

西北人影作业天气背景条件初步分析

张存杰^{1,2} 张思齐^{1,2} 周江兴^{1,2} 聂肃平^{1,2} 吴萍^{1,2} 向阳^{1,2} 李想^{1,2} 汪方^{1,2}

(1 中国气象局气候研究开放实验室, 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)

摘要: 利用高分辨率的气象台站观测资料、再分析资料、卫星遥感资料等, 结合高分辨率区域气候模式模拟, 对西北地区以及祁连山、天山、六盘山和三江源等试验区的降水场、气流场、水汽场等时空特征开展了研究。结果表明: 精细化的降水资料能够刻画出西北试验区复杂地形条件下的降水场时空特征, 研发的小时降水融合算法对西北地区高频降水分析是有效的; 涝年, 由于高原抽吸作用, 试验区受低层形成的辐合气流所控制, 容易形成降水; 旱年, 高原地表不存在大范围的辐合区, 试验区被干冷的偏北风所控制, 不利于成云降水。利用模式资料, 分析了西北地区及四个试验区水汽场月、季、年气候特征, 分析了水汽来源、大气可降水量、水汽收支情况以及年际变化情况。对MODIS和FY卫星反演的水汽产品进行了校准, 并对西北地区水汽含量的气候特征进行了分析。

关键词: 中国西北, 人工影响天气, 降水场, 气流场, 水汽场

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.022

Atmospheric Circulation Analysis for Weather Modification over Northwest China

Zhang Cunjie^{1,2}, Zhang Siqi^{1,2}, Zhou Jiangxing^{1,2}, Nie Suping^{1,2}, Wu Ping^{1,2}, Xiang Yang^{1,2}, Li Xiang^{1,2}, Wang Fang^{1,2}

(1 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: In this paper, the temporal and spatial characteristics of precipitation, airflow and water vapor over Northwest China (NW) and the experimental areas of Qilian Mountain, Tianshan Mountain, Liupan Mountain and Sanjiangyuan are studied by using high-resolution meteorological observation data, reanalysis data and satellite remote sensing data. Results indicated that: the temporal and spatial characteristics of the precipitation under the complex terrain conditions could be well described based on the refined precipitation data, and the developed hourly precipitation fusion algorithm is effective to analyze the high-frequency precipitation. In wet years, the experimental areas is controlled by the convergence airflow in the lower layer due to the effect of plateau suction, benefiting the formation of precipitation. In dry years, the cold northly winds prevailed in the experimental areas, not benefiting the formation of precipitation. The climate characteristics and the inter-annual change feature of the water vapor over NW and experimental areas are analyzed based on the model data. The water vapor products retrieved by MODIS and FY satellites are calibrated, and the climate characteristics of water vapor content over NW are analyzed.

Keywords: Northwest China, weather modification, precipitation, airflow, water vapor

0 引言

西北地区高山、高原、沟壑纵横, 地形复杂、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、三江源地区的高大山系, 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。西北地区干旱少雨, 大多数河流年内长时间干枯, 水资源严重缺乏^[1-5]。该地区虽然面积约占全国的42%, 但降水量只占全国17%。多年平均降水量在235 mm左右,

而年可蒸发量却高达1000~2600 mm, 年可蒸发量是降水量的4~11倍。据统计, 20世纪90年代初以来, 西部地区农田每年受旱面积 $860 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占耕地总面积的1/3, 比80年代增加1/3, 呈加剧趋势。据估计, 西北地区平均年缺水量超过 $250 \times 10^8 \text{ m}^3$, 由此造成西北地区经济和环境可持续发展所面临的首要问题就是解决水资源短缺问题^[6-12]。不论是地表水还是地下水, 都来自大气中的云中降水, 大气降水是水资源中可持续利用的重要来源^[13-16]。因此, 着眼于空中云水资源的研究增加对空中云水资源的开发利用, 是缓解水资源短缺问题的有效途径之一, 也是恢复和改善西北生态脆弱地区的重要途径。

由于西北地区地形云的复杂性、广泛性、多样

收稿日期: 2020年11月5日; 修回日期: 2020年12月21日

第一作者: 张存杰(1965—), Email: zhangcj@cma.gov.cn

资助信息: 西北区域作业天气背景条件分析(RYSY201907);

西北区域人影科学试验研究项目(RYSY201909)

性以及气候特征差异性等,在人工影响天气工程建设中需要了解作业背景的气候及气候变化特征,包括大尺度环流背景、典型降水天气系统、水汽来源及水汽输送通道、地形云和降水局地特征等。近几十年来,国内外学者和专家针对西北地区云水资源和人工影响天气做了大量的研究和试验工作,如2005—2007年,甘肃省气象局联合西北五省及相关科研院所,开展了“祁连山空中云水资源开发利用研究”,该项目取得了一系列有价值的研究成果^[17-18],对指导祁连山区人工影响天气作业具有非常重要的科学意义,也为本项目的开展奠定了良好的基础。

在气候系统观测还不完备的情况下,再分析资料是开展气候系统气候特征分析的有力工具,但受观测资料变更、数值预报模式和同化方案差异等因素的影响,再分析资料的可信度有待进一步检验。不仅不同再分析资料在中国地区的质量和性能存在差异,同种再分析资料在中国东部地区的可信度要高于西部地区,这是西部地区观测台站密度远小于东部地区导致的。此外,中国西北地区地形十分复杂,全球再分析模式往往分辨率较粗,对精细化下垫面特征考虑不够充分,同时,再分析模式往往采用单一的物理过程配置组合,不能充分考虑物理过程参数化方案对区域气候特征的适应性,这些都会对区域再分析资料的质量产生影响。因此,直接使用再分析资料分析中国西北地区的气流场、水汽场等的气候背景时空变化特征,可能会得到不可信的虚假信息。西北区域人工影响天气能力建设项目“作业天气背景条件分析”将利用地面、探空、卫星、雷达等多源观测资料,对再分析资料在西北地区的适用性开展进一步评估,采用再分析资料强迫更高精度的区域气候模式,结合国家气候中心最新研制的3 km×3 km分辨率气候资源数据集,开展西北地区及试验区降水场、气流场、水汽场以及云水资源等分析,以期为西北人影工程得到更多有价值的参考信息。

