

基于 FMM 算法的夏秋季登陆中国热带气旋路径分类及特征分析

耿焕同^{①*}, 谢佩妍^②, 史达伟^③, 李俊徽^②

① 南京信息工程大学 计算机与软件学院, 江苏 南京 210044;

② 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044;

③ 江苏省连云港市气象局, 江苏 连云港 222000

* 联系人, E-mail: htgeng@nuist.edu.cn

2016-05-09 收稿, 2016-06-20 接受

国家自然科学基金资助项目(41201045); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20151458); 2016 江苏省青蓝工程资助项目

摘要 利用有限混合模型 FMM 聚类算法, 将 1951—2012 年夏秋季(6—11 月)登陆我国的热带气旋(Tropical Cyclone, TC)路径数据集分为三类, 并对三类不同路径 TC 的季节变化、发生频数、环流形势等特征进行对比分析。研究表明, 每类 TC 存在明显的特征差异: 1) 在夏季, 第一、二类 TC 出现频数高于第三类, 但在秋季第三类 TC 发生频数最高。2) 第一类 TC 生成位置偏北, 强度较强, 生命史较长, 路径略有向北发展的趋势, 影响区域最广; 第二类 TC 生命史最短, 主要影响我国两广、福建一带; 第三类 TC 生命史最长, 路径略向西北方向发展。3) 第一类 TC 在生成和消亡时的辐合程度最强, 且副高脊线西伸脊点位置偏北; 第二类 TC 在消亡时低层辐合最弱, 且副高脊线西伸脊点位置偏西; 第三类 TC 在生成时纬向风垂直切变最强, 且副高脊线西伸脊点位置偏东南。

关键词

有限混合模型;
热带气旋;
路径分类;
气候特征;
大尺度环流场

西北太平洋热带气旋(Tropical Cyclone, TC)是影响我国的主要气象灾害的天气系统之一, 在其移动过程中, 常伴随有狂风、暴雨、巨浪和风暴潮, 严重影响我国沿海地区的社会生产和人员财产安全(陶丽等, 2013)。例如 2013 年 9 月台风“天兔”影响我国福建、广东两省, 并在沿海形成十几米高的巨浪; 2014 年 7 月台风“威马逊”登陆我国华南地区, 造成了重大经济损失。TC 的不同移动路径直接关系到区域影响的差异, 因此开展 TC 移动路径规律的相关研究将有利于防范台风灾害。

TC 路径聚类是根据 TC 实际移动位置进行归类统计分析, 从而揭示登陆后 TC 发生发展潜在的机理和气候特征。早在 2003 年, Elsner(2003)使用 K-means 聚类算法对西北太平洋与北大西洋 TC 进行了分类, 但 Camargo et al.(2007a, 2007b)指出

K-means 算法对路径长度敏感度较低, 无法区分不同长度的路径。而有限混合模型(Finite Mixture Model, FMM)聚类算法(Ramsay et al., 2012; Camargo et al., 2008)则能克服上述 K-means 聚类算法的不足, 并且在西北太平洋(Camargo et al., 2007a, 2007b)、北大西洋(Nakamura et al., 2009; Kossin et al., 2010)与北太平洋东部的 TC 路径聚类分析中得到了有效验证。与此同时, Zhang et al.(2012)应用 FMM 算法对登陆中国后的 TC 路径进行聚类分析, 也取得了不错效果。

TC 的移动速度与环境流场的强弱、引导气流的大小关系密切(唐家翔, 2011)。对流层中层环流场与 TC 移动路径和速度呈显著性相关(Chan and Gray, 1982)。引导气流产生于大尺度环境风场相对集中的涡度平流(Wu and Wang, 2004)。因此, 在

引用格式: 耿焕同, 谢佩妍, 史达伟, 等, 2017. 基于 FMM 算法的夏秋季登陆中国热带气旋路径分类及特征分析[J]. 大气科学学报, 40(3): 390-400.

Geng H T, Xie P Y, Shi D W, et al., 2017. FMM algorithm for track classification and characteristic analysis of land-falling tropical cyclones over China during summer and autumn[J]. Trans Atmos Sci, 40(3): 390-400. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160509001. (in Chinese).

TC 的移动过程中,环境场与 TC 相互作用,影响其路径、强度和引导气流。在 TC 生成期,通常都伴随低层强烈辐合和对流活动(Zhang et al., 2012),低层相对涡度、弱垂直风切变等被视为利于 TC 生成的环境因素(Zhang et al., 2015)。垂直风切变产生的通风效应使得积云对流产生的凝结潜热迅速被带离初始扰动区上空,不利于暖心结构的形成。水汽凝结释放的潜热为 TC 生成维持暖心结构(李英等, 2005),所以 TC 登陆后能否获得水汽凝结潜热的补充,是其登陆后能否维持和发展的关键(Zhang et al., 2012)。

本文侧重对夏秋季登陆我国的 TC 进行研究,首先利用 FMM 算法对 1951—2012 年夏秋季登陆我国的 TC 整条路径进行聚类,然后对各类 TC 路径、生成和消亡地的环流形势特征进行归纳分析。

1 资料与方法

1.1 研究资料

TC 数据取自中国气象局上海台风研究所(Shanghai Typhoon Institute, STI)的最佳台风路径数据集,包括每 6 h 定位的经纬度坐标和最大风速,数据集年限为 1951—2012 年,共计 62 a。选取最大风速大于等于 17.2 m/s,生命史大于 1 d 的 522 个登陆中国的 TC 作为研究样本。TC 源地位置是 TC 第 1 次强度达到 17.2 m/s 的观测时次所出现的经纬度,消亡位置是 TC 最后 1 次强度达到 17.2 m/s 的观测时次出现的经纬度。

同时,还采用了 1951—2012 年 NCEP/NCAR 每 6 h 一次的再分析资料,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,提供各层标准等压面上的风场、温度场、相对湿度场等资料,垂直方向共有 17 层。

1.2 FMM 算法

采用 Gaffany(2004)开发的包含 FMM 算法的 MATLAB 工具箱 CCToolbox(<http://www.datalab.uci.edu/resources/CCT>),对登陆我国的 TC 路径进行聚类分析。

FMM 算法是一种无监督的通过曲线长度、形状及初始位置利用机器学习对曲线进行分类的算法,其特点使用基本概率组成密度来模拟概率密度,特别是非高斯密度(Nakamura et al., 2009)。将 TC 路径抽象为曲线,根据每一条 TC 的移动轨迹、起始经纬度,利用多项式回归模型进行回归分析(Zhang et al., 2012)。假设所有路径数据集为 Y, y_i 是第 i 个 TC 路径,由 n_i 个经纬度坐标(即观测到的 TC 位置组成): $\{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in_i}\}$ 。每条曲线长度为 n_i ,每条路径的观测时长为 x_i, x_i 用整数序列 $1, 2, 3, \dots, n_i$ 表示。以 p 次的多项式回归模型来定义 y_i 与 x_i 的关系,该 p 次多项式回归模型具有一个

高斯分布误差项 ε_i 。 y_i 与 x_i 的回归模型为:

$$y_i = x_i \beta + \varepsilon_i, \varepsilon_i \in N(0, \sigma^2 I). \quad (1)$$

