

基于HYSPLIT模型模拟六盘山地区水汽来源 以及与降水量相关性分析

李峰, 邱玉珺*

南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京

收稿日期: 2023年4月14日; 录用日期: 2023年6月22日; 发布日期: 2023年6月29日

摘要

本文采用宁夏六盘山地区2020年夏季气象观测资料、同期微波辐射计资料以及NCEP全球同化气象资料, 结合后向轨迹HYSPLIT模型、线性回归方法, 研究了六盘山夏季降水水汽来源以及降水量与气象要素、降水资源的相关性分析。结果显示: 1) 8月份比7月份和9月份分别多出20.3%和23.1%的偏南暖湿气流输送, 造成六盘山地区8月份降水量分别是7月份和9月份的2.1和4.7倍。2) 7月份水汽输送潜在源主要在陕西西南部地区, 对六盘山水汽贡献率较大。3) 降水量与湿度呈正相关且相关系数较高(0.3), 与十分风速呈负相关且相关系数较低(0.04)。4) 降水量与降水资源(可降水量、水汽通量、不稳定能量)呈显著相关, 回归方程达到显著水平。

关键词

六盘山, HYSPLIT, 降水量, 水汽输送, 相关分析

Simulation of Water Vapor Source and Correlation Analysis with Precipitation in Liupan Mountain Based on HYSPLIT Model

Feng Li, Yujun Qiu*

Key Laboratory of Aerosol and Cloud Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Apr. 14th, 2023; accepted: Jun. 22nd, 2023; published: Jun. 29th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 李峰, 邱玉珺. 基于 HYSPLIT 模型模拟六盘山地区水汽来源以及与降水量相关性分析[J]. 运筹与模糊学, 2023, 13(3): 2303-2314. DOI: 10.12677/orf.2023.133231

Abstract

In this paper, meteorological observation data of July, August and September 2020, microwave radiometer data of the same period and NCEP global assimilated meteorological data were used in Liupanshan region of Ningxia, combined with backward trajectory HYSPLIT Euler model and linear regression method. The correlation analysis of water vapor source and precipitation with meteorological elements and precipitation resources during summer precipitation in Liupan Mountain was studied. The results showed that: 1) Compared with July and September, 20.3% and 23.1% more southerly warm and wet air transported in August, which resulted in 2.1 and 4.7 times of precipitation in Liupanshan in August. 2) The potential source of water vapor transport in July was mainly in the southwest of Shaanxi Province, which contributed a lot to the water vapor in Liupan Mountain. 3) Precipitation has a positive correlation with humidity with a high correlation coefficient (0.3), and a negative correlation with wind speed with a low correlation coefficient (0.04). 4) Precipitation has a significant correlation with precipitation resources (precipitable water vapor flux, unstable energy), and the regression equation reaches a significant level.

Keywords

Liupan Mountain, HYSPLIT, Precipitation, Water Vapor Transport, Correlation Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为温室气体的水汽,其活动非常活跃,不仅对地气系统的平衡产生影响,还对云降水有重要的作用,同时也是局地对流云降水天气系统形成和消散的重要因子之一[1][2][3][4]。

我国西北地区属于干旱区,地处亚欧大陆腹地,是我国水资源最缺的地区之一,该地区经常出现土地贫瘠,自然灾害频发,对区域农业以及生态环境的破坏巨大[5][6]。位于西北地区的六盘山,既是西北部地区重要的水源涵养林基地,该地区降水还对陕甘宁地区人民的农、林、牧业和其他经济建设活动有着重要且直接的影响[7]。

宁夏位于我国西北部地区,其南北狭长,地貌复杂,地势呈南高北低且由西南向东北逐渐倾斜,因其独特的地势特征造成了该地区降水分布不均匀等特点。纪晓玲等[8]发现降水量在地区分布存在明显差异,位于宁夏南部的六盘山地区降水量年均在 500 mm 以上,远远高于中部和北部地区的降水量(100~300 mm)。陈海波等[9]发现夏季降水占年总降水超过 50%,春秋次之,冬季最少。郑丽娜[10]利用气象观测站资料、再分析资料,分析了中国西北地区 55 年夏季平均降水的时空演变特征,揭示了该西北地区降水普遍偏少,东部偏多西部偏少的分布特征。许多学者对六盘山降水资源特征开展了相关研究,李欣等[11]利用宁夏逐日降水资料,揭示了宁夏近 50 年平均极端降水阈值大致呈现从南到北逐渐减小的分布特征。邓佩云等[12]利用 30 年 ERA-Interim 再分析资料以及气象站降水观测资料,对六盘山东西坡的空中水汽条件差异性进行了分析,揭示出六盘山地区的大气可降水量、水汽通量、比湿(700 hPa)与实际降水量的空间分布特征较为一致,呈现东高西低、南高北低的分布特征。温芸芸等[13]选取 8 个不同高度处站点的降水资料数据(以 100 m 为梯度)分析发现,六盘山西麓汛期的降水随着海拔高度变化特征较为明显,2.2

km 可被看作降水关键高度, 在 2.2 km 以下, 降水随海拔高度增加而增加。

针对水汽输送特征的分析一直备受气象学者关注。徐祥德等[14]研究了南亚季风水汽输送对四川盆地的影响。戴竹君等[15]利用 HYSPLIT 轨迹追踪发现孟加拉湾地区的水汽对热带风暴 Bilis 暴雨过程有重要影响。本文选取 2020 年夏季 7~9 月份六盘山地面梯度站资料, 引入欧拉轨迹模型 HYSPLIT 对影响该地区降水的水汽来源、输送特征定性分析, 结合线性回归分析了降水与气象要素的相关性分析。该研究结果对六盘山降水资源的开发利用以及人影作业等方面均具有重要的科学指导作用。

