

# 雅鲁藏布大峡谷地区水汽输送和收支的时空变化特征分析

洪佳娜<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 气候与环境变化联合实验室, 成都平原城市气象与环境四川省野外科学观测研究站, 四川 成都

<sup>2</sup>开平市气象局, 广东 开平

收稿日期: 2023年9月26日; 录用日期: 2023年11月2日; 发布日期: 2023年11月9日

## 摘要

雅鲁藏布大峡谷位于青藏高原南部, 是季风水汽从孟加拉湾输送到青藏高原的主要通道。本研究利用分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 的ERA-Interim再分析资料, 阐明不同时间尺度(年、季节和月)雅鲁藏布大峡谷地区水汽输送和水汽收支等的时空变化特征。结果表明: (1) 可降水量分布集中在雅鲁藏布大峡谷南侧, 夏季可降水量最多, 冬季可降水量最少; 夏季青藏高原是水汽汇; 夏季流域东南部可降水量呈现倒“U”型的空间分布, 水汽通量受孟加拉湾水汽输送带影响明显; 空间上, 大峡谷的东南部呈现较弱的下降趋势, 年均可降水量总体呈上升的趋势, 夏季可降水量增加趋势最明显; 时间变化上, 除秋季以外其余三季可降水量均呈上升趋势。(2) 雅鲁藏布大峡谷地区南边界和西边界为主要水汽输入边界, 在29年里雅鲁藏布大峡谷地区的水汽收支起伏不大, 呈现波动减少的趋势; 低层大气主要为水汽输入, 中层大气为水汽输出, 高层大气水汽收支大致相等且都接近于0; (3) 夏季青藏高原东南部增强的气旋式水汽输送通量从大峡谷西南方输入导致大峡谷在夏季降水偏多年较偏少年可降水量和水汽通量偏多。

## 关键词

雅鲁藏布大峡谷, 水汽输送, 水汽收支, 垂直分布

# Analysis of Spatiotemporal Changes in Water Vapor Transport and Budget in the Yarlung Zangbo Grand Canyon Region

Jiana Hong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Observation and Research Station of Sichuan Province, Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu

Sichuan

<sup>2</sup>Kaiping Meteorological Bureau, Kaiping GuangdongReceived: Sep. 26<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2023; published: Nov. 9<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The Yarlung Zangbo Grand Canyon, located in the south of the Qinghai Tibet Plateau, is the main channel for monsoon water vapor from the Bay of Bengal to the Qinghai Tibet Plateau. This study utilized a resolution of  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  at ERA-Interim reanalysis data to elucidate the spatiotemporal variation characteristics of water vapor transport and water vapor budget in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region at different time scales (year, season, and month). The results show that: (1) the distribution of precipitation is concentrated on the south side of the Yarlung Zangbo Grand Canyon, with the highest precipitation in summer and the lowest in winter; the Qinghai Tibet Plateau is a water vapor sink in summer; in summer, the spatial distribution of precipitable water in the southeast of the basin presents an inverted "U" shape, and the water vapor flux is significantly affected by the water vapor transport belt in the Bay of Bengal; in terms of space, the southeast of the Grand Canyon shows a weak downward trend, with an overall upward trend in annual precipitation, and the most obvious increase trend in summer precipitation; in terms of time variation, except for autumn, the other three seasons have an upward trend in precipitable water. (2) The southern and western boundaries of the Yarlung Zangbo Grand Canyon region are the main water vapor input boundaries. In the past 29 years, the water vapor budget in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region has not fluctuated much and shows a decreasing trend; the lower atmosphere is mainly water vapor input, the middle atmosphere is water vapor output, and the upper atmosphere water vapor budget is roughly equal and close to 0. (3) The enhanced cyclonic water vapor transport flux in the southeastern part of the Qinghai Tibet Plateau in summer is imported from the southwest of the Grand Canyon, resulting in more precipitation and water vapor flux in the Grand Canyon during the summer.

## Keywords

Yarlung Zangbo Grand Canyon, Water Vapor Transport, Water Vapor Budget, Vertical Distribution

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

青藏高原位于中国西南部，是世界上最高的高原，它被称为地球第三极，其地形地貌复杂，是许多河流的源头地区。而在青藏高原东南部为雅鲁藏布江流域，流域下游有一个著名的峡谷，叫做雅鲁藏布江大峡谷，它从南到北长约 500 公里，深度从 2 公里到 6 公里不等，中间有一个很大的弯曲峡谷，将峡谷从南北向反转为东西向。这个大峡谷形成了从孟加拉湾沿雅鲁藏布江(或称布拉马普特拉河)的水汽通道，便于夏季季风将水汽输送到东部青藏高原(高登义，2008) [1]。

对于雅鲁藏布大峡谷地区的水汽研究，前人已经取得了众多科研成果：雅鲁藏布江地区的降水无显著趋势且以夏季降水居多，水汽主要来源于印度洋和孟加拉湾，有印度夏季季风场的异常反气旋式水汽输送(高登义，2008；张文霞等，2016) [1] [2]；同时雅鲁藏布大峡谷地区作为向青藏高原输送水汽的最大

通道,水汽先沿布拉马普特拉河(印度)向东北方向输送,到达沿雅鲁藏布江下游后向北输送,再自大弯峡谷(29.5°N)转向西北输送进入青藏高原东部(杨逸畴等, 1987) [3]。

