

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.01.004

短周期高强度旅游活动对城市空气 质量的影响

杜娟^{1,2}, 欧阳文言¹, 刘春琼^{3*}, 吴波¹, 张娇¹, 史凯³

(1 吉首大学数学与统计学院, 湖南 吉首 416000;

2 洪江高新技术产业开发区(洪江市)管理委员会, 湖南 怀化 418000;

3 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000)

摘要: 为定量研究短周期高强度旅游活动对城市空气质量的影响, 提出一种综合集合经验模态分解和去趋势互相关分析的模型 (EEMD-DCCA), 研究了2015年张家界市武陵源景区旅游人数的变化对大气NO₂浓度的影响。首先, 通过EEMD方法, 获得武陵源景区旅游人数与城市空气中NO₂浓度的高频分量; 进一步, 通过DCCA方法研究旅游人数高频分量和NO₂浓度之间的相关性。结果表明, 两组旅游人数高频分量与NO₂浓度之间均呈正相关性, 且具有长期持续性特征, 这意味着短周期节假日旅游人数的剧增会持续影响未来一定时间尺度内大气NO₂浓度的变化趋势。在武陵源景区的研究表明所提的分析模型可以为定量评估旅游活动对自然景区空气质量的影响提供新的研究途径。

关键词: 旅游; NO₂; 集合经验模态分解法; 去趋势互相关分析法; 长期持续性

中图分类号: X51

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)01-036-011

Influence of short-duration high-strength tourism activities on urban air quality

DU Juan^{1,2}, OUYANG Wenyan¹, LIU Chunqiong^{3*}, WU Bo¹, ZHANG Jiao¹, SHI Kai³

(1 College of Mathematic and Statistics, Jishou University, Jishou 416000, China;

2 Management Commission of High-Tech Industrial Development Zone in Hongjiang, Huaihua 418000, China;

3 College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China)

Abstract: To quantitatively study the impact of short-duration high-strength human tourism activities on urban air quality, a novel model (EEMD-DCCA) integrating ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and detrended cross-correlation analysis (DCCA) was proposed and applied to study the impact of the number of tourists in Wulingyuan scenic spot of Zhangjiajie on local atmospheric NO₂ concentration in 2015. The high-frequency components of the number of tourists in Wulingyuan scenic spot and the concentration of NO₂ in Zhangjiajie City were obtained firstly through EEMD. And then, DCCA method was used to analyze the correlation between high-frequency components of the number of tourists and NO₂.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52160024), 湖南省自然科学基金项目 (2022JJ30475)

作者简介: 杜娟 (1995-), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事应用统计方面的研究。E-mail: dumin0014@163.com

导师简介: 刘春琼 (1981-), 女, 重庆忠县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事大气环境非线性和复杂性研究。E-mail: liuchunqiong@163.com

收稿日期: 2020-10-09; 修改日期: 2020-12-12

*通信作者。

concentration. The results show that there is a significant positive correlation between the two groups of the high-frequency components of the tourist number and NO_2 concentration in Zhangjiajie, and the positive correlation has a long-term sustainability feature, which means that the rapid increase of the number of tourists in short-duration holidays will continue to affect the future change trend of NO_2 concentration in a certain time scale. The research in Wulingyuan scenic area shows that the model proposed can provide a new research approach for quantitative assessment of the impact of tourism activities on the air quality of natural scenic spots.

Key words: tourism; NO_2 ; ensemble empirical mode decomposition; detrended cross-correlation analysis; long term correlation

0 引言

旅游业的快速发展, 导致自然景区空气质量趋于恶化。定量研究大气污染物演化特征与人类旅游活动的相关性有助于科学评估人类旅游活动对自然景区的影响。

近年来, 已有众多学者对人类旅游活动与大气污染物的关系进行了研究, 均发现自然景区内旅游人数的变化会对大气质量造成一定的影响^[1-3]。我国旅游业已进入互联网、物联网、大数据、智能化等现代科技新时代, 即旅游 4.0 新时代^[4]。我国旅游活动主要集中于五一、国庆和春节等假期, 进而出现短周期高强度的人类旅游活动特征。 NO_2 是交通尾气和餐饮油烟排放的主要污染物, 旅游旺季机动车使用量和餐饮油烟排放量的增加将导致大气中 NO_2 在短时限内剧增。而在旅游淡季, 机动车使用和厨房油烟排放量相对减少, 大气中 NO_2 浓度污染也相应较小。由于旅游城市中 NO_2 浓度的局部波动特征蕴含着短周期高强度人类旅游活动的印迹和信息, 因此可以用于准确评估短周期高强度人类旅游活动对自然景区空气质量的影响, 对政府制定空气质量管理政策具有重要意义。

