

# 星载激光雷达探测云与气溶胶的仿真模拟

廖淑君<sup>1,2</sup>, 郜海阳<sup>1,2\*</sup>, 寇蕾蕾<sup>1,2</sup>, 康佳慧<sup>2</sup>, 卜令兵<sup>1,2</sup>, 王震<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044;

<sup>2</sup>南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044

**摘要** 在星载激光雷达的设计、研制和数据反演过程中,正演模型起到至关重要的作用。建立了一套星载激光雷达探测云与气溶胶的正演模型,整个模型具有模拟冰云场景、气溶胶场景等复杂多场景的能力,由8个子模块构成。针对532 nm通道的模拟结果表明:在深对流场景中的云层深厚,信号衰减严重,仅能获取云顶分布信息;而在冰云和气溶胶的场景中,需要考虑云层的微物理特性对气溶胶有效探测的影响。望远镜直径、卫星轨道高度和激光器单脉冲能量对信噪比的影响结果可以为星载激光雷达的参数设计提供支持。与CALIOP/CALIPSO实际探测结果的对比表明,正演模型计算的衰减后向散射系数与实际观测结果在结构分布上基本一致,但由于CALIPSO反演算法的不确定性及与正演模型参数设置上的差异性,在多廓线平均值的对比中,在不同高度上存在一定的差异。

**关键词** 星载激光雷达; 正演模型; 主动遥感; 云与气溶胶

中图分类号 P412.27

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1028001

## Simulation of Cloud and Aerosol Detection Based on Spaceborne Lidar

Liao Shujun<sup>1,2</sup>, Gao Haiyang<sup>1,2\*</sup>, Kou Leilei<sup>1,2</sup>, Kang Jiahui<sup>2</sup>, Bu Lingbing<sup>1,2</sup>, Wang Zhen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

**Abstract** In the design, development, and data inversion of spaceborne lidar, the forward model is critical. This study establishes a forward model for observing clouds and aerosols using spaceborne lidar. It can simulate ice clouds and aerosols, as well as other complex scenes. The model as a whole is made up of 8 sub-modules. The simulation results in the 532-nm channel show that in the deep convection scenarios, the clouds are deep and the signal attenuation is serious, thus, only the distribution of the cloud top can be distinguished. The influence of cloud microphysical characteristics on the effective detection of aerosols must be considered in the ice cloud and aerosol scenes. In terms of parameter sensitivity analysis, the relationship between telescope diameter, satellite orbit altitude, laser single pulse energy, and the signal-to-noise ratio can help with instrument design. The comparison of the attenuation backscattering coefficient calculated by the forward model with the actual detection results of CALIOP/CALIPSO shows a good consistency in the structure of spatial distribution. However, owing to the uncertainty in the CALIPSO inversion algorithm and the difference in parameter settings between the inversion and the forward model, some minor differences at different altitudes when comparing the average of all profiles remain.

**Key words** spaceborne lidar; forward model; active remote sensing; cloud and aerosol

收稿日期: 2021-09-07; 修回日期: 2021-10-24; 录用日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(41304124, 41975027)、国家重点研发计划(2017YFC1501401)

通信作者: \*gaohy@nuist.edu.cn

## 1 引言

大气气溶胶是一种复杂的多相体系,它可以通过改变地球上的辐射平衡来影响地球的气候,既可以通过对短波和长波辐射的散射或吸收,直接影响地气系统的辐射平衡,也可以通过改变大气中云的微物理过程,从而改变云的辐射特性、云量和云的寿命,进而影响地气系统的辐射平衡和气候变化<sup>[1]</sup>。而云对气候系统的影响更加复杂,一方面云可以有效地反射太阳辐射,减少地球表面接收到的太阳辐射量,起到对地表降温的作用;同时云也会吸收短波辐射并产生长波辐射,又产生升温作用<sup>[2]</sup>。因此,云和气溶胶对气候系统的影响具有很大的不确定性,降低这些不确定性在气候变化基础科学研究中具有重要意义。

利用星载激光雷达实施主动遥感探测是对云和气溶胶进行宏观研究的重要手段之一。它具有探测参数丰富、探测精度和时空分辨率高的优点,因此,在探测云层的三维结构上有不可替代的独特优势。其中最典型代表是搭载于 Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) 卫星上的云-气溶胶偏振激光雷达 Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP)<sup>[3]</sup>,它能够实时、连续、快速、长期和精确地探测全球范围内较薄云层(尤其卷云)和气溶胶层的参数和信息<sup>[4]</sup>。CALIPSO 卫星从 2006 年发射升空至今已正常连续运行十余年,获取了大量云垂直廓线观测数据,这些数据被广泛应用到云物理、天气、气候、环境等多个领域,在推动科学研究发展的同时,也产生了巨大的社会和经济效益<sup>[5-7]</sup>。

目前,多个国家都在研制下一代的星载激光雷达,而在星载仪器的设计论证阶段,正演模型起到至关重要的作用。正演模型是指在仪器设计、探测模式论证过程中,通过构造数学模型计算得到其理论值,用仿真模拟的方式验证设计的正确性和可行性,同时为设计方案提供优化手段的一种有效方法;在后期的反演中,正演模拟结果为其提供初始值,并通过不断修正参数来使模拟结果与实际资料尽可能地接近,从而实现多参数的精确反演。Filipitsch 等<sup>[8]</sup>使用基于 Monte Carlo 的 ARLEM 正演模型模拟了星载高光谱分辨率激光雷达(HSRL)测量。Hogan<sup>[9]</sup>发现在用雷达和激光雷达对冰云进行联合反演中,激光雷达的多次散射效应是不可忽略的,为此引入了一种快速计算的激光雷达正演模

型,并分析了多次散射对小角度前向散射的影响。Delanoë 等<sup>[10]</sup>还提出了一种包括雷达的非瑞利散射和激光雷达的分子和多次散射等效应的正演模型。此外, Ehret 等<sup>[11]</sup>分析了 integrated path differential absorption(IPDA)激光雷达探测 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 时的系统误差和随机误差。Kawa 等<sup>[12]</sup>进行了一项模拟研究,以评估 Goddard 航天飞行中心(Goddard Space Flight Center)设计的 IPDA 激光雷达的性能,并验证了现有技术单次测量中的精度可以达到 0.5%。

我国也在近年来启动了自己的星载激光雷达工程,涵盖了多波段测云、高光谱探测气溶胶、星载多普勒激光雷达测风和差分吸收探测二氧化碳等先进技术<sup>[13-16]</sup>,同时,开展了正演模型研究,将给系统的设计提供重要的理论支撑。因此,本文将围绕星载激光雷达探测云和气溶胶的模式,开展正演模型的研究,并对结果进行详细分析,为其提供可行性论证。

## 2 正演模型

### 2.1 正演模型的原理和构架

基于 PYTHON 语言(3.8 版本)构建整个正演模型,该模型由 8 个子模块构成:云与气溶胶场景模拟、水凝物与气溶胶微物理参数、光学特性(吸收与散射)计算、大气辐射传输计算、仪器与轨道平台参数、雷达回波模拟、敏感性分析、结果对比验证分析。各个子模块之间的逻辑结构如图 1 所示。从 CALIPSO 和 CloudSat 历史数据中找出典型云和气溶胶场景数据,根据其各项背景条件,如发生区域、时间等信息,找到与之对应的美国国家环境预报中心(NECP)或欧洲中期天气预报中心(ECMWF)再分析数据作为背景大气数据源,将再分析数据和气溶胶排放源数据输入 Weather Research and Forecast (WRF)和 WRF-CHEM 中进行水凝物和气溶胶的三维场景模拟;得到的水凝物分布通过经验公式和理论推导,得到云内和气溶胶层内的各类水凝物的滴谱信息;再利用光学特性计算水凝物和气溶胶的光学特性,获得大气分子、云和气溶胶的后向散射特性,并基于大气辐射传输过程,计算衰减后向散射系数;将激光雷达各项仪器参数、卫星平台的观测模式和轨道高度等参数耦合至模型中;通过激光雷达方程模拟真实探测的回波信号,并给出信噪比分析。最终获得的回波结果再回到第一步中,与最初选择的 CALIPSO 历史数据进行对比验证,同时,

