

# 基于星载激光雷达数据的海面风速探测

吴 东<sup>1</sup> 张小雪<sup>1</sup> 阎逢旗<sup>1</sup> 刘兆岩<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> 中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100  
<sup>2</sup> 美国国家航空航天局兰利研究中心, 弗吉尼亚州 汉普顿 23681  
<sup>3</sup> 美国航空航天研究所, 弗吉尼亚州 汉普顿 23666

**摘要** 使用新版 (Version 3.01) 星载激光雷达 CALIPSO Level 1 剖面数据和 Level 2 的大气气溶胶光学厚度 (AOD) 数据反演全球海面风速。将 AOD 数据用于大气双程透射率的校正。对 CALIPSO 所采集的 2007 年 1 月、4 月、7 月和 10 月 532 nm 波长无云激光测量数据进行应用计算, 采用 532 nm 退偏比经验修正海面白帽及水下次表层水体散射的影响, 同时选用准同步的 AMSR-E 海面风速测量值为真值进行对比。对应 2007 年的 4 个月, 由 CALIPSO 星载激光雷达 532 nm 单脉冲测量数据反演海面风速的标准偏差分别为 1.24、1.24、1.24、1.20 m/s, 由 5 km 滚动平均数据反演海面风速的标准偏差分别为 0.98、1.02、0.98、0.94 m/s。结果表明, 采用的数据反演方法可行且数据利用率得到提高。

**关键词** 遥感; 星载激光雷达; 海面后向散射; 海面风速; 气溶胶光学厚度

**中图分类号** P733.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0828002

## Sea Surface Wind Speed Detection by Using the Data of CALIPSO Lidar

Wu Dong<sup>1</sup> Zhang Xiaoxue<sup>1</sup> Yan Fengqi<sup>1</sup> Liu Zhaoyan<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China  
<sup>2</sup> NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia 23681, USA  
<sup>3</sup> National Institute of Aerospace, Hampton, Virginia 23666, USA

**Abstract** The global sea surface wind speeds are retrieved from the Version 3.01 CALIPSO lidar level 1 profile products and level 2 aerosol optical depth (AOD) products. The corresponding AOD data are used for correction of the two-way atmospheric transmittance, which allows wind speeds retrieval in the presence of significant amount of aerosols. Four months (January, April, July and October, 2007) of the CALIPSO lidar 532 nm data are selected. The AMSR-E sea surface wind speed data are collocated with the CALIPSO data and used for comparison. Effects from whitecaps and subsurface backscattering signals are corrected empirically using the lidar depolarization ratio measurement. The standard deviations of wind speeds retrieved by the CALIPSO lidar single-shot data and those by AMSR-E are 1.24, 1.24, 1.24, 1.20 m/s, respectively, for January, April, July and October, 2007. The standard deviations are reduced to 0.98, 1.02, 0.98, 0.94 m/s, respectively, when the lidar data is smoothed with a 5 km running window. The results show that the method works well and the data utilizing rate increases.

**Key words** remote sensing; satellite-born lidar; sea surface backscattering; sea surface wind speed; aerosol optical depth (AOD)

**OCIS codes** 280.1350; 280.3640; 010.0280; 010.1285; 010.1350

## 1 引 言

星载激光雷达作为一种具有高精度、高空间分辨率的新型主动式光学卫星传感器, 被广泛地应用在大气探测。如何利用星载激光雷达对海洋进行

观测, 并研究和发展其海洋信息的提取技术和反演方法是现今急需解决的一个课题。云-气溶胶激光雷达和红外探测者观测卫星 (CALIPSO) 的主要目标是更好地研究云和气溶胶的形成、发展过程及其

收稿日期: 2012-03-05; 收到修改稿日期: 2012-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(40876017, 41076116)资助课题。

作者简介: 吴 东(1964—), 男, 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

相互作用,以及对气候和温度的变化的影响<sup>[1]</sup>。对其主要载荷正交偏振云-气溶胶激光雷达的激光穿透概率分析表明,占总数据 55.6% 的单脉冲激光数据可以用来探测海面信息<sup>[2,3]</sup>,本文将 CALIPSO 卫星的星载激光雷达数据用于实现星载激光高分辨率海面风速探测。

