

祁连山地形云人工增雨(雪)试验观测与研究进展

张文煜^{1, 2, 3} 黄颖^{1, 2} 尹宪志^{2, 4} 李林^{2, 5} 程鹏^{2, 4, 6} 王黎俊^{2, 5} 罗汉⁴
张丰伟⁴ 林春英⁵ 韩辉邦⁵ 隆霄¹ 张武¹ 毛文茜^{1, 2} 王潇雅^{1, 2} 把黎⁴

(1 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000; 2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081; 3 郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450001; 4 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020; 5 青海省人工影响天气办公室, 西宁 810001; 6 甘肃省兰州市气象局, 兰州 730020)

摘要: 系统概括了西北区域人工影响天气能力建设项目“西北区域人工影响天气工程祁连山地形云人工增雨(雪)技术研究试验”的研究进展, 可归纳如下: 按照项目计划顺利开展了野外探测试验以及火箭、飞机观测试验, 收集了各种手段获取的各要素探测数据及作业相关信息, 开展了各种作业方法的效果检验和评估; 分析了祁连山地区降水量场和气流场特征; 探讨了试验仪器及再分析数据和卫星数据的精确性, 对FY-3A/MERSI水汽产品、TK-2GPS人影探测火箭资料进行了精度验证, 对微波辐射计温湿度的反演方法进行了探讨; 从云垂直结构、云粒子特征、水汽等方面对祁连山地区云、水资源的变化特征进行了研究; 对人工增雨效果进行了统计检验; 利用WRF中尺度数值模式对地形云降水个例进行了模拟研究, 探讨了祁连山地形云和降水的发生发展机制。初步研究结果表明: 祁连山地区平均年降水量为232.4 mm, 祁连山区流场主要有西南及偏西气流型, 辐合辐散气流型, 东北及偏东气流型, 西北及偏北气流型, 偏南气流型等五种类型; 祁连山北坡云的发生频率较低, 仅为20%~40%; 降水和气温分别使径流量增加了21.1%和10.9%; 石羊河流域2010年以来, 4—10月人工增雨绝对增雨量为33.7 mm, 平均相对增雨率为17.5%, 平均植被覆盖百分比达到了46%以上并保持稳定; 夏季祁连山区地形抬升局地性强, 地形抬升作用对降水影响很大, 过程降水一般都包含着地形云降水。

关键词: 人工影响天气, 祁连山, 地形云, 观测试验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.016

Observations and Research Progress of Cloud-Seeding (Snow) Project in Qilian Mountains

Zhang Wenyu^{1, 2, 3}, Huang Ying^{1, 2}, Yin Xianzhi^{2, 4}, Li Lin^{2, 5}, Cheng Peng^{2, 4, 6}, Wang Lijun^{2, 5}, Luo Han⁴, Zhang Fengwei⁴, Lin Chunying⁵, Han Huibang⁵, Long Xiao¹, Zhang Wu¹, Mao Wenqian^{1, 2}, Wang Xiaoya^{1, 2}, Ba Li⁴

(1 College of Atmospheric Sciences, Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000 2 Key Laboratory for Cloud Physics, China Meteorological Administration, Beijing 100081 3 School of Geoscience and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001 4 Office of Weather Modification in Gansu Province, Lanzhou 730020 5 Office of Weather Modification in Qinghai Province, Xining 810001 6 Lanzhou Meteorological Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730020)

Abstract: Systematically summed up the research progress of “weather modification project of topographic cloud precipitation (snow) enhancement technology research and experiment in Qilian mountain”, the research progress can be summarized as follows: according to the plan of the project, field detection tests and aircraft observation tests were carried out successfully, and the detection data and weather modification operation of various elements obtained by various means were collected, which provided data support for the effect inspection and evaluation of various operational methods. The characteristics of precipitation field and air flow field in Qilian Mountains are analyzed. The accuracy of instruments and satellite data were verified, the accuracy of FY-3A/MERSI water vapor product and TK-2GPS rocket data were verified, and the inversion method of temperature and humidity of microwave radiometer was discussed. The variation characteristics of cloud and water resources in Qilian Mountains were studied from the aspects of cloud vertical structure, cloud particle characteristics and water vapor. The effect of artificial precipitation enhancement was tested statistically. Simulated the topographic cloud precipitation cases and discussed the

occurrence and development mechanism of topographic cloud and precipitation in Qilian Mountains by used WRF mesoscale numerical model. Preliminary results show that: the average annual precipitation in the Qilian Mountains is 232.4 mm; the flow field in the Qilian Mountains region mainly consists of southwest and west flow pattern, convergence and divergence

收稿日期: 2021年1月8日; 修回日期: 2021年1月29日
第一作者: 张文煜(1964—), Email: zhangwy@lzu.edu.cn
资助信息: 西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验项目(ZQC-R18208); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0104)

flow pattern, northeast and east flow pattern, northwest and north flow pattern, and south flow pattern; the occurrence frequency of clouds on the Northern Slope of Qilian Mountains is only 20%–40%; precipitation and temperature increased the runoff by 21.1% and 10.9%, respectively; the absolute precipitation increase of artificial precipitation in Shiyang River Basin from April to October was 33.7 mm, the average relative precipitation increase rate was 17.5%, and the average vegetation coverage percentage was more than 46% and remained stable; in summer, the uplift of the Qilian Mountains has a strong local character, and the uplift has a great influence on the precipitation, and the process precipitation usually includes the topographic cloud precipitation.

Keywords: weather modification, Qilian Mountains, topographic cloud, measurement and experiment

0 引言

祁连山位于甘肃省和青海省的交界处，是青藏高原、内蒙古高原和黄土高原的分界线，在气候分区上，处于我国西北干旱区、东部湿润区、青藏高原寒区的过渡带，是气候变化的敏感地区^[1]。祁连山地区降水情况复杂，降水量地区差异大、年内分配不均、年际变化大，降水量变化对于毗邻区域尤其是河西走廊水资源具有重要影响^[2-4]。河西走廊冬春季农业干旱频繁发生，水资源短缺不仅严重影响了工农业生产，而且使城市居民生活用水和生态用水也受到威胁。河西地区陆地水资源总量不足且地域分布不均，而社会经济发展对生态建设、水资源开发和可持续利用、防灾减灾等提出了越来越高的要求，人工影响天气作为大气水资源利用、气象防灾减灾的重要手段，在新的形势和需求下，越来越显示出其重要性^[5-7]，祁连山地区的空中水资源备受关注。

许多学者从不同角度对祁连山地区的空中水资源进行了探讨^[8-14]。祁连山大气水汽受西风带、偏南季风带和东亚季风的影响，过境水汽量较周围地区丰沛，常年有水汽的辐合^[10-11]。但水汽总输送量中只有15%左右形成降水，其余的水汽越界而过^[6, 12]。这些丰富的山区空中水汽在地形抬升、迎风坡较多、气温较低等条件的共同作用下，容易形成有效的增雨云系。祁连山的地形云是该地区产生降水最主要的云系之一^[13]，具有很好的增雨潜力，对其进行催化作业可增加其降水量^[6, 14]。但是，祁连山地形云的复杂性、广泛性、多样性、以及作业背景的气候特征差异性等，使得地形云的水汽场、气流场、云物理特征等的综合观测非常必要；同时，开展针对地形云的人工增雨（雪）作业指标的验证和各类作业装备催化效果的验证工作，对进一步提高地形云降水效率也起到关键作用。此外，通过研究试验，掌握地形云作业技术方法和指标体系，可以为准确预测和预报作业条件、作业量、作业时机等方面提供科学的方法和手段。

通过本研究试验的实施，有效开发空中云水资源，提高地形云降水效率、增加地面降水量，是改善祁连山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。

1 观测方案设计与实施

1.1 观测方案

祁连山区域面积为5.02万km²。根据试验示范区设计原则和依据，试验区设有一区和二区：当盛行西北气流时，二区为作业区，一区为对比区；当盛行西南气流时，一二区可互为作业区和对比区（图1）。试验一区面积为2.31万km²，其中自然保护区面积有0.67万km²，约占一区面积的32%；试验二区面积为2.34万km²，其中自然保护区面积有0.48万km²，约占二区面积的23%。在试验区内布设有自动气象站208套、雨滴谱仪32部、探空站7个、天气雷达站5台等常规观测仪器，云雷达1部、微波辐射计4部、地形云影像观测设备2台、GNSS/MET站13个、车载多普勒天气雷达2部等特种观测仪器，人影作业火箭69台、高炮22台、地面烟炉40个，同时配合有飞机、火箭和卫星探测。地面观测仪器形成了“三横六纵”的网格布局，其中三个横向剖面主要是沿着祁连山的山体走向（北坡（横A）、山脊（横B）、南坡（横C））布设；6个纵向剖面分别在一区和二区各设有3个剖面（纵A、纵B、纵C；纵D、纵E、纵F），且一区和二区各布设一个加密观测剖面（纵C、纵E）。

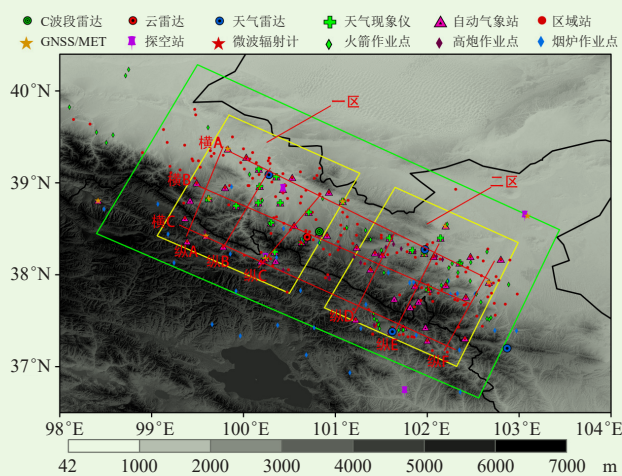


图1 试验区范围及仪器布局
Fig. 1 Test area and instrument layout

1.2 加密观测带

一区的加密观测带（纵C）为祁连至民乐一线

(图2a), 其上增加布设了六要素自动气象站9部、雨滴谱仪5部、移动车载云雷达1部、微波辐射计2部、C波段天气雷达1部。青海、甘肃省内各有4部和5部自动气象站, 皆按照海拔高度梯度布设, 位于2700~3600 m高度范围内, 越靠近祁连山腹地的气象站海拔高度越高; 车载云雷达位于紧邻祁连山的张掖

市民乐县卜里沟村, 其采用sPPI、RHI和天顶模式结合的方式进行观测, 可提供包括雷达反射率因子、径向速度、退偏振比等参数的基数据和谱数据; 两部微波辐射计分别位于民乐县海潮音寺和祁连县人工影响天气作业点, 均采用天顶模式进行观测。

