

云—气溶胶星载激光雷达的二维简单多尺度层次检测方法

余泓洋¹, 徐维维¹, 毛飞跃^{1,2}, 臧琳³, 龚威⁴

1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079;

2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

3. 武汉大学 中国南极测绘研究中心, 武汉 430079;

4. 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430079

摘要: 星载激光雷达能够观测云—气溶胶特性的垂直剖面分布, 是云—气溶胶研究和监测的独特手段。正交偏振云—气溶胶激光雷达 (CALIOP) 已在轨运行多年, 提供了大量云—气溶胶剖面观测的数据资料。从激光雷达数据中检测云和气溶胶层次的空间位置, 是精确反演和提取层次信息的前提。CALIOP官方算法运用经验阈值检测层次, 存在较多的层次漏检。当前以一维简单多尺度算法 (1D-SMA) 为代表的假设检验算法, 通过检验给定信号是否符合背景大气分布假设, 避免了设置传统的经验阈值阵列, 提高了检测准确性。然而, 上述方法均未考虑层次信号在二维垂直剖面场景中的空间连续性, 漏检现象仍有发生。因此, 本文进一步提出了基于伯努利概率分布的二维简单多尺度算法 (2D-SMA), 运用统计概率模型替换经验阈值阵列, 并结合覆盖多根廓线的二维层次检测窗口, 实现对相邻廓线信号空间关联的利用。新算法在全水平分辨率 (5—80 km) 综合检测的层次总面积, 比CALIOP官方算法多50.45%, 比一维方法1D-SMA多32.45%。新算法仅在5—20 km水平分辨率就能实现与官方算法全分辨率面积相当的层次检出量。最后, 本文通过冰云退偏比评估, 验证了新算法检测的可靠性。

关键词: 遥感, 星载激光雷达, CALIOP, 云和气溶胶, 层次检测, 多尺度

中图分类号: P2

引用格式: 余泓洋, 徐维维, 毛飞跃, 臧琳, 龚威. 2025. 云—气溶胶星载激光雷达的二维简单多尺度层次检测方法. 遥感学报, 29(8): 2531–2543

Yu H Y, Xu W W, Mao F Y, Zang L and Gong W. 2025. Two-dimensional simple multiscale algorithm for detecting cloud and aerosol layers from spaceborne lidar data. National Remote Sensing Bulletin, 29(8): 2531–2543 [DOI: 10.11834/jrs.20254435]

1 引言

云和气溶胶是地球大气的重要组成部分, 影响着大气辐射平衡和全球气候变化, 日益受到人类的关注。气溶胶由大气介质与其中悬浮的0.001—100 μm 粒径固液颗粒物构成 (毛节泰等, 2002), 既可以吸收、散射太阳辐射 (气溶胶直接效应), 也可以作为云的凝结核改变云滴大小、分布, 间接改变云对太阳辐射的吸收、散射 (气溶胶间接效应), 对气候和环境造成影响 (Twomey, 1977)。

高浓度气溶胶还会降低大气能见度和空气质量, 增加长期接触的人类罹患心血管与呼吸道疾病的风险 (Lelieveld等, 2020)。因此, 研究云和气溶胶的三维特性, 包括其层次所在的悬浮高度、几何厚度等, 对气候预测和环境评估意义重大 (Shonk等, 2010; Mao等, 2021a)。星载激光雷达不受昼夜、天气条件的制约, 弥补了被动遥感传感器缺失的夜间信息、大气垂直信息, 同时相较于需要组网布设、站点选择依赖地形条件的地基

收稿日期: 2024-10-10; 预印本: 2025-05-09

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42322109); 国家重点研发计划 (编号: 2024YFF0809400); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (编号: 2042025kf0047)

第一作者简介: 余泓洋, 研究方向为云和气溶胶激光雷达数据反演。E-mail: hongyangyu@whu.edu.cn

通信作者简介: 毛飞跃, 研究方向为云和气溶胶的三维遥感和气候效应。E-mail: maofeiye@whu.edu.cn

激光雷达, 具有全球范围探测的优势, 因此被广泛应用于云和气溶胶的变化监测 (黄忠伟等, 2022; 刘刚等, 2008; Li等, 2017)。2006年, 美国国家航空航天局等合作发射了正交偏振云—气溶胶激光雷达 CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) 用于全球气溶胶的垂直剖面探测。截至2023年退役, CALIOP积累了17年在轨垂直观测资料与星载激光雷达研制经验。

应用星载激光雷达观测数据首先需要检测云和气溶胶层次所在空间位置, 即“层次检测”, 其结果作为层次分类和消光反演的重要输入, 需要尽可能保证精度, 以避免误差在后续工作中的传递和累积 (Winker等, 2009)。斜率法是最先发展并应用于地基激光雷达的层次检测算法。地基激光雷达回波信号的强度通常随海拔高度的增加单调下降, 并在层次出现时明显增强。理想情况下, 对信号求一阶导, 搜索其中零点的位置即可发现层次底部所在高度 (Pal等, 1992)。然而, 星载激光雷达信号受噪声干扰严重, 即使经过平滑降噪, 也很难由传统斜率法达到理想的检测效果 (Comerón等, 2013)。小波法被认为是更高级的斜率法。它由局部模的极大值确定层次边界, 虽然对噪声不敏感, 但可能会遗漏信号变化不甚明显的层次边缘 (Davis等, 2000; Brooks, 2003)。

另一类更广泛的星载激光雷达层次检测算法是阈值法, 以CALIOP官方的选择性迭代边界定位 SIBYL (Selective Iterated Boundary Location) 算法为代表。阈值法根据清洁大气信号的最大期望值构建阈值阵列, 连续超出阈值的信号被判定为层次。SIBYL算法可以自适应地设置单根廓线上的阈值, 并通过多分辨率网格平均机制降低局部噪声的影响 (Vaughan等, 2009)。然而, 当信噪比很低, 噪声干扰下的弱层次信号难以持续超越阈值时, 层次容易被遗漏 (Davis等, 2000)。同时, 较细分辨率检测下遗漏的层次信号, 在被平均到较粗分辨率时将与周围大气信号混合, 可能导致清洁大气被阈值法误判为层次 (Cesana等, 2016)。研究表明, 相较于常与CALIOP协同观测的同星座卫星载荷, 中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (寇蕾蕾等, 2023), CALIOP获取的气溶胶光学厚度 AOD (Aerosol Optical Depth) 总体上普遍偏低。层次漏检或许是该现象的重要原因 (Kim等, 2013, 2017;

Ma等, 2013; Redemann等, 2011)。

为了解决上述问题, Mao等 (2021b) 在SIBYL算法原理上加以改进, 使用最小代价函数自动分段激光雷达信号, 改善了层次边缘的定位精度。Vaillant de Guélis等 (2021) 也提出了一种二维检测算法, 将SIBYL于单廓线上移动的一维检测窗口, 改进为于垂直场景里移动的二维窗口, 以利用相邻廓线信号的空间关联性, 更灵敏地感知薄弱层次。上述方法本质上都是阈值法, 难以克服阈值法的根本缺陷。Mao等 (2021a) 基于伯努利概率分布提出了的一维简单多尺度算法 1D-SMA (1D-Simple Multiscale Algorithm), 用统计概率模型替代人为设置的阈值阵列实现检测, 但在对检测结果进一步筛选时, 依然使用了传统的经验噪声过滤参数。同时, 1D-SMA也未考虑层次在二维垂直场景内的空间连续性。之后, 二维多尺度假设检验法 2D-MHT (Two-dimensional Multiscale Hypothesis Testing algorithm) 使用了更为严格的高斯分布概率模型, 并考虑了相邻廓线信号的空间关联 (Mao等, 2024)。该方法需要了解全面的激光雷达系统参数指标和信号实测性能, 以准确评估理想大气信号高斯模型的不确定度, 在系统参数不明确时难以应用。

本文总结上述算法的发展经验, 提出了基于二维伯努利概率分布的多尺度层次检测算法 2D-SMA (2D-Simple Multiscale Algorithm)。新算法不仅避免了传统的阈值检测过程和噪声过滤参数, 而且充分考虑了相邻廓线间的信号相关性。相对基于高斯模型的2D-MHT, 新算法更加简便, 在激光雷达系统参数指标和实测性能难以获取时, 可提供快捷精确的层次检测结果。

2 数据与方法

2.1 理想衰减散射比

CALIOP Level 1B数据提供了532 nm和1064 nm两种波长脉冲的总衰减后向散射 TAB (Total Attenuated Backscatter) 系数廓线。532 nm波段对小粒径气溶胶散射更灵敏, 常被用于层次检测 (Vaughan等, 2009; Mao等, 2021b; Vaillant de Guélis等, 2021; Mao等, 2021a)。星载激光雷达TAB系数是与高度相关的非线性函数, 将其转换为衰减散射比 ASR (Attenuated Scattering Ratios),

