

基于星载激光雷达的气溶胶光学厚度与海面风速关系研究

汤佳沅, 吴东

(中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 海面上空气溶胶的产生和传输在一定程度上和风有关, 研究气溶胶和风速间的关系, 对增加大气模式的预测精度有重要意义。使用 CALIPSO 卫星 CALIOP 激光雷达 L2(V3.01) 气溶胶层与云层数据, 与准同步 AQUA 卫星的 AMSR-E 海面风速数据, 采用 2007 年和 2008 年 1 月、4 月、7 月、10 月共 8 个月的观测数据, 研究波长为 532 nm 的气溶胶光学厚度 (AOD) 与海面风速间的关系及其随季节、年份的变化。结果显示, 无云条件下, 全球海洋上空 AOD 与风速存在关系: 当风速在 0 ~ 12 m/s 时, AOD 随风速增大而增加, 当风速在 4 ~ 12 m/s 时, AOD 与风速近似线性关系, 当风速大于 14 m/s 时, AOD 趋于平稳。

关键词: 遥感; 星载激光雷达; 气溶胶; 气溶胶光学厚度; 海面风速

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2013)01-0025-04

Relationship between aerosol optical depth and sea surface wind speed based on CALIPSO lidar measurements

TANG Jia-yuan, WU Dong

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Aerosol production and transmission over oceans are related to wind in some extent. Research on the relationship between wind speed and aerosol might increase the accuracy of forecast, which has important meaning to atmospheric model. The relationship between aerosol optical depth (AOD) and sea surface wind speed was explored using remotely sensed data from cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization (CALIOP) on board CALIPSO satellite and collocated advanced microwave scanning radiometer (AMSR-E) on board AQUA satellite. Measurements in eight months (January, April, July and October, 2007 and 2008) were used to study the relationship between sea surface wind speed and AOD at the wavelength of 532 nm, and its changes with seasons and years. The results show that, in cloud free condition, aerosol optical depth over global ocean is related to sea surface wind speed. For wind speed less than 12 m/s, AOD increases with wind speed. For wind speed between 4 m/s and 12 m/s, AOD increases quasi-linearly with the increase in surface wind. For higher wind speed values, *i.e.* wind speed is more than 14 m/s, and the relationship shows a tendency toward leveling off.

Key words: remote sensing; CALIPSO lidar; aerosol; aerosol optical depth; sea surface wind speed

1 引言

海洋是自然源气溶胶产生的最大来源, 气溶胶通过吸收和散射太阳短波辐射以及地球长波辐射, 影响地球辐射平衡, 同时, 气溶胶作为云的凝结核影响云的辐射特性以及作为反应表面影响大量化学反应的速度。因此海洋上空气溶胶的研究对大气辐射和气候变化等问题有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金 (41228008, 41076116, 40876017) 资助项目

作者简介: 汤佳沅 (1988 -), 女, 研究生, 主要从事海洋光学与激光探测方面的研究。E-mail: jia yuan0205@126.com

导师简介: 吴东 (1964 -), 博士, 教授, 主要从事海洋光学与激光探测方面的研究。E-mail: dongwu@ouc.edu.cn

收稿日期: 2012-10-09

海洋上空气溶胶种类繁多,包括海盐、从陆地传来的沙尘和烟尘、城市或工业污染、生物物质粒子和有机物、硫化物和氮化物等。其中自然源海洋性气溶胶分为主类气溶胶和第二类气溶胶^[1]。主类气溶胶是波浪将海水泡沫抛向空中破裂后产生的含盐(或生物微体微粒)小液滴悬浮空中,第二类气溶胶是海洋生物释放出挥发性有机化合物。而海洋上空人为源的气溶胶也是由风的作用,使沙尘、污染物等由陆地传输到海洋上空。可见,海面上气溶胶的产生原因多样,但在某种程度上都和风有关。

