

国内典型人工影响天气云降水观测试验进展

郭世钰 张玉欣 韩辉邦

(青海省气象灾害防御技术中心, 西宁 810001)

摘要: 介绍了我国人工影响天气领域典型观测试验研究进展, 总结和讨论了目前试验中存在的问题并提出了建议。内容包含气溶胶、云凝结核、大气冰核观测试验及室内试验研究成果, 以及不同云系云微物理特征和降水观测试验成果。有助于较为全面地了解目前我国人工影响天气观测试验取得的进展及存在的局限性, 为人工影响天气观测试验发展提供参考。

关键词: 人工影响天气, 观测试验, 云微物理

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.04.006

Research Progress of Typical Observation Experiment of Weather Modification and Cloud Precipitation in China

Guo Shiyu, Zhang Yuxin, Han Huibang

(Meteorological Disaster Prevention Technology Center in Qinghai Province, Xining 810001)

Abstract: This paper introduces the research progress of typical observation experiments in the field of weather modification in China, summarizes and discusses the problems of the experiments and puts forward some suggestions. It is mainly included with the research results on observation experiments and laboratory experiments of aerosol, cloud condensation nuclei, and ice nuclei. In addition, it also discusses the research results of cloud microphysics and precipitation observation experiments in different cloud systems. The study is conducive to an overall understanding of the progress made and limitations of weather modification observation experiment in China. It is expected to provide reference for the development of such observation experiment in China in the future.

Keywords: weather modification, observation experiment, cloud microphysical

0 引言

人工影响天气是指通过人为手段对局部地区施加影响, 使得天气朝着期望的方向发展。人工影响天气具体有人工增雨(雪)、人工防雹、人工消雨(雪)、人工消雾等。主要手段有地面火箭增雨、高炮防雹、飞机播撒催化剂等。我国是受自然灾害影响很严重的国家之一。很多灾害和隐患的出现与云和降水的演变息息相关, 在一定程度上能通过人工干预达到防灾减灾消除隐患的目的。人工影响天气技术经过几十年的发展, 已能够较好地对付雨施加影响, 达到增雨或减雨, 以缓解旱灾或洪涝; 针对雹云也同样能够实施防雹作业达到人工消雹的目的; 森林火灾的消灭以及增雪防灾工作也在诸多省份开展; 机场人工消雾也得到

了普遍应用, 有力保障了航空安全运行。

人工影响天气作为试验性学科, 业务都建立在观测试验基础上, 通过联合多种特种观测设备资料来加强对云中宏微观物理演变特征、云形成发展机制的认识, 从而使之更加科学有效地开展。不同的地理环境在试验中具体的观测方式、观测对象有所不同。我国在观测试验设计合理性、技术先进性、手段多样性等方面近年来都有了一定程度的发展, 也有很多高性能探测设备面世, 综合观测能力大大增强。

云降水物理学是人工影响天气的学科基础, 而其发展离不开对云内部垂直结构、水平结构、成云过程、粒子生长过程、粒子分布特征及降水形成过程等的深刻认识。近年来, 国外学者在云降水研究中做了许多工作, 广泛利用模式或观测数据与模式结合的方式对研究区域的云降水宏微观物理过程或降水垂直结构展开研究^[1-5], 或通过统计研究多元地面观测资料分析降水参量的周期性变化^[6], 也有学者利用飞机观测资料对气溶胶-云相互作用开展了试验研究^[7-9]。为更好地获取云物理资料, 掌握云内粒子相态及分布情

收稿日期: 2022年5月10日; 修回日期: 2023年5月5日

第一作者: 郭世钰(1997—), Email: 13327695665@163.com

资助信息: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0104); 国家重点研发计划(2019YFC1510302); 国家自然科学基金项目(42165008); 青海省基础研究计划项目(2021-ZJ-745)

况,进而实现更加科学合理的人工影响天气,我国同样开展了大量观测试验,如依靠飞机平台开展全国性的机载探测试验,在地面开展成规模的遥感探测试验,广泛应用各种雷达、微波辐射计、雨滴谱仪、探空系统等先进探测设备,目前已经建立了很多云系发展概念模型,形成了对雹云发展的初步认识,也加强了对层状云、对流云及混合云系结构的认识。我国人工影响天气在发展中取得了涵盖作业、观测、设备等多方面的成果与进展^[10-15],同时也存在许多未解决的科学问题,先进探测手段的应用能力依然存在不足,制约了对云微物理的认识水平。针对人工影响天气中依然难以说清的效果问题,目前检验手段发展较慢且对试验设计实施要求甚高,种种问题都在激励和引导着人工影响天气工作者们持续不断地努力与付出。本文着重介绍近年来我国典型观测试验所取得的成果,对气溶胶、云凝结核、大气冰核观测试验、层状云观测试验、对流云观测试验、混合云系观测试验、地形云观测试验等方面展开综述,讨论目前主要研究进展和有待解决的科学问题。

1 气溶胶、云凝结核及大气冰核观测试验

气溶胶光学特性直接影响大气辐射的吸收散射,能间接影响云和降水,这一特征使得人工影响天气得以实现。气溶胶活化为云凝结核(CCN)、大气冰核(IN)后的活化谱特征以及CCN浓度分布特征都是人工影响天气观测的重点。对气溶胶的观测主要依托天基、地基、星基或联合观测几种类型。目前以飞机探测为主,多种观测手段为辅的方式开展,机载探测主要依靠机载探头对气溶胶进行直接探测,能得到大气垂直和水平尺度上气溶胶浓度、粒径、图像等信息,但无法获得较长连续时段数据,地基、星基的稳定观测能够弥补飞机探测时间的不足,近年来利用地基、星基观测广泛开展气溶胶与环境、来向轨迹、光学特性在辐射中的作用以及人类活动对环境的影响等问题的研究受到广泛关注。国内开展的大量有关气溶胶、CCN、IN的观测试验中使用较多的是新一代粒子测量系统(PMS)、美国DMT公司的粒子测量系统、地面云凝结核计数器(CCNC)、扫描电迁移率粒径谱仪(SMPS)和机载云凝结核计数器、比格混合云室(Bigg Chamber)、静力真空水汽扩散云室等测量设备。某些试验中为研究特殊条件下,例如晴空、降水、雾霾、冷锋过境等天气背景下的气溶胶,利用一次飞机探测资料配合地面设备对该地区气溶胶进行分析^[16-18],可以发现个例中相较于普遍情况的异常变化及产生原因。也有研究人员利用某一地区累计多次的飞机探

测资料进行分析研究^[19-21],这类试验中将多组资料组成较长时间尺度的数据集,排除单次试验个例的偶然性,对于获得该地区普遍情况下的气溶胶分布更为有利,分析结果也更为科学可信。

利用试验资料研究气溶胶垂直水平分布、粒子谱分布、粒子浓度,分析CCN活化特征、分布状况,IN在不同活化温度下的浓度变化特征都取得了很多成果:气溶胶受天气状况影响明显,气溶胶粒子在逆温层中累积明显,存在极大值^[22-23],风速较小、相对湿度较大时气溶胶易发生积累^[24](图1)。降水过程对气溶胶分布、尺度也具有明显影响,降水发生前气溶胶数浓度偏高,降水发生后由于冲刷作用使得气溶胶数浓度普遍偏低,降水前后数浓度能相差1个数量级,水平分布极不均匀。阴天和降水过程气溶胶粒子浓度相较于晴空时要稍大一些^[19-20],云内气溶胶数浓度会随高度波动增长,粒子尺度会随碰并而增大。气溶胶的源区一般位于地面,在近地面有浓度最大值且随高度指数递减^[25],在边界层附近也常出现气溶胶的大值区。地基、星基探测设备以遥感探测为主,遥感探测试验主要的研究对象为气溶胶光学特性,如气溶胶光学厚度、消光系数、退偏振比、色比等要素的时空分布,有利于研究气溶胶的直接、间接辐射以及大气污染的时空变化等。根据CloudSat以及MODIS卫星遥感反演数据,我国北方地区气溶胶光学厚度高低值区受地形影响明显,大值区集中在南疆盆地、华北地区等地势较低处,季节分布也存在地区差异,北方西部地区春季最大,东部夏季最大^[26],同样利用MODIS和CALIPSO level 2产品研究华东地区气溶胶光学厚度分布也具有高地势处有小值,低地势处有大值的特征^[27]。利用葵花-8卫星资料反演东南沿海地区气溶胶时空分布发现,气溶胶光学厚度沿海岸线呈带状分布,且在春季有最大值,与北方地区东部的季节变化存在差异^[28]。基于CALIPSO研究华东地区气溶胶垂直分布,发现随着高度升高大气散射能力减弱^[29]。我国国产FY-4A静止卫星AGRI蓝光波段反演的气溶胶光学厚度结果与MODIS卫星趋势一致,有较高的相关性^[30]。除了对气溶胶分布及特性的研究,在人工影响天气工作领域,气溶胶活化为CCN及IN对云中宏观特性的研究也占据重要地位。