可以更清晰直观地呈现信号变化的趋势 (Winker 等, 2009; Vaughan 等, 2009):

$$\text{ASR}(Z) = \frac{\beta'_{532}(Z)}{\beta'_{\text{air}}(Z)} = \frac{(\beta_p(Z) + \beta_m(Z)) \cdot T_p^2 \cdot T_m^2 \cdot T_{O_3}^2}{\beta_m(Z) \cdot T_m^2 \cdot T_{O_3}^2} = \left(\frac{\beta_p(Z)}{\beta_m(Z)} + 1 \right) \cdot T_p^2 \quad (1)$$

式中, Z 为信号点高度, β'_{532} 、 β'_{air} 分别是 532 nm 的实测 TAB 系数和清洁大气的 TAB 系数, β_p 、 β_m 分别是气溶胶粒子和空气分子的后向散射系数, T_p^2 、 T_m^2 和 $T_{O_3}^2$ 分别是气溶胶粒子、空气分子和臭氧分子的双向透过率。

理想衰减散射比 ($\text{ASR}_{\text{ideal}}$) 是无噪声条件下背景大气 ASR 的理想值, 在新算法中作为与实测 ASR 相比较、判定层次存在与否的参考对象。由于云、气溶胶粒子的散射、吸收作用, 层次下方存在信号衰减。检测时需不断对层次下方的理想衰减散射比作以下更新:

$$\text{ASR}_{\text{ideal}}(i+1) = \text{ASR}_{\text{ideal_initial}} \cdot \prod_{j=0}^i T_j^2, \quad i \geq 1 \quad (2)$$

$$T_j^2 = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \prod_{k=0}^{j-1} T_k^2 - 2 \cdot \gamma_j \cdot S_{\text{reasonable}}, & j \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, T_j^2 是从上往下第 j 个层次的双向透过率。 $\text{ASR}_{\text{ideal_initial}}$ 为初始的理想背景大气 ASR, 每检测到一个层次, 即对下方的 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 进行一次更新, $\text{ASR}_{\text{ideal}}(i+1)$ 是遇到第 i 个层次 ($i \geq 1$) 后的更新结果。实际探测中, 海拔低于 30 km 的大气几乎都不是绝对纯净, 背景气溶胶普遍存在, 使得理论上 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 的初始值大于 1。Mao 等 (2024) 统计了 2006 年 6 月至 2020 年 7 月 CALIPSO Level 3 平流层背景气溶胶 ASR 的均值分布, 发现 90% 的背景气溶胶 ASR 均值最大值为 1.175。本研究参照其讨论, 选取 1.175 作为 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 的初值。

计算 T_j^2 需要该层次的积分衰减后向散射 IAB (Integrated Attenuated Backscatter) γ_j 与合理的激光雷达比 $S_{\text{reasonable}}$ 。 γ_j 的计算如式 (4) — (6), $Z_{\text{top}(j)}$ 、 $Z_{\text{base}(j)}$ 分别是第 j 层的顶部和底部高度, $\beta_m(Z_k)$ 是 Z_k 高度处空气分子的后向散射系数, $\text{ASR}(Z_k)$ 是 Z_k 高程处的衰减散射比 (Vaughan 等, 2005)。合理的激光雷达比 $S_{\text{reasonable}}$ 以 Mao 等 (2018) 提出的迭代试探法获取: 激光雷达比的取值范围一般在 1—

100 sr 之间 (Su 等, 2014), 迭代生成具有给定步长 (如 1sr) 的、大于 1 的激光雷达比试探值 S 。根据式 (2) — (3) 和 S 更新 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$, 更新结果记为 $\text{ASR}_{\text{ideal}}(i+1, S)$, 将 $\text{ASR}_{\text{ideal}}(i+1, S)$ 除以第 i 层底部与第 $(i+1)$ 层顶部之间的实测衰减散射比均值, 构建函数 $\text{Fun}(S)$, 当 $\text{Fun}(S) = 1$ 时, 获得合理的激光雷达比 $S_{\text{reasonable}} = S$ (式 (7))。

$$\gamma_j = g_j - \frac{1}{2} (Z_{\text{top}(j)} - Z_{\text{base}(j)}) \cdot (R_{\text{top}(j)} + R_{\text{base}(j)}) \quad (4)$$

$$g_j = \frac{1}{2} \sum_{k=\text{top}(j)+1}^{\text{base}(j)} (Z_{k-1} - Z_k) \cdot (R_{k-1} + R_k) \quad (5)$$

$$R_k = \beta_m(Z_k) \cdot \text{ASR}(Z_k) \quad (6)$$

$$\text{Fun}(S) = \frac{\text{ASR}_{\text{ideal}}(i+1, S)}{\sum_{k=\text{base}(i)}^{\text{top}(i+1)} \text{ASR}(Z_k)} \quad (7)$$

2.2 背景大气发生概率

经过光电倍增管增益的 CALIOP 回波信号遵循奈曼 A 型分布 (Teich, 1981), 可以视为理想信号与泊松噪声的叠加。信号足够强时, 将噪声近似为高斯分布是合理的 (Liu 和 Sugimoto, 2002; Vaughan 等, 2005), 因此, 背景大气信号点实测 ASR 大于或小于 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 的概率均是 1/2。假设场景内信号点互相独立 (Vaillant de Guélis 等, 2021), m 个背景大气信号点实测 ASR 与 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 大小关系就服从 $p=1/2$ 的 m 重伯努利实验, 故 m 个背景大气信号点中有不少于 u 个实测 ASR 大于 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 的概率可由式 (8) 计算:

$$P_{\text{background}}(m, u) = \sum_{i=u}^m C_m^i \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^i \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{m-i} \quad (8)$$

定义这个概率 ($P_{\text{background}}(m, u)$) 为“背景大气发生概率”。对于场景内含有 m 个信号点的矩形窗口, 其中心信号点是否属于层次, 可以参考周围信号点实测 ASR 与 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 相比的整体情况进行判断: 实测 ASR 大于 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 的信号点越多 (u 越大), 中心信号点偏离背景大气的程度就越高, 属于层次的可能性越大, 属于背景大气的可能性越小, 相应计算出的 $P_{\text{background}}(m, u)$ 也越小 (式 (8))。2D-SMA 依据窗口 $P_{\text{background}}(m, u)$ 的大小判断其中心信号点是否属于层次。

2.3 二维多尺度检测机制

2D-SMA 使用覆盖多廓线的二维窗口在垂直场景内检测层次。便于确定中心信号点, 窗口水平

尺度、垂直尺度和信号点总数均是奇数。2D-SMA对窗口中心信号点是否属于层次的判定规则如下：

为 $P_{\text{background}}(m, u)$ 设定最大临界值 α （即显著性水平）。当前窗口算得的 $P_{\text{background}}(m, u) < \alpha$ 时，标记中心信号点为层次。 α 越小，获得标记的中心信号点偏离背景大气的程度越高，层次判定条件越严格，越不容易出现误检测。 α 的取值也不宜过小，否则可能导致弱层次的遗漏。2D-SMA取 $\alpha = 0.01$ ，对于特定大小的窗口（相同的 m ），标记中心信号为层次要求窗口内ASR超过 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 的信号点数量不小于特定值 u_0 （即当 $u \geq u_0$ 时， $P_{\text{background}}(m, u) < \alpha$ ）。 u_0 与窗口尺度的对应关系如图1。特别地，若窗口内信号点数不超过5（ $m \leq 5$ ）， $P_{\text{background}}(m, u)$ 会始终大于0.01，规定此时窗口内全部位置ASR超过 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ ，才给予中心信号点层次标记。

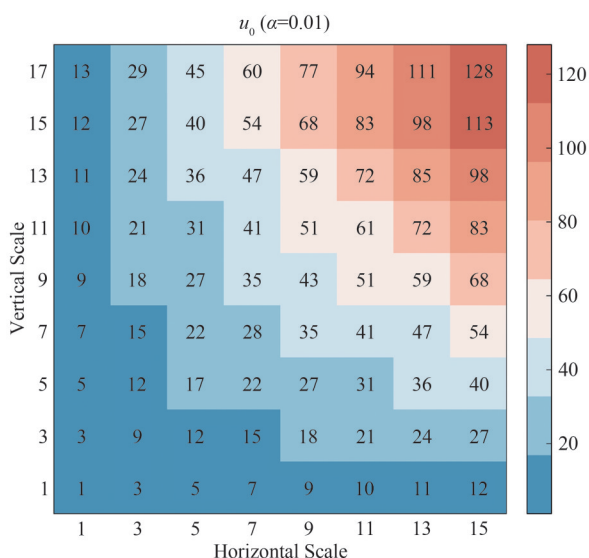


图1 不同窗口尺度下的 $u_0(\alpha = 0.01)$

Fig.1 u_0 at different window scales($\alpha = 0.01$)

