

夏季怒江流域水汽输送多支特征及对降水影响

潘 锋¹, 何大明², 曹 杰³, 陆 颖²

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 昆明 650500; 2. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500;
3. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500)

摘要: 基于高空间分辨率0.25°的ERA-Interim再分析资料、TRMM 3B43 Version7数据、气象站点实测数据等多源数据, 本文采用一种新的流域边界水汽通量概化和提取方法, 揭示了夏季怒江流域水汽输送多支特征, 并分析了其对降水时空分异的影响。研究表明, 在高黎贡山南部、北部, 伯舒拉岭北部及念青唐古拉山中部, 有4支区域性水汽输送高值区, 多年平均输送通量分别达102.6 kg/(m·s)、66.3 kg/(m·s)、39.7 kg/(m·s)和41.3 kg/(m·s)。多支水汽输送不仅深刻影响流域水汽输送格局, 而且对降水时空分异也有不同程度影响。年际变化上, 中下游横断山区水汽输送对降水的影响较小, 上游青藏高原区影响较大, 尤其以那曲—比如—索县一带影响最为显著。空间分布上, 流域降水与水汽输送通量呈显著正相关, 受多支水汽输送影响形成多个区域性多雨带。

关键词: 怒江流域; 水汽输送; 降水; ERA-Interim再分析数据; 青藏高原

DOI: 10.11821/dlxb202301006

1 引言

日益加剧的气候变化和人类活动引发了水资源短缺、旱涝灾害频发等一系列水问题^[1-2], 严重制约着人类社会的发展。水汽输送—降水是大气水资源向陆地水资源转变的关键环节, 这些水问题的发生、发展都与水汽输送及其引发的降水改变和异常密切相关^[3-4]。厘清流域水汽输送特征及其对降水的影响, 对科学评估变化环境下的水文响应、合理配置流域水资源及指导防灾减灾具有重要意义。

夏季青藏高原及周边山地是影响中国乃至亚洲地区降水及灾害性天气的水汽输送关键区^[5], 也是雅鲁藏布江—布拉马普特拉河、怒江—萨尔温江、澜沧江—湄公河、金沙江—长江等大江大河的上游区, 区域水汽输送及降水对中国乃至亚洲区水文循环和水资源产生重要影响^[6]。因而, 青藏高原及周边水汽输送及对降水影响是气象及水文学研究中备受关注的科学问题, 以往研究多基于大陆或次大陆尺度开展, 侧重于青藏高原及周边水汽输送对下游地区^[4, 7]及青藏高原本身降水的影响^[8-11], 而从青藏高原山地流域视角开展的研究相对较少。

怒江是中国西南一条重要的国际河流(图1), 面积约13.6万km², 多年平均径流量703亿m³^[12]。流域上游深入青藏高原东南腹地, 以念青唐古拉山—伯舒拉岭为界与雅鲁藏布江相邻; 下游纵贯横断山区西部, 以高黎贡山为界与伊洛瓦底江毗邻。特殊的区位

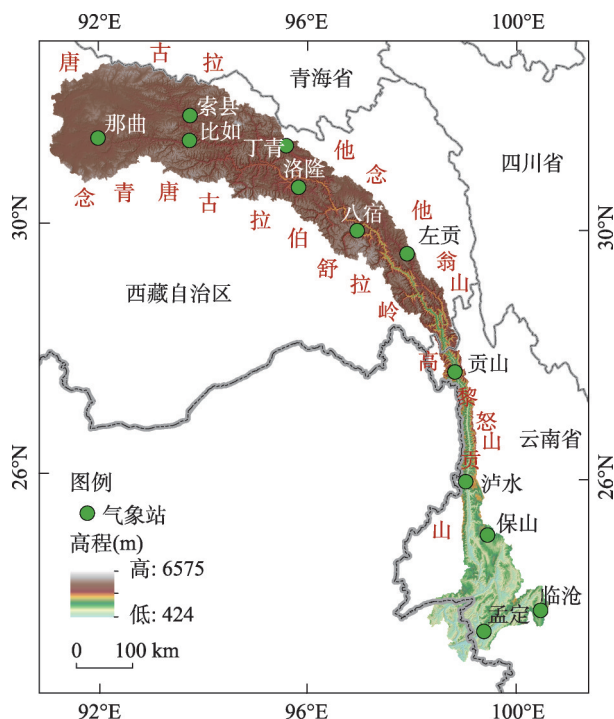
收稿日期: 2022-05-09; 修订日期: 2022-12-31

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0601600)[Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFA0601600]

作者简介: 潘锋(1980-), 男, 江苏泰兴人, 博士, 讲师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: panfeng@kmust.edu.cn

通讯作者: 何大明(1958-), 男, 四川南充人, 教授, 中国地理学会会员(S110000355M), 主要从事国际河流、跨境水与生态安全等研究。E-mail: dmhe@ynu.edu.cn

使其降水深受印度季风影响^[13], 空间异质性显著。杜军、樊辉等利用气象站长时序逐月降水量数据, 对怒江流域降水空间格局和变化特征进行研究, 并讨论了经纬度和海拔对降水的影响^[14-15]; 李蒙等基于 TRMM 3B42 V7 降水数据分析了怒江上游降水特征^[16]; 目前, 尚缺乏水汽输送对降水影响的探讨。高登义^[17]指出该区山地水汽屏障和通道作用同时存在, 两者综合作用形成特殊的水汽输送结构和降水分布。本文采用 0.25° 高分辨率 ERA-Interim 再分析资料、SRTM V4.1 DEM 数据, 通过一种新的流域边界水汽通量概化和提取方法, 揭示出山地“水汽屏障和通道”作用下, 怒江流域水汽输送具有多支特征; 并结合站点实测资料、TRMM 3B43 V7 降水数据, 分析了多支水汽输送对降水时空分异的影响。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作, 底图边界无修改。

图1 怒江流域区位及气象站点分布

Fig. 1 Location of the Nujiang River Basin and meteorological stations

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

怒江发源于青藏高原唐古拉山南麓, 其河源那曲(洛隆县以北)河谷宽广, 海拔大都在 4500~5000 m, 山峰在 5500 m 以上, 年降水量在 500~700 mm。干流过洛隆县后, 流域渐窄, 河流深切, 谷地海拔多在 3000 m 以下, 山峰多在 4500 m 以上; 区域年降水在 270~500 mm, 是流域降水最少的地区之一。过左贡县后, 流域在高黎贡山和怒山的夹持下进一步收窄, 山峰海拔在 3500 m 以上, 谷底海拔在 1000~2500 m, 北部贡山一带雨量丰沛, 年降水在 1700 mm 左右, 南部在 950 mm 左右。干流向南过泸水后, 地形渐低且开阔, 北部山峰高程一般在 2000~2500 m, 南部山峰海拔降至 1500 m 以下, 河床海拔 600 m 以下; 年降水大都介于 1000~1600 mm 间, 下游边境一带山地年降水可达 2000 mm 以上^[12]。

