

六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究

张沛¹, 姚展予^{1*}, 谭超¹, 贾烁¹, 常倬林², 桑建人², 高亮书¹, 赵文慧¹, 王伟健¹, 祝晓芸¹

1 中国气象局云雾物理环境重点实验室, 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川, 750002

摘要: 为了利用人工增雨技术合理开发六盘山地区空中水资源, 首先需了解该地区水汽场、地形对当地降水的影响和空中水资源的特征及典型降水过程中云系的降水效率。本文采用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的高时空分辨率 ERA5 再分析数据集和中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据, 通过统计分析研究了该地区水汽的输送、地形强迫作用下的辐合抬升状况和地形云参量特征, 并分别利用 WRF 数值模拟的输出结果和 ERA5 再分析数据, 估算 2016-2017 年夏季自西向东移经该山区的多次混合降水云系的水凝物降水效率。研究结果表明: 在西北地区东部, 六盘山地区具有较为丰沛的大气可降水量和更强的水汽输送。受亚洲季风影响, 夏季偏南风向六盘山地区输送了丰沛的水汽, 山区成为相对湿度高值区; 春、夏、秋季午后山区云量 (CF) 达 70% 及以上, 夏季云水路径 (CWP) 和云光学厚度 (COT) 均明显大于周边地区; 在夏季降水过程中, 地形引起的动力场对降水有明显的影响, 在日降水量 5mm 以上强度的过程中, 气流遇迎风坡地形产生明显辐合抬升, 且辐合抬升越强时降水强度越大; 夏季典型降水系统中, 山区水凝物降水效率平均约为 48.1%, 空中还有较大部分的水凝物未能成为降水。因此作为水源涵养地的六盘山地区夏季空中水资源相对丰富而降水量不足, 空中水资源具有一定开发空间。

关键词: 六盘山地区; 空中水资源; 降水效率

文章编号: 2019104A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.19104

作者简介: 张沛, (1993—), 女, 中国气象科学研究院硕士研究生, 从事云降水与人工影响天气研究. Email: zhangp1919@126.com

通讯作者: 姚展予, 中国气象科学研究院研究员, Email: yaozy@cma.gov.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41775139), 科技部战略性国际科技创新合作重点专项 (2016YFE0201900), 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201406033)

收稿日期: 2019-01-08; 网络预出版日期:

Study on the Characteristics of Atmospheric Water Resources and Hydrometeor Precipitation Efficiency over the Liupan Mountain Area

Pei Zhang¹, Zhanyu Yao^{1*}, Chao Tan¹, Shuo Jia¹, Zhuolin Chang², Jianren Sang²,
Liangshu Gao¹, Wenhui Zhao¹, Weijian Wang¹, Xiaoyun Zhu¹

¹ Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081,

² Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002

Abstract: To develop atmospheric water resources reasonably over the Liupan Mountain area based on precipitation enhancement techniques, it is necessary to understand firstly the influence of water vapor field and topography on local precipitation, the characteristics of water resources in the air and the hydrometeor precipitation efficiency of clouds in typical precipitation processes over this area. Based on the high spatial and temporal resolution reanalysis dataset issued by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) data, the features of water vapor transport, the convergence and ascending motion of water vapor flux forced by topography, as well as orographic cloud characteristics are investigated using statistical analysis methods. Besides, during several precipitation events with stratus clouds embedded in convective systems moving from west to east in the summer of 2016 and 2017, the hydrometeor precipitation efficiency is calculated based on the simulation results of WRF model and ERA5 reanalysis dataset respectively. Results are as follows. In the east of Northwest China, there are abundant atmospheric precipitable water and stronger water vapor transport over Liupan Mountain area. Affected by the Asian monsoon, abundant water vapor is transported by the southerly wind into this area in summer, which makes the mountain area become a higher relative humidity zone. The clouds fraction (CF) reaches 70% over the Liupan Mountain in the afternoon of spring, summer and autumn, and the cloud water

path (CWP) and the optical thickness (COT) in summer are significantly larger than those over the surrounding areas. The dynamic field caused by topography has a significant impact on summer precipitation. Obvious convergence and ascending motion of water vapor flux forced by topography occurs in the process with daily precipitation exceeding 5mm, and the more intense the convergence and ascending motion is, the stronger the corresponding rainfall intensity is. In the typical precipitation systems in summer, the average hydrometeor precipitation efficiency is about 48.1% and much of the hydrometeor in the air fails to become precipitation. Therefore, as a source of water conservation, the Liupan Mountain area has relatively abundant atmospheric water resources but insufficient precipitation in summer, which means certain potential in this area for developing the atmospheric water resources.

Key words: Liupan Mountain; Atmospheric water resources; Precipitation efficiency

1. 引言

为了解一个地区的降水形成的背景,为人工增雨雪、气候变化做些基础性研究,到目前为止,已有许多对山区水汽和云量特征的研究。研究表明,水汽输送的方向和强度能够影响整层水汽通量和大气可降水量,进而对山区降水产生影响(Kawase et al., 2006; Smith and Yuter, 2009; Giovannettone and Barros, 2009)。Durán et al. (2015)分析伊比利亚半岛的瓜达拉马山脉在不同水汽输送背景下整层水汽通量与地形降水的相关关系,发现自西南输送的水汽具有更高的降雨率。我国对西北山地和高原地区的水汽输送和云水资源有过不少研究。深居内陆的祁连山区常年水汽含量值较小,水汽输送主要受西风带、偏南季风和东亚季风的共同影响(张良等, 2007; Ma et al., 2018; Zhang et al., 2008),经向和纬向水汽收支对区域净水汽收支分别有正向和负向贡献(Wang et al., 2017);陕西、宁夏南部和甘肃东南部为水汽含量的高值区和水汽辐合中心,水汽以西南风和西风输送为主(王可丽等, 2005)。许多研究表明,云量最大值主要出现在触发对流的高原山地上空(Vondou, 2012; Carrasco et al., 2017; Bendix et al., 2004; Sumargo and Cayan, 2017),即使山脉海拔较低、坡度平缓且抬升凝结高度较高,空气的上升运动仍然能够提供足够的浮力并产生对流云(Barth, 2010)。西北干旱半干旱区的高山地区总云量和低云量均高于周围地区,云厚度和含水量也高于同纬度华北地区,做出主要贡献的是云层深厚、含水量较高的层云、雨层云和深对流云(宜树华等, 2003; 刘洪利, 2003; 石晓兰等, 2016; 刘玉芝等, 2018)。

降水效率是降水的一个重要特征,也是判断云水资源开发潜力的重要要素。国际上对降水效率有三种定义:雨水微物理降水效率、云微物理降水效率和大尺度降水效率(Zhou et al., 2014);李宏宇等(2006)定义拟降水效率为地面累积降水与进入计算域内的总水汽(资源)量之比;洪延超和周菲菲(2006)将地面降水量分成凝结水和凝华水两部分,分别求出了凝结水和凝华水的降水效率。但目前大多评估降水过程的水汽降水效率(袁野等, 2005; Sun et al., 2016; 程菲和杨军, 2016; 张扬等, 2018)和凝结水降水效率,无法了解水凝物的降水效率平均状况。

六盘山地处西北地区东部,是全国为数不多的西北-东南走向的狭长山地(与南北方向夹角近 30° ,范围约为 $105.6-106.7^\circ\text{E}$, $34.9-36.2^\circ\text{N}$),山脊海拔超过2500米,最高峰米缸山2942米,山地东坡陡峭而西坡和缓。与西北其他区域相比,六盘山地区水汽更为充沛,但降水仍比较匮乏,属于北半球同纬度降水量较少的地区(杨瑜峰, 2014)。六盘山作为西北重要的水源涵养地,是陕、甘、宁三省区13县180万人口的水源地。然而干旱少雨制约了