2.4 滑动窗口与水平平均

多尺度检测采用了不同大小的二维滑动窗口。窗口大小选择上，大窗口样本数量更多，稳健性更强，但过大的窗口可能导致层次边缘识别不准确。2D-SMA对不同水平分辨率数据设置不同的检测窗口尺度，细分分辨率检测完成后，逐次平均廓线信号到更粗的水平分辨率，重复检测，尽可能使层次在更细的分辨率下被检出。窗口尺度设置上，水平方向，参考SIBYL将80 km水平分辨率数据作为一个场景进行层次检测的情况（Vaughan等，2009），令5 km分辨率的窗口水平尺度（Horizontal Scale）不超过15个信号点（Horizontal Scale=1，

3，5，...，15），10 km、20 km、40 km、80 km分辨率的窗口水平尺度依次不超过7、3、1、1个信号点，垂直方向，参考1D-SMA，统一设置窗口垂直尺度（Vertical Scale）不超过17个信号点（Vertical Scale=1，3，5，...，17）（Mao等，2021a）。检测过程中，若两个相邻层次间距很小，就将其合并，最大合并距离参考SIBYL（Vaughan等，2005）。每检测到一个层次，更新层次底部到地面的 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 。每结束一个水平分辨率下全部窗口的检测，清除该分辨率新增层次位置的ASR信号强度，平均廓线信号进入更粗的水平分辨率，继续检测，以减少强层次对周围大气信号的污染。

图2是窗口在场景中滑动检测的示意图。图2（a）—（d）中“+1”绿色区域为真实层次信号，蓝色实线框代表检测窗口。当检测窗口位于图2（a）位置时，窗口中心信号点（蓝色虚线框）不属于层次，但周围存在层次信号。这些层次信号会影响窗口内实测ASR的信号检验，有可能导致中心信号点被误判为层次，严重时如图2（b），初步检测后真实层次周围（水平或垂直方向上）半个窗口大小内，存在大量虚假层次标记（“-1”黄色区域）。针对这一问题，每次检测窗口完成全场景遍历后，都清除初步“层次”标记边缘水平和垂直方向各半个窗口宽度的标记，实现保守估计（图2（c）—（d））。此外，由于虚假检测概率受到 $P_{\text{background}}$ 临界值 α 的影响， α 越大，虚假检测概率越高。对临界值 α 下标记为层次的区域，用更小的临界值 α' （如0.001）重复检测，可以进一步去除虚假层次标记。真实层次通常是连续的，能够通过更严格的检测标准，而噪声导致的虚假层次往往孤立，会被有效滤除。

2.5 算法流程

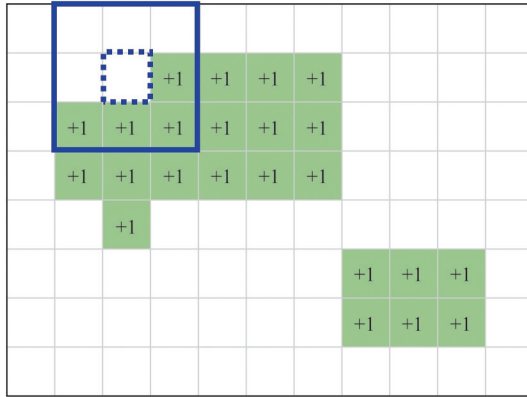
基于上述的原理与方法分析，2D-SMA算法流程梳理如下：

首先，根据TAB、辅助气象数据（大气分子数密度、臭氧数密度、分子散射截面积、臭氧吸收截面积等）和雷达高度数据计算5 km水平分辨率下的ASR廓线，并设置全场景 $\text{ASR}_{\text{ideal}}$ 初值为背景大气ASR均值1.175。

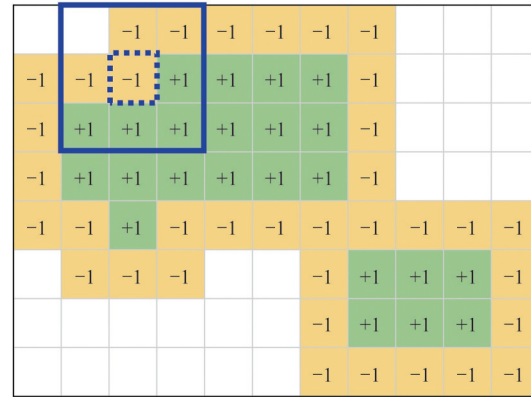
其次，按窗口内信号点数由少到多（信号点数相同时，窗口垂直尺度递减）的顺序，使用当前水平分辨率下第一个尺度的二维滑动窗口（初

始分辨率为 5 km, 5 km 分辨率第一个尺度是 3×1) 遍历场景, 每个信号点依次作为中心信号点, 根

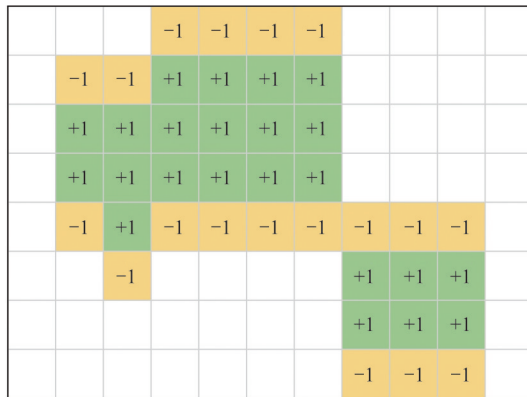
据窗口计算出的 $P_{\text{background}}$ 和临界值 $\alpha = 0.01$ 给予符合条件的信号点初步层次标记。



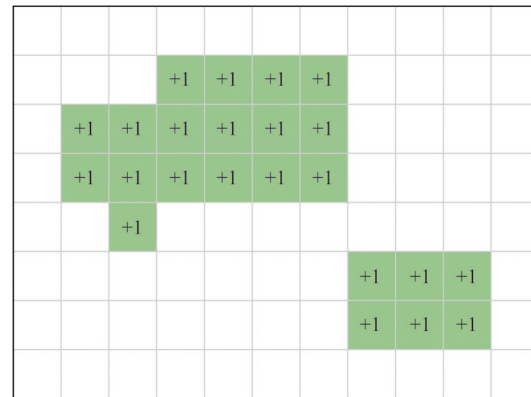
(a) 真实层次(+1)与检测窗口(蓝色实线)
(a) True layers(+1) and detecting window
(Blue solid line)



(b) 初步层次标记, 含真实(+1)和虚假层次(-1)
(b) "Layer marks" at first, including true(+1) and fake
(-1) ones



(c) 横向移动边缘清除后的“层次”标记
(c) Layer marks after horizontal removal on edges



(d) 再经历纵向移动边缘清除后的真实层次标记
(d) True layer marks after vertical removal on edges

图2 窗口初步检测及层次边缘半窗口清除示意图

Fig.2 Diagram of initial window detection and half-window removal on the edges of the initial layer marks

完成场景遍历后, 清除初步层次标记边缘水平和垂直方向各半个窗口宽度的标记, 保存当前窗口尺度的检测结果, 由高到低更新各新增层次底部到地面的 ASR_{ideal} 。继续当前水平分辨率下其他尺度窗口的检测 (5 km 分辨率后续尺度窗口信号点数依次增加, 依次为 1×3 , 5×1 , 1×5 , 7×1 , 1×7 , 9×1 , 3×3 , $\dots$, 17×13 , 15×15 , 17×15), 合并新增层次标记, 直至全部尺度使用完毕。

在当前分辨率全部层次标记覆盖的区域中, 每根廓线为一窗口, 以更小的 $P_{\text{background}}$ 临界值 $\alpha' = 0.001$ 逐廓线进行一维检测, 再次通过检验的层次标记予以保留。

最后, 清除新增标记位置的 ASR 信号强度, 平均廓线数据到下一个更粗的水平分辨率, 重复

上述步骤, 直至全部水平分辨率检测完毕。综合各分辨率结果, 结束检测。详细的技术路线图如图3。

3 结果与讨论

为评估 2D-SMA 的算法性能, 本研究设计了 SIBYL、1D-SMA 及 2D-SMA 的单根廓线和垂直剖面场景的检测对比, 并统计了相同时段内 3 种算法在全球多场景观测中检出的层次总面积与各高程位置的层次频数。其中 SIBYL 结果取自 CALIOP Level 2 云气溶胶层次产品, 该产品由 CALIOP Level 1 数据经 SIBYL 算法检测获得。对与 SIBYL 结果同时段同场景的 CALIOP Level 1 数据, 分别使用 1D-SMA 和 2D-SMA 算法检测层次, 获得 1D-

