

# 登陆华南热带气旋年频数预测

张海燕<sup>1,2</sup>, 胡金磊<sup>1,2</sup>, 姚小娟<sup>1,2</sup>, 赖志娟<sup>1,2</sup>, 庄桦<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部南海预报减灾中心, 广东 广州 510310; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310)

**摘要:** 利用中国气象局39 a的热带气旋资料, 结合多元线性回归和自回归方法, 构建了一个考虑登陆华南热带气旋年频数多时间尺度特性的组合预测模型。该组合模型能较好地拟合1980—2012年登陆华南热带气旋年频数实况, 拟合相关系数达0.93, 平均绝对误差为0.57个, 平均相对误差为12.7%。利用该模型对2013—2018年进行后报试验, 平均绝对误差为0.61个, 平均相对误差为12.4%。

**关键词:** 华南; 登陆热带气旋; 多时间尺度; 频数预测

**中图分类号:** P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)01-0101-08

## 1 引言

热带气旋是一种极其严重的灾害性天气系统, 不仅会带来强风和暴雨, 还能引起气旋靠近或登陆地区风暴潮和近岸灾害性海浪过程的发生, 这是我国海洋灾害发生的最主要的诱因之一。华南地属热带和亚热带, 濒临南海, 每年的夏秋季节都会受到热带气旋的袭击, 是我国热带气旋灾害最突出的地区之一。据统计, 平均每年有5.2个热带气旋(包括热带低压)在华南沿岸登陆, 但登陆年频数存在显著的年际差异, 最多可达到10个<sup>[1]</sup>。在南海地区的海洋业务预报中, 对登陆华南热带气旋活动年频数进行定量预测是一项非常重要的工作, 能为南海地区台风风暴潮的长期预测提供指示意义, 有效地服务于海洋防灾减灾能力建设。

热带气旋频数预测是短期气候预测的重要研究课题, 动力统计预测方法是最常用的预测方法之一。范可<sup>[2]</sup>利用北太平洋涛动、北太平洋海冰面积、赤道中东太平洋海温等前期气候因子, 采用多元线性回归分析方法, 建立了一个能较好地预测西北太

平洋热带气旋生成频次的统计预测模型, 拟合率达0.79。应明等<sup>[3]</sup>建立了影响我国及华东、华南地区热带气旋年频数的统计预测方案, 即采用相关普查和主成分分析相结合的方法选取合适的前期预测因子, 并采用最优子集回归方法构建统计预测模型, 检验结果显示各模型的复相关系数基本在0.8以上。吴慧等<sup>[4]</sup>提取了前期海温场、对流层高度场、高低层垂直风切变场等与热带气旋频数显著相关的因子群, 基于模糊神经网络构建预测模型, 并对夏季影响海南的热带气旋频数进行预测, 该模型对1976—2007年的后报试验结果与实况的相关系数达0.71。动力统计预测模型的效果与所选的预测因子密切相关, 寻找新的热带气旋活动预测因子是提高预测能力的关键。数值模式是预测热带气旋活动的另一种行之有效的方法<sup>[5-8]</sup>, 然而受气候模式水平分辨率、系统误差和计算成本等因素的限制, 数值预报及其降尺度应用方法在实际气候预测业务中尚未完全普及, 动力统计预测方法仍然具有不可替代性。

许多学者已针对登陆华南热带气旋频数开展

收稿日期: 2021-09-10; 修回日期: 2022-04-15。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401503); 广东省科技计划资助项目(2017B020244002); 广东省促进经济发展专项资金(海洋经济发展用途)资助项目(GDME-2018B001); 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金资助项目(粤自然资合[2020]053号)。

作者简介: 张海燕(1989-), 女, 工程师, 博士, 主要从事海洋气象气候预报及季风气象学研究。E-mail: zhhaiyan202326@foxmail.com

了预测工作。龙渊等<sup>[9]</sup>应用自回归滑动平均模型对登陆华南的台风序列进行了单纯的数理统计预测,通过对数据进行平稳化处理后再建模分析,然而时序模拟的精度不高。李祚泳等<sup>[10]</sup>选用两个与台风有关的因子,应用投影寻踪回归的基本思想,建立了台风登陆华南年频次预测模型,整体预测精度较高,但个别年份的预测效果稍差,相对误差超过100%,且计算量偏大。事实上,登陆华南热带气旋年频数是具有多尺度信息的时间序列信号,既有高频的年际振荡,又有相对低频的年代际波动,不同时间尺度变率的影响因素可能大不相同,针对不同频率分量信号分别建模是提高预测精度的有效方法<sup>[11-12]</sup>。因此,本文拟采用多时间尺度组合的预测方法对登陆华南热带气旋年频数进行预测,为南海区短期海洋气候预测业务提供客观、定量的预测新工具。

