

郑卓云,陈良富,郑君瑜,等. 2011. 高分辨率气溶胶光学厚度在珠三角及香港地区区域颗粒物监测中的应用研究 [J]. 环境科学学报, 31(6): 1154-1161

Zheng Z Y, Chen L F, Zheng J Y, et al. 2011. Application of retrieved high-resolution AOD in regional PM monitoring in the Pearl River Delta and Hong Kong region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(6): 1154-1161

高分辨率气溶胶光学厚度在珠三角及香港地区区域颗粒物监测中的应用研究

郑卓云¹, 陈良富², 郑君瑜^{1,*}, 钟流举³, 刘启汉⁴

1. 华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510006

2. 中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

3. 广东省环境监测中心, 广州 510045

4. 香港科技大学环境研究所, 香港

收稿日期: 2010-10-13

修回日期: 2010-11-22

录用日期: 2010-12-01

摘要: 利用最新的 MODIS(中分辨率成像光谱仪)气溶胶光学厚度(AOD)反演算法,反演珠江三角洲及香港地区 2008 年高分辨率(1 km × 1 km) AOD 分布,并与 AERONET 观测数据进行了验证($r=0.917$)。分析了 2008 年珠江三角洲及香港地区 5 个站点地面监测 PM₁₀ 质量浓度与反演的 AOD 数据相关性。结果表明:两者直接相关性较低($r=0.127 \sim 0.230$)。经过气溶胶季节标高垂直订正及相对湿度订正后,两者相关性显著提高($r=0.397 \sim 0.574$)。利用气溶胶消光系数建立 PM₁₀ 观测浓度与 AOD 线性回归模型,反演珠三角与香港地区地面 PM₁₀ 浓度的空间分布。结果表明该高分辨率 AOD 产品可用于区域大气污染分析,为评估区域空气质量提供一种有效途径。

关键词: MODIS; 气溶胶光学厚度; PM₁₀; 反演

文章编号: 0253-2468(2011)06-1154-08

中图分类号: X513

文献标识码: A

Application of retrieved high-resolution AOD in regional PM monitoring in the Pearl River Delta and Hong Kong region

ZHENG Zhuoyun¹, CHEN Liangfu², ZHENG Junyu^{1,*}, ZHONG Liuju³, Alexis Kai Hon LAU⁴

1. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006

2. State key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

3. Guangdong Province Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510045

4. Institute for Environment, the Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong

Received 13 October 2010;

received in revised form 22 November 2010;

accepted 1 December 2010

Abstract: Based on the newest aerosol retrieval algorithm for the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), 1 km × 1 km aerosol optical depth (AOD) data over the Pearl River Delta region and Hong Kong was retrieved, and validated with the AERONET observations ($r=0.917$). Correlations between the retrieved AOD data and observed PM₁₀ concentrations in 2008 at 5 monitoring stations in the Pearl River Delta region and Hong Kong were analyzed. The results indicated that initial correlations between AOD and PM₁₀ concentrations are relatively low ($r=0.127 \sim 0.230$); however, the correlations were greatly improved after the vertical correction of seasonal aerosol scalar heights and the relative humidity (RH) correction on aerosol optical properties ($r=0.397 \sim 0.574$). A linear regression model of the observed PM₁₀ concentrations vs AOD data was developed with the use of aerosol extinction coefficients to retrieve the surface PM₁₀ concentration distributions. Our results suggest that the high-resolution AOD data can help analyze regional air pollution characteristics and provide an alternative approach for assessing regional air quality.

Keywords: MODIS; AOD; PM₁₀; retrieval

1 引言 (Introduction)

随着珠江三角洲经济快速发展,区域大气污染

问题面临严峻挑战,气溶胶污染问题尤为突出,大部分城市以颗粒物为首要污染物(程兴宏等, 2007)。气溶胶污染由于其对大气能见度

基金项目: 粤港联合科技创新平台(No. 2009B050900000); “十一五”国家高技术研究发展计划(No. 2006AA06A303)

Supported by the Guangdong-Hong Kong Innovation Research Platform Project (No. 2009B050900005) and the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2006AA06A303)

作者简介: 郑卓云(1984—),女,E-mail: zhengzhuoyun@gmail.com; * 通讯作者(责任作者),E-mail: zheng.junyu@gmail.com

Biography: ZHENG Zhuoyun(1984—), female, E-mail: zhengzhuoyun@gmail.com; * Corresponding author, E-mail: zheng.junyu@gmail.com

(Christopher *et al.* ,1996) 及人体健康的重要影响 (Li *et al.* ,2006) 受到了国内外研究人员和决策者的广泛关注. 由于气溶胶在大气形成与输送过程的复杂性,任何单一的研究手段都不能完全揭示气溶胶污染的空间特征. 卫星遥感反演信息全面,覆盖范围广泛,能够弥补地面监测站点空间上的不足. 利用卫星资料反演气溶胶光学厚度以评价地面大气污染状况目前正逐渐得到广泛应用.

