

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.08.023

基于 MF-DCCA 的港口与非港口地区 PM_{2.5} 与 NO_x 互相关性分析^①

张赛鑫, 何红弟, 张季平

上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306

摘要: 针对 PM_{2.5} 与 NO_x 序列间的互相关性特征, 采用多重分形去趋势波动互相关分析法(MF-DCCA), 对香港葵涌(港口)和沙田(非港口)地区的 PM_{2.5} 与 NO_x 浓度序列进行了研究. 首先, 基于整体数据进行研究, 发现港口和非港口地区的 PM_{2.5} 与 NO_x 的互相关性均具有长程相关性和多重分形特征, 港口地区的多重分形特征比非港口地区的要弱. 然后, 对四季数据进行研究, 结果表明港口和非港口地区的 PM_{2.5} 与 NO_x 的互相关性在四个季节均具有长程相关性和多重分形特征. 而且 PM_{2.5} 和 NO_x 互相关性多重分形特征具有明显的季节变化, 春、夏、秋季时港口地区的 PM_{2.5} 与 NO_x 的互相关性多重分形特征比非港口地区的弱, 冬季则相反.

关键词: 多重分形去趋势互相关分析法; 港口; PM_{2.5}; NO_x

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)08-0161-07

近年来, 雾霾受到广泛关注, 尤其是空气中 PM_{2.5}、NO_x(氮氧化物)、SO₂(二氧化硫)等污染物与人们的生活息息相关^[1]. NO_x 的主要来源是燃料燃烧、工业废气、汽车尾气等^[2-3]. 产生 PM_{2.5} 的过程较复杂, 主要由 NO_x, SO₂, CO_x(碳氧化物)经过一系列光化学反应产生^[4-7]. 而对于香港来说, 港口是 PM_{2.5} 和 NO_x 的主要来源, 分析港口与非港口地区的 PM_{2.5} 和 NO_x 的互相关性可以为香港地区的环境治理提供有效的科学依据.

由于大气污染是一个复杂的过程, 传统的统计分析方法很难准确地分析其复杂性, 采用分形学研究大气污染物间的互相关性是目前一个新兴研究领域^[8-9]. 现有的研究已经证明分形学在研究环境污染因素间的特征是非常有效的. Pablo^[10] 等使用 MF-DFA 方法分析了不同季节城市、郊区、农村臭氧的分形特征. MF-DCCA 方法正是对 MF-DFA 方法的改进, 该方法适用于具有多重分形特性的两个非平稳时间序列之间互相关性的分析. 目前已应用于各种随机分析领域, 例如, 在证券投资^[11-12]、能源价格^[13-13]、农业生产等领域. 而污染物时间序列获得的数据大部分是非平稳、有限的, 污染物间的互相关关系可用 MF-DCCA 方法进行分析. Francisco^[15] 使用 MF-DCCA 方法分析了不同季节 NO_x 和 O₃ 之间的分形相关性, 取得了较好的效果. 李思川^[16] 等人采用 DCCA 方法分析了香港地区 O₃ 和 NO₂ 的长期互相关作用.

本文采用 MF-DCCA 方法, 收集葵涌(港口地区)和沙田(非港口地区)监测站 2011-01-01 到 2015-11-30 的数据, 研究 PM_{2.5} 和 NO_x 互相关性的多重分形特征和两个地区 PM_{2.5} 和 NO_x 浓度的非线性特征, 并分析不同季节港口地区和非港口地区的 PM_{2.5} 和 NO_x 互相关性的多重分形特征和浓度的非线性特征, 从而为制定港口污染的治理措施提供科学的依据.

① 收稿日期: 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(11672176); 国家自然科学基金应急管理项目理论物理专款(11647077); 上海市科学技术委员会科研计划(14DZ2280200); 上海海事大学研究生学术新人(YXR2016037); 上海海事大学研究生创新基金(2016YCX075).

作者简介: 张赛鑫(1991-), 女, 河南滑县人, 硕士研究生, 主要从事绿色物流、绿色港口方面的研究.

1 资料与研究方法

1.1 资料来源

本研究选用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)两个监测站的空气质量实时监测数据. 具体研究数据选取这两个监测站从 2011-01-01 到 2015-11-30 的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 每天(共 1795 天)小时平均浓度时间序列数据, 数据长度均为 43080 个数据点. 为了研究 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 之间相关性的季节特征, 并将这些数据按季节分为春、夏、秋、冬 4 个时间段. 其中 3-5 月为春季, 6-8 月为夏季, 9-11 月为秋季, 12 月到次年 2 月为冬季.

