

# 秦岭中部山地降水的垂直变化研究

李大伟, 段克勤, 石培宏, 李双双, 尚 澍, 张召鹏

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:** 明确秦岭高海拔山区降水的变化规律, 是深入理解秦岭作为中国南北地理过渡带特征、认识秦岭水资源在南水北调中线工程中重要作用的前提。但秦岭高海拔地区长期缺乏有效的降水观测数据, 导致对其降水变化缺乏了解。利用2018年6月1日—2019年5月31日秦岭太白山海拔3760 m实测降水数据, 发现在秦岭海拔3760 m处年降水量可达1300 mm, 远高于汉江盆地和关中平原600~800 mm的年降水量。在此基础上, 检验了克里金(Kriging)、反距离加权(IDW)和薄盘样条(ANUSPLIN)插值方法, 以及GPM修正数据(GPM-cal)和ERA5再分析资料对秦岭中部山地年和季节降水空间模态的再现效果, 各方案均能揭示秦岭高山区是降水高值中心, 且降水随海拔的升高而增大, 但利用克里金、反距离加权插值方案不能得到准确的高海拔降水值, 与此相比, GPM-cal数据、薄盘样条插值与ERA5资料能较准确刻画秦岭中部山地年降水量随地形的变化。水汽通量分析显示, 秦岭凭借高大地形对600 hPa高度以下的南来湿润气流具有明显的阻挡、强迫和拦截作用, 使其南坡成为区域降水高值中心。结合高山区降水观测、薄盘样条插值、多源格点资料和数据修正方法, 是认识秦岭山地降水形成和变化的有效途径。

**关键词:** 秦岭; 降水; 薄盘样条插值; GPM; ERA5

DOI: 10.11821/dlxb202207013

## 1 引言

秦岭是中国南北地理分界线<sup>[1]</sup>, 是横亘在中部、东西走向的巨大山系, 其东西长约1000 km, 南北宽约200 km<sup>[2]</sup>。秦岭是中国中东部重要的生态屏障, 也是黄河最大支流渭河和长江重要支流汉江的主要集水区。秦岭作为中国南北过渡带的主体, 在气候和水文等多方面都呈现过渡性、敏感性和复杂性, 是中国地理科学研究的关键带<sup>[3]</sup>。秦岭山地的气候特征对于中国水资源涵养、地域结构研究的深化都具有重大意义。

秦岭主脊平均海拔约在2500~3700 m, 其中太白山主峰海拔3771.2 m, 是秦岭的最高峰。认识秦岭山地的气象与气候要素特征及变化的首要手段是气象观测, 当前秦岭以北的关中平原和以南的汉江盆地气象站相对密集, 但气象站海拔都在800 m以下。而秦岭山地的气象站稀少, 且位于谷地, 海拔最高的是位于秦岭东段的华山站(海拔2065

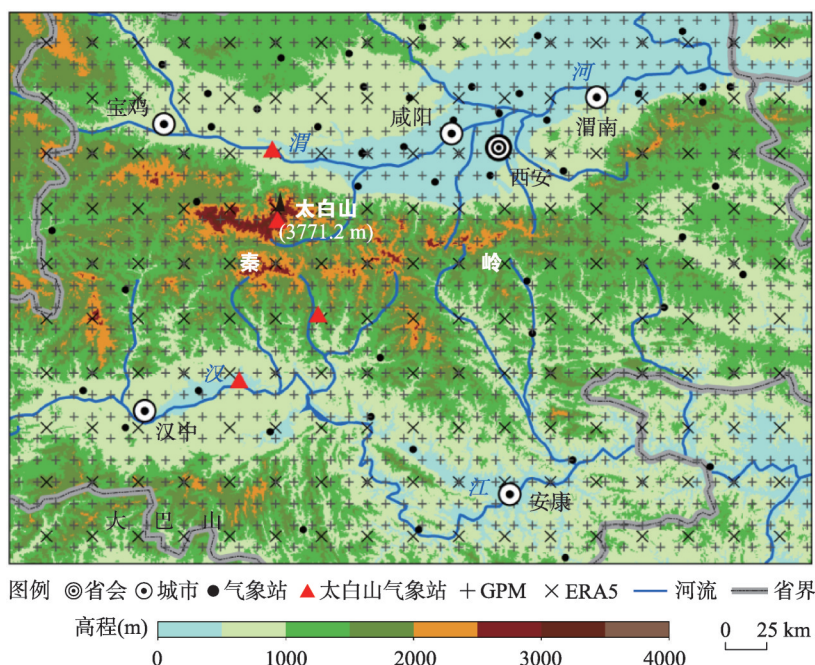
收稿日期: 2021-03-19; 修订日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771030, 42101122); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JQ-311) [Foundation: National Nature Science Foundation of China, No.41771030, No.42101122; Natural Science Basic Research Program of Shaanxi, No.2021JQ-311]

作者简介: 李大伟(1998-), 男, 陕西西安人, 硕士生, 主要从事区域气候变化与数值模拟研究。

E-mail: lidw@snnu.edu.cn

通讯作者: 段克勤(1970-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 教授, 主要从事全球变化研究。E-mail: kqduan@snnu.edu.cn



注: 红色三角点从南向北依次为洋县站、佛坪站、拔仙台站和眉县站。

图1 研究区自然概况、气象站以及GPM和ERA5资料格点分布

Fig. 1 Profile of the study area, meteorological stations, and GPM and ERA5 data grid distribution

m), 其次是太白县气象站(海拔1543 m), 其余气象站海拔均低于800 m。在海拔大于2000 m的秦岭核心区, 因海拔较高(图1), 几乎没有有效的降水观测资料, 导致对秦岭高山地区的降水变化并不十分了解。比如利用秦岭及周边地区加密的气象站降水数据, 发现夏季降水的空间变化表现为从汉江盆地向陕北递减<sup>[4]</sup>, 没有体现出秦岭降水高值区, 而实际随海拔的升高, 降水在秦岭山地有增大趋势<sup>[5-6]</sup>。利用薄盘样条插值方法, 以经度、纬度和海拔为独立变量, 由气象站观测资料建立了秦岭及其周边地区降水格点数据集<sup>[7-8]</sup>, 认为秦岭是年降水800 mm的分界线。但由于秦岭高海拔地区缺乏观测资料, 造成在高山区, 无法评判插值的结果是否反映实际的降水状况。

当前对秦岭降水研究主要以极端降水<sup>[9]</sup>、降水时空格局<sup>[10]</sup>和强降水事件模拟<sup>[11-13]</sup>为主, 这些研究主要利用秦岭南北盆地和山间谷地的气象站数据, 揭示了秦岭南北降水时空规律。但受限于降水观测资料的匮乏和卫星降水、再分析资料空间分辨率的粗糙, 目前秦岭山地降水研究仍具有较大的不确定性, 这严重制约着秦岭气候变化、水资源量估算等研究。

