

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.03.003

香港港口 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的多重分形特征

谢焕丽, 何红弟

(上海海事大学物流科学与工程研究院, 上海 201306)

摘 要: 颗粒物是港口地区的主要污染物之一, 利用多重分形理论分析港口地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的多重分形特征。首先, 运用多重分形消除趋势波动分析方法 (Multifractal detrended fluctuation analysis, MF-DFA) 分析 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 自身的多重分形特征, 结果显示 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的演化过程表现出非线性、复杂性的多重分形特征, 且 PM₁₀ 浓度的多重分形特征较 PM_{2.5} 强。其次, 利用多重分形消除趋势交叉波动分析方法 (Multifractal detrended cross-correlation analysis, MF-DCCA) 研究港口地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的交叉相关性, 结果表明两者之间不仅存在具有长期记忆性的多重分形特征, 而且其互相关性多重分形特征具有明显的季节变化特征。港口地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的多重分形特征在春季最强, 夏季次之, 秋季最弱。这些结论对港口地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的联合控制具有一定的参考价值。

关键词: 多重分形特征; 多重分形理论; 颗粒物; 季节变化; 香港港口

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6141(2019)03-0179-012

Multifractal Property Between PM_{2.5} and PM₁₀ in Hongkong Port

XIE Huanli, HE Hongdi

(Logistics Science and Engineering Research Institute, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Particulate matter is one of the major pollutants in the port area. The multifractal theory was used to analyze the multifractal characteristics of the concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ in the port area. Firstly, the multifractal characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ were analyzed by Multifractal detrended fluctuation analysis(MF-DFA). The results showed that the evolution of PM_{2.5} and PM₁₀ shows nonlinear and complex multifractal characteristics, and the multifractal characteristics of PM₁₀ is more than that of PM_{2.5}. Second, Multifractal detrended cross-correlation analysis(MF-DCCA) was used to study the cross-correlation of PM_{2.5} and PM₁₀ in the port area. The results showed that there existed not only multifractal characteristics with long-term memory between them, but also obvious seasonal variation for its cross-correlation multifractal features. The multifractal characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in the port area are the strongest in spring, the second strongest in summer, and the weakest in autumn. These conclusions provide some reference value for the joint control of port area PM_{2.5} and PM₁₀.

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 11672176), Shanghai Science and Technology Committee (上海市科委资助项目, 17DZ2280200)

作者简介: 谢焕丽 (1990 -), 女, 安徽宿州人, 研究生, 主要从事绿色物流与绿色港口方面的研究。 **E-mail:** 593778358@qq.com

导师简介: 何红弟 (1980 -), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 副教授, 主要从事低碳物流、绿色交通方面的研究。 **E-mail:** 4003963@qq.com

收稿日期: 2017-12-24; **修改日期:** 2018-03-06

Key words: multifractal characteristics; multifractal theory; particulate matter; seasonal variation; Hongkong port

1 引言

随着港口贸易日趋繁盛, 港口地区的大气污染也日益严重。统计显示, 港口地区船舶、集卡、大型机械等产生的废气排放量比其他非港口地区平均多 25%。香港作为我国典型的港口城市, 港口污染近年来日趋严重。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 是港口典型的污染物之一, 其浓度变化呈现出复杂的长期持续性、非线性混沌特征^[1-3]。在以往的研究中, 很多学者通过数理统计方法研究 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的化学源解析^[4]、质量浓度、主要化学组分的时空分布^[5-6], 以及相关影响因子^[7-9]等方面。但传统的数理统计方法无法消除非平稳时间序列内在的自相关性, 也不能识别外在趋势所导致的伪相关现象。因此基于复杂性科学的非线性方法, 从宏观、整体上认识复杂系统动态演化的过程, 已成为大气环境基础研究的一个热点^[10-14]。多重分形理论是一种非线性方法, 是由多个标度指数的奇异测度所组成的集合, 与原有时间序列研究的线性模式不同, 它以全新的视角探索非线性问题, 更为细致、准确、全面地描述 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 时间序列的波动特征, 对时间序列演化过程的长期记忆性或长程相关性进行定量描述, 在表征 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 内在的动力机制方面卓有成效^[15-19]。黄毅等^[20]运用 MF-DCCA 研究成都市灰霾消散前后 PM₁₀ 浓度的多重分形特征, 发现重度灰霾期间, PM₁₀ 演化过程中存在长期记忆性; 史凯等^[21]通过对上海市污染特征及其变化趋势进行多重分形分析, 发现 SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 在整个时间尺度上具有多重分形特征; 徐岩等^[22]运用多重分形方法对连云港不同功能区 SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 时间演变特征进行研究, 结果表明三种大气污染物在不同功能区均表现出多重分形特征, 其中 SO₂ 的多重分形特征最强; 张琛等^[23]通过基于小波包变换模极大值 (Wavelet Packet Transform Modulus Maxima, WPTMM) 的联合多重分形方法进行研究, 结果表明不同气象要素、不同季节显著影响 PM_{2.5} 浓度。Pablo 等^[24]利用 MF-DFA 方法研究了不同季节、不同地区 (城市、郊区、农村) 的臭氧波动特征, 发现不同季节、地区的臭氧具有多重分形特征; Francisco 等^[25]运用 MF-DCCA 方法对 NO_x 和 O₃ 不同季节下的相关性进行研究, 结果表明不同季节 NO_x 和 O₃ 均具有多重分形特征与长期记忆性。

