

# 基于递归图理论的飓风信号非平稳特征定量分析

邵亚会<sup>1</sup>, 侯俊勇<sup>1</sup>, 葛耀君<sup>2</sup>, 朱晓虎<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;  
3. 国网安徽省电力公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 为解决传统时频域分析方法无法定量表征风信号的非平稳特征问题, 提出采用递归定量分析方法对风场的非平稳特征进行可视化 and 定量化分析, 该方法适用性强且噪声对计算过程的影响较小. 首先, 采用相空间重构技术和递归图理论对飓风 Gustavo (2008) 典型时间序列做非平稳性分析; 然后, 通过引入递归率、确定率、信息熵、对角线平均长度、层度和捕获时间等 6 项递归定量分析指标对飓风过境的全过程进行信号特征的定量分析, 并给出飓风信号和良态风信号的 6 项定量指标界限; 最后用台风梅花(1109)进行了上述指标的验证. 研究发现, 飓风过境前期信号具有一定的周期性和平稳性, 中期信号的非线性、非平稳性比较突出; 6 项递归定量分析指标能够客观区分开飓风信号和良态风信号; 递归定量分析方法完全适用于风信号系统的研究, 能够更全面、定量地描述风信号的非平稳特征.

**关键词:** 飓风; 递归图; 相空间; 非平稳性; 递归定量分析  
**中图分类号:** V211.3 **文献标志码:** A

## Quantification Analysis of Non-stationary Characteristics of Hurricane Utilizing Recurrence Plot Theory

SHAO Yahui<sup>1</sup>, HOU Junyong<sup>1</sup>, GE Yaojun<sup>2</sup>, ZHU Xiaohu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Grid Anhui Province Electric Power Corporation Research Institute of Economic & Technology, Hefei 230022, China)

**Abstract:** Wind is a non-stationary stochastic process, but the traditional time domain or frequency domain analytical procedure can't quantify its non-stationary characteristics. A visual and quantitative signal analytical procedure was put forward, which was the recurrence quantification analytical procedure. In this procedure, there were no specific requirements for the stationary characteristics of system and

the procedure was not sensitive to noise. Firstly, the non-stationary characteristics and other characteristics of the typical time series of hurricane Gustavo (2008) were obtained by utilizing phase space reconstruction techniques and recurrence plot theory. Thereafter, 6 recurrence quantification indexes were imported, which were recurrence rate, determinism, entropy, average diagonal line length, laminarity and trapping time and quantifies the signal characteristics of hurricane in the whole process of making landing, and defines one boundary for every index between hurricane signal and normal wind signal. Lastly, the procedure and all the indexes defined are verified by typhoon Muifa (1109). The result shows that the early hurricane has certain periodicity and stationarity; however, the non-linearity and non-stationary are particularly salient for the middle hurricane; 6 indexes can distinguish the signal characteristics between hurricane and normal wind; recurrence quantification analytical procedure completely suitable for the wind signal researches, and can fully describe the nonstationary characteristics of wind signals.

**Key words:** hurricane; recurrence plot; phase space; non-stationary; recurrence quantification analysis

飓风(台风)作为一种多发性自然灾害, 频频登陆大西洋、北太平洋和我国东南沿海地区, 给登陆地带来严重的生命和财产损失. 风信号是典型的非线性非平稳过程, 现有的时域方法和频域方法难以对风场非平稳特性进行量化<sup>[1]</sup>, 定性描述无法满足工程和研究领域的要求. 研究飓风信号的非线性非平稳性特征, 通过对该信号做定量分析得出信号的定量分析值, 可作为飓风信号的经验定量分析值, 可为今后大跨高层结构抗风分析或其他模拟强风风场的风场特性给出参考值. 因此研究风场的非平稳性等特征具有重要意义.

收稿日期: 2016-02-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51308178); 国家自然科学基金重点项目(优秀重点实验室项目)(51323013)

第一作者: 邵亚会(1981—), 女, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构与桥梁抗风. E-mail: yahuishao@126.com

通讯作者: 侯俊勇(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为结构与桥梁抗风. E-mail: junyonghou@yeah.net

1987年 Eckmann 等<sup>[2]</sup>提出一种分析时间序列的新方法,即递归图(Recurrence Plot, RP)理论.随着研究的不断深入,Zbilut 和 Webber<sup>[3]</sup>提出递归定量分析方法,给出了递归图的定量分析指标.该方法随后被引入各个研究领域,最先引入的是生物医学工程领域<sup>[4-6]</sup>,用于人类健康监测和疾病预测等,其他还有物理学、电子仪器、车流监控、机械损伤识别等领域<sup>[7-9]</sup>.近年来该方法也被引入到建筑结构健康和损伤识别领域<sup>[10-11]</sup>.随着各个研究领域的不断应用,该方法显示出处理复杂信号的优势,一是信号噪声对计算过程影响较小,且适用于不同的信号种类;二是针对不同信号特征给出了相应的定量指标;三是该方法不受数据统计分布假设的限制.各领域实践证明递归定量分析方法是一种有效的非线性信号分析工具,因此采用该方法研究风信号的非平稳性等特征具有深远的意义.

