

张春桂, 彭云峰, 林晶, 等. 福建三大城市群气溶胶遥感监测及时空变化分析[J]. 气象, 2010, 36(8): 92-99.

福建三大城市群气溶胶遥感监测及时空变化分析^{* 1}

张春桂¹ 彭云峰² 林晶¹ 隋平¹

1 福建省气象科学研究所, 福州 350001

2 福建省气象台, 福州 350001

提 要: 气溶胶对城市环境质量的影响越来越受到人们的关注。利用 2001—2007 年 MODIS 卫星数据, 借助 6S 辐射传输模式, 采用目前较为成熟的暗像元方法, 在分析 MODIS 红光、蓝光和近红外波段对气溶胶敏感性的基础上, 反演福建三大城市群福州、厦门和泉州的气溶胶光学厚度, 将反演结果与大气环境观测数据进行对比, 并分析了三大城市群气溶胶光学厚度的时空分布与变化特征。结果表明: MODIS 红光和蓝光波段均对气溶胶敏感, 只是在不同季节表现出不同的敏感程度; 遥感反演的气溶胶光学厚度与现场观测的 PM₁₀ 数据相关系数为 0.604; 在时空分布上气溶胶光学厚度高值区与城区分布相一致, 秋冬季气溶胶光学厚度明显大于其他季节。基于 MODIS 数据反演得到的福建三大城市群气溶胶光学厚度产品精度是可靠的, 能客观反映该区域气溶胶光学厚度的时空分布与变化特征。

关键词: 遥感, 气溶胶光学厚度, 6S 辐射传输模型, MODIS

Remote Sensing Retrieval and Spatio-Temporal Analysis of Aerosol over Three Cities of Fujian

ZHANG Chungui¹ PENG Yunfeng² LIN Jing¹ SUI Ping¹

1 Fujian Province Meteorological Institute, Fuzhou 350001

2 Fujian Province Meteorological Observatory, Fuzhou 350001

Abstract: It has being more and more noticed by people that aerosol impact on city environment. On the basis of sensitivity test to the aerosol made for the planetary albedo of red, blue and near-infrared channel of MODIS data, the aerosol optical depth over three cities, Fuzhou, Xiamen, and Quanzhou of Fujian Province is retrieved based on 6S model and dark target method by using MODIS data during 2001—2007, the precision of aerosol optical depth (AOD) retrieved from MODIS data is verified with the station observed data of air environment over Fuzhou urban during 2001—2007, the spatio-temporal distribution and change characteristics of AOD over the three cities are analyzed. The results showed that the red and blue channel data of MODIS is sensitive to the AOD, although the sensitivity of different season is variational. The relationship index between AOD retrieved from MODIS and PM₁₀ observed from station is 0.604. It is the same that distribution of high value area of AOD is consistent with the distribution of urban, and the value of AOD in autumn and winter seasons is higher than other seasons. The remote sensing retrieval of AOD over three cities of Fujian based on MODIS data is credible, and the retrieved AOD can truly describe the spatio-temporal distribution and change characteristics over the study region.

Key words: remote sensing, aerosol optical depth (AOD), 6S model, MODIS

* 福建省科技厅重点项目(2006Y0008)“MODIS 卫星数据在福建生态环境与灾害监测中的应用研究”资助
2009 年 1 月 17 日收稿; 2009 年 11 月 21 日收修定稿
第一作者: 张春桂, 主要从事气象卫星遥感应用研究. Email: fjywork@163.com

引 言

气溶胶通常是指悬浮在空气中直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的细小颗粒,它的来源主要包括海洋的海盐微粒、陆地的尘土、生物体的孢子和花粉以及人类在生活和生产中的排放物等等,气溶胶的分布主要集中在 $5\ \text{km}$ 以下的对流层底层^[1]。

气溶胶对区域乃至全球的气候变化和空气质量变化、人类健康都有重要影响,一方面气溶胶通过散射和吸收太阳辐射直接影响了地气系统的辐射收支平衡,另一方面气溶胶可以充当云的凝结核,通过影响云的微观物理结构、反照率及降水的时空分布,从而进一步间接影响着气候系统^[2-6]。气溶胶是导致大气污染的主要因子之一,气溶胶颗粒因为对可见光的消光作用可导致地面能见度的下降,高浓度的气溶胶可以降低大气能见度甚至影响飞机的正常起落。气溶胶对人体健康也有一定的危害,研究表明 $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子在肺泡内沉积率最高,对人体健康危害也最大。除此之外,气溶胶导致农作物对太阳辐射吸收的减少以及光合作用效率的下降都将使农作物减产。

由于气溶胶的时空分布具有高度的变异性,仅靠地面少数观测站点很难详尽反映气溶胶的变化特征,同时也难以获取足够多的数据用来研究气溶胶的气候效应和环境效应。而卫星遥感具有连续、动态、宏观、快速的优势,可以弥补常规地面观测的不足,为了解气溶胶大范围的空间覆盖、变化趋势以及气溶胶输送源的信息提供强有力的手段。