CCN作为特殊的气溶胶与气溶胶具有相似的分布情况,CCN的浓度大值区也集中在近地面1500 m以下,由于垂直方向的湍流扩散与动力沉降的动态平衡使得CCN浓度随高度递减。在我国北方地区,同一高度上随着过饱和度的增加CCN活化浓度增加,不同高度下过饱和度增加相同时CCN活化浓度增加不同,低

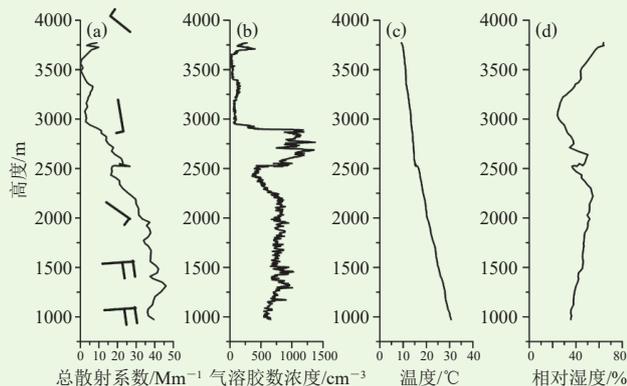


图1 2013年8月19日山西省飞机上升阶段观测到的气溶胶总散射系数及风向和风速(a)、气溶胶数浓度(b)、温度(c)、相对湿度(d)的垂直分布^[24]

Fig. 1 Vertical distributions of scattering coefficients of aerosol particles with wind direction and wind speed (a), number concentrations of aerosol particles (b), temperature (c), and relative humidity (d) in Shanxi during the airplane ascent stage on 19 August 2013^[24]

层CCN活化比例小于高层^[31-33]。其中在不同过饱和度下CCN浓度不同, CCN浓度在同一地区的不同天气背景下也有不同表现, 发生雾霾天气时其浓度远大于晴空时, 且呈逐渐增加的趋势, 不同程度的霾出现时CCN浓度都要大于雾天, 高浓度的CCN能使降水和雾过程减弱。由于云体对CCN的消耗作用, 云内CCN浓度要明显小于云外, 多云天和晴天相比CCN数浓度要大, 晴天条件下CCN活化率随高度增加^[34-36]。按时空分布来看, CCN浓度受季节变化影响十分显著: 冬季由于供暖导致的煤烟增多使得CCN数浓度最高, 夏季由于降水冲刷作用导致CCN数浓度最低。在我国南方地区, CCN浓度的季节变化也呈现出冬季最大, 夏季最小的特征。

IN在我国的浓度变化也具有明显的地区差异, 与天气系统关系密切。我国北方地区春夏季地面IN浓度日变化很大, 最大最小浓度能相差1~2个数量级, 当温度较低时($< -15^{\circ}\text{C}$) IN浓度在沙尘天最大, 阴雨天次之; 当温度较高时($> -15^{\circ}\text{C}$) IN浓度阴天较大。IN浓度随高度升高而递减, 随着粒径增大而增大^[37], 以沈阳为例, 春季IN浓度明显高于夏季。飞机观测的IN浓度相较于地面明显要小, 降水对IN也具有明显的冲刷作用, 降水前总有IN浓度的极大值而降水后有极小值^[38]。也有研究表明, 降水过程除冲刷作用外, 降水后也会因为微生物增多而导致IN浓度的增加, 除此之外, 吹风天气既能起到清除作用, 也能起到输送作用, 或将已经降到地面的雪输送到空中从而导致IN浓度增大^[39]。我国南方地区以南京为例, IN浓度相较于北方地区要低, 晴好天气下也具有明显的日变化且与

人类活动密切相关。降水清除作用明显, 在台风天气IN浓度增加。水汽条件也在显著影响IN浓度, 随着水汽增多冰核浓度也具有明显增大^[40-41]。南方的黄山地区IN浓度也要小于北方同期, 与北方污染重南方较为清洁有关, 吹风起到的输送作用要大于清除作用。无论南方或北方, IN浓度都会随温度的降低而呈指数增加, 随着过饱和度的增加而增加^[42-45]。气溶胶受天气状况影响明显, 存在季节性变化。通过我国南北方气溶胶分布情况的对比发现, 气溶胶分布受多种因素影响, 我国北方气溶胶数浓度普遍大于南方; 垂直方向的不均匀分布普遍存在。

室外观测试验能直接地对某种天气背景下或某个时间尺度上气溶胶的变化特征进行监测, 能很好地反映出该地区气溶胶来源、浓度以及引起气溶胶变化的原因, 从而在污染防治、人工增雨等方面起到科学地推动作用。室外试验的顺利开展离不开室内实验创建的基础。近年来开展的许多气溶胶成核速率或成冰率的室内实验研究发现, 人工冰核的成核速率受多方面因素影响, 环境温度较低时成核速率较快, 以凝结核化、凝华核化为主; 随着温度的上升, 成核过程表现为接触核化、浸入核化, 焰剂类样品核化速率受化学组分和燃烧性能影响明显^[46]。碘化银(AgI)作为人工影响天气领域使用最为广泛的人工冰核, 具有成冰阈值高、成核率高等特点^[47]。在对不同配方AgI焰剂的成冰性能研究中发现, 成冰阈值 $\leq -16^{\circ}\text{C}$ 时不同配方焰剂成核率均能达到 $10^{12}\sim 10^{13}\text{g}^{-1}$; -8°C 下不同焰剂90%冰核完成核化所用时间差异较大^[48]。此外, 通过制备纳米级AgI颗粒能增大其比表面积, 提高吸附能力和表面活性, 表现出成冰阈值上升, 成核速率加快的特点^[49-51]。

2 云微物理和降水观测

云微物理和降水研究是人工影响天气领域的重要根基。通过对某一地区云的探测能够深入对该地区云体结构及特征参数、云体形成发展机制、云内粒子特征及分布状况、降水形成机制的了解和认识, 对开发云水资源, 通过人工影响天气解决水资源短缺的现状具有十分重要的意义。目前国内对云微物理的研究一般分地区、不同云类型、一种或多种探测手段、不同时间尺度开展。人工增雨的基础就是研究云雨的演变特征、云降水物理机制, 并将其运用到人工影响天气, 进而发现可降水云系的增雨潜力和适宜增雨部位。科学家们提出了我国云物理方面的发展方向, 讨论了目前亟待解决的科学问题, 对需要重点研究、突破的人工影响天气技术展开了讨论, 为云降水物理发

展研究提出了建设性意见。黄美元^[15]提出我国人工影响天气作业时对云的选择存在盲目性, 缺乏对作业条件的识别, 同时增雨时没有保证催化剂播撒在云中能起作用的部位。洪延超等^[52]认为发展人工影响天气必先研究和解决云和降水物理中的问题, 其次由于对云和降水认识还较为肤浅, 需要开展更多观测试验。郭学良等^[14]认为目前由于探测手段还不够成熟, 对云的认识还存在很多不确定性, 云体的可播性、播撒后催化剂的扩散追踪等都是十分关键的问题。所以基于上述问题大力开展云微物理和降水观测试验十分必要。