本文使用递归定量分析方法,从相空间的角度分析了飓风风场信号特征,得到飓风过境前期具有良态风的周期性和平稳性特征、中期具有典型的非线性和非平稳性特征.引入 6 项定量分析指标,对良态风场和飓风风场进行了非平稳性的定量描述.

## 1 递归定量分析理论

### 1.1 递归图

递归图是一种  $N \times N$  的二维图形<sup>[2,12]</sup>,将递归点以黑点的形式在图中标出,以达到表征信号系统动力学特征的目的.相比于其他信号处理方法,递归图理论更简单,该理论表述如下.

相空间重构是使用递归图分析时间序列的基础与首要步骤,对于长度为  $M$  的风信号时间序列  $\{x(1), x(2), \dots, x(M)\}$ ,由时间延迟重构技术可得到延迟向量.

$$\mathbf{X}(n) = [x(n), x(n+\tau), \dots, x(n+(m-1)\tau)]^T, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{X}(n)$  为延迟向量;  $N$  为重构向量总个数,  $N = M - (m-1) \times \tau$ ,  $m$  为嵌入维数,  $m$  可通过虚假最邻近点(False Nearest Neighbor, FNN)确定;  $\tau$  为延迟时间,  $\tau$  只能取采样间隔的整数倍,文中的采样间隔均视为 1,因此只需要是整数,可通过互信息法(Average Mutual Information, AMI)确定.

递归图的绘制可以通过以下数学模型来说明:

$$R_{i,j} = \Theta(\epsilon - \|X(i) - X(j)\|), \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中:  $R_{i,j}$  为递归值,取 0 或 1,  $i$  为行数,  $j$  为列数;  $\epsilon$  为距离阈值;  $\|\cdot\|$  为欧式范数(Euclidean Norm);  $\Theta(x)$  为海维塞函数(Heaviside Function),如果  $x < 0$ ,  $\Theta(x) = 0$ ,否则  $\Theta(x) = 1$ .

距离阈值  $\epsilon$  是一个经验值,它确定了一个以延迟向量  $\mathbf{X}(i)$  为中心、 $\epsilon$  为半径的领域.如果向量  $\mathbf{X}(j)$  位于该领域中,就认为风信号时间序列具有递归特性,此时  $R_{i,j} = 1$ ,反之则  $R_{i,j} = 0$ .最后可以将一个  $N \times N$  的距离矩阵转换成 0-1 矩阵,将  $R_{i,j} = 1$  的值用黑点表示,这样就可将风信号时间序列的递归特性以二维图形的形式表示出来.

### 1.2 递归定量分析指标

为了观察递归图所隐含的更深层次的信息,提出 6 项量化递归图的复杂测度,通常称作递归定量分析(Recurrence Quantification Analysis, RQA)指标.根据各指标所表征的信号特征不同,将 RQA 指标分为以下 3 类:信号的周期性指标,即确定率  $D_{ET}$ 、对角线平均长度  $L$ ;信号的非线性指标,即递归率  $R_R$ 、信息熵  $E_{NTR}$ ;信号的非平稳性指标,即层状度  $L_{AM}$ 、捕获时间  $T_T$ .这些指标都是建立在递归点密度、递归图对角线和垂直线的基础之上.以下给出 6 项 RQA 指标的算法和表征风信号的意义.

#### 1.2.1 信号的周期性指标

$D_{ET}$  是构成递归图对角线结构的递归点数与总递归点数的比值.  $D_{ET}$  把构成线段的递归点和孤立(或离散)的递归点很好地区分开.若风信号的  $D_{ET}$  较高,则意味着此信号存在一个较强的周期性嵌入过程.对于风信号而言,不相关或弱相关过程和随机混沌过程通常不产生或产生短的对角线结构.

$$D_{ET} = \left( \sum_{l=l_{\min}}^N lP(l) \right) \cdot \left( \sum_{l=1}^N lP(l) \right)^{-1} \quad (3)$$

式中:  $l$  为对角线结构长度;  $l_{\min} = 2$ ;  $P(l)$  为递归图中找到长度为  $l$  的对角线结构的概率.