目前关于 AOD 与海面风速关系的研究,主要集中在纯净海洋性气溶胶即自然源气溶胶与风速关系的研究,得到的关系包括线性关系、指数关系和幂次关系等。研究区域多选择远海地区以避免人为源气溶胶的影响。如 Mulcahy^[2]在清洁海洋环境条件和风速变化相对平稳的条件下,得出 AOD_{500} 与风速的平方近似成一定比例。Huang^[3]用 AOD 值和风向定义远海区域,得出当风速 0~20 m/s 时, AOD_{550} 与风速存在高度相关的线性关系。Kiliyanpilakkil^[4]使用 2006~2011 年 CALIPSO 气溶胶数据和 AMSR-E 风速数据,研究代表清洁海洋性气溶胶的 15 个区域,得出当风速小于 4 m/s, AOD_{532} 对风速依赖很小,当风速在 4~12 m/s 时, AOD_{532} 与风速成线性关系,当风速大于 18 m/s 时, AOD_{532} 趋向于平稳。Smirnov^[5]利用海洋气溶胶网络得出风速与 AOD 存在线性关系,拟合关系式的斜率范围在 0.004~0.005 之间,并且指出不同风速来源对研究结果存在一定影响。

本文研究全球范围内海面上空气溶胶光学厚度与海面风速的关系,将自然源和人为源气溶胶包含在内,期望得到气溶胶光学厚度与海面风速间广泛适用的关系。

2 数据及处理

本文采用 CALIPSO 卫星数据提供的云和气溶胶光学特性信息,及搭载在 AQUA 卫星上 AMSR-E 的海面风速信息。CALIPSO 卫星于 2006 年 4 月 28 日成功发射,在全球范围内对云和气溶胶进行观测,对气溶胶和云精确参数化,以提高气候模型、天气预报模型的精度^[6]。CALIOP 是 CALIPSO 卫星的载荷之一,为双波长的正交偏振激光雷达(波长为 532 nm, 1064 nm),提供全球气溶胶的垂直分布信息,是目前唯一可测量全球气溶胶高度分布的激光雷达,并且可对众多种类的气溶胶进行分类识别。Aqua 卫星与 CALIPSO 卫星同属 A-train 系列卫星,两者轨道相同,观测时间相差 75 s,因此认为两者观测准同步^[7]。

文中使用 2007 年和 2008 年的 1 月、4 月、7 月、10 月共 8 个月的 CALIPSO 激光雷达 Level 2 V3.01 的气溶胶层数据和云层数据,气溶胶层数据提供水平分辨率为 5 km 的柱状气溶胶光学厚度(Column_Optical_Depth_Aerosols),气溶胶层数数据(Number_Layers_Found),气溶胶的层顶海拔高度(Layer_Top_Altitude),

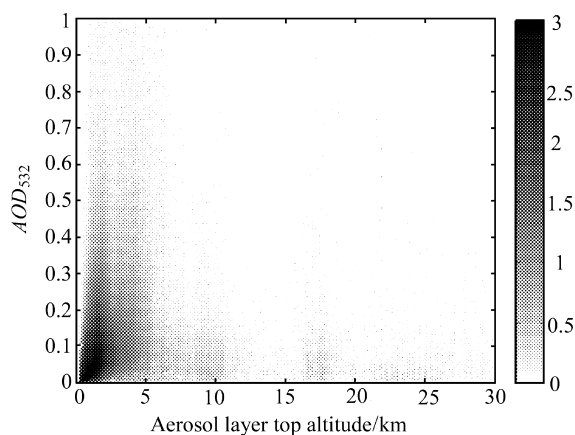


Fig.1 The relationship between aerosol layer top altitude and AOD_{532}

云层数据提供无云数据筛选条件。海面风速采用匹配对应的 V7 版 AMSR-E 日平均海面风速数据, V7 版本数据提供低频和中频风速,文中使用中频风速数据(wspdMF)。

在无云条件下,对 2007 年、2008 年共 8 个月的全球海面上空气溶胶数据进行统计分析,得到气溶胶层顶高度与波长为 532 nm 的气溶胶光学厚度 AOD_{532} 的三维统计直方图,如图 1 所示。图中色标表示 \lg [出现次数], 8 个月数据共有 4070773 点符合条件。由图可见, AOD_{532} 主要分布在 0~0.2 之间(占 91.22%),气溶胶层顶高度主要分布在平均海平面 0~5 km 之间(占 95.79%),文中采用气溶胶高度在 5 km 以下的数据进行分析。