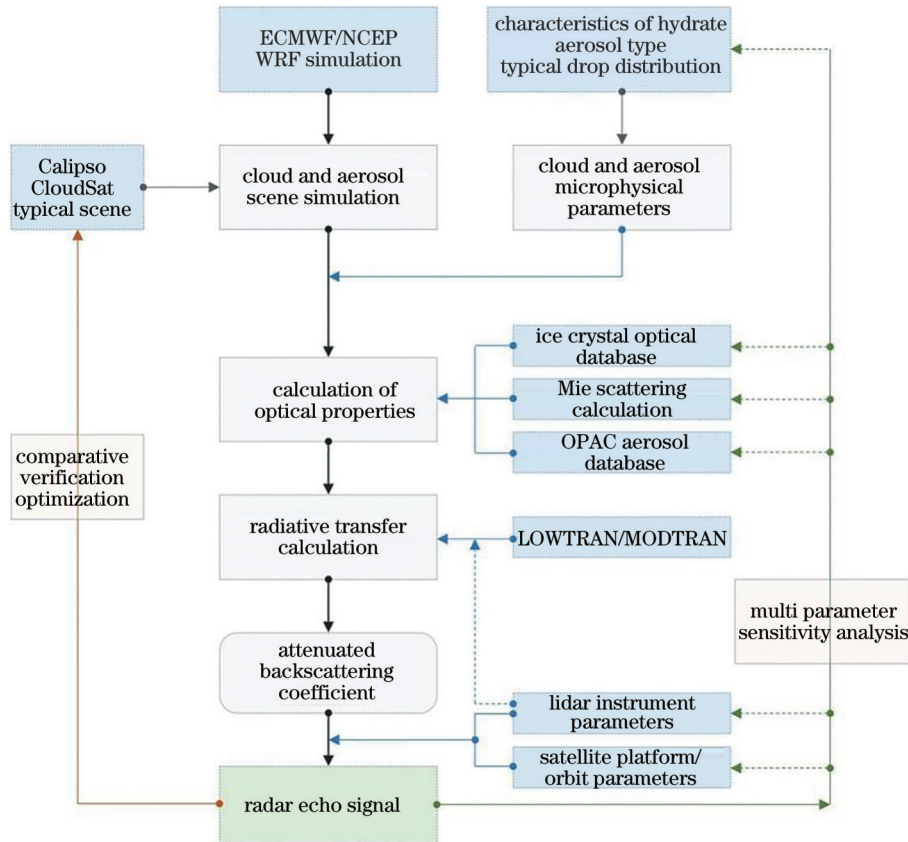


图 1 正演模型的子模块构成及逻辑构架

Fig. 1 Sub-module structure and logic framework of the forward model

通过对多项输入参数的敏感性分析,计算正演模型的探测效率和误差水平。

## 2.2 云与气溶胶场景

场景的选取和分类是正演模型的基础,根据整体需求,设置了15个典型场景,包括陆地和海洋的晴空、积云、深对流云、卷云、层状云、气溶胶、气溶胶与卷云、台风场景等。每个场景中的背景场数据使用NCEP提供的FNL再分析数据,作为WRF和WRF-CHEM的输入初始场,NCEP采用了当今最先进的全球资料同化系统和完善的数据库。水凝物和气溶胶的分布需要通过WRF和WRF-CHEM的模拟计算获得,本文所采用的WRF是4.1.2版本,是目前参数化方案较多、代表性较好的一个稳定版本<sup>[17]</sup>。在输出场的参量中,可被直接使用的

凝物和气溶胶参量如表1所示,气温(T)、地理高度(GMP)等需要借助扰动位温(T0)、基态位势(PHB)、地形高度(HGT)、扰动位势(PH)、基态气压(PB)等参量计算获取。

在典型场景中,当与CALIPSO数据进行对比时,需要对WRF数据与其进行时空匹配。首先确定CALIPSO卫星的过境时间,设置WRF模拟时间与CALIPSO卫星过境时间基本相同。CALIPSO星下点轨迹呈斜线状分布,WRF模拟结果为区域数据,如图2所示,线条为2010年5月6日CALIPSO一轨道的数据示例,WRF输出结果为块状区域。空间匹配后对WRF模拟结果的数据进行插值和平滑处理,同时参照CALIPSO数据的垂直高度,将WRF模拟结果插值为垂直分辨率为30 m的数据,

表 1 WRF 和 WRF-CHEM 中水凝物和气溶胶的参量

Table 1 Parameters of hydrometeor and aerosol in WRF and WRF-CHEM

Type	Parameter	Symbol	Unit
Hydrometeor	Mixing ratio of cloud/ice/rain/snow/graupeil	QCLOUD/QICE/QRAIN/ QSNOW/GRAUPEL	kg·kg <sup>-1</sup>
Aerosol	Dry mass of PM <sub>10</sub>	PM <sub>10</sub>	μg·m <sup>-3</sup>
	Dry mass of PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>2.5</sub>	

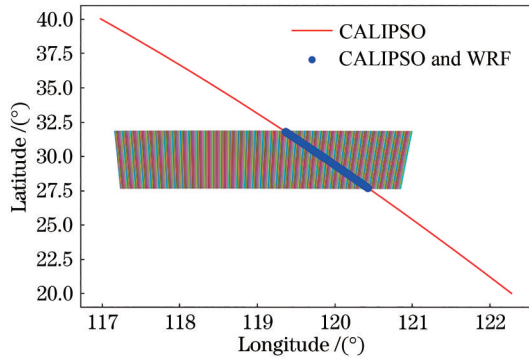


图 2 CALIPSO 与 WRF 数据的时空匹配

Fig. 2 Spatiotemporal matching between CALIPSO and WRF data

并对其平滑处理。

### 2.3 云与气溶胶微物理参数

在微物理参数模块中,对于云而言,需要计算含水量(含冰量),并给出各成分的滴谱分布。而对于冰晶而言,还要设定冰晶的形状类型。以冰云为例,利用 WRF 输出水凝物混合比,计算出其含水量:

$$W = \frac{P_B}{R_{\text{gas}} T} Q_{\text{ice}}, \quad (1)$$

式中: $P_B$ 为基态气压; $R_{\text{gas}}$ 为理想气体状态常数; $T$ 为气温; $Q_{\text{ice}}$ 为冰的混合比。

对于冰云,使用较多的是 Gamma particle size distribution(PSD)<sup>[18-19]</sup>作为滴谱分布,表达式为

$$\begin{cases} N(D) dD = N_w \frac{6}{3.64^4} \frac{(3.67 + \mu)^{\mu+4}}{\Gamma(\mu + 4)} \left(\frac{D}{D_{\text{eff}}}\right)^{\mu} \exp\left[-(3.67 + \mu) \frac{D}{D_{\text{eff}}}\right] dD \\ N_w = \frac{W}{\pi \rho} \left(\frac{3.67}{D_0}\right)^4 \\ D_{\text{eff}} = 3.67 \left(\frac{W}{\pi N_w \rho}\right)^{1/4} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:取冰晶粒子体积中值直径 $D_0$ 为 $10^{-4}$  m<sup>[18]</sup>;根据 $D_0$ 、冰晶粒子的含水量 $W$ 和冰粒子的密度 $\rho$ ,计算出归一化截距参数 $N_w$ ,从而计算出所用到的冰粒子等效直径 $D_{\text{eff}}$ 。在后续模拟中,通过输入不同的冰晶粒子直径 $D$ 和谱型常数 $\mu$ (通常设 $\mu=1$ ),得到所需的云冰粒子滴谱。另外,对于冰粒子,模型中还设置了另一个可供选择的幂指数滴谱分布<sup>[19]</sup>。

对于其他四种水凝物,每种都提供了2个经典的滴谱分布供选择,其中包含E指数分布、Gamma分布、修正Gamma分布、对数正态分布等。

气溶胶的种类较多,按照光学特性的差异,一般分为水溶性粒子、煤烟型粒子、海盐粒子等9种类型,尺度分布<sup>[20]</sup>遵循

$$\frac{dN_i(r)}{dr} = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi} r \log \sigma_i \ln 10} \times \exp\left[\frac{1}{2} \left(\frac{\log r - \log r_{\text{mod},i}}{\log \sigma_i}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中: $N_i$ 为基本粒子 $i$ 的粒子总数( $\text{cm}^{-3}$ ); $r_{\text{mod},i}$ 为模半径; $\sigma_i$ 为分布宽度。其中 $N_i$ 与气溶胶浓度有关,关系到气溶胶的光学厚度;而 $r_{\text{mod},i}$ 和 $\sigma_i$ 分别为反映粒子群的平均半径和方差,直接关系到气溶胶的吸收特征和散射特征。

实际上,在研究气溶胶分布时,通常还需要对其存在的场景进行区分,不同的场景下,各种类型气溶胶分布的比例有很大差异<sup>[21]</sup>。例如,对于大陆污染(continental polluted)型而言,煤烟型粒子和水溶性粒子分别占据了68.6%和31.3%,而其他类型气溶胶只占据了不到0.1%,这对于仿真模拟来说至关重要,因此在正演模型中,提供7种不同场景下的气溶胶类型。在后续的研究工作中,将耦合更全面和丰富的气溶胶光学特性数据库,重点考量气溶胶不同参数(如粒子形状等)对探测过程中辐射传输的影响,进一步优化正演模型。