$L$  表示递归图中对角线结构的平均长度,代表重构相空间里 2 个风信号时间序列轨迹彼此靠近的平均时间,即周期重现时间较长,也可以称作平均预测时间.

$$L = \left( \sum_{l=l_{\min}}^N lP(l) \right) \cdot \left( \sum_{l=l_{\min}}^N P(l) \right)^{-1} \quad (4)$$

#### 1.2.2 信号的非线性指标

$R_R$  是递归图上表征递归点密度的一个测度,定义为递归点数目与矩阵点总数的比值.若风信号的递归率较低,则意味着此信号是典型的非线性非平稳性信号.

$$R_R = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j} \quad (5)$$

$E_{NTR}$ 是指在递归图中恰巧以概率  $p(l) = P(l)/N_l$  找到长度为  $l$  的对角线的 Shannon 熵.  $E_{NTR}$  反应涉及对角线结构的递归图的复杂性. 例如对于随机的风信号来说, 它的  $E_{NTR}$  相对较低, 也就预示它的复杂度较低.

$$E_{NTR} = - \sum_{l=l_{min}}^N p(l) \ln p(l) \quad (6)$$

式中:  $P(l)$  是对角线结构长度分布的概率密度.

### 1.2.3 信号的非平稳性指标

$L_{AM}$  是构成垂直线结构的递归点数与总递归点数的比值.  $L_{AM}$  是描述整个递归图中垂直线结构数量的一个测度, 代表系统中分层状态的发生. 如果风信号递归图中垂直线递归点较多,  $L_{AM}$  将会较高, 信号的平稳性较好.

$$L_{AM} = \left( \sum_{v=v_{min}}^N vP(v) \right) \cdot \left( \sum_{v=1}^N vP(v) \right)^{-1} \quad (7)$$

式中:  $v$  为垂直线结构的长度,  $v_{min} = 2$ ;  $P(v)$  为递归图中找到长度为  $v$  的垂直线结构的概率.

$T_T$  类似于  $L$ , 表示递归图中垂直线结构的平均长度.  $T_T$  包含递归图中垂直线结构的数量和长度信息, 可以测出风信号系统处于某种状态和在此状态将要停留的时间.

$$T_T = \left( \sum_{v=v_{min}}^N vP(v) \right) \cdot \left( \sum_{v=v_{min}}^N P(v) \right)^{-1} \quad (8)$$

以上理论可以简单概括为: 首先, 用递归图对重构后的数据进行分析; 然后, 应用 RQA 方法量化递归图中递归点的几何特性, 得到一系列递归量化值.

## 2 飓风信号递归分析

### 2.1 数据采集和分组

现场实测时间从 2009 年 8 月 31 日 18:06 开始, 9 月 2 日下午 18 点结束, 历时约 48 h. 完整地捕捉到了飓风古斯塔夫 (Gustavo 2008) 登陆美国路易斯安那州时的风场特征, 包括高度为 2.5 m, 4.0 m, 5.0 m, 7.5 m, 10.0 m 处的风速、风向、气压、温度、雨量、湿度等关键参数. 具体采集设备和采集方法见文献[13]. 风塔 5.0 m 高度处的 48 h 风速时程图如图 1 所示.

为了便于分析, 将飓风古斯塔夫 (Gustavo 2008) 登陆整个过程分成飓风过境前期、飓风过境中

期和飓风过境后期 (简称前期、中期和后期). 由图 1 可看出, 飓风过境中期风塔 5.0 m 处实测风速经历了逐渐升高、骤降、骤升和逐渐降低的过程, 骤降和骤升过程是由于此时飓风风眼正好经过风信号采集站, 飓风风眼中心气压最低, 风眼处风速也极低. 综合分析风速时程图, 飓风过境前期的平均风速最低, 但呈现增大趋势; 飓风过境中期的风速信号先增大后减小, 完整地捕获到飓风峰值; 飓风过境后期, 风速较低, 且趋于平稳.

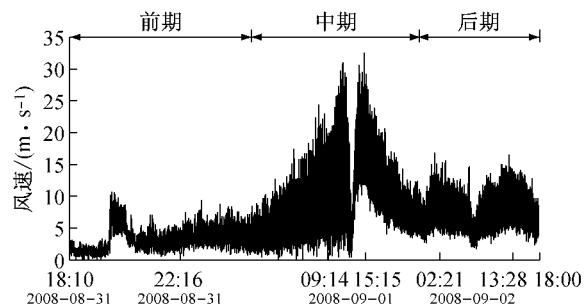


图 1 2008 年飓风古斯塔夫 48 h 风速时程

Fig.1 Wind speed time history of hurricane Gustavo (2008) of 48 hours

对于非线性信号分析而言, 信号尺度的选择尤为重要, 尺度过小容易表现平稳性特征, 尺度过大往往表现非平稳性特征. 根据现有风信号的研究和飓风古斯塔夫 (Gustavo 2008) 的采集频率, 决定选取 3 000 个采样点作为研究尺度. 从前期、中期、后期的信号中分别选取 2 组典型时间序列, 每组典型时间序列代表的时间和编号如表 1 所示.