由于受到气象、地形等各种因素作用, 大气污染物浓度的变化呈现非线性、非平稳的多尺度特征^[5-10], 此外区域人类旅游活动还受到国内旅游政策以及旅游行业的波动性、敏感性和季节性等诸多因素的影响, 使得传统统计分析方法无法准确分析短周期高强度人类旅游活动对城市空气质量的影响。而现代非线性统计分析方法的研究成果为解决上述问题提供了新的科学研究手段。Wu 和 Huang^[11] 提出的集合经验模态分解法 (EEMD) 可以将景区游客流量及城市 NO_2 非平稳时间序列分解为多个模态分量 (IMF), 如高频项、周期项及趋势项 (RES), 其中的高频项就具有短周期高频率的特征模态信息, 可以用以挖掘城市空气污染物以及游客量在短时间尺度上的内在演化特征。该方法已成功应用于气象^[12]、水文^[13, 14] 和股票价格^[15-17] 等多个领域。此外, 由 Podobnik 和 Stanley^[18] 提出的去趋势互相关分析 (DCCA) 方法是一种定量分析两组非平稳时间序列之间相关性的最科学有效方法。该方法能克服时间序列高度非平稳性的影响, 有效地避免了非平稳性伪相关检测^[19-21], 可以用于研究短周期高强度人类旅游活动对城市空气质量的影响。

本文以张家界武陵源风景区为研究对象, 首先采用 EEMD 方法从复杂的游客流量和大气污染物 NO_2 时间序列中提取具有短周期高频率的非线性模态分量; 进而应用 DCCA 方法研究短周期高强度人类旅游活动与 NO_2 污染演化的相关性, 以期阐明短周期高强度人类旅游活动对典型旅游城市空气质量的影响。

1 研究数据与方法

1.1 研究数据

选取2015年1月1日至12月31日张家界市日均 NO_2 浓度数据和武陵源风景区的日旅游人数作为研究对象。国家生态环保部开展了空气质量监测网络,建立了一个详细的空气污染数据库,分别在张家界市未央路、电业局、永定新区和袁家界内设有空气质量自动监测站,张家界市日均 NO_2 浓度数据由各空气质量自动监测子站每日 NO_2 浓度数据平均得到。武陵源风景区的每日旅游人数来源于张家界全域通管理系统平台。由于停电、设备维护等因素,研究时段内有不到1%的数据缺失,已用两个相邻 NO_2 浓度数据的平均值来替换缺失数据。张家界日均 NO_2 浓度数据和武陵源风景区进园人数的序列长度均为365个,研究数据如图1所示。

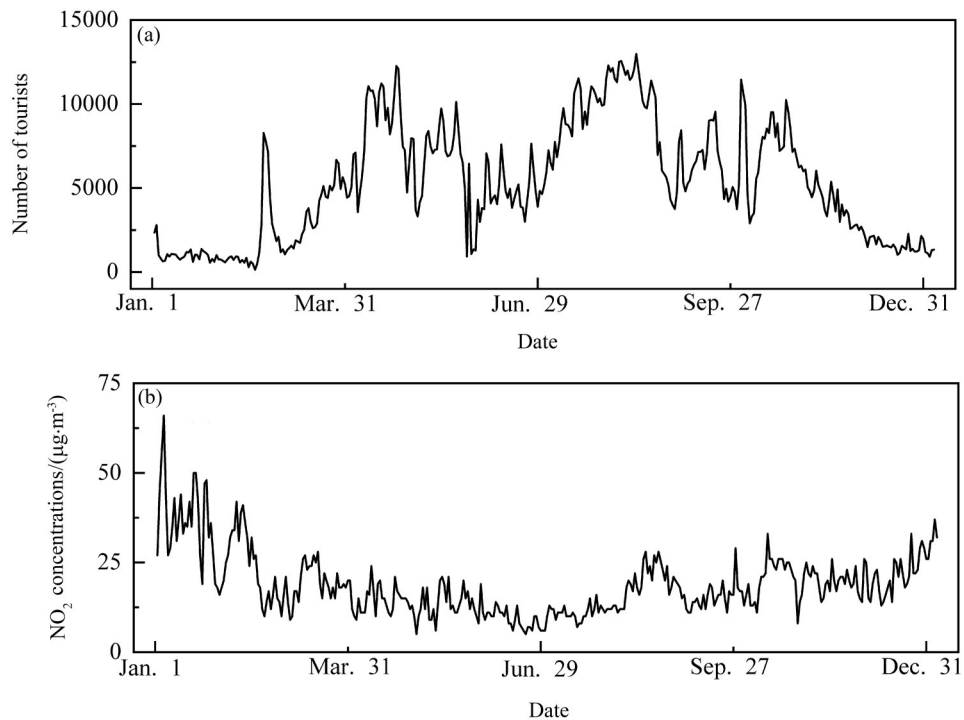


图1 2015年武陵源风景区旅游人数(a)和张家界市 NO_2 浓度的日变化(b)