3 结果与讨论

以 1 月、4 月、7 月、10 月作为四季的代表,图 2 为 2007 年和 2008 年共 8 个月各月份的 AMSR-E

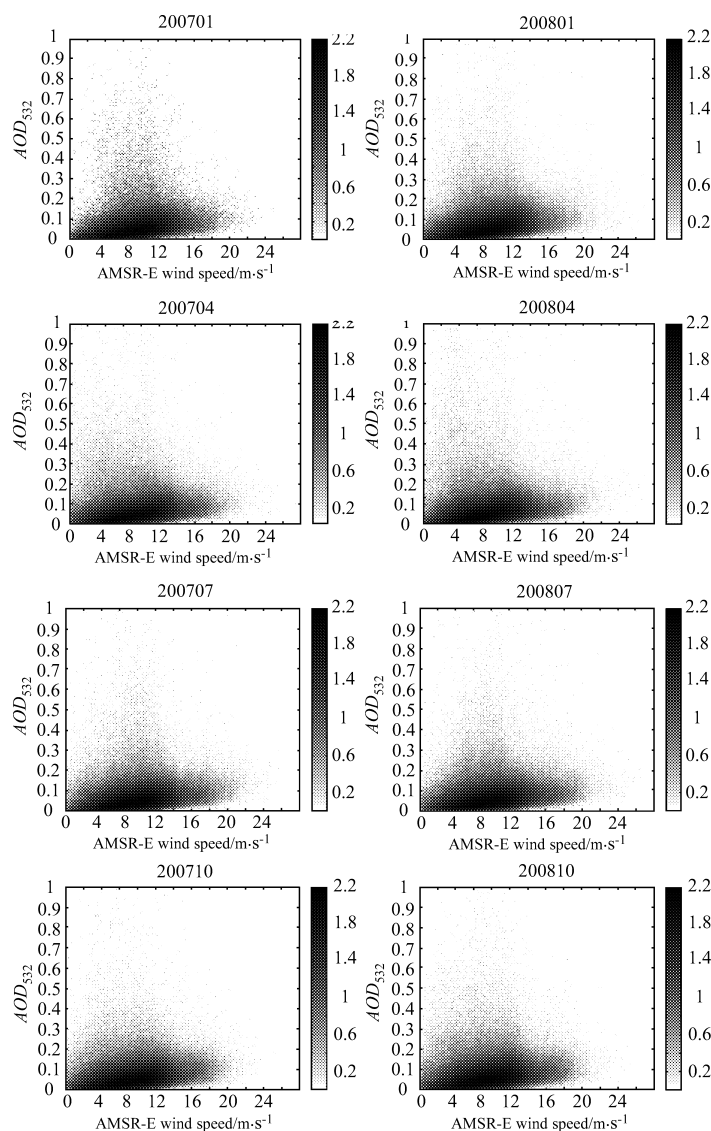


Fig.2 The relationship between AMSR-E wind speed and AOD_{532} for each month

中频海面风速与 AOD_{532} 的三维统计直方图，图中色标表示 $\lg[\text{出现次数}]$ 。由图可见，数据点主要出现在海面风速区间 $0 \sim 20 \text{ m/s}$ 之内，当 AOD_{532} 值小于 0.2 时，光学厚度与风速关系显著，且随季节和年份的变化不明显，当 AOD_{532} 值大于 0.2 时，出现的数据点相对较少，但数据点所在的风速区间随季节变化，而随年份的变化则基本相同。

使用 2007 和 2008 两年的 1、4、7、10 月共 8 个月数据，做出 AOD_{532} 与海面风速关系三维统计直方图，如图 3 所示。图中灰色曲线为 Kiliyanpilakkil 等 [4] 采用 2006 年 6 月至 2011 年 4 月的 CALIPSO 卫星数据与 AMSR-E 海面风速数据得出的纯净海洋性气溶胶光学厚度与风速关系，其函数关系为 $AOD_{532} = \frac{0.15}{(1 + 6.7e^{-0.17U})}$ 。对于数据筛选，Kiliyanpilakkil 选取了全球海洋上空 15 个远离人为污染和矿物粉尘传输路径的区域，选择气溶胶层顶高度在 2 km 以下，气溶胶层为单层，激光雷达比在