2. 资料及方法

2.1. 研究区概况

六盘山位于宁夏南部, 处于西南季风区西北边缘, 是全国为数不多的近似南北走向(夹角约 30°)的连续山脉(如图 1), 其区域范围是 $N34.7^\circ\sim 36.5^\circ$, $E105.2^\circ\sim 107^\circ$, 山脊海拔超过 2500 m, 最高达 2942 m, 最低是 1599 m, 山体西坡和缓, 东坡陡峭, 坡向以西南为主。六盘山地处黄河流域, 黄河干流以及其重要支流: 挑河、涅水、泾河、渭河等流经本区, 整个六盘山区除泾源县部分地区有森林覆盖外, 其余地区森林覆盖率较低。

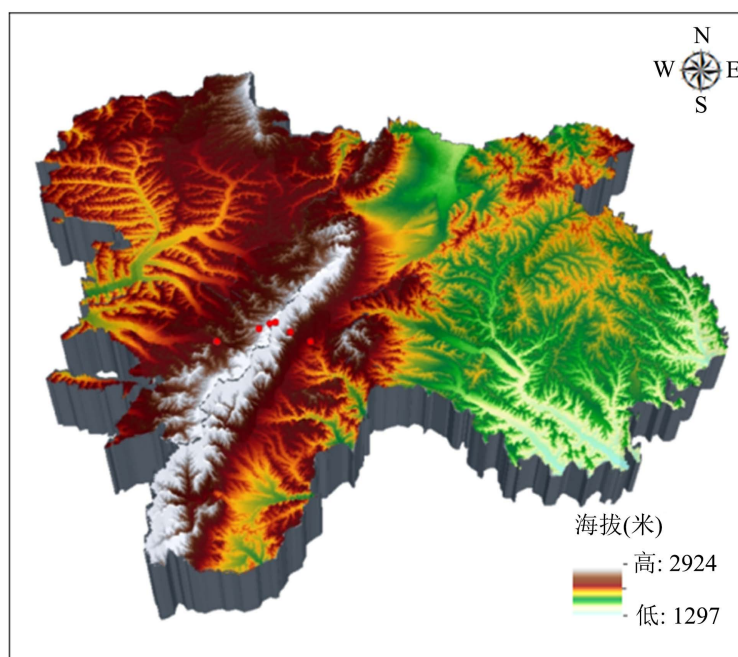


Figure 1. Schematic diagram of the locations of meteorological observation stations on the east and west sides of Liupan Mountain (red dots represent the locations of observation stations)

图 1. 六盘山东侧和西侧气象观测站位置示意图(红点表示观测站位置)

2.2. 资料来源及使用方法

本文使用的数据来自六盘山地区 7 个地面观测站, 包括 2020 年 7~9 月常规风温压湿以及逐小时降水观测资料, 利用该资料分别计算大气可降水量 W 、水汽通量 Q 。另外, 还使用架设在德隆气象观测站的一台德国 RPG 公司的 RPG-HATPRO 型地基微波辐射计温度廓线, 可以进行连续监测, 在 0~10 km 范围内获得大气温度产品, 运用以上公式资料分别计算六盘山东西坡 6 个站点的大气可降水量 W 、水汽通量 Q 和不稳定能量 E_k 。

1) 大气可降水量

大气可降水量(W)表示某一层单位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, 单位是 mm, 考虑到六盘山海拔高度和地形特征, 采用张沛等[7]。计算 W 的公式, 如下:

$$W = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{500} q dp. \quad (1)$$

其中, g 表示重力加速度, 取 9.8 m/s^2 , p_s 表示站点气压, q 表示比湿, p 表示气压。

2) 水汽通量

水汽通量(Q)反映了流经某地的某一层单位面积大气柱中所含水汽与风速乘积的大小和方向, 计算公式如下:

$$Q = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{500} Vq dp. \quad (2)$$

3) 不稳定能量

大气层结对流层不稳定能量(E_k)的概念最早在 20 世纪三十年代被提出, 采用公式如下:

$$E_k = R_d \int_{p_0}^p (T_v - T_{ve}) d(-\ln p). \quad (3)$$

其中, E_k 为单位质量上升气块从 p_0 等压面上升至 p 等压面垂直运动动能的增量, R_d 为干空气比气体常数, T_v 为上升气团虚温, T_{ve} 为上升气团周围环境的虚温。