国际上开展卫星遥感气溶胶研究工作始于 20 世纪 70 年代中期,1977 年 Carlson 等^[7]研究了热带大西洋上空的撒哈拉沙尘粒子光学厚度与 NOAA/AVHRR 辐射值之间的关系。我国从 20 世纪 80 年代中期开始进行卫星遥感气溶胶研究,1986 年赵柏林等^[8]利用 NOAA/AVHRR 资料进行了海洋上空气溶胶的遥感研究。近 20 多年来,我国在遥感气溶胶研究方面已取得了重要进展,但其研究区域主要集中在长江三角洲、珠江三角洲以及我国北方地区,对于东南沿海地区气溶胶特性的研究甚少^[9-14]。

人类活动产生的气溶胶排放量大致与所在地的经济发展程度和人口密度成正比,福建沿海地区是福建省经济最发达、人口最密集的地区,特别是从 20 世纪 90 年代末以来,随着经济的迅猛发展,城市

化过程的加快和城市规模的扩张,该区域环境质量发生了显著的变化。本文利用 2001—2007 年的 MODIS 数据,借助 6S 辐射传输模式,采用目前较为成熟的暗像元方法,对福建经济最为发达的三大城市群的气溶胶进行动态监测研究,这对于加强城市管理与规划,预测城市未来环境质量的变化趋势,推动区域可持续发展均有重要的意义。

1 数据与方法

1.1 数据来源

采用的 2001—2007 年 MODIS 卫星数据来源于国家卫星气象中心和福建省气象科学研究所卫星数据接收站,原始 MODIS 数据通过北京星地通公司提供的 ShineTek 软件包进行预处理,卫星影像采用等经纬度投影方式,卫星数据包括 MODIS 的可见光及近红外波段 1~7,以及相应地理位置的卫星天顶角、卫星方位角、太阳天顶角、太阳方位角,同时将波段数据定标为表观反射率。

本研究还收集了 2001—2007 年福州市环保部门在福州市区五四北路(26.12°N 、 119.30°E)、紫阳路(26.08°N 、 119.32°E)和福建师范大学(26.04°N 、 119.31°E)的地面大气环境观测数据 PM_{10} , PM_{10} 是指空气动力学当量直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的固体颗粒浓度,又称为可吸入颗粒物浓度,其单位以每立方米空气中含可吸入颗粒物的毫克数表示。

1.2 气溶胶遥感反演原理与方法

在晴空大气条件下,卫星观测到的可见光辐射由地表反射的太阳辐射中透过气溶胶的部分和经气溶胶多次散射的部分组成,因此,卫星观测到的表观反射率既反映了地表反射率的特征,也反映了大气中各种气体成分和气溶胶的光学特征,同时表观反射率还与太阳和卫星的天顶角密切相关。因而在假设地表反射率和主要大气成分的吸收和散射为已知的情况下,就有可能从卫星观测到的表观反射率中反演出气溶胶的光学参数。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth,简称 AOD)是描述大气气溶胶物理特性的一个重要光学参数,它是推算气溶胶含量、评估大气污染程度、确定气溶胶气候效应和环境效应的关键因子。遥感反演 AOD 所用的卫星探测通道主要是位于可见光的蓝光波段($0.43\sim 0.50\ \mu\text{m}$)和红光波段($0.62\sim$

0.76 μm),也就是在遥感反演时选择波长较短的波段并且选择地表反射率相对较低的地区。MODIS 具有 36 个探测通道,覆盖可见光、近红外和热红外波段,其中通道 1(0.62~0.67 μm)和通道 3(0.459~0.479 μm)对应于可见光的红光和蓝光波段,满足短波长的条件且通道宽度窄,能很好地订正大气气体吸收不确定性对气溶胶遥感的影响,具有遥感反演气溶胶的能力。本研究采用 MODIS 资料并借助于 6S 辐射传输模式和暗像元方法进行 AOD 的遥感反演。

6S 辐射传输模式(Second Simulation of Satellite Signal in The Solar Spectrum)是法国里尔大学大气光学实验室开发的目前较为完善的大气校正模型之一^[15],6S 模式能较合理地处理主要大气成分和气溶胶粒子的散射和吸收,并考虑到目标物的海拔高度、地表非均匀状况等因素,可以用来模拟晴空无云天气条件下,在 0.25~4 μm 的太阳光波段内,可见光辐射从太空到地表再到卫星传感器路径上的大气影响情况。6S 模式需要输入的参数主要包括以下 4 个方面:

(1) 几何路径参数:包括卫星影像成像日期、卫星天顶角和方位角、太阳天顶角和方位角、传感器和目标物海拔高度。

(2) 大气模式:包括无气体吸收、热带、中纬度夏季、中纬度冬季、副极地夏季、副极地冬季和美国 1962 年标准大气 7 种标准模式及自定义大气模式。

(3) 气溶胶模式:包括无气溶胶、大陆型、海洋型、城市型、沙漠型、生物型和平流层型 7 种标准模

式及自定义气溶胶模式。

(4) 地表类型:包括均一地表和非均一地表两大类,在均一地表中又分为无方向影响的朗伯体反射和有方向影响的二向性反射两种情况。

暗像元方法是由 Kaufman 等^[16]建立的用于遥感反演陆地上空气溶胶较为有效的算法之一,由于 2.1 μm 附近的近红外波段在表观反射率较低的情况下基本上不受大气气溶胶的影响,所以在暗地表区域可以将卫星观测的 2.1 μm 附近的波段表观反射率值近似认为是地表反射率值,同时暗像元方法利用密集植被在红光波段和蓝光波段反射率较低的特性,根据 2.1 μm 附近的波段反射率来判识是否为暗像元,并利用以下经验关系式来确定红光和蓝光波段暗像元的地表反射率:

$$\rho_{\text{red}} = \rho_{2.1\mu\text{m}}/2$$

$$\rho_{\text{blue}} = \rho_{2.1\mu\text{m}}/4$$

对于 MODIS 卫星数据,上式中 $\rho_{2.1\mu\text{m}}$ 是第 7 通道(2.105~2.155 μm)的表观反射率, ρ_{red} 和 ρ_{blue} 分别是第 1 通道和第 3 通道的地表反射率。

1.3 气溶胶遥感反演工作流程

6S 辐射传输模式的算法是采用基于 DOS 操作系统的 FORTRAN 语言编写而成的,本研究在 6S 模式核心算法的基础上,对反演过程进行集成,研发了基于 Windows 操作系统的“MODIS 气溶胶光学厚度反演”可视化软件平台,实现了 AOD 遥感反演的高度自动化,大大地提高了反演计算效率。图 1 为反演工作流程,具体反演步骤如下:

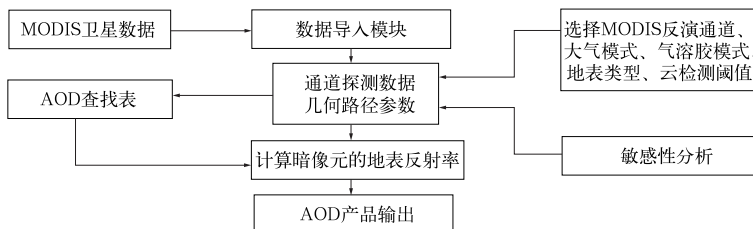


图 1 MODIS 气溶胶光学厚度遥感反演流程

Fig. 1 The flowchart illustrating the retrieval of aerosol optical depth by MODIS

(1) 从经过投影和定标处理的 MODIS 数据文件中分别得到用于反演 AOD 的通道 1、通道 3 和通道 7 的表观反射率,并对三个通道的数据进行重采样插值处理,使数据的空间分辨率统一为 250 m。

(2) 利用 6S 模式针对每个时次的 MODIS 卫星数据分别建立通道 1 和通道 3 的 AOD 查找表,并确定模式参数的选取,其中 5 月至 10 月的大气模式选

取中纬度夏季大气,11 月至次年 4 月的大气模式选取中纬度冬季大气,气溶胶模式选取大陆型,地表类型由于缺少必要的地表状态参数,选取均一朗伯体地表。AOD 查找表反映的是理论表观反射率随地表反射率和 AOD 的变化情况,本研究所建立的查找表 AOD 数值范围选取 0.1~1.0,变化步长为 0.1,反射率数值范围选取 0.01~0.4,变化步长为 0.05。

(3) 利用通道 7 的表观反射率特性选取研究区的暗像元,然后根据红光和蓝光波段暗像元与 2.1 μm 附近的近红外波段暗像元的经验关系式计算得到研究区通道 1 和通道 3 的地表反射率。

(4) 根据实际的表观反射率和地表反射率反查查找表,当实际表观反射率与查找表中的理论表观反射率一致时对应的 AOD 数值即为反演的 AOD,从而计算得到研究区中每个反演点上 MODIS 通道 1 和通道 3 的气溶胶光学厚度,最后,按照两个通道的气溶胶光学厚度,进一步确定 550 nm 的气溶胶光学厚度。

2 结果分析

2.1 敏感性试验

首先必须考虑的是表观反照率对地表反射率和气溶胶光学厚度是否具有较好的敏感性,福建省地

处我国南方亚热带季风气候区,年降水量多,全年地表植被比较密集,其地表反射率相对较低,比较好地符合暗地表的条件。为了分析 MODIS 红光波段、蓝光波段和中红外波段对气溶胶光学厚度的敏感性,选择 2007 年不同季节福建沿海地区较为晴空的 MODIS 卫星数据进行试验分析,分别是代表春季的 4 月 19 日、代表夏季的 7 月 20 日、代表秋季的 11 月 29 日和代表冬季的 1 月 8 日。

气溶胶光学厚度敏感性试验结果表明,无论什么季节,在地表反射率较低情况下,通道 1 和通道 3 的表观反射率都对 AOD 敏感,只是在不同季节表现出不同的敏感程度(见图 2~5),而 MODIS 通道 7 的表观反射率几乎不随 AOD 的变化而变化,即其表观反射率对 AOD 不敏感(见图 6)。从这些不同季节的表观反射率、地表反射率和 AOD 的关系图上可以看到,在地表反射率的横轴上存在一个阈值点,当地表反射率小于该阈值点时,通道 1 和通道 3