SMA 和 2D-SMA 检测结果。因此, 3 组结果均由同一数据源检测获得, 构成对比实验。

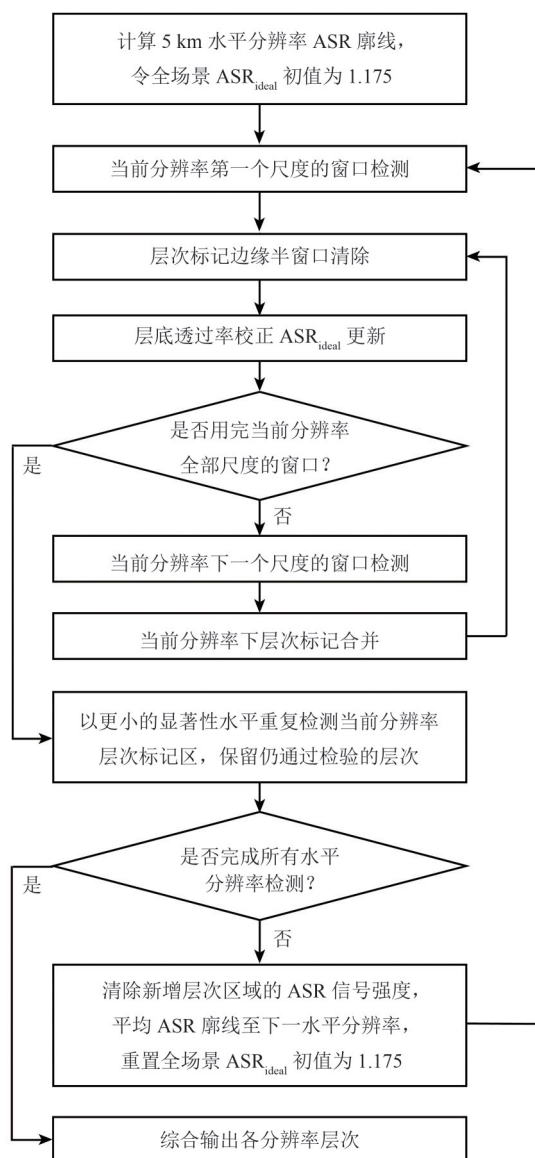
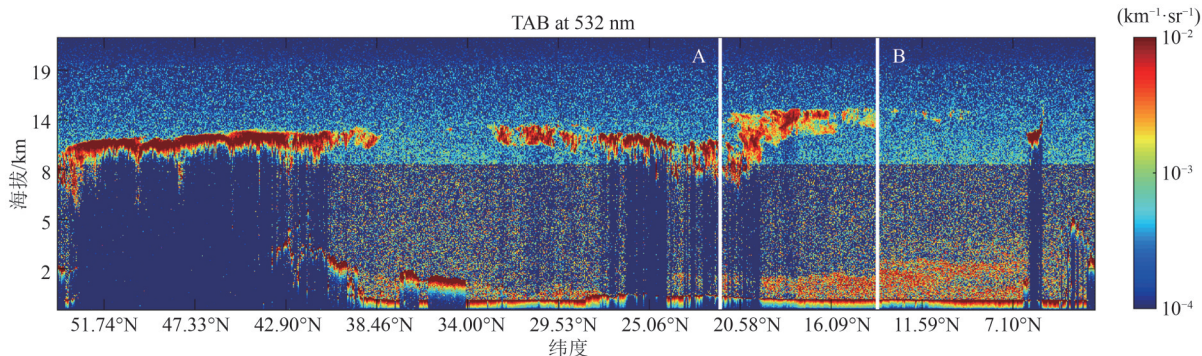


图3 技术路线

Fig.3 Technical route

3.1 廓线检测对比

图4对比了3种算法在CALIOP 5 km水平分辨率单根廓线上的层次标记情况。图4(b)、(c)子图中, 实线分别展示了廓线(A)、(B)上的ASR波动; 灰色部分代表该段信号未检测到层次; 彩色部分代表检测到层次, 不同彩色区分了层次初次被检出时廓线信号的水平分辨率; 黑色部分代表位于地表高度以下的部分。图4(b)显示, 在廓线(A)的2—5 km高度处, SIBYL算法结果存在可疑的过检测, 而1D-SMA和2D-SMA算法激光无此层次标记; 在廓线(A)的8—14 km高度处, SIBYL和1D-SMA均漏检了一个明显的薄层次, 2D-SMA实现了该层次的有效探测, 这是因为2D-SMA算法不依赖于主观经验的过滤参数, 具有更高的探测灵敏度。同样地, 图4(c)显示, 廓线(B)14 km高程处存在一个强度较弱的层次, 被SIBYL和1D-SMA算法漏检, 而2D-SMA算法于5 km水平分辨率下将其检出。对于微弱层次, 如廓线(B)2.5 km左右高度处的一小段信号起伏, 因信号变化非常微弱、信噪比低, 即使SIBYL最粗分辨率的检测也未能将其识别, 而2D-SMA算法在80 km水平分辨率下标记了这个层次。此外, 廓线(B)中2 km高度下方存在一段连续超过 ASR_{ideal} 的信号, SIBYL和1D-SMA的漏检将信号分割成了两个不相邻的层次, 2D-SMA充分考虑了邻近廓线信号的空间关联性, 可以有效识别层次相接处的微弱层次。总体上, 1D-SMA改善了SIBYL层次近边缘部分的缺失, 修正了SIBYL可疑的过检测; 2D-SMA在1D-SMA基础上检测到更多薄层次和信号强度弱的层次, 并减少了完整云和气溶胶层次被分割为多个层次情况的发生。



(a) 场景TAB伪彩图

(a) TAB map of the scene

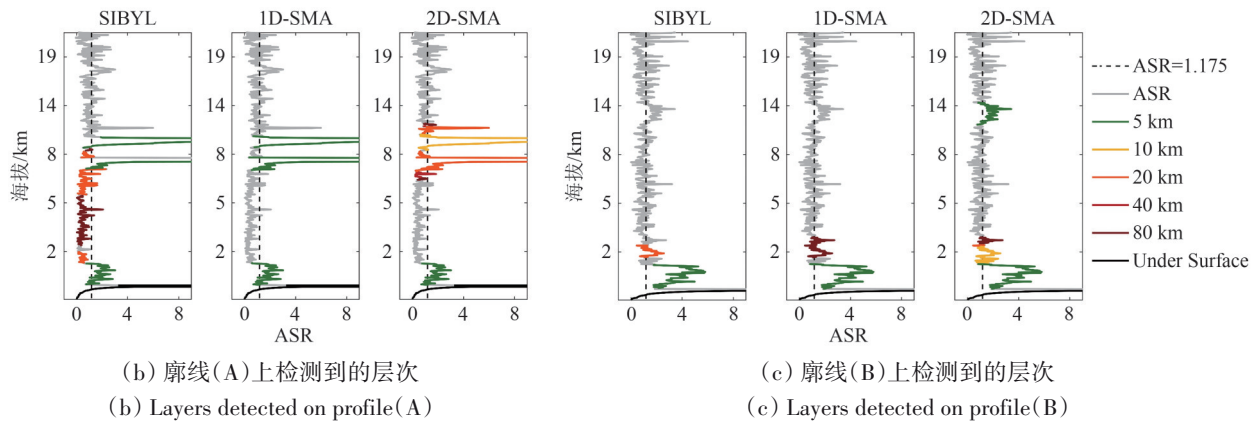
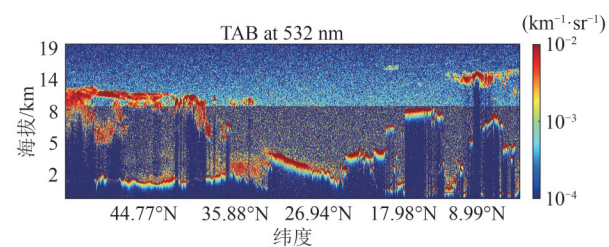


图4 SIBYL、1D-SMA、2D-SMA算法廓线检测结果对比(起始时间:2017年12月10日02:27:04 UTC)
Fig.4 Comparison of the layers detected by the SIBYL, 1D-SMA and 2D-SMA on a single profile
(Start point: 10 December 2017, 02:27:04 UTC)