利用标记 i 将基于类(簇)的条件密度表示为 $P(y_i | X_i)$:

$$P(y_i | X_i) = N(X_i \beta, \sigma_i^2 I). \quad (2)$$

式(1)、(2)中, X_i 是由 x_i 所求出的范特—蒙德矩阵,是一个 $n \times p$ 维的回归矩阵; β 是 p 维回归系数。 X_i 表达式为:

$$X_i = \begin{pmatrix} 1 & \dots & x_{i1}^p \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & x_{in}^p \end{pmatrix}. \quad (3)$$

由 FMM 得到 y_i 的混合密度函数:

$$P(y_i) = \sum_{k=1}^K \alpha_k P_k(y_i) = \sum_{k=1}^K \alpha_k P_k N(y_i | X_i \beta_k, \sigma_k^2 I). \quad (4)$$

式(4)中, k 为第 k 个类; P_k 为第 k 个类成分密度函数; α_k 为非负混合权重,总和为 1。

TC 路径的“形状和长度”是通过将每条路径观测点的经度、纬度的时间序列作为独立变量,用多项式回归函数进行拟合得到的,并根据形状和长度的相似程度分为 K 个回归模型,每个模型具有不同的参数、回归系数和噪声矩阵,每一条 TC 路径分配给 K 个模型中的一个(Zhang et al., 2012)。

2 夏秋季登陆我国 TC 路径的 FMM 聚类与时间特征分析

登陆我国 TC 路径一般分为三类(朱乾根, 1992),张倩影等(2015)虽利用模糊 C 聚类法将路径分为六类,但又根据路径的起源地及地理空间走向,最终亦将路径大致归为三类。本文采用 FMM 算法,根据 TC 路径的形状、长度及位置,对 1951—2012 年夏秋季登陆我国 TC 路径进行聚类,将聚类数同样设为 3,聚类结果如图 1 所示。可见,利用 FMM 算法对 TC 路径相似程度进行分类,较好地体现了 TC 相似方向与形状,是一种更为准确的客观分类方法。

2.1 TC 源地、强度和生命史分析

从表 1 可以看出,第一类 TC(登陆转向型)的平均源地在冲绳岛东南方约 470 km 的洋面,影响我国的海岸线最长,影响区域最广,对长三角、珠三角、京津冀等经济发达地区均有影响,甚至影响到朝鲜半岛及日本列岛。该类 TC 强度较强,平均生命史达 8 d;第二类 TC(登陆西移型)的平均源地位于我国南海北部区域,与其他类型相比,其强度最弱,持续时间最短,主要影响我国福建、广东、广西一带;第三类 TC(登陆西北型)的平均源地位置在吕宋岛东约 400 km 的洋面上,该类 TC 强度最强,平均生命

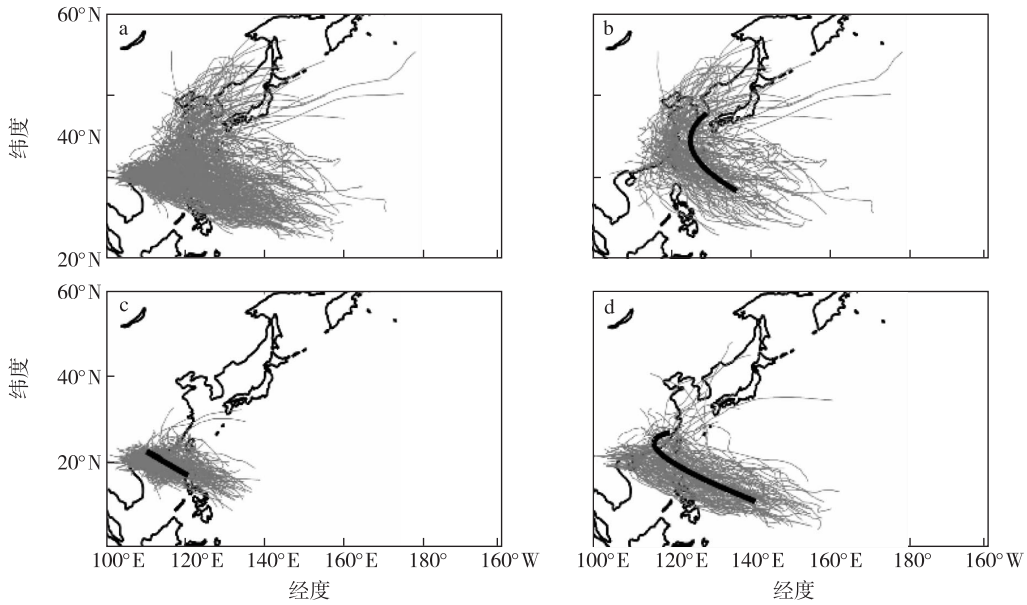


图1 1951—2012年夏秋季登陆我国的TC路径的FMM聚类结果(图中灰色实线为每条路径;b—d中路径上的黑色加粗曲线为平均路径,代表每一类路径的平均状况) a.1951—2012年夏秋季登陆我国的TC路径分布状况;b—d.分别为第一类、第二类和第三类的路径

Fig.1 The clustering results of land-falling TC tracks over China during summer and autumn from 1951 to 2012 by using FMM algorithm(Gray solid curves represents the TC tracks;The black solid curves represents mean tracks in Fig.1(b)—Fig.1(d);(a) the distribution of land-falling TC tracks over China during summer and autumn from 1951 to 2012;(b—d) TC tracks of Cluster-1,Cluster-2 and Cluster-3

表1 夏秋季登陆我国三类TC的统计特征

Table 1 The characteristics of the three clusters of landfall TC tracks over China during summer and autumn

TC 分类	平均起始经度/(°)	平均起始纬度/(°)	平均强度/($m \cdot s^{-1}$)	平均生命史/d	年均路径频数/次	占总频数比例/%
第一类	128.63	24.57	53.01	7.91	2.65	31
第二类	115.84	19.24	39.23	5.05	3.54	42
第三类	125.95	17.38	58.31	9.02	2.32	27

史最长,约为9 d,对我国福建、浙江地区影响较大。

2.2 各类TC夏秋季活动特征

对登陆我国TC的盛行期(6—11月)发生频数进行统计(图2)。总体来看,夏秋季均有TC登陆我国,但7—9月为TC活动高峰期。第一、二类路径的TC在6—9月频数较高,10—11月频数较低;第三类路径的TC在6—10月均可能出现。

2.3 各类TC频数的年际变化特征

图3为各类TC的年变化趋势,拟合率均为95%。由图3可见,登陆我国的第一类TC在20世纪60年代出现一次峰值,20世纪90年代以后登陆我国的第一类TC数量接近均值,每年约3~4个;第二类TC在20世纪60年代及90年代各出现一次峰值;第三类TC在20世纪60年代、20世纪90年代—21世纪初呈现明显的谷值,近年来有增加趋势。

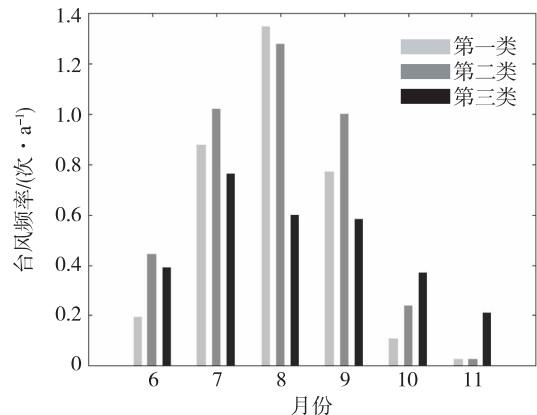


图2 夏秋季(6—11月)登陆我国三类TC的发生频率(单位:次/a)

