

渤海海域 CALIOP 与 MODIS 气溶胶光学厚度相关性分析

黄 珏¹, 陈晓玲^{1,2}, 田礼乔¹, 于之锋¹

(1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079; 2. 江西师范大学 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330027)

摘要: 以渤海海域为试验区, 对经过时间、空间和波段匹配的 MODIS/Aqua 550 nm 气溶胶光学厚度产品与 CALIOP 532 nm 通道反演得到的气溶胶信息在五种不同空间采样窗口(10 km × 10 km, 30 km × 30 km, 50 km × 50 km, 70 km × 70 km 和 90 km × 90 km)、三种不同时间尺度(日、月、季度)下进行了相关性拟合分析。研究发现, 较小的空间采样窗口可以更准确地反映气溶胶的局部变化特征, 而以季度为时间统计单元能更好地体现气溶胶的季节变化特性。实验结果表明, 在 10 km × 10 km 采样窗口中, 春季的日数据之间相关性较高; 春季和秋季的月均值之间高度相关(R 均大于 0.950)。从而证明, 在特定时间和空间尺度下, 上述两种数据之间确存在良好的相关性, 为利用遥感数据反演渤海海域气溶胶光学厚度信息提供了新的途径。

关键词: CALIOP; MODIS; 气溶胶光学厚度; 相关性分析

中图分类号: TP 79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)01-0113-06

大气气溶胶作为大气中含量很少的由固体和液体微粒共同组成的多相体系^[1], 通过对太阳辐射的散射、吸收作用直接影响地球大气的辐射平衡, 可起到云凝结核的作用; 还通过改变云滴的数密度和平均半径影响云对太阳辐射的反射率以及降水情况^[2], 对大气中发生的许多物理化学过程都有重要的影响。气溶胶的不确定性也是定量遥感中大气校正的主要困难, 因此, 获取准确的大气气溶胶性质参数对定量遥感分析与反演具有重要意义。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)是可获取的气溶胶数据中覆盖范围最广、精确度较高的一种数据^[3], 它可以表征气溶胶光学特性和大气浑浊度^[4-5]。气溶胶光学厚度的探测主要有三种手段: 一是地基观测, 其中, 太阳光度计观测是目前气溶胶观测手段中最准确的方法, 其精度可达 0.01 ~ 0.02^[6-7]。但是, 由于站位数相对较少, 数据时间段较短, 常作为验证数据; 二是通过气溶胶模式, 获得分辨率较高的气溶胶光学厚度时空分布, 但是, 目前对气溶胶复杂的形成过程了解还不够深入, 得到的数据有很大的不确定性^[8]; 三是被动卫星遥感探测, 借助气象卫星高时空分辨率、同步大范围、多通道的特性, 已经针对 NOAA/AVHRR, TOMS, GMS/VISSR, SeaWiFS, POLDER 以及 MODIS 等卫星传感器开展了大量有价值的海上气溶胶反演和应

用研究^[6, 9-10]。但在实际探测过程中常受到云、水汽的干扰和光照条件的限制, 使得目前普遍使用的被动卫星遥感手段应用潜力比较有限。

激光雷达(Lidar), 采用主动遥感方式获取长期、实时、抗干扰、高空间和高时间分辨率的气溶胶光学厚度数据^[11]。搭载在 CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)卫星上的 CALIOP(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)传感器, 既能提供气溶胶光学厚度、云层和植被垂直分布、地表高度等常规观测信息, 又能提供常规被动遥感所无法观测的参量, 如特殊天气气候现象监测信息以及气溶胶和云的光学物理特性

收稿日期: 2011-09-01; 修回日期: 2012-12-04

基金项目: 973 项目(2011CB707106); 国家自然科学基金项目(40906092, 41071261, 40971193, 41101415); 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目(41021061); 湖北省自然科学基金资助项目(2009CDB107); 测绘遥感信息工程国家重点实验室重点自主研究课题; 测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费; 南昌大学“鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室”开放课题(Z03975); 985、国家重点实验室仪器设备专项经费; 中国博士后科学基金(20100480861); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 武汉大学博士生自主科研课题