1994 年划时代的 LITE 实验,由发现者号航天飞机将激光雷达送入太空,这是第一次在全球尺度范围对选定海域进行的激光探测实验。Menzies 等<sup>[4]</sup>报道了 LITE 激光雷达海面风速测量的初步研究结果,并给出了发展星载激光雷达的建议。2003 年,美国宇航局(NASA)成功发射了载有激光高度计的 ICESat 卫星,主要用于基极地海冰高度的测量。Lancaster 等<sup>[5]</sup>报道了该星载激光雷达 GLAS 海面风速测量的研究结果,指出星载激光海面反射不仅可以用来进行海面风速的探测,还可以用于激光雷达系统校正评价,以避免用白沙校正系统出现饱和的困难。2006 年 CALIPSO 卫星成功发射,NASA 的 Hu 等<sup>[6]</sup>于 2008 年报道了采用该卫星激光雷达数据进行海面风速测量的初步研究结果,并由最小方差拟合给出了三段式海面风速与海面均方斜率的关系表达式。该研究利用了 2007 年 1 月间采集的夜晚晴空数据。

获得高分辨率的海表风速对于提高数字天气预报和海洋预报有着重要意义。使用较长时间(2007 年 1 月、4 月、7 月和 10 月)的 CALIPSO 最新版本(Version 3.01)的激光雷达 532 nm 通道 Level 1 剖面数据和 Level 2 气溶胶光学厚度(AOD)数据反演海面风速。与文献<sup>[6]</sup>方法不同,本文采用大气后向散射积分(IAB)和 AOD 数据共同判定大气清洁度以进行数据筛选,使用 AOD 数据进行大气双程透射率校正,最终可获得最高水平分辨率为 70 m 的海面风速。并由于进行 AOD 的大气衰减校正,使得有较显著的大气气溶胶存在的数据反演成为可能,因此增加了反演的有效数据量,提高了数据利用率,并可作为小尺度海面风速探测研究提供新的数据源。

## 2 探测原理

CALIPSO 卫星的激光雷达系统,同时发射双波长(1064 nm 和 532 nm)激光脉冲,脉冲能量均约为 110 mJ,接近垂直地面发射,接收望远镜直径为 1 m,有三个接收通道,分别接收波长为 1064 nm 后向散射信号和波长为 532 nm 的两个正交偏振后向散射信号。垂直最高分辨率为 30 m,在地球表面光斑直径约为 70 m,水平间隔为 333 m。风可以造成海面波浪起伏形成粗糙的水面,激光在海面的后向散射可用几何光学来说明,激光后向散射可以看成是光斑覆盖区域内许多微小镜面反射点的贡献。1966 年 Kodis<sup>[7]</sup>指出平均后向散射正比于镜面反射点的平均数与这些点的平均曲率的乘积。1968 年 Barrick<sup>[8]</sup>运用物理光学方法导出雷达后向散射截面与入射角及粗糙表面均方斜率的理论关系,将 Kodis 的思路用解析式表达出来,该理论也可应用在激光雷达上。1983 年 Bufton 等<sup>[9]</sup>的机载激光海面散射测量、1998 年 Menzies 等<sup>[10]</sup>报道的 LITE 激光雷达海面风速测量、2005 年 Lancaster 等<sup>[5]</sup>报道的 GLAS 星载激光雷达海面风速测量以及 2008 年 Hu 等<sup>[6]</sup>报道的 CALIPSO 星载激光雷达海面风速测量均基于该理论,其表达式为<sup>[6]</sup>

$$\gamma = \frac{\rho}{4\pi\sigma^2 \cos^4\theta} \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

其中  $\gamma$  为激光海表面后向散射系数, $\rho$  为海面 Fresnel 反射率,对于 532 nm 波长, $\rho \approx 0.0209$ ;  $\theta$  为激光发射角, $\sigma^2$  为具有统计意义的反映海面粗糙程度的海面均方斜率。

1954 年 Cox 等<sup>[11]</sup>通过对海面太阳耀斑的统计分析,给出了海面以上 12.4 m 风速与海面均方斜率之间的线性关系式,1972 年 Wu<sup>[12]</sup>给出海面以上 10 m 风速与海面均方斜率间的两段(风速大于和小于 7 m/s)对数线性关系,2008 年, Hu 等<sup>[6]</sup>采用 CALIPSO 卫星激光雷达一个月的夜晚晴空数据,分析给出

$$\sigma^2 = \begin{cases} 0.0146 \sqrt{U_{10}}, & U_{10} \leq 7 \text{ m/s} \\ 0.003 + 0.00512U_{10}, & 7 \text{ m/s} \leq U_{10} \leq 13.3 \text{ m/s} \\ 0.138 \lg U_{10} - 0.084, & U_{10} > 13.3 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