### 2.4 散射特性和辐射传输

场景模拟和微物理参数计算后,需要获取大气分子、不同类型水凝物和气溶胶的光学特性,即粒子的散射和吸收能力。以冰晶和云滴的散射特性为例,使用基于米散射理论和先进几何光学计算的公开数据库<sup>[22]</sup>,其中冰晶包含7种形状、散射相函数、消光系数(extinction coefficient, Ext)、单次散射反照率(SSA)等详细参数。如图3(a)、(c)所示,入射光波长为532 nm时,云滴的消光系数远大于柱状(solid column)冰晶粒子的消光系数,但它们均随粒子有效半径的增大而减小,同时云滴单次散射反照率随粒子有效半径的变化不明显。图3(b)、(d)给

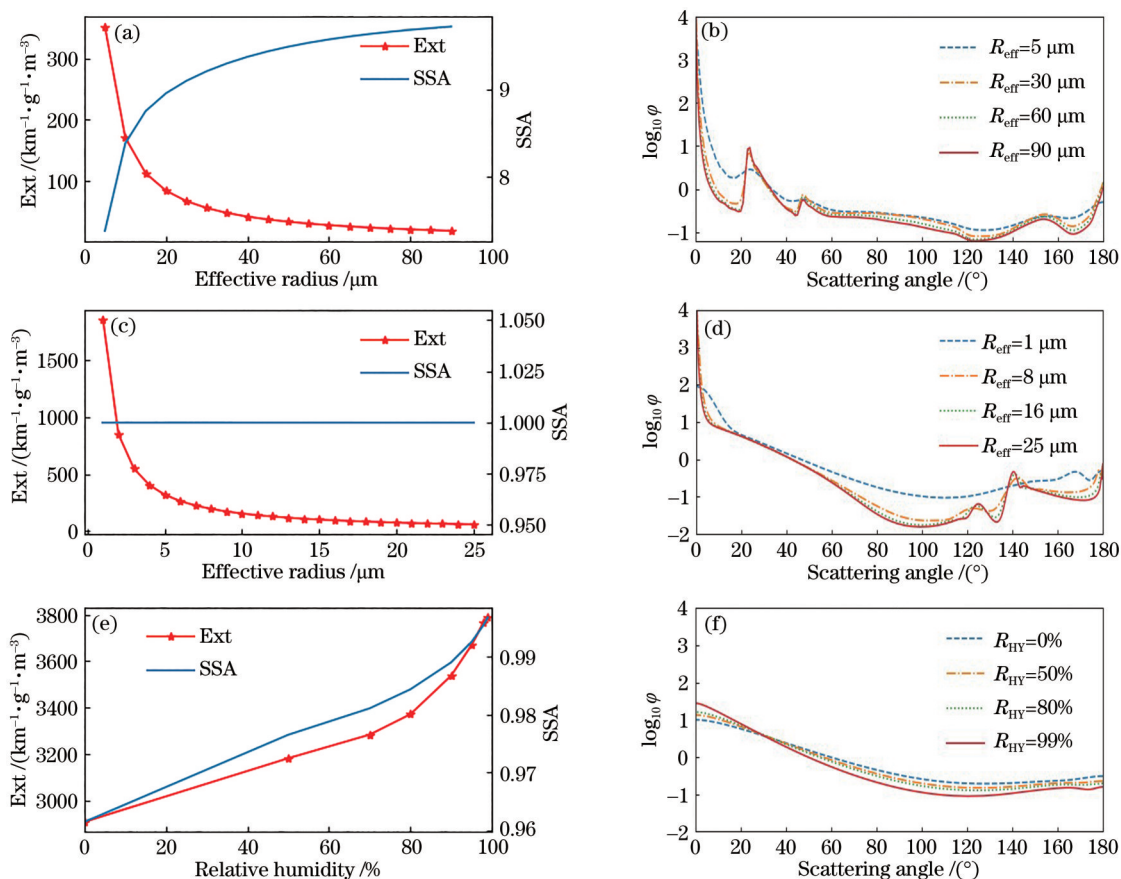


图3 三种粒子的光学特性和散射相函数。(a)冰晶粒子的光学特性;(b)冰晶粒子的散射相函数;(c)液水粒子的光学特性;(d)液水粒子的散射相函数;(e)气溶胶的光学特性;(f)气溶胶的散射相函数

Fig. 3 Optical properties and scattering phase functions of three types of particles. (a) Optical property of ice crystal; (b) scattering phase function of ice crystal; (c) optical property of liquid water particle; (d) scattering phase function of liquid water particle; (e) optical property of aerosol; (f) scattering phase function of aerosol

出了当入射光波长为 532 nm 时,不同有效半径 ( $R_{\text{eff}}$ )下柱状冰晶和云滴的散射相函数( $\varphi$ ),可以看出  $180^\circ$ 附近的后向散射在有效半径不同时均有一定的差异性。已知粒子散射特性后,可以计算出不同有效半径下冰晶粒子单位立体角的后向散射系数,并对其与冰晶粒子的滴谱分布[式(2)]和水凝物含量廓线进行耦合,从而获得不同高度上的散射系数和消光系数。

使用 Optical Properties of Aerosols and Clouds (OPAC)数据库<sup>[23]</sup>描述气溶胶的光学特性,该数据库给出 9 种不同类型气溶胶的消光系数、单次散射反照率、散射相函数等详细参数。与云粒子有所不同,气溶胶粒子的光学特征主要随相对湿度( $R_{\text{HY}}$ )的变化有较大差异。以水溶性气溶胶粒子(WASO)为例,如图 3(e)所示,当入射波长为 532 nm 时,气溶胶粒子的消光系数和单次散射反照率均随相对湿度的增大而增大;从图 3(f)可以看出, $180^\circ$ 附近的后向散射在

相对湿度不同时存在一定的差异性。已知粒子散射特性后,可以计算出不同相对湿度下气溶胶单位立体角的后向散射系数,对其与 WRF-CHEM 结果中的  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 和相对湿度廓线进行耦合,可以获得气溶胶散射系数和消光系数的垂直分布。

求得大气分子散射特性的公式<sup>[24]</sup>为

$$\left\{ \begin{array}{l} N_m = 3000000 \frac{P}{KT} \\ m = \left( 6432.8 + \frac{2949810}{146 - \lambda^{-2}} + \frac{25540}{41 - \lambda^{-2}} \right) \div 10^8 + 1 \\ Q_{\text{phase}} = \frac{8}{3.14} \times \frac{8\pi^4 r^6}{\lambda^4} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) \\ Q_s = \frac{128\pi^5 r^6}{3\lambda^4} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \end{array} \right. , \quad (4)$$

式中: $N_m$ 为大气分子数密度; $P$ 为大气压强; $K$ 为玻尔兹曼常数; $m$ 为大气分子的复折射指数; $\lambda$ 为波

长; $Q_{\text{phase}}$ 和 $Q_s$ 分别为大气分子的散射相函数和散射截面; $r$ 为分子半径。大气分子的散射系数为大气分子的散射截面、大气分子数密度和大气分子后向散射相函数的乘积,由于大气分子在 532 nm 波长下的吸收很弱,其消光系数可用散射系数替代。

在辐射传输的计算中,除去云、气溶胶、分子的散射外,大气中其他成分如水汽、臭氧等的散射吸收特性均来自于 LOWTRAN 软件的计算<sup>[25]</sup>。在获得所有成分的散射、吸收特性之后,可以通过正演方程进行逐层积分,求得激光信号在整层大气中的衰减和散射情况。实际上,在星载激光雷达的探测过程中,太阳背景辐射会随有效信号进入到星载激光雷达的光学系统中,与云微物理特性廓线、气溶胶光学特性廓线、大气状态廓线、地表反射率、卫星和太阳相对几何位置有关联性,从而产生两个方面的影响,一是对最小探测能力的影响,二是对探测不确定度的影响。已经在正演模型中为背景辐射影响预留了子模块接口,但本文主要聚焦整个探测模式的模拟,没有过多涉及对背景辐射影响的评估,在后续的研究中,要进一步完善和优化正演模型。

### 2.5 仪器与卫星平台参数

仪器和卫星平台参数是影响正演模型结果的重要因素。以 CALIOP 为例,通常一台星载激光雷达的主体部分由发射系统、接收系统和采集系统构成。在实际的模拟中,需要考虑每个仪器和平台参数可能产生随机变化带来的影响。如对于 532 nm 激光器,其单脉冲功率和中心波长的稳定性一般在  $\pm 0.1$  mJ 和  $\pm 0.1$  nm,对于望远镜的视场角,会在卫星平台姿态的稳定性影响下有  $\pm 0.7\%$  左右的变化。在模型中,均采用产生高斯分布随机数的方

