏北路径进入该区域，其中海南岛东南侧海域 TC 出现频率最高且强 TC 比例最多，而岛西北区域出现频率最低，强 TC 比例最少。（2）TC 中心位于海南岛不同方位时，其外围低层风场分布具有不同的非对称特征，且大风出现比率也各有差异；TC 中心位于海南岛上时出现大风比率最高，位于岛南侧时次之，位于岛北侧时最小。（3）该区域 TC 平均最大风速半径（RMW）为 58.3 km；TC 位于岛上时 RMW 最大，而位于岛西南侧最小。（4）TC 近中心最大风速由海上向陆地急剧减小，其高值中心主要位于雷州半岛东侧及西侧海域。（5）研究区域内 TC 的 34 节风圈半径在 TC 环流的东侧大而西侧小，强 TC 大而弱 TC 小。（6）不同区域 TC 变形程度有所差异。平均而言，位于岛西南侧 TC 变形最大而位于岛东南侧时变形最小。

关键词　热带气旋　低层风场　风圈半径　海南岛

文章编号　1006-9585（2018）03-0299-12　　**中图分类号**　P444　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17180

Characteristics of Tropical Cyclone-Induced Low-Level Wind Fields over Hainan

XUE Lin[1, 2], LI Ying[1], WANG Binglan[3], and ZHOU Rongwei[3]

1*State Key Laboratory of Severe Weather*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081
2 *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044
3 *Public Meteorological Service Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract　Using the tropical cyclone best track dataset from the Joint Typhoon Warning Center (JTWC) and the ERA-Interim reanalysis data on global 0.5°×0.5° grids from 1979 to 2015, characteristics of low-level winds around tropical cyclones (TC) over Hainan (15.5°N–23.5°N，106°E–116°E) are statistically analyzed. Results are as follows. (1)

收稿日期　2017-09-04；**网络预出版日期** 2017-12-19

作者简介　薛霖，女，1990 年出生，博士研究生，主要从事热带气旋研究。E-mail: linxue.icy@gmail.com

通讯作者　李英，E-mail: yli@cma.gov.cn

资助项目　国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目 2015CB452804，国家自然科学基金项目 41475055、51778617、41775048，科技基础性工作专项 2013FY112400

Funded by　National Basic Research Program of China (973 Program)(Grant 2015CB452804), National Natural Science Foundation of China (Grants 41475055, 51778617, and 41775048), National Basic Task Program of the Ministry of Science and Technology (Grant 2013FY112400)

On average, annually there are 5.5 TCs entering the study region during April to December. Most of the TCs occur over the ocean to the southeast of Hainan and their intensities are stronger than those occurred to the northwest of Hainan. (2) When the TC centers are located at different quadrants of the island, the low-level wind fields in the TC periphery have different asymmetric features and high wind occurrence frequencies. The strong wind occurrence frequency is the highest when TC centers are located at the island, followed by that when the TC centers are located to the south of the island, and the occurrence frequency is the lowest when the TC centers are located to the north of the island. (3) Radiuses of the maximum wind (RMW) for TCs around Hainan are within the range of 9–185 km and the averaged value is 58.3 km. On the average, the RMWs of TCs located at the island (to the southwest of the island) are the biggest (smallest). (4) The maximum wind speeds near the TC centers sharply decrease from the ocean to the land for all TCs. And high wind speed regions are located at oceanic areas to the west and east of Leizhou Peninsula. (5) The 34-kts wind radiuses on the eastern side of the TCs are larger than that on the western side. And the stronger the TC is, the larger and more symmetry its specific wind radius will be. (6) Different regions have different degrees of wind circle deformation. On average, when the TC is located to the southwest (southeast) of the island, its wind circle experiences the largest (least) deformation.

Keywords Tropical cyclone, Low-level wind field, Radius of specific wind circle, Hainan

1 引言

热带气旋（TC）是影响我国的主要灾害性天气系统之一，其灾害主要包括暴雨、大风及风暴潮。其中台风大风是一个重要的致灾因子，其不仅对暴雨和风暴潮灾害推波助澜，还可直接对沿海渔业、农业、航海运输以及工程设施等造成威胁。随着我国沿海经济建设高速发展及人口迅速增多，台风大风的致灾风险不断攀升，对防灾减灾能力提出更高要求。海南岛作为我国南海最大的岛屿，其面向东南亚，连接北部湾，背靠华南腹地，是我国重要的海上航运中心，固守南海的战略咽喉，海洋资源开发的重要基地。同时，海南岛及其周围海域也是 TC 影响的重灾之地，是我国 TC 袭击率最高的区域（魏娜等，2013）。台风大风给该区域的海上运输、近海工程建设、沿海养殖业等带来严重威胁。本文研究海南岛及其周围海域台风大风影响，可为 TC 大风预报提供参考，对防灾减灾具有重要意义。

统计研究表明，我国 TC 大风的时空分布较不均匀（杨玉华和雷小途，2004；Ni et al.，2015；陆逸等，2016），主要发生于我国 105°E 以东的东部沿海地区，尤其是山东半岛以南的沿海地区。并具有显著的季节性变化特征，4～8 月 TC 大风影响范围不断北推，9～11 月逐渐南退。东南沿海观测站观测的最大台风风速均可达 20.8 m s^{-1} 以上，而内陆地区的最大风速则小于该值（Ni et al.，2015）。台风大风灾害主要在低层 TC 入流层内发生，且存在一定非对称性。TC 最大风速一般位于其移动方向的右侧（Hughes，1952；Miller，1967）。当 TC 移动过程中遇到岛屿或登陆时，下垫面粗糙度的改变可对 TC 低层风场造成影响，使其更为复杂多变（陈联寿等，2004）。我国海岸线复杂，且近海有台湾岛及海南岛两大岛屿以及西沙群岛、南沙群岛等诸多群岛。复杂地形可在台风环流内诱生低压、TC 前部可产生地形辐合性飑线、雷暴、龙卷等天气系统，引发台风大风灾害（沈树勤，1990；陈联寿等，2004；Meng and Zhang，2012）。如 TC 在接近台湾岛过程中，可在岛屿附近诱生出涡旋，造成风场的非均匀性分布（Meng et al.，1996；Wu，2001；Hsu et al.，2013；Tang and Chan，2014；薛霖等，2015；Wu et al.，2015；薛霖和李英，2016）。台湾地形阻挡造成的“角流”及海峡的“开通道流”还可使台湾海峡低层出现偏北急流。海峡效应产生的低层喷流通过平流作用可将台风大风区移至眼墙西侧，造成 TC 的非对称风场（Jian and Wu 2008；Huang et al.，2011；Yeh et al.，2012；胡姝等，2014）。海南岛地形也可在 TC 环流中激发出中小尺度涡旋，使 TC 局部环流增强（段丽等，2006；冀春晓等，2007）。可见在复杂下垫面环境下，TC 低层风场复杂多变。

但由于观测条件所限，海上台风大风的观测和积累较少，缺少多样本统计结果。本文利用 1979～2015 年 ERA-interim 再分析数据及美国联合台风预警中心（Joint Typhoon Warning Center，简称 JTWC）台风最佳路径资料，统计分析海南岛及附近区域 TC 低层风场变化特征，包括 TC 位于海南岛不同方位时其外围低层风场的水平分布、强风出现比率以及近台风中心最大风速、最大风速半径以及风圈半径等，为该区域尤其是观测稀少海域的台风大风预报和防御提供参考。

2 资料与方法

使用 1979～2015 年 JTWC 发布的最佳路径资料。该资料包括每 6 h 一次的 TC 中心位置、近中心最低海平面气压值、最大风速（1 分钟平均）、热带气旋等级[根据 JTWC 的 TC 等级划分标准，10.8～17.1 m s^{-1} 为热带低压（TD），17.2～32.6 m s^{-1} 为热带风暴（TS），32.7～66.4 m s^{-1} 为台风（TY），大于等于 66.5 m s^{-1} 为超级台风（Surper TY）]等信息。自 2001 年起，该数据集还提供最大风速半径、指定风圈形状及各象限半径信息（https://metoc.ndbc.noaa.gov/web/guest/jtwc/best_tracks/western-pacific [2018-04-18]）。

