

# 投弃式雾能见度剖面仪的设计原理与应用\*

赵进平<sup>1,2</sup>, 陈萍<sup>3</sup>, 刘一林<sup>1,2,4</sup>, 陈显尧<sup>4\*\*</sup>, 门雅彬<sup>5</sup>, 徐俊臣<sup>5</sup>,  
衣立<sup>1</sup>, 李涛<sup>1</sup>, 王晓宇<sup>4</sup>, 栾亮<sup>2</sup>, 高琳<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛冠潮海洋科技有限责任公司, 山东 青岛 266000;  
3. 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266100; 4. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,  
山东 青岛 266100; 5. 国家海洋技术中心, 天津 300112)

**摘要:** 精准观测大气能见度是研究雾的重要基础,我们将雾引起的大气能见度变化简称为雾能见度。现有的大气能见度仪较重,无法由探空气球携带升空;由于观测手段的限制,迄今对雾的垂向结构研究很少,本文提出利用自然光探测雾能见度的方案。为获取大气的垂向衰减系数,研制了一种体积小、重量轻、传输距离远的投弃式微型辐照度计,由探空气球携带升空,实现雾能见度的垂向剖面探测,我们将该仪器系统命名为“投弃式雾能见度剖面仪”。投弃式雾能见度剖面仪既能实现对大气辐照度的精确测量,又具有重量轻、造价低的特点,成为探测雾能见度垂向特征的一种新手段。本文还提出精确测量大气辐照度所涉及的两个创新性算法——谱辐照度的反演算法和仪器摆动的校正算法。在此基础上利用获取的太阳辐射在垂向的漫衰减系数,成功反演出雾能见度的垂向分布。实际观测结果表明,雾在垂直方向上有丰富的信息,也有空间上的明显差异,需要深入研究。雾能见度剖面仪可为深入研究雾的垂向结构提供宝贵数据,有重要的应用价值。

**关键词:** 雾能见度; 剖面探测仪; 垂向结构; 辐照度; 衰减系数; 多光谱

**中图分类号:** TH765

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-5174(2024)10-167-12

**DOI:** 10.16441/j.cnki.hdxh.20240293

**引用格式:** 赵进平, 陈萍, 刘一林, 等. 投弃式雾能见度剖面仪的设计原理与应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(10): 167-178.

Zhao Jinping, Chen Ping, Liu Yilin, et al. Principles and applications of a disposable fog visibility profiler[J]. Periodical of Ocean University of China, 2024, 54(10): 167-178.

雾是重要的天气现象,定义为悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶系统,其引起的能见度降低到1 000 m以下时被定义为雾<sup>[1]</sup>。当大气处于静力稳定,水汽充足,空气处于饱和或过饱和状态时,空气中水汽凝结成细微的水滴悬浮于空中便会形成雾<sup>[2]</sup>。雾主要分为蒸发雾、辐射雾和平流雾等<sup>[3-4]</sup>。浓雾是灾害性天气现象,会严重影响陆地交通、航空飞行、船舶航行和户外活动安全<sup>[5-7]</sup>。雾在全世界范围内都存在,有明显的区域差异、季节差异和天气尺度变化<sup>[8]</sup>。

我们最早开展雾能见度剖面仪研发的动机是开展对北极雾的探测。由于北极海冰的快速减退,一方面扩大了北极航道的面积,有利于北极航运;另一方面,新开放水域的海雾出现频率在显著增加,严重威胁冰海中航行的船舶安全,使北极航道的航运时间显著增

加<sup>[9]</sup>。可见雾对于生命安全和经济发展的影响在不断提升<sup>[10]</sup>。

描述雾的参数主要包括大气能见度、雾滴谱和液态水含量<sup>[11-12]</sup>。其中大气能见度是最基础的参数,作者将雾引起的大气能见度变化简称为雾能见度。大气能见度体现为可视距离,早期的大气能见度是人们视觉感知的参数<sup>[13]</sup>。实际上,视距不仅与雾的浓度有关,而且与人们的视力和空中的亮度有关,估算的误差很大<sup>[14]</sup>,直到大气能见度仪的问世,才将大气能见度变成可以定量观测的物理量<sup>[15-16]</sup>。

大气能见度涵盖了大气水平能见度和大气垂向能见度,一般提到的大气能见度多指大气水平能见度。大气能见度仪是测量大气水平能见度的仪器,根据工作原理的不同,分为透射式和散射式两种<sup>[17]</sup>。透射式大气能见度仪采用主动光源,在一定距离外接收光信

\* 基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFA0607000);国家自然科学基金项目(42106221)资助

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2019YFA0607000); the National Natural Science Foundation of China(42106221)

收稿日期:2024-08-20; 修订日期:2024-09-10

作者简介:赵进平(1954—),男,教授,主要研究领域为物理海洋学。E-mail: jpzha@ouc.edu.cn

\*\* 通信作者:陈显尧(1973—),男,教授,主要研究领域为海洋环流与气候变化。E-mail: chenxy@ouc.edu.cn

号,测量光的衰减率,据此得到消光系数用以计算大气能见度<sup>[18]</sup>。透射式辐照度计的优点是测量精度较高,缺点是需要的测量基线较长(需要数十米),对光轴对准的要求很高,在实际应用中不是很方便<sup>[19]</sup>。散射式大气能见度仪是侧向测量一定体积内雾滴引起的散射光强度,并根据侧向散射强度与整体散射强度的关联性来确定能见距离<sup>[20]</sup>。散射式大气能见度仪的优点是基线短,需要的空间小;缺点是其测量的散射光只是一个小体积的散射,测量精度低,需要将多次测量的结果进行平均才能获得可信的结果<sup>[19,21]</sup>。

以往关于雾中大气能见度的研究主要局限在近地面层。雾的垂直范围在几米到几百米之间<sup>[22]</sup>,雾在垂向上分布并不均匀,人们一直希望了解雾的垂直结构,以满足对雾结构和机制的认识。目前借助气象铁塔或系留气艇可以进行雾的垂向探测<sup>[23]</sup>。借助气象铁塔可以获取气象要素信息,但探测高度受限且垂向分辨率很低<sup>[24]</sup>。探空观测可以获取大气温度、湿度层的垂向变化,却很难直接获取雾参数的垂直分布特征<sup>[23]</sup>。同时一些主动遥感设备已应用于雾的垂直结构研究中, Tomine 等利用移动式激光雷达分析云雾衰减系数的垂直结构特征,通过衰减系数的分层研究了雾的分层结构<sup>[25]</sup>; Hamazu 等利用 35 GHz 的毫米波雷达观测辐射雾、平流雾和海雾,获得了雷达反射率因子的水平和垂直分布<sup>[26]</sup>。近年来,星载垂向探测手段逐渐应用于北冰洋海雾的识别<sup>[27]</sup>。然而激光雷达在大雾天气下衰减较强,测量精度受到较大影响<sup>[28]</sup>;毫米波雷达可探测角度较小,测距性能较差<sup>[26]</sup>;卫星遥感的分辨率较低,而且会受云的遮挡<sup>[29]</sup>。因此受观测手段的制约,人们对雾的垂直结构认识较少。

由于大气能见度是在可见光视域观测的结果,人们期待通过对自然光的光学观测实现对大气能见度的研究。对自然光的观测不需要人造光源,仪器可以做得比较小巧<sup>[30-31]</sup>。对太阳辐射的观测主要是测量辐照度,通过辐照度的垂向变化计算漫衰减系数<sup>[32]</sup>,然后将漫衰减系数与大气能见度建立联系,从而可以采用微型辐照度计进行雾的垂直剖面探测。