在美国、欧洲等发达地区,由于拥有较为完善的空气质量监测网络,并且拥有大量颗粒物浓度监测站点,利用 AOD 产品反演地面颗粒物浓度的工作已经广泛开展 (Liu *et al.* ,2005; 2007; Koelemeijer *et al.* ,2006; Engel-Cox *et al.* ,2004; Wang *et al.* ,2003; Gupta *et al.* ,2006; Vidot *et al.* ,2007) . 例如, Chu 等(2003) 利用 NASA 发布的全球 MODIS 气溶胶产品数据,研究全球及区域性大气污染状况,证实了用气溶胶光学厚度监测大气污染的可行性. Liu 等(2005) 考虑大气层边界高度、湿度、季节和监测站点点位特征等因素的影响,建立了 AOD 和 $PM_{2.5}$ 回归关系模型,估算了美国东部 4 个季节的平均颗粒物排放浓度. 而目前国内相关方面研究相对缺乏,且主要集中在北京、长江三角洲等地区. 例如,何秀等(2010) 利用 MODIS AOD 产品与北京大学站点 PM_{10} 监测浓度进行了长期比较分析,发现基于季节变化的气溶胶标高和湿度校正后,二者之间的相关系数显著提高. 刘勇(2007) 利用南京的空气污染指数与 MODIS AOD 产品进行比较,发现在考虑气象因子的情况下,气溶胶光学厚度能够比较全面地反映地面大气污染状况. 但是,目前这些研究仍集中利用传感器气溶胶光学厚度产品的应用研究, AOD 产品的空间分辨率并不高 (MODIS $10\text{ km} \times 10\text{ km}$),难以满足评价区域颗粒物污染的需要.

珠江三角洲地区利用遥感数据反演地面颗粒物浓度分布的应用研究还相对较少. 随着粤港珠江三角洲区域空气质量监测网络的建立(张振铎等, 2005) ,在珠三角地区开展利用遥感数据反演地面颗粒物浓度分布研究具备了重要的数据基础. 本文主要运用 MODIS 基础数据反演了 2008 年珠江三角洲及香港地区高分辨率($1\text{ km} \times 1\text{ km}$) AOD 分布. 并利用区域空气监测网络 PM_{10} 常规监测数据,考虑垂直和湿度订正对 AOD 的影响,建立了 PM_{10} 监测浓度与 AOD 线性回归模型,反演 PM_{10} 浓度区域空间分特征. 为全面分析与评价珠江三角洲及香港地区

的颗粒物污染状况提供了新的途径.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究范围和数据来源

本文利用 Lambert 投影,以 $111^{\circ}59'52''E \sim 115^{\circ}24'48''E$ 和 $21^{\circ}27'47''N \sim 23^{\circ}56'13''N$ 为研究范围, 涵括珠江三角洲及香港地区(见图 1) . 本文 AOD 反演的基础数据来源于 MODIS 卫星传感器观测数据; 地面常规颗粒物监测数据来自于粤港珠江三角洲区域空气监测网络 13 个监测站点的 PM_{10} 质量浓度数据和香港元朗站的 PM_{10} 监测数据; 相对湿度数据主要来源于珠江三角洲及香港地区各气象监测站点实时监测资料. 考虑到气象站点与空气质量监测站点的匹配性以及各站点空间位置的的代表性,选择 5 个站点进行分析,包括广州麓湖公园(GZLH) 、从化天湖(CHTH) 、深圳荔园(SZLY) 、肇庆城中(ZQCZ) 、香港元朗(HKYL) . 监测站点具体位置见图 1,站点的相关信息如表 1 所示.

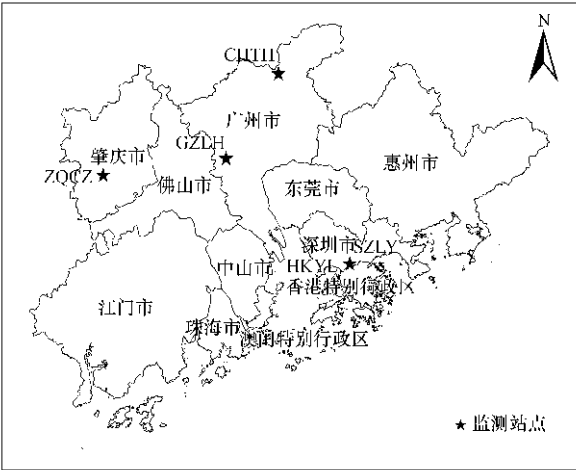


图 1 研究区域边界以及监测站点分布图

Fig. 1 The study domain and the distribution of monitoring stations

表 1 珠江三角洲及香港地区 PM_{10} 监测站点信息

Table 1 PM_{10} monitoring stations over the Pearl River Delta region and Hong Kong used in this study

站名	Station ID	经度(E)	纬度(N)	站点位置
广州麓湖公园	GZLH	113.281°	23.157°	市区
从化天湖	CHTH	113.625°	23.650°	郊区
深圳荔园	SZLY	114.096°	22.550°	市区
肇庆城中	ZQCZ	112.471°	23.054°	市区
香港元朗	HKYL	114.023°	22.445°	市郊

2.2 方法与思路

本文首先根据气溶胶反演算法研究方面的资料与成果,使用最新的 MODIS AOD 反演算法,反演了珠江三角洲及香港地区分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 气溶胶光学厚度;然后,利用气溶胶季节平均标高和相对湿度数据对 AOD 进行垂直校正和湿度校正;最后利用区域地面监测颗粒物数据及气溶胶消光系数,建立地面监测 PM_{10} 质量浓度和 AOD 之间的回归模型.在此基础上,反演 PM_{10} 浓度及空间分布,并与地面观测结果进行校验.