2.3. 线性回归分析

利用最小平方函数对自变量及因变量之间关系进行建模的方式称为线性回归, 主要分为一元线性回归及多元线性回归, 它是数理统计学中的重要组成, 可直接确定两种及以上变量之间的定量关系。由于经过严格的分析研究, 线性模型比非线性模型更容易拟合, 因而被广泛应用于实际生活中。假设(因变量) Y 与(自变量) X_1, X_2, \dots, X_n 之间存在线性关系, 建立二者之间的线性回归模型是该方法的基本原理, 一般可表示为:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (4)$$

式中 Y 为因变量, b_0 为截距, X_1, X_2, \dots, X_n 为自变量, b_1, b_2, \dots, b_n 为 Y 对 X_1, X_2, \dots, X_n 的斜率(系数)。

2.4. 后向轨迹模型分析

HYSPLIT 是由 NOAA 等机构联合开发的一款模式系统, 该系统可以处理不同的气象要素信息、不同排放源以及不同物理过程的输送、扩散、沉降过程, 能够方便追踪不同气块的来源[16] [17]。为了更加直观清晰地分辨出水汽的来向、源地及其对降水的贡献, 本文采用欧拉聚类分析法对气流输送轨迹按照最近的原则进行合并分组, 该方法的优点是区分了长途输送和短途输送。

该模式的原理如下:

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5 \cdot [v(P(t)) + v(P(t + \Delta t), (t + \Delta t))] \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中, $P(t + \Delta t)$ 为模拟点的位置; $P(t)$ 为气团的起始点; Δt 为气团的运动时间; $v(P, t)$ 为气团的移动速度。

粒子所处的轨迹位置由时间和空间的积分代表, 粒子速度则由时间和空间的线性插值代表。在模拟计算中, Δt 是可以改变的, 也可称为可变时间步长, 前提是时间步长内的平流移动距离不能超过网格分

分辨率。通过网格线性插值而得到积分位置上的数据, 因此提高该方法的精确度不能以采用高积分手段来实现, 因此粒子的最终位置可用一次位置的估算代表[18]。

步骤为:

- 1) 数据下载。本文研究的数据选用来自美国国家环境预报中心(NCEP)发布的 $1^\circ \times 1^\circ$ GDAS 数据集。
- 2) 设置参数和绘制轨迹。选择区域坐标信息, 作为气团的终点位置, 设置高度为每个站点海拔高度, 该软件使用的是世界时间, 因此选择(UTC + 8)东八区时间, 后推 24 h, 选择欧拉聚类分析方法, 设置 6 个通道, 可以表示六盘山地区水汽输送的特征。
- 3) 运行模型, 如果参数设置正确, 自动等待运行结果。
- 4) 绘制图片并显示。

通常将数量较多的集通过一定的数学方法计算最终划分为多个性质相似的小类的方法称为聚类分析, 它是一个由多到少、化繁到简的过程。在后向轨迹模型中, 根据气团轨迹的传输速度或者传输角度不同, 可将所有的轨迹进行分类, 最终计算得到主要的气流轨迹类型。轨迹间的距离根据距离得到, 具体公式如下:

$$d_{mn} = \sqrt{\sum_{i=1}^Z \left((x_m(i) - x_n(i))^2 + (y_m(i) - y_n(i))^2 \right)} \quad (6)$$

式中, Z 为节点数, m 、 n 为轨迹, $x_m(i)$ 、 $y_m(i)$ 为轨迹 m 在第 i 个节点上的经纬度, $x_n(i)$ 、 $y_n(i)$ 为轨迹 n 在第 i 个节点上的经纬度。

2.5. 潜在源贡献因子分析法

基于条件概率函数的潜在水汽源贡献因子(PSCF)是确定水汽源最常用和最有效的方法之一, 潜在水汽源位置的分析主要依赖于气流的反向轨迹和污染物浓度。研究环境内经过研究区域点网格(i, j)的气流轨迹端点数(m_{ij})与经过该网格的所有气流轨迹端点数(n_{ij})的比值为该方法主要原理及计算过程, 用如下公式表示:

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (7)$$

其数值大小在[0, 1]区间内, 可以代表不同地区对降水水汽变化的影响, 二者呈正比关系。为了降低结果的不确定性, W_{ij} 被引入权重函数用来分析其误差带来的影响。如下所示:

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1 & 80 < n_{ij} \\ 0.7 & 20 < n_{ij} \leq 80 \\ 0.4 & 210 < n_{ij} \leq 20 \\ 0.5 & n_{ij} \leq 10 \end{cases} \quad (8)$$

对 PSCF 加权计算, 如下:

$$WPSCF_{ij} = PSCF_{ij} \times W_{ij} \quad (9)$$

3. 结果与讨论

3.1. 降水水汽来源

对比六盘山 6 个不同高度处的地面梯度观测站 2020 年 7~9 月的降水量发现(见表 1), 六盘山降水主要集中在 8 月份, 该月份降水量均值分别是 7 月份和 9 月份的 2 倍多和近 5 倍。降水主要集中在夏季(7~9

