

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.013

一种面向工程应用的台风强度统计预测方法

文元桥^{1,2}, 蔡永庆^{1,2}, 耿晓巧^{1,2}

(1. 武汉理工大学航运学院, 湖北 武汉 430063; 2. 湖北省内河航运技术重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘要:为实现台风强度的年变化预测,提出了一种基于灰色均生函数模型的预测方法。选取最大风速作为台风强度的指标,利用中国气象局发布的西北太平洋台风资料,建立台风登陆和未登陆情况下的预测模型,做5a预测,并与观测结果对比。结果表明:灰色均生函数模型对台风强度的预测具有较高精度,年平均值最大绝对误差为4.4 m/s,低于2012年各站25次台风强度的数值模式预测结果平均值;年极值最大绝对误差为11.1 m/s,低于上海台风模式对台风个例的预报结果。

关键词:工程应用;灰色均生函数模型;台风强度预测;最大风速;连续时间序列预测;西北太平洋海域
中图分类号:P457.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2016)02-0172-06

Typhoon intensity statistical prediction method oriented to engineering application

WEN Yuanqiao^{1,2}, CAI Yongqing^{1,2}, GENG Xiaoqiao^{1,2}

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Hubei Inland Shipping Technology Key Laboratory, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to predict the annual variation of the typhoon intensity, a prediction method based on the grey-mean generating function model is proposed. Selecting the maximum wind velocity as the index of typhoon intensity, the prediction models for typhoons arriving or not arriving at coasts are established using data from a Northwest Pacific Ocean typhoon published by the China Meteorological Administration. A five-year prediction was made, and a comparison was made between the predicted results and the observed ones. The results show that the grey-mean generating function model has high accuracy for the prediction of the typhoon intensity. The maximum absolute error of the predicted annual average value is 4.4 m/s, lower than the average absolute error of forecast results regarding the intensity of 25 typhoons in 2012 obtained from the numerical model. The maximum absolute error of the predicted annual extreme value is 11.1 m/s, lower than the absolute error of the predicted value obtained from the Shanghai typhoon model.

Key words: engineering application; grey-mean generating function model; typhoon intensity prediction; maximum wind speed; continuous time series prediction; Northwest Pacific Ocean

台风是发生在热带洋面上破坏力极强的天气系统,常伴有狂风、暴雨和强增水,会对沿海地区工程的结构和营运安全产生较大的潜在危险。沿海地区工程必须考虑台风的强度变化,它既在很大程度上决定了工程造价,又严重影响着工程结构的安全性。定量预测台风强度变化,尤其是预测台风强度极值,对合理设计工程参数、维护工程安全具有重要的应用意义。

目前国内外关于台风强度的研究多集中于对台风个例的研究,并取得了较多的成果^[1-4],但针对工程应用的台风强度预测研究尚不多。现今在工程应用中的普遍做法是利用极值估计模型,计算不同重现期的台风强度极值,为工程设计提供参考。但极值估计模型并不能进行连续时间序列的预测,而且还要受限于阈值的选取。针对这一问题,笔者将已在降水预测^[5]、高温极值预测^[6]、风速预测^[7]等方面有广泛应用的均生函数模型以及灰色模型引入台风强度预测领域,对台风强度进行连续时间序列的预测,以为沿海地区工程的安全防范及防灾减灾工作提供参考。

收稿日期: 2015-03-09

作者简介: 文元桥(1975—),男,湖北松滋人,教授,博士,主要从事水上交通安全仿真研究。E-mail: 3444324@qq.com

笔者以中国气象局发布的西北太平洋海域台风的相关数据为计算样本,选取最大风速作为台风强度的指标,并考虑台风登陆后受地形摩擦影响,最大风速或台风中心最低气压可能产生突变这一因素,建立台风登陆和未登陆2种情况下的灰色均生函数预测模型,预测未来台风强度的变化。