本文收集 2012~2015 年的港口与非港口地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的数据, 利用 MF-DFA 和 MF-DCCA 方法探讨港口地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的分形特征, 试图从分形角度分析港口 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 之间复杂的时空演化规律, 及其演化动力特征。同时为了对比, 对非港口地区的交叉相关性特性进行了研究, 试图揭示用多重分形参数来表征大气污染物时空演化规律的可能性, 以期加深人们对港口地区分形特征知识的理解, 为港口城市大气污染的控制提供新途径, 同时为港口环境保护决策提供科学依据。

2 研究方法

首先检验 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 之间是否具有交叉相关关系, 再运用 MF-DFA 以及 MF-DCCA 方法研究两种污染物之间的交叉相关性及分形特征, 分析港口 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的互相关性及分形特征差异。

2.1 交叉相关性检验函数

对于两组相互独立的时间序列 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, $\{y_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 交叉相关函数为

$$C_i = \frac{\sum_{k=i+1}^N x_k y_{k-1}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N x_k^2 \sum_{k=1}^N y_k^2}}, \quad (1)$$

交叉相关统计量为

$$Q_{cc}(m) = N^2 \sum_{i=1}^m \frac{C_i^2}{N-i}, \quad (2)$$

式中 m 为自由度。交叉相关统计量 $Q_{cc}(m)$ 接近于自由度为 m 的卡方分布 $\chi^2(m)$ 。当 $Q_{cc}(m)$ 大于对应的 $\chi^2(m)$ 临界值, 说明该组数列之间存在交叉相关关系。

2.2 MF-DFA 方法

根据 Kantelhardt 等^[26]的研究, MF-DFA 方法能够验证非线性时间序列的长程相关性和多重分形特性。因此, 对于一个时间序列 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 计算过程如下:

1) 构造新的序列

$$X_i = \sum_{k=1}^i (x_k - \bar{X}), i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

式中 \bar{X} 为 x_i 的均值。

2) 把 X_i 进行等距分割, 每个区间互不相交, 长度为 s , 个数为 N_s [其中, $N_s = \text{int}(N/s)$]。由于长度 N 并不总是被 s 整除, 因此, 从序列尾部开始重复相同的分割过程, 得到 $2N_s$ 个区间。

3) 每个区间 λ 的 m 阶多项式趋势函数值由最小二乘法拟合得到。针对 $2N_s$ 个消除子区间局部趋势序列, 计算其平方均值。

$$F^2(s, \lambda) = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \{X_{(\lambda-1)s+j}(j) - \tilde{X}_\lambda(j)\}^2, \lambda = 1, 2, \dots, N_s, \quad (4)$$

$$F^2(s, \lambda) = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \{X_{N-(\lambda-N_s)s+j}(j) - \tilde{X}_\lambda(j)\}^2, \lambda = N_s + 1, N_s + 2, \dots, 2N_s. \quad (5)$$

4) 计算序列的 q 阶波动函数

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{\lambda=1}^{2N_s} [F^2(s, \lambda)^{q/2}] \right\}^{1/q}, q \neq 0 \quad (6)$$

$$F_q(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{p=1}^{2N_s} \ln [F^2(p, s)] \right\}, q = 0 \quad (7)$$

5) 利用确定的 q 值确定波动函数的标度指数

$$F_q(s) \propto S^{h(q)}. \quad (8)$$

由波动函数 $F_q(s)$ 和时间标度 s 的双对数曲线得到广义的 Hurst 指数 $h(q)$, 根据 $h(q)$ 和 q 的关系, 判断时间序列是否具有多重分形特征: $h(q)$ 与 q 无关时, 序列为单分形; $h(q)$ 随 q 变化时, 序列为多重分形; 当 $h(q) > 0.5$ 时, 该时间序列具有长程相关性, 即过去发生的事件会对现在和未来产生影响。

6) 多重分形标度指数 $\tau(q)$ 和 $h(q)$ 满足

$$\tau(q) = qh(q) - 1. \quad (9)$$

(7) 由 $\alpha = \partial\tau(q)/\partial(q)$ 得到

$$\alpha = h(q) + qh'(q), \quad (10)$$

$$f(\alpha) = \alpha q - \tau(q). \quad (11)$$

式中 α 为用来描述时间序列的奇异程度的奇异性指数。广义多重分形模型中的 $\Delta\alpha$ ($\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$) 为分形谱的宽度, 表示多重分形特征的强度, 即 $\Delta\alpha$ 越大, 多重分形特征越强。 $f(\alpha)$ 为多重分形谱, 其值反映了具有奇异指数 α 的分形维度。 $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$, 主要表示浓度落在波峰和波谷的概率大小的差异: $\Delta f > 0$, 曲线形状左倾, 表明 PM2.5 和 PM10 浓度处于高浓度的几率较大; 反之亦然。

2.3 MF-DCCA 方法

MF-DCCA 方法是多重分形中重要的分析方法, 是 Zhou^[27] 在 DCCA 法、MF-DFA 法的基础上的延伸。主要用来分析两种颗粒物 PM2.5 和 PM10 的交叉相关性的多重分形特征。MF-DCCA 分析方法具体如下:

1) 已知两组时间序列 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, $\{y_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 。其中 \bar{X} , \bar{Y} 分别为 $\{x_i\}$, $\{y_i\}$ 的样本均值。

$$X_i = \sum_{k=1}^i (x_k - \bar{X}) \quad Y_i = \sum_{k=1}^i (y_k - \bar{Y}) . \quad (12)$$

