

最新 V4 版 CALIOP 云和气溶胶衰减后向散射与 V3 版的差异

张天澈 吴 东

中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 为研究正交偏振云-气溶胶激光雷达(CALIOP)最新 Version 4(V4)版产品与 Version 3(V3)版产品全球大气气溶胶和云衰减后向散射特征的差异及其对以往研究可能造成的影响,利用 2011 年 1、4、7、10 月 CALIOP 这两个版本的数据,对 20.2 km 海拔高度内全球范围云和气溶胶样本点的 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射、总衰减颜色比进行了概率分布统计,并对两个不同版本相应数据的相对偏差做出统计分析。结果表明,云或气溶胶 V4 版与 V3 版散射数据的相对偏差趋于正值,夜间数据的变化比日间数据明显。V4 版与 V3 版云的日间 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射及总衰减颜色比的相对偏差均值分别为 3.40%、4.66%和 1.18%,而夜间的则分别为 2.80%、8.00%和 5.33%。气溶胶的 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射及总衰减颜色比的相对偏差均值日间分别为 1.14%、6.94%和 5.62%,夜间分别为 3.33%、10.92%和 7.64%。

关键词 大气海洋光学; 衰减后向散射; 总衰减颜色比; CALIPSO/CALIOP; 云; 气溶胶

中图分类号 P412.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.060102

Differences Between Latest V4 and V3 Products for CALIOP Clouds and Aerosols Attenuated Backscatters

Zhang Tianche Wu Dong

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

Abstract In order to study the differences of attenuated backscatter characters of global clouds and aerosols obtained from the cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization (CALIOP) the latest version of Version 4 (V4) and Version 3 (V3) products separately, and the potential impacts on previous studies. The CALIOP two vertical products in January, April, July and October of 2011 are used to gather probability distribution statistic of clouds or aerosols 532 nm total attenuated backscatters, 1064 nm attenuated backscatters and total attenuated color ratios respectively below the altitude of 20.2 km all over the world. And the relative deviation of two different versions of the corresponding data is made statistical analysis. The results show that the relative deviations of the attenuated backscatters between V4 and V3 products for clouds and aerosols tend to be positive values, and the changes from V3 to V4 data are more obvious at nighttime than those at daytime for both clouds and aerosols. The mean relative deviations from V4 and V3 of clouds daytime 532 nm total attenuated backscatters, 1064 nm attenuated backscatters and total attenuated color ratios are 3.40%, 4.66% and 1.18% separately, and those of clouds nighttime data are 2.80%, 8.00% and 5.33% separately. The mean relative deviations of aerosols daytime 532 nm total attenuated backscatters, 1064 nm attenuated backscatters and total attenuated color ratios are 1.14%, 6.94% and 5.62% separately, those of aerosols nighttime data are 3.33%, 10.92% and 7.64% separately.

Key words atmospheric and oceanic optics; attenuated backscatter; total attenuated color ratio; CALIPSO/CALIOP; cloud; aerosol

收稿日期: 2015-12-17; 收到修改稿日期: 2016-01-15; 网络出版日期: 2016-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(41376180)

作者简介: 张天澈(1991—),女,硕士研究生,主要从事海洋与大气激光测量方面的研究。E-mail: solar.ztc@gmail.com

导师简介: 吴 东(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事海洋光学与激光探测方面的研究。

E-mail: dongwu@ouc.edu.cn(通信联系人)

OCIS codes 010.1350; 280.1350; 280.3640

1 引言

星载激光雷达在地球观测系统中主要承担了激光测高和大气探测的任务。地球科学探测系统(GLAS)是激光测高的典型代表^[1],而作为大气观测的有利工具,正交偏振云-气溶胶激光雷达(CALIOP)是第一个以高垂直分辨率连续观测大气气溶胶和云垂直结构的星载激光雷达,同时也是第一个星载偏振激光雷达^[2],搭载在云-气溶胶激光雷达和红外探测者观测(CALIPSO)卫星上,通过测量得到激光与大气分子、气溶胶粒子或云粒子相互作用的后向散射信号垂直廓线,反演得到消光系数、退偏比、光学厚度等光学特征参数,承担测量全球云和气溶胶分布及特性进行垂直廓线的任务^[3],以便对气溶胶辐射强迫作用和云-气候反馈机制的不确定性进行评估^[2,4],其垂直观测数据的准确性对云和气溶胶光学特性的研究有重要影响。