该地区农业和经济发展，也成为最突出的生态环境问题。因此合理开发利用六盘山地区空中水资源显得尤为重要，目前人工增雨雪仍然是重要的开发手段。作为人工增雨技术研究的基础工作，应该了解此地区水汽场、地形对降水的影响和空中水资源的特征，以及典型降水过程中云水资源的降水效率，目前针对这方面还少有人研究。因此本文利用高时空分辨率的 ECMWF ERA5 再分析数据集分析包括六盘山在内的西北地区东部(本文指 34.5-42°N, 95-110°E 范围)水汽的输送和分布的多年平均特征以及在六盘山地区地形对大气动力场和水汽输送的影响，其中包括地形作用下的辐合抬升状况，同时采用 MODIS 遥感数据分析该地区云参量变化特征，并利用 WRF 模式输出结果估算夏季多次典型自然降水过程中的水凝物降水效率，为开发利用六盘山地区云水资源的工作提供科学依据。

2. 资料选取

所用资料包括中国地面降水月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集 (V2.0)、经质量控制的近 6000 个中国气象局业务布网的自动气象站逐小时雨量资料、欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的 ERA5 再分析数据集 (2017 年 7 月 ECMWF 发布的 ERA5 气候再分析数据集，与 ERA-Interim 相比融合了更多的观测数据，具有更高时空分辨率，时间分辨率提高至 1h、分析场水平分辨率 31 km、垂直分层 137 层 (ECMWF,2016,2017; Urraca,2018)，对于较小区域的研究更为有利)、搭载于 Aqua 卫星的中分辨率成像光谱仪 MODIS 数据 (空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$)、固原市天气雷达资料、风云二号 FY-2G 相当黑体亮温数据等。

3. 西北地区东部降水和水汽分布及输送特征

受纬度、复杂地形、天气系统等影响，西北地区东部水汽和降水分布较为不均。朱晓炜等 (2013) 指出地形是影响西北东部降水形势的重要因素之一，其中最明显的地形影响是高原，其次是六盘山、沙漠戈壁等地形。由 1987-2017 年间西北地区东部降水分布的平均状况来看 (图 1)，主要分布趋势大致为自东南向西北减少且高值区与地形分布密切相关。祁连山和青藏高原东北边坡等大地形对降水均有明显影响，年降水量在 420-600mm 之间；位于宁夏南部与甘肃交界处的六盘山地区和宁夏北部贺兰山地区地形尺度虽然相对较小，对降水量分布也有着明显影响，其中六盘山地区年降水量与祁连山相近，明显大于降水量不足 250mm 的贺兰山地区，但与中国东南地区相比，降水仍十分匮乏。

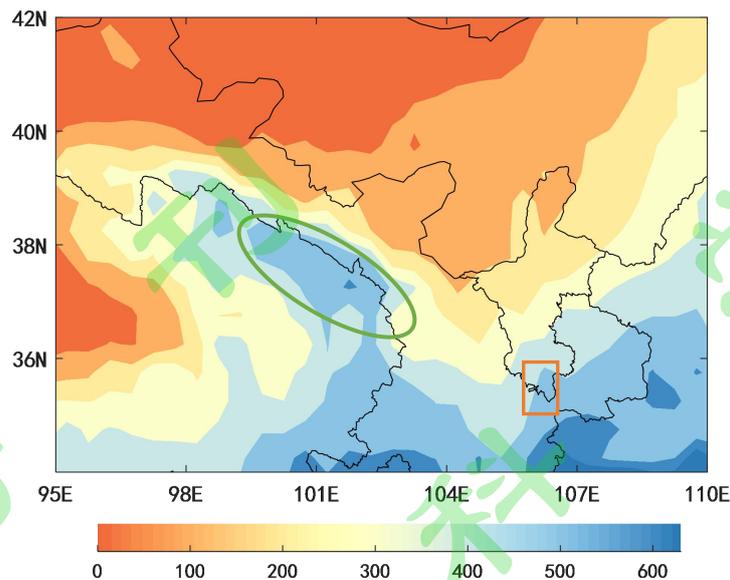


图 1 1987-2017 年间西北地区东部年降水量 (单位: mm) 分布。红色矩形框表示六盘山地区, 绿色椭圆框表示祁连山地区

Fig. 1 Annual average precipitation distribution in the east of Northwest China during 1987 to 2017 (units: mm). The red rectangular frame and green elliptical frame represent Liupan Mountain area and Qilian Mountain area, respectively

为了解六盘山地区的水汽的分布和输送的平均状况, 计算大气可降水量和整层水汽通量并分别分析高层和低层的水汽输送特征。大气可降水量和水汽通量计算公式分别为:

$$W = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{300} q dp \quad (1) \quad Q = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{300} \mathbf{V} q dp \quad (2)$$

式中 \mathbf{V} 为全风速矢量, q 为比湿, p_s 为地面气压, 由于 300hpa 以上高度的水汽输送很小, 计算大气可降水量和整层积分的水汽通量以及后文中水汽通量散度时均取从地面至 300hpa 的垂直积分 (周晋红等, 2011)。

大气可降水量表示从地面到大气顶的单位截面积大气柱中所含水汽总量全部凝结降落到地面可以产生的降水量。图 2 为 2010-2017 年西北地区东部大气可降水量的分布。除陕西和宁夏南部之外, 年平均的大气可降水量低至 12mm 以下 (图 2a); 夏季平均的可降水量分布与年平均的分布相似 (图 2b), 但其值明显大于年平均的可降水量, 六盘山地区达 22-27mm。对六盘山山区 2010-2017 年相对湿度的统计分析也表明 (图略), 六盘山对应着相对湿度高值区, 夏季午后山顶平均达 75% 以上。因此该山区在年平均尤其是夏季平均中, 比西部其他主要山区有着更为充沛的水汽条件。水汽通量反映了流经某地的水汽的大小和方向, 2010-2017 年整层水汽通量的年平均分布和夏季平均分布与大气可降水量相似 (图 3a、b), 祁连山等高原地区的水汽输送强度也弱于包括六盘山区在内的西北地区东南部, 这与海拔较

高以及山地对水汽的阻挡作用等因素有关（林志强等，2011）。

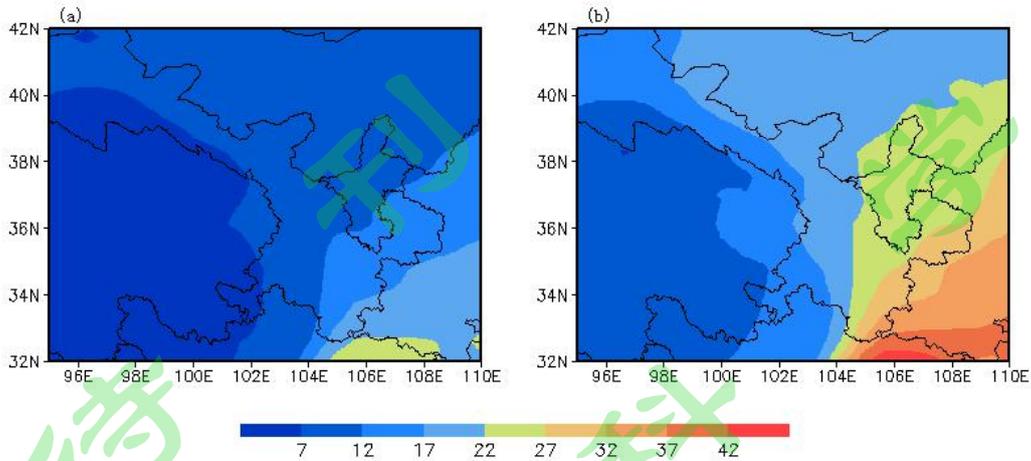


图2 2010-2017年间西北地区东部年平均(a)和夏季平均(b)的大气可降水量(单位: mm)分布

Fig. 2 Annual(a) and summer (b) mean distribution of atmospheric precipitable water in the east of Northwest China during the period from 2010 to 2017(units: mm)