表 1 典型时间序列的时间和编号

Tab.1 Time and number of typical time series		
时期	编号	时间
前期	前期 1 号	8 月 31 日 18:10—18:12
	前期 2 号	8 月 31 日 22:16—22:18
中期	中期 1 号	9 月 1 日 09:41—09:51
	中期 2 号	9 月 1 日 15:15—15:25
后期	后期 1 号	9 月 2 日 02:21—02:31
	后期 2 号	9 月 2 日 13:28—13:38

### 2.2 典型时间序列相空间重构

根据飓风信号的传统特性, 选取 AMI 和 FNN 计算 6 组典型时间序列的延迟时间  $\tau$  和嵌入维数  $m$ ,  $\tau$  和  $m$  分别在 5 和 15 附近左右变化, 为了让飓风登陆前后分析数据对比更直观, 选定  $\tau = 5$ ,  $m = 15$ . 通过时间序列的相空间重构, 6 组二维相空间图如图 2 所示.

对比观察 6 组相空间重构图, 前期 1, 2 号时间

段的相空间图(图 2a, 2b)相对不规则, 存在突变和多个吸引子; 中期和后期的相空间图(图 2c—2f)相对发散, 没有明显的吸引子. 从平稳性角度分析, 前期相

空间图存在吸引子, 相比中、后期平稳性较强; 中、后期相空间图则表现发散, 随机性较强, 表现出更加非线性、非平稳性的特征.

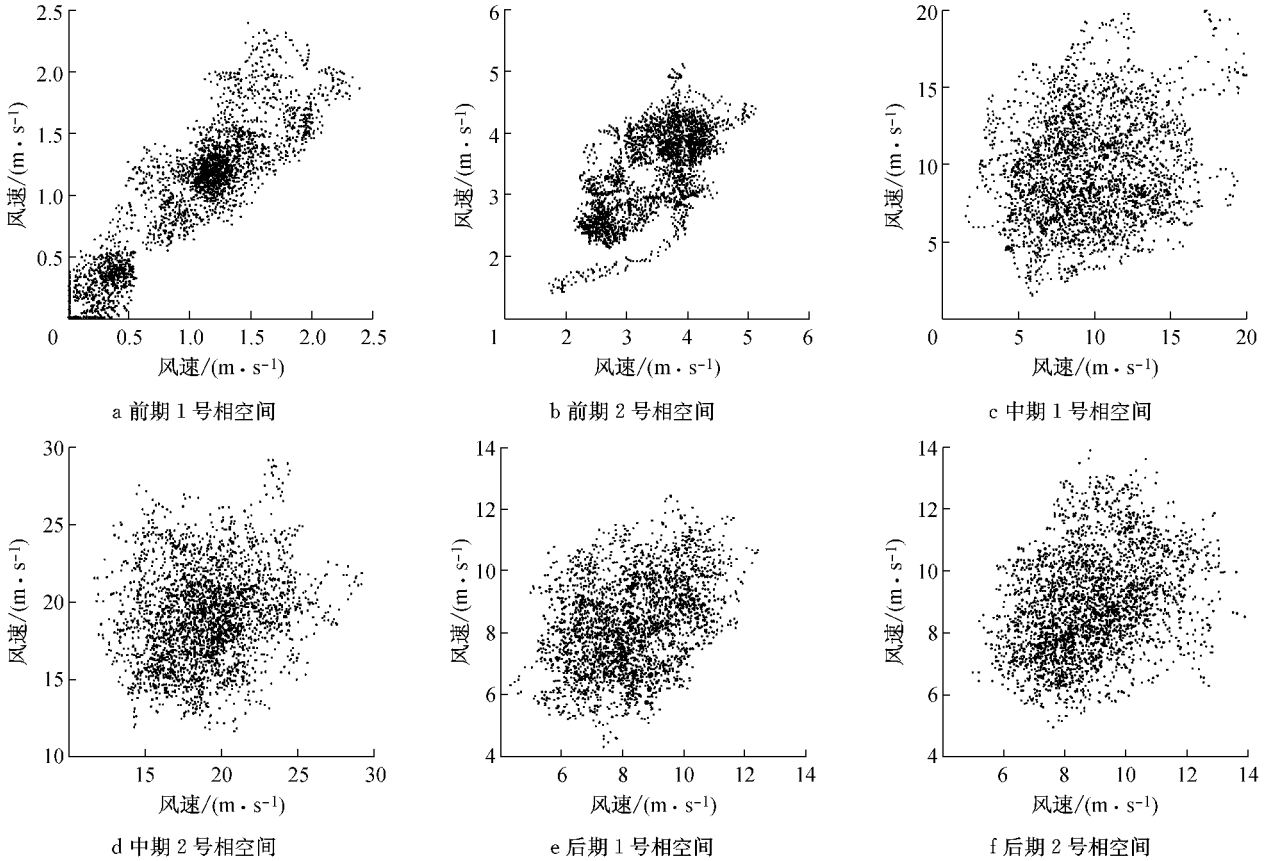


图 2 典型时间序列的相空间

Fig. 2 The phase space of 6 typical time series

### 2.3 典型时间序列递归图分析

从递归图的角度分析, 通过时间延迟, 计算出各延迟时间序列的空间距离是否满足阈值  $\epsilon$  的限制, 取距离阈值  $\epsilon=1$ , 小于阈值  $\epsilon$  则记为递归点. 将递归点以黑点的形式显示在  $N \times N$  二维递归图上. 飓风古斯塔夫(Gustavo 2008)的 6 组典型时间序列递归图如图 3 所示.