雅鲁藏布江流域的水汽在输送过程中受到不同尺度、多种因素的共同作用,与青藏高原的热力和动力作用、季风活动及孟加拉湾地区的天气系统等密切相关。雅江流域所处的青藏高原是全球最强且最复杂的季风区,夏季处于东、西风带的交界处,冬季处于西风带中。已有众多研究表明,高原南侧的孟加拉湾地区常年存在低压槽,但因高原附近的大气环流有明显的季节性变化而表现出不同特征。索渺清等将在冬半年形成的低槽称之为南支槽,形成于夏半年的称之为孟加拉湾槽,受其影响,雅江流域的水汽输送条件也会随着季节变化而发生改变。本文将对雅鲁藏布江流域水汽输送的季节性特征等做进一步的研究和探讨。

从不同高度上研究,也有很多研究成果证明,雅鲁藏布大峡谷可能是青藏高原的主要季风水汽通道:杨等(1987) [3]和高(1985) [1]利用 1983 年 7~8 月的高空探测资料,比较了雅鲁藏布大峡谷两个站与青藏高原附近其它站 750 hPa 以上的水汽输送总量,结果表明,雅鲁藏布大峡谷上空有更多的水汽输送进入青藏高原。由于他们的结果仅基于有限的台站数据,张等(2016) [2]利用 1979~2007 年期间的三个再分析数据集,进一步分析了低层(1000~600 hPa)、中层(600~400 hPa)和高层(400~300 hPa)的水汽输送,肯定了雅鲁藏布大峡谷是主要的水汽通道。近年来更有学者研究得出结论,赤道以南的上升运动有利于低纬水汽的输送季风在 500 hPa 的热带高压南部显示强的水汽输送(Sun L *et al.*, 2022) [4]。且低层通过雅鲁藏布大峡谷输送的水汽量比高层多消耗两倍,导致雅鲁藏布大峡谷有丰富的降水,因此低层通过雅鲁藏布大峡谷的水汽输送对雅鲁藏布大峡谷的降水至关重要,而高层通过雅鲁藏布大峡谷的水汽输送对青藏高原东部降水的形成更为重要(Yuan Xu *et al.*, 2023) [5]。

前人关于夏季降水异常与水汽输送关系的问题极为关注,也做了大量研究。研究发现西藏地区南部的水汽输送主导着该地区的夏季降水,阿拉伯海、孟加拉湾、南海和西太平洋四个海域的暖湿水汽从西藏南部进入高原后形成降水,是西藏地区夏季降水的主要水汽来源(卓嘎等, 2012) [6]。来自印度洋和孟加拉湾的水汽输入高原东南部,影响区域内的夏季降水,印度半岛北部和孟加拉湾的反气旋式水汽输送异常在高原东南部上空引发更多的水汽辐合,导致降水量偏多(Lei Feng *et al.*, 2012) [7]。

本次研究利用 1989~2018 欧洲中心的再分析资料,分析雅鲁藏布大峡谷地区年、四季大气可降水量、水汽通量等参量的空间分布及年内、年际变化特征,获得雅鲁藏布大峡谷地区水汽输送特征;并分析大峡谷各边界年、四季水汽收支的年内和年际变化特征、垂直变化特征,获得该地区水汽输送和收支的时空变化特征。从而揭示雅鲁藏布大峡谷地区水汽源地,获得该地区水汽输送和收支的时空变化特征。

## 2. 资料和方法

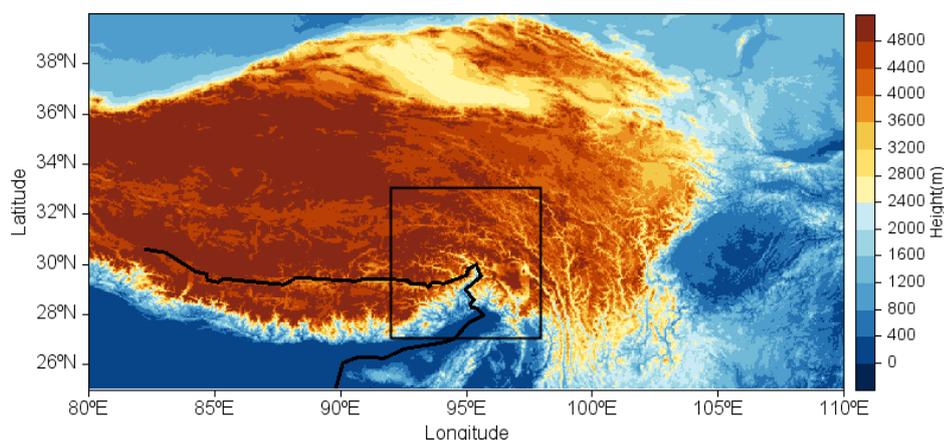
### 2.1. 资料概况

雅鲁藏布江大峡谷位于青藏高原南部,其所在流域北邻冈底斯山脉及念青唐古拉山脉,南邻喜马拉雅山。其南侧分水岭为水汽输入边界,北侧分水岭为水汽输出边界。青藏高原的水汽主要来源于西风带、孟加拉湾北部、阿拉伯海及南海 4 条水汽通道。作为青藏高原的重要组成部分,若只单独在雅鲁藏布江流域范围内开展水汽输送研究,将无法准确地反映出流域水汽的来源以及输送路径,故需要扩大研究范围,见图 1,本文选择将研究水汽输送的范围扩大,且选定雅鲁藏布大峡谷区域的范围为 92°E~98°E, 27°N~33°N。

ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)全球数据集来源于欧洲中尺度天气预报中心,该数据集通过定期使用数据同化系统和预测模型对已存档的观测值进行“重新分析”,从而描述出大气、海洋和陆地的近期历史。ERA-Interim 再分析数据集在大气科学领域发挥着极其重要的作用,但该数据在研究区域的适用精度会对研究结果造成极大影响。Bao 等[8]基于 1998 年第二次青藏高原科学考

察基本资料数据集中的连续探空资料,对多种再分析数据产品进行了评估,认为 ERA-Interim 再分析资料可以适用于青藏高原地区的相关研究,其适用精度较高。谢欣汝等[9]通过对比多套资料,认为 ERA-Interim 再分析资料可以用于研究青藏高原及其周围地区夏季的水汽输送特征。因此,本文对雅鲁藏布大峡谷的水汽输送特征展开相关研究时使用的数据为 ERA-Interim 再分析资料。

本文所用数据为月平均数据,时间序列为 1989 年 1 月至 2018 年 1 月,共计 30 年,范围选取在 60°E~110°E, 10°N~40°N,空间分辨率为 0.125°×0.125°,资料参数包括:1. 大峡谷地区整层的可降水量资料和降水量资料。2. 各高度层上的经向(u)、纬向(v)、垂直向(w)速度和比湿(q)和相应的地面气压(psf)资料,用于计算各层可降水量和水汽通量,其中从垂直方向上共计 22 层。3. 东西向、南北向水汽通量的垂直积分数据,用于计算整层水汽通量。



**Figure 1.** Topographic map of the study area (unit: m), the black box represents the Yarlung Zangbo Grand Canyon, the black line is the Yarlung Zangbo River

**图 1.** 研究区域地形图(单位: m), 黑色方框代表雅鲁藏布大峡谷, 黑色线为雅鲁藏布江

## 2.2. 研究方法

### 2.2.1. 可降水量的计算

本文使用 MeteoInfoLab 绘制青藏高原地形图,使用 NCL 进行数据读取、绘图分析,在时空分布图中,水汽通量用黑色箭头表示,箭头所指的方向即为水汽运输的方向,箭头的长度即代表水汽输送通量的强度,而可降水量常用填色表示。在分析可降水量垂直分布时,各层可降水量需根据各层比湿进行积分计算,对于高为单位 hPa 的各层可降水量可表示为:

$$PW_1 = \frac{1}{g} q \quad (1)$$

将各层的可降水量垂直积分数据进行合成,得到整层可降水量数据。因此,整层可降水量可表示为:

$$PW = \int_0^{\infty} \frac{1}{g} q dP \quad (2)$$

### 2.2.2. 水汽通量的计算

在分析水汽通量垂直分布时,各层水汽通量需根据各层比湿、经纬向风场进行积分计算,对于高为单位 hPa 的各层水汽通量可表示为:

$$Q_1 = \frac{1}{g} q \vec{V} \quad (3)$$

将东西、南北向的水汽通量垂直积分数据进行合成, 得到整层水汽通量数据。因此, 整层水汽通量可表示为:

$$Q = \int_0^{\infty} \frac{1}{g} q \bar{V} dP \quad (4)$$

其中,  $p$  为气压;  $\bar{V}$  为水平风场, 包含经向风( $u$ )、纬向风( $v$ )两个分量;  $q$  为比湿;  $g$  为重力加速度。

### 2.2.3. 各边界水汽收支的计算

在分析大峡谷的水汽收支时, 四个边界的水汽收支可表示为:

南边界:

$$Q_S = \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_{\varphi_S} a \cos \varphi_S d\lambda \quad (5)$$

北边界:

$$Q_N = - \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_{\varphi_N} a \cos \varphi_N d\lambda \quad (6)$$

西边界:

$$Q_W = \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_{\lambda_W} a d\varphi \quad (7)$$

东边界:

$$Q_E = - \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_{\lambda_E} a d\varphi \quad (8)$$

其中,  $\lambda_W$  代表西部边界的经度,  $\lambda_E$  代表东部边界的经度,  $\varphi_S$  代表南部边界的纬度,  $\varphi_N$  代表北部边界的纬度。  $Q_{\lambda_W}$  和  $Q_{\lambda_E}$  代表通过西部和东部边界的纬向通量。  $Q_{\varphi_S}$  和  $Q_{\varphi_N}$  代表通过南部和北部边界的经向通量。  $a$  代表地球平均半径, 取  $6.37 \times 10^6$  m。

净水汽收支表示为:

$$Q_T = Q_S + Q_N + Q_W + Q_E \quad (9)$$

### 2.2.4. 线性回归的计算

本文用线性回归来分析可降水量的长期时空变化趋势。用  $x_i$  表示样本量为  $n$  的某一气候变量, 用表示  $t_i$  所对应的时间, 建立  $x_i$  与  $t_i$  之间的一元线性回归方程:

$$x_i = a + bt_i \quad (10)$$

上述方程可以看作一种特殊的、最简单的线性回归形式。公式中  $a$  为回归常数,  $b$  为回归系数,  $a$  和  $b$  可以用最小二乘法进行估计。

