

西北人影工程研究试验设计与实施

段婧^{1,2} 王自强³ 李圆圆⁴ 程鹏⁵ 常倬林⁶ 林春英⁷ 岳治国⁸ 史金丽⁹
殷占福^{1,2} 陈宝君^{1,2} 陈添宇^{1,2} 李集明^{1,2}

(1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京100081; 3 中国气象局计划财务司, 北京 100081;
4 新疆维吾尔自治区人工影响天气中心, 乌鲁木齐 830002; 5 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020;
6 宁夏回族自治区人工影响天气中心, 银川 750002; 7 青海省人工影响天气办公室, 西宁 810001;
8 陕西省人工影响天气中心, 西安 710016; 9 内蒙古自治区气象科学研究所, 呼和浩特 010051)

摘要: 西北区域人工影响天气能力建设项目预期利用已有和本项目即将建设的装备设施, 通过科学设计的专项研究, 开展针对西北区域地形云的人工增雨(雪)试验研究。在工程项目建设中设立研究试验内容, 旨在通过项目建设中同步实施试验研究, 充分体现科技支撑能力在工程项目中的重要作用。总结了西北区域人工影响天气能力建设项目中研究试验的设计和 implementation 过程, 依据建设经验, 提出提高工程项目效益的建议, 为相关工程项目建设提供参考。

关键词: 西北区域人工影响天气能力建设项目, 研究试验, 科学设计, 运行机制

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.012

Design and Implementation of Northwest China Weather Modification Ability Construction Project

Duan Jing^{1,2}, Wang Ziqiang³, Li Yuanyuan⁴, Cheng Peng⁵, Chang Zhuolin⁶, Lin Chunying⁷, Yue Zhiguo⁸,
Shi Jinli⁹, Yin Zhanfu^{1,2}, Chen Baojun^{1,2}, Chen Tianyu^{1,2}, Li Jiming^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081; 3 Planning and Finance Department of CMA, Beijing 100081; 4 Xinjiang Weather Modification Office, Urumqi 830002; 5 Weather Modification Office in Gansu Province, Lanzhou 730020; 6 Weather Modification Center of the Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002; 7 Office of Weather Modification in Qinghai Province, Xining 810000;
8 Center of Weather Modification of Shaanxi Province, Xi'an 710016;

9 Research Institute of Meteorological Science of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051)

Abstract: Special design and innovative operation mechanism were adopted in Weather Modification Ability Construction Project of Northwest China. The existing and new instruments from this project will be expected to effectively use. The scientific designed experiments and the special research based on it were carried out. The mainly aim of these programs is to enhance precipitation of orographic cloud in Northwest China. The purposes of these research programs could reflect the effect of science and technology capacity on the whole building project. In this paper, the process of design and implementation of research and experiment program in Weather Modification Ability Construction Project of Northwest China was summarized. Based on the construction experience, the suggestions to improve the efficiency of the project was suggested and these experiences provide reference for the later construction of related projects.

Keywords: Weather Modification Ability Construction Project of Northwest China, research and experiment, scientific design, operation mechanism

0 引言

我国是世界上气象灾害发生最频繁的国家之一, 生态环境十分脆弱, 水资源短缺也是制约我国可持续

发展的重大难题。人工影响天气是以云降水物理学为理论基础, 在我国社会经济迫切需求的推动下, 近年来随着大气探测技术发展和数值模式的应用, 我国云雾物理与人工影响天气学科得到了较快发展, 也取得了明显的社会效益^[1-3]。

为了增强我国人工影响天气服务能力, 满足社会对人工影响天气工作日益增长的需求, 继东北区域人工影响天气能力建设项目后(以下简称东北人影项

收稿日期: 2021年1月6日; 修回日期: 2021年8月18日
第一作者: 段婧(1981—), Email: duanjing@cma.gov.cn
通信作者: 王自强(1985—), Email: wangzq@cma.gov.cn
资助信息: 西北区域人影科学试验研究项目(RYSY201909)

目), 西北区域人工影响天气能力建设项目(以下简称西北人影项目)作为我国第二个实施的人影区域能力建设项目由中国气象科学研究院牵头, 负责工程的具体建设、管理、运行和维护, 甘肃、陕西、宁夏、青海、新疆、内蒙古等省(自治区)气象局和新疆生产建设兵团气象局等参建单位共同承担建设任务。