其中 X_i, Y_i 为新生成的两组时间序列。

2) 将两组新时间序列 X_i, Y_i 分别按照 MF-DFA 方法的步骤 2) 处理。

3) 类似于 MF-DFA 方法, 通过最小二乘法进行多项式函数拟合, 得 $\{\overline{X_p}(t)\}$, $\{\overline{Y_p}(t)\}$ 以及相关系数 $F_q(m)$ 。

$$F_q(s) = \frac{1}{s} \sum_{t=1}^s |X_p(t) - \overline{X_p}(t)| |Y_p(t) - \overline{Y_p}(t)| . \quad (13)$$

4) 计算两个序列的 q 阶相关系数

$$F_{XY}(s) = \begin{cases} \left\{ \frac{1}{2m} \sum_{p=1}^{2m} [F_q(s)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}, & q \neq 0 \\ \exp \left\{ \frac{1}{4m} \sum_{p=1}^{2m} \ln [F_q(s)] \right\}, & q = 0 \end{cases} . \quad (14)$$

5) 若两序列之间的交叉幂律相关性存在, 则标度关系满足

$$F_{XY}(s) \propto S^{h(q)} . \quad (15)$$

式中 $h(q)$ 为广义 Hurst 指数, 表示两个时间序列之间的幂律相关性, $F_q(s)$ 随时间序列呈现幂律性质。赫斯特在 1951 年提出, 当 $q = 2$ 时, 广义 Hurst 指数可用于分析时间序列中存在长期记忆过程。即: 当 $h(2) > 0.5$ 时, 表明两个序列的相关性存在长期记忆特征, 即两组序列存在正相关并且在一定时间尺度上长期存在, 也就是说, 在某个时间序列中, PM2.5 浓度的变动会对未来 PM10 浓度产生影响。广义赫斯特指数与多重分形标度质数 $\tau(q)$ 的关系同 MF-DFA 方法中的式 (9)~(11)。

3 数据分析

3.1 描述性分析

选取香港地区环境保护署公布的葵涌 (港口地区) 和沙田 (非港口地区) 两个监测站实时监测数据 (<http://epic.epd.gov.hk/EPICDI/air/station/>)。收集这两个监测站 2012 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日 PM2.5 和 PM10 浓度的日均值进行研究, 结果如图 1 所示。从图 1 中可见, 颗粒物浓度时间序列具有明显

的非线性、非平稳性特征, 颗粒物日平均浓度随时间上下波动, 其中 PM2.5 和 PM10 日均值变化具有峰形结构。随着时间的推移, 港口的日常活动与气象因素的变化影响着颗粒物浓度, 非港口地区亦然。

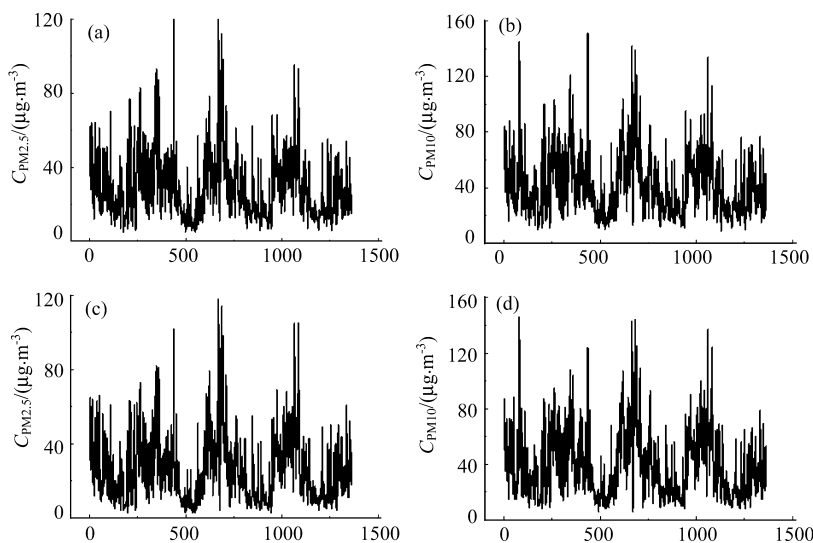


图1 2012年1月~2015年12月港口与非港口 PM2.5 和 PM10 日平均浓度。
(a) 港口 PM2.5; (b) 港口 PM10; (c) 非港口 PM2.5; (d) 非港口 PM10

Fig.1 Series of PM2.5 and PM10 daily average concentrations in port and non-ports. (a) PM2.5 in port; (b) PM10 in port; (c) PM2.5 in non-ports; (d) PM10 in non-ports

由图 2 可见, 港口地区 PM2.5 和 PM10 浓度四季均大于非港口地区。从春季到夏季, 港口与非港口颗粒物浓度都呈下降趋势, 港口 PM2.5 浓度由 $25.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至夏季的 $18.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10 浓度由 $34.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $22.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 而非港口 PM2.5 浓度由 $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $13.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 同时 PM10 浓度由 $38.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $27.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而夏季到冬季, PM2.5 和 PM10 浓度有上升趋势。其中港口 PM2.5 和 PM10 浓度升至 $39.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $54.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 与此同时非港口这两类颗粒物的浓度分别升至 $38.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $53.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 与港口地区均达到最高值。