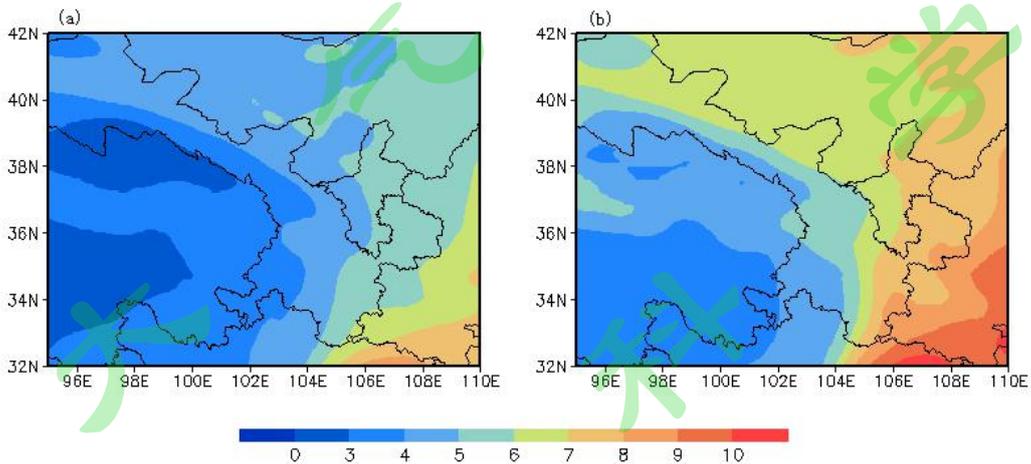


图3 2010-2017年间西北地区东部年平均(a)和夏季平均(b)的整层水汽通量(单位: $g/(cm \cdot s)$)分布

Fig. 3 Annual(a) and summer(b) average water vapor flux distribution in the east of Northwest China during the period from 2010 to 2017 (units: $g/(cm \cdot s)$)

六盘山地区海拔2000多米,最高峰达3000米左右,计算西北地区东部在700hpa高度处的水汽输送通量(图4a、b.不考虑32-40°N、95-104°E左右的高海拔地区),发现在宁夏北部和中部地区的低层水汽主要来源于西北风输送,南部地区则主要为西南风水汽通量,并与西北风通量相汇后继续向东南方向输送(图4a)。宁夏南部处于季风西北影响区边缘,夏季来自西南方向的水汽沿青藏高原东北边坡继续向北输送至38°N左右(图4b)(这与赵光平等(2017)计算的40°N有一定偏差,可能与选取研究年限不同、所用再分析资料分辨率不同有关),在该南风水汽通量的影响下,六盘山地区水汽丰沛。到了500hpa及以上高度,西北地区东部的水汽输送均为西风纬向输送,且水汽输送通量的强度低于低层(图略),

这与赵光平等的研究结果相符。

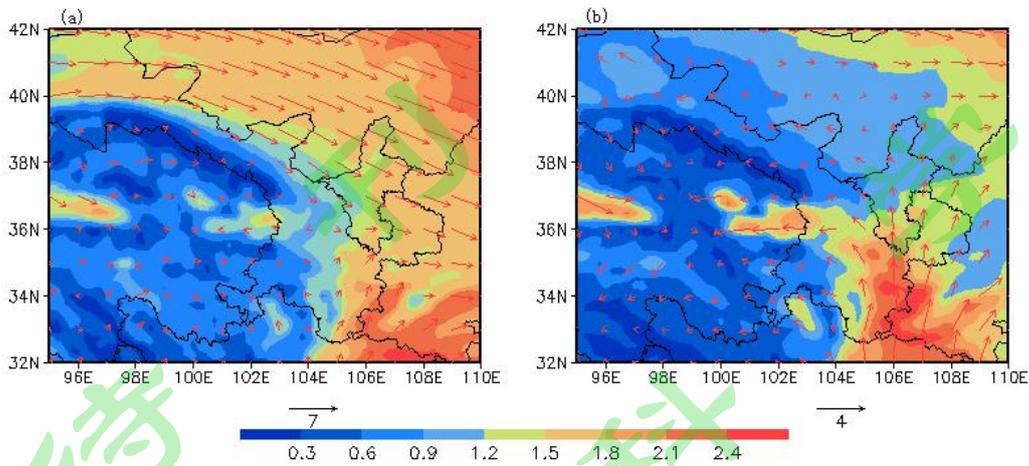


图4 2010-2017年间西北地区东部(a)年平均和(b)夏季平均的700hpa水汽通量(单位: g/(s·hpa·cm))分布。矢量箭头表示风场(单位: m/s)

Fig.4 Annual(a) and summer(b) average distribution of vapor flux(units : g/(s·hpa·cm)) at 700hPa in the east of Northwest China during the period from 2010 to 2017. The vector arrow indicates the wind field(units : m/s)

4. 六盘山地区水汽通量散度特征

水汽输送通量仅表示水汽流经某地时的大小和方向,而降水主要是由水汽辐合造成,水汽辐合则主要由低层通量辐合造成(杨辉等,1998)。低层辐合高空辐散的高低空配置可为对流的发生和维持提供很好的动力条件。在夏季平均状况下,六盘山地区具备较好的水汽条件,这对降水的产生是有利的;但有利的水汽条件并不一定产生降水,还要有动力辐合场的配合。那么六盘山地形作用对动力场的影响能否使低层水汽产生辐合,在不同降水强度下表征水汽辐合强度的水汽通量散度具有什么特征?

本文选取2010-2017年夏季六盘山地区降水过程为研究对象,按照当地降水强度,将降水强度(日降水量)分为5类:①0.1-5mm ②5-10mm ③10-15mm④15mm-25mm⑤>25mm,并分析不同降水强度下,地形对动力场的影响。整层和某层的水汽通量散度计算公式分别为:

$$D = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{300} \nabla \cdot (\mathbf{V}q) dp \quad (3a) \quad A = \frac{1}{g} \nabla \cdot (\mathbf{V}q) \quad (3b)$$

计算并分析水汽通量散度发现,第一类降水中没有出现明显的水汽通量辐合;而在降水强度较大的过程中,低层(750hpa高度层)来自西南偏南方向的水汽输送在地形作用下,在迎风坡产生了明显辐合,较强辐合区的分布与山脉走向基本一致(图5),由此说明,较强降水的形成与地形产生的水汽通量辐合有关,这从图6可以看得更为清楚。图6(a)-(d)分别为第②-⑤类降水强度下水汽通量散度沿35.5°N的垂直剖面,均沿西坡出现明显辐合,

降水强度与低层水汽通量辐合强度具有很密切的关系，低层辐合越强时，降水强度越大，且在降水强度大于 15mm/d 的过程中，辐合层高出山顶并延伸至东坡；相似地，图 6 (e) - (h) 为沿 106.2° E 的剖面，表明明显的水汽通量辐合主要出现在南坡，第②类降水强度的水汽通量散度弱于 $-2e-07g/(s\cdot cm^2\cdot hpa)$ ，第五类则达到 $-4e-07g/(s\cdot cm^2\cdot hpa)$ 。由此可见，来自西南偏南输送的水汽在六盘山地形作用下产生辐合抬升，形成低层辐合高空辐散的高低空配置。随着水汽通量辐合强度的增强以及辐合层的增厚，降水强度增大。此外，地形造成的水汽通量辐合，在强度较大时，可以扩展到地形的背风坡，产生更强的降水。总得来说，在夏季降水过程中，地形引起的低层辐合高空辐散的动力场对降水有明显的影响，地形的抬升作用有利于较强降水的产生和发展。

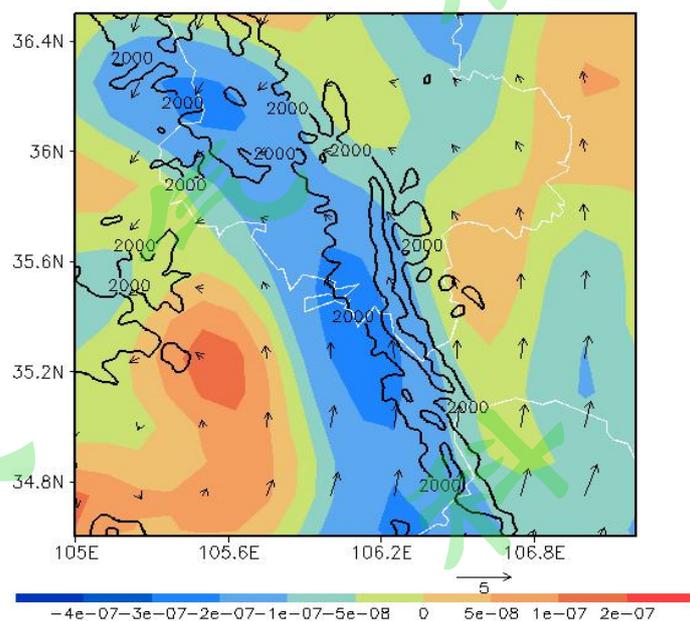


图 5 2010-2017 年间六盘山山区夏季较强降水过程中近地面 750hpa 高度处风场及水汽通量散度水平分布图。黑色实线为海拔 2000m 以上地形，白色细实线为省界，黑色矢量箭头表示风场（单位：m/s），填色图为水汽通量散度（单位： $g/(s\cdot cm^2\cdot hpa)$ ）