同时还利用 1979～2015 年由欧洲中心提供的 ERA-Interim 0.5°×0.5°全球再分析数据中的 10 m 风场资料对台风中心位于海南岛及其周围区域的台风风场进行合成分析（Dee et al., 2011；http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/ [2018-04-18]）。ERA-Interim 再分析资料已被广泛应用于台风路径、气候及结构研究中（Emanuel, 2005; Yang et al., 2016; Sobel et al., 2016; Ditchek et al., 2017）。该资料可有效识别台风系统环流，但受分辨率所限，资料中的台风中心位置存在 1 度左右的误差，台风强度被低估，且最大风速半径偏大（Caires and Sterl, 2003; Caires et al., 2004; Scoccimarro et al., 2012; Schenkel and Hart, 2012; Murakami, 2014; Hodges et al., 2017）。此外，本文统计发现该区域内台风的平均最大风速半径为 57 km（约为 0.5°），而本文所用的 ERA-Interim 再分析资料的水平空间分辨率为 0.5°，故对台风内核区域的描述并不完整。尽管如此，考虑到该资料较长的时间序列且覆盖全球，可弥补海上台风大风观测资料稀缺的不足，可为认识台风外围大风的影响提供参考。为弥补 ERA-Interim 资料对 TC 内核风场描述的不足，本文采用 JTWC 提供的风圈资料对 TC 最大风速半径及指定风圈半径的变化进行分析。

运用 *K* 均值聚类方法（Macqueen，1967）对研究区域内的 TC 样本进行聚类分析。该方法首先随机选取 *K* 个对象为初始聚类中心，后计算各中心至其余对象的距离（本研究选用欧氏距离，即在空间中两个点之间的真实距离，或向量的自然长度），将每个对象分配至离其最近的中心。每个中心及分配给他们的对象视为一个聚类。全部对象分配完毕后，再次计算每个聚类中的聚类中心。此过程不断重复，直至满足以下任一条件：（1）无对象被重新分配至不同的类别；（2）无聚类中心再次变化；（3）误差平方和局部最小。

3 台风活动特征

海南岛西侧海岸地形接近半圆形，故选取以海南岛为中心、4 个经纬距为半径的圆作为研究区域（图 1a 中红色圆形）。一般 TC 系统的半径约为 5 个经纬距，可认为进入该区域内的 TC 即可产生较大影响。

3.1 时空分布

1979～2015 年期间共 204 个 TC 进入研究区域，年均约 5.5 个，主要以西偏北移动路径为主（图 1a）。进入该区域的 TC 频数具有显著的年际变化（图 1b），周期约为 6 年。1989 年及 2013 年的 TC 频数最多，均为 10 个；2004 年最少无 TC 进入。此外，进入该区域的 TC 频数还具有显著的月际变化特征（图 1c）。1～3 月无 TC 进入，4 月起 TC 个数逐渐增加，至 9 月达到最大后逐渐减少。

以每 6 小时一次的 TC 记录作为一个样本，1979～2015 年 37 年间研究区域内样本数共计 1460 个。利用聚类分析方法，将样本点的空间分布分为 4 类，各类的中心点如图 2a 中红色“＋”号所示。可见各聚类中心分别位于海南岛的东北、东南、西南及西北四个象限。考虑下垫面的不同属性，将海南岛单独作为一个分区。最终将研究区域划分为海南岛（HN）以及岛屿东北（NE）、东南（NS）、西南（SW）和西北（NW）五个分区（图 2a）。各分区面积不一且其样本量各有差异。其中 SE 区域内样本数最多，共计 498 个；HN 区最少，共 129 个。NE、NW 和 SW 的样本量分别为 323、223 及 287 个。

3.2 强度分布

各分区内不同强度等级的 TC 样本所占比例各不相同（图 2b，柱状图）。TY 等级比率在 SW 区域最多，NW 区域最少。而超强台风 Super TY 出现在海南岛东侧的 NE 与 SE 区域，但仅有 2 个样本。TD（热带低压） 在 NE、SE 及 SW 区内所占比例最高，分别占各区样本数的 39%、38%及 36%；其

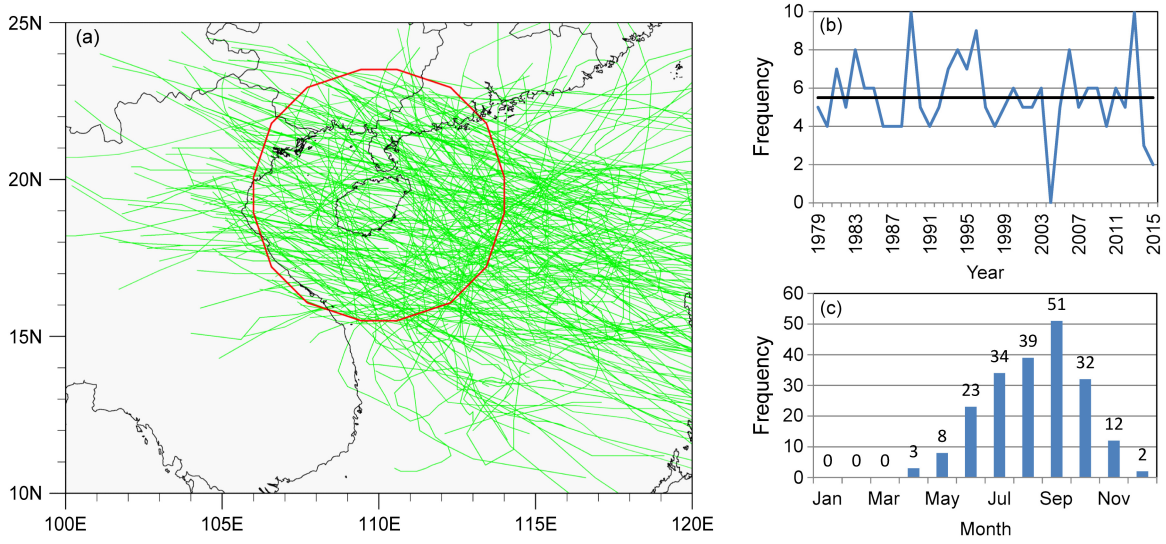


图 1 1979～2015 年间经过研究区域（红色圆圈所示）（a）热带气旋（TC）的路径以及 TC 频数的（b）年际（黑色实线为平均值）与（c）月际变化

Fig. 1 (a) Tracks of tropical cyclones (TCs) across the study area (denoted by red circle), and (b) interannual (black line donates the averaged frequency) and (c) intermonthly variations of TC occurrence frequency during 1979–2015

