

孙跃,肖辉,冯强,等. 2020 年雾灵山人工低频强声波增雨和消雾试验. 应用气象学报,2024,35(1):90-102.

DOI: 10.11898/1001-7313.20240108

2020 年雾灵山人工低频强声波增雨和消雾试验

孙跃¹⁾ 肖辉^{1)2)*} 冯强³⁾ 张云⁴⁾
舒未希¹⁾²⁾ 付丹红¹⁾²⁾ 杨慧玲¹⁾²⁾

¹⁾(中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室,北京 100029)

²⁾(中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049)

³⁾(中国科学院空天信息创新研究院,北京 100094)

⁴⁾(国防科技大学气象海洋学院,长沙 410003)

摘 要

为了研究人工低频强声波增雨和消雾作业手段的效果,使用最大声压级为 155 dB 的电声低频强声波装置原型机,于 2020 年 8—9 月在河北省雾灵山开展增雨和消雾外场作业观测试验。具有明显消雾效果的两个典型个例显示:作业开始后 2~3 min 内尺度小于 10 μm 的雾滴减少,尺度大于 10 μm 的雾滴增多;随后大部分尺度的雾滴明显减少,10 min 内能见度可从小于 100 m 回升至最高 1000 m。在风速、风向与消雾效果的关系方面,消雾效果明显的个例均发生在平均风速小于 1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且风向可使雾能够途经声波装置影响范围近侧的条件下,而平均风速大于 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的个例能见度几乎未出现趋势性变化。在一次地面平均风速为 1.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的对流云增雨作业中观测到符合试验预期的结果,开始作业后的 3 min 内地面雨强从 0.3 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 迅速增至 7 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,并观测到出现迅速但维持时间较短的大雨滴。其他增雨个例在作业时段的平均风速均超过 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,可能受风速偏大和观测点单一的影响,未能观测到明确且一致的增雨证据。

关键词: 人工强声波; 增雨; 消雾; 雾灵山

引 言

云和雾由尺度在微米量级或更大的水凝物组成,分别由高空和近地面的水汽凝结或凝华等微物理过程形成。云和雾均是人工影响天气的重要作业对象。对云的人工影响目的主要为增雨、消减雨和防雹等,主要作业手段为通过高炮、火箭弹、飞机、地面发生器等方式向云播撒催化剂。对于具有过冷水的云,播撒人工冰核(如 AgI 等)或制冷剂(如液态二氧化碳、干冰、液氮等)可消耗过冷水使冰晶增长并下落,最终引发冷云降水微物理连锁反应;对于温度大于 0 $^{\circ}\text{C}$ 的云,播撒吸湿性催化剂(如盐粉、吸湿性混合剂等)可诱发大云滴的形成,促进云滴碰并增

长成为尺度和下落末速度更大的雨滴,从而形成降水,即暖云增雨。然而,上述作业方式往往涉及作业空域的协调,在作业的灵活性和安全性等方面不可避免地存在局限性。人工消雾的作业手段除了加热和人工扰动等方法外,还包括按照雾的冷、暖性质播撒针对性催化剂,作业灵活性方面也存在局限性。因此,仍然有必要探索人工影响云雾和降水的新技术和方法。

声波可促使气溶胶和云雾粒子发生聚并、碰并增长^[1],是应用潜力值得深入挖掘的人工影响手段。早在 20 世纪 60 年代,苏联科学家已归纳出经典可解析计算的声波影响气溶胶、云雾等小粒子碰并的理论主要包括同向位移效应^[1-3]和声尾流效应^[1,4]。同向位移效应指不同强度、频率的声波携带不同尺度

2023-10-24 收到,2023-12-07 收到再改稿。

资助项目:国家重点研发计划(2019YFC1510304)

* 通信作者,邮箱:hxiao@mail.iap.ac.cn

粒子的能力存在差异,导致粒子出现额外相向运动的效应。如在气流沿声波法线方向往复变化的微观流场中,较小粒子在气动阻力作用下会在极短时间内被加速到和气流运动一致,而较大粒子受气动阻力作用被加速所需时间更长,最终可能导致在 1 个声波正弦波形的后半周期,大粒子刚被加速到正速度最大值,由于惯性仍在向前运动,而小粒子则已开始向相反方向运动,导致不同尺度粒子出现同向位移。这种效应在给定背景条件、声波频率和强度及粒子固有物理属性后可解析计算^[5]。通常频率在 10^2 Hz 量级或更低的低频声波更易驱使 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的粒子出现同向位移,高频声波的粒子则容易促使 $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ 尺度的粒子发生该效应。声尾流效应指在声波法线方向上的两个粒子由于存在交替遮挡关系而产生相向运动的能力。该机制很好地解释了单分散颗粒在声波作用下也能出现明显聚并增长的现象。此外,许焕斌^[6]指出声波能影响球形粒子边界层的动量交换状态,减小粒子下落时的空气阻力,形成润滑效应,这是既能增加粒子下落速度也能影响粒子碰并的潜在机制之一。

20 世纪 70 年代后随着空气质量健康标准愈发受到重视,许多学者陆续开展试验和数值模拟,研究人工声场促使燃烧排放的飞灰颗粒发生聚并的能力和规律^[7-13],以达到清除空气污染物的目的。Hoffmann 等^[14-15]采用显微镜下的可视化追踪技术,发现两个粒子在强声波作用下呈音叉状振荡下落最终聚并的运动轨迹,该现象表明两个粒子在声波作用下发生聚并的轨迹基本符合声尾流效应的理论计算结果。González 等^[16-17]提出能更精确反映声尾流效应的计算方案。Zhang 等^[18-21]在 González 的工作基础上相继开展计算流体力学验证与离散元数值模拟方法的改进与应用,并展示声波消烟试验。此外,近年国内还有研究团队从工程角度开展强声波清除气溶胶的室内试验研究。

在声波消雾和影响降水方面,20 世纪 60 年代我国学者已在探讨声场中粒子的受力^[22],并能实现行波管中的消雾^[23]。早期有文献记载船舶汽笛前方的消雾现象。顾震潮^[24]提到声波对云雾的影响作用,但可能受制于有限的作业和观测等条件,未能形成明确结论。侯双全等^[25]开展低频强声波消雾的室内试验,结果显示:在声压级超过 130 dB 的 30 Hz 低频强声波作用下,1 min 后出现直径接近 $10\ \mu\text{m}$ 的大滴增多现象,雾室内的水雾在 2 min 内

迅速消散,明显区别于超过 5 min 的自然消散时间。该试验还证实消雾效果具有随频率增加而减弱的趋势。这些现象与声波促使粒子碰并的原理和解析计算规律基本相符,从而证明人工强声波能够消除一定体积内的雾。此外,有研究从工程角度开展外场增雨^[26]和消雾的试验探索。许焕斌^[6]也开展过声场雨效应的外场随机对比试验,归纳出声响雨大、声停雨小的试验现象。但总体而言,充分结合云雾和降水物理观、探测手段和分析方法的声波外场作业试验与研究报道仍较少。

声波外场增雨和消雾作业可行性的关键问题在于声波的强度及其随距离的衰减。根据球面波的衰减规律,声波法线上水平距离分别为 S_1 和 S_2 的两点声压级差异为 $20\times\lg(S_1/S_2)$ dB,即与声波源的距离每增加 1 个量级,理论上声压级衰减 20 dB。考虑许多强声波装置在出口(通常约定为 1 m 处)的声压级超过 150 dB,100 m 距离上声压级仍能达到 110 dB,而这也较实验室内发现的有消雾作用的声压级下限(100 dB)^[21-22]更高。外场试验的声波波束不免具有一定的角度展宽范围,对于静稳天气下的雾过程,人工低频强声波能直接影响空间体积比试验室内大得多的雾,叠加局部消雾后四周雾扩散、平流的补充效应,理论上可在下游局部范围内达到消、减雾的效果。另一方面,100 m 距离接近甚至超越许多低云的云底高度,如果能在云底引发粒子增长和下落,可能会拖曳减弱上升气流或形成下沉气流,从而促成更多雨滴下落的连锁反应。然而,自然条件下的云雾在宏微观特性方面均存在很大时空变率,人工强声波能否真正达成显著的影响效果,仍然亟待研究。