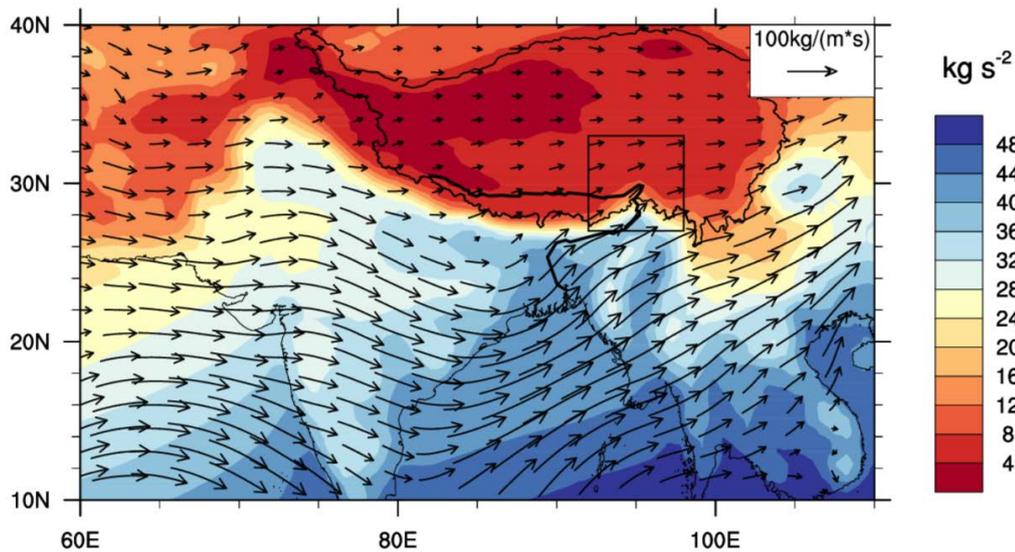
## 3. 研究结果

### 3.1. 可降水量与水汽通量的时空变化特征

#### 3.1.1. 可降水量与水汽通量的空间分布

为了揭示雅鲁藏布大峡谷地区作为水汽通道的影响, 从 ERA-Interim 获取的整层平均可降水量和水汽通量的空间分布见图 2。大峡谷地区可降水量沿大弯峡谷呈倒“U”型分布, 南边界可降水量最多, 流域西部上游的可降水量最少。在孟加拉湾北部的下游出海口至大峡谷一带为可降水量的大值区(对应水汽通道一带), 最高达到逐年日均  $40 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$ 。雅鲁藏布江流域上空多年平均可降水量整体上来上呈东多西少的分布特

征,且自东向西、自南向北逐渐减少,不同地区的水汽含量差异较大。从布拉马普特拉河到大弯峡谷(29.5°N)再进入青藏高原腹地,水汽通量输送基本沿江而上,并向北逐渐递减。换言之,雅鲁藏布大峡谷地区水汽通量从南边界由西南向输入后转为偏西向输出,即水汽从南边界输入后在大峡谷地区形成降水,剩余的水汽在高原上转为偏西向从东边界输出。另一水汽通量输入边界为西边界,西边界水汽在遇到青藏高原西部屏障时分为两部分,总体上自高原西部由西偏南方向输入,主要由东边界输出,少量从北边界输出。