在云微物理观测试验中使用最为广泛的是机载探测设备, 利用机载探头能直观获取云内粒子分布状况, 极大促进了过冷水分布的研究, 对人工增雨选取适当催化部位科学作业具有十分重要的帮助。除空基机载探测设备外, 雷达、微波辐射计、雨滴谱仪以及卫星等遥感探测设备在云微物理研究中也占据重要的地位。云微物理观测试验一般针对层状云、对流云或混合云开展, 试验方案设计一般以平飞探测、垂直盘旋探测、垂直分层探测为主, 但都受制于本地区的安全高度、空域及飞机升限影响。垂直穿云试验对了解云体的垂直结构、水滴、冰晶垂直分布十分有效, 但垂直穿云试验对研究区域的下垫面海拔高度、地形及安全高度有较高要求, 很难在高海拔多山地区实施。一些研究催化作业在云中的物理响应及催化剂扩散试验也会进行双机探测, 一架在目标区域作业, 另一架对目标区域进行探测。飞机配合地面雷达、微波辐射计、卫星等探测设备的联合观测也能对云中粒子起到更加精确地识别, 促进对云体特征参数更加精细的认识。

2.1 层状云观测试验

层状云是我国北方主要的大范围降水云系, 华北地区是我国开展飞机探测试验与相关研究最为广泛的地区之一, 在层状云的研究中发现: 华北地区层状云分层现象普遍发生, 多层或双层结构明显, 由于分层现象导致了云中液态含水量分布十分不均匀, 时常伴有干层结构出现; “催化-供给”云结构常见, 当“催化-供给”降水结构建立且地面发生降水时, 适宜人工增雨作业^[53, 54]; 0℃层及过冷水高值区集中在3000~4000 m^[54]; 云系垂直水平结构的不均匀分布普遍发生^[55, 56]; 降水云系冷、暖云都存在, 但以冷云过程居多, 冷云降水中粒子增长多为凝华、碰并聚合增长, 冰晶粒子直径随高度下降逐渐增长^[53-59]。

我国西北多省由于深居内陆远离海洋, 海拔整体较高, 水汽输送条件较差, 水资源严重短缺, 生态环境极为脆弱, 急需开展空中云水资源开发, 对云系的

宏观研究是科学有效增雨的前提。对西北地区层状云降水研究发现: 西北低海拔地区夏季层状暖云液态水丰水区集中在云层中部, 与逆温层结构相对应, 大云滴对液态水含量贡献较大, 随高度增加, 大云滴数浓度逐渐减小, 干层现象也时常出现; 在冷暖层共存的夏季层状云中冷层粒子尺度要大于暖层, 过冷层到暖层粒子尺度减小, 降水粒子主要来自于冷层降落的冰晶经过过冷层增长在暖层融化最终形成降水^[60-62]; 上层冰晶以凝华、淞附增长为主, 下层暖层为碰并增长; 对春季层状云降水的卫星反演研究发现, 云层较厚且过冷水含量丰富, 作业潜力巨大^[63]。对西北高海拔山地的层状云研究发现, 祁连山地区秋季层状云呈现西少东多的分布特性, 与水汽分布相对应, 出现频次也呈现减少趋势^[64]。在青海三江源地区的层状云观测试验中发现, 云粒子大值区和过冷水的高值区集中在高层云下层中, 粒子浓度与直径在水平方向上存在3~4个数量级的差异^[65]。对新疆天山地区夏季层状云降水的雷达探测研究表明, 该地区层状云降水存在分层现象, 温度层结表现为上部和下部冷, 中部暖的特性, 降水前期至峰值阶段2.5~4.0 mm中等粒子和大于4.0 mm的大粒子浓度增加明显, 降水峰值阶段过后该区间直径粒子浓度会率先减小^[66]。

在我国南方地区, 水汽丰沛, 为云系观测提供了很好的背景条件。相对于北方地区, 南方由于下垫面相对平坦、海拔较低, 云底、云顶高度都相对较低, 有利于实现飞机对云层上、中、下部的完整探测。四川秋季层状暖云探测中, 低层暖云的云底、云顶液态含水量都处在较低水平; 水平方向上云滴数浓度和云滴体积平均直径分布不均匀, 两个参量的最大值与最小值均相差1个数量级, 与三江源地区的3~4个数量级形成鲜明对比。当液态水含量较少时, 云中粒子增长主要依靠碰并增长, 而当液态水含量较多时, 毫米波云雷达观测的降水性层状云中粒子在强回波区通过凝华增长、碰并增长形成降水^[67-68]。在江西的一次层状云飞机探测试验中发现, 降水前期云系垂直水平方向都不均匀, 存在明显分层现象, 0℃层以上为播种云, 云内以升华、聚合现象为主, 针状及柱状冰晶与液滴共存, 随着高度降低, 到达暖层的供给云液态水含量丰富, 云内粒子有效直径明显增大^[69]。广西地区层状云云滴数浓度相较于北方要大1个数量级, 液态含水量要高1~2个数量级。广西秋季层状云中, 云滴生成于云下层, 伴随上升气流上升, 云滴数浓度、直径、液态含水量都随高度升高而增加, 到了云层中部, 由于逆温作用会导致上升运动减弱, 云滴增大, 从而碰并增长为大云滴, 出现数浓度与粒子直径的极

大值, 微物理量的水平分布也表现出不均匀性^[70]。到了冬季层状暖云垂直分层明显, 逆温普遍发生且常出现在云顶附近, 云滴数浓度的大值区集中在云下层, 最大值位于云底, 液态水含量与云滴直径在云底有最小值, 相较于北方冬季层状云, 各微物理量仍大于北方地区^[71]。

2.2 对流云观测试验

对流云是我国强天气的代表之一, 也是重要的降水云系, 强对流云垂直发展旺盛, 云内上升气流剧烈, 常伴有阵雨、雷暴、阵风等恶劣天气, 但其生命史往往较短。对流云内部过冷水含量丰富, 具有很强的增雨作业潜力, 但观测试验中出于安全考虑, 飞机很难深入云中获取数据, 往往是通过遥感探测, 利用卫星、雷达对对流云形成发展及内部结构进行研究。试验设计主要为卫星、雷达或两者协同观测为主。第三次青藏高原大气科学试验对对流云展开了大量观测试验^[72-77]。青藏高原对整个东亚地区气候影响巨大, 是南北能量、水汽交换的重要屏障, 也是能量和水汽循环的活跃地带, 易形成对流系统, 对我国长江、黄河流域的暴雨、洪涝具有重要影响。夏季对流云主要发生在高原东南部和中部。利用多源卫星和C波段雷达、毫米波雷达对那曲地区的对流云垂直结构对比分析发现: 高原深对流云垂直发展旺盛, 水平发展较弱且尺度较小, 以10 km为界, 上层为小粒子, 下层为大粒子, 相态以冰相为主。深对流和浅对流都存在混合相和冰化过程^[72]。梅垚等^[73]通过对那曲地区多种雷达资料的研究指出, 高原地区对流云的发展尺度在垂直和水平方向上都不大, 发展消亡快, 出现频次高。借助毫米波雷达发现, 对流云强度与上升运动具有正比的关系, 云中以冰晶为主, 由于过冷水较为丰富、上升气流较强, 保证了冰晶撞冻、淞附过程剧烈, 导致了霰粒子含量较高^[74]。这与利用WRF模式对那曲地区对流云模拟的研究结论一致^[75]。高原地区对流云以深对流居多, 与高原地形和热力作用息息相关。

我国南方江淮地区对流云观测试验针对对流云合并现象的观测较多。合并现象在对流云中较为常见。对流云中由于气流复杂多变, 在气流的输送作用下云内要素也存在不均匀分布。由于垂直运动的水平不均匀性和明显的气压梯度力、低层大气辐射的增温作用以及两个对流云中的上升气流与下沉气流的耦合, 都会导致对流云的合并。对流云合并存在多种方式, 如从多个对流单体合并为一个超级单体, 也有大的对流系统吞并单个对流单体、多个对流云团多次合并。卫