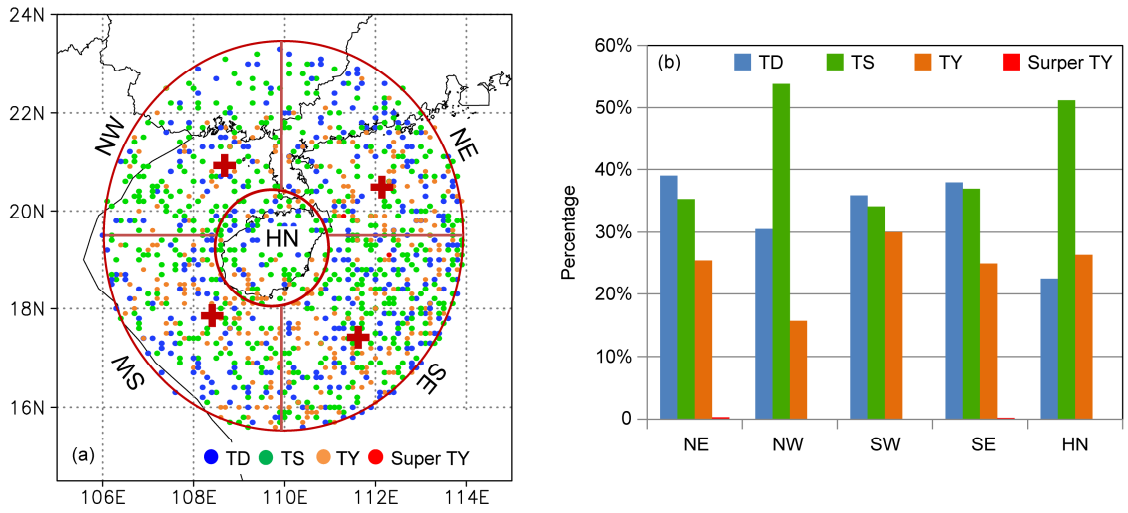


图 2 （a）各分区不同等级 TC 样本分布及其聚类中心位置（蓝色为热带低压 TD，绿色为热带风暴 TS，橙色为台风 TY，红色为超级台风 SuperTY；“＋”号为聚类中心位置，黑色字母为各分区名称）；（b）各分区内不同等级 TC 样本所占比率。研究区域划分为海南岛（HN）以及岛屿东北（NE）、东南（NS）、西南（SW）和西北（NW）五个分区

Fig. 2 (a) Distribution of TC samples in different intensity categories (red lines and circles divide the region into five subregions; black letters indicate the subregion names; symbol “＋” is the center of the cluster). A dot denotes the center of a TC in the study region and its intensity category is represented by its color, i.e., blue dot for Tropical Depression (TD); green dots, Tropical Storm (TS); orange dots, Typhoon (TY); red dots, Super Typhoon (SuperTY). (b) Probabilities of TC intensity categories

次为 TS（热带风暴），所占比例分别为 35%、37%及 34%。可见在这三个区内 TC 强度等级主要以 TD 与 TS 居多。在 NW 及 HN 区域内 TC 样本强度等级则为 TS 所占比例最高，均可占区域样本总数的 50%以上。

综上所述，海南岛附近区域 TC 具有非均匀的时空和强度分布。4～12 月间年均 5.5 个 TC 主要以西偏北路径进入研究区域，其中海南岛东南侧出现频率最多，强 TC 比例最多；西北侧频数最少，强 TC 比例最少。

4 台风外围风场变化特征

利用 ERA-interim 再分析数据提供的 10 m 风

场资料，对上述各分区内的 TC 样本进行合成分析，探讨海南岛不同方位 TC 影响下该区域低层风场的变化特征。需要强调的是，ERA-Interim 再分析资料所提供的风场数据虽可有效识别 TC 环流，但其在一定程度上低估了台风风速。且受水平空间分辨率所限（0.5°），其对台风内核区的描述并不完全。另外，本节对分布于各分区内台风样本的相关物理要素进行了平均，由此合成的平均场对台风中心附近的描述也存在一定误差。因此本节结果主要反映台风外围区域的风场特征。第 5 节中将利用 JTWC 提供的台风最大风速、最大风速半径以及指定风圈半径等数据对台风内核风结构变化进行分析。

4.1 涡度场与风矢量场

当 TC 中心位于海南岛附近区域时，其低层垂直涡度的分布具有明显变化特征（图 3）。当 TC 中心位于海南岛四周时（图 3a–d），TC 中心与海南岛连线上有正、负涡度带相间分布。其中 TC 中心附近、海南岛另一侧为正涡度带，岛和 TC 之间则为弱的负涡度或涡度小值区。且正—负—正的涡度中心连线方向随 TC 中心与海南岛相对位置的改变而改变。当 TC 中心位于 NW 及 SE 区时，位于岛和 TC 之间的负涡度较其位于 NE 和 SW 区时显著。当 TC 中心位于岛上时（HN，图 3e），海南岛及其附近海域 TC 环流内均为正涡度。此外当 TC 位于 HN、SW 和 SE 区时，海岸线附近有一强负涡度带出现。这与海岸地形摩擦减速作用造成 TC 外围风速水平分布不均匀产生的反气旋切变有关。

海南岛附近 TC 涡度场的非均匀分布是其风场非对称的体现。各区域台风样本合成的 10 m 风速分布如图 4 所示，可见当 TC 中心位于海南岛的不同方位时，其风场分布存在显著差异。当 TC 中心位于 NE 区时（图 4a），台风外围强风速区离岛较远，主要出现在岛东侧 115°E 附近海域上空，值可达 8 m s^{-1} 以上。当 TC 中心位于岛西北侧 NW 区时（图 4b），台风外围风速强值区主要位于岛东北侧海域上空，中心值达 8 m s^{-1} 以上，次大值区位于岛西南侧。当 TC 位于 SW 区时（图 4c），台风外围风速大值区分别位于北部湾，（风速达 10 m s^{-1} 以上）和岛东北侧。而当 TC 位于 SE 区时（图 4d），其外围风速强中心出现在岛东北侧海域，次强区则出现在 TC 中心的东南侧。TC 中心在海南岛之上时（HN 区，图 4e），TC 外围风场为各分区最强，分布与 SW 区 TC 相似，分别位于岛东侧和北部湾内，其中岛东北侧的风速较大可达 11 m s^{-1}，中心位于 112°E，20°N 附近琼州海峡入口附近。

可见位于海南岛不同方位 TC 低层风场的影响各不相同。但强风速区主要出现在海南岛附近的海上，分别位于岛东北侧和北部湾内，岛上的风速相对较小。

4.2 大风出现百分率

中国气象局台风年鉴定义台风大风为：台风影响下我国境内测站出现 10 分钟平均最大风速达 6 级及以上（≥10.8 m s^{-1}）或 2 分钟平均阵风风速达 8 级及以上（≥17.2 m s^{-1}）的大风。由于 ERA-interim 再分析资料在一定程度上低估了台风大风（Caires and Sterl, 2003; Caires et al., 2004），这里以 10 m s^{-1} 作为台风大风阈值，计算 TC 中心位于不同分区时，0.5°×0.5° 区域范围内 10 m 大风的出现百分率，定性分析大风出现的高频区（图 5）。

对研究区域内的所有样本而言（图 5a），大风高比率区主要位于海南岛周围的海域。最大值中心位于岛屿东北侧，大风的出现百分率达 50%以上。次中心位于岛屿的西北侧北部湾内，达 30%以上。而不同位置 TC 影响下大风的分布差异明显，大风高比率区的中心也不尽相同。当 TC 中心位于海南岛以东，即 NE 区（图 5b）和 SE 区（图 5e）时，大风比率分布有一个大风高频中心。TC 外围大风高发区均主要位于海南岛东侧海域，东北侧可见大于 50%的高概率中心。但 NE 区 TC 外围大风频发区距离海南岛较远，位于岛东北侧 114°E 附近，而 SE 区位于 112°E 附近，且强度更强，可达 60%以上。这两个区域的大风次高比率区位于岛西北侧的北部湾内，值明显偏低，约为 20%。而当 TC 中心位于 SW 区（图 5d）以及岛上（HN 区，图 5f）时，大风出现比率表现为两个高值中心，分别位于海南岛东北和西北海域上。其中 TC 位于 SW 区时最大中心位于北部湾内，可达 70%以上，次中心位于琼州海峡东侧，约 50%。而 TC 位于 HN 区时则相反，大风出现比率高值中心位于岛东北侧，而次大中心位于西北侧，分别可达 80%及 70%以上。此类 TC 影响下海南岛附近大风的出现比率最高，其它大部分区域也可达 50%以上。而当 TC 中心位于 NW 区时（图 5c），大风高比率中心有三个，分别位于海南岛的东北、西北和西南侧，但各中心的值也较其余分区低，约为 40%。图中也可看出，不论 TC 位置如何，岛上台风大风的出现比率均较周围海域