2.2.1 AOD 反演算法 本研究主要以 NASA 推出的 EOS/MODIS 第五版反演算法 (Remer *et al.*, 2006) 为基础来反演珠三角及香港地区气溶胶光学厚度分布.下面简要阐述该算法的原理和实现流程.

(1) 基本原理

假设卫星观测的目标表面为均匀朗伯表面,大气水平均一,大气上界观测表观反射率 ρ_{TOA} 可以表示为:

$$\rho_{\text{TOA}}(\mu_s, \mu_v, \phi) = \rho_o(\mu_s, \mu_v, \phi) + \frac{T(\mu_s) T(\mu_v) \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)}{1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi) S} \quad (1)$$

式中, ρ_o 为大气路径辐射项等效辐射率, ρ_s 为地表二向反射率, ϕ 是相对方位角,由太阳方位角 ϕ_s 和卫星方位角 ϕ_v 确定; $\mu_s = \cos\theta_s$, $\mu_v = \cos\theta_v$; S 为大气的球面反照率; $T(\mu_s)$ 和 $T(\mu_v)$ 分别为向下和向上整层大气透过率.

(2) 气溶胶光学厚度反演

珠江三角洲及香港地区地处华南,四季地表植被较为密集,符合应用暗像元法的背景条件,故本研究使用暗像元法进行地表反射贡献率处理.暗像元法主要利用大多数植被在红 ($0.60 \sim 0.68\text{ }\mu\text{m}$) 和蓝 ($0.40 \sim 0.48\text{ }\mu\text{m}$) 波段反射率低的特性,根据植被指数 (NDVI) 或短波红外通道 ($2.13\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.8\text{ }\mu\text{m}$) 观测值进行暗像元判识,并根据可见光红或蓝通道地表反射率与中红外波段的函数关系,去除地表贡献.

基于以上原理,首先从 MODIS 产品中提取 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率的表观反射率数据和几何定位数据,进行海陆像元分离、云像元识别和判别暗像元;然后利用“6S”辐射传输模型 (Vermote *et al.*, 1997) 进行辐射传输计算,建立气溶胶光学厚度和 S 、 ρ_o 、 $T(\mu_s)$ 和 $T(\mu_v)$ 等参数之间的关系查找表;最后,按照暗像元地表反射波段变化函数关系,计算可见光波段的地表反射率,并根据不同的气溶胶光学厚度

在查找表中提取相应的 S 、 ρ_o 、 $T(\mu_s)$ 和 $T(\mu_v)$ 参数,在此基础上,利用假定可见光波段表观反射率对 MODIS 产品提取的可见光波段表观反射率进行线性插值获得气溶胶光学厚度,具体反演算法参照王中挺等 (2008).

2.2.2 垂直和湿度订正 由于气溶胶成分垂直分布非常复杂,气溶胶光学厚度与 PM_{10} 质量浓度之间的相关关系受到气溶胶垂直分布的影响.除此之外,它们之间的关系还受到气象条件的影响 (相对湿度、温度、降雨、风速),特别是相对湿度对气溶胶粒径影响很大 (Seinfeld *et al.*, 2004). 因此, AOD 与 PM_{10} 质量浓度的直接相关关系一般并不高 (何秀等, 2010). 而对气溶胶光学厚度进行垂直和湿度订正,将有助于提高两者之间的相关关系 (李成才等, 2005; Wang *et al.*, 2010).

气溶胶光学厚度指的是消光系数在垂直方向上的总积分,与气溶胶消光系数的垂直分布和气溶胶总浓度有关.假设大气气溶胶在垂直方向上按照指数递减分布,气溶胶光学厚度与地面气溶胶消光系数成线性相关 (Liou *et al.*, 2004) 关系,以气溶胶标高来代表大气层高度,地面气溶胶消光系数 (κ_α) 可以通过公式 (2) 计算:

$$\kappa_\alpha = \text{AOD}/H \quad (2)$$

式中, H 为大气标高.由于不同季节气溶胶消光系数有差异,本文考虑了大气标高的季节性变化.根据李成才 (2002) 研究成果,香港地区四季平均气溶胶标高为春季 1076 m,夏季 1880 m,秋季 1358 m,冬季 1061 m.

地面颗粒物质量浓度监测时通常有一个干燥过程 (温度约 $50\text{ }^\circ\text{C}$),代表较低相对湿度 (小于 40%) 下的颗粒物质量浓度.考虑到吸湿性气溶胶的存在,气溶胶的粒径随相对湿度显著变化,从而影响气溶胶消光特性 (李成才等, 2005),因此需要消除相对湿度对气溶胶消光系数的影响.根据 Wang 等 (2010) 的研究成果推导,地面气溶胶消光系数 (k_α) 与气溶胶质量浓度 (PM_X) 关系可描述为:

$$\kappa_\alpha = \frac{3Q_{\text{ext}}}{4\gamma_{\text{eff}}\rho} \text{PM}_X \times f(\text{RH}) \quad (3)$$

式中, Q_{ext} 为粒度分布综合消光效率, γ_{eff} 为颗粒物的有效半径, ρ 为粒子平均质量密度, $f(\text{RH})$ 为吸湿增长因子.吸湿增长因子经验公式一般可表示为 (李成才等, 2005):

$$f(\text{RH}) = 1/(1 - \text{RH}/100) \quad (4)$$

式中, RH 为相对湿度,更为精确的吸湿增长因子公

式需通过实验确定. 本文应用了吸湿增长因子经验公式(4)对 PM_{10} 质量浓度进行湿度订正, 而相关研究也表明运用吸湿增长因子经验公式与实验得到的吸湿增长因子公式订正效果无明显差异, 吸湿增长因子经验公式可能适用性更强(何秀等, 2010).