2014年5月,为了验证利用微型辐照度计可对有雾时的大气垂直剖面进行探测的可行性,作者采用日本 ALEC 公司生产的八分度微型辐照度计(型号: AL8W-CMP)<sup>[33]</sup>,前往美国巴罗(156°20'W, 71°25'N),结合其他观测项目进行海雾垂向剖面探测试验。微型辐照度计由系留气艇携带升空,通过线缆收放实现剖面探测。然而上升到数百米高度后系留气艇的升力与系缆的拉力平衡,系留气艇不再上升。当地面风速很大时,受强大的湍流影响,系留气艇甚至无法升空。由此表明,采用系留气艇进行雾的光学剖面测量无法满

足雾垂向探测的需要。这个经历促使我们考虑使用体积更小、重量更轻、传输距离更远的投弃式仪器进行大气垂直剖面探测。投弃式剖面探测技术的工作方式与大气探空仪观测相似,由充有氦气或氢气的气球携带升空,在上升过程中实现对辐照度的测量,并将测量信号实时传送回地面。探空气球摆脱了系留线缆的羁绊,只要有足够的升力,就可以实现对大气光学剖面的测量。

2019年,赵进平等<sup>[34]</sup>提出了用垂直方向测量的辐照度数据计算大气能见度的方法,成为雾光学剖面测量的重要基础。据此,我们研制了雾能见度剖面仪(FVP, Fog visibility profiler)(专利号 201910302823.2)。本文主要介绍该仪器的探测原理以及关键的理论和 technical 问题,推动对雾垂直结构的探测与研究。

## 1 雾能见度剖面仪的测量工作原理

如引言中所述,现有的大气能见度仪过重,造价高,不适用于垂直剖面的探测,而且不论是基于透射式原理还是散射式原理的大气能见度仪,都需要自带光源,其重量和能耗都难以满足探空观测的需求<sup>[35]</sup>。为此,我们研发了体积小、重量轻(仪器总重量约为 360 g)、无线传输距离远的雾能见度剖面仪。与现有的大气能见度仪测量原理不同,FVP 采用的测量方式并非直接测量大气能见度,而是通过测量辐照度,然后计算出大气能见度的数值。

### 1.1 雾能见度的测量原理

实际上,大气能见度涉及两个问题:一是能够识别物体的光学特性,二是能够识别的最大距离。首先,人是通过相对亮度来识别物体的,设  $B$  为目标物的亮度,  $B_h$  为背景的亮度,视觉光亮度对比度(Visual brightness contrast)  $K$  表达为<sup>[36]</sup>

$$K = \frac{B_h - B}{B_h} \quad (1)$$

显然,如果两个挨在一起且亮度相同的物体会因对比度趋于零而无法识别,亮度差别越大,越容易识别。 $K$  可以是正值,也可以是负值。目标物的亮度小于背景亮度, $K$  为正值,目标物的亮度大于背景亮度时, $K$  为负值。 $K$  值只与物体的相对亮度有关,与距离无关。

根据柯西密德(Koschmieder)定律,在有雾的情况下,随着到目标物体的距离增大,视觉光亮度对比度将会减小,物体间的差别越来越模糊。当目标与观测者之间的距离达到  $L$  时, $K$  减小为视觉光亮度对比度阈值  $\epsilon$ ,  $L$  定义为视觉能见度。 $\epsilon$  与  $L$  的关系为<sup>[36]</sup>

$$\epsilon = e^{-\alpha L} \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为穿过距离  $L$  的大气消光系数(Extinction co-

efficient), 单位为  $\text{m}^{-1}$ 。考虑到视觉正常的人  $\epsilon$  通常取为  $0.02^{[37]}$ , 因而有

$$L = -\frac{\ln \epsilon}{\alpha} = \frac{3.91}{\alpha} \quad (3)$$

可见, 只要获得大气消光系数  $\alpha$ , 就可以由式(3)直接计算出大气能见度  $L^{[36]}$ 。需要注意的是, 按照公式(3)的要求, 在整个观测区间衰减系数的大小是相同的, 也就是认为雾的浓度在水平方向上是均匀分布的。但实际上雾常以团雾的形式存在, 单点测量的大气水平能见度可能与实际的大气能见度并不一致。此外, 雾能见度剖面仪在一个高度上只有一个衰减系数值, 按照式(3)计算的大气能见度只能表征大气水平能见度。

## 1.2 大气漫衰减系数的测定

Midleton 专门讨论了大气能见度的观测原理, 认为在式(3)中可以用漫衰减系数(Diffuse attenuation coefficient)  $\gamma$  代替消光系数  $\alpha$  计算大气水平能见度。对于平行光而言, 漫衰减系数与消光系数有很高的关联性<sup>[38]</sup>。单色光的漫衰减系数  $\gamma(\lambda)$  满足比尔定律(Beer Law)<sup>[39]</sup>

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) e^{-\gamma(\lambda)h}, \quad (4)$$

即当初始辐照度为  $E_0(\lambda)$  的一束平行单色光垂直通过厚度为  $h$  的介质后, 辐照度衰减为  $E(\lambda)$ 。其中, 衰减系数  $\gamma(\lambda)$  是波长的函数:

$$\gamma(\lambda) = -\frac{1}{h} \ln \left[ \frac{E(\lambda)}{E_0(\lambda)} \right] \quad (5)$$

式(5)表明, 漫衰减系数需要通过辐照度的测量来获得, 而且只有仪器在垂直方向上移动, 才可以通过辐照度的变化来获取漫衰减系数。

由于不同波长的衰减系数差别很大, 获得的大气能见度也不相同<sup>[40]</sup>。因此, 如何确定衰减系数对于获得的雾能见度精度有密切关系? 例如, 有人选取人眼最敏感的波长, 即 550 nm 的衰减系数, 这个衰减系数最小, 按照式(3), 反演得到的大气能见度最大。但是实际上, 大气能见度既与雾中的光线有关, 也与人视觉的光谱响应有关, 单一谱段的衰减系数未必能代表可见光谱段在雾中的整体衰减特性。

辐照度定义为单位面积的辐射能量通量, 单位是  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 而谱辐照度是某一波长的光引起的能通量, 单位是  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。在可见光范围内将谱辐照度对波长进行积分可以得到辐照度。我们设计了多光谱辐照度计, 仪器光谱的选择并没有严格限制, 选择时需要满足以下两个条件: 一是要避开各个水汽吸收带及其周边 20 nm 范围内的谱段, 二是选取的谱段在积分时尽量处于均值处, 确保积分时误差最小化。为此, 在 400~700 nm 之间选取 5 个谱段进行观测, 波长分别为 427、474、535、606 和 671 nm, 并采用式(5)获得谱衰减

系数  $\gamma(\lambda_n)$ 。由于各个谱段的辐照度不同, 计算可见光范围内的总衰减系数需要由谱衰减系数来计算。我们根据人眼视觉与目标亮度有关的原理, 用谱辐照度对谱衰减系数进行加权平均, 得到可见光全谱段的衰减系数为

$$\gamma = \frac{\sum_{n=1}^5 \gamma(\lambda_n) E(\lambda_n) \Delta \lambda_n}{\sum_{n=1}^5 E(\lambda_n) \Delta \lambda_n} \quad (6)$$

把式(6)代入式(3), 就可以求得雾水平能见度。因此, 雾能见度剖面仪只要能给出谱辐照度  $E(\lambda_n)$  的垂向分布, 就可以用式(5)计算谱衰减系数, 并通过式(6)计算总衰减系数的垂向分布, 然后用式(3)计算每一层的雾水平能见度。

事实上, 能见度与谱衰减系数之间的关系并不准确, 还是局限于近百年前的物理概念, 有许多问题需要深入研究。本文可以观测并计算各个谱辐照度, 为探索雾能见度与谱辐照度之间的关系创造了条件。