星云图上, 云团在合并作用下结构变得更加密实、边缘变得光滑, 雷达回波强度增强、径向速度增大、回波顶高和垂直液态水含量显著增大。对流云的合并也导致了系统生命史延长、云体面积增大、强度增强, 使得本就强烈的对流规模更大, 造成严重的气象灾害, 如降雹、阵风、短时强降水等^[78-83]。

2.3 混合云系观测试验

积层混合云是层状云中嵌套有对流单体。该种云系往往生命期较长, 多出现持续性降水, 也是人工增雨的重要对象。Hou等^[79]发现太行山区积层混合云中, 过冷水一般在温度高于 -6°C 时出现, 嵌套在层状云中的对流单体在 $-6\sim-3^{\circ}\text{C}$ 含有大量过冷水, 最大值能达到 0.57 g/m^3 , 但在层状云区最大过冷水含量不超过 0.1 g/m^3 ; 在 -10°C 以下对流区冰晶尺度很大, 能超过1 cm, 以辐枝状及聚合体为主; 在 $-5\sim-3^{\circ}\text{C}$ 时, 含有大量小尺度冰晶, 以淞附状及针状为主(图2)。Yang等^[80]研究发现, 嵌套浅对流云的层状云中冰粒子高浓度区位于浅层对流云的过冷区, 其形状主要为柱状和针状, 该区域冰粒子浓度增加原因很大程度是由Hallet-Mossop机制造成的, 通过二维粒子图像发现此类冰晶从弱对流区下落至层状云区能继续增长。Li等^[81]研究山东地区混合云不同区域对催化后的响应发现, 对流区播撒后回波顶高和反射率因子明显增加, 降水粒子尺度增大明显, 对流区内的上升气流有助于将AgI带入过冷水丰富的区域, 同时过冷水凝结释放的潜热能更好的促进云层发展, 从而导致贝吉隆过程和碰并过程加速, 使得大粒子快速形成以增加降水; 而层状云区播撒后回波顶高和反射率因子减小, 粒子尺寸从 $700\text{ }\mu\text{m}$ 增大至 $5700\text{ }\mu\text{m}$, 过冷水因AgI的加入凝结为冰晶, 再通过下沉过程长大, 最终形成地面降水。朱士超等^[84]指出, WRF模式对云系的演变模拟较为准确, 但在高层和低层都表现出对小粒子的模拟偏低, 对大粒子的模拟偏高。积层混合云中的液态水含量丰富但不均匀。蔡兆鑫等^[85]发现, 混合云的强可播区较大, 作业后云系整体发展较为旺盛, 作业后的小云粒子浓度有明显减少, 大云滴浓度增加, 增雨效果明显。就太行山探测飞行的一次典型试验开展研究^[86-87]发现, 太行山东麓强对流区中的积层混合云粒子浓度存在分层, 冷云上层过冷水含量丰富; 在弱对流区域云粒子垂直分布不均匀, 液态水含量有分层现象; 在无明显对流区过冷水含量较少; 对流的发生导致了降水粒子浓度的增加以及液态水含量高值区高度的升高; 丰富的冰晶粒子下落到过冷水丰富区时, 以聚并淞附的形式增长, 低过冷水区淞附显著减弱; 对流泡中小粒子浓度、液水含量比对流泡外要高很多。

— 200 μm

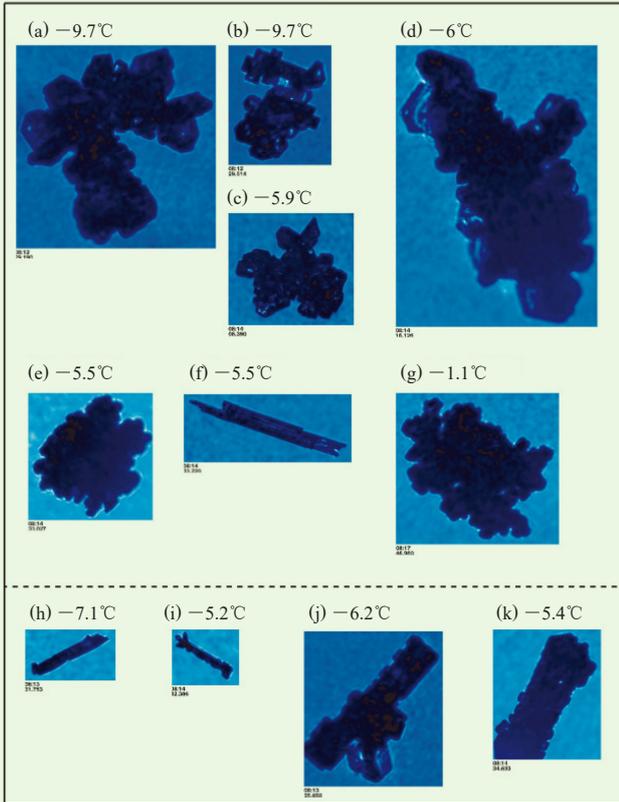


图2 嵌入式对流区的冰粒子CPI图像示例^[79]
Fig. 2 Example CPI images of ice particles in the embedded convective region^[79]

2.4 地形云观测试验

地形云是山地地区的重要降水云系，也是人工影响天气中最具有增雨潜力的云系之一。湿空气在前进过程中受地形的阻挡作用向上爬升，上升过程伴随着水汽的凝结增长，逐渐形成云体。地形云观测资料相对缺乏，主要依靠地面常规资料、探空资料与雷达资料。观测试验的开展时间较长，一般持续1~3个月，通过获取多次有效观测数据来研究地形云形成发展特征及降水特征。

西北地区是地形云出现的主要地区，新疆天山、宁夏六盘山、横贯青海和甘肃的祁连山都是地形云多发的地区。地形云观测试验也主要集中在上述地区。郑国光等^[88]指出，夏季祁连山地区地形云云量丰富，且在西南气流影响下伴随丰富的水汽总云量能达到八成，水汽充足时降水极易形成，降水粒子以小雨滴为主。陈添宇等^[89]从风场、水汽场、热力作用、大气稳定度等方面揭示了山风谷风共同作用使得祁连山区地形云发展的现象。西南气流导致南部水汽向北输送，北坡昼间湿空气受动力抬升作用有利于降水的形成，得出了地形云易在北坡发展的结论。把黎^[90]研究

得到了相似结果，指出系统配合导致了地面辐合线的维持，使得抬升作用明显，分散地形云的合并加强，使得祁连山北坡降水要大于南坡。张国庆等^[91]发现，相邻层结从低层到高层有时会出现气旋性切变，导致气流辐合抬升；河谷地区逆温层、逆湿层出现频率高，山顶高度水汽充足有利于降水的形成。刘蓓^[92]指出，由于山谷风环流，谷内夜间对流增强导致云量夜间最大；山谷风与祁连山地形云有很好的相关性，通常山谷风转换后积雨云也会逐渐消散。朱平等^[93]发现，不同分型的天气背景对湟水谷地地形云促进作用不同，地形云发展成熟时常常发展为普通单体、脉冲单体、多对流单体。马学谦等^[94]指出，不同坡度下祁连山地形云的成云特征不同，大坡度下的成云机制为简单的水汽抬升凝结及高空碰并过程；坡度较小时，云单体间水汽与能量交换易形成强单体；更小坡度下，既有暖云过程也有冷云过程。曹宁等^[95]指出，六盘山对流云降水过程中，山脊区反射率因子、反射率衰减均大于山谷区，对流云成熟时强中心位于单体中上部；层状云降水过程中山脊、山谷的降水粒子以霰或霰混合雪粒子为主。

3 讨论与小结

我国人工影响天气观测试验开展情况已经具有较长时间的沉淀，无论是试验方案设计、试验资料数据储备还是研究成果的转化都已经较为成熟。部分试验是针对局地的一些突出特征所设计的，如在多山地区开展地形云试验，在重污染地区开展气溶胶观测试验。因地制宜的试验方案设计不仅仅是为了方便开展而为之，更重要的是研究成果能够造福当地的生态环境与人民大众。但其中依然有很多问题亟待解决，需要人工影响天气工作者持续的付出与努力。