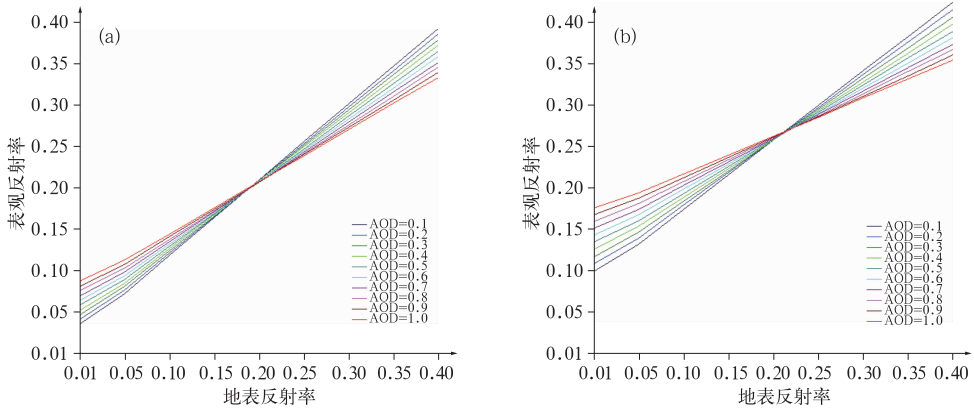


图 2 春季 MODIS 通道 1(a)和通道 3(b)对 AOD 的敏感性

Fig. 2 The sensitivity test of AOD to channel 1 (a) and channel 3 (b) of MODIS in spring

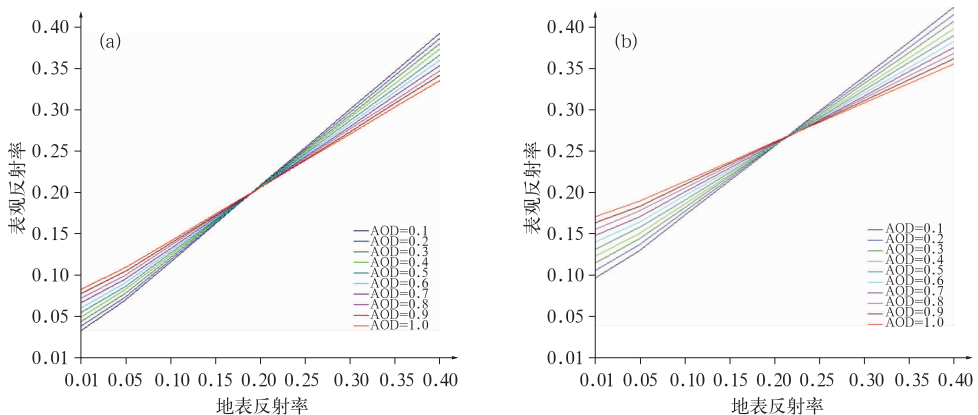


图 3 夏季 MODIS 通道 1(a)和通道 3(b)对 AOD 的敏感性

Fig. 3 The sensitivity test of AOD to channel 1(a) and channel 3(b) of MODIS in summer

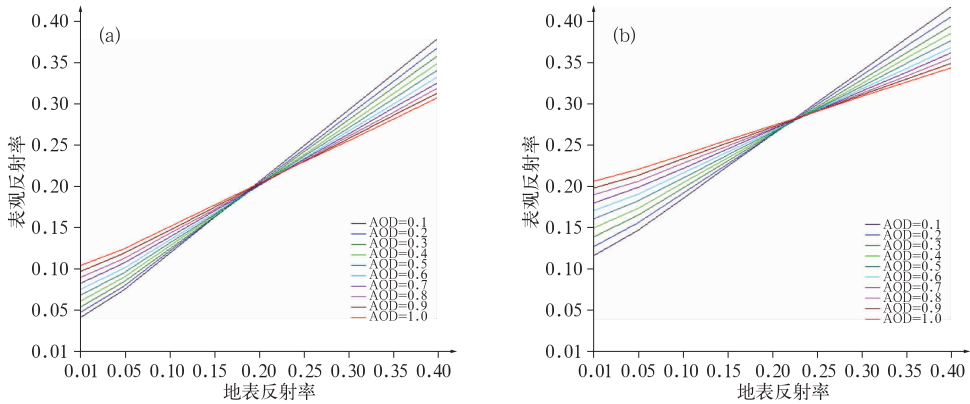


图 4 秋季 MODIS 通道 1(a)和通道 3(b)对 AOD 的敏感性

Fig. 4 The sensitivity test of AOD to channel 1(a) and channel 3(b) of MODIS in autumn

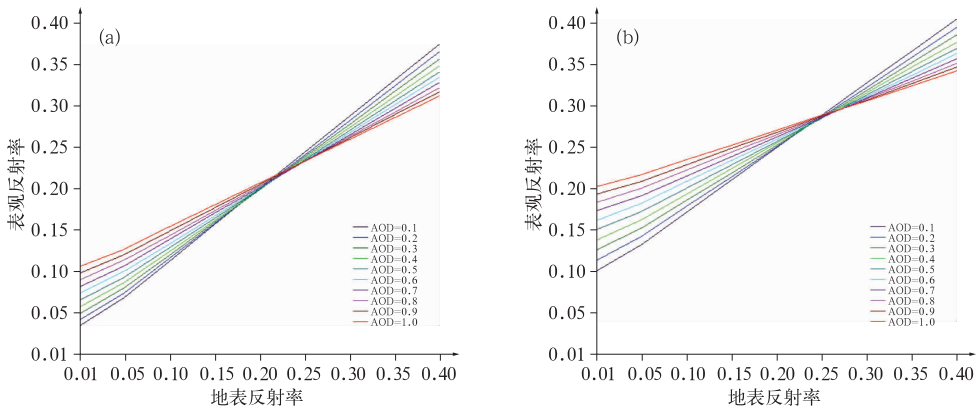


图 5 冬季 MODIS 通道 1(a)和通道 3(b)对 AOD 的敏感性

Fig. 5 The sensitivity test of AOD to channel 1 (a) and channel 3 (b) of MODIS in winter

