

近 30 年六盘山东与西坡降水及空中水汽条件 差异特征分析

邓佩云^{1,2} 桑建人^{1,2*} 杨萌³ 穆建华^{1,2} 常倬林^{1,2} 曹宁^{1,2}

(1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002;

2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081; 3 成都信息工程大学, 成都 610225)

摘要 利用 1989—2018 年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-Interim 高时空分辨率($0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$)再分析资料以及气象站降水观测资料,对六盘山区近 30 年东坡与西坡降水及空中水汽条件差异特征进行诊断分析。结果表明:①近 30 年六盘山区大气可降水量、700 hPa 比湿、水汽通量与降水量空间分布特征较为一致,呈东高西低、南大北小的特征。②六盘山区的水汽主要来源于低层孟加拉湾、南海及印度洋暖湿气流的水汽输送。③六盘山区的水汽输送特征表现为 700 hPa 和 750 hPa 以西南风水汽输送为主导,750 hPa 以下六盘山东侧为东南风迎风坡,受地形强迫的影响,东南暖湿气流在东坡抬升。④六盘山系东坡存在高层辐散、低层辐合或弱辐散的动力场配置,加之地形、东亚季风与天气系统之间相互作用共同影响,造成六盘山区降水及空中水汽条件呈东高西低的分布特征。初步的研究结果可揭示区域空中水汽条件的分布特征,为该地云水资源开发提供可参考性依据。

关键词 六盘山区;大气可降水量;水汽通量;水汽通量散度;风场;地形

中图分类号: P467 **DOI**: 10.19517/j.1671-6345.20200061 **文献标识码**: A

引言

在全球变暖的大背景下,我国区域经济发展和有限的环境资源禀赋之间的矛盾日益突出,以干旱灾害为代表的生态问题严重制约着当地社会的发展,其重要性愈加受到政府、公众和学界的关注^[1-2]。西北干旱区深居亚欧大陆腹地,是我国水资源最短缺的地区之一,干旱缺水的生态特点造成西北地区土地贫瘠,灾害频发,对农业和区域生态环境的影响巨大^[3-4]。中国西北地区降雨成因较复杂,水汽含量相对较低,姚俊强等^[5]探讨了西北干旱区的气候变化特征及其对生态环境的影响;郑丽娜^[6]利用近 55 年中国西北地区气象站点的日降水数据以及再分析资料,揭示了该地区夏季降水的时空演变特征;陈楠等^[7]利用 NCEP/NCAR 月均再分析资料,初步探讨了宁夏水汽通量的年际、年代际演变特征以及不同区域和不同季节的分布特征。已有

研究表明^[8],西北地区水汽含量随海拔高度的升高而减少,降水效率随海拔高度的升高而增大,其来源主要为西风带水汽输送,少量来自于西西伯利亚,王宝鉴等^[9]研究表明东部季风区是西北地区大气水汽含量最丰富的地区,西风带区次之,高原区最少,巩宁刚等^[10]研究发现,近 38 年西北腹地的祁连山区大气水汽含量呈东南多、西北少的空间分布特征,且随海拔的升高而逐渐减少,整层大气水汽主要集中在 5000 m 以下,并揭示了该地区空中水资源的开发潜力;祁连山区水汽输送主要受西风带、偏南季风与东亚季风的共同影响^[11-12]。此外,研究表明,山地上空的云量较周边区域偏多^[13],空气的上升运动在较低海拔山脉也能产生对流云^[14]。

六盘山作为西北地区东部的主要山脉,位于青藏高原东部,黄土高原的西北部,六盘山区是中国气象局精准扶贫行动计划示范区,是重要的水源涵养地及雨养农业区,也是海洋暖湿气流进入西北内陆

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

西北区域人影建设研究试验项目(RYSY201904)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0104)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2019BEG03001)、国家自然科学基金面上项目(41775135)共同资助

作者简介:邓佩云,女,1993 年生,硕士,助理工程师,主要从事大气物理及人工影响天气工作,Email: 734785297@qq.com

收稿日期:2020 年 2 月 28 日;定稿日期:2020 年 6 月 8 日

* 通信作者,Email:sangjr@126.com

的门户,维系西北内陆地区空中水汽输送的关键区域,担负着陕、甘、宁 3 省区的供水重任,然而其干旱少雨、灾害性天气多、区域降水差异大等气候特征严重制约着当地经济发展。空中水汽条件的分布以及水汽的输送对山区降水至关重要^[15],但六盘山区针对此方面还鲜有研究,因此,明晰该区域空中水汽条件特征及其成因,可为区域降水预测、农业气象评估以及人工影响天气等提供科学依据,具有重要的现实意义和科学价值。

为此,本文基于六盘山区气象站逐日降水量观测资料,对六盘山区 1989—2018 年的降水特征进行分析,并基于同期的 ERA-Interim 高分辨率再分析资料对包括六盘山在内的西北地区东部的空中水汽条件特征进行分析,进一步探究六盘山区的水汽来源以及东西坡降水和空中水汽条件的差异特征及其成因,以期为后续云和降水物理过程参数化方案等相关研究和应用提供可参考性依据。

1 资料方法及研究区概况

1.1 资料方法

使用的资料包括 1989—2018 年期间六盘山区的气象站(西吉站、隆德站、六盘山站、泾源站、固原站、彭阳站)逐日降水量观测资料以及同期 ECMWF 的 ERA-Interim 高分辨率再分析资料(10°~70°N, 30°~160°E)。ERA-Interim 再分析资料时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 0.125°×0.125°,垂直分为 16 层等压面(本文选取 1000~500 hPa)。具体包括:大气可降水量、位势高度场、风场、相对湿度、表面气温、海平面气压场和垂直速度等。

