

西北太平洋转向路径和西北移路径登陆台风的水汽输送特征对比分析

秦意茗¹, 周瑾², 焦鑫喆¹

¹中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

²双流区气象局, 四川 成都

收稿日期: 2022年4月16日; 录用日期: 2022年5月16日; 发布日期: 2022年5月23日

摘要

本文基于热带气旋最佳路径资料和再分析资料, 利用有限混合模型(Finite Mixture Model, FMM)聚类分析方法将西北太平洋台风(Typhoon, TY)路径分为四类, 并通过动态合成方法研究了转向路径与西北移路径强台风登陆前后其周围环境气流及水汽输送特征, 研究结果表明: 将西北太平洋台风分为转向路径台风、西北移路径台风、异常路径台风和曲线路径台风。转向路径的台风与强台风的个数最多, 登陆以后维持的时间最长; 西北移路径台风登陆的频数最多。异常路径与曲线路径台风偏东偏南, 且频数较少, 极少登陆。相较于西北移路径强台风, 转向路径的强台风在登陆前后的强度更强, 暖心结构更明显, 得到的水汽输送更充沛, 因此在登陆后能够维持更久的时间。

关键词

台风, 登陆, 大尺度环流, 水汽输送

Comparison of Water Vapor Transport Characteristics for Turning and Northwestward Track Landing Typhoon in the Western North Pacific

Yiming Qin¹, Jin Zhou², Xinzhe Jiao¹

¹College of Ocean and Atmosphere, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Shuanliu Meteorological Bureau, Chengdu Sichuan

Received: Apr. 16th, 2022; accepted: May 16th, 2022; published: May 23rd, 2022

文章引用: 秦意茗, 周瑾, 焦鑫喆. 西北太平洋转向路径和西北移路径登陆台风的水汽输送特征对比分析[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(3): 295-305. DOI: 10.12677/ccrl.2022.113029

Abstract

Based on the tropical cyclone best track data and reanalysis data, this paper divides typhoon (TY) into four categories by using the Finite Mixture Model cluster method on the Western North Pacific. The circulation and the vapor transport around intense typhoon (ITY) before and after the landfall are explored by the dynamic synthesis method. The conclusions are as follows: the TY are divided into turning TY, northwestward TY, abnormal path TY and curve path TY. The turning TY, with the most frequency of TY and ITY, has longer duration than others after landfall. And the northwestward TY has the greatest number of landfall TY. The last two types are generated farther east and south than those in the first two groups, with much smaller frequency and chance to make landfall. Compared with the ITY of the north-west typhoon, no matter landfall or not, the turning track ITY has longer duration accompanied by more abundant water vapor and warmer core.

Keywords

Typhoon, Landfall, Large Circulation, Water Vapor Transport

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

台风(Typhoon, TY)是在西北太平洋(Western North Pacific, WNP)上生成的、具有暖心结构的低压系统。台风登陆的时候往往会带来较强的降水、大风等天气,严重的时候甚至还会引发滑坡和泥石流等地质灾害[1]。近期的研究表明,WNP 台风强度在增加[2],且向西向北漂移的路径倾向将使台风登陆的可能性增大[3],这些变化会致使亚洲东部沿海地区暴露在更多剧烈的潜在风险中。

大尺度环境因子一方面影响了 TY 的发展,另一方面也反映了 TY 结构特征。不同的气象统计学研究与数值模式都表明,大尺度气象环境因子在热带气旋生成和发展的过程扮演着至关重要的角色[4] [5]。Gray 首先提出 TC 的生成与发展与六个气象要素密切联系:温暖洋面、低层相对涡度、对流层垂直风切变、条件不稳定大气、对流层中层的相对湿度以及一定的纬度条件[6]。后续大量研究也从这六个关键因子出发,通过数值模拟、气候统计以及不同的观测资料在对 TC 气候活动进行研究[7] [8] [9]。

大尺度环境因子为台风生成提供较好条件外,对台风登陆后的维持也十分重要。一般来说,台风作为热力推动的环流系统,其主要能量来源为水汽潜热释放能,一旦登陆后便会失去海洋直接提供的水汽与能量,不利于台风的维持[10]。台风在登陆后如果可以获取外界持续给予的水汽和潜热,能增加在陆面的持续时间[11]。台风在陆地上长时间的维持有可能导致局地强降水、狂风等灾难性天气,故对台风登陆前后的大尺度环境因子进行研究,可以加深台风登陆前后的结构特征与影响要素的了解,从而提高主客观预报水平。

基于上述,本文运用聚类分析方法研究台风的路径特征,并剥离出登陆频次较多的台风路径,再运用动态合成方法对其登陆前后的结构以及周围环流进行分析。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

热带气旋最佳路径资料取自美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC),根据 Saffir-

Simpson 标准, 本文定义中心平均持续最大风速达到 33 m/s 的热带气旋为台风, 达到三级(49.38 m/s)及以上的热带气旋为强台风(Intense Typhoon, ITY)。

再分析数据取自欧洲中期数值预报中心(The European Center of Medium-range Weather Forecast, ECMWF)提供的 ERA5 月平均再分析数据与逐小时再分析资料, 该资料包含了风场、位势高度、相对湿度、温度等气象要素, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 垂直方向有 37 层, 覆盖了 1000 hPa 至 1 hPa。

2.2. 方法

在对台风路径进行分类时, 本文参考了 Gaffney 提出的有限混合模型(Finite Mixture Models, FMM)聚类分析方法[12]。该方法基于 FMM 聚类方法, 根据台风路径数据得到每组模型的参数, 推断最有可能生成某条路径的模型。所有轨迹假设是由不同的回归模型产生的, 而每个回归模型都有自己的形状参数。在给定轨道的情况下, 将每一条路径分配给最有可能生成该路径的模型, 即所分配的回归模型具有最高的后验概率。