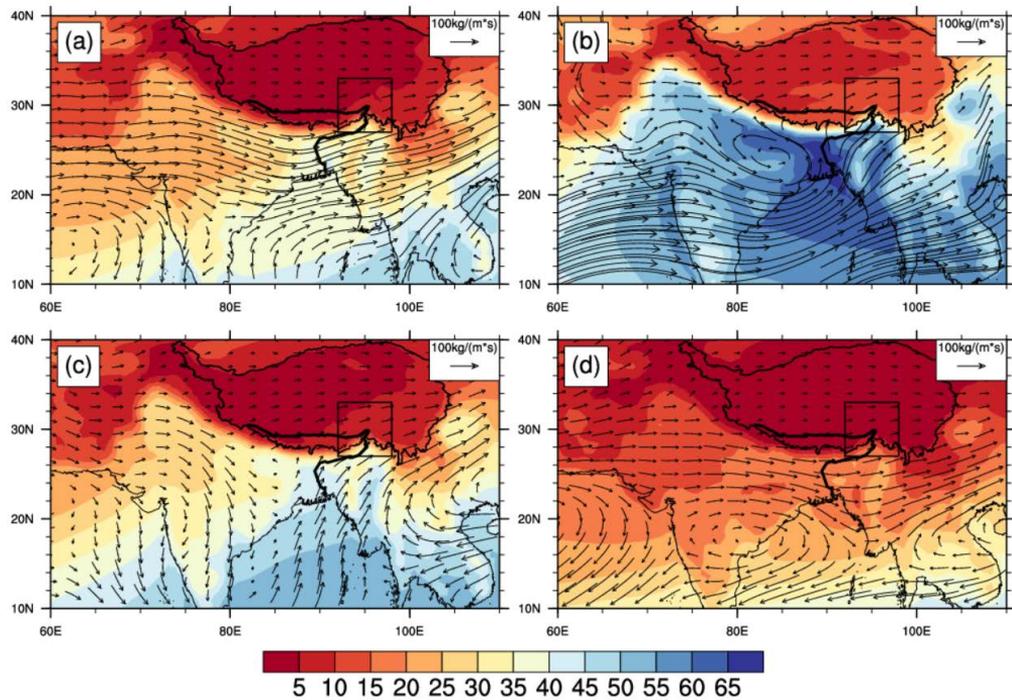


**Figure 2.** The spatial distribution of annual average precipitation (colored, unit:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and average water vapor flux (arrow, unit:  $100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region. The black box in the figure represents the Yarlung Zangbo Grand Canyon, the black thin line is the border of the Qinghai Tibet Plateau, and the black thick line is the Yarlung Zangbo River

**图 2.** 雅鲁藏布大峡谷地区逐年整层平均可降水量(填色, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )和整层平均水汽通量(箭头, 单位:  $100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )的空间分布。图中黑色方框代表雅鲁藏布大峡谷, 黑色细线为青藏高原边界, 黑色粗线为雅鲁藏布江

四季的可降水量整体分布见图 3, 均呈东多西少的特征, 最高和最低可降水量均分别分布在流域东南部大拐弯一带和西部上游地区, 且流域东南部可降水量在四个季节均呈现倒“U”型的空间分布, 以上各季的空间特征与多年平均可降水量空间分布特征保持一致。春季受南支槽前沿布拉马普特拉河-雅鲁藏布江河谷的水汽输送的影响, 流域的可降水量开始增多。同时, 可降水量明显呈现自东向西逐步推进的趋势, 夏季可降水量东部多、西部少并且随着纬度的增加而不断减少, 流域东南部大峡谷区域可降水量十分可观。同时受印度东北部热低压的影响, 高原南侧水汽中心向西偏移, 导致雅江流域  $90^{\circ}\text{E}$  往西至  $87^{\circ}\text{E}$  区域水汽显著增多(李琳静, 2022) [10]。

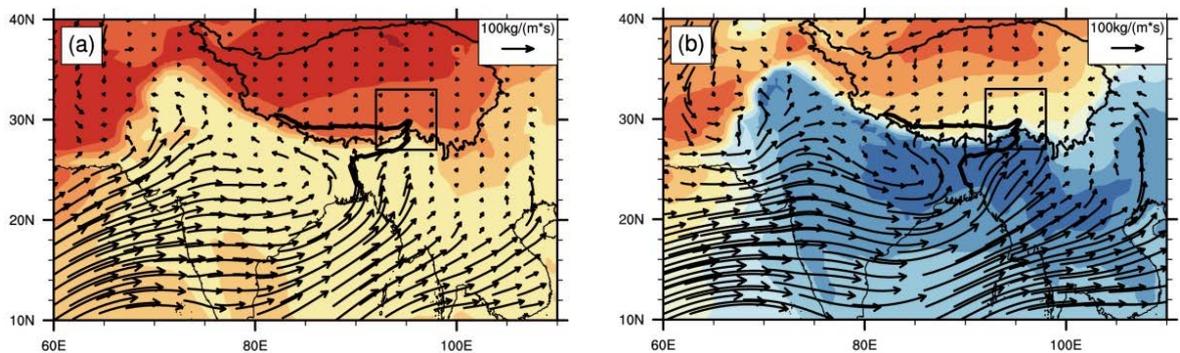
夏季水汽丰沛, 春秋水汽较稀疏, 尤其是冬季。春季整体受西风带主导, 受高原地形影响形成南支西风带, 但总体输送方向不变, 进入大峡谷范围的水汽通量输入方向为西偏南。值得注意的是, 在雅鲁藏布江流域南侧至孟加拉湾西北部区域, 形成了一个槽线位于  $88^{\circ}\text{E}$  左右的南支槽(又称印缅槽)。其次, 在孟加拉湾区域的正南风水汽输送与南支西风带输送的水汽在南支槽前得以汇合, 在二者共同作用下, 使得南支槽前西南风的水汽输送增大。在夏季, 印度西南夏季风爆发, 大量水汽从印度洋沿着布拉马普特拉河进入雅鲁藏布大峡谷西南部, 形成明显的水汽通量梯度并自西向东不断扩张, 在流域东南部形成强的西南风向水汽输送带, 少部分水汽沿着青藏高原自西向东爬升的同时不断减少并进入大峡谷的西边界。秋季的水汽通量受印度季风的衰弱影响而减少, 冬季时流域变成一个冷源, 南支槽重新加强, 印度半岛上空存在一明显的副热带高压异常气旋, 受西风带控制, 西风较强, 水汽含量较少, 导致水汽输送通量极小。因此夏季青藏高原是水汽汇, 雅鲁藏布大峡谷地区为向青藏高原输送水汽的最大通道。

