

珠三角地区长时间序列气溶胶时空变化特征分析

范萌¹, 张胜敏², 陈良富¹, 陶金花¹, 苏林¹, 王甜甜³, 葛强⁴

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 开封大学 信息工程学院, 河南 开封 475002;

3. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036;

4. 河南大学 计算机与信息工程学院, 河南 开封 475004

摘要: 本文通过对2000年—2013年长时间序列的MODIS气溶胶产品进行统计, 分析了珠三角地区气溶胶光学厚度(AOD)和细粒子光学厚度(FAOD)的空间分布特征以及年度和季节变化特点, 有助于深入研究珠三角地区颗粒物污染水平变化及颗粒物的排放与输送等。研究结果显示珠三角地区中部为AOD高值区, 东西两翼地区为AOD低值区。AOD和FAOD的最高值通常分别出现在春季和秋季, 最低值则通常都出现在冬季。2006年之后, 珠三角地区大气气溶胶总消光虽在部分年份仍有反弹上升的现象出现, 但已有明显降低。然而, 该地区细粒子消光在2000年—2012年期间则呈逐年增加的趋势, 且其空间差异性也越加显著, 细颗粒物污染仍需进一步控制。

关键词: AOD, FAOD, MODIS, 珠三角地区

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A

引用格式: 范萌, 张胜敏, 陈良富, 陶金花, 苏林, 王甜甜, 葛强. 2016. 珠三角地区长时间序列气溶胶时空变化特征分析. 遥感学报, 20(6): 1413–1423

Fan M, Zhang S M, Chen L F, Tao J H, Su L, Wang T T and Ge Q. 2016. Analysis of long-term (2000–2013) spatio-temporal aerosol distribution over Pearl River Delta region in China by using MODIS data. Journal of Remote Sensing, 20(6): 1413–1423 [DOI:10.11834/jrs.20164264]

1 引言

气溶胶粒子是悬浮在大气中的多种固体微粒和液体微小颗粒的总称, 作为大气的重要组成部分, 它对大气环境、人体健康、能见度等方面有着重要影响, 同时也是影响全球气候变化的不确定因素之一。在过去的几十年中, 虽然国际上许多国家都致力于建立监测全球主要区域气溶胶光学特性、化学组分的地基监测站点, 但在许多地区仍难以反映区域范围内的气溶胶空间分布和变化趋势(Liu 等, 2010; Li 等, 2011)。而卫星遥感技术则可以提供全球或区域尺度上气溶胶的分布信息, 为认识大空间尺度上颗粒物分布、来源以及区域间传输过程提供有效手段(Zhang 等, 2004; Holmes和Morawska, 2006; Che 等, 2011;

Rodrigues-Silva 等, 2012)。

20世纪末以来, 国际上发射了一系列卫星以获取气溶胶光学特性的3维空间分布信息。其中, 搭载在Terra和Aqua卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)是探测气溶胶的重要仪器。目前, NASA已经发布了自2000年以来覆盖全球范围的气溶胶光学厚度(AOD)和其他光学参数的10 km产品, 诸多研究表明该产品在监测全球、区域和局地大气污染方面具有显著的应用价值, 尤其是在监测污染源的宏观分布方面具有很大的潜力(Barnaba和Gobbi, 2004; Chu 等, 2005)。

珠三角地区位于中国的东南部(图1), 经纬度范围约在21°—24°N、111.5°—115.5°E之间, 是中国典型的城市群区域之一, 该地区约占广东省面

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-05-11; 优先数字出版日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41130528, 41501373, 41471367); 广州市科技计划(编号: 2013J100002); 中国科学院遥感与数字地球研究所所长基金(编号: Y5SJ0700CX); 国家科技支撑计划(编号: 2014BAC21B00)

第一作者简介: 范萌(1986—), 女, 助理研究员, 现从事大气气溶胶遥感研究。E-mail: fanmeng@radi.ac.cn

通信作者简介: 葛强(1977—), 男, 副教授, 主要从事空间信息处理研究。E-mail: gq@henu.edu.cn

积的23.3%，但人口和地区生产总值则分别占到了全省的50%和79%(广东省2013年统计年鉴)。珠三角地区伴随经济的超常规发展的同时，区域内大气环境问题越来越突出(Chan和Yao, 2008; Zhang等, 2008; Zheng等, 2009)。近10多年来，该地区大气污染的复杂程度也引起了政府部门和越来越多学者的广泛关注，其中大量研究表明珠三角地区颗粒物，特别是细颗粒物污染形势仍然十分

严峻。目前，相关研究中珠三角地区气溶胶颗粒物特性的观测数据主要来自于离散的地面站点，而利用卫星遥感对该地区气溶胶时空分布情况进行十年以上长时间持续观测的研究仍十分有限。本文将通过对MODIS/Terra 2000年—2013年的气溶胶资料进行统计，并基于此长时间序列数据分析珠三角地区气溶胶光学厚度和细粒子光学厚度年际和季节变化趋势及其空间分布特征。

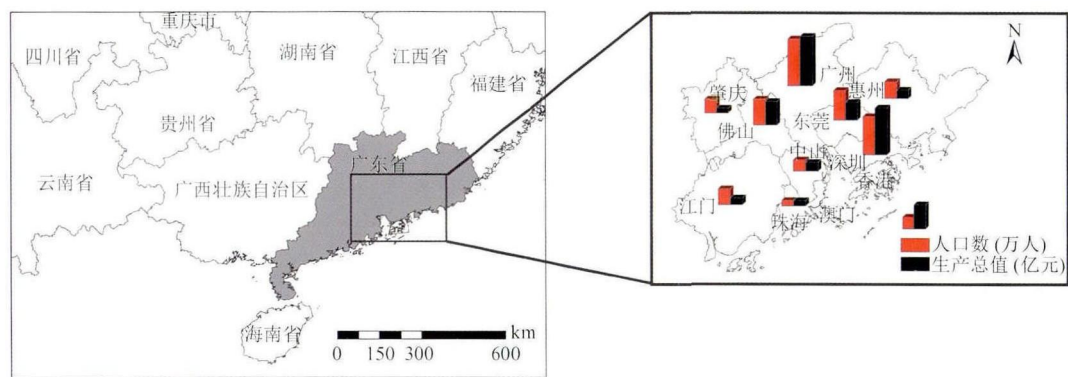


图1 珠江三角洲地区地理位置及地区人口数、生产总值分布图(广东省统计局, 2013)
Fig. 1 The location, population and GDP of PRD region(Statistics Bureau of Guangdong Province, 2013)