自2006年4月28日CALIPSO发射升空,CALIOP一级垂直廓线数据(CALIOP L1B)产品已经历多次算法更新,第三版(V3)一级数据产品于2009年6月发布,最早期的V3.00已不可下载使用,其余版本(Version 3.01、Version 3.02和Version 3.30)分别包含2006年06月13日至今的部分数据。各个子版本的校准算法相同,与Version 3.01相比,Version 3.02改变了数据处理软件编译体系,Version 3.30在衰减后向散射数据校准区域采用更新了的戈达德地球观测系统模型第五版(GEOS-5, Version 5)分子数密度数据,使得夜间衰减后向散射信号平均增加了约0.6%,日间衰减后向散射信号在赤道附近增加量小于0.2%,在两极地区增加了约0.8%^[5]。CALIOP L1B V4产品于2014年11月发布,其质量声明^[6]提到V4产品校准过程的变化包括数据校准算法、校准不确定度算法的改善及校准软件代码错误的修正等。质量声明对V4与V3校准算法的差异作了介绍:1) V4将532 nm夜间数据校准区域由30~34 km提升至36~39 km,消除了校准区域中气溶胶的影响;2) 进行532 nm日间数据校准时,参考夜间数据校准结果,提高了校准转换区域的海拔高度,并增加了转换区内的样本数量;3) 1064 nm校准比例因子由定值改为卫星运行时间的函数,用于校准比例因子的卷云样本选择标准也获得改善^[7]。同时,质量声明以2010年10月V3.01数据为例给出V4与V3数据532 nm夜间校准系数、532 nm日间校准系数及1064 nm日夜间校准系数的偏差中值分别为3%、6%及8%,其中V4版1064 nm日、夜间校准系数的变化率范围分别为-22%~8%和-20%~10%。V4校准过程的变化提高了532 nm和1064 nm信号的校准准确性,经重算后的一级标准产品包括2006年06月13日至2015年05月30日的数据。目前,CALIOP L1B V3和V4产品均可从美国国家航空航天局兰利研究中心获取。

近年来国际上基于CALIOP云和气溶胶衰减后向散射数据的相关研究大量涌现。2012年,Chen等^[8]对基于CALIOP和OMI的探测结果进行了对比研究,发现CALIOP气溶胶1064 nm衰减后向散射的观测值与OMI的紫外气溶胶指数反演值存在相关性。同年,吴东等^[9-10]将CALIOP海面散射信号用于海面风速和海气界面气体传输速率的研究。2013年,Liu等^[11]利用5年的CALIOP资料研究亚洲沙尘退偏比等光学特性随沙尘运移的变化。同年,Wu等^[12]利用CALIOP实测的气溶胶衰减后向散射替代传统的标准大气散射模型进行星载相干激光测风雷达的性能仿真。2015年,Wu等^[13]将CALIOP的气溶胶和云衰减后向散射数据应用于海雾探测研究。同年,刘聪等^[14]对强霾、沙尘、生物质燃烧污染天气和清洁天气的CALIPSO气溶胶消光系数、退偏比、衰减颜色比以及温度廓线等进行了统计对比。另外,本课题组也正在开展多项利用CALIOP的气溶胶和云衰减后向散射数据的研究。上述研究的结果都可能受到数据版本更新的影响。从质量声明中可以看出校准系数的全球分布呈明显的纬向带状分布,而云和气溶胶在各个纬度的分布概率也都不相同^[15-16],并且V4数据校准过程也包含了对校准软件代码错误的修正,校准系数的偏差中值不能很好地反映出云和气溶胶等目标物的衰减后向散射从V3版到V4版的整体变化,更不能表征衰减后向散射数据升级导致的衰减颜色比等的变化。进行云和气溶胶V4和V3版本数据差异比较的研究对于前期研究成果的重新审视、承前启后开展今后研究有着重要意义。

为研究CALIOP V4和V3版产品全球大气气溶胶和云衰减后向散射特征的差异,本文利用2011年1、4、7、10月的数据,对20.2 km海拔高度内全球范围云和气溶胶样本点的532 nm总衰减后向散射、1064 nm衰减后向散射及总衰减颜色比进行了概率分布统计,并对两个不同版本相应数据的相对偏差进行统计分析。

2 数据及方法

本文选用了 CALIOP 2011 年 1、4、7、10 月一级垂直廓线数据 V3.01 版和 V4.00 版产品(L1B V3.01 及 V4.00)以及二级垂直特征掩码 V3.01 版产品(L2 VFM V3.01)。

在数据的选取上,考虑到 V3 版 3 个不同子版本 Version 3.01、Version 3.02 和 Version 3.30 的校准算法相同,各子版本数据偏差较小,且 V3.01 仍是 V3 产品中数据量最多的版本,并能与 CALIOP L1B V4 版质量声明中的示例进行更好地对比说明,本文也选用 V3.01 版数据代表 V3 版数据。由于多项相关云和气溶胶衰减后向散射的前期研究采用 2011 年的数据并急需研究结果作参考,本文选用了 2011 年的数据,考虑到样本数量较大,仅挑选 1、4、7、10 月 4 个月份的数据,期望能够反映四季的整体变化。

