

基于路径分类的登陆中国热带气旋时空特征分析

马超, 刘青青, 许红师

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 利用中国气象局提供的1972—2013年登陆中国的西北太平洋热带气旋最佳路径数据集, 根据TC的风速和地理位置, 采取*K-means*聚类算法确定其路径分类; 统计分析登陆TC总体和各类别的时空演变特征, 包括生成位置、路径形状、活动季节及频数和强度。结果表明: 登陆TC可分为5类, 包括直行路径(A、B和D类)和转向路径(C、E类)。A、D类主要登陆华南; B、E类以登陆台湾岛及华东沿海为主; C类主要登陆华东中部沿海地区。生成位置自西向东越靠近150°E的登陆TC, 其平均强度相对越大。总体登陆TC的年均频数呈增加趋势, 年均强度呈减弱趋势。登陆强度以STS和TY等级为主, 占65.8%; STY和Super TY等级仅占13.1%, 主要集中在B、D、E类。

关键词: 登陆热带气旋; *K-means* 聚类算法; 路径分类; 时空特征

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2016)03-0065-06

1 引言

中国是世界上登陆热带气旋(TC)最多的国家之一, 从辽宁至广西漫长的沿海地区均有可能发生TC登陆^[1]。TC是一种具有强大影响的灾害性天气系统, 其主要灾害常在登陆前后造成^[2-3]。因此, 研究登陆中国TC的时空变化特征具有重要现实意义, 也是当前关注的重点研究课题。李英等^[4]统计分析1970—2001年登陆中国TC的频率、位置、维持、衰减、变性、加强及消亡等特征, 发现登陆中国不同地区(不包括岛屿)的TC在陆上维持时间明显不同; 王小玲等^[4]通过分析1951—2004年登陆中国的TC频数和强度变化, 发现登陆TC频数呈减少趋势, 平均登陆强度无明显变化; 张翰等^[5]采用1951—2010年的TC最佳路径资料, 分析了登陆中国TC频数的年际变化规律和登陆纬度的分布特征, 并发现1970年后TC资料的一致性更高; 梁海萍等^[6]对1964—2013年登陆海南省的TC特征进行统计分析, 表明登陆海南省的TC主要路径是西行型及西北行型, 登陆频数的年代际呈现增减阶段性转换的

变化特征。

前人研究大多分析了登陆中国或某一地区TC的频数、强度及登陆区域等问题, 对其路径分类则很少研究。TC路径分类是获得其时空特征的重要途径。目前, 研究TC的最佳路径数据集来源主要包括中国气象局(CMA)、美国台风警报中心(JTWC)、香港天文台(HKO)和东京台风中心(RSMC Tokyo)^[7]。研究表明, 开展影响中国的TC分析, CMA提供的数据具有明显优势^[8]。在分类方法方面, 客观分析法, 包括回归混合模型、*K-means*聚类算法和模糊c-均值聚类算法等, 是当今研究的主流方法^[9-11], 均已在西北太平洋和大西洋等区域的TC分类中取得了成功应用。

本文根据1972—2013年登陆中国的TC最佳路径数据集资料, 采取*K-means*聚类算法对登陆TC路径进行分类; 在此基础上, 统计分析各类及总体TC的时空特征, 包括生成位置与路径形状、活动季节、登陆特征、频数和强度特征。所得结果可为开展TC预警预报及灾害防御工作提供信息和决策支持。

收稿日期: 2015-09-26

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(B14042); 天津市应用基础与前沿技术研究计划(一般项目)(15JCYBJ21800)。

作者简介: 马超(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事城市防灾减灾研究。E-mail: mac_tju@126.com