为了更好地实现上述功能, 并借鉴东北人影项目实施的经验, 西北人影项目首次在人影工程建设中增设了研究试验内容。有效利用工程建设的各部分功能, 通过在建设的试验示范基地开展人工影响天气技术研究、科学试验和成果的业务化应用。以期形成人工影响天气成套技术并进行推广, 从而提高我国人工影响天气科学水平, 保障工程效益的发挥。本文首先阐述研究试验在西北人影项目中的作用、设计思路及实施方案, 最后对在工程和研究试验实施中的某些关键环节进行了总结性讨论与思考。

1 研究试验在人影工程中的作用

试验研究在人工影响天气工作中有着不可替代的重要作用。人工影响天气是用人为了的手段使天气现象朝着人们预定的方向转化(如人工增雨雪、人工防雹、人工消云、人工消雾、人工抑制雷电、人工防霜冻等)。主要利用云(雾)的微物理不稳定性, 例如在温度低于 0°C 的云内过冷水中播撒成冰催化剂使过冷水滴转化为冰晶; 或在暖云(雾)中播撒大小适当的吸湿性催化剂促进雨滴的生成, 从而改变云的热力、动力结构, 在不同场合下可以促进降水、减少冰雹、消云(雾)等^[4]。

目前, 人工可以影响云微物理结构已经在实验室得到验证, 也通过数值模拟和对云物理量的测量得到了证实。但是自然云雾降水复杂多变, 现在还没有掌握精准判别人工影响天气作业条件的技术方法和选择催化技术的方法。由于无法将自然变化与播云造成的影响区分开来, 客观精确评估人工影响天气试验的效果有一定难度, 人工影响天气至今仍是一项发展中的科学技术^[1]。面对上述问题, 有效利用先进设备和科学设计开展人工影响天气的研究试验, 并进行深入研究, 有望在人工影响天气的基础科学问题研究上取得进展, 在解决核心技术上有所进步。

西北人影项目涵盖飞机作业能力建设、飞机作业保障能力建设、地面作业能力建设以及人影作业指挥系统和试验示范基地建设五项任务, 均重点体现在硬件设备、设施和软件功能的建设和完善上。通过硬、软件建设可充分提高指挥、探测能力及作业装备的硬件性能, 弥补目前西北地区已有人工影响天气探测手段和技术装备相对落后的现状。但建设任务各部分本

身是相对独立和分散的, 特别是人影作业指挥系统软件建设, 需要有较为完整、完善的科技成果方可支撑起科学的业务软件平台。基于东北人影项目实施经验, 如何将这些建设起来的硬件观测、作业设备及软件有效结合起来, 达到充分利用, 进而提升当前人工影响天气工作的科技水平成为一个重要问题。因此, 结合人影工作研究型业务的特点及西北区域实际情况, 西北人影项目中研究试验的设置在这里起到了关键性作用。

西北人影项目中的研究试验, 利用已有及本项目建设的装备、设施(飞机作业能力、地面保障能力、地面作业能力及试验示范基地等内容), 通过有科学设计的专项研究, 开展针对西北区域地形云的人工增雨(雪)研究试验, 从而提高通过人工增雨(雪)开发空中云水资源的科技水平, 提高工程建设效益, 并为西北人影项目建成后的人工增雨业务化运行(即人影作业指挥系统)提供成套成熟的技术方法。因此, 研究试验相当于五部分建设内容的纽带(图1), 可将建设的软、硬件高效利用, 同时其研究成果将成为人影作业业务化运行的重要科技支撑。



图1 在西北人影工程中的研究试验

Fig. 1 The role of research and experiment in the Weather Modification Ability Construction Project of Northwest China

西北人影项目研究试验其既不同于以往气象或人影工程项目的建设内容, 也与普通的科研项目有所区别。主要表现在其研究内容与科研项目设置相似, 特点是更偏重于外场试验的设计和和实施, 重点体现在对两个国家试验示范基地及几个试验点的建设成果的应用上; 不同于普通科研项目主要表现在对其预期成果的要求上, 为了使研究成果能直接地应用于指挥系统软件, 将成果凝练为算法、指标、数据集等, 以期集成并可落实到应用平台。