CALIOP L1B 数据文件包含由 Level 0 单脉冲激光雷达数据经过校准和地理定位后得到的 532 nm 偏振(垂直偏振和平行偏振)通道及 1064 nm 通道的半轨(日间或夜间)垂直廓线数据、地理位置、时间参数、气象资料及与激光雷达和卫星相关的参数等信息^[17],分辨率信息如表 1 所示。

表 1 CALIOP L1B 产品不同高度范围的距离分辨率

Table 1 Range resolutions of different altitude ranges of CALIOP L1B products

Altitude range /km	Bin number	Horizontal	532 nm vertical	1064 nm vertical
		resolution /km	resolution /m	resolution /m
30.1~40.0	1~33	5	300	N/A
20.2~30.1	34~88	5/3	180	180
8.3~20.2	89~288	1	60	60
-0.5~8.3	289~578	1/3	30	60
-2.0~-0.5	579~583	1/3	300	300

CALIOP L2 VFM 产品包含与激光雷达和卫星相关的参数及时间和空间参数如经纬度、垂直廓线获取及发布时间、陆地/水体分类标识、特征分类标记等。其中,特征分类标记(FCF)为 16 位二进制数,用于存储特征层类型、冰/水相、特征层子类型、特征层探测的水平距离要求及质量评估等信息,并将 5 km 水平范围内的样本点特征分类结果保存在廓线中,廓线内样本点的空间分辨率如表 2 所示,样本点的空间位置可与 L1B 数据一一对应。

表 2 CALIOP L2 VFM 产品的廓线空间分辨率

Table 2 Profile special resolution of CALIOP L2 VFM products

Altitude range /km	Vertical resolution /m	Horizontal resolution /km	Profiles /5 km	Samples per profile
20.2~30.1	180	5/3	3	55
8.3~20.2	60	1	5	200
-0.5~8.3	30	1/3	15	290
Total				545

CALIOP 一级数据给出了多通道的衰减后向散射激光探测廓线数据,但未说明这些散射数据来自什么目标物,首先需要对云和气溶胶样本进行识别。考虑到 20.2 km 海拔高度以上云和气溶胶样本的数量相对较少,且水平和垂直分辨率相对较低,利用 L2 VFM 产品的特征分类标记选取 20.2 km 海拔高度以下全球范围的云和气溶胶样本点的位置,CALIOP 2011 年 1、4、7、10 月经匹配筛选后确定的统计样本点数目如表 3 所示。根据样本点位置从 L1B V3 和 V4 产品获取相应的日夜间 1064 nm 衰减后向散射和 532 nm 总衰减后向散射数据。总衰减颜色比 $\chi'(r)$ ^[18] 定义为

$$\chi'(r) = \frac{\beta'_{1064}(r)}{\beta'_{532}(r)}, \quad (1)$$

式中 $\beta'_{1064}(r)$ 和 $\beta'_{532}(r)$ 分别为 1064 nm 衰减后向散射和 532 nm 总衰减后向散射。V3 与 V4 数据的相对偏差定义为 V4 与 V3 数据的绝对偏差与 V4 数据的比值。

分别对表 3 中云及气溶胶样本点 V3、V4 不同版本的日、夜间 532 nm 总衰减后向散射(BS532)、1064 nm 衰减后向散射(BS1064)、总衰减颜色比(CR)及以上三个参数不同版本的相对偏差作概率分布统计,横轴为衰减后向散射以 10 为底的对数坐标,衰减后向散射取对数后分辨率为 0.1,总衰减颜色比概率分

布横轴的分辨率为 0.05, 数据相对偏差概率分布横轴的分辨率为 1%, 统计范围为 $-30\% \sim 30\%$ 。

表 3 云和气溶胶样本点个数统计

Table 3 Numbers of cloud and aerosol sample point

Time	Cloud		Aerosol	
	Daytime	Nighttime	Daytime	Nighttime
Jan	604,647,400	866,200,274	117,598,088	247,286,335
Apr	664,643,909	777,262,708	140,988,277	287,178,933
Jul	569,506,541	852,102,852	135,581,747	270,721,005
Oct	660,135,948	802,830,530	134,384,415	254,450,133
Amount	2,498,933,798	3,298,396,364	528,552,527	1,059,636,406
	5,797,330,162		1,588,188,933	

