

星载激光雷达观测东中国海气溶胶时空分布的统计特征

任文核¹, 宋小全^{1,2}, 王芳涵¹

(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 266100)

摘要: 基于 2006 年 6 月至 2016 年 12 月期间 CALIPSO 星载激光雷达卫星观测资料, 分析了东中国海的渤海、黄海和东海海域的气溶胶时空分布特征。结果表明: (1) 三个海域的主要气溶胶构成都是清洁海洋型、沙尘型和污染大陆型三种类型气溶胶, 三者百分比之和均达到目标海域气溶胶成分的 90%, 而具体占比最大、起主导作用的气溶胶类型在不同海域并不相同; (2) 三个海域随着高度升高气溶胶整体均为指数衰减趋势, 其中 4 km 高度以下各气溶胶类型变化显著, 4 km 以上区域均只剩下沙尘型、污染沙尘型和煤烟型的气溶胶存在; (3) 几乎所有气溶胶类型都会随着月份和季节上的更替变化而变化, 春季各海域都是沙尘型气溶胶占比最大, 夏季清洁海洋型气溶胶影响最明显, 秋季和冬季期间东海地区以清洁海洋型气溶胶为主, 而渤海和黄海均是沙尘型气溶胶为主。

关键词: 激光雷达; CALIPSO; 气溶胶类型; 东中国海

中图分类号: P407.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1230002

Spatiotemporal distribution of aerosols in East China Seas based on spaceborne lidar

Ren Wenhe¹, Song Xiaoquan^{1,2}, Wang Fanghan¹

(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 266100, China)

Abstract: Based on the CALIPSO satellite observations from June 2006 to December 2016, the aerosol spatiotemporal distribution characteristics above the East China Seas (the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea) were analyzed. The results indicate that: (1) Aerosols in the three seas are mainly Clean Marine, Dust and Polluted Dust, and the sum of the three percentages is nearly 90%. The predominant aerosol type is different in different seas; (2) Aerosols above each sea tend to exponentially decay as the height increases. The aerosol type changes significantly in the space below 4 km, but there exists only Dust, Polluted Dust and Smoke above 4 km; (3) Temporal distribution characteristics show that almost all aerosol types vary with months and seasons. In spring, the three seas are Dust aerosols accounted for the

收稿日期: 2018-07-28; 修订日期: 2018-08-28

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

作者简介: 任文核(1991-), 男, 硕士生, 主要从事激光雷达探测大气方面的研究。Email: wenhe.ren@qq.com

导师简介: 宋小全(1976-), 男, 副教授, 主要从事大气激光遥感方面的研究。Email: songxq@ouc.edu.cn

largest proportion. In summer, Clean Marine aerosols obviously have the greatest impact for the East China Sea. In autumn and winter, the Bohai Sea and the Yellow Sea are mainly composed of Dust aerosol, while the East China Sea is Clean Marine aerosol as main component.

Key words: lidar; CALIPSO; aerosol types; the East China Seas

0 引言

我国东中国海是典型的沿岸浑浊二类水体。由于黄河、长江河水入海,工业城市沿海布局,以及内陆地区强吸收性气溶胶随大气传输入侵,使得东中国海的大气气溶胶模型和海水后向散射模型变得愈发复杂,国际海色卫星的观测数据在东中国海沿岸水域具有很大误差^[1],气溶胶模型的准确与否成为解决东中国海海色参数反演算法的关键因素。李丽萍^[2]首次提出在东亚海域普遍存在 NASA 大气校正算法对于 SeaWiFS 蓝波段离水辐亮度低估现象,并利用辐射传递模拟表明是由于未考虑亚微米级吸收性气溶胶引起的。经过进一步的研究提出,除黄沙气溶胶外,东亚海域海色大气校正算法还必须考虑煤烟型气溶胶^[1]。

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星的产品数据与模式模拟和其他卫星数据结合,可以用来分析气溶胶的垂直分布,验证模型的模拟情况^[3]。但是,以往的工作主要集中在与卫星之间观测结果和模式模拟结果之间的比较,而对较长时间尺度上的气溶胶类型的廓线分布和时间变化属性研究较少。文中利用自 2006 至 2016 年期间的 CALIPSO 星载激光雷达卫星观测结果,针对东中国海在渤海(BS)、黄海(YS)和东海(ECS)这三个海域分别选取一定范围的研究区域来分析东中国海的气溶胶类型在时空上分布特征。

