

## 蓝绿光星载海洋激光雷达全球探测深度估算

刘秉义<sup>1,2</sup>, 李瑞琦<sup>1</sup>, 杨倩<sup>3</sup>, 孔晓娟<sup>1</sup>

- (1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院 海洋技术系, 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 266237;
3. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001)

**摘要:** 为了评估和分析激光雷达探测全球海洋光学参数的性能, 根据激光雷达方程和给定的激光雷达参数, 使用 MODIS Level 3 全球年平均的海水吸收系数  $a(\lambda)$  和后向散射系数  $b_b(\lambda)$  数据作为海水光学参数的参考值, 对蓝绿光星载海洋激光雷达在全球海洋的探测深度进行了估算和分析。研究表明: 星载海洋激光雷达探测深度的分布主要依赖于探测波长和水体光学性质, 清洁大洋水的最佳探测波长在 460 nm 左右, 白天和夜间的最大探测深度分别为 ~110 m 和 ~120 m; 沿岸浑浊水的最佳探测波长多在 500 nm 以上, 最大探测深度只能达到 20 m 或更浅。探测波长为 470~480 nm 时, 星载海洋激光雷达在全球范围内的平均探测能力最佳。

**关键词:** 海洋激光雷达; 卫星遥感; 探测深度; 信噪比

**中图分类号:** P715.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0106006

## Estimation of global detection depth of spaceborne oceanographic lidar in blue-green spectral region

Liu Bingyi<sup>1,2</sup>, Li Ruiqi<sup>1</sup>, Yang Qian<sup>3</sup>, Kong Xiaojuan<sup>1</sup>

(1. Department of Marine Technology, 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 266237, China; 3. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266001, China)

**Abstract:** In order to evaluate and analyze the detection performance of lidar for optical properties in global ocean, the detection depth of spaceborne oceanographic lidar operating in blue-green spectral region was estimated and analyzed. This research was based on lidar equation and given lidar parameters. MODIS Level 3 annual averaged global water absorption coefficient  $a(\lambda)$  and backscatter coefficient  $b_b(\lambda)$  were used as reference values for optical properties of sea water. The results show the distribution of detection depth depends on both detection wavelength and water optical properties. In clear open ocean, the best detection wavelength is near 460 nm and the maximum detection depths are approximated 110 m and 120 m in daytime and nighttime, respectively. In turbid coastal water, the best detection wavelength is mostly longer than 500 nm and the maximum detection depths can only reach 20 m or even shallower.

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-05-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400905, 2016YFC1400904)

作者简介: 刘秉义(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事大气和海洋激光探测方面的研究。Email: liubingyi@ouc.edu.cn

The spaceborne oceanographic lidar achieves best global detection performance when the detection wavelength is between 470 nm and 480 nm.

Key words: oceanographic lidar; satellite remote sensing; detection depth; signal-to-noise ratio

## 0 引言

海洋水色遥感是实现全球海洋水体光学参数和颗粒物空间观测的主要手段,自 1978 年第一台水色传感器 (Coastal Zone Color Scanner, CZCS) 成功运行至今,卫星水色遥感作为全球观测系统的一个重要组成部分,在海洋初级生产力、海洋碳循环和海洋生态环境等领域发挥了重要作用。目前业务化运行的星载水色传感器均采用被动光学遥感技术,利用海水组分对太阳光的吸收和散射特性,通过测量海面向上光谱辐射,获得海水固有光学参数 IOPs<sup>[1]</sup>以及叶绿素 a 浓度<sup>[2]</sup>、颗粒有机碳 POC 浓度<sup>[3]</sup>和颗粒无机碳 PIC 浓度<sup>[4]</sup>、悬浮物 SPM 浓度<sup>[5]</sup>等生物地球化学参数。

激光雷达作为一种主动光学传感器,能够进一步提高空间全球海洋观测能力,已引起了海洋光学和水色遥感领域专家的极大兴趣<sup>[6-8]</sup>。目前在轨运行的星载云-气溶胶激光雷达 (Cloud-Aerosol LiDAR with Orthogonal Polarization, CALIOP) 已显示出海洋探测的潜力<sup>[9-10]</sup>。与被动水色传感器相比,星载海洋激光雷达具有获取垂直剖面数据和不受大气校正影响的优点,可以工作在白天和晚上,而且能覆盖太阳高度角较低的高纬度地区。由于光波在海水中传输时衰减速度很快,海水光学性质及激光波长会显著影响激光雷达的探测深度。

