

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.05.007

# CALIOP 反演海洋颗粒物后向散射方法

于素真<sup>1</sup>, 吴东<sup>1,2</sup>

( 1 中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

2 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266200 )

**摘 要:** 云和气溶胶探测激光雷达 ( Cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization, CALIOP) 能够发射 532 nm 和 1064 nm 两种波长激光脉冲, 主要用于大气中云和气溶胶的探测。532 nm 激光脉冲在海洋表面有很好的穿透性, 能获得海表以下的后向散射信号。利用 CALIOP 数据对直接提取水下信号和瞬态响应校正提取水下信号两种方法进行对比研究。首先, 反演得到海洋次表层水下信号, 进而反演海洋颗粒物后向散射, 并与中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 反演的颗粒物后向散射进行对比。颗粒物后向散射差值的均值分别为 0.0035、0.0027; 标准偏差分别为 0.4004、0.0042。表明校正方法反演的颗粒物后向散射与 MODIS 反演颗粒物后向散射更为接近。

**关键词:** CALIOP; 颗粒物后向散射; MODIS; 海洋次表层信号

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)05-0367-07

## Methods of Ocean Subsurface Particulate Backscattering Coefficient Retrieval from CALIOP Measurements

YU Suzhen<sup>1</sup>, WU Dong<sup>1,2</sup>

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

2 Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China)

**Abstract:** Cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization(CALIOP) can emit 532 nm and 1064 nm laser pulses which is mainly used for the detection of clouds and aerosols in the atmosphere. The 532 nm laser pulse can be used to get backscatter signal below the sea surface due to a good penetrability to the ocean surface. Based on the CALIOP data, the directly extracted signal and the corrected transient response signal of subsurface are studied. Firstly, the subsurface backscatters are calculated. Then the marine particulate backscattering coefficients are retrieved from two different methods, and compared to particulate backscattering

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金项目, 41376180)

**作者简介:** 于素真 (1989 - ), 女, 河南周口人, 研究生, 研究方向是海洋与大气激光测量。

**E-mail:** 2449913949@qq.com

**导师简介:** 吴东 (1964 - ), 男, 福建人, 教授, 主要从事海洋光学与激光遥感方面的研究。

**E-mail:** dongwu@ouc.edu.cn

**收稿日期:** 2018-04-17; **修改日期:** 2018-06-26

coefficients from moderate-resolution imaging spectroradiometer(MODIS) products. The mean of difference value of particulate backscattering coefficients are 0.0035 and 0.0027, and the standard deviation are 0.4004 and 0.0042 respectively, which indicates that particulate backscattering coefficients derived by using transient response correction method is closer to MODIS products.

Key words: CALIOP; particulate backscattering coefficient; MODIS; subsurface signal

## 1 引言

海洋光学特性的研究始于上世纪三十年代, 水体中颗粒物的特性与水体固有光学性质(散射、吸收及后向散射等)有关, 悬浮颗粒物的后向散射是影响海洋水色的重要因素<sup>[1]</sup>。水中颗粒物的后向散射是研究水体光学模型的重要参数, 利用颗粒后向散射系数可以反演浮游植物量、有机颗粒碳等<sup>[2-4]</sup>。船载、机载激光雷达很难获得全球海域的观测数据<sup>[5]</sup>。海色遥感为人们反演颗粒物后向散射系数提供了一种大面积观测方法, 但是海色卫星属于被动遥感, 受环境因素影响较大, 只能在白天无云条件进行测量, 不能获得夜晚数据。随着星载激光雷达的发展, 人们逐渐把星载激光雷达应用于海洋次表层的研究。星载激光雷达为研究海洋提供了一种快速、全天时、大范围测量海洋参量的手段。