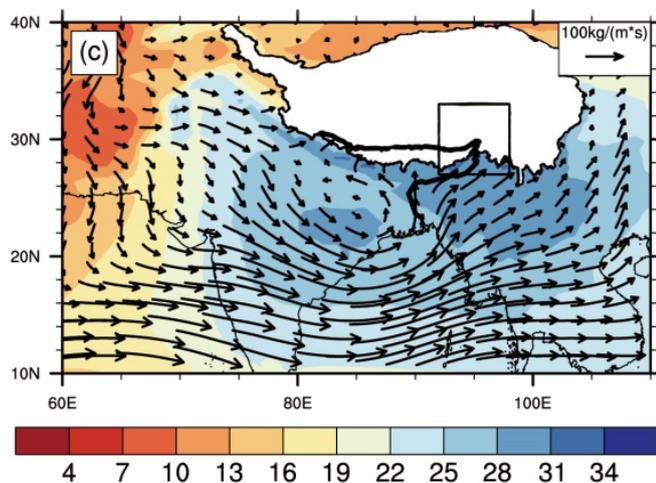


**Figure 3.** The spatial distribution of overall average precipitable water (colored,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and overall water vapor flux (arrow,  $100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region in spring (Figure a), summer (Figure b), autumn (Figure c), and winter (Figure d)

**图 3.** 雅鲁藏布大峡谷地区春季(图 a)、夏季(图 b)、秋季(图 c)和冬季(图 d)整层平均可降水量(填色, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )和整层水汽通量(箭头, 单位:  $100\text{ kg m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )的空间分布

对夏季的平均可降水量和水汽通量空间分布(图 4)进行分层分析, 可降水量自东向西逐步推进, 且随着高度下降不断增加, 在中层图(b)的大峡谷地区上可看到明显的可降水量变化梯度, 在低层由于青藏高原的平均海拔在 4000 米以上, 故在将高原上的可降水量和水汽通量做掩膜遮盖处理。另外, 可降水量在雅鲁藏布大峡谷的东南部达到最大, 以中层为基准大峡谷东南部的可降水量往上快速减少, 往下缓慢减少, 在低层虽然大峡谷东南部的可降水量依然比较客观, 但强度和范围较中层都有所缩减。在  $25^{\circ}\text{N}$  以南水汽通量充沛, 孟加拉湾水汽输送带在经过( $25^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\text{E}$ )附近时一分为三(李琳静, 2022) [10], 其中, 第一支为朝着西北方向输送的水汽, 一部分水汽在孟加拉湾北部附近的印度半岛上空形成一明显的气旋性环流和一水汽输送中心, 另一部分水汽通过有利地形进入高原; 第二支为正南风向的水汽输送; 第三支水汽朝着东北方向输送, 同样是得益于布拉马普特拉河 - 雅鲁藏布江河谷这一天然水汽输送通道, 使得来自于孟加拉湾海面的暖湿气流能够源源不断地被抬升输送至流域内, 甚至可影响到流域东部区域。



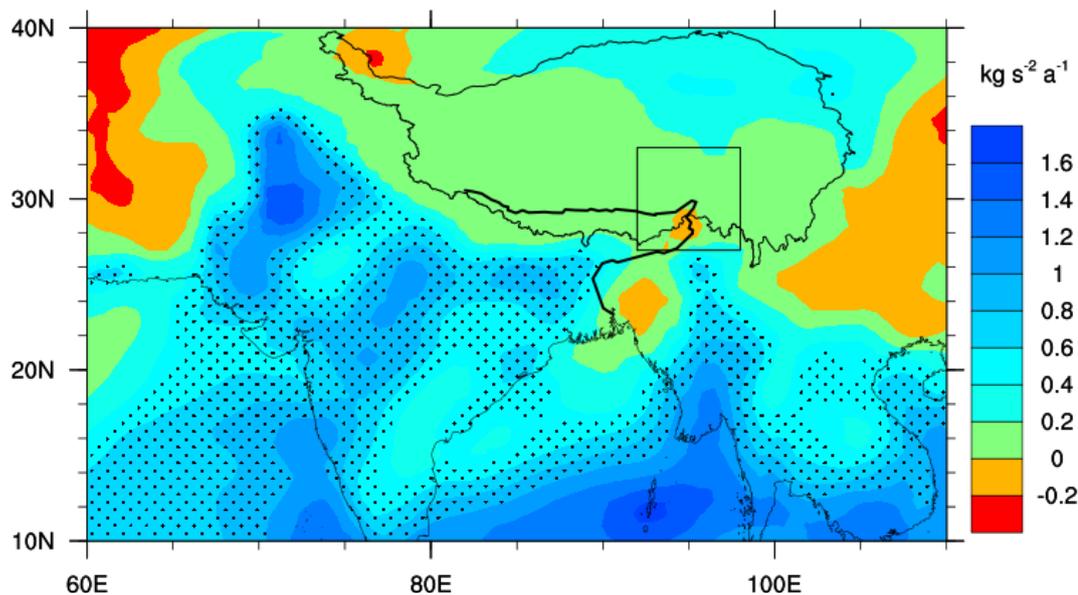


**Figure 4.** The vertical spatial distribution of summer precipitable water (colored,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) and water vapor flux (arrow,  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region at three levels (upper level (Figure a): 300~400 hPa, middle level (Figure b): 400~600 hPa, and lower level (Figure c): 600~1000 hPa)