可以明显看出, 图 3a、图 3b 与图 3c—3f 有显著的区别. 从图 3a 和 3b 可以看, 前期存在大片的白色或黑色区域, 说明该时期风信号存在大的突变, 并且突变前后信号处于一段时间的相对平稳状态, 也即平稳的阵风; 在中期, 图 3c 和 3d 中的递归点分布相对更加均匀, 且存在水平或垂直的细长白色区域, 说明该时期风信号的随机性较强, 且存在风速的长期渐变; 后期风信号的平稳性和随机性介于前期和中期之间.

从相空间图和递归图 2 个分析角度得出相同的结论, 前期信号处于相对平稳的阵风状态; 中期风信

号的随机性较强, 且伴随风速的长期渐变; 后期受飓风登陆的影响, 风信号的各方面特性处于前期和中期之间.

## 3 全局递归定量分析

从相空间图和递归图只能直观得出风信号的一般特征, 不能定量分析时程信号, 也就不能为工程实际给出具体抗风验算参数, 为此在递归图基础上进行全局时程信号的递归定量分析.

为验证该方法的鲁棒性, 选取风塔 5.0 m 处的风速时程为研究对象, 对 6 项 RQA 指标的曲线图分别进行了按照 10 min 和 3 000 点分组的递归定量分析, 研究发现不同的分组方法对 6 项指标变化规律的影响均较小, 可忽略, 同时也证明该方法的鲁棒性较好, 可以作为定量研究的依据.

