

白皮书

维萨拉激光云高仪
CL61的去极化应用

目录

简介	2
衰减后向散射和退偏比	2
标准云高仪产品	4
维萨拉云高仪产品系列的发展历程	5
冰云/液态云	6
降水类型	7
雾监测	9
融化层	10
结冰条件/过冷液态云	11
冻雨	12
边界层分析	13
沙尘层	15
野火烟雾	16
火山灰	17



致力于为可持续发展的未来提供可靠的气象观测

1 简介

云高仪是一种坚固耐用且具有成本效益的激光遥感仪器。除了传统上在航空领域用于检测云底高度外，云高仪也日益在多种应用中被用于垂直大气分析。

衰减后向散射廓线在云、边界层和抬高的气溶胶层分析中得到应用。如果进一步增加退偏比退偏比廓线，就可以直接识别液态云和冰云、降水类型以及融化层，同时还可提高气溶胶、烟雾、沙尘和火山灰的监测潜力。

高端分析云高仪可以通过网络无人值守运行的方式提供非常详细的大气信息。

配备去极化测量功能的维萨拉云高仪 C [61 是一款功能丰富的分析云高仪。本文档着重介绍 C [61 的广泛应用，同时通过图形和案例研究摘要说明如何对衰减后向散射和退偏比廓线的各种特征加以区分。凭借 C [61，维萨拉在高端云高仪分析和应用领域值得期待。



2 衰减后向散射和退偏比

衰减后向散射的测量

发出的激光脉冲在穿过大气层的路径上被遇到的每个粒子散射。部分光束被散射回到云高仪并被记录下来。其余的光束要么被吸收，要么被散射到云高仪接收不到的方向。被记录到的那部分后向散射光称为衰减后向散射。

衰减后向散射廓线中的信号强度和形状包含了大量大气相关信息。例如，液态云层会显示很强的峰值，并且信号在云内部迅速衰减。冰云的衰减后向散射信号相对较强，但测量信号在云中不会衰减。信号强度和衰减之间的差异可以归因于每种云中粒子的大小和数量浓度，其中冰云含有尺寸较大但数量较少的冰晶，而液态云则含有大量小液滴。

可以根据衰减后向散射区分多种特征，例如：

- 液态云
- 冰云
- 降水
- 雾
- 边界层特征
- 抬升的气溶胶层
- 融化层(降水时)

退偏比的测量

每个粒子通过保持或改变发射光的极化而与激光脉冲相互作用。具备去极化功能的 CL61 能够测量这些极化变化，并将之报告为名为“线性退偏比”的廓线，这种廓线通过平行和垂直（透射光）分量计算。去极化不但可以增加清晰度，而且还揭示了许多仅使用衰减后向散射很难或无法区分的特征。

例如，液态和固态降水粒子单靠衰减后向散射无法区分，但却可以通过测量线性退偏比进行区分。

冰云和液态云的去极化效应具有不同的特征：透射光在冰晶内部发生多次反射，就会导致检测到去极化信号。

相反，球形液滴不会导致接收到去极化信号，所以液态云的退偏比接近于零。

通过退偏比廓线能够直接识别多种大气特征。通过目测检查和衰减后向散射廓线并用，就能够快速可靠地识别前面提到的大气特征（云相、液态与固态降水、雾、融化层）。仅靠 CL61 等单波长激光雷达难以进行独立、确凿的气溶胶类型识别。

但如果能够获得诸如其他气象数据、模型后向轨迹或补充的研究级激光雷达测量值等额外信息，是有可能获得气溶胶表征的。具备去极化功能的 CL61 能够更加有效地检测以下气象特征：

- 过冷液态云
- 结冰和冰冻条件
- 混合层高度
- 沙尘
- 火山灰
- 森林火灾烟雾

CL61 还可分别报告可供进一步检查大气特征的平行和垂直信号分量，并对退偏比廓线进行灵活的时间平均。

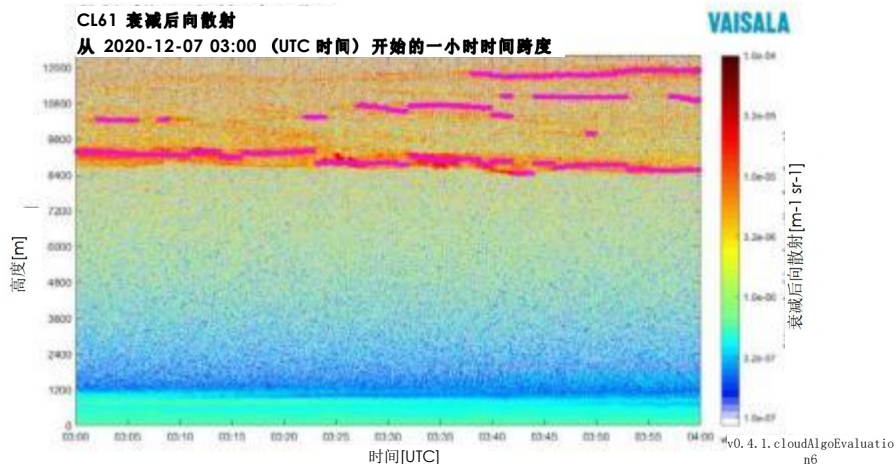
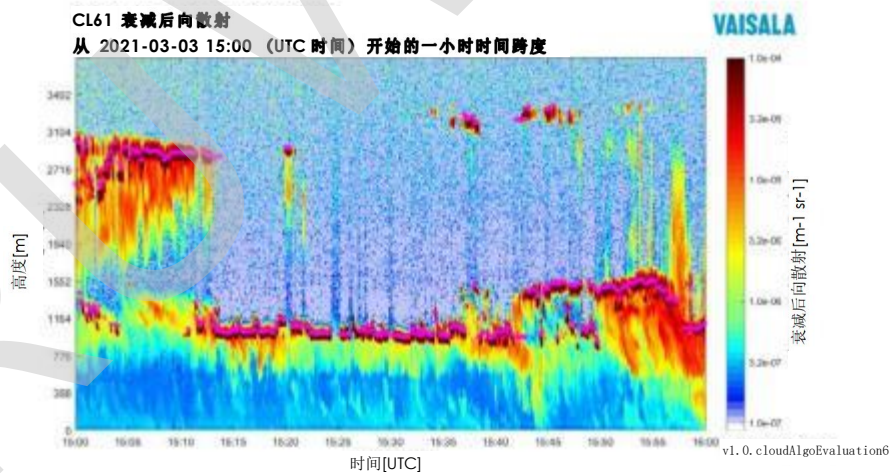
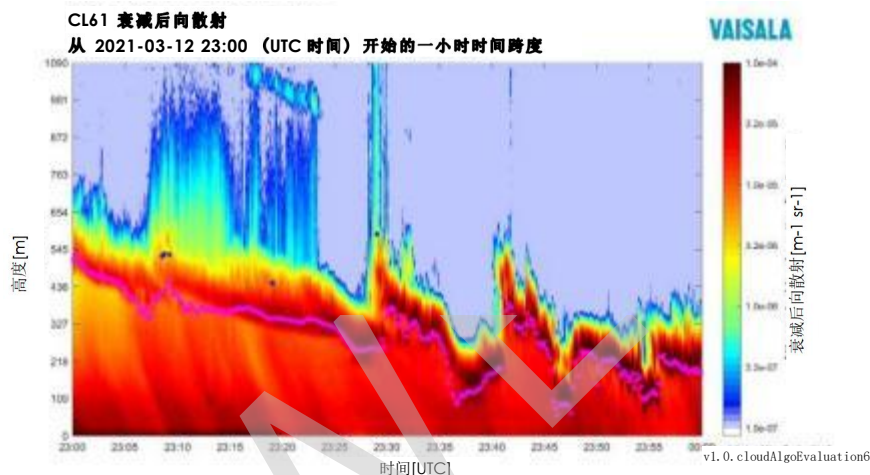


仅供参考

3 标准云高仪产品

CL61 能够报告包含云底高度、垂直能见度和天空条件（以 okta 为单位的云量）值的标准云高仪产品。除了标准云高仪产品外，还可以测量和存储衰减后向散射廓线，这一点与此前的维萨拉 CL31 和 CL51 型云高仪类似。CL61 能够检测低、中和高层云，一次最多可报告 5 个级别的云底高度。如果云底不可见，CL61 则会报告垂直能见度，类似于此前的维萨拉云高仪型号。

下图中的 x 轴表示 UTC 时间，y 轴表示高度(米)。品红色点代表云底，蓝点代表垂直能见度。示例案例在芬兰维萨拉试验场测量，分别可以看到有降水的低层云、中层云和多层的云。