1) 气溶胶受大气活动影响具有很强的流动性，其远距离输送能造成局地气溶胶浓度剧增，而大气运动时刻处在变化中，所以气溶胶活动规律也变化莫测。尽管目前开展了大量的气溶胶分布研究，但受气候变暖、人类活动等的影响，很难准确描述某一地区气溶胶的变化情况。卫星遥感探测是研究气溶胶分布的主流手段，单个卫星难以收集全球气溶胶监测数据，需要大量卫星组网，以及更高分辨率的长期观测数据对气溶胶分布及变化展开长期研究。除了卫星遥感，利用地面粒子谱仪、激光雷达等设备对局地气溶胶的研究也具有十分重要的意义。目前研究中直接探测与间接探测的配合研究相对缺乏，直接探测与间接探测紧密配合对局地气溶胶变化的研究更具说服力，同时仅对个别测站开展气溶胶特性研究也远不如开展区域性

研究精确。在“双碳”目标下,对开展更加精密、广泛的气溶胶研究提出了更高要求。除了室外试验及遥感探测,聚焦模拟真实气象环境研究的室内实验对发展人工影响天气新技术、新手段以及加深对云微物理过程的认识也具有重要意义。室内实验能人为控制环境条件,且可以重复试验,对研究不同条件下的气溶胶变化特征具有十分显著的作用。但目前云室、风洞的规模,微物理特征的控制等与实际环境仍存在较大的差距,发展更先进、更接近实际情况的云室、风洞对室内实验的进步、云微物理的精细化研究,以及人工影响天气科学技术的发展都有重要的推动作用。

2)在对层状云系的研究中,不同地区的研究结果存在较大差异。我国北方地区气候相对干燥,下垫面多为山地、草垫、戈壁、沙漠等,且北方地区纬度较高气候相较于南方较为寒冷。从人类活动角度来看,我国北方地区工业城市较多,冬季供暖期也会有大量化石燃料燃烧直接影响大气环境。而我国南方地区湿润多雨,水汽充沛,下垫面较为平坦,海岸线长度较长,受海洋影响明显,与北方形成鲜明对比。我国层状云及积层混合云的相关研究和试验的开展已经达到一定规模,关于不同云系中的微物理特征,许多地区已经进行了细致的研究,但目前将研究结果转化为业务应用的能力还有待提高。相关研究中基于空地联合观测的研究相对较少,主要集中在对飞机探测数据或地面不同设备观测资料的研究,相对缺乏多种探测仪器相互配合、资料能相互印证的研究试验。其次,同一地区在相似过程下的不同飞机探测资料的对比研究也相对较少,由于单次试验具有较多的不确定性,无法用单次的试验结果概括某一地区某种云系的普遍规律。最后,开展飞机探测试验成本高昂、云中环境复杂多变,每一次机载探测资料都来之不易,应该加强对前人已有数据的再利用、再研究,从不同的角度出发深入发掘,将每一次飞机探测资料的数据价值最大化。

在对流云的研究中十分缺乏直接探测数据,主要以遥感探测为主,尽管目前遥感探测手段能实现对粒子形状、相态的识别,但缺乏直接探测数据依然限制了对云内粒子、气流运动的精细化研究。出于安全性考虑,载人飞机很难实现对流云内探测,下投式探空仪能实现对流云内气象要素的观测但缺乏粒子测量信息。无人机近年来发展迅速,大型无人机几乎能达到载人飞机的飞行能力,能够通过改造加装粒子测量仪器,从而代替载人飞机探测,但由于大型无人机造价高昂且对流云内环境复杂,所以利用无人机开展对流

云观测也存在较大风险。目前低风险、低付出的可行性探测方法还没有出现,突破瓶颈仍需要集思广益、不断发展。整体来看,我国开展的对流云观测试验相对较少,其原因主要是观测难度大,系统生消快、云体移动迅速。但对流云观测对于研究云内特征、生消机制、提升模式精度、提高预报准确性、发展人工影响天气技术都具有重要意义。混合云及地形云作为人工影响天气的主要云系之一,都具有很大的增雨作业潜力,目前已经开展了许多试验研究云微物理特征及降水机制,但对不同地区混合云及地形云的垂直结构、水平结构以及降水形成的详细微物理过程研究依然不够充分,针对先进探测设备的应用能力不足制约了人们对云和降水更全面的认识。

3)模式研究是揭示云结构及降水产生机制的重要手段。数值模式的发展应用从基于观测资料的理论研究角度实现了对气象目标生消机制、发展规模、出现时间等的定量预测。人工影响天气观测试验借助多种特种观测设备来实现相关数据的采集,对数值模式发展、提升预报能力具有重要意义。研究者普遍将数值模拟与观测资料相结合,开展云微物理等相关研究,观测试验的设计与广泛开展、数据的大量收集与研究不仅能加深对云微物理的认识,将观测资料应用到模式中,能有效提升模式模拟水平,对天气预报取得长足发展、气候预测准确性得以提高都具有重要意义;以观测资料为参考,将观测资料与模式模拟结果进行横向对比也能有效评估模式模拟水平;或利用模式配合观测资料对云结构或某些过程进行详细研究,都是观测试验在模式模拟中的重要应用方向。目前人工影响天气数值模式发展迅速,耦合催化模式后的数值模拟对人工增雨效果预测及业务应用具有十分重要的作用,且人工影响天气主要聚焦中小尺度系统,发展高分辨率数值模式能大大提升模式对云中精细化结构的描述水平。

4)除了加强观测试验提高其在模式研究方面应用的深度与广度外,发展先进的探测技术需要不断革新探测设备。目前双偏振多普勒雷达、地基多通道微波辐射计、激光雨滴谱仪、风廓线雷达、机载云雷达、微雨雷达、机载粒子探测系统、毫米波云雷达、火箭探空、卫星产品等装备技术已经广泛应用在我国观测试验中。除此之外,相控阵雷达因其具有扫描速度快、发射波形可灵活变化、可靠性高、抗干扰能力强等特点^[97],非常适合用于云结构的探测。于明慧等^[98]利用相控阵雷达和双偏雷达对华南一次超级单体的结构及相态进行分析,认为双偏振雷达能很好地反映单体的相态特征,在结构方面相控阵雷达扫描精

度高、时间分辨率好等特点能够反映单体的精细化结构特征，也能发现其短时的变化情况，能够直观反映云体形成发展到消亡所处的不同发展阶段。从整体来看，相控阵雷达具有出色的探测能力，在未来探测试验中将扮演非常重要的角色。成都信息工程大学科研团队研制的磁控管X波段双偏振多普勒天气雷达系统MaXPol具有出色的探测性能，有多种参差重复频率可选，在75 km距离档不模糊速度达55.7 m/s，150 km距离档不模糊速度达28 m/s，具有很好的粒子形状、大小、相态识别能力，对人工影响天气作业时机有很好的指示^[99]。

5) 近年来在国家人工影响天气中心和各省区气象局的努力下，依托能力建设工程有序建设重点人工影响天气气象观测站网，目前东北区域工程项目已竣工验收，西北区域工程项目也即将验收，试验示范基地陆续建成。依托西北人工影响天气能力建设项目，2018—2021年在内蒙古巴彦淖尔地区开展了人工防雹技术研究试验，对该地区冰雹路径、降雹时空分布、雹谱反演等进行了详细研究，为防雹减灾提供了科学依据^[100]。除此之外，祁连山地形云人工增雨(雪)技术研究试验，在祁连山沿线分设一个试验区和一个对比区，通过布设众多探测设备及作业装备配合飞机及卫星探测实现了“三横六纵”的观测布局(图3)，对祁连山地形云降水机制、云结构、云粒子特征等进行了分析研究，揭示了祁连山区夏季地形抬升具有局地性，对降水影响明显，祁连山区年平均降水量为232.4 mm，流场相对复杂多变，统计研究发现存在五种不同流场类型^[96]。该探索性试验的开展对补充我国地形云人工增雨(雪)的研究具有重要意义。