## 2 多光谱辐照度计探测技术

基于上述理论, 根据实际的探测需求, 作者首先开发多光谱辐照度计, 用于探测辐照度的垂向变化, 以获得漫衰减系数的垂向分布。虽然国内外已有多种微型辐照度计产品, 但这些精密的光学仪器价格昂贵, 用于投弃式探测使用的成本太高<sup>[41]</sup>, 而且这些产品只是测量谱辐照度, 不能同时测量气象参数。为了满足雾能见度垂向探测的需要, 需研制一款结构简单、测量精准、重量轻、成本低、可同步测量气象参数并进行实时数据传输的微型辐照度计, 用于投弃式雾能见度剖面探测。虽然辐照度计的原理和技术都很成熟, 但是设计和制造满足投弃式探测要求的微型辐照度计还是有很多需要解决的理论和和技术问题。高精度的辐照度计是实现大气能见度观测的关键环节。

### 2.1 谱辐照度的测量手段

辐照度计接收到的自然光是太阳光经过整个大气层物质衰减后的光辐射。大气对光的衰减包括吸收和散射, 其中吸收是大气物质吸收太阳辐射能, 将其转换为热能, 热能再以其他形式的能量加入大气能量传输。散射是大气物质引起的向各个方向的散射, 其中大气中气体分子引起的散射用瑞利散射来描述, 而雾滴和气溶胶等较大颗粒物质引起散射用米散射来描述<sup>[42-44]</sup>。散射造成了太阳能量的损失, 只有向下的散射分量会到达下垫面。

辐照度计测量的自然光由直射光和散射光两部分构成, 都是太阳辐射引起的光辐射。直射光是指太阳光经过大气层的衰减直接照射到仪器表面的光通量,

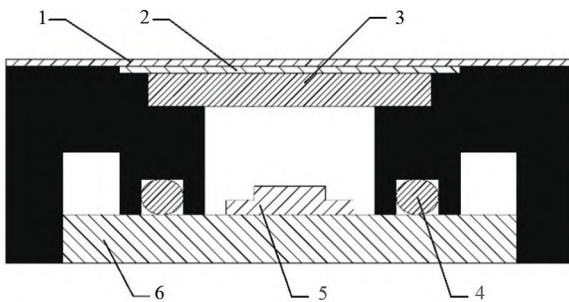
而散射光是大气分子和悬浮颗粒物向下散射的光通量。从辐照度观测而言,直射光必须考虑光的入射方向。即使在浓雾情形辐照度与光的来向关系不大,但当仪器穿透雾层之后仍然会遇到直射光,因此,对直射光的测量是必须考虑的因素。

辐照度计是利用物理学的光电效应实现光信号转换为电信号的探测手段,主要原理分为两种:一种是通道式仪器,多采用滤光片为分光元件<sup>[45]</sup>;另一种是光谱式仪器,多采用光栅为分光元件<sup>[46-47]</sup>。光谱式辐照度计有明显的优势,通过光纤引光可以直接获取 200 个以上的谱段<sup>[48-49]</sup>,可以获取窄带宽辐照度数据,具有体积小、重量轻的特点,可以选做微型辐照度计的测量原理。然而,光谱式辐照度计的谱段可达 200 多个,每个谱段接收的能量较小,在浓雾光线很暗的条件下信号识别率降低。

使用滤光片为分光元件的通道式辐照度计的优势是能量透过率高,成本造价低,体积小,重量轻,适用于雾能见度的垂向探测。光线通过不同的滤光片获取不同谱段的光,直接由光电管接收,产生光电流,放大并输出电压信号。将电压信号数字化,就成为测量信号。通过对电压信号的光学定标,转换为谱辐照度数据。

## 2.2 谱辐照度计的光学系统

谱辐照度计光学信号采集系统的结构如图 1 所示。采用光电管以及承载光电管的线路板用于光信号的采集。前置部件包括:滤光片、余弦散射体和覆膜,整个光信号采集系统通过密封圈实现光学密闭。



(1. 覆膜, 2. 余弦散射体, 3. 滤光片, 4. 光学密封圈, 5. 光电管, 6. 数据采集线路板。图中所有组件均为圆形。1. Film; 2. Cosine collector; 3. Optical filter; 4. Sealing ring; 5. Photodiode; 6. Data acquisition circuit board. All components are in circular.)

图 1 多光谱仪器光信号采集系统组件剖面图

Fig. 1 The cross-sectional view of the components of the optical signal acquisition system in a multispectral radiometer

光电管是信号的采集单元,其响应时间、截止频率和测量范围都需要满足高频光学测量的需要。入射的辐射能被采集单元接收,改变了光电管的电流,产生输出电压作为辐照度计的输出信号。滤光片是按照要求

定制的镀膜玻璃镜片。滤光片透射的光谱是峰状分布,与理想的矩形谱形有较大的差别。此外,各个谱段的透射率也不相同。这些因素会在定标阶段通过新开发的算法予以解决,详见 3.1 节。余弦散射体使用 Spectralon 材料,将来自各个方向的光转换为余弦散射光。该余弦散射体采用纯白色,其透射特性在不同谱段有明显差异<sup>[50]</sup>,透射光强的差异通过定标过程校正。

一般的辐照度计在余弦散射体上方不加膜,因为膜的物理特性会影响余弦散射体和滤光片的光学特性。然而,余弦散射体的防水和密封造价很高,很难用于一次性仪器。作者在深入研究膜的物理特性,权衡覆膜的优点和缺点之后,还是决定采用覆膜。覆膜的优点首先是易于使用,可以用来固定滤光片和余弦散射体;其次,覆膜在液态水丰沛的雾中可以实现水密封;第三,可通过改变膜的结构提高反射率,满足隔热的要求,也可以局部增加透射率,提高测量阈值;第四是低成本,覆膜及其粘贴的造价都很低,满足一次性使用仪器的要求。

然而,覆膜带来了一系列问题:首先薄膜是一种光学介质,在其上下界面上会发生反射和透射,对光的影响有三个方面:(a)对透射光的削弱或增强;(b)光谱的频移;(c)倾斜入射光透射率的改变。膜对透射率的影响可以通过定标解决;薄膜与余弦散射体之间仍然有空气层,故可以不考虑频移的影响。需要解决的是薄膜对倾斜入射光的影响。

光在薄膜分界面上的反射和折射会产生偏振光。按照光学偏振理论,偏振会产生  $p$  光和  $s$  光,二者的反射率和透射率有明显的偏差<sup>[51]</sup>。 $p$  光和  $s$  光所占的比例与入射角有关,入射角很小时偏振光的影响可以忽略,而在入射角很大时偏振光起主导作用。由于我们的研究通过对透光率与入射角的关系,很好地表现了偏振光对透射光的影响。根据 3.2 节的介绍,保留覆膜未对测量产生消极影响。

由此,图 1 所表达的光学镜头很好地实现了辐照度信号的获取,并通过 3.2 节提出的算法实现了对辐照度的精确测量。

## 2.3 辐照度剖面探测系统

雾能见度剖面仪(FVP)由系统主机、空中机和地面机构成。其中,主机用于系统控制、数据接收和存储;空中机由气球携带升空,探测垂向辐照度剖面数据并通过无线通信将数据传回;地面机架设在地面并与主机用电缆相连,与空中机同步进行近地面的辐照度测量。

系统主机采用标准机箱(见图 2),其主体是中央处理器,配有面板、显示屏、接收天线、存储卡、线缆接口和可充电镍铬电池。用户通过系统主机控制地面机和

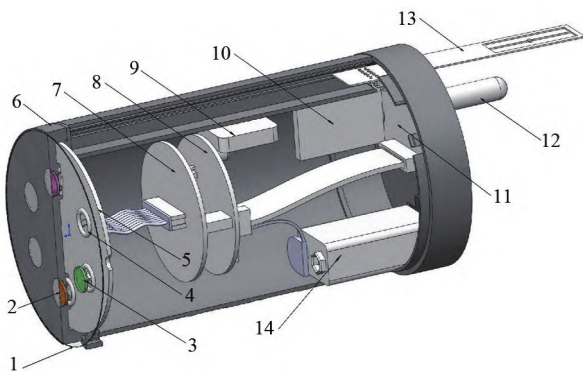
空中机的数据采集与存储。主机上显示观测期间的各种信息, 主要包括数据序号、空中机高度、GPS 状况、存储卡状况等, 可以实时监测剖面探测系统的运行。