单位气柱内整层水汽通量^[16],垂直积分水汽通量^[16],某层水汽通量散度^[17]及大气可降水量^[18]的计算公式如下:

$$Q = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} Vq dp \quad (1)$$

$$Q_u = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} qu dp \quad (2)$$

$$Q_v = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} qv dp \quad (3)$$

$$D = -\frac{1}{g} \nabla \cdot (Vq) \quad (4)$$

$$W = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q dp \quad (5)$$

式中, Q 表示水汽通量; Q_u 表示纬向水汽通量, Q_v 表示经向水汽通量,单位: $g/(s \cdot hPa \cdot cm)$; D 表示某层的水汽通量散度,单位: $g/(s \cdot hPa \cdot cm^2)$; W 表示大气可降水量,单位: mm ; q 为各层大气的比湿,单位: g/kg ; V 为风速矢量,其中 u 为纬向风, v 为经向风,单位: m/s ; p 为气压,其中 p_s 、 p_t 分别为大气柱下界气压和上界气压,单位: hPa ; g 为重力加速度,单位: m/s^2 。

1.2 六盘山区地理及气候特征

六盘山位于宁夏南部,为近似南北走向(与南北方向夹角近 30°)的连续山脉(西北接青藏高原北麓祁连山东部余脉,东南接秦岭西部的余脉),山地东坡陡峭,坡度为 26°~60°,坡向以东—东北为主,西坡和缓,坡度为 20°~35°,坡向以西南为主。区域内以六盘山为南北脊柱,范围约在 105.2°~107°E, 34.7°~36.5°N 内,海拔高度大于宁夏的其余地区,大部分在 1500~2200 m,山脊海拔高度在 2500 m 以上,最高峰米缸山达 2942 m。本文以六盘山站为基准,向东至宁夏东部边缘范围为六盘山东坡区域,即 106.2°~107°E, 34.7°~36.5°N,向西至宁夏西部边缘范围为六盘山西坡区域,即 105.2°~106.2°E, 34.7°~36.5°N(图 1)。表 1 为六盘山区 6 个气象站基本情况,其中,西吉、隆德站位于六盘山的西坡,泾源、固原、彭阳站位于六盘山的东坡。

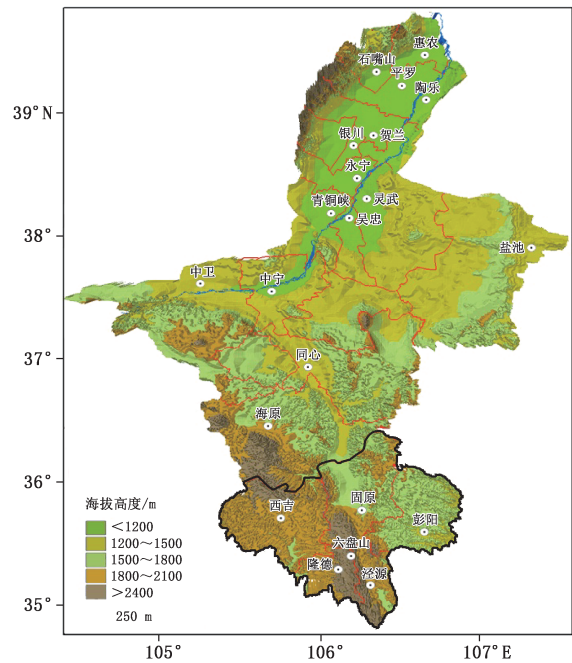


图 1 宁夏地区地形
(黑色加粗区域为六盘山区)

六盘山区气候属中温带半湿润向半干旱过渡带,具有大陆性和海洋季风边缘气候特点,春低温少雨,夏短暂多雹,秋阴涝霜早,冬严寒绵长,区域年均降水量高于宁夏的引黄灌溉区与中部干旱带,但降水仍为匮乏且差异大,其中东坡年均降水量大于西坡。具有雨雾日数多、水汽条件充沛、对流条件以及垂直扩散上升条件好、催化条件适宜等特征,人工增雨潜力较大,其特殊的地理优势与气候特征为西北山区气候的研究提供了天然的实验场。

表 1 六盘山区 6 个气象站基本情况

站名	东经	北纬	海拔高度	距六盘山站距离
			m	km
西吉	105.72°	35.63°	1916.5	43.83
隆德	106.12°	35.61°	2078.6	9.36
六盘山	106.20°	35.67°	2845.2	0.00
泾源	106.32°	35.50°	1984.7	21.30
固原	106.27°	36.00°	1752.8	37.55
彭阳	106.64°	35.85°	1496.0	31.27

2 六盘山区近 30 年降水量与空中水汽条件特征

2.1 六盘山区近 30 年降水量时空分布特征分析

基于 1989—2018 年六盘山区降水量距平(图 2)对研究区降水量的年际变化特征进行分析,历年降雨量变化表现为 1990、1992、2003、2005、2013、2014、2017、2018 年为 8 个雨量偏多年;1989、1991、1993、1994、1995、1996、1997、1998、1999、2000、2001、2002、2004、2006、2007、2008、2009、2010、2011、2012、2015、2016 年为 22 个雨量偏少年,分析期内六盘山区降水量以降水偏少年居多,降水偏多年次数不多但变幅较大,最高年份为 2013 年,年降水量为 771.54 mm。由六盘山区近 30 a 的各站年均降水量统计(图 3)可知,降水量分布呈现显著的南多北少和东高西低的空间分布特征,六盘山区年均降水量为 520.09 mm,其中东坡年均降水量为 531.15 mm,西坡年平均降水量为 456.49 mm,六盘山区逐年的降水量东坡大于西坡的年份高达 90%。进一步分析,六盘山区暴雨日数共计 72 d,大雨为 483 d,中雨为 1964 d,小雨日数为 10676 d,各类降雨的日数的空间分布特征也均表现为六盘山东坡高于西坡的空间分布特征。此外,六盘山区降水量的季节变化特征表现为降水过程主要集中在夏季。