4 云高仪产品系列的发展历程

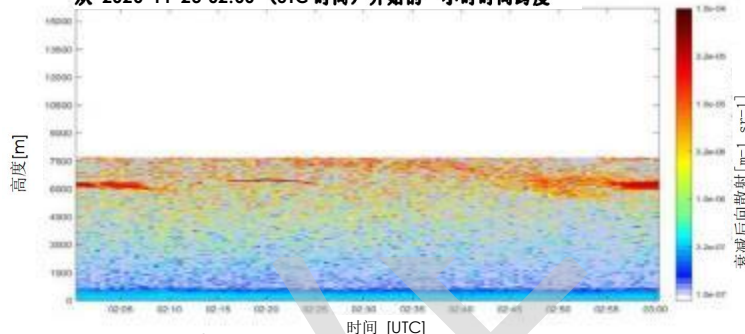
2020年11月23日，在芬兰万塔的维萨拉试验场，通过CL31、CL51和CL61检测到的冰云，从这些图形可以看出维萨拉不断发展的云高仪产品系列性能改进。所有图形展示的均为相同时间段在6公里以上高度检测到的冰云。

CL31测量范围仅有7.6公里，因此无法达到冰云的上部。CL51将测量范围扩大到15公里，而CL61扩大到15.4公里，两者均可检测到冰云的整个垂直范围。具备去极化功能的CL61不仅可以测量衰减后向散射，还可以测量线性退偏比，因而能够获得更多云特性信息。

信噪比(SNR)也不断提升。与之前的CL51型号相比，CL61的信噪比提高了5倍，与之前的CL31型号相比则提高了25倍。CL61性能的提高在检测到的细节数量上体现得最为明显。明显的信号电平差异可以归因于校准功能的差异，其中CL61针对衰减后向散射廓线使用了内置的云校准因子(依据O'Connor等人(2004)的方法)。

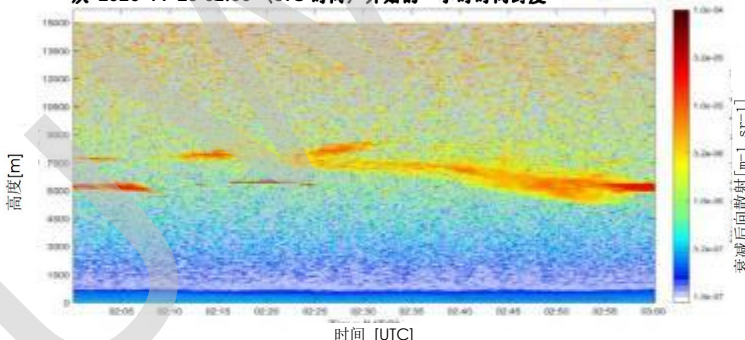
CL31 衰减后向散射

从 2020-11-23 02:00 (UTC 时间) 开始的一小时时间跨度



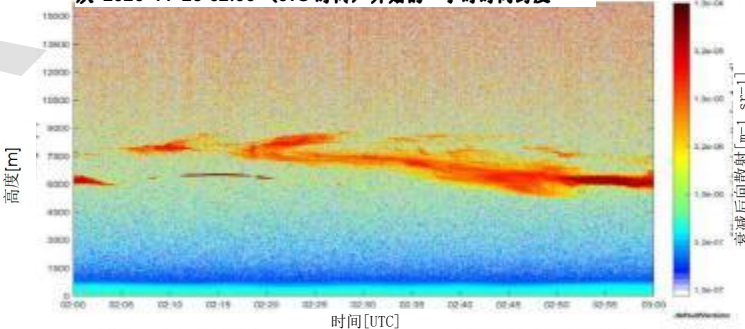
CL51 衰减后向散射

从 2020-11-23 02:00 (UTC 时间) 开始的一小时时间跨度

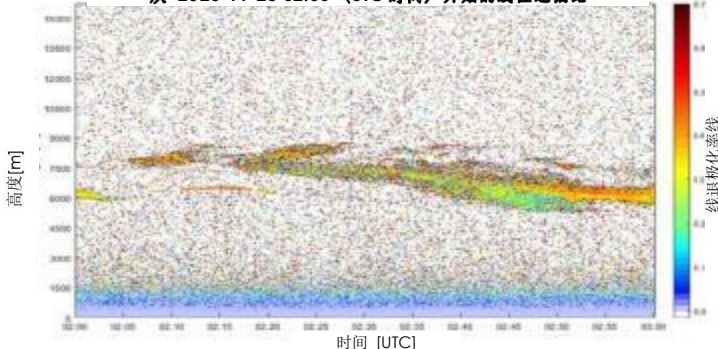


CL61 衰减后向散射

从 2020-11-23 02:00 (UTC 时间) 开始的一小时时间跨度



从 2020-11-23 02:00 (UTC 时间) 开始的线性退偏比

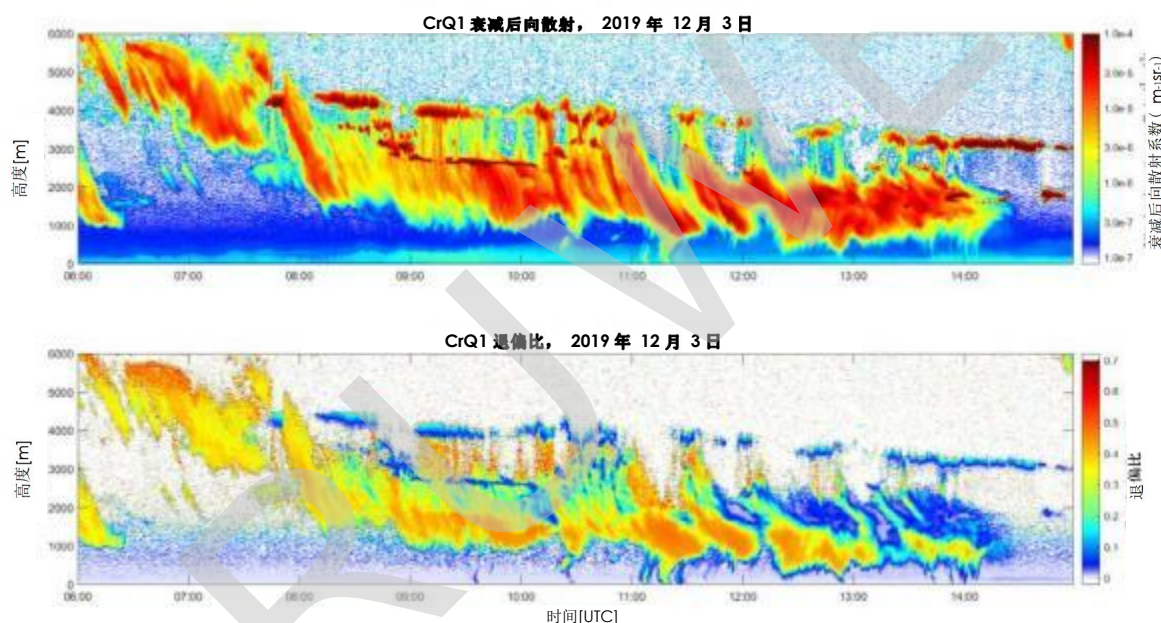


5 冰云/液态云

云高信息对于航空业至关重要，然而，对云类型的更多了解可以为评估潜在风险提供更多信息：比如，了解过冷液态云存在与否及其高度就比仅仅报告云底高度能够提供更多信息。

云类型信息还可用于诸如调查云对太阳能或辐射平衡的影响等等多种气象研究。冰云与混合相云或液态云等不同类型的云在衰减后向散射和线性退偏比这两个方面具有不同的特征。

以下是 2019 年 12 月 3 日在芬兰拉普兰测量的例子，显示了冰云和冰云之间以及冰云上方的冰云和液态层，这些在不同时间和高度水平上可以很容易地相互区分。



冰云在衰减后向散射数据中具有相对较强的信号，并且与液态云相比具有更大的退偏比值。

图中的冰几乎始终存在，其中衰减后向散射信号的幅度用黄色和红色表示，线性退偏比值信号用黄色和橙色表示。

相比之下，液态云显示出强烈的衰减后向散射信号，显示为暗红色，并且由于激光雷达信号在云中强烈衰减，液态云的信号在衰减后向散射和线性退偏比数据中通常被看成一个较浅的层。液态云的线性退偏比值接近于零，当光线在球形云滴中多次散射时，通常可以看到多重散射效应，特别是当光线穿透云层深处时（越向层上方，退偏比值越高）。

冰云和液态云的区分

冰云

- 相对较强的衰减后向散射信号
- 较少的冰晶导致看透或深入云层深处
- 冰晶形状不规则让线性退偏比更高

液态云

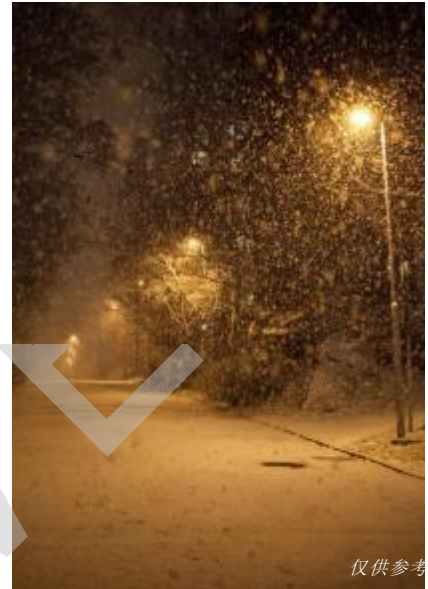
- 衰减后向散射中的强峰值
- 大量小云滴导致信号在云内迅速衰减
- 液滴的球形特性让线性退偏比较低