**图 4.** 雅鲁藏布大峡谷地区夏季可降水量(填色, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )和水汽通量(箭头, 单位:  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )在三个层次(高层(图 a): 300~400 hPa、中层(图 b): 400~600 hPa 和低层(图 c): 600~1000 hPa)上的垂直空间分布

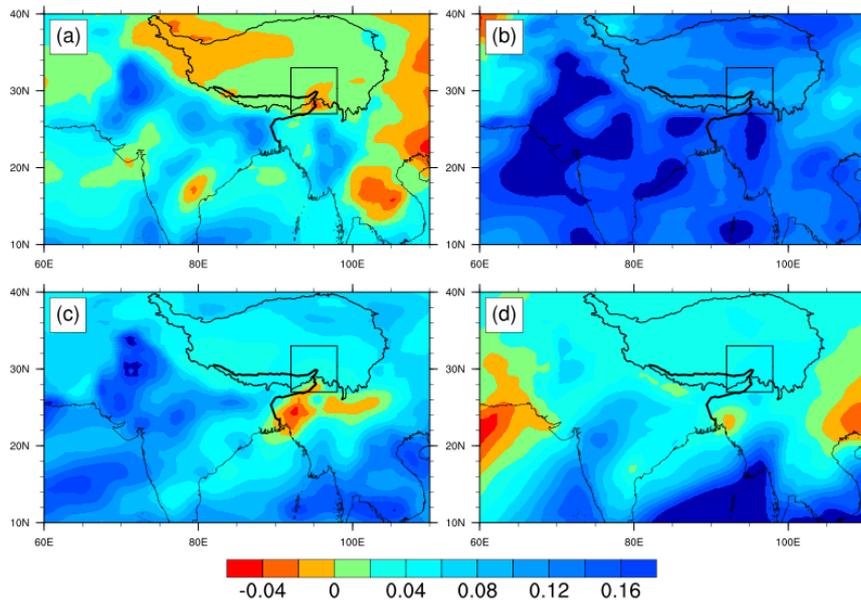
### 3.1.2. 可降水量的时空变化特征

由图 5 可知, 雅鲁藏布大峡谷地区的年均可降水量总体呈上升的趋势, 但在雅鲁藏布大峡谷的东南部墨脱地区呈现较弱的下降趋势。从可降水量的四季变化趋势(图 6)来看, 春季在流域东南部的下降趋势较图 5 向北扩大加深。夏季整个雅鲁藏布大峡谷地区则呈现出以大弯峡谷(29.5°N)为中心向南北递增的梯度趋势。秋季流域内可降水量的上升趋势不明显, 另外在沿布拉马普特拉河呈现较弱的下降趋势。在冬季, 雅鲁藏布大峡谷地区总体为较弱的上升趋势, 东南部增长较快。总体而言夏季的平均可降水量增加最多, 春季的平均可降水量减少最多, 呈现明显的季节差异。



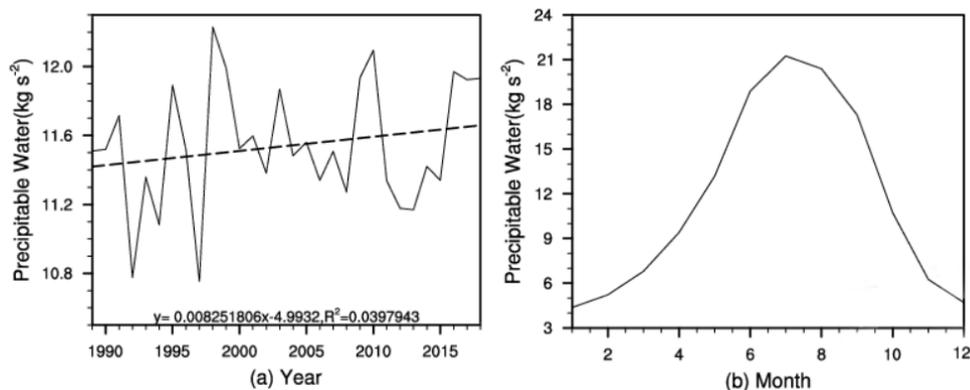
**Figure 5.** Trend chart of annual average precipitable water in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region (colored, unit:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), with the dotted area passing 99% significance test