作者简介: 黄珏(1987-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事定量遥感与遥感应用研究, 电话: 15807156653; E-mail: huangjue2007@126.com; 陈晓玲, 通信作者, 女, 教授, 博士生导师, 电话: 13907195381, E-mail: cecx1@yahoo.com

等^[12]。因此,对 CALIOP 数据的分析与运用能够扩展气溶胶探测的数据源,尤其在可见光数据无法应用的场合,可以为气溶胶监测和科学研究提供更为有效的数据支持。

在广阔的海洋地区,卫星遥感探测手段具有明显的时空优势,并且卫星数据是许多气候模型中的气溶胶数据的重要来源,所以比较分析卫星遥感气溶胶产品就显得十分必要^[13]。作为常用的气溶胶探测手段,晴朗无云条件下 MODIS 气溶胶数据在中国近海区域的真实性与精度已被许多学者利用 AERONET 数据所证实^[4,6,13-15],但利用 CALIOP 数据反演气溶胶光学厚度的研究目前较少。本文通过选取可信度较高的晴空条件下 MODIS/Aqua 传感器 10 km 分辨率的 Level2 MYD04 气溶胶光学厚度数据与准同步的 5 km 分辨率 CALIOP Level 1B 反演数据进行相关性分析,并研究 CALIOP 气溶胶光学厚度数据的可靠性及其时空限制条件,从而进一步挖掘星载激光雷达探测气溶胶参数的应用潜力。

1 数据与方法

1.1 实验数据

实验选取渤海海域为研究区域,采用 NASA 提供的 2006 年 6 月 15 日到 2008 年 5 月 31 日共计 715 d 的 MODIS/Aqua 影像,及相应的 CALIOP 数据和云掩膜数据,提取 MODIS/Aqua 传感器 Level2 MYD04 550 nm 波段 10 km 分辨率的日气溶胶光学厚度数据和 CALIOP 传感器 L1B 产品中 532 nm 通道 5 km 分辨率的气溶胶光学厚度数据,并利用 MODIS/Aqua 传感器 Level2 MYD35 云掩膜数据剔除受到薄云干扰的 MODIS 像元。

1.2 研究方法

首先对上述数据进行预处理,包括依据标准算法获得相应数据集、提取研究区域内有效数据、云检测云掩膜处理等;然后对两种数据进行波段、时间、空间匹配;最后分析两种数据的相关关系。

1.2.1 数据预处理

采用 CALIOP 理论算法标准文档(CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document)中的算法,将 CALIOP L1B 产品中的削弱后向散射系数代入激光雷达方程,结合激光雷达比计算得大气消光系数,积分后即气溶胶光学厚度^[16]。研究海域上空的激光雷达比则需要依据实地调查所获取的数据和邻近

气象站点的参数来具体确定。最终得到 532 nm 和 1 064 nm 通道的气溶胶光学厚度,结合实际,选取 532 nm 通道的气溶胶光学厚度数据进行后续分析。同时读取对应的 MODIS/Aqua 传感器 MYD04 产品的经度、纬度和气溶胶光学厚度。

由于 MODIS 易受云中水分子的影响,因此需进行云检测和云掩膜处理。MYD35 产品“云掩膜及光学检测结果”数据集将云检测可信度分为 4 个等级,本文只选取可信度为 0.99 和 0.96 的“明确晴空”和“大概晴空”像元来反演气溶胶光学厚度。为了与气溶胶光学厚度数据格式相匹配,“云掩膜及光学检测结果”数据集矩阵需进行压缩处理。

1.2.2 波段匹配

因采用 CALIOP 532 nm 通道的气溶胶光学厚度,而 MODIS MYD04 产品没有提供对应波长的数据,故选取最接近的 550 nm 气溶胶光学厚度。研究表明,气溶胶光学厚度与波长之间满足 Ångström 关系式^[17]:

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

式中 λ 为波长, $\tau_a(\lambda)$ 为对应波长的气溶胶光学厚度, β 为 Ångström 浊度系数, α 为 Ångström 波长指数。 α 与气溶胶粒子的平均半径有关,气溶胶粒子越大, α 值越小。依据刘亚豪等^[18]的研究,渤海海域气溶胶 α 的范围是 0.03~2.76,假设在两个较窄波长 λ_1 和 λ_2 之间的 α 为常数,则^[6]:

$$\tau_a(\lambda_1) / \tau_a(\lambda_2) = (\lambda_1 / \lambda_2)^{-\alpha} \quad (2)$$