于2006年4月28日发射成功的云-气溶胶激光雷达和红外探测观测卫星(Cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations, CALIPSO)携带有能发射532 nm波长的激光雷达CALIOP, CALIOP最早用于大气中云和气溶胶的探测<sup>[6]</sup>, 其发射的波长为532 nm的激光在海表有很好的穿透性, 能得到海洋表层和海洋次表层的散射信息, 因此可将星载激光雷达用于海洋方面的研究。CALIOP应用于海洋方面的研究主要有海面风速、海气界面的二氧化碳气体交换能量、海洋光学特性、全球叶绿素浓度和估计海洋碳储量<sup>[1,7-13]</sup>等方面。从2008年起人们开始利用CALIOP探测海洋次表层的信息<sup>[14]</sup>。2013年Behrenfeld等人<sup>[15]</sup>通过CALIOP 532 nm的正交偏振通道的信号, 得到水下信号的退偏比, 反演大洋颗粒物的后向散射系数 $b_{bp}$  (particulate backscattering coefficient,  $b_{bp}$ )并用 $b_{bp}$ 量化全球海洋的颗粒有机碳和浮游植物生物量两个参数, 将CALIOP反演的 $b_{bp}$ 与机载、船载和被动遥感的数据作对比。2014年Lu等人<sup>[12]</sup>利用瞬态响应函数校正CALIOP数据, 提取出全球海洋水下信号, 利用水下积分的衰减后向散射与MODIS叶绿素和颗粒有机碳(particulate organic carbon)数据进行研究, 分别拟合出与两者的关系式。2016年Lu等人<sup>[16]</sup>提出一个基于30°天底角数据计算海洋颗粒物后向散射的新方法。使用发射角为30°的数据, 1064 nm后向散射积分代表海表的后向散射<sup>[17]</sup>, 结合MODIS漫射衰减系数反演水下颗粒物后向散射。

由于NASA至今未公布30°天底角相关数据, 我们对前两种方法进行了对比研究, 期望对我国将发射星载激光雷达应用于海洋提供依据。CALIOP数据对水下信息的反演可以帮助更好地理解水中物质的光学特性、浮游生物量和全球海洋碳存储量。

## 2 资料数据

使用CALIOP 2008年全年夜间数据, 包括Version 3.0版本的Level 1 B垂直剖面数据, Level 2云层数据和Level 2气溶胶层数据。利用云和气溶胶数据进行晴空筛选, CALIOP数据均来源于美国NASA兰利研究中心ASDC网站([https://eosweb.larc.nasa.gov/HORDERBIN/HTML\\_Start.cgi](https://eosweb.larc.nasa.gov/HORDERBIN/HTML_Start.cgi))。

使用Aqua AMSR-E V7版本月平均风速数据反演海表均方斜率, 进而计算海表后向散射。AMSR-E搭载在Aqua卫星上。风速数据下载网址为: <ftp://ftp.ssmi.com/amsre>。

使用 Aqua MODIS 2008 年 Level 3 年平均漫衰减系数和年平均 443 nm 颗粒物后向散射数据。MODIS 数据来源于 NASA 的海色研究中心的海色数据产品, 网站为 <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/13>。

### 3 原理

#### 3.1 直接提取水下信号的方法 (方法 1)

2013 年 Behrenfeld<sup>[15]</sup> 提出利用水下信号的退偏比, 直接提取水下信号。使用此方法可以避免进行大气校正, 进而计算颗粒物后向散射, 激光雷达垂直通道后向散射的柱状积分的计算公式为

$$\beta_{w+} = \delta_T \frac{\beta_s}{1 - \delta_T / \delta_w}, \quad (1)$$

$\beta_s$  代表海面后向散射, 单位是  $\text{sr}^{-1}$ , 与风速有关, 由 AMSR-E 风速数据计算<sup>[13]</sup>,  $\delta_T$  是退偏比, 是垂直通道信号积分和平行通道信号积分的比, 积分包括了海平面以及海平面以下的后向散射信号,  $\delta_w$  表示水下散射信号的退偏比 (包括布利渊散射), 根据相关研究,  $180^\circ$  后向散射角时,  $\delta_w = 0.1$ <sup>[18,19]</sup>。利用反演的次表层后向散射信号反演颗粒物后向散射, 经过一系列计算、推导, CALIOP 反演颗粒物后向散射的方法为

$$b_{\text{bp}}(440) \approx \frac{b_{\text{bp}}(\pi) 532}{0.16 \cdot 440} = \frac{2K_d \beta_{w+}}{0.16 \times 0.98^2} \frac{1 + \delta_p}{\delta_p} \frac{532}{440}, \quad (2)$$

$\delta_p$  为水中颗粒物的后向散射, 可以由漫射衰减系数计算。当  $K_d$  小于  $0.15 \text{ m}^{-1}$  时  $\delta_p = 0.1 + 2(K_d - 0.05)$ ; 当  $K_d$  大于  $0.15$  时,  $\delta_p = 0.3$ 。