6 降水类型

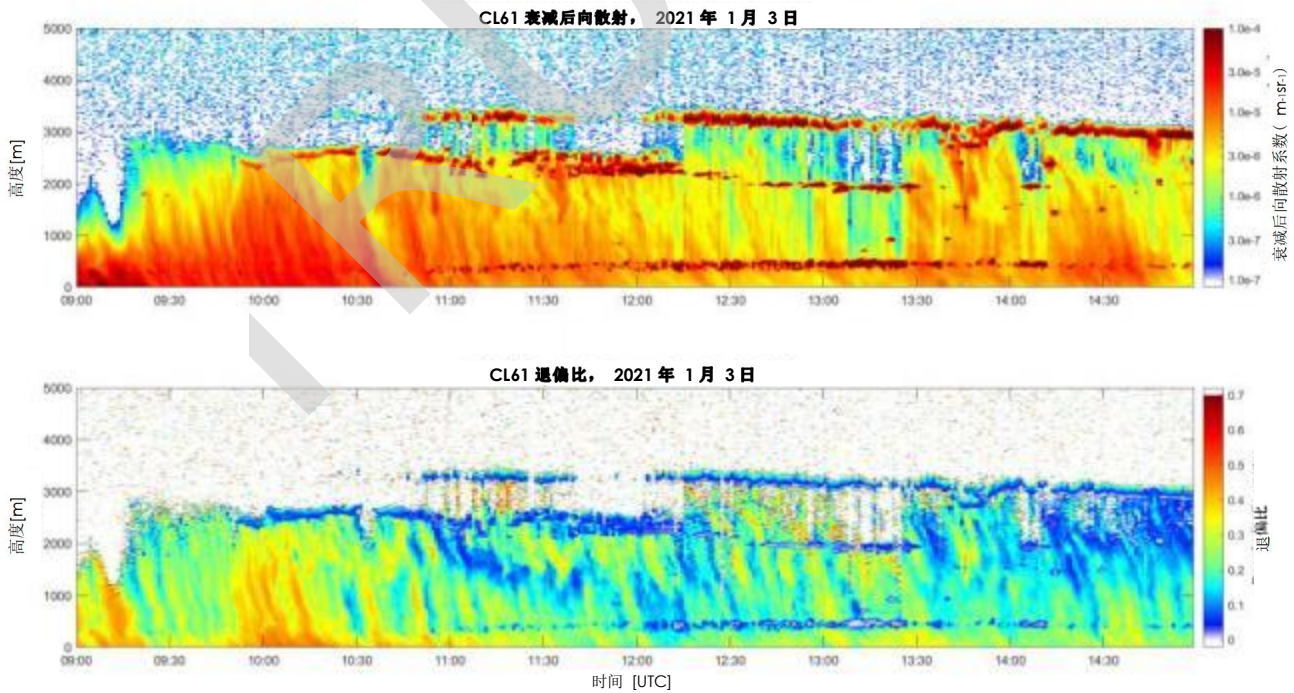
使用云高仪可以看到下降的降水，而现在 CL61 使用退偏比信息还可以区分降水类型。降雪的线性退偏比值较大 (>0.2)，能够与具有较小值的雨滴和细雨明显区分开。

2021 年 1 月 3 日在芬兰测量的地面降雪示例如下(注意中间和顶部存在液态层):

如 09:00 和 10:00 (UTC 时间) 之间所见，有时候激光雷达信号在降雪时衰减，也就是看不到液态云底。但在很多时候液态云底在降雪上方可见，比如在 10:00 (UTC 时间) 之后。在这个例子中，数据中的多个可见液态云层可以通过这些层中的较强的衰减后向散射信号和较低的退偏比值进行区分。



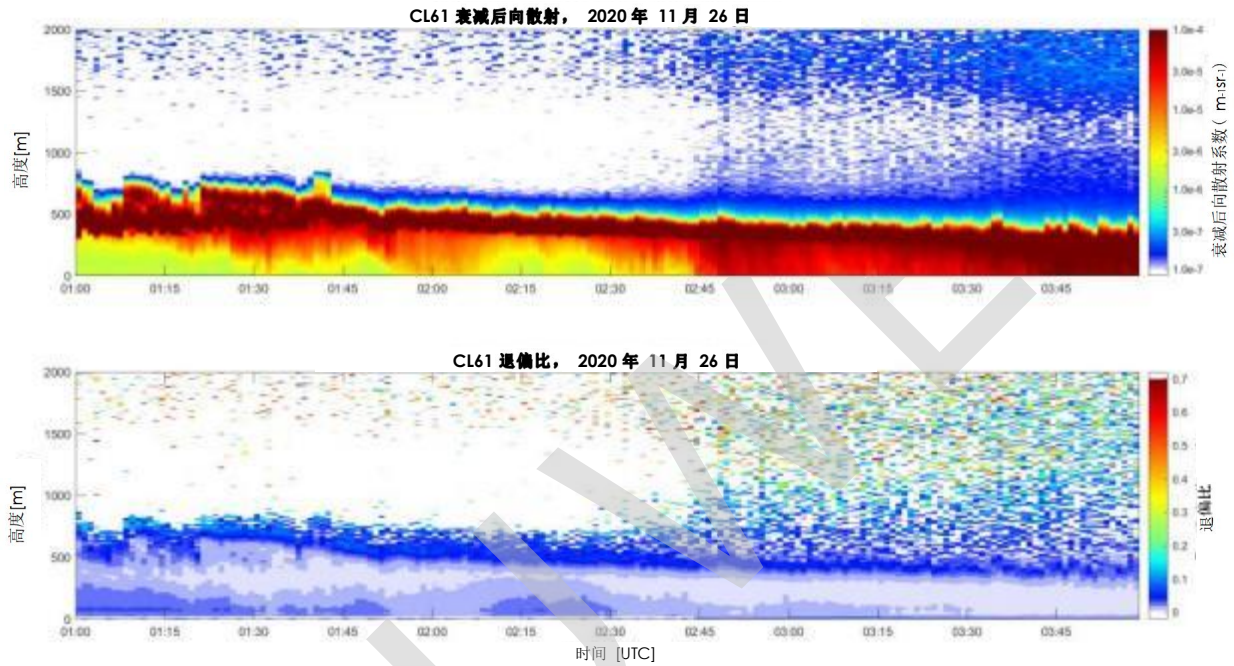
仅供参考



根据降水信号接近于零的线性退偏比测量值，就可以将液态降水与降雪加以区分。

下面是 2020 年 11 月 26 日在芬兰测量的一个例子，雨滴从上方的云层落下。

下降的降水并非总是能够到达地面，比如在 01:15 和 01:30 (UTC 时间) 之间的时段就是这样。2:45 (UTC 时间) 之后，雨才连续下落到地面。

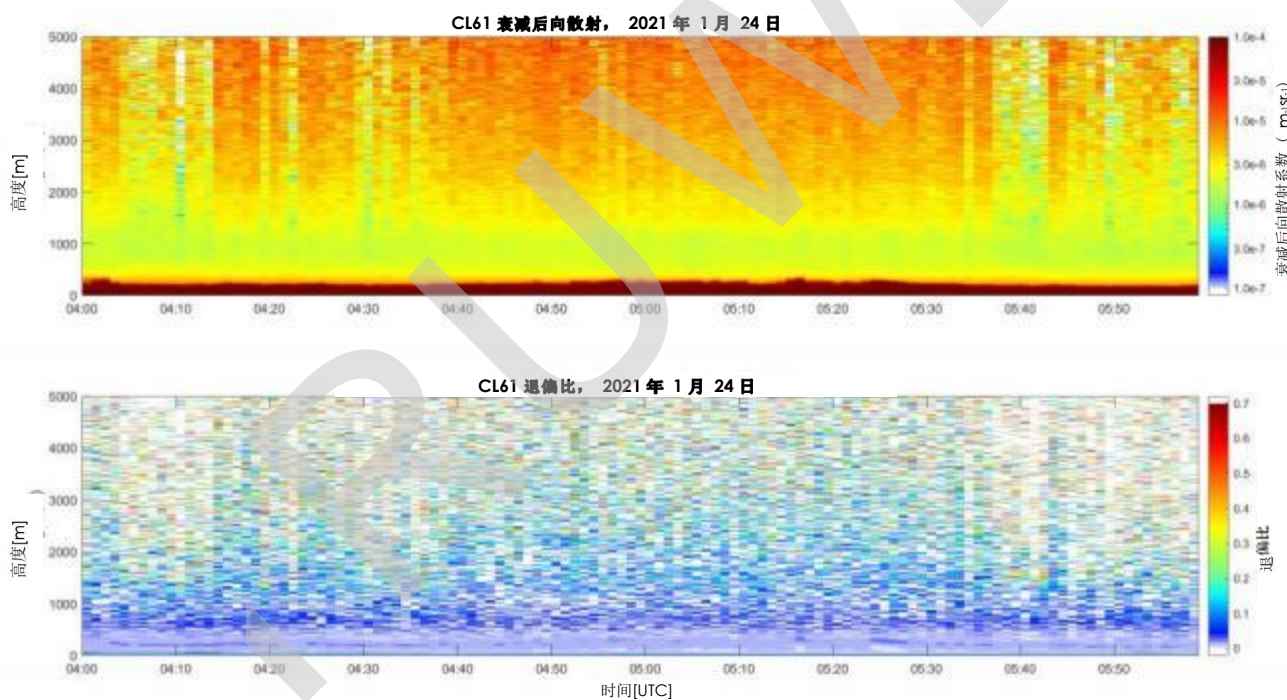


雾监测

雾及雾的形成由于航空安全考虑而受到机场的关注，同时也会影响道路安全或气温，对于人们的日常生活也非常重要。使用云高仪能够对雾进行有效监测。雾的特征体现在地面上的衰减后向散射强烈峰值