## 2 资料与方法

本文参考中国气象局整编的《台风年鉴》和《热带气旋年鉴》,将在广东省、广西壮族自治区、海南省、香港及澳门特别行政区登陆且登陆时中心最大风速达到10.8 m/s的热带气旋定义为登陆华南热带气旋。考虑到早期部分热带气旋数据相对不可靠<sup>[13]</sup>,本文只研究1980年之后的热带气旋变化。本文采用的资料还包括美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的全球逐月扩展重建海表温度资料(Extended Reconstruction Sea Surface Temperature Version 4, ERSST V4, 水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ )、美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国能源部(Department of Energy, DOE)联合发布的逐月对流层各等压面的再分析位势高度场资料(水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ )。

构建多时间尺度组合预测模型的基本思想是,将登陆华南热带气旋年频数序列看作是年际和年代际两种不同时间尺度分量的叠加,针对不同分量分别进行建模,然后将各分量的预测值进行叠加,得到考虑多尺度特性的组合预测结果。在进行时间序列的尺度分离时,采用谐波分解的方法,将9 a周期以下的高频分量从原始的时间序列中分离出来,记作年际分量,剩余序列记作年代际分量(包含

气候平均值)。在对未来登陆华南热带气旋频数年际变化进行预测时,考虑到高频的年际分量变化剧烈、受海洋-大气系统内部因素影响显著,因此采用多元线性回归的动力统计预测方法进行建模;在对未来登陆华南热带气旋频数年代际变化进行预测时,考虑到低频的年代际分量相对平稳,自相关性强,因此采用自回归分析方法构建简单的数理统计预测模型,对年代际分量进行外推预测。

本文还将对多时间尺度组合预测模型进行检验。模型效果评估包括交叉检验和独立样本检验。本文利用1980—2012年登陆华南热带气旋年频数的样本资料进行建模,将这一时段实况和拟合曲线的相关系数、绝对误差、相对误差等指标进行交叉检验;利用2013—2018年的资料进行独立样本检验,通过绝对误差、相对误差等指标对预测模型进行效果评估。

## 3 结果与讨论

### 3.1 登陆华南热带气旋年频数的变化特征

图1为登陆华南热带气旋年频数的时间序列。1980—2018年热带气旋平均年频数为5.2个,标准差为2个,其中年频数最多为9个(1981年和1995年),年频数最少仅为2个(1982年、1997年和2004年)。从季节分布特征看,登陆华南热带气旋主要集中在7—9月,占全年登陆总频次的70%左右;在年际变化上,登陆华南热带气旋年频数存在3~4 a的显著周期振荡;此外,登陆华南热带气旋年频数还具有明显的年代际变化特征<sup>[11,14]</sup>。由图1年代际分量序列曲线可见,39 a间登陆华南热带气旋经历

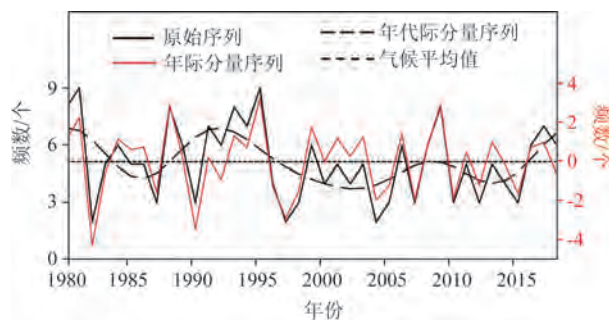


图1 1980—2018年登陆华南热带气旋年频数序列

Fig.1 Time series of the annual frequency of landfall tropical cyclones (LTCs) in South China (SC) during 1980—2018



了5个主要阶段,即20世纪80年代前期登陆气旋相对偏多,后期偏少,90年代前中期登陆气旋偏多,末期后进入较长时期的相对偏少阶段,2016年以来登陆气旋再次偏多。

### 3.2 年际变化的前兆信号分析

前人研究表明,登陆华南热带气旋活动的年际变化与前期海洋和大气的异常信号有关<sup>[15-16]</sup>。为了满足每年3月海洋业务预测的需求,本文首先对前一年四季的大尺度海温场进行普查,以高相关系数(达到95%信度)为标准,充分提取前期不同时段的海温信号。由图2a可以看出,前一年春季海温场与登陆华南热带气旋频数年际分量相关,突出表现在两者在赤道中东太平洋地区的显著正相关,以及赤道西太平洋和副热带太平洋地区的显著负相关。这种大尺度相关型与厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)模态分布相似,说明前一年春季的ENSO状态对登陆华南热带气旋年际异常有较好的指示意义,ENSO事件为暖位相时,登陆

热带气旋偏多。前人研究也指出,当1—4月赤道东太平洋海温偏暖时,次年登陆华南热带气旋偏多<sup>[15]</sup>。此外,中高纬南、北太平洋以及南大西洋海域的海温也与气旋频数在较大范围内存在显著相关关系,说明这些地区也是与登陆华南热带气旋活动密切联系的海温关键区,但是其中的物理过程还有待研究。取图2a中范围最大、相关性较显著的6个关键区的海温,作为影响登陆华南热带气旋频数年际变化的预选因子(见表1)进行研究。