1.2 研究方法

首先检验 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 之间是否具有交叉相关关系, 再运用 MF-DCCA 方法研究两种污染物之间的交叉相关性及分形特征, 分析港口和非港口两个地区 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性及分形特征的差异.

1.2.1 交叉相关性检验方法

对于两个时间序列 $\{x_t, t=1, 2, \dots, N\}$ 和 $\{y_t, t=1, 2, \dots, N\}$, 定义其交叉相关函数为

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

交叉相关统计量为

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

其中, m 是自由度, 交叉相关统计量 $Q_{CC}(m)$ 则近似于自由度为 m 的卡方分布 $\chi^2(m)$.

1.2.2 MF-DCCA 方法

多重分形去趋势波动交叉相关分析法(MF-DCCA)是多重分形去趋势波动分析法(MF-DFA)的一个延伸和扩展, 与 MF-DFA 具有相似的理论依据^[17]. 用于分析 2 个非平稳时间序列之间的相关性. 具体算法如下:

1) 假设两个时间序列 $\{x(i)\}$ 和 $\{y(i)\}$, $i=1, 2, \dots, N$, N 是时间序列的长度, 构造新的时间序列:

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

$$y(i) = \sum_{k=1}^i (y(k) - \bar{y})i, i=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中,

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y(k)$$

2) 把时间序列 $\{x(i)\}$ 和 $\{y(i)\}$ 分成 $N_s = \text{int}(N/s)$ 个不相重叠的子区间, 每个子区间的长度为 s . 因为长度 N 可能不是子区间长度 s 的整数倍, 为了保证序列结尾的 $N - N_s * s$ 的值也考虑在内, 对时间序列的逆序做同样的处理, 这样就可以得到 $2N_s$ 个子区间.

3) 在每一个子区间中, 通过最小二乘法用多项式函数 X_v 和 Y_v 拟合轮廓, 对于 $v=1, 2, \dots, N_s$ 局部协方差函数为

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{X[(v-1)s+i] - x_i(i)\} \times \{Y[(v-1)s+i] - y_i(i)\} \quad (5)$$

对于 $v=1, 2, \dots, 2N_s$, 局部协方差函数为

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{X[N - (v - N_s)s + i] - x_i(i)\} \times \{Y[N - (v - N_s)s + i] - y_i(i)\} \quad (6)$$

4) 把所有子区间的局部协方差取均值, 可得到 q 阶波动函数:

$$F_q(s) = \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(s, v)^{q/2}]^{1/q} \quad (7)$$

一般来说, q 可以是非零的任意实数. 当 $q=0$ 时, 由洛必达法则得:

$$F_o(s) = \exp\left\{\frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [\ln F^2(s, v)]\right\} \quad (8)$$

5) 计算不同标度 s 所对应的波动函数 $F_q(s)$. 如果两个序列之间存在长期幂律交叉相关性, 则波动函数 $F_q(s)$ 和时间间隔 s 存在以下标度关系:

$$F_q(s) = s^{H_{xy}(q)} \quad (9)$$

其中, 标度指数 $H_{xy}(q)$ 即为广义赫斯特指数, q 是阶数, $H_{xy}(q)$ 是 Hurst 标度指数, 以下用 Hq 表示. 当 Hq 不以 q 的变化而变化时, 即 Hq 为一常数, 序列为单分形; 当 Hq 是 q 的函数时, 序列为多重分形. Hq 值的取值范围通常为 $(0, 1)$, 通过 Hq 的取值, 可以判断两个非平稳序列互相关性的特征. 当 $Hq > 0.5$ 时, 两组序列存在正相关且以幂律形式在一定时间尺度上长期存在, 这也意味着如果某个序列在某个时间尺度上存在一个增长(减小)趋势, 则由于两个序列之间相互作用的长期持续性, 使另一组序列在随后的时间上也存在增长(减小)的趋势; 若 $Hq = 0.5$ 时, 则表明序列之间不存在互相关性, 序列之间互不关联; 若 $Hq < 0.5$ 时, 则表明两个序列之间存在长期反相关作用.