2020 年 8—9 月中国科学院大气物理研究所牵头的研究团队在河北省雾灵山开展人工强声波装置的增雨和消雾试验,并进行应用效果评估研究。本文将对此轮外场试验进行介绍,并基于结果讨论作业试验的效果。

1 数据和方法

1.1 试验场地及观测设备

雾灵山地处河北省承德市兴隆县,紧邻北京东北界外,系燕山山脉主峰,最高海拔为 2118 m。雾灵山以夏季多雾多云而闻名,现为国家 AAAA 级旅游景区。本文试验团队于 2020 年 8 月 18 日—9

月 13 日在雾灵山顶景区构建了临时外场试验阵地。图 1 为试验场位置和仪器分布,其中试验场上空照片取自高分 2 号卫星 0.8 m 分辨率全色通道数据。A 点为山顶西侧的一处平台空地,人工强声波装置部署于此。A 点周围是其他机构的平房,试验团队租用其中一部分以供试验仪器供电和团队住宿。B 点为平房楼顶,部署具备超声风速仪的 Lufft WS600-UMB 型自动气象站(采样频率为 5 s)和 OTT Parsivel2 型雨滴谱仪(采样频率为 1 min),用于观测背景气象信息和评估增雨效果。C 点位于主峰及山顶信号塔南侧山坡步行道旁相对平坦开阔的位置,距离 A 点约 126 m,海拔略高于 A 点,部署 HY-V20 型能见度仪(采样频率为 15 s)和 DMT FM-120 型雾滴谱仪^[27](采样频率为 1 s),用于评估消雾效果。此外,使用 NTi XL2 型手持式声压级计在不同位置观测无计权声压级,用以评估人工强声波装置发射声波的性能参数。

在观测点位置的设计方面,由于几乎所有的雾(包括部分不易与雾区分的地形云,以下统称为雾)均从山的南坡爬升而来,故最初在考察和选定试验场地时,本文研究团队原计划人工强声波装置在图 1

A 点向南边作业,并在 A 点部署 1 台雾滴谱仪作为影响观测点,在侧风方向稍远距离部署第 2 台雾滴谱仪作为对比观测点。但试验场地开始部署设备并经过对雾天实况考察后发现,由于 A 点平台南侧边缘过于陡峭,雾要么爬升不上来而从平台侧边绕过 A 点,要么沿人工强声波装置无法影响到的负仰角爬升上来,因此观测点并不理想。A 点和 C 点间为景区停车场,不宜部署设备,故将消雾影响观测点设置在剩余可行的、具有步行道且坡度较缓的 C 点。山顶南坡其他周边位置受限于无步行道或地形陡峭等因素,不易完成观测设备及其线缆的布设和维护,故第 2 台雾滴谱仪仅为备用,未能实现利用其构建侧向对比观测点的试验构想。消雾作业时,A 点的人工强声波装置向 C 点南侧的山坡上空进行作业,预计可影响到沿坡度较缓的山坡向山顶移动的雾。此时 C 点作为影响区的下游,预计可观测到受作业影响前后能见度和雾滴谱的变化。对于增雨作业,则将人工强声波装置指向天顶,并向目测降水云系的来向(基本为偏北向)略微倾斜约 10° 天顶角,由 B 点的雨滴谱观测作业前后雨滴谱的变化。

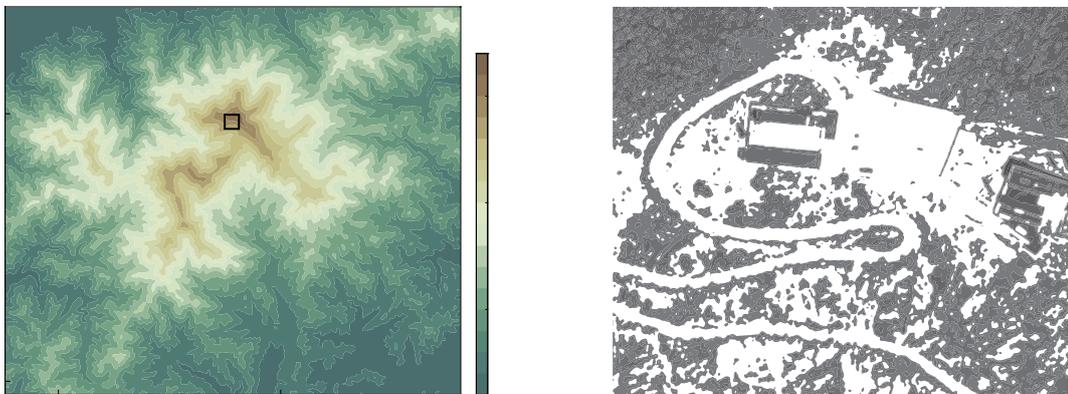


图 1 雾灵山顶临时试验场的位置(方框,填色为海拔高度)(a)与仪器分布(A 为架设在地面平台上的人工强声波装置,B 为架设在屋顶的激光雨滴谱仪和自动气象站,C 为雾滴谱仪和能见度仪观测点;蓝色箭头为消雾试验时云雾从南坡爬上山顶的方向示意,红色箭头为低频强声波装置消雾发射时的声波朝向)(b)

Fig. 1 Location of temporary experiment site on the top of Wuling Mountain (the box, the shaded denotes altitude)(a) and placement of observation instruments (A denotes the placement of artificial strong sound wave device on the ground platform, B denotes the placement of laser disdrometer and automatic weather station, C denotes the placement of fog droplet spectrometer and visibility meter; the blue arrow denotes the fog moving direction, the red arrow denotes the direction of artificial sound wave for fog dissipation)(b)

1.2 人工强声波装置

本文使用的人工强声波装置为中国科学院大气物理研究所和中国电子科技集团公司第三研究所联合研制的电声低频强声波装置原型机。该装置主体是由 9 个电声音箱组成的发声阵列,仰角和方位角可手动调整,另外附属有功放机柜和有线音源控制盒。该装置设计的最大声压级为 155 dB(1 m 处),试验时由手动控制开关及播放预制的单一频率数字音源。

图 2 为人工强声波装置声压级随发射声波频率和测试距离的变化。试验团队在 A 点北侧的房顶上进行观测,测试点距离装置约为 30 m。由于受周边房屋遮挡、折射干涉和山风影响,声压级可能偏小,但仍然可见,在 200 Hz 和 60 Hz 位置具有极值,声压级超过 120 dB,符合该装置可发射低频强声波的设计目的。与此同时,钳形电表现场测试该装置

的电功率为 2000~8000 W,具体电功率与声压级和声音频率有关。

另一个需要外场实证的问题是装置发出的声波是否能传播较远的距离。由于雾灵山山间地形较为崎岖且晴天时山风较强,在雾灵山试验期间并未形成较完整的声压级随距离变化的测试结果,仅测得 C 点(距声源 126 m)的声压级最高为 106 dB。为此,2020 年 11 月 23 日本研究团队专门赴具有 2 km 长的直线步行道及开阔环境的北京顺义奥林匹克水上公园,在晴朗且几乎无风的傍晚进行补充测试。测试不同频率下 30 m~1 km 距离的声压级,结果显示该装置发出的声波声压级随距离的变化符合理论推算值,即距离增大 1 个量级声压级衰减 20 dB。可能受声波同时沿地面传播的影响,实测声压级还略高于推算值,且明显高于背景声压级,从而验证了该装置发出强声波的传播能力。