图 2 系统主机操作页面

Fig. 2 Main operating controller of the fog visibility profiler (FVP)

空中机的结构主要由以下部件组成: 光学镜头、光电采集板、信号放大板、A/D 转换板、终端板、通信模块、天线及电池, 搭载温湿压传感器、GPS 传感器(见图 3)。



(1. 覆膜, 2. 余弦散射体, 3. 滤光片, 4. 光密封圈, 5. 光电管, 6. 信号采集电路, 7. 信号放大电路, 8. A/D 转换电路, 9. GPS 模块, 10. 数据通信模块, 11. 终端电路, 12. 数据通信天线, 13. 温湿压传感器, 14. 电池。1. Flim; 2. Co-sine radiator; 3. Optical filter; 4. Sealing ring; 5. Photodiode; 6. Photoelectric circuit; 7. Signal amplifier; 8. A/D converter; 9. GPS Module; 10. Communication circuit; 11. Connection circuis; 12. Radio antenna; 13. Temperature; humidity and pressure sensors; 14. Battery.)

图 3 雾能见度剖面仪空中机

Fig. 3 The cross-sectional view of the air model FVP

空中机由三叉吊挂线悬挂在气球上升空, 气球直径 1.2 m 左右。空中机配备的 9 V 叠层电池可以保证空中机工作 1 h 以上, 通信距离不小于 5 000 m。空中机的通信频率固定, 不允许多台空中机同步观测。仪器的采样频率为 2 Hz, 也可以根据需要调整设计。空

中机可以采用黑色注塑外壳, 缺点是硬度较大; 也可以采用泡沫作为外壳, 由软硅胶包裹。

地面机与空中机的结构大致相同, 但有以下差异: 地面机采用有线通信, 电源也由主机经由电缆提供, 由系统主机控制开关机。鉴于地面机要长期使用, 其壳体选为更加坚固的材料, 光学镜头也进行加固。此外, 地面机选用更加坚固耐用的地面观测用温湿度传感器, 不配置压力传感器和 GPS 传感器。地面机可以重复使用。

空中机和地面机组装完成后, 首先需要进行暗电流测试。暗电流即为在没有光源入射的情况下仪器内产生的电流, 即电子线路内的电流。暗电流是通过测量无光源条件下的输出电压值得到的, 输出电压通常很小, 只有  $10^{-3}$  伏特的量级。但由于每个谱段的电阻不同, 输出电压也不同。

每台空中机和地面机均需经过暗室定标。定标采用中国计量科学研究院提供的标准灯作为光源, 光源的辐照度由定标文件给定。光源加热 20 min 后达到稳定状态, 通过光阑滤除杂散光, 对各个谱段镜头逐一进行定标, 定标文件储存在相应的文件中, 由用户软件进行处理。

仪器测量的数据采用传统的无线通信技术传回, 数据结构有很好的包容性, 个别丢失的数据不影响整体数据的使用。数据直接存储在 SD 卡上, 可以通过计算机直接读取数据。用户软件可以控制数据的使用, 并提供所需的数据反演算法。

### 2.4 气象参数的配置

雾能见度剖面仪主体进行光学辐照度的测量。与此同时, 仪器还搭载了气象传感器, 开展温度、湿度和压力的同步探测。气象数据一方面有利于精确测定大气密度的剖面分布, 用于大气能见度的精确反演; 另一方面, 大气参数可以用于有雾条件下的大气物理结构研究, 有利于深入探索成雾的物理机制。

由于仪器上升得很快, 大约  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 所用的温湿压传感器要具有响应时间短和测量精度高的特点。同时, 大气能见度剖面仪也配备 GPS 传感器, 实现对风速的测量。

### 3 雾能见度仪的数据反演算法

雾能见度剖面仪由气球携带升空(见图 4)。气球携带仪器升空的动力学理论与探空仪的相关内容基本一致。只要气球充气足够多, 其形成的升力大于仪器受到的重力和阻力, 就会形成上升运动, 实现剖面探测。气球的上升速度与大气的结构有关, 总体而言随着高度上升, 空气变得稀薄, 上升速度随之下降。为了实现对雾的垂向探测, 需要上升速度小一些, 保持的

$5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右。上升速度只能通过充气量来控制,尚没有更好的解决办法。



图4 2020年中国第十一次北极考察期间释放雾能见度剖面仪  
Fig. 4 Deployment of the FVP during the 2020 Chinese National Arctic Research Expedition

### 3.1 辐照度的反演

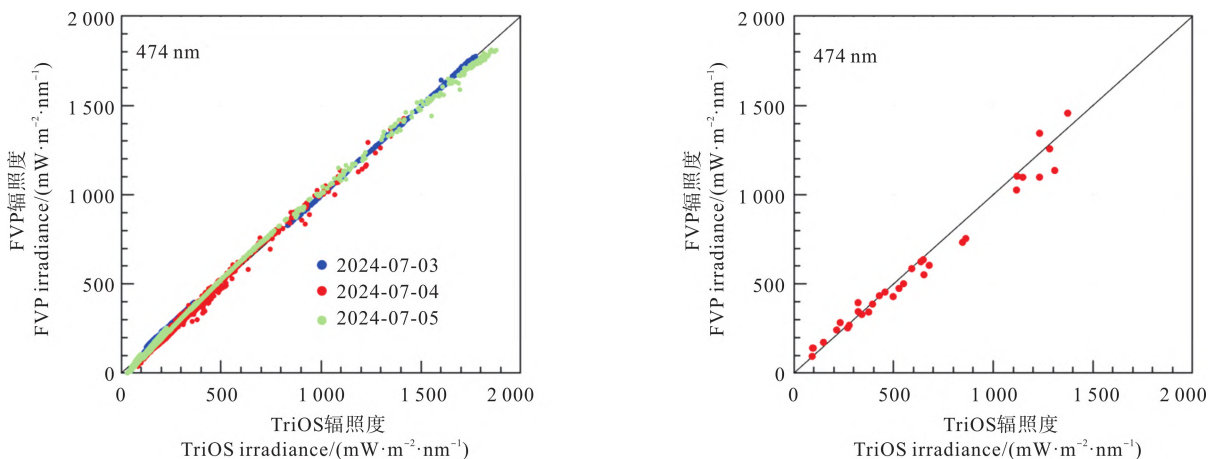
采用宽带宽滤光片的方式有一系列问题要解决。首先,滤光片的透射光谱并不是理想的矩形值,而是呈现下宽上尖的峰状曲线,透射光的谱峰曲线可以通过高光谱测量获得。滤光片的谱峰带宽较大,成为宽带宽的信号源。宽带宽滤光片透过的能量无法给出谱峰处的准确辐照度值,而是给出更宽带宽内的平均值,因而引入较大的误差,是仪器的主要误差源。我们通过深入理解带宽和透射能量的关系,建立了标准算法,使用宽带宽数据获取精确的辐照度数据,圆满解决了这