Hq 是 $\ln(F_q(s)) \sim \ln s$ 函数关系图的斜率. 通过 MF-DCCA 得到的广义赫斯特指数 $H_{xy}(q)$ 与多重分形标度指数 $T(q)$ 关系为

$$\tau(q) = qH_{xy}(q) - 1 \quad (10)$$

通过 Legendre 变换, 可以得到描述多标度时间序列的多重分形谱 $f(a)$:

$$\alpha = H_{xy}(q) + qH'_{xy}(q) \quad (11)$$

$$f(\alpha) = q[\alpha - H_{xy}(q)] + 1 \quad (12)$$

其中, a 为奇异指数, 用来描述时间序列的奇异程度. $f(a)$ 为多重分形谱, 它的值反映了具有奇异指数的分形维数. a_{\max} 、 $f(a_{\max})$ 反映的是最小概率子集的性质, a_{\min} 、 $f(a_{\min})$ 反映的是最大概率子集的性质. $\Delta f = f(a_{\min}) - f(a_{\max})$ 表示多重分形谱的差别, 即相应的最大最小概率子集分形维数的差别. $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ 表示最大、最小概率间的差别. $\Delta\alpha$ 描述多重分形的强度, $\Delta\alpha$ 越大, 即多重分形的强度也越大.

2 结果分析

2.1 互相关性结果分析

首先验证港口、非港口地区 PM_{2.5} 和 NO_x 之间是否存在互相关关系. 自由度 m 的取值范围是 1~1 000, 对不同的自由度 m , 选取公式(1)(2)计算其相应的相关统计量 $Q_{CC}(m)$ 与卡方分布 $\chi^2(m)$ 的临界值.

图 1 给出了 PM_{2.5} 和 NO_x 互相关检验 $Q_{CC}(m)$, 图中两根虚线分别表示港口地区和非港口地区的相关性统计量 $Q_{CC}(m)$, 实线表示自由度为 m , 显著性水平为 5% 时卡方分布 $\chi^2(m)$ 的临界值. 从图 1 中可以看出在自由度从 1~1 000 范围内, 相关性统计量 $Q_{CC}(m)$ 均大于卡方分布 $\chi^2(m)$ 的临界值, 这表明港口、非港口两个地区的 PM_{2.5} 和 NO_x 之间均存在显著的互相关性.

2.2 MF-DCCA 分析结果

2.2.1 基于整体数据的分析结果

首先本文给出了葵涌(港口)与沙田(非港口)两个地区 PM_{2.5} 和 NO_x 整体数据互相关性的多重分形分析图, 如图 2 所示. 其中图 2(a)是 Hurst 指数图, 利用 MATLAB 进行编程, 并根据公式(3)和公式(9)

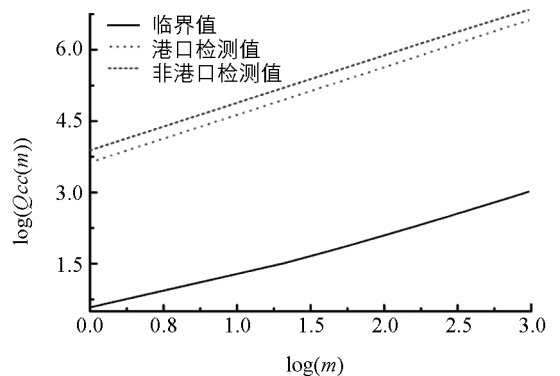


图 1 PM_{2.5} 和 NO_x 互相关检验

对数据进行计算提取,借助 Origin Pro8.0 软件作图.由图 2(a)可以看出港口和非港口的 Hq 均随 q 值的增大而减小,说明两个地区的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 之间的互相关性具有多重分形特征.对于港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性而言, q 从 -5 增加到 5 使 Hq 从 1.06 降至 0.76 ,跨度为 0.3 ,而非港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性的 Hq 从 1.26 降至 0.89 ,跨度为 0.37 . $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性的 Hq 均显著地不为常数,且非港口的 Hq 的跨度大于港口的 Hq 的跨度.说明港口和非港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性具有明显的多重分形特征,并且非港口的互相关性的多重分形强度要高于港口的.对于港口来说,当 q 取 $(-0.6, 5)$ 时, Hq 值均在 $(0.5, 1)$ 范围内,表明 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性具有长程相关性.同理,非港口当 q 取 $(1.5, 5)$ 时亦如此.