2.2 数据来源

2.2.1 ERA-Interim 再分析资料 已有研究表明, ERA-Interim 再分析资料能较好地刻画青藏高原及周边地区夏季水汽输送情况^[11]。选取 1979—2017 年欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 推出的 0.25°×0.25° 高空间分辨率逐月平均 ERA-Interim 再分析资料 (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>), 包括 100~1000 hPa 的分层风场、比湿, 以及相应的地面气压数据; 垂直方向共分为 27 层。

2.2.2 气象资料 选用怒江流域内 12 个国家气象基本站的实测降水数据 (图 1、表 1), 数据源自国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>)。

2.2.3 TRMM 3B43 Version7 数据 TRMM 3B43 为月降水数据, 空间分辨率为 0.25°×

表 1 怒江流域气象站点

Tab. 1 Meteorological stations in the Nujiang River Basin

站点	高程(m)	起止年份	站点	高程(m)	起止年份	站点	高程(m)	起止年份
孟定	5114	1979—1990	贡山	1583	1979—2017	丁青	3873	1979—2017
临沧	1502	1979—2017	左贡	3780	1979—2017	比如	3940	1991—2017
保山	1652	1979—2017	八宿	3260	1991—2017	索县	4023	1979—2017
泸水	1805	1979—2002	洛隆	3640	1992—2017	那曲	4507	1979—2017

0.25°, 存储格式为 HDF 格式, 数据记录的是每月的平均每小时降水量 (mm/h), 最新版本 Version7 于 2012 年 5 月 22 日发布, 数据下载自 the Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (<http://pps.gsfc.nasa.gov/tmpa/>)。

2.2.4 SRTM Version4.1 DEM 数据 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Version 4.1 DEM 数据, 为最新修订版本, 由国际热带农业中心 (International Centre for Tropical Agriculture, CIAT) 利用新的插值算法进行了处理, 并基于辅助数据对无值区域做了填充; 数据空间分辨率 90 m, 下载自 <http://srtm.csi.cgiar.org>。

2.3 研究方法

2.3.1 整层水汽通量和水汽通量散度 垂直积分水汽通量计算公式如下:

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_i}^{p_s} q \vec{V} dp \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度 (m^2/s); \vec{V} 为水平风矢量 (m/s); q 为比湿 (g/g); p_s 为地面气压 (hPa); p_i 为大气顶部气压, 本文取值 100 hPa。

水汽通量散度计算公式如下:

$$Q_{div} = \frac{1}{g} \int_{p_i}^{p_s} \nabla(q \vec{V}) dp \quad (2)$$

2.3.2 流域边界水汽通量的概化和提取 已有研究在开展水汽输送特征分析时, 常采用“箱体”模型^[7]或区域外包正多边形^[18]对流域边界进行概化处理。怒江流域形状不规则且地形变化剧烈、水汽输送空间异质性强, 现有方法并不适用。本文提出一种新方法进行流域边界 (分水岭脊线) 上空水汽通量的概化和提取: ① 选用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 高空间分辨率 ERA-Interim 再分析数据, 基于公式 (1) 计算得到研究区地表至 100 hPa 的整层水汽通量栅格数据。② 基于 SRTM V4.1 DEM 提取得到流域矢量边界 (分水岭脊线) 数据。③ 将流域矢量边界和水汽通量栅格数据进行叠加分析, 提取与矢量边界相交的水汽通量栅格值。通过该方法提取的水汽通量沿流域边界分布大致均匀, 每隔 0.25° 就有一个值。

2.3.3 TRMM 降水数据处理及统计 利用怒江流域矢量边界数据, 对 1998—2015 年共 216 幅的 TRMM 3B43 Version7 月降水数据进行批量裁剪, 得到流域范围内 212 个 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的降水栅格数据。将 TRMM 3B43 Version7 月平均小时降水量 (mm/h) 转换成月降水量 (mm), 统计得到流域多年平均夏季 (6—8 月) 降水数据。

此外, 本文中还使用了皮尔逊相关分析 (t 检验)、非线性函数拟合及时间序列趋势分析等统计分析方法^[19]。

3 流域水汽输送特征

3.1 流域水汽输送的多支特征

夏季怒江流域及周边地区多年平均整层水汽通量计算成果如图 2 所示。结果表明,

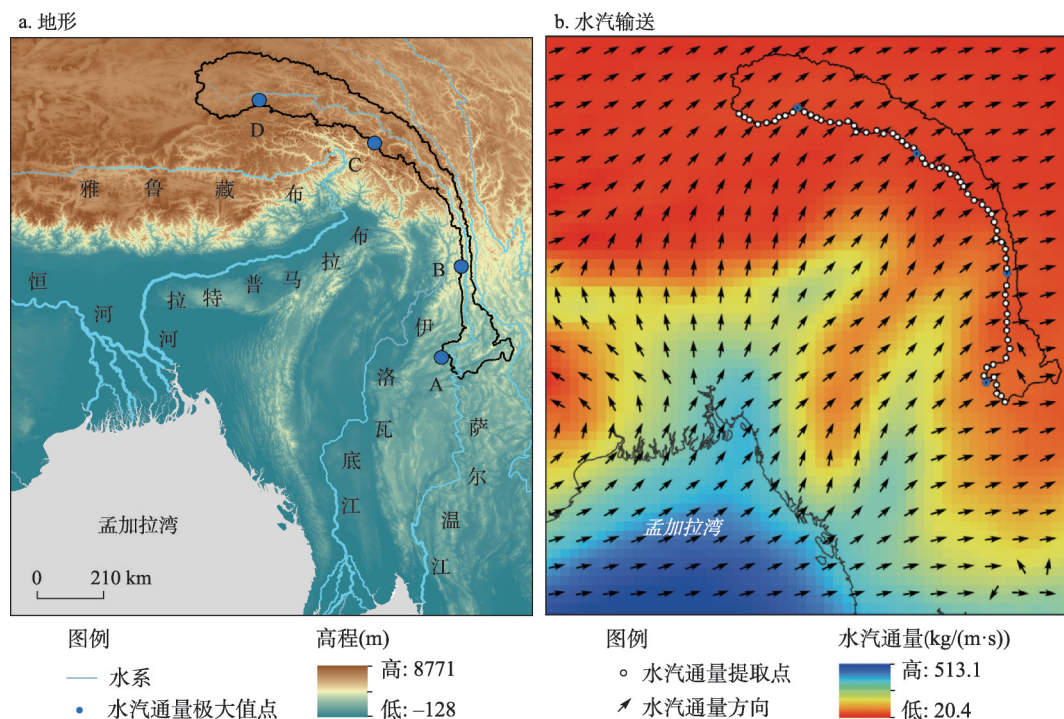


图2 1979—2017年怒江流域多年平均夏季水汽输送背景场和区域地形

Fig. 2 Background field of summer water vapor transfer of Nujiang River Basin from 1979 to 2017 and the topography