Fig.2 Occurrence frequency of the three land-falling TC tracks over China during summer and autumn (units: times $\cdot a^{-1}$)

3 各类 TC 路径的大尺度环流场形势分析

3.1 500 hPa 不同路径下 TC 的环流场形势与引导气流分析

图 4 为 500 hPa 夏秋季登陆我国的三类 TC 综

合平均高度场与平均引导气流(林春辉,1984)。分析 500 hPa 夏秋季 6—11 月不同路径下 TC 环流形势的区别:受 β 效应影响,三类 TC 路径均有向西偏北、西北方向移动的趋势。第一类 TC,副高西伸脊点位置较第二类偏东,但在经向上副高脊线、副高西伸脊点位置较第二类、第三类 TC 偏北,位于日本上

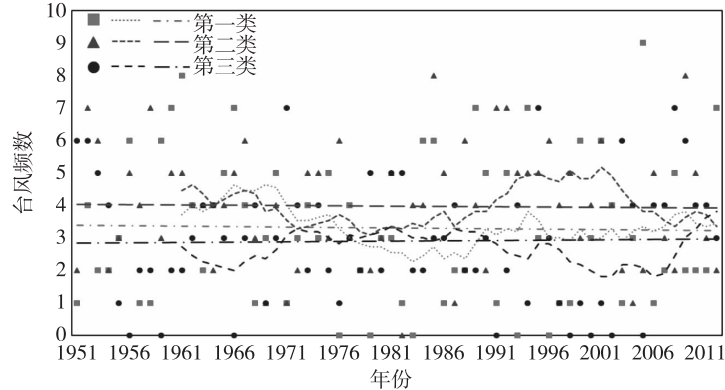


图 3 三类 TC 发生频数的年际变化及其趋势(散点为历年值;曲线为 11 a 滑动平均;直线为一次多项式拟合曲线)

Fig.3 The inter-annual change and trend of the three types TC occurrence frequency(The points mark the time series of the number of TCs;The curves mark the 11-year moving average;The straight lines mark the polynomial curve fitting)

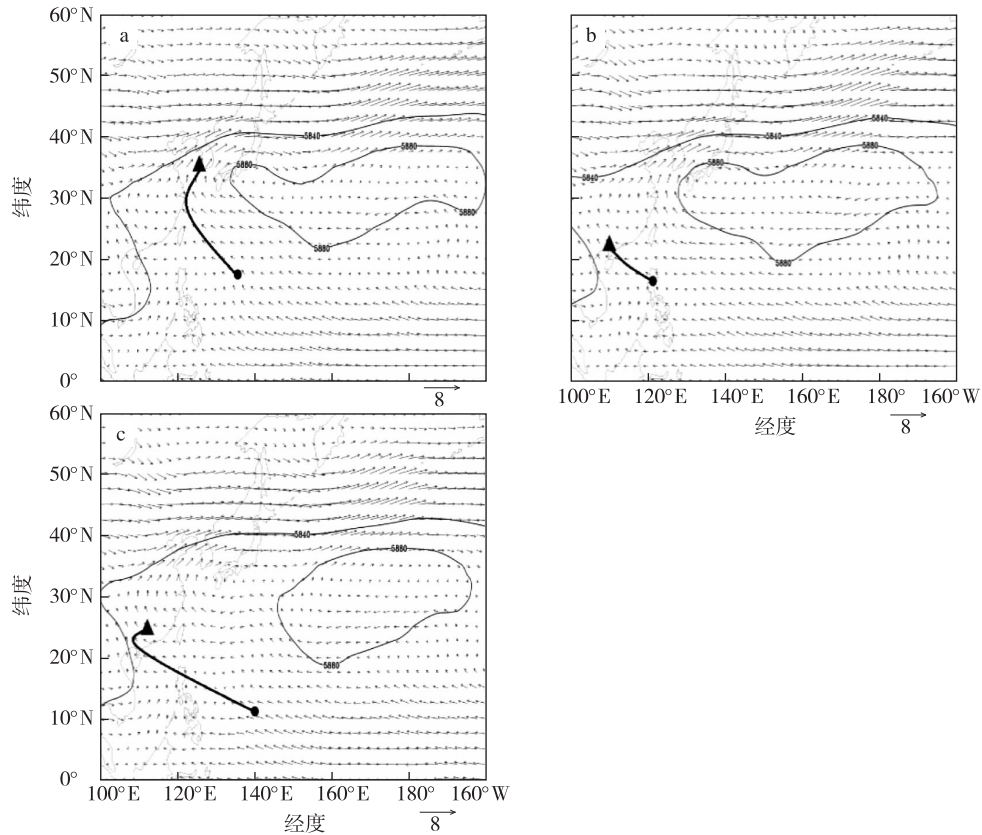


图 4 500 hPa 夏秋季三类 TC 综合平均高度场(黑色等值线;单位:dagpm)与平均引导气流(箭头;单位: $m \cdot s^{-1}$)(黑色实心圆为平均源地,黑色实心三角形为平均消亡地,黑色实线为平均路径) a.第一类;b.第二类;c.第三类

Fig.4 The composite 500 hPa mean geopotential heights field(contours in black;units: dagpm) and average mean wind fields (vector;units: $m \cdot s^{-1}$) of three clusters(Also shown are the mean genesis location(black solid round); the mean disappearance location(black solid triangle) and the mean trajectory(black line)): (a) Cluster-1; (b) Cluster-2; (c) Cluster-3

空,其移动受副高南部东南气流引导,在副高脊点所在纬度附近发生转向,进而北上;第二类 TC,其副高强度最强,副高脊线、副高西伸脊点与第一类、第三类 TC 相比,明显偏西,脊点位置在 128°E 附近,到达东海、日本南部上空,其移动受副高南部偏东气流引导;第三类 TC,路径所对应的副高主体在三类 TC 路径中最偏东,副高脊线、副高西伸脊点在 147°E 附近,位置较第一类偏南,受洋面较强的偏东气流引导以及 β 效应影响,第三类 TC 向西北方向移动靠近我国大陆。

从图 5、图 6 可以看出,不论是单层引导气流,还是地面—500 hPa 气压加权平均引导气流(王长甫等,1991),引导气流最大的是第三类 TC,其次是第二类 TC,第一类 TC 的引导气流速度最小。

3.2 相对涡度、散度与风场分析

对比低层(850 hPa)、高层(200 hPa)三类 TC 在生成和消亡时的相对涡度、散度与风场(图 7、8)。第一类 TC 的相对涡度在消亡时比生成时高,低层辐合程度是三类中最弱的,但消亡时 TC 附近以负涡度为主,且高层辐散程度较强;第二类 TC 在生成