于是,根据激光海面后向散射系数  $\gamma$  由(1)式可得到海面均方斜率  $\sigma^2$ ,再由(2)式可推算出海面风速。对

于 CALIPSO 星载激光雷达,归一化激光雷达方程可表示为

$$\beta'(z) = \beta(z)T^2(z), \quad (3)$$

$$T^2(z) = \exp\left[-2 \int_z^{z_{\text{sat}}} \sigma(z')dz'\right], \quad (4)$$

式中  $z$  为海拔高度,  $z_{\text{sat}}$  为卫星的海拔高度,  $\sigma$  为消光系数。于是激光海面后向散射值

$$\gamma = \beta(0) = \beta'(0)/T^2(0). \quad (5)$$

因此, 只要由 CALIPSO 星载激光雷达 Level 1 数据提供的激光测量值正确确定海表反射信号  $\beta'$ , 再进行双程大气透射率  $T^2$  校正, 即可获得激光海面后向散射值进而测得海面风速值。

双程大气透射率的校正, Hu 等<sup>[6]</sup> 采用经验算法由 CALIPSO 激光雷达 Level 1 数据求得。不同于该方法, 本文采用的方法及原理介绍如下。在无云状态下, 大气在可见光波段的衰减主要由分子、臭氧和气溶胶所贡献, 相应的后向散射系数、消光系数为分子、臭氧和气溶胶三组分贡献的叠加, 即

$$\sigma(z) = \sigma_m(z) + \sigma_{\text{O}_3}(z) + \sigma_a(z), \quad (6)$$

于是

$$T^2(z) = T_m^2(z)T_{\text{O}_3}^2(z)T_a^2(z). \quad (7)$$

双程大气透射率校正, 即在海面的  $T^2(0)$  的计算, 通过(7)式进行。分子和臭氧贡献的计算利用文件[13]提供的模型及 Level 1 数据计算。气溶胶的贡献  $T_a^2(0)$  则通过 CALIPSO 官方提供的 Version 3.01 CALIOP 5 km Level 2 的分层气溶胶产品获取气溶胶光学厚度计算而得。

### 3 海面风速反演

本文全部数据处理, 包括海面风速反演和误差分析工作均采用 Matlab 软件根据上述原理编程实现。

#### 3.1 数据

采用 2007 年 1 月、4 月、7 月和 10 月 Version 3.01 版的 CALIPSO 星载激光雷达 Level 1 产品数据获取 532 nm 通道激光海面反射信号和大气分子、臭氧分布的剖面数据, 同时采用对应的 Version 3.01 星载激光雷达 5 km Level 2 分层气溶胶产品数据获取匹配的大气气溶胶光学厚度数据以便对大气气溶胶的衰减进行校正。

由于 Aqua 卫星和 CALIPSO 卫星都是 A-train 系列卫星成员, 轨道相同, 前后仅有 75 s 的时间间隔, 于是采用与 CALIPSO 星载激光雷达数据相对应的 Aqua 卫星的 AMSR-E 海面风速数据作为对比。

#### 3.2 数据处理

为减少大气校正的复杂性, 选取夜间无云较为

清洁的大气环境下的海面数据进行分析。与 Hu 等<sup>[6]</sup> 方法不同, 采用大气后向散射积分 (IAB) 和气溶胶双向透射率  $T_a^2$  (由 AOD 数据计算得出) 共同判定大气清洁度以进行数据筛选。将筛选条件限定为 IAB 小于  $0.017 \text{ sr}^{-1}$ , 同时  $T_a^2$  在 0.8 以上<sup>[14]</sup>。