个问题<sup>[52]</sup>。

其次,余弦散射体对于不同波段的光有不同的透射率。研究表明,余弦散射体的影响可以通过光学定标来消除。

一般的辐照度计使用乳白玻璃材质的余弦散射体,可以直接暴露在空气中,不需要覆膜。但是,使用不干胶覆膜更加简单、可靠,便于加工,测量效果令人满意。然而,覆膜带来了新的问题:一方面,覆膜的存在会影响原有光学镜头的余弦特性。另一方面,光线通过覆膜时会发生偏振,不同的覆膜对不同波段的光有不同的作用,有时会减小透射率,有时会加大透射率<sup>[51]</sup>。本文的研究表明,覆膜对余弦特性的影响主要体现在大入射角(入射角大于 $60^\circ$ )的情形,膜对光的偏振效应改变了透射的余弦特性。同时光线倾斜入射时,透射率会因偏振产生额外减小。我们确定了膜对透射光的透射规律,并进行偏振订正,很好地消除了膜的负面影响<sup>[52]</sup>。作者于2024年7月3—6日在青岛八关山气象台将FVP与对比仪器TriOS进行标准化测试,经过校正的辐照度数据达到了令人满意的反演结果,相对偏差小于8%(见图5左图)。此外,作者2024年4月在千里岩岛海洋站做了20d的海雾观测,成功观测到3次浓雾剖面,辐照度的反演结果也达到很高的精度,相对误差小于15%(见图5右图)。

需要注意的是,在近地面高度,仪器获得的大气能见度可以与能见度仪的观测结果进行比测<sup>[34]</sup>,而在空中的测量结果尚无法进行检测。



(左图:青岛八关山的标准试验( $120^\circ 20' \text{E}$ ,  $36^\circ 04' \text{N}$ )。右图:千里岩岛的海雾观测( $121^\circ 23.17' \text{E}$ ,  $36^\circ 15.93' \text{N}$ )。Left panel: standard experiment conducted at Baguan Mountain, Qingdao. Right panel: In situ observation of fog conducted at Qianliyan ocean station.)

图5 FVP反演的辐照度与标准仪器TriOS的对比

Fig. 5 Comparison of irradiance retrieved by the FVP data and observed by the reference radiometer TriOS

### 3.2 剖面测量数据的分析方法

常规探空观测一般不需要考虑探空仪的姿态,因

为仪器摆动姿态与温湿压数据的关系很小。与探空系统不同的是,光学仪器对于仪器的姿态非常敏感,

仪器摆动时改变了太阳光线的入射角,导致反演的辐照度在很大范围内变化(见图6)。图6的观测时间为2024年4月12日07:46(北京时),地点在千里岩岛(121°23.17'E,36°15.93'N)。从测量结果可以看出,仪器在空中发生一定幅度的摆动。仪器的摆动没有固定的摆动平面,无法用单摆的运动理论解释。目视可见,仪器在空中一面上升,一面呈椭圆锥摆运动,数据也体现了椭圆锥摆的运动特性。

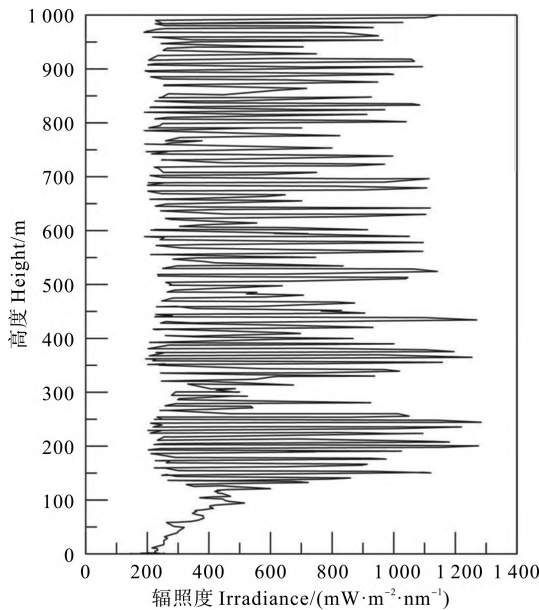


图6 观测得到的辐照度随仪器摆动的变化特征

Fig. 6 Variation in irradiance with the FVPs swinging posture from in situ observation

椭圆锥摆的旋转方向由仪器上升前的动力学状况决定,可以顺时针或逆时针旋转。椭圆锥摆的运动规律表明,即使没有水平运动和上升运动,椭圆锥摆的轨迹也不是闭合的,一个周期后会滞后或超过初始位置,体现为仪器的进动。仪器的进动使得测量过程中太阳光线的入射方向不断变换,增大了数据分析的难度。此外,测量数据表明,仪器除了摆动和进动之外,有时还发生章动,即相对于垂直轴的摆动。FVP采用三线吊挂的方式,已尽可能消除章动的因素,但由于仪器自转,有少数时候发生单根吊线松弛,产生章动现象。章动导致数据的额外偏差。

经过宽波段多光谱辐照度计校正算法进行数据处理<sup>[52]</sup>,将每个输出电压值换算为辐照度的数值(见图6)。普通的辐照度计用于对太阳辐射的观测需要垂直放置,其法向平行于垂直轴。辐照度只与太阳的天顶角有关,与太阳光线来向的水平方位无关<sup>[53]</sup>。一旦仪器发生摆动,相当于太阳光线的入射角不断变化,对光学测量产生显著的影响。当仪器法向与太阳光的夹

角小于太阳天顶角时,获得的辐照度会大于实际辐照度;同理,当仪器法向与太阳光的夹角大于太阳天顶角时,获得的辐照度小于实际辐照度。在摆幅很大和太阳天顶角很大时,仪器法向与太阳光的夹角可能在仪器的测量平面之外,即大于 $2\pi$ 立体角,无法测量到太阳的直射辐射。从大气光学的角度看,摆动的仪器测得的数据并不是辐照度,二者几乎没有一致性和可比性。作者认为,仪器摆动造成的光照强度的变化可以简单地归因于太阳天顶角的变化,设仪器直立时的太阳实际天顶角为 $\alpha$ ,而仪器实际摆动时的天顶角为 $\theta$ ,可以将摆动获得的辐照度 $E'(\lambda)$ 数值换算成标准的辐照度 $E(\lambda)$ :

$$E(\lambda) = E'(\lambda) \frac{\cos\alpha}{\cos\theta} \quad (7)$$

式中:

$$\cos\theta = \cos\beta\cos\alpha + \sin\alpha\sin\beta\cos(180-\varphi) \quad (8)$$

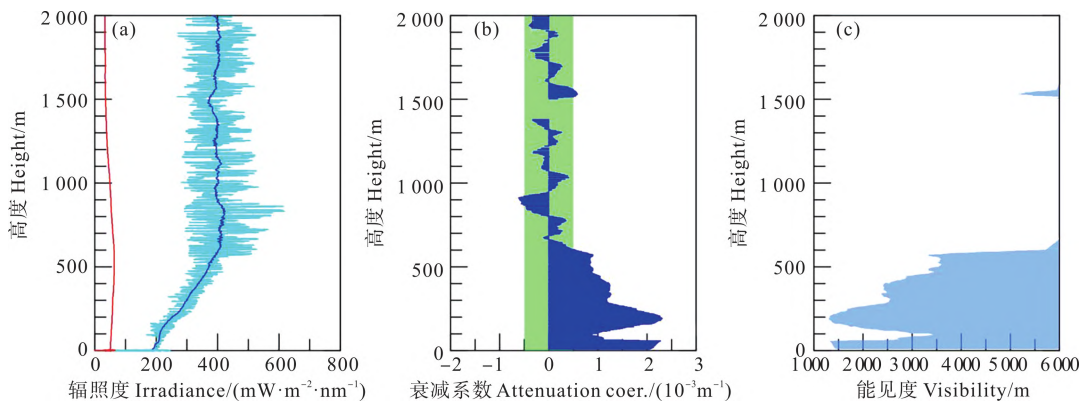
式中: $\beta$ 为仪器法向偏离铅直方向的夹角; $\varphi$ 为摆动面偏离太阳光来向的夹角。从式(8)可见,当仪器处于直立状态时, $\beta=0$ ,给出的辐照度值代表该位置的垂向测量辐照度值;但如果仪器因摆动并非处于直立状态,需要按式(8)进行姿态订正,换算为直立状态的辐照度值。式(7)看起来很简单,实际需要经过复杂的算法,具体内容将在另文发表。经过校正的辐照度数据滤除了大部分因摆动引起的高频信息,得到辐照度的垂直分布信息。