2 数据与方法

用于研究珠三角地区长时间序列气溶胶时空分布情况的数据来自于MODIS/Terra的550 nm波段处气溶胶产品(MOD04_L2, Version5.2)，该数据的空间分辨率为10 km。MOD04 AOD数据主要利用0.47 μm、0.66 μm和2.1 μm 3个波段反演获得，是目前应用最广泛、可信度最高的气溶胶光学参数数据之一(Kaufman等, 1997; Remer等, 2005)。在传统暗像元算法的基础上，5.2版本的MOD04产品算法中在计算可见光与中红外波段的反照率比值时考虑到了散射角(包含太阳天顶角和观测天顶角)、地表类型和归一化植被指数(NDVI)的影响。同时，算法中用到的气溶胶模型通过对全球AERONET观测数据进行聚类分析获得，并将中国大部分区域的气溶胶模型定义为中吸收型。Levy等人(2009)研究表明MODIS与AERONET的AOD相关系数由5.1版本的 $R=0.847$ 提高到了5.2版本的 $R=0.894$ 。在中国地区，Wang等人(2007)利用中国太阳分光观测网数据评估了MODIS AOD产品在中国地区不同生态类型和地理区域的适用性。He等人(2010)利用太阳光度计验证了长三角地区7个站

点的MODIS AOD数据，得到二者的相关系数为0.85，均方根误差为0.15，且有90%的样本点位于NASA预期的误差范围 $\nabla\tau=\pm0.05+0.15\tau$ 内。针对珠三角地区，Huang等人(2010)利用2004年1至11月地基太阳光度计数据对MODIS AOD产品进行检验，其检验的210个样本中有143个样本位于NASA预期的误差范围内，MODIS AOD与地基AOD的相关系数 R 达到0.79，此外，广州、番禺、南海和东莞4个观测站点的拟合度 R^2 依次为0.71、0.88、0.84和0.84。Tan等人(2009)以太阳光度计观测AOD为准，验证2006年1月至2007年1月珠三角地区MODIS AOD结果，表明MODIS AOD在珠三角地区具有较好的量化精度，地面观测AOD和MODIS AOD样本离散点的拟合度 R^2 为0.77，均方根误差为0.136。

AOD的细粒子比(FMF)为MOD04气溶胶产品中公布的一个用于描述粒子尺度分布的产品，是细粒子气溶胶光学厚度占整个气溶胶光学厚度的比例。大气中的细粒子气溶胶主要来自于人为的矿物质和生物质燃烧过程，因此，FMF在一定程度上有助于识别气溶胶的人为源。Kleidman等人(2005)通过将MODIS和AERONET的FMF反演结果

进行比对发现，MODIS会略微高估以沙尘粒子为主的气溶胶模型的FMF，同时会低估以烟尘等污染性粒子为主的气溶胶模型的FMF。Ramachandran (2007)比对了印度南部坎普尔地区MODIS和AERONET的FMF月均值，研究表明在大多数月份二者具有很好的一致性。Levy等人(2010)比对了MODIS的细粒子AOD和AERONET的细粒子AOD，结果表明二者的相关系数 R 达到0.81。王宏斌等人(2011)比对了中国地区香河和太湖两个站点的MODIS和AERONET的细粒子AOD(FAOD，即 $FAOD=AOD*FMF$)，其中，香河站的相关系数 R 为0.89，太湖站为0.72。珠三角地区虽尚未有相关研究，但Choi等人(2009)利用该地区MODIS细粒子AOD反演获得 PM_{10} ，且与地基观测结果的相关性较好。因此，MODIS AOD和FAOD具备用于研究区域范围内气溶胶特性时空分布的能力。

为研究珠三角地区颗粒物污染长时间变化规律特点，将2000年—2013年10 km MOD04的AOD和FAOD日均值数据处理为月均值和年均值，并最后计算得到该地区这两个参数14年中的多年平均值(该数据已剔除了云的影响)。

3 结果与分析

3.1 珠三角地区气溶胶分布概况

2000年—2013年，珠三角地区AOD和FAOD的多年均值分布如图2所示。AOD的高值区主要分布在佛山、中山北部、东莞西南部、广州南部和深圳西北部等人口相对密集和经济较为发达的珠三角中部地区，这除了与该地区汽车尾气排放量大密切相关外，还由于该地区分布有许多如皮革厂、水泥厂、陶瓷厂和金属加工厂等，这些工厂所其造成的粉尘污染也是珠三角地区颗粒污染的主要来源之一。尤其是对于珠三角大气污染最为严重的佛山市，作为中国著名的陶瓷生产基地，陶瓷工业生产中消耗大量的能源燃料并排放大量的烟尘和粉尘是导致该地区大气污染问题最重要的原因，此外，加之佛山市地处珠三角中部，周边区域污染物输送更加剧了佛山上空的污染程度。珠三角地区三面环山，东部、西部和北部山区颗粒物浓度易受地形影响，同时由于山区植被覆盖较高，所以这些地区的AOD值也相对较低。