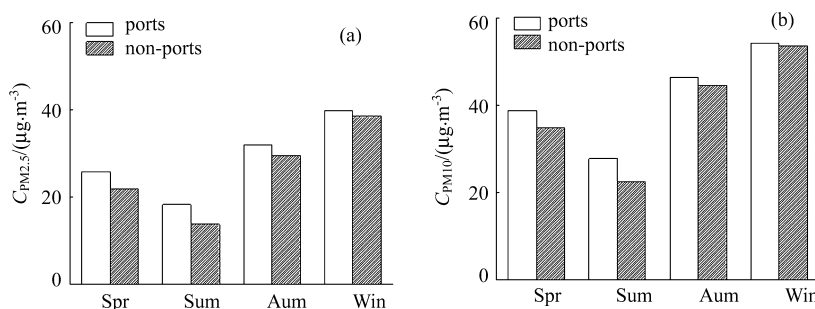


图2 港口与非港口 PM2.5 和 PM10 浓度的季节特征。(a) PM2.5; (b) PM10

Fig.2 Seasonal characteristics of PM2.5 and PM10 concentrations in ports and non-ports. (a) PM2.5; (b) PM10

3.2 基本统计量分析

港口与非港口地区 PM2.5 和 PM10 的基本计量分析, 可以看出两地区 PM2.5 的变动系数 (Coefficient of variance, CV) 大于 PM10, 说明整个时间尺度上, 两地区 PM2.5 离散程度较大, 分布不稳定; 同时港口地区颗粒物变异系数小于非港口地区, 表明非港口地区颗粒物浓度变化剧烈, 情况相对复杂。港口与非港

口地区颗粒物偏度 (S) 均大于 0, 为右偏分布, 同时峰度 (BK) > 3, 说明颗粒物呈现“尖峰厚尾”分布。四组时间序列的 Jarque-Bera 检验中 J 值均等于 1, 而 P 值为 0, 说明颗粒物浓度不符合正态分布。

表 1 港口与非港口地区 PM2.5 与 PM10 的基本统计量

Table 1 Basic statistics of PM2.5 and PM10 in port and non-port areas

Areas	Particulates	Max	Min	Mean	SD	CV	S	BK	J	P
Ports	PM2.5	127.67	5.75	28.75	17.43	0.61	1.55	6.45	1.00	0.00
	PM10	151.26	9.39	41.69	22.40	0.54	1.29	5.13	1.00	0.00
Non-ports	PM2.5	118.93	3.47	25.72	17.95	0.70	1.41	5.68	1.00	0.00
	PM10	146.82	6.59	38.69	23.61	0.61	1.16	4.49	1.00	0.00

单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

4 结果与讨论

4.1 交叉相关性检验结果分析

首先进行港口、非港口地区 PM2.5 和 PM10 之间互相关关系的检验。自由度 m 的取值范围为 1~1000, 选取式 (1)(2) 计算不同自由度 m 、相对应的相关统计量 $Q_{cc}(m)$ 与卡方分布 $\chi^2(m)$ 的临界值。图 3 给出 PM2.5 和 PM10 互相关检验的 $Q_{cc}(m)$, 图中方形线表示自由度为 m 、显著性水平为 5% 时卡方分布 $\chi^2(m)$ 的临界值, 方形线上方两条线分别表示港口与非港口地区的相关统计量 $Q_{cc}(m)$ 。从图 3 中可以看出在自由度 1~1000 范围内, 相关统计量 $Q_{cc}(m)$ 均大于卡方分布 $\chi^2(m)$ 的临界值, 这表明港口与非港口两个地区的 PM2.5 和 PM10 之间均存在显著的交叉相关性。

4.2 MF-DFA 分析结果

首先运用 MF-DFA 分别对港口地区 PM2.5 和 PM10 进行多重分形分析。图 4(a)、(b) 为式 (8) $h(q)$ 定义得出的港口地区 PM2.5 和 PM10 两种颗粒物的 q 阶 Hurst 指数图与多重分形谱曲线。由图 4(a) 可知, q 值不同, Hurst 指数不同。当 q 从 -5 变化到 5 时, 对于港口 PM2.5 来说, $h(q)$ 由 1.54 递减到 0.72, 对于 PM10, $h(q)$ 从 1.42 递减到 0.74。均显著的不为常数, 表明港口地区 PM2.5 和 PM10 时间序列具有多重分形特征。根据式 (8) 以及 Hurst 指数与广义 Hurst 指数的关系可知, 图 4(a) 中所有的 $h(q)$ 均大于 0.5, 表明港口地区 PM2.5 和 PM10 浓度时间序列具有长程相关性, 即港口地区某一段时间颗粒物 PM2.5 和 PM10 浓度的变动也会伴随下一段浓度的下降。

从图 4(b) 可以看出, 在港口地区 PM2.5 和 PM10 的多重分形谱近似接近抛物线形状, 并且根据分形谱参数计算结果, 港口地区 PM2.5 的 $\Delta\alpha = 1.10$, PM10 的 $\Delta\alpha = 1.37$ 。可以看出港口地区 PM2.5 的 $\Delta\alpha$ 值较小, 表明港口地区 PM2.5 浓度波动变化的剧烈程度较 PM10 小, 且其多重分形特征相对较弱。这可能是由于港口 PM10 粒径较大, 气象因素等对其浓度影响明显, 浓度大幅度变动概率较大。此外 PM2.5 和 PM10 的多重分形谱谱端高度差 $\Delta f(\alpha)$ 为正值, 表明在港口地区 PM2.5 和 PM10 浓度处于高浓度的几率