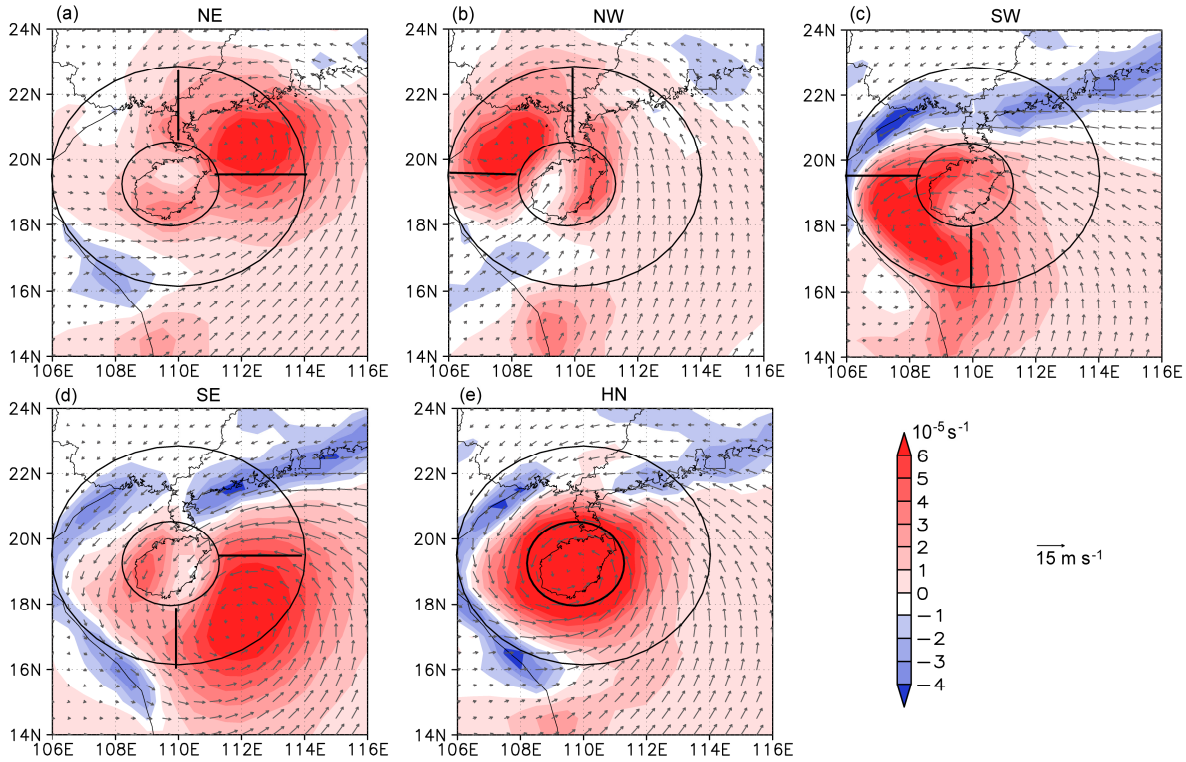


图 3 （a）NE、（b）NW、（c）SW、（d）SE 和（e）HN 各分区 TC 样本的合成台风 10 m 高度处垂直涡度场（阴影，单位：10^{-5} s^{-1}）与风矢量场（灰色箭头，单位：m s^{-1}）。加粗线所围扇形和圆形区域表示分区，下同

Fig. 3 Composite vertical vorticity (shaded, units: 10^{-5} s^{-1}) and wind vectors (units: m s^{-1}) at 10-m height: (a) NE, (b) NW, (c) SW, (d) SE, and (e) HN. The sub-regions are denoted by black sectors and circle, the same below

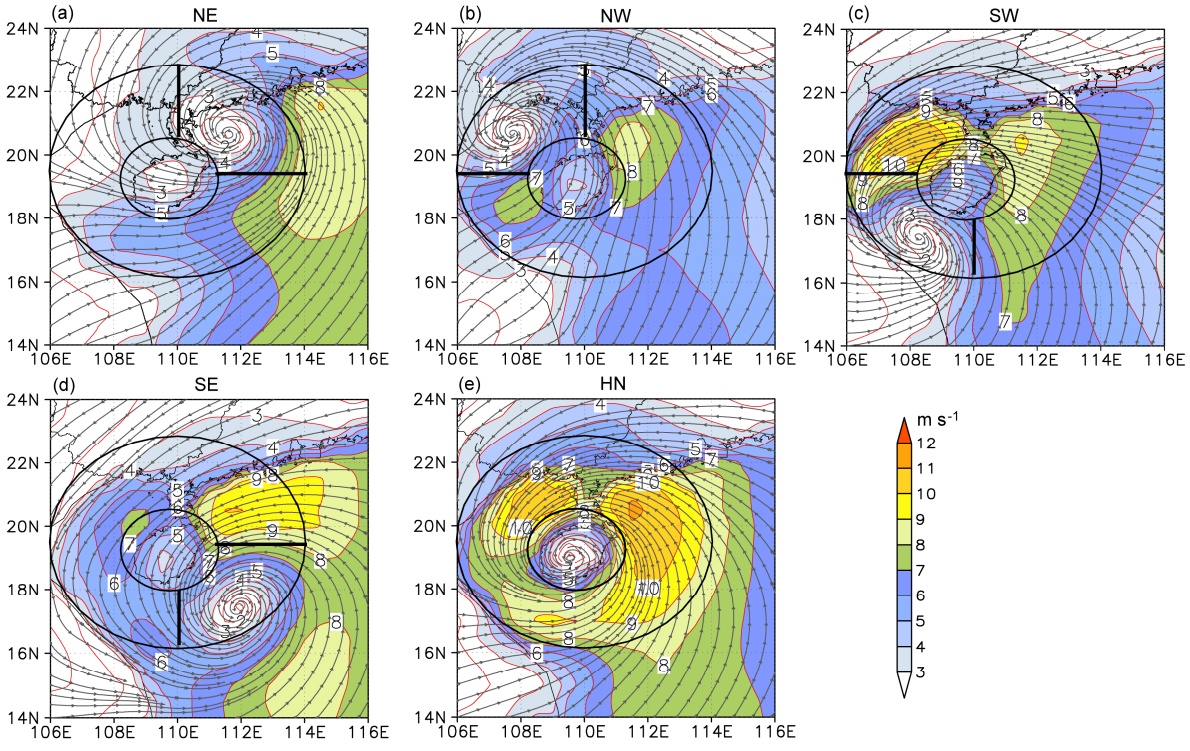


图 4 同图 3，但为合成流场（灰色实线）及 10 m 风速分布（阴影，红色等值线，单位：m s^{-1}）

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for composite wind speed (shadings and red contours, units: m s^{-1}) and streamlines (grey solid lines) at 10-m height

小。这一方面与岛上粗糙下垫面摩擦减速作用有关；另一方面，当台风位于岛上时，受再分析资料分辨率和合成方法所限，不能有效描述台风内核区的强风速。

用 ERA-interim 资料合成分析 TC 风场分布可见，海南岛附近区域的 TC 大风主要出现在岛周围海域，强中心主要位于岛东北侧附近海域及西北侧北部湾内，岛上风速相对较小。而 TC 位于海南岛不同区域时，外围大风的分布和出现比率均具有明显差异。当 TC 位于海南岛上时，台风大风出现比率最高，位于岛南侧时次之，岛北侧时则最小。

5 台风内核风场变化特征

TC低层风场与其自身内核结构特征密切相关，最大风速发生在内核区域的最大风速半径处。本节利用 JTWC 提供的 2001～2015 年台风最大风速半径（Radius of Maximum Wind，简称 RMW）、近中心最大风速以及指定风圈大小信息，对海南岛附近台风内核区域的风结构进行补充分析。