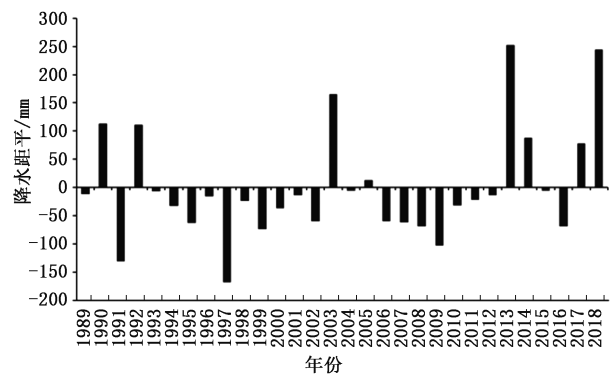


图 2 1989—2018 年六盘山区降水量距平

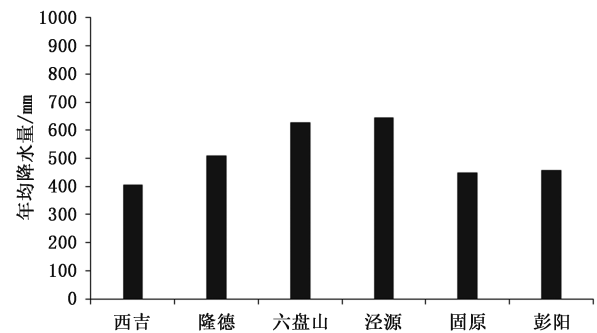


图 3 1989—2018 年六盘山区各站年均降水量

2.2 六盘山区近 30 年空中水汽条件分布特征

大气可降水量(W)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,是评估区域空中水资源的重要指标。为明晰六盘山区近 30 年空中水汽条件的分布特征,利用 ERA-Interim 再分析资料计算 1989—2018 年包括六盘山区在内的西北地区东部(33°~37°N, 103°~109°E)的大气可降水量分布(图 4a),可以看出,六盘山区近 30 年年均大气可降水量达 12~14 mm,呈东南向西北递减趋势,区域内的大气年均可降水量显著高于宁夏中北部地区,区域平均大气可降水量为 12.89 mm,其中六盘山东坡年均区域平均大气可降水量为 13.43 mm,而西坡仅为 12.46 mm。基于 ERA-Interim 再分析资料与站点资料有很好的-一致性,进一步将再分析资料插值到六盘山区的各站点中,并求出六盘山区各站点近 30 年的年均大气可降水量(图 4b),可以看出,近 30 年的年均大气可降水量在六盘山系东西坡具有显著的差异,尤其以东坡的泾源辖区为代表的区域各站点,最大年均大气可降水量高达 12.94 mm 以上,而西坡的隆德

各站点的年均可降水量显著低于东坡,最大年均大气可降水量在 12.59~12.94 mm 之间,这与实际降水量的空间分布差异特征一致。进一步分析表明,六盘山区大气可降水量的季节变化表现为夏季最

大、春秋季节次之、冬季最少(图略),其年际变化为 80—90 年代呈降低趋势,90 年代后呈上升趋势^[7],2006 年后呈下降趋势^[18],其时空变化规律与田磊等^[19]利用气象观测站资料的验证结果相一致。

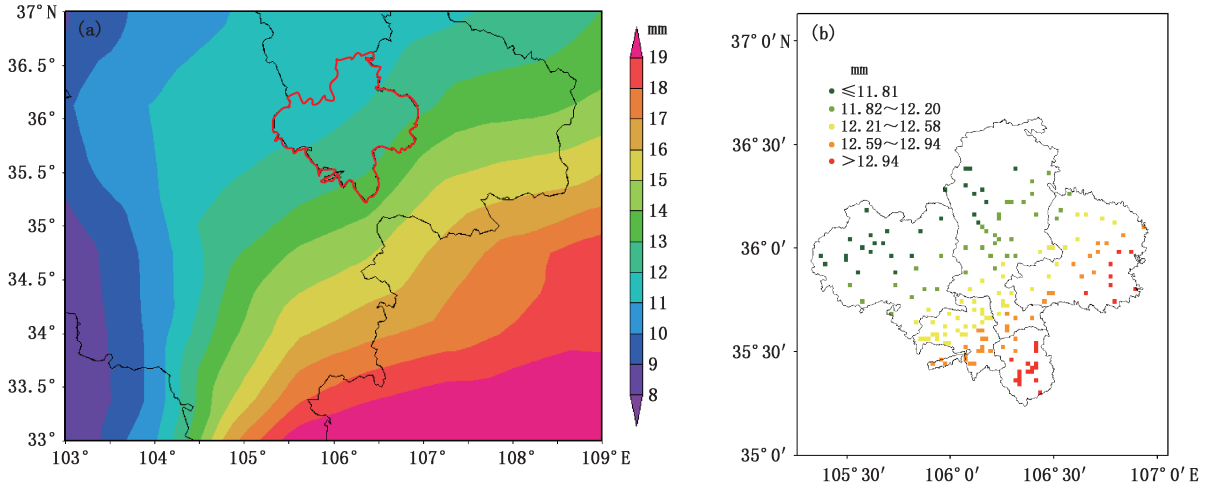


图 4 1989—2018 年西北地区东部(a)和六盘山区各站点(b)年均大气可降水量分布

比湿又称水汽含量(q),指湿空气中的水汽质量与湿空气的总质量之比。赵美等^[20]研究表明,700 hPa 高空比湿对地面降水具有强烈的指示意义,总的降水趋势是随着 700 hPa 比湿的增大,降水的可能性也增大。六盘山区东西坡 700 hPa 比湿场的显著差异,对揭示该区域东西坡降水差异以及人工影响天气有着重要的指示作用。利用 1989—2018 年的再分析资料对六盘山区 700 hPa 比湿的变化特征进行分析(图 5a),六盘山区近 30 年的年均比湿在 3.6~4.2 g/kg 范围