1 数据和预测方法

1.1 数据选取

研究数据选取中国气象局热带气旋资料中心发布的1949—2008年西北太平洋海域(含南海)热带气旋最佳路径数据及资料。根据最新的热带气旋强度等级定义标准,本文中的台风是指最大风速大于17.2 m/s(蒲福风级8级)的热带气旋,包括热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风。

研究数据中的最大风速数据根据台风中心最低气压推算得出,存在一定的误差。为避免因推算误差而导致的预测误差,在台风强度预测中选择以台风中心最低气压值作为预测量,再根据最大风速推算公式^[8]推算相应的最大风速,作为台风强度的指标。

1.2 模型应用流程

台风强度的预测流程为:首先从台风数据中筛选出所需的台风中心最低气压观测值,构成时间序列,建立灰色均生函数预测模型,再将模型预测出的台风中心最低气压预测值根据最大风速推算公式,推算出最大风速预测值。

1.3 灰色均生函数模型

灰色均生函数模型^[9]是一种组合预测模型,它通过灰色GM(1,1)模型^[10]揭示事件的总趋势,并利用均生函数模型^[11-12]对时间序列中的极值具有较强的拟合和预测能力这一特性,来刻画随机摆动规律,将两者结合起来能够更好地描述事件的发展变化规律。

1.3.1 灰色GM(1,1)模型

设原始数据序列 $X^{(0)}$ 的原始时间序列 $x^{(0)} = \{x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}\}$, n 为时间序列长度,对其进行一次累加生成处理:

$$x_k^{(1)} = \sum_{j=1}^k x_j^{(0)} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

以序列 $x^{(1)} = \{x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}\}$ 为基础,建立白化微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (2)$$

式中: a, u ——待辨识参数。

设参数向量 $\hat{a} = [a, u]^T$, 且 $y_n = [x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}]^T$, 并构造矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} -(x_1^{(1)} + x_2^{(1)})/2 & 1 \\ -(x_2^{(1)} + x_3^{(1)})/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -(x_{n-1}^{(1)} + x_n^{(1)})/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由最小二乘法可估计参数向量: $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T y_n$, 离散响应方程为

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = \left(x_1^{(1)} - \frac{u}{a}\right)e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (k = 0, 1, \dots, n-1) \quad (4)$$

其中

$$x_1^{(1)} = x_0^{(0)}$$

式中: $\hat{x}_{k+1}^{(1)}$ ——原始数据累计估计值。

对 $\hat{x}_{k+1}^{(1)}$ 作累减还原处理,可得 $x_i^{(0)}$ 的估计值:

$$\hat{x}_{k+1}^{(0)} = \hat{x}_k^{(1)} + 1^{(1)} - \hat{x}_k^{(1)} \quad (k = 0, 1, \dots, n-1) \quad (5)$$

$\hat{x}_{k+1}^{(0)}$ 即为GM(1,1)模型提取的原始数据 $x_i^{(0)}$ 的趋势值。定义估计结果的相对值:

$$z(i) = \frac{x_i^{(0)}}{\hat{x}_i^{(0)}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

1.3.2 均生函数模型

1.3.2.1 均生函数及其外延矩阵

设序列 $z(i) = \{z(1), z(2), \dots, z(n)\}$, 则 $z(i)$ 的均值为

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(i) \quad (7)$$

均生函数可定义为

$$\bar{z}_l(i) = \frac{1}{n_l} \sum_{j=0}^{n_l-1} z(i+jl) \quad (i=1, 2, \dots, l; 1 \leq l \leq m) \quad (8)$$

其中

$$n_l = \text{INT}\left(\frac{n}{l}\right) \quad m = \text{INT}\left(\frac{n}{2}\right) \text{ 或 } \text{INT}\left(\frac{n}{3}\right)$$

式中: $\text{INT}(\ast)$ ——取整函数。

对均生函数做周期性延拓:

$$f_l(t) = \bar{z}_l(i) \quad t = i[\text{mod}(l)] \quad (t=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: $\text{mod}(\ast)$ ——求余函数。