综观对秦岭山地的降水研究, 直至目前关于秦岭高海拔地区降水研究十分有限, 单靠低海拔的观测数据不能得到降水空间分布特征, 对深入认识秦岭山地大气降水及其水资源变化十分不利。鉴于此, 本文利用2018—2019年在秦岭太白山海拔3760 m处观测的降水数据, 采用3种空间插值方法, 结合GPM-cal数据和ERA5再分析资料, 探讨秦岭山地降水垂直变化的规律并分析降水形成的水汽条件, 以期深入认识秦岭作为南北气候过渡带的特征, 以及为研究秦岭水资源变化提供基础数据和理论依据。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究区概况

本文研究区为陕西秦岭地区 (图1), 范围介于  $32.3^{\circ}\text{N}\sim 35.0^{\circ}\text{N}$ 、 $106.4^{\circ}\text{E}\sim 110.6^{\circ}\text{E}$ , 研究区地势西高东低、北陡南缓, 太白山拔仙台为秦岭最高峰 (3767 m)。从气候角度看, 秦岭阻挡了冬季西北干冷气流南下和夏季南部暖湿气流北上, 形成中国南北重要的地理界限, 是年降水 800 mm 等降水量线和 1 月  $0^{\circ}\text{C}$  等温线<sup>[14-15]</sup>。

### 2.2 数据来源

**2.2.1 秦岭太白山降水观测数据** 本文作者 2018 年春季在秦岭太白山海拔 3760 m 拔仙台处 (图1) 架设了自动气象站, 降水观测采用 WUSH-WP 称重式降水传感器, 精度为 0.1 mm, 时间分辨率为 30 min, 研究时段是 2018 年 6 月 1 日—2019 年 5 月 31 日, 自动气象站观测的降水数据与同地点雨量桶观测数据进行了对比验证, 观测期间数据连续且无异常。

**2.2.2 气象站降水数据与 DEM 资料** 秦岭周边 62 个国家气象站的降水数据, 来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn>)。为保持数据时段一致, 选取了 62 个站点 2018 年 6 月—2019 年 5 月日降水数据。研究区地形分布及薄盘样条插值使用的数字高程数据 (DEM) 源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 分辨率为  $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。

**2.2.3 GPM 卫星降水数据与修正** GPM (Global Precipitation Measurement) 是继 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 之后的新一代全球卫星降水产品, 相较 TRMM 产品, GPM 具有覆盖范围广、时空分辨率高、反演算法精进及可探测微量降水等优点, 广泛应用于气候变化和水文过程等研究领域<sup>[16-18]</sup>。本文选用 GPM-IMERG 月降水滞时产品 (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>), 该产品经过地面月观测数据的偏差校正, 其精度最接近实际降水值<sup>[19]</sup>, 格点空间分辨率为  $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$  (图1), 时间段与观测数据保持一致, 单位为 mm/h。

本文以 63 个站点季节降水观测值为参照, 提取对应位置的 GPM 估算值以及两者的差额, 发现 GPM 数据在降水较少的渭河盆地、汉江盆地存在高估现象, 而在降水较丰富的秦岭、大巴山则存在低估现象 (图2), 这进一步验证了继 TRMM 后 GPM 数据仍在复杂地形区有“低值高估, 高值低估”问题<sup>[20]</sup>, 如 2018 年夏季至 2019 年春季拔仙台站降水观测值与 GPM 估算值的差额分别为 306.1 mm、76.7 mm、20.1 mm、136.4 mm。采用降水量差额和克里金球形插值模型对 GPM 数据进行精度修正, 得到校正后的 GPM-cal 降水数据, 该方法在青藏高原地区已经有效解决了上述误差问题且再现了区域降水空间分布<sup>[20]</sup>。

**2.2.4 ERA5 再分析资料** ERA5 是 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) 发布的第 5 代气象数据集 (<https://cds.climate.copernicus.eu>), 该资料采用国际先进的四维同化变分技术 (4D-Var) 及综合预报模式系统, 融合了大量气象站观测数据及卫星资料, 使其成为数值模拟研究重要的驱动资料之一<sup>[21]</sup>。本文选用单层月平均数据集, 变量为总降水, 格点空间分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$  (图1), 单位为 m/d; 分析与降水形成的相关水汽条件选取了月平均经向风、垂向速度和比湿数据。

### 2.3 研究方法

为研究秦岭无观测高山区的降水变化特征, 基于秦岭南北气象站点数据、GPM 卫星降水数据及 ERA5 再分析资料, 进行研究所需数据集的获取与结果的分析, 流程如图3。



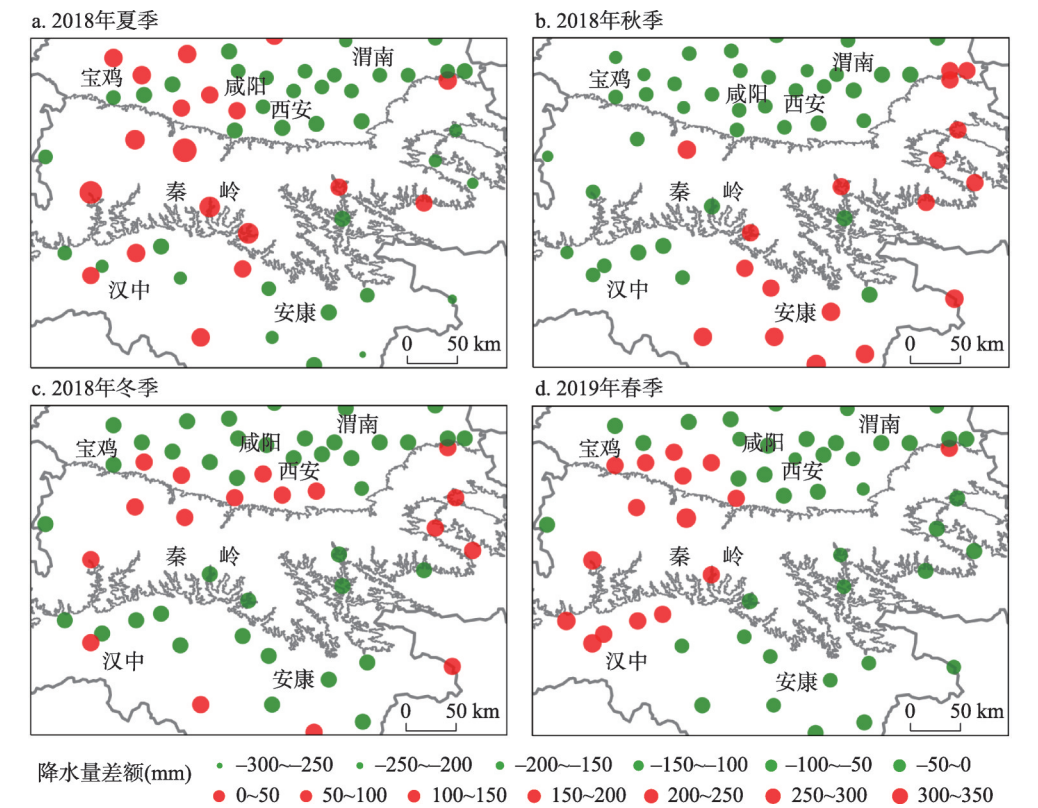


图2 研究区气象站季节降水观测值与GPM估算值差额的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of differences between rain gauges and GPM-derived seasonal precipitation in the study area