综上所述, 开展试验研究在西北人影项目中举足轻重, 研究试验内容的设置作为纽带连接了项目建设的五个建设内容, 体现了基础、纽带和科技支撑作

用,不仅是落实国家发展战略中依靠科技高质量发展我国人工影响天气工作的有效措施,也是提升国家级工程项目效益和加强科技支撑的重要保障,更是坚持改革创新发展战略在国家气象重大工程建设中的具体实践。

2 围绕西北地形云人工增雨(雪)科技水平提高的研究试验

西北地区多高山,地势起伏较大,造就了以山系走向为主、山体影响水汽和气流场分布的复杂地形云,特别是像天山、祁连山、三江源地区的高山,不仅关乎西北地区水资源利用和开发,而且是全国生态安全的重要屏障。由于其特殊的地理地貌特点,高山阻挡形成的典型地形云是主要降水天气系统之一,同时也是人工增雨效率较高的催化作业云系。

西北祁连山、天山两个试验示范基地及三江源、六盘山的地形云研究,依托以往的外场试验及近年来人工影响天气的发展,在云降水物理学科及作业技术等方面已经取得了长足的进步^[5-12]。随着近年来探测技术水平的提高和数值模拟研究及其应用技术的发展,一些先进的探测和作业设备在人工影响天气中得到了应用,数值模式在人工影响天气作业条件预报、识别、效果评估及机理等方面的研究中都起到了重要作用^[13-15]。根据以往的研究成果和经验,西北地区建设范围内的两个国家级试验示范基地(祁连山地形云人工增雨(雪)试验示范基地、天山地形云人工增雨(雪)试验示范基地)中,祁连山地区地形云产生的降水条件较好,山区空中水汽资源相对丰富,独特的地理条件使其成为人工增雨(雪)的极佳地区^[5-8];天山山脉以北的北疆地区成云多,但降水却不充分,云水资源潜力大^[9-10]。结合西北地区区域特点及业务需求,在西北人影工程中选取了人工增雨效果较高的地形云作为催化作业云系的重点研究目标,研究试验也主要围绕地形云在试验示范基地设计试验和开展。

因此,西北人影项目将依托工程建设,开展重点以地形云人工增雨(雪)为主的研究试验,为充分有效的开发空中云水资源,提高地形云降水效率,增加地面降水量,是改善西北地区水资源欠缺的有效途径之一,也是恢复和改善西北生态脆弱地区的重要途径。

2.1 设计原则

通过开展研究试验,可为西北人影工程提供验证数据、资料,解决各项建设任务技术难点和有关问题,实现工程所建各项设备设施的科学应用、各项建设任务的有效落实和工程整体效益的切实发挥;同时,促进人影关键技术研制,发挥人工影响天气技术、

指标和方法等相关成果对后续其他相关工程的借鉴作用,减少后续相关工程建设中重复性问题的出现。

因此,其设计原则一是主要内容设计以地方需求为导向,与工程建设任务紧密结合、同步设计、同步实施;二是采用的技术方法与路线充分体现可行性和先进性;三是获得的试验成果可直接应用于工程项目业务化运行。

2.2 主要内容及研究目标

依据设计原则和研究现状,西北人影工程研究试验内容重点以西北地形云为研究目标,主要包含作业背景条件分析、综合观测对比试验、增雨作业验证试验以及新型资料云数值模式融合试点应用的4个部分(表1)。

表1 西北人影工程研究试验主要内容和研究目标
Table 1 Main content and research objectives of research and experiment