二区的加密观测带(纵E)为门源至武威一线

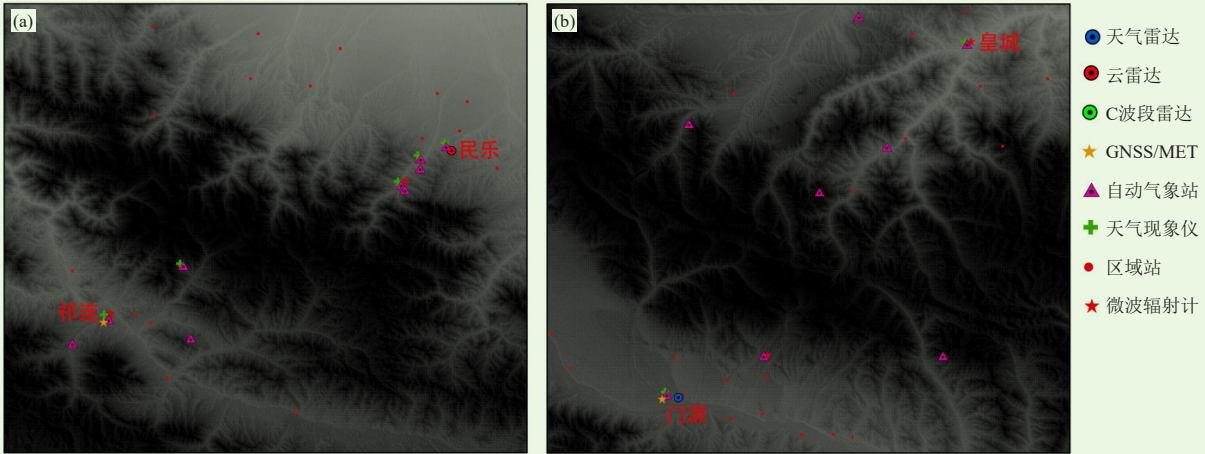


图2 一区(a)和二区(b)加密观测带
Fig. 2 The encrypted observation bands in region 1 (a) and region 2 (b)

(图2b), 其上增加布设了六要素自动气象站8部、雨滴谱仪1部、微波辐射计2部。青海、甘肃省内各有3部和5部自动气象站, 与一区加密观测带相同, 也为海拔高度梯度站, 位于2600~3600 m高度范围内; 两部微波辐射计分别位于肃南裕固族自治县皇城镇水关村和海北藏族自治州门源县老龙湾管护站, 均采用天顶模式进行观测。

水量远大于周围的平原, 降水量分布与海拔高度有良好的对应关系, 海拔越高处降水量越大, 降水量最大值出现在祁连山中部的高海拔地区, 年降水量值最大超过550 mm; 年降水量场常呈西北—东南向分布, 中部和东部地区降水量较大。年降水量总体呈现上升的趋势, 其气候倾向率达到24.7 mm/10 a。使用MK方法对年降水量进行检验, 发现降水量于1996—1997年发生突变, 1996年前降水量偏少, 多为负距平, 1997年后降水增多。祁连山地区降水量的季节变化明显, 降水主要发生在夏季, 其降水量占全年总降水的54.08%; 各季节降水量都呈增加的趋势, 但秋季降水增加最明显, 秋季降水气候倾向率高达9.8 mm/10 a。因我国西部山区降雪观测较为缺乏, 冬春季降水量的分析可能存在不确定性。祁连山地区的降水也有显著的日变化特征, 3小时累计降水量在14:00—20:00最大。研究区白天降水的增加方向由东向西, 入夜后降水量的减少方向由西向东。

2 课题研究进展

2.1 背景场分析

2.1.1 降水量场分析

为了解祁连山地区降水量场的气候分布特征, 利用欧洲中期数值预报中心ERA-Interim再分析数据集的降水资料, 对祁连山及其周边地区降水量时空分布特征进行了分析(图3)^[4]。发现祁连山地区平均年降水量为232.4 mm, 降水量的空间分布极不均匀, 山区降

2.1.2 气流场分析

山区风场的特点直接影响着动量、热量和水汽的输送, 从而影响着山区气象要素的分布^[15], 利用2018年ERA-Interim再分析资料, 统计分析了祁连山区的地面风场分布特征发现, 受大气环流及地形的影响, 祁连山区存在一些定常性的风场环流特征^[16]。对祁连山西段(图4)、中段(图5)和东段(图6)分别进行分析。发现祁连山区盛行气流主要有西北气流型、西

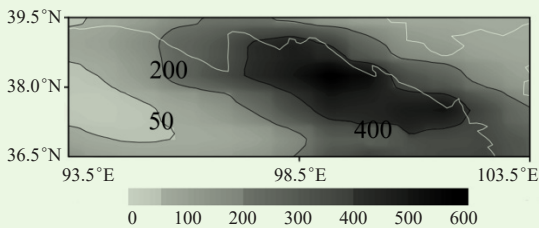


图3 1979—2017年祁连山地区平均年降水量空间分布(单位: mm)
Fig. 3 The spatial distribution of average annual precipitation from ERA-Interim data in Qilian Mountains during 1979—2017 (Unit: mm)

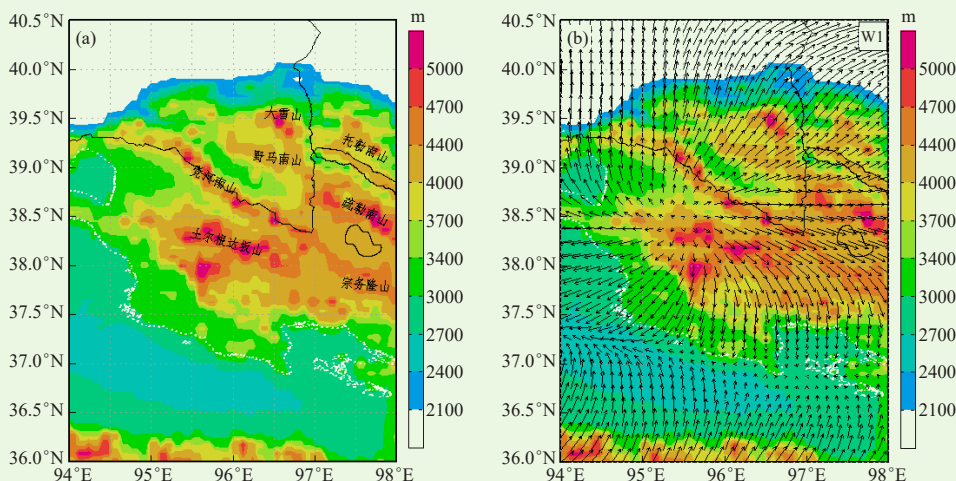


图4 祁连山西段地形 (a) 及地面风场类型 (b)

Fig. 4 Terrain (a) and surface wind field types (b) in the western of Qilian Mountains

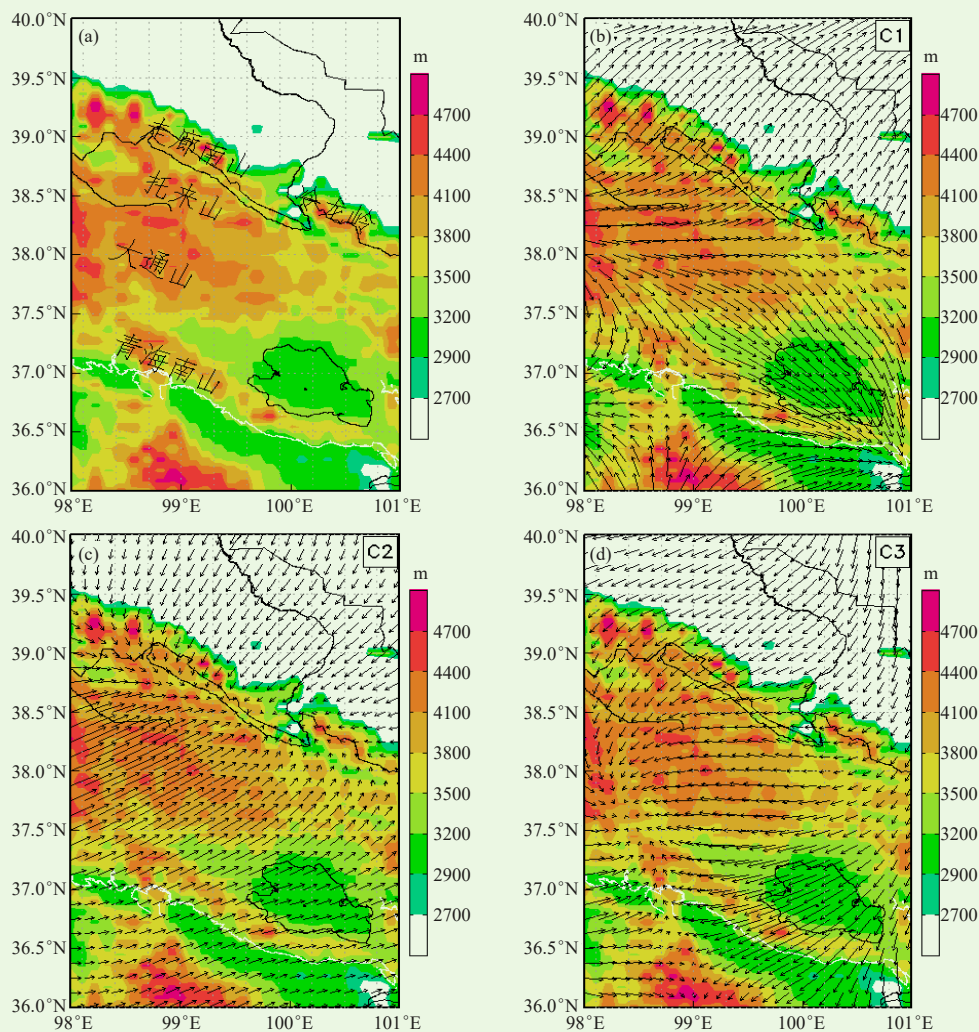


图5 祁连山中段地形 (a) 及地面风场类型 (b~d)

Fig. 5 Terrain (a) and surface wind field types (b~d) in the middle part of Qilian Mountains