2 资料与方法

2.1 资料来源

登陆TC最佳路径数据集来源于中国气象局热带气旋资料中心 (<http://tcdata.typhoon.gov.cn/>), 包括1972—2013年西北太平洋和南海地区 (0° — 55°N , 105° — 180°E) 每个登陆TC的年份、序号、登陆时强度等级和每6 h的经度、纬度、2 min最大平均风速(Maximum Sustained Wind Speeds, MSW)及中心最低气压。依据《热带气旋等级》(GB T 19201—2006), 本文将达到TS及以上强度等级(即 $\text{MSW} \geq 17.2 \text{ m/s}$)且生命史在24 h及以上的共296个登陆TC(不包括副中心登陆)样本作为研究对象, 并将其MSW首次达到 17.2 m/s 时的位置定义为生成位置。此外, 研究所需的Niño 3、Niño 3.4和Niño 4指数来自KNMI气候资源管理 (<http://climexp.knmi.nl/>)。

2.2 分类方法

采用K-means聚类算法进行TC路径分类, 需要确定聚类数据集和度量准则。

第一, 根据Nakamura等^[10]提出的非闭合曲线的质量矩定义TC路径, 包括2个质心和3个方差, 可综合表征TC的有效重心、路径方向、长度和曲率等特征。采取式(1)和式(2)计算每个登陆TC样本对应的5个参数, 形成聚类数据集。

第二, 聚类的相似度量与收敛函数分别选用欧氏距离与误差平方和准则, 类内样本的聚集度和类间样本的区分度采用“轮廓值”^[10]表征, 第*i*点的轮廓值 S_i 定义见式(3)。当 S_i 的平均值最大且对应的 S_i 负值个数最少时, 即可得出最优分类数K。

质心:

$$M1 = \frac{1}{A} \int w(r) r dx dy = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w(r_i)} \sum_{i=1}^n w(r_i) r_i \quad (1)$$

方差:

$$M2 = \frac{1}{A} \int w(r) (r - M1)^2 dx dy = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w(r_i)} \sum_{i=1}^n w(r_i) (r_i - M1_i)^2 \quad (2)$$

轮廓值:

$$S_i = \frac{\min(b_i) - a_i}{\max[a_i, \min(b_i)]}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: r 为TC路径上的经纬度坐标, $w(r)$ 为TC路径上与定位点位置有关的权重, A 为反映TC强度的常数, n 为TC路径上的定位时次, a_i 和 b_i 分别为第*i*点与同类和所有不同类中各点之间的平均距离。基于文献[9], 权重 $w(r)$ 取为 $\sqrt{v}$, M1和M2的系数分别设定为1/4和1/6。

3 登陆TC路径分类

根据式(3)构建K与 S_i 之间的对应关系, 结果见图1。当K=5时, S_i 的平均值最大, 同时相应的负值个数最少。因此, 登陆TC可分为5类, 分别用字母A、B、C、D、E表示, 见图2。各类及总体登陆TC的平均特征指标见表1, 表中PDI^[12]为TC的能量耗散指数(Power Dissipation Index), 表征其累积能量。各类及总体登陆TC的月均频数见图3, 近42 a登陆中国的TC主要发生在7—9月, 占总体的79%。

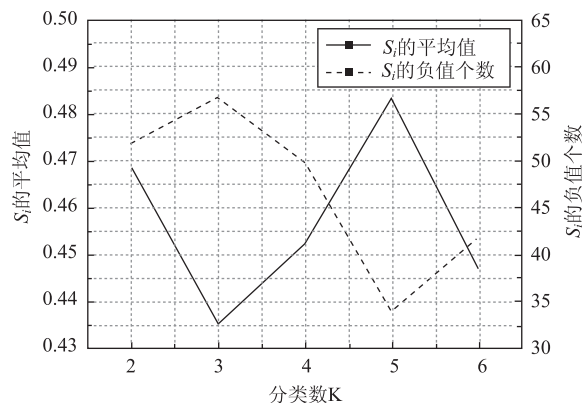


图1 S_i 的平均值(实线)与 S_i 的负值个数(虚线)随分类数K的变化情况

4 登陆TC时空特征分析

4.1 登陆TC生成位置、路径形状及登陆特征

生成位置和路径是描述TC空间特征的重要指标。由图2可知, 整体而言, 总体登陆TC主要生成于南海中北部、菲律宾东部、关岛东部至马绍尔群岛西部的广阔海域; 将生成位置以 120°E 、 130°E 、