根据(2)式,550 nm 与 532 nm 通道的气溶胶光学厚度之比在 $\alpha = 3$ 的极端条件下(此时气溶胶粒子很小,其半径接近大气分子)为 0.905,即相对误差仅为 9.5%。 α 越小,其相对误差越小,当 $\alpha = 0$ 时,两者的光学厚度相等。因此,可以直接比较 CALIOP 532 nm 与 MODIS 550 nm 的气溶胶光学厚度。

1.2.3 时间空间匹配

MODIS/Aqua 传感器与 CALIOP 传感器过境时间仅相差 1 min 30 s,可以视为准同步数据,这为直接比较两种气溶胶光学厚度提供了依据。但是,MODIS/Aqua 传感器 MYD04 气溶胶产品空间分辨率是 10 km,而 CALIOP 反演的气溶胶光学厚度的空间分辨率为 5 km,二者差异显著。

针对上述特点,本文对 MODIS 550 nm 气溶胶光学厚度在以 CALIOP 过境轨迹为中心的一定空间区域内进行统计平均。而空间区域面积的确定,则借鉴邓学良等^[15]、Ichok 等^[19]的研究成果:MODIS 气溶

胶光学厚度空间采样窗口从 30 km × 30 km 到 90 km × 90 km 的变化对窗口平均值和标准差影响很小。为了更好地代表这一区域的气溶胶光学厚度值并反映局部特征,沿 CALIOP 飞行轨迹分别选取 10 km × 10 km, 30 km × 30 km, 50 km × 50 km, 70 km × 70 km 和 90 km × 90 km 五种空间采样窗口,分别求窗口内 MODIS 550 nm 和 CALIOP532 nm 气溶胶光学厚度平均值,对比分析匹配结果,并确定最佳空间采样窗口。

1.2.4 相关性验证方法

选用一元线性回归模型模拟经过波段匹配和时空匹配的 MODIS 和 CALIOP 数据间的相关性。

$$\tau_{\text{MODIS}} = A \tau_{\text{CALIOP}} + B \quad (3)$$

式中: τ_{MODIS} 为 MODIS 气溶胶光学厚度; τ_{CALIOP} 为 CALIOP 气溶胶光学厚度; A 为斜率; B 为截距。主

要的验证指标为拟合得到的相关系数(R)、回归估计的标准误差 S 和 F 显著性检验(显著性水平 <0.05)。

2 分析与结果

本文在五种不同空间采样窗口、三种不同时间尺度下对两种数据的最大概率值和平均值分别进行了相关性拟合。

2.1 日数据相关性分析

对 2006 年 6 月 15 日到 2008 年 5 月 31 日共计 715 d 的两种匹配数据经过云掩膜处理后,分析其在五种不同的空间采样窗口中的相关关系,并计算得到含有波段、时间、空间匹配点对的总时间和含有相关性较好(即相关系数 R 大于 0.6)点对的时间及其百分比。结果如表 1 所示。

表 1 不同空间采样窗口相关性对比

Tab. 1 Comparison of correlations of different spatial sampling windows

空间采样窗口 (km×km)	含匹配点对的总时间 (d)	含相关性较好点对的时间 (d)	含相关性较好点对时间所占 百分比(%)
10×10	110	43	39.09
30×30	228	77	33.77
50×50	272	95	34.92
70×70	310	99	31.94
90×90	339	101	29.79

从表 1 中可以看出,随着空间采样窗口的减小,含有相关性较好点对的时间所占的百分比逐渐增大,说明在排除云的干扰后, CALIOP 与 MODIS 的日气溶胶光学厚度数据之间存在一定的相关性。其中, 10 km×10 km 的空间采样窗口百分比最大,即两种数据间相关性最大,因此在后文中选取该窗口作为空间匹配的条件。

2.2 月(季度)数据相关性分析

随后分析在 10 km × 10 km 的空间采样窗口下,不同时间统计单元内(月、季度)数据间的相关关系。图 1 分别表示以月和季度为时间统计单元,含相关性较好点对的时间占含匹配点对总时间的百分比。对比发现,4 月的百分比明显高于其他月份,同时春