2.2.3 AOD 与地面观测 PM_{10} 模型建立 本研究用于建模的 AOD 数据是以监测站点经纬度(见表 1)为圆心, 半径为 1 km 圆形区域象元内 AOD 数据的平均值. 在计算过程中, 根据 AOD 遥感图像上的分布及像元个数, 去除了受降水与大雾天气影响较大的异常 AOD 数据. 根据卫星过境时间, PM_{10} 和湿度数据选取每日 10:00 ~ 12:00 对应观测数据的平均值. 然后, 对相同日期下的 AOD、 PM_{10} 质量浓度以及相对湿度的有效数据对进行线性回归分析, 建立监测站点 PM_{10} 质量浓度与 MODIS 1 km $\times$ 1 km AOD 的直接相关关系模型. 然后, 考虑气溶胶垂直分布和相对湿度的影响, 建立经过垂直订正的 AOD 以及经过湿度订正的地面 PM_{10} 质量浓度的线性回归模型, 由此获得监测站点的 PM_{10} 质量浓度与 AOD 的线性方程, 反演 PM_{10} 质量浓度及其区域分布.

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 卫星遥感反演校验

基于上述 AOD 反演方法, 利用 MODIS 基础数据, 反演了 2008 年珠江三角洲及香港地区 1 km $\times$ 1 km 气溶胶光学厚度, 结果如图 2 所示. 利用 AERONET 提供的香港鹤咀站(HK HokTsui)和开平站(Kai Ping)(LEVER 2.0) AOD 观测值检验反演的 MODIS 1 km $\times$ 1 km AOD 精度. 结果显示 AERONET

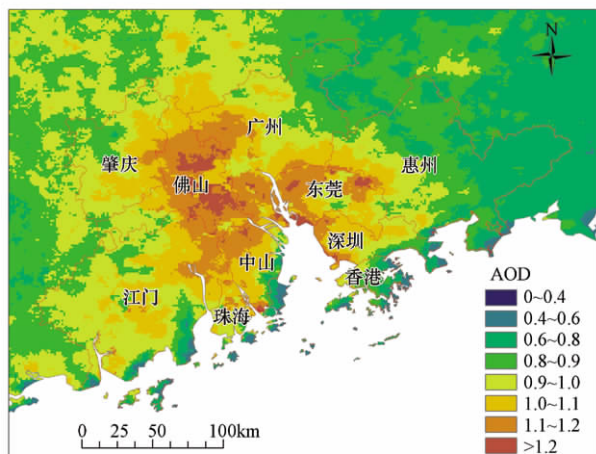


图2 MODIS 反演年均 AOD 分布图

Fig. 2 Annual derived AOD image from MODIS

观测值与反演的 AOD 数据具有良好的一致性, 其相关系数均为 0.917(图 3), 显示本研究反演的珠江三角洲及香港地区 1 km $\times$ 1 km 气溶胶光学厚度具有一定的可靠性, 可用于区域大气颗粒物污染评价研究.

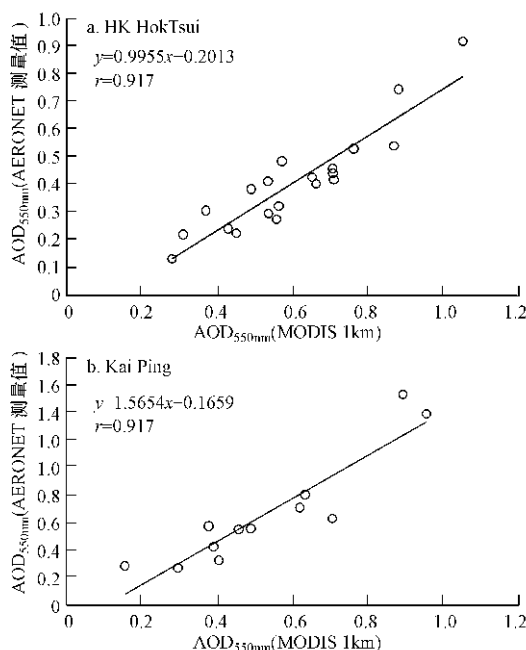


图3 MODIS 1 km AOD 与 AERONET 测量值对比

Fig. 3 Comparison of MODIS 1 km AOD with the AERONET observations

3.2 AOD 数据与地面监测 PM_{10} 质量浓度相关性分析

通过 2.2.3 节介绍的建模方法, 分别建立了 2008 年珠江三角洲及香港地区主要地面监测 PM_{10} 质量浓度与反演的 MODIS 1 km $\times$ 1 km AOD、 PM_{10} 质量浓度与垂直订正后的 AOD 和垂直订正后的 AOD 与湿度校正后的 PM_{10} 质量浓度之间的线性回归模型. 结果如表 2 所示(相关系数用 r 表示).