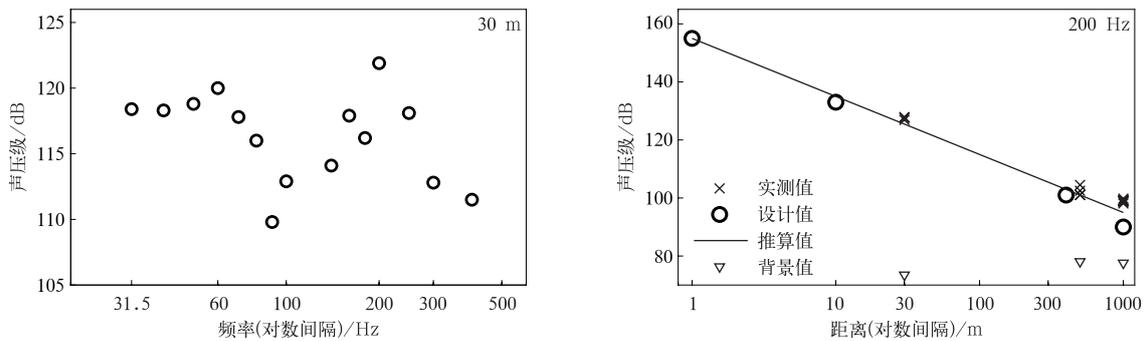


图 2 声压级随频率和距离的变化

Fig. 2 Sound pressure level varying with frequency and distance

由于作业装置需要调整指向,声压级的方向图也是需要关注的重要指标。本文在远近两个地点(126 m 和 30 m)分别开展了声压级方向图测量。

鉴于装置设计的局限性,在 A 点北侧 30 m 处房顶的观测采用抬升声波装置的仰角进行,在 C 点的观测采用变换声波装置的方位角进行。由图 3 可知,两

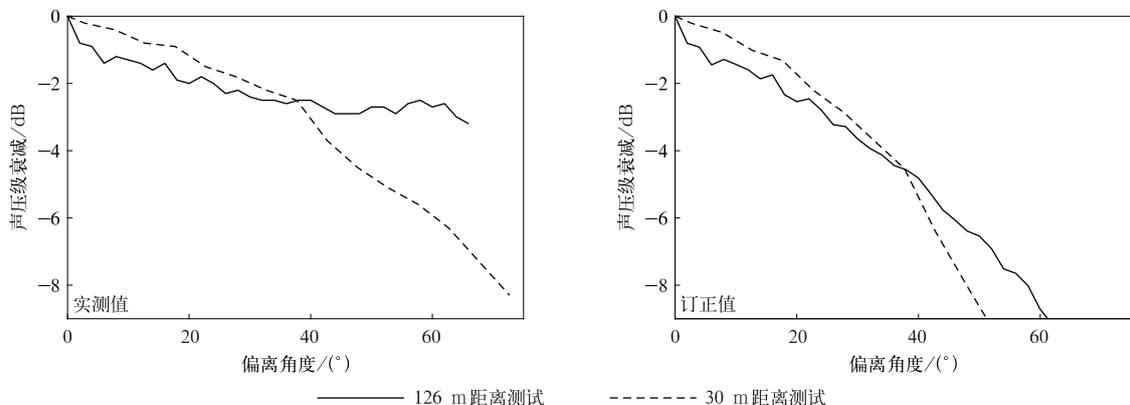


图 3 人工强声波装置的声压级方向图

Fig. 3 Directional images of sound pressure level of artificial strong sound wave device

个地点的观测结果存在差异。该声波装置 30 m 测量点疑似由于地面和房屋折射影响,在偏离角度 40° 以内的衰减较慢;126 m 测量点疑似由于山风和山体传播、反射等因素影响,在偏离角度 40° 以上的衰减较慢。总体而言,由发声阵列构成声波装置的定向性偏弱,衰减 6 dB(两倍)对应的偏离角度为 60° 甚至更大,这与抛物面天线雷达、号筒喇叭等装置的能量集中性存在明显差异。但不能就此认为该装置拥有如此大方位角的影响范围,还应考虑偏离角度增大后声压级随距离衰减的影响。经过订正,6 dB 衰减对应的偏离角度为 $40^\circ\sim 45^\circ$,由此确定该声波装置的影响范围。

另一个需要关注的问题是人工强声波装置是否成为影响周边环境的噪声源。需要指出的是,本文以 dB 为单位的无加权声压级与用于评估环境噪声的声压级有所不同,后者使用 A 计权声压级(声环境质量标准 GB 3096—2008),即按照人耳的敏感程度对不同声音频率赋予不同权重再积分得到声压级。在人耳较为敏感的 1000~5000 Hz, A 计权权重大于 1,在更高频和更低频方向权重系数依次减小。如 30 Hz 的权重系数约为 -40 dB,60 Hz 的权重系数约为 -27 dB。以声环境质量标准为例,昼间居民区对环境噪声 A 计权声压级限制为 55 dB。经反算可知最大声压级 155 dB 的强声波装置以 60 Hz 作业时,若要满足居民区的噪声标准,则作业装置在中间无地物遮挡的情况下需距离居民区 4.5 km 以上。实际情况下难免有地物遮挡,导致声波快速衰减,作业装置也应尽可能距居民区 1 km 以上,本文试验也符合这一指标。另一方面,近距离测试人员在声波装置正面 30 m 的噪声感受(A 计权下大于 90 dB)会超过工厂内的限制(通常规定最大不超过 90 dB),但考虑到近距离的测试时间非常短且非持续性,在佩戴隔音耳罩后认为可以临时承受。对于在声波装置侧面和背面的其他控制人员和相关人员,10~30 m 距离的噪声感受类似在铁路干线或飞机场旁,也认为短暂操作相关设备时可以临时承受。

1.3 作业方案和预期结果

低频强声波装置消雾试验的作业需充分考虑外场试验和室内试验的主要差异,即自然雾具有移动性和时空不均匀性。因此,外场消雾不宜像室内试验一样长时间持续开机作业直至雾消散。由 1.1 节和 1.2 节可知,本文的声波装置在 100 m 量级的距

离上声压级已不足 110 dB,接近室内试验中声波促使粒子碰并的声压级下限;考虑到该声波装置法线两侧存在最大 45° 的展览,不论雾的来向是偏南侧还是偏西侧,经声波影响区到达观测点 C 均约为 100 m。以试验地区爬坡的山风分别为 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (一级风)和 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (二级风)为例,雾被风输送 100 m 距离的时间分别为 200 s 和 50 s。因此,如果声波消雾在这种外场条件能够产生效果,则在 $10^0\sim 10^1\text{ min}$ 量级时间内必然能够在下游观测到能见度和雾滴谱发生变化,而在更长时间后才出现的雾消散效果则应考虑是雾本身的时空尺度和移动的结果。另一方面,考虑即便影响区出现消雾效果,其上游即山坡下面会有雾补充,因而不期望短时作业能使山顶的雾完全消散。综合上述考虑,制定作业试验方案:等待雾从山下爬升上来并基本维持在极低能见度状态(A 点通过目测看不到 C 点,能见度小于 100 m),以 10 min 左右作为声波装置开机时长,以 5~10 min 间隔,交替开机、关机。预期观测的宏观结果:开机时段具有明显消雾现象,关机时段具有雾明显回升补充现象。对于增雨试验,采用类似的交替开机、关机方式进行试验。按照上述方法,2020 年 8 月 23 日—9 月 10 日分别在 7 个作业日开展 25 次开机消雾试验,9 月 7—11 日期间分别在 3 个作业日 5 个作业时段内开展 22 次开机增雨试验。

在预期的微物理观测效果方面,由于强声波理论上能促使粒子碰并,形成更大的粒子,引发更多的粒子沉降,故在雾滴谱和雨滴谱中应能观测到相应的变化。对于消雾试验中的雾滴谱数据,预期观测到作业时发生小粒子减少、大粒子先增多再减少的现象。考虑到 C 点位于影响区下游,可能存在大粒子已经在上游沉降而无法进一步向下游输送的情况,故作业时 C 点实际观测到的大粒子增加数可能偏少,即大粒子数浓度存在增长但幅度有限。对于增雨试验中的雨滴谱数据,预期作业后表现出大雨滴突然增多的现象。考虑到作业前无法观测到那些最终无法下落的小云滴和小雨滴,因此无法预期雨滴谱数据出现类似雾滴谱的小雨滴减少的现象。此外,还需关注是否出现声响雨大、声停雨小^[6]的现象。

2 作业效果观测与分析

2.1 2020 年 8 月 23 日消雾试验

2020 年 8 月下旬雾灵山地区除 25 日前后受途

经黄河北上的第 8 号台风巴威(2008)外沿的影响外,其他时间 500 hPa 上总体受中纬度纬向型环流影响。受延伸到华东地区的西北太平洋副热带高压(台风时段除外)影响,雾灵山地区 850 hPa 为偏南风。在上述环流背景下,山谷形成的雾在白天可被上坡风及背景偏南风输送至山顶,偏南风本身也能促使水汽上坡时发生凝结,导致山顶可观测到雾的过程。