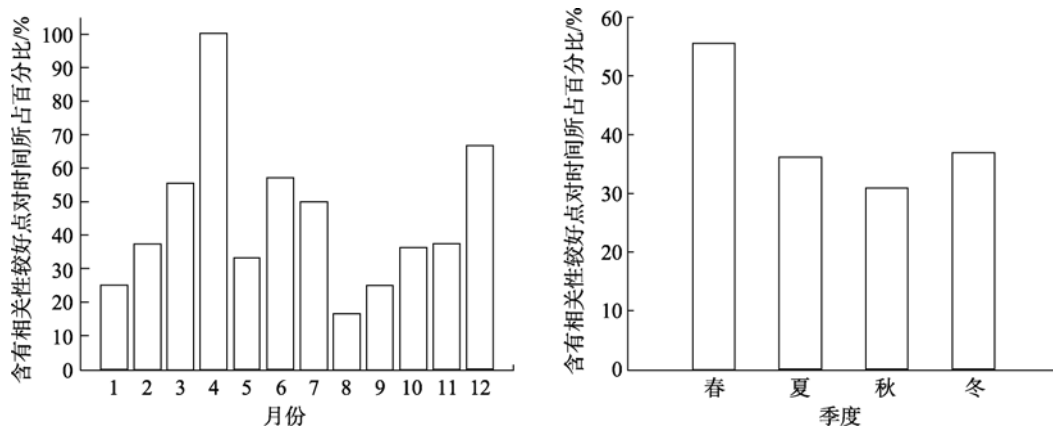


图 1 不同时间单元相关性对比

Fig. 1 Comparison of correlations of different time units

季的百分比其他季度也更高,说明春季两种数据的相关性更显著。

2.3 月(季度)平均值相关性分析

由上述分析可知,随着时间尺度的增大,数据间的相关性表现得越为明显。为了深入研究不同时间统计单元内数据间的相关性,分别比较了两种数据最大概率值之间以及均值之间的相关关系,发现最大概率值之间不存在显著关系,因而重点研究均值间的相关关系。

为此分别求出 CALIOP 与 MODIS 气溶胶光学厚度的月均值并分析了各季度月均值间的相关关系。如图 2 所示,两种数据月均值间确存在较好的相关性, R 达 0.647。而进一步研究各季度内两种数据月均值间的相关性发现,春季和秋季 CALIOP 与 MODIS

数据的月均值高度相关, R 均大于 0.95(图 3); 而夏季和冬季的数据间相关性并不明显。

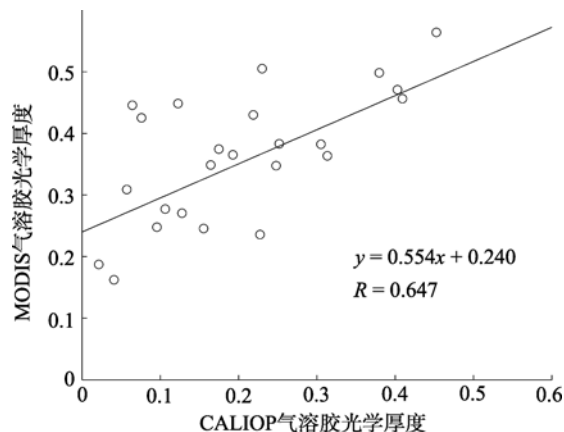


图 2 月均值相关性

Fig. 2 Correlation of mean values of all months

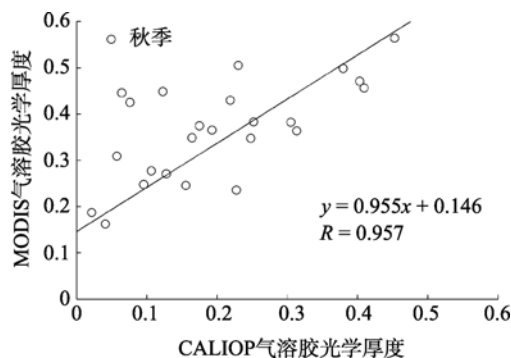
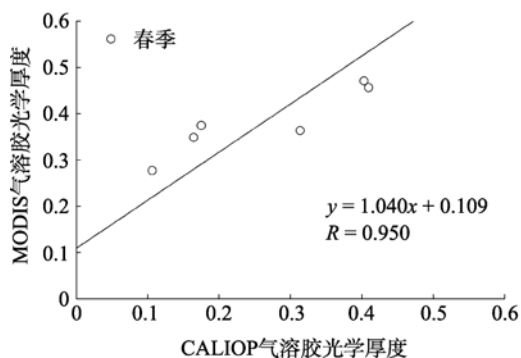