表 2 的结果表明, 5 个监测站点 PM_{10} 质量浓度与 AOD 直接关系都偏低, 最高相关系数不超过 0.230($p < 0.001$). 经过气溶胶季节平均标高订正后, 两者相关系数得到提高, 所有站点相关系数均超过 0.269. 经气溶胶季节平均标高和湿度订正后, 各站点相关系数显著提高($r = 0.397 \sim 0.574$). 图 4 为所有监测站点不同情形下的 AOD 与 PM_{10} 质量浓度相关系数散点图. 如图 4 所示, 所有监测站点的 AOD 与 PM_{10} 质量浓度相关系数为 0.147(图 4a), 垂直订正后的 AOD 与 PM_{10} 质量浓度相关系数为 0.289

表2 珠江三角洲及香港地区地面 PM₁₀ 浓度与 AOD 相关关系
Table 2 Correlations between PM₁₀ concentrations and AOD over the Pearl River Delta and Hong Kong region

站点	PM ₁₀ -AOD	PM ₁₀ -AOD _{SEC}	PM _{10RH} -AOD _{SEC}	
ALL(631) *	0.147	0.289	0.484	$y=0.120x+64.4$
GZLH(109)	0.147	0.313	0.530	$y=0.105x+56.1$
CHTH(137)	0.230	0.293	0.504	$y=0.116x+81.2$
SZLY(127)	0.136	0.309	0.438	$y=0.132x+48.9$
ZQCZ(121)	0.132	0.293	0.574	$y=0.424x+49.0$
HKYL(137)	0.127	0.269	0.397	$y=0.902x+73.2$

注: PM₁₀-AOD,MODIS 1 km AOD 与地面 PM₁₀ 质量浓度直接相关系数; PM₁₀-AOD_{SEC},MODIS 1km AOD 经气溶胶季节平均标高订正的 AOD 与地面 PM₁₀ 质量浓度相关系数; PM_{10RH}-AOD_{SEC},经垂直订正的 MODIS 1km × 1kmAOD 与经过相对湿度订正的 PM₁₀ 质量浓度的相关系数和线性回归模型($p < 0.001$); 括号内数据为监测站点的有效数据对,ALL 为全部站点.

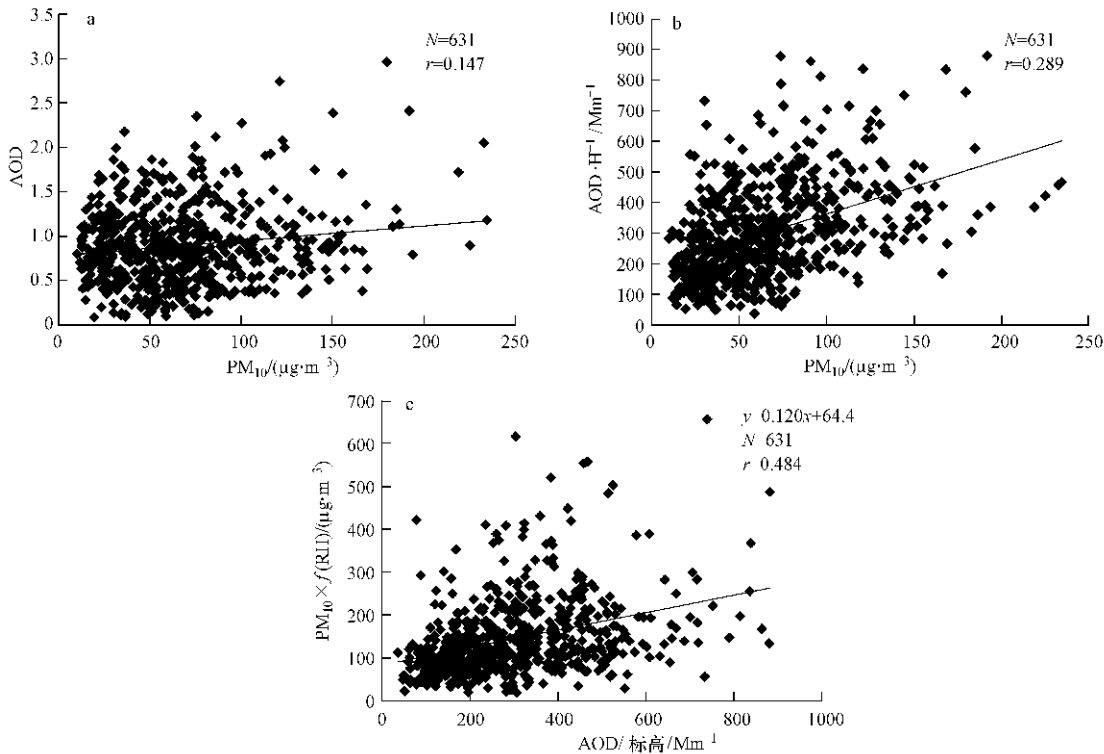


图4 珠江三角洲及香港地区所有监测站点 PM₁₀ 质量浓度与 MODIS 1km × 1km AOD (a)、经过垂直订正的 AOD (b) 的比较以及经过垂直订正的 AOD 与经过湿度订正的 PM₁₀ 质量浓度 (c) 的比较