获得了辐照度随高度的变化后,按照式(5)计算谱衰减系数,并将谱衰减系数加权平均,得到各层大气在可见光谱段(400~700 nm)的平均衰减系数,然后根据式(3)得到各层大气的能见度。

### 3.3 雾能见度垂直结构的观测结果分析

作者于2020年中国第11次北极科学考察期间对仪器进行了试验,由于该航次是北极航次,观测站位普遍位于高纬度地区,辐照度小于中纬度地区。在有雾情形,辐照度受到进一步的削弱。

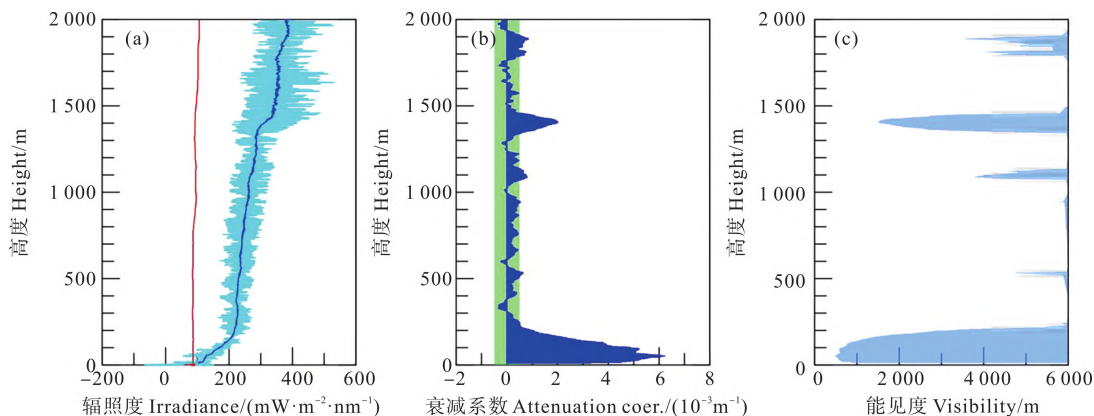
图7、8和9是几个典型浓雾情形的示例,描写各种海雾的不同垂直结构。各图的子图(a)为空中机(蓝线)和地面机(红线)测得的辐照度的垂向分布,以530 nm为例;从图7(a)可见,原始辐照度数据中包含了丰富的垂直变化信息,虽然由于仪器的摆动引起了一定的偏差,但在进行了数据校正之后,很好地体现了辐照度的衰减特征。图7(b)为衰减系数 $\gamma$ 的垂向分布,图中绿色区域表明,衰减系数小于这个范围产生的能见度大于6 000 m。各个子图(b)都表明,在有雾的情形,垂向衰减系数明显增大。子图7(c)为水平能见度的垂向分布,其中白色区域表示可见范围,蓝色区域为不可见范围。



(观测日期为2020年08月21日00:38(UTC),释放位置为86°02.72'N,162°25.94'W。(a)空中机(蓝线)和地面机(红线)测得的530 nm辐照度的垂向分布;(b)垂向衰减系数 $\gamma$ 的垂向分布,图中绿色区域表明衰减系数小于这个范围产生的能见度大于6 000 m;(c)水平能见度的垂向分布,其中白色区域表示能见度,蓝色区域为不可见范围。Observation time: 00:38 (UTC) 21 August 2020, at location (86°02.72'N, 162°25.94'W). (a) Profile of 530 nm irradiance measured by the air FVP (blue line) and the corresponding irradiance of the same wavelength measured by the ground FVP (red line); (b) Profile of the vertical attenuation coefficient  $\gamma$ ; (c) Vertical distribution of horizontal visibility, where the white area indicates the visible range and the blue area represents the invisible range, i. e., the boundary between white and blue areas represents horizontal visibility.)

图7 雪龙2号极地考察船2020年北极航次X27站海雾垂直结构

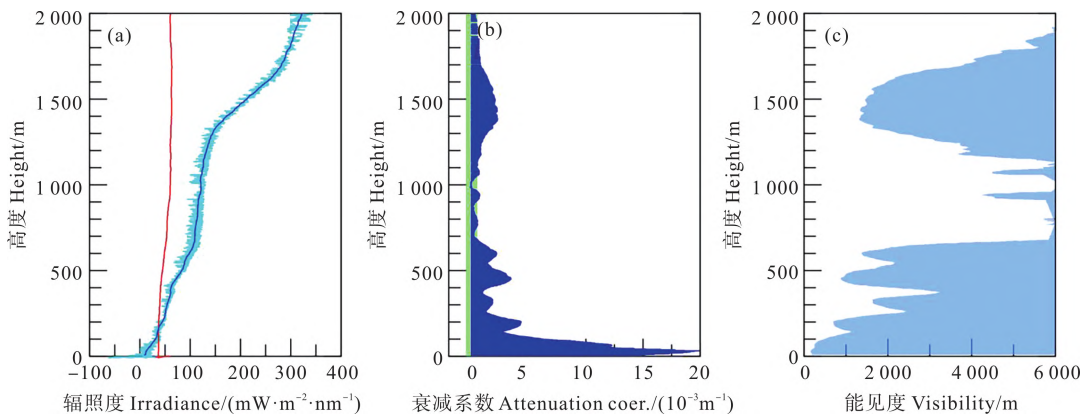
Fig. 7 Vertical structure of sea fog at station X27 during 2020 Xuelong-2 Arctic Research Expedition



(观测日期为2020年8月10日04:10(UCT),释放位置为76°50.30'N,151°05.38'W。图中曲线和标记的说明见图7。Observation time: 04:10 (UCT) 10 August, 2020 at location (76°50.30'N, 151°05.38'W). Refer to Figure 7 for the description of the curves and markers.)

图8 雪龙2号极地考察船2020年北极航次X19站海雾垂直结构

Fig. 8 Vertical structure of sea fog at station X19 during the 2020 Xuelong-2 Arctic Research Expedition



(观测日期为2020年08月07日04:02(UTC),释放位置为75°35.96'N,159°43.23'W。图中曲线和标记的说明见图7。Observation time: 04:02 (UTC) 07 August 2020, at location (75°35.96'N, 159°43.23'W). Refer to Figure 7 for the description of the curves and markers.)

