

厦漳泉地区气溶胶污染特征及影响因素分析

肖钟湧^{1,2}, 陈颖锋^{1,2}, 陈炯烽^{1,2}, 施益强^{1,2}, 谢先全^{1,2}

(1. 集美大学港口与海岸工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学地理国情监测研究中心, 福建 厦门 361021)

[摘要] 利用卫星 Terra 和 Aqua 上搭载的中分辨率成像光谱仪 (moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 的气溶胶产品, 研究福建省厦漳泉地区气溶胶污染特征和影响因素, 并对比了 3 市气溶胶质量浓度的差异。研究结果表明 2002—2017 年厦漳泉地区气溶胶质量浓度的变化趋势可以分为三个阶段: 一是在 2002—2007 年呈现平缓的增长; 二是在 2008—2011 年没有明显的变化; 三是在 2012 年之后, 气溶胶质量浓度开始出现明显的下降趋势。在 16 年的时间里, 区域平均气溶胶质量浓度减少了 $5.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (约为 23.10%), 说明厦漳泉地区空气质量有较明显的改善。在气溶胶质量浓度较高的厦门市, 2012 年出现最大值 ($45.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), 之后逐渐下降, 到 2017 年 (平均值为 $37.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) 约下降了 16.34%。厦漳泉地区气溶胶质量浓度呈现明显的季节变化, 最大值出现在 4 月; 5 月开始出现较大的下降; 秋末冬初出现最低值; 12 月区域平均值为 $(18.4 \pm 5.2) \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 但是时间上的波动达到最大, 同时空间异质性也很明显。厦漳泉地区气溶胶质量浓度的空间分布异质性明显, 在 $10 \sim 85 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 之间变化。气溶胶质量浓度高值区主要出现在沿海的泉州市、厦门市和漳州市的城区, 三个城区的高值分别为 85, 75, $65 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 高值区年际间波动较小; 而低值区由于受到其他区域的影响, 年际间波动较大。

[关键词] 气溶胶; 中分辨率成像光谱仪; 卫星遥感; 厦漳泉地区

[中图分类号] X 511

Characteristics and Analysis of Influencing Factors of Aerosol Pollution over Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou Region

XIAO Zhongyong^{1,2}, CHEN Yingfeng^{1,2}, CHEN Jiongfang^{1,2}, SHI Yiqiang^{1,2}, XIE Xianquan^{1,2}

(College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

National Geographic Conditions Monitoring Research Center, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This paper performed an analysis of temporal-spatial variations of aerosol mass concentration over Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou (XZQ) region using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) aerosol products, which flew on NASA's Earth Observing System Terra and Aqua satellite platforms, and study the differences among these three cities of Xiamen, Quanzhou and Zhangzhou. The findings indicated that the trend of aerosol mass concentration in XZQ region can be divided into three stages from 2002 to 2017. There was a gradual increase from 2002 to 2007; there was no obvious change trend from 2008 to 2011; the aerosol mass concentration began to show a significant downward trend after 2012. In these 16 years, the aerosol mass concentration was reduced $5.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, about 23.10%, which response the air quality has improved significantly over

[收稿日期] 2020-05-19

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2017J01659); 福建省中青年教师教育科研项目 (JAT160253); 潘金龙集美大学学科建设基金项目 (ZC2013022)

[作者简介] 肖钟湧 (1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事大气环境遥感研究。通信作者: 谢先全 (1978—), 男, 讲师, 硕士, 主要从事 GIS 应用与开发。E-mail: xxq187@126.com

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

XZQ region. However, the high aerosol concentration area of Xiamen, after the maximum value ($45.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) appeared in 2012, then gradually decreased until 2017. The average value for 2017 was $37.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, decreased about 16.34%. The aerosol mass concentration in the XZQ region showed obvious seasonal changes. The maximum appeared in April and the regional average was $(37.1 \pm 7.2) \mu\text{g}/\text{cm}^2$. The aerosol mass concentration in the whole region is generally larger than other months in spatial distribution, and the spatial heterogeneity is the smallest. The aerosol mass concentration appeared large drop from May, and the spatial distribution characteristics of the whole region were similar from May to October. The aerosol concentration in the entire region showed the lowest value by late autumn and early winter. The regional average aerosol mass concentration in December was $(18.4 \pm 5.2) \mu\text{g}/\text{cm}^2$. The fluctuations in winter time reached its maximum in December, and the spatial heterogeneity was also most obvious. Zhangzhou, Quanzhou cities showed consistent monthly variation. The spatial heterogeneity of aerosol mass concentration in the XZQ region was obvious, varying between $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ and $85 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. The high value areas of aerosol mass concentration mainly appeared in the coastal area of the urban of Quanzhou, Xiamen and Zhangzhou cities. The highest values of the three urban areas are 85, 75, $65 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, respectively. The high value areas have less interannual fluctuations, while the low value areas are affected by other areas, with large interannual fluctuations.