月份), 最大降水出现在 7、8 月份, 此分布特征与水汽输送路径密切相关。分别对六盘山 7、8、9 月进行后向轨迹聚类分析发现(见图 2、图 3), 整体 8 月份该地区偏南暖湿气流输送占比较高, 为 41.91%, 9 月份占比最少, 为 7.08%, 因此 9 月份六盘山降水最少。8 月份偏南暖湿气流出现两类路径, 其中 8 月份六盘山降水受西南风影响较大, 西南方向的水汽占比为 18.82%。总之, 8 月份比 7 月份和 9 月份分别多出的 21.64% 和 34.86% 的偏南暖湿气流的输送, 因此 8 月份的降水量最多, 9 月份降水量最少。

Table 1. Precipitation at six gradient sites in Liupan Mountain in summer 2020/mm

表 1. 六盘山 2020 年夏季 6 个地面梯度站点降水量

月份	WS1	WS2	WS3	ES1	ES2	ES3
7 月份	99.3	99.8	150.9	92.6	144.1	153.6
8 月份	230.2	237.2	296.3	222.4	277.7	274.6
9 月份	54.5	59.4	60.7	70	36.6	47.5

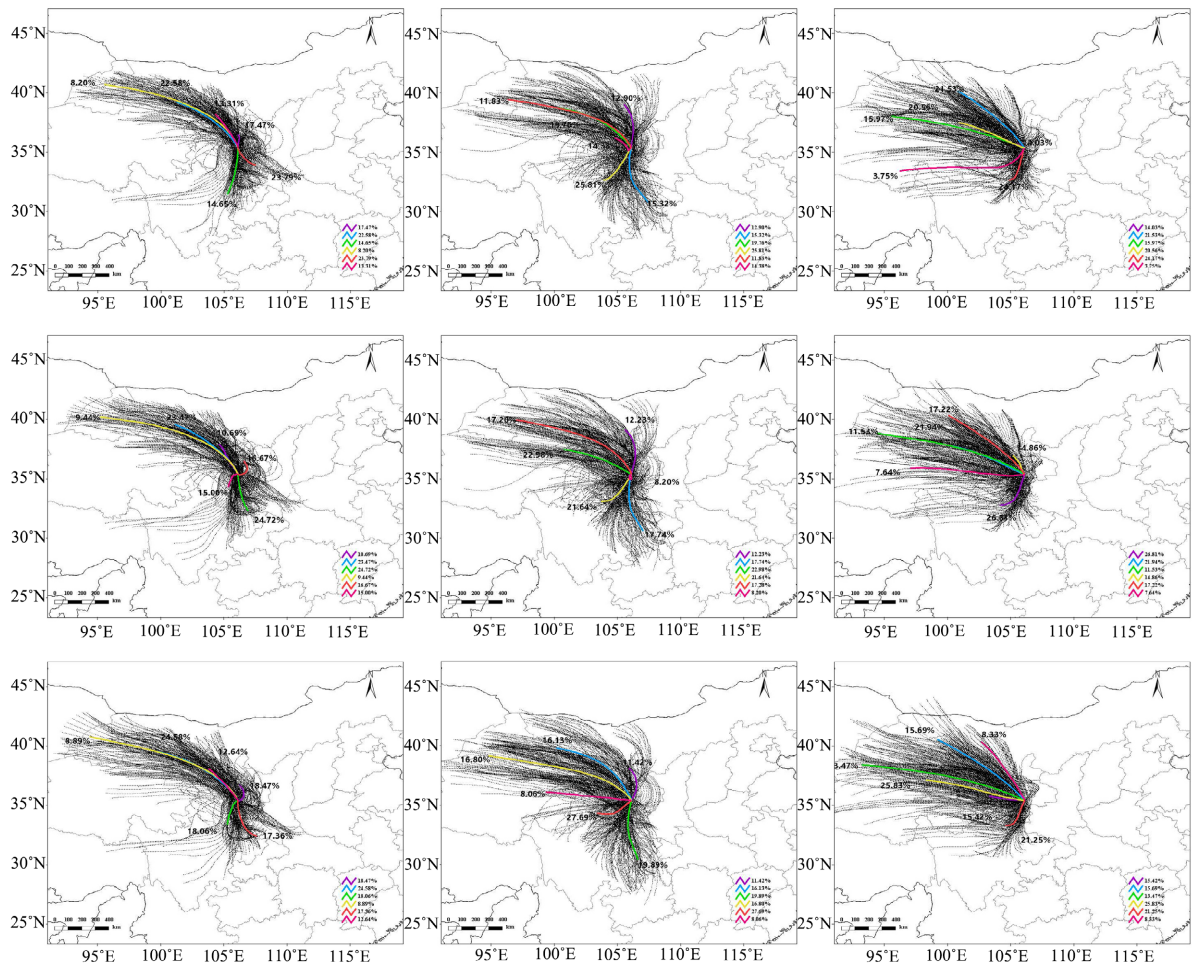


Figure 2. Clustering diagram of 24-hour backward trajectory of the three stations on the west slope of Liupan Mountain in summer 2020 (the height of the terminal station of the backward trajectory is 2223 m, 2323 m and 2599 m, respectively, from left to right: July, August and September, and from top to bottom: W1, W2 and W3)

图 2. 2020 年夏季六盘山西坡三个站点 24 小时后向轨迹聚类图(后向轨迹终点站点的高度分别为 2223 米、2323 米、2599 米, 从左到右依次是: 7 月、8 月、9 月, 自上而下依次是: W1、W2、W3)