在台风分类的基础上, 对不同路径类型的台风在中国登陆前后进行动态合成。本文采用了以台风中心为坐标原点的动态合成分析方法, 具体的公式如下:

$$A = \frac{1}{T_{sum}} \sum_{t=1}^{t=T_{sum}} A_t(x, y)$$

其中, T_{sum} 是提取的时次总数, $A_t(x, y)$ 表示的是在 t 时刻距离台风中心固定范围内的物理场。水汽通量的垂直积分(vertically Integrated water Vapor Transport, IVT)计算为:

$$IVT = \int_{ps}^{pt} qVdp$$

其中 g 为重力加速度(取 9.8 m/s^2), q 表示比湿, p 代表气压, ps 和 pt 分别表示大气柱下部和顶部气压值, 这里取 $Ps = 1000 \text{ hPa}$, $Pt = 200 \text{ hPa}$ 。

水汽通量的流函数和势函数首先利用比湿与风场数据, 计算水汽通量及其对应的涡度与散度, 再运用张弛迭代法求解水汽通量的流函数及其分量。

垂直风切变的计算公式如下:

$$VWS = \sqrt{(u_{200} - u_{850})^2 + (v_{200} - v_{850})^2}$$

其中, u 和 v 分别表示纬向风和经向风, 200 和 850 分别表示在 200 hPa 和 850 hPa 等压面上。

3. 西北太平洋台风路径聚类分析

从 1979~2020 年西北太平洋台风路径聚类分析(图 1)来看, 台风的主要生成区域在 $150^\circ\text{E}\sim 180^\circ\text{E}$, $5^\circ\text{N}\sim 20^\circ\text{N}$ 。转向路径台风(图 1(a))主要位于 WNP 西北部, 主要在菲律宾以东洋面($140^\circ\text{E}\sim 160^\circ\text{E}$, $5^\circ\text{N}\sim 15^\circ\text{N}$)生成并向西北方向移动, 在中国沿海地区转向东北方向移动, 大致呈抛物线状。图 1(c)为西北移路径, 其路径相对于转向台风路径偏西, 它从菲律宾以东的区域向西北偏西的方向移动, 在中国南部以及东南亚登陆。异常路径台风(图 1(c))与曲线路径(图 1(d))两类台风主要位于西北太平洋东南部, 它们相对于前两类台风数量相对少, 生成地偏东偏南, 大部分停留在洋面上, 这两类台风也极少登陆。

由四类台风频数特征(表 1)来看, 转向路径台风与强台风个数是最多的; 西北移路径台风频数位居第二, 但其强台风个数相对少。从四类台风登陆情况来看, 西北移路径台风对中国的影响较大, 总共有 110 个台风登陆中国, 登陆率高达 54.19%, 登陆后维持 24 小时的台风个数最多, 登陆后台风的平均维持时间为 35.35 小时; 转向路径台风的登陆率为 31.02%, 登陆后维持 48 小时的台风个数最多, 登陆后维持

48 小时分别占据该类台风登陆个数的 26.87% (18/67), 高于其它路径类型的台风, 并且登陆后的平均维持时间(36.2 小时)为四类中最多的, 说明在登陆后转向路径台风维持得更久。而异常路径台风和曲线路径台风频数与登陆的台风个数相对较少, 登陆后持续的时间也低于转向路径台风与西北移路径台风。

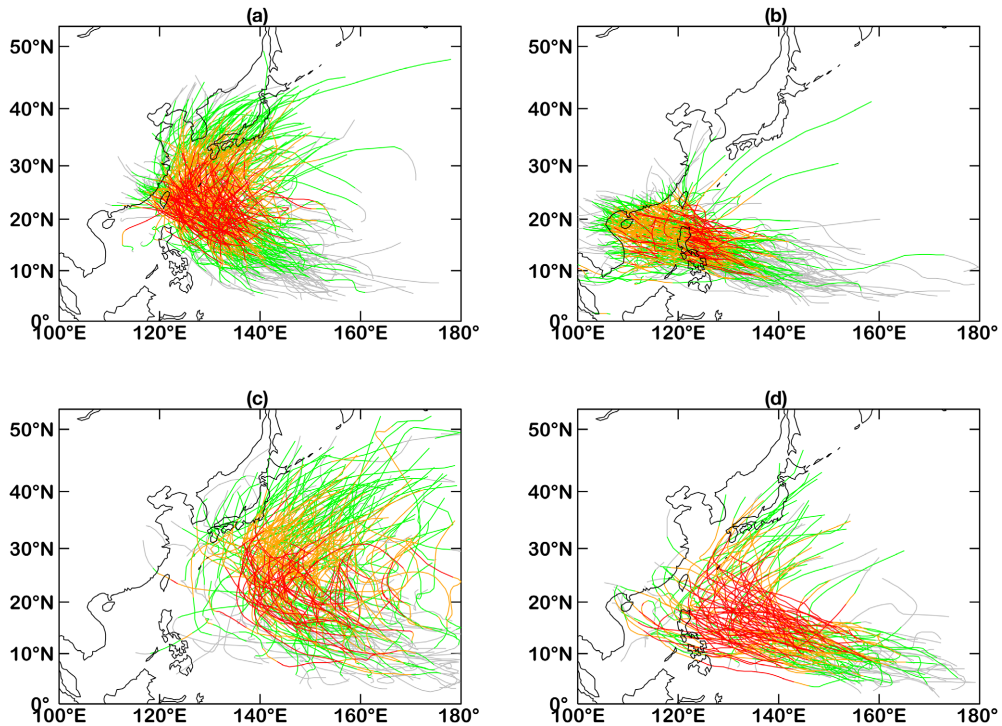


Figure 1. Tracks of typhoons from 1979 to 2020: (a) turning typhoon, (b) Northwestward typhoon, (c) abnormal path typhoon and (d) curve path typhoon. The colors show the intensity of tropical cyclone (grey), tropical storm (green), categories 1 and 2 (orange), and categories 3 to 5 (red)