Fig. 4 Comparison of the mass concentration of PM₁₀ with MODIS 1 km × 1 km AOD (a) AOD corrected by vertical distribution (b) and comparison of the AOD corrected by vertical distribution with the PM₁₀ mass concentration corrected by relative humidity (c) at all monitoring stations over the Pearl River Delta region and Hong Kong

的季节相关性. 总体来说,各站点 PM₁₀ 质量浓度与 AOD 的直接相关性普遍不高,且不同季节相关系数差异较大,夏季相关性较高. 垂直订正由于利用气溶胶季节平均标高,对提高 PM₁₀ 质量浓度与 AOD 季节相关性的作用不大. 而同时经过垂直和湿度订

(图 4b),垂直订正的 AOD 与湿度订正的 PM₁₀ 质量浓度相关系数为 0.484 (图 4c). 表 3 总结了本研究与其它相关研究的对比结果. 由表 3 可以看出,本研究中不同情形下 PM₁₀ 浓度与 AOD 相关系数与相关研究结果都较为接近.

为了研究不同季节 AOD 与 PM₁₀ 质量浓度的相关性,本研究对相关数据按照春、夏、秋、冬 4 个季节进行了统计分析. 春季由于阴雨天气较多,卫星获取的有效信息量较少,导致样品数量较少,在有些站点甚至出现负相关. 对于这些站点,本研究不进一步考虑垂直和湿度对气溶胶光学厚度的影响. 各站点不同季节 AOD 与 PM₁₀ 直接相关以及经过垂直和湿度订正的相关系数如表 4 所示. 由表 4 可以看出,不同站点 PM₁₀ 质量浓度和 AOD 变化具有一定

正后,各个站点各个季节的 PM₁₀ 质量浓度与 AOD 相关性得到了显著的提高,相关系数平均提高了 0.2 左右. 特别是在 ZQCZ 站点,夏季、秋季和冬季的相关系数均超过 0.5 以上,夏季的相关系数更达到 0.675. 综上所述,经过气溶胶垂直标高和湿度同

时订正后,地面监测 PM₁₀浓度与 MODIS 1 km × 1 km AOD 的相关系数显著提高.

表 3 PM₁₀浓度与 AOD 相关关系对比
Table 3 Comparison of correlations between PM₁₀ concentrations and AOD

研究区域	PM ₁₀ -AOD	PM ₁₀ -AOD _{SEC}	PM _{10RH} -AOD _{SEC}	参考文献
北京	0.230			李成才等,2003
北京	0.249	0.233	0.535	李成才等,2005
北京	0.260	0.400	0.470; 0.510	何秀等,2010
香港	0.350	0.430	0.560; 0.570	何秀等,2010
珠三角及香港地区	0.127 ~ 0.230	0.269 ~ 0.313	0.397 ~ 0.574	本研究

表 4 不同季节 AOD 与 PM₁₀浓度相关关系
Table 4 Correlations between PM₁₀ concentration and AOD in different seasons

站点	时间	PM ₁₀ -AOD	PM ₁₀ -AOD _{SEC}	PM _{10RH} -AOD _{SEC}
GZLH	春天(12)*	0.358	0.358	0.745
	夏天(18)	0.059	0.059	0.100
	秋天(52)	0.061	0.061	0.366
	冬天(28)	0.171	0.171	0.365
CHTH	春天(14)	0.332	0.332	0.742
	夏天(30)	0.010	0.010	0.111
	秋天(60)	0.494	0.494	0.657
	冬天(32)	0.009	0.009	0.245
SZLY	春天(17)	-	-	-
	夏天(34)	0.516	0.516	0.542
	秋天(48)	0.184	0.184	0.473
	冬天(28)	0.333	0.333	0.485
ZQCZ	春天(15)	-	-	-
	夏天(26)	0.471	0.471	0.675
	秋天(55)	0.324	0.324	0.658
	冬天(25)	0.346	0.346	0.526
HKYL	春天(21)	0.017	0.017	0.449
	夏天(33)	0.616	0.616	0.632
	秋天(52)	0.106	0.106	0.119
	冬天(31)	0.165	0.165	0.380

注: 括号内数据代表有效数据对的数量.

由以上结果我们得出以下结论: 考虑了湿度订正和垂直订正后 PM₁₀浓度与 AOD 相关系数可以达到 50% 以上,但是二者之间的相关系数仍然偏低,原因可能是由于缺乏逐日的实测混合层标高数据,而在研究中使用气溶胶季节平均标高进行垂直订正所致,这表明垂直订正处理还需要进一步研究.