Keywords: aerosol; MODIS; satellite remote sensing; Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou region

0 引言

大气气溶胶粒子中含有各种各样的有毒化合物, 高浓度的气溶胶粒子直接危害人体健康^[1-2]。同时, 大气气溶胶也是气候变化的一个重要的不确定来源^[2-4]。目前, 气溶胶的研究方法从原位观测发展到遥感估算。与地基遥感相比, 卫星遥感具有全球覆盖的优势, 越来越受重视。如 MODIS 卫星遥感传感器提供的全球气溶胶产品, 已经广泛用于气溶胶污染研究中^[4-7]。在区域尺度上, 张亮林等^[8]利用 MODIS 气溶胶产品研究了中国 11 年间 AOD 的空间分布特征及年际和四季变化特征; 赵仕伟等^[9]利用 2006—2015 年 MODIS/AQUA C6 MYD08-M3 产品分析了中国西北地区气溶胶光学厚度的时空变化特征和形成原因; 玛依拉·热西丁等^[10]利用 MODIS/AQUA C6.1 MYD04_L2 气溶胶光学厚度日数据, 对乌鲁木齐市气溶胶光学厚度时空分布特征进行了分析。

福建省厦漳泉地区正处于经济快速发展的阶段, 人为活动强烈, 工业污染物排放增加, 产生了大量的人为气溶胶粒子。因此, 研究该地区的气溶胶质量浓度具有区域代表性。本研究第一次利用 Terra-MODIS 和 Aqua-MODIS 两个传感器反演的气溶胶产品, 合成不同时间尺度信息, 利用时空分析方法对厦漳泉地区气溶胶质量浓度的时空变化特征进行研究, 并分析厦漳泉 3 个城市的差异及其影响因素, 以期对厦漳泉地区空气质量评价和空气污染预防与治理提供科学依据。

1 数据来源与处理

本文使用的 MODIS 气溶胶产品时间跨度为 2002 年 1 月—2017 年 12 月, 存储格式为 HDF 数据格式, 空间分辨率为 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 。先从 HDF 文件里面提取出气溶胶数据, 然后处理成 ArcGIS 可以读写的 Shapefile 文件格式。在数据处理和分析上, 通过计算区域平均值来分析气溶胶的时间变化特征; 对多年的数据求平均值, 分析该地区的空间分布特征; 并利用变异系数研究时间上的波动和空间上的异质性。时间上的波动情况和空间的异质性分别用时间和空间变异系数来表征。变异系数 (C_v) 为标准差 (σ) 与平均数 (μ) 的比值, 计算公式为: $C_v = \sigma/\mu$ 。其中: C_v 为时间变异系数时, σ 和 μ 分别根据时序变化的数据来计算; 而 C_v 为空间变异系数时, σ 和 μ 分别根据区域空间分布的数据来计算。