内呈现南高北低、东高西低的空间分布特征,年均区域平均比湿为 4.02 g/kg,其中东坡为 4.03 g/kg,西坡为 4.01 g/kg,进一步将再分析资料插值到六盘山区的各站点中(图 5b),可以看出以六盘山系东坡为代表的泾源辖区各站点的比湿均在 3.94 g/kg 以上,而西坡隆德区域内大部分站点的比湿值在 3.88~3.94 g/kg 内,其值显著低于东坡,其季节变化表现为夏季最大,冬季最小(图略),这与实际降水量的时空分布特征一致。

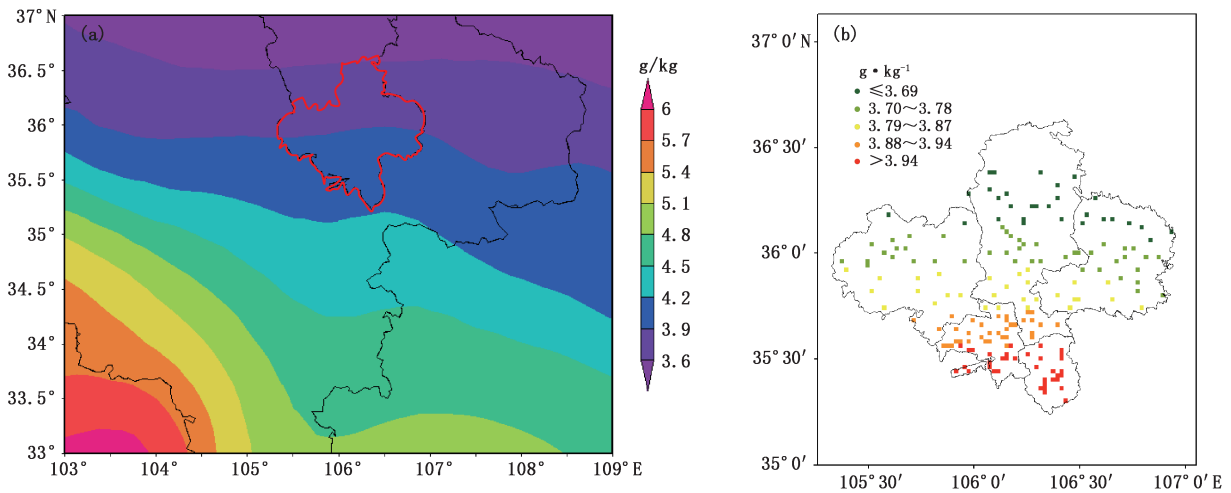


图 5 1989—2018 年 700 hPa 西北地区东部(a)和六盘山区各站点(b)年均比湿分布

水汽通量(Q),又称水汽输送量,可表征水汽输送的强度和方向。本文利用 ERA-Interim 再分析资料计算可得 700 hPa 近 30 年六盘山区的区域平均水汽通量为 $0.56 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$,其中东坡为 $0.66 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$,西坡为 $0.47 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$,进一步沿六盘山站($106.20^\circ\text{E}, 35.67^\circ\text{N}$)对六盘山区 $850\sim 500 \text{ hPa}$ 范围的水汽通量的经纬向进行剖面(图 6),由图 6a 可以看出,高层水汽通量的强度低于低层,水汽通量的大值区集中在六盘山东坡

800 hPa 左右,高达 $2.2 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$ 及以上,在六盘山西坡范围内, $800\sim 750 \text{ hPa}$ 有一次高值区,达 $2 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$ 及以上,较大值区主要集中在沿六盘山脉的海拔较高地。由图 6b 可以看出,南部地区水汽通量的大值区范围高于北部地区,水汽主要积聚在山系东坡,西坡的水汽有抬升作用,六盘山区水汽通量近 30 a 的年际变化表现为逐渐减少的趋势,但其值仍高于宁夏区域内的引黄灌区和中部干旱带^[7]。