夏秋季后,与登陆华南热带气旋频数年际异常相联系的海温前兆信号明显减弱:赤道中东太平洋的显著相关信号消失;副热带太平洋地区的负相关区范围逐渐收缩;中高纬北太平洋的负相关关系基本维持,高相关区略微东移北收;中高纬南太平洋的显著正相关区北移至东南太平洋海域,此海温信号可持续至冬季(见图2b—d)。此外,随着太平洋海温信号减弱,印度洋海温信号逐渐增强,前期冬季热带及中高纬度南印度洋为显著负相关区,副热带南印度洋为正相关区,大体呈现“+—+”经向三

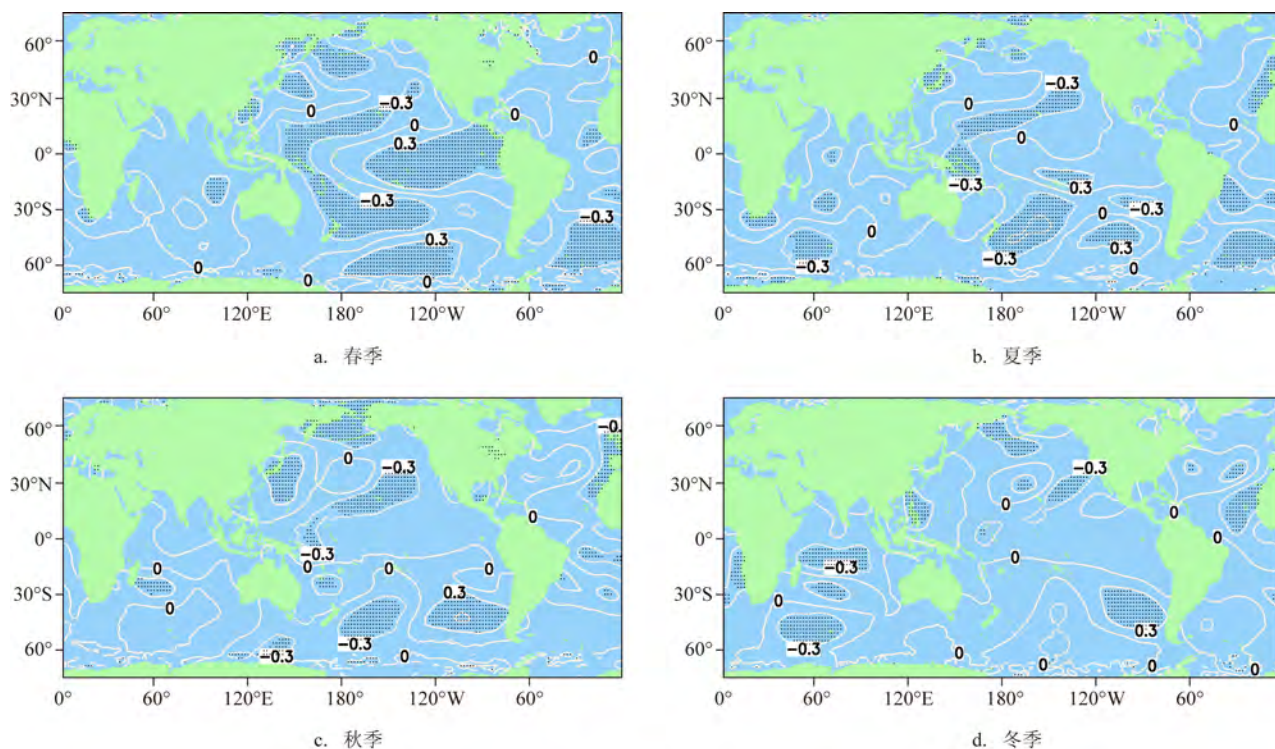


图2 1980—2012年登陆华南热带气旋频数年际分量与前期海表面温度的相关系数分布

Fig.2 The correlation coefficients distribution of the inter-annual components of LTCs in SC and preceding sea surface temperature during 1980—2012

表 1 登陆华南热带气旋频数年际分量与各预选因子在 1980—2012 年的相关系数

Tab.1 The correlation coefficients of the LTCs in SC and each selected predictors during 1980—2012