由于星载激光雷达 Level 2 产品数据为 5 km 平均数据, 每个数据点对应的 Level 1 产品数据中 15 个单次脉冲采样点均近似认为具有相同 AOD 值。Level 1 产品单脉冲测量数据的激光海表信号提取, 采用 Hu 等<sup>[6]</sup> 的方法。经过大气双程透射率校正之后, 可以得到初步的激光海面后向散射系数  $\gamma$ 。取与激光测量点匹配的 AMSR-E 海面风速数据作为对比数据, 给出激光海面后向散射系数  $\gamma$  与 AMSR-E 海面风速  $U$  的关系图。图 1 给出单脉冲激光雷达数据经 5 km 滚动平均后与 AMSR-E 海面风速  $U$  的关系图。将对比数据点出现次数取以 10 为底的对数, 用不同颜色表示 (彩图请见网络电子版), 即图中色标表示  $\lg N$ ,  $N$  为出现次数, 色标最大值为 4.2。图 1(a)~(d) 分别表示 2007 年 1 月、4 月、7 月和 10 月的数据, 彩色曲线是  $\sigma^2-U$  关系曲线, 红色、绿色和黑色曲线分别代表 Cox 等<sup>[11]</sup>、Wu<sup>[12]</sup> 以及 Hu 等<sup>[6]</sup> 给出的关系曲线。横轴为激光海面后向散射系数  $\gamma$  的倒数, 纵轴为对应的 AMSR-E 海面风速值。

从图 1 可以看出, 在风速低于 12 m/s 的区域, 数据分布与 Hu 等<sup>[6]</sup> 给出的关系曲线吻合最好。在风速高于 12 m/s 的高风速区域, 数据分布与上述经验关系出现偏差, 这主要是由于高风速导致海面白帽, 在白帽内激光的多次散射造成信号的退偏现象, 同大气气溶胶对信号的退偏一样, 对激光雷达信号的影响增大<sup>[6,15~18]</sup>。Hu 等<sup>[6]</sup> 的方法是利用退偏比和白帽中多次散射之间的经验关系来修正海面白帽及水下次表层水体散射的影响, 并以退偏比为 15% 的经验值对 2007 年 1 月的数据进行修正, 取得较好的结果。

本文将此经验算法应用于 2007 年新版 1 月、4 月、7 月和 10 月单脉冲测量数据的修正, 选取退偏比  $\delta$  为 15% 的经验值修正不能完全适用于其他月份。实验结果表明, 1 月和 7 月选取  $\delta=15\%$ , 4 月和 10 月选取  $\delta=25\%$  可以获得较好的修正。图 2 给出经修正后的 5 km 滚动平均激光海面后向散射系数与 AMSR-E 海面风速的关系图, 图 2 中色标定义与图 1 相同。图 3 给出未经滚动平均的单脉冲激光雷达数据与 AMSR-E 海面风速  $U$  的关系图, 图 3 中色标定义与图 1 相同。

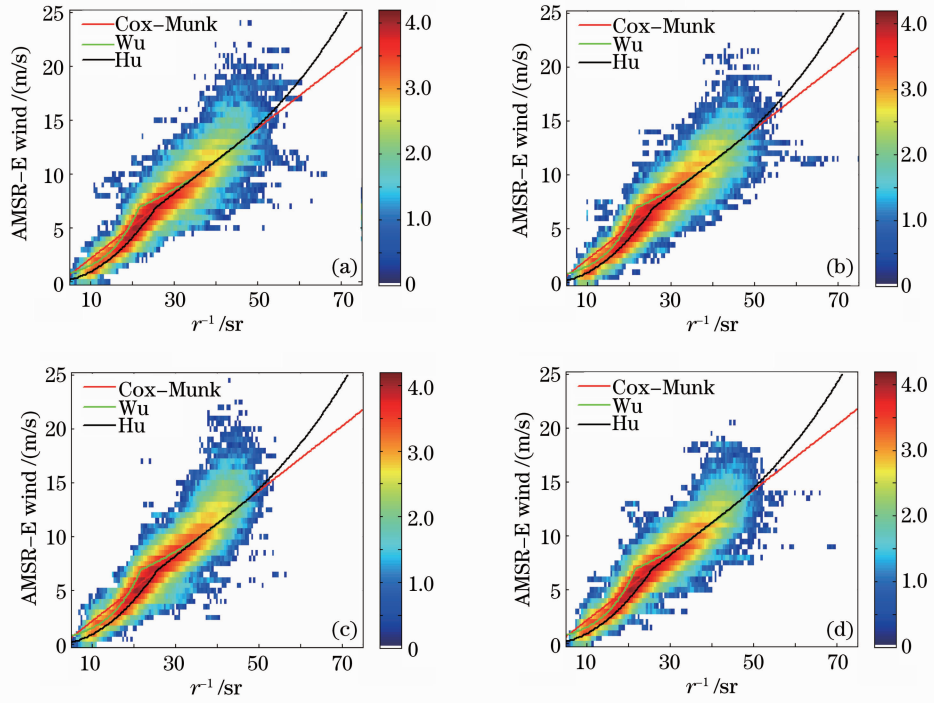


图 1 2007 年不同月份的 5 km 滚动平均后的 CALIPSO 激光雷达 532 nm  $\gamma$  与  $U$  的关系  
三维直方图。(a) 1 月；(b) 4 月；(c) 7 月；(d) 10 月