图 3 春季、秋季月均值相关性

Fig. 3 Correlations of month mean values in spring and autumn

通过以上分析发现,两种数据的月均值变化趋势较为接近,特别是春季和秋季的月均值变化趋势高度一致。依据前文所述的拟合验证方法,分别得到 MODIS 与 CALIOP 的气溶胶光学厚度数据全部月均值以及春、秋季月均值之间的相关关系拟合式及参数(表 2):

月均值:

$$\tau_{\text{MODIS}} = 0.554 \tau_{\text{CALIOP}} + 0.240 \quad (4)$$

春、秋季月均值:

$$\text{春季: } \tau_{\text{MODIS}_2} = 1.040 \tau_{\text{CALIOP}_2} + 0.109$$

$$\text{秋季: } \tau_{\text{MODIS}_3} = 0.955 \tau_{\text{CALIOP}_3} + 0.146 \quad (5)$$

由相关系数($R_1=0.647$, $R_2=0.950$, $R_3=0.957$)可知,在 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的空间采样窗口下,两种数据的全部月均值和春、秋季度月均值之间均存在较好的相关性。同时相关关系的线性拟合式均通过了显著性水平 <0.05 的 F 显著性检验,即因变量对自变量的一元线性回归成立,进一步证实两种数据显著相关

以及回归方程的合理性。

表 2 不同时间单元相关关系拟合式参数
Tab. 2 Parameters of correlation fitting of different temporal sampling units

均值类型	R	B	S
月均值	0.647	0.240	0.094
春季月均值	0.950	0.109	0.073
秋季月均值	0.957	0.146	0.041

注: 其中 R 为相关系数, B 为截距, S 为回归估计的标准误差

因此,在特定的空间窗口($10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$),时间尺度(月均值)和一定的季节条件下,两种数据之间确存在良好的相关性,即 CALIOP 反演的气溶胶光学厚度数据的质量与高精度的 MODIS 数据接近,从而证实了 CALIOP 数据在反演气溶胶光学厚度参数方面的可靠性以及在光照、气象条件不佳情况下用

特定时空尺度的 CALIOP 数据替代 MODIS 数据的可行性。

3 结论与讨论

1)在 10 km×10 km 的空间采样窗口下两种遥感数据的相关性较好;而随着空间窗口的增大,二者的相关性明显降低。这可能是由于渤海海域气溶胶的分布受到沿海人为活动影响以及海陆热力差异影响,具有很强的局部特征。因此较小的空间采样窗口可以更准确地表征这种小范围的局部变化特征。

2)以日为时间统计单元,两种数据的相关性不显著;以月为时间统计单元,两种数据的均值相关性较高($R=0.647$);以季度为时间统计单元,春季的日数据之间相关性提高,而春季和秋季的月均值之间高度相关。这说明两种数据在特定季节、较大时间尺度下相关性更为显著。但这种相关性并不稳定,其原因是多样的:首先,已有研究表明受季风和沙尘等因素的影响,渤海海域气溶胶的分布变化具有明显的季节特征,而气溶胶自身的季节特征很可能导致量测结果以及不同数据间相关关系的季节特征。依据本文实验结果,春季两种数据的相关性最好。其次,MODIS 与 CALIOP 传感器的空间分辨率差异显著,主被动式传感器的成像机理也有很大不同,加之观测对象——气溶胶自身的高动态性,都会导致相关关系的不稳定。

3)文中直接沿 CALIOP 飞行轨迹分别求空间窗口内 MODIS 和 CALIOP 气溶胶光学厚度平均值,而 CALIOP 数据点的质量以及 MODIS 与 CALIOP 传感器空间分辨率的差异对渤海海域气溶胶光学厚度反演精度的影响还需进一步研究。

参考文献:

[1] 王明星,张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(1): 119-124.