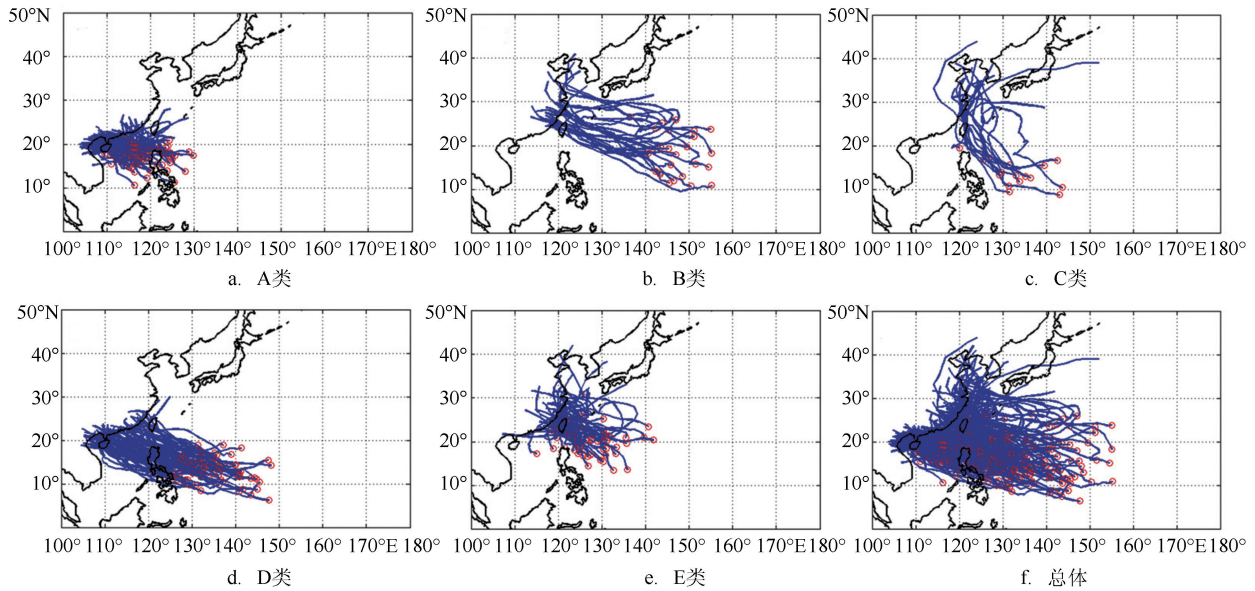


图2 各类及总体登陆TC的生成位置(红色圆圈)及路径(蓝色线)分布

表1 各类及总体登陆TC的平均特征指标

类别	频数	生命史/d	强度/(m/s)	$PDI \times 10^8 / (m^3/s^2)$	路径长度/km	移动速度/(km/h)
A	2.68	3.61	31.33	4.00	1 380.19	16.65
B	1.24	8.35	49.81	11.93	3 918.24	20.22
C	1.07	7.69	46.25	9.35	3 873.98	23.20
D	2.15	6.09	45.08	9.88	2 947.30	21.03
E	2.00	4.48	36.50	5.69	1 821.52	18.54
总体	7.05	5.13	38.71	7.21	2 272.10	18.94

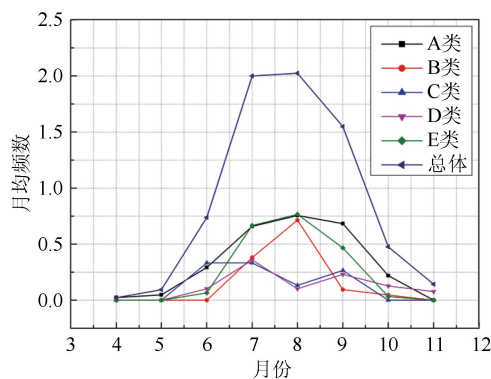


图3 各类及总体登陆TC的月均频数

140°E和150°E为界划分为5个区域,自西向东生成于各区域的TC平均强度分别为29.9 m/s、35.13 m/s、46.07 m/s、52.36 m/s和48.75 m/s。路径从关岛东北部,经菲律宾中北部、中国沿海、朝鲜半岛及日本等地延伸至鄂霍次克海域,可概括为直行路径(A、B