式将每一项随机变化加入至模型中,但实际上这一类随机变化对最后正演模拟信号的影响并不大,而最大影响来自探测器的噪声。

探测器噪声一般来自暗电流、热噪声和散粒噪声。其中暗电流和热噪声与探测器本身的性能有关,而散粒噪声是指仪器单位时间内接收到的不均匀光子数,通常服从泊松分布。实际上,光电倍增管(PMT)光电阴极产生的光电子也是不均匀的,通常认为也服从泊松分布。因此,将散粒噪声的均值用  $N_s = S \cdot P^{1/2}$  来表示, $P$ 为回波功率平均值, $S$ 为一个偏离泊松分布的附加系数,通常选择 0.3~0.7<sup>[26]</sup>。一些主要的参数如表 2 所示。

表 2 主要的仪器参数典型值  
Table 2 Some important instrument parameters

Symbol	Parameter	Value (example)
$Z_{\text{sat}}$ /km	Satellite orbit altitude	705
$D_{\text{tel}}$ /m	Telescope diameter	1.0
$T_{\text{sys}}$	Optical system transmittance	0.14
$\eta$	Quantum efficiency of PMT photocathode	0.25@532 nm
$G$	PMT photoelectron gain coefficient	$5 \times 10^6$
$C_{\text{adu}}$	Digital to analog conversion coefficient	1/1000
$E$ /mJ	Laser single pulse energy	150

### 2.6 正演方程

将所有子模块计算的参数代入正演方程<sup>[27]</sup>中,即可求得激光雷达探测器输出的信号值。正演方程为

$$P = E \left( \frac{d}{2} \right)^2 \pi (\beta + \beta_m + \beta_{\text{ae}}) \exp \left[ -2 \int_0^Z (\sigma + \sigma_m + \sigma_{\text{ae}}) dZ \right] \left( \frac{1}{Z_{\text{sat}} - Z} \right)^2 \eta G C_{\text{adu}} + N, \quad (5)$$

式中: $\beta$ 、 $\beta_m$ 和 $\beta_{\text{ae}}$ 分别为粒子、大气分子和气溶胶粒子的后向散射系数; $\sigma$ 、 $\sigma_m$ 和 $\sigma_{\text{ae}}$ 分别为粒子、大气分子和气溶胶粒子的消光系数; $Z$ 为激光雷达的探测高度,在每个探测高度,可以计算出对应的激光雷达探测器输出信号值; $N$ 为所有噪声;其他参数如表 2 所示。

## 3 典型场景的仿真模拟分析

### 3.1 深对流场景

首先给出一次 WRF 模拟的深对流场景个例。

所选数据为 2016 年 6 月 23 日 6 时(世界时,下同)的 d03 数据,在黄淮下游大部分地区出现强对流天气,其中江苏省盐城市发生了龙卷、大风、冰雹等极端天气,同时黄淮下游大部分地区出现了强降水。采用的模式是 WRF 的 4.1.2 版本,模拟区域覆盖了  $116^\circ \text{E} \sim 121^\circ \text{E}$  和  $32^\circ \text{N} \sim 36^\circ \text{N}$ 。采用三重嵌套区域,水平分辨率分别为 22.5, 7.5, 1.5 km,模式垂直分层数为 40,模式顶取为 50 hPa,如图 4(a)所示。微物理过程选取的是 NSSL 双参方案,WRF 模式的初始场和边

界条件都由 NCEP 再分析资料提供,再分析资料的时间间隔为 6 h,积分步长为 90 s,最外层嵌套 d01,每隔 360 min 输出一次数据,中间层嵌套 d02,每隔 60 min 输出一次数据,内层嵌套 d03,每隔 10 min 输出一次数据,积分时间是 2016 年 6 月 23 日 00:00 至 18:00。

图 4(b) 为 WRF 直接输出在不同海拔高度上的云冰混合比。选择经度 119.15° E 处的一个二维廓面,通过式 (1) 可将混合比转换成冰晶含水量 (IWC),如图 5(a) 所示。云顶高度位于 13 km 左右,冰晶含水量在最大区域 33.5° N~34.1° N 的均值达到约 0.23 g/m<sup>3</sup>,配合其形态,可以看出是典型

的深对流云。通过插值将廓面转换为 100 m(H)×33 m(V) 的高分辨率,用于模拟计算。图 5(c) 的结果表明信号衰减严重,在大量冰晶强烈的吸收和散射作用下,最小的穿透深度出现在 34.65° N,仅有 950 m;同时如图 5(d) 所示,其对应的衰减后向散射系数 (ABC) 也在 14.67 km 的高度上出现最大值,约为 0.0201 km<sup>-1</sup>/sr。图 5(e) 给出了探测信号模拟结果,其分布与衰减后向散射系数基本相同。因此,将图 5(d)、(e) 与图 5(a)、(c) 进行对比,可以看出,在深对流云等类似的场景中,当云量较大、云层深厚时,信号衰减很严重,星载激光雷达仅能准确获

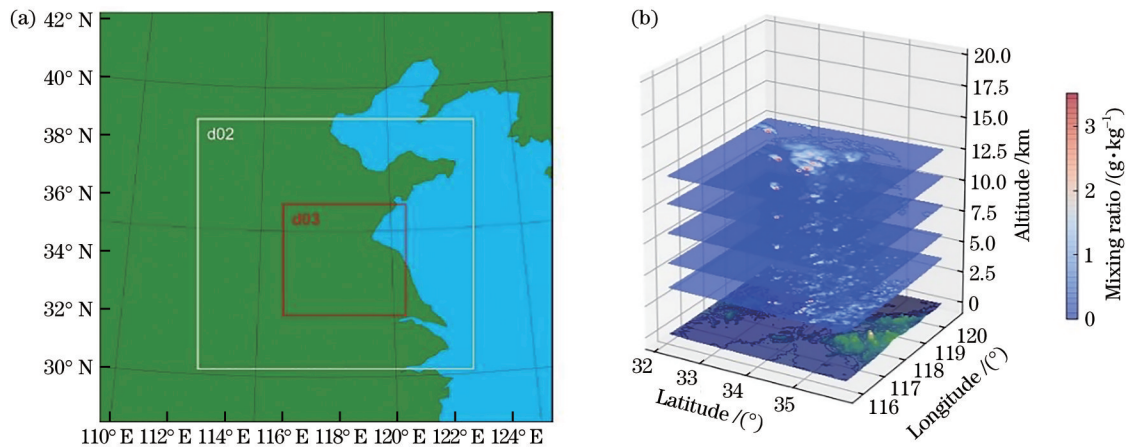


图 4 深对流场景模拟。(a) WRF 模拟区域;(b) 云水和冰的混合比层状分布

Fig. 4 Deep convection scene simulation. (a) WRF simulation area; (b) layered distribution of ice and cloud water mixing ratio

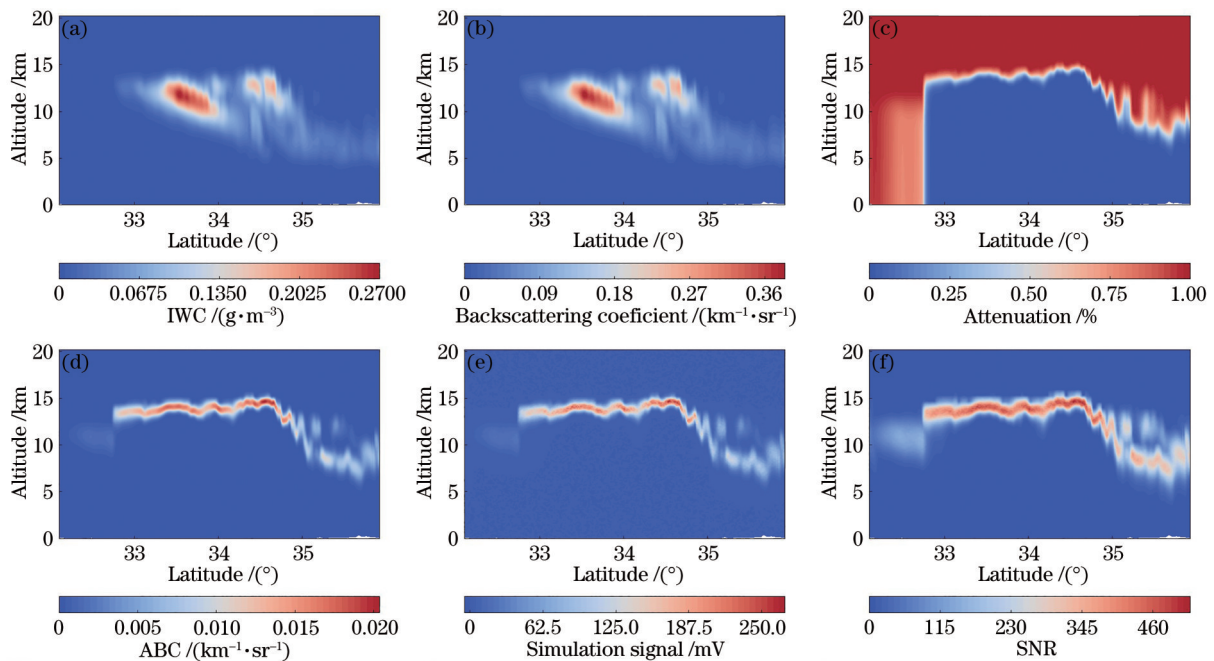


图 5 深对流场景模拟。(a) 冰晶含水量;(b) 后向散射系数;(c) 衰减系数;(d) 衰减的后向散射系数;(e) 模拟信号;(f) 信噪比  
Fig. 5 Deep convection scene simulation. (a) Ice and water content; (b) backscattering coefficient; (c) attenuation coefficient; (d) attenuated backscattering coefficient; (e) simulation signal; (f) signal-to-noise ratio