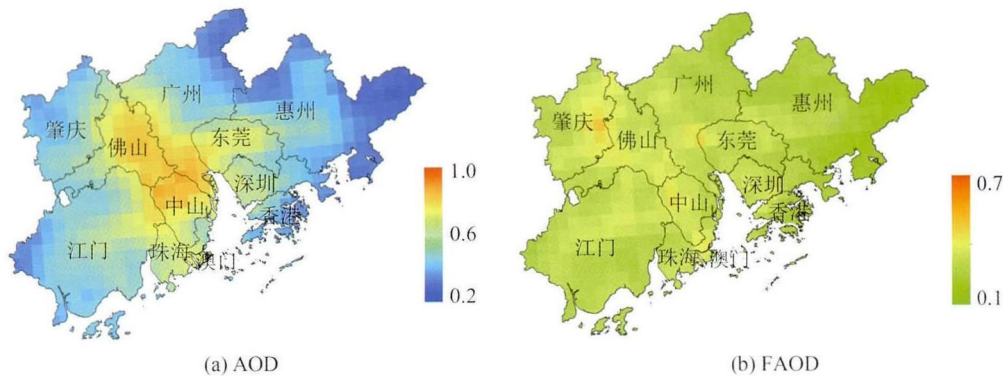


图2 2000年—2013年珠三角地AOD和FAOD多年平均值空间分布图
Fig. 2 The distribution of multi-year averaged AOD and FAOD over PRD region in the period of 2000—2013

细粒子光学厚度FAOD在珠三角地区的2000年—2013年均值分布也存在一定的空间差异性，但并没有AOD在地区间的差异性显著。FAOD的高值出现在肇庆、广州、东莞和佛山地区，与广东省环境保护厅发布的城市空气质量排名(<http://www.gdep.gov.cn>)中细颗粒物($PM_{2.5}$)浓度的排名相对一致。其中，FAOD的最高值出现在肇庆市，这与肇庆地区分布有较多陶瓷工厂排放大量的颗粒物，受西北部山区阻拦导致大量污染物无法及时

扩散有关。此外，由于珠三角地区雨季盛行东南风、旱季盛行东北风，肇庆处于下风向，周边地区污染物的传输也进一步加剧了肇庆地区的细粒子污染。FAOD低值区分布与AOD分布情况类似，主要位于广州北部和惠州等地区。

3.2 珠三角地区气溶胶年际变化趋势分析

图3给出了珠三角地区2000年—2013年的AOD年均值空间分布情况，表1则给出了该地区每年AOD的最高值、最低值、平均值，以及AOD>

0.5和AOD>1.0的区域面积与珠三角面积之比($P_{0.5}$ 和 $P_{1.0}$)。由图3和表1可以看出14年间气溶胶显著的年际变化趋势。2000年—2006年,珠三角颗粒物污染程度逐年加重,AOD的平均值由0.41增加至0.619,其中,佛山、中山、东莞和深圳四市7年间AOD的增长均超过了0.3。同时,污染高值区范围也在逐年扩大,例如,AOD>0.5的面积比在2000年—2006年间增长了约50%左右,且佛山部分区域逐渐有AOD>1.0的情况出现。为保障2010年广州亚运会空气质量全面改善,2006年之后,珠三角地区开展了区域大气复合污染防治研究,并启动了区域大气污染联防联控工作。因此,从图

3和表1也可以看出,2006年—2010年期间空气质量保障措施开始逐步发挥效应,污染高值区范围逐年缩小, $P_{0.5}$ 由2006年的72.4%减小为46.96%,同时期AOD数值也基本呈降低趋势。然而,在2011年—2012年间,珠三角地区的AOD出现了一个明显的上升反弹,但在2013年又有明显回降,并基本达到近10年内的最低水平。总体看来,2004年—2013年十年中珠三角地区AOD处于降低与反弹反复出现的时期,但整体AOD已有明显下降,这与整个珠三角地区,乃至整个广东省全面实施产业结构调整,严格执行空气质量监管,控制新增大气污染源等措施密切相关。