#### 3.2 瞬态响应校正方法 (方法 2)

2014 年 Lu<sup>[12]</sup> 提出利用瞬态响应函数校正 CALIOP 水下信号, 进而反演海洋颗粒物的方法。激光信号遇目标物的后向散射信号进入雷达接收系统通过低通滤波器、模数转换器得到测量信号, 输出信号是目标信号与瞬态响应函数的卷积。选择硬陆地面后向散射最大值为地表<sup>[20-23]</sup>, 取地表上 1 个 bin (采样单元) 和地表以下 10 个 bin 共 12 个 bin 数据求得瞬态响应函数  $F(z)$ 。 $\beta'_c(z)$  是实际水下信号,  $\beta'_m(z)$  是激光雷达探测得到的信号, 根据系统响应的原理得知,  $\beta'_m(z)$  和  $\beta'_c(z)$  卷积过程如下

$$\beta'_m(z) = F(z) \times \beta'_c(z) \quad (3)$$

相比于海面后向散射, 即第一个 bin 的信号, 水下 12 个 bin 以下的信号非常小, 可以忽略。对上面的公式进行反卷积就可以得到校正过后的衰减的后向散射信号

$$\beta'_c(z) = [F]^{-1} \beta'_m(z) \quad (4)$$

利用上述校正原理校正 CALIOP 水下信号, 利用公式 (1) 反演水下后向散射, 其中, 水下信号退偏比  $\delta_w = \frac{\sum_{i=p+1}^{i=p+5} \beta'_\perp(z_i)}{\sum_{i=p+1}^{i=p+5} \beta'_\parallel(z_i)}$ ,  $p$  是海面峰值信号 bin 的位置。进而利用公式 (2) 可以反演水下颗粒物的后向散射。

根据上述两种方法计算水下后向散射信号和反演颗粒物后向散射, 并进行对比分析。

## 4 反演水下颗粒物后向散射

### 4.1 数据的预处理

由于白天大气中有太阳直射和天空的光辐射干扰<sup>[24-25]</sup>, 选取夜间 CALIOP 数据。Level 2 云、气溶胶数据、风速数据的水平分辨率与 Level 1 B 不同, 所以把 Level 2 云、气溶胶数据、风速数据统一到 Level

1 B 经纬上。使用大气后散射积分小于  $0.017 \text{ sr}^{-1}$  和气溶胶光学厚度小于 3 来判定晴空条件<sup>[15]</sup>。此外, 由于 CALIOP 发射的脉冲无法穿透冰面, 所以要剔除南、北极等被海冰覆盖的海域数据。海表风速过大时海表会出现大量的气泡、白沫和泡沫, 海表风速较小时, 海表会有很强的镜面反射, 为了避免这种情况选取的风速的范围为  $2\sim 8 \text{ m/s}$ <sup>[16]</sup>。对于筛选出的晴空无冰正常风速 CALIOP 数据, 认为 CALIOP 在 558~568 bin 之间后向散射的最大值作为海平面, 取海平面上一个 bin 水下 10 个 bin 数据为本文研究的海洋水下信号数据。

## 4.2 反演水下信号

使用经过预处理后的数据分别反演海洋次表层后向散射信号。

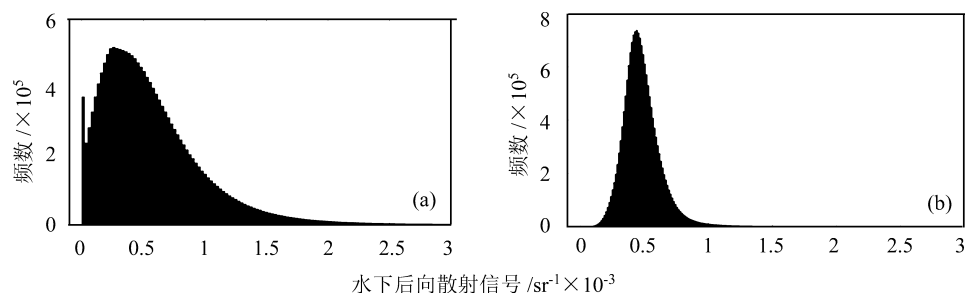


图 1 水下后向散射信号。(a) 方法 1; (b) 方法 2

Fig.1 Subsurface backscatter. (a) Method 1; (b) method 2

图 1 是使用两种方法反演的水下后向散射信号直方图, 图 1(a)、(b) 分别使用方法 1 和方法 2, 横坐标表示水下后向散射, 单位是  $\text{sr}^{-1}$ , 纵坐标是数值出现的频数。从图中可以看出水下后向散射信号出现最多的值都在  $0.4 \times 10^{-3}$  左右, 方法 1 反演水下后向散射信号分布, 0 到  $2 \times 10^{-3}$ ; 方法 2 反演水下后向散射值分布为 0 到  $1 \times 10^{-3}$ , 方法 2 反演颗粒物后散射值较为集中。为进一步比较、分析作两种方法水下后向散射的差值分布直方图。