以及较低的线性退偏比值。信号在雾中通常会衰减，因此在雾层上方看不到信号(特别是在浓雾情况下)。雾的案例可以参考 2021 年 1 月 24 日在芬兰测量的数据示例，时间段为从 04:00 到 07:00 (UTC 时间)。

雾层(黄色和橙色)上方的背景噪声较强，原因是将测量设置为以低增益运行，以防止测量信号因雾的强烈响应信号导致饱和。

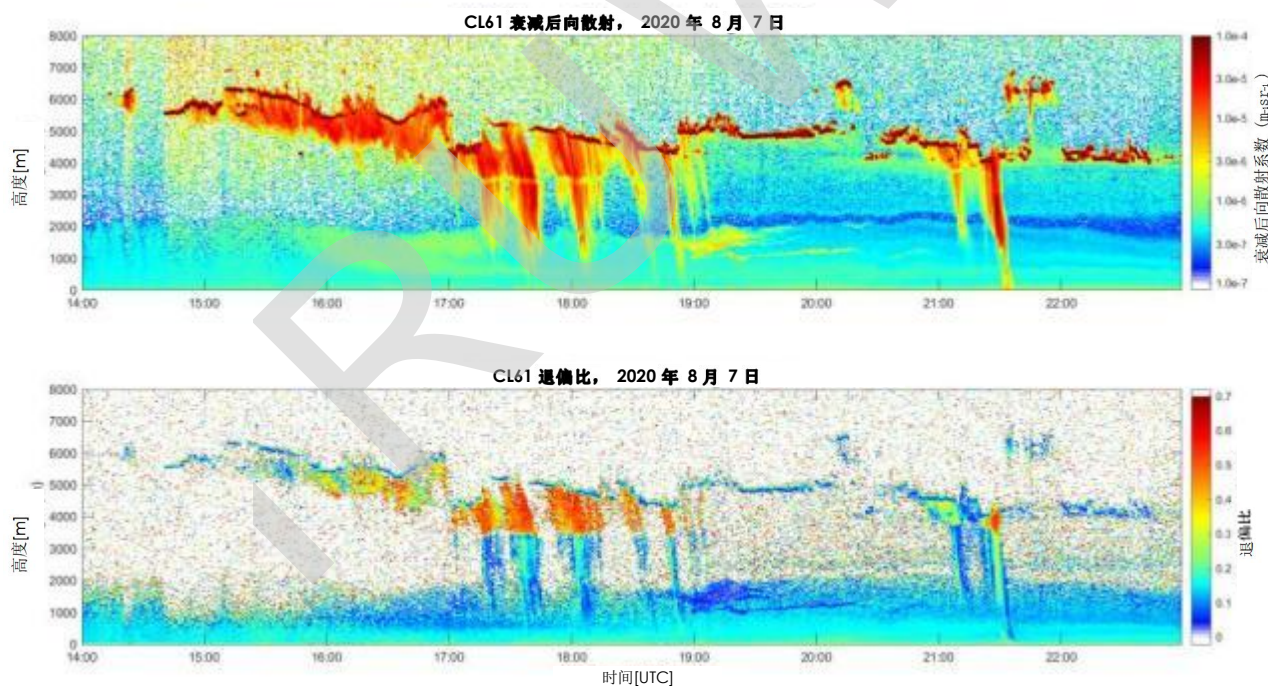


8 融化层

在研究降水区域内的数据时，使用云高仪还可以看到融化层（如果存在的话）。在云高仪衰减后向散射数据中，融化层可以用所谓的“暗带”区分（与雷达数据中的亮带形成对比）。2020年8月7日17:15至18:15（UTC时间）在英国卡丁顿3000米以上测量的示例中可以看到融化层。

在这种情况下，可以通过线性退偏比验证融化层，原因是较高的线性退偏比值（在0.4和0.5之间）对应的是下落的冰晶，而融化层以下（0.2以下）对应的是雨滴。

在本例中，降水并没有在所有时间都降落到达地面。融化层检测对于估计潜在的危险结冰情况以及其他气象研究非常有用。

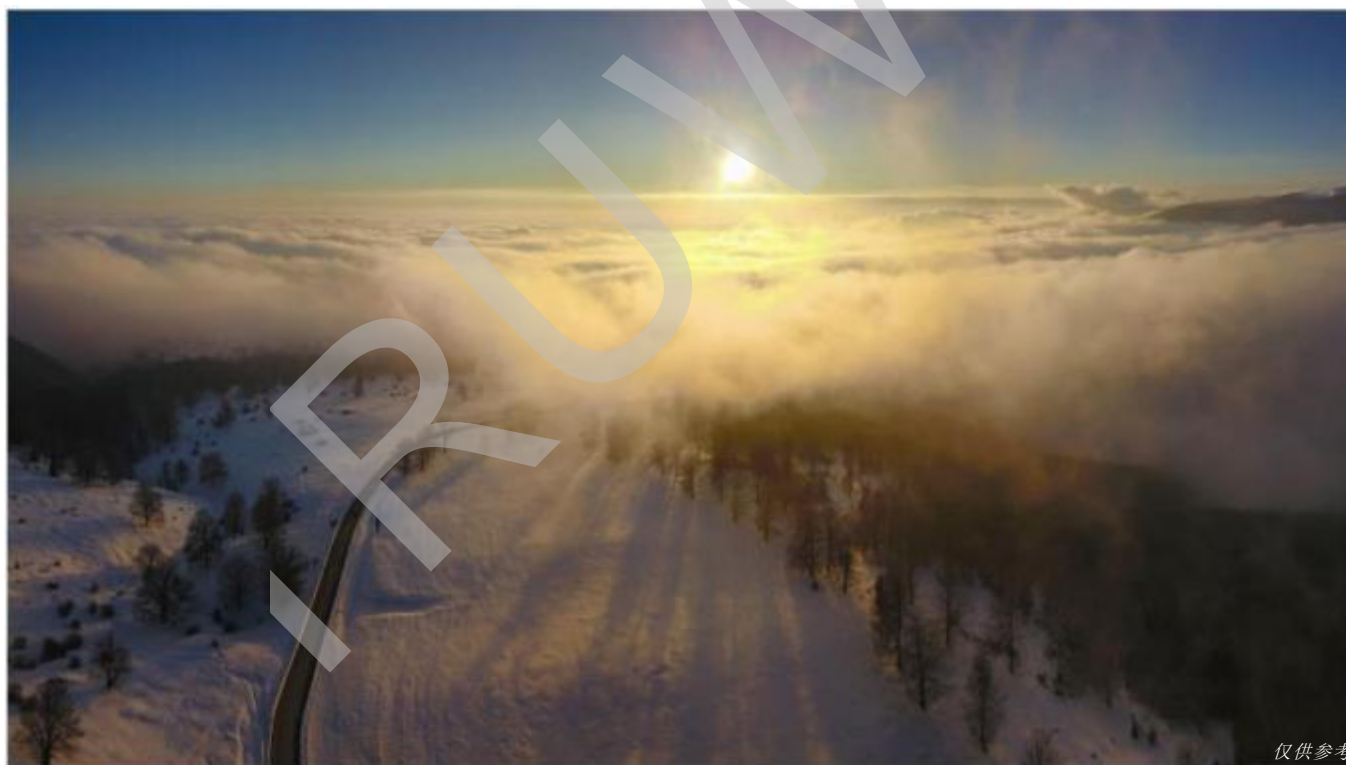


8 结冰条件和过冷液态云

从云高仪数据中可以识别出结冰条件，特别是利用过冷液态云的存在时间和高度信息。过冷液态云滴是温度低于零度时呈液态的云滴。如果这类液滴碰撞到表面（即风力涡轮机叶片、飞机等），则液滴会冻结在表面上。

由于云高仪不测量大气中的温度廓线，气温可以使用气象知识或通过其他测量进行估算。对流层气温通常随着高度的增加而降低，这样根据对地表温度的了解就可以粗略推测出气温。如果能够区分融化层，那么就更容易粗略估计出温度已降至零度以下的大气位置。