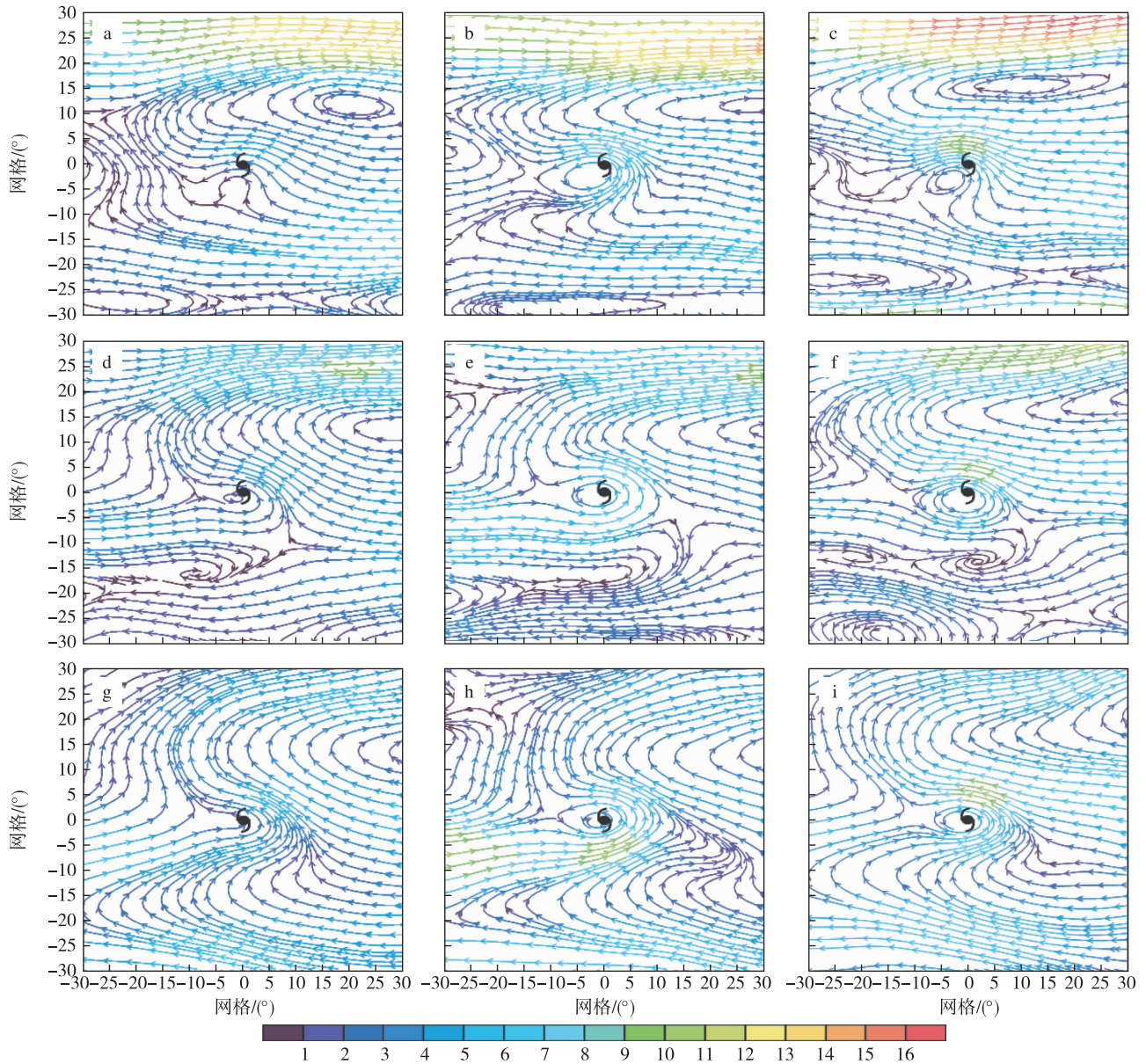


图 5 500 hPa (a—c)、700 hPa (d—f) 和 850 hPa (g—i) 的引导气流(以 TC 为中心,坐标为 (0,0), 60°×60° 区域; 单位: $m \cdot s^{-1}$) a, d, g. 第一类; b, e, h. 第二类; c, f, i. 第三类

Fig.5 Steering flow(units: $m \cdot s^{-1}$) over the 60°×60° region anchored at TC centers in (a—c) 500 hPa, (d—f) 700 hPa and (g—i) 850 hPa: (a, d, g) Cluster-1; (b, e, h) Cluster-2; (c, f, i) Cluster-3

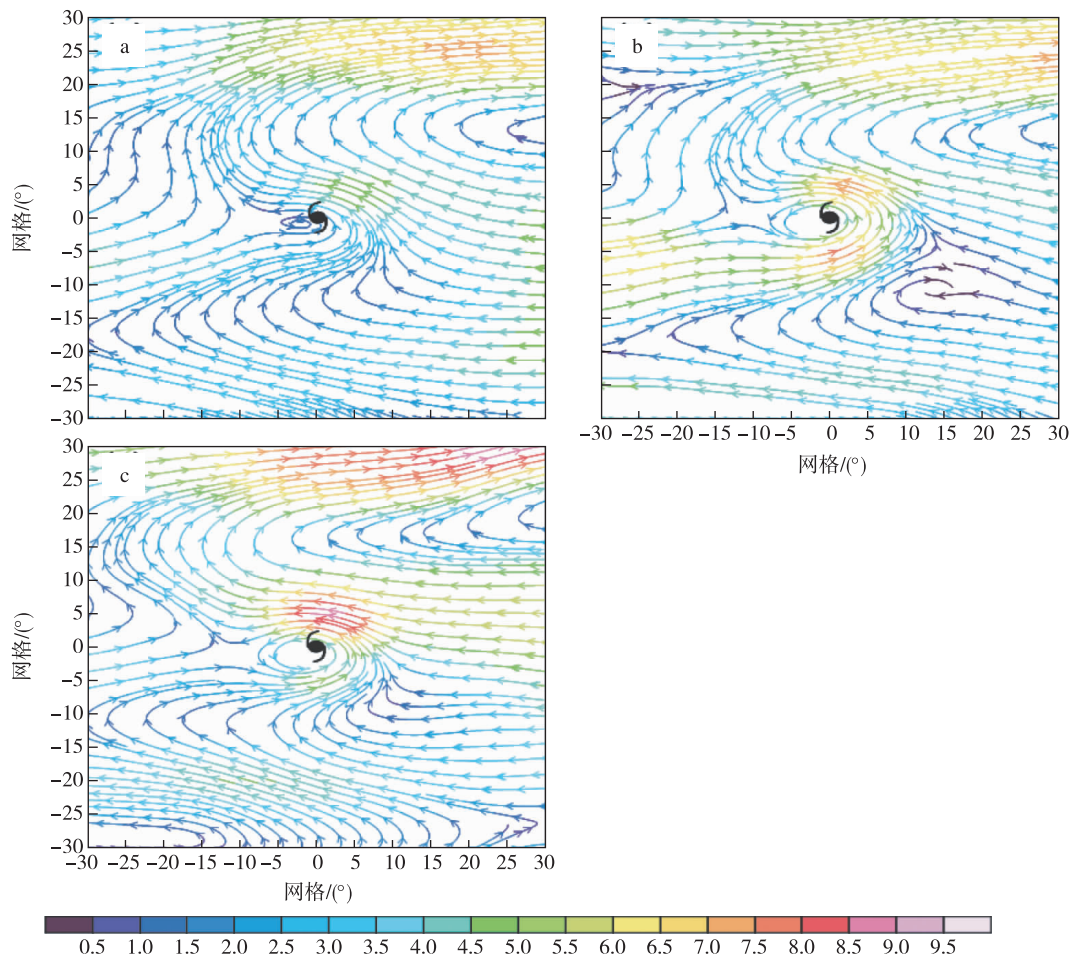


图6 地面—500 hPa 气压加权引导气流(以 TC 为中心,坐标为(0,0), $60^\circ \times 60^\circ$ 区域;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
a.第一类;b.第二类;c.第三类