区域内盛行西南向水汽输送,且强度具有明显空间异质性。经统计,孟加拉湾上空水汽输送均值达 $378.8 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,青藏高原南侧 (27.0°N 以南) 陆地上空水汽输送均值 $174.5 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,青藏高原面上仅 $39.2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。可见,区域内向北不断攀升的地形,尤其青藏高原隆起(图2a)对南来暖湿气流“阻隔作用”明显。同时,对比图2a、2b可见,沿恒河、布拉马普特拉河以及伊洛瓦底江河谷地带的水汽输送,明显强于同纬度其他地区,表明青藏高原南侧海拔较低的大河河谷地带是水汽向高纬输送的有利通道。

夏季怒江流域水汽源自印度洋—孟加拉湾,且主要自西侧边界输入(图2b)。流域西侧边界由念青唐古拉山—伯舒拉岭—高黎贡山脉构成,是印度洋暖湿气流进入流域的天然屏障。按2.3.2所述方法,得到流域西侧分水岭上空69个水汽通量数据(图2b),将数据从下游向上游依次编号(1~69),绘制分水岭上空水汽输送通量和高程变化图(图3a)。可见,怒江西侧分水岭沿程水汽输送变化较大,有4个区域性强水汽输送中心(极大值点),依次用A、B、C、D标示(图3a、图2a)。

流域西侧分水岭高黎贡山段(点1~31)位于横断山区西侧,平均高程3027 m,平均水汽通量 $70.5 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;水汽输送的两个极大值分别位于高黎贡山南部(A点: 98.170°E 、 23.700°N ,水汽通量 $102.6 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)和高黎贡山北部(B点: 26.374°N 、 98.730°E ,水汽通量 $66.3 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$);该段高程自南向北迅速攀升,水汽输送不断减小,向北至与伯舒拉岭结合处仅 $35.3 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,是流域水汽输入最小的地区。流域分水岭伯舒拉岭—念青唐古拉山段(点32~69)位于青藏高原东南部,平均海拔4935 m左右,平均水汽通量 $38.2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;该段高程和水汽输送变化相对平稳,两个水汽输送极大值点分别位于伯舒拉岭北部(C点: 30.016°N 、 96.261°E ,水汽通量 $39.7 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)和念青唐古拉山中部(D点: 92.973°E 、 31.278°N ,水汽通量 $41.3 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)。

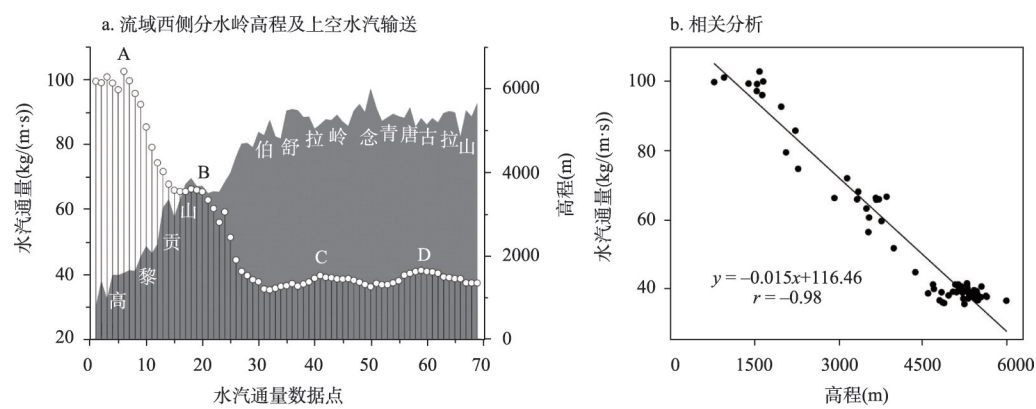


图3 夏季怒江流域西侧分水岭水汽通量、高程沿程变化及两者相关分析
Fig. 3 Variations of water vapor input and elevation along the western boundary of the Nujiang River Basin in summer and their correlation analysis

分析发现,流域西侧分水岭上空水汽通量与高程具有显著负相关关系(图3b),即分水岭高程越大的地区,输入的水汽强度越小。可见,西侧分水岭高程是影响水汽通量大小和形成多支输送特征的关键制约因素。此外,怒江流域南北纵贯10个纬度,纬度越高距水汽源地越远,输送路径也各异。结合图2b和图2a可见,怒江流域青藏高原区的水汽(C支、D支),主要源自经青藏高原南缘有利地形进入青藏高原^[8],而后向东北越过念青唐古拉山—伯舒拉岭的水汽输送;流域横断山区的水汽(A支、B支)主要源自沿伊洛瓦底江河谷向高纬输送,而后在青藏高原东南缘转向^[7]进入流域的水汽输送。因此,流域不同地区纬度差异导致的距水汽源地远近及水汽输送路径差异,也是造成水汽输送强弱差异的重要原因。

3.2 多支水汽输送年际变化及影响区域

1979—2017年4支(A支、B支、C支、D支)水汽输送年际变化曲线如图4所示。下游横断山区(A支、B支)和上游青藏高原区(C支、D支)的水汽输送变化过程有一定相似性(表2),相关系数分别达0.74和0.86。B支水汽输送与其它3支的年际变化均有较好相关性,这可能与其位于横断山区向青藏高原的地形过渡带有关。此外,4支水汽输送的年际变化趋势各异(图4),A支呈增强趋势,B支相对平稳,C支总体呈下降趋势,D支具有波动性。

夏季怒江流域水汽主要自西侧边界输入,具有多支特征。为分析A支、B支、C支、D支水汽输送各自的影响区域,将各支水汽输送年际变化序列分别与不同地区(站点)的水汽输送序列进行相关分析。通过比较相关系数大小,结合地理分布情况,使用泰森多边形法界定各支水汽输送的影响区域(图5a),结果表明:A支水汽输送主要影响包括孟定、临沧、保山的下游地区,B支水汽输送主要影响包括泸水、贡山的峡谷地区,C支水汽输送

表2 1979—2017年夏季怒江流域各支水汽输送序列相关分析

Tab. 2 Correlation analysis of each water vapor transport of the Nujiang River Basin in summer from 1979 to 2017

水汽输送	A支	B支	C支	D支	均值(kg/(m·s))
A支	1.0	0.74**	0.32*	0.27	102.6
B支		1.0	0.68**	0.57**	66.3
C支			1.0	0.86**	39.7
D支				1.0	41.3