3 结果与讨论

3.1 云 V4 版与 V3 版数据的对比

图 1 给出了 2011 年 1、4、7、10 月云的 V4、V3 版日间 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射、总衰减颜色比及不同版本数据相对偏差的概率分布。

图 1(a)~(c) 分别显示的是 V4、V3 两个版本云的日间 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射及总衰减颜色比的概率分布曲线基本重合, V4 版概率分布曲线略向右移。V4 与 V3 版日间 532 nm 总衰减后向散射相对偏差 (C_RD532D) 的概率分布如图 1(d) 所示, 由数据统计可得, C_RD532D 众数约为 3.50%, 比例约占 13.51%; C_RD532D 分布的半峰全宽范围约为 0.00%~7.00%, 所占比例约 71.86%; C_RD532D 大于 6.00% (质量声明给出的 532 nm 日间数据校准系数相对偏差的中值) 的数据约占 22.14%。V4 与 V3 版云的日间 1064 nm 衰减后向散射的相对偏差 ($C_RD1064D$) 的概率分布如图 1(e) 所示, 统计表明, 众数约为 5.50%, 所占比例约为 5.49%; $C_RD1064D$ 分布的半峰全宽范围约为 0.00%~14.00%, 所占比例约 59.48%; $C_RD1064D$ 大于 8.00% 质量声明给出的 1064 nm 日间数据校准系数相对偏差的中值的数据约占 37.37%。图 1(f) 给出了 V4 与 V3 版云的日间总衰减颜色比相对偏差 (C_RDCRD) 的概率分布, C_RDCRD 的众数约为 4.50%, 所占比例约为 5.79%, C_RDCRD 概率分布的半峰全宽范围约为 $-2.00\% \sim 11.00\%$, 所占比例约为 57.96%。云的 V4 版与 V3 版日间 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射及总衰减颜色比的相对偏差均值分别为 3.40%、4.66% 和 1.18%。

2011 年 1、4、7、10 月云的夜间 V4、V3 数据及相对偏差的概率分布如图 2 所示。

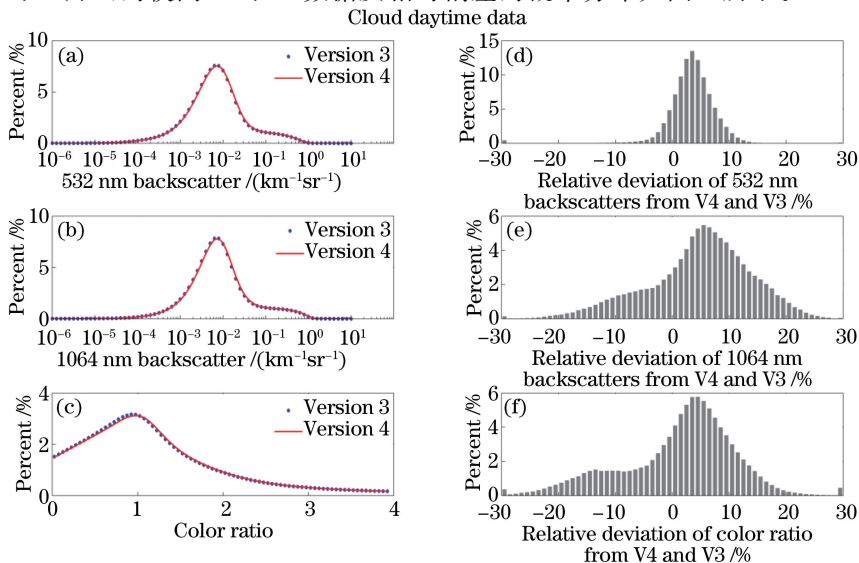


图 1 2011 年 1、4、7、10 月云的日间 V4、V3 数据的概率分布

Fig. 1 Probability distribution of cloud daytime data from V4 and V3 products in January, April, July and October 2011

从图 2(a)~(c)可以看出,V4 与 V3 概率分布曲线的差异与日间数据相似。图 2(d)给出了 V4 与 V3 版夜间 532 nm 总衰减后向散射相对偏差(C_{RD532N})的概率分布统计结果, C_{RD532N} 众数约为 3.50%,比例约占 12.08%; C_{RD532N} 分布的半峰全宽范围约为 $-1.00\% \sim 7.00\%$,所占比例约 77.64%; C_{RD532N} 大于 3.00%(质量声明给出的 532 nm 夜间数据校准系数相对偏差的中值)的数据约占 48.62%。图 2(e)的统计结果表明,云的 V4 与 V3 版夜间 1064 nm 衰减后向散射的相对偏差($C_{RD1064N}$)众数约为 10.50%,比例约为 4.33%; $C_{RD1064N}$ 分布的半峰全宽范围约为 $-2.00\% \sim 20.00\%$,所占比例约 77.80%; $C_{RD1064N}$ 大于 8.00%(质量声明给出的 1064 nm 夜间数据校准系数相对偏差的中值)的数据约占 51.91%。图 2(f)给出了 V4 与 V3 版云的日间总衰减颜色比相对偏差($C_{RD CRN}$)的概率分布, $C_{RD CRN}$ 的众数约为 4.50%,所占比例约为 4.88%, $C_{RD CRN}$ 的分布的半峰全宽范围约为 $-3.00\% \sim 16.00\%$,所占比例约为 71.79%。云的 V4 版与 V3 版夜间 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射及总衰减颜色比的相对偏差均值分别为 2.80%、8.00%和 5.33%。