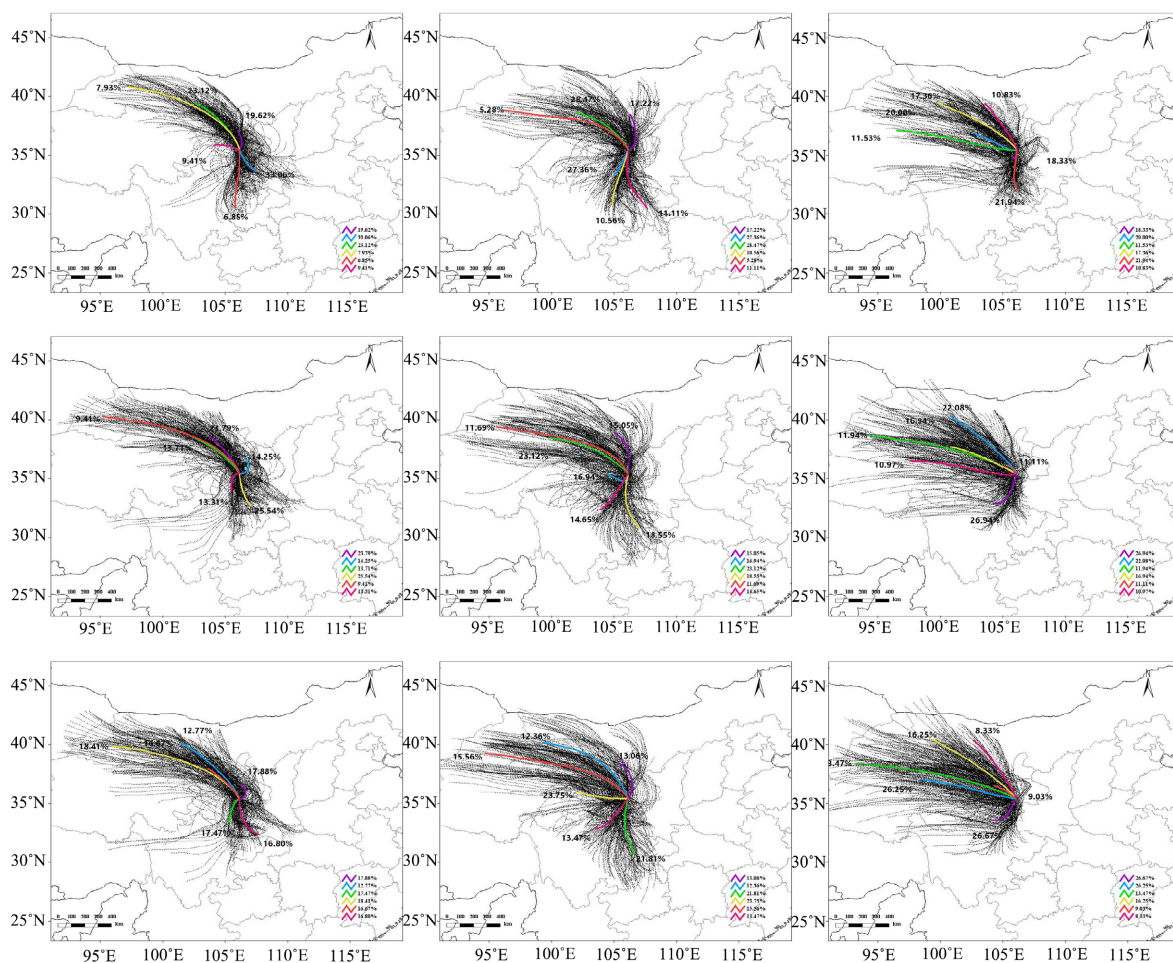


Figure 3. Clustering diagram of 24-hour backward trajectory of the three stations on the eastern slope of Liupan Mountain in summer 2020 (the height of the terminal station of the backward trajectory is 1957 m, 2347 m and 2602 m respectively, which are in July, August and September from left to right, and E1, E2 and E3 from top to bottom)

图 3. 2020 年夏季六盘山东坡三个站点 24 小时后向轨迹聚类图(后向轨迹终点站点的高度分别为 1957 米、2347 米、2602 米, 从左到右依次是: 7 月、8 月、9 月, 自上而下依次是: E1、E2、E3)

为了进一步对比地形对不同站点降水产生的影响, 把发生微雨的条件作为降水临界条件, 与小雨及以上强度降水进行站点之间的对比。统计发现, 西坡和东坡站点发生微雨的累计时间均是小雨及以上强度降水的 2 倍多。从图 4 看到, 6 个站点小雨及以上强度的降水量有明显的日变化特征, 微雨日变化特征不明显。不论是微雨还是小雨及以上强度降水, 除了 E2 站点, 西坡和东坡站点海拔越高, 降水累计时间越长。东坡 E2 站点累计降水时长高于 E3 与该站点坡度大于 E3 以及 E3 站点位于山脊下的一个谷地有关, 因此各站点降水量不但与其海拔高度有关, 还与其所在地理位置有关。另一方面, 东坡和西坡三个相应高度层站点对比发现, 东坡 E1、E2、E3 三个站点发生微雨的累计时长分别高出西坡 W1、W2、W3 三个站点的 10%、29%、16%, 也就是说, 东坡比西坡更易产生降水。总体上, 西坡 W3 和东坡 E2 与 E3 的平均降水量略高于其他三个站点, 站点坡度和所在高度与小雨以上强度的平均降水量密切相关。