注: *通过0.05显著性检验,**通过0.01显著性检验。

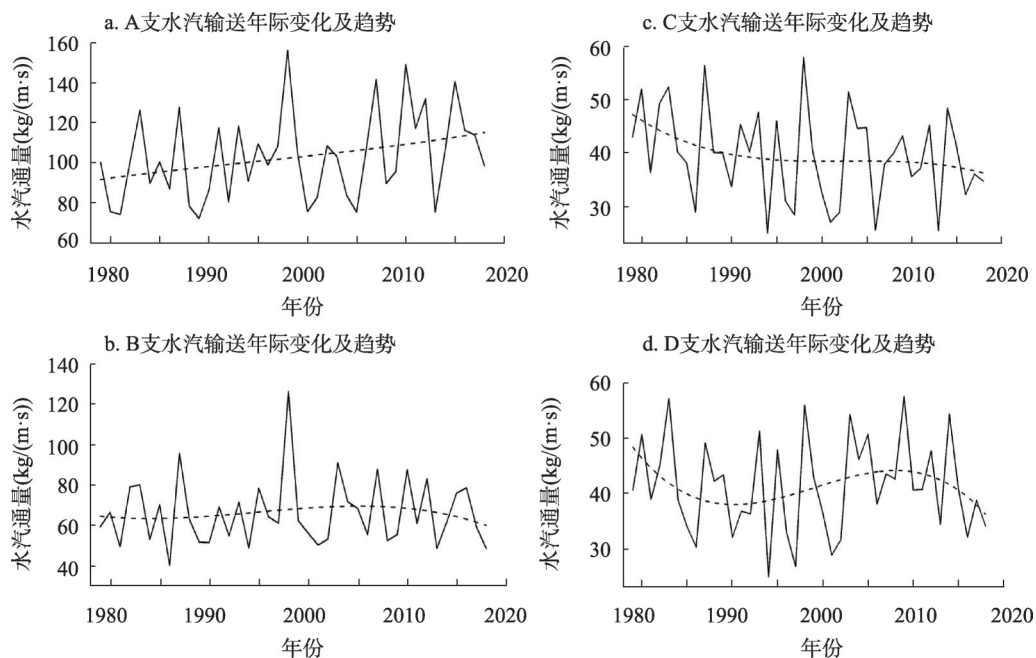


图4 1979—2017年夏季怒江流域4支水汽输送年际变化曲线及趋势

Fig. 4 The interannual variation and trend of water vapor transport of the Nujiang River Basin in summer during 1979-2017

主要影响青藏高原东南的左贡、八宿、洛隆一带，D支水汽输送则主要影响包括那曲、比如、索县、丁青的上游地区。对比分析各影响区（相关站点）的水汽输送年际变化曲线（图5b），发现：不同影响区（站点）水汽输送年际变化与各支水汽输送的变化基本一致，两者相关系数介于0.85~0.99间，均通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。且各影响区内，距水汽输入通道（A点、B点、C点、D点）越近的站点，相关系数越高，水汽输送强度也越大，如A支影响区的孟定站（相关系数 $r = 0.94$ ）、B支的泸水站（ $r = 0.95$ ）、C支的八宿站（ $r = 0.99$ ）和D支的那曲站（ $r = 0.99$ ），均强于同一影响区内的其他站点。

4 多支水汽输送对降水的影响

4.1 多支水汽输送对降水年际变化的影响

为评估多支水汽输送年际变化对降水的影响，将各支水汽输送序列与其影响区域（站点）的降水序列做相关分析，发现两者相关性地区差异明显（图6）。下游地区（孟定站、临沧站和保山站），降水和A支水汽输送年际变化的相关性较弱。随高程增大，相关系数近似以指数关系增大，至青藏高原面上丁青站的相关系数 $r = 0.35$ ，通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验；比如站（ $r = 0.71$ ）、索县站（ $r = 0.72$ ）、那曲站（ $r = 0.43$ ），均通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。可见，流域青藏高原区降水的年际变化，受水汽输送的影响更加显著。

1979—2017年各支水汽输送强度年际变化箱形图表明（图7c），A支水汽输送多年均值达102.6 kg/(m·s)，即使输送较弱年份（下四分位数）亦可达81.3 kg/(m·s)。D支水汽输送均值41.3 kg/(m·s)，仅有下游地区的40.3%；输送较弱年份仅34.0 kg/(m·s)。可见，夏季流域不同区域的水汽条件差异明显。水汽是形成降水的物质基础和必要条件，流域青藏高原区（C支、D支影响区）较差的水汽条件，使得其降水对水汽输送强度的变化

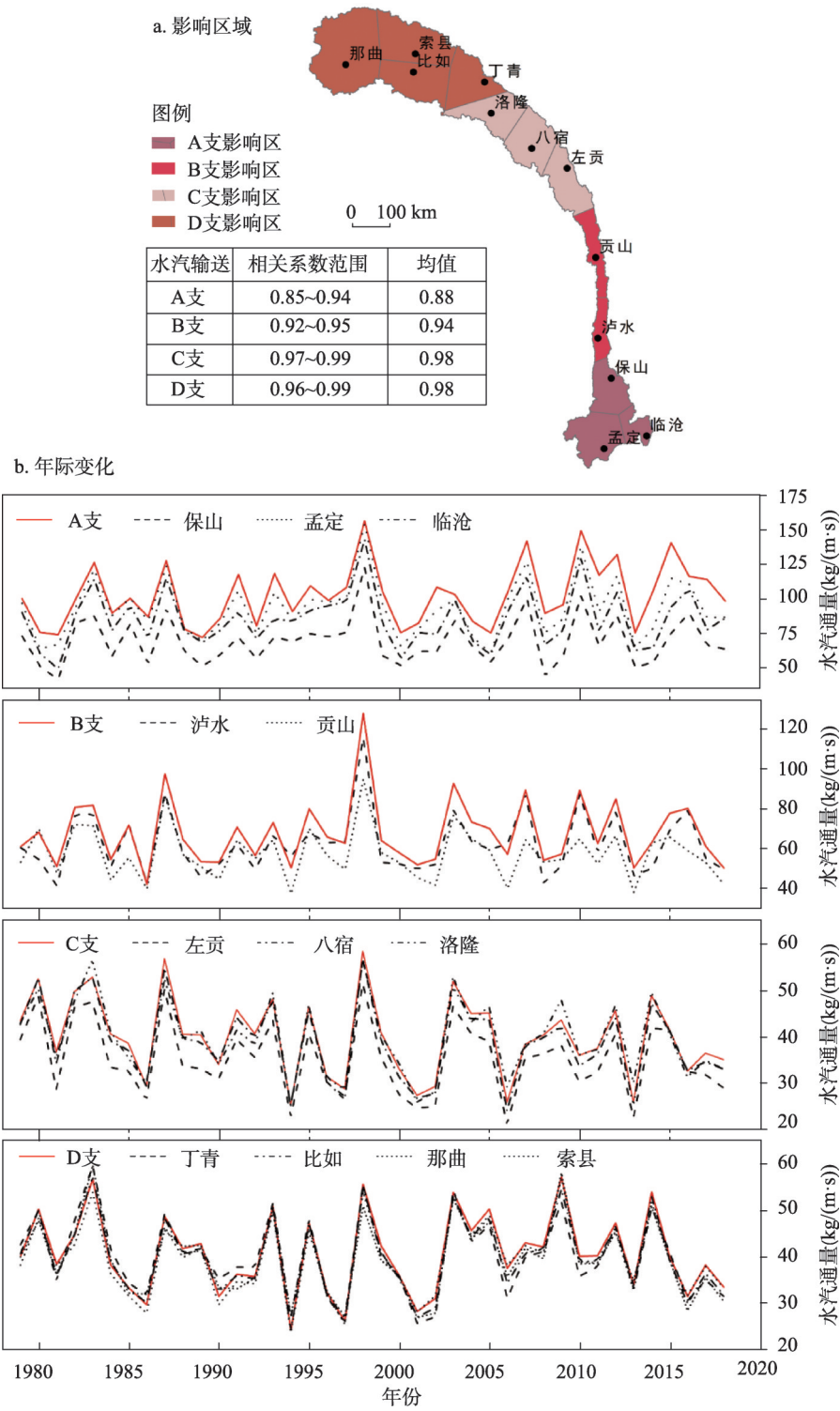


图5 1979—2017年4支水汽输送影响区域和怒江流域各地夏季水汽输送年际变化曲线

Fig. 5 Impact area of each water vapor transport and interannual variation curve of summer water vapor transport in different areas of the Nujiang River Basin during 1979-2017