以下仅列出按照 10 min 分组的计算结果, 具体分组方法如下: 将 48 h 采集的 126 万个数据点分成

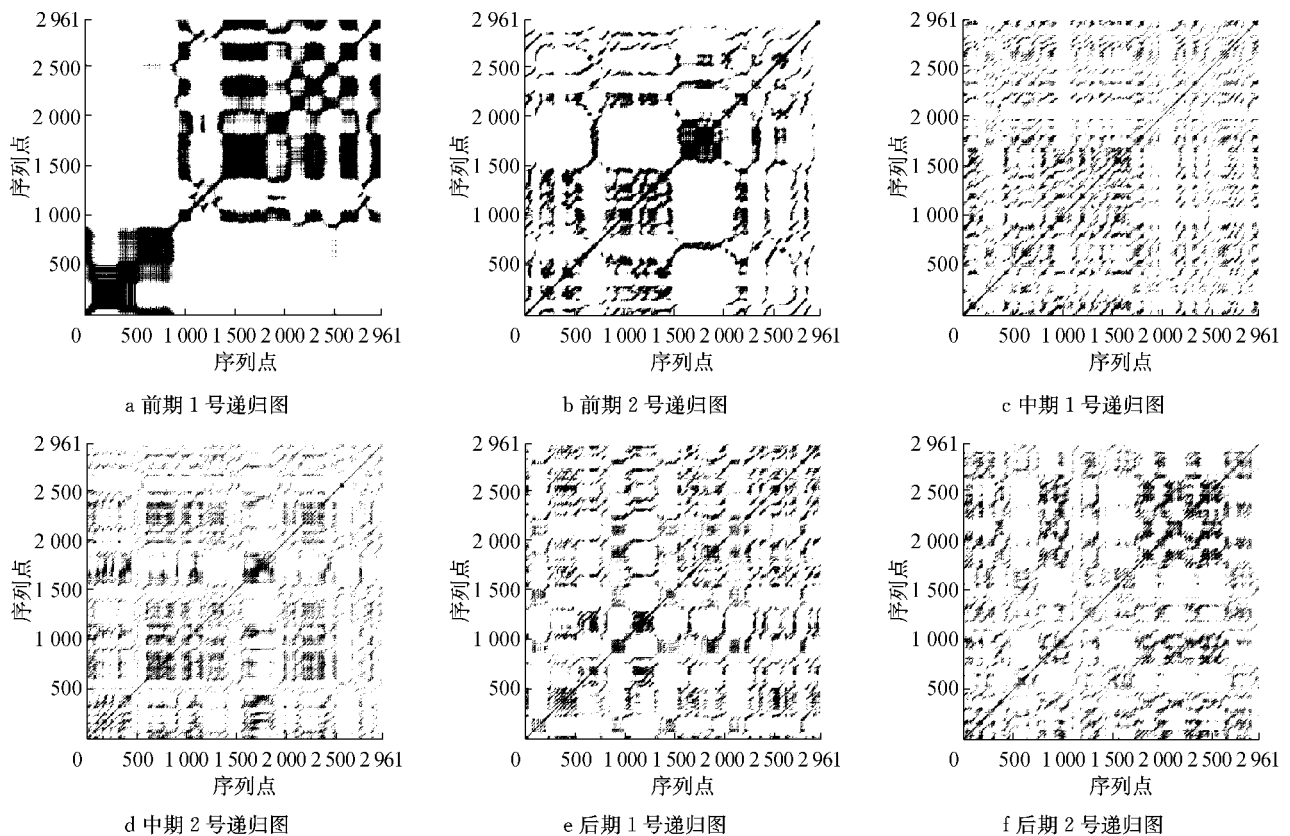


图 3 典型时间序列的递归图

Fig. 3 The recurrence plot of 6 typical time series

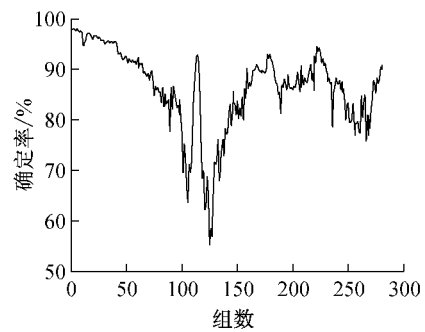
281 组, 每组代表 10 min 信号数据, 前期、中期和后期数据分别对应第 1~50 组、51~150 组和 151~281 组. 根据递归定量分析理论, 分别计算每个小组的 RQA 指标, 然后进行各个量化指标的分析研究. 6 项 RQA 指标的变化和对比如图 4~6 所示.

### 3.1 信号的周期性指标

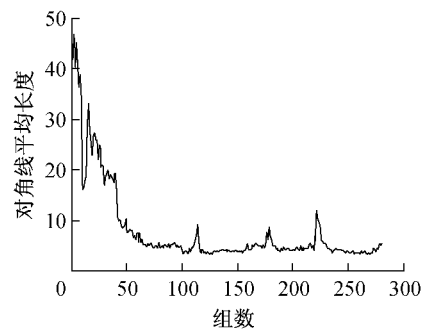
图 4a 给出 48 h 飓风登陆过程的  $D_{ET}$  变化, 前期的  $D_{ET}$  值均在 90% 以上, 飓风信号确定性较强, 信号的周期性嵌入特性最强; 随着飓风的不断深入, 飓风信号的  $D_{ET}$  减小, 中期飓风信号的  $D_{ET}$  最小, 也即随机性最强,  $D_{ET}$  最小值为 55%; 受飓风登陆影响, 后期的  $D_{ET}$  值保持在 85% 左右. 因此前期具有区别于其他的信号或者其他的风信号的本质特征, 中期本质特征不明显, 后期处于二者之间.

由图 4b 的对角线平均长度  $L$  变化来看,  $L$  值前期大于中期和后期, 且  $L \geq 10$ , 说明前期飓风信号相比中期、后期有较强的周期性. 飓风过境中、后期的对角线平均长度  $L$  较短,  $L < 10$ , 说明 2 个延迟相空间轨迹位置相互靠近的时间较短.

飓风过境前期周期性特征较强, 可以认为是良态风, 因此给出良态风的周期性指标数值范围, 即  $D_{ET} \geq 90\%$ ,  $L \geq 10$ .



a 确定率



b 对角线平均长度

图 4 周期性指标变化

Fig. 4 The change of cyclical indexes

### 3.2 信号的非线性指标

由图 5a 可以看出, 飓风过境前期递归率  $R_R$  值

较高,最高稳定在 55%左右;随着飓风的不断深入,  $R_R$  不断降低,中期  $R_R$  值保持在 3%以下;后期递归率略微升高,处于前期和中期之间. 通过分析  $R_R$  变化可以得出,前期飓风信号轨迹在状态空间里聚集程度较高,可以得到很好的线性拟合;中期非线性最强;后期处于二者之间. 因此认为  $R_R < 3\%$  时风信号处于飓风过境状态;  $R_R \geq 15\%$  时风信号可以认为是良态风信号,具有一定的线性平稳特征.

由图 5b 可以看出,前期飓风信号的  $E_{NTR} \geq 1.8$ , 前期到中期,飓风信号的信息熵减弱. 随着飓风的不断深入,飓风信号所包含的信息变得不再那么复杂,中期和后期  $E_{NTR} < 1.8$ ,信息维度降低.