1 研究区域和星载激光雷达产品

1.1 研究区域

目标区域的选取原则,要保证区域内的下垫面尽量无陆地或海岛的存在,同时也要接近内陆海岸边缘。此外,还要考虑到目标区域的位置和海岸线轮廓在我国东中国海地区的具体范围和分布特征的影响。因此,各海域目标区域选取结果如图 1 所示,经纬度

范围为:渤海(38.0~39.8 °N, 119.0~120.5 °E), 黄海(33.0~36.0 °N, 121.0~125.0 °E)和东海(27.5~31.5 °N, 123.5~127.5 °E)。针对选取的研究区域,其特征表现为:三个区域由北向南依次分布,且受到内陆的包围和影响依次减弱。

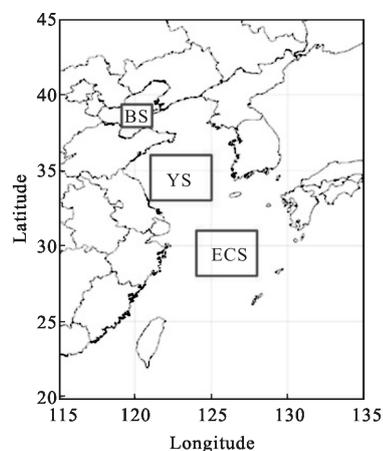


图 1 目标海域所选的研究区域

Fig.1 Area of interest for this study

1.2 星载激光雷达数据产品

2006 年 4 月 28 日成功发射的 CALIPSO 卫星,搭载的主要仪器为 CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization),能够提供全球范围内多年连续的气溶胶和薄云的垂直分布以及光学厚度和物理特性,旨在提高人们对气溶胶和云在气候系统中作用的认知水平^[4-6]。CALIOP 是第一个能够提供全球范围连续观测的星载激光雷达^[7]。CALIOP 接收的信号经过类似于 EOS 的数据处理系统处理后,提供包括 Level 0, Level 1A, Level 1B, Level 2, Level 3 和 Level 4 这五个级别的数据。Level 2 数据是在 Level 1 数据基础上去除云得到的^[8], Level 2 产品分为廓线产品和 Level 2 层数据产品及 Level 2 垂直特征层分布数据产品三种类型。特征层分布数据产品主要提供特征层的识别和鉴定信息,如主要区分云的相态、辨别气溶胶的类型等^[9]。文中所使用的

数据为 Level 2 VFM 产品 Version 3 资料的 Feature Classification Flags^[10]。CALIOP 提供的 Version 3 资料相对于 Version 2 在云-气溶胶分类算法上有了较大改进,使气溶胶分类的精度大大提升^[11-12]。气溶胶通常多存在于低对流层的内部,为使统计对比的数据保持分辨率的一致性,文中仅考虑了 0~8.2 km 高度范围内的水平分辨率 333 m、垂直分辨率 30 m 的气溶胶类型数据。

CALIOP 所观测和区分出的气溶胶模型是基于 AERONET 自 1993-2002 年连续多年的数据分析,从而得出不同种类气溶胶的物理和光学特性以及气溶胶激光雷达比^[13-14]。同样,CALIOP 的 Level 2 VFM 数据集是根据接收不同高度的后向散射信号,计算得到体积退偏比(δ_v)、532 nm 后向散射系数(β_{532})、区域类型以及抬升现象等相关的信号特征,将大气层内部的气溶胶类型分成如下 6 种:Clean Marine (清洁海洋型)、Dust (沙尘型)、Polluted Continental (污染大陆型)、Clean Continental (清洁大陆型)、Polluted Dust (污染沙尘型)和 Smoke (煤烟型)^[15]。表 1 所示为 CALIOP 的气溶胶分类标准。

表 1 CALIOP 气溶胶分类标准^[15]

Tab.1 CALIOP aerosol classification criteria^[15]

Flag	Aerosol subtype	δ_v	β_{532} /km ⁻¹ ·sr ⁻¹	Land/ Ocean	Uplift
1	Clean Marine	>0.075	<0.001 5	Ocean	N
2	Dust	>0.20	-	-	N
3	Polluted Continental	<0.075	>0.000 5	Land	N
4	Clean Continental	<0.075	<0.000 5	Land	N
5	Polluted Dust	0.075-0.20	-	Land	N
6	Smoke	<0.075	>0.000 5	Land/ Ocean	Y
7	Other	-	-	-	-