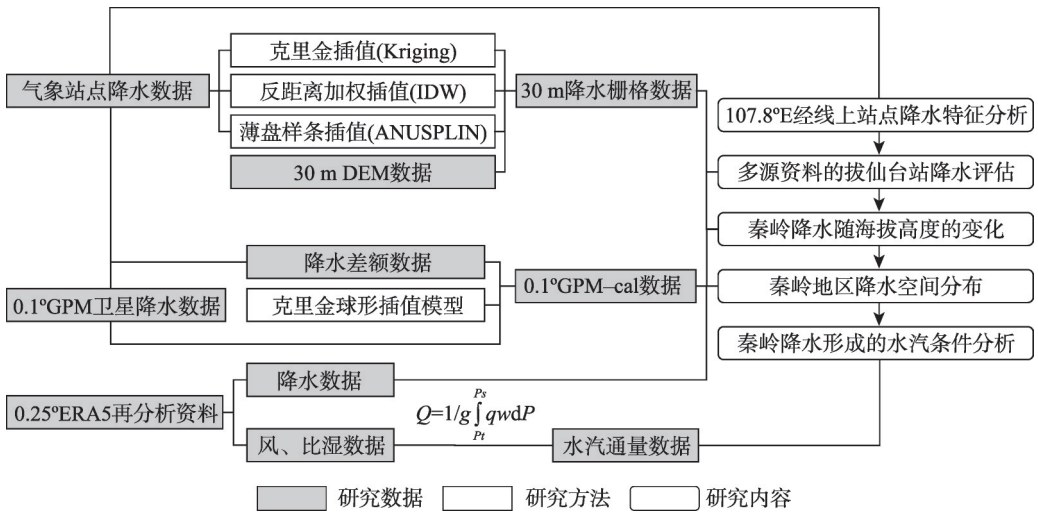


图3 研究区降水数据获取与分析流程

Fig. 3 Precipitation data acquisition and analysis process in the study area

细节如下：① 选取秦岭太白山 107.8°E 经线上的洋县、佛坪、拔仙台和眉县气象站降水观测资料，从日、月、季节和年尺度分析其降水变化特征。② 利用秦岭南北 62 个站点的降水资料，基于克里金、反距离加权及薄盘样条插值法<sup>[22-23]</sup>获取研究区 2018 年 6 月—2019

年5月空间分辨率为30 m的降水栅格数据,结合气象站降水观测值与GPM估算值的差额以及克里金球形插值模型修正得到0.1°GPM-cal数据、0.25°ERA5再分析降水数据及拔仙台站观测降水数据,在拔仙台站进行多源降水资料的评估。③选择经过秦岭拔仙台的区域,范围为32.3°N~35.0°N、107.5°E~108.0°E,利用观测、空间插值、GPM及ERA5降水数据,探究秦岭山地降水随海拔高度的变化与秦岭降水空间分布的规律。④使用ERA5再分析资料的风、比湿数据,计算研究区107.75°E剖面上季节水汽通量值,对秦岭降水形成的水汽条件进行分析。

### 3 结果分析

#### 3.1 2018年6月—2019年5月秦岭太白山降水变化

图4为经过太白山拔仙台,沿107.8°E的秦岭山区地形随纬度的剖面图,同时绘出了沿107.8°E线附近的洋县、佛坪、拔仙台和眉县气象站2018年6月—2019年5月的年降水量及逐月降水量,4个站点年降水量(海拔)分别为:洋县737.9 mm(476 m)、佛坪941.2 mm(827 m)、拔仙台1298.7 mm(3760 m)和眉县633.8 mm(520 m);季节上,拔仙台降水量均高于另外3个站点,其降水量值是汉江、渭河盆地洋县和眉县站的1.5~2倍,可见整体上秦岭年和季节降水量随海拔的升高而增大。

在月降水变化方面,4个站点相似,表现为降水集中于4—9月。同一月份内拔仙台降水量均大于位于盆地的洋县和眉县站,说明海拔高度是导致这种差异的重要因素。图4给出了2018年6月1日—2019年5月31日4个站点逐日累积降水曲线,4个站点年内逐日降水累积曲线相似,都在2018年9月和2019年4月存在两个拐点,表征在秦岭山地降水主要发生于夏季和春季。其中,拔仙台降水最多,且各季节内累积速度最快,说明秦岭高海拔地区降水强度要大于低海拔地区。

#### 3.2 多源降水资料的拔仙台站年和季节降水评估

以往因在秦岭高海拔山区缺乏降水观测资料,很难验证空间插值、卫星降水产品与再分析资料结果在秦岭高山区的适用性<sup>[24-25]</sup>。利用秦岭南北62个气象站降水资料,由克里金、薄盘样条和反距离加权法分别插值得到拔仙台的降水量,与拔仙台的观测值相比较,可验证插值方法、卫星反演降水和再分析资料在秦岭高山区的效果。从表1和图5可见,克里金插值、反距离加权插值与观测值均存在较大差异,全年相对偏差都大于35%。如利用由洋县和佛坪全年的降水观测值,由反距离加权插值得到拔仙台的降水量比观测值小620 mm,造成这一现象的原因是在插值过程中没有考虑海拔效应。

采用降水差额和克里金球形插值模型修正GPM数据得到的拔仙台全年降水量相较其他方案最佳,相对偏差为-0.8%,这是由于考虑了拔仙台站降水观测值;由薄盘样条插值获取的拔仙台全年降水量较GPM-cal次之,相对偏差为13.1%;同时,GPM-cal数据2018年秋季、ERA5再分析资料2019年春季拔仙台的降水量与实测值绝对偏差分别为-4.5 mm和-12.7 mm,对应的相对偏差为-1.7%和-4.4%,但2018年冬季各方案偏差均较大,相对偏差均在35%以上。就年降水量而言,评估结果依次为GPM-cal>薄盘样条插值>ERA5>克里金插值>反距离加权插值(表1)。