1 主要研究目标和内容

1.1 研究目标

利用不同时空分辨率的气象台站观测资料、再分析资料、卫星遥感资料等,结合高分辨率区域气候模式模拟,对西北地区以及祁连山等试验区的降水场、气流场、水汽场和云水资源等时空分布和演变特征开展研究,给出西北地区人影作业背景条件下的气候特征和气候变化规律及相应的数据集及算法;与试验区观测的资料进行对比分析,给出西北地区降水场、气流场、水汽场等要素的误差评估和订正算法。

1.2 研究区域

本项目研究区域包括西北地区和主要试验区域,西北地区包括甘肃、新疆、青海、宁夏和陕西五省(自治区)(73°—112°E, 31°—50°N),主要试验区包括祁连山地形云人工增雨(雪)试验示范基地试验区(98°—104°E, 36°—41°N)、天山地形云人工增雨(雪)试验示范基地试验区(80°—95°E, 41°—45°N)、三江源地区人工增雨(雪)试验示范基地试验区(89.5°—102.5°E, 31°—36°N)以及宁夏六盘山区水源涵养地试验区(105°—107°E, 35°—37°N)等区域,如图1所示。

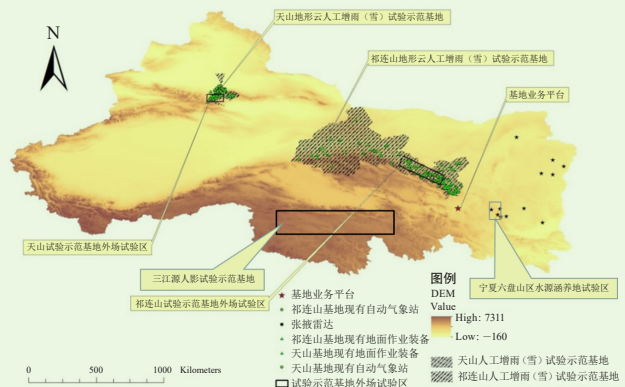


图1 开展研究试验的主要区域范围
Fig. 1 The experimental areas

1.3 主要研究内容

- 1) 利用长时间序列气象台站观测资料和再分析资料,分析近50年来西北地区以及祁连山等对比试验区降水量场的气候特征和气候变化规律;
- 2) 利用地面观测、探空观测以及模式再分析资料,揭示旱涝年以及强降水天气过程的环流异常特征,并用高分辨率模式资料分析主要试验区复杂地形条件下三维流场特征。
- 3) 利用模式再分析资料结合探空观测、卫星遥感及观测试验资料等,分析西北地区和试验区水汽场气候及气候变化特征,揭示西北地区和试验区强降水过程的水汽来源、通道、收支等气候特征。

2 技术方法和资料

2.1 试验区降水场分析方法

利用西北地区近3年3000多个国家站和区域站资料,分析了西北地区和4个试验区月、季、年降水量特征,得到4个试验区更加精细的降水量空间气候特征;利用降水量小时观测资料,分析了4个试验区春季和夏季降水日变化特征,给出了每个分区降水频数和降水强度的日变化特征;分析了4个试验区强降水

过程的逐小时演变特征。

2.2 试验区多源资料的精细化降水场融合方法

利用收集到的对比试验区复杂地形环境下的多种降水量资料，开展适用于对比试验区多源资料的精细化降水场融合分析方法研究，提供对比试验区连续可靠的精细化降水量客观分析场。

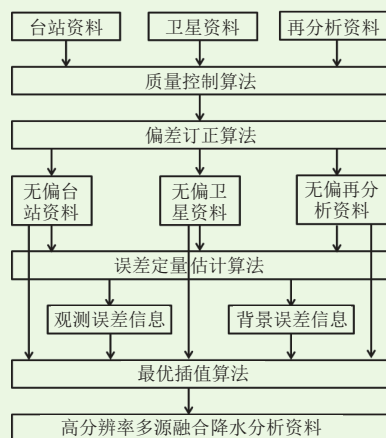


图2 多源资料的精细化降水场融合分析技术流程
Fig. 2 Technology flow of precipitation refinement integration analysis from multi-source data

地面台站观测是最准确的降水量测量方式，对于单点而言，相比其他各类资料都有更好的精度和准确度。针对该地区长时间的地面常规气象站和近年来已有自动气象站降水量资料的各自特点，建立与之适应的质量控制算法。建立基于最优插值(OI)框架的多源降水量资料融合算法(图2)，实现试验区复杂地形下多源降水资料的最优融合分析，主要步骤如下：以试验区质量控制后的高分辨率台站资料作为锚定观测资料，基于累积概率密度函数(CDF)偏差订正算法，对高分辨率卫星降水资料和国家气象信息中心格点降水融合分析资料(CMIC)的系统性偏差进行估算，去除这些降水资料中的系统性偏差；基于观测背景余差协方差估计算法，确定不同来源降水场资料在融合之前的观测误差量值分布、背景场误差量值和分布，以及观测误差和背景场误差的空间协相关参数；建立基于最优插值(OI)框架，建立适应复杂地形的精细化多源降水融合算法，引入时间平滑算子，更好地保障高频降水信号在融合过程中的传递，通过优化后的融合关键参数的输入，实现复杂地形下多源降水资料的最优融合分析；在不同资料交叉的时段选取合适的时间窗口进行系统行偏差订正，针对不同资料来源特征建立概率偏差订正函数，通过订正函数的延伸实现在不同时段区间内的气候态偏差的去除，保证整个历史融合时段上融合降水分析场的连续和完整性，