图9 雪龙2号极地考察船2020年北极航次X16站海雾垂直结构

Fig. 9 Vertical structure of sea fog at station X16 during the 2020 Xuelong-2 Arctic Research Expedition

图 7(X27 站)在地面出现浓雾,地面能见度低于 800 m。在 200 m 之上,水平能见度有所增大,雾层厚度达到 600 m。其上方是无云的晴空。图 8(X19 站)在地面出现浓雾,能见度不足 500 m,但雾层厚度只有 200 多米,而且垂向很均匀,与图 7 中的能见度有明显的不同。在 1 300 m 左右出现了一层云,能见度降低到 1 000 多米。

图 9(X16 站)给出了雾的不同垂向结构。根据结果和现场记录,在地面附近有一个浓雾层,层厚超过 600 m,地面大气能见度只有几十米,200 m 以上能见度有所增大。此外,在 1 200~1 800 m 范围内存在一个很厚的云层,最低水平能见度不到 1 200 m。从其高度可知,这个低能见度层属于低云,该站同时受到低云和雾层的笼罩。

以上只是给出了雾能见度剖面仪观测的部分应用示例,所给出的能见度及其分布的原因需要进一步研究。此外大气能见度与气温、湿度、静力稳定度都有明显的关系,也需在进一步的研究中探讨。

#### 4 结语

大气能见度是重要的天气现象,不仅有近地面的水平分布特征,还有垂向分布变化。有雾时的大气能见度(简称雾能见度)在不同的高度有所差别,即存在层化现象。能见度仪一般采用主动光源,实现透射式或散射式的能见度探测。然而大部分能见度仪较重,大气能见度的垂向观测受到限制,目前雾的垂向结构研究很少。为此,我们提出,采用自然光进行光学观测,从而探测雾能见度的方案。该方案不使用人造光源,形成新的大气垂向能见度探测手段。

采用该方案获取大气能见度需要使用辐照度计的数据,为此我们研制了一种体积小、重量轻、传输距离远的投弃式微型辐照度计,实现用探空气球携带升空进行大气能见度的垂直剖面探测。目前辐照度计的技术很成熟,主要采用光栅或滤光片为分光元件。本文介绍的投弃式雾能见度剖面仪既能精确测量辐照度数据,从而准确反演大气能见度,又能满足重量轻、造价低的特点,是大气垂向能见度探测的有效工具。

测量太阳光谱辐照度的仪器主要分为通道式和光谱式两种。本文采用以宽带宽滤光片为分光元件的通道式仪器,测量光谱辐照度。为此,我们提出了宽波段多光谱辐照度计校正算法,实现了对辐照度的精确反演。在此基础上,我们对仪器在空中的摆动姿态进行了研究,创新性地将仪器倾斜时的谱辐照度测量结果校正为垂向测量的谱辐照度。为此,我们采用加权平均的方式获取太阳辐射在垂向的衰减系数,并成功反演出雾能见度的垂向分布。

通过仪器测量辐照度的垂向剖面,可以给出各个高度上的光学衰减系数,测量得到的各个高度上的能见度都是水平能见度。由于在不同高度上雾的浓度和成分不同,不同高度的大气水平能见度也不同。大气能见度的垂直剖面探测就是要给出大气水平能见度的垂直分布,用于认识大气水平能见度的空间不均匀性。从研究结果可以清晰地看到,采用 FVP 进行光的垂向剖面测量可以体现大气能见度的分层现象。不同区域雾的垂向结构有很大的不同,我们研发的大气能见度剖面仪可以为深入研究雾的垂向结构提供宝贵的数据,有重要的应用价值。

**致谢:**感谢唐军武研究员、张廷禄教授、陈树果教授在大气光学理论和技术方面提供的支持和帮助。

#### 参考文献:

- [1] Houghton H G, Radford W H. On the local dissipation of natural Fog, papers in physical oceanography and meteorology[J]. Massachusetts: Cambridge and Woods Hole, 1938.
- [2] 李子华, 杨军, 石春娥, 等. 地区性浓雾物理[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 13.  
Li Zihua, Yang Jun, Shi Chun'e, et al. The Physics of Regional Dense Fog[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008: 13.
- [3] Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. Fog research: A review of past achievements and future perspectives[J]. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164: 1121-1159.
- [4] Kaseke K F, Wang L. Reconciling the isotope-based fog classification with meteorological conditions of different fog types[J]. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127321.
- [5] Zhang S, Li M, Meng X, et al. A comparison study between spring and summer fogs in the Yellow Sea-observations and mechanisms[J]. Pure and Applied Geophysics, 2012, 169: 1001-1017.
- [6] 千月欣, 王永忠, 李佳骏, 等. 基于深度学习的机场能见度预测研究[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2021, 30(6): 615-620.  
Qian Yuexin, Wang Yongzhong, Li Jiajun, et al. Research on airport visibility prediction based on deep learning[J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 2021, 30(6): 615-620.
- [7] 郎紫晴. 基于风云四号的海雾识别算法及对海洋航线影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.  
Lang Ziqing. Research on Sea Fog Recognition Algorithm Based on FY-4A and Its Impact on Ocean Routes[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.
- [8] Dorman C E, Mejia J, Koracin D, et al. World marine fog analysis based on 58-years of ship observations[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(1): 145-168.
- [9] Song S, Chen Y, Chen X, et al. Adapting to a foggy future along trans-arctic shipping routes[J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(8): e2022GL102395.
- [10] Heo K Y, Park S, Ha K J, et al. Algorithm for sea fog monitoring with the use of information technologies[J]. Meteorological Applications, 2014, 21(2): 350-359.

- [11] Tomasi C, Tampieri F. Features of the proportionality coefficient in the relationship between visibility and liquid water content in haze and fog[J]. *Atmosphere*, 1976, 14(2): 61-76.
- [12] Niu S, Lu C, Liu Y, et al. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: A case study[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27: 1259-1275.
- [13] 傅刚, 李晓岚, 魏娜. 大气能见度研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(5): 855-862.  
Fu Gang, Li Xiaolan, Wei Na. Review on the atmospheric visibility research[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(5): 855-862.
- [14] Blackwell H R. Contrast thresholds of the human eye[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1946, 36(11): 624-643.
- [15] Muench H S, Moroz E Y, Jacobs L P. Development and Calibration of the Forward Scatter Visibility Meter[M]. Air Force Cambridge Research Laboratories, Air Force Systems Command, Cambridge: United States Air Force, 1974.
- [16] Lee H K, Suh M S. A comparative study on the visibility characteristics of naked-eye observation and visibility meters of fog over South Korea[J]. *Atmosphere*, 2018, 28(1): 69-83.
- [17] 张霁琛. 现代气象观测[M]. 北京: 北京大学出版社, 2015.  
Zhang Aichen. *Modern Meteorological Observation*[M]. Beijing: Peking University Press, 2015.
- [18] 黄成栋, 李玮, 刘瑞良, 等. 透射式能见度仪校准方法研究[J]. *气象水文海洋仪器*, 2018, 35(1): 17-19.  
Huang Chendong, Li Wei, Liu Ruiliang, et al. Research on calibration methods of transmission visibility meter[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2018, 35(1): 17-19.
- [19] 曾书儿, 王改利. 能见度的观测及其仪器[J]. *应用气象学报*, 1999(2): 80-85.  
Zeng Shu'er, Wang Gaili. Observation and instrument of visibility[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1999(2): 80-85.
- [20] 王建森, 葛永华, 章焕, 等. 气象用前向散射式能见度传感器核查方法探讨[J]. *中国仪器仪表*, 2021(5): 70-72.  
Wang Jiansen, Ge Yonghua, Zhang Huan, et al. Discussion on verification method of forward scattering visibility sensor for meteorology[J]. *China Instrumentation*, 2021(5): 70-72.
- [21] 杜传耀, 马舒庆, 杨玲, 等. 双光路能见度测量方法和试验[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 610-617.  
Du Chuanyao, Ma Shuqing, Yang Ling, et al. Dual optical path visibility system measuring method and experiment[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(5): 610-617.
- [22] Ju T, Wu B, Zhang H, et al. Parameterization of radiation fog-top height and methods evaluation in Tianjin[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(5): 480-486.
- [23] Egli S, Maier F, Bendix J, et al. Vertical distribution of microphysical properties in radiation fogs: A case study[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 130-145.
- [24] 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 天津南部地区平流雾过程塔层气象要素特征分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(5): 744-750.  
Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Zhang Changchun, et al. Analysis of the micro-meteorologic element during the advection fog period in the south of Tianjin City[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 44(5): 744-750.
- [25] Tomine K, Michimoto K, Hikiji I, et al. The vertical structure of fog observed with a lidar system at Misawa Airbase, Japan[J]. *Journal of Applied Meteorology (1988-2005)*, 1991: 1088-1096.
- [26] Hamazu K, Hashiguchi H, Wakayama T, et al. A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(7): 972-986.
- [27] 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): e2021EA002049.
- [28] Caicedo V, Rappenglück B, Lefer B, et al. Comparison of aerosol lidar retrieval methods for boundary layer height detection using ceilometer aerosol backscatter data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(4): 1609-1622.
- [29] Yi L, Li K F, Chen X, et al. Arctic fog detection using infrared spectral measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, 36(8): 1643-1656.
- [30] Hommersom A, Kratzer S, Laanen M, et al. Intercomparison in the field between the new WISP-3 and other radiometers (TriOS Ramses, ASD FieldSpec, and TACCS)[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 063615.
- [31] Tveiterås J H. Characterization of Hyper Spectral Irradiance and Radiance Sensors[D]. Bergen: The University of Bergen, 2013.
- [32] 王维波, 靖春生, 郭小钢. 极区海洋漫射衰减系数的观测和模拟[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(7): 1550-1562.  
Wang Weibo, Jing Chunsheng, Guo Xiaogang. Observation and simulation of Marine diffuse attenuation coefficients in the polar oceans[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2023, 53(7): 1550-1562.
- [33] Miniature Light-Intensity Data Logger COMPACT 8LW[C]. <http://www.candv.co.kr/data/COMPACT-8LW>.
- [34] 赵进平, 刘一林, 衣立, 等. 用垂向光学辐照度测量数据计算雾能见度的方法和验证[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(5): 1-10.  
Zhao Jinping, Liu Yilin, Yi Li, et al. A method for retrieving fog visibility from vertical optical measurement and its validation[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(5): 1-10.
- [35] 林晔, 王庆安, 顾松山, 等. 大气探测学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 79-98.  
Lin Ye, Wang Qingan, Gu Songshan, et al. *Atmospheric Observation*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 79-98.
- [36] Koschmieder H. Theorie der Horizontalen Sichtweite[M]. [s. l.]; Keim & Nemnich, 1925.
- [37] 李曙光, 刘晓东, 侯蓝田, 等. 沙尘暴对大气能见度影响的数值模拟与分析[J]. *应用激光*, 2003, 23(2): 87-90.  
Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian, et al. Theoretical calculation about influence of sand storm on atmospheric visibility[J]. *Applied Laser*, 2003, 23(2): 87-90.
- [38] Middleton W E K. Bouguer, Lambert and the theory of horizontal visibility[J]. *Isis*, 1960, 51(2): 145-149.
- [39] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
Rao Ruizhong. *Modern Atmospheric Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [40] 贾之娟. 激光在雾环境下的传输衰减特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.  
Jia Zhijuan. Study on the Attenuation Characteristics of Laser