#### 3.3 秦岭降水随海拔高度变化

选取经过秦岭最高峰拔仙台的区域(32.3°N~35.0°N, 107.5°E~108.0°E),分别从观测降水量、空间插值结果、GPM-cal数据和ERA5再分析降水,来探讨秦岭地区全年和季节降水随海拔高度的变化规律(图5)。

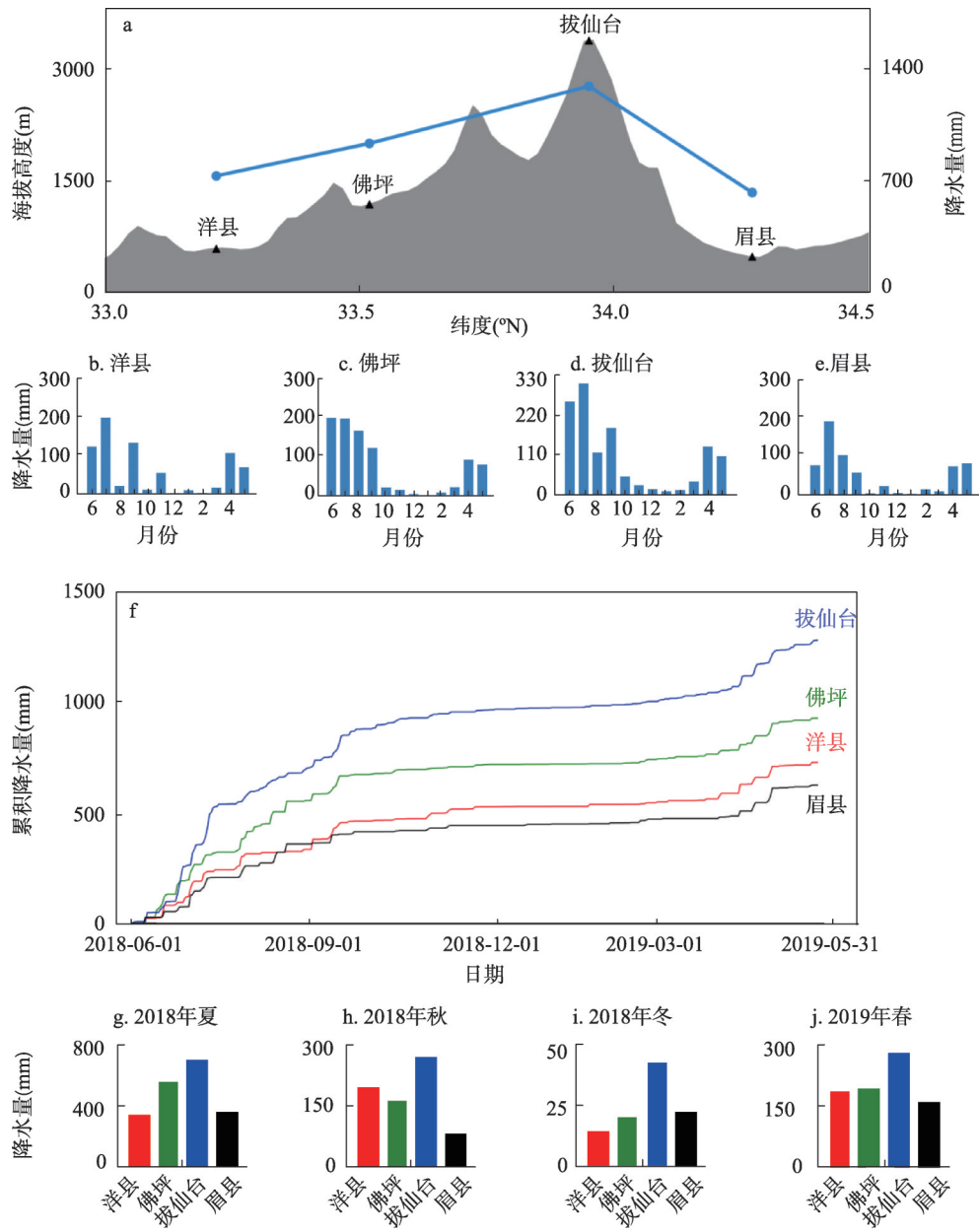


图4 2018年6月1日—2019年5月31日秦岭107.8°E经线附近4个气象站  
年降水、逐月降水、季节降水和逐日累积降水变化

Fig. 4 Annual, monthly, seasonal, and accumulated daily precipitation of four meteorological stations  
along 107.8°E in the Qinling Mountains between June 1, 2018 and May 31, 2019

从观测值看，受水汽来源和地形的影响全年降水量随海拔的升降而变化（图5a）。秦岭高海拔山区的降水是汉江盆地和渭河盆地的2倍左右，凸显了秦岭山区降水对汉江和渭河径流的重要补给作用。图5b~5e显示降水最大高度带随季节而发生变化，2018年夏季秦岭山地降水量最高，大巴山次之，汉江盆地降水与渭河盆地相当。2018年秋季大巴

表 1 不同方案拔仙台站年和季节降水量和相对偏差

Tab. 1 Annual and seasonal precipitation and relative bias of precipitation of different schemes at Baxiantai station						
指标	方案	全年	2018年夏季	2018年秋季	2018年冬季	2019年春季
降水量(mm)	观测	1298.7	700.6	269.8	42.7	285.6
	薄盘样条插值	1468.6	923.6	202.2	89.6	250.8
	克里金插值	814.4	482.0	124.1	26.4	178.7
	反距离加权插值	678.2	387.3	106.6	25.9	158.4
	GPM-cal	1287.8	583.4	265.3	26.1	246.3
	ERA5	1578.9	983.0	247.0	76.0	272.9
相对偏差(%)	薄盘样条插值	13.1	31.8	-25.1	109.8	-12.2
	克里金插值	-37.3	-31.2	-54.0	-38.1	-37.4
	反距离加权插值	-47.8	-44.7	-60.5	-39.3	-44.5
	GPM-cal	-0.8	-16.7	-1.7	-38.9	-13.7
	ERA5	21.6	40.3	-8.5	78.0	-4.4