3.3 地面 PM₁₀质量浓度反演

3.3.1 区域 PM₁₀质量浓度反演 本研究利用表 2 建立的经垂直和湿度校正后的 PM₁₀质量浓度与反演的 AOD 关系模型,反演了珠三角及香港地区地面 PM₁₀质量浓度,并利用地面监测 PM₁₀质量浓度验证这些反演模型的适用性. 表 5 总结了各线性回归模

型反演的 PM₁₀质量浓度和监测 PM₁₀质量浓度之间的相关系数和年均偏差率. 从表 5 可以看出,利用考虑所有监测站点线性回归模型反演的 PM₁₀质量浓度与监测值之间的年均偏差率最小,只有 0.90%,最大的年均偏差率为 14.07%. 表明了利用考虑所有站点反演模型在反演区域 PM₁₀质量浓度时误差较小,能够更好地反映区域 PM₁₀质量浓度情况.

表 5 反演的 PM₁₀质量浓度值与监测值之间的相关关系及年均偏差率

站点	相关系数	年均偏差率
ALL	0.473	0.90%
GZLH	0.442	2.35%
CHTH	0.310	3.72%
SZLY	0.598	1.95%
ZQCZ	0.541	14.07%
HKYL	0.617	10.15%

注: ALL 为全部站点.

上述研究结果表明,运用考虑所有站点的 PM₁₀质量浓度反演模型反演的结果具有更高的可靠性. 图 5 为利用该模型反演的珠江三角洲及香港地区 2008 年年均 PM₁₀质量浓度的空间分布结果. 由图 5 可以看出,佛山、中山、东莞、深圳和江门 PM₁₀污染较为严重,年均 PM₁₀质量浓度在 70 μg·m⁻³ 以上;广州和东莞年均 PM₁₀质量浓度甚至达到 85 μg·m⁻³ 以上;肇庆和广州南部的污染也相对严重,年均 PM₁₀质量浓度在 60 ~ 80 μg·m⁻³ 之间;珠海东部、惠州污染相对较轻,大部分地区 PM₁₀质量浓度在 60 μg·m⁻³ 以下. 比较珠三角各市 2008 年环境质量公报中公布的可吸入颗粒物年均质量浓度(江门市, 76 μg·m⁻³; 广州市, 71 μg·m⁻³; 深圳市, 63 μg·m⁻³; 中山市, 63 μg·m⁻³; 珠海市, 50 μg·m⁻³) 本研究反演的年均 PM₁₀质量浓度与各市公布的结果基本吻合,显示反演结果具有较高的准确性. 同时

反演的 PM_{10} 质量浓度空间分布与 Zheng 等 (2009) 研究的珠江三角洲 PM_{10} 污染源排放空间分布特征相近. 在广州、深圳、东莞、佛山、中山等人口密集、交通路网密集、工业相对发达的地区 PM_{10} 污染严重, 珠海、肇庆、江门和惠州等地污染相对较轻. 由此表明, 经过高分辨率 AOD 反演的地面 PM_{10} 质量浓度无论在数量级上还是空间分布特征上均能满足区域大气环境质量评价的要求, 并能够弥补大气污染监测站点空间稀疏的不足, 提供高分辨率的 PM_{10} 浓度反演结果, 为评价区域颗粒物污染状况提供了一种新的有效途径.

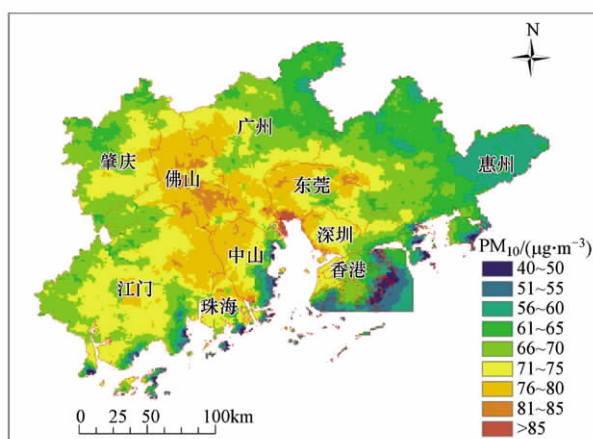


图 5 反演的 PM_{10} 年均质量浓度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the retrieved PM_{10} concentration

4 结论 (Conclusions)

1) 利用最新的 MODIS 气溶胶光学厚度反演算法, 反演了珠江三角洲及香港地区高分辨率 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的 AOD 数据, 并与 AERONET 提供的香港鹤咀和开平站的地面 AOD 观测数据进行了对比分析 ($r=0.917$), 表明反演的 MODIS $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 气溶胶光学厚度数据的可靠性.

2) 分析了 2008 年及不同季节情形下珠江三角洲及香港地区 5 个站点地面监测 PM_{10} 质量浓度与气溶胶光学厚度的相关性, 结果表明, 两者直接相关性较小. 利用气溶胶季节平均标高对 AOD 进行垂直订正和相对湿度对 PM_{10} 质量浓度进行湿度订正后, PM_{10} 质量浓度与 AOD 之间的相关性显著提高. 从季节特征来看, 夏季两者之间的相关性普遍较高.

3) 利用修正后的 PM_{10} 质量浓度与 AOD 线性回归模型, 反演了珠江三角洲及香港地区 PM_{10} 质量浓度及空间分布特征, 并与环境质量公报公布的 PM_{10}

年均浓度和污染源排放空间分布特征进行对比, 显示了 PM_{10} 质量浓度反演结果的合理性. 表明了利用卫星遥感数据有助于分析区域颗粒物浓度的空间分布特征, 弥补了地面监测在空间分布上的不足, 为珠江三角洲及香港地区研究区域颗粒物污染状况提供了一个有效的途径.