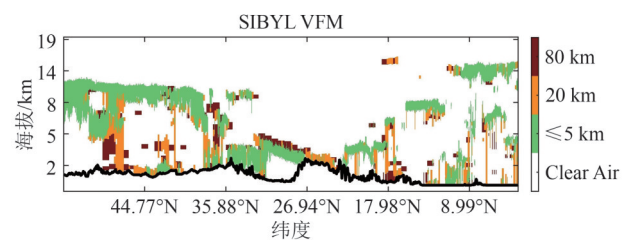
3.2 场景检测对比

为对比3种算法在垂直剖面示例场景中的检测效果,图5(b)、(c)、(e)分别展示了SIBYL、1D-SMA、2D-SMA检出层次的垂直特征掩膜VFM(Vertical Feature Mask),图5(d)、(f)、(g)是SIBYL与1D-SMA、SIBYL与2D-SMA、1D-SMA与2D-SMA两两检测结果的差异,绿色为共有层次标记,红色、蓝色为独有层次标记,图5(a)是CALIOP 532 nm场景的TAB伪彩图,可以用于目视检验层次掩膜的可靠性。图5(b)、(e)表明,5 km水平分辨率下,2D-SMA即标记出与SIBYL全

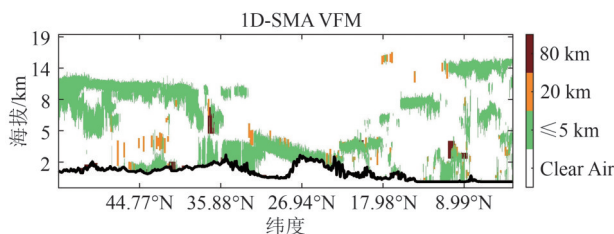
分辨率结果几乎相当的层次,表现出更高的检测效率。同时,在全分辨率下,2D-SMA检出的层次也比1D-SMA更多,主要体现在层次顶部和底部,如图5(g)所示,这是因为2D-SMA利用了相邻廓线的空间信息,对微弱层次更为敏感。此外,图5(b) SIBYL层次掩膜中较多厚层次下的20 km分辨率检测到的孤立长条区域,未被图5(c)展示的1D-SMA和图5(e)展示的2D-SMA检测识别为层次。参考图5(a) TAB伪彩图可知,该区域的SIBYL层次标记很可能是低分辨率下层次覆盖高估的结果(Mao等, 2021a, 2024)。这个现象与图4(b) 2—5 km高度处的可疑标记类似。



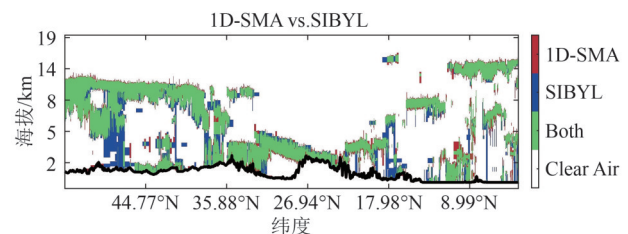
(a) 场景TAB伪彩图
(a) TAB map of the scene



(b) SIBYL检出层次的垂直特征掩膜
(b) The VFMs detected by the SIBYL



(c) 1D-SMA检出层次的垂直特征掩膜
(c) The VFMs detected by the 1D-SMA



(d) SIBYL与1D-SMA检测结果的差异
(d) Differences between the output of the SIBYL and the 1D-SMA

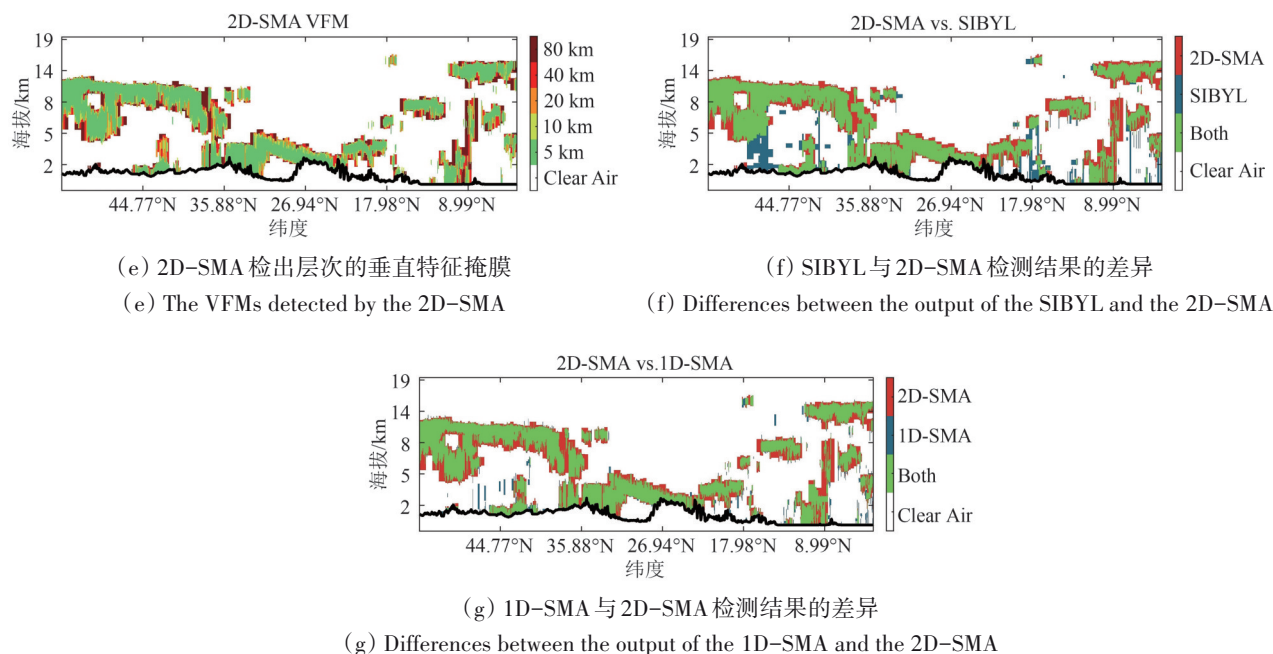


图5 SIBYL、1D-SMA、2D-SMA 场景检测结果对比(起始时间点:2017年12月28日18:43:24 UTC)

Fig.5 Comparison of the layers detected by the SIBYL, 1D-SMA and 2D-SMA in a scene

(Start point: 28 December 2017, 18:43:24 UTC)

3.3 全球多场景检测统计对比

本研究对比了SIBYL、1D-SMA和2D-SMA在同时段观测中检出的层次总面积与各高程位置的层次频数。统计数据来自2017年12月1日至31日的CALIOP全球连续场景观测。2016年9月起,由于CALIOP间歇发射低能量激光,43.75°S—2.2°N、93°W—35°E间的南大西洋异常SAA(South Atlantic Anomaly)区域(https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/advisory.php [2024-10-10])内,532 nm波段的Level 1B TAB值极低,且包含噪声。本文参考CALIPSO团队建议和过往研究经验(Mao等,2022),不使用这部分数据进行分析。

图6是SIBYL、1D-SMA和2D-SMA检测到的层次总面积统计对比,不同分辨率下标记的层次在柱状图中用不同颜色显示。每个子图里,各段柱状图上方的百分数是以SIBYL检出的层次总面积为100%的相对值。每种算法全分辨率检测到的层次总面积标记在柱状图右侧。子图(a)、(b)、(c)分别是全场景、日间场景以及夜间场景的统计图。总体上,2D-SMA通常检测到比SIBYL和1D-SMA更多的层次面积。全时段统计中,2D-SMA标记的层次面积比SIBYL多50.45%,比1D-

SMA多32.45%;日间场景统计中,比SIBYL多79.78%,比1D-SMA多27.63%;夜间场景统计中,比SIBYL多30.13%,比1D-SMA多37.42%。2D-SMA相较SIBYL和1D-SMA增加的层次面积在日间多于夜间,低信噪比的日间场景更能体现2D-SMA的算法优势。信噪比相对高的夜间场景中,2D-SMA也能保持较SIBYL层次检出率的提升。此外,2D-SMA在5—20 km水平分辨率检测中,大致取得了与SIBYL全分辨率(5—80 km)检测相同或更大的检测面积。日间场景统计中,2D-SMA在5—10 km水平分辨率下检出的层次面积是SIBYL全分辨率结果的1.046倍,这说明就算仅保留2D-SMA 5—10 km水平分辨率的检测结果,也将取得更高分辨率与检测效率的层次产品。

图7显示了全分辨率下3种算法在各高程位置检测到的层次频数,水平方向以5 km为间隔采样,垂直方向按照CALIOP在相应高程的垂直分辨率采样。蓝色曲线代表SIBYL,绿色曲线代表1D-SMA,红色曲线代表2D-SMA。3种算法检出层次频数在各高程位置上的分布大致相同。当场景信噪比较高时,如图7(c)夜间低空处,三者性能差异并不显著;5—10 km处,无论昼夜,2D-SMA相比SIBYL和1D-SMA检出层次的频数明显增加;