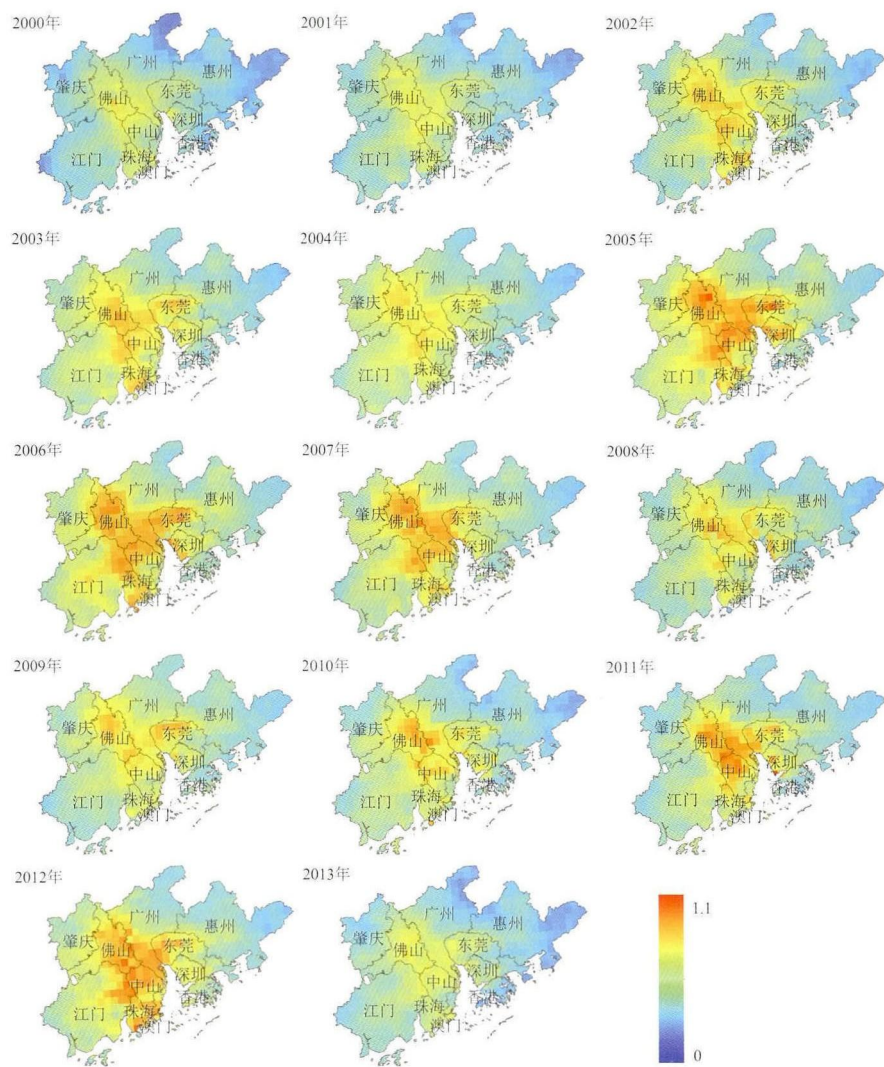


图3 2000年—2013年珠三角地区AOD年平均值空间分布图

Fig. 3 The distribution of annual mean AOD over PRD region for 2000—2013

图4给出了2000年—2013年珠三角地区FAOD的年均值空间分布情况,表1第5列给出了该

地区FAOD的年均值。与AOD不同,整个珠三角地区的FAOD均值在2000年—2012年期间基本呈现出

一个逐年增加的趋势，但在2013年有明显回落。此外，2000年—2004年期间，珠三角地区城市间FAOD差异并不显著，在2005年之后，佛山、肇庆、东莞、中山等高值地区与惠州、江门等低值地区间FAOD的差异逐渐增加。表2中列出了2006年—2013年香港理工大学AERONET站点

(114.18°E, 22.30°N)的FAOD年均值(2005年之前数据缺失)，并同时给出了该点对应的MODIS FAOD数据。虽然该点的FAOD年际变化趋势并不能完全反映整个珠三角地区FAOD的时空变化，但仍可看出MODIS和AERONET的FAOD年均值具有较好的一致性，二者的绝对误差均在0.08以内。

表1 珠三角地区2000年—2013年气溶胶相关参数及相对湿度年均值表
Table 1 The annual mean aerosol-related parameters and RH values over PRD region

年份	AOD _{mean}	P _{0.5} /%	P _{1.0} /%	FAOD _{mean}	RH/%
2000	0.410	25.230	0.000	0.271	...
2001	0.446	31.801	0.000	0.279	...
2002	0.518	45.956	0.000	0.319	...
2003	0.553	58.118	0.000	0.336	...
2004	0.581	68.140	0.000	0.341	75.77
2005	0.617	71.193	0.550	0.368	79.09
2006	0.619	72.426	0.184	0.369	75.05
2007	0.570	60.478	0.184	0.369	76.28
2008	0.508	45.756	0.000	0.370	77.00
2009	0.530	49.358	0.000	0.376	76.26
2010	0.503	46.961	0.000	0.378	80.70
2011	0.522	44.199	0.368	0.398	78.09
2012	0.589	62.799	0.368	0.439	81.65
2013	0.437	32.228	0.000	0.333	...

表2 香港理工大学(114.18°E, 22.30°N)AERONET与MODIS 2006年—2013年细粒子气溶胶光学厚度年均值
Table 2 Annual mean FAOD of AERONET and MODIS at PolyU site(114.18°E, 22.30°N)for 2006年—2013年

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
AERONET_FAOD	0.557	0.443	0.483	0.448	0.357	0.461	0.500	0.406
MODIS_FAOD	0.483	0.374	0.442	0.422	0.369	0.409	0.455	0.333

综合图3和图4可以看出，珠三角地区细粒子对总消光的贡献比例自2006年起逐年增加，但颗粒物的整体消光却已有明显下降。虽然许多研究表明近年来珠三角地区颗粒物浓度波动下降，但从粒子成分来看，大气中浓度下降的主要是沙尘等含钙离子的粗粒子和含硫酸盐的细粒子，而二次有机碳、硝酸盐和铵盐等代表新型复合污染的水溶性气溶胶细粒子却明显增加。吴兑等(2014)对广州市的研究结果也表明，PM_{2.5}所占比例并不一定随PM₁₀的质量浓度降低而降低，在一些年份中PM_{2.5}质量浓度及其所占比例甚至有较大程度的增

加。此外，地基监测的PM_{2.5}为气溶胶粒子单位体积内的“干”质量浓度，而MODIS AOD反映的则是“湿”消光系数在垂直方向上积分的情况，二者表征的是不同的物理量。根据相关研究(付晓辛，2015)及本文处理得到的2004年—2012年间的GEOS-Chem模式数据(表1)显示近年来珠三角地区空气相对湿度呈总体波动上升的趋势，水溶性细粒子在经过吸湿增长后，因散射系数变大(可达3—6倍)可使得消光系数显著增加(吴兑等，2006；李菲等，2012)。因此，即使是在较低的细粒子质量浓度情况下，由于相对较大的大气湿度，粒子

在吸湿增长后也可导致较大的FAOD。虽然本文所得结果成因仍需结合地面观测和模式分析等手段进行进一步的深入分析，但仍可表明珠三角地区的颗粒物污染情况确实已有显著改善，除与气象因素相关外，也与该地区持续推行严格的大气污染减排措施有密切关系，但也只有更大程度上控制细颗粒物的污染水平，才能使得珠三角地区的空气质量水平得到根本性的改善。