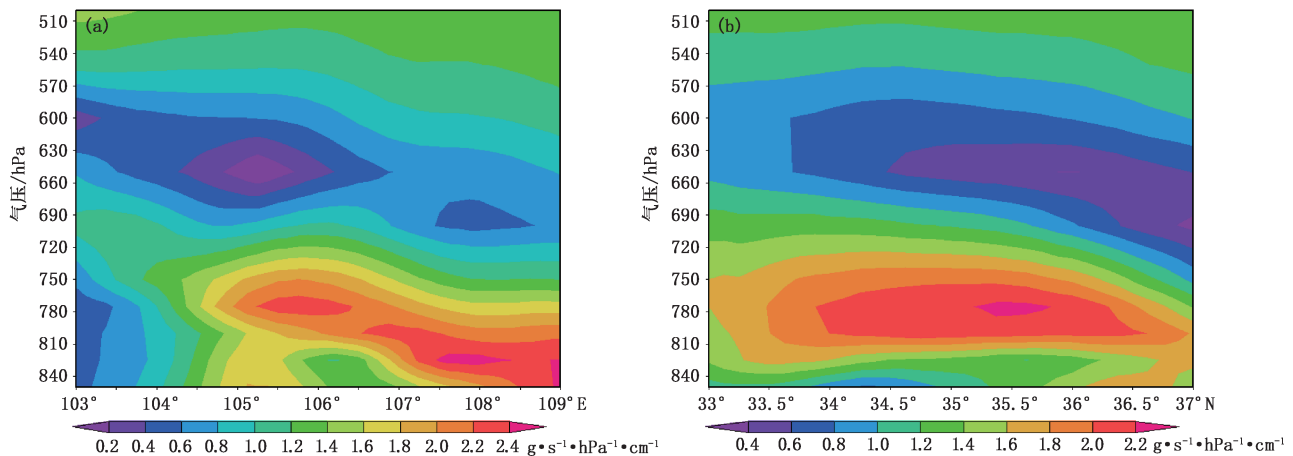


图 6 1989—2018 年西北地区东部沿 35.67°N (a)及沿 106.20°E (b)水汽通量垂直剖面

综上所述,近 30 年六盘山东坡年均降水量比西坡高 74.66 mm ,区域平均大气可降水量比西坡高 0.97 mm , 700 hPa 区域平均比湿比西坡高 $0.02 \text{ g}/\text{kg}$, 700 hPa 区域平均水汽通量比西坡高 $0.19 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$,相较于海拔较高地处于西风带气候区的天山以及高原气候区的祁连山^[21],六盘山区具有更为充沛的水汽条件,这与海拔较高以及山地对水汽的阻挡作用等因素有关^[22]。

3 六盘山区近 30 年空中水汽条件分布成因

3.1 六盘山区水汽来源

水汽输送是产生降水的一个重要物理因子,考虑到气候平均状况下水汽源地上空的水汽通量相当充沛,水汽输送源地可能是水汽输送路径上水汽通量大值区下方的海洋、江河及湖泊等地,已有研究表明^[7],在水汽输送偏多年,西太平洋到孟加拉湾有较大闭合比湿中心,这是西北地区东部重要的水汽来源地之一。进一步分析六盘山区的水汽来源,叠加绘制($10^\circ\sim 70^\circ\text{N}, 30^\circ\sim 160^\circ\text{E}$)范围内的 30 年年均

水汽通量与风场的分布(图 7),可以看出,六盘山区近 30 年水汽主要来源于孟加拉湾、南海及印度洋。 700 hPa 在孟加拉湾有明显的西南风水汽输送带延伸至甘肃东南部、宁夏南部、陕西一带; 850 hPa 在南海有一明显的西北向水汽输送带,印度洋—孟加拉湾的水汽输送带向东北方向输送,两支水汽输送带经云南、四川转为向西北输送,在青藏高原地形的影响下^[23],将水汽输送至六盘山区。

3.2 六盘山区水汽通量散度场

水汽通量散度(D)指单位时间、单位体积中,从水平方向汇合进来或辐散出的基层水汽量,是表征水汽输送的主要物理量, $D<0$,水汽通量辐合, $D>0$,水汽通量辐散。利用 1989—2018 年的 ERA-Interim 再分析资料计算可得,六盘山区 500 hPa 年均区域水汽通量散度为 $-5.67 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$,其中东坡年均区域平均值为 $4.25 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$,水汽辐散,西坡年均区域平均值为 $-17.06 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$,水汽辐合; 700 hPa 平均水汽通量散度为 $-1.98 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$,其中东坡年均区域平均值

为 $-5.22 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$ ，水汽辐合，西坡年均区域平均值为 $0.60 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$ ，水汽辐散；850 hPa 年均区域平均值为 $241.12 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$ ，东坡为 $81.52 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$ ，西坡高达 $368.80 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$ 。为进一步明晰六盘山区东西坡站点水汽通量散度场的差异性，将 1989—2018 年的水汽通量散度插值到六盘山区的各站点(图 8)，由图 8a 可知，500 hPa 水汽通量散度正值集中在六盘山东坡，其中大值区位于泾源县，水汽通量散度值 $>19.56 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$ 的站点居多，水汽辐散，而西坡大部分区域为负值区或弱正值区，水汽辐合或弱辐散。由图 8b 可知，850 hPa 水汽通量散度正值的大值区集中在六盘山

系西坡区域，其中水汽通量散度最大值多集中在隆德辖区，高达 $354.92 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$ 以上，水汽显著辐散，而在东坡范围内大部分站点的水汽通量散度值为负值或弱正值，水汽辐合或弱辐散，六盘山东坡存在着高层辐散、低层辐合或弱辐散的配置。进一步分析表明，近 30 年六盘山区在大至暴雨降水天气过程前期，700 hPa 青海东南部—甘肃南部—宁夏南部—陕西西部一带通常存在明显的水汽辐合区，水汽通量散度值可达 $-6\sim-3 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$ 。因此，六盘山东坡受地形的抬升作用引起的高层辐散、低层辐合或弱辐散的动力场^[24]，使东坡相较于西坡有着更为有利的较强降水发生发展条件。