Fig.6 The weighted mean steering flows of the pressure from surface to 500 hPa (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) over the $60^\circ \times 60^\circ$ region anchored at TC centers: (a) Cluster-1; (b) Cluster-2; (c) Cluster-3

时低层伴有较为明显的气旋性环流,在消亡时低层辐合程度较生成时弱,为三类中最弱,且高层辐散程度明显较生成时弱很多;第三类 TC 在生成与消亡时的相对涡度从数值上看差异不大,但在消亡时 TC 附近多为负涡度区,且高层伴有明显的反气旋性环流。

3.3 纬向风垂直切变对 TC 生成和消亡的影响

采用台风周围一定范围内的上层(200 hPa)与下层(850 hPa)的区域平均的纬向风差值绝对值作为垂直切变。比较图 9 中三类 TC 在生成和消亡时的纬向风垂直切变发现:三类 TC 在生成时的垂直切变均在 10 m/s 以下,其中第三类 TC 最大为 $6 \sim 9 \text{ m/s}$,第二类次之,第一类最小为 $2 \sim 6 \text{ m/s}$;在消亡时,第一类 TC 的垂直切变为 $8 \sim 12 \text{ m/s}$,比生成阶段强,与 Wong and Chan(2004)的结论一致,即当垂直切变为 10 m/s 时,TC 强度迅速减弱。第二类、第三类 TC 在消亡时的垂直切变较生成时的差异不够

明显,第二类 TC 的低层辐合最弱,第三类 TC 受反气旋性环流影响,TC 逐渐减弱衰退。

3.4 850 hPa 水汽输送对 TC 的生成和消亡的影响

图 10 为三类 TC 在生成和消亡时 850 hPa 的水汽输送,可见西风气流将水汽向 TC 附近输送:第一类 TC 在生成时的水汽输送较弱,在消亡时 TC 东南部的的水汽输送较多,西北部水汽输送很少;第二类 TC 在生成时从洋面上输送过来的水汽很强,在消亡时相对变弱;第三类 TC 在生成时的水汽较多,在消亡时水汽供给不及生成期。

比较三类 TC 的水汽输送可知:在生成时,第一类 TC 的强度较第二类、第三类弱,且第二类、第三类 TC 周围有明显的气旋性环流;在消亡时,第一类 TC 的气旋性环流显著,第二类 TC 西部仍有较强的水汽并向东北输送,第三类 TC 东部有较强的水汽供给。水汽输送主要来源于中国南海与西北太平洋,第二类、第三类 TC 的西南气流较第一类强,无

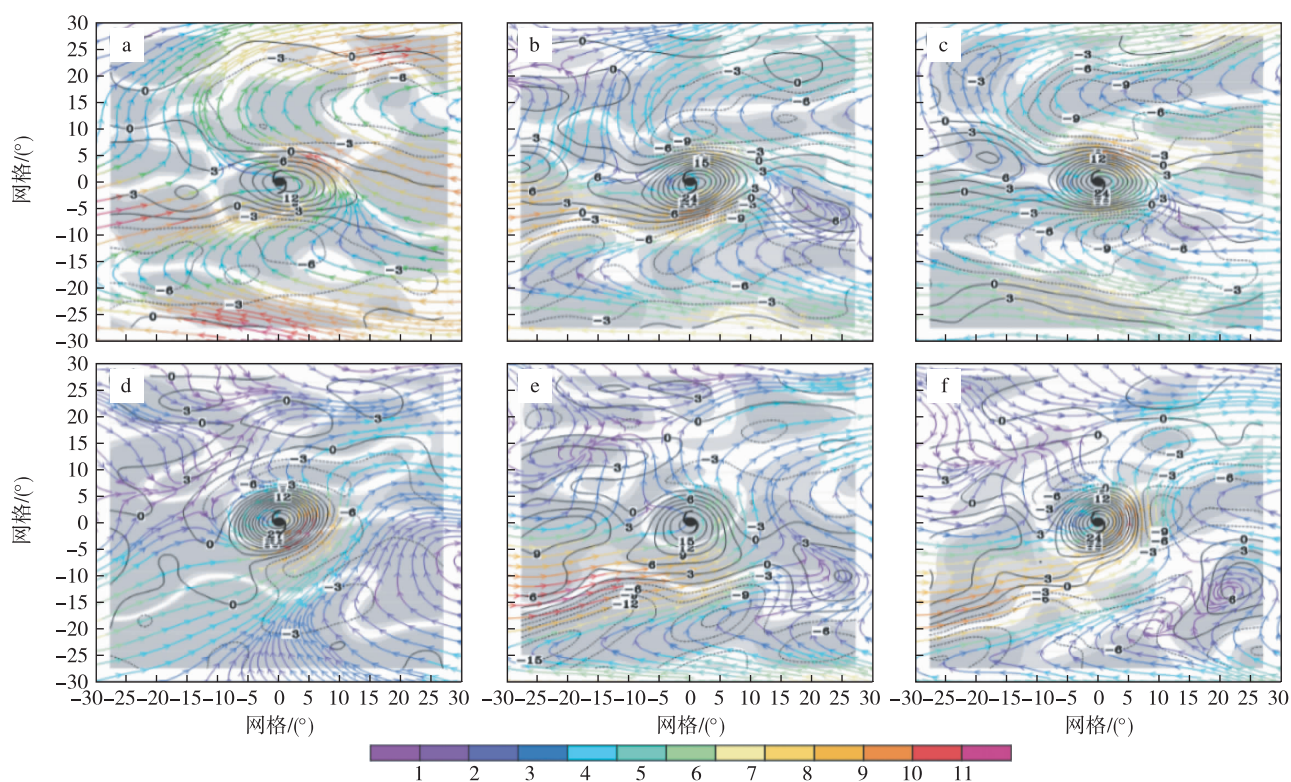


图7 三类 TC 在生成(a—c)与消亡(d—f)时的 850 hPa 相对涡度(等值线;单位: $10^{-6} s^{-1}$) 与风场分布(流线;单位: $m \cdot s^{-1}$) (以 TC 为中心,坐标为(0,0), $60^{\circ} \times 60^{\circ}$ 区域;阴影区表示通过置信度为 99% 的显著性检验) a, d, 第一类; b, e, 第二类; c, f, 第三类

Fig.7 The composite of 850 hPa relative vorticity(contour; units: $10^{-6} s^{-1}$) and wind fields(stream; units: $m \cdot s^{-1}$) of the three clusters in (a—c) genesis and (d—f) disappearance location after landfall over the $60^{\circ} \times 60^{\circ}$ region anchored at TC centers (Shading indicates the statistical significance of relative vorticity at the 99% level; Coordinate(0,0) marks the TC's center): (a, d) Cluster-1; (b, e) Cluster-2; (c, f) Cluster-3