文中基于激光传输过程,根据激光雷达方程和给定的激光雷达参数,利用 MODIS Level 3 全球年平均的海水吸收系数  $a(\lambda)$  和后向散射系数  $b_b(\lambda)$  数据作为海水光学参数的参考值,对星载海洋激光雷达探测全球海洋的最优波长和最大探测深度进行了估算。

## 1 探测深度估算方法

激光雷达通过发射激光脉冲并接收经水体散射的光信号来获取海水光学参数的垂直剖面信息。星载海洋激光雷达发射的激光脉冲经过大气、云层、气

溶胶层和海面的衰减后进入海水,海水中的水分子和各种组分会对入水激光产生吸收和散射,其中部分后向散射光信号再次经过海面 and 大气后被激光雷达接收。由于不同深度水体的散射信号返回到激光雷达时的光程不同,激光雷达可以通过信号的返回时间获取水体光学参数的垂直分布信息。根据激光雷达方程,星载海洋激光雷达接收到的距离分辨的回波信号光电子数可以表示为:

$$N_s(z) = \frac{E_0}{h\nu} \eta T_o T_A T_s^2 \frac{A}{(H+z/n)^2} \Delta z \beta(z) \times \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right] \quad (1)$$

式中: $N_s(z)$ 为激光雷达接收到的海水深度  $z$  处的信号光子数; $E_0$ 为单脉冲激光能量; $h$ 和  $\nu$ 分别为普朗克常数和激光频率; $\eta$ 为光电倍增管量子效率; $T_o$ 为光学元件透过率; $T_A$ 为大气透过率; $T_s$ 为海气界面透过率; $A$ 为望远镜接收面积; $H$ 为激光雷达高度, $n$ 为海水折射率; $\Delta z$ 为垂直分辨率; $\beta$ 为激光雷达后向散射系数(即散射角为  $\pi$  时的体散射系数  $\beta(\pi)$ ); $\alpha$ 为激光雷达消光系数(或称为  $K_{Lidar}$ )。

$\beta(\pi)$  的数值可由给定的相函数和后向散射系数  $b_b$  计算得出:

$$\beta(\pi) = \frac{\tilde{\beta}_{HG}(g, \pi)}{2\pi \int_{\pi}^{\pi/2} \tilde{\beta}_{HG}(g, \varphi) d\varphi} b_b \quad (2)$$

式中: $\tilde{\beta}_{HG}(g, \varphi)$ 为 Henyey-Greenstein 相函数<sup>[11]</sup>。

$$\tilde{\beta}_{HG}(g, \varphi) = \frac{1}{4\pi} \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\varphi)^{3/2}} \quad (3)$$

式中: $g$ 为散射强度不对称因子,其值介于 0 到 1 之间,0 表示前后向散射强度对称,而 1 表示全为前向散射; $\varphi$ 表示散射角,对于后向散射,其值等于  $\pi$ 。

激光雷达衰减系数  $\alpha$  与海洋光学参数存在以下关系<sup>[6,12]</sup>:

$$\alpha = K_d + (c - K_d) e^{-0.85cD} \quad (4)$$

式中: $K_d$ 为漫射衰减系数; $c$ 为衰减系数; $D$ 为激光

雷达系统视场在海表面的直径。 $K_d$ 可由海水吸收系数  $a$  和后向散射系数  $b_b$  计算得到<sup>[13,6]</sup>

$$K_d = a + 4.18b_b(1 - 0.52e^{-10.8a}) \quad (5)$$

衰减系数  $c$  与  $a$  和  $b_b$  的关系为:

$$c = a + \frac{b_b}{B} \quad (6)$$

式中:  $B$  可由 HG 相函数计算得到

$$B = \frac{1-g}{2g} \left( \frac{1+g}{\sqrt{1+g^2}} - 1 \right) \quad (7)$$

$B$  和  $g$  的数值与海水类型有关, 对于清洁大洋水、近岸水体和港口浑浊水  $B$  的数值可以分别取 0.044、0.013 和 0.02<sup>[14]</sup>, 相应的  $g$  的数值分别为 0.82、0.94 和 0.91。