为该区域降水场气候评估分析提供可靠资料。

2.3 试验区气流场分析方法

利用地面观测、探空观测以及模式再分析资料，分析西北地区以及主要试验区复杂地形下的环流场特征，给出该地区环流的月、季平均特征以及年际、年代际演变特征，揭示旱涝年以及强降水天气过程的环流异常特征，并用高分辨率模式资料分析主要试验区复杂地形条件下三维流场特征。

2.4 建立试验区高分辨率气流场三维气候数据集

基于中尺度数值模式WRF3.7.1ARW模块，模拟区域采用两重单向嵌套，第一重水平分辨率 $9\text{ km}\times 9\text{ km}$ ，第二重水平分辨率 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ ，模式垂直分层35层，大气底层垂直非均匀加密。采用全球格点再分析资料产品(CFSv2)及OISST海表面温度来驱动模式。运用分析技术，将包括2400个气象站及160余个探空资料站在内的多源观测数据有效融入模式驱动场，提高模式初、边条件质量；在模式积分过程中，运用观测逼近(observation nudging)的同化技术^[19-20]，通过引入人工趋势项，使模式输出结果松弛逼近到观测资料，分别将观测站点信息、全球模式再分析(CFSv2)信息同化到模式模拟结果中，最终开发出我国 3 km 数据集(以下简称BCC_3km)。该数据集提供2006—2016年30余种气候要素逐小时信息，近地层垂直分层细，其中200 m以下垂直间隔为10 m，模式外层覆盖面积超过3000万 km^2 ，涵盖我国陆地和海域以及“一带一路”主要国家和地区。与MERRA2相比，50 m高度处BCC_3km各省平均风速与测风塔的实测风速绝对值更接近，尤其在复杂地形地区区域BCC_3 km优势更加明显，适合复杂地形大气环流分析^[21]。

2.5 试验区水汽场分析方法

基于欧洲中期数值预报中心(ECMWF)和美国国家环境预报中心(NCEP/NCAR)高分辨率再分析资料结合探空观测、卫星遥感及观测试验资料等，使用气候统计诊断方法(空间场分解和时间序列谱分析等方法)以及水汽流函数和势函数方法，分析近十年来西北地区及主要试验区水汽输送(水汽源及水汽通道)和水汽收支(区域输入、输出量和总收支以及各边界收支等)的空间分布和时间变化气候特征，以及西北地区及主要试验区强降水过程的主要水汽来源和水汽输送通道及区域和边界水汽收支特征。

2.6 西北地区大气水汽遥感数据集建立

相比于模式再分析资料和探空资料，卫星遥感能获得高空间分辨率的水汽资料。针对TERRA卫星

MODIS传感器和风云3号卫星MERSI传感器每天过境西北地区遥感反演的大气水汽产品，利用地面探空仪、GPS和太阳光度计实测的大气水汽量对卫星遥感的水汽产品的精度进行真实性检验，并用探空仪和地基GPS实测的水汽量对卫星遥感水汽产品进行修订^[22-24]。在此基础上，由每天卫星过境时5 min段的遥感水汽产品，制作合成了西北地区及其典型区域2000年2月—2019年1月MODIS遥感水汽月数据集和2010年2月—2019年1月MERSI遥感水汽月数据集。利用MERSI遥感水汽数据集，初步分析了西北地区和青藏高原地区水汽的空间分布特征、以及时间变化规律。

2.7 试验区地形云水汽场演变机理模拟分析

利用CWRF区域气候模式（水平分辨率为30 km，垂直为36层）开展历史气候模拟（1979—2016年），提供西北地区高分辨率水汽场模拟数据集，据此分析西北地区水汽场变化特征及演变机理。主要步骤如下：利用ERA再分析资料强迫CWRF模式开展中国区域多物理配置集合历史气候模拟（1979—2016年）；结合地面观测资料、卫星遥感资料和再分析资料，分析CWRF模式对西北地区水汽场气候背景、时空变化特征、水汽输送和收支的模拟能力，研究水汽场变化的可能机理；研究CWRF模式西北地区水汽模拟对物理配置选择（积云对流、云微物理过程、辐射方案等）的敏感性，分析物理配置选择对水汽模拟影响的不确定性。

3 主要工作进展

3.1 建立基础数据集

数据集包括：中国地面气象观测基础数据集，西北地区区域自动气象站降水数据集，中国区域多源资料融合分析数据集（CLDAS2.0），NCEP再分析数据集，ECMWF再分析数据集（ERA5），国家气候中心高分辨率气候资源数据集（BCC_3km），MODIS卫星反演水汽资料，FY3A/MERSI卫星反演水汽资料。

3.2 开展了试验区降水场精细化分析

利用近3年西北地区所有气象观测站（包括3000个多国家站和区域站）资料，分析了西北地区和四个试验区月、季、年降水量特征，得到四个试验区更加精细的降水量空间气候特征；利用降水量小时观测资料，通过分区，分析了四个试验区春季和夏季降水日变化特征，给出了每个分区降水频数和降水强度的日变化特征；分析了四个试验区强降水过程的逐小时演变特征。利用CLDAS2.0高分辨率多源资料融合分析数据集，分析了四个试验区降水近10年的降水场空间特征和气候变化特征。

3.3 开展了试验区气流场分析

利用NCEP再分析资料分析了西北地区以及祁连山、天山、三江源等对比试验区不同季节大气环流的气候特征，研究了多时间尺度水汽路径特征；并根据观测资料进行了西北地区典型降水事件的划分，完成了西北地区典型降水事件的环流形势和主要环流系统普查。揭示了在气候变暖的背景下，西北地区汛期降水的新特征，以及降水和大气环流关系的年代际演变趋势。揭示了西北试验区旱、涝年近地层大气流场特征。研究了西北地区东部夏季降水与西太平洋副热带高压位置和南部水汽输送密切相关。利用国家气候中心高分辨率模式模拟资料，对四个试验区典型降水过程的气流场进行了分析。