2 结果与分析

2.1 气溶胶质量浓度的时序特征

为研究厦漳泉地区气溶胶质量浓度的时序变化特征,对该区域的数据进行月合成、插值和区域统计。图 1 为 2002—2017 年厦漳泉地区区域气溶胶质量浓度的平均值和标准差的变化。标准差是利用区域内每个像元的数值来计算,它能说明气溶胶质量浓度空间分布的差异。从图 1 可以得出,2002—2017 年气溶胶质量浓度呈逐渐减少的趋势。具体的变化趋势可以分为三个阶段:1) 2002—2007 年间呈现平缓的增长。2002 年气溶胶质量浓度为 $22.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,到 2007 年末为 $28.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,增长了 $6.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,大约增长了 27.10%。2) 2008—2011 年,没有明显的变化,较为稳定。2008 年初气溶胶质量浓度为 $25.7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,2011 年末为 $25.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。3) 2012 年后,气溶胶质量浓度开始出现明显的下降趋势。2012 年初气溶胶质量浓度为 $28.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,到 2017 年末为 $17.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,减少了 $11.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,大约少了 41.00%。从 2002 年到 2017 年 16 年的时间里,气溶胶质量浓度减少了 $5.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,大约减少了 23.10%。由于这 16 年城市化和工业化进程减缓,生态环境逐步恢复,森林覆盖面积渐渐提高,使得排放进入大气的人为气溶胶逐渐减少。由图 1 还可以看出,厦漳泉地区气溶胶质量浓度平均值波动较大,最大值出现在 2012 年 4 月,大约为 $50.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$;最小值出现在 2016 年 12 月,大约为 $9.9 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

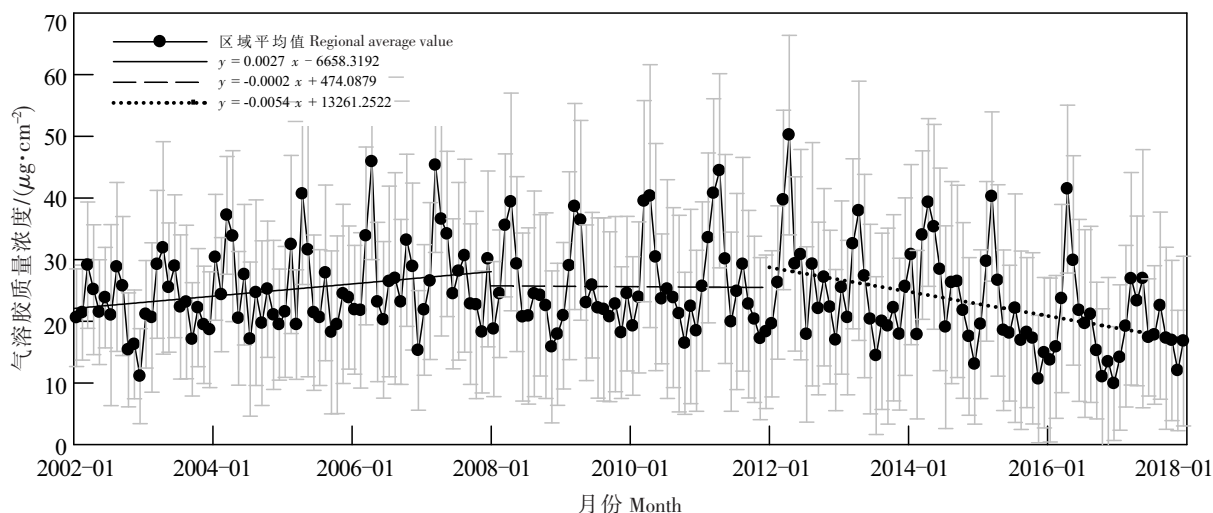


图 1 厦漳泉地区区域月平均气溶胶质量浓度时间序列的变化特征

Fig.1 Variations characteristics of the time series of regional monthly mean value of aerosol mass concentration of XZQ region

从图 2 可看出 3 市变化特征大体相似,但是厦门市平均气溶胶质量浓度高于漳州市、泉州市。厦门市多年平均气溶胶质量浓度为 $(40.1 \pm 3.8) \mu\text{g}/\text{cm}^2$,漳州市为 $(22.5 \pm 2.6) \mu\text{g}/\text{cm}^2$,泉州市为 $(24.7 \pm 2.7) \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。厦门市的气溶胶污染较大,主要在于市域面积较小,郊区森林覆盖较高的区域也小,经济发展水平又较高;而漳州市和泉州市的市域较大,有大量的偏远山区,森林覆盖率高,空气质量好,因而气溶胶质量相对较低。由图 2 还可看出,漳州市和泉州市 2002—2017 年气溶胶质量浓度在时间变化上与整个区域的变化特征相似,可以分为三个阶段;并可分析得出漳州市和泉州市的变化特征相似性较高,相关系数达到 0.92。同时图 2 也显示,厦门市 2002—2017 年的气溶胶质量浓度的时序变化,可分为二个阶段:2002—2012 年气溶胶质量浓度呈现增长的趋势,2012 年出现最大值,年平均值为 $45.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$;2013—2017 年出现逐渐下降的趋势,2017 年平均值为 $37.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,与 2012 年相比约下降了 16.34%。