2020 年 8 月 23 日除自动气象站的接收终端通讯尚在调试外,其他观测仪器均已完成部署,当日下午迎来一次雾过程。声波频率采用低频方向声压级较高的 60 Hz,采用开机 10 min、暂停 5 min 的方式进行试验。由图 4 可见,8 月 23 日 17:45(北京时,下同)能见度由 800 m 降至 100 m 以下并几乎稳定维持,最低可至 60 m。第 1 次开机作业后,能见度迅速回升至最高 500 m,之后在 100~500 m 间振荡,关机后回落至最低 50 m。第 2 次开机后类似,能

能见度先迅速回升至 300 m,之后最高可超过 1000 m,关机后能见度持续回落至 40 m 以下。进一步通过线性拟合计算作业时段内能见度随时间的变化,求得前两次作业的能见度回升速度分别为 $14.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $59.3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。但是后两次作业的能见度始终为 100 m 以下,第 3 次作业完全没有消雾效果($-0.1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$),第 4 次作业仅有微弱效果($3.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)。雾滴谱参数随时间的变化与能见度的对应关系很好;对于前两次作业,均存在数浓度和液态水含量减小、体积中值等效直径先增大再减小的现象;后两次作业未能显现以上变化趋势,且液态水含量比前两次作业开始前大 2 倍,体积中值等效直径也明显较大。第 4 次作业结束 5 min 后,虽然雾的过程尚未结束,但考虑到日落后光线不足可能导致试验人员在山间活动存在安全隐患,故结束当日试验。

由平均雾滴谱变化(图 5)可知,在前两次消雾

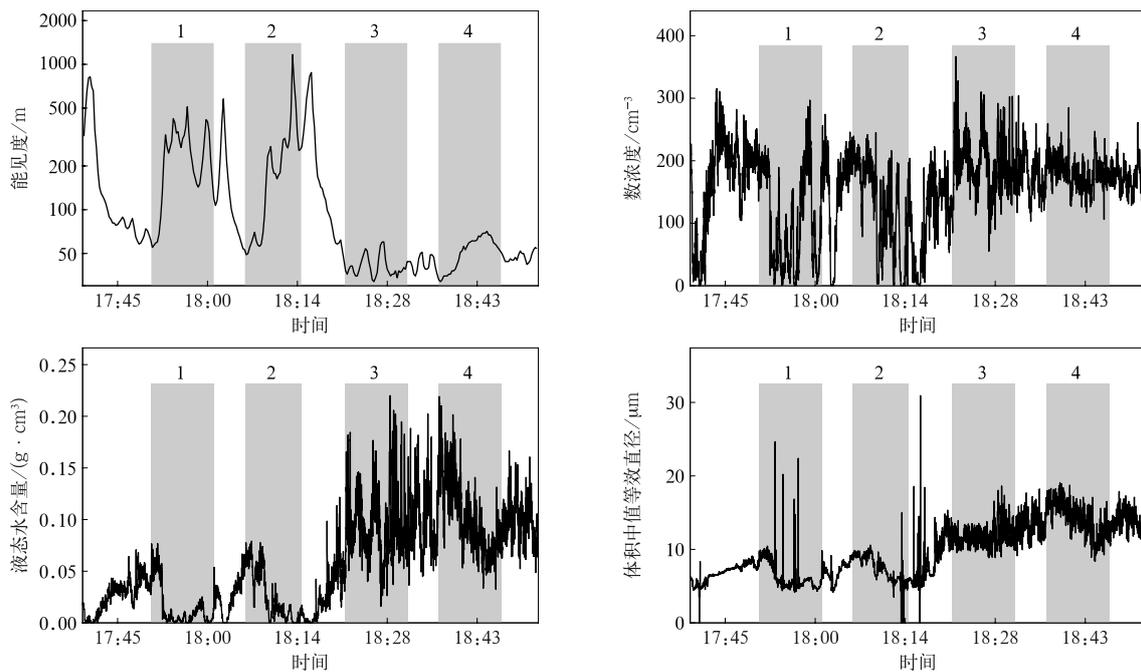


图 4 2020 年 8 月 23 日消雾试验的能见度和雾滴谱参数

(有序号阴影区代表开机作业的顺序时段)

Fig. 4 Visibility and fog size distribution parameters during fog dissipation experiments on 23 Aug 2020

(the numbered shaded area denotes sequential operation period)

效果明显的作业中,雾滴谱演变符合预期。对于第 1 次作业,作业开始 1 min 后雾滴尺度小于 $10 \mu\text{m}$ 的粒子减少,尺度大于 $10 \mu\text{m}$ 的粒子增多,但作业 2 min 后尺度大于 $5 \mu\text{m}$ 的粒子迅速减少。对于第 2 次作业,作业开始 2 min 后出现小粒子略微减少

而大粒子略微增多的现象,且在作业 4 min 后出现尺度大于 $5 \mu\text{m}$ 的粒子全部迅速减少的现象。这与 1.3 节试验方案设计时期望的结果非常吻合。而第 3 和第 4 次消雾效果不明显的试验中,雾滴谱的变化幅度非常小。

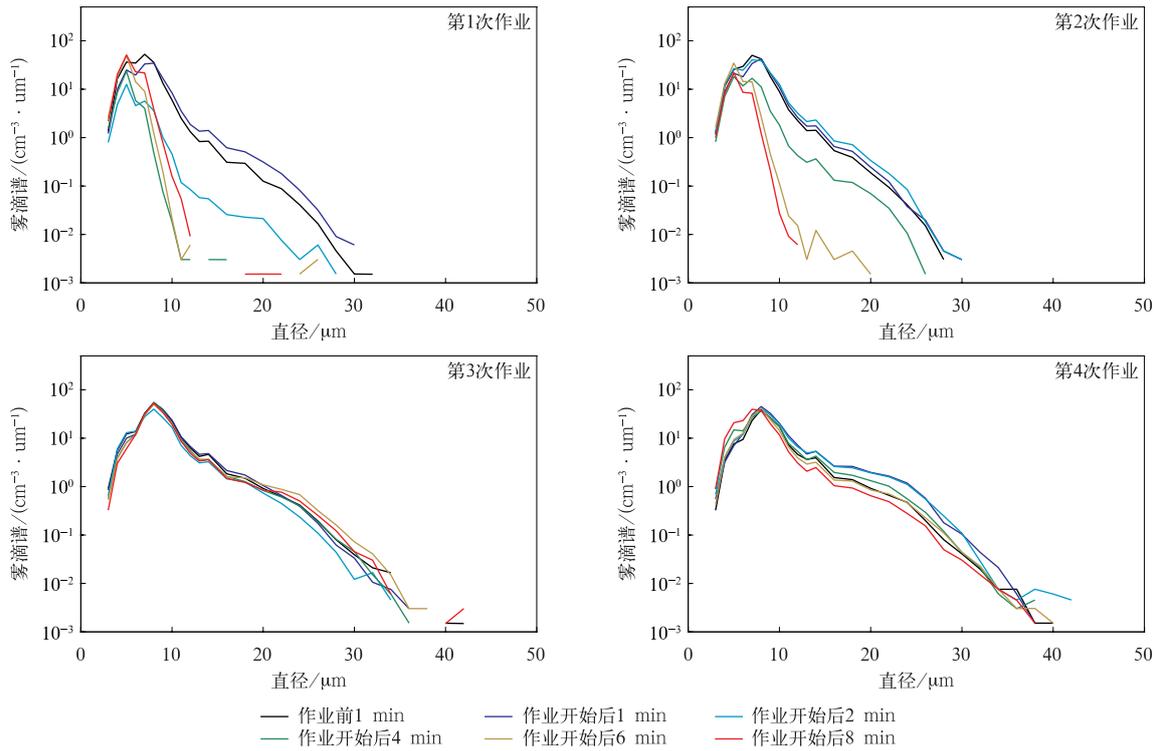


图 5 2020 年 8 月 23 日 4 次消雾作业前后的雾滴谱

Fig. 5 Fog droplet size distribution during four fog dissipation operation periods on 23 Aug 2020