2 结果分析

2.1 总体分布特征

针对东中国海的三个海域,分别对 2006-2016 年这 10 年内各类型气溶胶的出现频次进行时间、高度空间上的累加,再将该海域总的所有类型气溶胶出现频次进行累加,得到各类型气溶胶在目标海域的

百分比统计结果,其计算公式为:

$$r_i = \frac{N_i}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N_i 为在该海域第 i 类气溶胶在时间和垂直空间上出现的总频次; N 为该海域所有类型气溶胶在时间和空间上出现的总频次; r_i 为第 i 类气溶胶在该海域出现的频率。最终的百分比占比结果如表 2 所示。由于在研究海域中均未发现有 Clean Continental (清洁大陆型) 类型的气溶胶,因此不再针对该类型气溶胶进行列表和讨论。

表 2 各类型气溶胶百分比占比

Tab.2 Percentage of various types of aerosols

	Clean Marine	Dust	Polluted Continental	Polluted Dust	Smoke
BS	18.83%	29.34%	2.27%	45.41%	4.09%
YS	27.89%	27.54%	2.58%	36.80%	5.19%
ECS	43.96%	18.52%	3.82%	26.35%	7.35%

从表 2 可以看出:三个海域的气溶胶组分整体上较为一致,即主要由清洁海洋型、沙尘型和污染沙尘型三种类型气溶胶构成,其占比总和达 90%,而污染大陆型和煤烟型气溶胶被监测到的次数都比较少。三种主要成分的气溶胶类型中,渤海出现频率最多类型的气溶胶为污染沙尘型,而东海出现最多的为清洁海洋型,黄海海域三种类型气溶胶出现频率相差不大。

2.2 垂直分布特征

为了观察和分析气溶胶在垂直空间上的分布特征,分别针对不同海域分析各类型气溶胶在垂直空间上的频数廓线分布,以及不同海域在同一水平高度上各类型气溶胶的占比分布对比情况,进而对东中国海海域的不同类型气溶胶在垂直空间上的变化趋势和同一水平高度上各类型气溶胶所占的百分比展开探讨和研究。

2.2.1 各类型气溶胶垂直空间上的分布

渤海、黄海和东海的各类型气溶胶在垂直空间上随高度变化的频数分布趋势如图 2 所示。由于渤海海域的下垫面受到陆地边界包围的影响,研究区域的范围进行了等比例缩小,因此在该海域所获得的样本统计量相对较少。

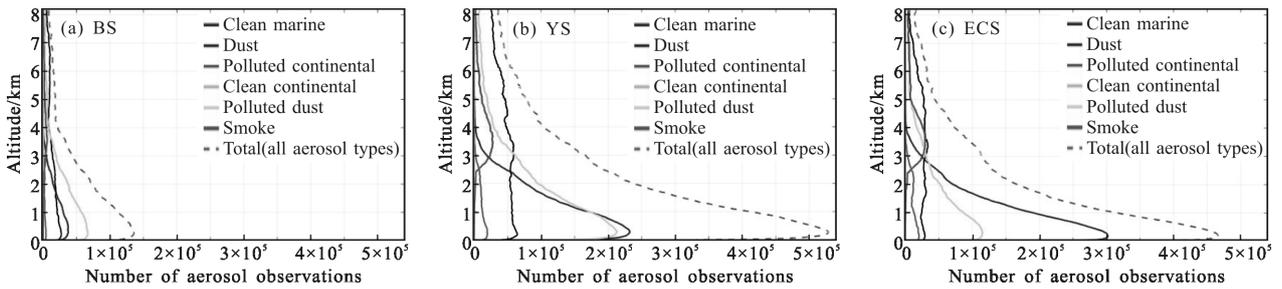


图 2 气溶胶类型廓线分布

Fig.2 Distribution of aerosol subtypes profile

整体上，被观测到的气溶胶类型总和随着高度的升高呈幂指数衰减趋势，且主要分布在 4 km 高度以下的区域，峰值在 0.3 km 高度附近；清洁海洋型主要分布在 4 km 高度以下区域，峰值在 0.5 km 左右，随着高度的上升在三个海域均呈现指数衰减且到 4 km 高度附近后几乎消失；沙尘型在 0~8 km 的各个高度上均有分布，整体随着高度的升高变化并不剧烈，但渤海海域变化比较明显，在该海域峰值出现在 0.2 km 高度附近，之后随着高度上升数量逐渐减少，而在 4 km 以上高度又逐渐增多；污染大陆型分布在 4 km 以下区域，峰值均出现在 0.2 km 高度附近；污染沙尘型在三个海域的垂直分布均在 0.3 km 高度附近出现峰值，然后随高度上升快速衰减，5 km 及以上高度区域变化不再明显；煤烟型在各海域的