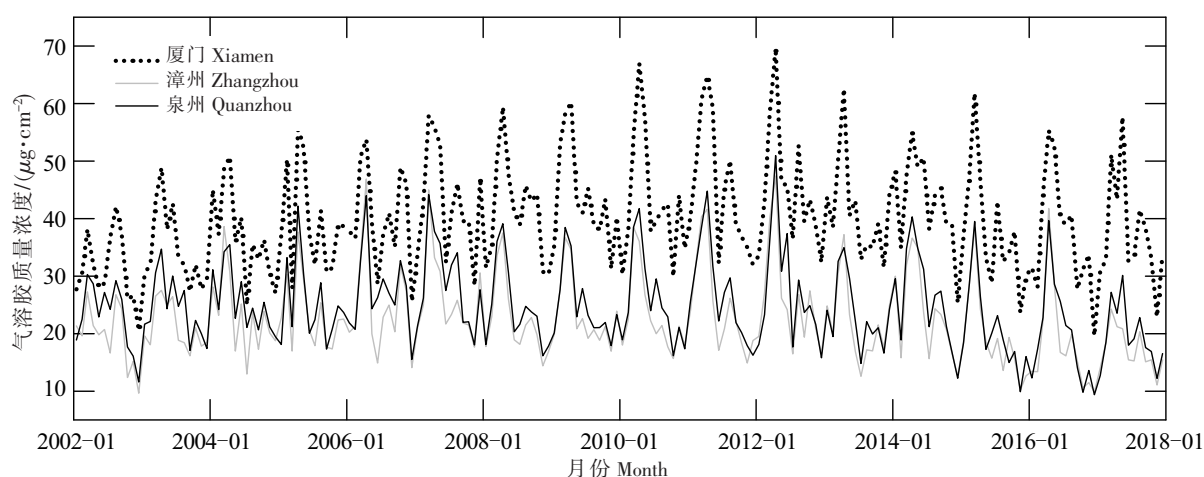


图2 厦门、漳州和泉州三市区月平均气溶胶质量浓度时间序列的变化特征

Fig.2 Variations characteristics of the time series of regional monthly mean value of aerosol mass concentration of Xiamen,Zhangzhou and Quanzhou cities

2.2 气溶胶质量浓度的月变化特征

图3~图5反映出厦漳泉地区气溶胶呈现明显的季节变化。在时间分布上,区域气溶胶质量浓度最大值出现在4月,为 $(37.1 \pm 7.2) \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。在空间分布上,整个区域的气溶胶质量浓度4月普遍大于其他月份,空间异质性最小,空间变异系数为0.39。究其原因在于:春季天气回暖,大气的相对湿度增大,细粒子模态的气溶胶吸湿效应增强,而且东季风减弱,不利于污染物扩散^[11],气溶胶停留在大气中的时间较长,从而导致气溶胶质量浓度达到最大值。