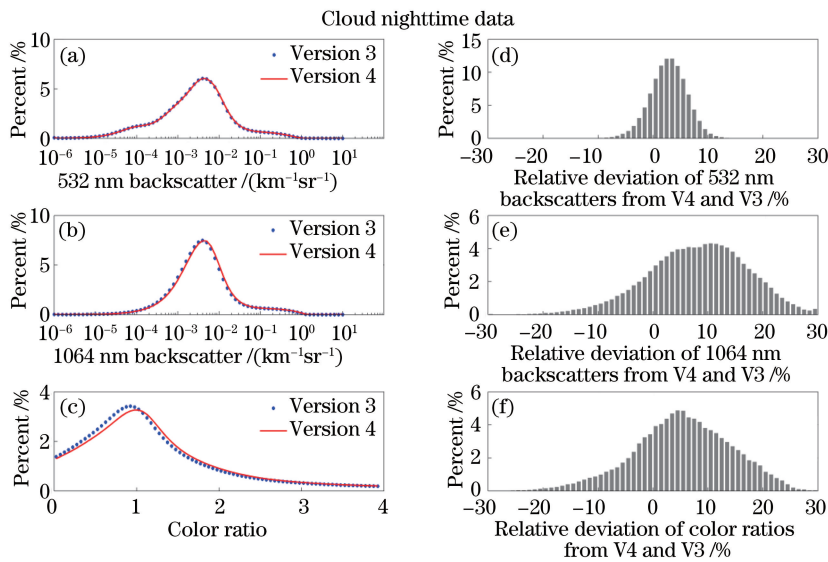


图 2 2011 年 1、4、7、10 月云的夜间 V4、V3 数据的概率分布

Fig. 2 Probability distribution of cloud nighttime data from V4 and V3 products in January, April, July and October 2011

根据图 1 和图 2 的统计结果,V4 校准过程的改善造成了云的 V4 版与 V3 版 532 nm 和 1064 nm 衰减后向散射相对偏差均值为正,并且由于 532 nm 和 1064 nm 衰减后向散射数据不同步的变化,云的 V4 版日、夜间总衰减颜色比分别产生了约 1.18%和 5.33%的增量。云的衰减后向散射数据的相对变化与质量声明给出的校准系数的相对变化有差异,特别是日间数据的相对偏差均值明显小于质量声明给出的校准系数偏差中值。

表 4 给出了 2011 年 1、4、7、10 月 4 个不同月份云的 V4 与 V3 版 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射以及总衰减颜色比相对偏差的均值。

表 4 云的不同月份的 V4 与 V3 后向散射数据相对偏差的均值 (%)

Table 4 Mean relative deviations of backscatter data of clouds in different months (%)

	Daytime			Nighttime		
	BS532	BS1064	CR	BS532	BS1064	CR
Jan	2.98	3.07	-0.16	2.28	12.16	10.09
Apr	3.73	6.19	2.53	3.28	8.23	5.14
Jul	4.04	5.70	1.64	2.89	2.73	-0.20
Oct	2.91	3.69	0.67	2.81	8.87	6.25

从表 4 可以看出,云的日间后向散射数据相对偏差在 4、7 月较大,1、10 月较小;除 7 月外,云的其他月份夜间 532 nm 总衰减后向散射数据的相对偏差变化幅度不大,1064 nm 衰减后向散射数据的相对偏差明显高于日间的偏差。由于云在不同季节的全球分布特征变化较小,云的不同版本散射数据相对偏差的分布特征可能主要是 V4 数据校准过程的更新造成的。

3.2 气溶胶 V4 版与 V3 版数据的对比

图 3 显示了 2011 年 1、4、7、10 月气溶胶的 V4、V3 版日间 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射、总衰减颜色比及不同版本数据相对偏差的概率分布。