Fig. 1 Daily variation of the number of tourists (a) in Wulingyuan scenic spot and the NO_2 concentration in Zhangjiajie City (b) in 2015

1.2 研究方法

1.2.1 EEMD

EEMD是一种适合处理非线性、非平稳信号的分解方法^[11],该方法的核心思想是向原始时间序列中加入等长度正态分布的高斯白噪声,使得信号变化在研究时间尺度上连续,改变了其极值点的特性。应用EEMD方法从张家界市 NO_2 浓度和武陵源风景区旅游人数时间序列中提取一系列具有物理意义的IMF,进一步对不同时间尺度下各IMF演化的内在行为进行研究。基于EEMD的基本原理,每个IMF应满足两个条件^[11,22]: 1) 在整组时间序列中,局部极值的个数和过零点的个数必须相等或最多相差1个; 2) 在任意时刻点上,上包

络线和下包络线的平均值为 0。EEMD 方法的计算步骤如下:

1) 向原始时间序列 $Y(t)$ 中添加等长度正态分布的白噪声 $a_i(t)$, 就可以得到第 i 次添加白噪声后的信号 $Y_i(t)$, 其构造公式为

$$Y_i(t) = Y(t) + a_i(t). \quad (1)$$

2) 为消除白噪声的影响, 将 M 次 EEMD 分解的 IMF 均值作为最终的 IMF, 其计算式为

$$H_j(t) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M H_j^k(t), \quad (2)$$

式中 $H_j(t)$ 表示对原始时间序列进行 M 次 EEMD 分解后得到的第 j 个 IMF, $H_j^k(t)$ 表示第 k 次 EEMD 分解得到的第 j 个 IMF。

白噪声对分析信号的影响为

$$e = \frac{d}{\sqrt{M}}, \quad (3)$$

式中 e 是标准差, d 是添加白噪声序列的振幅, M 是集合的数目。显然, M 越大, 原始时间序列的分解结果越接近真实值。通常 e 为 0.2, M 为 100^[23]。

3) 原始时间序列可以表示为

$$Y(t) = \sum_{j=1}^m H_j(t) + r_m(t), \quad (4)$$

式中 m 为 IMF 的个数, 各 $H_1(t), H_2(t), \dots, H_m(t)$ 的周期尺度依次递增, $r_m(t)$ 为长期趋势项。

1.2.2 去趋势互相关分析法

Podobnik 和 Stanley^[18]于 2008 年基于消除趋势波动分析法 (DFA) 提出了去趋势互相关分析法 (DCCA), 该方法可以用来分析两组非平稳时间序列之间的相关性。通过 DCCA 方法可以计算得到两组非平稳时间序列之间的互相关指数, 即 DCCA 指数, 该指数可以用来定量评价两组非平稳时间序列之间的相互关系。该方法的优点是可以针对两组非平稳时间序列系统地滤去各阶趋势成分, 以避免因数据非平稳性导致时间序列之间出现伪相关现象。因此, 该方法直接用来研究短周期高强度人类旅游活动与 NO_2 污染演化之间的关系。目前, DCCA 方法已成功应用于股票^[24, 25]、气象时间序列^[26, 27]等。DCCA 方法的具体计算过程如下:

1) 根据武陵源风景区旅游人数序列 $\{x_i, i=1, 2, \dots, N\}$ 和张家界城市空气中 NO_2 浓度序列 $\{y_i, i=1, 2, \dots, N\}$, 构造新的累积序列, 分别为

$$\begin{cases} x_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \\ y_k = \sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中 \bar{x}, \bar{y} 分别是其时间序列的平均值, $i=1, 2, \dots, N$ 。

2) 将构造的时间序列 $\{x_k\}$ 和 $\{y_k\}$ 分成 n 个长度相等的 $N_s \equiv \text{int}(N/n)$ 非重叠段, 由于时间序列的长度 N 通常不是所考虑的时间刻度 n 的倍数, 因此在构造时间序列的末尾可能会保留一小部分。为了不忽略这一部分, 用同样的方法从另一端开始重复同样的步骤。因此共获得 $2N_s$ 段。

3) 通过对数据拟合 (最小二乘法) 一阶多项式来计算 $2N_s$ 个分段的局部趋势和。然后, 确定两组趋势序列 $\{\tilde{x}_k\}$ 和 $\{\tilde{y}_k\}$ 的协方差。其计算式为

$$f^2_{\text{DCCA}}(n, i) = \frac{1}{n} \sum_{k=i}^{i+n} (y_k - \tilde{y}_k)(x_k - \tilde{x}_k). \quad (6)$$

4) 去趋势协方差函数的计算公式为

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{2N_s} \sum_{i=1}^{2N_s} f^2_{\text{DCCA}}(n, i)}. \quad (7)$$