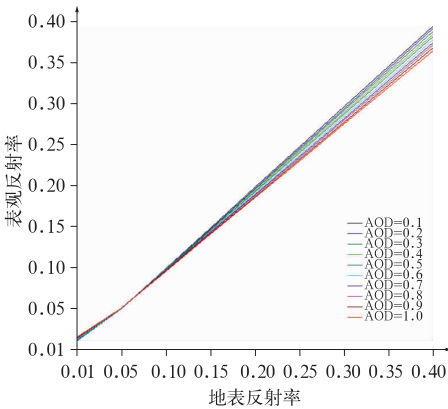


图 6 冬季 MODIS 通道 7 对 AOD 的敏感性

Fig. 6 The sensitivity test of AOD to channel 7 of MODIS in winter

秋冬季有差异,秋冬季的阈值比春夏季来得高,而无论在什么季节,通道 3 的阈值均比通道 1 来得高,具体情况见表 1。

表 1 不同季节不同 MODIS 通道地表反射率阈值情况
Table 1 The threshold of surface reflectance on MODIS different channel in different season

	春季		夏季		秋季		冬季	
通道	CH ₁	CH ₃	CH ₁	CH ₃	CH ₁	CH ₃	CH ₁	CH ₃
阈值	0.19	0.22	0.19	0.22	0.20	0.22	0.22	0.24

不同区域不同季节由于下垫面性质的变化不同,其表观反射率受到路径辐射和地表反射率两方面的影响也将不同,从而造成不同的卫星探测通道其地表反射率存在不同的阈值点,因此 AOD 的反演效果也有所差异。当地表反射率小于阈值点时,表明路径辐射对表观反射率的贡献较大,而与地面反射辐射有关的相对较小,在这种情况下反演 AOD,由地表反射率误差引起的 AOD 反演误差将较小。当地表反射率大于阈值点时,表明路径辐射

的表观反射率随 AOD 增大而增加,当地表反射率大于该阈值点时,通道 1 和通道 3 的表观反射率随 AOD 增加而减小,同时通道 7 也随 AOD 变化而开始敏感起来。不同季节不同通道这个阈值点有所不同,从试验结果来看,在季节上春夏季没有差异,但

对表观反射率的贡献较小,在这种情况下反演 AOD,由地表反射率误差引起的 AOD 反演误差会较大。在阈值点附近,表观反射率对 AOD 的变化不敏感,因此在根据卫星数据反演 AOD 时,地表反射率应与阈值点有一定的差值。

从以上 AOD 的敏感性试验可以看出,总体上通道 1 和通道 3 的表观反射率均对 AOD 具有敏感性,但通道 3 的表观反射率对 AOD 敏感性要比通道 1 来得好,同时中红外通道 7 的表观反射率对 AOD 不敏感,满足暗像元方法反演 AOD 的前提条件,可通过暗像元方法反演福建沿海地区的 AOD。但在敏感性试验中也发现,冬季福建沿海地区对 AOD 敏感的通道 3 的表观反射率都比较高,这可能会造成反演的 AOD 值稍有降低。

2.2 反演精度验证

我国目前有存档的 MODIS 卫星数据从 2001 年开始,为了分析福州、泉州、厦门三大城市群气溶胶的时空分布,从 2001 年起每年选取春、夏、秋、冬四个季节较为晴朗的 MODIS 卫星数据进行反演,并将反演结果与福州市区的大气环境观测数据进行统计对比分析,以初步验证 AOD 遥感反演结果的精度。

为了与现场观测的 PM_{10} 数据进行对比分析,需要从反演得到的 AOD 分布图上选取相应匹配点,因为 PM_{10} 数据是在整点时间进行观测的,与 MODIS 卫星数据的观测时间大多不相吻合,为此根据观测时间对 PM_{10} 数据进行折算,当卫星观测时间在整点前后 15 分钟之内,则直接采用相应整点的 PM_{10} 数据,当卫星观测时间在半点前后 15 分钟之内,则取邻近两个整点 PM_{10} 数据的平均,最后得到现场观测 PM_{10} 数据和遥感反演 AOD 相匹配的样本点共 59 个进行统计对比分析,结果见表 2 和图 7。

从现场观测的 PM_{10} 数据与 MODIS 反演的气溶胶光学厚度相关分析的结果来看,两者相关系数为 0.604, 有较好的相关性。虽然观测的 PM_{10} 数据代表的是近地层大气中直径小于 $10 \mu m$ 的颗粒浓度,而 AOD 代表的是整个对流层底层的气溶胶光学厚度,由于它们都是表征大气中气溶胶的特性,因此这种相关性是可靠的。同时由于它们代表的是不同的量,因此难以进一步进行误差分析。