图 2(b)为多重分形谱 $f(\alpha) - \alpha$ 关系图,由公式(12)得到.可以看出多重分形谱曲线呈钟形,表示 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性呈现多重分形特征,港口 $\Delta\alpha = 0.54$,非港口 $\Delta\alpha = 0.64$,说明非港口的多重分形特征比港口更加明显,验证上文所述.多重分形谱曲线均是顶部较平坦、开口宽大、曲线分布范围大,说明 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 互相关性强度波动较大且分布不均匀.还可以看出港口的曲线出现明显的右偏现象,即 $\Delta f < 0$,说明港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性很大程度为高度相关.非港口的曲线出现明显的左偏现象,即 $\Delta f > 0$,说明非港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性很大程度为低度相关.

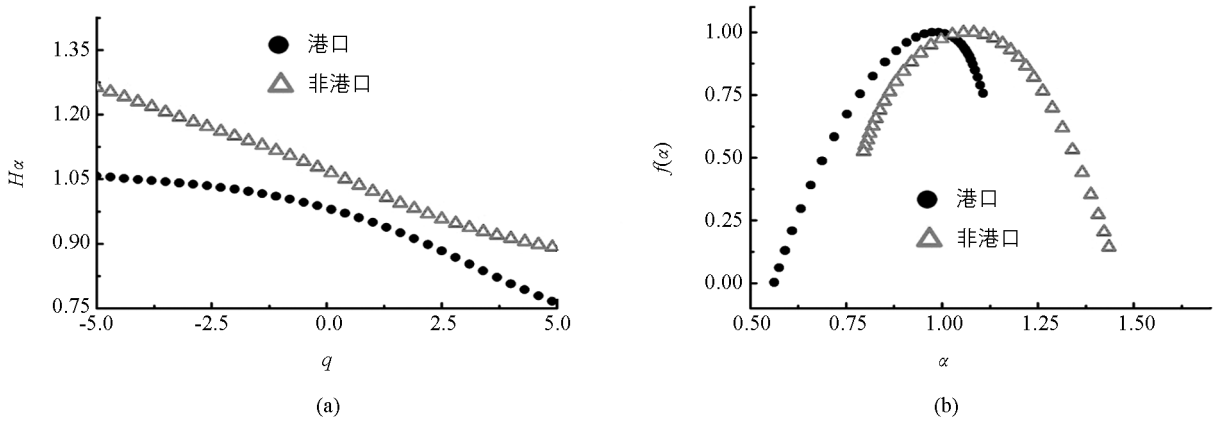


图 2 整体数据多重分形分析图

2.2.2 基于四季数据的分析结果

其次,本文给出了港口和非港口四季的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 之间互相关性的多重分形分析图.其中图 3 是 Hurst 指数图,可以看出所有的 Hq 均随 q 值的增大而减小,且明显地不为常数,说明四个季节港口、非港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性具有明显的多重分形特征.春季,港口的 Hq 跨度为 0.31 ,非港口的为 0.51 .夏季,港口的 Hq 跨度为 0.21 ,非港口的为 0.25 .秋季,港口的 Hq 跨度为 0.27 ,非港口的为 0.4 .冬季,港口的 Hq 跨度为 0.31 ,非港口的为 0.28 .可以看出,春、夏、秋季港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的多重分形特征均弱于非港口的,与整体数据表现相同,而冬季是港口的要强于非港口,且两个地方的多重分形特征均是在夏季最弱.所有的 Hq 值均显著大于 0.5 ,表明港口和非港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性在四个季节均具有长程相关性.

图 4 给出了四季 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 之间互相关性的多重分形谱图,由公式(12)得到.可以看出所有的多重分形谱曲线呈钟形,说明四个季节港口、非港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关性呈现多重分形特征.还可以看出,春、夏、秋季非港口的值都比港口的值要大,冬季港口的值比非港口的值略大,进一步说明这三个季节非港口 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 互相关性的多重分形特征比港口明显,冬季港口的多重分形特征比非港口稍微明显.而且可以看出港口的多重分形谱曲线在夏季大致呈对称,即 $\Delta f = 0$,在春、秋、冬季出现右偏,即 $\Delta f < 0$,说明港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的相关度夏季在高值与低值波动机会相同,另三季在高值波动机会大.非港口的多重分形谱曲线在春季出现左偏,即 $\Delta f > 0$,在夏、秋、冬季大致呈对称,即 $\Delta f = 0$,说明非港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关度春季在低值波动机会大,另三季在高值与低值波动的机会相同.