若 $F(n)$ 与相应的时间尺度 n 之间满足线性关系, 则存在如下幂律关系:

$$F(n) \propto n^\alpha, \quad (8)$$

式中 α 为 DCCA 标度指数。当 $\alpha > 0.5$ 时, 则表明两组非平稳时间序列之间存在持续的长期正相关关系, 即一组时间序列中数值的增大或减小, 会使另一组时间序列中的数值也增大或减小。当 $\alpha < 0.5$ 时, 则表明两组非平稳时间序列之间具有反持续性的长期互相关性, 即一组时间序列中数值的增加, 很可能导致另一组时间序列中数值的减小。若 $\alpha = 0.5$, 则表明两组非平稳时间序列之间不存在长期相互关系, 即某组时间序列中数值的增加或减小不会影响另一组时间序列中数值的变化。

2 研究结果

2.1 EEMD 分解结果

为了从张家界市 NO_2 浓度和武陵源风景区旅游人数的原始时间序列中提取具有短周期高频率的特征模态, 通过 EEMD 方法将张家界市 NO_2 浓度和武陵源风景区旅游人数的原始时间序列分别分解为 7 个 IMF 和 1 个 RES, 其具体分解结果分别如图 2 和图 3 所示。趋势项可以反映张家界市 NO_2 浓度以及武陵源风景区旅游人数在研究时间尺度上的总体变化趋势。各 IMF 均展示了不同周期尺度上 NO_2 浓度和旅游人数从最高频率到最低频率的波动特征。随着 NO_2 浓度和旅游人数各 IMF 的频率由高到低的变化, 其振幅变得越来越大。 NO_2 浓度和旅游人数各 IMF 的信号波动均具有各自的准周期, 分别表示张家界市 NO_2 浓度和武陵源风景区旅游人数在不同时间尺度的变化特征。在同一研究时间段内, NO_2 浓度和旅游人数在不同周期尺度上各 IMF 的波动振荡表现出不同强度的非均匀变化, 这种非均匀变化反映了大气系统内外力相互作用的非线性波动特征。这样, 需要计算 NO_2 浓度和旅游人数序列各 IMF 的平均周期, 而各 IMF 的信号波动对 NO_2 浓度和旅游人数原始时间序列总体的影响程度可以通过其方差贡献率来反映。因此, 需要进一步计算 NO_2 浓度和旅游人数序列各 IMF 的平均周期和方差贡献率。

进一步, 通过快速傅立叶变换 (FFT) 分别计算张家界 NO_2 浓度和武陵源风景区旅游人数各 IMF 的平均周期和方差贡献率, 结果如表 1 所示。张家界 NO_2 浓度的前 2 个模态分量分别具有准 3 天 (IMF1) 和准 7 天 (IMF2) 的振荡周期, 武陵源风景区旅游人数的前 2 个模态分量也分别具有准 3 天 (IMF1) 和准 7 天 (IMF2) 的振荡周期。张家界 NO_2 浓度和武陵源风景区旅游人数的前 2 个模态分量具有近似一致的周期振荡特征, 其准周期的波动对应一周以内的时间尺度。张家界市 NO_2 的高频分量 IMF1 和 IMF2 的方差贡献率分别为 10.1% 和 3.3%, 其中 IMF1 高频分量在其所有的 IMF 中方差贡献率最大, 表明该分量对张家界 NO_2 浓度总体波动特征的影响较大。武陵源风景区旅游人数的高频分量 (IMF1 和 IMF2) 代表了短周期、高强度的人类旅游活动特征, NO_2 的高频分量 (IMF1 和 IMF2) 更能反映 NO_2 浓度的显著波动。因此, 需要进一步研究武陵源风景区旅游人数的高频分量 (IMF1 和 IMF2) 与张家界 NO_2 浓度之间的关系。