得云顶信息,而对云层内部无法实施有效探测。

### 3.2 冰云与气溶胶场景个例

所选的冰云与气溶胶场景为 2016 年 10 月 14 日 8 时的 d03 数据,如图 6(a)所示。模拟区域覆盖了  $108.5^{\circ}\text{E}\sim 111^{\circ}\text{E}$  和  $34.75^{\circ}\text{N}\sim 36.75^{\circ}\text{N}$ ,为我国陕西省所处区域,采用三重嵌套,分辨率分别为 27, 9, 1 km,垂直分为 36 层,顶层取 50 hPa,微物理过程为 Morrison 方案,积分步长为 60 s, WRF-CHEM 使用的排放源为 ANTHRO。

图 6(b)为 WRF 直接输出在不同海拔高度上的云冰混合比和气溶胶总质量浓度( $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{PM}_{10}$ 之

和)。选择经度  $110.58^{\circ}\text{E}$  处的一个二维廓面,通过式(1)可将混合比转换成冰晶含水量,如图 7(a)所示。层状冰云分布在 7~10 km 高度,含水量最大的层结高度在  $35.8^{\circ}\text{N}\sim 36.7^{\circ}\text{N}$  的 8 km 附近出现,大约为  $0.027\text{ g/m}^3$ 。从图 7(c)信号衰减情况可以看出,  $34.7^{\circ}\text{N}\sim 35.8^{\circ}\text{N}$  之间的云层较弱,衰减程度不高,但  $35.8^{\circ}\text{N}\sim 36.7^{\circ}\text{N}$  区间内的云层含水量丰富,吸收和散射作用很强,有些地方出现了完全衰减的情况。气溶胶的含量要小得多,且均贴近地面,分布范围很广,因此对信号的衰减作用并不明显,但受到上方云层的影响,气溶胶层不能够被完全有效探

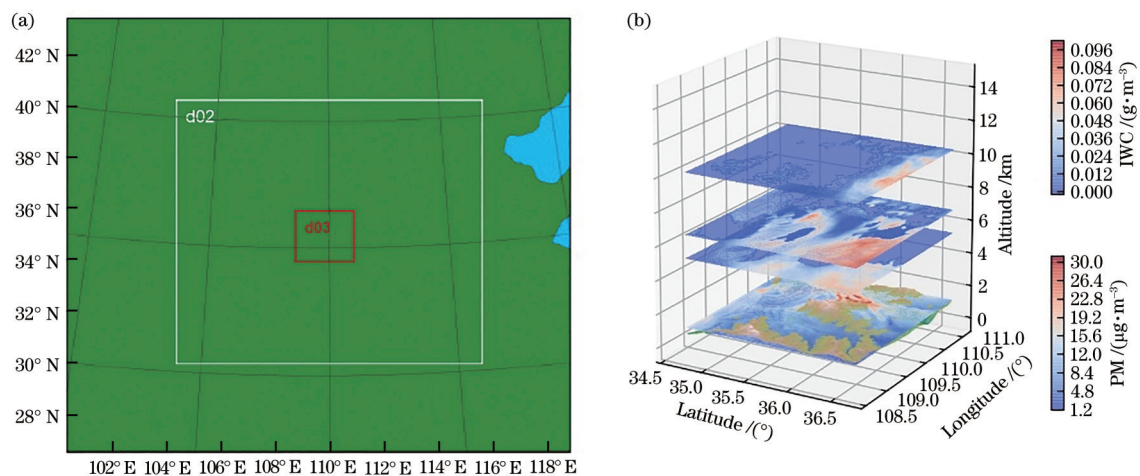


图 6 冰云与气溶胶场景模拟。(a) WRF 模拟区域;(b)冰的含水量和气溶胶干质量层状分布

Fig. 6 Ice cloud and aerosol scene simulation. (a) WRF simulation area; (b) layered distribution of ice water content and aerosol dry mass

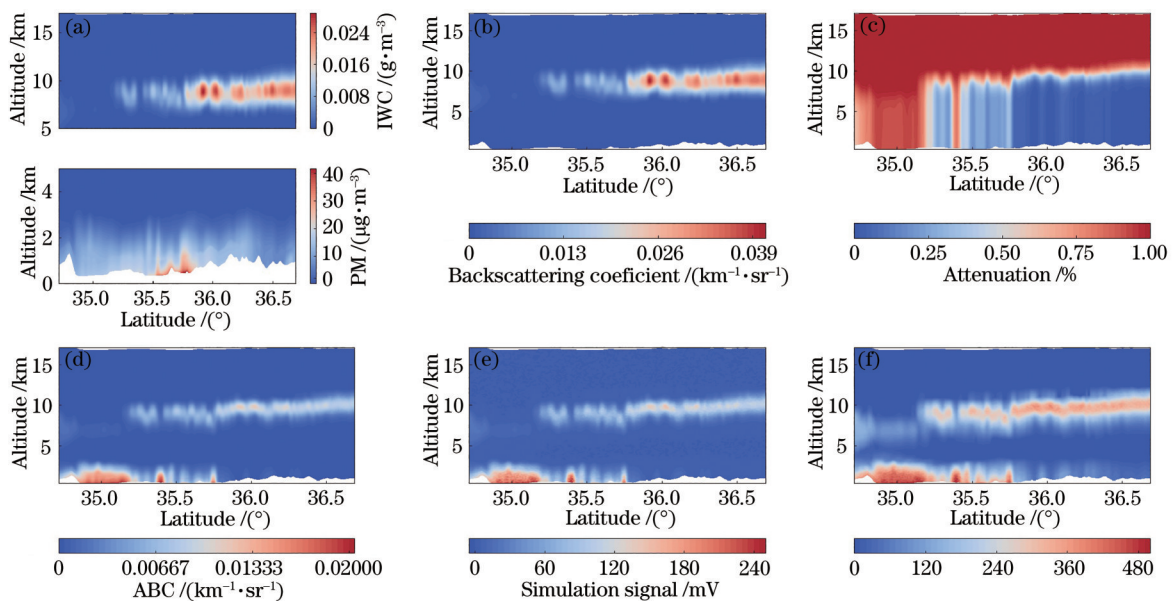


图 7 冰云与气溶胶场景模拟。(a)气溶胶含量和冰的含水量;(b)后向散射系数;(c)衰减系数;(d)衰减的后向散射系数;(e)模拟信号;(f)信噪比

Fig. 7 Ice cloud and aerosol scene simulation. (a) aerosol content and ice water content; (b) backscattering coefficient; (c) attenuation coefficient; (d) attenuated backscattering coefficient; (e) simulation signal; (f) signal-to-noise ratio



测,只能在透过信号较强的 34.7° N~35.8° N 之间有较强的信号。将图 7(d)、(e)与图 7(a)、(c)进行对比,可以看出,云层的回波信号与含水量的分布结构基本一致,但气溶胶的回波信号与气溶胶质量密度的分布差异明显。这一结果意味着,虽然星载激光雷达可以同时探测云层和气溶胶层,但在进行时空分布特征分析时,需要考虑云层对气溶胶有效探测的影响。