由此构造出均生函数延拓矩阵为 $F = (f_{ij})_n \times m$, $f_{ij} = f_l(t)$ 。

1.3.2.2 均生函数模型建模步骤

均生函数模型主要有 Cram-Schmidt 正交化模型、最优子集回归模型和主分量模型。为减小计算量,降低分析问题的复杂性,采用主分量模型。

均生函数模型建模步骤为 (a) 原始数据标准化: $z'(i) = (z(i) - \bar{z})/s_z$, s_z 为标准差。(b) 采用式 (8)、式 (9) 分别生成均生函数 $\bar{z}'_l(i)$ 和外延矩阵 F 。(c) 对 F 进行主成分分析。按协方差公式 $s_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (z'_{ik} - \bar{z}'_i)(z'_{jk} - \bar{z}'_j)$ 计算协方差矩阵 S , 其中 s_{ij} 为 S 中的元素。(d) 计算 S 的特征值 λ_i 和特征向量 $C_{i \times l}$, 并从大到小排列其特征值及相应的特征向量。(e) 计算前 k 个特征值与特征值总和的比值 $\rho = \sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{j=1}^n \lambda_j$, 使其满足 $\rho \geq \mu$, 其中 μ 为阈值, 可视具体情况而定。(f) 因前 k 个主分量已包含 l 个均生函数的大部分信息, 故自变量仅需 k 个主分量, 对 Z 变量建立模型: $Z = V\Phi' + \xi'$, 其中 $V = F_{n \times m} C_{m \times k}^T$ 为主分量矩阵, Φ' 为回归系数矩阵, ξ' 为误差。忽略 ξ' , 则 $\Phi' = (V^T V)^{-1} V^T Z$ 。(g) 变量 Z 可以直接用 $\bar{z}'_l(i)$ 作为自变量进行建模, 则有 $Z = F\Phi + \xi$, Φ 为标准化后回归系数矩阵, ξ 为误差。将 $Z = F\Phi + \xi$ 代入 $\Phi' = (V^T V)^{-1} V^T Z$, 忽略误差, 与 $Z = V\Phi' + \xi'$ 比较, 可得 $\bar{z}'_l(i)$ 作为自变量进行建模的回归系数为 $\Phi = C^T \Phi'$ 。求出 $\Phi = [\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(l)]^T$ 后, 忽略建模误差, 由 $Z = F\Phi + \xi$ 可得时间序列在 t 时刻的模拟值为 $\hat{z}(n) = \sum_{j=1}^n f_{n,j} \varphi(j)$ 。(h) 将均生函数作 t_1 步周期外延, $t_1 + t$ 时刻的预测值为 $\hat{z}(t+t_1) = \sum_{j=1}^n f_{t+t_1,j} \varphi(j)$ 。

2 实例分析

表1 台风强度模拟误差分析结果

2.1 气压模拟结果及误差分析

对 1949—2008 年登陆和未登陆台风 2 种情况下台风中心最低气压的年平均值、年极值构成的时间序列进行灰色均生函数模型模拟预测。模型模拟结果与观测值对比如图 1、图 2 所示。

对模拟结果进行误差分析, 结果见表 1、图 3。由表 1、图 3 可知: 灰色均生函数模型模拟整体效果较好, 但未登陆情况下台风中心最低气压年极值的模拟效果较差, 绝对误差均值为 6.5 hPa, 相对误差均值为 0.72%; 该模型对台风强度年平均值的模拟优于年极值的模拟, 其绝对误差平均值和标准差均小于对年极值的模拟; 残差图中的异常点, 均对应图 1、图 2 中的极值点, 由此说明该模型对极值的模拟有欠缺。

Table 1 Error analysis results of typhoon intensity simulation

台风状态	台风中心最低气压值	绝对误差均值/hPa	相对误差均值/%	标准差/hPa
未登陆	年平均值	1.4	0.15	1.3
未登陆	年极值	6.5	0.72	6.5
登陆	年平均	2.3	0.24	1.6
登陆	年极值	4.9	0.53	3.2