融化层上方的液态云包含的过冷液滴可能会对航空等行业造成危害。如果地面温度低于零度，上方液态云层可能含有过冷液滴，就可能已经在较低的高度（如风力涡轮机）造成结冰。冻雨或冻雾也可能会结冰。



仅供参考

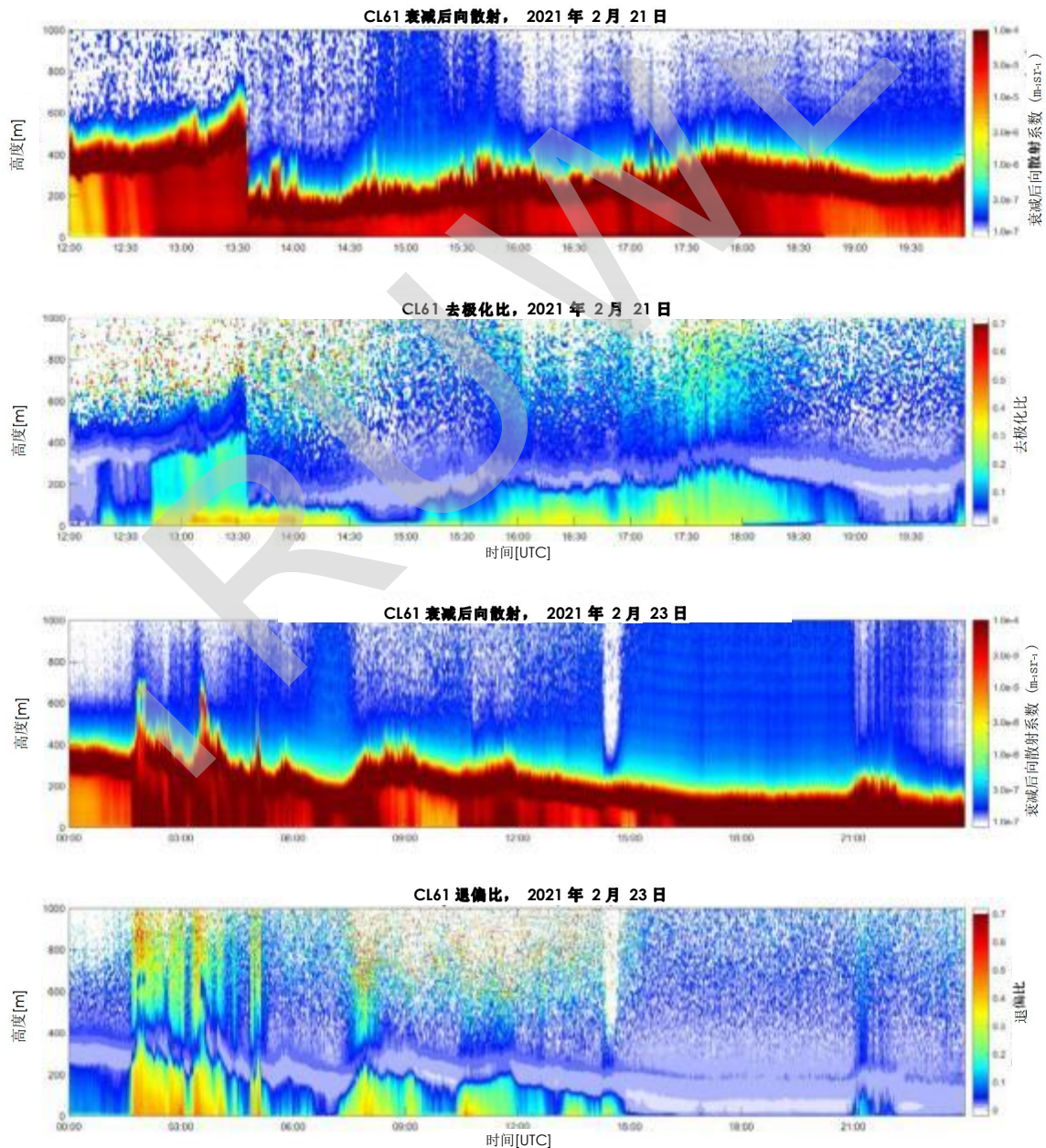
9 冻雨

当气温低于零度时有过冷雨滴落下，就会发生冻雨事件，导致建筑物上有可能形成严重的冰层。冻雨对于诸如道路安全、航空业和电网等涉及日常生活的很多方面都极其危险。

2021年2月21日至23日，

在维萨拉试验场对冻雨事件进行了测量。在2月21日14:30–15:15（UTC时间）和19:00–20:00（UTC时间）之间以及2月23日15:00（UTC时间）之后可以看到最为明显的冻雨信号，此时有降水到达地面，

线性退偏比表明是球形雨滴，同时另外测量的空气温度低于零度。在上述时间段内，多次人类观测以及其他维萨拉仪器（包括维萨拉前向散射FD70等现有气象传感器）均报告出现冻雨。