### 3.3 典型参数的敏感性分析

信噪比(SNR)是衡量信号与噪声强弱关系的

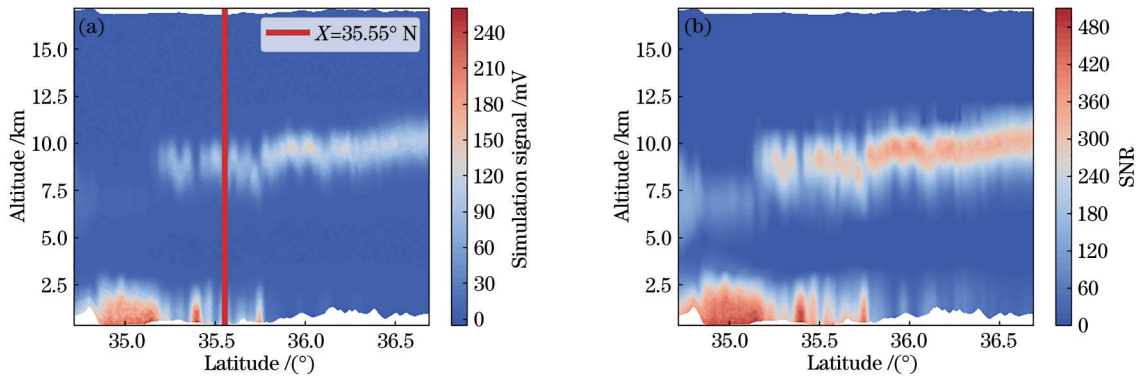


图 8 气溶胶场景敏感性分析。(a)模拟信号;(b)信噪比

Fig. 8 Sensitivity analysis in aerosol scene. (a) Simulation signal; (b) signal-to-noise ratio

图 9 为针对 35.55° N(X 竖线)处廓线的分析结果,此处廓线特点是云层回波信号与气溶胶回波信号相当,有一定的代表性。图 9(a)、(b)的结果表明,卫星轨道高度与信噪比呈反比关系,卫星轨道高度越高,回波信号越弱,因此信噪比越差,结合图 9(c)不同探测高度上的信噪比变化,回波越强的区域(如 2 km),信噪比变化越明显。在图 9(d)、(e)中,望远镜直径与信噪比成正比关系,望远镜口径

度量,也是检验激光雷达探测性能的重要指标之一。为了进一步探究正演模型中不同典型参数对模拟结果中信噪比的影响,对卫星轨道高度( $Z_{\text{sat}}$ )、望远镜直径( $D_{\text{tel}}$ )、激光器单脉冲能量( $E$ )和冰云粒子滴谱开展了敏感性分析。仍然采用 3.2 节中的场景,冰云和气溶胶同时具有很好的代表性。仍然选择经度为 110.58° E 的二维廓面,图 8(a)给出了模拟的探测器信号强度,图 8(b)给出了信噪比,截取 35.55° N(X 竖线)的廓线,分别考察  $Z_{\text{sat}}$ 、 $D_{\text{tel}}$ 、 $E$  对模拟信号信噪比的影响。

越大,回波信号越强,因此信噪比越好,结合图 9(c)不同探测高度上的信噪比变化,回波越强的区域(如 2 km),信噪比变化越明显。图 9(g)~(i)所展示的是激光器单脉冲能量对信噪比的影响,其规律与望远镜直径对信噪比的影响相似,均为正比关系。

在冰云中,冰晶粒子滴谱谱形的选取也是影响模拟结果的重要因素。使用一种修正 Gamma 滴谱谱形<sup>[19]</sup>来代替式(2)中的谱形:

$$\begin{cases} N(D)dD = \frac{6}{\pi} \frac{W}{\rho D_0^3} \frac{\mu^{\mu+4}}{\Gamma(\mu+4)} \frac{1}{D_0} \left(\frac{D}{D_0}\right)^\mu \exp\left(-\mu \frac{D}{D_0}\right) dD \\ \rho = 917 \text{ kg/m}^3 \\ D_0 = 0.1 \text{ mm} \\ \mu = 6 \end{cases} \quad (6)$$

其中图 10(a)为采用式(2)的结果,而图 10(b)为采用式(6)的结果,整体的结构分布基本相同。分别取三个不同纬度上的廓线,并展示在图 10(c)中。在图 10(d)中可以看到:在云层回波较强的 10 km 高度上,峰值回波有一定的差异,对于 36.55° N 廓线而言,差异达到了 21 mV,超过了总模拟信号值的 19%。而对于 34.89° N 的廓线,虽然云层的回波强

度差异不明显,但是它对方气溶胶回波信号产生了影响,使得在 2.5 km 以下高度上最大差异达到了 38 mV,约总体模拟信号值的 16%。这一结果表明,在进行正演模拟和后期的数据反演时,云层的微物理特性的选择和假设是必须要仔细考虑的因素,不仅会影响正演模拟结果,对实际观测数据的反演也会产生显著的影响。

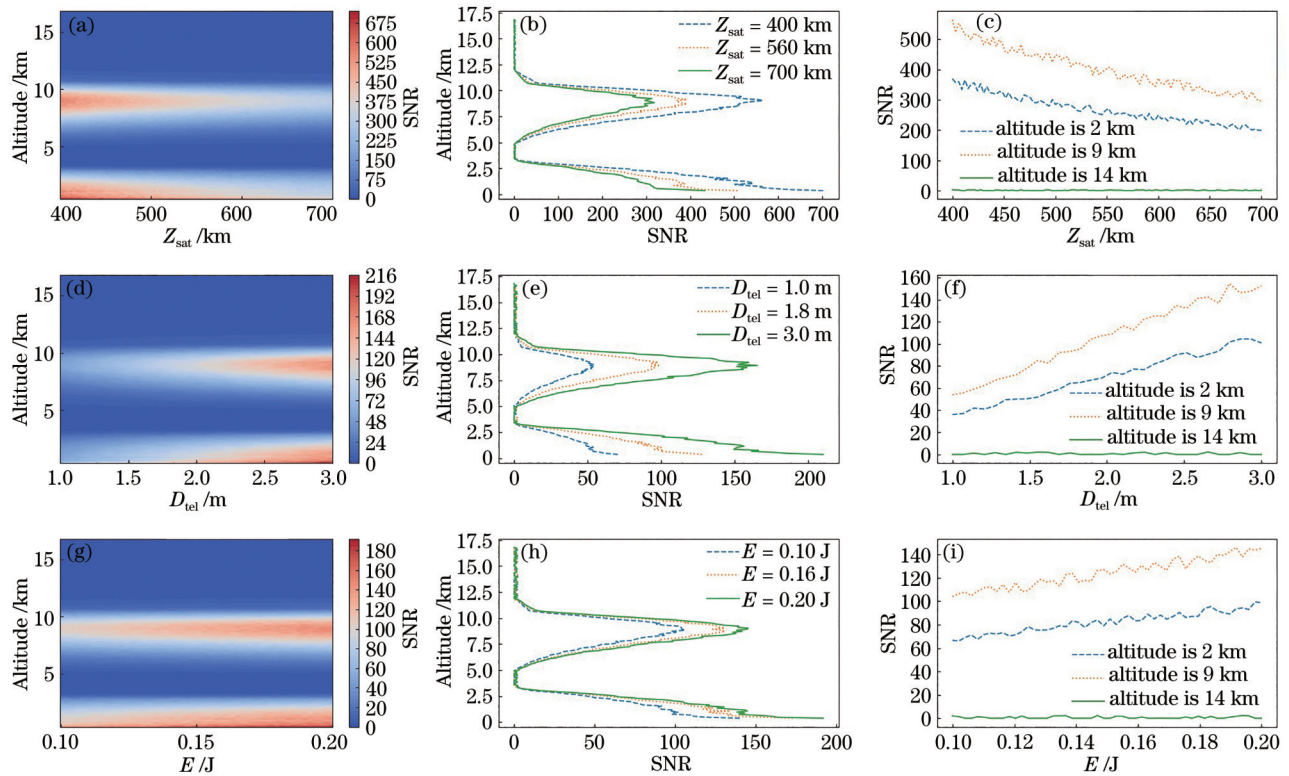


图9 三种变量对模拟信号信噪比的影响。(a)  $Z_{\text{sat}}$  对信噪比的影响;(b)三种  $Z_{\text{sat}}$  在不同高度上对信噪比的影响;(c)三种高度在不同  $Z_{\text{sat}}$  下对信噪比的影响;(d)  $D_{\text{tel}}$  对信噪比的影响;(e)三种  $D_{\text{tel}}$  在不同高度上对信噪比的影响;(f)三种高度在不同  $D_{\text{tel}}$  下对信噪比的影响;(g)  $E$  对信噪比的影响;(h)三种  $E$  在不同高度上对信噪比的影响;(i)三种高度在不同  $E$  下对信噪比的影响

Fig. 9 Influence of three parameters on the SNR of simulation signal. (a) Influence of  $Z_{\text{sat}}$  on SNR; (b) influence of three  $Z_{\text{sat}}$  on SNR at different altitudes; (c) influence of three altitudes on SNR under different  $Z_{\text{sat}}$ ; (d) influence of  $D_{\text{tel}}$  on SNR; (e) influence of three  $D_{\text{tel}}$  on SNR at different altitudes; (f) influence of three altitudes on SNR under different  $D_{\text{tel}}$ ; (g) influence of  $E$  on SNR; (h) influence of three  $E$  on SNR at different altitudes; (i) influence of three altitudes on SNR under different  $E$