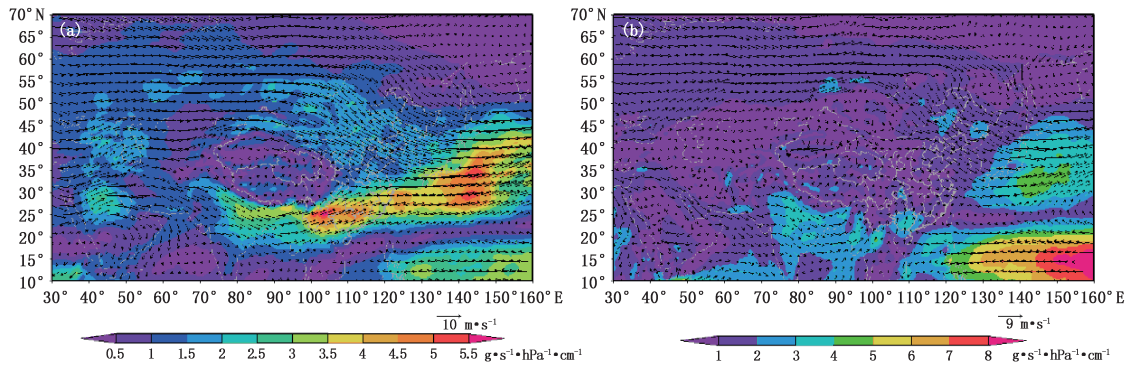


图 7 1989—2018 年 700 hPa(a)、850 hPa(b)水汽通量与风场分布

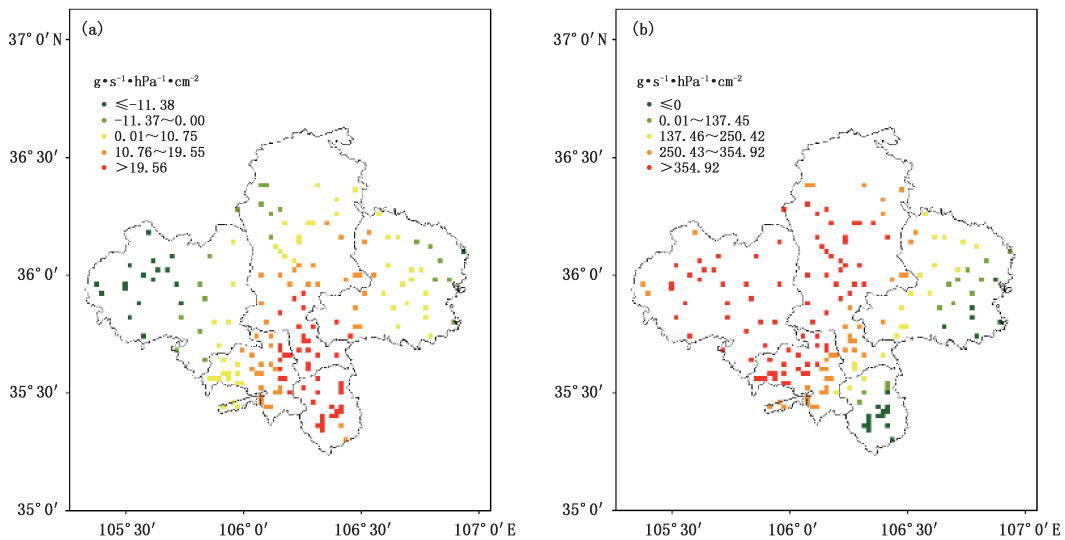


图 8 1989—2018 年六盘山区 500 hPa(a)及 850 hPa(b)水汽通量散度分布

3.3 六盘山区近 30 年空中水汽条件分布成因初探

宁夏六盘山区近 30 年较好的空中水汽条件主要集中在 4—10 月，季节变化表现为夏季最为充沛，

冬季相对较弱(表 2)，这与六盘山区的降水实况相符。已有研究表明^[25]，东亚季风对西北地区降水的影响较为显著，季风是由海洋和大陆的热力特征差

异造成的气候现象,其盛行风向随季节变化。进一步分析可见(表 3),六盘山区在 750 hPa(约 2.5 km 高度)以下于 4 月开始盛行东南风,并于 10 月消退,季节变化表现为冬季盛行干冷的西北气流,夏季盛行东南风,六盘山区空中水汽条件的优劣与东南季风的进退具有较好的吻合性。六盘山区地处青藏高原东北部与黄土高原西北边缘的狭长喇叭口地带,在夏季受青藏高原的影响,西南暖湿气流很难到达

海拔较高地,六盘山区位于东南季风及其边缘影响区域,受东亚季风影响较大,低层来自孟加拉湾、南海及印度洋的较为稳定的东南暖湿气流,受西太平洋副高北抬的影响将水汽输送到六盘山区,并在六盘山系附近积聚,空中水汽含量较多^[21],而宁夏中部干旱带及北部川区由于所处纬度较高,受到东亚季风的影响减弱,水汽很难到达,因此六盘山区的空中水汽条件相较于宁夏其它地区更为充沛。

表 2 1989—2018 年 1—12 月六盘山区逐月大气可降水量及 700 hPa 比湿、相对湿度、水汽通量

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
大气可降水量/mm	3.99	5.11	7.10	9.88	13.62	19.93	26.28	25.57	20.58	12.23	6.74	4.21
比湿/(g·kg ⁻¹)	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.014	0.013	0.013	0.006	0.013	0.013	0.013
相对湿度/hPa	47.57	53.12	55.88	52.40	51.96	58.16	66.42	69.80	66.70	59.88	46.56	40.24
水汽通量/(g·s ⁻¹ ·hPa ⁻¹ ·cm ⁻¹)	0.555	0.556	0.557	0.557	0.559	0.559	0.560	0.560	0.561	0.562	0.562	0.562

表 3 1989—2018 年 1—12 月六盘山区逐月主导风向

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
700 hPa	NW	NW	NW	NW	NW	SW	SW	SW	SW	NW	NW	NW
750 hPa	NW	W	W	W	SW	SW	SW	SW	SW	SW	NW	NW
800 hPa	NW	W	S	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	NW	NW
850 hPa	NW	W	S	SE	SE	SE	SE	SE	SE	S	NW	NW