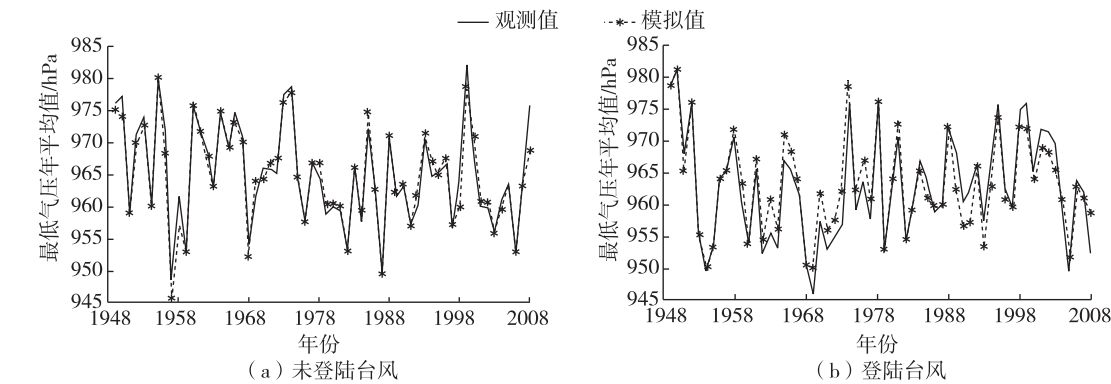


图 1 西北太平洋海域 1949—2008 年台风中心最低气压年平均值模拟值与观测值
Fig. 1 Simulated and observed annual average values of minimum pressure in typhoon center in Northwest Pacific Ocean during period from 1949 to 2008

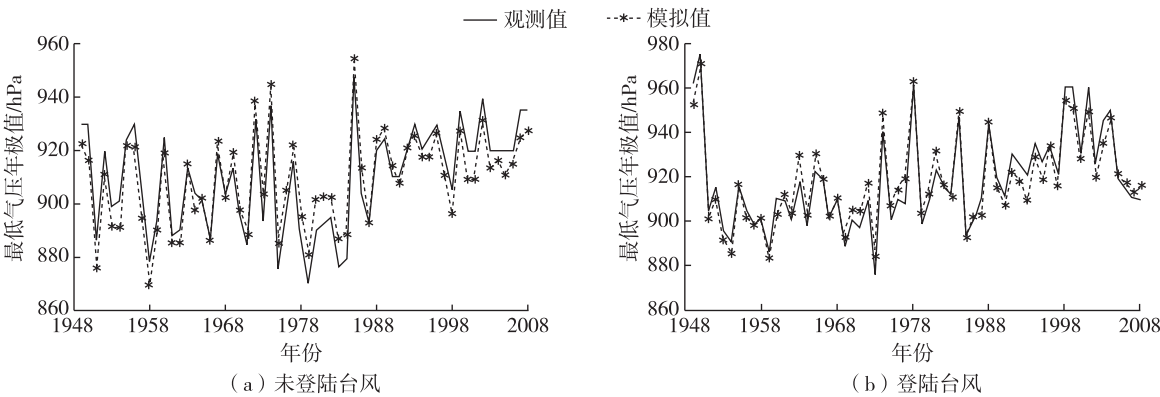


图 2 西北太平洋海域 1949—2008 年台风中心最低气压年极值模拟值与观测值
Fig. 2 Simulated and observed annual extreme values of minimum pressure in typhoon center in Northwest Pacific Ocean during period from 1949 to 2008