15 km 以上的日间场景，2D-SMA 检出层次频数略低于 1D-SMA，一方面可能是因为 2D-SMA 选取 1.175 作为背景大气 ASR_{ideal} ，另一方面，在日间场

景过量噪声下，1D-SMA 可能存在少量难以使用经验参数剔除的误检测。

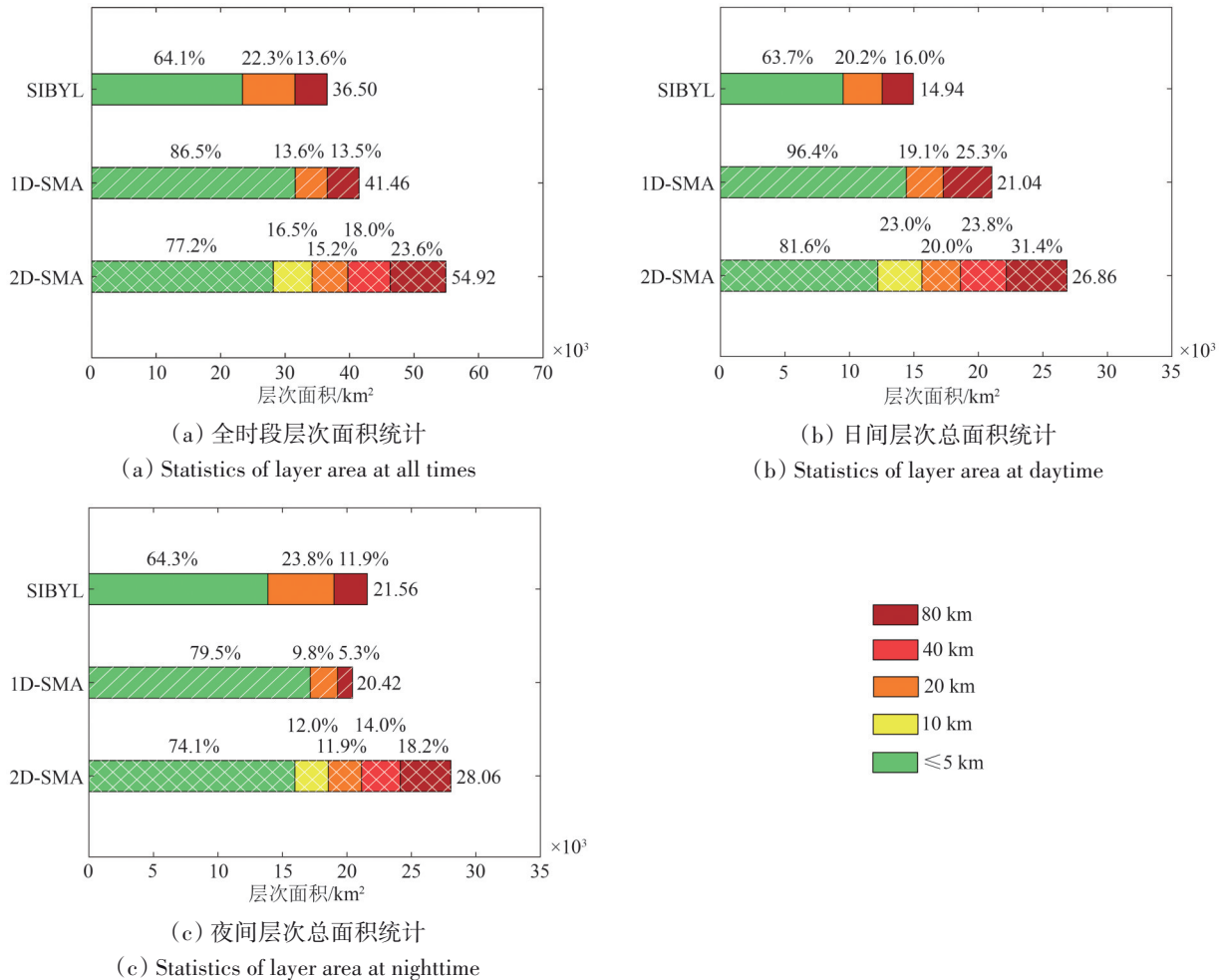


图6 SIBYL、1D-SMA、2D-SMA 算法检测到的层次面积统计(统计样本:2017年12月 CALIOP 的连续全球观测)

Fig.6 Statistics of layer area detected by the SIBYL, 1D-SMA and 2D-SMA (Statistical sample: The continuous global observations of CALIOP in December, 2017)

3.4 可靠性评估

检出层次的面积和频率仅能评估算法检测层次的覆盖量，并不直接反映层次边缘的准确性。因此，本研究沿用了 Mao 等 (2024) 基于退偏比 DR (Depolarization Ratio) 的可靠性评估方案，评价 2D-SMA 算法标记层次的可靠程度。其基本思路是：不同粒子的退偏比存在差异，清洁大气退偏比的理想值为 0.0035，而冰云的退偏比通常情况下不会小于 0.05 (Liu 等, 2005; Vernier 等, 2011)。图 8 中，绿色曲线代表 1D-SMA 相比 SIBYL 额外检测到的冰云区域 (认为与 CALIOP 官方分类的冰云相连接的层次仍属于冰云)，红色曲线代表

2D-SMA 相比 1D-SMA 额外检测到的冰云区域，蓝色曲线代表 2D-SMA 冰云区域周围 1 信号点 (5 km 水平采样间隔) 范围内的大气区域。图 8 (a) 是上述 3 个区域积分体退偏比 VDR (Volume Depolarization Ratio) 频率的分布，图 8 (b) 是累积频率的分布。参与统计的数据与 3.3 节使用的数据相同。图 8 (a) 显示，1D-SMA 相比 SIBYL、2D-SMA 相比 1D-SMA 额外检测到的冰云区域，VDR 频率百分数峰值均位于 0.05 附近，远离清洁大气的估计值 0.0035，接近 CALIOP 云分类标准下的冰云的表现，而 2D-SMA 冰云区域周围非层次大气的 VDR 则集中于 0.0035 附近，接近理想清洁大气的 VDR，和两组

额外冰云区域差异明显。图 8 (b) 显示, 84.57% 的 1D-SMA 额外冰云和 83.80% 的 2D-SMA 额外冰云 VDR 大于 0.05, 对于周围大气区域, 这一比例仅在 10.34%。证明 1D-SMA 相比 SIBYL 增加的冰云标记较为可靠, 2D-SMA 相比 1D-SMA 增加的冰

云标记区域特性也较为可靠。上述对比说明了 2D-SMA 比 SIBYL 和 1D-SMA 检测到更多冰云, 同时较好地证明了 2D-SMA 层次标记的可靠性和层次边缘定位的准确性。

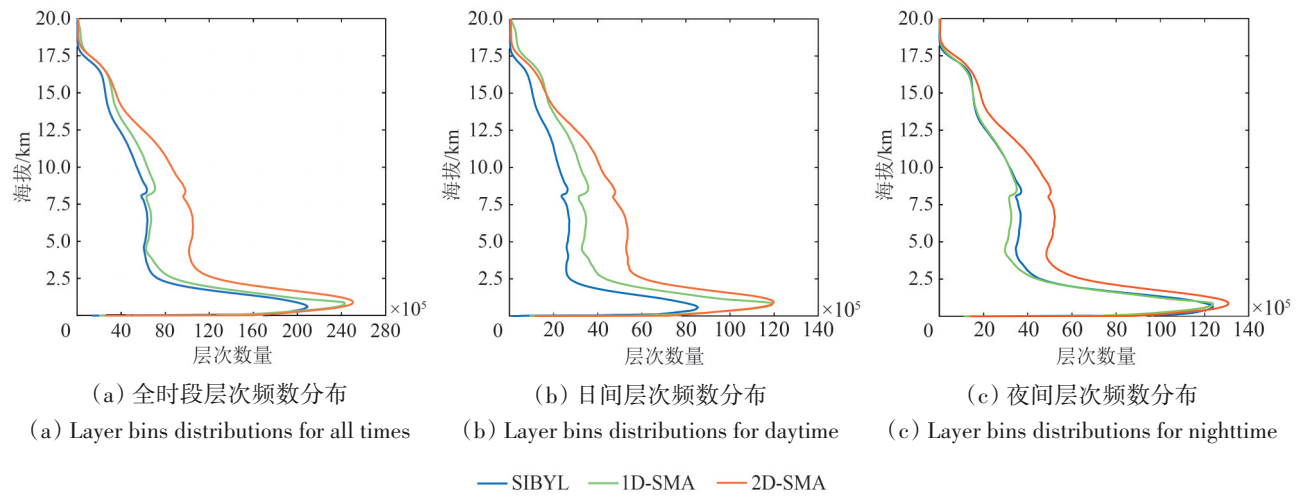


图 7 SIBYL、1D-SMA、2D-SMA 算法检测到的层次频数(5 km 水平分辨率)于各高程位置上的分布
(统计样本:2017 年 12 月 CALIOP 的连续全球观测)