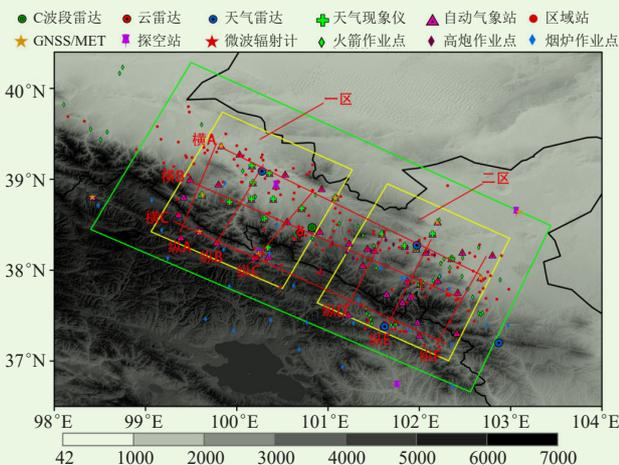


图3 祁连山地形云人工增雨(雪)试验区范围及仪器布局^[96]
Fig. 3 Test area and instrument layout of artificial precipitation (snow) with orographic cloud in Qilian Mountains^[96]

人工影响天气领域涉及广泛，聚焦中小尺度研究，极度依赖高质量试验数据，对观测试验高质量开展的需求越来越高。整体来看，人工影响天气工作要想取得更大进步，需要多方面协同发展，攻坚克难解决精细化难题。

参考文献

- [1] Ritzman J M, Deshler T, Ikeda K, et al. Estimating the fraction of winter orographic precipitation produced under conditions meeting the seeding criteria for the Wyoming Weather Modification Pilot Project. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2015, 54(6): 1202-1215.
- [2] Lamer K, Fridlind A M, Ackerman A S, et al. (GO)2-SIM: A GCM-oriented ground-observation forward-simulator framework for objective evaluation of cloud and precipitation phase. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11(10): 4195-4214.
- [3] Masaki S, Shuhei M, Woosub R, et al. Evaluation of cloud and precipitation processes in regional and global models with ULTIMATE (ULTRa-sIte for Measuring Atmosphere of Tokyo metropolitan Environment): A case study using the dual-polarization Doppler weather radars. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2022, 9(1): 51.
- [4] Virman M, Bister M, Sinclair V A, et al. Vertical temperature structure associated with evaporation of stratiform precipitation in idealized WRF simulations vertical temperature structure associated with evaporation of stratiform precipitation in idealized WRF simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77(5): 1851-1864.
- [5] Jin H G, Lee H, Baik J J. A new parameterization of the accretion of cloud water by graupel and its evaluation through cloud and precipitation simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2019, 76(2): 381-400.
- [6] Kneifel S, Pospichal B, Leonie V T, et al. Multi-year cloud and precipitation statistics observed with remote sensors at the high-altitude environmental research station Schneefernerhaus in the German Alps. *Meteorologische Zeitschrift*, 2021, 31(1): 69-86.
- [7] Wehbe Y, Tessorod S A, Weeks C, et al. Analysis of aerosol-cloud interactions and their implications for precipitation formation using aircraft observations over the United Arab Emirates. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(16): 12543-12560.
- [8] Patnaude R, Diao M H. Aerosol indirect effects on cirrus clouds based on global aircraft observations. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(10): e2019GL086550.
- [9] Shilling E J, Pekour S M, Fortner C E, et al. Aircraft observations of the chemical composition and aging of aerosol in the Manaus urban plume during GoAmazon 2014/5. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(14): 10773-10797.
- [10] 黄美元, 沈志来, 洪廷超. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展. *大气科学*, 2003, 27(4): 536-551.
- [11] 方春刚, 郭学良, 王广河. 我国人工影响天气探测装备技术. *气象知识*, 2012, (2): 16-17.
- [12] 雷恒池, 洪廷超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. *大气科学*, 2008, 32(4): 967-974.
- [13] 苏正军, 郑国光, 鄞大雄. 吸湿性物质催化云雨的研究进展. *高原气象*, 2009, 28(1): 227-232.
- [14] 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008~2012年). *大气科学*, 2013, 37(2): 351-363.
- [15] 黄美元. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路. *气候与环境研究*, 2011, 16(5): 543-550.
- [16] 金赛花, 濮江平, 张瑜, 等. 一次霾天气条件下石家庄上空大气气溶胶数浓度的飞行探测与特征分析. *气象与环境科学*, 2015, 38(1): 40-45.
- [17] 胡向峰, 韩洋, 董晓波. 一次霾条件下石家庄上空气溶胶的观测研究. *气象与环境科学*, 2016, 39(3): 32-37.
- [18] 董晓波, 王高磊, 吕峰, 等. 一次晴空条件下华北中南部上空气溶胶的飞机观测及特征分析. *气象与环境科学*, 2010, 33(1): 48-51.