图 2 是方法 2 反演的水下后向散射信号与方法 1 反演水下散射信号后的差值分布图, 横坐标是水下后向散射信号差值, 单位是  $\text{sr}^{-1}$ 。纵坐标是数值出现的频数。水下后向散射信号差值在  $-2 \times 10^{-3}$  到  $1 \times 10^{-3}$  之间, 频数最大的值在  $0.1 \times 10^{-3}$ 。水下后向散射差值的均值为  $-1.005 \times 10^{-4}$ , 标准偏差为 0.00468, 说明方法 1 反演的水下后向散射信号较大。

## 4.3 反演颗粒物后向散射

利用得到的水下后向散射信号结合 MODIS 漫射衰减系数反演水下颗粒物的后向散射, 与 MODIS 反演水下颗粒物后向散射分别作差值比较。

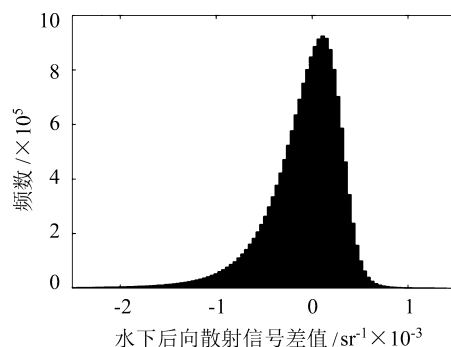


图 2 水下后向散射信号差值

Fig.2 Difference value of subsurface backscatter

图 3 是两种方法反演颗粒物后散射与 MODIS 反演颗粒物后向散射的差值直方图, 图 3(a) 是方法 1 反演颗粒后向散射与 MODIS 反演颗粒物后向散射的差值, 图 3(b) 是方法 2 反演颗粒物后向散射与 MODIS 反演颗粒物后向散射的差值。横坐标表示水下颗粒物后向散射差值, 单位是  $\text{m}^{-1}$ , 纵坐标是数值出现的频数。颗粒物后向散射差值的均值分别为 0.0035、0.0027; 标准偏差分别为 0.4004, 0.0042。可以看出使用