5.1 最大风速半径

选取 2001～2015 年每 6 h 一次含有 RMW 信息的 TC 样本共 448 个，统计发现（图 6a），448 个 TC 的 RMW 值介于 9.3 km 至 185 km 之间，平均为 58.3 km。其中 30～40 km 与 40～50 km 的样本数最多，均为 68 个（各占样本总体的 15%）。RMW 最大为 185 km，仅 3 个样本。将 RMW 按不同大小分为小于等于 20 nm （37 km）、大于 20 nm（37 km）小于等于 40 nm（74 km）、大于 40 nm（74 km）小于等于 60 nm（111 km）与大于 60 nm（111 km）四个等级（“nm”表示“海里”，1 nm 约等于 1.85 km），分别计算不同大小的 RMW 在各分区内所占的比率（图 6b）。可见 NE 区 TC 的 RMW 小于 37 km 的样本最多，占该分区总样本的 39.2%，其次为 37～74 km 占该区总数的 38.2%。其余各区的 RMW 均为 37～74 km 的半径最多，且在 NW 与 HN 区达 50% 以上。74 km 以上大半径样本在 SW 最多，其次是 SE 区，分别占分区内样本总数的 25%和 23%。少量 111 km 以上的大半径样本仅出现于海南岛及其东部区域内，分属于 3 个 TC。平均而言，HN 区 TC 的 RMW 最大，达 67.4 km，而 NW 区最小，为 52.1 km。当 TC 位于岛屿南侧时，RMW 74 km 以上的大半径样本较多；而当 TC 中心位于岛北侧时则小半径样本较多。TC 位于岛上时平均半径最大；位于 NW 区时最小。

5.2 最大风速

将 1979～2015 年 JTWC 台风最佳路径资料中近中心最大风速插值到整个研究区域内（插值网格分辨率为 0.49°），可得台风影响下海南岛附近区域 10 m 高度 1 分钟平均最大风速分布（图 6c）。可见台风最大风速海上较陆地大，且由海洋向陆地显著减小。海南岛附近的最大风速大多可达 25 m s^{-1} 以上，其中最大值中心位于雷州半岛东侧 111°E 附近洋面，可达 50 m s^{-1}，次大中心位于雷州半岛西侧洋面，值为 45 m s^{-1} 以上。此外在海南岛附近东南和西南洋面上也有小范围大值区出现。而海南岛上的最大风速相对较小，在岛南侧沿岸及东侧沿岸可达 25 m s^{-1} 以上，风速由岛沿岸向岛中间逐渐减小。需要说明的是，本节中插值时近似将近台风中心最大风速的位置记在台风中心处，实际应位于最大风速半径处，即平均有约为 58 km 的位置误差。

5.3 指定风圈半径

利用 2001～2015 年 JTWC 提供的 17.5 m s^{-1}（34 节）指定风圈半径（R_{34}）样本共 264 个，研究海南岛附近台风大风风圈变化特征。该数据记录了指定风圈形状参数及其各个半径的大小。形状参数可为完整的圆、半圆（NNS 北半圆、NES 东北半圆、EES 东半圆、SES 东南半圆、SSS 南半圆、SWS 西南半圆、WWS 西半圆、NWS 西北半圆）或其对应象限（NNQ、NEQ、EEQ、SEQ、SSQ、SWQ、WWQ、NWQ）。当风圈形状为圆形时，仅记录一个半径的数值；风圈形状为椭圆时，记录形状参数所在半圆区的半径为 R_1，未记录形状区域的半径为 R_2；风圈形状为象限时，记录形状参数所在象限的半径为 R_1，并按顺时针顺序依次记录余下 3 个象限的半径分别为 R_2、R_3 和 R_4。

研究区域内所有记录 17.5 m s^{-1} 大风风圈信息的 TC 样本其指定风圈的形状参数均为 NEQ（North East Quarter），即大风主要出现在 TC 环流的东北象限内，并依次记录有东南、西南及西北象限的 R_{34} 信息。说明该区域 TC 指定风圈半径大小在各象限有所差异，风圈形状有不规则变形。当 TC 中心位于不同分区时，R_{34} 在 TC 各象限的分布也存在显著差异（图 7a）。位于 NE（HN）区时，四个方向的 R_{34} 均为最大（小），其值介于 178 km 至 198 km 之间（133 km 至 150 km 之间），平均 187 km（143 km）。

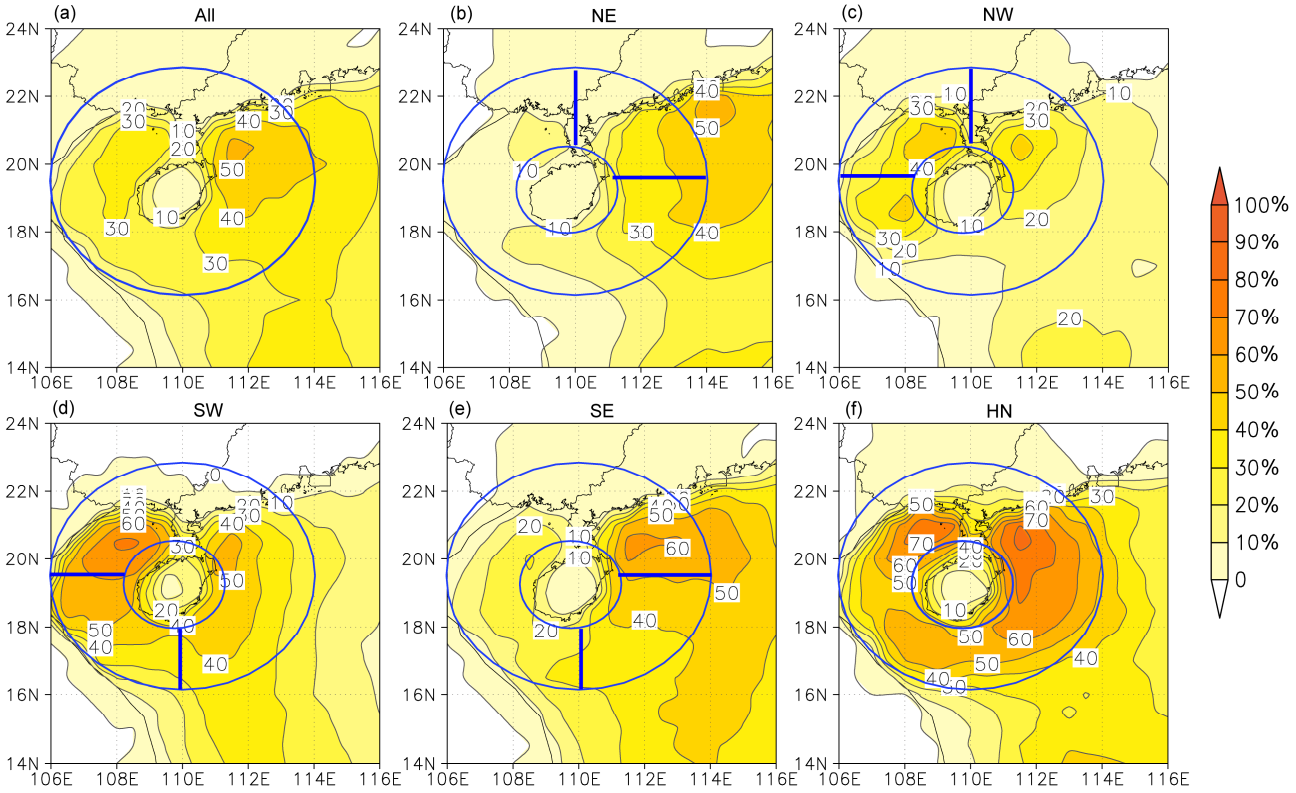


图 5 （a）所有样本（All）及（b–f）各分区 10 m 高度台风 10 m s^{-1} 以上大风的出现百分率（阴影，等值线）

Fig. 5 Percentage occurrence frequency of strong wind at 10-m height for wind speed exceeding 10 m s^{-1} in (a) all samples (ALL) and (b–f) sub-regions