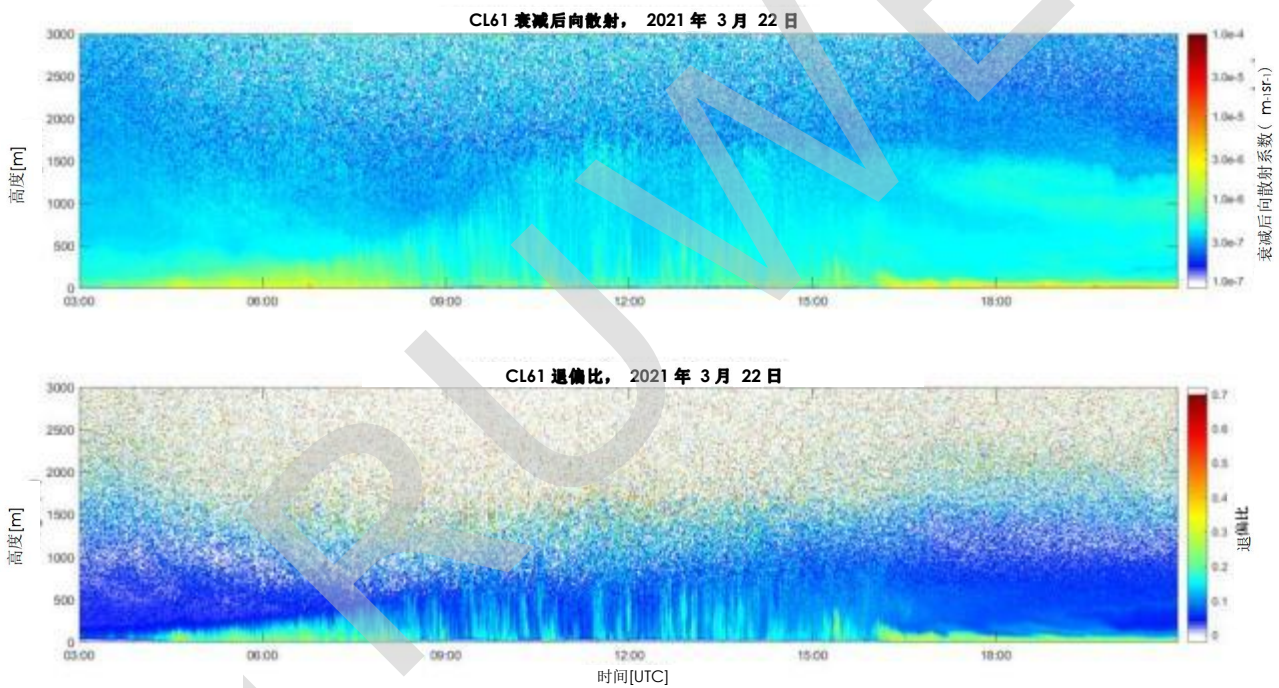


10 边界层分析

CL61 云高仪的衰减后向散射和线性退偏比数据也可用于边界层分析。边界层分析对于空气质量、数值模拟和气象研究等领域非常重要。

在下面 2021 年 3 月 22 日在芬兰测量的例子中，云高仪能够很好地检测到晴天边界层的变化。

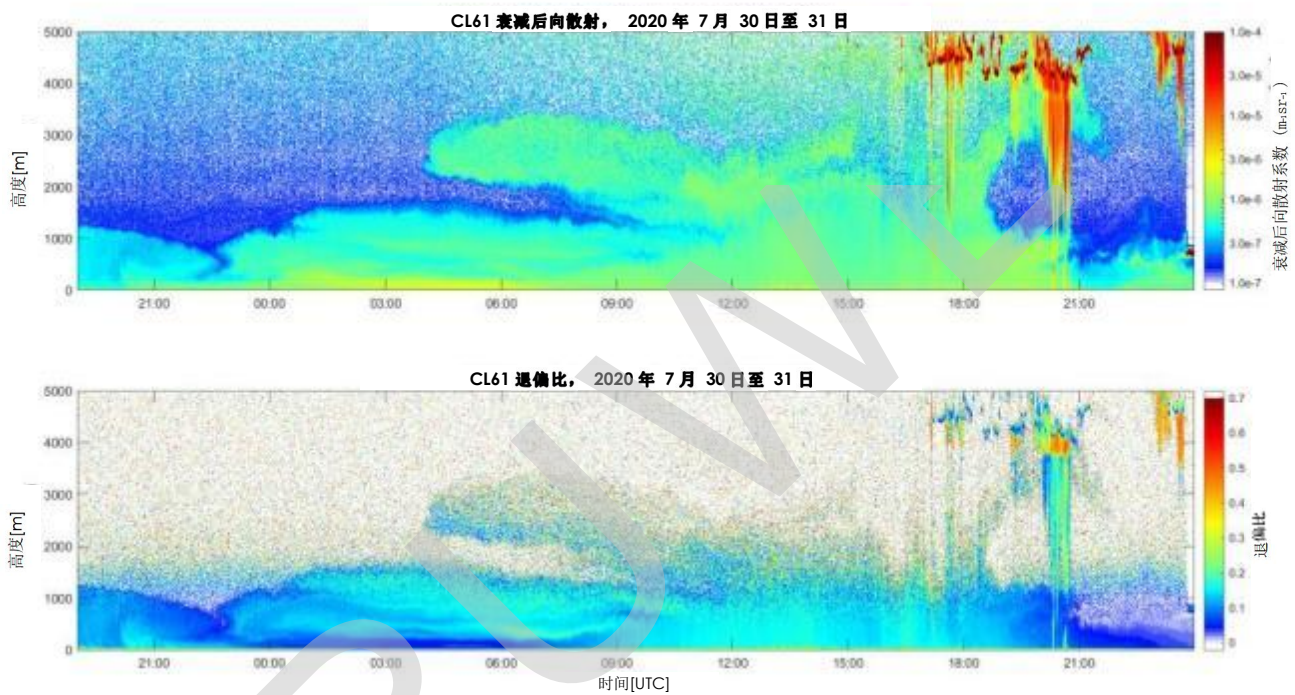
从气溶胶信号中可以清楚地看到白天边界层的生长，而在夜间，特别是在 17:00 (UTC 时间) 之后，可以看到残留的边界层。清晨也可以看到较浅的边界层。



另一个例子是 2020 年 7 月 30 日至 31 日在英国卡丁顿测量的，展现了不同气溶胶层在边界层的混合。使用去极化 CL61 测量的数据揭示了不同的气溶胶层，可以观察到气溶胶层的不同特性。

例如在下面的例子中，当观察线性退偏比数据时，2000 米以下的气溶胶信号和 2000 至 4000 米之间的另一层显示出不同的特征，表明气溶胶的类型和来源不同。

在 12:00 (UTC 时间)之后，可以看到上层与下层的混合。每个气溶胶层的线性退偏比的差异可能有助于对气溶胶类型和来源进行分类，此外，还可作为其他仪器的补充测量。



11 沙尘层

不同种类抬升的气溶胶层对于空气质量和航空业等均非常重要。多项气象研究通过结合使用不同类型的测量系统(包括遥感仪器和建模)增加对不同气溶胶类型特征的了解。

在下面 2020 年 3 月 28 日在英国卡丁顿测量的例子中，边界层信号上方存在一个具有不同特征的升高的气溶胶层。

英国气象局进一步的案例分析表明，边界层气溶胶是污染物或烟雾，

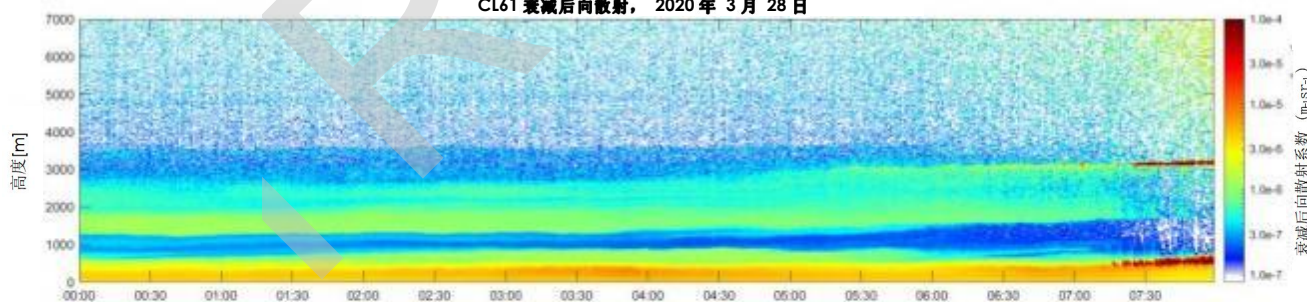
上方的抬升层是含有矿物粉尘的混合物（维萨拉可应要求提供英国气象局的完整测试报告 © 版权属英国皇家所有，2020，英国气象局）。

更进一步的分析通过整合来自 Raymetrics 研究级激光雷达和 HYSPLIT 轨迹分析的信息完成。

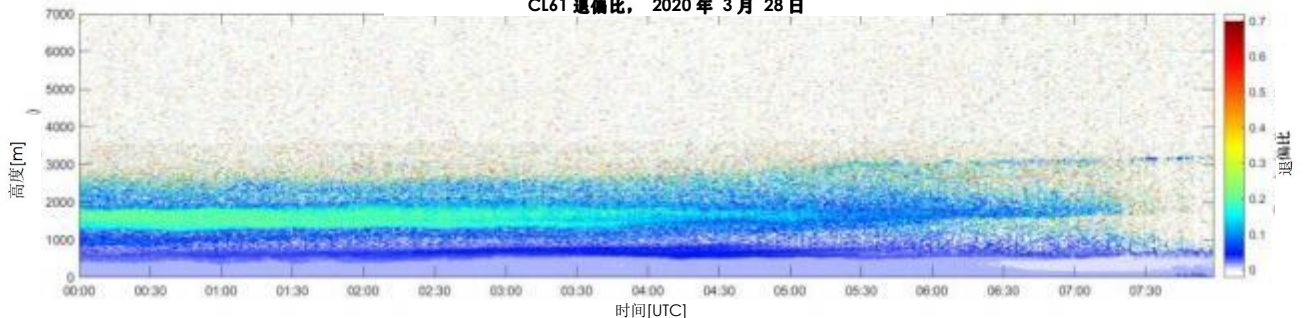


仅供参考

CL61 衰减后向散射, 2020 年 3 月 28 日



CL61 退偏比, 2020 年 3 月 28 日



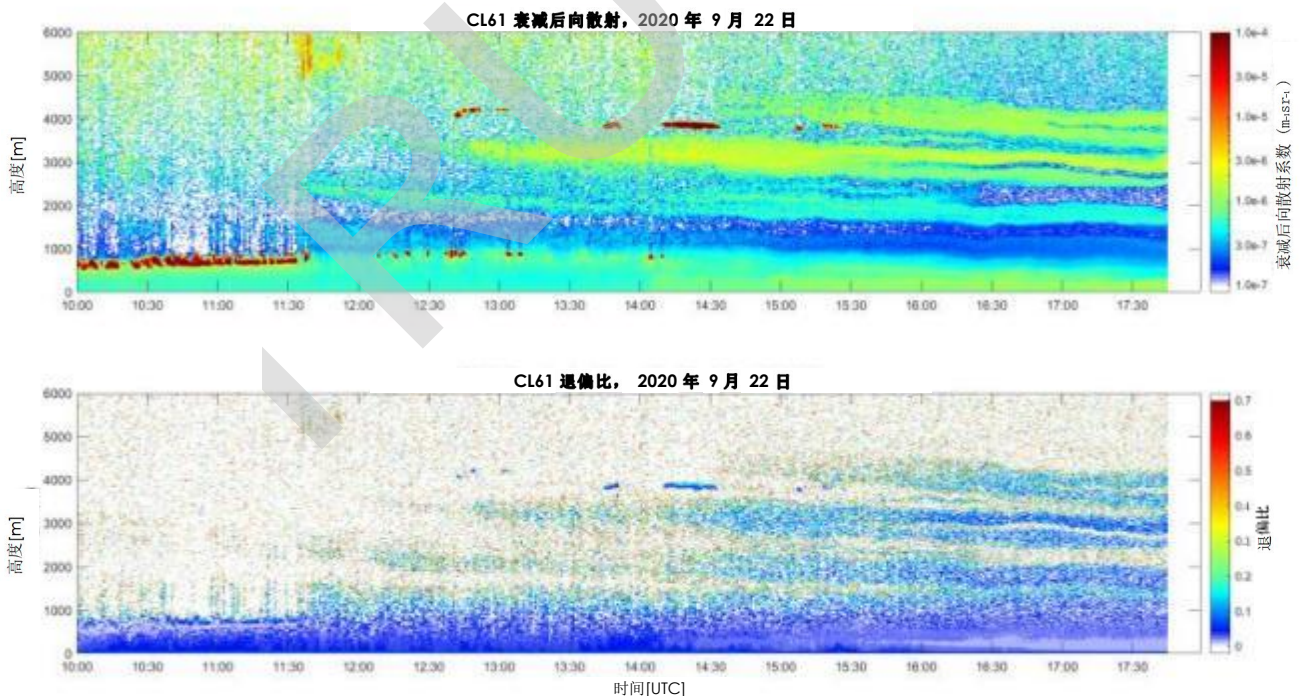
12 野火烟雾

2020年9月22日，在芬兰测量了加利福尼亚野火产生的烟羽。11:30 (UTC 时间)之后，在1000到4000米高度之间检测到烟雾层，并且可以在衰减后向散射和退偏比图像中加以识别。