3.4 开展了试验区水汽收支情况分析

利用模式再分析资料分析了西北地区以及祁连山、天山、三江源和六盘山试验区年、季节和月尺度的水汽场的气候特征。分析了西北区和四个试验区强降水过程水汽的主要来源和水汽收支情况。分析了西北及四个试验区季节尺度和年尺度水汽收支变化特征。利用区域气候模式CWRF对西北地区和四个试验区水汽含量和水汽收支情况进行了模拟研究。

3.5 开展了西北地区大气水汽遥感反演

针对TERRA卫星MODIS传感器和风云3号卫星MERSI传感器每天过境西北地区遥感反演的大气水汽产品，利用地面探空仪、GPS和太阳光度计实测的大气水汽量对卫星遥感的水汽产品的精度进行真实性检验，并用探空仪和地基GPS实测的水汽量对卫星遥感水汽产品进行修订。基于订正后的MERSI月水汽含量数据集（2010年2月—2016年7月），对西北地区水汽旱涝时空特征进行了分析^[22-24]。

4 主要成果和结论

4.1 试验区降水场时空特征刻画更加精细

收集的西北试验区区域站（2931个）是国家站（186个）的15倍，用于揭示西北试验区降水场的精细化时空特征（表1）。

表1 四个试验区国家站和区域站站数
Table 1 The quantity of national stand and regional stations in the experimental areas

类别	天山	祁连山	三江源	六盘山	合计
国家站/个	61	59	43	22	185
区域站/个	1072	763	616	480	2931
总数/个	1133	822	659	502	3116

利用区域站观测资料（2016—2018年）分析了四个试验区的年、季节和逐月的精细化降水场分布特

征。结果表明：区域自动站资料的使用能够更精细地刻画出试验区降水的时间变化特征和空间分布特征，能有效提高人们对山区天气和气候背景条件的认识，

对西北地区人工影响天气作业有重要参考价值。下图举例给出天山试验区气象站点分布以及年降水空间分布特征（图3和图4）。

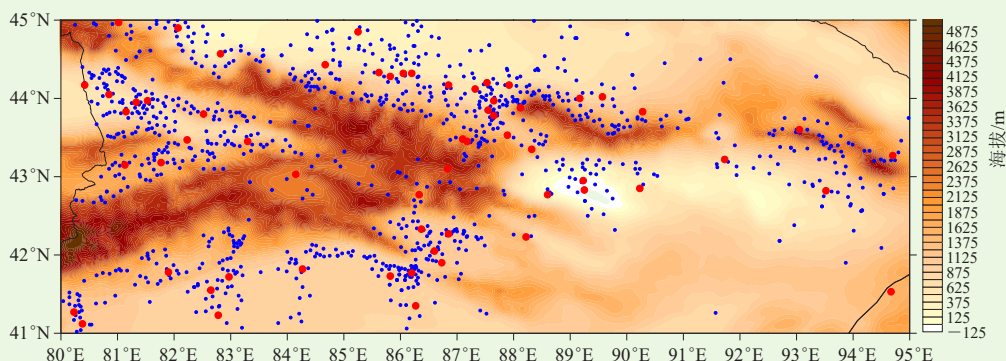


图3 天山试验区国家站、区域站分布图 (红点为国家站, 蓝点为区域站)

Fig. 3 The distribution of observation stations in Tianshan area (red dot: national station, blue dot: regional station)

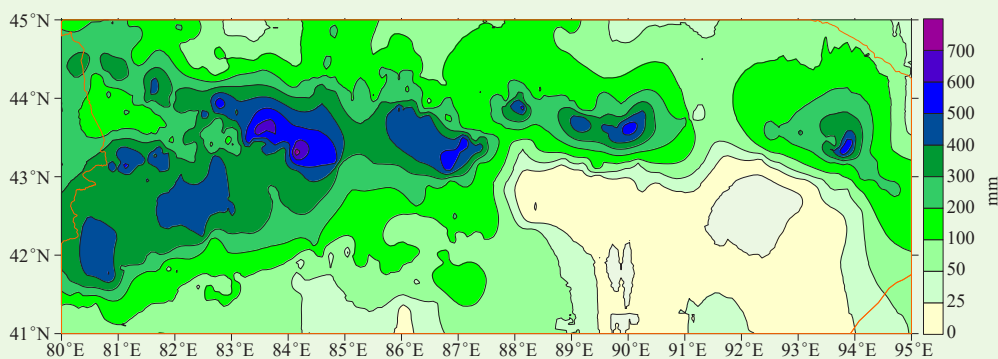


图4 天山试验区年平均降水分布特征 (单位: mm)

Fig. 4 Spatial distribution of annual mean precipitation in Tianshan area (unit: mm)

利用区域自动站小时降水观测资料，对四个试验区降水的日变化特征进行了分析，包括降水日变化的空间特征、降水在日内不同时间出现的频率和强度分布特征等（图5）。对四个试验区典型降水过程进行详细分析。研究表明，利用高密度区域站小时资料，能够细致地刻画出强降水过程时间、空间演变特征，可以为人工影响天气有效作业提供天气背景特征。

4.2 多源降水资料融合分析方法更加有效

利用全球降水观测（Global Precipitation Measurement, GPM）数据集^[25]，开展了基于逐小时分辨率资料的CDF偏差订正算法研制^[26-27]，完善了针对逐小时降水资料的CDF订正算法。试验结果表明，新的变分位数CDF偏差订正算法能更好地适应小时降水数据随机性强的特点，并且能更好地满足不同网格点上降水资料量空间分布差异的影响，相比传统CDF方法，其对模式降水数据的误差有更好的订正效果（图6），订正后的模式降水的整体偏差更接近为0。

采用最优融合算法对GPM卫星降水和台站降水进

行融合分析。图7给出了2018年7月28日04时的降水分布，可以看到，GPM降水、CDF订正降水、融合分析降水和CMIC降水产品刻画的空间分布都保持了很好的一致性。而台站降水在西部地区有一个较明显的降水中心，在其他降水资料中都没有体现。由于CMIC降水产品融合了雷达和台站降水，GPM降水是卫星从高空探测的反演，这两个产品在该地区都没有反演出降水，可能表示此时台站降水体现的可能是一个虚假中心。而这个虚假中心，在我们的融合算法中没有通过检验，因此在最后的融合分析降水中没有体现。这一结果也表明该小时融合降水算法对西北地区这种高频降水资料是有效的。