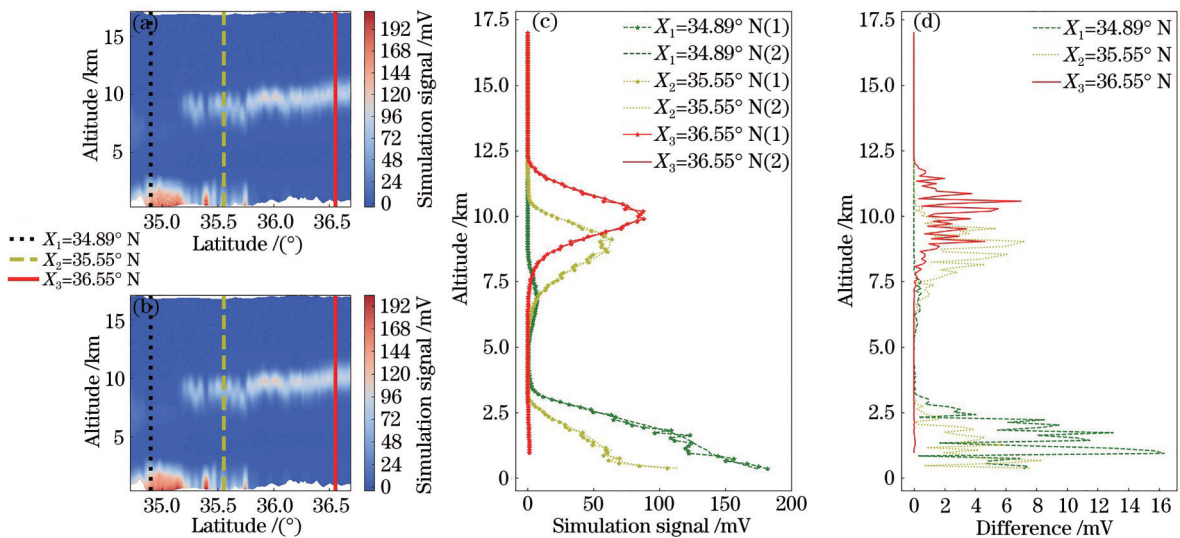


图10 两种滴谱对模拟信号的影响。(a) Gamma PSD的模拟信号;(b) Modified Gamma PSD的模拟信号;(c)在三个不同纬度处两种滴谱模拟信号的对比;(d)在三个不同纬度处两种滴谱模拟信号的差异

Fig. 10 Influence of two PSD on simulation signal. (a) Simulation signal of Gamma PSD; (b) simulation signal of Modified Gamma PSD; (c) comparison of two PSD simulation signals at three different latitudes; (d) difference of PSD simulation signals at three different latitudes

## 4 与 CALIOP/CALIPSO 观测结果的对比

为验证本文的正演模型,利用 CALIPSO 数据中的 IWC 和分子数密度(MND)产品作为输入,通过仿真后,对模型得到的结果与 CALIPSO 的衰减后向散射系数数据产品进行分析。所选取的对比场景为 2010 年 5 月 6 日 4 时 59 分的冰云场景,使用到的数据为 CALIPSO V4.1 Level 1 全分辨率剖面数据(即 Level 1B)和 V4.2 Level 2 5-km Cloud Profile 数据,区域覆盖  $119^{\circ}\text{E}\sim 121^{\circ}\text{E}$  和  $26^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 。Level 1 产品包括后向散射系数、气象数据、方位和高度信息等。其中 532 nm 通道衰减后向散射系数(Total\_Attenuated\_Backscatter\_532)采用 583 个 bin(bin 为

激光雷达回波信号采集单元),依序记录从高空 40 km 至 -2 km 的激光雷达 532 nm 通道衰减后向散射系数,在不同高度上分辨率不同,减少了数据的存储量,如表 3 所示。Level 2 产品为云廓线产品,用来提供 IWC 和 MND,数据都为 399 个 bin。CALIPSO 的 Level 2 产品的 IWC 由 Level 1 数据经 LIDAR 方法、MWCR 方法、Wang 方法等计算而得。由于算法的不确定性,Level 2 中的 IWC、MND 等参数存在一定误差<sup>[28]</sup>。

图 11(a)为 Level 1 中的 532 nm 通道衰减的后向散射系数,最大值为  $0.072\text{ km}^{-1}/\text{sr}$ ,出现在  $32.5^{\circ}\text{N}$  处,云底高度约为 8 km,云顶高度约为 13.6 km。Level 1 数据是由 Level 0 数据反演得来的,因此可以看出 8 km 以下有大量无法避免的随机噪声。

表 3 CALIPSO Level 1B 数据空间分辨率

Table 3 Spatial resolution of CALIPSO Level 1B data

Altitude region / km	Vertical resolution / m	Horizontal resolution / km	Samples per profile
30.1-40.0	300	5.0	33
20.2-30.1	180	5/3	55
8.2-20.2	60	1.0	200
-0.5-8.2	30	1/3	290
-2--0.5	300	1/3	5

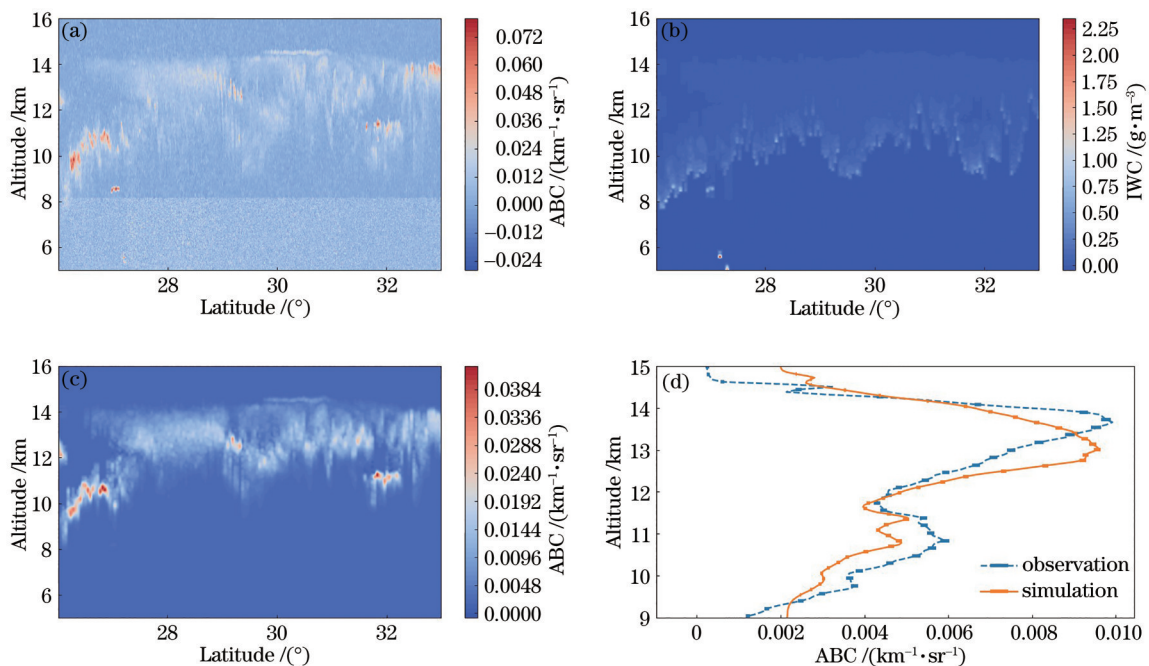


图 11 衰减的后向散射系数对比。(a) CALIPSO Level 1 数据的衰减的后向散射系数;(b) CALIPSO Level 2 数据的冰水含量;(c)正演模型模拟的衰减的后向散射系数;(d)一级数据与模拟后向散射系数的平均值对比

Fig. 11 Comparison of attenuated backscattering coefficient. (a) Attenuated backscattering coefficient of CALIPSO Level 1 data; (b) ice water content of CALIPSO Level 2 data; (c) attenuated backscattering coefficient simulated by the forward model; (d) comparison of the average value between the Level 1 data and the simulated backscattering coefficient

图 11(b)是 Level 2 数据中的 IWC,由 Level 1 数据经相关方法计算而得,存在一定误差,最大值达到了  $2.25 \text{ g/m}^3$ 。图 11(c)是将 Level 2 提供的 IWC 和 MND 代入本文的正演模型后计算出的衰减的后向散射系数,最大值约为  $0.038 \text{ km}^{-1}/\text{sr}$ ,出现在  $32.5^\circ \text{ N}$  处,云底高度约为  $5 \text{ km}$ ,云顶高度约为  $13.6 \text{ km}$ 。由图 11(a)和图 11(c)可以看出,正演模型计算出的冰云的后向散射系数与 CALIPSO 实际观测的冰云的后向散射系数在结构上高度相似,在数值上偏小。