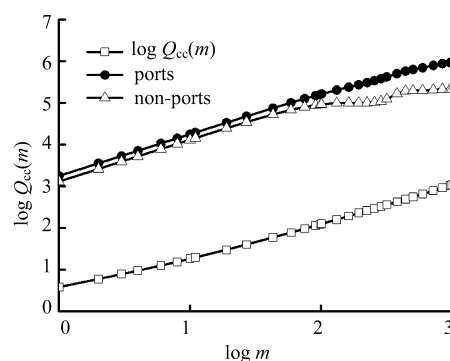


图 3 交叉相关性检验 $Q_{cc}(m)$

Fig.3 Cross-correlation test $Q_{cc}(m)$

要大于处于低浓度的几率, 且有上升的趋势。且 PM10 分形谱形状呈现左倾, 表明港口地区 PM10 波动变化奇异性较低。

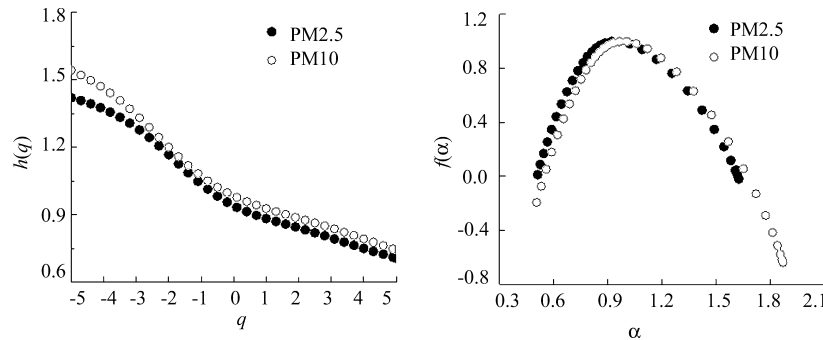


图 4 港口地区 PM2.5 和 PM10 浓度 MF-DFA 分析的 Hurst 指数与多重分形谱

Fig.4 Hurst index and multifractal spectrum of MF-DFA analysis of PM2.5 and PM10 concentration in port area

4.3 MF-DCCA 分析结果

由图 4 可知港口 PM2.5 和 PM10 浓度呈现出非稳定性、非线性变化的多重分形特征, PM2.5 属于 PM10 的较小粒径, 粒径分子之间会产生复杂的交叉相互作用。接下来运用 MF-DCCA 方法进一步研究不同时间尺度下港口地区 PM2.5 和 PM10 相关性的多重分形特征。

首先给出了两个地区 PM2.5 和 PM10 整体数据互相关性的多重分形分析图, 如图 5 所示。其中图 5(a) 是 Hurst 指数图, 可以看出港口与非港口地区 Hurst 指数走势相近, 表现为随 q 值的增大两个地区的 $h(q)$ 逐渐减小, 说明在一定时间尺度上两个地区 PM2.5 和 PM10 之间的互相关性并不遵循经典的马尔科夫过程, 而是以幂律形式随时间衰减, 表明两地区 PM2.5 和 PM10 交叉相关性具有多重分形特征。港口地区, 当 q 从 -5 增加到 5 时, $h(q)$ 从 1.18 递减至 0.84 , 同时非港口 PM2.5 和 PM10 的相关递减跨度为 0.39 , $h(q)$ 值均大于 0.5 , 表明两地区 PM2.5 和 PM10 之间存在长期记忆性, 意味着某一时间尺度内 PM2.5 浓度增加会导致未来某一时间 PM10 浓度的增加, 即过去时刻 PM2.5 的浓度会持续影响未来一定时间尺度内 PM10 的变化趋势。从复杂性理论来讲, PM10 未来的变化趋势对 PM2.5 浓度具有敏感依赖性。

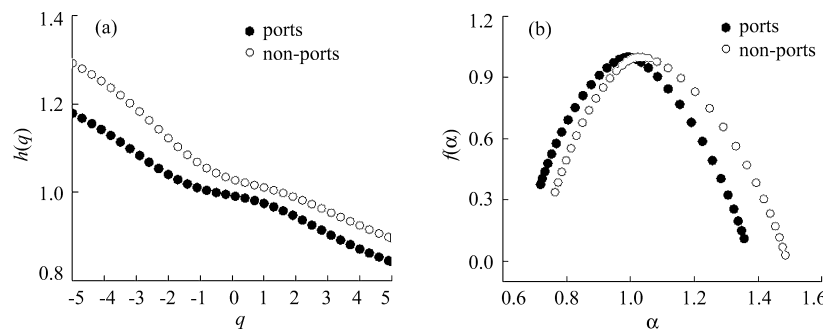


图 5 港口与非港口地区 PM2.5 和 PM10 浓度时间序列整体的多重分形特征

Fig.5 Multifractal characteristics of the overall PM2.5 and PM10 concentration time series in port and non-port areas

图 5(b) 中港口与非港口地区 PM2.5 和 PM10 时间序列的多重分形谱 $f(\alpha) - \alpha$ 关系图由式 (12) 得到。多重分形谱曲线呈抛物线形状, 表示 PM2.5 和 PM10 的时间序列表现为多重分形行为。由分形参数计算得: 港口 $\Delta\alpha = 0.64$, 小于非港口 $\Delta\alpha = 0.72$, 说明非港口地区 PM2.5 和 PM10 之间相互作用更为剧烈, 其分形强度更强。多重分形谱曲线均是开口宽大、曲线分布范围大, 表明 PM2.5 和 PM10 浓度波动幅度较大

且分布不均匀。还可以看出港口多重分形谱呈左钩形状, 即 $\Delta f(\alpha) > 0$, 多重分形谱右侧的取值范围大于左侧, 说明港口 PM2.5 和 PM10 监测数据点更多处于波峰。