注：表中灰色底纹为相对偏差最小的方案。

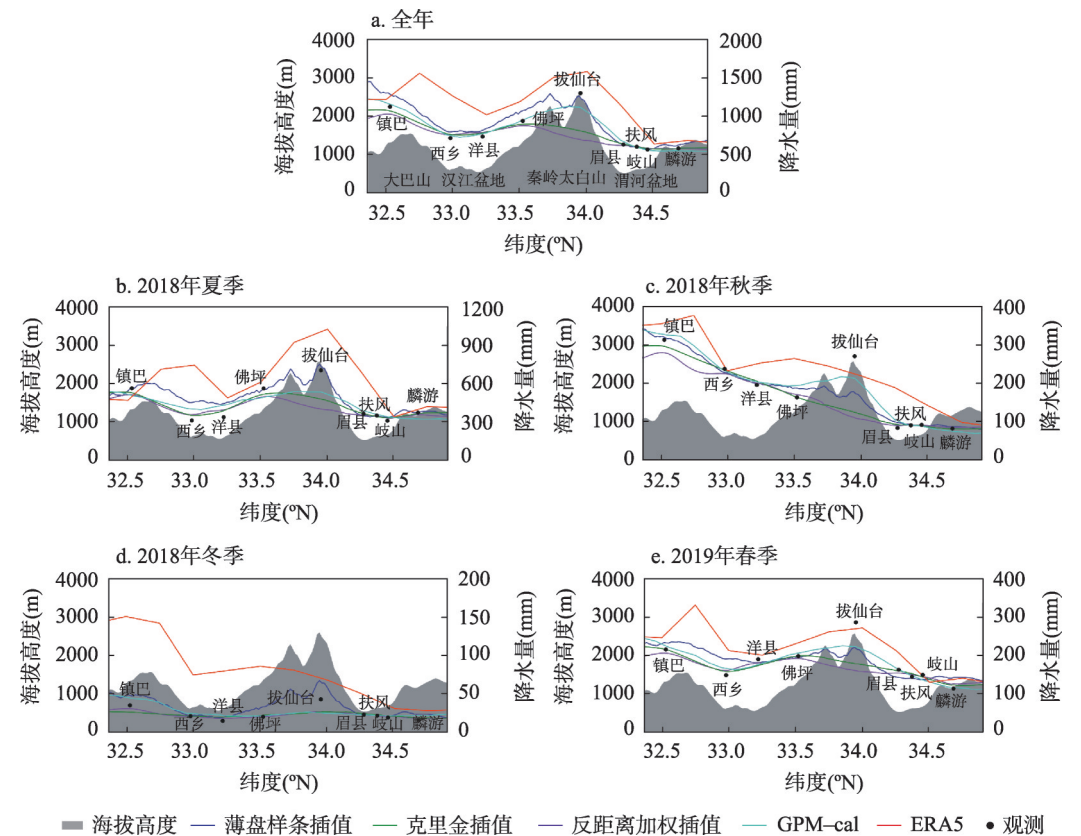


图 5 观测、空间插值、GPM-cal 和 ERA5 资料的年和季节降水随海拔高度的变化

Fig. 5 Variations with height of the precipitation, including observations, spatial interpolation, and GPM-cal and ERA5 data

山地区降水最大，秦岭次之，汉江盆地高于渭河盆地。2018 年冬季秦岭山地降水最大，且降水量是汉江盆地、渭河盆地和大巴山地区的 1.5~2 倍左右。2019 年春季降水随海拔变化的特征与 2018 年夏季相似。



3种空间插值方案表征秦岭太白山年和季节降水垂向分布规律差异明显(图5)。其中,克里金和反距离加权插值均未能再现秦岭太白山年和季节降水高值中心,且全年、夏季、秋季、冬季和春季插值结果较实测值显著偏低。薄盘样条插值结果在全年和夏季接近实测,主要原因是该方法以DEM作为协变量,考虑了地形对降水插值的影响,但对秦岭山地秋季和春季降水低估,而对冬季降水高估,这表明地形对降水的影响是多因子共同作用的结果,海拔高度仅是影响因子之一<sup>[26]</sup>。

基于降水差额和克里金球形插值模型修正的GPM-cal降水数据,克服了“低值高估,高值低估”问题,基本能刻画秦岭年和季节降水随海拔变化的规律;同样,空间分辨率较粗糙的ERA5再分析降水,也能够反映地形起伏对降水形成和分布的影响。综合看,薄盘样条方法获取的秦岭全年和夏季降水插值结果较好,但对秋季、冬季和春季高山区降水的插值结果存在较大偏差。

### 3.4 秦岭地区降水空间分布特征

为表征秦岭地区降水的空间变化规律,分别从观测资料(62个气象站+拔仙台站)、薄盘样条插值结果、GPM-cal降水数据和ERA5再分析结果比较分析2018年6月—2019年5月秦岭地区的降水空间分布特征(图6)。

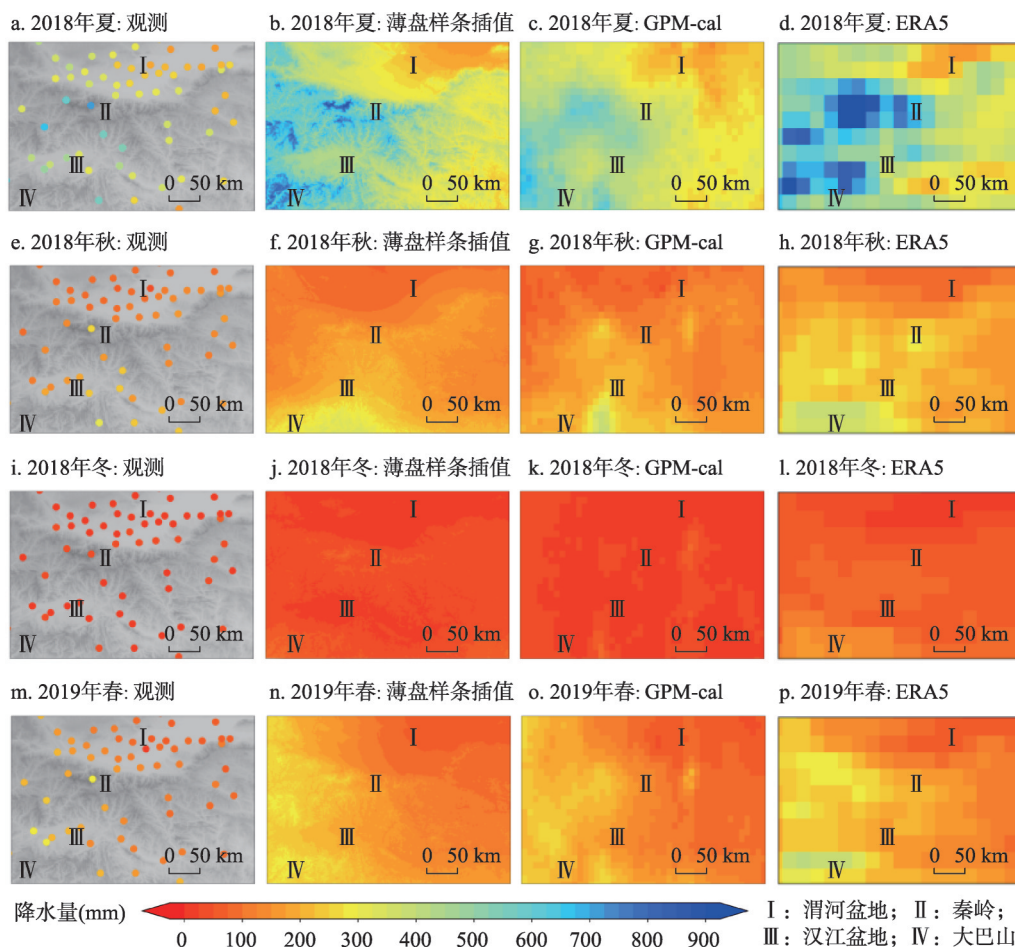


图6 观测、薄盘样条插值、GPM-cal和ERA5季节降水空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of precipitation by observation, ANUSPLIN, GPM-cal, and ERA5 data