预选因子	关键区	相关系数	预选因子	关键区	相关系数
春季海温 1	(64°~50°S, 160°~114°W)	0.49	冬季海温 5	(42°~52°N, 176°~160°W)	-0.42
春季海温 2	(60°~42°S, 36°~6°W)	-0.43	冬季海温 6	(52°~62°N, 170°E~180°)	-0.52
春季海温 3	(40°~28°S, 174°E~130°W)	-0.75	高层环流 1	(55°~40°S, 45°~80°E)	-0.53
春季海温 4	(16°S~6°N, 160°~60°W)	0.46	高层环流 2	(20°~35°N, 85°~125°E)	0.48
春季海温 5	(10°~20°N, 170°E~160°W)	-0.56	高层环流 3	(22.5°~32.5°N, 140°~130°W)	-0.56
春季海温 6	(42°~52°N, 170°E~170°W)	-0.47	高层环流 4	(20°~35°N, 110°~100°E)	0.49
夏季海温 1	(56°~46°S, 50°~70°E)	-0.41	高层环流 5	(42.5°~52.5°N, 125°~145°E)	-0.41
夏季海温 2	(50°~26°S, 180°~150°W)	-0.62	高层环流 6	(55°~70°N, 30°~85°E)	0.53
夏季海温 3	(56°~46°S, 38°~8°W)	-0.42	中层环流 1	(55°~40°S, 45°~80°E)	-0.53
夏季海温 4	(24°~50°N, 20°W~0°)	-0.40	中层环流 2	(17.5°~37.5°N, 112.5°~95°W)	0.55
夏季海温 5	(10°~20°N, 170°E~170°W)	-0.44	中层环流 3	(20°~30°N, 0°~15°E)	-0.37
秋季海温 1	(50°~36°S, 176°~146°W)	-0.55	中层环流 4	(20°~30°N, 35°~60°E)	0.42
秋季海温 2	(48°~34°S, 120°~80°W)	0.63	中层环流 5	(30°~45°N, 50°~30°W)	0.43
秋季海温 3	(18°~32°N, 162°~136°W)	-0.55	中层环流 6	(40°~50°N, 115°~145°E)	-0.40
秋季海温 4	(20°~40°N, 134°~150°E)	0.52	中层环流 7	(50°~65°N, 50°~70°E)	0.40
秋季海温 5	(26°~56°N, 20°W~10°E)	-0.39	低层环流 1	(55°~40°S, 45°~80°E)	-0.53
秋季海温 6	(52°~72°N, 160°E~160°W)	-0.58	低层环流 2	(40°~30°S, 50°~10°W)	-0.55
冬季海温 1	(54°~42°S, 40°~74°E)	-0.52	低层环流 3	(12.5°~35°N, 110°~90°W)	0.42
冬季海温 2	(16°~6°S, 50°~90°E)	-0.43	低层环流 4	(25°~45°N, 50°~25°W)	0.46
冬季海温 3	(46°~32°S, 110°~80°W)	0.58	低层环流 5	(40°~50°N, 130°~145°E)	-0.39
冬季海温 4	(6°~26°N, 34°~20°W)	-0.42	低层环流 6	(45°~55°N, 60°~75°E)	0.40

极型分布(见图 2d)。前人研究也指出,中高纬度南印度洋海温异常对西北太平洋热带气旋活动年际变化有指示能力,且其独立于 ENSO 信号<sup>[17]</sup>。在筛选因子时,从前期夏季、秋季、冬季海温场中分别选出 5 个、6 个、6 个预选因子(见表 1)。

图 3 为登陆华南热带气旋频数年际分量与前期冬季对流层 200 hPa、500 hPa 和 850 hPa 位势高度场的逐点相关,用于考察大气环流中的前兆信号。在对流层中上层,北半球欧亚中高纬地区的相关场呈现“东正西负”式分布,即乌拉尔地区为显著正相关,东亚北部为显著负相关。在气候态上,上游乌拉尔地区多阻塞高压出现<sup>[18-19]</sup>,下游东亚北部常受东亚大槽控制(图略)。因此,前期冬季乌拉尔阻塞高压和东亚大槽活动偏强时,亚欧大陆中高纬以经向环流为主,有利于登陆华南热带气旋增多,可作为其前兆信号。在对流层 850 hPa 上,欧亚大陆的环境信号明显减弱,相反地,北美—大西洋地区出现大范围的显著正相关区,由此可见,北美西南部

和北大西洋中部的中低层环流变化也与登陆华南热带气旋活动年际异常关系密切(见图 3b—c)。而在南半球,有利于登陆华南热带气旋频数偏多的环流形势突出表现为南印度洋中纬度地区异常高度槽发展,此槽相当深厚,能从对流层 850 hPa 等压面伸展到高层 200 hPa 上(见图 3a—c)。冬季南印度洋中纬度地区存在异常高度槽时,指示次年登陆热带气旋年频数趋向偏多,反之,南印度洋中纬度地区存在异常高度脊时,指示次年登陆热带气旋年频数偏少。从高层、中层、低层环流场上分别选出 6 个、7 个、6 个关键区的位势高度作为预选因子(见表 1)。

### 3.3 多时间尺度组合预测模型及其评估

根据以上分析,本文共获取了 42 个预选因子,包括前期春季 ENSO、春季、夏季、秋季中高纬南北太平洋海温、冬季南印度洋海温、冬季亚欧大陆中高空环流及中纬度南印度洋位势高度等。预选因