其次, 季节更替影响颗粒物浓度的变化。将数据按照四季进行划分, 研究其随季节变化的多重分形特征。季节划分的时间段如下: 每年的 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 12 月~来年 2 月为冬季。图 6 是 Hurst 指数图, 可以看出所有的 $h(q)$ 均随 q 值的增大而减小, 且不为固定常数, 这说明各个季节港口、非港口的 PM2.5 和 PM10 的交叉相关性均存在明显的多重分形特征; 当 $q = 2$ 时, 所有的值 $h(q)$ 均显著大于 0.5, 表明港口四季 PM2.5 和 PM10 的相关性均具有长期记忆性, 具体表现为在一定的尺度上 PM2.5 和 PM10 浓度的相关性随时间的变化并不遵循经典的马尔可夫过程, 即在过去的某一时间内港口地区排放 PM2.5 浓度的增大会导致未来一定时间内 PM10 浓度的增加。春季, 港口的 $h(q)$ 跨度为 0.84, 非港口为 0.74, 夏季, 港口 $h(q)$ 跨度为 0.85, 非港口为 0.72。秋季, 港口 $h(q)$ 跨度为 0.16, 非港口为 0.12。冬季, 港口 $h(q)$ 跨度为 0.44, 非港口为 0.45。可以看出, 港口地区春、夏、秋季港口 PM2.5 和 PM10 的多重分形特征均强于非港口, 不同于整体数据, 冬季则是港口要弱于非港口。

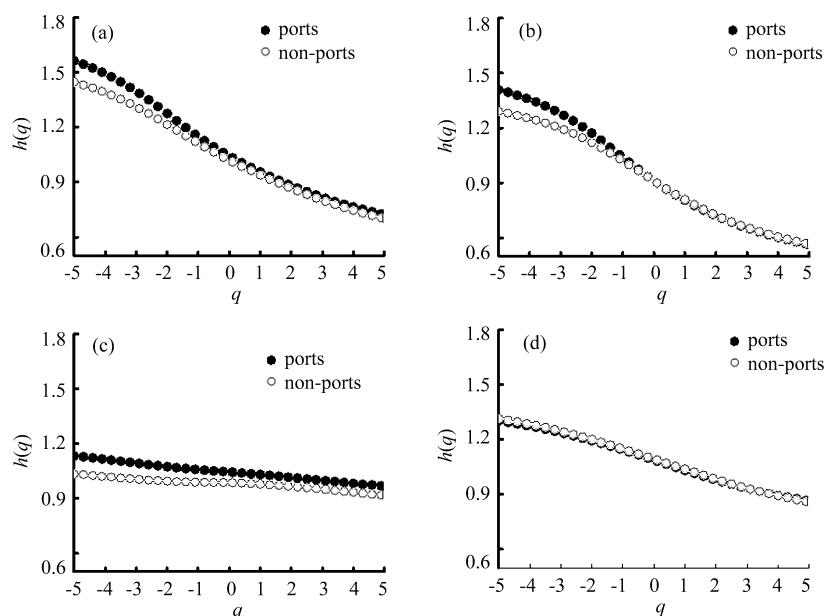


图 6 港口与非港口地区 PM2.5 和 PM10 季节变化的 MF-DCCA 分析的 Hurst 指数。

(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig.6 Hurst index of MF-DCCA analysis of seasonal changes in PM2.5 and PM10 in port and non-port areas.

(a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

图 7 为港口四季 PM2.5 和 PM10 相互关系的多重分形谱图, 可见春季与夏季港口与非港口地区的多重分形谱曲线较相似, 均呈顶端相对平滑的钟形, 且 $\Delta f(\alpha) > 0$, 表明 PM2.5 和 PM10 浓度处于高浓度的几率要大于低浓度的几率, 且浓度有上扬趋势; 秋季港口地区 $\Delta f(\alpha) > 0$, 说明港口地区 PM2.5 和 PM10 多重分形谱曲线呈左钩形状, PM2.5 和 PM10 的观测值更多地处于波峰, 非港口地区相反; 冬季两地区均符合 $\Delta f(\alpha) < 0$, 说明冬季两地区 PM2.5 和 PM10 浓度落在低值的几率大, 且有下降趋势。对于港口与非港口地区 PM2.5 和 PM10 而言, $\Delta\alpha$ 均为春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季, 表明两地区 PM2.5 和 PM10 春季的多重分形特征最强, 夏季次之, 秋季最弱。造成这种差异的原因可能是春季温度升高, 颗粒物运动加剧, 分子扩散速度加快, 秋季则相反; 而冬季时港口地区受北风或东北风影响, 减少了港口与非港口颗粒

物浓度相关性的差异强度, 从而表现出与其他三季不同的多重分形谱。

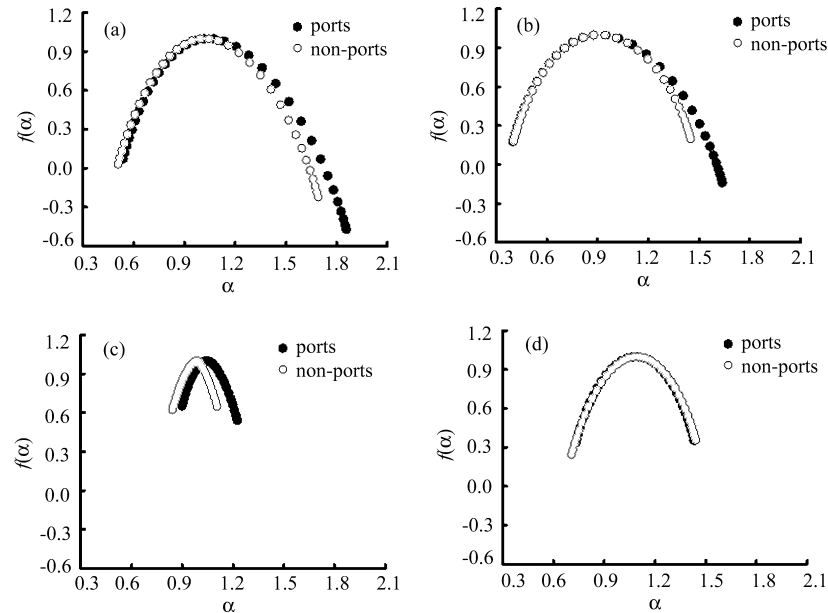


图 7 港口与非港口地区 PM2.5 和 PM10 季节变化的 DF-DCCA 分析的多重分形谱。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig.7 Multifractal spectrum of MF-DCCA analysis of seasonal changes in PM2.5 and PM10 in port and non-port areas. (a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

