

利用船载激光云高仪遥感北极海雾

叶进^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 丁锦锋^{1,2}, 谢海玲^{1,2}

(1. 国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073;

2. 中国气象局高影响天气重点开放实验室 长沙 410073)

Email: yejin@nudt.edu.cn

摘要: 北极海雾是一种严重的灾害性天气, 通常导致能见度急剧降低, 其发生往往对航海和航空构成巨大挑战。了解北极海雾的特性对于提高北极地区海雾预报的准确性具有重要作用。Vaisala CL31 激光云高仪因其对液态水含量的高灵敏度, 是探测和获取海雾垂直结构的有效手段。在这项工作中, 提出了一种基于激光云高仪后向散射系数廓线海雾检测和海雾厚度反演算法。工作中涉及到的数据集为 2019 年 9 月至 2020 年 9 月 MOSAiC 期间北极星号科考船观测到的数据。结果表明, 与能见度仪海雾检测结果相比, 所提算法的海雾检测结果平均偏差在 5% 以内。同时, 北极海雾具有明显的日变化和季节变化趋势, 夏季海雾厚度基本上在 300 m 以下, 以高浓度大粒子为主。此外, 北极海雾与大气边界层之间存在显著相关性, 边界层高度与海雾厚度之间的相关系数为 0.7, 平均绝对误差为 65.86 m。实验结果显示, 反演得到的海雾层顶部与大气湿度廓线的变化吻合良好。

关键词: Vaisala CL31 激光云高仪; 北冰洋; 海雾; 垂直结构; 微物理参数

1、研究背景

在过去的几十年里, 北极海冰的覆盖范围在夏季和冬季都显著减少^[1], 这将允许开放水域船只在夏季沿着北极航线穿过北极^[2]。Smith 和 Stephenson 估计^[3], 与通过苏伊士运河的传统路线相比, 从西太平洋经北极到欧洲的北极航线成本可能降低 50% 以上。然而, 常见的北极海雾对船舶航行安全构成了巨大威胁。海雾是由于水蒸气凝结成液态水导致的灾难性海洋天气现象, 导致能见度急剧下降 (小于 1000 m), 严重影响人类活动。由海雾引起的低能见度是北极海上作业中最严重的极端天气事件^[4]。据统计, 与海雾低能见度相关的经济和人员损失可与其他极端天气事件 (如龙卷风) 造成的损失相当。此外, 全球 32% 的海事事故和大西洋 40% 的事故发生在浓雾中^[5]。因此, 提高对海雾的预报能力极为重要。

尽管当前的数值天气预报能够预测海雾形成的有利条件 (如高相对湿度、辐射冷却和逆温), 但很难预测海雾发生的确切时间和地点^[6]。同时, 这些模型无法再现海雾的垂直结构和微物理过程。因此, 有必要使用观测设备实时跟踪驱动雾形成的关键过程和关键参数。激光雷达的后向散射系数对大气中的分子和粒子的散射截面具有较高的敏感性, 已被证明可用于雾的检测。Haeffelin 等人^[6] 使用激光雷达和激光云高仪的组合研究了雾的吸湿增长过程。Guy 等人^[7] 比较

了激光云高仪和被动遥感仪器在晴朗天空条件下对辐射雾的检测结果，进一步证明了激光雷达检测雾的可行性。最近，北极星号破冰船从2019年9月到2020年9月在北冰洋漂流的MOSAIC期间^[8]，配备了包括 Vaisala CL31 激光云高仪在内的多种观测设备，为评估北极海雾的特性提供了罕见的的数据。

2.1 北极海雾反演算法构建

通过比较激光云高仪在 15 m 高度处的后向散射系数与观测到的能见度之间的关系，确定了大雾、薄雾等现象对应的阈值。进一步基于激光云高仪后向散射系数廓线特征确定北极海雾厚度（见图 1）。为验证算法准确性，将能见度仪海雾的观测结果与所提算法的海雾反演结果进行比较，结果显示两种方法观测到的海雾发生频率差异几乎均在 5% 以内。

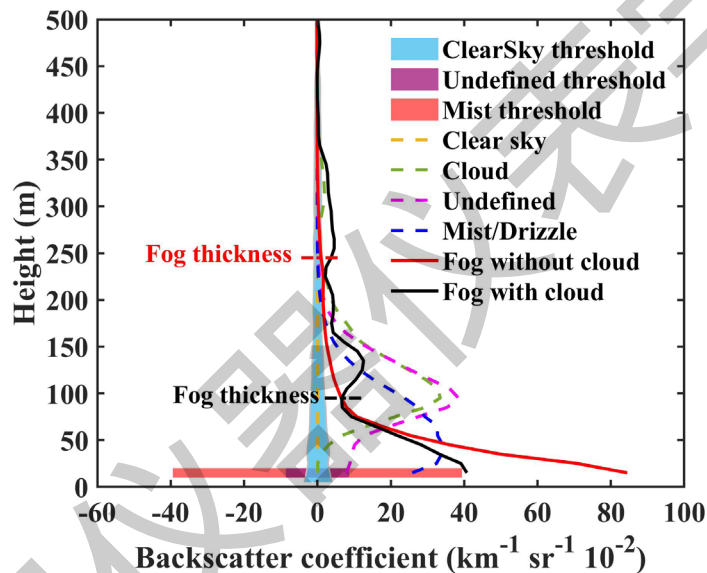


Fig.1 Arctic marine fog detection algorithm during MOSAiC expedition

2.2 北冰洋海雾日变化和季节变化特征

北冰洋海雾发生的频率呈现出显著的日变化和季节变化。夏季海雾发生频率在所有时段都明显高于其他季节。从 10 月到 5 月，海雾发生的频率低于 10%，而夏季期间海雾平均发生频率约为 40%。所有季节海雾发生频率都表现出一致的日变化趋势，海雾发生频率表现出夜间高、下午低的特征。尤其对于夏季，午夜海雾发生频率比下午平均发生频率高出 15% 以上。