类别	项目	预期目标
作业背景条件分析	对比试验区复杂地形精细化雨量场分析	1) 获取对比试验区观测降水量场气候特征数据集 2) 建立适用于对应区域的精细化多源降水量场融合分析技术方法;多源资料融合分析的实时降水量场
	对比试验区复杂地形气流场分析	1) 西北地区主要试验区的天气系统分型;主要降水环流形势的三维气候特征数据集 2) 主要试验区实时气流场
综合观测对比试验	地形云水汽和云水的观测和分析	1) 提供优化的地形云水汽的综合观测、分析方法 2) 主要试验区地形云水汽场气候分布特征 3) 主要试验区实时水汽场 4) 主要试验区云水资源分布特征
	地形云物理特征综合观测对比试验	1) 特种云物理观测仪器的资料质控算法、使用方法、观测规范(包括飞机探测设备、地面车载移动雷达等特种观测仪器) 2) 天山和祁连山地区地形云降水概念模型(包括云宏、微观结构及降水形成过程)
增雨作业技术验证试验	地形云作业指标验证试验	主要天气系统背景下的地形云人工增雨作业概念模型: 1) 适宜于区域主要地形降水云系实施人工增雨(雪)作业的宏观条件(时机、部位) 2) 适宜于区域主要地形降水云系实施人工增雨(雪)作业的综合技术指标
	不同作业装备对地形云催化作业效果的验证试验	1) 针对主要地形降水云的飞机、火箭、烟炉等不同催化装备催化方案 2) 可用于试验区催化作业效果评估物理检验的主要物理参量 3) 主要试验区地形云催化效果评估方案
观测资料融合应用	新型资料云数值模式融合试点应用	1) 典型个例模式输出四维云场数据集 2) 典型个例范例 3) 基于新型探测资料的云微物理参数化方案改进方案

2.3 凝练科学问题及成果需求

设计中主要研究内容、技术路线和预期成果通过四部分(图2)实现:1)利用模式或试验可获取雨量场、气流场、水汽场、云水资料分布、四维云场及多种手段获取的云监测产品等的历史背景场及实时场,研究云降水概念模型及人工增雨(雪)作业概念模型,提出初步可应用的催化效果评估方案;2)上述雨量、气流等历史背景场,作为开展研究试验的基础性成果,结合当地云降水和人工增雨(雪)作业概念模型,可服务于监测设备选址及作业设备布点等

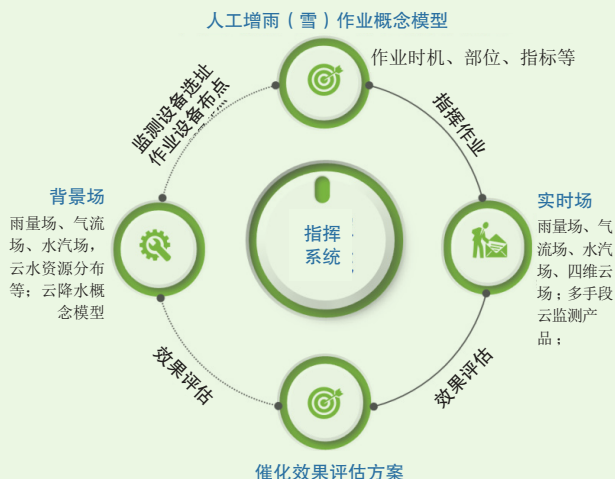


图2 研究试验设计思路
Fig. 2 Design of research and experiment

方面；3）上述雨量、气流等实时场，结合人工增雨（雪）作业概念模型可有效辅助指挥作业；4）上述雨量、气流等历史背景场和实时场，是完成催化效果评估方案的必要条件。所有预设功能的完成需将研究试验成果集成于指挥系统，实现研究成果的应用。在此基础上，结合项目建设的具体要求及业务亟需解决的问题，总结并凝练了需要解决的几个重点问题：可用的空中云水资源有多少；人工增雨（雪）的作业方法；人工影响天气作业效果如何评价。这三个问题也是一直围绕人工影响天气工作的三个核心问题，将其作为西北人影工程研究试验的重点研究问题，使所有研究和试验方案都围绕此开展。

3 实施及初步成效

针对西北人影工程中实施研究试验的新内容，创新运行机制，全面、认真论证了研究试验内容和任务分解的科学性、运行体制的可行性，形成了完整的实施方案。

为有效利用工程建设成果并充分发挥国家人影中心和地方人影部门优势，研究试验项目设计经多方征求意见并通过专家论证，在研究内容上，形成了围绕祁连山、天山两个试验示范基地及青海三江源、宁夏六盘山、陕西渭北和内蒙古巴彦淖尔试验点的符合西北地区特色的六个研究试验专题，在科学设计的基础上，预计开展重点以地形云为目标的研究试验。同时，统筹考虑了西