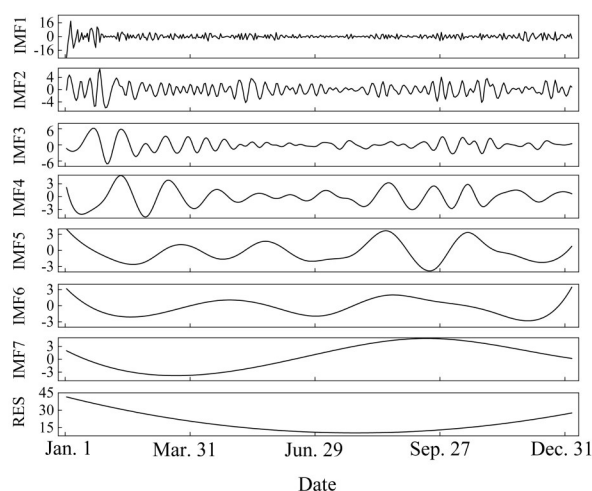


图2 2015年张家界NO₂浓度的IMF及趋势项

Fig. 2 IMF and RES of NO₂ concentration in urban air of Zhangjiajie in 2015

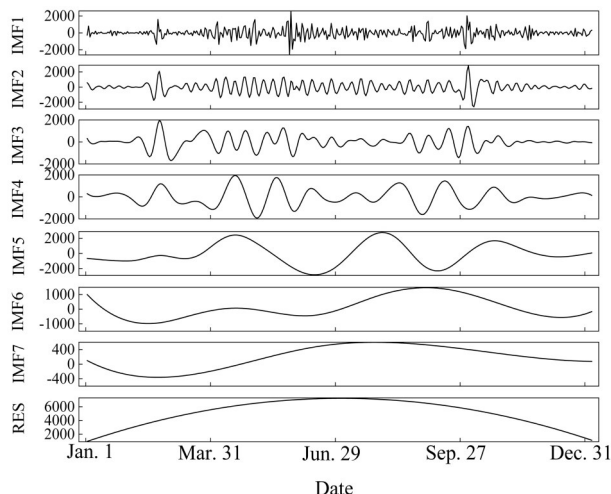


图3 2015年武陵源旅游人数的IMF及趋势项

Fig. 3 IMF and RES of tourist arrivals of Wulingyuan in 2015

表1 两组时间序列各IMF的平均周期和方差贡献率

Table 1 Average period and variance contribution rate of each IMF in two time series

IMF components	NO ₂ concentration		Number of tourists	
	Average period/h	Variance ratio/%	Average period/h	Variance ratio/%
IMF1	3.8	10.1	3.5	4.0
IMF2	7.3	3.3	7.0	5.5
IMF3	24.3	3.7	14.6	4.4
IMF4	40.6	3.7	30.4	7.5
IMF5	73	3.2	91.3	26.3
IMF6	121.7	2.0	365	6.6
IMF7	365	8.7	365	1.3
RES	365	65.4	365	44.4

2.2 DCCA分析结果

如上所述, 张家界市 NO_2 浓度和武陵源风景区旅游人数的前2个模态分量具有近似一致的周期振荡特征, NO_2 的高频分量所对应的平均周期与短周期高强度人类旅游活动密切相关。因此, 在研究时间尺度上, 分析武陵源风景区旅游人数的两组高频分量 (IMF1 和 IMF2) 与张家界 NO_2 浓度之间的相关性, 可以定量地反映张家界 NO_2 浓度波动对武陵源风景区短周期高强度人类旅游活动的响应。应用 DCCA 方法计算了旅游人数两组高频分量与张家界 NO_2 浓度之间的相关性, 计算结果分别如图4和图5所示。旅游人数与张家界 NO_2 浓度的前两个高频分量协方差波动函数 $F(n)$ 与时间尺度 n 之间均呈幂律变化特征, 其 DCCA 指数 α_1 与 α_2 分别为0.695 (IMF1) 和0.684 (IMF2), 表明约3天 (IMF1) 和7天 (IMF2) 周期的人类旅游活动与 NO_2 浓度之间存在正相关性。DCCA 的长期相关性表明, 武陵源风景区短周期高强度人类旅游活动与张家界城市中 NO_2 浓度的相关性随时间呈幂律衰减, 而不是指数衰减, 即二者之间存在很强的幂律关系, 表明过去短周期高强度人类旅游活动会持续影响当前甚至未来张家界城市中 NO_2 浓度的波动趋势, 从而反映出武陵源风景区短周期高强度人类旅游活动对张家界市大气污染过程的影响呈长期持续特征。

为了验证 DCCA 标度指数能够揭示旅游人数两组高频分量 IMF1 和 IMF2 与张家界 NO_2 浓度之间的某些互相关信息, 采用同样的方法分析了旅游人数两组高频分量与 NO_2 浓度原始时间序列的随机洗牌序列。对于洗牌序列, 在洗牌过程中, 数据中的时间相关性被破坏, 而分布保持不变。理论上, 在整个研究时间尺度上, 这两个序列之间不会有长期相关性。由图4和图5可知, 旅游人数两组高频分量 IMF1、IMF2 与 NO_2 洗牌序列之间的 DCCA 标度指数 α_s 分别为0.509 和0.492, 均接近0.5, 表明旅游人数两组高频分量与 NO_2 浓度的洗牌时间序列之间不存在内在的相关性。这些分析表明, DCCA 方法可以用来评估短周期高强度人类旅游活动与张家界城市 NO_2 浓度之间的互相关特性。