气溶胶的日间衰减后向散射概率及总衰减颜色比分布曲线如图 3(a)~(c) 所示,气溶胶的 V4 版衰减后向散射众数增大,导致概率分布曲线峰值处的分布略向右偏移,而 V4 版总衰减颜色比的概率峰值有所下降,数值较大总衰减颜色比的概率略有增加。V4 与 V3 版日间 532 nm 总衰减后向散射相对偏差(A_RD532D)的概率分布如图 3(d)所示,根据数据统计可知,A_RD532D 众数约为 1.50%,比例约占 13.16%;A_RD532D 分布的半峰全宽范围约为 0.00%~5.00%,所占比例约 66.11%;A_RD532D 大于 6.00%(质量声明给出的 532 nm 日间数据校准系数相对偏差的中值)的数据约占 8.51%。V4 与 V3 版气溶胶的日间 1064 nm 衰减后向散射的相对偏差(A_RD1064D)如图 3(e)所示,统计结果表明,众数约为 7.50%,比例约为 7.35%;A_RD1064D 分布的半峰全宽范围约为 1.00%~13.00%,所占比例约 70.16%;A_RD1064D 大于 8.00%(质量声明给出的 1064 nm 日间数据校准系数相对偏差的中值)的数据约占 42.95%。图 3(f)给出了 V4 与 V3 版气溶胶的日间总衰减颜色比相对偏差(A_RDCRD)的概率分布,A_RDCRD 的众数约为 5.50%,所占比例约为 6.61%,A_RDCRD 分布的半峰全宽范围约为 -1.00%~12.00%,所占比例约为 69.13%。气溶胶的 V4 版与 V3 版日间 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射及总衰减颜色比的相对偏差均值分别为 1.14%、6.94%和 5.62%。

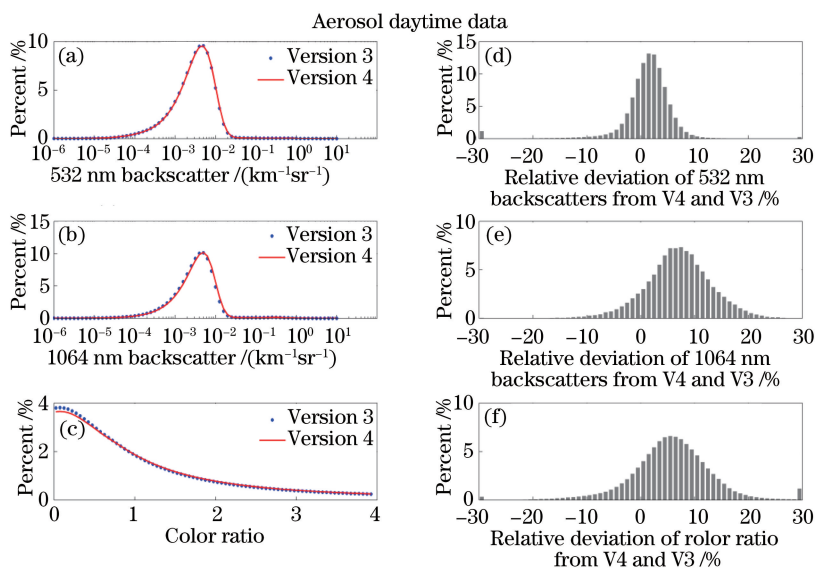


图 3 2011 年 1、4、7、10 月气溶胶的日间 V4、V3 数据的概率分布

Fig. 3 Probability distribution of aerosol daytime data from V4 and V3 products in January, April, July and October 2011

图 4 显示了 2011 年 1、4、7、10 月气溶胶的夜间 V4、V3 数据及相对偏差的概率分布。气溶胶的夜间衰减后向散射概率及总衰减颜色比分布曲线如图 4(a)~(c) 所示,气溶胶的夜间 532 nm 总衰减后向散射概率分布曲线[图 4(a)]与日间曲线有显著不同,可以看到两处明显的峰值;V4 与 V3 数据分布的差异情况与日间数据相似。气溶胶的 V4 与 V3 版夜间 532 nm 总衰减后向散射相对偏差(A_RD532N)的概率分布的统计结果如图 4(d)所示,A_RD532N 众数约为 3.50%,比例约占 12.99%;A_RD532N 分布的半峰全宽范围约为 0~7.00%,所占比例约 74.41%;A_RD532N 大于 3.00%(质量声明给出的 532 nm 夜间数据校准系数相对偏差的中值)的数据约占 55.87%。V4 与 V3 版气溶胶的夜间 1064 nm 衰减后向散射的相对偏差(A_RD1064N)如图 4(e)所示,统计表明,众数约为 9.50%,比例约为 6.47%;A_RD1064N 分布的半峰全宽范围约为 4.00%~18.00%,所占比例约 71.48%;A_RD1064N 大于 8.00%(质量声明给出的 1064 nm 夜间数据校准系数相对偏差的中值)的数据约占 67.68%。图 4(f)给出了 V4 与 V3 版气溶胶的夜间总衰减颜色比相对偏差(A_RDCRN)的概率分布,A_RDCRN 的众数约为 6.50%,所占比例约为 6.94%,A_RDCRN 分布的半峰全宽范围约为 1.00%~14.00%,所占比例约为 72.02%。气溶胶的 V4 版与 V3 版日间 532 nm 总衰减后向散射、1064 nm 衰减后向散射及总衰减颜色比的相对偏差均值分别为 3.33%、10.92%和 7.64%。

