云和降水在低频强声波干预下的响应

魏加华^{1,2,3*}, 袁钧^{1,2*}, 李铁键^{1,2}, 黄跃飞^{1,2}, 乔祺^{1,3}, 曹炯玮^{1,3}, 钟德钰^{1,2}, 王光谦^{1,2}

1. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016;

2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

3. 青海大学水利电力学院, 西宁 810016

* E-mail: weijiahua@tsinghua.edu.cn; aeroengine@tsinghua.edu.cn

doi: [10.1360/SST-2021-0021](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0021)

天空中蓬松的云朵里, 蕴藏着惊人的水汽资源. 中国大气水年均资源总量达22亿吨, 空中水资源开发潜力巨大, 如何利用空中水资源是一个重要问题^[1]. 一个多世纪以来, 人类一直在寻求各种技术去控制天气过程, 试图改变自然水资源条件. 具有现代科学意义的人工影响天气技术诞生于20世纪40年代的美国, 科学家们提出了干冰、碘化银等催化剂播云技术. 长期以来, 包括中国在内, 全球有很多国家开展了播云增雨作业, 但都因为作业效果难以量化评估和作业成本高昂等原因而饱受争议^[2~4].

最近10年, 各种人工影响天气新技术出现了蓬勃发展的趋势^[5], 其中以大气电离、激光致凝、带电粒子催化等技术为主. 本文提出了一种基于声波的大气干预及空中水资源开发利用技术, 该技术利用声波的物理效应, 不使用任何催化剂, 不会对环境造成化学污染, 无需依赖飞机和火箭等载具, 可远程遥控, 成本低廉, 是一种全新的值得探索的空中水资源开发利用新技术.

声波大气干预技术的主要机制是通过声波的机械波动将声波能量赋予大气及其所含的颗粒物. 具体而言, 低频率高声强的声波会激发云体, 使之发生窄幅振荡, 云滴颗粒的同向团聚效应、共辐射压作用和声波尾流效应等声致凝聚机理, 引起云滴相对运动加剧, 粒子之间产生更大概率碰撞及融合, 加速水汽的凝

结, 快速增加雨滴粒径, 促发降雨. 以上对声波干预空中水汽团聚机理的认识都是基于理论或来自于室内云室实验、虚拟数值模拟研究, 还未开展过自然天气过程下声波干预大气的试验研究. 本研究建立了一套完整的声波大气干扰技术装备系统, 在此基础上开展了一系列的声学作用下云和降水响应的实验研究.

本研究采用的声波发生器是基于射流阻挡原理进行气流调制的气声源. 在稳定工作状态下, 出口1 m处的声压特性为131.6 dB@50 Hz和135.2 dB@160 dB, 低频综合声压级为136.7 dB. 我们采用了Ka/Ku双频双极化毫米波气象雷达, 监测作业目标云层内的水汽含量、云滴平均等效粒径、雨强等宏观云物理特征的变化情况. 在声波作业设备东、西、南、北四个方向上, 布置了地面雨量监测设备. 低频强声波大气干预试验设备及其布置情况如图1所示.

在历时131 min的试验中, 声波发生器陆续启停, 共开启3次, 分别维持15、37和30 min. 得到以下试验结果: (1) 发现声波触发效应, 在声波开启/关闭作用的触发下, 云层回波强度、云水含量、云滴平均等效粒径和降雨强度都会发生显著性变化; (2) 发现云层对声波的跟随效应, 不论是Ka还是Ku波段, 上述各个变量值在试验过程中均发生了明显的起伏波动, 起伏过程基本与声波发生器的启停过程吻合; (3) 发现高雨强区, 在离声波发生器0.5 km的范围内雨强是最大的,

英文全文见: Wei J H, Qiu J, Li T J, et al. Cloud and precipitation interference by strong low-frequency sound wave. Sci China Tech Sci, 2021, 64: 261–272, <https://doi.org/10.1007/s11431-019-1564-9>

图 1 (网络版彩图)低频强声波大气干预试验示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of atmospheric intervention experiments by low-frequency strong sound wave.

明显大于1 km以外的雨强, 由雨量采集板和雨量筒两种测量方式的数据显示, 声波作用中心区雨强比周围分别高17%和11%。

人工影响天气是一个富有争议却又极其诱人的研究领域, 效果评估是其核心关键。声波干预大气的研究挑战也来自于阐释低频强声波与云层的相互作用效果以及增雨效果。本研究建立了声波增雨试验的全套设备体系和技术方案, 开展了一系列声波影响云雨过程

响应特征的研究。从云层雷达回波强度、云微物理特征和地面雨强空间分布三个方面开展研究, 深入分析了声波作用的启闭对云层的触发效应、云层对声波的跟随效应、声波对雨强分布的影响。加深了对低频强声波与云层的相互作用的认识, 提供了量化评估声波增雨效果的多重全新的角度, 发现了声波影响云雨过程的一系列证据, 在很大程度上支撑了声波增雨的效果, 对进一步开展声波增雨科学研究大有裨益。

参考文献

- 1 Wang G Q, Zhong D Y, Li T J, et al. Study on sky rivers: Concept, theory, and implications. *J Hydro-Environ Res*, 2018, 21: 109–117
- 2 List R. Weather modification—A scenario for the future. *Bull Am Meteorol Soc*, 2004, 85: 51–64
- 3 Flossmann A I, Manton M, Abshaev A, et al. Review of advances in precipitation enhancement research. *Bull Am Meteorol Soc*, 2019, 100: 1463–1480
- 4 Qiu J, Cressey D. Taming the sky. *Nature*, 2008, 453: 970–974
- 5 Henin S, Petit Y, Rohwetter P, et al. Field measurements suggest the mechanism of laser-assisted water condensation. *Nat Commun*, 2011, 2: 456