Fig. 1 3-D histograms of 5 km running mean CALIPSO lidar 532 nm  $\gamma$  versus  $U$  of different months in 2007.  
(a) January; (b) April; (c) July; (d) October

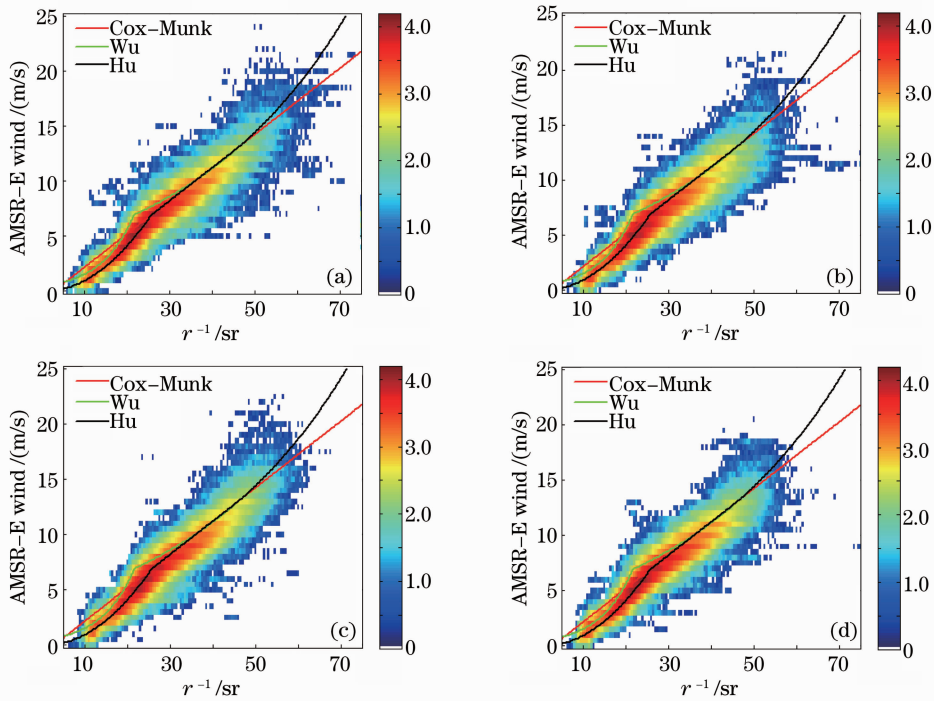


图 2 2007 年不同月份的经海面白帽及水下表层水体散射信号修正的  $\gamma$  与  $U$  的关系  
三维直方图。(a) 1 月；(b) 4 月；(c) 7 月；(d) 10 月

Fig. 2 3-D histograms of  $\gamma$  with the correction for white cap and ocean sub-surface backscattering signal versus  $U$  of different months in 2007. (a) January; (b) April; (c) July; (d) October

由图 2 的 5 km 滚动平均结果和图 3 的单脉冲测量结果可以看出,对于不同月份的高风速情况,使用不同退偏比较正白帽之后,都有效地去除了白帽后向散射信号的影响,修正了激光雷达海面后向散射系数,数据分布与经验关系更加吻合。图 2 的 5 km 滚动平均结果的数据点分布比图 3 单脉冲测量结果的分布更为集中,测量精度更高,符合常理。