北转东北气流型、东南或偏南气流型、东南转东北气流型、西北—东南气流辐合型、东北—西南气流辐合型、偏西或西南气流型等7种类型。

祁连山西段主要包括大雪山、托勒南山、野马南山、疏勒南山、党河南山、土尔根达坂山、宗务隆山。祁连山西段常见的风场类型为以山体为中心，气

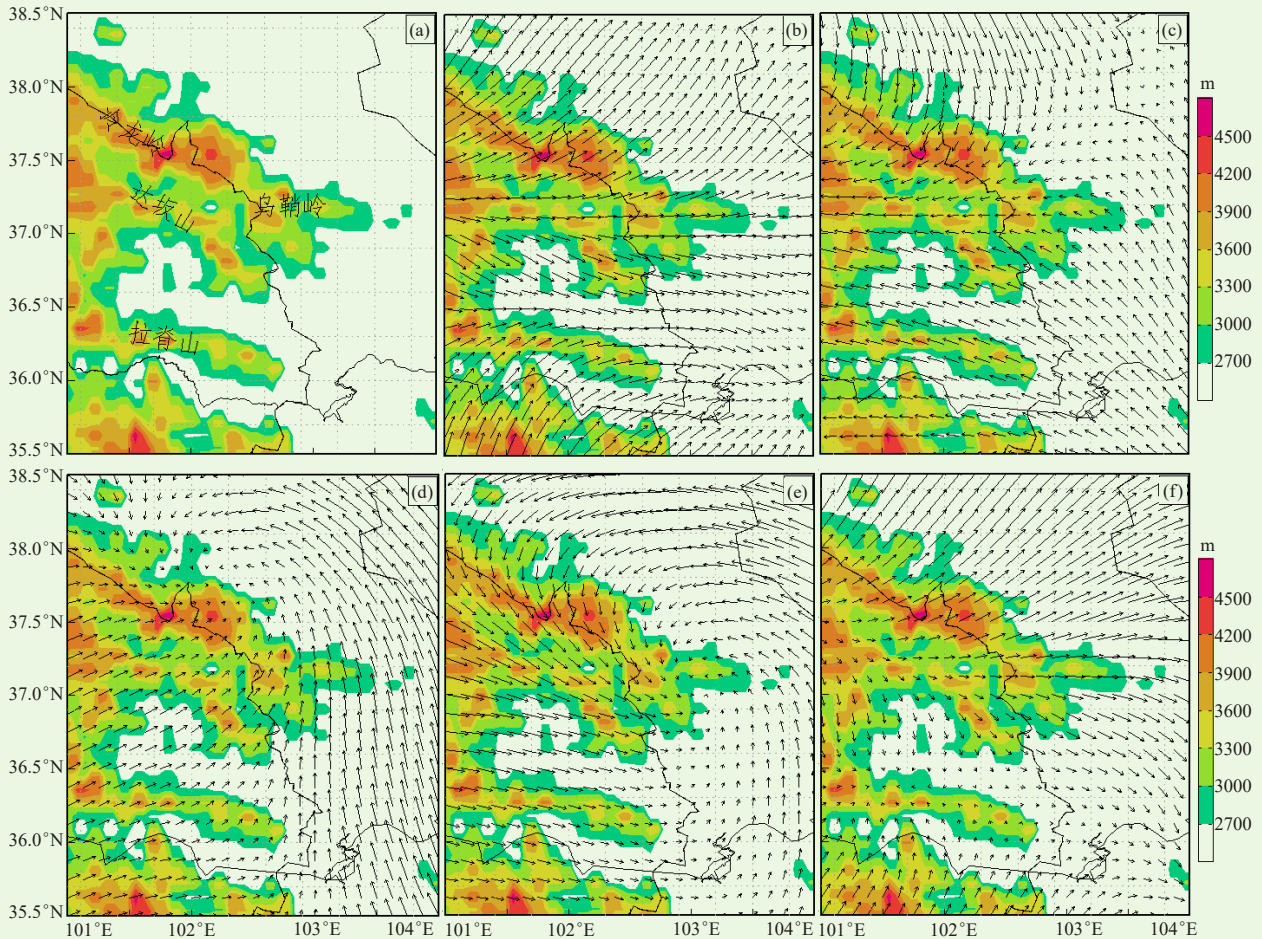


图6 祁连山东段地形 (a) 及地面风场类型 (b~f)

Fig. 6 Terrain (a) and surface wind field types (b~f) in the eastern of Qilian Mountains

流向外辐散，但辐散中心的位置并不确定，可能出现在山体的很多地方，由于辐散中心位置的变化，祁连山区西段山系不同区域的风场存在差异。

祁连山中段主要包括走廊南山、冷龙岭的西段、托来山、大通山以及青海南山。祁连山中段主体受偏西气流影响，整体气流呈现辐散形势，在北坡走廊南山、托来山及冷龙岭处转为西南气流，大通山处为偏西气流，在南坡青海南山处转为西北、偏北甚至是东北气流，并且在青海南山的最南部边坡受青藏高原而来的偏南风影响，在此处形成气流的汇合，有时南坡辐散形势表现的不太明显时，青海南山受偏西气流影响，不会在边坡形成气流的汇合。当高原南风强盛时，青海南山转为偏南气流。当高原南风强盛且南坡辐散形势较弱时，祁连山区中段为一致的西南气流。

祁连山东段包括冷龙岭的中东段、乌鞘岭、达坂山以及拉脊山。祁连山东段最常见的地面风场受偏西气流影响，气流在北部山区冷龙岭中东段、乌鞘岭、达坂山和南部山区拉脊山呈现出不同的态势，在北部

山区气流呈辐散形势，偏西气流在冷龙岭山脉段转为西南气流，在达坂山脉段转为西北气流，冷龙岭和达坂山之间的谷地以及乌鞘岭为偏西气流，而南部山区拉脊山受青藏高原辐散气流影响，为西南气流，有时青藏高原的影响不明显，且北部山区的辐散形势强烈时，拉脊山受辐散气流边缘的西北或东北气流影响。当北部山区的辐散形势不明显并且青藏高原的辐散气流强烈时，整个祁连山东部都转为西南或偏南气流，当北部山区辐散形势明显且青藏高原的南风强烈时，易在拉脊山形成辐合。

为了解祁连山地面风场的整体情况，利用统计学方法对2018和2019年祁连山区的地面气流场进行了分型及统计，根据祁连山区气流的来向把流场分为五种类型，分别为：西南及偏西气流型，出现次数占48.88%；辐合辐散气流型，出现次数占23.88%；东北及偏东气流型，出现次数占7.91%；西北及偏北气流型，出现次数占14.39%；偏南气流型，出现次数占4.94%。从中可以得到祁连山区全年出现最多频率的

流场为西南及偏西气流型。从表1中可以看出，四个季节的盛行气流均为西南及偏西气流，春夏秋冬出现的频率分别为63.01%、44.20%、34.24%和54.44%。春季出现频率第二的是辐合辐散气流，出现频率为24.35%；夏季西北及偏北气流出现频率仅次西南及偏西气流，占比为22.12%；秋季和冬季出现频率次于西南及偏西气流的为辐合辐散气流，出现频率分别为28.26%和23.42%。

表1 祁连山区地面流场分型统计
Table 1 Classification statistics of surface flow field in Qilian Mountain area

季节	西南及偏西气流	辐合辐散气流	东北及偏东气流	西北及偏北气流	偏南气流
春季	63.01%	24.35%	3.08%	9.35%	0.21%
夏季	44.20%	19.50%	7.38%	22.12%	6.79%
秋季	34.24%	28.26%	14.88%	12.64%	9.99%
冬季	54.44%	23.42%	6.18%	13.32%	2.63%
总计	48.88%	23.88%	7.91%	14.39%	4.94%

2.2 数据标定分析

2.2.1 FY3A/MERSI 大气可降水产品的精度验证

风云三号A星 (FY-3A) 是中国第二代极轨气象卫星的第一颗科学研发卫星，由国家卫星气象中心针对中分辨率光谱成像仪MERSI近红外通道开发了水汽产品，为了更好地应用该产品数据，需要对其精度验证。分别采用地基GPS水汽、AERONET水汽和探空水汽数据对FY-3A/MERSI 5分钟段水汽产品进行精度验证，在剔除一些异常值后绘制了MERSI水汽的对比散点图 (图7)。尽管与3个参考数据匹配的样本数不同，但它们的相关系数都在0.867以上，说明MERSI水汽量与3个参考数据都有很好的相关性。当水汽量较低 (<7.5 mm) 时，MERSI水汽产品与3个参考数据值都比较接近，样本均分布在散点图1:1直线附近；当水汽量大较高 (>7.5 mm) 时，所有样本都分布在散点图1:1直线的下方，平均偏差均小于0，说明MERSI水汽产品值比参考数据值低。图7a是MERSI水汽与地基GPS水汽的散点图，两者的相关系数最高，为0.944；平均绝对百分误差MAPE为22.83%、均方根误差RMSE为1.62 mm、平均偏差MB为-0.93 mm，在3个参考数据中误差最小的，主要是搭载MERSI传感器的FY-3A卫星过境时间与GPS观测水汽的时间差最小，低于5 min。图7b是MERSI水汽与AERONET水汽的散点图，相关系数为0.867，尽管稍低，但仍达到极显著水平；MAPE、RMSE和MB分别为27.42%、2.33 mm和-1.12 mm，在3个参考数据中误差居中；由于MERSI与AERONET水汽的时间差异在30 min内，

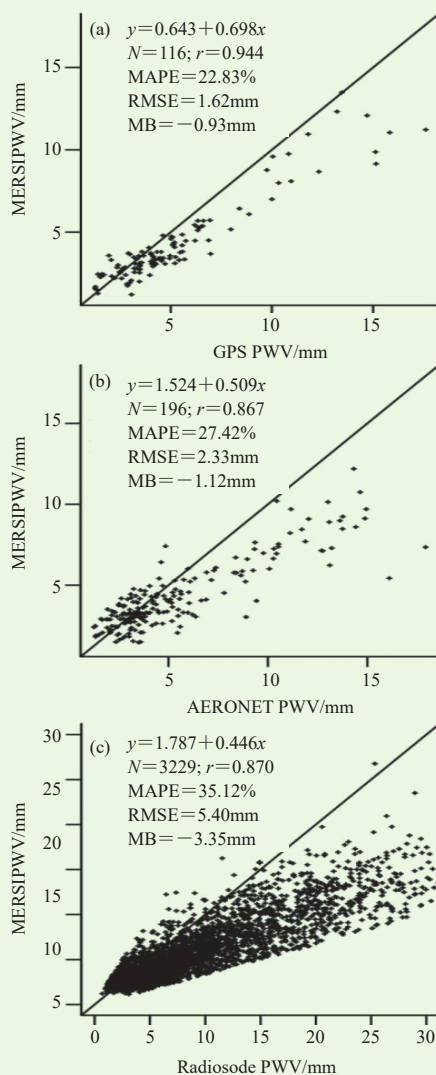


图7 MERSI水汽与GPS水汽 (a)、太阳光度计水汽 (b)、探空水汽 (c) 的散点图

Fig. 7 Scatter diagrams of MERSI water vapor and GPS water vapor (a), solar photometer water vapor (b), and sounding water vapor (c)