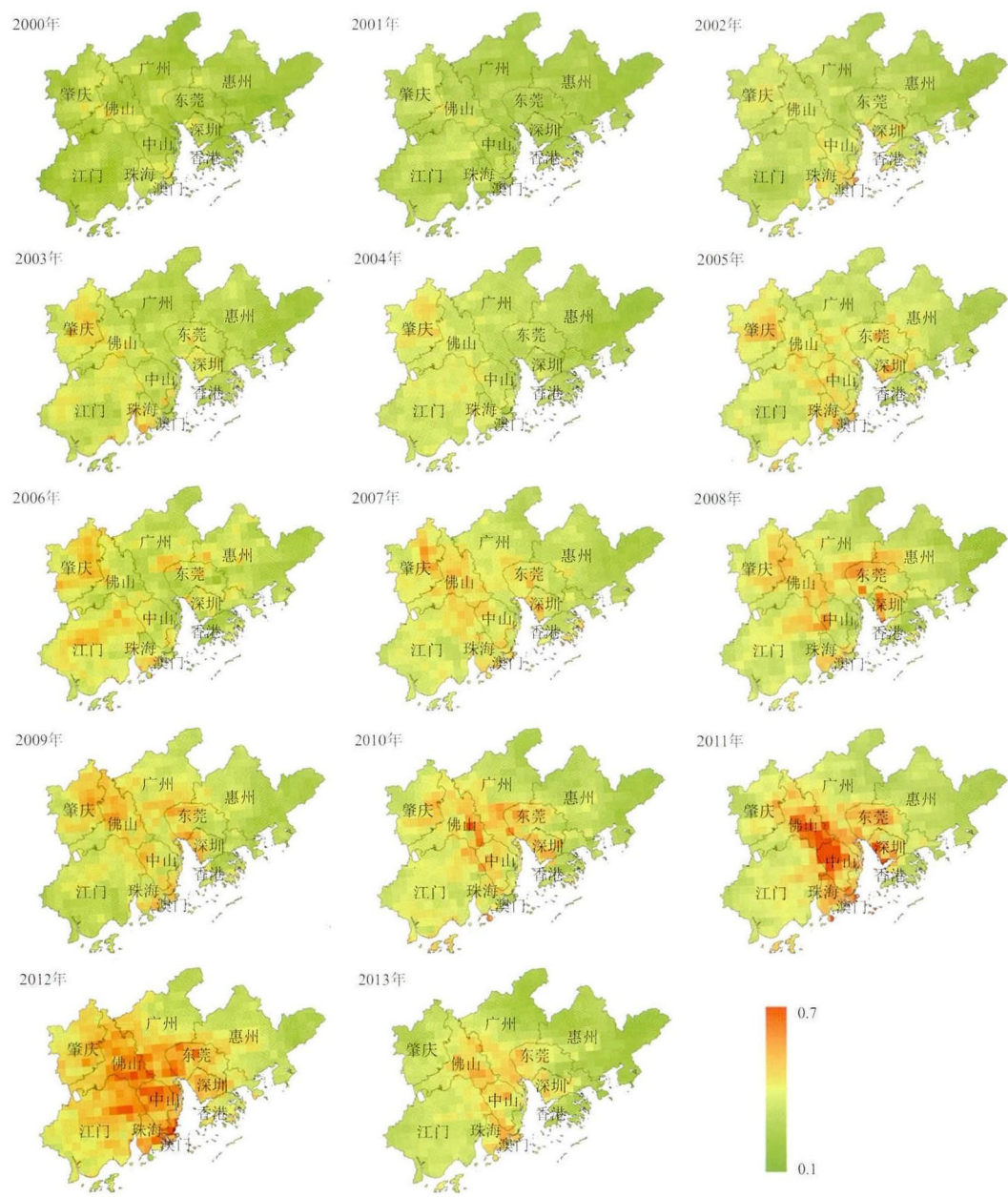


图 4 2000年—2013年珠三角地区FAOD年平均值空间分布图
Fig. 4 The distribution of annual mean FAOD over PRD region for 2000—2013

3.3 珠三角地区气溶胶季节变化趋势分析

为分析珠三角地区气溶胶的季节变化特征，本文首先计算得到了2000年—2013年每年AOD和FAOD的月均值并以月均值为基础而得到了珠三角地区的AOD和FAOD的季均值分布(图5)，并在此

基础上得到了整个珠三角地区在14年中总的月平均值及表征年际间波动程度的标准差(图6)。由于珠三角地区气溶胶的时空分布具有较好的一致性和规律性，因此，本文中只给出了2012年气溶胶的季均值空间分布图。