图 1. 1979~2018 年四类台风路径, (a) 为转向路径台风, (b) 为西北移路径台风, (c) 为异常路径台风, (d) 为曲线路径台风, 不同颜色表示处于不同强度, 灰色为热带低压, 绿色为热带风暴, 橙色为 1~2 级台风, 红色为 3~5 级台风

Table 1. Frequency of different tracks of typhoons and landfall typhoons in China from 1979 to 2020

表 1. 1979~2020 年不同路径台风频数以及登陆中国台风频数

台风路径类型	台风/所占台风总数比例(%)	3~5 级强台风个数	登陆个数/登陆率(%)	登陆后维持 24 小时台风个数	登陆后维持 48 小时台风个数
转向路径	216/31.86	132	67/31.02	49	18
西北移路径	203/29.94	81	110/54.1	78	17
异常路径	164/24.19	79	2/1.22	2	0
曲线路径	95/14.01	86	13/13.68	7	0

4. 转向路径和西北移路径强台风登陆时刻环境场

4.1. 大尺度环流

从转向路径台风和西北移路径强台风周围 500 hPa 和 700 hPa 位势高度场、925 hPa 和 200 hPa 风场合成图(图 2)可知, 登陆前和登陆时刻在强台风东北偏东方向副热带高压呈纬向连续带状分布, 在其西南方向有急流带与之相连, 为其输送水汽; 而登陆后, 强台风中心强度及其周围急流均显著减弱。