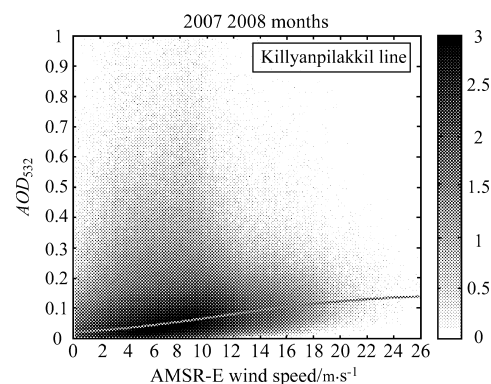


Fig.3 The relationship between AMSR-E wind speed and AOD_{532} for eight months

(20 ± 6) sr 的气溶胶数据。本文仅作了无云和气溶胶层顶高度在 5 km 以下的限制,若不考虑 AOD_{532} 值大于 0.2 以上的散点,在全球海域得到的 AOD_{532} 随风速的变化趋势仍可以用 Kiliyanpilakkil 关系式很好地表示,即当风速在 0 ~ 12 m/s 时, AOD_{532} 随风速增大而增加,当风速在 4 ~ 12 m/s 时, AOD_{532} 与风速近似线性关系,风速大于 14 m/s 时, AOD_{532} 的值趋于平稳。当 AOD_{532} 小于 0.2 时,按 Kiliyanpilakkil 公式计算得到的光学厚度标准偏差为 0.041,若使用全部数据点,得到标准偏差为 0.097。目前研究结果显示,相对纯净的海洋性气溶胶的光学厚度不超过 0.3^[2~5],图中 AOD_{532} 的高值点可能是沙尘气溶胶或陆地污染物传向海洋引起的。其中, AOD_{532} 值在 0.2 以上的散点占全部数据点的 7.81% (图 3 共 3413081 数据点)。另外, CALIPSO 卫星数据的气溶胶分层错误也会引起气溶胶光学厚度的计算误差^[8]。经计算, AOD_{532} 值大于 0.2 的点,其所在的气溶胶层数大于两层的占 73.56%。

4 总 结

本文使用 CALIPSO 星载激光雷达气溶胶层 / 云层数据,结合 AMSR-E 海表面风速数据,研究全球范围内海面上空气溶胶光学厚度与海面风速间的关系,得到两者关系的三维统计直方图。研究结果表明,波长为 532 nm 的气溶胶光学厚度与风速关系随季节和年份基本保持不变。对比 Kiliyanpilakkil 在纯净海洋性气溶胶条件下拟合的关系式,本文使用 2007 年和 2008 年共 8 个月的数据得到的 AOD_{532} 随风速的变化趋势与之相近,表明全球海洋上空的气溶胶当风速为 0 ~ 12 m/s 时,其光学厚度随风速的增大而增加,在风速为 4 ~ 12 m/s 近似成线性关系,当风速较大时,光学厚度值趋于平稳。

致谢: 感谢美国国家航空航天局兰利研究中心的科学数据中心 (ASDC) 提供的 CALIPSO 激光雷达观测数据。感谢美国遥感系统 (RSS) 公司提供的 AMSR-E 数据 (下载于 www.remss.com)。

参考文献:

- [1] O'Dowd C D, de Leeuw G. Marine aerosol production: A review of the current knowledge [J]. *Phil. Trans. R. Soc. A: Mathematical, Phys. Eng. Sci.*, 2007, 365: 1753-1774.
- [2] Mulcahy J P, O'Dowd C D, Jennings S G, *et al.* Significant enhancement of aerosol optical depth in marine air under wind conditions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35: L16810.
- [3] Huang H, Thomas G E, Grainger R G. Relationship between wind speed and aerosol optical depth over remote ocean [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, 10: 5943-5950.
- [4] Kiliyanpilakkil V P, Meskhidze N. Deriving the effect of wind speed on clean maritime aerosol optical properties using the A-Train satellites [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, 11: 11401-11413.
- [5] Smirnov A, Sayer A M, Holben B N, *et al.* Effect of wind speed on aerosol optical depth over remote oceans, based on data from the maritime aerosol network [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2012, 5: 377-388.
- [6] Winker D M, Vaughan M A, Omar A H, *et al.* Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J]. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 2009, 26: 2310-2323.
- [7] Hu Y, Stamnes K, *et al.* Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, 8: 3593-3601.
- [8] Omar A, Winker D, Vaughan M, *et al.* The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 2009, 26: 1994-2014.