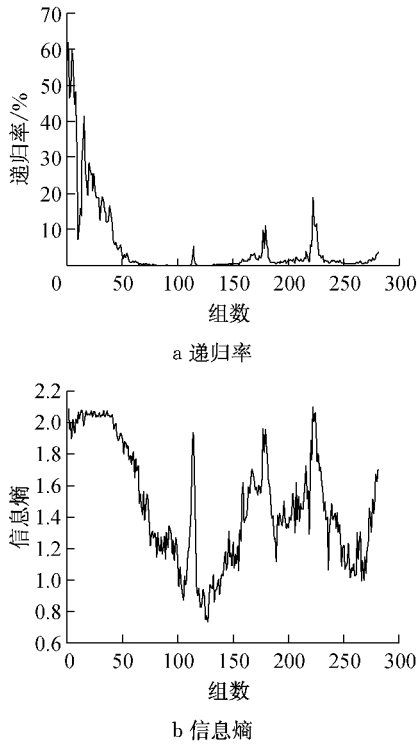


图 5 非线性指标变化

Fig.5 The change of non-linear indexes

### 3.3 信号的非平稳性指标

对比图 6a 和图 4a,层状度  $L_{AM}$  和确定性  $D_{ET}$  指标变化趋势相似,飓风过境前期  $L_{AM} \geq 95\%$ ;随着风速的不断增强而降低,可以得出中期飓风系统状态变化较快,飓风信号平稳性最差. 因此可以认为  $L_{AM} \geq 95\%$  时为平稳性较好的良态风,  $L_{AM} < 95\%$  时为飓风过境时期.

由图 6b 可以看出,捕获时间  $T_T$  不断降低,说明前期飓风风速停滞时间较长,前期风信号平稳性较好. 相反,中期、后期飓风风速停滞时间较短,非平稳性较强. 很明显,这与中期风速变化剧烈有直接关系,中期风速不断升高,再骤降和骤升,最后不断降

低,很少有大的风速停滞现象,且升高和降低渐变过程伴随着随机变化. 在此给出捕获时间  $T_T$  对于良态风和飓风的非平稳性判定分界线,即:  $T_T = 10$ .

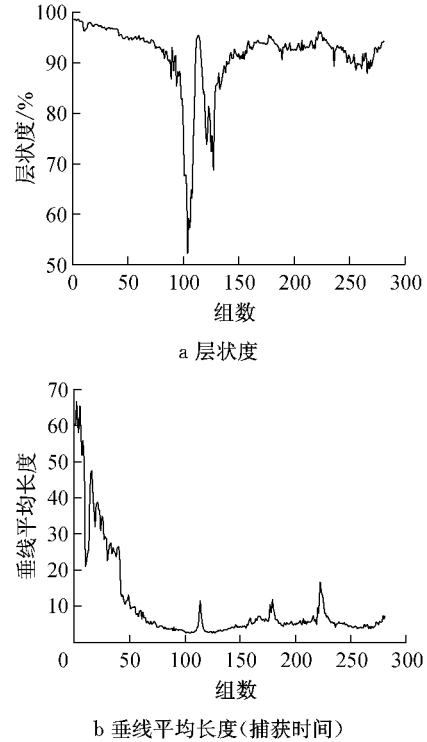


图 6 非平稳性指标变化

Fig.6 The change of non-stationary indexes

由以上三方面的分析,给出飓风信号和良态风信号 6 项 RQA 指标的参考取值范围,如表 2 所示.

表 2 飓风和良态风信号的 RQA 指标范围

Tab.2 RQA scopes for hurricane and normal wind

风	$R_R$	$D_{ET}$	$E_{NTR}$	$L$	$L_{AM}$	$T_T$
良态风	$\geq 15\%$	$\geq 90\%$	$\geq 1.8$	$\geq 10$	95%	$\geq 10$
飓风	$< 3\%$	$< 90\%$	$< 1.8$	$< 10$	$< 95\%$	$< 10$

## 4 递归定量分析指标合理性检验

为了验证以上 RQA 指标范围的准确性,选取台风梅花(1109)过境时的风速时程进行分析,其中西堍门大桥桥址处 10 min 风速时程图如图 7. 通过对台风梅花(1109)过境时风信号的递归定量分析,得出 RQA 指标值如表 3 所示.

通过与表 2 的 RQA 指标范围对照,台风梅花(1109)的 6 项指标值完全符合飓风信号特征指标,验证了本文划定的 RQA 指标范围的准确性.