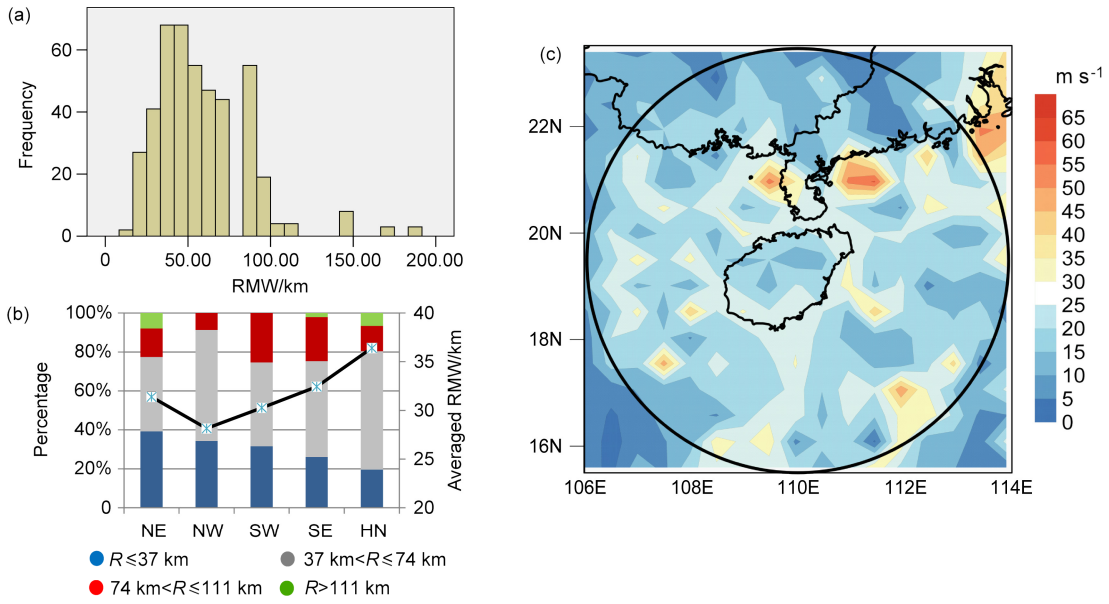


图 6 2001～2015 年（a）最大风速半径（RMW）的频次分布、（b）各分区不同大小 RMW 出现比率（柱状图；蓝色：RMW≤37 km；灰色：37 km＜RMW≤74 km；红色：74 km＜RMW≤111 km；绿色：RMW＞111 km）以及平均 RMW（黑色实线，单位：km）。（c）1979～2015 年间海南岛附近区域 TC 近中心 1 分钟平均最大风速分布（阴影及等值线，单位：m s^{-1}）

Fig. 6 (a) Frequency of RMW (Radius of Maximum Wind), (b) percentages of samples with different RMW sizes (bars; blue: RMW≤37 km; grey: 37 km＜RMW≤74 km; red: 74 km＜RMW≤111 km; green: RMW＞111 km) and the averaged RMW (right axis, black line, unit: km) from 2001 to 2005. (c) TC-induced maximum 10-m height winds over Hainan from 1979 to 2015 (1-minute average, shaded and contours, units: m s^{-1})

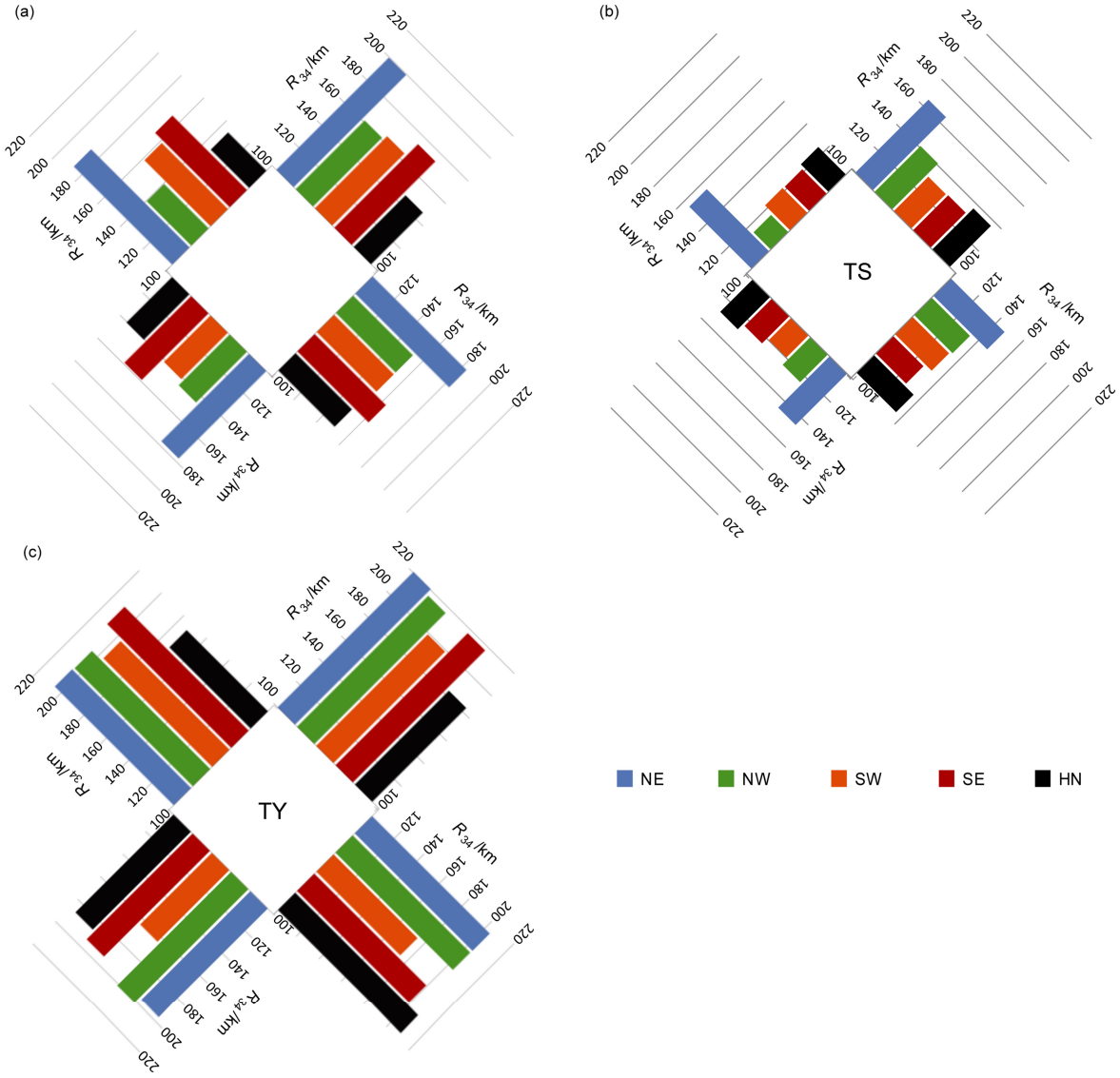


图 7 （a）所有样本、（b）TS 强度样本和（c）TY 强度样本平均 17.5 m s^{-1} 大风半径（R_{34}）在台风不同方向的分布（单位：km）

Fig. 7 The averaged R_{34} (units: km) of 17.5 m s^{-1} wind in the four quadrants of TC in each sub-region for (a) all samples, (b) TS, and (c) TY