Fig.5 Horizontal distribution of water vapor flux divergence in the Liupan Mountain area at 750 hPa near the surface in the heavy summer precipitation during the period from 2010 to 2017. The black solid line indicates altitude over 2000m ASL, the white fine line represents the provincial boundary, the black vector arrows show the wind field(units : m/s), and the color map gives the water vapor flux divergence(units: $g/(s\cdot cm^2\cdot hpa)$)

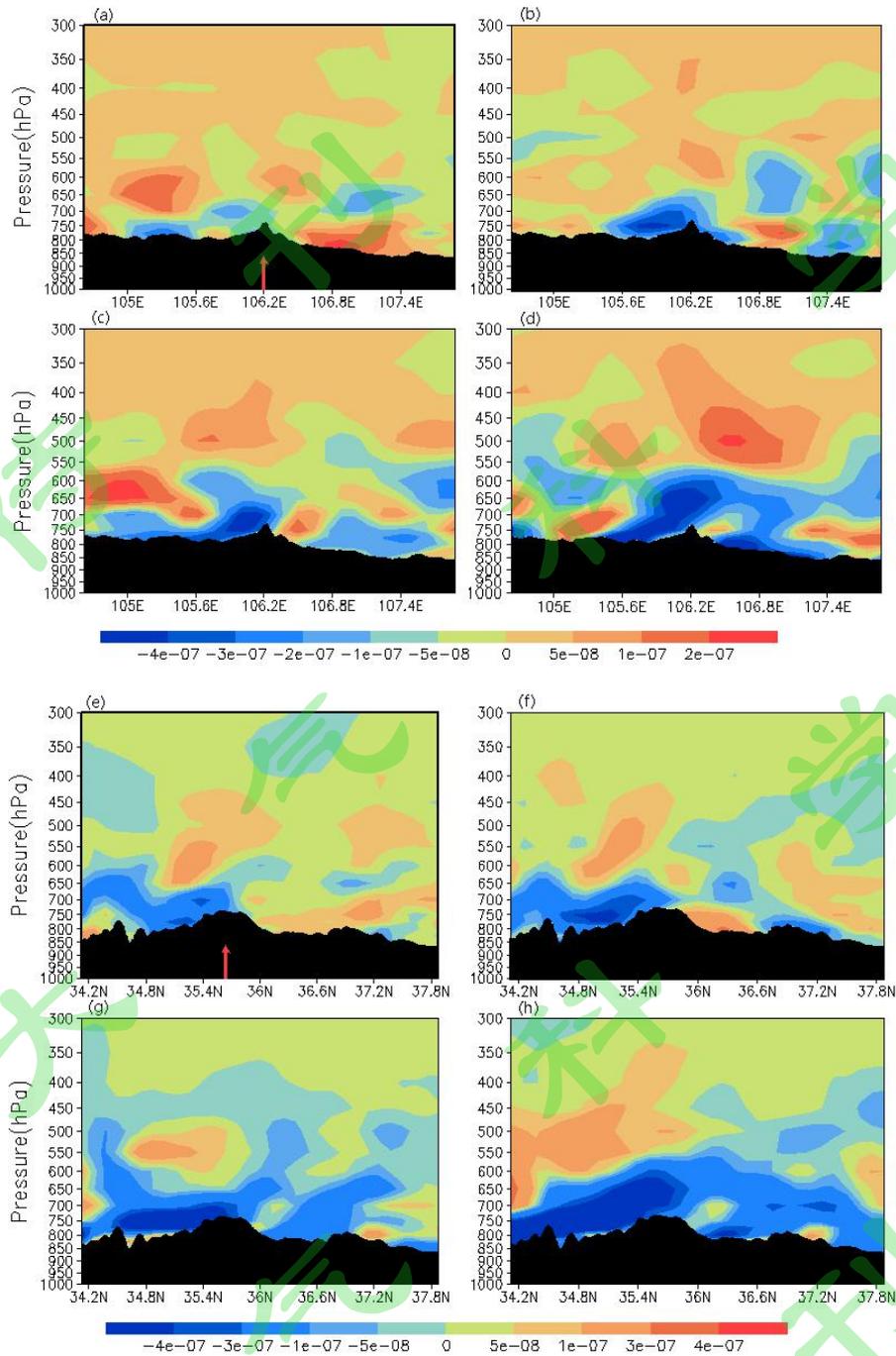


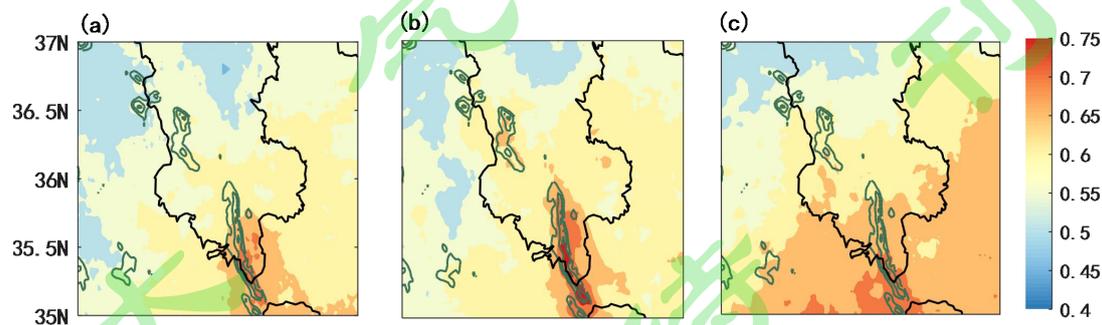
图6 2010-2017年间六盘山地区夏季降水过程中水汽通量散度(单位: $g/(s \cdot cm^2 \cdot hPa)$)垂直剖面图。其中(a)-(d)分别为第②-⑤类降水强度下的平均状况,沿 $35.5^\circ N$,横坐标为经度,纵坐标为等压面(单位: hPa)。(e)-(h)与(a)-(d)相同,但为沿 $106.2^\circ E$ 的剖面图。图中黑色阴影为地形,红色箭头指示六盘山顶所在位置,填色图为水汽通量散度

Fig. 6 Distribution of water vapor flux divergence in the Liupan Mountain area during the period from 2010-2017. (a)-(d) are the profiles along $35.5^\circ N$, the abscissa indicates longitude, and the ordinate represents the isobaric surface (units: hPa). (a) - (d) show the average condition of divergence in type ②-⑤, respectively, (e)-(h) are the same as (a)-(d), but for profiles along $106.2^\circ E$. The black shadow shows the terrain, the red arrow indicates the

location of the Liupan mountaintop, and the color shaded shows the moisture flux divergence(units: $g/(s \cdot cm^2 \cdot hpa)$)