综合上述 MF-DFA 与 MF-DCCA 两种方法的分析结果可知, 港口地区船舶、机械作业等排放源都会增加 PM2.5 和 PM10 的浓度, 且港口地区颗粒物浓度受港口运作排放影响程度较大, 受其他相关因素 (例如, 气象因素、内陆污染物的外部输送等) 影响较小, 所以港口地区的 PM2.5 和 PM10 浓度高于非港口地区, 波动范围较大并可能持续增大。而非港口地区无固定排放源, 受港口排放影响较小, 所以 PM2.5 和 PM10 浓度波动变化较小且浓度值较低。不同时间尺度、不同季节, 港口地区与非港口地区 PM2.5 和 PM10 互相关性和浓度变化均不同, 据此可知, 在建立港口地区 PM2.5 和 PM10 浓度预测模型时, 需要考虑不同时间刻度、不同季节条件下多重分形的差异性。

5 结 论

通过多重分形 MF-DFA 和 MF-DCCA 方法对港口地区颗粒物 PM2.5 和 PM10 浓度的时间序列进行研究, 结论如下:

1) 从交叉相关性检验结果分析, 港口与非港口两地区 PM2.5 和 PM10 的 $Q_{cc}(m)$ 检验值均大于 $\chi^2(m)$ 的临界值, 表明两地区 PM2.5 和 PM10 之间存在着显著交叉相关性。

2) 通过 MF-DFA 分析, 结果显示港口地区的 PM2.5 和 PM10 浓度表现出长程相关性的多重分形特征, 并且港口地区 PM10 的多重分形特征强于 PM2.5。

3) 根据 MF-DCCA 分析结果, 在 2012~2015 大时间尺度上, 港口 PM2.5 和 PM10 的 $h(q)$ 从 1.18 降至 0.84, 非港口 $h(q)$ 从 1.29 降至 0.90, Hurst 指数均为变量, 且当 $q=2$ 时, 港口与非港口 PM2.5 和 PM10 相互作用的 Hurst 指数均大于 0.5。这说明在大时间尺度上港口与非港口地区 PM2.5 和 PM10 的相关性随时间的变化不遵循马尔科夫过程。

4) 对比不同季节港口与非港口 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 相互关系的多重分形特征, 结果发现 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 互相关性多重分形特征具有明显的季节变化。港口地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的 $\Delta\alpha$ 表现为春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季, 由此可知港口地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 春季的多重分形特征最强, 夏季次之, 秋季最弱。因此在制定港口地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的控制策略时, 需要考虑不同季节两者互相关特征的差异性。

参考文献:

- [1] Yu Qingxi, Wang Zhiyong, Zhang Yuqiang, *et al.* PM_{2.5} mass concentration and its relationship with sea-surface wind and visibility in coastal area of Qingdao [J]. *Ocean Development and Management*, 2018, **35**(6): 39-42(in Chinese).
于清溪, 王志勇, 张玉强, 等. 青岛市近海海域 PM_{2.5} 浓度及其与海面风和能见度的关系 [J]. 海洋开发与管理, 2018, **35**(6): 39-42.
- [2] Qiu H, Yu I T, Tian L, *et al.* Effects of coarse particulate matter on emergency hospital admissions for respiratory diseases: a time-series analysis in Hong Kong [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, **120**(4): 572-576.
- [3] Wu Shenghu, Shi Kai, Liu Chunqiong, *et al.* Long-term persistence characteristics of PM_{2.5} evolution during a typical haze episode in Chengdu [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, **37**(10): 9-14, 20(in Chinese).
吴生虎, 史 凯, 刘春琼, 等. 成都市典型灰霾消散前后 PM_{2.5} 演化的长期持续性特征 [J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(10): 9-14, 20.
- [4] Xiao Zhenghui, Shao Longyi, Zhang Ning. Chemical composition and source analysis of PM₁₀ in winter and spring in Chengguan district of Lanzhou [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **34**(12): 164-168, 17(in Chinese).
肖正辉, 邵龙义, 张 宁. 兰州城关区冬春季 PM₁₀ 的化学组分和来源分析 [J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(12): 164-168, 17.
- [5] Li Yang. Characteristics of spatio-temporal variations of PM₁₀ in key cities of China from 2000 to 2007 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, **23**(9): 51-54(in Chinese).
李 杨. 2000~2007 年中国重点城市 PM₁₀ 的时空变化特征 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(9): 51-54.
- [6] Li Juan, Zhang Guangxing, Li Xia, *et al.* Analysis of Seasonal variation of PM₁₀ concentration and morphology-Taking Tianshan District, Urumqi in 2004 as example [J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2005, **18**(6): 16-18(in Chinese).
李 娟, 张广兴, 李 霞, 等. PM₁₀ 浓度及微观特征季节分布分析 - 以乌鲁木齐天山区 2004 年为例 [J]. 城市环境与城市生态, 2005, **18**(6): 16-18.
- [7] Li Fei, Wu Dui, Tan Haobo, *et al.* The Characteristics and causes analysis of a Typical Haze Process during the dry season over Guangzhou area: A case study [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, **28**(1): 113-122.
李 菲, 吴 兑, 谭浩波, 等. 广州地区旱季一次典型灰霾过程的特征及成因分析 [J]. 热带气象学报, 2012, **28**(1): 113-122.
- [8] Yu Ye, Xia Dunsheng, Chen Leihua, *et al.* Analysis of particulate pollution characteristics and its causes in Lanzhou, Northwest China [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 22-28(in Chinese).
余 晔, 夏敦胜, 陈雷华, 等. 兰州市 PM₁₀ 污染变化特征及其成因分析 [J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 22-28.