两者的同步性较好，相对误差相对较小。从MAPE值来看，MERSI水汽与地基GPS和AERONET水汽的相对精度，与同类卫星MODIS近红外通道反演水汽产品的绝对精度±13%相似。图7c是MERSI水汽与Radiosonde水汽的散点图，由于MERSI与Radiosonde观测水汽的时间不同步，两者至少相差2.5 h以上，对于晴朗的天气，对流层的水汽受太阳照射后，水汽量变化较大，因此MERSI相对于探空水汽的MAPE、RMSE和MB分别为35.12%、5.40 mm和-3.35 mm，两者的相对误差在3个参考数据中最高。总体而言，MERSI数据反演的水汽产品精度较好。

2.2.2 微波辐射计数据反演方法研究

地基微波辐射计是一种通过接收大气辐射信号来

遥感大气的被动遥感设备，能够通过反演算法获取高时间分辨率的大气温度、相对湿度和水汽密度廓线，具有全天候自动观测的能力。研究地基微波辐射计反演算法，对提高其反演精度具有极其重要的意义，故项目对微波辐射计数据的反演方法进行了研究^[17-18]。

径向基神经网络是Moody和Darken^[19]在1998年提出的，基本思想是利用径向基函数（Radial Basis Function, RBF）作为隐层神经元的基，构成隐含层空间，隐含层对输入矢量进行变换，将低维的模式输入数据带入高维空间，训练过程主要为径向基中心的确定和隐含层到输入层之间权重系数的计算，训练较为便捷，得到广泛应用，为了解RBF神经网络在反演微波辐射计资料方面的应用效果，研究^[17]利用地基微波辐射计亮温资料和同期探空资料，建立了应用于地基微波辐射计温度、相对湿度和水汽密度反演的径向基神经网络，并将反演结果与地基微波辐射计自带反演产品进行了对比，探究了径向基神经网络在地基微波辐射计气象要素反演算法本地化的应用效果。结果表明：径向基神经网络反演的温度、相对湿度和水汽密度的均方根误差最大值分别为2.72 K、22.32%和 $0.73 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，在所有高度层上径向基神经网络的反演结果均优于微波辐射计，反演产品对2~10 km、1~7 km、0~3 km的大气温度、相对湿度和水汽密度廓线的反演均有明显改善，径向基神经网络能够应用于地基微波辐射计气象要素的反演算法的本地化。

为提高地基微波辐射计反演大气温/湿度廓线的精度，研究^[18]提出了一种直接利用高垂直分辨率探空资料与地基微波辐射计观测亮温训练反演温、湿度廓线BP神经网络方案。基于地基微波辐射计的观测特点，提出了一种基于微波辐射计地面观测资料和探空资料的观测亮温综合质量控制方案，利用质量控制后的观测亮温训练BP神经网络（OBS-BP），并与基于MonoRTM辐射传输模式模拟亮温训练BP神经网络（SIM-BP）的方法进行了对比。结果表明，OBS-BP反演温度廓线的均方根误差随高度逐渐增大，范围为0.62~2.81 K，偏差范围为-0.67~0.43 K，相关系数随高度的升高逐渐减小，变化范围为0.92~0.99；相对湿度廓线的均方根误差在0~4.75 km随高度升高而增，在4.75 km以上随高度升高而减小，范围为8.21%~24.37%，偏差范围为-3.87%~4.54%，相关系数随高度升高逐渐减小，变化范围为0.13~0.94。将OBS-BP和SIM-BP反演高时间频次的温/湿度廓线的效果进行了对比，得出OBS-BP的反演结果能更好地反映对流层内大气温、湿度演变过程，相对于利用

SIM-BP的反演结果，OBS-BP反演温/湿度廓线在各个高度层上均优于SIM-BP，与探空资料具有更好的一致性，更适用于实际观测中地基微波辐射计温、湿度廓线的反演。

2.2.3 人影探空火箭数据的精确度验证

随着人影探测火箭系统在人影作业中的广泛使用，人影探测火箭采集的数据可靠性及误差将会是实际业务中关注的问题。利用TK-2GPS人影探空火箭和L波段探空资料，采用平均偏差、均方根误差和相关系数等分析方法，对两种探空数据温度、相对湿度、风向及风速等要素的差异性和变化特征进行了对比分析，并对可能造成差异的原因进行了探讨。两种探空数据的对比分析结果表明：TK-2GPS探空火箭与L波段探空同要素相互间均呈显著的正相关，并通过了0.05显著性水平的检验；温度、风速和相对湿度相关性较好，分别达到了1.0、0.91和0.67；风向相关性略差，相关系数为0.18。温度、风速平均偏差和离散度较小，探测效果最好；相对湿度的平均偏差虽大，但相关性较好；风向的离散度最大，相关性相对较差。从同要素不同高度的分析来看，温度和风速在各高度层相关性较好，差异性较小，TK-2GPS人影探测火箭温度数值较探空气球偏小，风速较探空气球偏大；风向在各高度层的离散度较大，相关性也较差；相对湿度在不同的高度层均呈正相关，平均偏差相对较大。从各要素的垂直廓线对比分析来看，温度和风速廓线的变化趋势一致性很高，且两种数据差异较小，对大气温度和风速的测量均比较准确。相对湿度廓线的变化趋势存在一定差异，TK-2GPS人影探测火箭数据偏小，相对湿度最大相差达45%左右。风向廓线一致性在700 hPa以上较高，数据差异较小，在700 hPa以下一致性较低，数据差异较大。

两种不同的探测仪器间势必会存在一定差异，究其原因，主要有：一是探测原理的不同。L波段探空雷达随气球的上升开始探测，是自下而上的探测；而TK-2GPS人影探测火箭正好相反，当火箭上升到最大高度后开始下落时探测，是从上而下的探测。二是探测时间的差异。两种探测方式最接近的个例在时间也相差在15 min左右，大部分个例相差近2 h以上，大气的温、湿各要素随时间变化明显，不同的时间气象要素必然存在差异。三是探测距离造成的差异。两种仪器虽布设在同一区域，但直线距离达30 km，探测距离上的差异也会产生一定的数据差异。四是仪器自身造成的差异。TK-2GPS人影探测火箭和探空气球所携带的是不同厂家型号的温、湿传感器，不同厂家的仪

器之间，在探测精度方面也会存在一定差异。

2.3 云结构和水汽场分析

2.3.1 祁连山北坡云垂直结构特征分析

利用敦煌、酒泉、张掖、民勤探空站2014—2019年的探空数据，对祁连山北坡云的发生频率及云垂直结构特征进行了分析（图8）。结果表明，就祁连山北坡全不同层数年云的发生频率而言，云的发生频率较低，仅为20%~40%；单层云的发生频率高于多层云，且多层云以2层云和3层云为主。在全年平均云层厚度上，祁连山北坡2层云的下层云厚度为1.4~1.8 km，上层云厚度为0.9~1.0 km，下层云厚度明显大于上层云；3层云中顶层云的厚度最大，为

0.9~1.0 km，且底层云与中层云之间的晴空夹层厚度大于中层云与顶层云之间的晴空厚度。在季节变化上，祁连山北坡所有云的发生频率呈现夏高冬低的规律，单层、2层和3层云在夏季出现频率皆大于其他季节；夏季单层云和2层云出现的频率较为接近，春秋冬三季单层云出现频率远高于2层云和3层云。祁连山北坡云层高度也有显著的季节变化，各层数云的云底高度、云顶高度都表现为夏高冬低。单层云的云层厚度在春季最厚为1.3 km、夏季最薄为0.9 km；双层云上下云层之间的晴空夹层厚度冬季最大，为0.7 km；3层云的中层与下层云之间晴空厚度大于中层与上层云之间的晴空厚度。

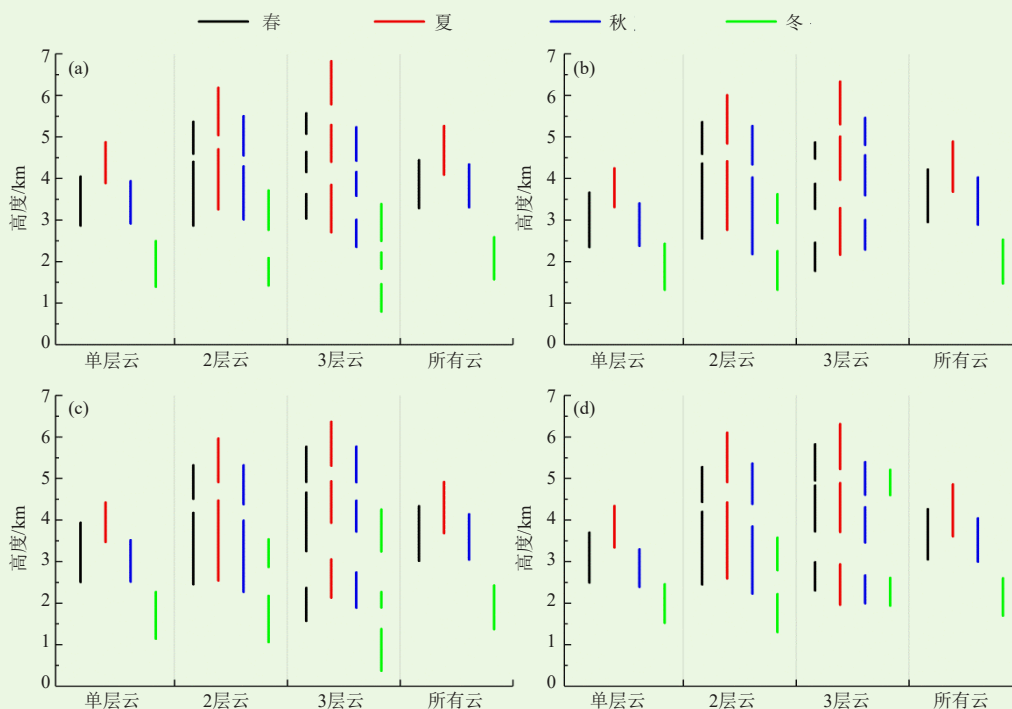


图8 祁连山北坡云高度的季节变化

(a)敦煌, (b)酒泉, (c)张掖, (d)民勤

Fig. 8 Seasonal variation of cloud height on the north slope of Qilian Mountains

(a) Dunhuang, (b) Jiuquan, (c) Zhangye, (d) Minqin

2.3.2 微波辐射计反演水汽

目前应用于水汽和液态水观测的遥感设备包括地基微波辐射计、地基GPS遥感、卫星红外遥感等，其中地基微波辐射计受云、雾的影响较小，穿透能力强，垂直分辨率高，可通过观测所得的亮温反演得到大气温度、相对湿度、水汽密度廓线和云液态水总量，被广泛应用于强对流天气和降水预报、天气过程分析和人工影响天气等多个领域，尤其在水汽和液态水变化特征研究中的应用更为广泛。