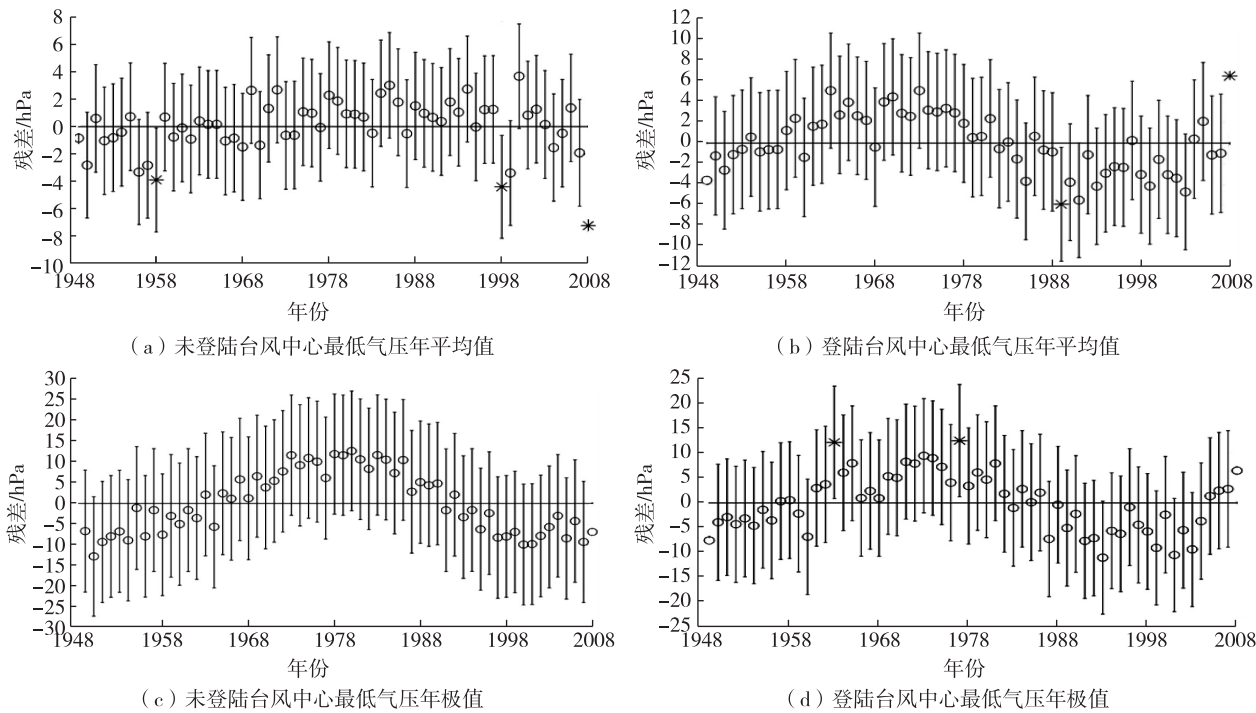


图 3 台风强度残差分析
Fig. 3 Residual analysis diagrams of typhoon intensity

2.2 最大风速预测

利用构建的灰色均生函数模型对 2009—2013 年台风中心最低气压进行预测,并将模型预测出的中心最低气压值转换为最大风速,结果见表 2、表 3。

表 2 未登陆台风强度预测值和观测值

Table 2 Predicted and observed intensity of typhoons not arriving at coasts

年份	台风中心最低气压 年平均值/hPa		最大风速 年平均值/(m·s ⁻¹)			台风中心最低气压 年极值/hPa		最大风速 年极值/(m·s ⁻¹)		
	预测值	观测值	预测值	观测值	绝对误差	预测值	观测值	预测值	观测值	绝对误差
2009	956.4	949.6	49.0	51.8	2.8	914.3	903.0	69.3	73.5	4.2
2010	967.0	960.0	38.4	41.3	2.9	931.0	940.0	63.5	60.6	2.9
2011	959.6	960.7	41.3	41.0	0.3	910.1	910.0	71.1	71.1	0
2012	961.7	959.5	40.6	41.3	0.7	929.7	910.0	64.0	71.1	7.1
2013	966.7	961.3	38.6	40.8	2.2	922.8	890.0	66.6	77.7	11.1