六盘山区东西坡降水量及空中水汽条件的明显差异,除了东坡受地形的抬升作用引起的高层辐散、低层辐合或弱辐散的动力场外,还受制于地形、季风与天气系统之间相互作用的影响。基于 ERA-Interim 再分析资料对六盘山区近 30 年大至暴雨降水过程的天气系统及影响系统进行分析,结果表明两槽一脊和一脊一槽为最主要的降水环流形势,主要影响系统为 500 hPa 低压槽和 700 hPa 切变及急流,切变一般位于六盘山区,急流区一般位于甘肃东南部至陕西一带,六盘山区处于急流区西侧。进一步分析表明,六盘山区近 30 年在 700 hPa 与 750 hPa 以西南风水汽输送为主,并与西北风通量汇合后继续向东南方向输送(图 9a、b),这与张沛等^[17]研究结果相符,而在 750 hPa 以下以东南风水汽输送为主,以 800 hPa、850 hPa 为例(图 9c、d),六盘山区地形大部分在 750 hPa 以下,因此在此高度范围内,六盘山东坡为迎风坡,且地势更为陡峭,降水潜力更大,尤其在主要降水天气过程下,此风场特征更为显著,水汽输送受六盘山地形的强迫辐合抬升,加之有利的天气系统配合,造成六盘山系多年年均降水量及空中水汽条件呈东高西低分布特征。

4 结论

(1)近 30 年六盘山区年均区域平均大气可降水量为 12.89 mm,700 hPa 区域平均比湿为 4.02 g/kg,水汽通量为 0.69 g/(s·hPa·cm),其中东坡年均降水量比西坡高 74.66 mm,各类降雨日数也高于西坡,年均区域平均大气可降水量、700 hPa 比湿、相对湿度、水汽通量与降水量空间分布特征较为一致,呈东高西低、南大北小的特征,并存在明显的夏高冬低的季节变化特征。

(2)700 hPa 从孟加拉湾有明显的西南风水汽输送带延伸至甘肃东南部、宁夏南部、陕西一带,850 hPa 六盘山区水汽主要来源于孟加拉湾、南海及印度洋,经云南、四川转为向西北输送,在青藏高原的地形的影响下,将水汽输送至六盘山区。

(3)六盘山区在 700 hPa 和 750 hPa 以西南风水汽输送为主,并与西北风通量汇合后向东南方向输送,750 hPa 以下六盘山东侧为东南风迎风坡,东南季风于 4 月开始进入六盘山区,并于 10 月消退,受六盘山地形强迫影响,东南暖湿气流在东坡抬升,使东坡相较于西坡有着更为有利的降水发生发展条件。

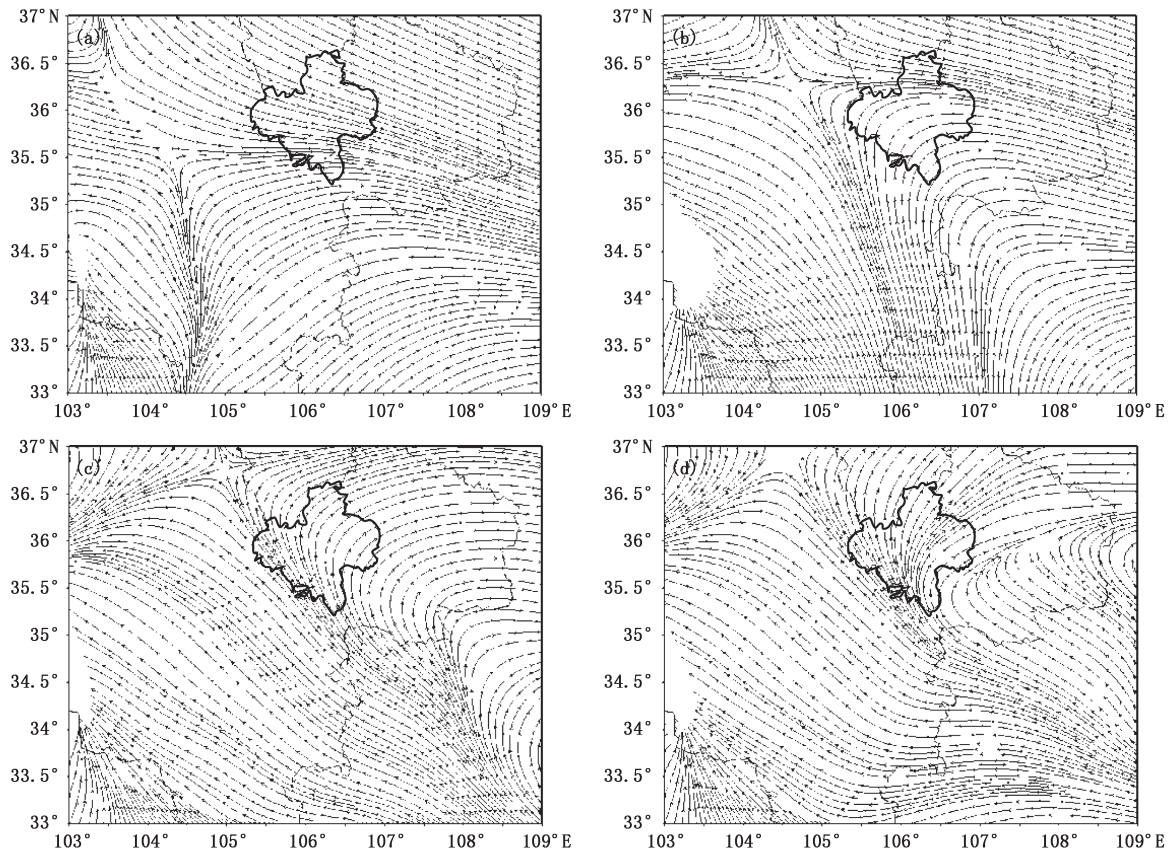


图9 1989—2018年西北地区东部700 hPa(a)、750 hPa(b)、800 hPa(c)、850 hPa(d)风场
(黑色加粗区域为六盘山区)