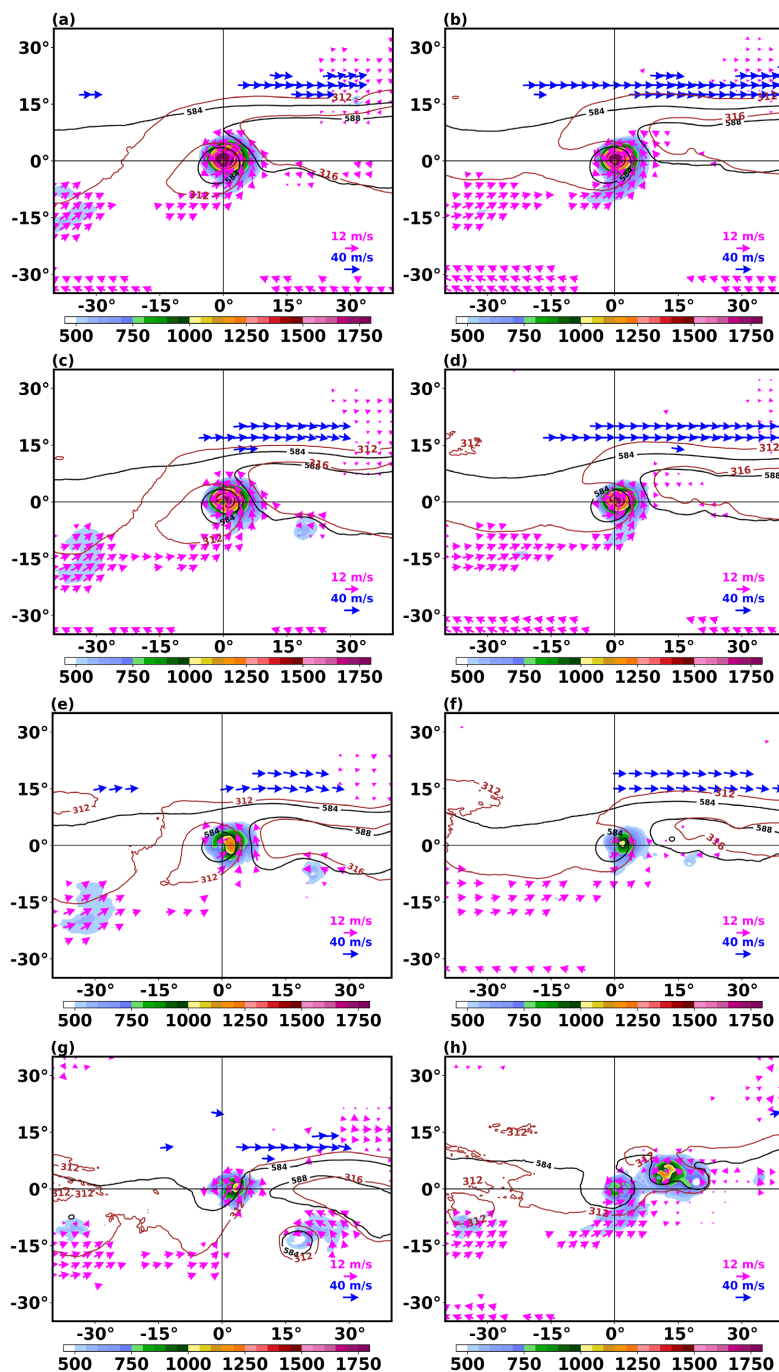


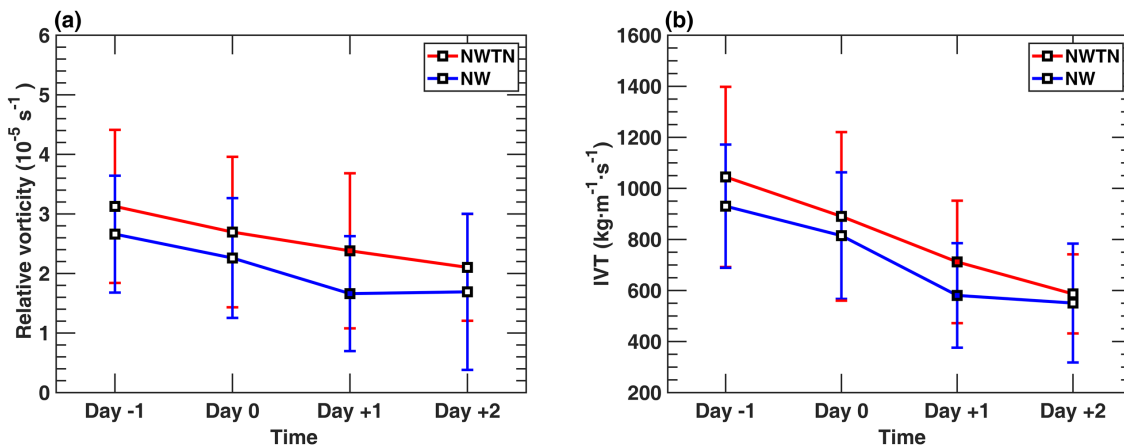
Figure 2. Turning and northwestward ITY's vertical integration of water vapor flux (shading, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), 500 hPa geopotential height (black contour, 10 gpm), 700 hPa geopotential height (brown contour, 10 gpm), 925 hPa wind (pink arrow, wind speed over 8 m/s) and 200 hPa wind (blue arrow, wind speed over 36 m/s). (a), (c), (e) and (g) are the day before landfall, landfall, one day after landfall and two days after landfall for turning ITY; (b), (d), (f) and (h) represent the day before landfall, landfall, one day after landfall and two days after landfall for northwestward ITY. The typhoon is located at the origin of coordinates, and XY coordinate is the distance from the typhoon center

图 2. 转向路径和西北移路径强台风合成的水汽通量垂直积分(填色, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)、500 hPa 位势高度场(黑色等值线, 10 gpm)、700 hPa 位势高度场(棕色等值线, 10 gpm)、925 hPa 风场(粉色箭头, 风速大于 8 m/s)以及 200 hPa 风场(蓝色箭头, 风速大于 36 m/s)。(a)、(c)、(e)、(g)分别是转向路径强台风登陆前一天、登陆、登陆后一天与登陆后两天; (b)、(d)、(f)、(h)分别是西北移路径强台风登陆前一天、登陆、登陆后一天与登陆后两天, 台风位于坐标原点, x、y 坐标是距离台风的距离

除共性特征外, 两类强台风登陆前后的大尺度环流也存在差异。在登陆前一天和登陆时刻(图 2(c)和图 2(d)), 与西北移路径强台风相比, 转向路径强台风中心强度更强, 与副热带高压的距离更近, 两者间的气压梯度力大。同时, 副热带高压南侧的偏东气流和与强台风中心直接相连的低空西南急流都相对较强。结合整层水汽通量垂直积分来看, 转向路径强台风在登陆前和登陆时刻台风中心最大水汽通量垂直积分可达 $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 并在西南象限有连续带状水汽辐合区。强台风中心西南象限的低层风场有利于洋面上充沛的暖湿水汽向东北输送至台风所在区域, 这为强台风在陆地上长时间维持提供了能量。而西北移路径强台风中心强度相对较弱, 副热带高压位置偏东, 副热带高压南侧的偏东气流以及强台风西南侧的低空急流相对较弱, 并且强台风西南侧水汽含量相较于转向路径强台风较小, 这使得强台风登陆后获得的潜热能相对少, 不利于强台风长时间的维持。

另外, 在两类强台风登陆后一天(图 2(e)和图 2(f))和登陆后两天(图 2(g)和图 2(h)), 转向路径强台风北部高空西风急流减弱, 导致急流南侧负的相对涡度减小, 副热带高压减弱, 副热带高压南部形态变化较大, 副高西侧边缘由登陆前的东南-西北走向登陆后的转为南-北走向, 同时副高与台风的相对位置由东北-西南转为东-西向, 从而使得副高附近的引导气流引导台风转向, 低空西南急流和副高南侧偏东气流相较西北移路径强台风更强烈, 登陆后强台风中心水汽输送强度虽减弱, 但依旧维持在 $1250 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 来自西南象限的水汽输送虽减弱, 但是其大值中心仍然保持在 $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 同时副热带高压南部的暖湿气流也有利于台风的维持; 而西北移路径强台风登陆前期西风急流范围大、强度更强, 距离台风相对较远, 不利于其南侧气旋式涡度的发展, 并且登陆后与副热带高压的相对位置变化不大, 在引导气流的作用下继续向西北方向移动, 在登陆以后强台风的中心水汽积分强度减小到了 $1100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 由于低空急流带和副热带高压周围偏东气流难以继续为其输送水汽, 在登陆后两天后西北移路径强台风结构破碎。

对两类强台风中心周围 $10^\circ \times 10^\circ$ 的区域进行研究, 从 850 hPa 相对涡度的平均值(图 3(a))可以发现, 无论是登陆前还是登陆以后转向路径强台风的相对涡度的平均值均大于西北移路径台风, 并且两类强台风的相对涡度在登陆前、登陆时及登陆后一天差异较大, 在登陆第一天差异达到最大。这说明转向路径强台风的登陆前后的强度更强, 且相较于西北移路径强台风在登陆后减弱的速度较慢。同时从水汽通量垂直积分的时间序列(图 3(b))与 925 hPa 风速均值的时间序列(图 3(c))也可得到类似特点, 在整个过程中转向路径强台风的水汽更充沛, 在登陆前一天区域内平均的水汽通量垂直积分可达到 $1050 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 并且 925 hPa 上的风速更大, 在登陆前可达 18 m/s, 也说明转向路径强台风的强度更强。在登陆后两类强台风对应的水汽通量垂直积分和风速虽都有大幅下降, 但西北移路径强台风下降幅度更大。从 500 hPa 区域平均温度来看(图 3(d)), 登陆前后转向路径强台风中心附近温度更高, 暖心结构更强。