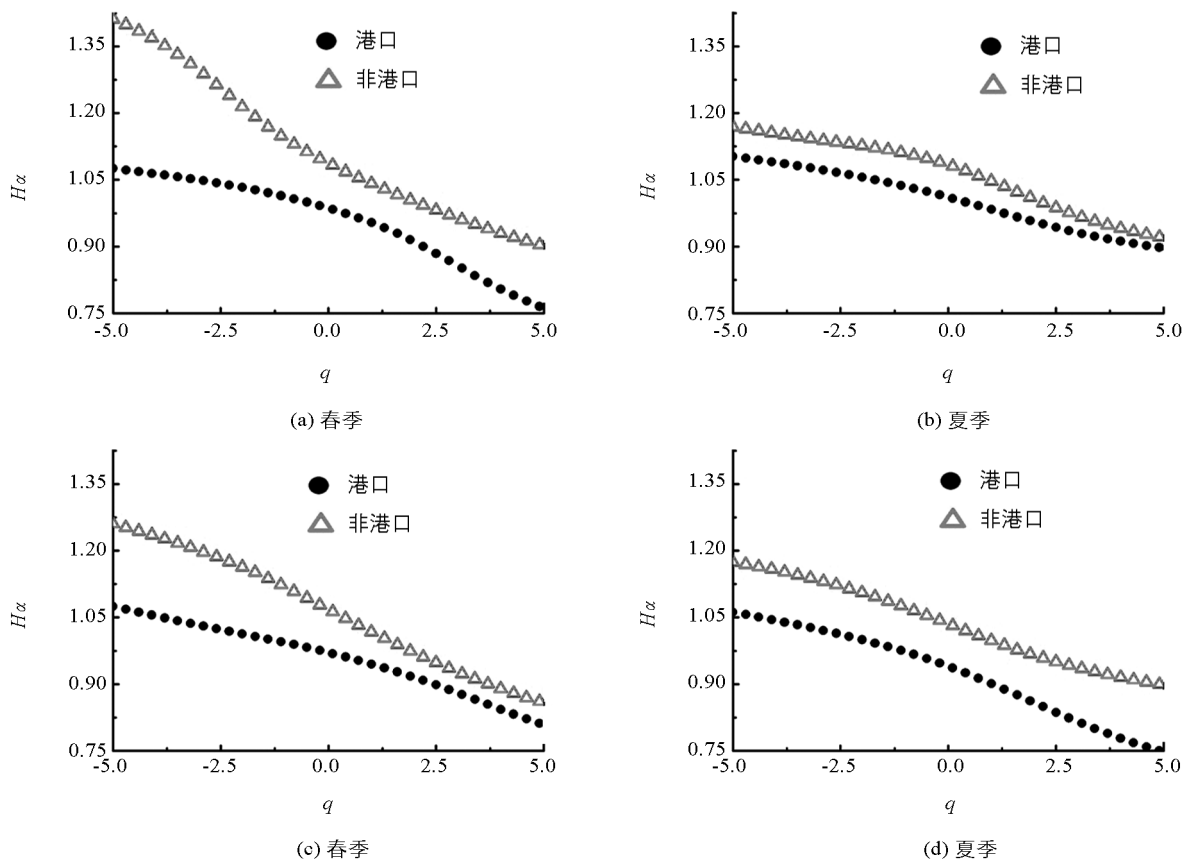


图 3 四季 q 阶 Hurst 指数图

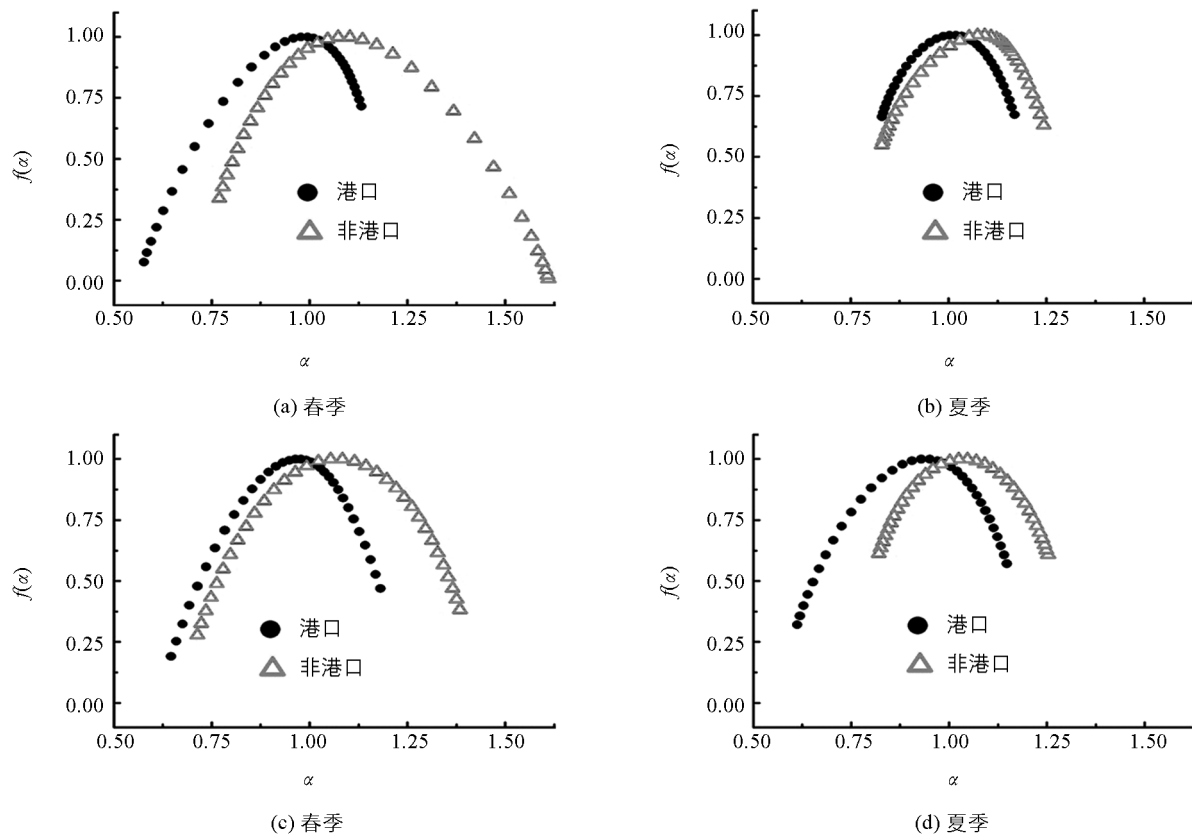


图 4 四季多重分形谱

基于上述两种分析结果可见,港口地区轮船、作业机械均会排放 $PM_{2.5}$ 和 NO_x , 污染物浓度长期受港口排放的影响较大,受其他因素影响相对较小.例如,气象因素、大陆污染物的外源输送影响等,所以港口地区的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 浓度波动变化较小且浓度值较高并可能还会持续增高.而非港口地区受港口排放影响较小,受其他因素影响相对较大, $PM_{2.5}$ 和 NO_x 浓度波动变化较大且浓度值较低并会持续下降.港口地区与非港口地区 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 互相关性和浓度变化不同,据此可知,制定并实施控制港口排放的措施,对治理港口污染至关重要.

3 结 论

本文采用 MF-DCCA 方法对香港葵涌(港口地区)和沙田(非港口地区)两个地区空气的 $PM_{2.5}$ 与 NO_x 浓度的互相关性进行多重分形特征研究,结论如下:

1) 不管是基于整体数据还是基于四季数据,港口和非港口两个地区的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的互相关关系都具有长程相关性,且都有多重分形特征.

2) 基于整体数据港口和非港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 互相关关系的多重分形分析得出:港口地区的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 互相关性的多重分形特征比非港口地区弱;又因为两个地区的 H_q 值都大于 0.5,表明 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 互相关性在接下来的一段时间里仍会保持原有趋势.

3) 基于四季数据港口和非港口的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 互相关关系的多重分形分析得出: $PM_{2.5}$ 和 NO_x 互相关性多重分形特征具有明显的季节变化,春、夏、秋季港口地区的多重分形特征比非港口地区弱,冬季港口地区的多重分形特征比非港口地区强.