5. 六盘山地区云参量特征

前面分析了六盘山地区水汽输送特征以及地形对水汽输送和降水的影响,结果表明较强的水汽通量辐合对应于较强的降水。这说明水汽是降水的物质基础,它通过气流的输送和动力场的辐合(辐散)等过程影响降水(王宝鉴等, 2004),然而水汽并不能够直接产生降水,要经过一个重要的环节,即水汽凝结形成云。通过对云中微观过程的影响可提高云系的降水效率,从而增加地面降水。因此,对云的参数特征的研究至关重要。MODIS 是搭载在 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪,每日两次经过六盘山上空,其中午后的过境的当地时间是 13:00-14:35,午后较易发生对流,有利于云的发生发展。利用 MODIS 遥感资料对 2010-2017 年的春、夏和秋三季的云参量做了统计分析(冬季云量较少在此不做分析)。图 7 中(a)-(c)为宁夏南部云量 CF(Cloud Fraction),CF 自东南向西北递减,沿着狭长的六盘山地区年平均 CF 达 70%左右,夏季可达 75%,且夏季高值区的走向和范围与地形非常接近。云水路径 CWP(Cloud Water Path)反映云中含水量大小,六盘山地区夏季平均值最大值可达 $400g/m^2$,明显大于周边地区(图 7(d)-7(f))。云光学厚度 COT(Cloud Optical Thickness)是描述云辐射特性最重要的参数,从原理部分的公式推导可以看出它与液水含量密切相关。COT 大于 30 的云也集中出现在夏秋季,尤其是夏季(图 7(h)),其分布与地形的分布相一致。对比夏季 CF 和 CWP(或 COT),发现 CF 较大值更多地集中在六盘山山脊,而 CWP(或 COT)的大值除了山脊外还出现在东坡。此外尽管山脉向北延伸 $36^\circ N$ 左右,但季节平均的云参量高值区主要分布在 $35-35.6^\circ N$ 之间,这可能与山脉对自南部、西南部输送至此的气流的阻挡和消耗作用有关。



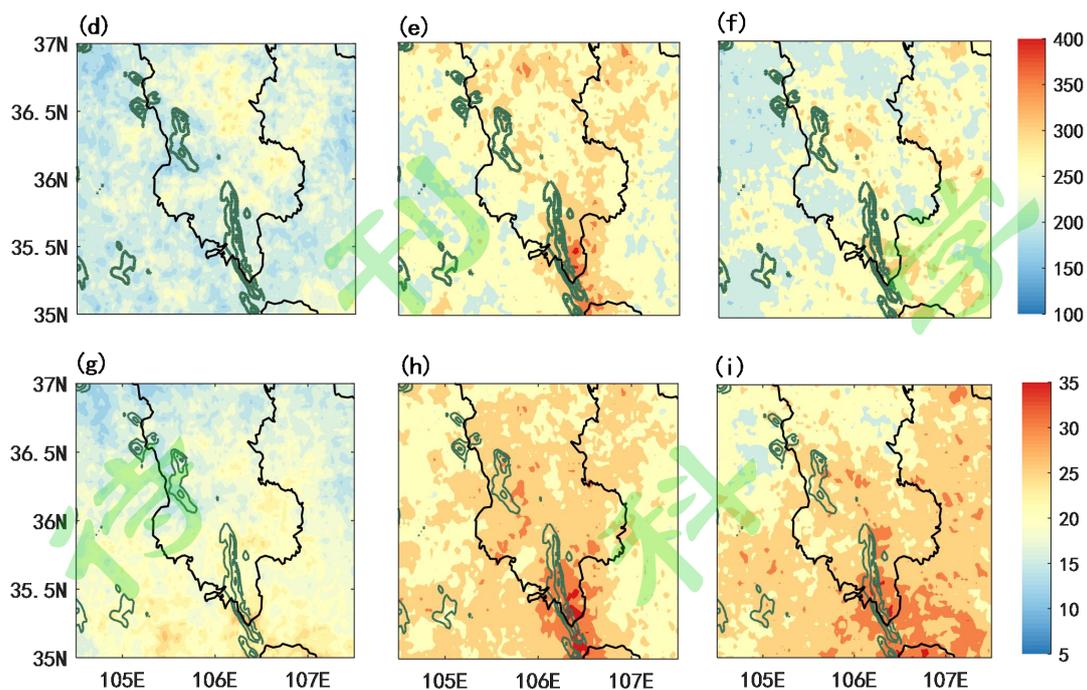


图7 六盘山地区春 (a, d, g)、夏 (b, e, h)、秋 (c, f, i) 三季云参量平均分布。(a)-(c)、(d)-(f)、(g)-(i)分别表示 CF、CWP (单位: g/m^2)、COT 分布。墨绿色实线为 2000m 以上海拔, 黑色实线表示省界

Fig.7 Distribution of MODIS cloud parameters in Liupan Mountain area during spring(a, d, g), summer(b, e, h) and autumn(c, f, i). (a) - (c), (d) - (f), (g) - (i) show distribution of CF, CWP(units: g/m^2) and COT, respectively. The dark green solid line indicates altitude over 2000m ASL, the black line is the provincial boundary

除对所有云进行季节平均外, 还对降水云系的分布分春、夏、秋季节进行了研究。图 8(a)和(b)分别为降水云系的 COT 和 CWP 纬向分布 (沿 35.5N, 山区范围约 105.6-106.7E, 山脊位于 106.2E 处)。春季降水云系 COT 和 CWP 均偏低, 夏、秋季数值相近且夏季偏高。夏、秋两季降水云系 COT 和 CWP 的相对高值区与山区范围有较好的对应关系, 其中夏季 CWP 高值区则主要对应着西坡, 这与所有云的季节平均状况 (图 7e) 有所区别。综上对云参量的统计发现, 虽然年降水量平均不足 600mm, 但在水汽丰沛且存在地形强迫抬升效应的条件下, 六盘山地区云水资源的确较周围丰富得多, 尤其在夏季。

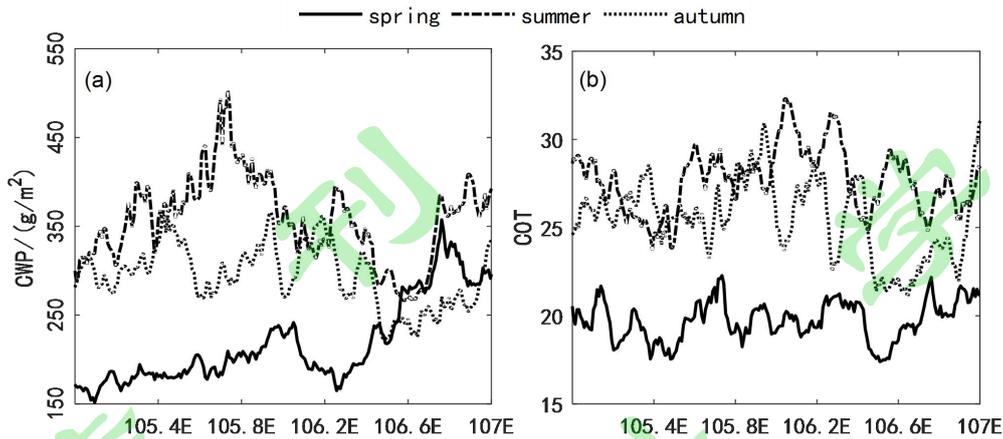


图 8 六盘山地区春、夏、秋季降水云系的 CWP (a) 和 COT (b) 的纬向分布 (沿 35.5° N, 单位: g/m^2)

Fig.8 Results of CWP(a) and COT (b) latitudinal distribution of precipitation clouds in spring, summer and autumn in Liupan Mountain area(along 35.5°N , units: g/m^2)

6. 六盘山地区夏季典型降水过程水凝物降水效率

前面研究结果说明,六盘山地区夏季产生降水的气流来自西南偏南,气流在地形影响下产生辐合,水汽通量辐合区与地形关系密切,较强的水汽通量辐合产生较强的降水;云量、云液态水路径、云光学厚度数值高且分布和范围与地形相似。也就是说,来自西南偏南的携带丰沛水汽的气流,在六盘山地形的作用下,产生了辐合和抬升过程,形成了较强的自然降水。对于人工增雨技术研究而言,此地区降水过程中的动力场、水汽场、云场和云参数都是需要了解的。此外,自然降水过程中云系的降水效率对于开发空中水资源而言也是关键参数。

对 2014 年 8 月到 2017 年 8 月共计 193 次降水天气过程中雷达回波移动方向的统计结果表明,91.6%的六盘山地区雷达回波从偏西向偏东方向移动,且主要集中在夏季。因此这里利用 FY-2G 相当黑体亮温等数据,选取夏季发生的、较典型的五次降水过程(见表 1),它们自偏西向偏东方向移动,为混合云系降水,具有一定代表性。对天气形势的分析表明该五次降水主要受高空槽、700hpa 风切变以及副高外围暖湿气流等的影响。