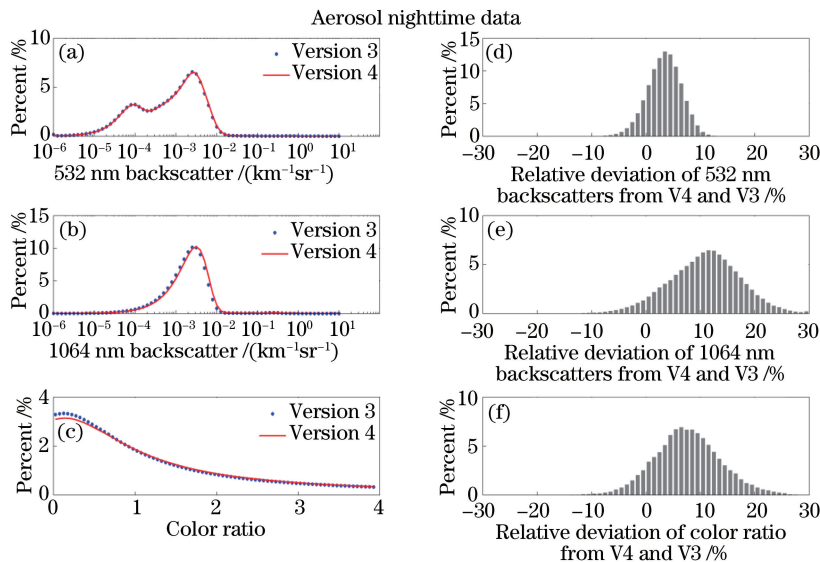


图4 2011年1、4、7、10月气溶胶的夜间V4、V3数据的概率分布

Fig. 4 Probability distribution of aerosol nighttime data from V4 and V3 products in January, April, July and October 2011

由图3和图4可以看出,气溶胶散射数据的相对偏差概率分布比云集中,并且V4校准过程的变化同样引起了气溶胶衰减后向散射数据的正变化;气溶胶日间数据的相对偏差略小于质量声明给出的偏差值,而夜间数据的相对偏差则高于质量声明给出的偏差值。

表5显示了2011年1、4、7、10月4个不同月份气溶胶的V4与V3版532 nm总衰减后向散射、1064 nm衰减后向散射以及总衰减颜色比相对偏差的均值。

表5 气溶胶的不同月份的V4与V3后向散射数据相对偏差的均值(%)

Table 5 Mean relative deviations of backscatter data of aerosols in different months (%)

	Daytime			Nighttime		
	BS532	BS1064	CR	BS532	BS1064	CR
Jan	0.70	7.66	6.78	2.84	10.98	8.36
Apr	2.05	7.55	5.41	3.98	12.08	8.43
Jul	1.24	4.86	3.44	3.02	10.23	7.45
Oct	0.49	7.75	7.04	3.41	9.46	6.27

由表5可知,气溶胶V4与V3版衰减后向散射数据的相对偏差没有明显的季节变化特点,日间1064 nm衰减后向散射在7月份的相对偏差与其他月份不同,继而引起总衰减颜色比的相对偏差与其他月份的显著差异。数据校准过程的变化和空间分布的差异使得云和气溶胶散射数据相对偏差在不同月份的统计结果也有明显差异。

4 结 论

利用CALIOP V3/V4版2011年1、4、7、10月的相关数据统计20.2 km海拔高度内云和气溶胶样本的532 nm总衰减后向散射、1064 nm衰减后向散射、总衰减颜色比及该三项参数不同版本的相对偏差,分别对日间和夜间概率特征分布曲线进行了对比,得出以下结论:

1) V4校准过程的完善导致衰减后向散射校准系数、衰减散射比及1064 nm衰减后向散射校准系数等的变化,结果造成V4版云及气溶胶的衰减后向散射和总衰减颜色比整体增大。