表 3 登陆台风强度预测值和观测值

Table 3 Predicted and observed intensity of typhoons arriving at coasts

年份	台风中心最低气压 年平均值/hPa		最大风速 年平均值/(m·s ⁻¹)			台风中心最低气压 年极值/hPa		最大风速 年极值/(m·s ⁻¹)		
	预测值	观测值	预测值	观测值	绝对误差	预测值	观测值	预测值	观测值	绝对误差
2009	962.8	971.2	40.2	36.7	3.5	947.5	950.0	52.7	51.7	1.0
2010	972.3	961.7	36.2	40.6	4.4	925.7	895.0	65.5	76.1	10.6
2011	964.2	964.4	39.6	39.5	0.1	925.8	925.0	65.4	65.7	0.3
2012	969.6	962.6	37.4	40.3	2.9	930.7	945.0	63.6	53.7	9.9
2013	965.0	956.2	39.3	43.4	4.1	928.3	915.0	64.5	69.4	4.9

由表 2、表 3 可知:台风强度年极值预测出现的最大绝对误差为 2013 年未登陆台风的 11.1 m/s 和 2010 年登陆台风的 10.6 m/s,均低于上海台风模式对 0801 号台风的预报结果(24 h、48 h 的绝对误差分别为 13.55 m/s、18.86 m/s)^[13-14],而这 2 个年份处于极值点,进一步验证了灰色均生函数模型对极值预测的欠缺,其他非极值点的预测呈现较为理想的预测结果;台风强度年均值预测出现的最大绝对误差为 4.4 m/s,整体上低于表 4 各站 2012 年 25 次台风数值模式预测结果的平均值^[15]。综上,无论是登陆台风还是未登陆台风,灰色均生函数模型均有较高的精度,能够满足工程应用的需求。

3 结 论

a. 灰色均生函数模型对登陆和未登陆台风强度的年平均值和年极值均表现出了较高的预测精度,年平均值最大绝对误差为 4.4 m/s,低于 2012 年各站 25 次台风强度的数值模式预测结果的平均值;年极值最大绝对误差为 11.1 m/s,低于上海台风模式对 0801 号台风的预测结果。

b. 由模拟结果的残差分析和预测结果可知,异常点和预测偏差最大点均出现在极值点。由此说明,该模型对极值的模拟有欠缺。

c. 该模型基于历史数据的统计,因此历史数据越多就越准确,其预测精度也越高。

参考文献:

[1] 胡春梅,余晖,陈佩燕.西北太平洋热带气旋强度统计释用预报方法研究[J].气象,2006,32(8):64-69.(HU Chunmei, YU Hui, CHEN Peiyan. Statistical prediction scheme of tropical cyclone intensity in northwest pacific[J]. Meteorological Monthly, 2006,32(8):64-69.(in Chinese))

表 4 2012 年 25 次预报台风最大风速平均误差^[15]

Table 4 Average errors of forecast maximum wind speed for 25 typhoons in 2012

预报 站台	24 h		48 h		72 h	
	绝对误差/ (m·s ⁻¹)	预报 次数	绝对误差/ (m·s ⁻¹)	预报 次数	绝对误差/ (m·s ⁻¹)	预报 次数
中国台	4.5	782	6.0	602	6.6	450
日本台	5.4	493	7.1	361	8.5	285
美国台	7.2	394	8.2	316	7.1	253
中国香港台	4.7	325	2.5	253	7.4	183