NW、SW 与 SE 区 TC 的 R_{34} 均值分别为 150 km、154 km 与 165 km。同时，TC 不同象限 R_{34} 的大小也有差异。TC 中心位于岛四周（岛上）时，TC 环流东北（东南）象限的 R_{34} 最大。位于 NE、SW 与 SE 区时，TC 环流西南象限的 R_{34} 最小；而位于 NW 与 HN 区时，TC 西北象限的 R_{34} 最小。不同方向 R_{34} 最大值与最小值之差最大（最小）的为 SW 区（SE）台风，即台风风场变形最大（小）。

可见 TC 中心位于海南岛附近区域时，台风大风圈形状不规则，即 TC 不同象限的风圈半径大小有一定差异。一般东侧象限的风圈半径较大而西侧较小。而不同分区 TC 的风圈大小不一，在各象限也有所差异。当 TC 位于 NE（HN）区时风圈最大（小）。而 TC 位于 SW（SE）时不同象限风圈半径差异最大（小）。

TC 指定风圈半径大小及其变化与 TC 强度密切联系。这里比较 TS（图 7b）与 TY（图 7c）两个强度等级 TC 的 34 节大风圈半径变化。可见 TS 的 R_{34} 明显较 TY 小。前者在 115 km 至 165 km 之间，而后者在 164 km 至 220 km 之间。同时在 TC 不同方向上 R_{34} 大小也存在一定差异。对于 TS 等级，TC 中心位于 NE 区时，R_{34} 最大，其它各区差异不大。除 SW 区外，各分区 TC 的 R_{34} 均在东北象限最大，SW 区 TC 在东南象限最大。当台风中心位于 NE 与 SW 区域（NW、SE 和 HN 区域）时，R_{34} 的最小值位于 TC 环流的西南（西北）象限，但不

同分区的数值相差不大。而对于 TY 等级，TC 中心位于 HN 区时，R_{34} 则为东南象限最大，西北象限最小。位于其他区域均为东北象限最大，西南象限最小。

利用 Song and Klotzbach（2016）定义的风圈半径非对称因子 α 定量评估各区 R_{34} 的非对称性：

$$\alpha = \frac{1}{2}\sqrt{\left(R_{NE} - R_{SW}\right)^2 + \left(R_{SE} - R_{NW}\right)^2}, \quad (1)$$

其中，R_{NE}、R_{SW}、R_{SE} 和 R_{NW} 分别为东北、西南、东南和西北方向的指定风圈半径大小。当指定大风圈完全对称时，α 值为 0；当其不等于 0 时，其方向与最长半径方向一致。最长半径的方向 θ 定义为

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_{NE} - R_{SE} - R_{SW} + R_{NW}}{R_{NE} + R_{SE} - R_{SW} - R_{NW}}\right), \quad (2)$$

其中，θ 为 0°、90°、180°以及 270°（或−90°）时分别代表向东、向北、向西以及向南。

海南岛附近不同分区 R_{34} 的平均非对称因子 α 及最长半径方向 θ 的分布如图 8 所示。从方向上而言，各分区样本的 R_{34} 最长半径均在−90°至 90°之间，即位于台风环流的东侧象限内。其中 HN 区的 R_{34} 最长半径位于东南象限，其余几个分区则主要位于东北象限，这与上述各方向风圈半径统计结果相同。对所有样本平均，SW 区的 α 最大，而 SE 区的 α 最小。而对 TS 强度样本平均，NW 区和 NE 的 α 较其它区大，即海南岛北侧区域台风风圈非对称性较强。而 TY 等级的台风样本中，TC 中心位于 SW 区及 HN 区时，34 节大风圈的非对称性较强。同时可以看出强度大的 TC 指定风圈变形更明显。

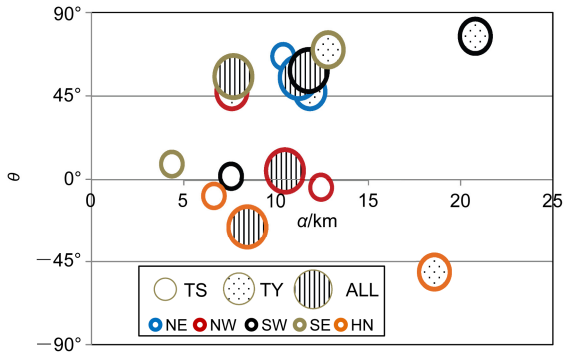


图 8 不同分区 R_{34} 的平均非对称因子 α（横坐标，单位：km）及最长半径方向 θ（纵坐标）。竖条纹填充的为所有样本平均，白色填充为 TS 强度样本平均，点填充为 TY 强度样本平均。蓝色圆圈表示 NE；红色圆圈表示 NW；黑色圆圈表示 SW；灰色圆圈表示 SE；橘色圆圈表示 HN

Fig. 8 Averaged asymmetry factor α (units: km) and the direction of R_{34} for all samples (striped circles), TS samples (areas shaded in white), and TY samples (dotted circles) in NE (blue circle), NW (red circle), SW (black circle), SE (gray circle), and HN (orange circle)

6 结论与讨论

本文基于 1979～2015 年 ERA-interim 再分析数据及 JTWC 最佳路径资料，统计分析了我国海南岛附近区域 TC 低层大风的分布及其风圈变化特征，获得以下认识：

（1）海南岛附近区域内 TC 活动具有非均匀的时空和强度分布。年均 5.5 个 TC 主要以西行路径进入研究区域，在海南岛东南侧（西北侧）TC 频数和强 TC 比例最多（少）。

（2）该区域台风外围低层强风速区主要出现在海南岛东北侧附近海域及西北侧北部湾内，岛上风速相对较小。当 TC 位于岛上时其附近海域大风出现比率最高，位于岛南侧时次之，北侧时最小。

（3）海南岛附近区域 TC 的最大风速半径均值为 58.3 km。平均而言，位于海南岛上 TC 的 RMW 最大，岛东侧 TC 次之，西侧 TC 最小。TC 近中心最大风速大值中心主要位于雷州半岛以东及以西附近海域。

（4）海南岛附近区域 TC 的指定风圈有一定变形且 TC 不同象限大风半径值各有差异。最长半径位于台风中心的东侧象限。平均而言，当 TC 位于 SW 区时变形最大，位于 SE 区时变形最小；强 TC 的指定风圈半径较弱 TC 变形明显。

由于海上观测资料所限，本文采用了 ERA-interim 再分析资料来定性描述台风影响下海南岛及其附近海域的风场特征，但由于分辨率较粗，只能反映 TC 外围风的影响，实际台风最强风发生在台风内核最大风速半径处。故考虑台风影响时应综合分析台风外围和内核区风的变化特征。另外，由于 JTWC 资料自 2001 年起才开始发布台风的 RMW 及指定大风风圈信息，相关分析的样本量有所减少，但仍可在一定程度上反应该区域内台风内核风结构的特征。

TC 位于海南岛不同方位时其低层风场特征不一，这从另一侧面也说明该区域台风低层风的分布与海南岛及其周围的地形密切联系。我们研究台湾附近 TC 风场分布时也发现与本文相似的分布特征，而台湾岛地形造成的绕流及海峡的狭管效应等

是造成该区域 TC 低层风场非均匀分布的主要原因（薛霖等，2015; 薛霖和李英，2016）。海南岛附近 TC 风场的非均匀分布可能是由海南岛地形阻挡产生绕流和摩擦减速作用产生的。当 TC 位于岛不同方位时，台风气流与地形配置不同，从而导致风场分布发生改变。但除海南岛外，该区域内雷州半岛和北部湾等特殊地形也是造成海南岛附近风场变化的一个原因。该区域 TC 低层风场的变化机理仍需进一步探讨。

参考文献（References）

Caires S, Sterl A. 2003. Validation of ocean wind and wave data using triple collocation [J]. J. Geophys. Res., 108 (C3): 3098, doi:10.1029/2002JC001491.