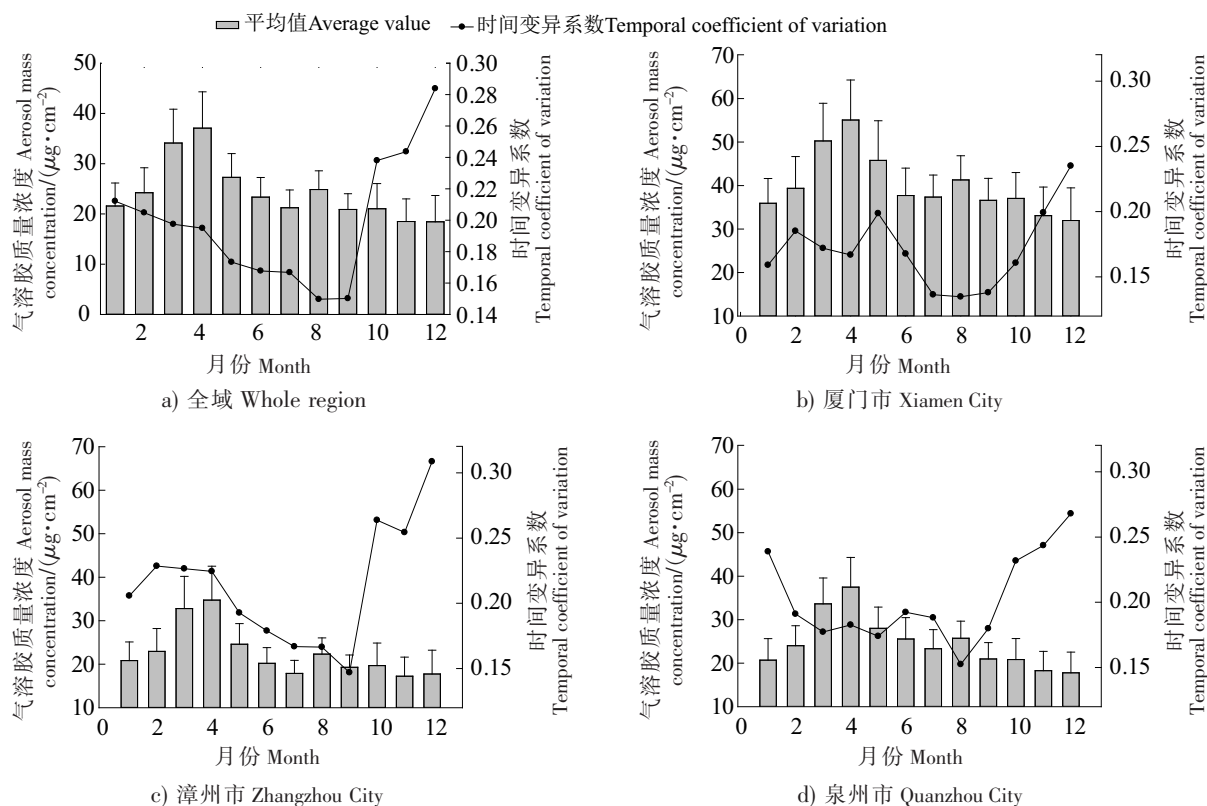


图3 2002—2017年厦漳泉地区及三个城市气溶胶质量浓度的多月变化特征

Fig.3 Variation characteristics of multi-monthly mean aerosol mass concentration of 3 cities from 2002 to 2017 over Xiamen,Zhangzhou and Quanzhou region