论在生成还是消亡时,第一类 TC 的水汽输送最弱。

4 结论与讨论

本文利用 FMM 算法对 1951—2012 年夏秋季(6—11 月)所有登陆我国的 TC 路径进行聚类分析,将其分为三类,并对比分析了每类路径下 TC 生命期的特征,主要结论有:

1) 在夏季,第一、二类 TC 出现的频数高于第三类,但在秋季(尤其是 11 月份),这两类 TC 鲜少活动,而第三类在秋季时的出现频数最高。

2) 第一类 TC 生成位置偏东、偏北,强度较强,生命史较长,路径略有向北发展的趋势,影响区域最广;第二类 TC 生命史最短,主要影响我国两广、福建一带;第三类 TC 生命史最长,从路径上看,略向西北方向发展。

3) 第一类 TC 的副高脊线西伸脊点位置最偏北,气旋周围东南气流转为西南气流,引导气流速度最小,生成时具有最弱的低层辐合、纬向风垂直切变和水汽输送,消亡时的水汽供给也是三类中最弱的,但有完整的气旋性结构;第二类 TC 的副高脊线西伸脊点位置最偏西,气旋周围以东南偏东气流为主导,消亡时低层辐合程度最弱;第三类 TC 的副高脊线西伸脊点位置最偏东,也最偏南,气旋周围东南气流转为西南气流,引导气流速度最大,生成时的垂直切变与源地、消亡水汽输送较第一、二类强。

本文仅仅研究了夏秋季登陆我国 TC 路径分类的气候规律,对于影响 TC 路径移动的具体因素,如 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)、MJO(Madden-Julian Oscillation)等,将是进一步要开展的研究工作。

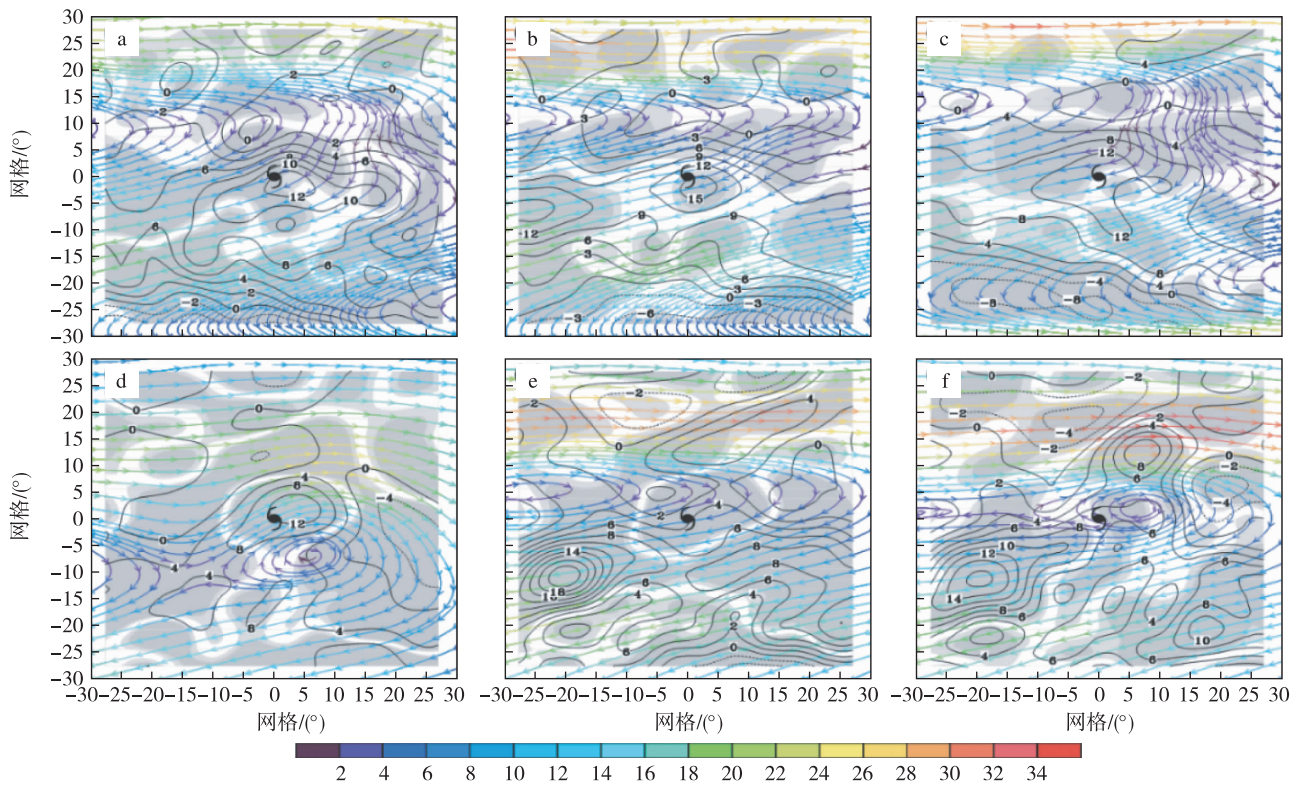


图 8 三类 TC 在生成(a—c)与消亡(d—f)时的 200 hPa 散度场(等值线;单位: 10^{-6} s^{-1})与风场分布(流线;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (以 TC 为中心,坐标为(0,0), $60^{\circ} \times 60^{\circ}$ 区域;阴影区表示通过置信度为 99%的显著性检验)

a, d. 第一类; b, e. 第二类; c, f. 第三类

Fig.8 The composite of 200 hPa divergence field (contour; units: 10^{-6} s^{-1}) and wind fields (stream; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of the three clusters in (a—c) genesis and (d—f) disappearance location after landfall over the $60^{\circ} \times 60^{\circ}$ region anchored at TC centers (Shading indicates the statistical significance of relative vorticity at the 99% level; Coordinate (0,0) marks the TC's center): (a, d) Cluster-1; (b, e) Cluster-2; (c, f) Cluster-3

参考文献 (References)

- Camargo S J, Robertson A W, Gaffney S J, et al., 2007a. Cluster analysis of typhoon tracks. Part I: General properties [J]. *J Climate*, 20 (14): 3654-3676.
- Camargo S J, Robertson A W, Gaffney S J, et al., 2007b. Cluster analysis of typhoon tracks. Part II: Large-scale circulation and ENSO [J]. *J Climate*, 20 (14): 3654-3676.
- Camargo S J, Robertson A W, Barnston A G, et al., 2008. Clustering of eastern North Pacific tropical cyclone tracks: ENSO And MJO effects [J]. *Geochimistry Geophysics Geosystems*, 9 (6): 104-107.
- Chan J CL, Gray W M, 1982. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships [J]. *Mon Wea Rev*, 110 (10): 1354-1374.
- Elsner J B, 2003. Tracking hurricanes [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 84 (3): 353-356.
- Gaffney S J, 2004. Probabilistic curve-aligned clustering and prediction with regression mixture models [D]. Paris: Laboratoire MAS.
- Kossin J P, Camargo S J, Sitkowski M, 2010. Climate modulation of North Atlantic hurricane tracks [J]. *J Climate*, 23 (11): 3057-3076.
- 李英, 陈联寿, 徐祥德, 2005. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验 [J]. *大气科学*, 29 (1): 91-98. Li Y, Chen L S, Xu X D, 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation [J]. *Chin J Atmos Sci*, 29 (1): 91-98. (in Chinese).
- 林春辉, 1984. 500 毫巴引导气流与南海海区台风移速突变分析 [J]. *热带海洋学报*, 3: 20-28. Lin C H, 1984. An analysis of the 500 mb leading air current and the sudden variation in the typhoon moving velocity over the South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 3: 20-28. (in Chinese).
- Nakamura J, Lall U, Kushnir Y, et al., 2009. Classifying North Atlantic tropical cyclone tracks by mass moments [J]. *J Climate*, 22 (20): 5481-5494.
- Ramsay H A, Camargo S J, Kim D, 2012. Cluster analysis of tropical cyclone tracks in the southern Hemisphere [J]. *Climate Dyn*, 39 (3/4): 897-917.
- 唐家翔, 2011. 西北太平洋台风移动的气候变化及其与大尺度引导气流的关系 [D]. 南京: 南京信息工程大学. Tang J X, 2011. Climate change on typhoon movement in the Northwestern Pacific and its relationship with large scale steering flow [D]. Nanjing: Nanjing University of Informa-