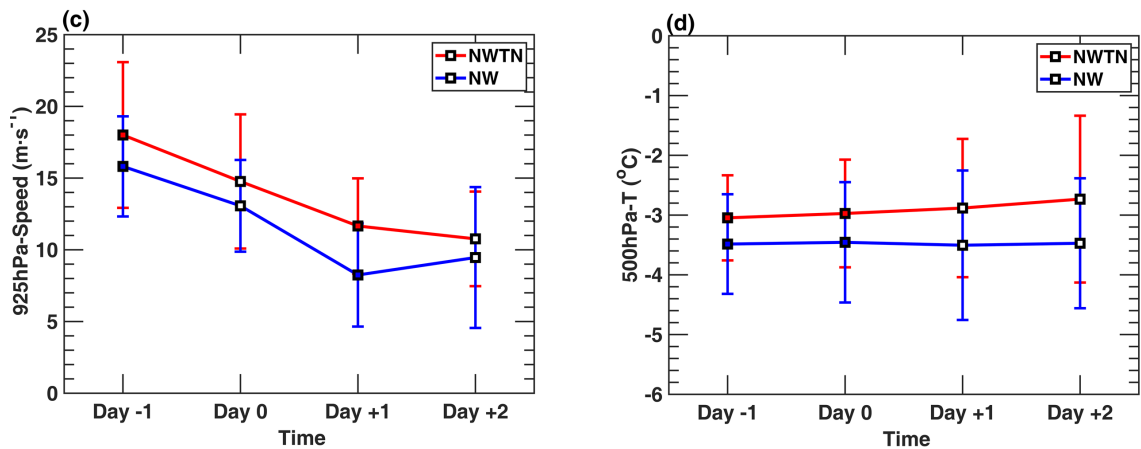


Figure 3. Turning and northwestward ITY's meteorological factors in $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ region around typhoon center. (a) relative vorticity of 850 hPa (s^{-1}), (b) vertical integral of vapor flux ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$), (c) wind speed at 925 hPa (m/s), and (d) temperature at 500 hPa ($^{\circ}C$). Day-1, Day 0, Day+1, and Day+2 indicate the day before landing, landfall, one day after landing, and two days after landing respectively. The filled markers represent significant differences at the .05 level based on Student's t-test

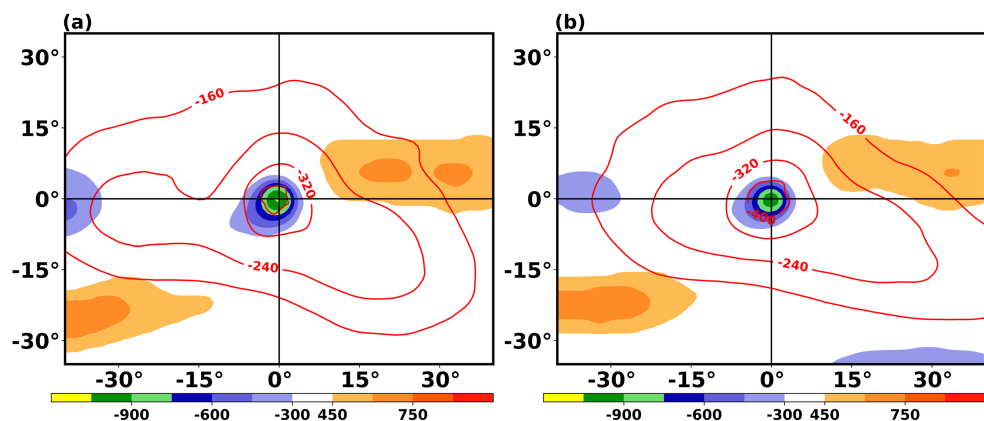
图 3. 转向路径与西北移路径强台风中心 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 区域内气象因子平均值, (a) 850 hPa 相对涡度(s^{-1}), (b) 水汽通量垂直积分($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$), (c) 925 hPa 风速大小(m)的均值, (d) 500 hPa 温度场($^{\circ}C$)。图中 Day -1、Day 0、Day +1 与 Day +2 分别表示登陆前一天、登陆时刻、登陆后一天与登陆后两天, 中心实心标志表示在 0.05 水平下差异显著

4.2. 水汽特征分布

水汽通量是表示水汽输送强度的重要物理量, 水汽通量流函数的垂直积分可以整体反映水汽的来源以及输送强度。本文通过水汽输送流函数, 对两类路径强台风的水汽条件进行了更深入的分析。

从图 4 可以发现, 低空西南急流和副热带高压南侧偏东气流是台风登陆前后的主要水汽来源, 转向路径强台风的水汽辐合更强, 并从西南急流和副高南侧带中得到了更多的水汽和潜热, 因此在登陆后维持时间更久。两类强台风的台风中心为水汽输送极小值, 在登陆前强台风中心附近的值小于 -900×10^6 kg/s, 在中心西侧存在一个范围和强度较小的水汽输送负值区, 而在西南象限存在带状的水汽输送的极大值区, 同时在强台风中心的东北象限也有一个极大值区。流函数的极大值区对应了两个不同的水汽来源: 孟加拉湾和西太平洋。来自孟加拉湾的水汽输送带是登陆我国台风的重要的水汽输送带, 暖湿气流裹挟的水汽为台风的维持和发展提供了有利的物理条件, 但在强台风登陆过程中对转向路径台风和西北移路径强台风的水汽输送表现出了不同的特征。

转向路径强台风在登陆后的水汽流函数(图 4(e)和图 4(g)), 西南象限的水汽极大值区域距强台风中心较远, 并在强台风登陆后迅速减小, 水汽输送的作用有限; 而中心东侧的极大值区维持时间更长, 在强