海洋激光雷达接收到的背景光电子数  $N_B$  为:

$$N_B = \frac{\pi \phi_R^2 A \Delta \lambda L_B \Delta t}{h\nu} \eta T_o T_A \quad (8)$$

式中:  $\phi_R$  为接收器半视场角大小;  $\Delta \lambda$  为滤波器带宽;  $L_B$  为背景光光谱辐亮度。

利用得到的海洋激光雷达的信号光电子数和背景光电子数, 信噪比  $SNR(z)$  可表示为:

$$SNR(z) = \frac{\sqrt{n} N_s(z)}{\sqrt{n} N_B + \sqrt{N_s(z)}} \quad (9)$$

式中:  $n$  为累积脉冲数。

根据公式(9)计算得到激光雷达探测信噪比随探测深度的变化关系, 可以进一步计算得到信噪比为特定阈值时激光雷达不同发射波长对应的探测深度。

## 2 探测深度估算与分析

### 2.1 探测深度全球分布

根据第 1 节所述的海洋激光雷达信噪比计算方法, 利用表 1 所示的海洋激光雷达参数和 MODIS 年平均海洋光学参数数据, 文中对星载激光雷达全球海洋探测深度进行了估算。发射激光参数的设定主要考虑了人眼安全阈值, 并将不同波长的单脉冲能量设定为相同数值。考虑到大气透过率受气溶胶和云的影响较大, 存在较大的不确定性, 这并非文中讨论的重点, 因此在计算过程中将单程大气透过率假设为 0.8。背景光光谱辐亮度的数值在 400~600 nm

的可见光范围内变化较小, 因此计算过程中忽略了其随波长的变化。表 1 中的背景光光谱辐亮度为太阳直射时的数值, 计算时假定太阳直射赤道, 并考虑背景光光谱辐亮度随纬度的变化。所用的 MODIS 数据为 Level 3 全球年平均产品, 包括吸收系数  $a$  和后向散射系数  $b_b$ , 水平分辨率为 4 km, 包含 6 个波段 (412、443、488、531、547、667 nm)。为了研究探测波长对激光雷达探测深度的影响, 以 5 nm 分辨率对  $a$  和  $b_b$  数据进行了插值, 得到 400~600 nm 波段范围内的  $a$  和  $b_b$  的全球年平均数据。文中在白天(考虑太阳背景光, 太阳直射赤道, 时段为当地时间正午 12 时)和夜晚(无太阳背景光, 忽略月光、星光等的影响)两种情况下分别估算了星载激光雷达的最大探测深度(信噪比阈值为 1)。

表 1 星载海洋激光雷达参数

Tab.1 Parameters of spaceborne oceanographic lidar

Parameters	Value
satellite altitude/km	400
Laser single pluse energy/mJ	1 300
Laser single pluse duration/ns	20
Laser pluse frequency/Hz	20
Laser beam divergence angle/mrad	0.075
Telescope diameter/m	1
Receiving field angle/mrad	0.3
Total transmittance of optical elements	0.9
Optical filter bandwidth/nm	0.2
System sampling frequency/MHz	100
Quantum efficiency of PMT	0.4
Transmittance of atmosphere	0.8
Sea-air interface transmittance	0.98
Refraction index of sea water	1.33
Background light spectral radiance/mW·m <sup>-2</sup> ·nm·sr <sup>-1</sup>	10

星载海洋激光雷达的探测深度的分布主要受到探测波长和水体光学性质的影响。在图 1 所示的白天探测情况下, 探测深度存在明显的随波长变化的趋势, 总体上看, 探测深度在 475 nm 附近达到最大值, 在清洁大洋水体最大可达约 110 m, 波长减小或增大时探测深度有不同程度的下降, 波长为 575 nm 时, 探测深度的最大值约为 40 m。另外, 探测深度的