垂直分布情况较相似，从 2.5 km 高度开始出现，随高度上升数量逐渐增多，在 3.6 km 高度附近达到峰值，随后逐渐缓慢衰减。

2.2.2 各类型气溶胶垂直空间上的百分比占比

将目标海域同一水平高度上各类型气溶胶进行百分比统计，其计算方法为：

$$h_i = \frac{n_i}{n} \times 100\% \quad (2)$$

式中： n_i 为在该水平高度上第 i 类气溶胶 10 年时间内的累加频次结果； n 为同一水平高度上所有类型气溶胶 10 年时间内的累加总频次结果； h_i 为该海域对应高度上的第 i 类气溶胶频率。最终的百分比廓线变化趋势如图 3 所示，各高度空间范围内的气溶胶类型主要特征为：

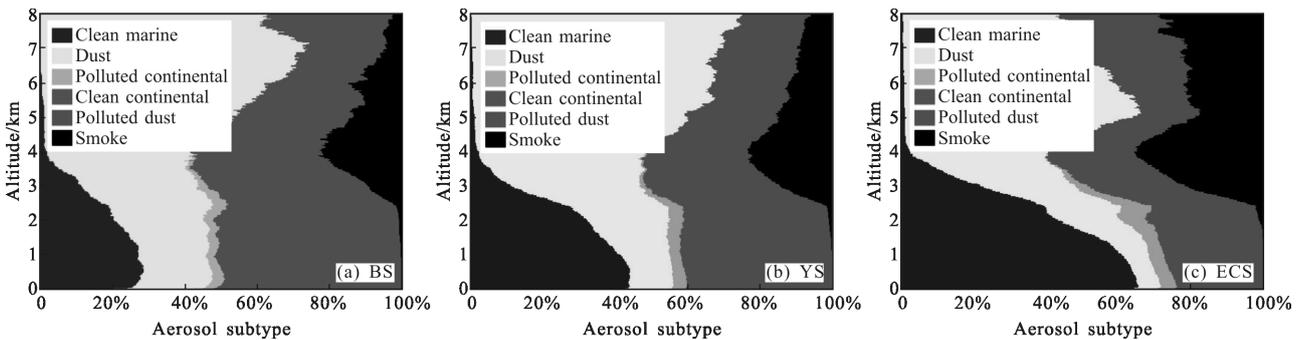


图 3 垂直空间百分比

Fig.3 Percentage of vertical space

(1) 0~2.5 km 各海域均未有煤烟型被监测到；污染大陆型百分比最小且随高度上升占比变化不明显；渤海海域污染沙尘型最多、清洁海洋型和沙尘型占比大小近似，黄海海域清洁海洋型与污染沙尘型占比大小相近，东海海域清洁海洋型在该高度区间内占比均达 50% 以上。

(2) 2.5~4 km 清洁海洋型和污染大陆型快速减

少，大约在 4 km 高度消失；沙尘型呈现明显的增加且成为主要类型气溶胶；开始出现煤烟型，在 4 km 附近区域达到最大百分比；污染沙尘型的百分比占比变化不明显。

(3) 4~8 km 各海域气溶胶类型都是只有沙尘型、污染沙尘型和煤烟型；沙尘型占比均达到 50% 以上；污染沙尘型都表现为占比逐渐减小而后又增大

的过程;煤烟型在渤海海域的 5 km 高度就不再被监测到,在黄海海域的 6 km 高度附近消失,而东海海域则是在 5 km 高度处出现极小值,随后占比又逐渐增大。