和D类)和转向路径(C、E类),其中,直行路径登陆中国的个数较多,范围较广。

各类登陆TC特征如下:

(1)A类TC个数达总数的37%,平均强度、移动速度及路径长度为5类中最小;活动季节主要在7—9月,占该类总的78%。主要生成于南海中北部及菲律宾东北部海域,其中生成于南海(120°E以西)的TC平均强度为29.54 m/s,120°E以东的为36.1 m/s;路径基本呈直线形,多数登陆华南地区,少数登陆华东南部及台湾岛,登陆后大部分消散于华南内陆地区;

(2)B类TC个数仅占总数的9%,平均强度和PDI值为5类中最大,平均路径长度最长;活动季节主要在7、8月,占该类总的88%。主要生成于关岛东北部的广阔海域,其中生成于150°E以西的平均强度为50.28 m/s,150°E以东的为48.75 m/s;路径基

本呈直线形且分布较为分散;多数登陆华东沿海及台湾岛地区,极少数登陆华北地区;登陆后,大部分在陆地上移动较长距离后消散于华东内陆及华中地区;

(3)C类TC个数只有总数的5%,平均移动速度为5类中 fastest,8月份出现的频率较低;主要生成于菲律宾中东部海域,其中生成于 130°E 以西的平均强度为 40 m/s , 130°E 以东的为 49.09 m/s ;平均路径呈半抛物线形,方向角变化较大,路径多数在长江三角洲一带发生转向。主要登陆台湾岛及华东的中东部沿海地区,之后北上,消散于中韩之间的海域。金荣花等^[13]利用1975—2005年TC数据集及NCEP/NCAR逐日再分析资料,发现西北太平洋副热带高压位置和强度对TC登陆北上起决定性作用,且西风带系统和南亚高压活动有利于TC登陆后北折和持续北上;

(4)D类TC个数占总数的28%,平均PDI值仅次于B类,8月份出现的频率较低;主要生成位置与C类相似,但范围更广,密度更大,且较均匀分布于(5° — 20°N , 120° — 150°E)范围内,其中生成于 130°E 以西的平均强度为 36.74 m/s , 130° — 140°E 之间的为 47.08 m/s , 140°E 以东的高达 53.65 m/s ;路径形状与B类相似,但该类路径分布更为集中,整体路径形状更直一些;除D类登陆台湾岛的更多一些,其他登陆位置与A类相似;

(5)E类TC个数占总数的20%,活动季节主要在7—9月,占该类总的95%;主要生成于南海东北部及菲律宾东北部海域,其中生成于 130°E 以西的平均强度为 32.18 m/s , 130°E 以东的为 44.52 m/s ;路径分散,形状基本是先西北方向直行;登陆位置基本遍布华东的整个沿海一带及台湾岛,部分路径登陆后又发生转向。此外,计算各类登陆TC个数与Niño指数的Person相关系数^[14]可得,5类中只有E类与Niño 3.4和Niño 4指数均呈显著负相关(在0.05的显著性水平上分别为-0.374和-0.366),说明拉尼娜年E类出现的概率较大。

4.2 登陆TC频数和强度特征

图4和图5分别给出了登陆中国TC的年均频数和年均强度及其趋势拟合,纵坐标为Z-score标准化处理后的结果。

整体而言,1972—2013年登陆中国TC的年均频数呈增加趋势,年均频数为7.05个,年际变化大;登陆TC最多的年份是1974年和1994年,均达到11个,最少登陆TC频数为4个(1982年,1997—1999年)。年均强度呈减弱趋势,20世纪90年代尤为显著,21世纪后开始增加。年均强度年际变化大,尤其在20世纪90年代后;最大值为 47 m/s (1977年),最小值为 28.25 m/s (1998年)。20世纪90年代中后期,登陆TC的年均频数出现明显低谷,年均强度波