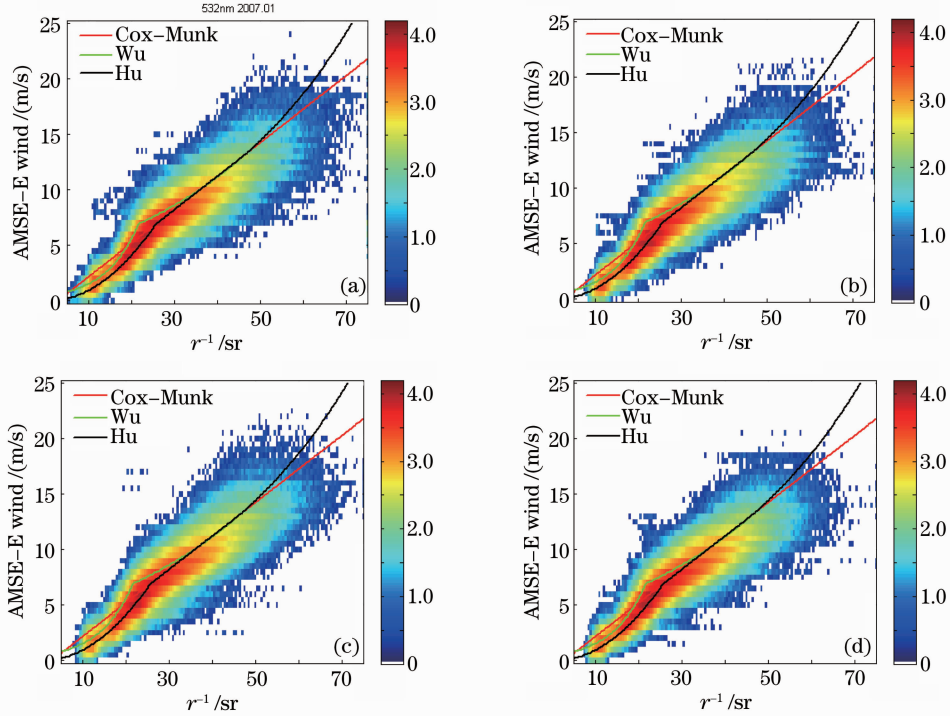


图 3 2007 年不同月份的 CALIPSO 激光雷达 532 nm 单脉冲激光海面后向散射系数  $\gamma$  与同步匹配 AMSR-E 海面风速  $U$  的关系三维直方图。(a) 1 月; (b) 4 月; (c) 7 月; (d) 10 月

Fig. 3 3-D histogram of single shot CALIPSO lidar 532 nm sea surface backscattering coefficient versus collocated AMSR-E sea surface wind speed in different months of 2007. (a) January; (b) April; (c) July; (d) October

### 3.3 海面风速反演及误差

CALIPSO 星载激光雷达 Level 1 产品数据经过数据筛选,提取激光海面信号,再经过大气双程透射率校正和海面白帽及水下次表层水体散射影响校正,获得用于海面风速反演的激光海面后向散射数据,由(1)式计算得出海面均方斜率  $\sigma^2$ ,再由(2)式计算海面以上 10 m 风速  $U_{10}$ ,从而实现海面风速反演。

图 4 给出 CALIPSO 星载激光雷达 5 km 滚动平均海面测量信号反演的海面风速与相匹配的 AMSR-E 海面风速测量值的对比关系图。横轴是由 CALIPSO 数据得到的海面风速,纵轴是 AMSR-E 测得海面风速值。图中色标表示  $\lg N$ 。

以 AMSR-E 海面风速测量值为真值,由 CALIPSO 星载激光雷达单脉冲(70 m)和 5 km 滚

统计分析表明,图 3 展示的相对清洁大气环境下 532 nm 波长单脉冲数据量占筛选前全部 CALIPSO 激光海面后向散射系数数据集的 79.2%,而文献 [6]图 4 中仅使用了最清洁的 2% 数据,因此本文方法显著地增加了反演的有效数据量,大大地提高了数据利用率。

动平均激光海面后向散射系数得到的海面风速误差如表 1 所示。

由表 1 知,对应 2007 年 1 月、4 月、7 月和 10 月 CALIPSO 星载激光雷达 532 nm 单脉冲测量数据反演海面风速的标准偏差分别为 1.24、1.24、1.24、1.20 m/s,与 Hu 等的结果 1.2 m/s 非常接近。若进一步进行 5 km 滚动平均以减少测量数据中的噪声影响,反演得到的海面风速质量得到进一步改善,对应 4 个月的标准偏差可分别达到 0.98、1.02、0.98、0.94 m/s。这说明 Hu 等 [6] 利用 2007 年 1 月 Level 1 数据得出的  $\sigma^2 - U_{10}$  关系即(2)式,同样适用于 2007 年其他月份(4 月、7 月和 10 月)数据,具有普适性。此外,从另一个角度,说明了 CALIPSO 星载激光雷达 5 km Level 2 分层气溶胶产品的大气气溶胶光学厚度(AOD)数据的准确性。