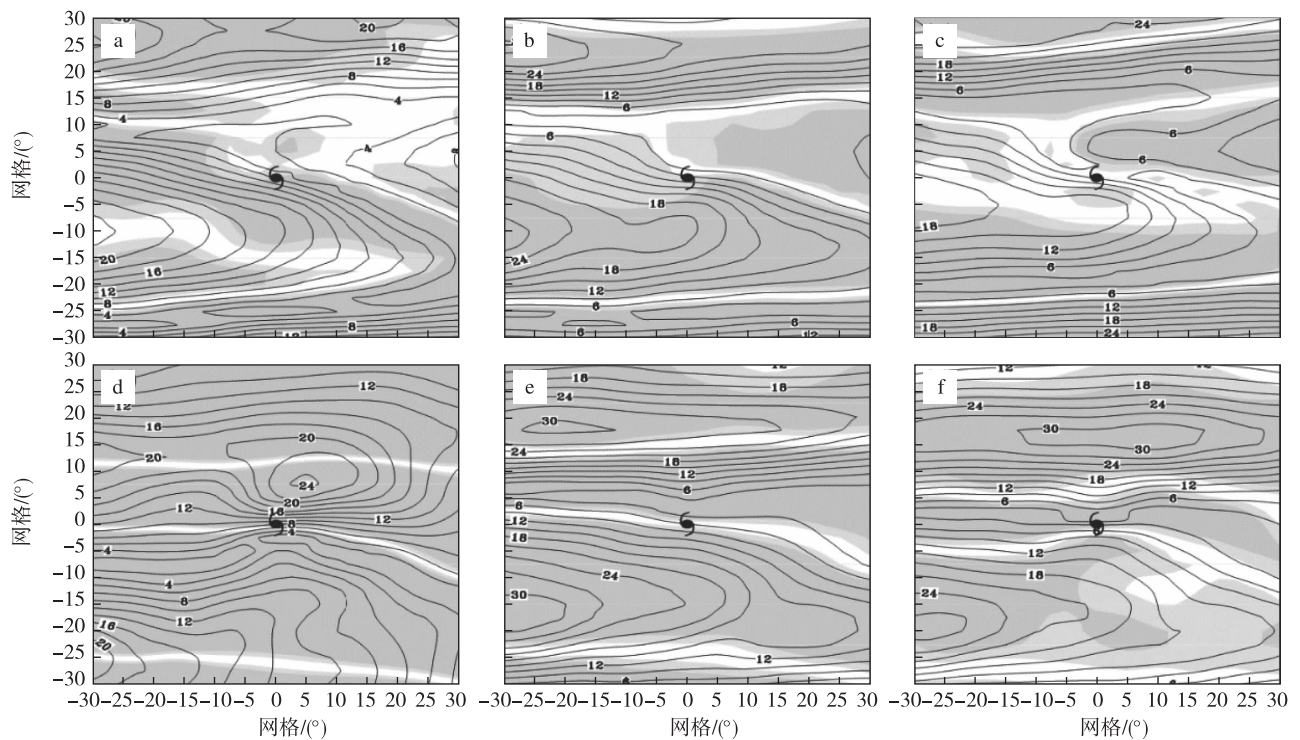


图9 三类TC在生成(a—c)与消亡(d—f)时的200~850 hPa纬向风垂直切变(等值线;单位: $m \cdot s^{-1}$)(以TC为中心,坐标为(0,0), $60^\circ \times 60^\circ$ 区域;阴影区表示通过置信度为99%的显著性检验) a,d.第一类;b,e.第二类;c,f.第三类

Fig.9 The composite of vertical zonal wind shear(850 to 200 hPa;units: $m \cdot s^{-1}$) of the three clusters in (a—c) genesis and (d—f) disappearance location after landfall over the $60^\circ \times 60^\circ$ region anchored at TC centers(Shading indicates the statistical significance of relative vorticity at the 99% level;Coordinate (0,0) marks the TC's center):(a,d) Cluster-1;(b,e) Cluster-2;(c,f) Cluster-3

tion Science & Technology.(in Chinese).

陶丽,靳甜甜,濮梅娟,等,2013.西北太平洋热带气旋气候变化的若干研究进展[J].大气科学学报,36(4):504-512. Tao L, Jin T T, Pu M J, et al., 2013. Review of the researches on climatological variation of tropical cyclones over western North Pacific[J]. Trans Atmos Sci, 36(4):504-512. (in Chinese).

王长甫,余荣华,刘福晓,等,1991.多层加权平均引导台风路径预报方法[J].应用气象学报,4:434-439. Wang C F, Yu R H, Liu F X, et al., 1991. A multiple-layer weighted mean steering method of the typhoon track forecast[J]. Quart J Appl Meteor Sci, 4:434-439. (in Chinese).

Wong M L M, Chan J C L, 2004. Tropical cyclone intensity in vertical wind shear[J]. J Atmos Sci, 61(15):1859-1876.

Wu L, Wang B, 2004. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks[J]. J Climate, 17(8):1686-1698.

张倩影,钟少波,黄全义,2015.基于模糊C均值的广东省登陆热带气旋路径分类研究[J].灾害学,4:187-193. Zhang Q Y, Zhong S B, Huang Q Y, 2015. Classification of tropical cyclone tracks striking Guangdong from 1949—2013 based on Fuzzy C-means[J]. Journal of Catastrophology, 4:187-193. (in Chinese).

Zhang W, Leung Y, Wang Y, 2012. Cluster analysis of post-landfall tracks of landfalling tropical cyclones over China[J]. Climate Dyn, 40(5/6):1237-1255.

Zhang W, Fu B, Peng M S, et al., 2015. Discriminating developing versus nondeveloping tropical disturbances in the western North Pacific through decision tree analysis[J]. Wea Forecasting, 30(2):446-454.

朱乾根,1992.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社. Zhu Q G, 1992. Synoptic principles and methods[M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).