使用张掖观象台WVP 3000微波辐射计2017年全

年的水汽、液态水观测资料，对张掖地区水汽和液态水含量的变化特征进行了初步研究（图9），分析表明：张掖地区大气水汽和液态水含量的最大值分别出现于8月和4月，分别为2.34 cm和0.84 mm。全年大气水汽含量的日变化特征水汽日变化呈现出双峰分布，峰值分别位于03时和17时，峰值水汽含量分别为1.081 cm和1.127 cm，水汽含量的日变化与温度日变化趋势具有较好的一致性，降水量高值时段滞后于水汽含量高值时段约3个小时；张掖地区四季水汽变化具有明显的差异，季节平均值夏季>春季>秋季>冬

季,水汽含量的高值区均出现在正午到傍晚时段,夜间均存在水汽含量逐渐下降的趋势,春、夏、秋三季日出前后水汽含量下降趋势尤为明显,日间水汽含量变化较之夜间更为剧烈;晴空条件下,张掖市观象台水汽来源以太阳加热地表导致的局地蒸发为主。四季水汽日变化差异明显,季节平均值夏季>春季>秋季

>冬季,高值区均出现在正午到傍晚时段;晴空条件下,张掖市观象台水汽来源以太阳加热地表导致的局地蒸发为主;春、夏、秋三季的液态水日变化具有较大差异,春季波动变化明显存在5个峰值、夏季呈现出单峰变化、秋季为双峰变化,春、夏、秋三季的液态水变化与水汽变化没有明显相关性。

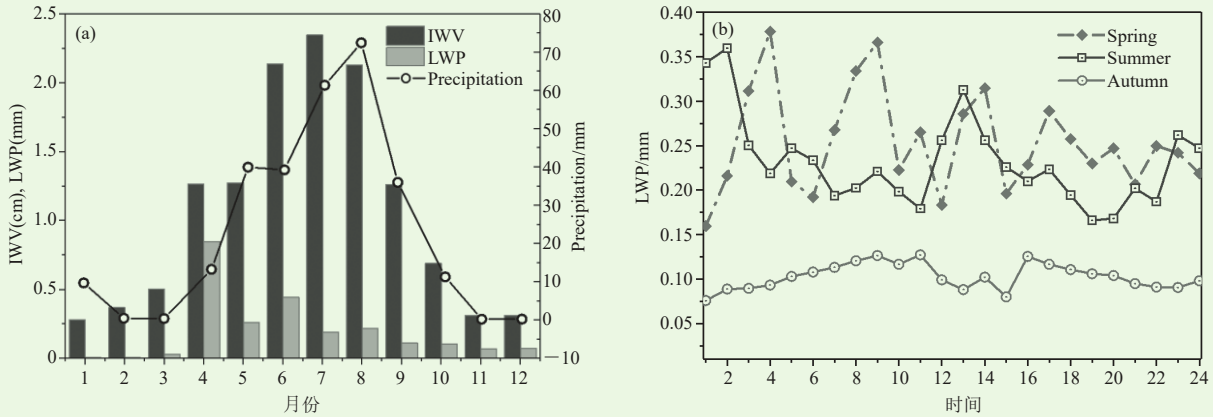


图9 (a) 张掖地区大气月平均大气水汽、液态水含量和月总降水量变化特征; (b) 春、夏、秋季张掖地区云液态水含量平均日变化
Fig. 9 (a) Variation characteristics of atmospheric average monthly water vapor, liquid water content and total monthly precipitation in Zhangye Area. (b) The average daily variation of liquid water content in Zhangye Area in spring, summer and autumn

2.3.3 空中水汽的时空分布特征及水汽的收支

使用欧洲中心ERA-5数据集的比湿、气压、气压层上的风速资料,对1996—2016年祁连山地区的空中水汽分布特征及水汽的收支进行了研究。

计算多年平均各月大气含水量(图10)分布发现,大气含水量夏季>秋季>春季>冬季,其中7月大气含水可达到95.6 mm,8月次之,最高为91.1 mm,6月最高大气含水量为67.8 mm;冬季大气含水量最低,其中1月最低仅为14 mm,2月次之,最高为16.1 mm,12月大气含水量最高为16.2 mm。大气

含水量高值主要集中在6、7、8月,且各月大气含水量的总体变化趋势呈现一致状态,即有水汽输送多的季节大气含水量普遍增多,而水汽输送少的季节大气含水量则变少,说明祁连山地区的水汽来源主要靠大尺度天气系统的输送。

研究区各个季节的大气含水量(图11)的空间分布非常相似,水汽高值区位于研究区东北角、西南角和西边,其中夏季较多,冬季较少,大气含水量低值区位于祁连山中部,因为祁连山地区海拔高,山脉阻挡,水汽很难到达,故而水汽含量偏少。结合季节降水分布图来看,发现研究区的大气含水量和降水量的多少在季节上是一一对应的,即两者随时间变化同增同减,而在空间上两者的差异是明显的,大气含水量高值区与降水区并不是一一对应,这也说明了降水的条件并不单靠水汽,降水较多处除了要有水汽来源外,还需要有上升气流、凝结核的作用,这也是进行人工增雨时需要关注的部分。

水汽收支可以反映流经某一地区的水汽净收支情况。在计算中,经向水汽收支用西边界水汽收支减去东边界水汽收支,数值为正表示在研究区内东、西方向上总体呈现水汽输入大于输出,即研究区水汽增多,数值为负则相反;纬向水汽收支用北边界减去南边界水汽收支,为正表示在研究区南、北方向上总体呈现水汽输入大于输出,即研究区水汽增加,为负

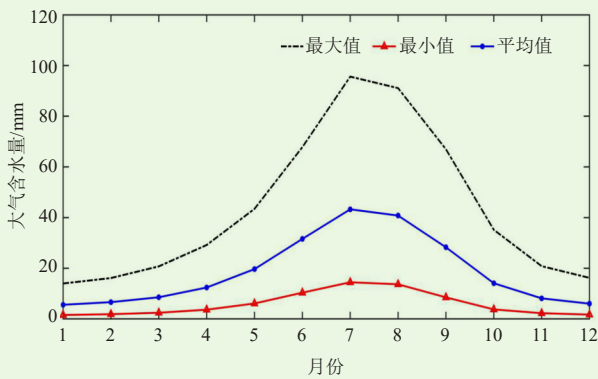


图10 1996—2016年多年平均月大气含水量变化折线图 (单位: mm)

Fig. 10 Broken line diagram of changes in average monthly atmospheric water content over the years from 1996 to 2016 (unit: mm)

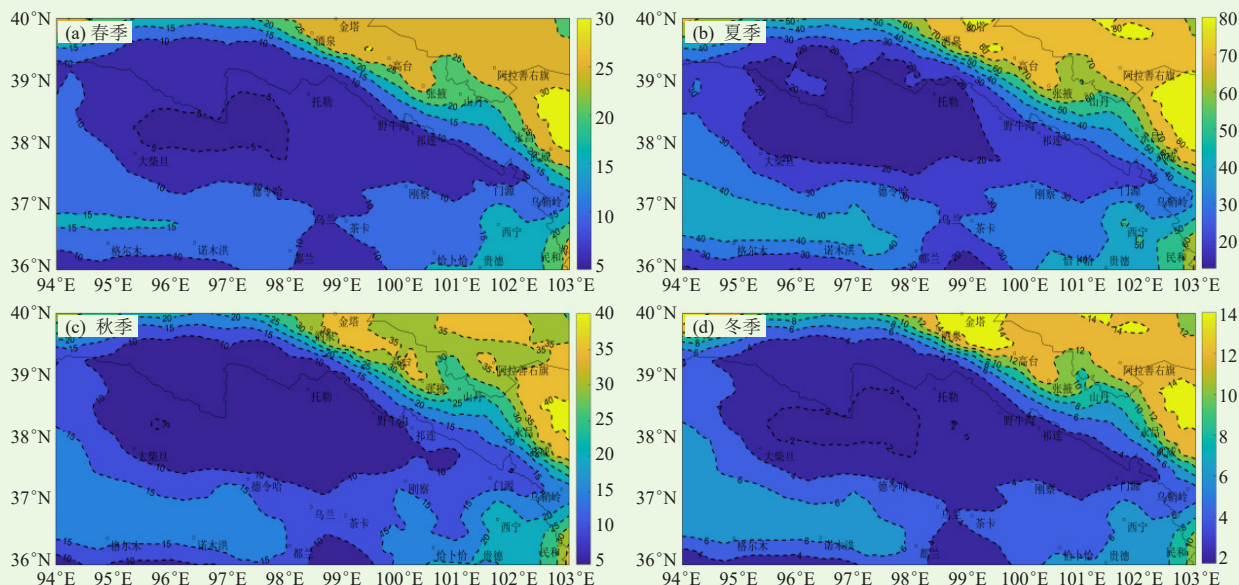


图11 1996—2016年各季节多年平均大气含水量空间分布图(单位: mm)

Fig. 11 Spatial distribution diagram of multi-year average atmospheric water content in each season from 1996 to 2016 (unit: mm)

则相反;总水汽收支等于经向水汽收支和纬向水汽收支的和,为正表示水汽增加,为负表示水汽减少。由表2可见,祁连山地区各月净水汽收支基本为负,其中夏季的净水汽收支数值的绝对值比较小。结合图12和表2可知,从研究区的各季节水汽总收支看,夏季水汽为净输入,输入值为 $4.2 \times 100 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,说明夏季祁连山地区空中有水汽堆积,只需合理开发,有利于人工降水,其余季节水汽收支均为水汽输出,秋季输出值最大为 $3.9 \times 100 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,其次为春季,输出水汽 $2.6 \times 100 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,冬季最小,为 $-1.2 \times 100 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。从各边界的水汽收支情况看,夏秋两季的水汽输送量

表 2 1996—2016 年月整层水汽通量在各边界的水汽收支情况表(单位: 10^7 吨)

Table 2 Water vapor balance of the entire layer at all boundaries from 1996 to 2016 (unit: 10^7 t)

	经向收支	纬向收支	净收支
1月	-5.8	5.3	-0.5
2月	-5.9	4.9	-1.0
3月	-8.7	4.8	-3.9
4月	-10.6	4.2	-6.4
5月	-11.7	4.0	-7.6
6月	-7.2	3.4	-3.8
7月	-1.9	3.9	2.1
8月	-5.5	4.0	-1.5
9月	-12.5	4.6	-7.9
10月	-13.3	5.3	-8.0
11月	-8.1	4.9	-3.3
12月	-6.3	5.1	-1.2
总计	-97.4	54.3	-43.1