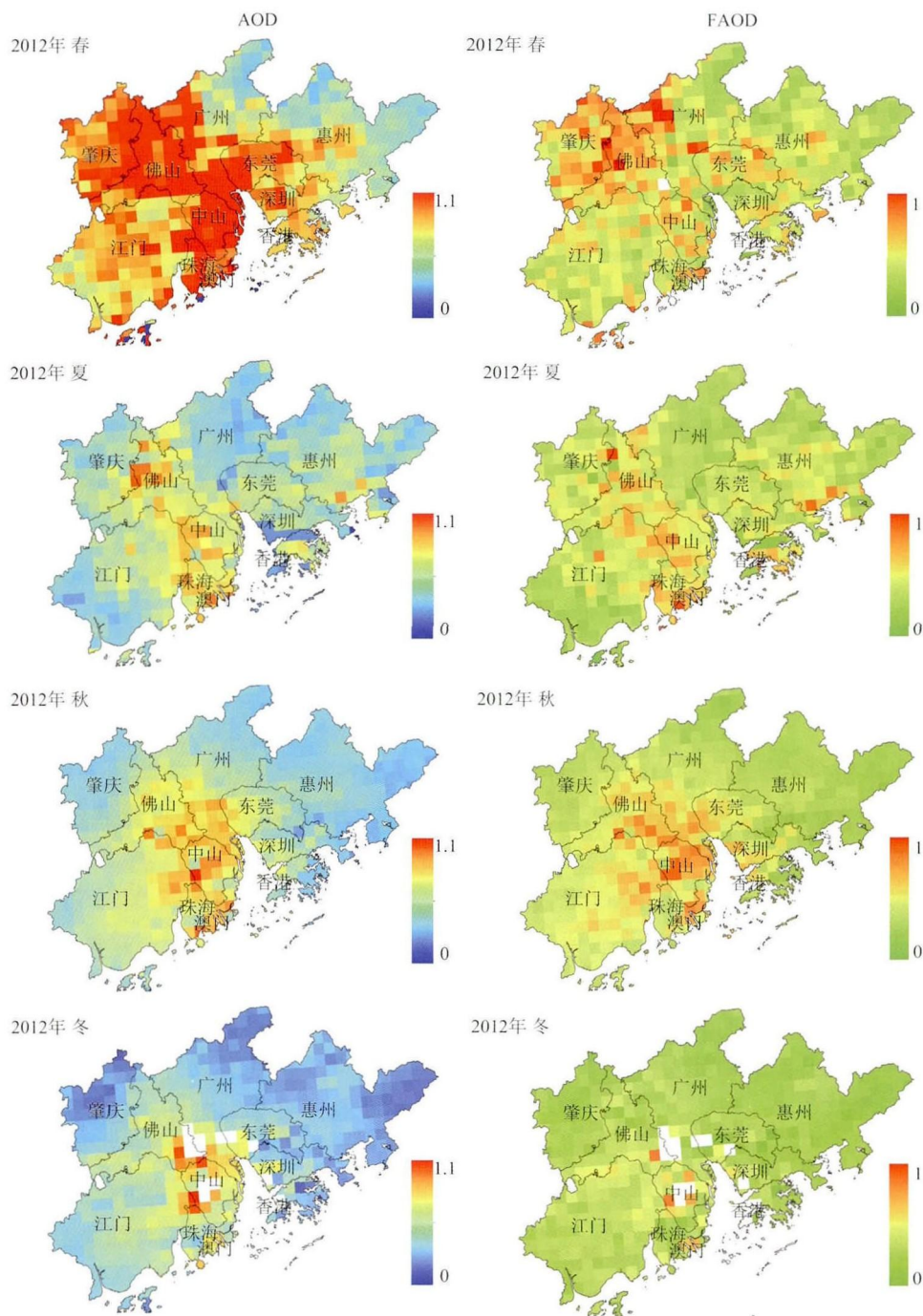


图5 珠三角地区2012年AOD和FAOD的季均值分布图

Fig. 5 The distribution of seasonal mean AOD and FAOD over PRD region in 2012

根据图5和图6可以看出,珠三角地区AOD的最高值通常出现在春季,夏季和秋季次之,冬季则为该地区AOD最小的季节。其中,AOD的最大值 0.72 ± 0.13 出现在4月,最小值 0.39 ± 0.10 出现在11月。FAOD的季节分布情况与AOD基本类似,FAOD的最大值 0.45 ± 0.10 出现在9月,最小值 0.25 ± 0.05 出现在11月。春、夏两季珠三角地区相对湿度偏大,气溶胶粒子吸湿增长现象更为明显,同

时,春季由北方长距离输送而来的粗沙尘粒子也会对珠三角的空气质量造成不利影响,这也是春季AOD最大而FAOD相对较小的主要原因之一。受典型季风气候影响,珠三角地区夏季盛行偏南风,风由海洋吹向陆地,虽然南岭等山地的阻隔作用使得污染物容易积聚,但夏季降水的增加促进了气溶胶粒子的湿清除,最终使得夏季AOD和FAOD较春季分别有显著下降和增加。而珠三角地

区冬季AOD和FAOD均最小的分析结果与其冬季灰霾频发的实际情况并不矛盾,其原因主要在于AOD代表的是整层大气气溶胶的总消光效果,而

灰霾事件中较低的能见度则代表了大气边界层较低情况下的近地面气溶胶水平消光效果。

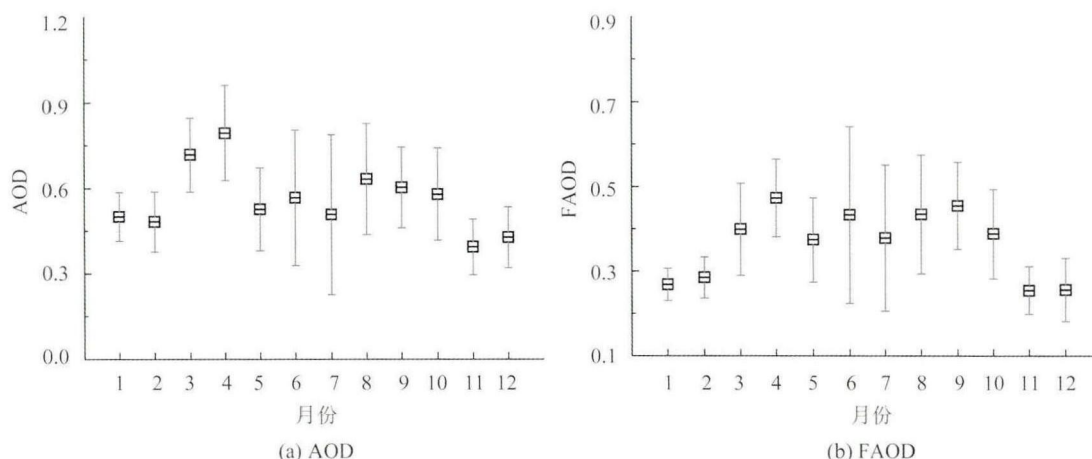


图6 珠三角地区2000年—2013年AOD和FAOD多年月均值变化趋势图(误差条表示标准差)

Fig. 6 The temporal variation of monthly mean AOD and FAOD over PRD region from 2000 to 2013(The error-bars represent the standard deviations)

此外,不同年份之间,夏季AOD的波动变化最大,其中7月份AOD的标准差达到0.28;而AOD在冬季的波动程度较小,如1月份的标准差只有0.086。对于FAOD而言,同样夏季FAOD的波动变化最大,其中6月份FAOD的标准差达到0.21;在冬季的波动程度较小,如1月份的标准差只有0.038。年际间AOD和FAOD月均值的变化除受本地排放源、下垫面等因素影响外,气象条件也是影响其波动的主要因素。

4 结论

本文针对中国大气污染重点防治区域之一的珠三角地区,利用2000年—2013年共14年的MODIS-Terra 10 km气溶胶产品数据给出珠三角地区气溶胶平均分布情况,并进一步分析了气溶胶的年际变化趋势和季节变化特征。结果表明:

(1)珠三角地区多年平均AOD高值区出现在佛山、中山北部、东莞西南部等中部地区,低值区则出现在广州、惠州、肇庆、江门等东西两翼地区。FAOD的地区间差异性没有AOD显著,其最高值主要位于肇庆地区。

(2)2000年—2006年间,珠三角地区AOD逐年增加,2006年之后,部分年份AOD虽然仍有反弹上升的趋势出现,但总体而言AOD仍呈下降趋

势,这与近年来珠三角地区采取严格的大气治理措施,并建立区域联防联控协作机制密不可分。

(3)2000年—2012年,珠三角地区FAOD基本呈逐年增加趋势,其空间差异性也越来越显著。因此,需严格控制细颗粒物污染水平才能使得珠三角地区空气质量得到进一步改善。