借助于 6S 模式和暗像元方法利用 MODIS 卫星数据反演福建沿海地区气溶胶光学厚度仍然存在有一定的误差,这种误差主要来源于以下几个方面:

表 2 MODIS 遥感反演 AOD 与实测 PM_{10} 数据 ($mg \cdot m^{-3}$) 对比情况

Table 2 The comparison between MODIS derived AOD and station observed PM_{10} ($mg \cdot m^{-3}$)

卫星观测时间 年一月一日一时	五四北路		福建师大		紫阳路	
	AOD	PM_{10}	AOD	PM_{10}	AOD	PM_{10}
2001-08-07 11:14	0.5	52.09	0.6	97.15	0.6	80.96
2001-11-19 10:21	—	—	1.0	91.30	1.0	97.05
2002-05-28 10:31	0.7	119.76	0.6	83.34	0.7	86.70
2002-07-26 10:12	—	—	0.9	107.09	0.7	103.53
2002-11-04 10:29	0.1	61.86	0.1	45.35	0.1	34.77
2002-12-16 11:06	0.7	178.82	0.6	117.66	0.6	81.55
2003-01-14 10:35	1.0	131.34	1.0	137.22	—	—
2003-05-31 10:33	0.9	204.85	0.7	173.69	0.8	163.01
2003-10-22 10:27	—	—	1.0	92.92	1.0	71.02
2004-01-24 10:40	0.1	55.45	0.1	35.08	0.1	61.97
2004-04-19 13:16	0.6	48.58	0.5	35.98	0.5	36.96
2004-08-09 13:17	—	—	0.6	61.98	0.8	76.82
2005-01-16 13:15	1.0	52.76	1.0	84.62	—	—
2005-08-01 10:25	—	—	0.3	69.74	0.4	36.49
2005-11-26 10:39	1.0	149.49	—	—	1.0	178.19
2006-05-14 13:47	0.3	54.36	—	—	0.3	59.01
2006-08-16 10:50	—	—	0.6	114.01	0.5	79.50
2006-10-05 13:49	0.1	30.26	0.1	34.38	0.1	46.45
2006-12-17 13:41	0.8	137.84	0.8	112.44	0.8	96.77
2007-01-08 13:09	0.9	112.91	0.9	80.65	0.9	72.69
2007-04-19 13:24	0.6	102.00	0.5	59.52	0.5	59.30
2007-07-20 10:38	0.4	51.67	0.3	74.10	0.3	28.71
2007-11-29 13:23	0.7	88.40	0.9	67.66	0.9	70.00

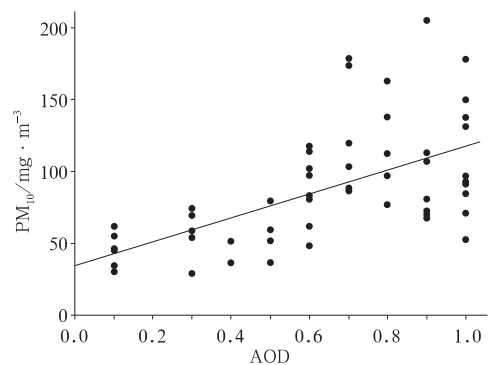


图 7 遥感反演 AOD 与实测 PM_{10} 数据相关分析
Fig. 7 The correlation analysis between MODIS derived AOD and station observed PM_{10}

(1) 虽然 6S 模式采用了先进的算法,是一个比较成熟的辐射传输模式,但仍存在有局限性,比如,模式要求能见度必须大于 5 km、模式假设大气为平面平行大气等。

(2) 由于缺少福建沿海地区的地表状态参数,把地表反射假设为朗伯体反射,即反射辐射强度与入射辐射方向无关,而且在各个反射方向上均匀分

布,这是一种简化的处理方案,它忽略了方向性特征对地表反射物理特征的影响,从而也影响到了地表反射率的准确确定,势必也就影响到 AOD 的反演精度。

(3) 福州、泉州、厦门处于海陆过渡地带,气溶胶粒子的来源较为复杂,这对于选择正确的气溶胶模式较为困难,由于选择不恰当的气溶胶模式也会

给反演结果带来误差。

2.3 气溶胶时空分布与变化特征分析

虽然气溶胶的分布随环境条件、天气条件、季节的不同而变化很大,但从 2001—2007 年福州、泉州、厦门三大城市群的气溶胶遥感监测结果来看,基本上呈现以下的时空分布与变化特征(见图 8~10)。