- [2] 金龙,姚才,黄明策,等.南海西行台风强度的一种客观预报新方法[J].应用基础与工程科学学报,2006,14(增刊):63-69. (JIN Long, YAO Cai, HUANG Mingce, et al. A new objective forecast method for tracking westward typhoons intensity in South China Sea[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(Sup): 63-69. (in Chinese))
- [3] 史旭东,金龙,黄小燕.基于KPCA的台风强度神经网络集合预报方法研究[J].气象科学,2013,33(2):184-189. (SHI Xudong, JIN Long, HUANG Xiaoyan. A new neural network ensemble forecast method based on KPCA for typhoon intensity[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2013, 33(2): 184-189. (in Chinese))
- [4] 王鑫,杨慧中.基于LS-SVM的热带气旋强度预报[J].江南大学学报(自然科学版),2010,9(4):400-403. (WANG Xin, YANG Huizhong. Tropical cyclone intensity forecasts based on LS-SVM[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2010, 9(4): 400-403. (in Chinese))
- [5] 马龙,刘廷玺,冀鸿兰,等.基于气候重建资料及均生函数-最优子集回归模型的降水预测[J].水文,2013,33(1):63-67. (MA Long, LIU Tingxi, JI Honglan, et al. Precipitation short-term forecasting based on climate reconstruction data and mean generating function-optimal subset regression (MGF-OSR) prediction model[J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(1): 63-67. (in Chinese))
- [6] 张德宽,杨贤为,邹旭恺.均生函数-最优子集回归在高温极值预测中的应用[J].气象,2003,29(4):44-47. (ZHANG Dekuan, YANG Xianwei, ZOU Xukai. Application of mean generating function-optimal subset regression to the prediction of high temperature extremes[J]. Meteorological Monthly, 2003, 29(4): 44-47. (in Chinese))
- [7] 常蕊,朱蓉,柳艳香,等.基于均生函数的风电场风速短临预报模型[J].气象,2013,39(2):226-233. (CHANG Rui, ZHU Rong, LIU Yanxiang, et al. Nowcasting model of wind speed based on mean generating function for wind farms[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(2): 226-233. (in Chinese))
- [8] 陈孔沫.西太平洋台风最大风速的计算[J].海洋通报,1985,4(4):5-10. (CHEN Kongmo. Calculation of the maximum wind speed of typhoon in the Western Pacific[J]. Marine Science Bulletin, 1985, 4(4): 5-10. (in Chinese))
- [9] 甘旭升,端木京顺,卢永祥.灰色均生函数模型及其在航空装备事故预测中的应用[J].中国安全科学学报,2010,20(6):40-44. (GAN Xusheng, DUANMU Jingshun, LU Yongxiang. Model of grey-mean generating function and its application to aviation equipment accident prediction[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(6): 40-44. (in Chinese))
- [10] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].湖北:华中科技大学出版社,1987.
- [11] 魏凤英,曹鸿兴.长期预测数学模型及其应用[M].北京:气象出版社,1990.
- [12] 魏生生,曹鸿兴,魏凤英.均生函数模型预报检验[J].气象,1998,24(5):42-46. (WEI Shengsheng, CAO Hongxing, WEI Fengying. Tests of mean generating function model prediction[J]. Meteorological Monthly, 1998, 24(5): 42-46. (in Chinese))
- [13] 谭燕,许晓林,张维,等.0801号台风“浣熊”(Noguri)特征分析及预报效果检验[J].大气科学研究与应用,2010(1):32-46. (TAN Yan, XU Xiaolin, ZHANG Wei, et al. Characteristics analysis and NWP forecast evaluation of typhoon Noguri (0801)[J]. Atmospheric Science Research and Application, 2010(1): 32-46. (in Chinese))
- [14] 许晓林,谭燕,余晖,等.0806号台风“风神”过程分析及预报精度评估[J].大气科学研究与应用,2010(1):68-80. (XU Xiaolin, TAN Yan, YU Hui, et al. Analysis and forecast evaluation on typhoon “Fengshen” (0806)[J]. Atmospheric Science Research and Application, 2010(1): 68-80. (in Chinese))
- [15] 顾茜,丁雪霖,陈永平.2012年西北太平洋多台风站台风预报误差比较分析[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(6):531-535. (GU Xi, DING Xuelin, CHEN Yongping. Comparison and analysis of forecasting errors at several stations for tropical typhoons over northwest Pacific region in 2012[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(6): 531-535.