前两次作业效果好而后两次作业无效可能有两个方面原因：一是后两次作业时雾过于浓密，二是山坡下的风速、风向发生变化。但由于原定计划用于观测风速的自动气象站在该作业日的次日才完成部署，这使得当日缺少山顶的实测风信息供参考。因此，采用 ERA5 再分析地面 10 m 水平风数据作为参考。由图 6 可知，空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 ERA5 数据格点恰好位于雾灵山周边，通过对山下数据的简单插值无法合理评估山上的风速，但可以通过作业时段内两个整点时次风速、风向的变化分析山上风向的变化趋势。在距离前两次作业最近的整点 18:00，雾灵山南偏东侧格点为不足 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风，而西南侧格点几乎静风，表明当时山南坡很可能为风速很小的西南风。但比较临近后两次作业时间的 19:00，山南侧全部转为风速较 18:00 更大的偏东风。这能较好地解释作业效果的差异：对于前两次作业，雾在较弱西南风输送下经过图 1 中 A、C 两点连线南侧的作业影响区并较充分地受到声波作业影响；对于后两次作业，雾被东南风向山顶输送，处于 C 点相对 A 点的远端，未过声波较强的影响区，因而几乎未受到声波作业影响。除风向变化外，风速增强导致雾的输送能力增强也能很好地解释后两次作业观测的液态水含量和体积中值等效

直径较前两次作业明显偏大的现象。综上，在风速很小且风向促使雾途经声波装置影响范围近侧时，在下游容易观测到消雾效果。

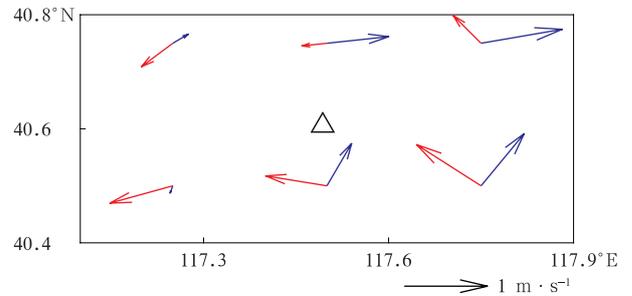


图 6 2020 年 8 月 23 日消雾作时雾灵山周边地区 ERA5 地面风 (Δ 为雾灵山, 蓝色矢量为 18:00 的风, 红色矢量为 19:00 的风)

Fig. 6 ERA5 surface wind in the surrounding area of Wuling Mountain during fog dissipation operations on 23 Aug 2020

(Δ denotes Wuling Mountain, the blue vector denotes wind at 1800 BT, the red vector denotes wind at 1900 BT)

2.2 其他消雾试验

其余 21 次消雾试验的作业声波频率仍以 60 Hz 为主，并穿插采用少量 31.5 Hz 和 200 Hz 等其他作

业频率,每次作业时长为 5~15 min,间隔 5~10 min。但得到的结果不如 8 月 23 日试验典型。由图 7 可知,2020 年 8 月 27 日的能见度在两次作业时均有一定程度的回升趋势,但振荡也很明显,较难判断这些变化是否为雾的空间不均匀性导致的自然起伏;2020 年 8 月 28 日和 29 日各仅进行 1 次声波作业,虽然作业期间能见度明显回升,但持续 10 min 的作

业暂停后,雾彻底消散,使得这两个个例作为孤证时无法区分是否为作业的效果;2020 年 8 月 30 日的作业从能见度变化几乎看不出作业效果;其他未展示个例均在一定程度上存在上述问题。此外,由于未能连续复现单一声波频率的消雾效果,声波频率对消雾效果的影响试验未能充分开展。

结合 2.1 节 2020 年 8 月 23 日试验的分析经

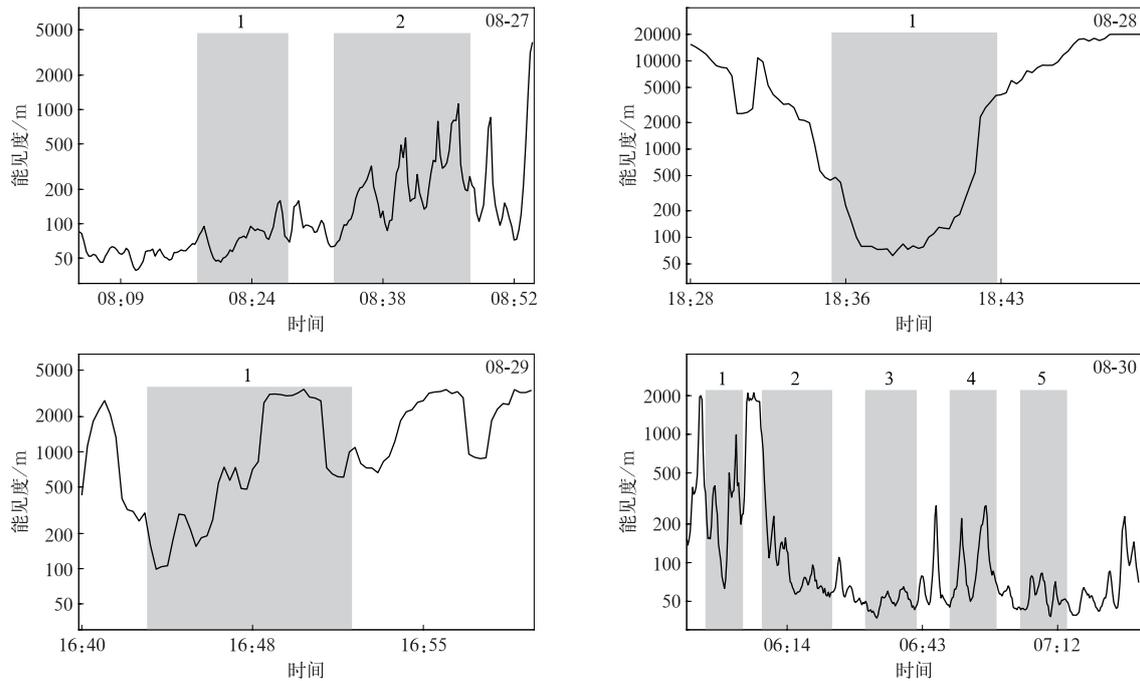


图 7 2020 年消雾试验的能见度变化个例(有序号的阴影区代表开机作业的顺序时段)

Fig. 7 Examples of visibility changes during fog dissipation experiments in 2020 (the numbered shaded area denotes sequential operation period)

验,风速、风向可能是影响上述声波消雾作业效果在下游观测结果的关键因素,下面分析上述 21 次作业时段内自动气象站观测的水平风和能见度变化速度

的关系。需要指出的是,图 1 中 B 点观测的风可能与其南侧山坡上的风存在差异,因此,相关统计结果仅作为定性参考。由图 8 可知,能见度变化速度最

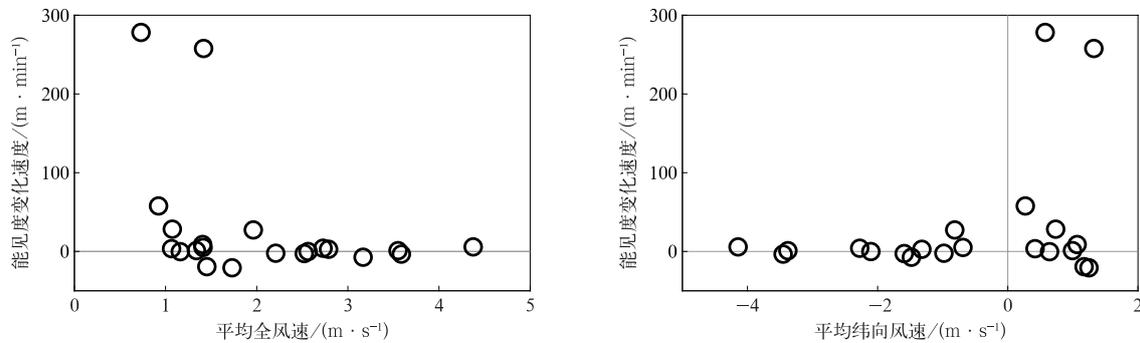


图 8 2020 年 8 月 27 日—9 月 10 日 21 次消雾作业时段内自动气象站风速和能见度变化速度的关系

Fig. 8 Relationship between wind speed of automatic weather station and visibility change for 21 fog dissipation operations from 27 Aug to 10 Sep in 2020

大 3 次试验对应的数据点全部位于平均风速小于 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区间,而在风速大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区间能见度变化速度基本接近于 0。另一方面,结合纬向风分量分析可见,能见度变化速度较大的试验对应的数据点更多分布在偏西风的区间。综上分析,与 2.1 节典型个例对风速的讨论结果类似,在风速较小且风向使得雾途经声波装置影响范围近侧时,更容易观测到明显的低频强声波消雾效果。