- [9] Zhao Chenxi, Wang Yunqi, WangYujie, et al. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 418-427(in Chinese).
赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 418-427.
- [10] Shi K, Liu C Q, Ai N S, et al. Using three methods to investigate time-scaling properties in air pollution indexes time series [J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2008, **9**(2): 693-707.
- [11] Schlink U, Dorling S, Pelikan E, et al. A rigorous inter-comparison of ground-level ozone predictions [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(23): 3237-3253.
- [12] Cobourn W G. An enhanced PM_{2.5} air quality forecast model based on nonlinear regression and back-trajectory concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(25): 3015-3023.
- [13] Chelani A B. Nonlinear dynamical analysis of ground level ozone concentrations at different temporal scales [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(34): 4318-4324.
- [14] Qiao J W, Wang Z. Self-organized criticality behavior in bulk metallic glasses [J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2016, **23**(1): 7-13.
- [15] Zhuang X, Wei Y, Ma F. Multifractality, efficiency analysis of Chinese stock market and its cross-correlation with WTI crude oil price [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, **430**: 101-113.
- [16] Jiménez-Hornero F J, Gutiérrez D R E, Ariza-Villarverde A B, et al. Description of the seasonal pattern in ozone concentration time series by using the strange attractor multifractal formalism [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **160**(1-4): 229-236.
- [17] Burgueño A, Lana X, Serra C, et al. Daily extreme temperature multifractals in Catalonia (NE Spain) [J]. *Physics Letters A*, 2014, **378**(11-12): 874-885.
- [18] Yuan Ying, Zhuang Xintian. Application research of multifractal theory in sharp fluctuations of stock market [J]. *Journal of Systems and Management*, 2008, **17**(3): 278-282(in Chinese).
苑莹, 庄新田. 多重分形理论在股市大幅波动中的应用 [J]. *系统管理学报*, 2008, **17**(3): 278-282.
- [19] Li Wenyong, Shi Kai, Deng Guiping. Multifractal structure of tourism population fluctuations after the earthquake: A case study of Jiuzhaigou scenic area [J]. *Tourism Tribune*, 2013, **28**(3): 21-28(in Chinese).
李文勇, 史凯, 邓贵平. 震后景区旅游人数波动的多重分形结构研究 - 以九寨沟风景名胜区为例 [J]. *旅游学刊*, 2013, **28**(3): 21-28.
- [20] Huang Yi, Liu Chunqiong, Shi Kai, et al. Multifractal characterization of sharp fluctuations about PM₁₀ before and after the haze [J]. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, **39**(1): 140-146(in Chinese).
黄毅, 刘春琼, 史凯, 等. 灰霾消散前后 PM₁₀ 浓度大幅波动的多重分形分析 [J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(1): 140-146.
- [21] Shi Kai, Liu Chunqiong, Ai Nanshan. Air quality analysis for Shanghai using multi-fractal approach [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2008, **30**(9): 60-64, 69(in Chinese).
史凯, 刘春琼, 艾南山. 上海市空气质量变化的多重分形分析 [J]. *环境污染与防治*, 2008, **30**(9): 60-64, 69.
- [22] Xu Yan, Liu Fucheng, Zhu Jiamei. Multifractal analysis of air pollutant concentration time series data in Lianyungang City [J]. *Journal of Huaihai Institute of Technology: Natural Science Edition*, 2011, **20**(1): 41-45(in Chinese).

- 徐 岩, 刘付程, 朱佳媚. 连云港市大气污染物浓度变化的多重分形分析 [J]. 淮海工学院学报: 自然科学版, 2011, **20**(1): 41-45.
- [23] Zhang Chen, Ni Zhiwei, Jiang Ting. Joint multifractal analysis of relationship of PM_{2.5} and meteorological conditions based on WPTMM [J]. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2015, **35**(8): 2166-2176(in Chinese).
- 张 琛, 倪志伟, 姜 婷. 基于 WPTMM 的 PM_{2.5} 与气象条件关系的联合多重分形分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, **35**(8): 2166-2176.
- [24] Pavon-Dominguez P, Jiménez-Hornero F J, De Rave E G. Multifractal analysis of ground-level ozone concentrations at urban, suburban and rural background monitoring sites in Southwestern Iberian Peninsula [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2013, **4**(2): 229-237.
- [25] Jiménez-Hornero F J, Jiménez-Hornero J E, De Ravé E G, et al. Exploring the relationship between nitrogen dioxide and ground-level ozone by applying the joint multifractal analysis [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **167**(1-4): 675-684.
- [26] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-Bunde E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2002, **316**(1-4): 87-114.
- [27] Zhou W X. Multifractal detrended cross-correlation analysis for two nonstationary signals [J]. *Physical Review E*, 2008, **77**(6): 066211.