(4)受地形的抬升作用引起的高层辐散、低层辐合或弱辐散的动力场,加之地形、东亚季风与天气系统之间相互作用的影响,造成六盘山系降水及空中水汽条件呈东高西低的分布特征。

参考文献

- [1] 黄会平. 1949~2005年全国干旱灾害若干统计特征[J]. 气象科技, 2008, 36(5):39-43.
- [2] 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3):322-330.
- [3] 徐利岗, 周宏飞, 杜历, 等. 1951—2008年中国西北干旱区降水时空变化及其趋势[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3):724-734.
- [4] 白虎志. 西北地区东部秋季降水日数时空特征分析[J]. 气象科技, 2006, 34(1):47-51.
- [5] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5):1283-1291.
- [6] 郑丽娜. 近55年中国西北地区夏季降水的时空演变特征[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(2):50-59.
- [7] 陈楠, 陈豫英, 彭维耿, 等. 宁夏近44年水汽时空分布及环流差异特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(7):49-54.
- [8] 刘芸芸, 张雪芹. 西北干旱区空中水资源的时空变化特征及其原因分析[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(6):385-392.
- [9] 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[J]. 地球科学进展, 2006, 21(9):948-955.
- [10] 巩宁刚, 孙美平, 闫露霞, 等. 1979—2016年祁连山地区大气水汽含量时空特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4):762-771.
- [11] Ma X, Jia W, Zhu G, et al. Stable isotope composition of precipitation at different elevations in the monsoon marginal zone [J]. Quaternary International, 2018(493):86-95.
- [12] 张良, 王式功, 尚可政, 等. 祁连山区空中水资源研究[J]. 干旱气象, 2007, 25(1):14-20.
- [13] Sumargo E, Cayan D R. Variability of cloudiness over Mountain Terrain in the Western United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(15):1227-1245.
- [14] Barth E L. Cloud formation along mountain ridges on Titan [J]. Planetary and Space Science, 2010, 58(13):1740-1747.
- [15] Smith B L, Yuter S E. Water vapor fluxes and orographic precipitation over Northern California associated with a landfalling atmospheric river [J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(1):74-100.
- [16] Trenberth K E. Climate diagnostics from global analyses: conservation of mass in ECMWF analyses [J]. Journal of Climate,

- 1991, 4(4): 707-722.
- [17] 张沛, 姚展予, 谭超, 等. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 200-213.
- [18] 黄露, 范广洲. 影响青藏高原大气可降水量的因素及其变化特征[J]. 气象科技, 2018, 46(6): 110-117.
- [19] 田磊, 翟涛, 常倬林, 等. 宁夏空中水资源分布特征的初步分析[J]. 宁夏工程技术, 2016, 15(3): 193-196.
- [20] 赵美, 李永, 张军, 等. 高空 700 hPa 规定层比湿与地面降水关系分析[C]//江苏省气象学会第七届学术交流会议论文集. 苏州:江苏省气象学会, 2011.
- [21] 宋连春, 张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 143-148.
- [22] 王凌梓, 苗峻峰, 韩芙蓉. 近 10 年中国地区地形对降水影响研究进展[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 64-75.
- [23] 乔钰, 周顺武, 马悦, 等. 青藏高原的动力作用及其对中国天气气候的影响[J]. 气象科技, 2014, 42(6): 1039-1046.
- [24] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技, 2007, 35(3): 309-316.
- [25] 张存杰, 谢金南, 李栋梁, 等. 东亚季风对西北地区干旱气候的影响[J]. 高原气象, 2002, 21(2): 193-198.

Analysis of Difference Characteristics of Precipitation and Air Water Vapor Conditions over East and West Slopes of Liupan Mountain in Recent 30 Years

DENG Peiyun^{1,2} SANG Jianren^{1,2} YANG Meng³ MU Jianhua^{1,2}
CHANG Zhuolin^{1,2} CAO Ning^{1,2}

(1 Key Laboratory of Characteristic Agrometeorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002; 2 Key Laboratory of Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081; 3 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

Abstract: Based on the high spatial and temporal resolution ($0.125^\circ \times 0.125^\circ$) reanalysis data of ERA-Interim issued by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the precipitation observation data of the meteorological stations from 1989 to 2018, the characteristics of precipitation and air water vapor conditions on the east and west slopes of Liupan Mountain in recent 30 years are analyzed. The results show that: (1) The spatial distribution characteristics of the atmospheric precipitation, 700 hPa specific humidity and water vapor flux in the Liupan mountain area are relatively consistent with these of the precipitation in recent 30 years, with the characteristics of high in the east and low in the west, large in the south and small in the north. (2) During the summer main precipitation processes, the water vapor in the Liupan mountain area mainly comes from the lower layer of the Bay of Bengal, South China Sea and Indian Ocean. (3) The water vapor transport characteristics over the Liupan Mountain area are as follows: the water vapor transport is dominated by the southwest wind in 700 hPa and 750 hPa; the east side of the Liupan Mountain is the windward slope of the southeast wind below 750 hPa; influenced by the landform forcing, the southeast warm and wet air flow rises on the east slope. (4) The divergence field of water vapor flux has a structure of divergence at upper levels and convergence or weak divergence at lower levels over the eastern slope of the Liupan Mountain. Combined with the interaction of topography, East Asian monsoon, and various weather systems, the distribution characteristics of precipitation and air water vapor conditions in the Liupan mountain area are high in the east and low in the west. The preliminary results can reveal the characteristics of regional air water vapor conditions and provide a reference basis for the development of cloud water resources.

Keywords: Liupan Mountains Area; atmospheric precipitation; water vapor flux; water vapor flux divergence; wind field; terrain