2.3 增雨试验

开展的 5 个增雨试验时段的风速和云类型见表 1。2020 年 9 月 7 日起雾灵山地区逐渐受东北冷涡影响,频繁出现降水天气。在此期间,降水云全部从山北侧移来。经现场目测和 FY-4A 气象卫星红外通道云图确认,9 月 7 日作业云是冷涡云系西侧边界外的对流云,9 月 10—11 日作业云则是冷涡云系内偏西南侧的层状云。

表 1 2020 年增雨试验的风速和云信息

试验时段	开机次数	平均风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	云类型
09-07T15:38—16:00	4	1.4	对流云
09-10T06:54—07:20	3	3.1	层状云
09-10T08:46—10:11	9	3.3	层状云
09-11T11:23—12:03	3	3.0	层状云
09-11T16:53—17:33	3	3.6	层状云

比较典型的增雨是 2020 年 9 月 7 日针对一块对流云的个例。考虑到低频声波的周期更长、更具驱动大粒子的能力,故选择最低的 31.5 Hz 频率声波进行作业。此外,考虑到云的移速相对较快且一般积云空间尺度有限,以比消雾试验更短的 3 min 和 2 min 分别作为开始时长和暂停间隔为主。由图 9 可见,作业开始前 $2 \sim 3 \text{ min}$,仅能观测到 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右的微量降水,且仅出现 2 min ;第 1 次作业时,雨强迅速增加至 $7.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,具有明显的突然增加现象。其后的 3 次作业效果均不明显,尽管第 3 次和第 4 次开机后雨强也出

现增加趋势,但量级非常小,这可能是由于第 1 次作业已使大部分具有碰并潜力的雨滴增长并迅速下落,也可能是云逐渐移出观测场所致。由第 1 次作业的雨滴谱可见,作业开始后 $1 \sim 3 \text{ min}$ 以及作业结束后 1 min ,可观测到的最大雨滴尺度持续增加,从作业前的不足 2 mm 增大到作业结束后 1 min 超过 6 mm 。作业结束后 2 min ,大雨滴才明显减少,同时小于 3 mm 的小雨滴明显增多,这可能是由于大雨滴下落拖曳上升气流从而使得更多雨滴下落。综合上述现象,认为该次增雨试验符合作业后大雨滴迅速增多的试验预期。

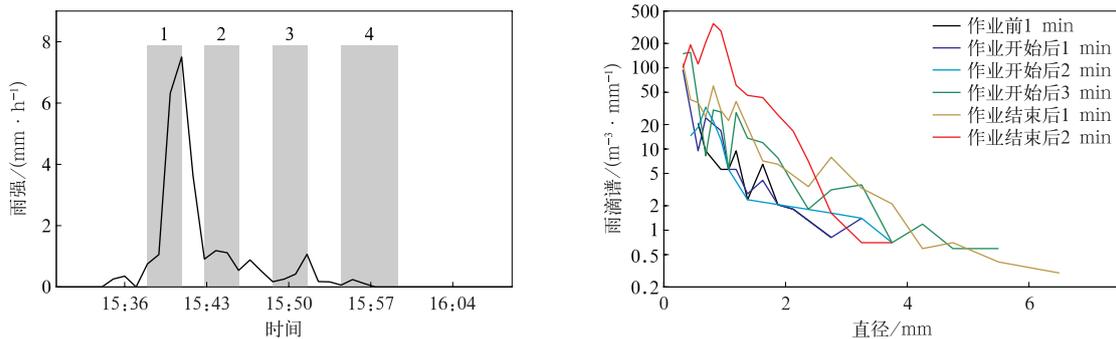


图 9 2020 年 9 月 7 日增雨试验的雨强和第 1 次作业前后的雨滴谱
(带序号阴影区代表开机作业的顺序时段)

Fig. 9 Rainfall intensity and raindrop size distribution before and after the first operations during rainfall enhancement experiments on 7 Sep 2020
(the numbered shaded area denotes sequential operation period)

需要指出的是,尽管自然对流性降水本身具有脉动特征,其中也不乏尺度超过 5 mm 的大雨

滴^[28-33],但该个例作业后短时间内出现了仅持续 2 min 、尺度分别超过 5 mm 和 6 mm 的大雨滴,这

在以往不多见。Luo 等^[34]研究显示,在位于雾灵山西南侧、北京郊区顺义区观测的暴雨系统雨滴谱中,较为孤立的对流云虽然在雨滴谱时间变化上也会表现出突然性和脉动性,但最大雨滴未超过 4 mm,更大的雨滴出现在强对流云系主体内。河北省周边地区的典型强降水确实可见超过 6 mm 的雨滴^[35-36],但也全部出现在大到暴雨且持续时间较长的强对流系统中。在强度稍弱的对流中^[37-38],类似尺度的大雨滴仍然很少见。上述 9 月 7 日的个例尚属孤证,且没有对比站点或特种雷达进行对比和追踪剖析,加之影响雨滴最大尺寸的因素较多,但周边地区的针对性研究较少,故不能就此确定上述作业后大雨滴迅速增多一定由作业导致,该现象仅能作为符合作业试验预期的一种佐证。

对于其余针对层状云的增雨试验,试验团队原预计层状云相比对流云在时空变化方面更加均匀和

稳定,遂采取 200、60 Hz 和 31.5 Hz 声波频率轮流的方式开展作业。但疑似受较大风速影响,未能再次观测到类似 2020 年 9 月 7 日的个例。如在 2020 年 9 月 10 日清晨的 3 次作业仅在后 2 次作业结束后才出现零星时次的微量降水,雨滴谱原始采样极少导致难以分析滴谱变化;9 月 10 日上午的 9 次作业雨强呈振荡变化,其中 4 次作业期间雨强增大,另外 5 次作业期间雨强减小,未能表明作业和增雨的关系;9 月 11 日中午的 3 次作业期间均出现微量的间断性降水,有些类似声响雨大、声停雨小的现象^[6],但较第 1 次作业开始前 1 min 的雨强并无明显量级差异;9 月 11 日下午作业开始前出现降水,作业后反而没有。总体看,2020 年 9 月 10—11 日针对层状云的增雨试验未能表现出明显且一致的增雨现象和预期的微物理变化特征。

在成因分析方面,表 1 显示 2020 年 9 月 7 日针

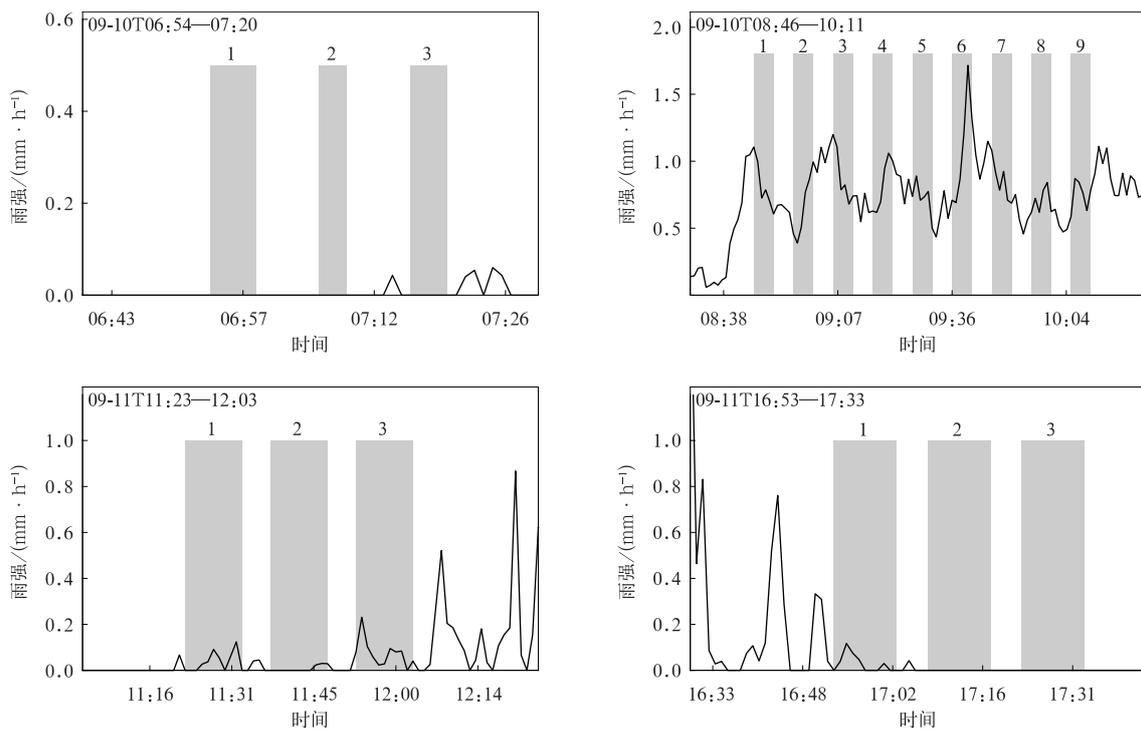


图 10 2020 年 9 月 10—11 日增雨试验的雨强(具有序号的阴影区代表开机作业的顺序时段)