方法 1 反演颗粒物后向散射差值比方法 2 反演颗粒物后向散射差值数值大, 分布更离散。

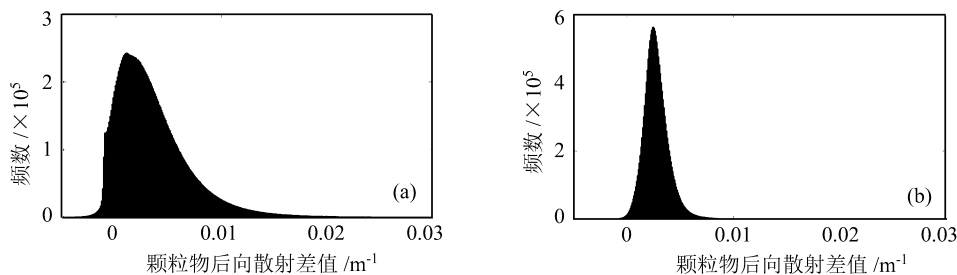


图 3 颗粒物后向散射差值。(a) 方法 1; (b) 方法 2

Fig.3 Difference value of  $b_{bp}$ . (a) Method 1; (b) method 2

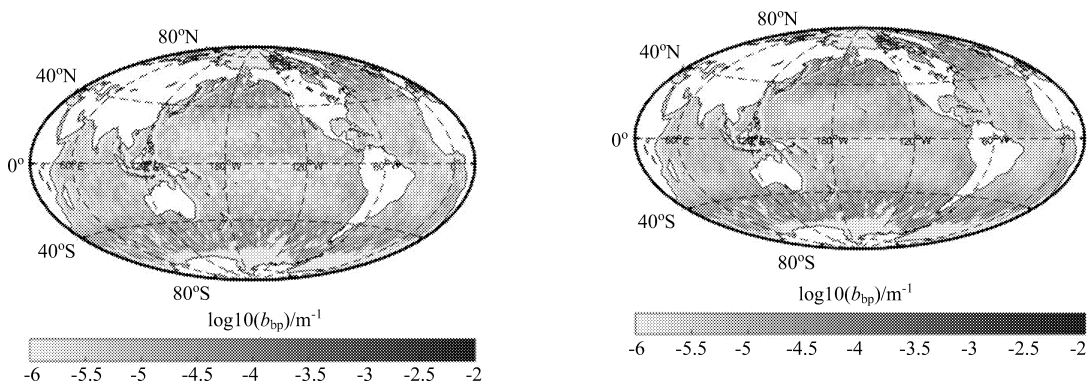


图 4 方法 1 反演颗粒物后向散射

图 5 方法 2 反演颗粒物后向散射

Fig.4  $b_{bp}$  of method 1

Fig.5  $b_{bp}$  of method 2

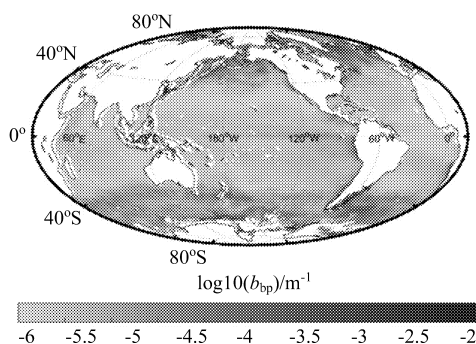


图 6 MODIS 反演颗粒物后向散射

Fig.6 MODIS-based  $b_{bp}$

图 4 和图 5 分别是两种方法反演的  $b_{bp}$  (440) 的全球分布, 经纬度分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 色标表示颗粒物后向散射系数取  $\log_{10}$ 。图 6 是 MODIS L 3 数据产品中提供的 443 nm GSM 算法反演颗粒物后向散射系数全球分布图。从图 3、4、5 中可以看出利用这两种方法反演的颗粒物后向散射系数的全球分布趋势具有相似性。在低纬度地区值较小, 高纬度地区和近陆地值较大。在高纬度地区 CALIOP 反演颗粒物后向散射比 MODIS 反演颗粒物后向散射值小。

## 5 结 论

选取夜间数据,使用大气后散射积分小于  $0.017 \text{ sr}^{-1}$ ,气溶胶光学厚度小于 3 来判定晴空条件,风速条件大于  $2 \text{ m/s}$  小于  $8 \text{ m/s}$ ,同时剔除含有冰的数据。分别使用方法 1、方法 2 反演水下后向散射信号和颗粒物后向散射。对比分析表明,方法 1 比方法 2 反演的水下后向散射信号值较大,频数最大的散射值相同,分布更为离散。两种方法反演颗粒物后散射与 MODIS 反演颗粒物后向散射比较,颗粒物后向散射差值的均值分别为 0.0035、0.0027;标准偏差分别为 0.4004、0.0042。结果表明两种方法都能反演水下颗粒物后向散射,方法 2 较方法 1 更为准确。

致谢:研究得到国家自然科学基金(41376180)的资助。感谢 NASA 提供的 MODIS、AMSR-E 兰利研究中心(ASDC)提供的 CALIOP 激光雷达数据。