(4)珠三角地区大气气溶胶的季节和月变化除了与本地排放源有关外,还受季风、天气等因素影响。其中,AOD和FAOD的最高值通常分别出现在春季和秋季,最低值则通常都出现在冬季。

此外,MODIS气溶胶细粒子比FMF的算法仍未完全成熟,以及气溶胶产品容易将中国的重污染(如雾霾等)区域识别为薄云覆盖区域而不进行气溶胶光学厚度反演。在多云的珠三角地区,MODIS由于缺乏霾光学厚度,其AOD必然存在系统性低估的情况(Li等,2013)。然而,实现重污染背景下的不同像元的有效识别也一直是MODIS云、气溶胶产品升级的主要方向(Levy等,2013)。本研究下一步也将重点开展MODIS产品在珠三角地区的适用性分析。

志 谢 本研究所用MOD04数据由NASA GSFC提供,在此表示感谢。同时,感谢司一丹帮助处理及分析GEOS-Chem模式数据所做的辛苦工作。

参考文献(References)

- Barnaba F and Gobbi G P. 2004. Aerosol seasonal variability over the mediterranean region and relative impact of maritime, continental and Saharan dust particles over the Basin from MODIS Data in the year 2001. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(9/10): 2367–2391 [DOI: 10.5194/acp-4-2367-2004]
- Chan C K and Yao X H. 2008. Air pollution in mega cities in China. *Atmospheric Environment*, 42(1): 1–42 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.09.003]
- Che W W, Zheng J Y, Wang S S, Zhong L J and Lau A. 2011. Assessment of motor vehicle emission control policies using Model-3/CMAQ Model for the Pearl River Delta region, China. *Atmospheric Environment*, 45(9): 1740–1751 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.12.050]
- Choi Y S, Park R J and Ho C H. 2009. Estimates of ground-level aerosol mass concentrations using a chemical transport model with Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aerosol observations over East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114: D04204 [DOI: 10.1029/2008JD011041]
- Chu D A, Remer L A, Kaufman Y J, Schmid B, Redemann J, Knobelspiesse K, Chern J D, Livingston J, Russell P B, Xiong X and Ridgway W. 2005. Evaluation of aerosol properties over ocean from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) during ACE-Asia. *Journal of Geophysical Research*, 110: D07308 [DOI: 10.1029/2004JD005208]
- He Q S, Li C C, Tang X, Li H L, Geng F H and Wu Y L. 2010. Validation of MODIS derived aerosol optical depth over the Yangtze River Delta in China. *Remote Sensing of Environment*, 114(8): 1649–1661 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.02.015]
- Holmes N S and Morawska L. 2006. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: an overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment*, 40(30): 5902–5928 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.003]
- Huang J, Li F, Deng X J, Bi X Y and Tan H B. 2010. Evaluation of the MODIS aerosol depth product over urban areas of the pearl river delta. *Journal of Tropical Meteorology*, 26(5): 526–532 (黄健, 李菲, 邓雪娇, 毕雪岩, 谭浩波. 2010. 珠江三角洲城市地区MODIS气溶胶光学厚度产品的检验分析. *热带气象学报*, 26(5): 526–532)
- Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, Vermote E F, Chu A and Holben B N. 1997. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research*, 102(D14): 17051–17067 [DOI: 10.1029/96JD03988]
- Kleidman R G, O'Neill N T, Remer L A, Kaufman Y J, Eck T F, Tanré D, Dubovik O and Holben B N. 2005. Comparison of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Aerosol Robotic Network (AERONET) remote-sensing retrievals of aerosol fine mode fraction over ocean. *Journal of Geophysical Research*, 110: D22205 [DOI: 10.1029/2005JD005760]
- Levy R C, Remer L A, Tanré D, Mattoo S and Kaufman Y J. 2009. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol over dark targets from MODIS: Collections 005 and 051: Revision 2
- Levy R C, Remer L A, Kleidman R G, Mattoo S, Ichoku C, Kahn R and Eck T E. 2010. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10: 10399–10420 [DOI: 10.5194/acp-10-10399-2010]
- Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, Remer L A, Sayer A M, Patadia F and Hsu N C. 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6: 2989–3034 [DOI: 10.5194/amt-6-2989-2013]
- Li C, Hsu N C and Tsay S C. 2011. A study on the potential applications of satellite data in air quality monitoring and forecasting. *Atmospheric Environment*, 45(22): 3663–3675 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.032]
- Li F, Wu D, Tan H B, Bi X Y, Jiang D H, Deng T, Chen H H and Deng X J. 2012. The characteristics and causes analysis of a typical haze process during the dry season over Guangzhou area: a case study. *Journal of Tropical Meteorology*, 28(1): 113–122 (李菲, 吴兑, 谭浩波, 毕雪岩, 蒋德海, 邓涛, 陈欢欢, 邓雪娇. 2012. 广州地区旱季一次典型灰霾过程的特征及成因分析. *热带气象学报*, 28(1): 113–122)
- Li S S, Chen L F, Xiong X Z, Tao J H, Su L, Han D and Liu Y. 2013. Retrieval of the haze optical thickness in North China Plain using MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5): 2528–2540 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2214038]
- Liu Y, Christopher J P and Koutrakis P. 2010. Estimating regional spatial and temporal variability of PM_{2.5} concentrations using satellite data, meteorology, and land use information. *Environmental Health Perspectives*, 117(6): 886–892 [DOI: 10.1289/ehp.0800123]
- Ramachandran S. 2007. Aerosol optical depth and fine mode fraction variations deduced from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) over four urban areas in India. *Journal of Geophysical Research*, 112: D16207 [DOI: 10.1029/2007JD008500]
- Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, Mattoo S, Chu D A, Martins J V, Li R R, Ichoku C, Levy R C, Kleidman R G, Eck T F, Vermote E and Holben B N. 2005. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4): 947–973 [DOI: 10.1175/JAS3385.1]
- Rodrigues-Silva F, de Paula Santos U, Saldiva P H N, Amato-Lourenço L F and El Khouri Miraglia S G. 2012. Health risks and economic costs of absenteeism due to air pollution in São Paulo, Brazil. *Aerosol and Air Quality Research*, 12: 826–833 [DOI: 10.4209/aaqr.2011.12.0235]
- Statistics Bureau of Guangdong Province. 2013. Guangdong statistical