3.2. 水汽潜在源分析

利用 TrajStat 软件针对 2020 年六盘山地区降水小时数据, 创建网格为 1, 剔除无效数据, 以 0.7: 0.42: 0.05 权重比例进行 PSCF 分析, 得到潜在源贡献因子图(图 5), 用于模拟分析空中水汽输送源, 判定其影

响该地区降水的潜在源以及贡献率。由图可知, $WPSCF > 0.2$ 的地区主要集中在六盘山东南方向, 甘肃东南部以及陕西西南部为潜在的水汽潜在源区, 且内蒙古西部至宁夏北部有一条 $WPSCF$ 低值轨迹, 7 月份西北冷空气输送较少, 因此对该地区的贡献率较少。



Figure 4. Diurnal variation of hourly cumulative total precipitation over the eastern and western slopes of different precipitation events

图 4. 不同等级降水事件东西坡逐时累积总降水量的日变化

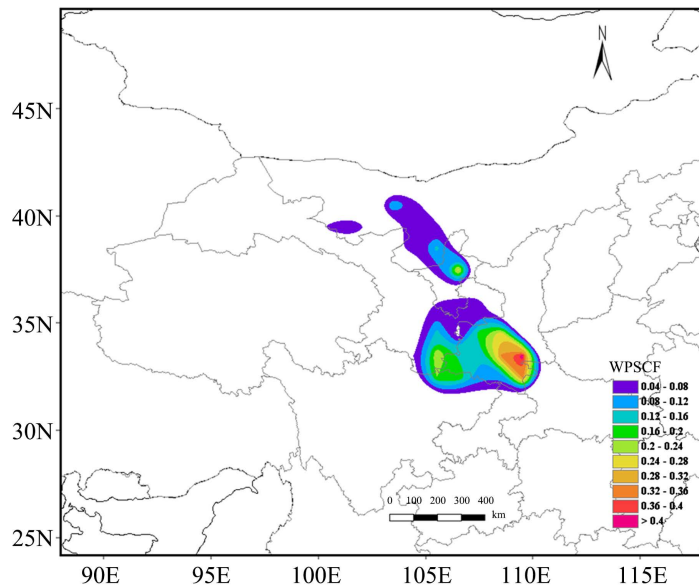


Figure 5. Contribution factors of potential sources in Liupan mountain in July 2020

图 5. 2020 年 7 月份六盘山地区潜在源贡献因子图

3.3. 降水与气象要素相关性分析

有研究表明, 降水量与气象要素存在密切联系。风速、湿度、气压、空气温度均是影响降水的因素之一, 风可以直接影响水汽输送从而引起局地降水, 而空气温度对水汽在近地面的凝结和沉降起到十分重要的作用。

如图 6 所示, 六盘山西坡上 WS3 站点降水量与十分风速、气压呈负相关, 而与湿度、空气温度呈正相关, 但是相关性除与湿度以外均较差, 这可能与六盘山地区气象观测站的精度的差异导致的。就图 6(b) 而言, 降水量随着湿度的增加而增大, 湿度集中在 90%~100% 最明显, R 相关系数为 0.3, 呈现显著相关。也就是说, 在湿度较高的环境条件下, 更利于降水的形成和发生, 从而导致降水量偏高; 而降水量随着空气温度在 10℃ 左右呈现下降趋势, R 相关系数为 0.12, 说明空气温度会影响降水的发生, 但影响稍弱。因此, 六盘山地区降水量变化趋势与风速、湿度、气压、空气温度具有一定的联系, 但是还需要进一步的相关性分析。