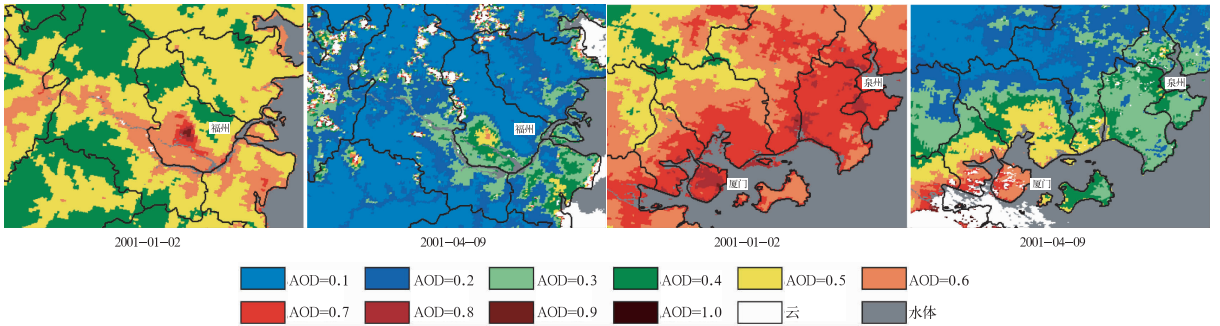


图 8 2001 年福州、泉州、厦门 MODIS 气溶胶光学厚度分布
Fig. 8 The distribution of aerosol optical depth of MODIS in Fuzhou, Quanzhou, and Xiamen in 2001

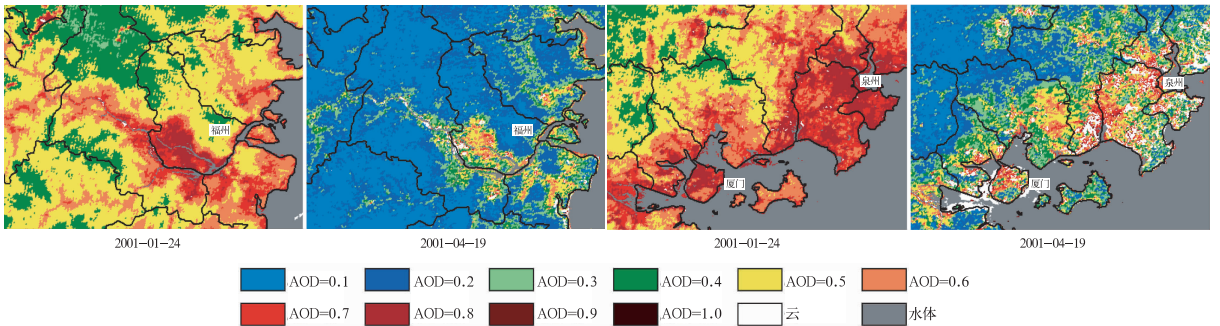


图 9 2004 年福州、泉州、厦门 MODIS 气溶胶光学厚度分布
Fig. 9 The distribution of aerosol optical depth of MODIS in Fuzhou, Quanzhou, and Xiamen in 2004

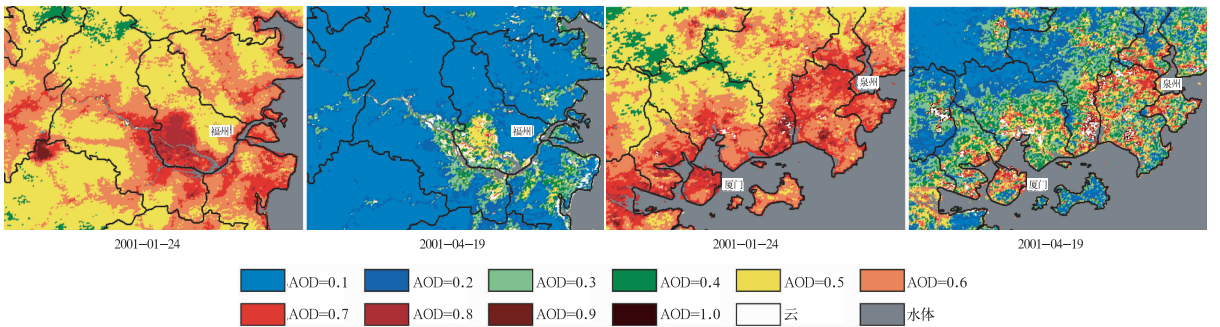


图 10 2007 年福州、泉州、厦门 MODIS 气溶胶光学厚度分布
Fig. 10 The distribution of aerosol optical depth of MODIS in Fuzhou, Quanzhou, and Xiamen in 2007

首先在空间分布上,气溶胶光学厚度的高值区与该区域的城市分布相一致,市区范围的气溶胶光学厚度明显比周边地区大很多,福州地区的这种特征特别明显,而泉州和厦门一带由于周边地区的大部分小城镇城市化水平也较高,因此气溶胶光学厚度高值区的范围也相对比较大。而在植被保护得很

好、人口密度比较稀疏、工业经济较为落后的山区气溶胶光学厚度的值普遍较低,如在福州市辖区周边的闽侯、永泰等山区存在明显的 AOD 低值区,泉州和厦门一带的山区虽然植被覆盖度也很高,但相对而言这一带的人口和小型工厂较多,因此 AOD 值普遍比福州一带的山区来得高。与泉州和厦门相