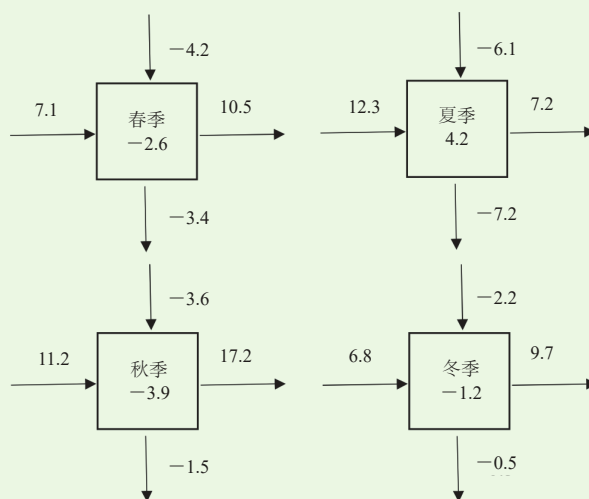


图12 2006—2015年季节整层水汽通量在各边界的水汽收支情况表(单位: $100 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)

(其中正负仅代表方向,箭头也指示水汽流动方向)

Fig. 12 Water vapor budget and expenditure of the whole layer of water vapor flux at various boundaries in the season from 2006 to 2015 (unit: $100 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)

(The positive and negative represent the direction, and the arrow indicates the direction of water vapor flow)

大,春冬的边界水汽输送量小,同时我们可以看出,在研究区内,水汽输送以经向输送为主,即西边界为主要水汽输入方向,这也符合之前学者得到的结论,西北地区高原切变线以北的水汽输送以西风带为主。

2.4 气候变化及其径流响应研究

近年来随着祁连山山区及黑河流域内社会经济

发展和人口增加,使得内陆河流域气候—水资源—生态体系的有机性和自组织优势受到破坏,水资源短缺和生态环境问题日益突出。因此,在全球气候变暖背景下,研究祁连山高山寒区气候变化特征以及对径流的影响,为流域内水资源的可持续利用发展提供参考依据具有现实意义。研究^[20]利用1960—2017年水文、气象资料,采用相关分析、Mann-Kendall和小波分析等方法,研究了祁连山中部气候和径流量变化特征。结果表明,近60年祁连山中部气温呈明显升高的趋势,年平均、最高和最低气温的升温幅度分别为0.39 °C/10 a、0.32 °C/10 a和0.46 °C/10 a,气温上升的速率高于西北其他地区,最低气温的升幅最大;四季的气温均呈升高趋势,冬季升温最为明显。就空间变化而言,祁连山中部降水呈明显增加趋势,降水增加了约19.2%,增加的幅度高于西北地区。就季节变化而言,夏季降水的增加速率高于其他季节,降水的增加主要是因为夏季降水的增多。祁连山中部气候暖湿化趋势较西北区域其他地方更为突出,四季暖湿化中冬季变暖、夏季趋湿特征明显。周期变化分析结果表明,年平均温度和降水分别存有8 a和30 a的主周期,径流量由30 a的主周期和8 a的次周期;在径流量周期响应中,短周期(8 a)与平均气温振荡非常一致,长周期(30 a)与年平均降水变化较为一致。气温和降水的突变结果显示,祁连山中部降水的突变时间不明显,年平均、最低和最高气温的突变时间分别为1993、1991和1994年,气温突变时间领先于中国西北其他地区。降水和气温都是影响径流的因素,受降水增加和温度升高影响,黑河上游径流量增加趋势明显。通过相关分析建立的模型能很好的分析径流量影响因子,并能应用于径流量预测。模型结果进一步证实,降水的增多和气温的升高使得年径流量增加了 $5.33 \times 10^8 \text{ m}^3$,降水和气温分别使径流量增加了21.1%和10.9%,并且降水对径流的影响更大;在气温突变之后,降水和气温对径流量的影响都明显增大。

2.5 人工增雨效果检验评估

为改善甘肃河西走廊石羊河流域生态环境,2010年开始气象部门在该流域的人工增雨作业点从22个增加到71个,并大幅度增加了作业量。因此,一个普遍关心的问题是,人工增雨作业规模大幅度增加后的效果如何?为回答这个问题,以作业规模增加后近10年(2010—2019年)石羊河流域的降水量资料,采用作业区和对比区的区域历史回归统计方法,对石羊河流域2010—2019年期间的人工增雨效果进行了统计检验,并分析了径流量和植被状况变化情况。统计结果

表明,2010年以来,4—10月人工增雨绝对增雨量为33.7 mm,平均相对增雨率为17.5%,4月、9—10月结果通过了0.05的显著性水平检验,5—8月结果通过了0.1的显著性水平检验。就不同季节而言,春季(4—5月)和秋季(9—10月)人工增雨效果要好于夏季,相对增雨率达到了13.3%以上。石羊河流域作业区内径流量增加趋势明显,人工增雨作业期间径流量增加了3.7%,径流量增加速率为 $0.067 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,而对比区径流量则呈下降趋势。人工增雨有效增加了石羊河流域降水,增加了生态需水量,对石羊河流域生态治理恢复起到了积极的作用。石羊河流域年平均归一化植被指数(NDVI)在0.15~0.18,2010年以后平均植被指数和平均植被覆盖百分比增加趋势较为明显,平均植被覆盖百分比达到了46%以上并保持稳定,植被恢复效果显著。生态效应的证据表明,近10年在自然降水和人工增雨作业的共同影响下,植被指数0.3以下面积明显减少,0.3以上面积明显增加;植被改善的面积占总流域面积的20.1%,石羊河流域上游的东南部是植被改善最好的区域。石羊河流域开展人工增雨效果比较显著,研究结果初步表明,人工增雨可成为河流域生态恢复治理的有效补充措施。

2.6 数值模拟

选取2018年发生在祁连山区的两次典型的降水个例,8月28日为一次典型的地形云降水,随后8月30—31日在山区发生了范围更广,降水量更大的过程,利用WRF中尺度数值模拟,对夏季祁连山区地形云降水和过程降水中云和降水的宏观结构特征进行对比分析,研究探索祁连山地形云和降水的发生发展机制。模拟方案采用三重嵌套网格,母域和子域中心均定位于张掖雷达站(100.25°E, 39.09°N),粗、细网格的格距分别为27、9和3 km,格点数分别为121×91、121×91、151×151。垂直高度分30层,格距为500 m。粗网格读入的初边界资料是NCEP的分辨率为1°×1°的全球6 h间隔的再分析资料,粗网格模拟生成的逐1 h预报结果插值到细网格上,为细网格模拟提供初始条件和边界条件。模拟过程中选用的主要物理参数化方案包括WSM3类冰雹方案、YSU边界层方案、Noah陆面参数化方案等。

模式的综合模拟能力直接表现在对降水场模拟效果的好坏。总体来看,WRF模式对以上两个个例降水区域以及中心强度的模拟同实况较接近(图13),模拟结果比较合理地抓住降水生命期和降水总体分布随时间演变的趋势,说明模式对个例的模拟是成功的。

图14为两个降水过程发生时前后的天气环流形

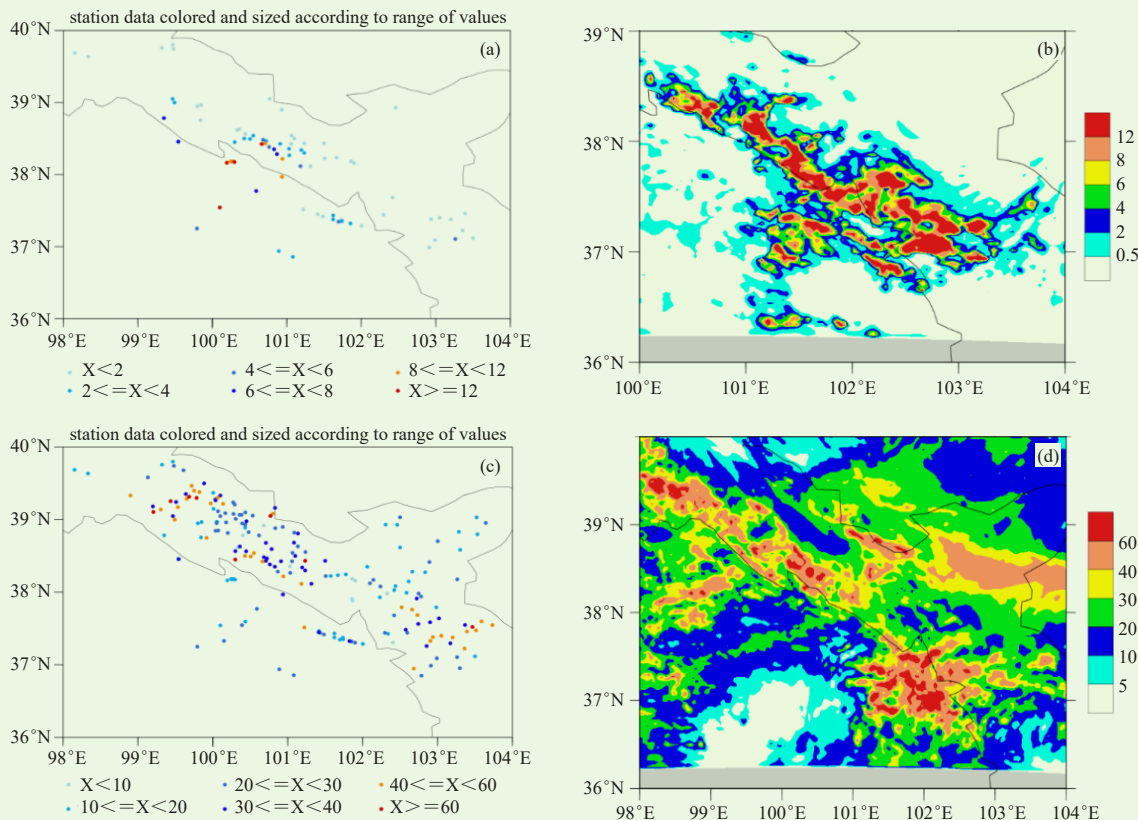


图13 2018年8月28日08时—29日08时的总降水量实况 (a) 和模拟 (b)；2018年8月30日08时—9月1日08时的总降水量实况 (c) 和模拟 (d) (单位: mm)

Fig. 13 Reality (a) and simulation (b) of total precipitation at 8:00 am, 28 to 8:00 am, 29 in August 2018; Reality (c) and simulation (d) of total precipitation at 08:00 BT 30 August to 08:00 BT 1 September in 2018 (unit: mm)