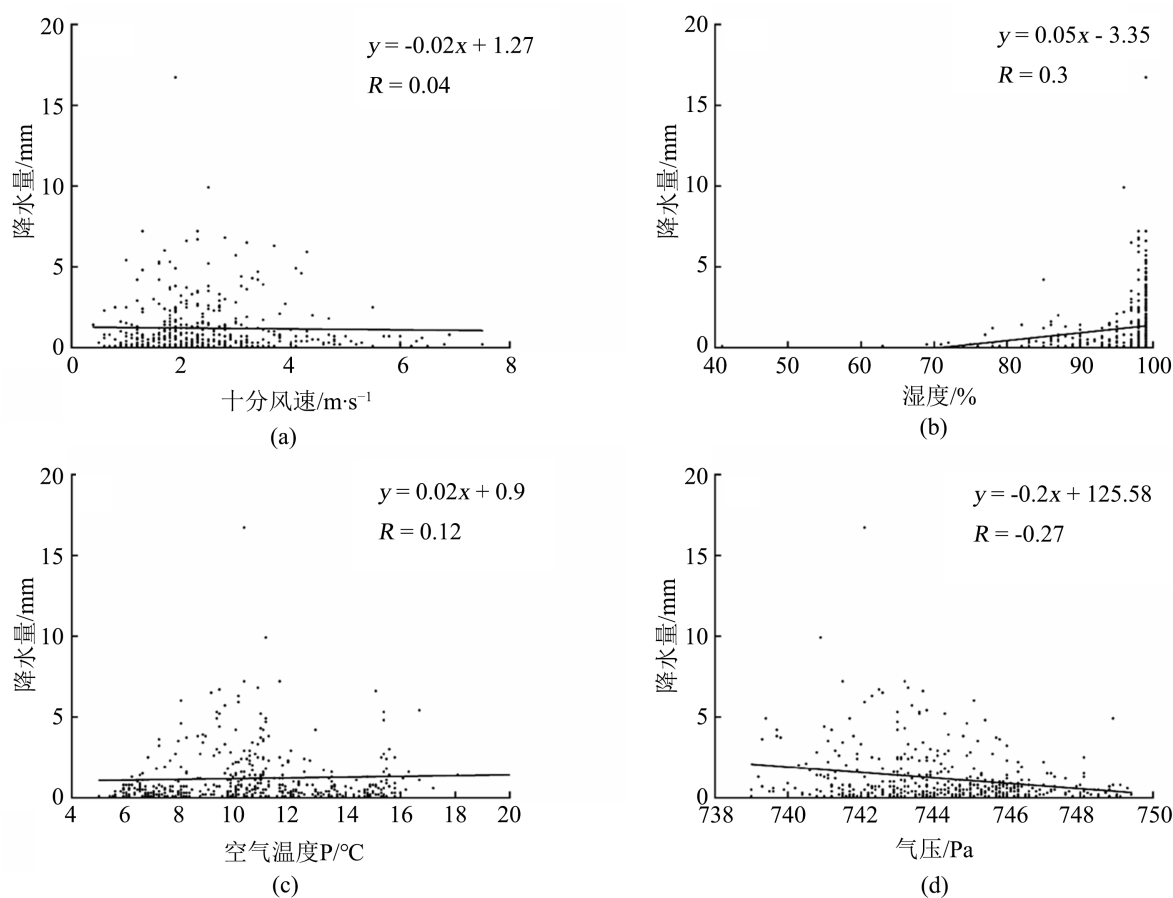


Figure 6. Scatter plot of WS3 precipitation, extreme wind speed (a), humidity (b), air temperature (c), and air pressure (d) on the western slope of Liupan Mountain in summer 2020

图 6. 六盘山 2020 年夏季西坡上 WS3 降水量和十分风速(a)、湿度(b)、空气温度(c)、气压(d)关系的散点图

3.4. 降水量与 W 、 Q 和 E_k 相关性分析

采用 SPSS 对大气降水资源 W 、 Q 和 E_k 进行斯皮尔曼相关性分析并进行双尾检验, 结果如表 2 所示(均在 0.01 水平上显著相关), 判定方法如下:

Table 2. Correlation between precipitation and precipitation resources**表 2.** 降水量与降水资源的相关性

指标	降水量	可降水量 W	水汽通量 Q	不稳定能量 E_k
降水量	1.000			
可降水量 W	0.786	1.000		
水汽通量 Q	0.681	0.812	1.000	
不稳定能量 E_k	0.613	0.861	0.774	1.000

- 1) $0.8 < r < 1$ 为极强相关;
- 2) $0.6 < r < 0.8$ 为强相关;
- 3) $0.4 < r < 0.6$ 为中等程度相关;
- 4) $0.2 < r < 0.4$ 为弱相关;
- 5) $0.0 < r < 0.2$ 为极弱相关或无相关。

可以看出, 降水量与 W 、 Q 和 E_k 的相关系数分别为: 0.786、0.681、0.613, 可见降水量与 W 、 Q 和 E_k 呈现强相关关系。

3.5. 降水量与 W 、 Q 和 E_k 回归分析

对降水量(Y)进行正态性检验, 结果显示统计量为 0.651, 显著水平 $\text{Sig.} = 0.779 > 0.05$, 表明降水量(Y)是正态变量, 可进行回归分析。通过逐步回归分析从所有可供选择的自变量中逐步地加入或删除某个自变量, 直到建立最优回归方程模型 3 为止(表 3 和表 4)以降水量(Y)为因变量, 以可降水量 $W(X_1)$ 、水汽通量 $Q(X_2)$ 和 不稳定能量 $E_k(X_3)$ 为自变量, 建立最优线性回归方程: $Y = 1.815 + 0.03X_1 + 0.01X_2 + 0.016X_3$ 。进一步验证了降水量与 W 、 Q 和 E_k 之间存在一定的同源性。

Table 3. Overview of regression equation model output**表 3.** 回归方程模型概述输出结果

模型	相关系数	决定系数	调整系数	标准估计误差
1	0.654a	0.624	0.681	0.42102
2	0.721b	0.772	0.791	0.23452
3	0.842c	0.876	0.883	0.00134

注: a 预测变量: 可降水量; b 预测变量: 可降水量、水汽通量; c 预测变量: 可降水量、水汽通量、不稳定能量。

Table 4. Statistical table of multiple linear regression model coefficients**表 4.** 多元线性回归模型系数统计表