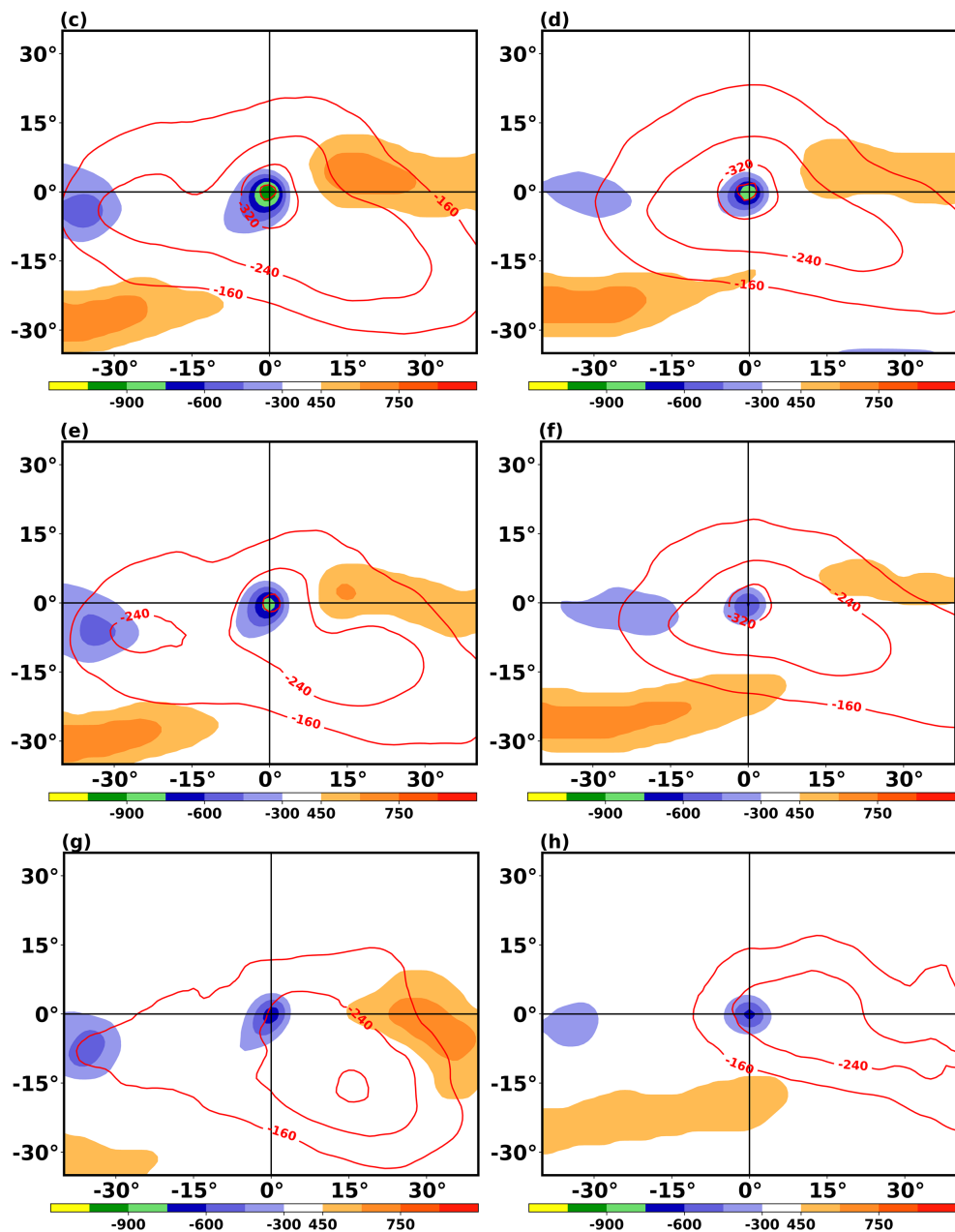


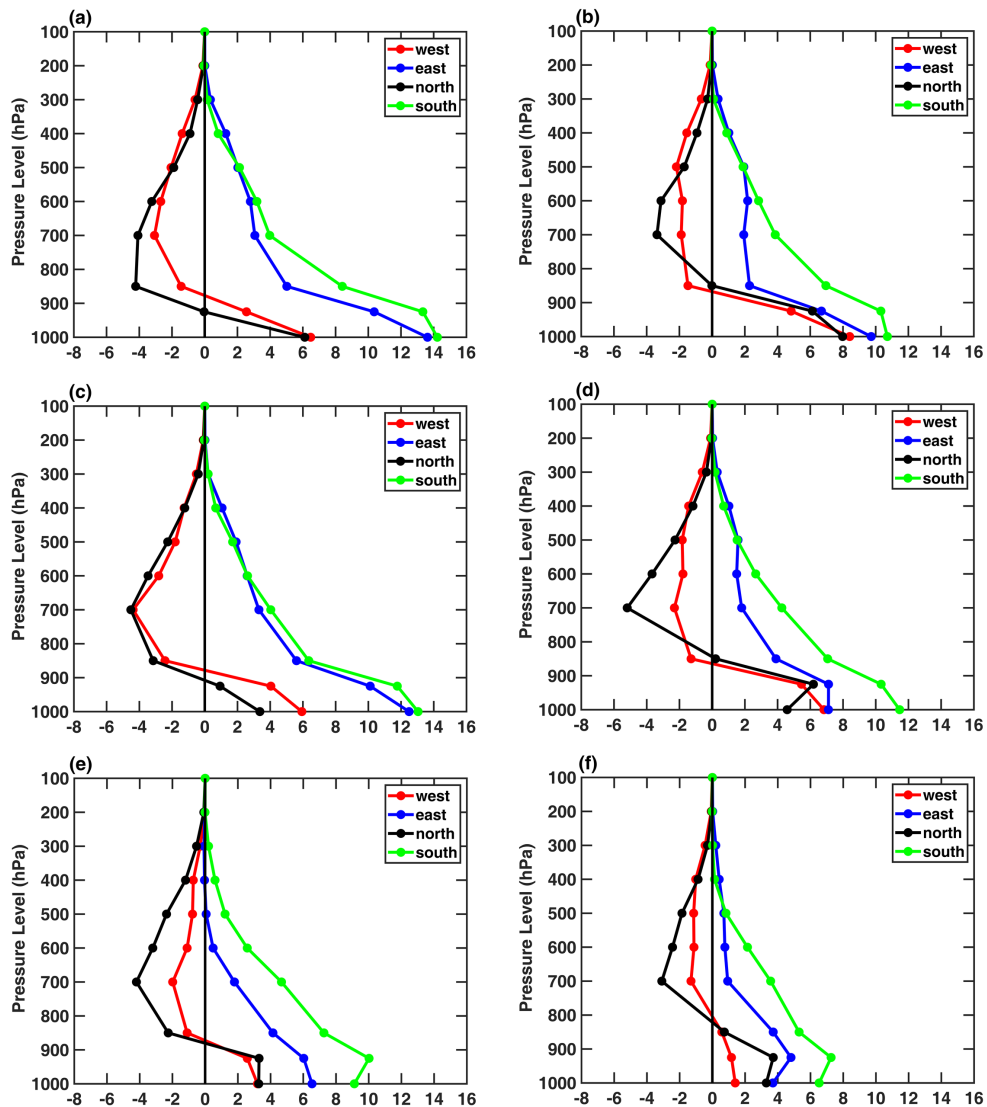
Figure 4. Same as Figure 2, but for the vertical integration of the water vapor stream function (shading, 10^6 kg/s) and vertical integration of the water vapor potential function (solid red line, 10^6 kg/s)