尽管在秦岭山区观测站点分布稀疏,但也反映出山区降水高、盆地降水低的特征。观测、薄盘样条插值结果、GPM-cal降水数据与ERA5再分析资料的降水空间格局大体一致,都表现为在秦岭和大巴山出现降水高值中心。薄盘样条插值、GPM-cal降水数据和ERA5再分析资料的分辨率分别为30 m、 $0.1^{\circ}$ 和 $0.25^{\circ}$ ,薄盘样条插值是基于低海拔站点和30 m DEM进行样条函数表面拟合获取的空间降水数据,30 m DEM足以显式解析山脉走向、海拔高度、坡度对降水的影响,能够再现秦岭山地真实的降水空间分布特征。GPM虽然是目前空间分辨率最高的卫星降水产品,但受降水反演算法、卫星传感器观测不确定性和复杂地形的影响,致使其在秦岭的估算结果与观测存在较大偏差;而GPM-cal考虑了秦岭高海拔降水观测资料对区域降水格局的控制作用,是引入研究区降水差额对GPM修正后的结果,解决了“低值高估、高值低估”问题,使其再现的降水空间分布特征较原数据更接近观测。相比之下,ERA5空间分辨率虽较GPM卫星降水粗糙,但ERA5作为ECMWF最新一代数据集,数据生成过程采用目前较高分辨率大气环流模式、较先进的数据同化技术及融合了多套观测资料,使得ERA5再现的秦岭山地降水场空间模态更接近实际,在大巴山、汉江盆地、秦岭和渭河盆地地区,都能够描绘地形剧烈起伏带来的降水场的空间分布差异。

### 3.5 秦岭降水形成的水汽条件

基于观测、空间插值、卫星产品和再分析资料对研究区季节降水空间分布、量值及趋势的比较分析显示,研究区内秦岭太白山南坡、大巴山部分在各季节均为降水高值中心,且ERA5资料能较好地捕捉这一特征(图6)。为了从环流角度分析区域降水形成、分布的机理,结合ERA5风、比湿数据绘制了沿 $107.75^{\circ}\text{E}$ 经线剖面上低层(1000 hPa)到高层(100 hPa)沿经线方向水汽通量的季节变化(图7)。

图7a~7d显示了在 $107.75^{\circ}\text{E}$ 剖面上各季节水汽输送状况,发现水汽输送过程主要发生于600 hPa高度以下。2018年夏季水汽通量值在750 hPa附近形成高值中心,最大值可达 $11\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ,为夏季降水的形成提供了充足的水分条件。2018年秋季、冬季和2019年春季(图7b~d)南来气流的水汽通量较夏季微弱,水汽通量值仅为 $0\sim 4\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ,水汽输送过程主要发生在700 hPa高度附近,这可能是秦岭山地与700 hPa西南低空急流的相互作用<sup>[27]</sup>。从图7看,秦岭对南来的湿润气流具有明显的阻滞作用,受秦岭地形阻挡,水汽集聚于汉江盆地,在地形强迫下气流爬升产生降水,使秦岭南坡形成降水高值中心。

## 4 结论与讨论

秦岭作为中国气候变化的关键带,不仅是南北气候的分界线,也是长江最大支流汉江和黄河最大支流渭河的重要水源地。深刻认识秦岭高山区的气候变化,是深入理解秦岭作为南北地理分界线特征,以及认识秦岭水文水资源变化的先决条件。针对在海拔大于2000 m的秦岭高山区缺乏气象观测这一事实,本文利用2018年6月—2019年5月在秦岭太白山海拔3760 m观测的降水资料,发现秦岭高海拔山区年降水量可达1300 mm,约2倍于汉江盆地和渭河盆地的降水量。

为探究秦岭降水随海拔高度的变化,采用克里金、反距离加权、薄盘样条插值方法、GPM-cal降水数据以及ERA5再分析资料,获得了研究区年和季节降水的空间分布。结果表明利用低海拔降水观测数据,由克里金、反距离加权插值不能得到准确的秦岭年