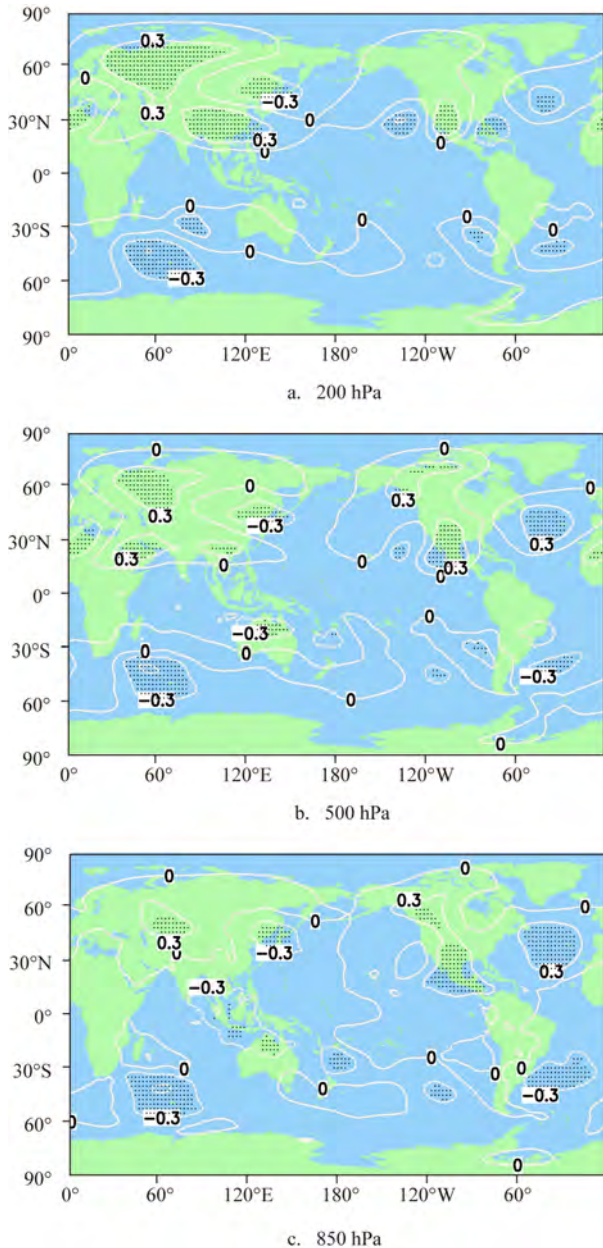


图3 1980—2012年登陆华南热带气旋频数年际分量与前期冬季势高度场的相关系数分布

Fig.3 The correlation coefficients distribution of the inter-annual components of LTCs in SC and geo-potential heights of previous winter during 1980—2012

子与登陆华南热带气旋年际分量的相关系数在 $-0.75 \sim -0.63$ 之间,均超过95%的显著性水平(见表1)。由前面的分析可知,海温因子在季节上本身具有延续性,而环流因子在垂直方向上也有较好的一致性,因此各预选因子之间存在不同程度的相关

性。为了避免因子间的共线性影响预测模型的性能,本文采用主成分分析的方法,对预选因子群进行降维处理,即取累积方差贡献达85%的前N个因子组合作为预测模型的候选因子。在对1980—2012年预选因子群进行主成分分析后,收敛得较快,前5个主成分的累积方差贡献已接近70%,前9个主成分的累积方差贡献达到85%。因此,利用前9个主成分构建多元线性回归预测模型,模型如下:

$$Y = -0.02 - 0.43X_1 + 0.2X_2 + 0.18X_3 + 0.03X_4 + 0.02X_5 + 0.01X_6 + 0.05X_7 + 0.1X_8 - 0.02X_9 \quad (1)$$

式中: $Y$ 为登陆华南热带气旋年频数的年际分量; $X_1 \sim X_9$ 分别为前9个主成分的特征值。

基于以上动力统计预测模型,本文对1980—2012年登陆华南热带气旋频数的年际分量进行拟合,结果见图4a,其中拟合时段为1980—2012年,预

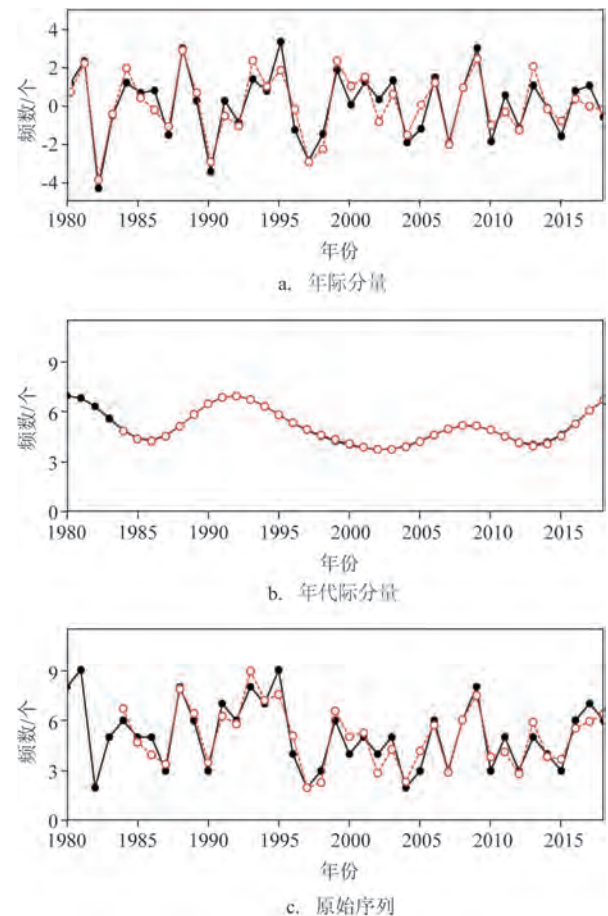


图4 登陆华南热带气旋年频数实况(黑线)及其模型拟合预测曲线(红线)