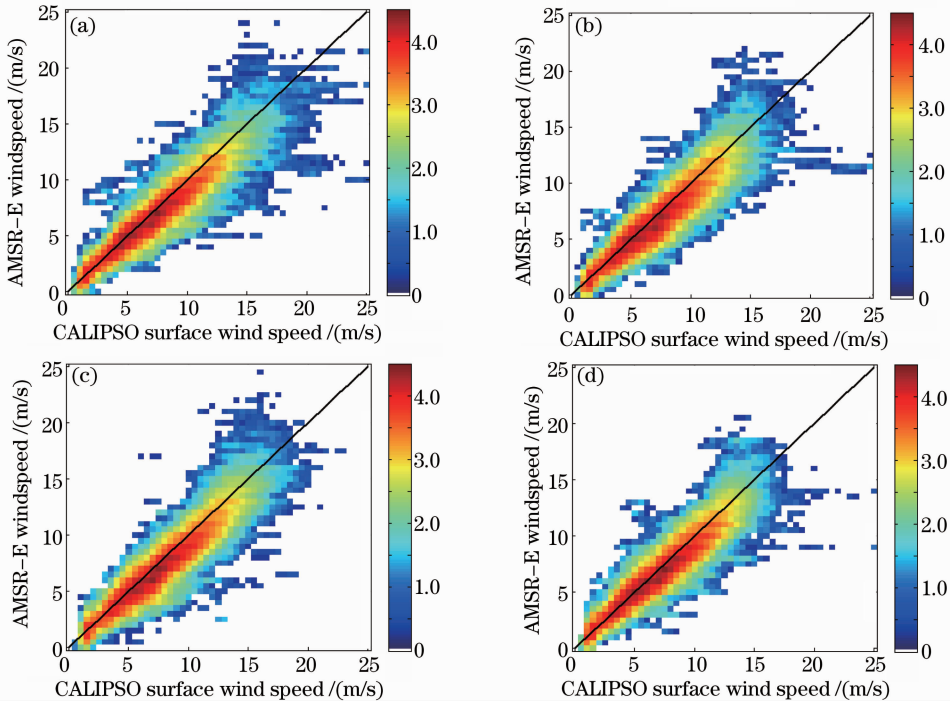


图 4 2007 年不同月份由 CALIPSO 激光雷达 5 km 滚动平均数据反演海面风速与 AMSR-E 海面风速关系的三维直方图。(a) 1 月；(b) 4 月；(c) 7 月；(d) 10 月

Fig. 4 3-D histogram of sea surface wind speed inverted from 5 km running mean CALIPSO lidar data and AMSR-E wind speed of different months in 2007. (a) January; (b) April; (c) July; (d) October

表 1 CALIPSO 星载激光雷达 532 nm 测量数据得到的海面风速与 AMSR-E 海面风速间的误差

Table 1 Differences of sea surface wind speeds retrieved by CALIPSO lidar 532 nm measurements and those by AMSR-E

	Bias /(m/s)		Standard deviation /(m/s)		Correlation coefficient	
	5 km mean	Single shot	5 km mean	Single shot	5 km mean	Single shot
2007.01	-0.44	-0.36	0.98	1.24	0.94	0.91
2007.04	-0.53	-0.44	1.02	1.24	0.93	0.90
2007.07	-0.56	-0.47	0.98	1.24	0.94	0.91
2007.10	-0.44	-0.36	0.94	1.20	0.94	0.91

## 4 结 论

采用 CALIPSO Version 3.01 星载激光雷达 5 km Level 2 分层气溶胶产品数据, 获取匹配的 AOD 数据并用于激光海面后向散射系数的大气双程透射率校正。同时采用了 IAB 和 AOD 数据共同判定大气清洁度以进行数据筛选。

对 CALIPSO 2007 年 1 月、4 月、7 月和 10 月新版 532 nm 波长单脉冲测量数据进行应用计算的结果表明, 提出的数据筛选和大气双程透射率校正方法是可行的, 在保证反演精度的前提下, 使得有较显著的大气气溶胶存在的数据反演成为可能, 因此显著地增加了反演的有效数据量, 大大地提高了数据利用率。若进一步进行 5 km 滚动平均以减少测量