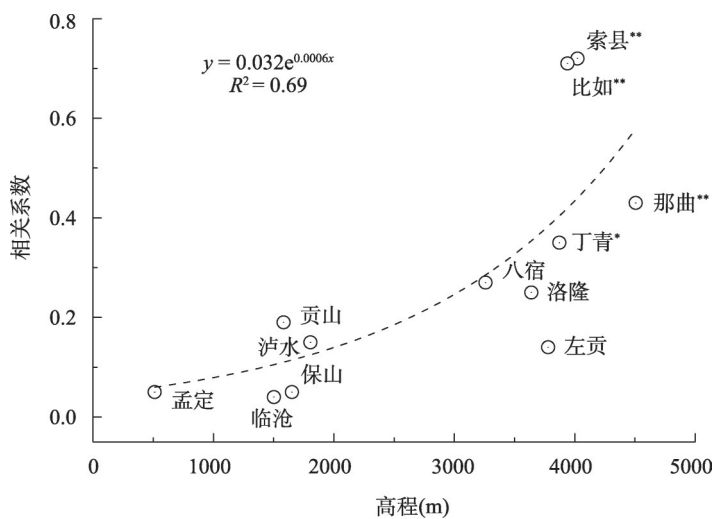


图6 水汽输送和降水序列相关系数及其与高程拟合分析

Fig. 6 Correlation coefficient of water vapor transport and precipitation series and its fitting analysis with elevation

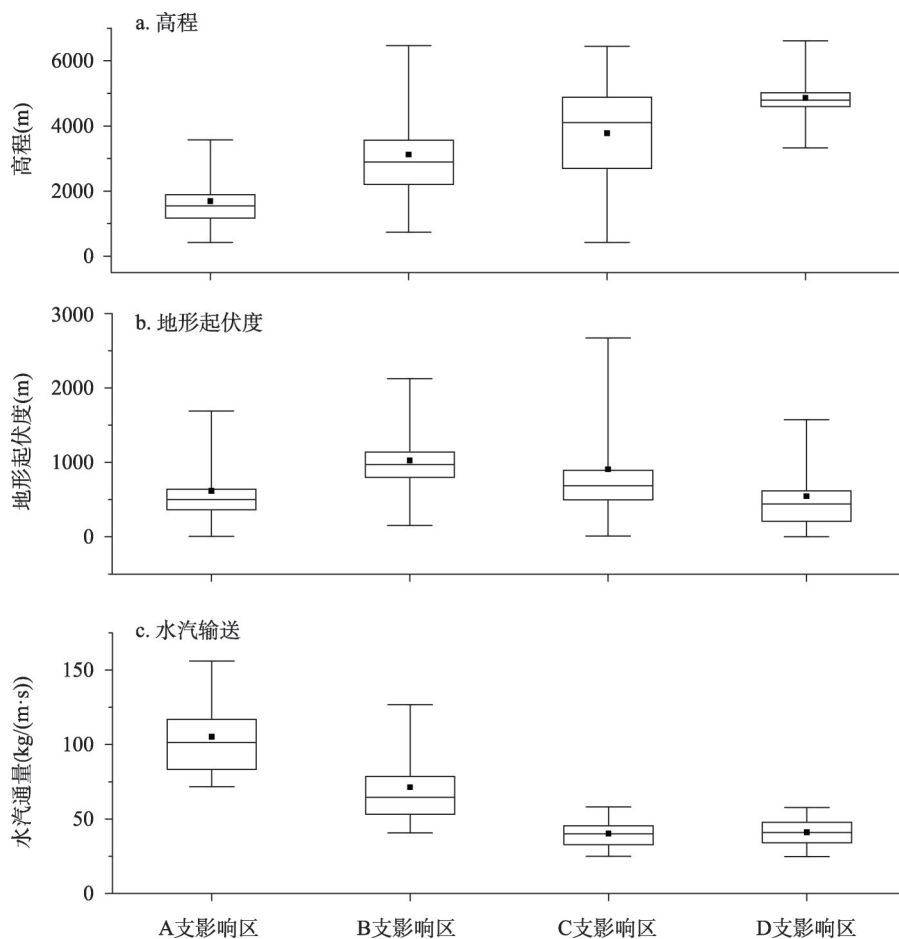


图7 怒江流域不同地区高程、地形起伏度和水汽输送年际变化箱形图

Fig. 7 Boxplot of elevation, terrain relief and water vapor transport in different areas of Nujiang River Basin

更为敏感。此外,地形也是影响降水形成和分布的重要因子。流域各区域高程和地形起伏度^[20]箱形图表明(图7a、7b),平均海拔最高的D支影响区,平均地形起伏度最小,为436 m;而平均海拔最低的A支影响区,地形起伏度为510 m;B支影响区(峡谷区)的地形起伏度最大,达970 m。可见,水汽条件较好的流域中下游地区(A支、B支影响区),具有更大的地形起伏度。已有研究^[21]表明,暖湿气流受地形作用,可形成多样的降水模态和分布,降水区在地形迎风坡、背风坡、山顶附近以及地形上、下游都有可能出现。夏季,水热条件较好的流域中下游地区(A支影响区和B支影响区),较大的地形起伏度增加了降水时空分异的不确定性,也会导致其水汽和降水年际变化相关性较弱。

4.2 多支水汽输送对降水空间分异的影响

4.2.1 TRMM 数据在怒江流域适用性评价 从月、夏季两个时间尺度,计算TRMM降水数据与站点数据的皮尔逊相关系数(r),以及回归直线的斜率(K),以评价TRMM数据在怒江流域适用性。皮尔逊相关系数 r 越大,表明数据变化的一致性越好; K 反映了数据间的偏离程度, $K > 1.0$,表示TRMM数据偏大, $K < 1.0$,则TRMM数据偏小;计算结果如表3所示。