Fig.4 Time series of observed LTCs in SC (black curve) and predicted LTCs by model fitting (red curve)

测时段为2013—2018年。由图可见,年际分量的拟合曲线与实况变化高度吻合,两者的相关系数高达0.93,远远超过99.9%的信度水平。经统计,1980—2012年登陆华南热带气旋频数年际分量拟合结果的平均绝对误差仅为0.54个,其中1995年的拟合效果最差,绝对误差为1.45个,2008年的拟合效果最好,误差仅为0.01个。本文利用1980年—预测前1 a的样本建模,采用逐年向前滚动预测的方法,对2013—2018年进行独立样本检验。结果显示,预测和实况的年际变化趋势基本一致,预测平均绝对误差为0.61个。综合交叉样本检验和独立样本检验的结果来看,该模型能较合理地预测登陆华南热带气旋频数的年际变化。

针对较为平稳的登陆华南热带气旋频数年代际分量序列,参考前人方法<sup>[20]</sup>,构建 $m$ 阶自回归模型(Autoregressive Model, AR)AR( $m$ ):

$$Y_{t+1} = \sum_{k=1}^m \varphi_k Y_{t-k+1} + a_{t+1} \quad (2)$$

式中: $Y_{t+1}$ 、 $Y_{t-k+1}$ 分别为 $t+1$ 、 $t-k+1$ 时刻登陆华南热带气旋年频数的年代际分量序列; $k$ 为滞后步长; $\varphi_k$ 为自回归系数; $a_{t+1}$ 为白噪音。

AR( $m$ )自回归模型的关键是确定模型的最优阶数 $m$ 。经计算,随着滞后步长 $k$ 增加, $Y_{t+1}$ 序列的自相关系数衰减得很快,当 $k=4$ 时,时滞相关系数仅为0.1。此外,采用目前国际上常用的最小化信息量准则(Akaike Information Criterion, AIC)<sup>[21]</sup>进行分析,发现系统的白噪音在 $k=4$ 时最小。因此,选取4阶自回归方程对登陆华南热带气旋年频数的年代际分量进行外推预测。经检验,该4阶自回归模型对年代际分量的拟合预测曲线与实况基本重合,绝对误差基本控制在0.1以内(见图4b),说明这个简单的数理统计模型能有效地预测登陆华南热带气旋频数的年代际变化。

将以上两种不同分量的预测值进行叠加,得到考虑多时间尺度特性的最终组合预测结果(见图4c),组合预测模型的拟合率为0.93。在2012年之前的交叉样本试验中,平均绝对误差为0.57个,平均相对误差为12.7%;在2013—2018年的独立样本试验中(见表2),平均绝对误差为0.61个,平均相对误差为12.4%,除对2015年的预测效果稍差,相对误差达23%外,整体预测精度较高。综合以上分析,该多时间尺度组合模型对登陆华南热带气旋年

表2 2013—2018年登陆华南热带气旋年频数后报效果评估

Tab.2 Evaluation of the prediction of LTCs in SC during 2013—2018

年份	实况/个	预测/个	绝对误差/个	相对误差/%
2013	5.00	5.89	0.89	17.8
2014	4.00	3.84	0.16	4.0
2015	3.00	3.69	0.69	23.0
2016	6.00	5.53	0.47	7.8
2017	7.00	5.94	1.06	15.1
2018	6.00	6.40	0.40	6.6
平均	5.17	5.21	0.61	12.4

频数具有很好的预测能力,且模型算法简单,计算高效,可以投入预测业务使用。

### 3.4 讨论

本文基于登陆华南热带气旋年频数的多时间尺度变化特征,在对年际和年代际两种不同时间尺度分量进行尺度分离的基础上,针对不同分量分别建模后再相互叠加,得到组合预测模型。在进行时间序列的尺度分离时,本文选取9 a周期作为年际和年代际分量的分界线,存在一定的主观性。在气候学研究中,学者多以7~10 a以下的周期变化作为年际变化分量。作者基于10 a、7 a周期作为滤波分界进行了同样的建模过程,所得模型的总体预测效果与本文结果相当(图略),表明结果对滤波窗口选择的敏感性不大。

前人研究指出<sup>[22]</sup>,西北太平洋热带气旋年频数预测的误差主要来源于两方面。一是热带气旋活动与其影响因子的关系往往并不稳定,例如,热带气旋频数与北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)、ENSO等因子的年际变化关系在20世纪70年代末有一次明显的由弱到强的转折<sup>[23-24]</sup>;二是建模所用的预测因子可能提取不充分,不能完全解释热带气旋的年际变率。因此,在实际业务预报中,需要采用滑动相关等分析方法,密切关注各预测因子与登陆热带气旋活动的关系变化,及时剔除相关性持续减弱的因子,同时引入其他重要的预测因子,进而不断改进预测模型。