- yearbook. Beijing: China Statistics Press (广东省统计局. 2013. 广东统计年鉴. 北京: 中国统计出版社)
- Tan H B, Wu D, Deng X J, Bi X Y, Li F and Deng T. 2009. Observation of aerosol optical depth over the Pearl River Delta. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(6): 1146–1155 (谭浩波, 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 李菲, 邓涛. 珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究. 环境科学学报, 29(6): 1146–1155)
- Wang H B, Zhang L, Liu R J, Zhang Z H and Cao X J. 2011. Comparison and assessment of the MODIS C005 and C004 aerosol products over the China. *Plateau Meteorology*, 30(3): 772–783 (王宏斌, 张镭, 刘瑞金, 张志薇, 曹贤洁. 2011. 中国地区两种MODIS气溶胶产品的比较分析. 高原气象, 30(3): 772–783)
- Wang L L, Xin J Y, Wang Y S, Li Z Q, Wang P C, Liu G R and Wen T X. 2007. Validation of MODIS aerosol products by CSHNET over China. *Chinese Science Bulletin*, 52(12): 1708–1718 [DOI: 10.1007/s11434-007-0222-0]
- Wu D, Bi X, Deng X, Li F, Tan H, Liao G and Huang J. 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta. *Acta Meteorologica Sinica*, 64(4): 510–517 (吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 李菲, 谭浩波, 廖国莲, 黄健. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. 气象学报, 64(4): 510–517)
- Wu D, Liao B T, Chen H Z and Wu C. 2014. Advances in studies of haze weather over Pearl River Delta. *Climatic and Environmental Research*, 19(2): 248–264 (吴兑, 廖碧婷, 陈惠忠, 吴晟. 2014. 珠江三角洲地区的灰霾天气研究进展. 气候与环境研究, 19(2): 248–264)
- Zhang Y, Pun B, Wu S, Vijayaraghavan K and Seigneur C. 2004. Application and evaluation of two air quality models for particulate matter for a southeastern U. S. episode. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(12): 1478–1493 [DOI: 10.1080/10473289.2004.10471012]
- Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, Wiedensohler A, Liu S C, Andreae M O, Wang W and Fang S J. 2008. Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): overview. *Atmospheric Environment*, 42(25): 6157–6173 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.03.025]
- Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, Zheng Z Y and Yin S S. 2009. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment. *Atmospheric Environment*, 43(32): 5112–5122 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.060]

Analysis of long-term (2000—2013) spatio-temporal aerosol distribution over Pearl River Delta region in China by using MODIS data

FAN Meng¹, ZHANG Shengmin², CHEN Liangfu¹, TAO Jinhua¹, SU Lin¹, WANG Tiantian³, GE Qiang⁴

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Information Engineering College, Kaifeng University, Kaifeng 475002, China;

3. Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China;

4. Computer and Information Engineering College, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Characterizing spatial and temporal variations in an aerosol is critical for a thorough understanding of its formation, transport, and accumulation in the atmosphere. The Pearl River Delta (PRD) region is one of the most densely urbanized regions in the world and one of the main hubs of China's economic growth. In this study, long-term (2000—2013) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) level 2 aerosol products were used to study the spatial and temporal distributions of both aerosol optical depth (AOD) and fine aerosol optical depth (FAOD) over the PRD region.

To investigate the variation characteristics of particulate pollution in the PRD region for a long time, we used long-term (2000—2013) MODIS AOD and FAOD data with 10 km resolution to calculate the monthly, seasonal, annual, and 14-year means. In this process, we screened the cloud pixels.

Results indicate that the spatial distribution of AOD of higher values are located in the central region of the PRD region (e.g., Foshan, north of Zhongshan, and southwest of Dongguan), whereas that of lower values are located in the western and eastern parts (e.g., Guangzhou, Huizhou, Zhaoqing, and Jiangmen). The spatial variability of FAOD is less significant than that of AOD, and the highest value of FAOD is located in Zhaoqing. Both annual mean AOD and number of areas with high AOD increase from 2000 to 2006. Between 2006 and 2013, although the annual AOD level over the PRD region fluctuated, the condition of particulate matter pollution has generally improved since 2006 because of the strict air pollution control implemented in the PRD region. The FAOD data set shows an increasing trend from 2000 to 2012, and the spatial variation in FAOD over the PRD region becomes increasingly significant. Therefore, a further improvement in the air quality in the PRD region requires a stricter regulation of fine particulate matter concentrations. A comparison of the annual MODIS

FAOD values and the annual AERONET FAOD values at the PolyU site (114.18°E, 22.30°N) shows that, from 2006 to 2013 both variables have a good agreement and the absolute differences between them are all lower than 0.08. The lowest AOD (0.39 ± 0.10) and FAOD (0.25 ± 0.05) occur in winter. The maximum AOD (0.72 ± 0.13) in the PRD region occurs in spring, whereas the FAOD (0.45 ± 0.10) reaches the maximum in autumn. From 2000 to 2013, the maximum fluctuation in AOD appears in summer, with the AOD standard deviation (std) reaching 0.28 in July. The season with the minimum fluctuation in AOD occurs is winter, with the AOD std being only 0.086 in January. Similar to AOD, the maximum (std=0.21) and minimum (std=0.038) fluctuations in FAOD occur in June and January, respectively.

A long-term MODIS AOD and FAOD series can reflect the spatio-temporal variation trend of particulate matter pollution over the PRD region. Although aerosol extinction has decreased significantly since 2006, the fine aerosol extinction has still increased to a certain extent, indicating that further control on fine particulate matter pollution is necessary in the PRD region.

Key words: AOD, FAOD, MODIS, Pearl River Delta region

Supported by Science and Technology Program of Guangzhou (No. 2013J100002); National Natural Science Foundation of China (No. 41130528, 41501373, 41471367); Preferred Foundation of the Director of the Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences (No. Y5SJ0700CX); National Key Technology R & D Program (No. 2014BAC21B00)