月降水尺度,地形相对开阔的怒江流域上、下游地区(站点),相关系数均在0.90以上,地形起伏大的中游地区介于0.76~0.82之间(表3)。除贡山站,斜率均大于1.0,表明在怒江流域,TRMM较实测数据普遍偏大,这可能因为山区气象站多建在河谷低处,观测数据难以准确反映降水相对集中的河谷中上部所致。已有研究^[22]表明,TRMM数据(0.25°)和实测数据(点降水)的空间尺度差异,是导致数据间差异的重要原因;随着TRMM数据网格内参与分析站点增多,精度评价结果会得到提升。虽TRMM降水数据与实测数据存在一定差异,但TRMM数据的时空连续性以及与实测值具有较高一致性,使其在揭示降水时空分异特征时具有优势^[23]。

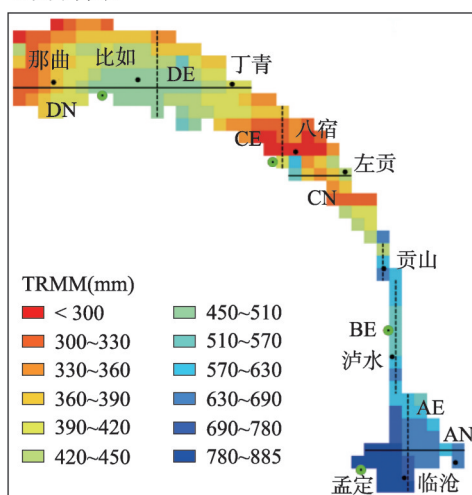
4.2.2 流域降水空间分异特征 怒江流域多年平均夏季降水栅格数据成果(图8a)表明,降水并非单一的自下游向上游减少。在下游西南部、峡谷区贡山一带、八宿西南部以及上游比如一带有多个区域性多雨带,多雨带邻近流域西侧,且和多支水汽输送具有较好的空间对应关系。

在各水汽输送影响区,分别取经向(E)、纬向(N)剖面,并绘制沿剖面的降水和高程变化曲线。沿纬向剖面AN(图8b),降水自西向东递减。沿经向剖面AE(图8c),降水自南向北递减。受A支水汽输送影响,该区多雨带位于西南部,降水自西南向东北不断减少。沿经向剖面BE(图8d),降水先随纬度增大而减小,在26.5°N附近达极小值;而后受B支水汽输送影响,降水增多并在27.75°N(贡山一带)达极大值。沿纬向剖面CN(图8e)及经向剖面CE(图8f),降水变化与地形基本一致;受C支水汽输送影

表3 TRMM数据在怒江流域适用性评价
Tab.3 Evaluation of TRMM data in the Nujiang River Basin

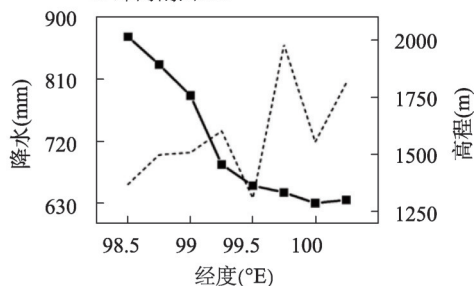
站点	月		夏季		站点	月		夏季	
	r	K	r	K		r	K	r	K
临沧	0.98	1.06	0.74	1.07	洛隆	0.82	1.52	0.47	1.53
保山	0.94	1.1	0.87	1.25	丁青	0.96	1.04	0.89	1.05
贡山	0.76	0.87	0.48	1.2	比如	0.93	1.27	0.85	1.3
左贡	0.83	1.35	0.76	1.34	索县	0.92	1.14	0.62	1.17
八宿	0.83	1.73	0.60	1.84	那曲	0.91	1.16	0.84	1.21

a. 夏季降水

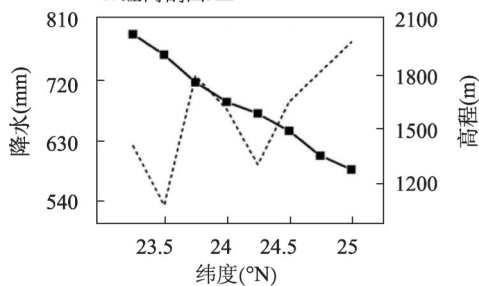


—■— 降水 - - - - 高程

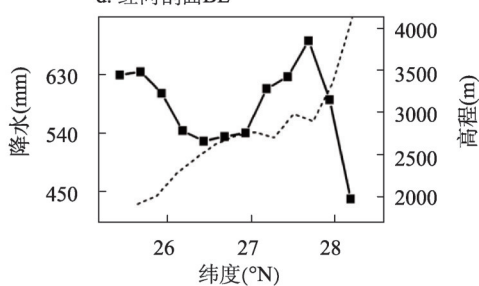
b. 纬向剖面AN



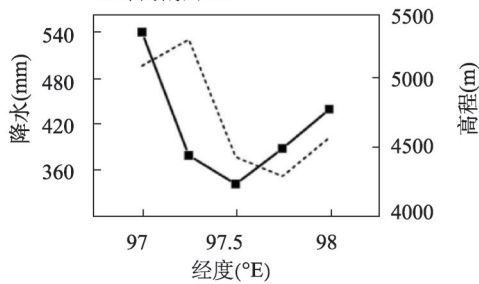
c. 经向剖面AE



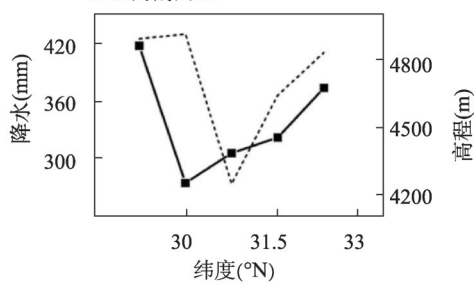
d. 经向剖面BE



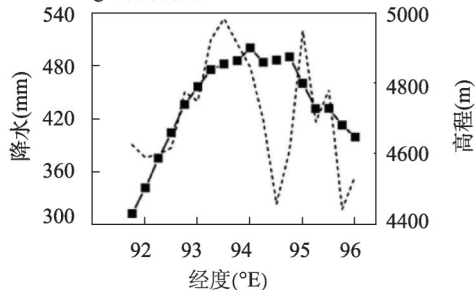
e. 纬向剖面CN



f. 经向剖面CE



g. 纬向剖面DN



h. 经向剖面DE

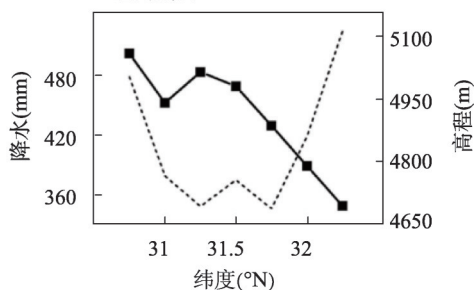


图8 1998—2015年夏季怒江流域多年平均TRMM降水数据

Fig. 8 Multi-year average TRMM precipitation data of the Nujiang River Basin from 1998 to 2015

响,在八宿西南部迎风坡出现小范围多雨区。沿纬向剖面DN(图8g),在94°E附近为降水高值区,然后向东、西两侧减少;沿经向剖面DE(图8h),降水自南向北不断减少。可见,邻近D支水汽输的比如一带降水较多,而后因水汽消耗降水向四周递减。