4.3 影响西北地区降水的主要流场特征

对西北地区高空气流场研究表明，西北地区高空主要受两支气流控制：一支是沿天山山脉自西向东的西风气流，一支是从高原西和高原南侧的爬流，自西向东控制整个高原及以东地区。西北地区水汽输送路径主要有三支（图8）：一是来自西风带并沿青藏

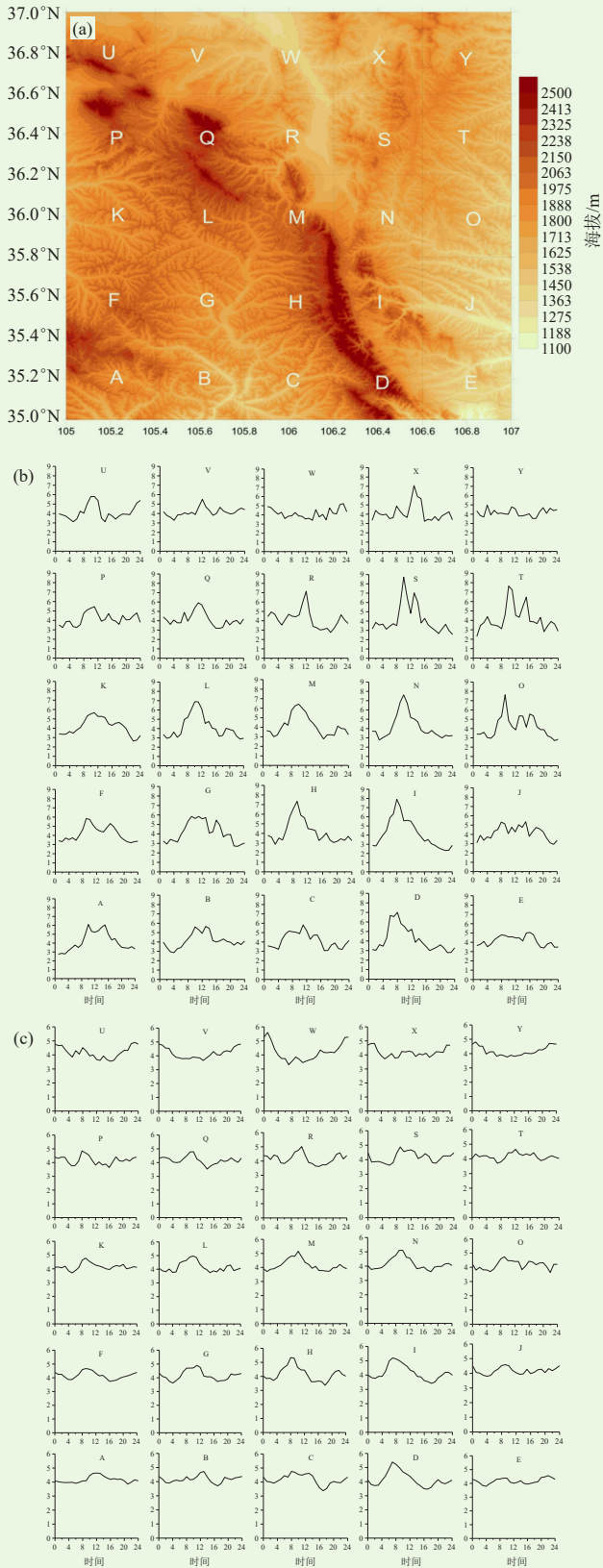


图5 六盘山试验区空间分区(a)、夏季降水强度(b)和夏季降水频率(c)日变化
Fig. 5 Topographic map and distribution (a), precipitation intensity (b) and daily precipitation frequency (c) in Liupanshan area

高原北侧的西风水汽输送；二是来自孟加拉湾或印度洋地区的西南或偏南风水汽输送，该支水汽在青藏高原东南侧沿高原向北输送至西北；三是西太平洋副热带高压西侧的东南风水汽输送，当副高偏西时，该支水汽输送也可到达西北地区。自20世纪80年代后期以来，西北地区汛期降水呈现年代际增长的趋势。滑动相关分析结果表明（图9），近十多年盛夏西北太平洋副热带高压位置偏北偏西，引导西太平洋副热带高压外围水汽向西北地区东部输送，来自西北南边界的水汽增强，导致西北地区东部盛夏降水偏多。

4.4 试验区旱、涝年以及强降水过程近地层大气流场特征

西北地区降水主要集中在夏季，涝年天山试验区大气低层盛行偏北风南侧为东风，六盘山、祁连山、三江源主要受高原抽吸作用在低层形成的辐合气流所控制，主要表现为高原四周大气向高原地表辐合；早年天山试验区大气低层盛行偏北风，但南侧东风偏强，高原上及高原东侧为偏北风所控制，高原南侧盛行偏东风，高原地表不存在大范围显著的辐合区。六盘山、祁连山、三江源三试验区为干冷的偏北风所控制，不利于试验区成云降水。

分别挑选天山、祁连山、六盘山及三江源2006—2016年极端降水事件，运用高分辨率数据分析上述极端事件发生过程中大气底层精细化流场演变。2007年7月17日，新疆天山日累积降水量达13.35 mm，为2000年以来最高。降水期间，沿天山山脉有明显边界层辐合带。2009年8月17—18日，祁连山日累计降水量达19.57 mm，为1981年以来最高。降水期间，沿祁连山山脉有明显边界层辐合带。2013年6月20日，六盘山日累计降水量达48.91 mm，为2010年以来次高。在六盘山中东部山区有明显边界层辐合带。三次极端降水事件大气底层精细化流场辐合区空间分布与山脉走向密切相关，这表明天山、祁连山和六盘山在上述三次极端降水事件提供重要的动力作用。