势以及高低空配置。200 hPa层面上，两次过程都是由于高空急流和南亚高压的加强造成的，31日巴尔喀什湖北部低槽快速发展导致槽前西北气流增强；30日500 hPa副热带高压西进北抬，西南风为山区为降水提供水汽；30日700 hPa层面上有较强的低空急流，降水区域在低空急流的左侧，低空切变的右侧同时东南风向山区输送水汽，为降水创造了有利的条件。

从TBB云图上可看出过程降水发生时对流强，云顶亮温低，而地形云降水范围小，降水少，云顶亮温主要分布在 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，主要由中低云组成。对比分析云系构演变特征（图15），28日8时低涡前缘云系首先接近祁连山西北部，受地形的强迫抬升作用，开始影响祁连山区中西部，沿着祁连山脉形成一条西北—东南走向的云带。28日16时（图15b）祁连山西北段的云系开始快速发展，云顶亮温降低。随后对流云团沿着祁连山脉向东南部移动，截止29日云团到达祁连山东段，在背风坡下沉气流的作用下减弱。过程降水的云系的云顶亮温高，30—31日降水由两个不同云团引起，30日在山区中段的西侧有对流云团快速发展并向东移从而影响山区东段，随后继续向东移动，

缓慢减弱消散。31日的降水则是由两个云团不断伸展合并，从而影响祁连山区，该云系范围远远大于地形云降水的云系。

沿着门源（ 101.61°E ， 37.38°N ）至皇城水关（ 102.56°E ， 37.88°N ）截取剖面，对比分析不同个例降水最强时刻的雨水含量剖面图（图16），典型地形云降水比大范围过程降水的雨水含量小。地形云降水最大区域有强上升运动，与其他区域相比，海拔高的区域雨水含量较大，由此可见地形抬升局地性强，地形抬升作用对降水影响很大；过程降水一般都包含着地形云降水，但雨水含量与海拔高度相关性小，这一点与地形云降水明显不同。

与雨水含量剖面相比，云水含量大值区高度低于雨水含量大值区（图17）。在地形云降水过程中，强垂直上升区域的底层云水含量大，与地形抬升作用相关；过程降水发生时，云水含量大小与地形云降水差别不大，但大值区与海拔高度依旧相关性小。

3 结论

通过“西北区域人工影响天气工程祁连山地形云人工增雨（雪）技术研究试验”的开展，在祁连山试

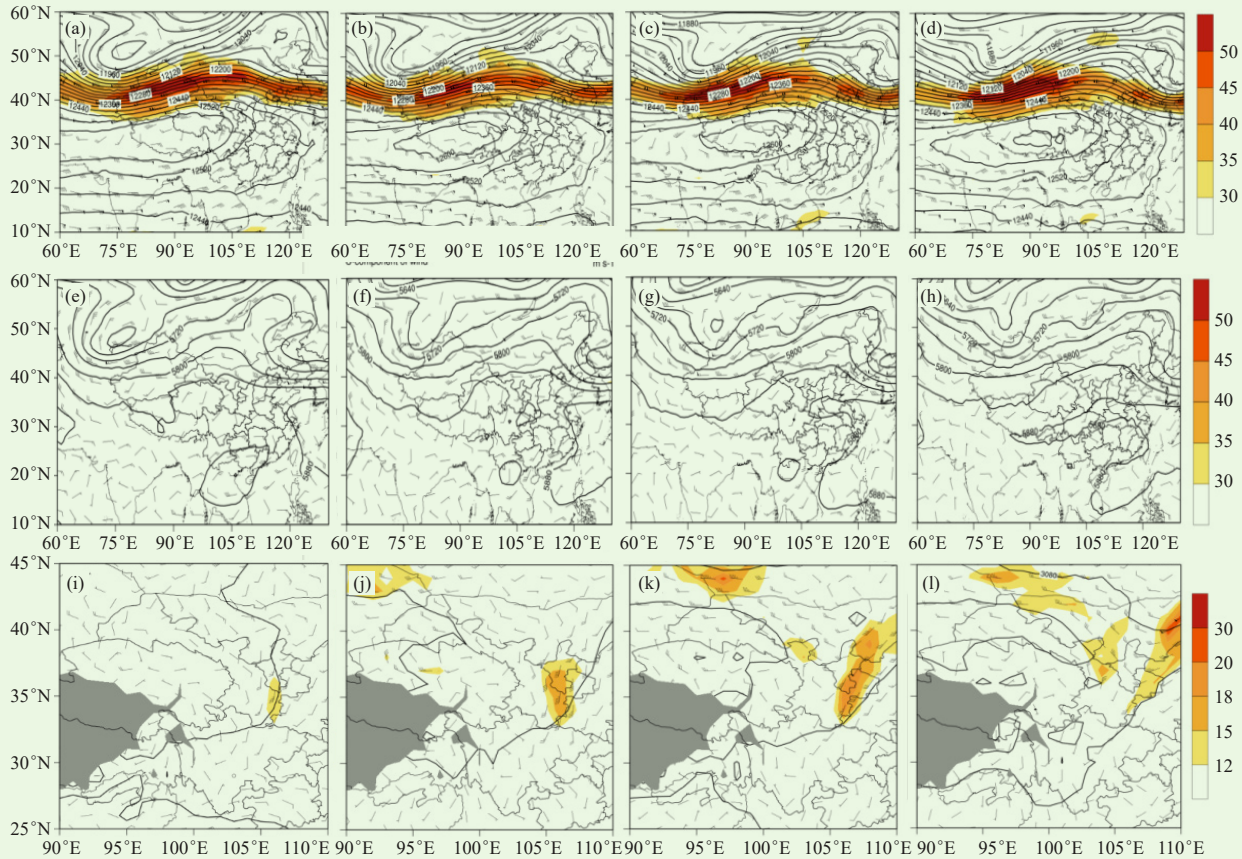


图14 2018年8月30日08时 (a)、14时 (b) 及31日00时 (c)、08时 (d) 200 hPa高度和风速图; 2018年8月30日14时 (e), 31日02时 (f)、08时 (g)、14时 (h) 500 hPa天气图; 2018年8月31日20时 (i), 9月1日02时 (j)、08时 (k)、14时 (l) 700 hPa天气图
Fig. 14 Height and wind speed of 200 hPa at 08 BT (a), 14 BT (b), 00 BT (c), 08 BT (d) on 30 August 2018; Weather charts for 14 BT on 30 August 2018 (e), 02 BT on 31 August 2018 (f), 08 BT on 31 August 2018 (g) and 14 BT on 31 August 2018 (h) on 500 hPa; Weather charts for 20 BT on 31 August 2018 (i), 02 BT on 1 September 2018 (j), 08 BT on 1 September 2018 (k) and 14 BT on 1 September 2018 (l) on 700 hPa

验区进行了作业天气背景条件分析、综合观测对比试验、增雨作业技术验证试验以及观测资料融合应用等研究试验工作。

1) 收集了各要素探测数据及作业相关信息, 为开展各种作业方法的效果检验和评估提供了数据支撑。通过开展祁连山试验区降水量场观测试验, 对复杂地形条件下降水的特征进行了观测, 通过观测试验得到祁连山地形条件下降水量场的观测方法, 初步形成了降水量场观测数据集。

2) 利用试验区探空、再分析等多年历史观测资料, 分析了祁连山地区降水量和天气形势的特征, 揭示了祁连山区降水量场和气流场的特征。祁连山地区平均年降水量为232.4 mm, 降水量最大值出现在祁连山中部的高海拔地区, 年降水量值最大超过550 mm; 根据祁连山区气流的来向把流场分为五种类型: 西南及偏西气流型, 辐合辐散气流型, 东北及偏东气流型, 西北及偏北气流型, 偏南气流型。

3) 利用试验区的特种观测资料和常规观测资料对仪器以及卫星数据的精确性进行了研究。分别采用地基GPS水汽、AERONET水汽和探空水汽数据对FY-3A/MERSI水汽产品进行了精度验证; 探究了径向基神经网络和BP神经网络在地基微波辐射计气象要素反演算法本地化的应用效果, 并提出基于微波辐射计地面观测资料和探空资料的观测亮温综合质量控制方案; 对TK-2GPS人影探测火箭和L波段探空数据温度、相对湿度、风等要素的差异性和变化特征进行了对比分析, 并对可能造成差异的原因进行了探讨。

4) 对祁连山地区云、水资源的变化特征进行了研究。利用探空站历史数据探讨了云垂直结构的反演方法, 并对祁连山地区云的发生频率及云垂直结构特征进行了分析, 发现祁连山北坡云的发生频率较低, 仅为20%~40%。利用微波辐射计的水汽、液态水观测资料, 对张掖地区水汽和液态水含量的变化特征进行了初步研究, 发现张掖地区大气水汽和液态水含

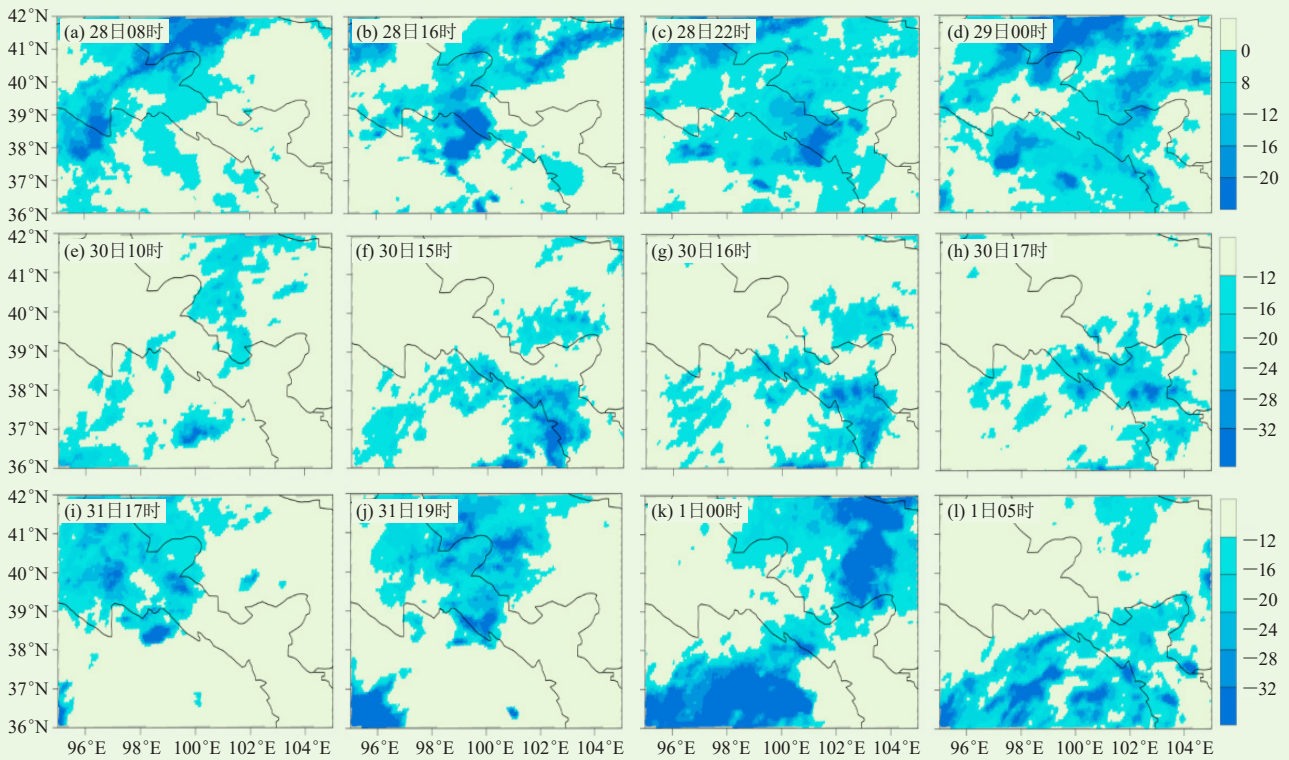


图15 2018年8月28日08时—9月1日05时(a-l) FY-2E TBB云图

Fig. 15 Fy-2E TBB cloud chart from 08 BT 28 August 2018 to 05 BT 1 September 2018 (a-l)