Fig.7 Distributions of the layer bins over height (At 5 km horizontal resolution) detected by the SIBYL, 1D-SMA and 2D-SMA
(Statistical sample: The continuous global observations of CALIOP in December, 2017)

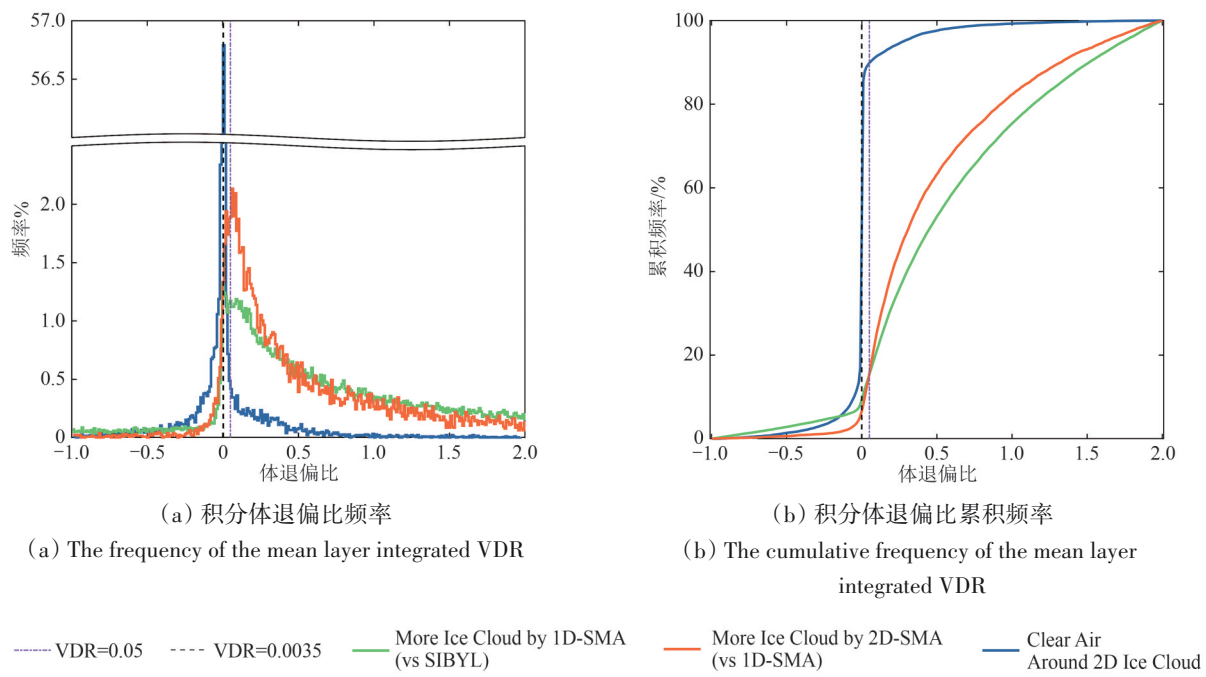


图 8 基于冰云退偏比的 2D-SMA 可靠性评估(统计样本:2017 年 12 月 CALIOP 的连续全球观测)
Fig.8 Reliability evaluation of the 2D-SMA based on ice cloud DR (Statistical sample: The continuous global observations of CALIOP in December, 2017)

4 结 论

星载激光雷达能实现全天时、全天候、全球范围的云—气溶胶垂直特征观测，在当前针对云—气溶胶变化及其造成的气候影响的研究中发挥着重要作用。本文提出了一种适用于星载激光雷达数据的二维简单多尺度层次检测方法，并与CALIOP官方算法（SIBYL）和现有一维多尺度算法（1D-SMA）进行了对比，评估了算法性能，得出如下结论：

（1）2D-SMA基于伯努利概率分布模型，充分利用了相邻廓线的空间关联性，算法模型简便快捷，相比于SIBYL、1D-SMA算法，不依赖阈值阵列或主观经验过滤参数，能够有效改善微弱层次漏检和粗分辨率层次误判的问题。

（2）2D-SMA在日间和夜间均检出比SIBYL和1D-SMA更多的层次，尤其体现在信号较弱的层次顶部和底部，并纠正了部分SIBYL、1D-SMA结果中的过检测。统计结果表明，全分辨率下2D-SMA检出的层次面积比SIBYL多50.45%，比1D-SMA多32.45%；5—20 km水平分辨率下，2D-SMA检测到与SIBYL全分辨率下面积相当甚至更多的层次。

（3）基于冰云退偏比的可靠性验证表明，2D-SMA相比1D-SMA多检出的冰云有83.80%的IVDR在0.05以上，符合冰云特征，较好地证明了算法可靠性。

2D-SMA算法相较CALIOP官方算法提高了激光雷达数据层次检测的检出量和精度，实现过程简单快捷，具备一定的研究潜力和应用前景。背景大气理想衰减散射比（ ASR_{ideal} ）的选择是多尺度假设检验算法能否取得精确结果的关键。由于实际探测中，背景气溶胶垂直分布并不均匀，2D-SMA全场景统一的 ASR_{ideal} 取值（1.175）在某些区域可能过于严格，结合更精细的背景气溶胶统计数据可以优化这一情况。由于当前缺乏与星载激光雷达同步监测的真实云和气溶胶分布数据，与检出率指标相关的算法性能评估仍然有待开展。此外，本研究仍然采用前期研究对检测窗口和尺度的设计方案，由于CALIOP后向散射区域的垂直分辨率在不同高程区间有所差异，是否使用统一的信号点数规定窗口尺度，在实际卫星产品的生产过程中，是值得进一步探讨的话题。

志 谢 CALIPSO团队公开的云—气溶胶观测数据 (<https://asdc.larc.nasa.gov/project/CALIPSO>)。

参考文献(References)

- Brooks I M. 2003. Finding boundary layer top: application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(8): 1092-1105 [DOI: 10.1175/1520-0426(2003)020<1092:FBLTAO>2.0.CO;2]
- Cesana G, Chepfer H, Winker D, Getzewich B, Cai X, Jourdan O, Mioche G, Okamoto H, Hagihara Y, Noel V and Reverdy M. 2016. Using in situ airborne measurements to evaluate three cloud phase products derived from CALIPSO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(10): 5788-5808 [DOI: 10.1002/2015JD024334]
- Comerón A, Sicard M and Rocadenbosch F. 2013. Wavelet correlation transform method and gradient method to determine aerosol layering from lidar returns: some comments. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(6): 1189-1193 [DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00233.1]
- Davis K J, Gamage N, Hagelberg C R, Kiemle C, Lenschow D H and Sullivan P P. 2000. An objective method for deriving atmospheric structure from airborne lidar observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(11): 1455-1468 [DOI: 10.1175/1520-0426(2000)017<1455:AOMFDA>2.0.CO;2]
- Huang Z W, Wang Y K, Bi J R, Wang T H, Li W R, Li Z and Zhou T. 2022. An overview of aerosol lidar: progress and prospect. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(5): 834-851 (黄忠伟, 王雍恺, 闭建荣, 王天河, 李武仁, 李泽, 周天. 2022. 气溶胶激光雷达的国内外研究进展与展望. *遥感学报*, 26(5): 834-851) [DOI: 10.11834/jrs.20221388]
- Kim M H, Kim S W, Yoon S C and Omar A H. 2013. Comparison of aerosol optical depth between CALIOP and MODIS-Aqua for CALIOP aerosol subtypes over the ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(23): 13241-1352 [DOI: 10.1002/2013JD019527]
- Kim M H, Omar A H, Vaughan M A, Winker D M, Trepte C R, Hu Y X, Liu Z Y and Kim S W. 2017. Quantifying the low bias of CALIPSO's column aerosol optical depth due to undetected aerosol layers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(2): 1098-1113 [DOI: 10.1002/2016JD025797]
- Kou L L, Gao H Y, Lin Z J, Liao S J, Ding P M, Zhu W, Shang J and Hu X Q. 2023. Status and prospect of cloud measurement by satellite active remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(9): 2041-2059 (寇蕾蕾, 郜海阳, 林正健, 廖淑君, 丁丕满, 朱维, 商建, 胡秀清. 2023. 星载主动遥感测云现状与展望. *遥感学报*, 27(9): 2041-2059) [DOI: 10.11834/jrs.20221080]
- Lelieveld J, Pozzer A, Pöschl U, Fnais M, Haines A and Münzel T.