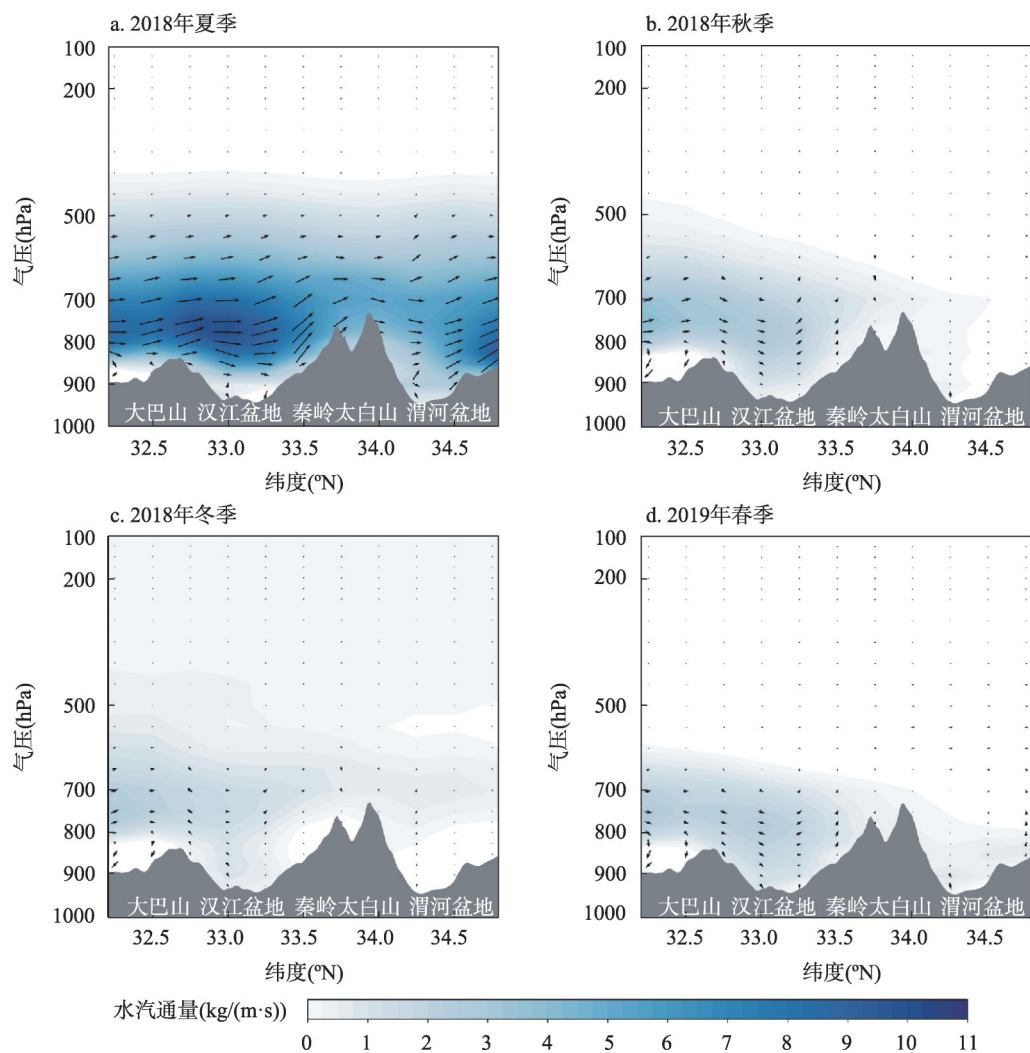


图7 107.75°E经线剖面上低层到高层的季节水汽通量

Fig. 7 Seasonal water vapor fluxes from low level to high level for the 107.75°E meridional profile

和季节高海拔降水值。继 TRMM 产品之后新一代卫星降水产品—GPM, 受传感器、反演算法及观测区域限制, 也未能再现秦岭和大巴山降水高值中心; 而考虑高海拔站点观测降水、采用降水差额和克里金球形插值模型得到的 GPM-cal 降水数据, 获取的秦岭高海拔年、夏季和秋季降水值更接近观测, 且具有再现秦岭降水模态的能力。ERA5 再分析资料虽降水量值偏高, 但具备再现研究区降水空间分布的能力。采用薄盘样条插值, 结合观测资料和高分辨率 DEM 产品相较其他方案更能准确刻画秦岭山地降水随海拔高度的变化。

ERA5 资料的水汽通量分析显示, 研究区水汽输送主要发生于 600 hPa 高度以下, 秦岭对水汽向北输送具有明显的阻滞作用。夏季降水占全年 55% 以上, 来自海洋的湿润气流抵达该区域, 受秦岭的地形强迫作用, 湿润气流发生爬升, 进而凝结降水, 致使其南坡降水最为丰富。除此之外, 春季、秋季和冬季区域气流水汽含量低, 但秦岭仍然对水

汽具有显著的拦截作用。因此,秦岭凭借着高大地形对水汽的阻挡、强迫和拦截作用使其成为区域降水高值中心。

秦岭作为湿润季风气候与半湿润季风气候的分界线,就目前而言,秦岭本身的气候变化并没有完全研究清楚。比如秦岭山地最大降水带处于什么高度?全球变暖背景下秦岭高海拔地区降水是增加还是减少?秦岭究竟是如何影响南北水汽输送的?这些问题目前都没有明确的答案。虽然在太白山海拔 3760 m 处进行了气象观测,但是对认识秦岭气候的垂直地带性显然不够。未来需要在秦岭高海拔地区进一步进行降水梯度的观测,注重加强高山地区对全球变化响应快速而强烈的山地特征“线”的连续监测,为全球变化的研究提供重要依据<sup>[28]</sup>。

### 参考文献(References)

- [1] Zhu Kezhen. Subtropics of China. Chinese Science Bulletin, 1958, 9(17): 524-528. [竺可桢. 中国的亚热带. 科学通报, 1958, 9(17): 524-528.]
- [2] Meng Qingren. Origin of the Qinling Mountains. Scientia Sinica: Terrae, 2017, 47(2): 412-420. [孟庆任. 秦岭的由来. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(2): 412-420.]
- [3] Zhang Baiping. Ten major scientific issues concerning the study of China's north-south transitional zone. Progress in Geography, 2019, 38(3): 305-311. [张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. 地理科学进展, 2019, 38(3): 305-311.]
- [4] Pan Liujie, Zhang Hongfang, Chen Xiaoting, et al. Dominant modes of summer precipitation in Qinling and surrounding areas. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(3): 377-387. [潘留杰, 张宏芳, 陈小婷, 等. 秦岭及周边地区夏季降水的主模态分析. 大气科学学报, 2018, 41(3): 377-387.]
- [5] Fu Baopu, Yu Jingming, Li Zhaoyuan. Characteristics of the summer microclimate in Mt. Taibai of Qinling Mountains. Acta Geographica Sinica, 1982, 37(1): 88-97. [傅抱璞, 虞静明, 李兆元. 秦岭太白山夏季的小气候特点. 地理学报, 1982, 37(1): 88-97.]
- [6] He Jun, Yao Xuanping. Some characteristics of precipitation in the Qinling Mountains. Shaanxi Meteorology, 1996(5): 22-23. [何军, 姚选平. 秦岭山地降水的若干特征. 陕西气象, 1996(5): 22-23.]
- [7] Lu Fuzhi, Lu Huayu. A high-resolution grid dataset of air temperature and precipitation for Qinling-Daba Mountains in central China and its implications for regional climate. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 875-888. [陆福志, 鹿化煜. 秦岭—大巴山高分辨率气温和降水格点数据集的建立及其对区域气候的指示. 地理学报, 2019, 74(5): 875-888.]
- [8] Meng Qing, Bai Hongying, Guo Shaozhuang. Spatial-temporal variation of precipitation in Qinling area in recent 50 years based on Anusplin. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 206-212. [孟清, 白红英, 郭少壮. 基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化. 水土保持研究, 2020, 27(2): 206-212.]
- [9] Li Shuangshuang, Wang Chengbo, Yan Junping, et al. Variability of the event-based extreme precipitation in the south and north Qinling Mountains. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 989-1007. [李双双, 汪成博, 延军平, 等. 面向事件过程的秦岭南北极端降水时空变化特征. 地理学报, 2020, 75(5): 989-1007.]
- [10] Zhang Y N, Liang C. Analysis of annual and seasonal precipitation variation in the Qinba Mountain area, China. Scientific Reports, 2020, 10: 961. DOI: 10.1038/s41598-020-57743-y.
- [11] Wang Nan, Zhao Qiang, Jing Yu, et al. Causation analysis of a short-time strong rainfall triggered by cold front at the northern piedmont. Plateau Meteorology, 2018, 37(5): 1277-1288. [王楠, 赵强, 井宇, 等. 秦岭北麓一次冷锋触发的短时强降水成因分析. 高原气象, 2018, 37(5): 1277-1288.]
- [12] Bai Xiaoping, Wang Shigong, Zhao Lu, et al. Conceptual models of short-time heavy rainfall in the east of Northwest China. Plateau Meteorology, 2016, 35(5): 1248-1256. [白晓平, 王式功, 赵璐, 等. 西北地区东部短时强降水概念模型. 高原气象, 2016, 35(5): 1248-1256.]
- [13] Yang Q Y, Yu Z B, Wei J H, et al. Performance of the WRF model in simulating intense precipitation events over the Hanjiang River Basin, China: A multi-physics ensemble approach. Atmospheric Research, 2021, 248: 105206. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105206.
- [14] Zhao T, Bai H Y, Yuan Y, et al. Spatio-temporal differentiation of climate warming (1959-2016) in the middle Qinling