北区域研究试验内容特点，设立了气候背景研究及模式研究两个分任务，与上述六个研究试验专题共包含八个研究项目（图3）。

4 试验的措施

在项目实施阶段，依据前期的充分调研和讨论，利用通过公开招标采购的方式委托研究项目任务。各项目设立首席科学家，每个任务的首席科学家由高校或科研机构的学科带头专家承担，引领试验设计和研究工作，通过共同讨论和论证，保障研究内容和试验设计的先进性；其团队与地区业务部门专家共同完成试验实施和研究工作，依此形成的以首席科学家为首的研究团队，包含高校科研机构及地方业务人员，形成资源、技术和设备优势互补，相互促进，同时促进地方业务人员的成长，青年的培养。以此充分调动全国大气物理及相关学科优秀科学家及研究团队，有针对性地集中优势力量开展试验研究，这也是西北人影工程建设中的一项重大突破。同时，采用了相关研究任务以科研项目形式直接下达的方式，促进各建设单位对西北人影工程研究试验项目的深度参与，加强地方气象部门人才培养。

实施中，根据公开招标的要求，编制完成了适宜于研究试验的招标文件、合同及相关任务书范本。其中技术参数和考核指标等内容都在参考招标文件要求的基础上，依据研究试验各分包的内容进行了详细有特点的设定。研究试验成果的一个重要体现就是与西北人影工程项目指挥系统的对接，因此考核指标除了首先满足研究试验内容需求以外，将成果明确为提交数据集、指标和算法，并具有可考核性。对研究成果的具体工程化要求，在推动成果转化的同时，是落实研究试验成效的一个有力措施。

5 结论与思考

通过研究试验在西北人影工程中的实践来看，研究试验在工程项目中的作用举足轻重。其将各建设内容有机结合，作为各部分的纽带，有助于建设成果的



图3 研究试验的任务分解
Fig. 3 Task decomposition of research and experiment

集成应用，其实施具有较好的试验示范作用，并将有效提高工程建设效益。

目前的西北人影工程研究试验与国家生态建设要求紧密结合，侧重解决包括西北地区云水分布和收支、作业概念模型及效果评估等重要问题。预期通过项目科学设计、执行机制的创新，结合科研项目任务下达的方式，将科学家、地方建设单位和国家建设单位三者更好地融合起来。公开招标的方式将吸引各方优秀团队和先进技术力量共同参与，形成成果共享、共同进步、互利共赢的良好局面；通过科研项目任务下达加深地方建设单位的深度参与，有利于地方人才的培养和技术储备升级。另外，执行过程中编制完成的适宜于工程项目研究试验类的招标文件、合同及相关任务书是经过了多方论证和讨论形成的范本，可为今后同类项目的执行提供依据。

另外，既是新事物，便需更多探索和实践。根据研究试验部分在工程项目执行过程中出现的问题，总结经验，有以下几个方面需进行重点考虑：

1) 多方咨询，政策支持。作为第一个在工程建设中设置的研究项目，如何做好是一个挑战。通过集中全国人工影响天气、云降水物理及多学科专家共同多方讨论，保障了形成的技术实施方案具备的先进性；通过向体制内、外的职能部门专家咨询，保障了项目执行过程中的合理、可行性。这是研究试验顺利执行的技术和政策保障。

2) 加强沟通，适当引导重应用。区别于以往的科研项目，本项目在执行过程中，为使研究成果能更好的得到业务应用，研究试验将在这方面起到更多的引导作用。将更多开展与指挥系统等多方讨论、沟通总结和交流，以

求研究成果能尽快适应指挥系统，在指挥作业中得以应用。这也是研究试验的一个重要任务。

3) 重视管理，加强交流与适时检查并重。研究试验的任务分解后包含八个任务内容。任务分解方式对项目管理方提出了较高的要求，如何将各部分内容在各自的研究范围内突出重点，并可如期按要求完成任务，定期组织各项目检查及项目间的交流便十分重要，以此可及时发现各自执行中的问题并尽快解决，各项目间也可互通有无、相互借鉴。