分布与水体光学性质的分布具有很强的相关性,呈现出比较明显的空间分布特征,在波长确定的情况下,清洁大洋水的探测深度最深,随着水体逐渐浑浊,探测深度迅速减小。对于不同波长,探测深度的空间分布特征也相对稳定。夜晚条件下探测深度随波长和水质光学性质的变化趋势与白天探测时基本相同。由于夜晚探测不受背景光影响,探测信噪比有所提高,因此不同波长和不同海域的探测深度均有不同程度的提高,475 nm 时清洁大洋水体提高最多,最大探测深度可达约 120 m,另外,受到背景光谱辐亮度随纬度的变化,低纬度海域的日夜背景

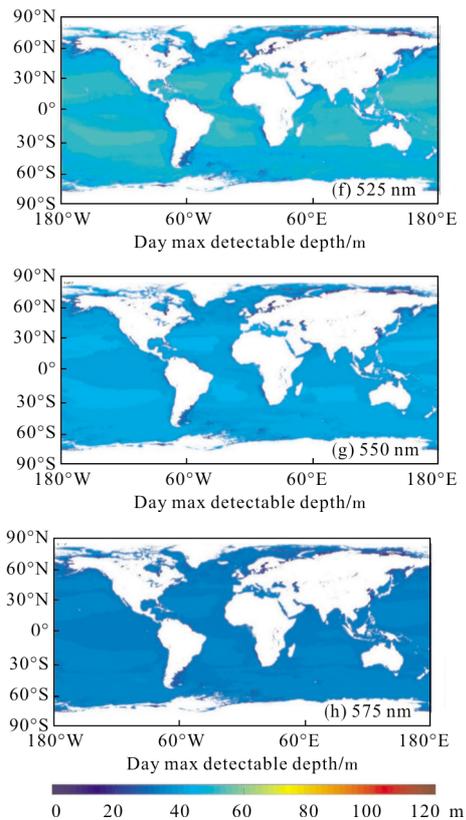
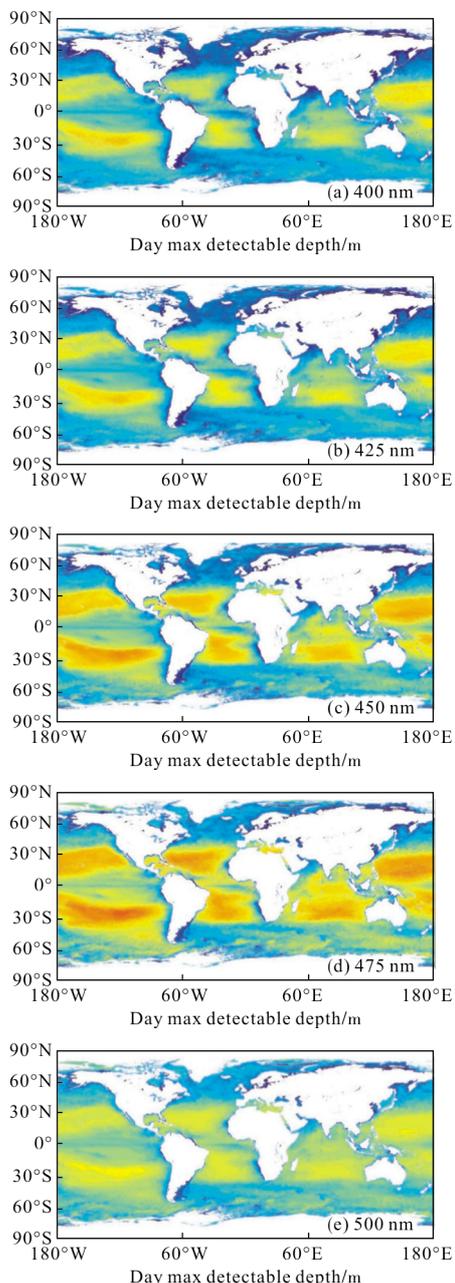


图 1 星载海洋激光雷达探测深度全球分布(白天探测,信噪比阈值为 1)  
Fig.1 Global distribution of detection depth by spaceborne oceanographic lidar (daytime operation, signal-to-noise ratio threshold of 1)