## 4 结论

本文利用中国气象局39 a的热带气旋资料,基



于登陆华南热带气旋年频数的多时间尺度变化特征,结合多元线性回归和自回归方法,构建多时间尺度组合预测模型对热带气旋活动进行预测,并对该模型的预测能力进行评估。结论如下:

(1)登陆华南热带气旋年频数具有多时间尺度变化特征,既有高频的以3~4 a为主周期的剧烈年际振荡,又有低频的相对平稳的年代际波动。针对各频率分量的不同特性分别建模,可有效提高预测精度。

(2)登陆华南热带气旋年频数的年际变化主要受海洋-大气系统内部异常的调制。本文在充分分析登陆华南热带气旋活动年际异常前兆信号的基础上,提取了包括前期春季ENSO、春季、夏季、秋季中高纬南北太平洋海温、冬季南印度洋海温、冬季亚欧大陆中高空环流及中纬度南印度洋位势高度等因素在内的多项环境场因子,结合主成分分析和多元线性回归方法,构建了年际分量的动力统计预测模型。在此年际分量预测模型的基础上,叠加基于自回归方法得到的年代际分量外推预测模型,得到考虑多尺度特性的组合预测模型。该组合模型具有很好的拟合预测能力。模型在1980—2012年的交叉检验中,平均绝对误差为0.57个,平均相对误差为12.7%,与登陆热带气旋频数实况的相关系数达0.93;在2013—2018年的独立样本试验中,平均绝对误差为0.61个,平均相对误差为12.4%。多时间尺度组合预测模型有效地提高了对登陆热带气旋活动的预测精度,可以投入相应的预测业务参考使用。

## 参考文献:

- [1] 张海燕. 南海区台风风暴潮时空分布特征[J]. 海洋预报, 2019, 36(6): 1-8.  
ZHANG H Y. Spatio-temporal distribution of typhoon storm surge along the South China Sea coast[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(6): 1-8.
- [2] 范可. 西北太平洋台风生成频次的新预测因子和新预测模型[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(9): 1260-1266.  
FAN K. New predictors and a new prediction model for the typhoon frequency over western North Pacific[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(9): 1260-1266.
- [3] 应明, 万日金. 影响我国的热带气旋年频数预测[J]. 应用气象学报, 2011, 22(1): 66-76.  
YING M, WAN R J. The annual frequency prediction of tropical cyclones affecting China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(1): 66-76.
- [4] 吴慧, 邢彩盈, 吴胜安, 等. 夏季影响海南的热带气旋频数预测[J]. 热带气象学报, 2016, 32(3): 377-384.  
WU H, XING C Y, WU S A, et al. Frequency prediction of tropical cyclones affecting Hainan in summer[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(3): 377-384.
- [5] 王会军, 郎咸梅, 范可, 等. 关于2006年西太平洋台风活动频次的气候预测试验[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(2): 133-137.  
WANG H J, LANG X M, FAN K, et al. Real-time climate prediction experiment for the typhoon frequency in the Western North Pacific for 2006[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(2): 133-137.
- [6] 孙建奇, 陈活泼. 一种适合于台风频次预测的统计降尺度方法[C]//2011年第二十八届中国气象学会年会论文集. 厦门: 中国气象学会, 2011: 1-8.  
SUN J Q, CEHN H P. A statistical downscaling method to forecast typhoon frequency[C]//Proceedings of the 28th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society in 2011. Xiamen: Chinese Meteorological Society, 2011: 1-8.
- [7] 贾小龙, 陈丽娟, LUO J J. 利用海气耦合模式预测的大尺度环流进行热带气旋年频数的预测试验[J]. 热带气象学报, 2013, 29(1): 37-46.  
JIA X L, CHEN L J, LUO J J. Climate prediction experiment for tropical cyclone frequency using the large scale circulation forecast by a CGCM[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2013, 29(1): 37-46.
- [8] 苏志重, 余锦华, 孙丞虎, 等. IPRC区域气候模式对西北太平洋热带气旋潜在预测能力的初步检验[J]. 热带气象学报, 2010, 26(2): 165-173.  
SU Z Z, YU J H, SUN C H, et al. The initial evaluation of tropical cyclone potential predictability in the Northwestern Pacific using the IPRC regional climate model[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2010, 26(2): 165-173.
- [9] 龙渊, 梅宁, 杨建伟. 应用ARMA模式对登陆华南台风序列的模拟和预报[J]. 广东气象, 1999(S1): 11-13.  
LONG Y, MEI N, YANG J W. Application of autoregressive moving average model to forecast landfall typhoon frequency in South China[J]. Guangdong Meteorology, 1999(S1): 11-13.
- [10] 李祚泳, 邓新民, 桑华民. 台风登陆华南年频次的投影寻踪回归预测模型[J]. 热带气象学报, 1998, 14(2): 181-185.  
LI Z Y, DENG X M, SANG H M. Forecasting model of numbers of landed typhoon based on projection pursuit regression[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1998, 14(2): 181-185.
- [11] 魏凤英. 华北干旱的多时间尺度组合预测模型[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 583-592.  
WEI F Y. A predicting drought model with an integration of multi-scale in north China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(5): 583-592.
- [12] 何蕾, 李国胜, 李阔, 等. 基于EEMD及BP神经网络的区域海平面多尺度预测研究[J]. 第四纪研究, 2015, 35(2): 374-382.  
HE L, LI G S, LI K, et al. Multi-scale prediction of regional sea level change based on EEMD and BP neural network[J].