Fig. 10 Rainfall intensity during rainfall enhancement experiments from 10 to 11 in Sep 2020 (the numbered shaded area denotes sequential operation period)

对对流云作业时,山顶平均风速仅为 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其余针对层状云的作业,风速均超过 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,增大 1 倍多。云系过山时易受山顶地形和建筑物引起的复杂气流影响,较大的风速和瞬时多变的风向使受作业影响而形成的大雨滴未必恰好在雨滴谱仪上方下

落,可能导致不易观测到确定性的有效增雨证据。

3 结论与讨论

本文综合分析 2020 年 8—9 月在雾灵山利用人

工低频强声波装置开展的增雨和消雾作业试验的观测结果,得到主要结论如下:

1) 对于具有明显消雾效果的典型个例,在微观变化方面,60 Hz 低频强声波作业 2~3 min 内尺度小于 10 μm 的雾滴减少,尺度大于 10 μm 的雾滴增多,随后大部分尺度的雾滴均出现明显减少;在宏观变化方面,作业开机时能见度回升并达到消雾效果,关机后雾受观测点上游补充影响又导致能见度迅速回落。这些宏微观变化特征符合低频强声波促进粒子碰并形成大粒子进而引发沉降的原理及试验预期。

2) 风速风向对消雾效果有较大影响。作业时能见度回升速度大的个例发生在平均风速小于 1.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,而平均风速大于 2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的个例几乎未能表现出能见度的趋势性变化。在风速较小且风向使得雾能够途经声波装置影响范围近侧时,作业更加充分,下游更易取得明显的消雾效果。

3) 在 1 次对流云的增雨作业中观测到了符合试验预期的结果。雨强在作业 3 min 内由 0.3 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 迅速增加到 7 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,并能够观测到迅速出现但维持时间较短的大雨滴,符合低频强声波促进云、雨粒子碰并进而形成大雨滴和降水的原理。

4) 雨量明显增加的个例发生在平均风速仅为 1.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下。其他增雨个例在作业时段的平均风速均超过 3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,可能受风速偏大和雨滴谱仪部署点位单一的影响,未能观测到增雨的确证性证据。

尽管增雨和消雾效果明显的作业个例在本轮外场试验中占比很少,但在效果相对理想的个例中已能获取与原理和试验预期相符的云雾和降水粒子微物理演变的证据,初步验证了人工强声波装置开展消雾和增雨作业的可行性和有效性,同时也积累了许多经验。首先,目前人工强声波装置仅适合在静稳、微风天气下开展消雾作业,应避免在风速较大时盲目开展作业。其次,山间地形崎岖,气流复杂,本轮试验观测点位部署灵活性较差。未来应尽量选择开阔的平台场地开展消雾外场试验,并在可能的上下游位置充分部署观测设备,确保可靠的对比观测点,以便积累更多可靠的试验结果对人工强声波影响降水和雾的效果进行充分评估。再次,在野外临时阵地的选择方面,应对预选阵地周围的各种天气实况和环境状况进行更加充分的考察。此外,对于增雨试验,应结合具有距离高度显示扫描功能的天气雷达或云雷达,针对性地探测作业点上空及云移动方向上的垂直剖面,以便进一步明晰声波促使云

雨粒子碰并增长的物理证据。

参考文献

- [1] 肖辉,舒未希,付丹红,等. 声波对气溶胶和云雾粒子聚并影响研究进展. 应用气象学报,2021,32(3):257-271.
Xiao H, Shu W X, Fu D H, et al. A review on the effect of sound waves upon the coalescence of aerosol and cloud and fog particles. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 257-271.
- [2] Mednikov E P, Larrick C V. Acoustic Coagulation and Precipitation of Aerosols. New York: Consultants Bureau, 1965: 1-180.
- [3] 吴学利. 悬浮细颗粒声波团聚的理论及实验研究. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2014.
Wu X L. The Theoretical and Experimental Study on Acoustic Agglomeration of Fine Particles. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2014.
- [4] Dianov D B, Podolskii A A, Turubarov V I. Calculation of the hydrodynamic interaction of aerosol particles in a sound field under Oseen flow conditions. *Sov Phys Acoust*, 1968, 13(3): 314-319.
- [5] Zhou D, Luo Z Y, Fang M X, et al. Numerical calculation of particle movement in sound wave fields and experimental verification through high-speed photography. *Appl Energy*, 2017, 185: 2245-2250.
- [6] 许焕斌. 中国的防雷实践和理论提炼. 北京: 气象出版社, 2021.
Xu H B. Practice and Theory Hail Suppression in China. Beijing: China Meteorological Press, 2021.
- [7] Volk M, Moroz W J. Sonic agglomeration of aerosol particles. *Water Air Soil Pollut*, 1976, 5(3): 319-334.
- [8] Rajendran N, Wegrzyn J, Cheng M T, et al. Acoustic precipitation of aerosol under standing-wave condition. *J Aerosol Sci*, 1979, 10(3): 329-338.
- [9] Chou K H, Lee P S, Wegrzyn J, et al. Aerosol deposition in acoustically induced turbulent flow. *Atmos Environ*, 1982, 16(6): 1513-1522.
- [10] Tiwary R, Reethof G. Hydrodynamic interaction of spherical aerosol particles in a high intensity acoustic field. *J Sound Vib*, 1986, 108(1): 33-49.
- [11] Hoffmann T L, Koopmann G H. Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: Theory evaluation. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101(6): 3421-3429.
- [12] Riera-Franco de Sarabia E, Gallego-Juárez J A, Acosta-Aparicio V M, et al. Acoustic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts: First results of the influence of humidity at two acoustic frequencies. *J Aerosol Sci*, 2000, 31: 827-828.
- [13] Liu J Z, Zhang G X, Zhou J H, et al. Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies. *Powder Technol*, 2009, 193(1): 20-25.
- [14] Hoffmann T L, Koopmann G H. A new technique for visualization of acoustic particle agglomeration. *Rev Sci Instrum*, 1994, 65(5): 1527-1536.
- [15] Hoffmann T L. An extended kernel for acoustic agglomeration