责任作者简介: 郑君瑜 (1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事大气排放源清单、不确定性分析、空气质量模型、区域大气污染控制策略和环境暴露风险评价等研究. 发表论文 30 余篇.

致谢: 本文使用了 NASA MODIS 数据、AERONET 的地基验证数据以及香港科技大学提供的珠江三角洲及香港地区相对湿度数据及香港元朗站点的 PM_{10} 数据, 在此表示感谢!

参考文献 (References):

- 程兴宏, 许祥德, 陈尊裕, 等. 2007. 北京地区 PM_{10} 浓度空间分布特征的综合变分分析 [J]. 应用气象学报, 18(2): 165-172
- Cheng X H, Xu X D, Chan C Y, et al. 2007. Integrated analysis on spatial distribution characteristics of PM_{10} concentration based upon variational processing method in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 18(2): 165-172 (in Chinese)
- Christopher S A, Kliche D V, Chou J, et al. 1996. First estimates of the radiative forcing of aerosols generated from biomass burning using satellite data [J]. Journal of Geophysical Research, 101 (D16): 21265-21273
- Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, et al. 2003. Global monitoring of air pollution over land from the earth observing system-terra moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) [J]. Journal of Geophysical Research, 108 (D21): 4661, doi: 10.129/P2002JD003179
- Engel-Cox J A, Holloman C H, Countant B W, et al. 2004. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality [J]. Atmospheric Environment, 38 (16): 2495-2509
- Gupta P, Christopher S A, Wang J. 2006. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities [J]. Atmospheric Environment, 40: 5880-5892
- 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. 2010. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM_{10} 监测方面的应用研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 46(2): 178-184
- He X, Deng Z Z, Li C C, et al. 2010. Application of MODIS AOD in surface PM_{10} evaluation [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 46(2): 178-184 (in Chinese)
- Koelemeijer R B, Homan C D, Matthijsen J. 2006. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe [J]. Atmospheric Environment, 40: 5304-5315
- 李成才. 2002. MODIS 遥感气溶胶光学厚度及应用区域环境大气污染研究 [D]. 北京: 北京大学

- Li C C. 2002. Remote sensing of aerosol optical depth with MODIS and its application in the regional environmental air pollution studies [J]. Beijing: Peking University (in Chinese)
- 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 2003. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染 [J]. 大气科学, 27(5): 869–880
- Li C C, Mao J T, Lau A K H. 2003. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD Products [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 27(5): 869–880 (in Chinese)
- 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 2005. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用 [J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 35(增刊 I): 177–186
- Li C C, Mao J T, Lau A K H. 2005. Application of remote sensing of aerosol optical depth in the air pollution studies over Beijing [J]. Science in China (Ser. D Earth Sciences), 35(suppl I): 177–186 (in Chinese)
- Liou K N. 2004. An Introduction to Atmospheric Radiation (2nd Ed.). Chinese translation [M]. Beijing: China Meteorological Press. 95–96
- 刘勇. 2007. MODIS 气溶胶光学厚度与南京主城区空气污染指数的关系研究 [J]. 南京: 南京师范大学
- Liu Y. 2007. Study on the Correlation between MODIS Aerosol Optical Thickness and Air Pollution Index in Nanjing [J]. Nanjing: Nanjing Normal University (in Chinese)
- Liu Y, Sarnat J A, Kilaru V, et al. 2005. Estimating ground-level $PM_{2.5}$ in the eastern United States using satellite remote sensing [J]. Environmental Science and Technology, 39: 3269–3278
- Liu Y, Franklin M, Kahn R, et al. 2007. Using aerosol optical thickness to predict ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 107: 33–44
- Remer L A, Didier T, et al. 2006. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS: Collection 5 [R]. MD: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, Greenbelt. 1–88
- Seinfeld J H, Carmichael G R, Arimoto R, et al. 2004. ACE-ASIA—Regional climatic and atmospheric chemical effects of Asian dust and pollution [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 85(3): 367–380
- Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. 1997. Second simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35(3): 675–686
- Vidot J, Santer R, Ramon D. 2007. Atmospheric particulate matter (PM) estimation from SeaWiFS imagery [J]. Remote Sensing Environment, 111: 1–10
- Wang J, Christopher S A. 2003. Intercomparison between Satellite-derived aerosol optical thickness and $PM_{2.5}$ mass: implications for air quality studies [J]. Geophysical Research Letters, 30(21): Art. No. 2095, doi: 10. 1029/2003GL01874
- Wang Z F, Chen L F, Tao J H, et al. 2010. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method [J]. Remote Sensing of Environment, 114: 50–63
- 王中挺, 陈良富, 张莹, 等. 2008. 利用 MODIS 数据监测北京地区气溶胶 [J]. 遥感技术与应用, 23(3): 284–289
- Wang Z T, Chen L F, Zhang Y, et al. 2008. Urban surface aerosol monitoring using DDV method from MODIS Data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 23(3): 284–289 (in Chinese)
- Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, et al. 2009. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. Atmospheric Environment, 43(32): 5112–5122