2.3 时间分布特征

根据各类型气溶胶在 2006~2016 年期间以月为单位出现频次的均值进行统计,对比和研究各类型气溶胶在东中国海海域的月际变化(图 4)。在月际变化的基础上将 3~5 月作为春季 (MAM)、6~8 月作为夏季(JJA)、9~11 月作为秋季(SON)以及 12 月~次年 2 月作为冬季(DJF),对各海域的气溶胶类型进行季节性的百分比统计(图 5),分析和对比各海域在不同季节中的类型组成及变化,其计算公式为:

$$s_i = \frac{m_i}{m} \times 100\% \quad (3)$$

式中: m_i 为第 i 类气溶胶在该季度出现的总频次; m

为所有类型的气溶胶在该季度出现的总频次; s_i 为第 i 类气溶胶在该季度的频率。

结合图 4 和图 5 的结果可以看出,各类型气溶胶在东中国海海域均呈现明显的时间和季节性变化。渤海海域的污染沙尘型在全年的影响都很突出,四个季度占比分别为 50.34%、39.56%、37.11%、54.37%,沙尘型则呈现明显的 DJF、MAM 较多而 JJA、SON 较少的季节更替现象,而在 JJA 期间清洁海洋型占比最大;黄海海域主要气溶胶类型的变化与渤海相类似,不同的地方在于在该海域清洁海洋型占比明显升高,而 JJA 期间占比更是达到了 48.54%,几乎是所有气溶胶类型总和的一半。东海海域的清洁海洋型整体占比较高、影响突出,从时间变化来看,一年当中除 MAM 期间以沙尘型气溶胶为主外,其余季节里均主要为清洁海洋型,JJA 和 SON 期间的该类型气溶胶非常突出,占比分别为 65.63%、64.01%。

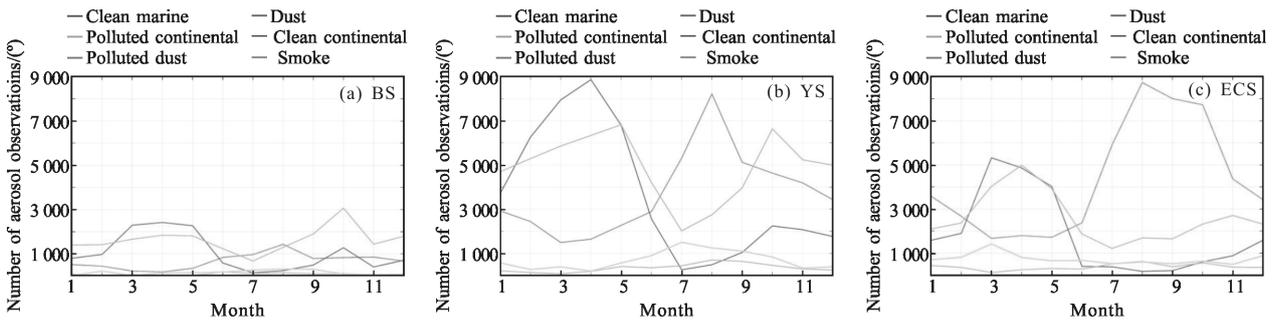


图 4 气溶胶类型的月际变化

Fig.4 Monthly variation of aerosol type

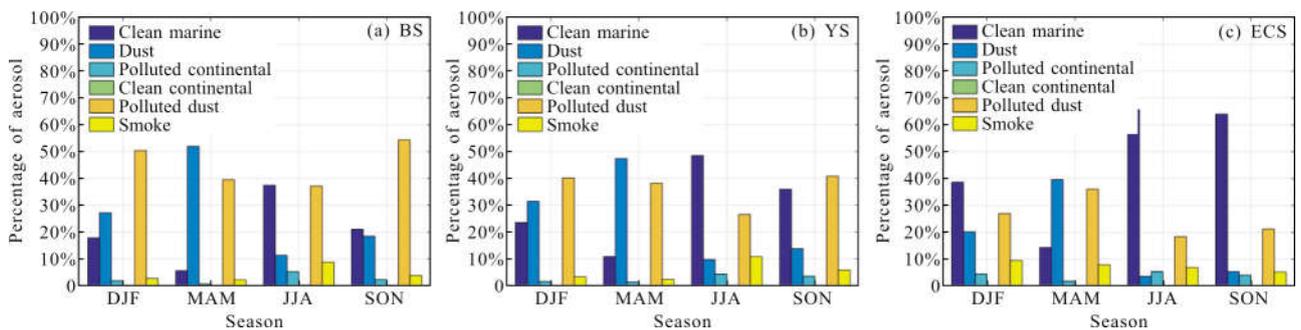


图 5 气溶胶季节统计

Fig.5 Aerosol type season statistics

3 结束语

文中利用星载激光雷达针对东中国海的渤海、黄海和东海海域,进行了 10 年时间的气溶胶类型时

空分布特性的统计和分析。东中国海气溶胶类型总体上由清洁海洋型、沙尘型和污染沙尘型组成;垂直空间上的分布都呈现幂指数衰减态势,且受到海洋大气边界层等因素影响,大量气溶胶都分布在 4 km 以下高度区间内;时间上的变化主要为各类型气溶