依据目前的观测资料来研究降水效率比较困难,因此利用数值模拟的结果来估算降水效率。利用 WRF 中尺度数值模式进行模拟,采用分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间间隔为 6 小时的 NCEP 再分析资料作为模式初始场和侧边界条件,双层双向嵌套方案中粗细网格分辨率分别为 9km 和 3km,主要物理过程参数设置为:Thompson 云微物理方案,RRTM 长波辐射方案,Dudhia 短波辐射方案,Kain-Fritsch 积云对流参数化方案(只在外层使用),修正的 MM5 Monin-Obukhov 近地面层方案,以及 YSU 边界层方案等。模拟域的设置如图 9 所示。

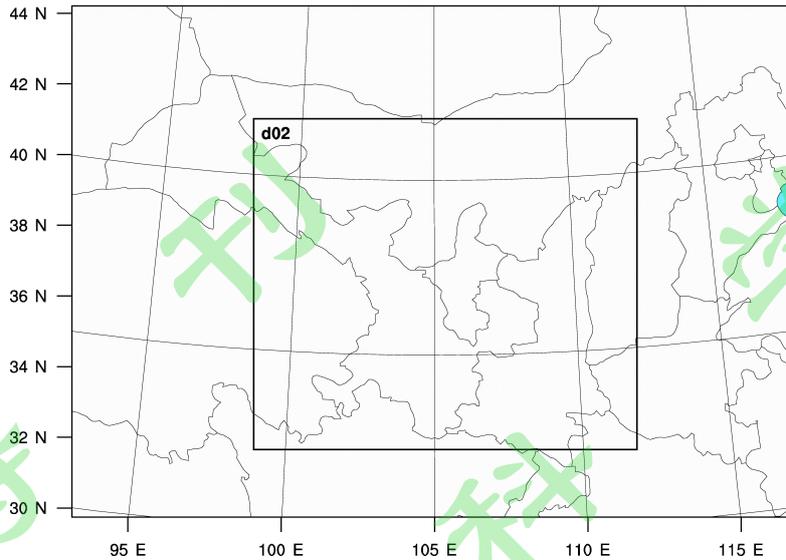


图 9. WRF 模式两层嵌套的模拟域示意图

Fig. 9 The double nested simulation domains used in WRF model

利用 WRF 数值模式模拟了选取的五次降水过程，将模拟的降水量与利用近 6000 个自动气象站逐小时雨量资料计得到的降水量进行对比，发现模拟结果能够较好地反映降水发生时间、范围和强度。为能够直观地比较模拟与实测降水的差异，对五次降水过程的降水量做平均，得到图 10。为定量评估模式对降水的模拟效果，分别计算五次过程中模拟的降水场与对应的自动气象站实测降水场的空间相关系数 R ，并计算均方根误差 RMSE（见表 1）。相关系数小于 0.4 为低度相关，处于 0.4-0.7 间为显著相关，处于 0.7 和 1 间为高度相关。由表 1 结果来看，五次模拟的降水场与实测的降水场存在显著或高度的空间相关性，且通过 0.001 的显著性检验。均方根误差则反映了模拟与实测值的偏差程度，平均为 5.5mm 左右，但仍能正确反映实际的降水强度。因此认为模式对降水的位置、强度等的模拟结果可信。

表 1. 五次降水过程天气系统以及模拟与实况降水场的空间相关系数 R 和均方根误差 RMSE (mm)

Table 1 Each weather system and moving direction of five precipitation processes and spatial correlation coefficient R and root mean square error RMSE(mm) between simulated and real precipitation fields.

个例日期	天气系统	系统移向	R	RMSE (mm)
2016 年 6 月 22-23 日	500hpa 高空槽+700hpa 风切变	W-E	0.820	6.228
2017 年 6 月 3-4 日	500hpa 高空槽+700hpa 风切变	W-E	0.759	3.939
2017 年 7 月 26-27 日	冷涡+副高西北侧西南暖湿气流	W-E	0.664	5.320
2017 年 8 月 6-7 日	高原槽+副高北侧暖湿气流	WN-ES	0.709	7.801

注：表1中R值均通过0.001显著性检验

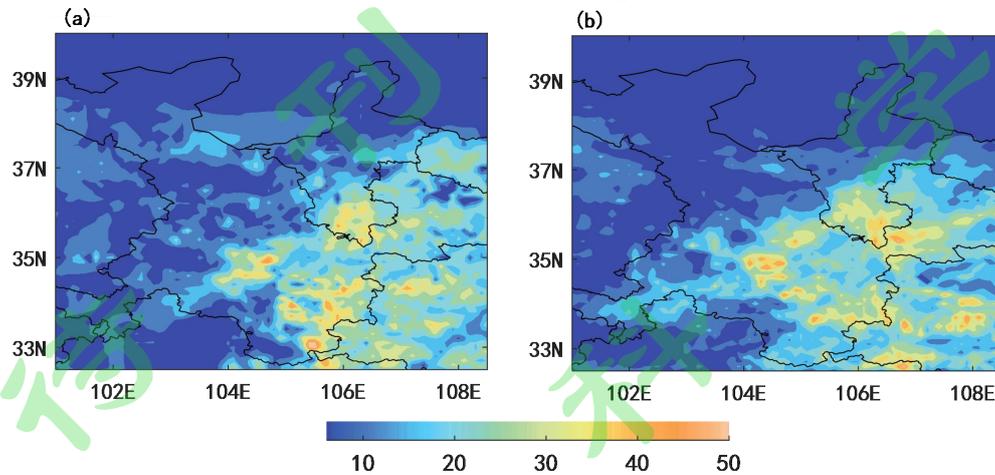


图10. 五次降水过程利用自动气象站雨量资料得到的降水量平均值(a)和WRF模式模拟的降水量平均值(b)
(单位: mm)

Fig. 10 Mean precipitation obtained from automatic meteorological stations(a) and mean simulated precipitation by WRF model (b) in five precipitation processes.(units: mm)

根据周非非等(2010)和陶玥等(2015)利用的水分平衡和转化效率分析方法,由显示云微物理方案中水汽、云水、雨水、冰晶、雪、霰的比含水量方程得到总水凝物(包括云水、雨水、冰晶、雪和霰)和总水物质(包括水汽和水凝物)的平衡等式:

凝结量+凝华量+总水凝物输入量-蒸发量-升华量-总水凝物输出量-降水量-总水凝物内留量变化量(最终水凝物内留量-初始水凝物内留量)=0 (4)

总水物质输入量+地表蒸发量-总水物质输出量-降水量-总水物质内留量变化量(最终水物质内留量-初始水物质内留量)=0 (5)

将水凝物总量定义为:水凝物总量=水汽凝结量+凝华量+水凝物初始内留量+水凝物输入量(6)

水凝物降水效率定义为:水凝物降水效率=降水量/水凝物总量(7)。

利用FY-2G的相当黑体亮温数据判断云体移入和移出研究区域的大致时间来确定评估时段后,对模式输出量进行时空积分得到公式(6)-(7)中各物理量,估算得到六盘山区域在评估时段内的水凝物降水效率(注:在总的水物质收支平衡方程(5)中,经时空积分后等式左边所有项的代数和虽然不等于0,但该值占等式左边所有正值项之和的比例均较低,在五次降水过程中分别为0.53%、0.17%、1.02%、1.15%、0.42%,由于这是对六盘山区域

在整个评估时段的时空积分的结果，计算的水物质收支出现的偏差在可接受的范围内，认为本文在研究的区域和时段内水物质收支基本上达到了平衡，结果可信。表 1 为五次降水过程中混合降水云系的移向以及评估时段内六盘山区域的水凝物总量和水凝物降水效率。可见夏季当系统由偏西向偏东方向移经六盘山区域、且降水云系为混合云系时，六盘山区平均水凝物降水效率约为 48.1%。同时利用 ERA5 再分析数据（水平分辨率取 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ，包括风场、水汽、各水凝物含量等物理量）、采用同样的计算方法估算得到该五次个例中研究区域的平均降水效率约为 44%，结果较为相近。计算云中水凝物降水效率的文献目前还较少，且由于不同地区的地理环境、气候条件和降水机制等不尽相同，因此不便将前人的结果与本文计算的结果直接进行比较，但作为参考仍具有一定意义；周非非等（2010）和陶玥等（2015）对发生在不同地区的个例进行计算得到的水凝物降水效率大小分别为 69.7%（河南）和 44.9%（北京）；Sui et al. (2007) 定义的降水效率 CMPE2 与本文定义的水凝物降水效率相似，本文选取的五次过程降水强度在 3mm/h 以上，而在其研究结果中，3mm/h 以上强度的降水对应的降水效率（CMPE2）范围在 45%–90% 之间。因此就这一结果来说，本文中五次过程的降水效率均处于比较低的水平区间。