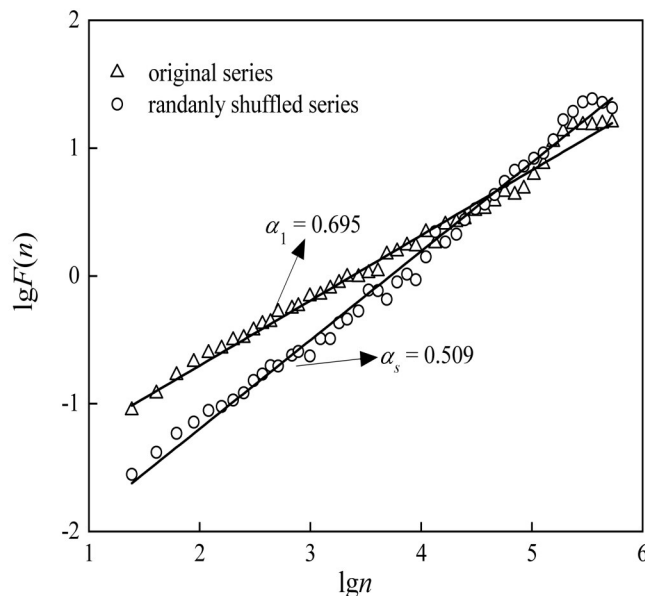


图4 旅游人数高频分量 IMF1 与 NO_2 浓度的 DCCA 分析

Fig. 4 DCCA analysis of the high frequency component IMF1 of tourist number and NO_2 concentration

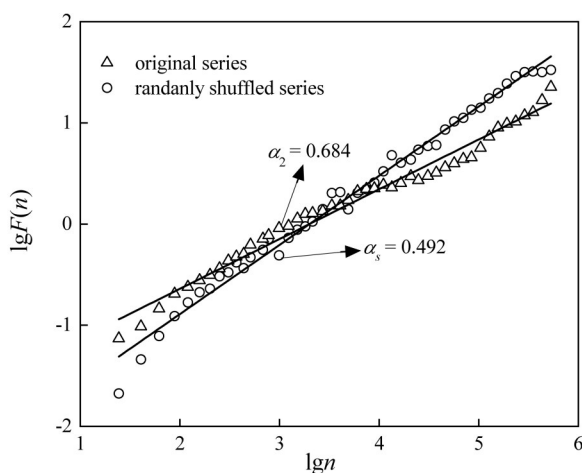


图5 旅游人数高频分量IMF2与NO₂浓度的DCCA分析

Fig. 5 DCCA analysis of the high frequency component IMF2 of tourist number and NO₂ concentration

3 讨 论

张家界地处中国湖南省西北部, 位于 28°52'N~29°48'N、109°40'E~111°20'E 之间, 该城市的主要支柱产业是旅游业。由于张家界地处武陵山区腹地, 远离国家主要城市群, 因此受到区域大气污染输送影响较小。武陵源风景区是国家 5A 级旅游景区, 景区内部交通运输均为电力环保客运车辆, 并且在景区内严格控制餐饮油烟排放。因此, 武陵源风景区本身不存在 NO₂ 排放源。空气污染物主要来源于城市机动车尾气和餐饮油烟排放^[28]。由于 NO₂ 是交通尾气和餐饮油烟排放的主要污染物, 因此 NO₂ 可作为评价因子分析人类旅游活动对旅游景区空气质量的影响。

人类旅游活动具有一定的周期性, 随着旅游旺季和旅游淡季的规律性、周期性变化, 旅游人群的活动也具有明显规律性。2015 年武陵源风景区门票实行 "景区门票 1 票 4 天有效" 政策, 人们更大限度地利用门票政策, 短时间内多次进入武陵源风景区, 从而导致武陵源风景区旅游人数出现约 3 天的周期特征。同时, 元旦、春节、清明、端午和国庆等法定节假日以及周末均可能导致景区旅游人数出现短周期的特征。这些短周期的节假日期间, 旅游人数快速激增, 形成短周期高强度的旅游效应。短周期高强度的人类旅游活动进一步会导致张家界机动车使用量和厨房油烟排放量增加, 从而导致张家界 NO₂ 排放量增加。而旅游淡季张家界的机动车使用量和厨房油烟排放量相对减少, NO₂ 的排放量也相应减少。城市中大气污染物浓度的局部波动特征可以反映短周期高强度的人类旅游活动对自然风景区空气质量的影响。

通过对比旅游人数和城市空气中 NO₂ 浓度的两组高频分量 IMF1 和 IMF2 的平均周期和方差贡献率, 可以发现, 两组时间序列高频分量均存在约 3 天 (IMF1) 和 7 天 (IMF2) 的平均周期, 且 NO₂ 的高频分量 IMF1 的方差贡献率高达 10.1%, 占据其各分量方差贡献率的最大值。NO₂ 浓度的高频分量 IMF1 和 IMF2 分别出现 3 天和 7 天的准周期, 说明存在影响其发生变化的周期污染源, 而旅游人数的高频分量恰好出现了相近的时间周期。因此, 短周期高强度人类旅游活动可能是导致 NO₂ 高频分量随时间演变的主要因素。由于长距离的污染物输送需要较长的时间尺度, 外来污染物不会在较短的时间尺度内进行长距离输送, 长距离的外来输送也不会导致张家界出现稳定的短周期高频率模态。因此, EEMD 方法分解得到的 NO₂ 短周期高频率特征模