比,福州市从分布结构来看城区往往出现明显的高值区,在2001年气溶胶光学厚度高值区出现在靠近鼓山一带的区域(见图11),这明显与福州城区的地形有关,但是到了2004年和2007年,福州仓山区一带也出现气溶胶光学厚度的高值区,这可能与福州市这几年的城区空间扩展变化有关,最近几年福州市结合实施福州城市总体规划,大力实施推进福州城市发展的“南进西拓”战略,“南进”以仓山区为建设重点,“西拓”以位于闽侯县上街镇的大学城为建设重点,随着仓山城区规模的扩张,人们活动产生的气溶胶排放量就会增多。

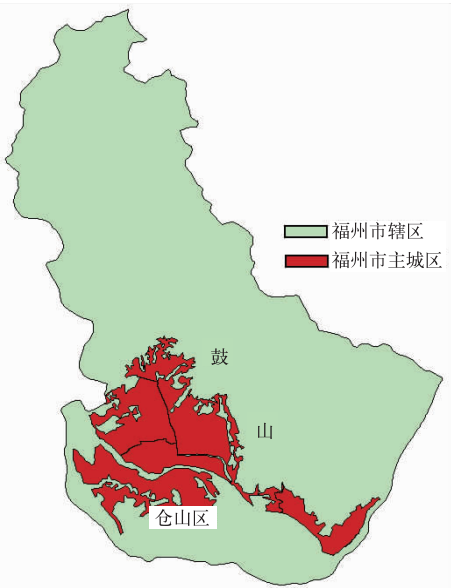


图11 福州主城区示意图

Fig. 11 The urban map of Fuzhou

在时间分布上,从2001年至2007年期间福州、泉州、厦门的AOD在总体上有逐年增大的趋势,城市中的商业中心和人口密集区也呈现AOD增大的趋势,这与近几年来居民私家车的增多、城市建设污染物排放的增多密切相关。

在季节分布上,总的来看,秋冬季气溶胶的光学厚度明显大于其他季节,虽然春夏季大气气溶胶粒子的组成较为复杂,气溶胶光学厚度的空间分布也较为多变,但能维持在相对较小的状态,秋季气溶胶光学厚度开始增大,到了冬季气溶胶光学厚度出现最大值。春夏季由于大气逆温强度弱,且是福建一年降水最为集中季节,有利于污染物的扩散和输送,同时春夏季的气溶胶光学厚度,在空气质量比较好的时候,空间分布比较均匀。秋冬季节,福建地区降水明显减少,大气中逆温现象频率高,对大气污染物扩散条件不利,使得气溶胶光学厚度明显增大。

3 结论与讨论

(1) 对于植被条件较好的福建沿海地区,借助于6S辐射传输模式和暗像元方法反演该地区气溶胶光学厚度是可行的,反演结果具有一定精度,能体现该区域气溶胶光学厚度的时空分布与变化特征,对于了解我国东南沿海城市环境质量变化具有重要意义。

(2) 基于MODIS高分辨率的气溶胶光学厚度遥感监测产品可以为分析城市大气污染的分布和变化趋势提供重要的参考依据,但由于福建省地处我国南方亚热带季风气候区,受到多云天气条件的制约,因此本研究分析的结果仅代表晴空少云天气条件下气溶胶光学厚度的变化规律。

参考文献

- [1] 于风莲. 城市大气气溶胶细粒子的化学成分及其来源[J]. 气象, 2002, 28(11): 3-6.
- [2] 秦世广, 汤洁, 温玉璞. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J]. 气象, 2001, 27(11): 3-7.
- [3] 刘校辰, 刘奇俊. 云模式中气溶胶物理过程参数化方案研究概述[J]. 气象, 2006, 32(6): 3-12.
- [4] 徐小红, 余兴, 戴进. 气溶胶对秦岭山脉地形云降水的影响[J]. 气象, 2009, 35(1): 39-49.
- [5] 康风琴, 银燕, 张逸轩. 中国北方沙尘气溶胶对云和降水影响的数值模拟研究[J]. 气象, 2009, 35(6): 37-44.
- [6] 黄海燕, 郑国光. 北京地区春季气溶胶分布特征的个例分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 3-9.
- [7] Carlson T N, Wendling P. Reflected radiance measured by NOAA-3 VHRR as a function of optical depth for Saharan dust[J]. J Appl Meteorol, 1977, (16): 1368-1371.
- [8] 赵柏林, 俞小鼎. 海上大气气溶胶的卫星遥感研究[J]. 科学通报, 1986, (31): 1645-1649.
- [9] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 用MODIS遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 1-7.
- [10] 赵秀娟, 陈长和, 张武, 等. 利用MODIS资料反演兰州地区气溶胶光学厚度[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 97-103.
- [11] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用MODIS资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度[J]. 大气科学, 2005, 29(3): 335-342.
- [12] 王耀庭, 王桥, 杨一鹏, 等. 利用Landsat/TM影像监测北京地区气溶胶的空间分布[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(3): 19-22.
- [13] 段婧, 毛节泰. 长江三角洲大气气溶胶光学厚度分布和变化趋势研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 537-543.
- [14] 郭本军, 刘莉, 黄丹萍, 等. 激光雷达对一次沙尘天气探测与分析[J]. 气象, 2008, 34(5): 52-57.
- [15] Vermote E F, Tanre S, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: An overview[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, (35): 325-368.
- [16] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al. The MODIS 2.1- μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, (35): 1286-1298.