光差异最大,信噪比和探测深度的提高程度与高纬度海域相比更为明显。

## 2.2 最大探测深度与最优波长

为了分析星载海洋激光雷达的最佳探测能力,文中进一步对最大探测深度和最优探测波长进行了分析。对于某个给定的空间位置,根据激光雷达探测深度随波长的变化关系,可以计算出该位置处的最大探测深度及其对应的最优探测波长,进而得到最大探测深度和最优探测波长的空间分布情况。星载海洋激光雷达最大探测深度主要受到水体光学性质的影响,如图 2 中的白天探测结果所示,清洁大洋水体的最大探测深度最大,沿岸浑浊水的最大探测深度最小。大洋水的最大探测深度普遍大于 70 m,靠近陆地的海区的探测深度大多在 40~50 m,近岸浑浊水体的最大探测深度只能达到 20 m 甚至更浅。最优探测波长的空间分布也与水体光学性质密切相关,如图 2 所示,清洁大洋水的最佳探测波长最短,

在 460 nm 左右, 开阔海域的最优波长大多在 460~500 nm 之间, 随着海水逐渐变浑浊, 最优探测波长逐渐变长, 在部分近岸区域最优波长能够达到 550 nm 以上。与白天探测结果相比, 夜间最大探测深度的分布趋势与白天基本相同, 最大探测深度比白天增加 0~10 m。夜间探测的最优波长分布趋势与白天几乎相同。

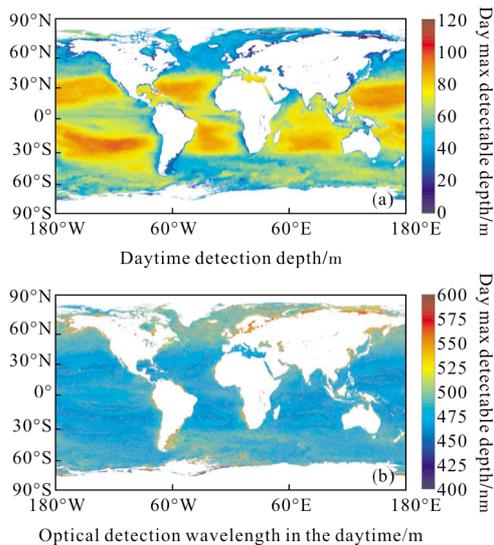


图 2 星载海洋激光雷达最大探测深度(a)及其对应的最优探测波长(b)的全球分布(白天探测, 信噪比阈值为 1)

Fig.2 Global distribution of maximum detection depth (a) and corresponding optimal operating wavelength (b) using spaceborne oceanographic lidar (daytime operation, signal-to-noise ratio threshold of 1)

在中国近海和附近海区, 星载海洋激光雷达最大探测深度和最优探测波长的分布都具有明显的区域性特征。如图 3 所示, 在近岸、内海和河口等海水较为浑浊的区域, 最大探测深度基本不超过 20 m, 对应的最优探测波长大致在 540~580 nm; 在黄海和远离长江口的东海区域, 最大探测深度能达到 50 m 左右, 最优探测波长在 490~510 nm; 在琉球群岛西北侧、台湾东侧和南海大部分海区, 最大探测深度可达 70~80 m, 最优探测波长基本在 470~490 nm; 在琉球群岛以东和菲律宾以东, 最大探测深度可达 90 m 左右, 最优探测波长大多在 450~470 nm。与图 3 所示的白天探测结果相比, 夜间最大探测深度的分布趋势与白天基本相同, 最大探测深度比白天增加 0~10 m。夜间探测的最优波长分布趋势与白天几乎相同。