表 2. 利用 WRF 模拟结果估算五次降水过程中评估时段内六盘山地区水凝物总量和降水效率

Table 2 Total hydrometeor contents and precipitation efficiency in Liupan Mountain area during five assessment periods estimated by results of WRF model

个例日期	评估时段 (UTC)	水凝物总量 (10^{11} kg)	水凝物降水效率 (%)
2016 年 6 月 22-23 日	6 月 22 日 12 时-次日 02 时	5	49.5
2017 年 6 月 3-4 日	6 月 4 日 00-12 时	2.9	50.2
2017 年 7 月 26-27 日	7 月 26 日 15 时-次日 03 时	1.5	47
2017 年 8 月 6-7 日	8 月 6 日 20-次日 08 时	2.1	53.9
2017 年 8 月 21-22	8 月 21 日 16-次日 02 时	4.6	40.1

为对比六盘山与周边地区的水凝物降水效率，还选定 $104-108^{\circ}$ E, $34-38^{\circ}$ N 区域范围，将其分为每 2500km^2 ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) 一个子评估区域，利用上述模式模拟数据和计算方法估算得到五次过程中该区域范围内平均的水凝物降水效率分布（图 11），可见六盘山地区平均水凝物降水效率较周围低海拔地区稍高，即山区更易产生降水，但低于其西侧的青藏高原东部边坡（该处海拔与六盘山地区相近）。由此结果看来在六盘山区域空中还有较大部分的水凝物未能成为降水，具有一定的开发空间。

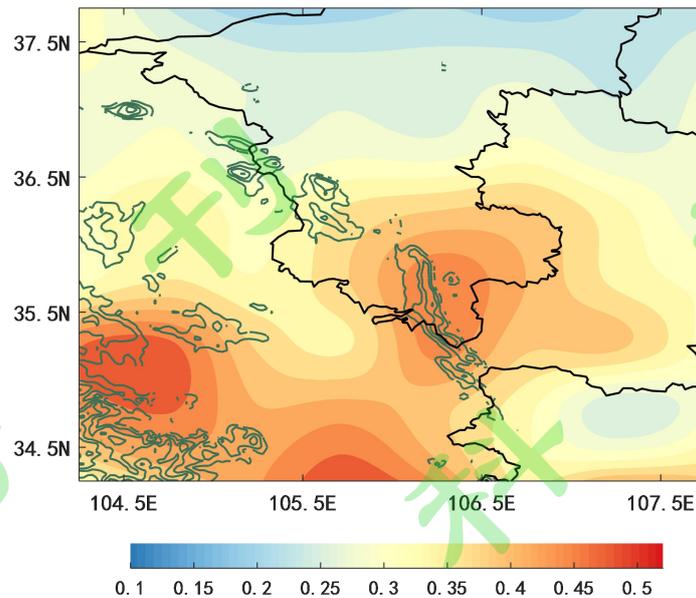


图 11 利用 WRF 模拟结果估算五次降水过程中评估时段内研究区域水凝物降水效率的平均分布图。墨绿色实线表示海拔高于 2000m；黑色实线表示省界

Fig.11 Average distribution of the hydrometeor precipitation efficiency in study area of the five assessment periods estimated by results of WRF model. The dark green solid line indicates altitude over 2000m ASL and the black line represents the provincial boundary

7. 结论和讨论

本文利用目前国际上较高时空分辨率的 ECMWF ERA5 再分析数据集、MODIS 数据和 WRF 数值模拟结果对六盘山地区空中水资源分布特征以及夏季典型降水过程的降水效率进行了统计分析，为今后开发六盘山地区空中水资源做了相关工作。初步结论如下：

- (1) 受亚洲季风影响，夏季来自偏南风的水汽通量为六盘山地区提供了丰沛的水汽，山区对应相对湿度高值区，午后达 75%以上。
- (2) 春、夏、秋三季午后山区上空云量较周围偏多，夏季云量达 75%；夏季平均云水路径和云光学厚度均明显大于周边地区；夏季降水云系的云水路径和云光学厚度的高值区也主要出现在山区。
- (3) 六盘山地形对夏季降水有明显影响。地形产生的水汽通量辐合区走向和范围与山区一致。山区低层辐合高空辐散的配置产生的动力作用有利于降水的发生和发展。在降水强度达 5mm/日以上的过程中，地形对水汽的辐合抬升作用明显，且辐合越强时降水强度越大。

(4) 夏季当系统由偏西向偏东方向移经六盘山区域、降水云系为层积混合云时，六盘山地区水凝物的降水效率平均为 48.1%左右。因此空中还有较大部分的水凝物未能成为降水，仍具有一定的开发空间。

六盘山地形走向为西北-东南向，夏季来自西南偏南的水汽输送在地形作用下形成水汽通量辐合，和周边相比，形成的云量、云的液态水路径和光学厚度的数值都较高，动力场、水汽场和云场及云参数相对而言有利于降水的形成，再考虑到降水量不足、夏季混合云云系的降水效率平均不足百分之五十，可在这个地区进一步开展人工增雨相关研究。本研究仅了解了六盘山地区降水的形成的动力场、水汽场、云场和降水的一般情况，今后可以将结合直接探测和遥感资料与模式结合，深入了解云的微物理结构、降水形成的微观过程和动力机制，分析影响降水效率大小的因素，进而研究人工增雨条件的评估技术和催化作业技术。

参考文献 (References)

- 程菲, 杨军. 2016. 东天山迎风坡与高海拔区域降水效率对比研究 [J]. 科学技术与工程, 16(22): 12-22. Cheng Fei, Yang Jun. 2016. The Comparative Study on the Precipitation Efficiency between Windward Slope and High Altitude Region in the Eastern Tianshan Mountains [J]. Science Technology and Engineering (in Chinese), 16(22): 12-22.
- Barth E L. 2010. Cloud formation along mountain ridges on Titan [J]. Planetary and Space Science, 58: 1740 - 1747.
- Bendix J, Rollenbeck R, Palacios E, 2010. Cloud detection in the Tropics—a suitable tool for climate-ecological studies in the high mountains of Ecuador [J]. International Journal of Remote Sensing, 25(21): 4521-4540.
- Carrasco E, Avila R, Erasmus A. 2017. A Satellite Survey of Cloud Cover and Water Vapor in the Southwestern USA and Northern Mexico [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 129: 1-22.
- Durán L, Rodríguez-Fonseca B, Yagüe C et al. 2015. Water vapor flux patterns and precipitation at Sierra de Guadarrama mountain range (Spain) [J]. International Journal of Climatology, 35: 1593 - 1610.
- ECMWF. 2017. ERA5 data documentation [EB/OL]. European Centre for Medium-range Weather Forecast. <https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/ERA5+data+documentation> [2019-03-04].
- Giovanettone J P, Barros A P. 2009. Probing Regional Orographic Controls of Precipitation and Cloudiness in the Central Andes Using Satellite Data [J]. Journal of Hydrometeorology, 10, 167-182.
- 洪延超, 周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究 [J]. 大气科学, 30(5): 913-926. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2006. The Study of Evaluation of Potential of Artificial Precipitation Enhancement in Stratiform