图 4. 合成整层水汽流函数(填色, 10^6 kg/s)与整层水汽势函数(红实线, 10^6 kg/s), 其他同图 2

台风登陆后仍有较强的水汽输送, 其高值仍可达 750×10^6 kg/s, 这与强台风中心与副热带高压距离较近有关, 来自西南和东侧的水汽使得转向路径台风可以维持较长时间。对西北移路径强台风(图 4(f)和图 4(h))而言, 副热带高压南侧偏东气流较弱, 来自西太平洋的水汽输送在强台风登陆后迅速减弱, 西南急流也减弱, 因此强台风难以长时间维持。

水汽通量势函数反映出了水汽的源和汇。由两类台风登陆前后的整层水汽通量势函数(图 4 红色实线), 发现在登陆前后两类强台风中心均有水汽的净流入, 登陆后两类强台风中心水汽辐合强度均有所减弱。转向路径强台风水汽辐合范围更大, 强度更强, 这为转向路径强台风登陆后的维持给予了充分的水汽与潜热能。

为了解两类强台风水汽收支的具体情况，以中心周围 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的区域为主要研究区域，分析登陆前后不同边界的水汽收支情况。通过分析发现，在登陆前(图 5(a)和图 5(b))和登陆时(图 5(c)和图 5(d))从整体来看两类强台风都得到了水汽的输入，其东边界和南边界整层均为水汽净流入，其流入量占水汽流入的主要部分，而西边界和北边界仅在低空有水汽少量流入，北边界的水汽流出量基本大于西边界，西边界和北边界从低层到高层从水汽净流入转为净流出说明强台风结构随着高度的增高而变得疏散。转向路径强台风东边界和南边界低层水汽流入强度基本相等，均维持在较高的水平；但对西北移路径强台风而言，南边界的流入量明显大于东边界流入量，其东边界水汽流入量在登陆时明显减少，并且西北移路径强台风水汽流入总量小于转向路径强台风，这与转向路径强台风对应较强的西南急流和副高南侧偏东气流，而西北移路径台风附近的副高南侧偏东气流较弱一致。在登陆后一天(图 5(e)和图 5(f))，两类强台风的南边界仍为水汽净流入量最大的边界，东边界的水汽流入强度减弱，但该边界仍保持着水汽的净流入，转向路径强台风东边界的水汽净流入依旧高于西北移路径强台风的，这与上述分析的副热带高压对转向路径强台风的登陆后影响较大相吻合，说明了副热带高压在转向路径强台风长时间维持中扮演了重要的角色。北边界和西边界 850 hPa 以上的水汽净流出较比前一天减小。西北移路径强台风的南边界水汽流入



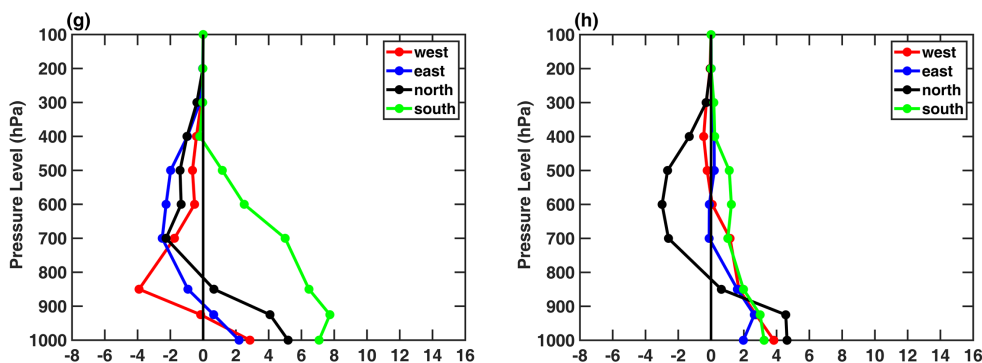


Figure 5. Turning and northwestward ITY's vertical distribution of water vapor fluxes (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at each boundary. (a), (c), (e) and (g) are the day before landfall, landfall, one day after landfall and two days after landfall for turning typhoon. (b), (d), (f) and (h) represent the day before landfall, landfall, one day after landfall and two days after landfall for north-westward typhoon. Red, blue, black and green lines represent the western, eastern, northern and southern borders respectively

图 5. 转向路径与西北移路径强台风各边界水汽通量的垂直分布(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。 (a)、(c)、(e)、(g)分别是转向路径强台风登陆前一天、登陆、登陆后一天与登陆后两天; (b)、(d)、(f)、(h)分别是西北移路径强台风登陆前一天、登陆、登陆后一天与登陆后两天。红色、蓝色、黑色和绿色分别代表西边界、东边界、北边界和南边界