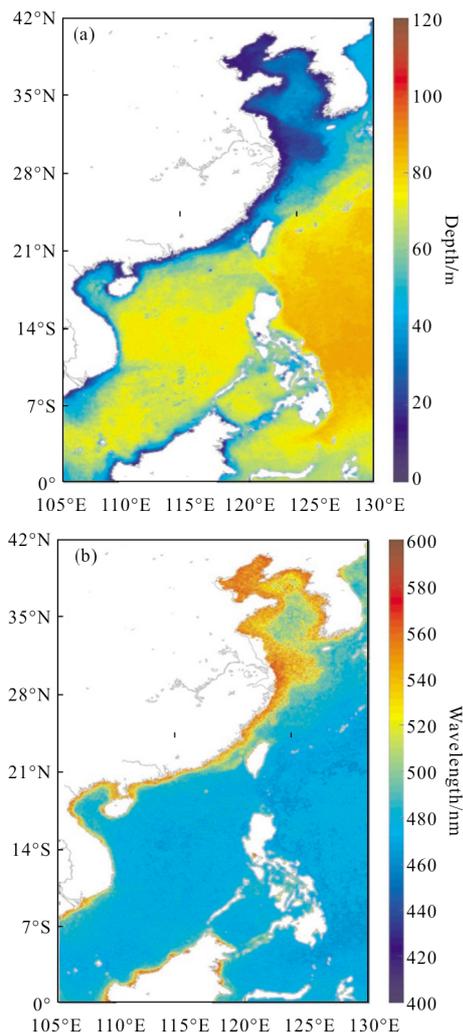


图 3 中国海附近星载海洋激光雷达最大探测深度(a)及其对应的最优探测波长(b)的全球分布(白天探测, 信噪比阈值为 1)

Fig.3 Distribution of maximum detection depth(a) and corresponding optimal operating wavelength (b) near China Sea using spaceborne oceanographic lidar (daytime operation, signal-to-noise ratio threshold of 1)

### 3 结论

文中通过计算激光雷达回波信号和激光雷达探测信噪比, 估算了蓝绿波段星载海洋激光雷达探测全球海洋的探测深度和最优探测波长的分布。结果表明探测深度的分布主要依赖于激光波长和水体光学性质, 在清洁大洋水, 最优探测波长在 460 nm 左右, 白天和夜间的最大探测深度分别为 110 m 和 120 m 左右; 沿岸浑浊水的最优探测波长多在 500 nm 以上, 部分水体较浑浊的海区的最优波长能够达到

550 nm 以上,最大探测深度只能达到 20 m 或更浅,而且夜间探测深度和白天几乎相同;其他海区的探测深度和最优波长介于清洁大洋水和沿岸浑浊水之间。总体上看,探测波长为 470~480 nm 时,星载海洋激光雷达在全球范围内的探测能力最佳,波长在 500 nm 以上时,在沿岸海域的探测能力最佳。

选择和确定星载海洋激光雷达系统指标时还需要考虑实际的技术成熟度和工程实现难易度,考虑到目前的激光器技术条件,532 nm 的激光器具有最高的成熟度和稳定性,该波长在近岸海区具有较好的探测能力。随着激光技术的发展,将来可以根据观测范围的具体需求,有针对性地选取特定波长的激光光源,以提高星载海洋激光雷达的综合探测能力。

#### 参考文献:

- [1] Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasianalytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41: 5755-5772.
- [2] O' Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 24937-24953.
- [3] Stramski D, Reynolds R A, Kahru M, et al. Estimation of particulate organic carbon in the ocean from satellite remote sensing[J]. *Science*, 1999, 285: 239-242.
- [4] Gordon H R, Boynton G C, Balch W M, et al. Retrieval of coccolithophore calcite concentration from SeaWiFS Imagery [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 1587-1590.
- [5] Doxaran D, Froidefond J M, Castaing P. Reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23: 5079-5085.
- [6] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53: 1-13.
- [7] Montes M A, Churnside J H, Lee Z P, et al. Relationship between water attenuation coefficients derived from active and passive remote sensing: a case study from two coastal environments[J]. *Applied Optics*, 2011, 50: 2990-2999.
- [8] Lee J H, Churnside J H, Marchbanks R D, et al. Oceanographic lidar profiles compared with estimates from in situ optical measurements[J]. *Applied Optics*, 2013, 52: 786-794.
- [9] Lu X, Hu Y, Hrepte C, et al. Ocean subsurface studies with the CALIPSO spaceborne lidar [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2014, 119: 4305-4317.
- [10] Behrenfeld M J, Hu Yongxiang, O' Malley R T, et al. Annual boom-bust cycles of polar phytoplankton biomass revealed by space-based lidar [J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10: 118-122.
- [11] Henyey L C, Greenstein L L. Diffuse radiation in the galaxy [J]. *Astrophys J*, 1941, 93: 70-83.
- [12] Gordon H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering[J]. *Appl Opt*, 1982, 21: 2996-3001.
- [13] Lee Z P, Darecki M, Carder K L, et al. Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: an evaluation of remote sensing methods [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110(C2): C02017.
- [14] Mobley C D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*[M]. New York: Academic Press, 1994.