- Cloud System[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 913-926.
- Kawase H, Takeuchi Y, Sato T et al. 2006. Precipitable Water Vapor around Orographically Induced Convergence Line[J]. SOLA, 2, 25-28.
- 李宏宇, 王华, 洪延超. 2006. 锋面云系降水中的增雨潜力数值研究 [J]. 大气科学, 30(2): 341-350. Li Hongyu, Wang Hua, Hong Yanchao. 2006. A Numerical Study of Precipitation Enhancement Potential in Frontal Cloud System[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(2): 341-350.
- 林志强, 唐叔乙, 何晓红, 等. 2011. 青藏高原汛期水汽输送特征与降水异常 [J]. 气象, 2011, 37 (8): 984-990. Lin Zhiqiang, Tang Shuyi, He Xiaohong et al. 2011. Features of Water Vapor Transfer in Rainy Season and Their Relations to Rainfall Anomalies over Tibetan Plateau[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 2011, 37 (8): 984-990.
- 刘洪利, 朱文琴, 宜树华, 等. 2003. 中国地区云的气候特征分析[J]. 气象学报, 61 (4): 466-473. Liu Hongli, Zhu Wenqin, Yi Shuhua et al. 2003. Climatic Analysis of The Cloud Over CHINA[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (4): 466-473 (in Chinese).
- 刘玉芝, 常姝婷, 华珊, 等. 2018. 东亚干旱半干旱区空中水资源研究进展[J]. 气象学报, 76 (3): 485-492. Liu Yuzhi, Chang Shuting, Huashan et al. 2018. A review of the research on atmospheric water resources over arid and semi-arid regions of East Asia[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76 (3): 485-492 (in Chinese).
- Ma X G, Jia W X, Zhu G F et al. 2018. Stable isotope composition of precipitation at different elevations in the monsoon marginal zone[J]. Quaternary International, 493:86-95.
- 石晓兰, 杨青, 姚俊强, 等. 2016. 基于 ERA-Interim 资料的中国天山山区云水含量空间分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 10(2): 50-56. Shi Xiaolan, Yang Qing, Yao Junqiang et al. 2016. The Spatial Distribution of Water Vapor

- and Cloud Water Content over Tianshan Mountains, China Based on ERA-Interim Dataset[J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 10(2):50-56.
- Smith B L, Yuter SE. 2009. Water Vapor Fluxes and Orographic Precipitation over Northern California Associated with a Landfalling Atmospheric River[J]. Mon. Weather Rev. /monthly weather review, 138, 74-100.
- Sumargo E and Cayan D R. 2017. Variability of Cloudiness over Mountain Terrain in the Western United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 18:1227-1245.
- Sui C H, Li X F, Yang M J et al. 2007. On the Definition of Precipitation Efficiency[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 64:4506-4513.
- Sun B L, Zhang X, Sun K. 2016. Study on Potential and Countermeasures of Artificial Precipitation Enhancement in Fuxin Region[J]. Meteorological and Environmental Research, 7(6):13-21, 28.
- 陶玥, 李军霞, 党娟, 等. 2015. 北京一次积层混合云系结构和水分收支的数值模拟分析[J]. 大气科学, 39(3):445-460. Tao Yue, Li Junxia, Dang Juan et al. 2015. A numerical study on precipitation process and moisture budget of stratiform and embedded convective cloud over Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(3):445-460.
- Urraca R. 2018. Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data[J]. Solar Energy, 164:339-354.
- Vondou D A. 2012. Spatio-Temporal Variability of Western Central African Convection from Infrared Observations[J]. Atmosphere, 3:377-399.
- 王宝鉴, 黄玉霞, 何金海, 等. 2004. 东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系[J]. 高原气象, 23(6):912-918. Wang Baojian, Huang Yuxia, He Jinhai et al, 2004. Relation between Vapour Transportation in the Period of East Asian Summer Monsoon and Drought in Northwest China[J]. Plateau

Meteorology (in Chinese), 23 (6):912-918.

- 王可丽, 江灏, 赵红岩. 2005. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送 [J]. 水科学进展, 16 (3): 432-438. Wang Keli, Jianghao, Zhao Hongyan. 2005. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China [J]. Advances In Water Science (in Chinese), 16 (3): 432-438.
- Wang X J, Pang G J, Yang M X, et al. 2017. Precipitation changes in the Qilian Mountains associated with the shifts of regional atmospheric water vapour during 1960 - 2014 [J]. Int J Climatol, 38:4355 - 4368.
- 杨辉, 宋正山, 朱抱真. 1998. 1979年5月东南亚夏季风的建立和青藏高原的作用 [J]. 大气科学, 22 (6):858-866. Yang Hui, Song Zhengshan, Zhu Baozhen. 1998. Onset of the Southeast Asia Summer Monsoon in 1979 and the Effect of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (6):858-866.
- 杨瑜峰. 2014. 中国西北东部近 50a 降水异常分布及变化特征 [J]. 干旱气象, 32 (5):701-705. Yang Yufeng. 2014. Characteristics of Precipitation Anomalies in the Last 50 Years in Eastern Part of Northwest China [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 32 (5):701-705.
- 宜树华, 刘洪利, 李维亮等. 2003. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析 [J]. 气象, 29 (1): 7-11. Yi Shuhua, Liu Hongli, Li Weiliang et al. 2003. Spatial and Temporal Distributions of Cloud over Northwest of China [J]. Meteorological Monthly, 29 (1): 7-11.
- 袁野, 王成章, 蒋年冲, 等. 2005. 不同云天条件下水汽含量特征及其变化分析 [J]. 气象科学, 25 (4):394-398. Yuan Ye, Wang Chengzhang, Jiang Nianchong et al. 2005. Analyzing the Character and the Change of Water Vapor Under the Different Cloud Weather [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 25 (4):394-398.
- 张良, 王式功, 尚可政等. 2007. 祁连山区空中水资源研究 [J]. 干旱气象, 25 (1): 14-20. Zhang Liang, Wang Shigong, Shang Kezheng et al. 2007. Research

on Vapor and Precipitation Resources over the Qilian Mountain Area[J]. *Arid Meteorology*(in Chinese), 25 (1): 14-20.

张扬, 李宝富, 陈亚宁. 2018. 1970—2013年西北干旱区空中水汽含量时空变化与降水量的关系[J]. *自然资源学报*, 33 (6): 1043-1055. Zhang Yang, Li Baofu, Chen Yaning, 2018. *Journal of Natural Resources*(in Chinese), 33 (6): 1043-1055.

赵光平, 姜兵, 王勇等. 2017. 西北地区东部夏季水汽输送特征及其与降水的关系 [J]. *干旱区地理*, 40 (2): 239-247. Zhao Guangping, Jiang Bing, Wang Yong et al. 2017. Characteristics of summer water vapor transport in the eastern Northwest China and their relationships with precipitation [J]. *Arid Land Geography*(in Chinese), 40 (2): 239-247.

周非非, 洪延超, 赵震. 2010. 一次层状云系水分收支和降水机制的数值研究 [J]. *气象学报*, 68 (2): 182 - 194. Zhou Feifei, Hong Yanchao, Zhao Zhen. 2010. A numerical study of the moisture budget and the mechanism for precipitation for a stratiform cloud system [J]. *Acta Meteorologica Sinica*(in Chinese), 68 (2): 182 - 194.

周晋红, 李丽平, 武捷. 2011. 山西春季典型干湿年份水汽输送特征差异[J]. *气象*, 37 (10): 1270-1276. Zhou Jinhong, Li Liping, Wu Jie, 2011. Different Characteristics of Water Vapor Transport Between the Typical Drought and Wet Years of Spring in Shanxi Province [J]. *Meteorological Monthly*(in Chinese), 37 (10): 1270-1276.

朱晓炜, 杨戩领, 崔洋等. 2013. 1961—2009年西北地区东部降水时空分布及成因 [J]. *干旱区研究*, 30 (6): 1096-1099. Zhu Xiaowei, Yang Jianling, Cui Yang et al. 2013. Spatiotemporal Distribution and Formation Causes of Precipitation in the East of Northwest China during the Period of 1961-2009 [J]. *Arid Zone Research*(in Chinese), 30 (6): 1096-1099.

Zhang Q, Zhang J, Sun G W et al. 2008. Research on Water-Vapor Distribution in the Air over Qilian Mountains[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 22(1): 107-118.

Zhou Y S, Li X F, Gao S T. 2014. Precipitation efficiency and its relationship to physical factors[J]. Chinese Physics B, 23(6):064210.

刊

第

六

卷

期

第

六

卷

期

刊

六

卷