4.5 西北试验区水汽特征

利用再分析资料对四个试验区水汽含量季节分布特征和年际变化特征分析表明，西北及四个试验区水汽含量夏季（7月）最多，其次是秋季和春季，冬季最少。比较四个区年平均和月平均水汽含量来看，六盘山年均和月均水汽含量最多，分别为122 mm和10.2 mm，其次是天山，分别为110.5 mm和9.2 mm，祁连山分别为94.4 mm和7.9 mm，三江源最少，分别为94.4 mm和6.2 mm。利用多年再分析资料分析表明，西北地区及四个试验区年均水汽含量近几十年呈

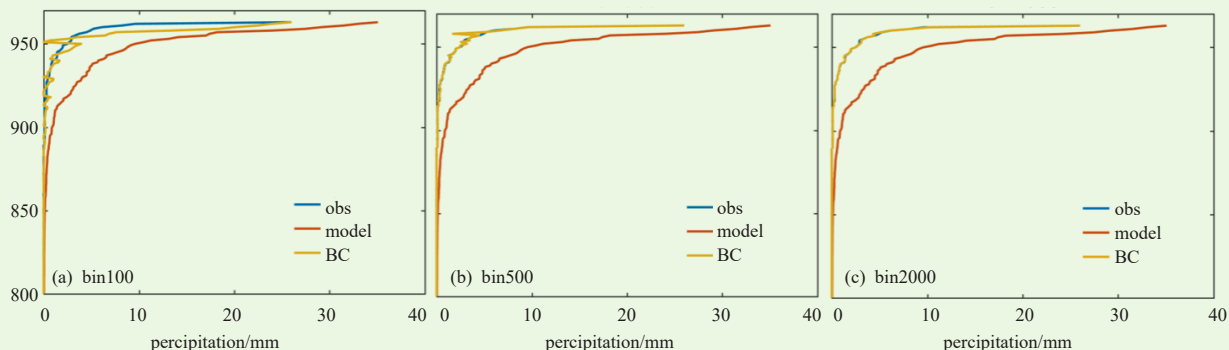


图6 采用不同分位数 (a为100分位, b为500分位, c为2000分位) 进行偏差订正后得到的CDF曲线 (蓝色: 观测, 红色: 订正前的模式结果, 黄色: 订正后的模式结果)

Fig. 6 The CDF curves of gauge observations (blue), model simulations before bias correction (red) and model simulations after bias corrections (yellow) using different quantiles (a: 100 quantile points, b: 500 quantile points, c: 2000 quantile points)