这些介于0.06到0.08之间的去极化值与已知文献非常吻合。



仅供参考

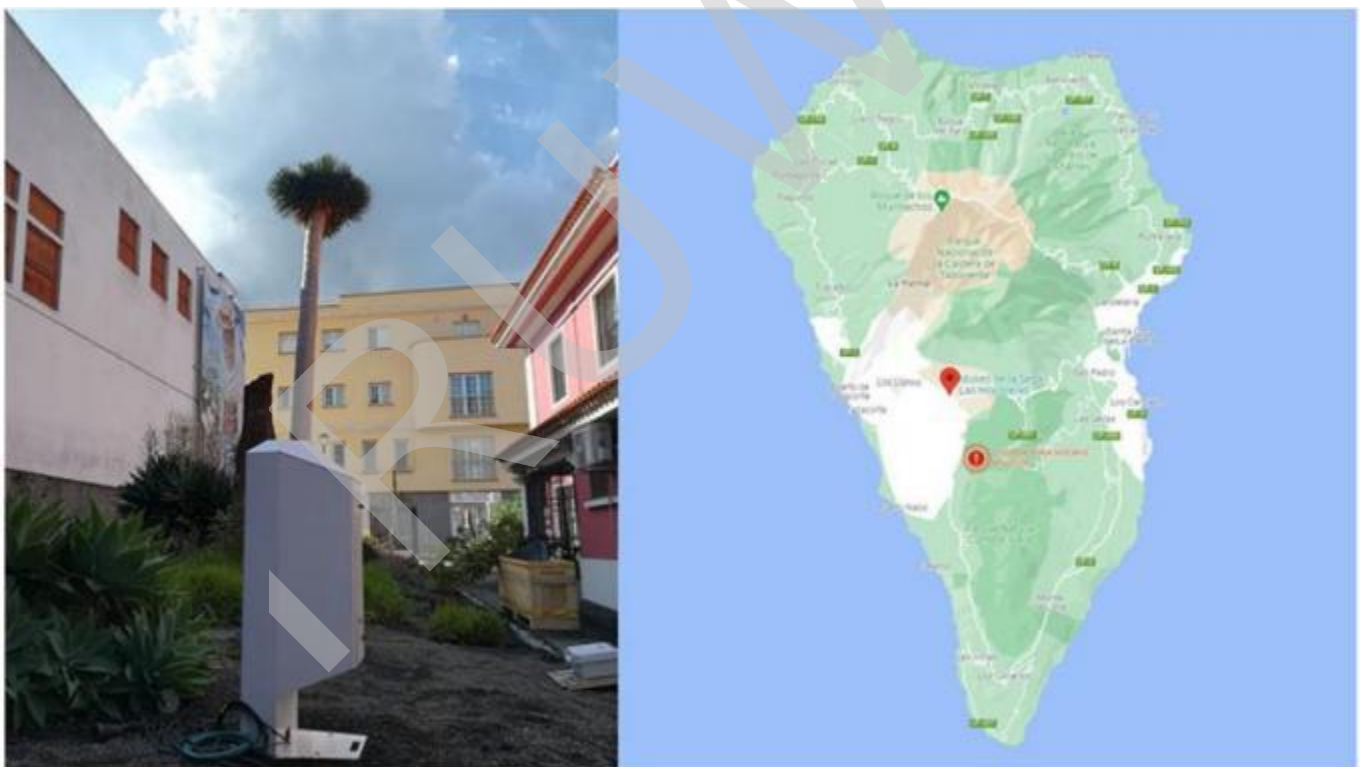


13 火山灰

检测火山灰是 CL61 的一项重要新功能。经过改进的 SNR 能够帮助检测较高的抬升的气溶胶层，这些气溶胶层有可能会对航空造成严重安全隐患。CL61 的线性退偏比可以为识别火山灰提供额外信息，并且也可作为预警系统的重要验证数据源。

在加那利群岛的拉帕尔马岛，Cumbre Vieja 火山喷发了三个月(2021年9月19日至12月25日)。熔岩流造成房产损失，火山灰羽流导致航线中断，火山灰和有毒气体造成的恶劣空气质量影响了当地居民的健康。

为了测量高处的火山灰层，CL61 被安装在埃尔帕索市政厅的院子里，位于 Cumbre Vieja 以北海拔 723 米的地方。拉帕尔马国际机场位于东海岸城镇圣克鲁斯附近。



左图，安装在埃尔帕索市政厅的CL61激光云高仪(图片由AEMET提供)。右图为拉帕尔马地图，地标显示CL61位于Cumbre Vieja以北(图片为谷歌地图)。

以下为与 AEMET 合作使用具备去极化功能的 CL61 观测拉帕尔马火山灰的研究。

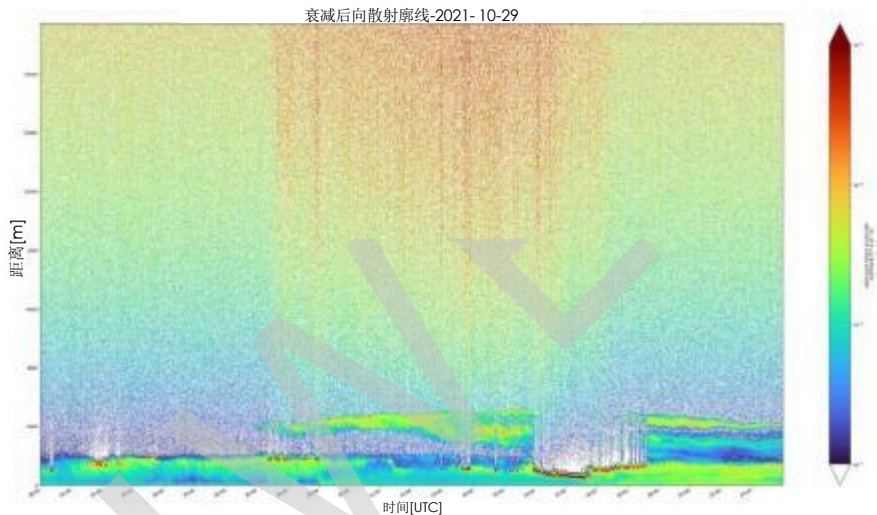
CL61 数据不但被用于了解拉帕尔马上空的火山灰层运动，同时也被用于为埃尔帕索居民提供泥雨预警。大多数时候，盛行风将火山灰羽流吹向西南，但偶尔也会在埃尔帕索和机场上方检测到羽流。

随后向公众发布了预防措施，比如建议留在室内或戴口罩和穿着防护服，以及因火山灰浓度过高而推迟航空出行。

边界层以上的火山灰

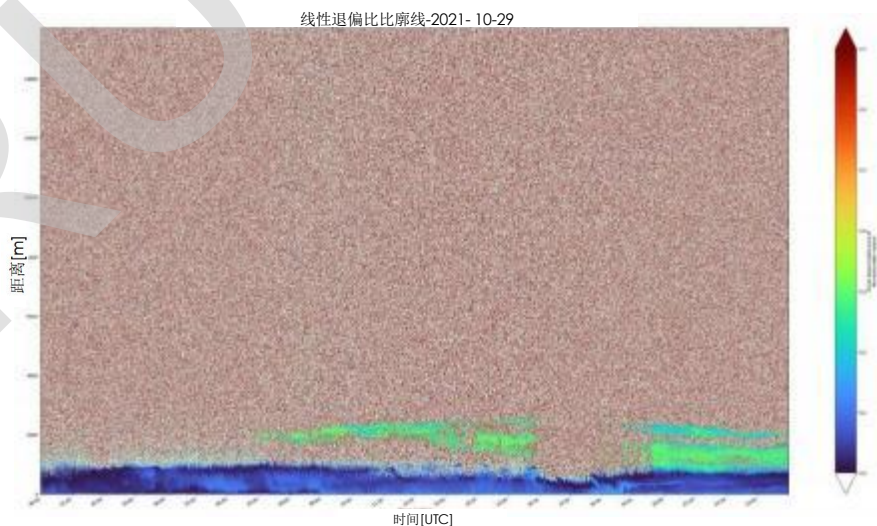
以下为 CL61 火山灰测量的一些测量示例。第一个示例可以看到时间/高度图中的衰减后向散射廓线。

在这张图中，我们看到边界层（高达 1000 米）内有一个强烈的强度信号，但从 07:00 (UTC 时间) 开始，在约 2000 米高空也有一个层。另外还有靠近边界层顶部的火山灰粒子形成的云，在图中显示为暗红色信号。