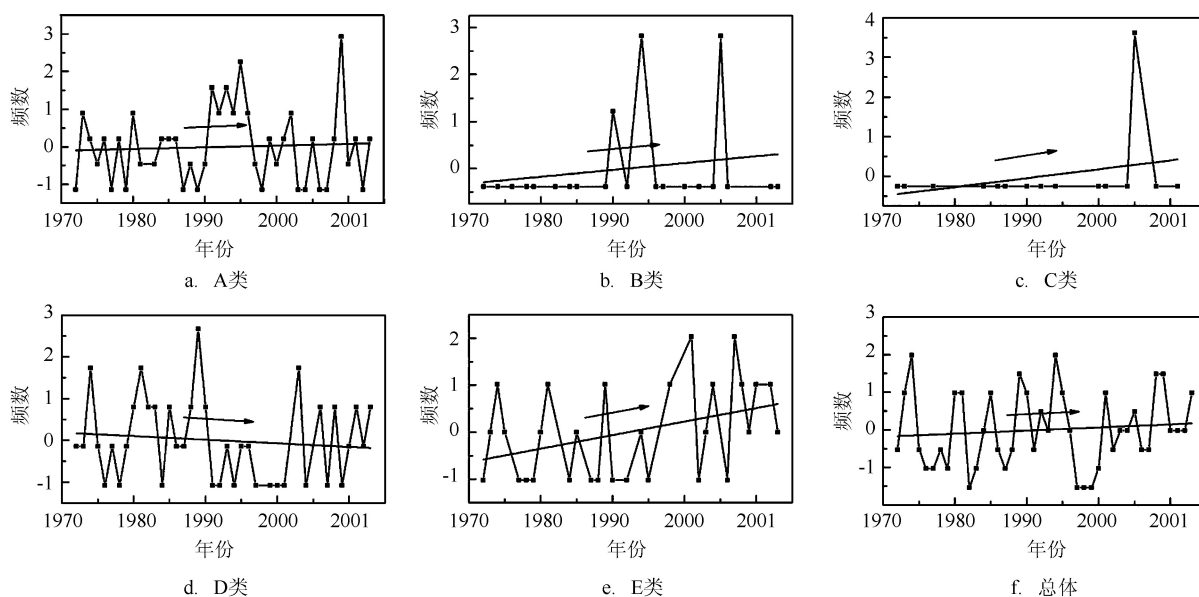


图4 各类及总体登陆TC的年均频数及其趋势拟合

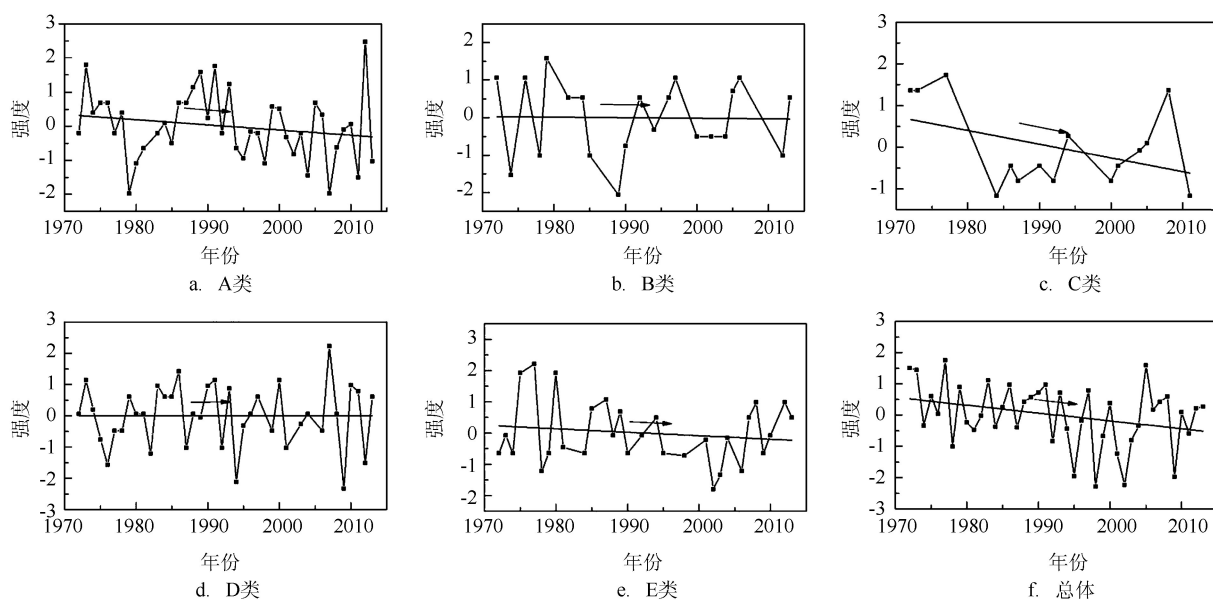


图5 各类及总体登陆TC的年均强度及其趋势拟合

动较大,这可能与1997—1998年发生了典型的ENSO暖事件密切相关^[4]。

按各类别而言(见图4),除D类的年均频数呈减少趋势外,其余类别均呈增加趋势,其中E类在20世纪90年代中期后增幅明显。A类的频数在19世纪20—60年代出现明显高峰期,登陆TC最多的年份是2009年,达到7个;B类登陆TC最多的年份是1994年和2005年,均为3个;C类登陆TC最多的年份是2005年,为2个;D类登陆TC最多的年份是1989年,为5个,19世纪90年代开始减少;E类登陆TC最多的年份为2001年和2007年,均为4个。由图5可知,年均强度除C类呈明显减弱趋势外,其余各类增强或减弱趋势无明显变化。A、B、C、E类年均最大强度分别为60 m/s、65 m/s、70 m/s、65 m/s,都发生在20世纪70年代;D类年均最大强度为75 m/s(1990年)。

登陆时不同强度等级的TC个数统计结果如表2所示。总体而言,登陆时强度以STS和TY等级为主,占65.8%;STY和Super TY等级仅占13.1%。各类中,A、D类的登陆时强度等级主要在TS到TY之间,分别占该类的96%和90%;B、C类则多数在STS和STY之间,分别占96%和81%;而E类的登陆时强度分布较平均,达到Super TY的占5%,是5类中达Super TY最多的一类。