- Mountains of China. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(4): 657-668.
- [15] Yao Yonghui, Kou Zhixiang, Hu Yufan, et al. Spatial distribution patterns of *Pinus tabulaeformis* forest and *Pinus massoniana* forest in Qinling-Daba Mountains and the boundary of subtropical and warm temperate zones. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2298-2306. [姚永慧, 寇志翔, 胡宇凡, 等. 秦巴山区马尾松林和油松林的空间分布及亚热带与暖温带界线划分. *地理学报*, 2020, 75(11): 2298-2306.]
- [16] Li X Y, Sungmin O, Wang N, et al. Evaluation of the GPM IMERG V06 products for light rain over mainland of China. *Atmospheric Research*, 2021, 253: 105519. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105510.
- [17] Li Z, Tang G Q, Hong Z, et al. Two-decades of GPM IMERG early and final run products intercomparison: Similarity and difference in climatology, rates, and extremes. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125975. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.125975.
- [18] Pradhan A, Nair A S, Indu J, et al. Impact of sampling of GPM orbital data on streamflow simulations. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125798. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125798.
- [19] Huffman G J, Stocker E F, Bolvin D T, et al. GPM IMERG final precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2019. DOI: 10.5067/GPM/IMERG/3B-MONTH/06.
- [20] Qi Wenwen, Zhang Baiping, Pang Yu, et al. TRMM-data-based spatial and seasonal patterns of precipitation in the Qinghai-Tibet plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(8): 999-1005. [齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 基于TRMM数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征. *地理科学*, 2013, 33(8): 999-1005.]
- [21] Zhang Yi, Chen Junhui, Tang Binyan, et al. Numerical simulation of meteorological elements of a pollution episode in Sichuan Basin based on two reanalysis datasets. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(9): 3093-3102. [张懿, 陈军辉, 唐斌雁, 等. 基于两种再分析资料的一次四川盆地大气污染过程气象要素数值模拟研究. *环境科学学报*, 2020, 40(9): 3093-3102.]
- [22] Hutchinson M. ANUSPLIN Version 4.2 User Guide. Canberra: Australian National University, 2001.
- [23] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4): 385-403.
- [24] Zhuo Jing, Zhu Yannian. Spatial interpolation methods of annual average precipitation on Qinling Mountains. *Arid Land Geography*, 2017, 40(3): 555-563. [卓静, 朱延年. 秦岭主脊区年降水量空间插值最优方法研究. *干旱区地理*, 2017, 40(3): 555-563.]
- [25] Ding Yu, Li Hongbing, Shao Aimei. Effects of different combinations of WRF parameterization schemes on 2 m temperature, precipitation simulation in Qinba Mountain area. *Gansu Science and Technology*. 2019, 35(9): 39-43, 46. [丁煜, 李洪兵, Shao Aimei. 基于WRF模式的不同参数化方案组合对秦巴山区2 m温度、降水模拟研究. *甘肃科技*, 2019, 35(9): 39-43, 46.]
- [26] Li G P, Yu Z B, Wang W G, et al. Analysis of the spatial distribution of precipitation and topography with GPM data in the Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, 2021, 247: 105259. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105259.
- [27] Zhang F L, Li G P, Yue J. The moisture sources and transport processes for a sudden rainstorm associated with double low-level jets in the northeast Sichuan Basin of China. *Atmosphere*, 2019, 10(3): 160. DOI: 10.3390/atmos10030160.
- [28] Li Guoping. Progress and prospects in research of mountain meteorology in China during the past 25 years. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(3): 115-122. [李国平. 近25年来中国山地气象研究进展. *气象科技进展*, 2016, 6(3): 115-122.]



## Vertical variation of precipitation in the central Qinling Mountains

LI Dawei, DUAN Keqin, SHI Peihong, LI Shuangshuang,

SHANG Wei, ZHANG Zhaopeng

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** A clear understanding of the precipitation variation patterns at high altitudes of the Qinling Mountains is a prerequisite for an in-depth understanding of the characteristics of this mountain range as China's north-south transitional zone and its important role of water resources in the Middle Route of South-North Water Transfer Project. However, understanding the precipitation changes in the mountainous areas of the Qinling Mountains has been hindered by limited effective precipitation observation data in these mountainous areas. An analysis of precipitation data measured from June 1, 2018, to May 31, 2019, at an altitude of 3760 m at the Mount Taibai of the Qinling Mountains revealed that the annual precipitation at this altitude can reach 1300 mm, which is much more than the 600-800 mm annual precipitation recorded in the Hanjiang Basin and the Guanzhong Plain. On this basis, the persistence of annual and seasonal precipitation patterns in the Qinling Mountains was examined by kriging, inverse distance weighted interpolation, and ANUSPLIN methods, as well as GPM-corrected data (GPM-cal) and ERA5 reanalysis data. Accurate high-altitude precipitation values could not be obtained using kriging and IDW. However, GPM-cal, ANUSPLIN, and ERA5 data could more accurately portray the variation of annual precipitation with topography in the Qinling Mountains. An analysis of water vapor fluxes showed that the Mount Taibai has significant blocking, forcing, and intercepting effects on southward moist airflow below the 600 hPa height owing to its high terrains, making its southern slope a regional center of high precipitation values. Combining high mountain precipitation observations, ANUSPLIN, multi-source grid point information, and data correction methods is an effective way to understand precipitation formation and variation in the Qinling Mountains.

**Keywords:** Qinling Mountains; precipitation; ANUSPLIN; GPM; ERA5