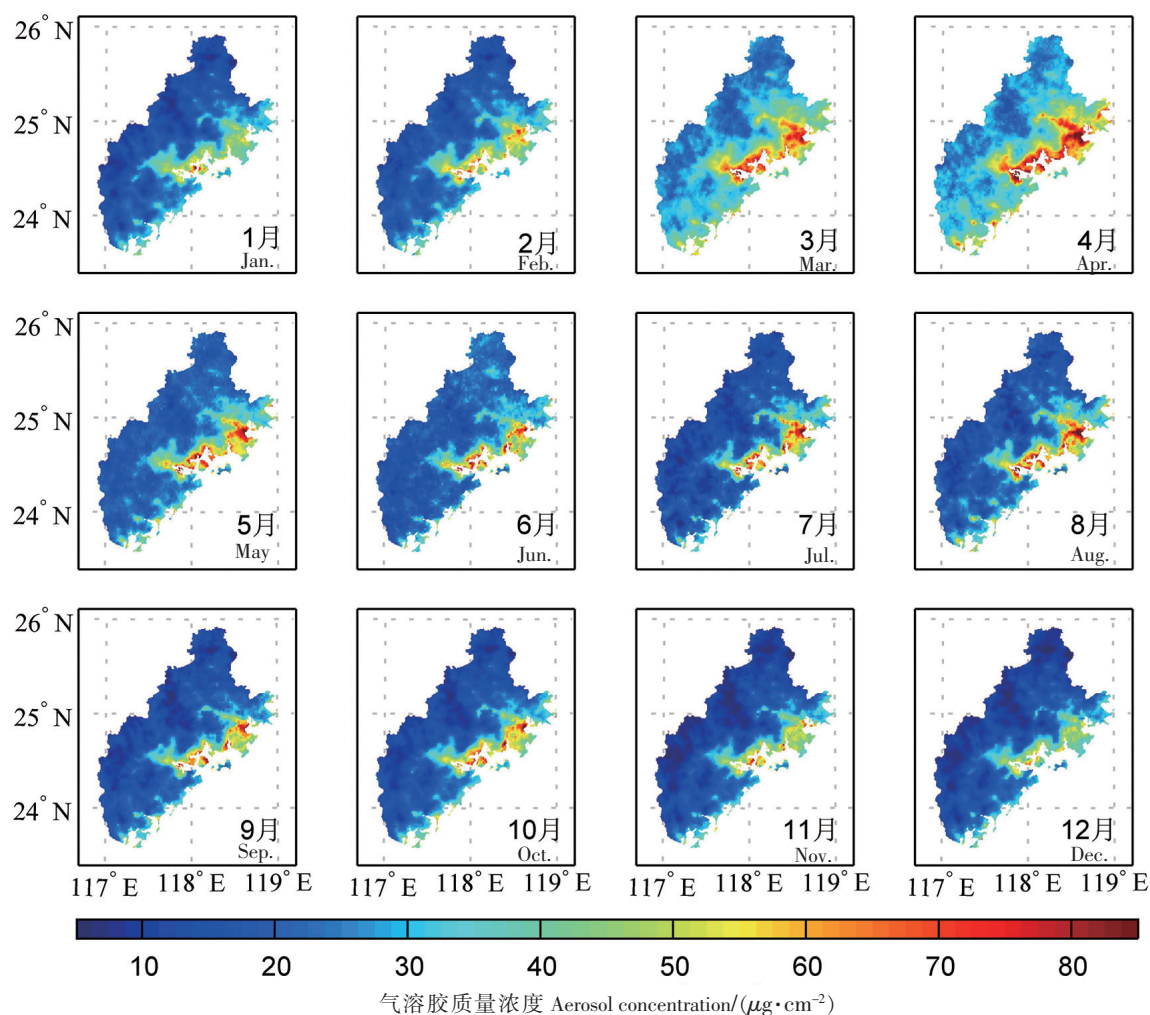


图 4 2002—2017 年季节平均气溶胶质量浓度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of seasonal mean aerosol mass concentration from 2002 to 2017

从 5 月到 10 月, 整个区域的空间分布特征相近, 其原因可能是: 1) 由于夏季的降水清除了一部分气溶胶粒子, 降低了气溶胶质量浓度。2) 在植被覆盖较多、人为影响较小的地区受到生物气溶胶的影响较大。3) 夏季空气中相对湿度大, 气溶胶粒子吸湿增长现象更为明显。4) 夏季的太阳辐射更加强烈, 光化学反应强本应使气溶胶保持较高的浓度; 但是, 夏季主要为雨季, 大量的降水可以清除大气中的气溶胶粒子, 使得从 5 月开始气溶胶质量浓度有较大的下降。

气溶胶质量浓度最小值常出现在 11 或 12 月。秋末冬初, 整个区域的气溶胶质量浓度出现最低值, 区域平均为 $(18.4 \pm 5.2) \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。主要原因为: 受冷高压系统影响, 北方来的干冷气团空气相对比较洁净, 空气相对湿度小, 气溶胶的吸湿增长效应不明显; 另外, 本地排放较小, 使得气溶胶质量浓度较小。

冬季 1 月, 整个区域的气溶胶质量浓度开始增大, 平均为 $(21.8 \pm 11.1) \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 空间变异系数为 0.51, 相较夏季和秋季而言, 空间异质性较高。在 12 月份变异系数达到最大值 0.28 后, 空间异质性也进一步增大, 空间变异系数大约为 0.65, 说明气溶胶质量浓度的空间差异最大。从图 4 的变异系数可以得出, 9 月变异系数最小 (0.15), 说明这个月份的气溶胶质量浓度的波动最小; 9 月后, 波动的情况增大; 在 12 月达到最大值, 之后逐渐下降, 下降持续到第二年的 8 月。厦门地区 3 个城市气溶胶特性的季节变化一致, 但是从数值上, 厦门市 12 个月的气溶胶质量浓度明显高于漳州市

和泉州市。3个城市的气溶胶质量浓度在时间上波动的情况有较大的差异, 其波动最小值, 漳州市出现在9月, 其他两个市是在8月; 波动最大值3市都出现在12月, 特别是漳州市波动的幅度最大。