参考文献:

- [1] 金赛花,樊曙先,王自发,等.青海瓦里关地面臭氧浓度的变化特征[J].中国环境科学,2008,28(3):198—202.
- [2] 浦静姣,张艳,余琦,等.上海地区 O_3 与 NO_2 时空特征数值模拟个例研究[J].中国环境科学,2009,29(5):461—468.
- [3] 李燕燕,李章平,熊海灵,等.重庆市街道灰尘重金属污染的健康风险评价[J].西南大学学报(自然科学版),2015,37(2):18—23.
- [4] 吴琳,冯银厂,戴莉,等.天津市大气中 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 及其碳组分污染特征分析[J].中国环境科学,2009,29(11):1134—1139.
- [5] RAVI K P, TAO W, HO K F, et al. Characteristics of Summertime $PM_{2.5}$ Organic and Elemental Carbon in Four Major Chinese Cities: Implications of High Acidity for Water-Soluble Organic Carbon(WSOC) [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(2):318—325.
- [6] 姜迪,李聪.西安市冬、夏两季 $PM_{2.5}$ 中碳气溶胶的污染特征分析[J].环境监测管理与技术,2016,28(1):36—40.
- [7] 王强,戴玄吏,巢文军,等.常州市春季大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素的分析及污染特征[J].环境工程学报,2015,09:323—331.
- [8] VASSOLE R T, ZEBENDE G F. DCCA Cross-Correlation Coefficient Apply in Time Series of Air Temperature and Air Relative Humidity [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2012, 391:2438—2443.
- [9] SHAN W P, ZHANG J D. Characterizations of Ozone and Related Compounds Under the Influence of Maritime and Continental Winds at a Coastal Site in the Yangtze Delta, Nearby Shanghai [J]. Atmospheric Research, 2010, 97:26—34.
- [10] PAVON-DOMINGUEZ P, JIMENEZ-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, 4:229—237.
- [11] 王星,郑婷婷,张程程.基于联合多重分形的股市量价关系分析[J].系统工程,2009,27(12):25—30.
- [12] HE Y, CHEN S P. A New Approach to Quantify Power-Law Cross-Correlation and Its Application to Commodity Mar-

- kets Original Research Article [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2011, 390: 3806–3814.
- [13] RUAN Q S, WANG Y. Cross-Correlations Between Baltic Dry Index and Crude Oil Prices [J]. *Physica A*, 2016, 453: 278–289.
- [14] ZHOU W X. Finite-Size Effect and the Components of Multifractality in Financial Volatility [J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2012, 45: 147–155.
- [15] JIMENEZ-HORNERO F J, JIMENEZ-HORNERO J E, DE RAVE E G. Exploring the Relationship Between Nitrogen Dioxide and Ground-Level Ozone by Applying the Joint Multifractal Analysis [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 167(1): 675–685.
- [16] 李思川, 史凯, 刘春琼, 等. 香港地区 O_3 与 NO_x 的长期互相关作用 [J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(11): 15–19.
- [17] LOPES R, BETROUNI N. Fractal and Multifractal Analysis: a Review [J]. *Medical Image Analysis*, 2009, 13: 634–649.

Multifractal Detrended Cross-Correlation Analysis of $PM_{2.5}$ and NO_x in a Port Area and a Non-Port Area

ZHANG Sai-xin, HE Hong-di, Zhang Ji-ping

Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Abstract: In order to get a better understanding of the cross-correlation between $PM_{2.5}$ and NO_x time series, multifractal detrended cross-correlation analysis (MF-DCCA) was made to study the concentration of $PM_{2.5}$ and NO_x sequences in KwaiChung (a port) or in ShaTin (a non-port area) in Hong Kong. First, an analysis of all the relevant data showed that the cross-correlation between $PM_{2.5}$ and NO_x had long-range correlation and multifractal characteristics either in KwaiChung or in ShaTin, the multifractal characteristics being weaker in KwaiChung than in ShaTin. Then, based on an analysis of the seasonal data, the cross-correlation between $PM_{2.5}$ and NO_x was shown to have long-range correlation and multifractal characteristics in all the four seasons both in KwaiChung and ShaTin. The multifractal characteristics between $PM_{2.5}$ and NO_x exhibited a marked seasonal variation, being weaker in KwaiChung than in ShaTin in spring, summer and autumn, and the opposite was true in winter.

Key words: multifractal detrended cross-correlation analysis (MF-DCCA); port; $PM_{2.5}$; NO_x

责任编辑 汤振金