量大幅减小, 东边界的水汽输入量也减小, 这使得在登陆以后西北移路径强台风得到相对少的水汽输送量, 维持的时间相对短; 转向路径强台风的南边界水汽输送强度减弱幅度较西北移路径强台风相对小, 东边界水汽流入减少, 整体维持着较高的水汽流入, 转向路径强台风减弱较慢。

在登陆后两天(图 5(g)和图 5(h)), 在 850 hPa 以下两类强台风水汽四个边界均为净流入, 低空西南急流仍为水汽主要来源, 北边界水汽输出较登陆后一天下降。转向路径强台风南边界的水汽贡献量相对较大, 这也使得此类台风能够在登陆以后获得充沛的水汽和潜热能, 进而得以长期维持。

5. 总结

本文采用 FMM 聚类分析方法对西北太平洋台风路径进行分类, 得到了转向路径台风、西北移路径台风、异常路径台风和曲线路径台风四类不同路径的台风, 得到了以下结论:

1) 通过对比四类台风的路径和频数特征, 发现转向路径台风主要在菲律宾以东洋面生成, 在中国东部海域或沿海地区转向东北方向移动, 强台风占比大, 且登陆台风维持时间长。西北移路径台风生成地偏西, 向西北偏西方向移动, 强台风个数相对较少, 但登陆率最高。异常路径台风和曲线路径台风生成地偏东偏南, 主要在海面移动, 且生成频率较低, 极少登陆。

2) 四类台风中转向路径台风和西北移路径台风个数最多并且登陆较多, 但两者的登陆频率和登陆后维持时间不同。为了探究两类强台风登陆的结构特征及环流背景, 分别对两类强台风登陆前后的大尺度环流以及水汽条件进行了合成分析。结果表明转向路径强台风的移动路径与副热带高压的形状和位置密切相关, 副热带高压减弱并在靠近台风一侧转变为偏南的引导气流, 有利于台风转向; 而西北移路径强台风对应的高空西风急流和副热带高压的强度和与台风的相对位置变化不大, 副热带高压位置相对偏北, 台风继续向西北方向移动。

3) 从水汽输送来看, 两类强台风的水汽主要来源于西南侧的低空西南急流和副高南侧偏东气流, 两类强台风中心区域均为水汽的汇, 在登陆后, 水汽迅速减少, 西北移路径强台风水汽辐合强度减弱更快。通过对比强台风中心区域不同边界的水汽输入量发现, 除来自孟加拉湾的水汽之外, 副热带高压南侧的偏东气流登陆前后不断地将西太平洋上的水汽沿强台风东侧和南侧边界输送至转向路径台风, 这对转向路径强台风登陆后的维持起了重要作用; 而由于强台风登陆后西南急流的水汽输送减少, 副热带高压南

侧的偏东气流弱，西北移路径强台风不能获得充足的水汽，难以继续维持。转向路径强台风可获得更多的水汽和潜热，登陆后维持时间更久。

参考文献

- [1] Ying, M., Zhang, W., Yu, H., Lu, X., Feng, J., Fan, Y., Zhu, Y. and Chen, D. (2014) An Overview of the China Meteorological Administration Tropical Cyclone Database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **31**, 287-301. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00119.1>
- [2] Sobel, A.H., Camargo, S.J., Hall, T.M., Lee, C.Y., TippetM, K. and Wing, A.A. (2016) Human Influence on Tropical Cyclone Intensity. *Science*, **353**, 242-246. <https://doi.org/10.1126/science.aaf6574>
- [3] Wang, C. and Wu, L. (2016) Interannual Shift of the Tropical Upper-Tropospheric Trough and Its Influence on Tropical Cyclone Formation over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, **29**, 4203-4211. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0653.1>
- [4] Van Nguyen, H. and Chen, Y. (2011) High-Resolution Initialization and Simulations of Typhoon Morakot (2009). *Monthly Weather Review*, **139**, 1463-1491. <https://doi.org/10.1175/2011MWR3505.1>
- [5] Emanuel, K. and Zhang, F. (2016) On the Predictability and Error Sources of Tropical Cyclone Intensity Forecasts. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **73**, 3739-3747. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-16-0100.1>
- [6] Gray, W.M. (1968) Global View of the Origin of Tropical Disturbances and Storms. *Monthly Weather Review*, **96**, 669-700. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2)
- [7] McBride, J.L. and Zehr, R. (1981) Observational Analysis of Tropical Cyclone Formation. Part II: Comparison of Non-Developing versus Developing Systems. *Journal of Atmospheric Sciences*, **38**, 1132-1151. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<1132:OAOTCF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<1132:OAOTCF>2.0.CO;2)
- [8] Zhao, H., Duan, X., Raga, G.B. and Klotzbach, P.J. (2018) Changes in Characteristics of Rapidly Intensifying Western North Pacific Tropical Cyclones Related to Climate Regime Shifts. *Journal of Climate*, **31**, 8163-8179. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0029.1>
- [9] Gao, S., Jia, S., Wan, Y., Li, T., Zhai, S. and Shen, X. (2019) The Role of Latent Heat Flux in Tropical Cyclogenesis over the Western North Pacific: Comparison of Developing versus Non-Developing Disturbances. *Journal of Marine Science and Engineering*, **7**, 28. <https://doi.org/10.3390/jmse7020028>
- [10] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报, 2004(5): 541-549.
- [11] Chen, Y.C., Cheung, D.K. and Lee, C. (2012) A Study on the Synoptic-Dynamical Characteristics of Compact Tropical Cyclones in the Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, **140**, 4046-4065. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00317.1>
- [12] Gaffney, S.J., Robertson, A.W., Smyth, P., Camargo, S.J. and Ghil, M. (2007) Probabilistic Clustering of Extratropical Cyclones Using Regression Mixture Models. *Climate Dynamics*, **29**, 423-440. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0235-z>