- [19] 居丽玲, 牛生杰, 段英. 一次秋季冷锋降水过程气溶胶与云粒子分布的飞机观测. 大气科学学报, 2011, 34(6): 697-707.
- [20] 万和跃, 董晓波, 孙玉稳, 等. 河北秋季气溶胶粒子垂直分布的飞机探测分析. 气象与环境学报, 2016, 39(4): 23-29.
- [21] 周德平, 苏航, 耿树江, 等. 辽沈地区不同高度大气冰核数浓度的飞机观测. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 133-139.
- [22] 刘思瑶, 濮江平, 周毓荃, 等. 河北气溶胶浓度垂直分布特性研究. 气象与环境学报, 2016, 39(2): 41-45.
- [23] 邓玮, 银燕, 石立新, 等. 河北省气溶胶与云微物理结构的飞机探测个例分析. 安徽农业科学, 2009, 37(35): 17578-17583.
- [24] 封秋娟, 牛生杰, 李培仁, 等. 山西夏季气溶胶散射特征的飞机观测研究. 气候与环境研究, 2019, 24(4): 482-492.
- [25] 康增妹, 孙玉稳, 董晓波, 等. 河北中西部地区大气气溶胶观测研究. 2019中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷). 北京: 中国环境科学学会, 2019.
- [26] 刘贞, 郑有飞, 刘建军, 等. 基于A-train卫星对中国北方地区气溶胶分布的研究. 中国环境科学, 2015, 35(10): 2891-2898.
- [27] 唐志伟, 许潇锋, 杨晓娟, 等. 基于卫星资料的华东地区气溶胶三维分布特征研究. 中国环境科学, 2019, 39(9): 3624-3634.
- [28] 李恺霖, 张春桂, 王宏, 等. 基于葵花-8卫星的东南沿海气溶胶时空分布及其变化. 应用海洋学报, 2019, 38(3): 318-328.
- [29] 刘璇, 朱彬, 袁亮, 等. 基于CALIPSO卫星资料的华东地区气溶胶垂直分布特征. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(5): 79-86.
- [30] 祝善友, 李佳敏, 向嘉敏, 等. 基于FY4A AGRI数据的气溶胶光学厚度反演研究. 地理与地理信息科学, 2020, 36(4): 26-32.
- [31] 李军霞, 银燕, 任刚, 等. 山西云凝结核时空分布特征观测. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2261-2271.
- [32] 沙桐, 马晓燕, 银燕, 等. 石家庄地区气溶胶和CCN垂直廓线的飞机观测分析. 大气科学学报, 2019, 42(4): 521-530.
- [33] 孟喆, 胡旻, 卿洋华. 云凝结核分布特征研究. 新农村(黑龙江), 2017, (21): 142.
- [34] 胡向峰, 秦彦硕, 段英, 等. 基于航测数据的河北中南部雾霾天气气溶胶及云凝结核研究. 干旱气象, 2016, 34(3): 481-493.
- [35] 张晶, 郑有飞, 李云川, 等. 石家庄市周边秸秆焚烧导致云凝结核变化的特征. 大气科学学报, 2011, 34(3): 343-350.
- [36] 岳治国, 刘贵华, 贺文彬, 等. 晴空云凝结核垂直探测个例分析. 气象科技, 2011, 39(2): 231-235.
- [37] 周德平, 洪也, 王扬锋, 等. 沈阳春夏季大气冰核浓度的观测研究. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 719-726.
- [38] 周德平, 苏航, 耿树江, 等. 辽沈地区不同高度大气冰核数浓度的飞机观测. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 133-139.
- [39] 毕凯, 黄梦宇, 马新成, 等. 在线连续流量扩散云室对华北冬季大气冰核的观测分析. 大气科学, 2020, 44(6): 1243-1257.
- [40] 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 南京地区冬季大气冰核特征及其与气溶胶关系的研究. 大气科学, 2013, 37(5): 983-993.
- [41] 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 南京地区大气冰核浓度的测量及分析. 大气科学, 2013, 37(3): 579-594.
- [42] 苏航, 周德平, 银燕, 等. 中国南北方大气冰核数浓度及核化机制对比研究. 第34届中国气象学会年会S10大气物理学与大气环境论文集. 北京: 中国气象学会, 2017.
- [43] 苏航, 陈力强, 陆忠艳, 等. 黄山地区大气冰核观测研究. 第31届中国气象学会年会S12大气物理学与大气环境. 北京: 中国气象学会, 2014.
- [44] 苏航, 银燕, 陆春松, 等. 新型扩散云室搭建及其对黄山地区大气冰核的观测研究. 大气科学, 2014, 38(2): 386-398.
- [45] 高任杰, 银燕, 蒋惠, 等. 亚青会期间南京地区大气冰核的观测分析. 气象科学, 2017, 37(2): 141-150.
- [46] 苏正军, 郑国光, 关立友. 人工冰核的核化速率实验. 气象, 2010, 36(11): 46-49.
- [47] 楼小凤, 傅瑜, 苏正军. 人工影响天气碘化银催化剂研究进展. 应用气象学报, 2021, 32(2): 146-159.
- [48] 党娟, 苏正军, 房文, 等. 几种碘化银剂成冰性能检测. 气象科技, 2018, 46(3): 619-624.
- [49] 金德镇, 张景红, 江中浩, 等. 纳米碘化银在人工影响天气的应用研究 I: 理论分析结果和展望. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 666-670.
- [50] 金德镇, 张景红, 江中浩, 等. 纳米碘化银在人工影响天气的应用研究 II: 室内实验. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 671-677.
- [51] 张景红, 金德镇, 江中浩, 等. 纳米碘化银在人工影响天气的应用研究 III: 表征实验研究. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 678-682.
- [52] 洪延超, 雷恒池. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 951-967.
- [53] 孙鸿博, 申东东, 封秋娟, 等. 山西省层状云飞机云物理观测试验结果分析. 山西气象, 2013, (4): 35-39.
- [54] 杨文霞, 胡朝霞, 董晓波, 等. 降水性层状云结构及微物理量相关性分析. 大气科学学报, 2018, 41(4): 525-532.
- [55] 邓育鹏, 董晓波, 吕锋, 等. 河北省降水性层状云宏观物理特征. 气象与环境学报, 2013, 29(3): 29-34.
- [56] 封秋娟, 申东东, 晋立军, 等. 山西层状云微物理结构飞机地面联合探测研究. 科技与创新, 2014, (8): 140-142.
- [57] 封秋娟, 李培仁, 杨俊梅, 等. 山西层状云降水微物理结构特征的观测研究. 科技与创新, 2016, (6): 36-39.
- [58] 李义宇, 申东东, 任刚. 山西省一次层状云降水微物理结构及降水机制分析. 科技与创新, 2017, (2): 39-42.
- [59] 马新成, 黄梦宇, 于潇涌, 等. 一次副热带高压后部层状云降水中山区层状云宏观物理结构探测分析. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 711-718.
- [60] 庞朝云, 黄山, 张丰伟. 甘肃中部降水性层状云微物理结构特征个例分析. 气象科技, 2016, 44(5): 805-810.
- [61] 张丰伟, 刘晓莉, 桑建人, 等. 宁夏夏季层状暖云降水观测研究. 高原气象, 2011, 30(2): 471-481.
- [62] 庞朝云, 张丰伟, 张建辉. 西北干旱地区一次降水性层状云的飞机观测分析. 干旱气象, 2013, 31(2): 272-277.
- [63] 刘贵华, 余兴, 贾玲, 等. 2009年陕西春季层状云增雨卫星观测分析. 干旱区研究, 2011, 28(4): 699-704.
- [64] 石光普, 石圆圆, 郭玉珍, 等. 气候变暖背景下祁连山区秋季层状云变化特征. 地理科学进展, 2012, 31(5): 609-616.
- [65] 王黎俊, 银燕, 李仑格, 等. 三江源地区秋季典型多层层状云系的飞机观测分析. 大气科学, 2013, 37(5): 1038-1058.
- [66] Wang M Z, Hu M. Study on radar detection of one stratiform cloud precipitation process in the central part of the Tianshan Mountains in China. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 54(3): 511-524.
- [67] 王维佳, 董晓波, 石立新, 等. 一次秋季暖云微物理结构探测试验. 气象科技, 2011, 39(5): 656-660, 665.
- [68] 范思睿, 王维佳. 四川盆地云和降水观测科学试验设计与实践. 气象科技, 2019, 47(2): 191-200.
- [69] Fu Y, Lei H C. Aircraft observation of cloud microphysical characteristics of pre-stratiform-cloud precipitation in Jiangxi Province. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2017, 10(5): 364-371.
- [70] 马新成, 程鹏, 毕凯, 等. 广西南宁冬季层状暖云微物理特征的飞机观测分析. 热带气象学报, 2017, 33(6): 922-932.
- [71] 张正国, 卢广献, 汤达章, 等. 广西秋季层状云微物理特征分析. 气象科技, 2018, 46(3): 545-555.
- [72] Wang H, Guo X L. Comparative analyses of vertical structure of deep convective clouds retrieved from satellites and ground-based radars at Naqu over the Tibetan Plateau. Journal of Meteorological Research, 2019, 33(3): 446-462.
- [73] 梅焱, 胡志群, 黄兴友, 等. 青藏高原对流云的偏振雷达观测研究. 气象学报, 2018, 76(6): 1014-1028.
- [74] 张涛, 郑佳锋, 刘艳霞. 利用Ka波段云雷达研究青藏高原对流云和降水的垂直结构及微物理特征. 红外与毫米波学报, 2019, 38(6): 777-789.
- [75] 唐洁, 郭学良, 常祎. 青藏高原那曲地区夏季一次对流云降水过程的云微物理及区域水分收支特征. 大气科学, 2018, 42(6): 1327-1343.
- [76] 常祎, 郭学良. 青藏高原那曲地区夏季对流云结构及雨滴谱分布日变化特征. 科学通报, 2016, 61(15): 1706-1720.
- [77] 洪健昌, 郭建平, 杜军, 等. 西藏改则地区雨季上对流层/下平流层大气垂直结构观测研究. 气象学报, 2016, 74(5): 827-836.
- [78] 刘裕禄, 邱学兴, 黄勇. 发生短时强降雨的对流云合并作用分析. 暴雨灾害, 2015, 34(1): 47-53.
- [79] Hou T J, Lei H C, He Y J, et al. Aircraft measurements of the microphysical properties of stratiform clouds with embedded convection. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(6): 966-982.
- [80] Yang J F, Lei H C, Hou T J. Observational evidence of high

(下转71页)