胶出现的频次(频率)随时间、季节地更替呈现出类正弦曲线形的波动变化。

采用 CALIPSO Level 2 级产品的 VFM 单一数据来源,且仅是针对对流层以内的大气气溶胶进行研究。因此,下一步的工作将尝试采用多源数据、多种参数和多角度联合分析的方式,对现有结果进行补充和完善;同时,还将重点关注、分析和探讨吸收性气溶胶(尤其是微小粒径的 Smoke 类型气溶胶)在该海域的光学特性。

参考文献:

- [1] He M X, He S, Hu L, et al. MERIS Performance in the East China Seas: Evaluation of atmospheric correction and optical inversion algorithms [C]//ENVISAT Symposium Proceedings, 2007: 23–27.
- [2] Li L P, Fukushima H, Frouin R, et al. Influence of submicron absorptive aerosol on sea-viewing wide field-of-view sensor (SeaWiFS)–derived marine reflectance during Aerosol Characterization Experiment (ACE)–Asia[J]. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 2013, 28(1–2): 147–158.
- [3] Generoso S, Bey I, Labonne M, et al. Aerosol vertical distribution in dust outflow over the Atlantic: comparisons between GEOS–Chem and Cloud-aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113 (D24): 10.1029/2008JD010154.
- [4] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310–2323.
- [5] Sun Xianming, Wan Long, Wang Haihua. Sensitivity study on lidar detection of the depolarization ratio of water clouds [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0906001. (in Chinese)
孙贤明, 万隆, 王海华. 激光雷达探测水云退偏振比的敏感性研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0906001.
- [6] Cesana G, Chepfer H, Winker D, et al. Using in situ airborne measurements to evaluate three cloud phase products derived from CALIPSO [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(10): 5788–5808.
- [7] Zhao Jian, Sun Xuejin, Zhang Riwei, et al. Application of CALIPSO in global aerosol detection [J]. *Meteorological Hydrological and Marine Instrument*, 2014, 31(1): 50–54. (in Chinese)
- 赵剑, 孙学金, 张日伟, 等. CALIPSO 星载激光雷达系统在全球气溶胶探测中的应用[J]. *气象水文海洋仪器*, 2014, 31(1): 50–54.
- [8] Liu D, Wang Z, Liu Z, et al. A height resolved global view of dust aerosols from the first year CALIPSO lidar measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D16): 10.1029/20075D009776.
- [9] Shen Xianxia, Liu Chaoshun, Shi Runhe, et al. Vertical distribution of aerosols during different air pollution periods around Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3): 582–591. (in Chinese)
沈仙霞, 刘朝顺, 施润和, 等. 上海不同污染等级下气溶胶光学特性垂直分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(3): 582–591.
- [10] Liu Z, Vaughan M, Winker D, et al. The CALIPSO lidar cloud and aerosol discrimination: Version 2 algorithm and initial assessment of performance[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(7): 1198–1213.
- [11] Liu Z, Vaughan M A, Winker D M, et al. The CALIPSO lidar cloud and aerosol discrimination: version 2 algorithm and initial assessment of performance [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(7): 1198–1213.
- [12] Winker D M, Vaughan M A, Omar A H, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310–2323.
- [13] Liu Bingyi, Zhuang Quanfeng, Qin Shengguang, et al. Aerosol classification method based on high spectral resolution lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0411001. (in Chinese)
刘秉义, 庄全风, 秦胜光, 等. 基于高光谱分辨率激光雷达的气溶胶分类方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0411001.
- [14] Omar A H, Won J G, Winker D M, et al. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D10): 2227–2252.
- [15] Ma Xiaojun, Qin Yan, Chen Yonghang, et al. Seasonal variation of vertical distribution of aerosol types around Shanghai during haze periods [J]. *China Environment Science*, 2015, 35(4): 961–969. (in Chinese)
马骁骏, 秦艳, 陈勇航, 等. 上海地区霾时气溶胶类型垂直分布的季节变化[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(4): 961–969.