从以上分析可以得出,6 项 RQA 指标能够很好反映飓风信号的非线性、非平稳性等动力学特征,并能用指标值来区分不同的信号种类和状态. 此研究结论与现有的其他研究方法结论相吻合,并表现出

理论简单、计算方便高效的优势,更可以实现对实时数据的及时处理和分析。

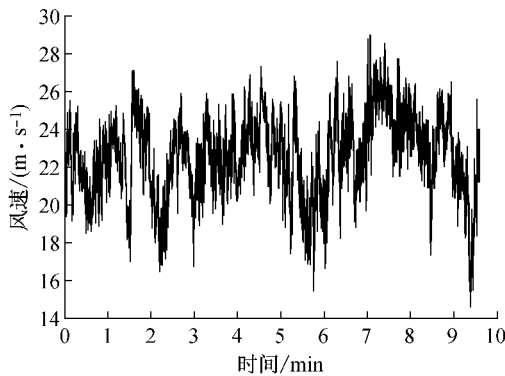


图 7 台风梅花(1109)风速时程

Fig.7 Wind speed time history of typhoon Muifa (1109)

表 3 台风梅花(1109)RQA 指标

Tab.3 RQA index of typhoon Muifa (1109)

$R_R$	$D_{ET}$	$E_{NTR}$	$L$	$L_{AM}$	$T_T$
0.72%	42.07%	0.55	2.57	61.77%	3.20

## 5 结论

通过引入相空间重构和递归定量分析的方法,对飓风 Gustavo (2008)和台风梅花(1109)实测风信号进行了分析,得出以下结论:

(1)RQA 方法实现了飓风信号的全过程特征分析,得出飓风过境前期信号具有一定的周期性和平稳性;中期信号的非线性、非平稳性尤为突出,随机性较强;后期受飓风影响,表现出前期和中期之间的信号特征。

(2)确定率  $D_{ET}$  和对角线平均长度  $L$  作为信号的周期性指标,给出了飓风信号和良态风信号的指标取值范围.对于飓风信号, $D_{ET} < 90\%$ ,  $L < 10$ ;对于良态风信号, $D_{ET} \geq 90\%$ ,  $L \geq 10$ .

(3)递归率  $R_R$  和信息熵  $E_{NTR}$  作为信号的非线性指标,给出了飓风信号和良态风信号的指标取值范围.对于飓风信号, $R_R < 3\%$ ,  $E_{NTR} < 1.8$ ;对于良态风信号, $R_R \geq 15\%$ ,  $E_{NTR} \geq 1.8$ .

(4)层状度  $L_{AM}$  和捕获时间  $T_T$  作为信号的非平稳性指标,给出了飓风和良态风 2 种信号的指标取值范围.对于飓风信号, $L_{AM} < 95\%$ ,  $T_T < 10$ ;对于良态风信号, $L_{AM} \geq 95\%$ ,  $T_T \geq 10$ .

(5)通过本文划定的飓风和良态风信号的 RQA 指标范围可以准确地识别风信号的类型. RQA 方法

作为处理信号系统动力学问题的一种新型研究方法,理论简单,计算方便高效,完全适用于风信号的研究,对航空航天和建筑结构防灾等具有参考价值。

## 参考文献:

- [1] Simiu Emil, Scanlan Robert H. Wind effects on structures fundamentals and applications to design [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [2] Eckmann J P, Kamphorst S O, Ruelle D. Recurrence plots of dynamical systems[J]. Europhysics Letters, 1987, 4(9):973.
- [3] Zbilut J P, Webber C L. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots[J]. Physics Letters A, 1992, 171(3/4):199.
- [4] Rolink J, Kutz M, Fonseca P, et al. Recurrence quantification analysis across sleep stages[J]. Biomedical Signal Processing & Control, 2015, 20:107.
- [5] Nguyen C D, Wilson S J, Crozier S. Automated quantification of the synchrogram by recurrence plot analysis [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2012, 59(4):946.
- [6] Terrill P I, Wilson S J, Suresh S, et al. Characterising non-linear dynamics in nocturnal breathing patterns of healthy infants using recurrence quantification analysis[J]. Computers in Biology & Medicine, 2013, 43(4):231.
- [7] Qian Y, Yan R, Hu S. Bearing degradation evaluation using recurrence quantification analysis and Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63(11):2599.
- [8] Soriano D C, Suyama R, Attux R. Blind extraction of chaotic sources from mixtures with stochastic signals based on recurrence quantification analysis [J]. Digital Signal Processing, 2011, 21(3):417.
- [9] Tahmasebpoor M, Zarghami R, Sotudeh-Gharebagh R, et al. Characterization of fluidized beds hydrodynamics by recurrence quantification analysis and wavelet transform[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 69:31.
- [10] Yang D, Ren W X, Hu Y D, et al. Selection of optimal threshold to construct recurrence plot for structural operational vibration measurements [J]. Journal of Sound & Vibration, 2015, 349:361.
- [11] Samborski S, Wieczorkiewicz J, Rusinek R. A numerical-experimental study on damaged beams dynamics [J]. Eksploatacja I Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2015, 17(4): 624.
- [12] Marwan N, Romano M C, Thiel M, et al. Recurrence plots for the analysis of complex systems [J]. Physics Reports, 2007, 438(5):237.
- [13] 邵亚会,葛耀君,柯世堂,等. 飓风古斯塔夫(2008)过境过程风特性研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(3):340. SHAO Yahui, GE Yaojun, KE Shitang, et al. Wind characteristics of hurricane Gustavo (2008) in the process of making landing[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(3): 340.