表2 各类及总体TC登陆时不同强度等级的个数

强度等级 (MSW,单位:m/s)	类别				
	A	B	C	D	E
TS(17.2—24.4)	37	0	2	11	12
STS(24.5—32.6)	46	5	5	28	18
TY(32.7—41.4)	23	13	5	37	15
STY(41.5—50.9)	3	7	3	8	12
Super TY(≥ 51.0)	1	1	1	0	3
合计	110	26	16	84	60

5 结论

根据中国气象局提供的1972—2013年登陆中国的TC最佳路径数据资料,采取K-means聚类算法划分登陆TC路径类别,分析各类的时空特征。研究结果如下:

(1)登陆TC可分为5类,即直行(A、B和D类)和转向(C、E类)路径,其中,直行路径占74%,多数登陆华南、华东及台湾地区,转向路径登陆华南的较少;

(2)从登陆TC的生成位置而言,针对生成于150°E以西范围的登陆TC,生成位置越靠近150°E,其平均强度相对越大;

(3)A、E类活动季节集中在7—9月,B类在7—8月,C、D类在8月出现的频率较低。A、D类主要登陆华南地区,其中A类频数最多但平均强度

(31.3 m/s)最小;B类主要登陆华东及台湾岛,平均强度(49.8 m/s)最大;C类登陆华东的中东部沿海一带较多,平均移动速度最快(23.2 km/h);E类登陆范围基本遍布整个华东沿海一带;