数据中的噪声影响, 反演得到的海面风速质量得到进一步改善。同时也表明了 Hu 等<sup>[6]</sup>提出的  $\sigma^2 - U_{10}$  关系, 同样适用于 2007 年其他月份(4 月、7 月和 10 月)数据, 具有普适性。

来自海水体的散射不可忽视<sup>[19]</sup>, 消除海面白帽及水下次表层水体散射影响的校正方法, 需进一步的研究、提高。若再考虑对由探测器动态范围变化引起的测点地理位置差异进行修正, 星载激光雷达反演海面风速的精度还可进一步提高。

**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。



## 参 考 文 献

- 1 W. H. Hunt, D. M. Winker, M. A. Vaughan *et al.*. CALIPSO lidar description and performance assessment [J]. *Atmos. Oceanic Technol.*, 2009, **26**(7): 1214~1228
- 2 D. Wu, Y. Hu, M. P. McCormick *et al.*. Global cloud layer distribution statistics from one year's CALIPSO lidar observations [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2011, **32**(5): 1269~1288
- 3 Wu Dong, Jia Jia. Global penetrability statistics of CALIPSO over ocean laser samples [J]. *J. Atmos. Environ. Opt.*, 2011, **6**(4): 252~259  
吴东, 贾佳. CALIPSO 星载激光在全球海洋上空的穿透性统计[J]. *大气与环境光学学报*, 2011, **6**(4): 252~259
- 4 R. T. Menzies, D. M. Tratt, W. H. Hunt. Lidar in-space technology experiment measurements of sea surface directional reflectance and the link to surface wind speed [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5550~5559
- 5 R. S. Lancaster, J. D. Spinhirne, S. P. Palm. Laser pulse reflectance of the ocean surface from the GLAS satellite lidar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**(22): L22S10
- 6 Y. Hu, K. Stamnes, M. Vaughan *et al.*. Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, **8**(1): 3593~3601
- 7 R. Kodis. A note on the theory of scattering from an irregular surface [J]. *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, 1966, **14**(1): 77~82
- 8 D. E. Barrick. Rough surface scattering based on the specular point theory [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1968, **16**(4): 449~454
- 9 J. K. Bufton, F. E. Hoge, R. N. Swift. Airborne measurements of laser backscatter from the ocean surface [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(17): 2603~2618
- 10 R. T. Menzies, D. M. Tratt, W. H. Hunt. Lidar in-space technology experiment measurements of sea surface directional reflectance and the link to surface wind speed [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5550~5559
- 11 C. Cox, W. Munk. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **14**(11): 838~850
- 12 J. Wu. Sea-surface slope and equilibrium wind wave spectra [J]. *Phys. Fluids*, 1972, **15**: 741~747
- 13 C. A. Hostetler, Z. Liu, J. Reagan *et al.*. CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document: Calibration and Level 1 Data Products [OL]. <http://ccplot.org/pub/resources/CALIPSO/CALIOP%20Algorithm%20Theoretical%20Basis%20Document/PC-SCI-202.01%20CALIOP%20Instrument,%20and%20Algorithms%20Overview.pdf>, 2012-06-13
- 14 Jia Jia. Sea Surface Wind Speed Inversion Based on CALIPSO Aerosol Production [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011  
贾佳. 基于 CALIPSO 气溶胶产品 LIDAR 信号校正的海面风速反演[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011
- 15 Y. Hu, Z. Liu, D. Winker *et al.*. A simple relation between lidar multiple scattering and depolarization for water clouds [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1809~1811
- 16 Y. Hu, M. Vaughan, Z. Liu *et al.*. The depolarization-attenuated backscatter relation: CALIPSO lidar measurement vs theory [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(9): 5327~5332
- 17 Huang Xufeng, Bu Yang, Wang Xiangzhao. Skylight polarization patterns based on Mie theory for scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3002~3006  
黄旭锋, 步扬, 王向朝. 基于米氏散射理论的阳光散射偏振特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3002~3006
- 18 Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo *et al.*. Research on the depolarization ratio characteristic of the aerosol in the atmosphere with the CALIPSO satellite data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2943~2951  
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, **29**(11): 2943~2951
- 19 Li Zhigang, Oliver Reitebuch, Liu Zhishen. Analysis of sea surface reflectance from airborne lidar experimental measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100505  
李志刚, Oliver Reitebuch, 刘智深. 激光海面反射率的机载实验分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100505

栏目编辑: 何卓铭