模型	B	标准误差	T	Sig.	VIF
常量	1.815	0.053	3.38	0.00	
可降水量 W	0.03	0.01	12.634	0.00	1.21
水汽通量 Q	0.01	0.01	5.364	0.00	3.12
不稳定能量 E_k	0.016	0.01	23.408	0.00	1.28

4. 结论

本文利用宁夏六盘山气象观测资料、同期微波辐射计资料以及 NCEP 全球同化气象资料, 研究了六盘山地区降水水汽潜在源以及降水与气象要素、降水资源的相关性, 与以往研究不同的是, 本文结合了后向轨迹聚类(欧拉模型、PSCF 分析模型)、线性回归分析, 重点探讨了降水量与十分风速、空气温度、气压、湿度、 W 、 Q 和 E_k 关联性。具体结论如下:

1) 六盘山夏季降水峰值出现在 8 月份。站点平均降水量(256.4 mm)分别是 7 月份的 2 倍多和 9 月份的近 5 倍。8 月份受偏南暖湿气流输送占比较高(41.9%), 其次为东南暖湿气流输送(23.1%)。

2) 7 月份西北冷空气输送较少, 因此对该地区的贡献率较少。在六盘山东南方向存在降水潜在源较大(WPSCF > 2), 甘肃东南部以及陕西西南部为潜在的水汽潜在源区, 且内蒙古西部至宁夏北部有一条 WPSCF 低值轨迹。

3) 降水量与十分风速、气压呈负相关, 而与湿度、空气温度呈正相关, 降水量与气象要素存在密切联系。

4) 降水量与 W 、 Q 和 E_k 均呈现显著正相关, 其中 W 和 Q 对降水量起直接主导作用, 而 E_k 对降水量产生间接作用。

致 谢

感谢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和宁夏气象防灾减灾重点实验室提供的地面气象站观测资料数据。

基金项目

国家自然科学基金项目(42075073, 42075077, 42175099)资助。

参考文献

- [1] Banta, R.M. (1990) The Role of Mountain Flows in Making Cloud. In: Blumen, W, Ed., *Atmospheric Processes over Complex Terrain. Meteorological Monographs*, Vol. 23, American Meteorological Society, Boston, 229-283. https://doi.org/10.1007/978-1-935704-25-6_9
- [2] 史玉光, 孙照渤, 杨青. 新疆区域面雨量分布特征及其变化规律[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 326-332.
- [3] Giovannetone, J.P. and Barros, A.P. (2009) Probing Regional Orographic Controls of Precipitation and Cloudiness in the Central Andes Using Satellite Data. *Journal of Hydrometeorology*, **10**, 167-182. <https://doi.org/10.1175/2008JHM973.1>
- [4] 王秀荣, 徐祥德, 庞昕. 西北地区夏季降水异常的时空特征分析[J]. 气象科学, 2002, 22(4): 402-409.
- [5] 徐利岗, 周宏飞, 杜历, 鲍子云. 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.
- [6] 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.
- [7] 张沛, 姚展予, 贾烁, 等. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究[J]. 大气科学, 2020, 43(6): 421-434.
- [8] 纪晓玲, 桑建人, 杨侃, 等. 宁夏适宜飞机增雨作业的层状云降水预报统计模型[C]//中国气象学会. 第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集(I): 2008 年卷. 北京: 气象出版社, 2008.
- [9] 陈海波, 严华生, 陈文, 杜鑫. 宁夏六盘山区多年降水的时空变化分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 103-110.
- [10] 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.
- [11] 李欣, 郑广芬, 纳丽, 王素艳. 宁夏近 50 年极端强降水事件的时空变化分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(8): 3533-3535, 3578.
- [12] 邓佩云, 桑建人, 杨萌, 等. 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[J]. 气象科技, 2021,

- 49(1): 77-85.
- [13] 温芸芸. 宁夏六盘山西麓汛期降水随海拔高度的变化特征[J]. 河南科技, 2021, 40(5): 150-152.
- [14] 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原-季风水汽输送“大三角扇型”影响区域特征与中国区域旱涝异常的关系[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 257-266.
- [15] 戴竹君, 王黎娟, 管兆勇, 等. 热带风暴“Bilis” (0604)暴雨增幅前后的水汽输送轨迹路径模拟[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 422-432.
- [16] Stohl, A. and James, P. (2004) A Lagrangian Analysis of the Atmospheric Branch of the Global Water Cycle. Part I: Method Description, Validation, and Demonstration for the August 2002 Flooding in Central Europe. *Journal of Hydrometeorology*, **5**, 656-678. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0656:ALAOTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0656:ALAOTA>2.0.CO;2)
- [17] Makra, L., Matyasovszky, I., Guba, Z., Karatzas, K. and Anttila, P. (2011) Monitoring the Long-Range Transport Effects on Urban PM10 Levels Using 3D Clusters of Backward Trajectories. *Atmospheric Environment*, **45**, 2630-2641. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.068>
- [18] 郑超. 成都大气中黑碳浓度及其颗粒物特征研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.