2020. Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. *Cardiovascular Research*, 116(11): 1910-1917 [DOI: 10.1093/cvr/cvaa025]
- Li Z Q, Guo J P, Ding A J, Liao H, Liu J J, Sun Y L, Wang T J, Xue H W, Zhang H S and Zhu B. 2017. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality. *National Science Review*, 4(6): 810-833 [DOI: 10.1093/nsr/nwx117]
- Liu G, Shi W Z and You R. 2008. Cloud-aerosol lidar of America. *Spacecraft Engineering*, 17(1): 78-84 (刘刚, 史伟哲, 尤睿. 2008. 美国云和气溶胶星载激光雷达综述. *航天器工程*, 17(1): 78-84) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2008.01.015]
- Liu Z Y, Omar A H, Hu Y X, Vaughan M A, Winker D M, Poole L and Kovacs T. 2005. CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document. Part 3: Scene Classification Algorithms. NASA-CNES document PC-SCI-203. NASA
- Liu Z Y and Sugimoto N. 2002. Simulation study for cloud detection with space lidars by use of analog detection photomultiplier tubes. *Applied Optics*, 41(9): 1750-1759 [DOI: 10.1364/AO.41.001750]
- Ma X, Bartlett K, Harmon K and Yu F Q. 2013. Comparison of AOD between CALIPSO and MODIS: significant differences over major dust and biomass burning regions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(9): 2391-2401 [DOI: 10.5194/amt-6-2391-2013]
- Mao F Y, Liang Z X, Pan Z X, Gong W, Sun J, Zhang T H, Huang X, Zang L, Lu X and Hong J. 2021a. A simple multiscale layer detection algorithm for CALIPSO measurements. *Remote Sensing of Environment*, 266: 112687 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112687]
- Mao F Y, Luo X, Xu W W and Gong W. 2024. Multiscale hypothesis testing theory and methods for aerosol and cloud layer detection of lidar. *Remote Sensing of Environment*, 300: 113915 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113915]
- Mao F Y, Pan Z X, Wang W, Li S W and Gong W. 2018. Iterative method for determining boundaries and lidar ratio of permeable layer of a space lidar. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 218: 125-130 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.07.007]
- Mao F Y, Shi R X, Rosenfeld D, Pan Z X, Zang L, Zhu Y N and Lu X. 2022. Retrieving instantaneous extinction of aerosol undetected by the CALIPSO layer detection algorithm. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(16): 10589-10602 [DOI: 10.5194/acp-22-10589-2022]
- Mao F Y, Zhao M D, Gong W, Chen L Z and Liang Z X. 2021b. Layer detection algorithm for CALIPSO observation based on automatic segmentation with a minimum cost function. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 261: 107498 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.107498]
- Mao J T, Zhang J H and Wang M H. 2002. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 60(5): 625-634 (毛节泰, 张军华, 王美华. 2002. 中国大气气溶胶研究综述. *气象学报*, 60(5): 625-634) [DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2002.05.014]
- Pal S R, Steinbrecht W and Carswell A I. 1992. Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent. *Applied Optics*, 31(10): 1488-1494 [DOI: 10.1364/AO.31.001488]
- Redemann J, Vaughan M A, Zhang Q, Shinozuka Y, Russell P B, Livingston J M, Kacenelenbogen M and Remer L A. 2012. The comparison of MODIS-Aqua(C5) and CALIOP(V2 & V3) aerosol optical depth. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(6): 3025-3043 [DOI: 10.5194/acp-12-3025-2012]
- Shonk J K P, Hogan R J, Edwards J M and Mace G G. 2010. Effect of improving representation of horizontal and vertical cloud structure on the Earth's global radiation budget. Part I: Review and parametrization. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(650): 1191-1204 [DOI: 10.1002/qj.647]
- Su J, Wu Y H, McCormick M P, Lei L Q and Lee III R B. 2014. Improved method to retrieve aerosol optical properties from combined elastic backscatter and Raman lidar data. *Applied Physics B*, 116(1): 61-67 [DOI: 10.1007/s00340-013-5648-2]
- Teich M C. 1981. Role of the doubly stochastic Neyman type-A and Thomas counting distributions in photon detection. *Applied Optics*, 20(14): 2457-2467 [DOI: 10.1364/AO.20.002457]
- Twomey S. 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34(7): 1149-1152 [DOI: 10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2]
- Vaillant de Guélis T, Vaughan M A, Winker D M and Liu Z Y. 2021. Two-dimensional and multi-channel feature detection algorithm for the CALIPSO lidar measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(2): 1593-1613 [DOI: 10.5194/amt-14-1593-2021]
- Vaughan M A, Powell K A, Winker D M, Hostetler C A, Kuehn R E, Hunt W H, Getzewich B J, Young S A, Liu Z Y, McGill M J and Getzewich B J. 2009. Fully automated detection of cloud and aerosol layers in the CALIPSO lidar measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(10): 2034-2050 [DOI: 10.1175/2009JTECHA1228.1]
- Vaughan M A, Winker D M and Powell K A. 2005. CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document. Part 2: Feature Detection and Layer Properties Algorithms. NASA-CNES document PC-SCI-202. NASA
- Vernier J P, Thomason L W and Kar J. 2011. CALIPSO detection of an Asian tropopause aerosol layer. *Geophysical Research Letters*, 38(7): L07804 [DOI: 10.1029/2010GL046614]
- Winker D M, Vaughan M A, Omar A, Hu Y X, Powell K A, Liu Z Y, Hunt W H and Young S A. 2009. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(11): 2310-2323 [DOI: 10.1175/2009JTECHA1281.1]

Two-dimensional simple multiscale algorithm for detecting cloud and aerosol layers from spaceborne lidar data

YU Hongyang¹, XU Weiwei¹, MAO Feiyue^{1,2}, ZANG Lin³, GONG Wei⁴

1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

4. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Spaceborne lidar is a unique approach for the research and monitoring of clouds and aerosols due to its ability to observe their vertical properties. The Cloud – Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) onboard the CALIPSO satellite has been operational in orbit for many years and has provided a large amount of profiling measurements of clouds and aerosols. Detecting the spatial locations of cloud and aerosol layers from lidar data is a prerequisite for accurately retrieving and extracting layer information. While the official CALIOP algorithm detects layers using empirical thresholds, many layers are missed in its output, which may explain the systematic underestimation of aerosol optical depth offered by CALIPSO compared with that by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Current hypothesis testing methods represented by the 1D-Simple Multiscale Algorithm (1D-SMA) determine whether a given signal belongs to a layer by verifying whether it conforms to the distribution hypothesis of background air. These methods eliminate the traditional empirical threshold array and improve the accuracy of layer detection. However, none of the methods above have considered the spatial continuity of the layer signals in the 2D vertical profiling scene, and missed layers still occur in their cases.

This study further proposes a 2D-Simple Multiscale Algorithm based on Bernoulli probability distribution, which replaces the empirical threshold with a statistical probability model. For a background atmosphere bin, the probabilities that its signal intensity is greater or less than the ideal value are both 1/2. If the signals at each bin are independent, then the distribution of the number of signal bins within the detection window that are greater or less than ideal value follows a multiple Bernoulli experiment. We design a probability of belonging to a layer based on the signal intensity of all the bins in the detection window, which reflects their overall deviation from the ideal background atmosphere bins. The new algorithm marks that the center bin of the detection window as layer bin when the probability is small to a certain extent, which means it deviates far from background atmosphere. We use 2D layer detection windows, which cover multiple profiles at different horizontal resolutions, to utilize the spatial correlation of signals on adjacent profiles.

Statistical comparing experiment based on the continuous global observations of CALIOP in December, 2017 shows that, at full horizontal resolution (5—80 km), the new algorithm detects 50.45% and 32.45% more layer area than the official CALIOP algorithm and 1D-SMA, respectively. When the new algorithm is applied at a horizontal resolution of 5—20 km, it achieves a comparable or greater area of detected layers than that of the official algorithm at 5 – 80 km horizontal resolutions. Moreover, this study demonstrates the reliability of the layers identified by the new algorithm by evaluating the depolarization ratio of ice clouds.

In general, the new algorithm effectively reduces the missing of weak layers compared with the official CALIOP algorithm. The new algorithm is also simple and easy to implement, with certain research potential and application prospects.

Key words: remote sensing, spaceborne lidar, CALIOP, cloud and aerosol, layer detection, multiscale

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 42322109); National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFF0809400); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2042025kf0047)