### 参考文献:

- [1] Churnside J H, Mc Carty B J, Lu X. Subsurface ocean signals from an orbiting polarization lidar. *Remote Sensing*, 2013, **5**(7): 3457-3475.
- [2] Siegel D A, Maritorena S, Nelson N B, et al. Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2002, **107**(C12): 21-1-21-14.
- [3] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A. *Multiple Scattering of Light by Particles: Radiative Transfer and Coherent Backscattering* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [4] Mishchenko M L, Travis L D, Lacis A A. Multiple Scattering of Light by Particles[C]. *Multiple Scattering of Light by Particles*, 2006.
- [5] Churnside J H, Tatarskii V V, Wilson J J. Oceanographic lidar attenuation coefficients and signal fluctuations measured from a ship in the Southern California Bight [J]. *Applied optics*, 1998, **37**(15): 3105-3112.
- [6] Vaughan M A, Young S A, Winker D M, et al. Fully automated analysis of space-based lidar data: An overview of the CALIPSO retrieval algorithms and data products[C]. *Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics*, 2004: 16-30.
- [7] Sun Yuchen, Wu Dong. Comparison of day and night sea surface wind speed detection using CALIPSO lidar measurements [J]. *Chinese journal of quantum electronics*, 2013, **30**(1): 29-35.  
孙雨辰, 吴 东. 星载激光雷达探测海面风速昼夜差异研究 [J]. *量子电子学报*, 2013, **30**(1):29-35.
- [8] Wu Dong, Zhang Xiaoxue, Yan Fengqi. Sea surface wind speed detection by using the data of CALIOP lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 243-249(in Chinese).  
吴 东, 张小雪, 阎逢旗, 等. 基于星载激光雷达数据的海面风速探测 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(8):243-249.
- [9] Zhang Xiaoxue, Research of the accuracy improvement of sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements[D]. Qingdao: Master Thesis of Ocean university of China, 2012(in Chinese).  
张小雪. 提高星载激光雷达海面风速探测精度的研 [D]. 青岛: 中国海洋大学硕士论文, 2012.
- [10] Yan Huaibin. Retrieval of chlorophyll concentrations in the ocean by using CALIPSO lidar signal below the ocean surface[D]. Qingdao: Master Thesis of Ocean university of China, 2014(in Chinese).  
晏怀斌. CALIPSO 激光雷达水下信号反演大洋叶绿素浓度的探索 [D]. 青岛: 中国海洋大学硕士论文, 2014.
- [11] Wang Jianhua. Retrieval of Air-Sea  $\text{CO}_2$  Transfer Velocity Based on CALIPSO Lidar Production[D], Qingdao: Master Thesis of Ocean university of China, 2012(in Chinese).

- 王建华. 基于星载激光雷达数据的海气界面 CO<sub>2</sub> 传输速率反演 [D]. 青岛: 中国海洋大学硕士论文, 2012.
- [12] Lu X, Hu Y, Trepte C, *et al.* Ocean subsurface studies with the CALIPSO spaceborne lidar [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2014, **119**(7):4305-4317.
- [13] Hu Y, Stamnes K, Vaughan M, *et al.* Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2008, **8**(1):3593-3601.
- [14] Shi W, Wang M. Threedimensional observations from MODIS and CALIPSO for ocean responses to cyclone Nargis in the Gulf of Martaban [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(35):99-100.
- [15] Behrenfeld M J, Hu Y, Hostetler C A, *et al.* Spacebased lidar measurements of global ocean carbon stocks [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(16):4355-4360.
- [16] Lu X, Hu Y, Pelon J, *et al.* Retrieval of ocean subsurface particulate backscattering coefficient from space-borne CALIOP lidar measurements [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(25):29001.
- [17] Hu Y, Behrenfeld M, Hostetler C, *et al.* Ocean lidar measurements of beam attenuation and a roadmap to accurate phytoplankton biomass estimates[C]//New York City, USA: IRLC 27th International Laser Radar Conference. 2016.
- [18] Voss K J, Fry E S. Measurement of the Mueller matrix for ocean water [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(23): 4427-39.
- [19] Kokhanovsky A A. Parameterization of the Mueller matrix of oceanic waters [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2003, 108(C6).
- [20] Churnside J H. Polarization effects on oceanographic lidar [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(2): 1196-207.
- [21] Li J, Hu Y, Huang J, *et al.* A new method for retrieval of the extinction coefficient of water clouds by using the tail of the CALIOP signal [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2010, **10**(11):2903-2916.
- [22] Lu X, Hu Y, Liu Z, *et al.* CALIOP receiver transient response study[J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2013, **8873**: 887316.
- [23] Zhang Qinghua, Wu Dong, Yu Suzhen. Transient response of CALIOP 532 nm photoelectric receiving systems [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, **13**(1): 20-29(in Chinese).
- 张清华, 吴东, 于素真. CALIOP 532 nm 通道光电接收系统时响应研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2018, **13**(1): 20-29.
- [24] Kildal H, Byer R L. Comparison of laser methods for the remote detection of atmospheric pollutants [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1971, **59**(12): 1644-1663.
- [25] Kirk J T O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* [M]. Cambridge University Press, 1983.