为了进一步检验二者的差异,计算了二者所有廓线的平均值,如图 11(d)所示。可以看出正演模型计算出的冰云的后向散射系数与 CALIPSO 实际观测的冰云的后向散射系数在整体结构上有一定的差异。在峰值高度上,正演模型计算出的结果比 CALIPSO 实际观测的结果在高度上低了约  $800 \text{ m}$ ;在次级峰处,二者的结果在高度上比较一致,在数值上有差异,正演模型计算出的结果比 CALIPSO 实际观测的结果在数值上小了约  $20\%$ 。误差出现的原因一方面是因为 CALIPSO 的 IWC 是由数据反演而来的,其中算法上的不确定性会产生一定的误差;另一方面是将 IWC 和 MND 代入正演模型进行计算时用到的一些微物理参数设置(如滴谱谱形)与 CALIPSO 反演过程中的参数设置不尽相同,也会产生一定的误差。因此,对误差的分析也将是后续进一步研究的重点工作,通过产生的误差可以对正演模型进行进一步改进,也可以为 CALIPSO 反演算法的改进起到一定的参考作用。

## 5 结 论

利用星载激光雷达实施主动遥感探测是对云和气溶胶进行宏观研究的最有效手段之一。目前,各个国家都在研制下一代的星载激光雷达,而在星载仪器的设计论证阶段,正演模型起到至关重要的作用。建立了一套星载激光雷达探测云与气溶胶的正演模型,该正演模型具有模拟冰云场景、气溶胶场景等复杂多场景的能力,由 8 个子模块构成:云与气溶胶场景模拟、水凝物与气溶胶微物理参数、光学特性(吸收与散射)计算、大气辐射传输计算、仪器与轨道平台参数、雷达回波模拟、敏感性分析、结果对比验证分析。针对  $532 \text{ nm}$  通道对深对流云、冰云和气溶胶的典型场景进行了模拟和分析。结果表明,在深对流场景中,当云量较大、云层深厚时,信号衰减很严重,仅能获取云顶分布信息,最小

有效探测深度仅为  $950 \text{ m}$ ,而对云层内部无法实施有效探测。在同时存在冰云和气溶胶的场景中,需要考虑云层对气溶胶有效探测的影响,在进行正演模拟及后期的数据反演时,云层的微物理特性的选择和假设也是必须要仔细考虑的因素。在典型参数的敏感性分析中,望远镜直径、卫星轨道高度和激光器单脉冲能量对信噪比的影响结果可以为星载激光雷达的参数设计提供支撑。最后在正演模型得到的结果与 CALIOP/CALIPSO 实际探测的结果的对比中,正演模型计算的衰减后向散射系数与 CALIPSO 实际观测的结果在结构分布上基本一致,但由于 CALIPSO 反演算法中的不确定性及与正演模型参数设置上的差异性,多廓线平均值在不同高度上存在一定的差异,根据对比结果对正演模型进行进一步改进将是后续工作的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Li Z Q, Barker H W, Moreau L. The variable effect of clouds on atmospheric absorption of solar radiation [J]. *Nature*, 1995, 376(6540): 486-490.
- [2] Stephens G L. Cloud feedbacks in the climate system: a critical review[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(2): 237-273.
- [3] Winker D M, Pelon J, Coakley J A, Jr, et al. The CALIPSO mission: a global 3D view of aerosols and clouds[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(9): 1211-1230.
- [4] 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.
- [5] Nam C C W, Quaas J. Evaluation of clouds and precipitation in the ECHAM5 general circulation model using CALIPSO and CloudSat satellite data [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(14): 4975-4992.
- [6] Stephens G, Winker D M, Pelon J, et al. CloudSat and CALIPSO within the a-train: ten years of actively observing the earth system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(3): 569-581.
- [7] Battaglia A, Kollias P, Dhillon R, et al. Spaceborne cloud and precipitation radars: status, challenges, and ways forward[J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, 58(3): e2019RG000686.
- [8] Filipitsch F, Buras R, Fuchs M. Model studies on the retrieval of aerosol properties beneath cirrus

- clouds for a spaceborne HSRL[C]. AIP Conference Proceedings, 2013, 1531(1): 452-455.
- [9] Hogan R J. Fast approximate calculation of multiply scattered lidar returns[J]. Applied Optics, 2006, 45(23): 5984-5992.
- [10] Delanoë J, Hogan R J. A variational scheme for retrieving ice cloud properties from combined radar, lidar, and infrared radiometer[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113(D7): D07204.
- [11] Ehret G, Kiemle C, Wirth M, et al. Space-borne remote sensing of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis [J]. Applied Physics B, 2008, 90(3/4): 593-608.
- [12] Kawa S R, Mao J, Abshire J B, et al. Simulation studies for a space-based CO<sub>2</sub> lidar mission[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2010, 62(5): 759-769.
- [13] Mace G G, Zhang Q Q, Vaughan M, et al. A description of hydrometeor layer occurrence statistics derived from the first year of merged Cloudsat and CALIPSO data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(D8): D00A26.
- [14] 董俊发, 刘继桥, 朱小磊, 等. 星载高光谱分辨率激光雷达的高光谱探测分光比优化分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(S2): S205001.
- Dong J F, Liu J Q, Zhu X L, et al. Splitting ratio optimization of spaceborne high spectral resolution lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(S2): S205001.
- [15] 陈炳龙, 杨忠东, 闵敏, 等. 星载多普勒测风激光雷达应用需求与研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 190003.
- Chen B L, Yang Z D, Min M, et al. Application requirements and research progress of spaceborne Doppler wind lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 190003.
- [16] 谢杨易, 刘继桥, 姜佳欣, 等. 使 CO<sub>2</sub> 浓度测量误差减小的星载激光雷达波长优化[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 88-93.
- Xie Y Y, Liu J Q, Jiang J X, et al. Wavelengths optimization to decrease error for a space-borne lidar measuring CO<sub>2</sub> concentration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 88-93.
- [17] 胡向军, 陶健红, 郑飞, 等. WRF 模式物理过程参数化方案简介[J]. 甘肃科技, 2008, 24(20): 73-75.
- Hu X J, Tao J H, Zheng F, et al. Introduction to parameterization scheme of physical process in WRF mode[J]. Gansu Science and Technology, 2008, 24(20): 73-75.
- [18] Ryan B F. A bulk parameterization of the ice particle size distribution and the optical properties in ice clouds[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2000, 57(9): 1436-1451.
- [19] Hirohiko M. Satellite Data Simulator Unit (SDSU) ver. 2 user's guide[EB/OL]. (2010-05)[2021-05-06]. <https://precip.isee.nagoya-u.ac.jp/sdsu/docs/UsersGuide-SDSUv2r2-1.pdf>.
- [20] 徐延峰, 陈辉, 张志军. 大气气溶胶尺度分布分形特征研究[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3): 8-14.
- Xu Y F, Chen H, Zhang Z J. Study on the fractal characteristics of size distribution of atmospheric aerosols[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(3): 8-14.
- [21] Devasthale A, Thomas M A. A global survey of aerosol-liquid water cloud overlap based on four years of CALIPSO-CALIOP data[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(3): 1143-1154.
- [22] Yang P, Baum B A, Heymsfield A J, et al. Single-scattering properties of droxtals[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2003, 79/80: 1159-1169.
- [23] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(5): 831-844.
- [24] 美)K.N.Liou. 大气辐射导论[M]. 郭彩丽, 周诗健, 译. 2版. 北京: 气象出版社, 2004.
- Liou K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. Guo C L, Zhou S J, Transl. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
- [25] 崔洪鲁. 基于 HITRAN 数据库的大气激光雷达信号仿真系统研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2019: 17-40.
- Cui H L. Research on atmospheric lidar signal simulation system based on HITRAN database[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2019: 17-40.
- [26] 邓潘, 张天舒, 陈卫, 等. 大气探测激光雷达噪声比例因子及信噪比的估算[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S130003.
- Deng P, Zhang T S, Chen W, et al. Estimating noise scale factor and SNR of atmospheric lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S1): S130003.
- [27] 夏俊荣, 张镭. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展[J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 68-72, 81.

Xia J R, Zhang L. Advances in detecting aerosols with Mie lidar[J]. *Arid Meteorology*, 2006, 24(4): 68-72, 81.

- [28] 潘红林. 基于 CloudSat/CALIPSO 卫星资料的南京地区卷云的物理特性分析[D]. 南京: 南京信息工程

大学, 2017: 13-18.

Pan H L. Analysis of cirrus physical properties over Nanjing, China based on the CloudSat and CALIPSO satellite data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017: 13-18.