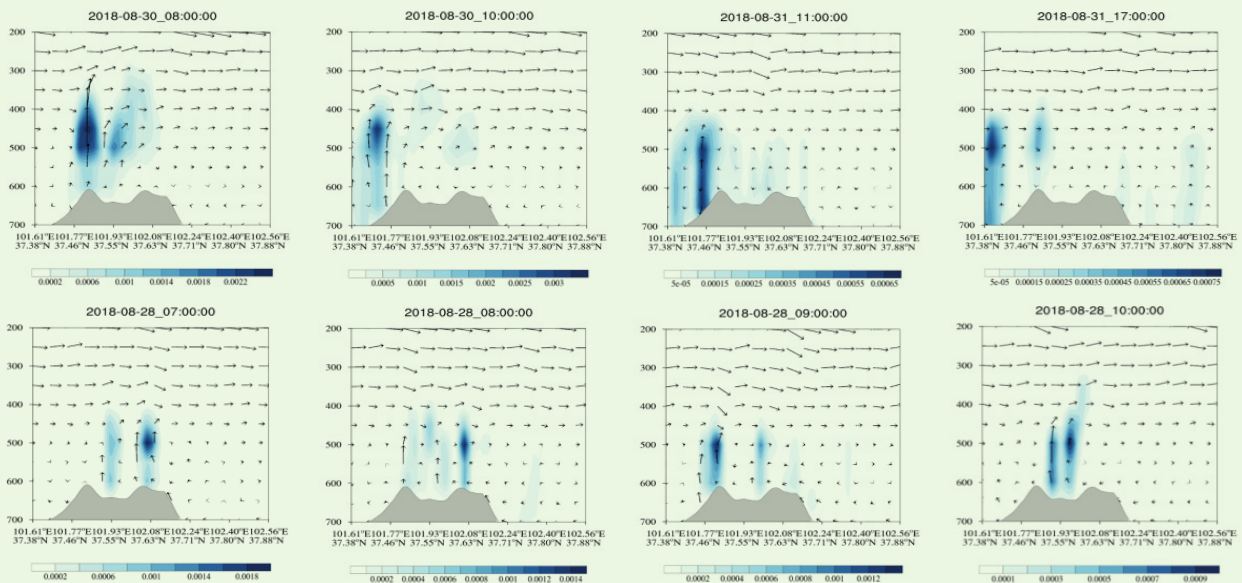


图16 2018年8月28—31日不同时刻雨水混合比剖面图(单位: kg/kg), 矢量箭头为风场(W×20), 灰色阴影为地形

Fig. 16 Profile of rainwater mixing ratio from 28 to 31 August 2018 (unit: kg/kg), vector arrows are wind field (W×20), gray shadows are terrain

量的最大值分别出现于8月和4月, 分别为2.34 cm和0.84 mm, 全年大气水汽含量的日变化特征水汽日变化呈现双峰分布, 峰值分别位于03时和17时。利用水文、气象资料, 研究了祁连山中部气候和径流量变化特征, 发现降水和气温分别使径流量增加了21.1%和

10.9%, 并且降水对径流的影响更大。

5) 对石羊河流域2010—2019年期间的人工增雨效果进行了统计检验, 结果表明, 2010年以来, 4—10月人工增雨绝对增雨量为33.7 mm, 平均相对增雨率为17.5%。且石羊河流域作业区内径流量增加趋

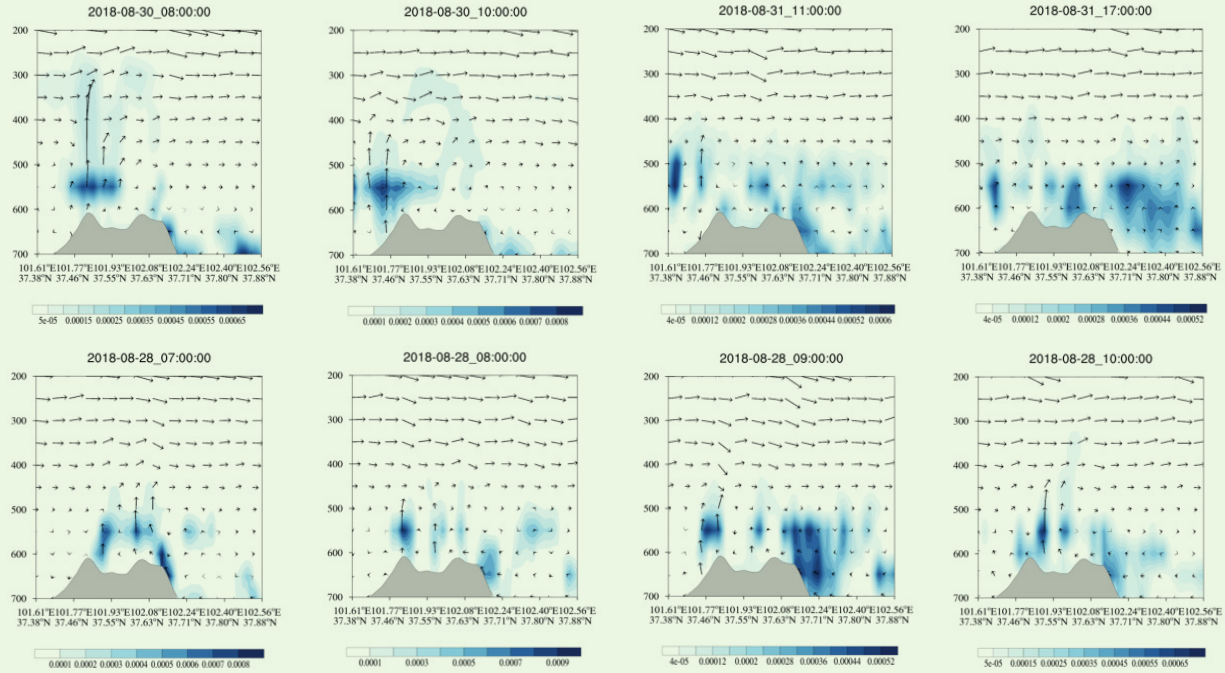


图17 2018年8月28—31日不同时刻云水混合比剖面(单位: kg/kg), 矢量箭头为风场 ($W \times 20$), 灰色阴影为地形
Fig. 17 Cloud water mixing ratio section from 28 to 31 August 2018 (unit: kg/kg), vector arrow is wind field ($W \times 20$), gray shadow is terrain

势明显, 人工增雨作业期间径流量增加了3.7%, 平均植被指数和平均植被覆盖百分比增加趋势较为明显, 平均植被覆盖百分比达到了46%以上并保持稳定, 植被恢复效果显著。

6) 利用WRF中尺度数值模拟, 对夏季祁连山区地形云降水和过程降水中云和降水的宏观结构特征进行对比分析, 发现地形抬升局地性强, 地形抬升作用对降水影响很大, 过程降水一般都包含着地形云降水。

参考文献

[1] 陈志昆, 张书余, 雒佳丽, 等. 祁连山区降水气候特征分析. 干旱区研究, 2012, 29(5): 847-853.
[2] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山及河西走廊气候变化的时空分布特征. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1151-1155.
[3] 刘雪梅, 张明军, 王圣杰, 等. 2008—2014年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素. 地理学报, 2016, 71(5): 754-767.
[4] 黄颖, 毛文茜, 王潇雅, 等. 近39 a祁连山及其周边地区降水量时空分布特征. 干旱气象, 2020(4): 527-534.
[5] 宋松涛, 张武, 陈艳, 等. 中国西北地区近20年云水路经时空分布特征. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 787-793.
[6] 张强, 孙昭萱, 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): 381-390.
[7] 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): 1-112.
[8] 朱斌, 张强, 卢国阳, 等. 祁连山区空中水汽分布特征及变化趋势分析. 高原气象, 2019, 38(5): 935-943.
[9] 张良, 张强, 冯建英, 等. 祁连山地区大气水循环研究(I): 空中水汽输送年际变化分析. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1079-1091.
[10] 王宝鉴, 黄玉霞, 王劲松, 等. 祁连山云和空中水汽资源的季节分布与演变. 地球科学进展, 2006, 21(9): 948-955.
[11] 张良, 张强, 冯建英, 等. 祁连山地区大气水循环研究(I): 空中水汽输送年际变化分析. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1079-1091.
[12] 郭良才, 白虎志, 岳虎, 等. 祁连山区空中水汽资源的分布特征及其开发潜力. 资源科学, 2007(2): 68-73.
[13] 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(1): 154-165.
[14] 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.
[15] 李林, 李卫林, 王振宇, 等. 青藏高原微地形对极值风速的影响及其参数化模拟方法研究. 冰川冻土, 2009, 31(6): 1161-1165.
[16] 把黎. 祁连山地区大气背景场及地形云降水过程的特征分析. 兰州: 兰州大学, 2020.
[17] 樊旭, 黄颖, 冷文楠, 等. 基于径向基神经网络的地基微波辐射计反演算法研究. 气象与环境学报, 2020, 36(2): 62-69.
[18] 樊旭, 吴肖燕, 曲宗希, 等. 地基微波辐射计反演温/湿度廓线的BP神经网络训练方案对比. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 587-596.
[19] Moody J, Darken C. Fast learning in networks of locally-tuned processing units. Neural Computation, 1989, 1(2): 281-294.
[20] 程鹏, 孔祥伟, 罗汉, 等. 近60 a以来祁连山中上部气候变化及其径流响应研究. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1192-1201.