(4)从频数和强度特征分析,1972年以来,总体登陆TC的年均频数呈增加趋势,年均强度呈减弱趋势;直行路径的频数变化小于转向路径,除C类的年均强度有明显减弱趋势外,其余各类的变化较小。登陆时总体TC主要集中在STS和TY两个强度等级,分别占34%和31%;STY和Super TY等级仅占13.1%,主要集中在B、D、E类。

参考文献:

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 227-230.
- [2] 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, 62(5): 541-549.
- [3] 李英, 陈联寿, 张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征[J]. 热带气象学报, 2004, 20(1): 14-23.
- [4] 王小玲, 任福民. 1951~2004年登陆我国热带气旋频数和强度的变化[J]. 海洋预报, 2008, 25(1): 65-73.
- [5] 张翰, 管玉平. 登陆我国大陆热带气旋的纬度分布特征[J]. 物理学报, 2012, 61(16): 169203.
- [6] 梁海萍, 梁海燕, 车志伟, 等. 近五十年登陆海南省的热带气旋统计特征分析[J]. 海洋预报, 2015, 32(4): 68-74.
- [7] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An Overview of the China Meteorological Administration Tropical Cyclone Database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [8] 梁进, 任福民, 杨修群. 中美两套西北太平洋热带气旋资料集的差异分析[J]. 海洋学报, 2010, 32(1): 10-22.
- [9] Camargo S J, Robertson A W, Gaffney S J, et al. Cluster Analysis of Typhoon Tracks. Part I: General Properties[J]. Journal of Climate, 2007, 20(14): 3635-3653.
- [10] Nakamura J, Lall U, Kushnir Y, et al. Classifying North Atlantic Tropical Cyclone Tracks by Mass Moments[J]. Journal of Climate, 2009, 22(20): 5481-5494.
- [11] Kim H S, Kim J H, Ho C H, et al. Pattern Classification of Typhoon Tracks Using the Fuzzyc-Means Clustering Method[J]. Journal of Climate, 2011, 24(2): 488-508.
- [12] Emanuel K A. Increasing Destructiveness of Tropical Cyclones over the Past 30 Years[J]. Nature, 2005, 436(7051): 686-688.
- [13] 金荣花, 高拴柱, 顾华, 等. 近31年登陆北上台风特征及其成因分析[J]. 气象, 2006, 32(7): 33-39.
- [14] Zhang W, Leung Y, Wang Y F. Cluster Analysis of Post-Landfall Tracks of Landfalling Tropical Cyclones over China[J]. Climate Dynamics, 2012, 40(5-6): 1237-1255.

Spatio-temporal characteristics analysis of landfall tropical cyclones over China based on tracks clustering analysis

MA Chao, LIU Qing-qing, XU Hong-shi

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072 China)

Abstract: Based on the best-track data set at 6-hourly sampling frequency over the period 1972—2013 available from China Meteorological Administration, classifications of the landfall TC tracks in the Northwestern Pacific are proposed by K-means cluster algorithm according to the wind speed and geographic location. Then, these clusters are statistically analyzed in terms of the spatial-temporal evolution features, including genesis location, trajectory shape, seasonality, frequency and intensity in each cluster and all. The results show that the landfall TC tracks are classified as five clusters, including straight-moving track types (A, B and D) and recurving track types (C and E). Cluster A and cluster D mainly land South China; Cluster B and cluster C are given priority to East China; Cluster E principally tends to East China and the north of South China. The annual average frequency of all landfall TCs has an increasing trend while the average intensity has a tendency of weakening. The closer 150° E the genesis locations are, the greater relatively the average intensity is. The landing intensity stage is mainly STS and TY with a proportion of 65.8%. The STY and Super TY only account for 13.1%, which primarily focus on cluster B, cluster D and cluster E.

Key words: landfall tropical cyclone; *K-means* cluster algorithm; classification of tracks; spatio-temporal characteristics