参考文献

- [1] 胡志晋, 王广河, 王雨增. 人工影响天气工程系统. 中国工程科学, 2000, 2(7): 87-91.
- [2] 郑国光, 郭学良. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势. 中国工程科学, 2012, 14(9): 20-27.
- [3] 李大山. 人工影响天气现状与展望. 北京: 气象出版社, 2002.
- [4] 顾钧禧. 大气科学辞典. 北京: 气象出版社, 1994.
- [5] 张强, 孙昭莹, 陈丽华, 等. 祁连山空中云水资源开发利用研究综述. 干旱区地理, 2009, 32(3): 381-389.
- [6] 郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等. 祁连山夏季地形云综合探测试验. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1057-1070.
- [7] 陈乾, 陈添宇, 张鸿. 用Aqua/CERES反演的云参量估算西北区降水效率和人工增雨潜力. 干旱气象, 2006, 24(4): 1-8.
- [8] 陈添宇, 郑国光, 陈跃, 等. 祁连山夏季西南气流背景下地形云形成和演化的观测研究. 高原气象, 2010, 29(1): 154-165.
- [9] 李霞, 张广兴. 天山可降水量和降水转化率的研究. 中国沙漠, 2003, 23(5): 509-513.
- [10] 郭玉娣, 徐祥德, 陈渭民, 等. “鱼尾”状地形热力效应对天山降水系统及水资源的影响. 高原气象, 2014, 33(5): 1363-1363.
- [11] 张沛, 姚展予, 贾烁, 等. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究. 大气科学, 2020, 44(2): 200-213.
- [12] 王黎俊. 三江源地区秋季多层层状云系微物理特性和催化响应的观测研究. 南京信息工程大学, 2013.
- [13] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(1): 降雪过程和地形影响. 高原气象, 2009, 28(3): 485-495.
- [14] 连钰. 北天山复杂地形作用下的局地强降水过程数值模拟研究. 南京信息工程大学, 2014.
- [15] 于晓晶, 赵勇. 地形对天山夏季降水影响的模拟. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1133-1143.

(上接71页)

3.3 部署

基地业务平台由西北区域人影中心牵头组织开发，部署于祁连山地形云人工增雨（雪）试验示范基地、天山地形云人工增雨（雪）试验示范基地和青海三江源地形云人工增雨（雪）试验示范基地，并根据各基地具体开展的外场试验性质和作业示范目的进行本地化安装。

参考文献

- [1] 赵玉田. 脆弱生态系统下西北干旱区农业水资源利用策略研究. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [2] 张九天, 何宵嘉, 上官冬辉, 等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策. 冰川冻土, 2012, 34(4): 848-854.
- [3] 郑国光. 21世纪人工影响天气科学技术展望. 国际地震动态, 1997, (7): 14-19.
- [4] Kenny J F, Barber N L, Hutson S S, et al. Estimated use of water in the United States in 2005. US Geological Survey Circular 1344,

- 2009.
- [5] 段婧, 楼小凤, 卢广献, 等. 国际人工影响天气技术新进展. 气象, 2017, 43(12): 1562-1571.
- [6] Robert M R, Art G, Ulin X, et al. Wintertime orographic cloud seeding—a review. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019, 58: 2117-2140.
- [7] 高登义, 邹捍, 周立波, 等. 中国山地环境气象研究进展. 大气科学, 2003, 27(4): 567-590.
- [8] 孙方林, 马耀明. 珠穆朗玛峰北坡地区河谷局地环流特征观测分析. 高原气象, 2007, 26(6): 1187-1190.
- [9] 邹捍, 周立波, 马舒坡, 等. 珠穆朗玛峰北坡局地环流日变化的观测研究. 高原气象, 2007, 26(6): 1124-1140.
- [10] 吕雅琼, 马耀明, 李茂善, 等. 青藏高原纳木错湖区大气边界层结构分析. 高原气象, 2008, 27(6): 1206-1210.
- [11] 陈添宇, 郑国光, 陈跃, 等. 祁连山夏季西南气流背景下地形云形成和演化的观测研究. 高原气象, 2010, 29(1): 152-163.
- [12] 王颖. 祁连山地区云参数的时空特征及其与降水关系的分析. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [13] 岳治国, 余兴, 刘贵华, 等. NPP/VIIIRS卫星反演青藏高原夏季对流云微物理特征. 气象学报, 2018, 76(6): 968-982.