2.3 北冰洋海雾厚度分布特征

北极海雾发生频率随温度变化呈现出双峰特性，发生频率分别在 $-30\sim-20^{\circ}\text{C}$ 和 $-5\sim 5^{\circ}\text{C}$ 达到极大值。此外， 0°C 附近海雾发生的概率明显高于过冷雾的形成概率。据统计，大约 25% 的海雾事

件发生在 -10°C 以下，而超过 70% 的海雾事件发生在 -5°C 至 5°C 范围内。

北极海雾的厚度几乎小于 300 米，概率密度函数在约 110 m 处达到峰值。 0°C 附近的海雾厚度分布相对集中，整体呈现单峰特性，雾厚度主要集中在 50 至 200 米的范围内。另一方面， -30°C 至 -20°C 之间的海雾厚度分布更为分散，显示出多峰特性。

2.4 北冰洋海雾厚度与边界层高度的比较

海雾厚度与边界层高度之间存在显著的相关性，相关系数达到 0.7，平均绝对误差为 65.86 m。如果海雾较薄时（激光信号能完全穿透海雾），反演得到的海雾顶部与逆温层顶部、相对湿度降低的位置具有明显的对应关系，进一步证明算法的准确性。然而当海雾较厚时，由于液态水对激光的衰减作用，可能会导致激光云高仪发出的信号在到达海雾顶部之前就被完全衰减，会最终导致识别出的海雾厚度被低估。

2.5 北冰洋海雾的微物理特性

基于激光云高仪和毫米波云雷达进行北极海雾微物理参数的反演。北极海雾的微物理特性也表现出显著的季节变化特征，夏季北极海雾表现为高浓度大粒子的特征，平均液态水含量约为 0.1 g/m^3 ，最大值甚至达到 0.6 g/m^3 。在秋季北极海雾以高浓度小液滴为主，在冬季和春季出现的海雾液滴浓度较小，粒子尺寸也较小。此外，北极海雾的液态水含量和有效粒子半径在垂直方向上随着高度的增加显著减小。

3、结论

在这项工作中，我们提出了基于船载激光云高仪后向散射系数的北冰洋海雾反演算法。通过比较能见度仪和反演算法之间海雾的识别结果，验证了所提算法的准确性。实验结果表明，发生在北冰洋的海雾呈现出显著的日循环和季节循环趋势，夏季是海雾发生的高峰期。此外，不同温度下海雾的发生频率呈现出明显的双峰结构。通过比较无线电探空仪得出的边界层高度与反演算法获得的海雾厚度，观察到两者之间存在显著的相关性。而且，海雾的顶部与相对湿度廓线下降位置对应的高度吻合，进一步证明了算法的准确性。最后，我们对北极海雾的微物理特性进行了统计分析，结果显示不同季节的海雾具有不同的微物理特征。与其他季节相比，夏季的海雾表现为高浓度大粒子特征。然而，这项工作仍面临一个重大挑战，即激光云高仪发射中心波长为 910 nm 的激光会在海雾中出现严重衰减。当浓雾发生时，激光可能无法完全穿透海雾层，导致测得的海雾顶部低于实际高度。因此，在未来，我们计划将激光云高仪与毫米波云雷达结合使用，以获得更准确的海雾厚度。同时，我们将在考察船（例如“雪龙二号”）上进一步验证算法的适用性和准确性。

参考文献

- [1] Alexeev V A, Walsh J E, Ivanov V V, et al. Warming in the Nordic Seas, North Atlantic storms and thinning Arctic sea ice[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12 (8): 084011.
- [2] Yi L, Li K F, Chen X, et al. Summer Marine Fog Distribution in the Chukchi – Beaufort Seas[J]. *Earth and Space Science*, 2023, 10 (2): 1-9.
- [3] Smith L C, Stephenson S R. New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110 (13): E1191-E1195.
- [4] Mariani Z, Huang L, Crawford R, et al. Enhanced automated meteorological observations at the Canadian Arctic Weather Science (CAWS) supersites[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14 (11): 4995-5017.
- [5] Koranyi D, Dorman C E, Lewis J M, et al. Marine fog: A review[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 143: 142-175.
- [6] Haefelin M, Laffineur Q, Bravo-Aranda J-A, et al. Radiation fog formation alerts using attenuated backscatter power from automatic lidars and ceilometers[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9 (11): 5347-5365.
- [7] Guy H, Turner D D, Walden V P, et al. Passive ground-based remote sensing of radiation fog[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15 (17): 5095-5115.
- [8] Shupe M D, Rex M, Blomquist B, et al. Overview of the MOSAiC expedition: Atmosphere[J]. *Elem Sci Anth*, 2022, 10 (1): 00060.