2) 云V4版与V3版日间532 nm总衰减后向散射的相对偏差均值略大于夜间数据的相对偏差均值,而日间1064 nm总衰减后向散射的相对偏差均值远小于夜间数据的相对偏差均值,与V4版质量声明中给出的日间与夜间1064 nm校准系数相对偏差中值相同、相对偏差变化范围相近的描述不同。

3) 气溶胶 V4 版与 V3 版夜间 532 nm 总衰减后向散射及 1064 nm 衰减后向散射的相对偏差均值明显高于日间数据的相对偏差均值,与 V4 版质量声明中给出的日间 532 nm 校准系数相对偏差中值高于夜间数据的偏差中值、日间与夜间 1064 nm 校准系数相对偏差中值相同的描述不同。

4) V4 版数据校准过程的优化造成云的日、夜间总衰减颜色比分别产生了 1.18% 和 5.33% 的增量,气溶胶的日、夜间总衰减颜色比分别产生了 5.62% 和 7.64% 的增量。

另外,云和气溶胶等不同目标物的 V4 版与 V3 版的衰减后向散射数据的相对变化程度不同。除 2011 年 7 月云的夜间和气溶胶的日间 1064 nm 衰减后向散射数据的相对偏差外,其他数据的相对偏差表现出了一定的时间变化特征。7 月份数据的异常变化可能是校准软件代码错误修正等引起的,更深的原因将在后续研究中进行探讨。

参 考 文 献

- 1 Wang Chunhui, Li Xu, Peng Huan. Research on simulation and analysis of spaceborne full waveform laser altimeter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 102801.
王春辉, 李旭, 彭欢. 星载全波形激光测高仿真分析技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 102801.
- 2 Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): L19803.
- 3 Winker D M, Pelon J R, McCormick M P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds[C]. *Proc SPIE*, 2003, 4893: 1-11.
- 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 Tackett J L. Impacts of change in GEOS-5 version on CALIOP products[EB/OL]. (2013-04-22) [2015-12-01] http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/data_summaries/pdfs/Impacts_of_Change_in_GEOS-5_Version_on_CALIOP_Products_rev01.pdf.
- 6 Atmospheric Science Data Center. CALIPSO quality statement lidar level 1B data product version release: 4.00[EB/OL]. (2013-04-22) [2015-12-01] https://eosweb.larc.nasa.gov/sites/default/files/project/calipso/quality_summaries/CAL_LID_L1-Standard-V4-00.pdf.
- 7 Vaughan M, Garnier A, Liu Z, *et al.*. Chaos, consternation and CALIPSO calibration: New strategies for calibrating the CALIOP 1064 nm channel[C]. *Proceedings of the 26th International Laser Radar Conference*, 2012: 39-55.
- 8 Chen Z, Torres O, McCormick M P, *et al.*. Comparative study of aerosol and cloud detected by CALIPSO and OMI [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 51: 187-195.
- 9 Wu Dong, Zhang Xiaoxue, Yan Fengqi. Sea surface wind speed detection by using the data of CALIPSO lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828002.
吴东, 张小雪, 阎逢旗. 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): 0828002.
- 10 Wu Dong, Wang Jianhua, Yan Fengqi. Estimation of air-sea gas transfer velocity using the CALIPSO lidar measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0928001.
吴东, 王建华, 阎逢旗. 激光雷达数据应用于海气界面气体传输速率的估算[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0928001.
- 11 Liu Z, Fairlie T D, Uno I, *et al.*. Transpacific transport and evolution of the optical properties of Asian dust[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 116: 24-33.
- 12 Wu D, Tang J, Liu Z, *et al.*. Simulation of coherent Doppler wind lidar measurement from space based on CALIPSO lidar global aerosol observations[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 122: 79-86.
- 13 Wu D, Lu B, Zhang T, *et al.*. A method of detecting sea fogs using CALIOP data and its application to improve MODIS-based sea fog detection[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 153: 88-94.
- 14 Liu Cong, Su Lin, Zhang Chaoyang, *et al.*. Comparative analysis of vertical distribution of aerosols by using spaceborne lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0413001.
刘聪, 苏林, 张朝阳, 等. 星载激光雷达对气溶胶垂直分布的对比分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0413001.
- 15 Wu D, Hu Y, McCormick M P, *et al.*. Global cloud-layer distribution statistics from 1 year CALIPSO lidar observations [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(5): 1269-1288.

- 16 Sun Yuchen. Research of global aerosol optical properties based on spaceborne lidar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
孙雨辰. 基于星载激光雷达的全球气溶胶光学特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- 17 Hunt W H, Winker D M, Vaughan M A, *et al.*. CALIPSO lidar description and performance assessment[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(7): 1214-1228.
- 18 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.