- Transmission in Fog[D]. Xi'an; Xi'an University of Technology, 2021.
- [41] 黄荣辉. 大气科学发展的回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2001(5): 643-657.
- Huang Ronghui. Review and prospects of the developments of atmospheric sciences[J]. *Advances in Earth Science*, 2001(5): 643-657.
- [42] Shangguan M J, Xia H Y, Shu Z F, et al. Scanning FP etalon based high spectral resolution lidar for low-stratosphere temperature measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(12): 26-32.
- [43] Wiscombe W J. Improved Mie scattering algorithms[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(9): 1505-1509.
- [44] Ma L. Measurement of aerosol size distribution function using Mie scattering—Mathematical considerations[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38(11): 1150-1162.
- [45] Tsiiankou V, Hinzer K, Haysom J, et al. Design principles and field performance of a solar spectral irradiance meter[J]. *Solar Energy*, 2016, 133: 94-102.
- [46] Gröbner J, Kouremeti N. The precision solar spectroradiometer (PSR) for direct solar irradiance measurements[J]. *Solar Energy*, 2019, 185: 199-210.
- [47] 黄雄豪. 高精度太阳直射光谱辐照度仪的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- Huang Xinghao. Development of High-Precision Direct Solar Spectral Irradiance Monitor[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [48] Heuermann R, Reuter R, Willkomm R. RAMSES: A Modular Multispectral Radiometer for Light Measurements in the UV and VIS[C]. [s. l.]: Environmental Sensing and Applications, SPIE, 1999, 3821: 279-285.
- [49] Ramírez Pérez M. New Observational Approaches for Optically Complex Waters Based on High-Resolution Transmissometry [D]. Catalunya; Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [50] 蓝菲光学. 标准漫反射板/漫透射膜 SG 系列. <https://www.instrument.com.cn/show/C519931.html>.
- [51] Akhmanov S A, Nikitin S Y. *Physical Optics*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [52] Liu Y L, Zhao J P, Chen P, et al. Calculation algorithm for spectral irradiance using broad-band optical filter data[J]. *Intelligent Marine Technology and Systems*, 2024, 2: 1-14. <https://doi.org/10.1007/s44295-024-00044-1>
- [53] 汤笑笑. 直射散射光谱辐射计改进及其定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- Tang Xiaoxiao. Study on the Improvement of Direct-Scattering Spectroradiometer and Its Calibration Method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.

## Principles and Applications of a Disposable Fog Visibility Profiler

Zhao Jinping<sup>1,2</sup>, Chen Ping<sup>3</sup>, Liu Yilin<sup>1,2,4</sup>, Chen Xianyao<sup>4</sup>, Men Yabin<sup>5</sup>, Xu Junchen<sup>5</sup>,  
Yi Li<sup>1</sup>, Li Tao<sup>1</sup>, Wang Xiaoyu<sup>4</sup>, Luan Liang<sup>2</sup>, Gao Lin<sup>1</sup>

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Guanchao Marine Technology Limited Company, Qingdao 266000, China; 3. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266100, China; 4. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 5. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

**Abstract:** Accurate observation of atmospheric visibility is an important basis for fog research. Most known visibility phenomena are based on the observations and studies near the ground. In fact, fog visibility in the sky is vertically different, showing a vertical stratification feature. The existing atmospheric visibility meters are heavy and cannot be carried by sounding balloons. Due to the limitation of observation methods, the vertical structure of fog is rarely studied. In order to obtain the vertical attenuation coefficient of the atmosphere, a disposable miniature irradiance meter with small volume, light weight and long transmission distance was developed, which is the key part of the Fog Visibility Profiler (FVP). FVP is equipped with five monochromatic bands and one full-spectrum band, which can be used to further study the relationship between the spectral attenuation coefficient and fog visibility. The radiometer is typically utilized by either grating-based or filter-based spectral acquirement techniques. Here, the filter-based measurement was adopted by using a broad-band filters to obtain spectral irradiance. This miniature radiometer is carried aloft by a meteorological balloon and collects natural light irradiance for detecting fog visibility. FVP not only can measure the atmospheric irradiance accurately, but also has the characteristics of light weight and low cost, so it becomes a new means to detect the vertical characteristics of atmospheric visibility. We also propose two innovative algorithms for accurate measurement of atmospheric irradiance: inversion of spectral irradiance and correction of instrument swing. inversion of spectral irradiance based on a calibration algorithm for the broad-band multispectral radiometer to enable precise retrieval of irradiance. Correction algorithm of instrument swing was innovatively developed a to correct the spectral irradiance. On this basis, the vertical distribution of atmospheric visibility is successfully reversed using the diffuse attenuation coefficient of solar radiation obtained in the vertical direction. From the results of the field experiments, it is clear that the profile observation using the FVP can capture the vertical structure of visibility in fog situation. The actual observation results show that the fog not only has rich information in the vertical direction, but also has obvious differences in space, which needs further study. The atmospheric visibility profiler can provide valuable data for the in-depth study of the vertical structure of fog and has important application value.

**Key words:** fog visibility; profiler; vertical structure of fog; irradiance; attenuation coefficient; multi-spectrum

责任编辑 庞 旻