2.3 气溶胶质量浓度的空间分布特征

从图5可以注意到2002—2017年区域气溶胶质量浓度的值为 $10 \sim 85 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 平均约为 $(26.3 \pm 13.2) \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 变异系数约为0.5。

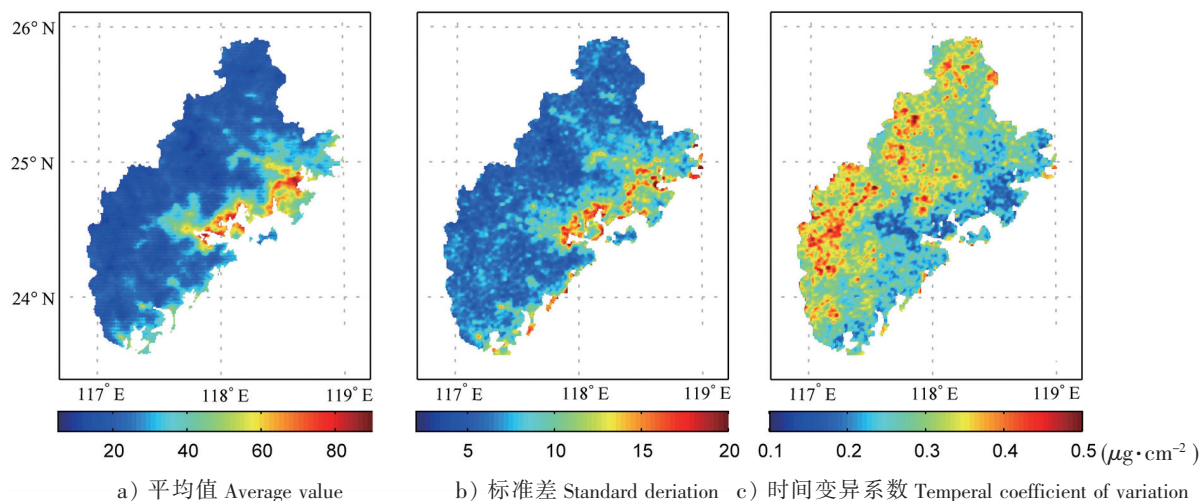


图5 2002—2017年多年年平均气溶胶质量浓度的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of multi-yearly mean aerosol mass concentration from 2002 to 2017

气溶胶质量浓度的高值区主要出现在厦门市、漳州市和泉州市沿海的城区, 泉州市沿海城区质量浓度最高, 三个市沿海城区的高值分别为 $85, 75, 65 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。沿海高值区, 从泉州市城区向南蔓延至漳州市城区。由于城市化和经济的快速发展, 在工农业较发达、人类活动频繁的地区, 气溶胶的人为排放较高, 即气溶胶质量浓度在一定程度上反映出当地的工业废气排放量。此外, 气溶胶与气象条件、地表特征和地形等因素密切相关。在厦漳泉地区的西北部, 人为活动较少, 且有大片森林覆盖, 而林地植被叶片表面具有一定的湿润度和粗糙度, 对大气气溶胶具有显著的阻滞作用, 同时可以吸附大气中的气溶胶粒子, 起到清除粒子的作用, 因此, 这些地区气溶胶质量浓度较小。在厦漳泉沿海的城区, 人为活动比较为强烈, 汽车尾气和工业废气排放大, 同时, 城市地表特征也影响气溶胶的扩散, 导致气溶胶光学厚度较高, 气溶胶质量浓度较高, 可达 $85 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

厦漳泉市区和郊县城区的内部空间分布较为一致, 反映出了城市/工业型气溶胶和自然型气溶胶空间分布特征的差异。高值区时间变异系数较小, 这些区域主要是本地源排放, 因而年际间波动较小; 而低值区由于受到周边其他区域的影响, 年际间波动较大。

3 结论

本研究利用 Terra-MODIS 和 Aqua-MODIS 两个传感器反演的气溶胶产品, 合成月、季、年不同时间尺度的气溶胶信息, 利用时空分析方法研究了厦漳泉地区气溶胶质量浓度的时空变化特征, 以及厦漳泉3个城市的差异。具体的结论如下:

1) 2002—2017年厦漳泉地区区域气溶胶质量浓度呈逐渐减少的趋势, 具体的变化趋势可以分为三个阶段: 在2002—2007年间呈现平缓的增长, 这个阶段增长了 $6.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 约增长了27.10%; 2008—2011年, 没有明显的变化; 2012年后, 气溶胶质量浓度开始出现明显的下降趋势, 这个阶段减少了 $11.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 约少了41.00%。从2002年到2017年的16年里, 气溶胶质量浓度减少了 $5.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 约少了23.10%, 说明该地区的空气质量有较明显的改善。

2) 2002—2017年漳州市和泉州市气溶胶质量浓度时间序列的变化特征与厦漳泉整个区域的相

似。但厦门市气溶胶质量浓度的时序变化有点不同,它分为 2 个阶段:2002—2012 年气溶胶质量浓度呈现增大的趋势,增长持续到 2012 年末出现最大值;2012 年后逐渐下降,这一趋势持续到 2017 年末。厦漳泉地区 3 个城市 12 个月气溶胶质量浓度的变化特征一致。从数值上看,厦门市各月的气溶胶质量浓度明显高于漳州市和泉州市。

3) 厦漳泉地区气溶胶质量浓度呈现明显的季节变化。最大值出现在 4 月,区域平均值为 $(37.1 \pm 7.2) \mu\text{g}/\text{cm}^2$,空间异质性最小;进入 5 月,气溶胶质量浓度出现较大的下降;从 5 月到 10 月,整个区域的气溶胶空间分布特征相近,9 月份的气溶胶质量浓度的波动最小;到 12 月份,气溶胶质量浓度出现最低值, $(18.4 \pm 5.2) \mu\text{g}/\text{cm}^2$,同时空间异质性达到最大(空间变异系数约为 0.65)。

4) 厦漳泉地区气溶胶质量浓度的分布空间异质性明显,变化范围为 $10 \sim 85 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。2002—2017 年多年区域平均气溶胶质量浓度大约为 $(26.3 \pm 13.2) \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。气溶胶质量浓度的高值区主要出现在泉州市、厦门市和漳州市沿海的城区,三个城区的高值分别为 85, 75, $65 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,泉州市城区最高。高值区时间变异系数较小,年际间波动较小,可以反映出这些区域的气溶胶质量浓度主要受本地源排放的影响。而低值区明显受到周边其他区域的影响,年际间波动较大。

致谢:本研究 MODIS 数据来自美国戈达德地球科学数据和信息服务中心 (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center),作者在此表示感谢。

[参 考 文 献]

- [1] SUESS D T, PRATHER K A. Mass spectrometry of aerosol [J]. Chemical Reviews, 1999, 99: 3007-3035.
- [2] 任丽新,游荣高,吕位秀,等. 城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响 [J]. 气候与环境研究, 1999, 4(1): 67-73.
- [3] IPCC. Climatechange 2013: the physical science basis [R]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [4] GASSÓ S, DEAN A H. On the retrieval of columnar aerosol mass and CCN concentration by MODIS [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (D1): 4010. DOI:10.1029/2002JD002382.
- [5] LI J, BARBARA E C, ANDREW A L. How well do satellite AOD observations represent the spatial and temporal variability of $\text{PM}_{2.5}$ concentration for the United States? [J]. Atmospheric Environment, 2015, 102: 260-273.
- [6] XIAO Z Y, JIANG H, SONG X D. Aerosol optical thickness over Pearl River Delta Region, China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(1): 258-272.
- [7] KEES DE HOOGH, HARRIS HERITIER, MASSIMO STAFOGGIA, et al. Modelling daily $\text{PM}_{2.5}$ concentrations at high spatio-temporal resolution across Switzerland [J]. Environmental Pollution, 2018, 233: 1147-1154.
- [8] 张亮林,潘竟虎,张大弘. 基于 MODIS 数据的中国气溶胶光学厚度时空分布特征 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(11): 4431-4439.
- [9] 赵仕伟,高晓清. 利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 [J]. 环境科学, 2017, 38(7): 2637-2646.
- [10] 玛依拉·热西丁,丁建丽,张喆,等. 乌鲁木齐市气溶胶光学厚度时空分布特征及潜在来源分析 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1611-1620.
- [11] 庄马展. 厦门大气气溶胶的化学特征研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(5): 657-660.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)