Caires S, Sterl A, Bidlot J R, et al. 2004. Intercomparison of different wind–wave reanalyses [J]. J. Climate, 17 (10): 1893–1913, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<1893:IODWR>2.0.CO;2.

陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. 气象学报, 62 (5): 541–549. Chen Lianshou, Luo Zhexian, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 62 (5): 541–549, doi:10.11676/qxxb2004.055.

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137 (656): 553–597, doi:10.1002/qj.828.

Ditchek S D, Molinari J, Vollaro D. 2017. Tropical cyclone outflow-layer structure and balanced response to eddy forcings [J]. J. Atmos. Sci., 74 (1): 133–149, doi:10.1175/JAS-D-16-0117.1.

段丽, 陈联寿, 徐祥德. 2006. 山脉地形对热带风暴 Fitow 结构和运动影响的数值试验 [J]. 气象学报, 64 (2): 186–193. Duan Li, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2006. The numerical simulation on the impact of topography on the structure change and motion of tropical storm Fitow (0114) [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64 (2): 186–193, doi:10.11676/qxxb2006.018.

Emanuel K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. Nature, 436 (7051): 686–688, doi:10.1038/nature03906.

Hodges K, Cobb A, Vidale P L. 2017. How well are tropical cyclones represented in reanalysis datasets? [J]. J. Climate, 30 (14): 5243–5264, doi:10.1175/JCLI-D-16-0557.1.

Hsu L H, Kuo H C, Fovell R G. 2013. On the geographic asymmetry of typhoon translation speed across the mountainous island of Taiwan [J]. J. Atmos. Sci., 70 (4): 1006–1022, doi:10.1175/JAS-D-12-0173.1.

胡姝, 孙立尹, 李英. 2014. 热带气旋结构和强度变化研究进展 [J]. 气象与环境学报, 30 (4): 91–98. Hu Shu, Sun Liyin, Li Ying. 2014. Progress in tropical cyclone intensity and structure change [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30 (4): 91–98, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2014.04.013.

Huang Y H, Wu C C, Wang Y Q. 2011. The influence of island topography on typhoon track deflection [J]. Mon. Wea. Rev., 139(6): 1708–1727, doi:10.1175/2011MWR3560.1.

Hughes L A. 1952. On the low-level structure of tropical storms [J]. J. Meteor., 9 (6): 422–428, doi:10.1175/1520-0469(1952)009<0422:OTLLSO>2.0.CO;2.

冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 2007. 台风 Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验 [J]. 大气科学, 31 (2): 233–244. Ji Chunxiao, Xue Genyuan, Zhao Fang, et al. 2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon Rananim during landfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 233–244, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.05.

Jian G J, Wu C C. 2008. A numerical study of the track deflection of supertyphoon Haitang (2005) prior to its landfall in Taiwan [J]. Mon. Wea. Rev., 136 (2): 598–615, doi:10.1175/2007MWR2134.1.

陆逸, 朱伟军, 任福民, 等. 2016. 1980～2014 年中国台风大风和台风极端大风的变化 [J]. 气候变化研究进展, 12 (5): 413–421. Lu Yi, Zhu Weijun, Ren Fumin, et al. 2016. Changes of tropical cyclone high winds and extreme winds during 1980–2014 over China [J]. Climate Change Research (in Chinese), 12 (5): 413–421, doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2016.030.

Macqueen J B. 1967. Some methods for classification and analysis of multi-variate observations [C]// LeCam LM, et al. Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley: University of California Press, 1: 281-297.

Meng Z Y, Masashi N, Chen L S. 1996. A numerical study on the formation and development of island-induced cyclone and its impact on typhoon structure change and motion [J]. J. Meteor. Res., 10 (4): 430–443.

Meng Z Y, Zhang Y J. 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China [J]. Mon. Wea. Rev., 140 (2): 445–470, doi:10.1175/MWR-D-10-05080.1.

Miller B I. 1967. Characteristics of hurricanes [J]. Science, 157 (3795): 1389–1399, doi:10.1126/science.157.3795.1389.

Murakami H. 2014. Tropical cyclones in reanalysis data sets [J]. Geophys. Res. Lett., 41 (6): 2133–2141, doi:10.1002/2014GL059519.

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., 120 (24): 12378–12393, doi:10.1002/2015JD024031.

Schenkel B A, Hart R E. 2012. An examination of tropical cyclone position, intensity, and intensity life cycle within atmospheric reanalysis datasets [J]. J. Climate, 25 (10): 3453–3475, doi:10.1175/2011JCLI4208.1.

Scoccimarro E, Gualdi S, Navarra A. 2012. Tropical cyclone effects on Arctic Sea ice variability [J]. Geophys. Res. Lett., 39 (17): L17704, doi:10.1029/2012GL052987.

沈树勤. 1990. 台风前部的龙卷[C]// 热带气旋科学讨论会文集. 北京: 气象出版社, 109–111. Shen Shuqin. 1990. Tornados in the front of typhoons [C]// Corpus of the Tropical Cyclones Scientific Symposium (in Chinese) . Beijing: China Meteorological Press, 109–111.

Sobel A H, Camargo S J, Hall T M, et al. 2016. Human influence on tropical cyclone intensity [J]. Science, 353 (6296): 242–246, doi:10.1126/science.aaf6574.

Song J J, Klotzbach P J. 2016. Wind structure discrepancies between two best track datasets for western North Pacific tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 144 (12): 4533–4551, doi:10.1175/MWR-D-16-0163.1.

Tang C K, Chan J C L. 2014. Idealized simulations of the effect of Taiwan and Philippines topographies on tropical cyclone tracks [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 140 (682): 1578–1589, doi:10.1002/qj.2240.

魏娜, 李英, 胡姝. 2013. 1949～2008 年热带气旋在中国大陆活动的统计特征及环流背景 [J]. 热带气象学报, 29 (1): 17–27. Wei Na, Li Ying, Hu Shu. 2013. Characteristics of tropical cyclone activities over mainland China in 1949–2008 and associated background circulation [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29 (1): 17–27, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.01.003.

Wu C C. 2001. Numerical simulation of typhoon Gladys (1994) and its interaction with Taiwan terrain using the GFDL hurricane model [J]. Mon. Wea. Rev., 129 (6): 1533–1549, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<1533:NSOTGA>2.0.CO;2.

Wu C C, Li T H, Huang Y H. 2015. Influence of mesoscale topography on tropical cyclone tracks: Further examination of the channeling effect [J]. J. Atmos. Sci., 72 (8): 3032–3050, doi:10.1175/JAS-D-14-0168.1.

薛霖, 李英, 许映龙, 等. 2015. 台湾地形对台风 Meranti (1010) 经过海峡地区时迅速增强的影响研究 [J]. 大气科学, 39 (4): 789−801. Xue Lin, Li Ying, Xu Yinglong, et al. 2015. Effect of Taiwan topography on the rapid intensification of typhoon Meranti (1010) passing by the Taiwan Strait [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 789−801, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14204.

薛霖, 李英. 2016. 台湾地形诱生中尺度系统对台风 Meranti (1010) 迅速加强影响的数值研究 [J]. 大气科学, 40 (6): 1107–1116. Xue Lin, Li Ying. 2016. The effect of mesoscale systems induced by the topography of Taiwan on the rapid intensification of typhoon Meranti (1010) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1107−1116, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15177.

Yang T, Lei X T, Tang J. 2016. Asymmetrical structures of the temperature and humidity of tropical cyclones [J]. Journal of Tropical Meteorology, 22 (3): 296–304, doi:10.16555/j.1006-8775.2016.03.004.

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 wind distribution 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.

Yeh T C, Hsiao L F, Chen D S, et al. 2012. A study on terrain-induced tropical cyclone looping in East Taiwan: Case study of typhoon Haitang in 2005 [J]. Natural Hazards, 63 (3): 1497–1514, doi:10.1007/s11069-011-9876-7.