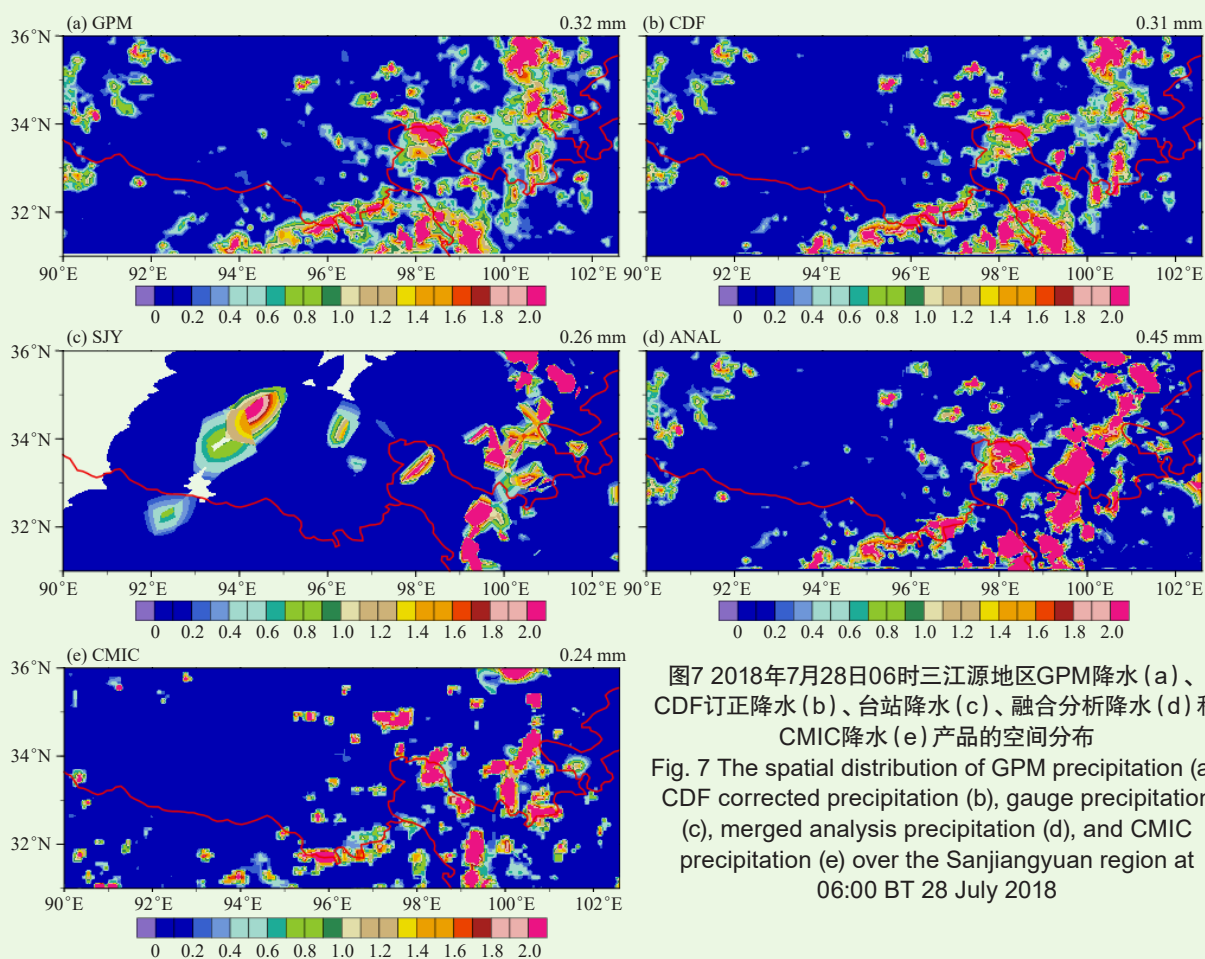


图7 2018年7月28日06时三江源地区GPM降水 (a)、CDF订正降水 (b)、台站降水 (c)、融合分析降水 (d) 和 CMIC降水 (e) 产品的空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of GPM precipitation (a), CDF corrected precipitation (b), gauge precipitation (c), merged analysis precipitation (d), and CMIC precipitation (e) over the Sanjiangyuan region at 06:00 BT 28 July 2018

现出上升的趋势。

基于订正后的卫星遥感资料,对西北地区水汽含量时空特征进行了分析表明^[23],西北地区的水汽含量东南部最高、西北部次之、中南高原区域的水汽量最低;西北地区水汽量的季节性变化明显,冬季最低、春季较低、夏季最高、秋季次高。

本研究揭示了西北试验区水汽收支年际和季节变

化特征分析。西北、三江源和六盘山全年是正的净水汽收支,天山全年基本处于负的水汽收支,祁连山表现出明显的上升趋势(图10)。西北地区、祁连山、三江源和六盘山夏季净水汽收支最大,天山夏季净水汽收支最少,呈负的水汽收支。西北、天山、三江源和六盘山夏季的净水汽收支主要是经向水汽输送的贡献,祁连山是纬向水汽输送的贡献,其他季节经向和

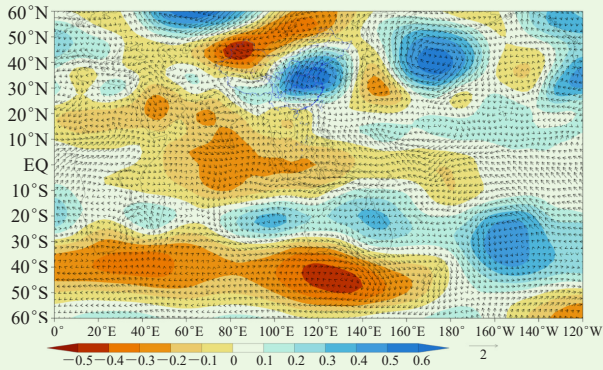


图8 盛夏(7—8月)降水量与700 hPa的水汽输送和500 hPa高度场相关

Fig. 8 The correlation between the midsummer (July and August) precipitation and the water vapor transport of 700 hPa and the geopotential height field of 500 hPa

纬向输送的贡献相当。

对西北试验区强降水过程的水汽来源分析表明,祁连山和六盘山的水汽主要源自西风带、北冰洋的水汽输送和南海及西北太平洋的水汽输送;天山的水汽

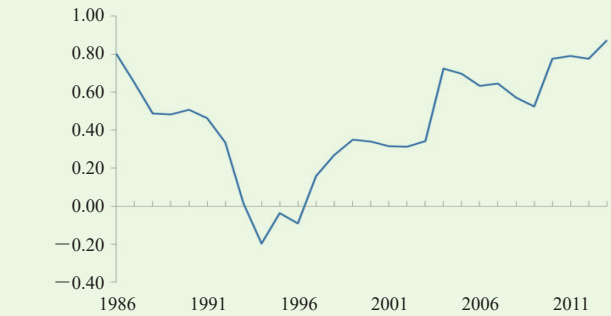
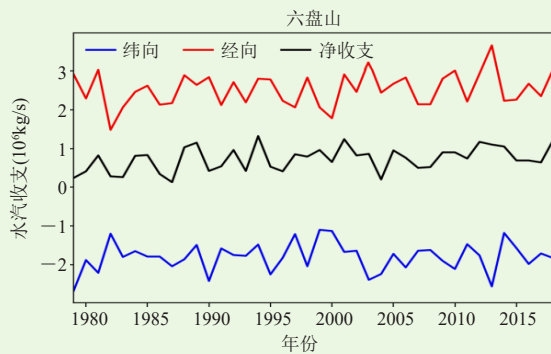
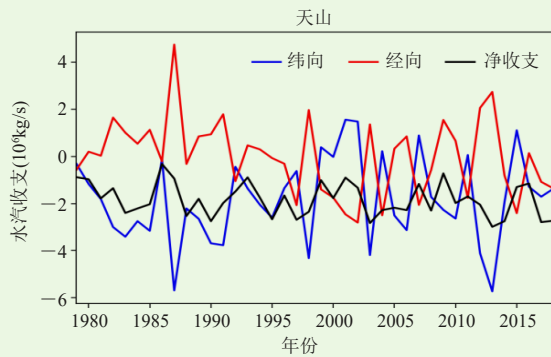
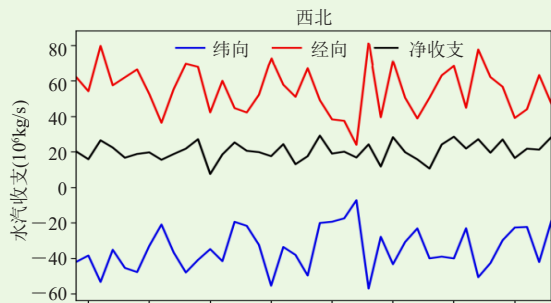


图9 盛夏(7—8月)降水与700 hPa南边界(31°N, 105—112°E)经向水汽输送滑动相关系数

Fig. 9 The running correlation efficient between the midsummer (July and August) precipitation and the meridional vapor transport at southern boundary (31°N, 105°-112°E) at geopotential height of 700 hPa