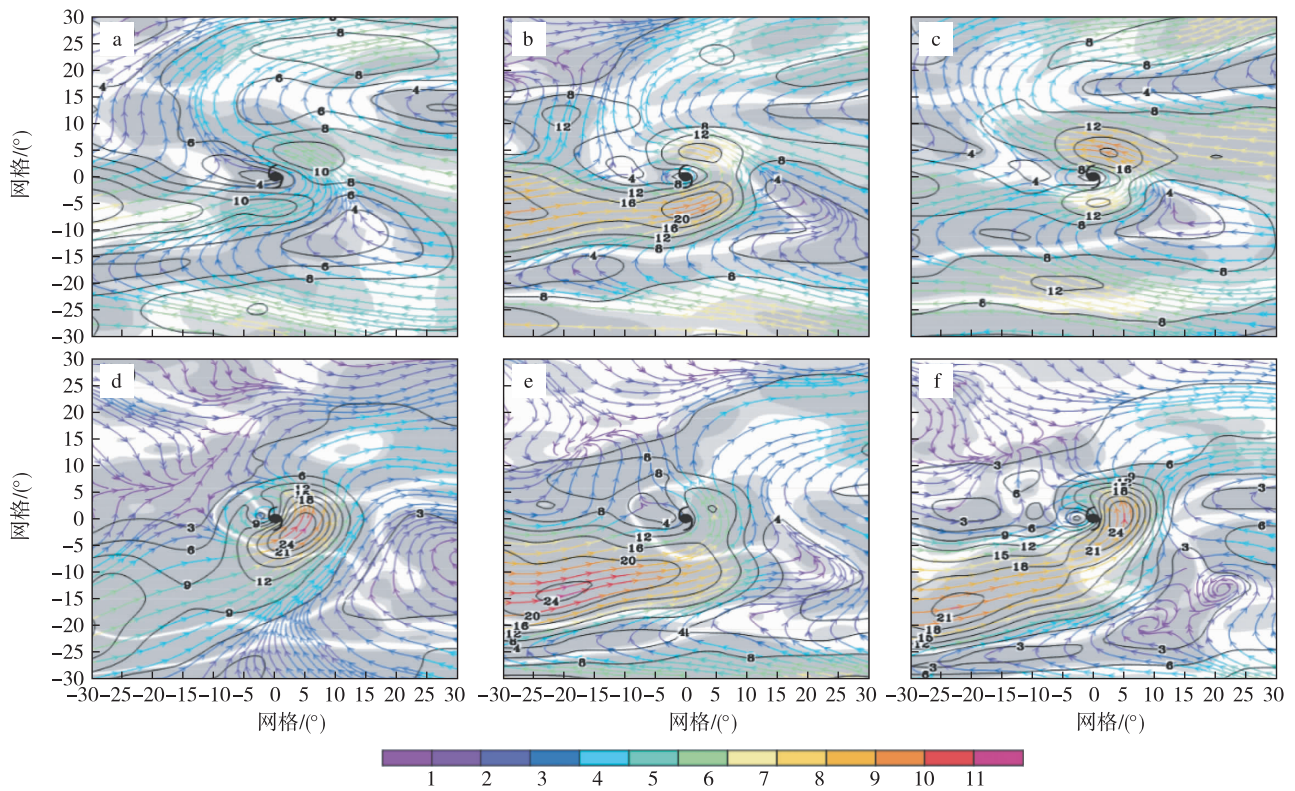


图 10 三类 TC 在生成(a—c)与消亡(d—f)时的 850 hPa 水汽通量(等值线;单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)及风场(流线;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)分布(以 TC 为中心,坐标为(0,0), $60^\circ \times 60^\circ$ 区域;阴影区表示通过置信度为 99% 的显著性检验)
a, d. 第一类; b, e. 第二类; c, f. 第三类

Fig.10 The composite of 850 hPa water vapour flux(contour;units: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$) and wind fields(stream;units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of the three clusters in (a—c)genesis and (d—f)disappearance location after landfall over the $60^\circ \times 60^\circ$ region anchored at TC centers (Shading indicates the statistical significance of relative vorticity at the 99% level;Coordinate(0,0) marks the TC's center):(a, d) Cluster-1;(b, e) Cluster-2;(c, f) Cluster-3

FMM algorithm for track classification and characteristic analysis of land-falling tropical cyclones over China during summer and autumn

GENG Huantong¹, XIE Peiyan², SHI Dawei³, Li Junhui²

¹ College of Computer and Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

³ Lianyungang Meteorology Bureau, Lianyungang 222000, China

To further explore tropical cyclones' (TCs) law and climate characteristics of occurrence, development and disappearance, this study applies Finite-Mixed-Model (FMM) which is based on clustering algorithms to cluster landfall tracks of TCs over China during summer and autumn (from June to November). The data of typhoon best-tracks and circulation fields are from the Shanghai Typhoon Institute (STI) of China Meteorological Administration (CMA) and 6-hourly reanalysis data of wind and other fields from NCEP/NCAR for the period 1951—2012 during summer and autumn. The three clusters are analyzed for comparison in terms of TC's active season, frequency and circulation.

The TC tracks landing China are divided into three categories by using FMM algorithm, which corresponds with the traditional classification result. Cluster-1 approximates the recurve-landing type, Cluster-2 approximates to the westward-landing type, and Cluster-3 approximates to the northwest-landing type. The findings are summarized

as follows. In summer, Cluster-1 and Cluster-2 appear more frequently than Cluster-3, however, Cluster-3 has the highest frequency of occurrence in autumn. The generate location of Cluster-1 is the most northward, and the intensity is relatively strong. The track of Cluster-1's development shows northward trend, affecting the most extensive region, such as the Yangtze River Delta, the Pearl River Delta, Beijing, Tianjin and other economically developed areas, and even affect the Korean Peninsula and the Japanese Islands. The generate location of Cluster-2 is the most westward, its lifetime is the shortest and its intensity is the weakest, but it owns the highest frequency of occurrence. This type mainly affects China's Guangdong, Guangxi and Fujian. The generate location of Cluster-3 is the most southward, and its lifetime is the most enduring, but more inactive than Cluster-1 and Cluster-2. With respect to the track, this type slightly move to the northwest direction. Cluster-3 mainly affects China's Fujian, Zhejiang.

Through the analysis of the circulation situation, results are shown as follows. The west-extending ridge point of the subtropical ridge line's location of Cluster-1 is the most northward, and the southeast airflow turns to the southwest airflow around the cyclone, which leads to the minimum steering flow velocity. When generating, Cluster-1 has the lowest convergence degree, zonal wind vertical shear and water vapor transportation. The water vapor supply during the decaying process is also the weakest among the three classes, but still has a complete cyclonic structure. The west-extending ridge point of the subtropical ridge line's location of Cluster-2 locates the most westward, with the southeastward easterly airflow dominated by the cyclone. When disappearing, the convergence over the lower level is the weakest. The location of Cluster-3's west-extending ridge point is the most eastward and southward, and the southeast airflow turns to the southwest airflow around the cyclone, which leads to the maximum steering flow velocity. This cluster owns the strongest vertical zonal wind shear when occurring. Both in occurring and decaying stage, water vapor supply of Cluster-3 is the strongest among the three clusters.

The above work and conclusions not only enrich the research of TC tracks, but also provide reference for climate diagnosis and new ideas for scientific research in the field of data mining and meteorology.

Finite Mixed Model (FMM); tropical cyclone; track clustering; climate characteristics; large-scale circulation field

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160509001

(责任编辑:孙宁)