- 28(4): 152-158.
- [2] 昌立伟, 黄海波, 许丽丽, 等. 岳阳市冬季暴雪和一般性降雪条件对比分析. 气象科技进展, 2020, 10(3): 141-146.
- [3] 高庆华, 马宗晋, 张业成, 等. 自然灾害评估. 北京: 气象出版社, 2007.
- [4] 郝璐, 王静爱, 满苏尔, 等. 中国雪灾时空变化及畜牧业脆弱性分析. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 42-48.
- [5] 王玉娟, 刘晓燕, 白爱娟, 等. 1961—2017年三江源地区极端降雪指数变化特征分析. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 108-115.
- [6] 郭晓宁, 李林, 刘彩红, 等. 青海高原1961—2008年雪灾时空分布特征. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 332-337.
- [7] Liu F, Mao X, Zhang Y, et al. Risk analysis of snow disaster in the pastoral areas of the Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(3): 411-426.
- [8] 马东辉. 东北地区雪灾风险综合评价. 南京: 南京大学, 2017.
- [9] 冯学智, 鲁安新, 曾群柱. 中国主要牧区雪灾遥感监测评估模型研究. 遥感学报, 1997, 1(2): 129-134.
- [10] Tachiiri K, Shinoda M, Klinkenberg B, et al. Assessing Mongolian snow disaster risk using livestock and satellite data. Journal of Arid Environments, 2008, 72(12): 2251-2263.
- [11] 周秉荣, 申双和, 李凤霞. 青海高原牧区雪灾综合预警评估模型研究. 气象, 2006, 32(9): 106-110.
- [12] 刘兴元, 梁天刚, 郭正刚, 等. 北疆牧区雪灾预警与风险评估方法. 应用生态学报, 2008, 19(1): 133-138.
- [13] 张国胜, 伏洋, 颜亮东, 等. 三江源地区雪灾风险预警指标体系及风险管理研究. 草业科学, 2009, 26(5): 144-150.
- [14] 白媛, 张兴明, 徐品泓. 青海省畜牧业雪灾风险评价研究. 青海师范大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 71-77.
- [15] 邵全琴, 刘国波, 李晓东, 等. 三江源区2019年春季雪灾及草地畜牧业雪灾防御能力评估. 草地学报, 2019, 27(5): 1317-1327.
- [16] DB63/T 372-2018, 气象灾害等级. 青海: 青海省质量技术监督局, 2018.
- [17] 张文博, 肖鹏峰, 冯学智. 基于MODIS数据的我国天山典型区积雪特征研究. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 746-753.
- [18] 邹铭, 范大一, 杨思全, 等. 自然灾害风险管理与预警体系. 北京: 科学出版社, 2010.
- [19] 陈海山, 孙照渤. 积雪季节变化特征的数值模拟及其敏感性试验. 气象学报, 2004, 62(3): 269-284.

(上接64页)

$Mg^{2+} > F^- > K^+$ 。 Ca^{2+} 是降水中主要的阳离子, 其浓度为 $89.73 \mu eq/L$, SO_4^{2-} 是降水中主要的阴离子, 其浓度为 $38.34 \mu eq/L$ 。

3) 通过中和因子、富集因子、相关性计算, 发现 Ca^{2+} 和 NH_4^+ 对酸性物质具有较强的中和作用。 Na^+ 基本来源于海源, Ca^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 基本由陆地源贡献, 海源和陆源对 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 都有一定的贡献。人类活动对瓦里关地区降水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的来源有较大贡献。

4) 瓦里关地区降水离子浓度主要受西风源和局地源影响。

参考文献

- [1] 康世昌, 丛志远. 青藏高原大气降水和气溶胶化学特征研究进展. 冰川冻土, 2006, 28(3): 371-379.
- [2] 王剑, 徐美, 叶霞, 等. 沧州市大气降水化学特征分析. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 96-102.
- [3] Calvo A I, Olmo F J, Lyamani H, et al. Chemical composition of wet precipitation at the background EMEP station in V\iznar (Granada, Spain) (2002—2006). Atmospheric Research, 2010, 96(2): 408-120.
- [4] Li Z X, He Y Q, Pang H X, et al. Chemistry of snow deposited during the summer monsoon and in the winter season at Baishui glacier No. 1, Yulong mountain, China. Journal of Glaciology, 2009, 55(190): 221-228.
- [5] Li Z X, Feng Q, Liu W, et al. Study on the contribution of cryosphere to runoff in the cold alpine basin: A case study of Hulugou River Basin in the Qilian Mountains. Global and Planetary Change, 2014, 122: 345-361.
- [6] Li Z X, Feng Q, Liu W, et al. The stable isotope evolution in Shiyi glacier system during the ablation period in the north of Tibetan Plateau, China. Quaternary International, 2015, 380-381: 262-271.
- [7] 王文兴, 许鹏举. 中国大气降水化学研究进展. 化学进展, 2009, 21(Z1): 266-281.
- [8] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析. 应用气象学报, 2004, 15(S1): 85-94.
- [9] 汤洁, 薛虎圣, 于晓岚, 等. 瓦里关山降水化学特征的初步分析. 环境科学学报, 2000, 20(4): 420-425.
- [10] 侯思宇. 我国典型地区大气降水化学特征及来源解析. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [11] 张占峰, 王红磊, 德力格尔, 等. 瓦里关大气降水的化学特征. 大气科学学报, 2014, 37(4): 502-508.
- [12] 杨东贞, 周怀刚, 张忠华. 中国区域空气污染本底站的降水化学特征. 应用气象学报, 2002, 13(4): 430-439.
- [13] 曹晏风. 兰州市大气降水水化学时空变化及影响因子研究. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- [14] 王剑球, 祁栋林, 薛丽梅. 瓦里关全球大气本底站站址环境及部分观测要素变化特征. 环境化学, 2020, 39(8): 2084-2092.
- [15] 程巴阳, 周凌晔, 安兴琴. 瓦里关站大气 CO_2 本底浓度及其源汇区域代表性//第34届中国气象学会年会S9大气成分与天气、气候变化及环境影响论文集. 郑州: 中国气象学会, 2017.
- [16] 王廷祥. 大气冷凝水化学特性研究. 上海: 复旦大学, 2012.
- [17] 汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 等. 长江源区大气降水化学特征及离子来源. 环境科学, 2019, 40(10): 4431-4439.
- [18] 李宗杰, 宋玲玲, 田青. 河西走廊东段大气降水特征及水汽来源分析. 环境化学, 2016, 35(4): 721-731.
- [19] 程新金, 黄美元. 降水化学特性的一种分类分析方法. 气候与环境研究, 1998, 3(1): 83-89.
- [20] Zhang X Y, Jiang H, Zhang Q X, et al. Chemical characteristics of rainwater in northeast China, a case study of Dalian. Atmospheric Research, 2012, 116: 151-160.
- [21] 王艳, 葛福玲, 刘晓环, 等. 泰山降水化学及大气传输的研究. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1187-1194.
- [22] 黄德银. 广州大气降水中几类典型污染物的化学组成, 沉降能量及物质来源分析. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007.
- [23] 王剑, 侯启婧, 郭蕊, 等. 沧州市降水化学组成及其对大气颗粒物的清除作用. 沧州师范学院学报, 2022, 38(1): 19-24.
- [24] 孙亚敏, 王欢. 安徽省近5年大气降水化学组分特征分析. 环境科学与技术, 2021, 44(S2): 89-92.
- [25] 张丽明, 胡晓艳. 上海市中心城区大气降水化学组分变化趋势及来源研究. 环保科技, 2020, 26(6): 28-34.
- [26] 侯思宇, 邱晨晨, 丁铖, 等. 西安市降水化学组成及来源解析. 环境化学, 2020, 39(9): 2384-2394.
- [27] 钟玉婷, 范子昂, 刘新春, 等. 克拉玛依大气降水化学组分及来源分析. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1038-1047.
- [28] 成彩霞, 赵维俊, 王荣新, 等. 祁连山排露流域青海云杉林对降水化学特征的影响. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 127-131, 145.
- [29] 牛晓文, 李新令, 黄震, 等. 华东区域背景地区降水化学特征及成因分析//第34届中国气象学会年会S9大气成分与天气、气候变化及环境影响论文集. 郑州: 中国气象学会, 2017.
- [30] Possanzini M, Buttini P, Palo V D. Characterization of a rural area in terms of dry and wet deposition. Science of The Total Environment, 1988, 74: 111-120.
- [31] 张泽锋, 沈利娟, 朱彬, 等. 南京市降水化学特征及其来源研究. 大气科学学报, 2015, 38(4): 473-482.