- Quaternary Sciences, 2015, 35(2): 374-382.
- [13] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-491.
- CHEN L S, DING Y H. The generality of typhoon in the Western Pacific[M]. Beijing: Science Press, 1979: 1-491.
- [14] 罗小莉, 姚才, 谭金凯. 登陆华南台风的频数及强度变化特征分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(4): 58-67.
- LUO X L, YAO C, TAN J K. Analysis on numbers and intensity characteristics of typhoon landed in the South China[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(4): 58-67.
- [15] 刘春霞. 广东省登陆热带气旋活动异常成因分析[J]. 热带气象学报, 2004, 20(1): 24-31, 113-114.
- LIU C X. The effect on abnormal action of tropical cyclone landfalling on Guangdong province[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2004, 20(1): 24-31, 113-114.
- [16] 彭小桐, 关皓. 海南岛登陆热带气旋频数异常成因分析[J]. 气象研究与应用, 2011, 32(2): 13-17.
- PENG X T, GUAN H. Abnormal frequency of the tropical cyclone landing in Hainan Island[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2011, 32(2): 13-17.
- [17] 吴胜安, 周广庆, 穆松宁. 中高纬度印度洋海温与西北太平洋夏季台风生成数的相关性[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 243-250.
- WU S A, ZHOU G Q, MU S N. Relationship between sea surface temperature of middle-high latitude Indian Ocean and summer typhoon frequencies over the Western North Pacific[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(2): 243-250.
- [18] 黄菲, 姜治娜. 欧亚大陆阻塞高压的统计特征及其与中国东部夏季降水的关系[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(2): 186-192.
- HUANG F, JIANG Z N. Study on the statistical characteristics of atmospheric blocking in the Eurasia and its relationship with the summer rainfall over the east of China[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(2): 186-192.
- [19] 史湘军, 智协飞. 1950—2004年欧亚大陆阻塞高压活动的统计特征[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 338-344.
- SHI X J, ZHI X F. Statistical characteristics of blockings in Eurasia from 1950 to 2004[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(3): 338-344.
- [20] JONES C, CARVALHO L M V, HIGGINS R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies[J]. Journal of Climate, 2004, 17(11): 2078-2095.
- [21] SCHWARZ G E. Estimating the dimension of a model[J]. The Annals of Statistics, 1978, 6(2): 461-464.
- [22] ZHAN R F, WANG Y Q, WEN M. The SST gradient between the southwestern pacific and the western pacific warm pool: a new factor controlling the northwestern pacific tropical cyclone genesis frequency[J]. Journal of Climate, 2013, 26(7): 2408-2415.
- [23] ZHOU B T, GUI X. Interdecadal change of the linkage between the North Atlantic Oscillation and the tropical cyclone frequency over the western North Pacific[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(9): 2148-2155.
- [24] 陶丽, 蓝玉峰, 孔承承. ENSO与西北太平洋强TC相关关系年代际变化研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(5): 596-607.
- TAO L, LAN Y F, KONG C C. Interdecadal variations in the relationship between the intense tropical cyclones over the Western North Pacific Ocean and the ENSO[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(5): 596-607.

## Prediction of the annual frequency of landfall tropical cyclones in South China

ZHANG Haiyan<sup>1,2</sup>, HU Jinlei<sup>1,2</sup>, YAO Xiaojuan<sup>1,2</sup>, LAI Zhijuan<sup>1,2</sup>, ZHUANG Hua<sup>1,2</sup>

(1. South China Sea Marine Forecasting and Disaster Reduction Center, Ministry of Natural Resource, Guangzhou 510300, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resource, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** Based the tropical cyclones (TCs) data over recent 39 years from the China Meteorological Administration and using the multiple linear regression and autoregressive methods, a combined prediction model considering the multi-time-scale characteristics of the annual frequency of landfall TCs in South China is constructed. The combined model can well fit the actual annual frequency of landfall TCs in South China during the period from 1980 to 2012 with the fitting correlation coefficient of 0.93, the mean absolute error of 0.57 and the mean relative error of 12.7%. The test results show that the model can reasonably predict the annual frequency of tropical cyclones landing in South China, and it can be used as a reference for corresponding forecasting operations. The mean absolute error and mean relative error of the hindcast experiments from 2013 to 2018 are 0.61 and 12.4%, respectively. These results indicate that the model could properly predict the annual frequency of landfall TCs in South China and can be operationally used as a reference.

**Key words:** South China; landfall tropical cyclones; multi-time-scale; frequency predict