- simulation based on the acoustic wake effect. *J Aerosol Sci*, 1997, 28(6): 919-936.
- [16] González I, Hoffmann T L, Gallego-Juárez J A. Theory and calculation of sound induced particle interactions of viscous origin. *Acustica*, 2000, 86(5): 784-797.
- [17] González I, Elvira L, Hoffmann T L, et al. Numerical study of the hydrodynamic interaction between aerosol particles due to the acoustic wake effect. *Acta Acust U Acust*, 2001, 87(4): 454-460.
- [18] Zhang G X, Zhang L L, Wang J Q, et al. A new model for the acoustic wake effect in aerosol acoustic agglomeration processes. *Appl Math Model*, 2018, 61: 124-140.
- [19] Zhang G X, Wang J Q, Chi Z H, et al. Acoustic agglomeration with addition of sprayed liquid droplets: Three-dimensional discrete element modeling and experimental verification. *Chem Eng Sci*, 2018, 187: 342-353.
- [20] Zhang G X, Zhang L L, Wang J Q, et al. A new multiple-time-step three-dimensional discrete element modeling of aerosol acoustic agglomeration. *Powder Technol*, 2018, 323: 393-402.
- [21] Zhang G X, Ma Z F, Shen J, et al. Experimental study on eliminating fire smokes using acoustic agglomeration technology. *J Hazard Mater*, 2020, 382: 121089.
- [22] 魏荣爵, 章肖融, 王耀俊. 气悬微粒在声场中所受的作用力对凝聚的贡献. *南京大学学报(自然科学版)*, 1964, 8(2): 249-265.
- Wei R J, Zhang X R, Wang Y J. Aerosol agglomeration due to forces in sound field. *J Nanjing Univ(Nat Sci Ed)*, 1964, 8(2): 249-265.
- [23] 章肖融, 干昌明, 魏荣爵. 声波对水雾消散作用的初步实验研究. *南京大学学报(自然科学版)*, 1963, 7(5): 21-28.
- Zhang X R, Gan C M, Wei R J. Sonic dissipation of water fog—A preliminary experimental study. *J Nanjing Univ(Nat Sci Ed)*, 1963, 7(5): 21-28.
- [24] 顾震潮. 云雾降水物理基础. 北京: 科学出版社, 1980.
- Gu Z C. Physical Basis of Cloud Precipitation. Beijing: Science Press, 1980.
- [25] 侯双全, 吴嘉, 席葆树. 低频声波对水雾消散作用的实验研究. *流体力学实验与测量*, 2002, 16(4): 52-56.
- Hou S Q, Wu J, Xi B S. Experiments on acoustic dissipation of water fog at low frequency. *Exp Meas Fluid Mech*, 2002, 16(4): 52-56.
- [26] Shi Y, Wei J H, Li Q, et al. Investigation of vertical microphysical characteristics of precipitation under the action of low-frequency acoustic waves. *Atmos Res*, 2021, 249: 105283.
- [27] 王庆, 李季, 樊明月, 等. 济南一次平流辐射雾的微物理结构及演变特征. *气象*, 2019, 45(9): 1299-1309.
- Wang Q, Li J, Fan M Y, et al. Microphysical structure and evolution characteristics of an advection-radiation fog event in Jinan. *Meteor Mon*, 2019, 45(9): 1299-1309.
- [28] 王俊, 王文青, 王洪, 等. 山东北部一次夏末雹暴地面降水粒子谱特征. *应用气象学报*, 2021, 32(3): 370-384.
- Wang J, Wang W Q, Wang H, et al. Hydrometeor particle characteristics during a late summer hailstorm in northern Shandong. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 370-384.
- [29] 黄泽文, 彭思越, 张浩然, 等. 福建安溪雨滴谱特征. *应用气象学报*, 2022, 33(2): 205-217.
- Huang Z W, Peng S Y, Zhang H R, et al. Characteristics of raindrop size distribution at Anxi of Fujian. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(2): 205-217.
- [30] 胡淑萍, 林文, 林长城, 等. 2014—2022年古田人工增雨随机试验物理检验. *应用气象学报*, 2023, 34(6): 706-716.
- Hu S P, Lin W, Lin C C, et al. Physical inspection of randomized trial for the artificial rain enhancement experiment at Gutian from 2014 to 2022. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(6): 706-716.
- [31] 葛黎黎, 吕国真, 赵桂香, 等. 太原地区雨滴谱季节分布特征. *应用气象学报*, 2023, 34(4): 489-502.
- Ge L L, Lü G Z, Zhao G X, et al. Seasonal distribution characteristics of raindrop spectrum in Taiyuan. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(4): 489-502.
- [32] 孙钦宏, 马洪波, 齐彦斌, 等. 2021年夏季长白山麓雨滴谱分布特征. *应用气象学报*, 2023, 34(3): 336-347.
- Sun Q H, Ma H B, Qi Y B, et al. Distribution characteristics of raindrop spectrum at Changbai Mountain foothills in summer of 2021. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3): 336-347.
- [33] 王俊, 郑丽娜, 王洪, 等. 山东6次台风雨雨滴谱统计特征及区域差异. *应用气象学报*, 2023, 34(4): 475-488.
- Wang J, Zheng L N, Wang H, et al. Statistical characteristics and regional differences of raindrop size distribution during 6 typhoon rainstorms in Shandong. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(4): 475-488.
- [34] Luo L, Xiao H, Yang H L, et al. Raindrop size distribution and microphysical characteristics of a great rainstorm in 2016 in Beijing, China. *Atmos Res*, 2020, 239: 104895.
- [35] 王俊, 姚展予, 侯淑梅, 等. 山东夏季两次极端雨强暴雨的滴谱特征研究. *大气科学*, 2023, 47(2): 311-326.
- Wang J, Yao Z Y, Hou S M, et al. The characteristics of raindrop size distribution in two rainstorms with extreme rainfall rates in summer in Shandong Province. *Chinese J Atmos Sci*, 2023, 47(2): 311-326.
- [36] Ding J F, Tian W S, Xiao H, et al. Raindrop size distribution and microphysical features of the extremely severe rainstorm on 20 July 2021 in Zhengzhou, China. *Atmos Res*, 2023, 289: 106739.
- [37] 宋灿, 周毓荃, 吴志会. 雨滴谱垂直演变特征的微雨雷达观测研究. *应用气象学报*, 2019, 30(4): 479-490.
- Song C, Zhou Y Q, Wu Z H. Vertical profiles of raindrop size distribution observed by micro rain radar. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(4): 479-490.
- [38] 常伟, 郭学良, 唐洁, 等. 青藏高原夏季对流云微物理特征和降水形成机制. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 720-734.
- Chang Y, Guo X L, Tang J, et al. Microphysical characteristics and precipitation formation mechanisms of convective clouds over the Tibetan Plateau in summer. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 720-734.

Rainfall Enhancement and Fog Dissipation Experiments in Wuling Mountain in 2020 Using Artificial Strong Sound Wave

Sun Yue¹⁾ Xiao Hui¹⁾²⁾ Feng Qiang³⁾ Zhang Yun⁴⁾
Shu Weixi¹⁾²⁾ Fu Danhong¹⁾²⁾ Yang Huiling¹⁾²⁾

¹⁾ (Key Laboratory of Cloud-Precipitation and Severe Storms,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

²⁾ (College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

³⁾ (Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

⁴⁾ (College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410003)

Abstract

Low-frequency sound wave is a new type of operational approach that has the potential for enhancing rainfall and dissipating fog. To investigate the impact of this type of equipment, field operations and observational experiments are conducted in Wuling Mountain from August to September 2020. Wuling Mountain is located at Chengde of Hebei outside the northeastern boundary of Beijing. The main peak of the Yanshan Mountains is renowned for its foggy summers with an altitude of 2118 m. In the experiment, a prototype of an electronic acoustic low-frequency strong sound wave device is used. This device has a maximum sound pressure level of 155 dB. Meanwhile, observation instruments such as a disdrometer, visibility meter, fog droplet spectrometer, and automatic weather station with an ultrasonic anemometer are deployed. These instruments are used to obtain the background conditions and to monitor macro and micro changes during rainfall enhancement and fog dissipation operations for evaluating the effectiveness.

In two typical cases with an obvious defogging effect, within 2 to 3 minutes after the start of the operation, the number of droplets smaller than $10\ \mu\text{m}$ decreased, while the number of droplets larger than $10\ \mu\text{m}$ increased. Subsequently, the size of the droplets on most scales decreased significantly, resulting in improved visibility. Within a span of 10 minutes, visibility could increase from less than 100 m to a maximum of 1000 m. The relationship between wind speed, wind direction, and the dissipation effect of fog shows that cases with a noticeable defogging effect occur when the average wind speed is less than $1.5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ and the wind direction causes the fog to pass through the near side of the influence range of the sound wave device, while cases with an average wind speed greater than $2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ hardly show any change in visibility trends. Results, which align with the experimental expectations, are observed during an operation on a convective cloud precipitation when the surface mean wind speed is $1.4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. In this case, the rainfall intensity increases rapidly from $0.3\ \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ to more than $7\ \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ within 3 min of operation, and large raindrops with rapid occurrence but short duration are observed. In other rainfall enhancement experimental cases, the average wind speed exceeded $3\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ during the operation period, and no clear and consistent evidence of increased rainfall is observed, which may be affected by the high wind speeds and only one single observation point.

Key words: artificial strong sound wave; rainfall enhancement; fog dissipation; Wuling Mountain