进一步对流域多年平均夏季TRMM降水与同期水汽通量、水汽通量散度相关分析(图9),结果表明:降水与水汽通量具有显著正相关关系(通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验),与水汽通量散度具有显著负相关关系(通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验)。可见,夏季怒江流域降水空间分异受多支水汽输送影响显著,并形成多个区域性多雨带。

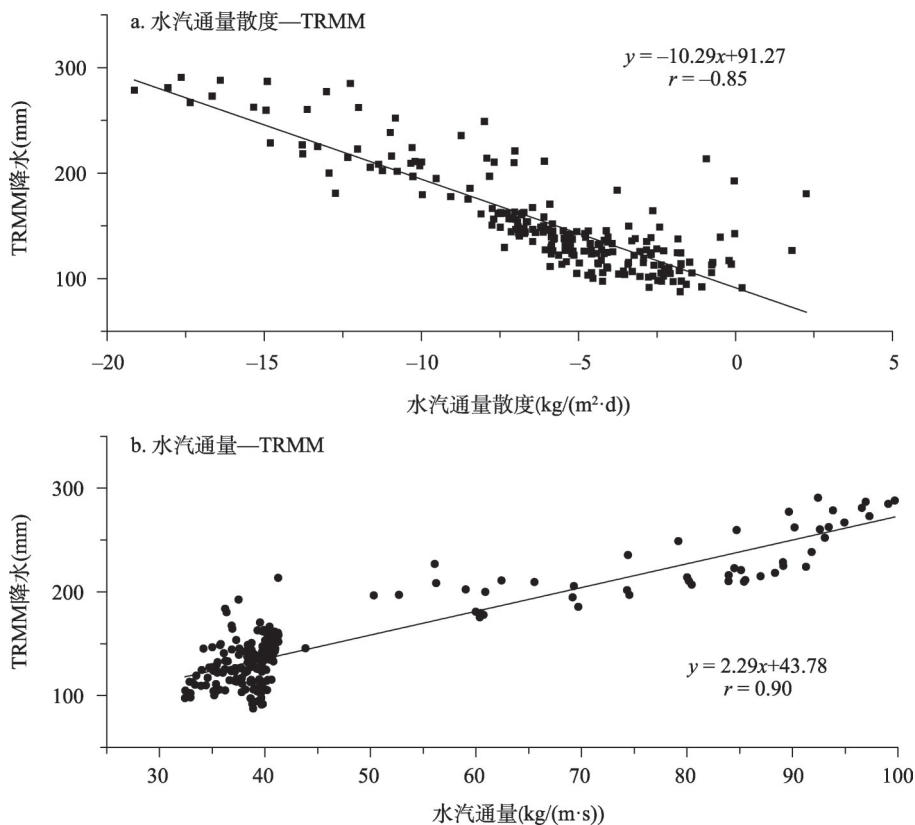


图9 1998—2015年夏季怒江流域多年平均TRMM降水与水汽通量、水汽通量散度相关分析

Fig. 9 Correlation analysis of multi-year average summer TRMM precipitation and water vapor flux, water vapor flux divergence of the Nujiang River Basin from 1998 to 2015

5 结论和讨论

本文基于1979—2017年高分辨率(0.25°)ERA-Interim再分析资料、TRMM 3B43 Version7降水数据以及站点实测数据等多源数据分析了夏季怒江流域水汽输送特征及其对降水影响,主要结论如下:

(1) 夏季怒江流域水汽主要自西侧边界输入,在分水岭水汽“通道与阻隔”机制作用下,形成4个区域性水汽输送高值区(多支特征),深刻影响着流域水汽输送的时空格局。4支水汽输送分别位于高黎贡山南部(23.700°N、98.170°E)和北部(26.374°N、98.730°E)、伯舒拉岭北部(30.016°N、96.261°E)以及念青唐古拉山中部(31.278°N、

92.973°E), 多年平均输送通量分别为 102.6 kg/(m·s)、66.3 kg/(m·s)、39.7 kg/(m·s)、41.3 kg/(m·s)。

(2) 夏季怒江流域多支水汽输送对降水空间分异影响显著, 形成了降水多区域特征。多年平均状况下, 流域空间降水数据和水汽通量具有显著正相关关系, 和水汽通量散度具有显著负相关关系; 受多支水汽输送影响, 靠近西侧边界形成多个区域性多雨带, 且随水汽消耗降水向四周的展布上不断减少; 多支水汽输送对流域夏季降水年际变化的影响, 地域分异明显, 在中下游的影响较小, 在上游青藏高原区的影响较大, 尤以那曲一比如一丁青一带的影响最为显著。

本文提出的流域边界(分水岭)水汽输送通量概化和提取方法, 在地形复杂、边界不规则的怒江流域具有较好适用性; 通过该方法得到流域分水岭上空的水汽通量, 可为分析流域水汽输送特征提供数据支撑。本文揭示出夏季怒江流域有多支水汽输送, 且形成降水多区域特征, 同处青藏高原季风区的雅鲁藏布江、澜沧江等流域是否具有类似现象, 有待进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Jiang Dabang, Wang Na. Water cycle changes: Interpretation of IPCC AR6. *Climate Change Research*, 2021, 17(6): 699-704. [姜大膀, 王娜. IPCC AR6 报告解读: 水循环变化. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 699-704.]
- [2] Wang Chenpeng, Huang Mengtian, Zhai Panmao. New progress and enlightenment on different types of drought changes from IPCC Sixth Assessment Report. *Acta Meteorologica Sinica*, 2022, 80(1): 168-175. [王晨鹏, 黄萌田, 翟盘茂. IPCC AR6 报告关于不同类型干旱变化研究的新进展与启示. 气象学报, 2022, 80(1): 168-175.]
- [3] Ding Yihui, Liu Yanju, Song Yafang. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 629-643. [丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响. 水科学进展, 2020, 31(5): 629-643.]
- [4] Xu Xiangde, Tao Shiyan, Wang Jizhi, et al. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau—Monsoon "large triangle" affecting region and drought-flood abnormality of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002(3): 257-266, 385. [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”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系. 气象学报, 2002(3): 257-266, 385.]
- [5] Xu Xiangde, Ma Yaoming, Sun Chan, et al. Effect of energy and water circulation over Tibetan Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*. 2019, 34(11): 1293-1305. [徐祥德, 马耀明, 孙婵, 等. 青藏高原能量、水分循环影响效应. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1293-1305.]
- [6] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [7] Miao Qiuju, Xu Xiangde, Zhang Shengjun. Whole layer water vapor budget of Yangtze River valley and moisture flux components transform in the key areas of the plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(1): 93-99. [苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征. 气象学报, 2005, 63(1): 93-99.]
- [8] Lin Zhiqiang, Tang Shuyi, He Xiaohong, et al. Features of water transfer in rainy season and their relations to rainfall anomalies over Tibetan Plateau. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(8): 984-990. [林志强, 唐叔乙, 何晓红, 等. 西藏高原汛期水汽输送特征与降水异常. 气象, 2011, 37(8): 984-990.]
- [9] Xie Chengying, Li Minjiao, Zhang Xueqin, et al. Moisture transport features in summer and its rainfall effects over key region in southern margin of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*. 2015, 34(2): 327-337. [解承莹, 李敏皎, 张雪芹, 等. 青藏高原南缘关键区夏季水汽输送特征及其与高原降水的关系. 高原气象, 2015, 34(2): 327-337.]
- [10] Lin Houbo, You Qinglong, Jiao Yang, et al. Water vapor transportation and its influences on precipitation in summer over Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(2): 309-317. [林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 青藏高原及附近水汽输送对其夏季降水影响的分析. 高原气象, 2016, 35(2): 309-317.]
- [11] Xie Xinru, You Qinglong, Bao Yuntao, et al. The connection between the precipitation and water vapor transport over Qinghai-Tibetan Plateau in summer based on the multiple datasets. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(1): 78-92. [谢欣汝, 游庆龙, 保云涛, 等. 基于多源数据的青藏高原夏季降水与水汽输送的联系. 高原气象, 2018, 37(1): 78-92.]