态不太可能由外来污染物输送导致,而主要受短周期高强度人类旅游活动的影响。

进一步,DCCA的定量分析结果表明,武陵源风景名胜区旅游人数约3天和7天的高频分量与城市空气中 NO_2 浓度之间均表现出长期持续的正相关性特征,反映了短周期高强度人类旅游活动与城市空气中大气污染过程密切相关。人类旅游活动涉及交通出行、餐饮等必备要素,短周期高强度人类旅游活动带来的机动车尾气和餐饮油烟排放必然会周期性地导致城市中 NO_2 大幅增加。因此,在短期内,短周期高强度人类旅游活动会引起大气中 NO_2 浓度在未来一定时间内呈持续升高趋势。

由此可见,张家界城市 NO_2 时空分布和演化的变异性特征,尤其是污染物局部极端波动过程蕴含着短周期高强度人类旅游活动的印迹。因此, NO_2 可作为科学评估短周期高强度人类旅游活动对城市空气质量影响的一个关键评价因子。应用科学合理的方法研究城市空气中 NO_2 时空演化与短周期高强度人类旅游活动的相关性及时间尺度特征,可以揭示城市空气污染物时空演化随人类旅游活动变化规律的响应机制,从而科学评估短周期高强度人类旅游活动对自然景区的影响。

此外,气象要素(如风速、降雨量和温度)对张家界城市空气中污染物的浓度变化也会造成很大的影响,这是张家界 NO_2 浓度序列的趋势项出现方差贡献率为65.4%(最高值)的可能原因,反映了一年时间尺度上气象要素是影响张家界 NO_2 浓度的最主要因素。本文重点关注的是武陵源风景区短周期高强度人类旅游活动对张家界城市空气中 NO_2 浓度的影响,而武陵源风景区高频分量约3天(IMF1)和7天(IMF2)周期的人类旅游活动反映的就是短周期高强度人类旅游活动的特征。相对于一个月或是一个季度的长周期人类旅游活动来说,短周期高强度的人类旅游活动更为普遍,这与人类的生活密切相关。因此,从旅游人数时间序列中提取具有短周期高频率的特征模态进行分析,更能真实反映短周期高强度人类活动与其城市中污染物浓度之间的关系。

4 结 论

基于EEMD-DCCA模型定量分析了短周期高强度人类旅游活动对张家界城市空气中 NO_2 演化的影响。

1) 通过EEMD分解结果发现,张家界武陵源风景区旅游人数与其城市大气中 NO_2 浓度在研究时间尺度上均存在周期相近的高频分量(IMF1和IMF2),其高频分量IMF1和IMF2的平均周期分别近似为3天和7天,表明短周期高强度人类旅游活动是导致 NO_2 高频分量随时间演变的主要因素。

2) 通过DCCA方法研究发现,张家界武陵源风景区约3天和7天周期的人类旅游活动高频分量与其城市大气中 NO_2 浓度之间呈正相关关系,其DCCA标度指数分别为0.695、0.684。武陵源风景区短周期高强度人类旅游活动与张家界城市中 NO_2 浓度之间的长期相关性表现为,过去张家界武陵源风景区旅游人数的变化会持续影响当前甚至未来张家界城市大气中 NO_2 浓度的演化趋势,从而表现出长期持续性特征。

3) NO_2 适宜作为科学评估短周期高强度人类旅游活动对张家界旅游城市空气质量影响的一个关键评价因子。基于EEMD-DCCA模型,可以定量揭示张家界城市空气中大气污染物的时空演化随短周期高强度人类旅游活动变化规律的响应机制,从而为科学评估短周期高强度人类旅游活动对自然风景区的影响提供新的理论依据。

参考文献:

- [1] Qiao X, Xiao W Y, Tang Y, *et al.* Contributions of local tourism and regional air pollution to atmospheric aerosols in Jiuzhaigou, Sichuan, China [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(1): 14-21.
乔雪,肖维阳,唐亚,等.旅游和区域大气污染对四川九寨沟气溶胶的贡献[J].中国环境科学,2014,34(1):14-21.
- [2] Zhou C C, Wang X Q, Sun X Y, *et al.* A test analysis of environmental changes of tourism Karst caves and study on influencing factors — A case of Jiutian cave in Yiyuan County, Shandong Province [J]. *Tourism Tribune*, 2009, 24(2): 81-86.
周长春,王晓青,孙小银,等.旅游洞穴环境变化监测分析及其影响因素研究:以山东沂源九天洞为例[J].旅游学刊,2009,24(2):81-86.
- [3] Zheng K L, Huang Y, Yao X Y, *et al.* Correlation between PM_{2.5}, NO₂ and tourism activities, weather factors in Zhangjiajie City [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(5): 347-356.
郑凯莉,黄毅,姚小云,等.张家界市PM_{2.5}、NO₂与旅游活动及天气因素的相关性分析[J].大气与环境光学学报,2020,15(5):347-356.
- [4] Shi P H. Constructing the national tourism innovation system and accelerating the strategy of China tourism 4.0 [J]. *Tourism Tribune*, 2015, 30(11): 13-14.
石培华.构建国家旅游创新体系,加快推进中国旅游4.0战略[J].旅游学刊,2015,30(11):13-14.
- [5] Shi K, Liu C Q, Wu S H. Long range correlation of air pollution between Chengdu City and its surrounding towns [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(11): 1633-1640.
史凯,刘春琼,吴生虎.基于DCCA方法的成都市市区与周边城镇大气污染长程相关性分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(11):1633-1640.
- [6] 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.
- [7] Lee C K, Juang L C, Wang C C, *et al.* Scaling characteristics in ozone concentration time series (OCTS) [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(6): 934-946.
- [8] Shi K, Liu C Q, Huang Y. Multifractal processes and self-organized criticality of PM_{2.5} during a typical haze period in Chengdu, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 2015(3): 926-934.
- [9] Shi K. Detrended cross-correlation analysis of temperature, rainfall, PM₁₀ and ambient dioxins in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 97: 130-135.
- [10] Wu S H, Shi K, Liu C Q, *et al.* Fractal feature and DFA analysis of PM₁₀ evolution in a typical fog-haze episode in Chengdu [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(5): 285-291.
吴生虎,史凯,刘春琼,等.成都市一次重雾霾期间PM₁₀自组织演化的分形特征及DFA分析[J].安全与环境学报,2014,14(5):285-291.
- [11] Wu Z H, Huang N. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(01): 1-41.
- [12] Tang J, Liu X Q, Fu M X. Multiscale analysis of precipitation in Shaanxi Province based on ensemble empirical mode decomposition [J]. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 34(1): 87-92.
唐洁,刘晓琴,傅明星.集合经验模态分解在陕西降水多尺度分析中的应用[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2018,34(1):87-92.
- [13] Kim T, Shin J Y, Kim S, *et al.* Identification of relationships between climate indices and long-term precipitation in South Korea using ensemble empirical mode decomposition [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 726-739.
- [14] Wang J, Wang X, Lei X, *et al.* Teleconnection analysis of monthly streamflow using ensemble empirical mode decomposition [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124411.

- [15] Xu M, Shang P, Lin A. Cross-correlation analysis of stock markets using EMD and EEMD [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 442: 82-90.
- [16] Zhang N N, Lin A J, Shang P J. Multidimensional k-nearest neighbor model based on EEMD for financial time series forecasting [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 477: 161-173.
- [17] Gong X, Lin B. Modeling stock market volatility using new HAR-type models [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 516: 194-211.
- [18] Podobnik B, Stanley H E. Detrended cross-correlation analysis: A new method for analyzing two nonstationary time series [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(8): 084102.
- [19] Vassoler 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(7): 2438-2443.
- [20] Yuan N M, Fu Z T. Different spatial cross-correlation patterns of temperature records over China: A DCCA study on different time scales [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 400: 71-79.
- [21] Shi K, Di B F, Zhang K S, *et al.* Detrended cross-correlation analysis of urban traffic congestion and NO₂ concentrations in Chengdu [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 61: 165-173.
- [22] Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [23] Ouyang Q, Lu W X, Xin X, *et al.* Monthly rainfall forecasting using EEMD-SVR based on phase-space reconstruction [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(7): 2311-2325.
- [24] Ferreira P, Loures L, Nunes J, *et al.* Are renewable energy stocks a possibility to diversify portfolios considering an environmentally friendly approach: The view of DCCA correlation coefficient [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 512: 675-681.
- [25] Xue L, Chen F, Guo S, *et al.* Time varying correlation structure of Chinese stock market of crude oil related companies greatly influenced by external factors [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 530: 121086.
- [26] Zhang C, Ni Z W, Ni L P. Multifractal detrended cross-correlation analysis between PM_{2.5} and meteorological factors [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 438: 114-123.
- [27] Zebende G F, Brito A A, Silva Filho A M, *et al.* ρ_{DCCA} applied between air temperature and relative humidity: An hour/hour view [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 494: 17-26.
- [28] Zhuang D C, Deng X Z, Zhan J Y. Assessment of the environmental quality for Wulingyuan Scenic Spot in Hunan Province [J]. *Geographical Research*, 2004, 23(2): 192-200.
- 庄大春, 邓祥征, 战金艳. 武陵源风景区环境质量评估 [J]. *地理研究*, 2004, 23(2): 192-200.