[2] 毛节泰,张军华,王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.

[3] Ramachandran S. Aerosol optical depth and fine mode fraction variations deduced from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) over four urban areas in India [J]. Geophys Res, 2007, 112, D16207, doi:10.1029/2007JD008500.

[4] 董海鹰,刘毅,管兆勇. MODIS 遥感中国近海气溶胶

光学厚度的检验分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 328-337.

[5] 马井会,郑有飞,张华. 黑碳气溶胶光学厚度的全球分布及分析[J]. 气象科学, 2007, 27(5): 549-557.

[6] 陈本清,杨燕明. 台湾海峡及周边海区 MODIS 气溶胶光学厚度有效性验证[J]. 海洋学报, 2005, 27(6): 170-176.

[7] 马玉娟,刘玉光,李艳芳. 青岛陆上观测点的气溶胶光学厚度特征分析及与渤海气溶胶光学厚度的比较[J]. 海洋湖沼通报, 2009, 1: 1-11.

[8] 张莹,孙照渤. 中国中东部 MODIS 与 MISR 气溶胶光学厚度的对比[J]. 气象科学, 2010, 30(1): 48-54.

[9] Higurashi A N T. Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on global scale using NOAA /AVHRR[J]. Atmos Sci, 1999, 56(7): 924-941.

[10] 郝增周,潘德炉,白雁. SeaWiFS 遥感资料分析中国海域气溶胶光学厚度的季节变化和分布特征[J]. 海洋学研究, 2007, 25(1): 80-87.

[11] 杨瑞科,马春林,李良超. 沙尘暴多重散射对激光脉冲传输的影响[J]. 中国激光, 2007, 10(34): 1393-1397.

[12] 赵一鸣,江月松,张绪国,等. 利用 CALIPSO 卫星数据对大气气溶胶的去偏振度特性分析研究[J]. 光学学报, 2009, 11: 2943-2951.

[13] 张军梅,刘毅. 东中国海域上空 modis 与 seawifs 两颗卫星反演气溶胶的比较[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 78-81.

[14] He Q, Li C. Validation of MODIS derived aerosol optical depth over the Yangtze River Delta in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 1649-1661.

[15] 邓学良,潘德炉,何冬燕,等. 中国海域 MODIS 气溶胶光学厚度检验分析[J]. 大气科学学报, 2009, 32(4): 558-564.

[16] 田礼乔. CALIOP 气溶胶数据辅助的海岸带浑浊水体 MODIS/Aqua 影像大气校正研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.

[17] Eck T F, Holben B N, Reid J S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and

- desert dust aerosols[J]. *Geophys Res*, 1999, 104(24): 31333-31349.
- [18] 刘亚豪, 刘玉光, 顾艳镇. 渤海及北黄海气溶胶分布特征和大气校正研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2008, 3: 13-26.
- [19] Ichoku C, Chu D A, Matto S, et al. A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products [J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(12): 121-124.

Correlational research on aerosol optical depths from CALIPSO and MODIS/Aqua over the Bohai Sea

HUANG Jue¹, CHEN Xiao-ling^{1, 2}, TIAN Li-qiao¹, YU Zhi-feng¹

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Ecological Environment and Resource Development, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China)

Received: Sep., 1, 2011

Key words: CALIOP; MODIS; aerosol optical depth(AOD); correlation fitting analysis

Abstract: Taking the Bohai Sea as a subject, this research conducted correlation fitting analysis of aerosol optical depth at 532 nm derived from CALIOP aerosol profiles and at 550 nm derived from MODIS/Aqua aerosol profiles at different spatial sampling scales (10 km × 10 km, 30 km × 30 km, 50 km × 50 km, 70 km × 70 km and 90 km × 90 km) and time scales (day, month and season). It was found that smaller spatial scale and larger time scale could illustrate the characteristics of aerosol better than others do. With a correlation coefficient over 0.950, the results demonstrated a good correlation between quarterly averages from the two sensors under the 10 km × 10 km window in spring and autumn. The research showed that in specific temporal and spatial unit these two kinds of data manifest good correlation, which may provide a new method for research on aerosol optical depth over the Bohai Sea.

(本文编辑: 刘珊珊)