主要源自西风带和北冰洋的水汽输送;三江源的水汽主要源自阿拉伯海—孟加拉湾—南海的西南风和东南风水汽输送。

对西北试验区强降水过程的水汽收支分析表明

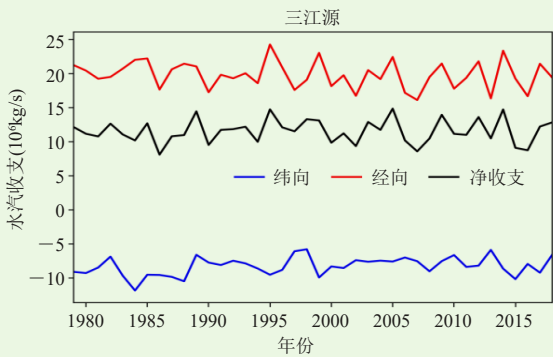
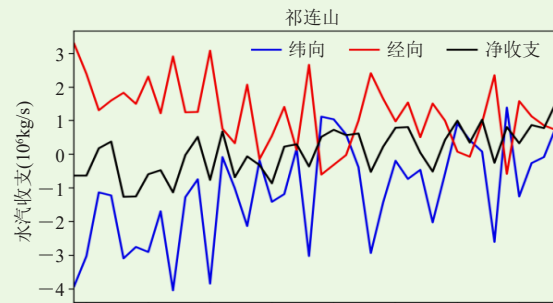


图10 1979—2018年平均水汽收支(单位: 10^6 kg/s)
Fig. 10 The time series of the water vapor budget from 1979 to 2018

(图略), 祁连山和三江源地区强降水的发生主要是纬向水汽收入的贡献, 六盘山地区强降水的发生主要是经向水汽收入的贡献, 天山地区纬向和经向水汽输入对强降水的发生都起了相当的正贡献。

参考文献

- [1] Zhang C J, Bourque P A, Sun L D. Spatiotemporal modeling of monthly precipitation in the upper shiyang river watershed in West Central Gansu, Northwest China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(1): 185-194.
- [2] Zhang C J, Sun L D, Han T, et al. Climate change impacts on water resources and ecological environment of inland watersheds in the Hexi Region of West Gansu, China. *International Conference on Engineering Management and Service Sciences*, 2009: 1-4.
- [3] 李栋梁, 谢金南, 王文. 中国西北夏季降水特征及其异常研究. *大气科学*, 1997, 21(3): 331-340.
- [4] 李江萍, 李俭峰, 杜亮亮, 等. 近50年夏季西北暴雨特征和水汽轨迹分析. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(4): 474-482.
- [5] 宋连春, 张存杰. 20世纪西北地区降水量变化特征. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 143-148.
- [6] 张家宝, 邓子凤. *新疆降水概论*. 北京: 气象出版社, 1987.
- [7] 杨莲梅, 李霞, 张广兴. 新疆夏季强降水研究若干进展及问题. *气候与环境研究*, 2011, 16(2): 188-198.
- [8] 魏锋. *中国西北地区降水的长期变化特征及其可能影响因子研究*. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [9] 韦志刚, 董文杰, 惠小英. 中国西北地区降水的演变趋势和年际变化. *气象学报*, 2000, 58(2): 234-243.
- [10] Zhu Y L, Liu Y, Wang H J, et al. Changes in the interannual summer drought variation along with the regime shift over Northwest China in the late 1980s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124, 2868-2881.
- [11] Huang W, Feng S, Chen J, et al. Physical mechanisms of the summer precipitation variations in the Tarim Basin, Northwest China. *Journal of Climate*, 2015, 28(9): 3579-3591.
- [12] Zhang C J, Liao Y M, Song Y L. The progress of dry-wet climate divisional research in china. *Earth Sciences*, 2020, 9(1): 8-15.
- [13] 黄荣辉, 陈际龙. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异. *大气科学*, 2010, 34(6): 1035-1045.
- [14] 俞亚勋, 王劲松, 李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 149-156.
- [15] 蔡英, 宋敏红, 钱正安, 等. 西北干旱区夏季强干湿事件降水环流及水汽输送的再分析. *高原气象*, 2015, 34(3): 597-610.
- [16] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送. *水科学进展*, 2005, 16(3): 432-438.
- [17] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究. *气象学报*, 2007, 65(4): 633-643.
- [18] 张强, 孙照萱, 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.
- [19] Sharman R D, Liu Y, Sheu R S, et al. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U.S. army test and evaluation command. Part III: Forecasting with secondary-applications models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 47(4): 1105-1122.
- [20] Stauffer D R, Seaman N L. Multiscale four-dimensional data assimilation. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(3): 416-434.
- [21] Keith W A, Robert J D, Peter A C. A simple temporal and spatial analysis of flow in complex terrain in the context of wind energy modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 98: 275-295.
- [22] Gong S Q, Hagan D F T, Zhang C J. Analysis on precipitable water vapor over the Tibetan Plateau using FengYun-3A medium resolution spectral imager products. *Journal of Sensors*, 2019: 6078591.
- [23] Gong S Q, Hagan D F, Wu X Y, et al. Spatio-temporal analysis of precipitable water vapor over Northwest China utilizing MERSI/FY3A products. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(10): 3094-3110.
- [24] Gong S J, Zhang C J, Tang G, et al. Global analysis of atmospheric refractivity profiles from COSMIC GPS radio occultation soundings. *Geodetski Vestnik*, 2020, 64 (2): 227-240.
- [25] Skofronick J G, Walter A P, Wesley B, et al. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(8): 1679-1695.
- [26] Nie S P, Luo Y, Wu T W, et al. A merging scheme for constructing daily precipitation analyses based on objective bias-correction and error estimation techniques. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2015, 120(17): 8671-8692.
- [27] Nie S P, Wu T W, Luo Y, et al. A strategy for merging objective estimates of global daily precipitation from gauge observations, satellite estimates, and numerical predictions. *Advances Atmospheric Sciences*, 2016, 33(7): 889-904.