- [12] Liu Changming, Zhou Chenghu, Yu Jingjie, et al. Chinese Hydrogeography. Beijing: Science Press, 2014: 846-847. [刘昌明, 周成虎, 于静洁, 等. 中国水文地理. 北京: 科学出版社, 2014: 846-847.]
- [13] Cao Jie, Li Huahong, Yao Ping, et al. Study on the moisture joining area of Asia and Indian-Pacific Ocean and its spatial variation in the Northern Hemisphere. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 302-309. [曹杰, 李华宏, 姚平, 等. 北半球夏季印度洋和太平洋水汽交汇区及其空间分异规律研究. 自然科学进展, 2009, 19(3): 302-309.]
- [14] Du Jun, Weng Haiqing, Yuan Lei, et al. The climate characteristics and changing trends over the Nujiang River Basin in Tibet from 1971 to 2008. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(5): 581-591. [杜军, 翁海卿, 袁雷, 等. 近40年西藏怒江河谷盆地的气候特征及变化趋势. 地理学报, 2009, 64(5): 581-591.]
- [15] Fan Hui, He Daming. Regional climate and its change in the Nujiang River Basin. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 621-630. [樊辉, 何大明. 怒江流域气候特征及其变化趋势. 地理学报, 2012, 67(5): 621-630.]
- [16] Li Meng, Qin Tianling, Liu Shaohua, et al. Spatial-temporal validation of TRMM 3B42V7 precipitation products and analysis of precipitation characteristics in the upper reaches of Nujiang River. Plateau Meteorology, 2017, 36(4): 950-959. [李蒙, 秦天玲, 刘少华, 等. 怒江上游 TRMM 3B42V7 降水产品资料时空验证及降水特征分析. 高原气象, 2017, 36(4): 950-959.]
- [17] Gao Dengyi. Preliminary studies on both the mountain blocking and moisture passage effects. Plateau Meteorology, 2007, 26(6): 1305-1310. [高登义. 山地屏障与水汽通道综合作用初探: 兼谈大香格里拉自然成因. 高原气象, 2007, 26(6): 1305-1310.]
- [18] Zheng Jianmeng, Ma Tao, Zhang Wancheng. Climate characteristics of water vapor resource over low latitude plateau area. Journal of Tropical Meteorology, 2013, 29(2): 291-298. [郑建萌, 马涛, 张万诚. 低纬高原地区水汽资源的气候变化特征. 热带气象学报, 2013, 29(2): 291-298.]
- [19] Wei Fengying. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology (2nd ed). Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(2版). 北京: 气象出版社, 2007.]
- [20] Zhang Wei, Li Ainong. Study on the optimal scale for calculation the relief amplitude in China based on DEM. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(4): 8-12. [张伟, 李爱农. 基于DEM的中国地形起伏度适宜计算尺度研究. 地理与地理信息科学, 2012, 28(4): 8-12.]
- [21] Zhao Yuchun, Wang Yehong, Cui Chunguang. An idealized three-dimensional numerical study of the topographic precipitation under air flow of large CAPE and conditionally unstable stratification. Acta Meteorologica Sinica, 2011, 69(5): 782-798. [赵玉春, 王叶红, 崔春光. 大对流有效位能和条件不稳定下地形降水的三维理想数值研究. 气象学报, 2011, 69(5): 782-798.]
- [22] Liu Peng, Fu Yunfei, Feng Sha, et al. A comparison of the precipitation from rain gauge observations with from TRMM PR measurements in the southern China. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(6): 822-835. [刘鹏, 傅云飞, 冯沙, 等. 中国南方地基雨量计观测与星载测雨雷达探测降水的比较分析. 气象学报, 2010, 68(6): 822-835.]
- [23] Liu Changming, Bai Peng, Wang Zhonggen, et al. Study on prediction of ungaged basins: A case study on the Tibetan Plateau. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 272-282. [刘昌明, 白鹏, 王中根, 等. 稀缺资料流域水文计算若干研究: 以青藏高原为例. 水利学报, 2016, 47(3): 272-282.]

Multiple branches of water vapor transport over the Nujiang River Basin in summer and its impact on precipitation

PAN Feng¹, HE Daming², CAO Jie³, LU Ying²

(1. College of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China;

3. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: Water vapor transport is a key factor in the transformation of atmospheric water resources to terrestrial water resources. In order to reveal the characteristics of water vapor transport and its influence on precipitation over the Nujiang River basin, high spatial resolution (0.25°) ERA-Interim reanalysis data, TRMM 3B43 Version7 data, meteorological station measured data and SRTM Version4.1 DEM data were used, and a new method to generalize and extract water vapor transport data along the watershed boundary was adopted. Through analysis and research, the multiple branches water vapor transports over the Nujiang River Basin in summer were detected, and their effects on the spatiotemporal distribution of precipitation were analyzed. The research shows that there are four regional high-value areas of water vapor transport on the western boundary of the watershed, which are located in the southern and northern parts of Gaoligong Mountain, the northern part of Boshula Mountain, and the middle of Nyenchen Tanglha Mountains, with the annual average water vapor flux being $102.6 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, $66.3 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, $39.7 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, and $41.3 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, respectively. Multiple branches water vapor transport affects not only the water vapor transport in different areas of the basin, but also the spatiotemporal characteristics of precipitation. In terms of interannual variation, the influence of water vapor transport on precipitation is weaker in the middle and downstream area (Hengduan Mountains), while it is greater in the upstream area (Qinghai-Tibet Plateau), especially in the Nagqu-Biru-Suoxian area. In terms of spatial distribution, annual precipitation in the basin is significantly positively correlated with water vapor flux and negatively correlated with water vapor flux divergence. Because of multiple branches of water vapor transport, four regional rainy areas are formed by the west side of the basin.

Keywords: Nujiang River Basin; water vapor transport; precipitation; ERA-Interim reanalysis data; Qinghai-Tibet Plateau