2021 年 10 月 29 日的 CL61 衰减后向散射廓线

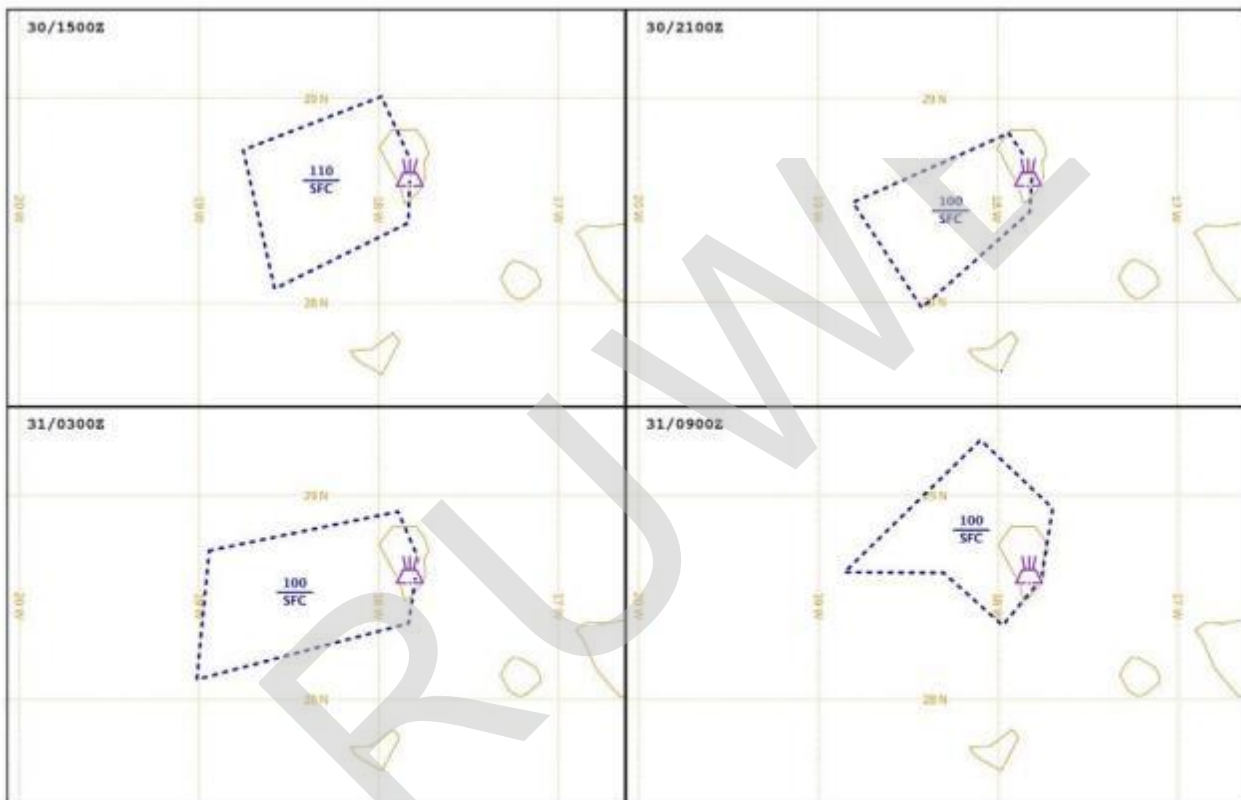
我们同一天观察去极化信号（基于平行和交叉极化信号比值的退偏比）时，可以清楚地看到边界层上方的火山灰层。灰层的退偏比为 0.3 至 0.4，在本例中，灰层在拉帕尔马岛上方高空移动，并没有在地面上造成火山灰沉降。16:00 到 20:00 (UTC 时间) 边界层顶部的云层为液态云层，原因是它的退偏比接近 0.0，同日在边界层顶部形成的所有其他云层也是如此。



CL61 退偏比廓线，2021 年 10 月 29 日

火山灰雨

这个例子显示了在地面上也能观察到的火山灰雨。第一张图是火山灰咨询中心 (VAAC, Meteo France Toulouse) 2021 年 10 月 30 日对火山灰层的预报。从这里我们可以看到预报表明该层位于埃尔帕索镇上空。



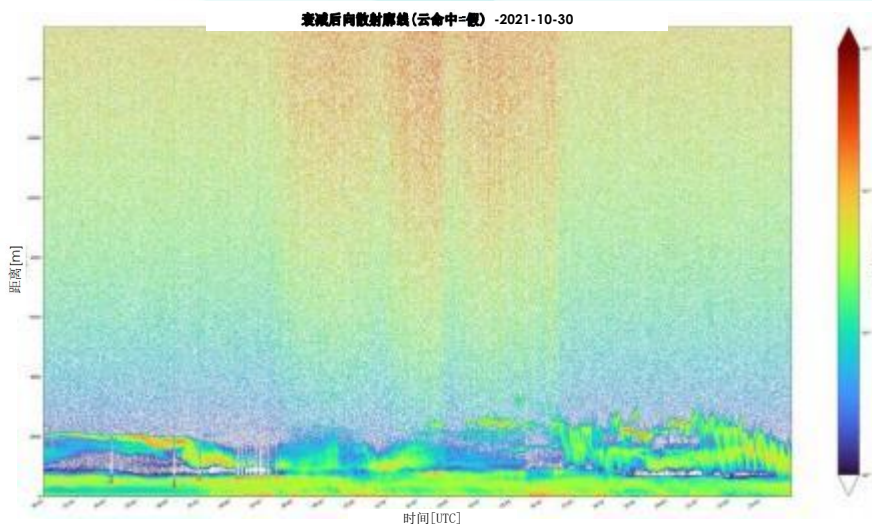
火山灰警报
DTG :
20211030/1454Z VAAC
: TOULOUSE 火山:
拉帕尔马 383010 区域
: 加那利群岛



警报编号: 2021/179
信息来源: 卫星影像、网络摄像机
航空颜色代码: 红色
喷发详情: 喷发时间为 20210919/1410Z, 大量火山灰排放仍在进行中
RMK: 在卫星数据上可以清楚地看到火山灰排放量的增加。中到高火山灰浓度分布在火山以西 35 英里内。火山附近的浓度最高。
下次警报: 不迟于 20211030/2100Z.

VAAC 2021 年10 月30 日在拉帕尔马的预报 (图片由VAAC 提供)

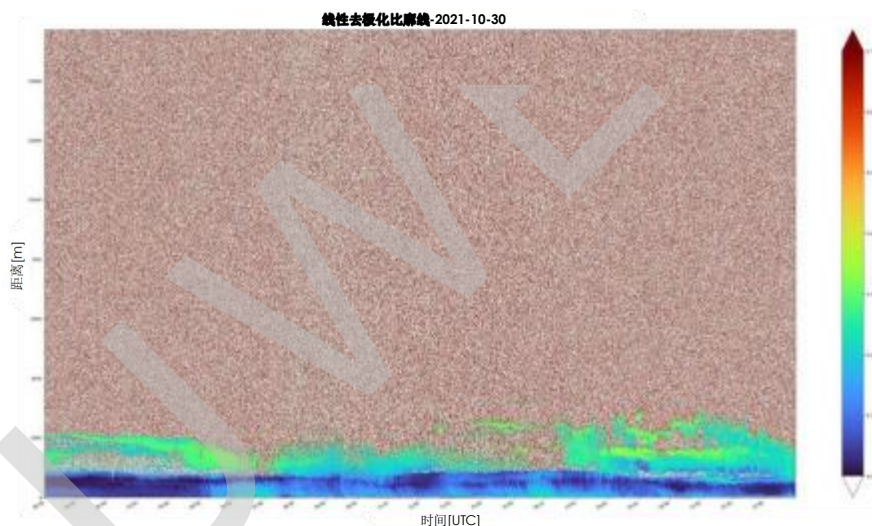
2021年10月30日的CL61衰减后向散射廓线显示边界层及其上方的层存在高信号。05:00到22:00(UTC时间)时段靠近地面的信号特别强。



2021年10月30日CL61衰减后向散射廓线

研判同日的退偏比廓线时，我们可以看到高处的火山灰层，但也可以看到边界层内有很多火山灰。全天都可以看到边界层上方约2000米高处的火山灰层。

图中可以看到有趣的火山灰雨，它导致火山灰在地面上的堆积。去极化信号也提示了观察者在地面上也观察到的沉积物。同样，0.3至0.4的退偏比值与预期的火山灰退偏比信号非常一致。



2021年10月30日的CL61退偏比廓线

摘要

具备去极化功能的维萨拉激光云高仪 CL61 在不同应用中表现良好。CL61 不仅可用于云底高度测量，还可用于表征不同粒子：液滴、毛毛雨和雨滴、雪和冰晶、灰尘、火山灰和沙尘。CL61 在检测结冰和冰冻条件以及检测混合层高度方面比传统云高仪更为准确、可靠出色。在不同气候条件的测量活动中，CL61 更加适合长期业务化稳定高效运行。