**图 5.** 雅鲁藏布大峡谷地区年平均可降水量变化趋势图(填色, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), 打点区域通过 99% 的显著性检验



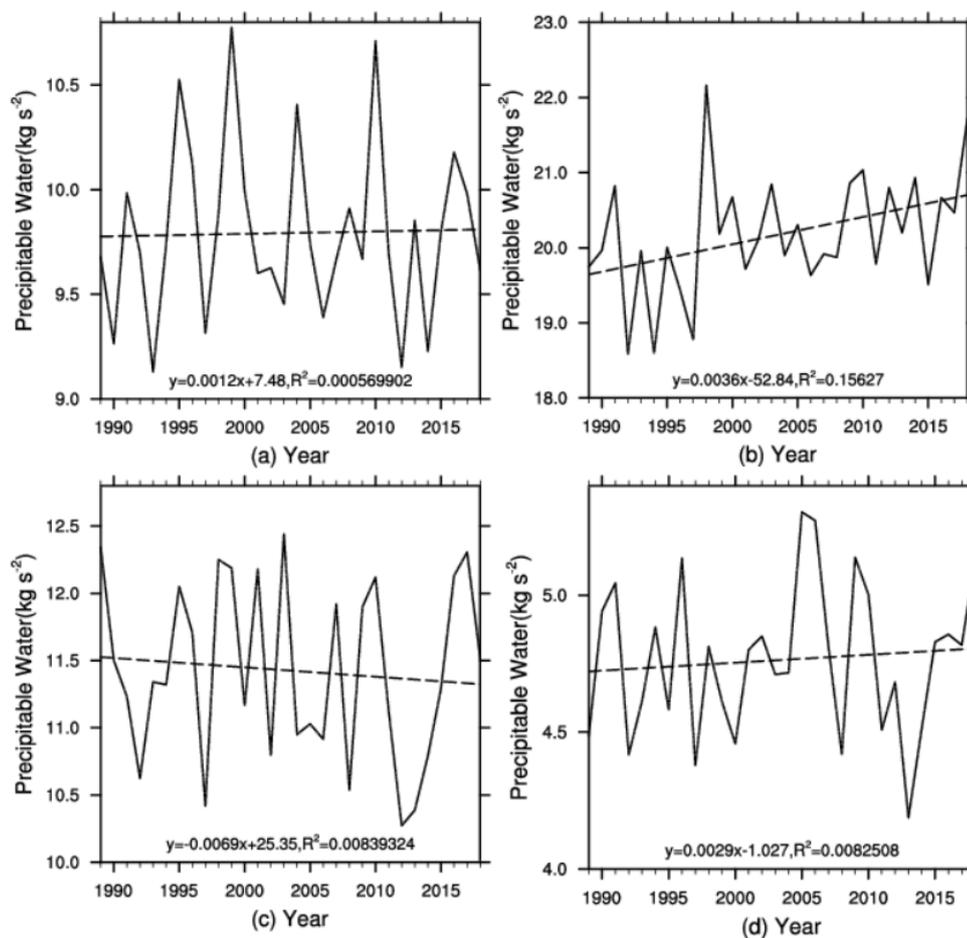
**Figure 6.** Trends in Average Precipitation in the Yarlung Zangbo Grand Canyon Region in Spring (Figure a), Summer (Figure b), Autumn (Figure c), and Winter (Figure d) (colored,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )  
**图 6.** 雅鲁藏布大峡谷地区春季(图 a)、夏季(图 b)、秋季(图 c)和冬季(图 d)平均可降水量的变化趋势(填色, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )

该流域在 30 年间的可降水量变化主要以年际振荡为主, 整体呈上升趋势, 上升幅度为  $1.08 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。图 7(a)表明了雅鲁藏布大峡谷地区的逐年平均可降水量变化规律, 1997 年最少, 约为  $10.8 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$ , 1998 年的增长率最快, 为最大值年, 约为  $12 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$ 。对比 1998 年前后的变化, 后期存在水汽输送通量辐散异常, 从而导致可降水量呈减小趋势(许建伟等, 2020) [11]。图 7(b)表明了雅鲁藏布大峡谷地区逐月平均可降水量变化规律呈单峰型, 自 1 月起, 流域水汽含量随时间的推移而不断增加, 5 月至 6 月的增量最大, 直至 7 月水汽含量达到峰值, 之后直至 12 月, 水汽含量保持逐渐减少的趋势, 9 月至 10 月的减量最大。可降水量的季节性的变化主要是由于水汽输送过程受到了季风的影响(范思睿等, 2014) [12]。从 5 月起, 受印度西南夏季风影响, 水汽从西南方向大量输送进入该地区, 使得该地区存在较强的西南水汽输送通量, 为即将到来的雨季降水提供了充足的水汽, 因此该地区夏季可降水量最多。



**Figure 7.** Time series (black solid line), linear trend (black dashed line) (a), and regional average monthly daily precipitation ( $\text{kg s}^{-2}$ ) in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region from 1989 to 2018 (b)  
**图 7.** 雅鲁藏布大峡谷地区 1989~2018 年逐年平均可降水量(单位:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$ )时间序列(黑色实线), 线性变化趋势(黑色虚线) (a)和区域平均逐月日均可降水量(单位:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$ )变化图(b)

图 8 四图可与图 7(b)逐月日均可降水量规律相对应。对比四图可发现, 该区域四季的可降水量以年际振荡为主, 其中春季在  $9.1\sim 10.8\text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$  之间波动, 夏季在  $18.6\sim 22.2\text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$  之间波动, 秋季在  $10.3\sim 12.4\text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$  之间波动, 冬季  $4.2\sim 5.3\text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$  之间波动, 夏季可降水量变化趋势最明显, 即方差最大, 整体呈明显上升趋势, 其余三个季节变化幅度相较夏季而言较为平缓。



**Figure 8.** The time series (black solid line) and linear trend (black dashed line) of average precipitable water ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$ ) in spring (Figure a), summer (Figure b), autumn (Figure c), and winter (Figure d) of the Yarlung Zangbo Grand Canyon region from 1989 to 2018

**图 8.** 雅鲁藏布大峡谷地区 1989~2018 年春季(图 a)、夏季(图 b)、秋季(图 c)和冬季(图 d)平均可降水量(单位:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$ )的时间序列(黑色实线), 线性变化趋势(黑色虚线)

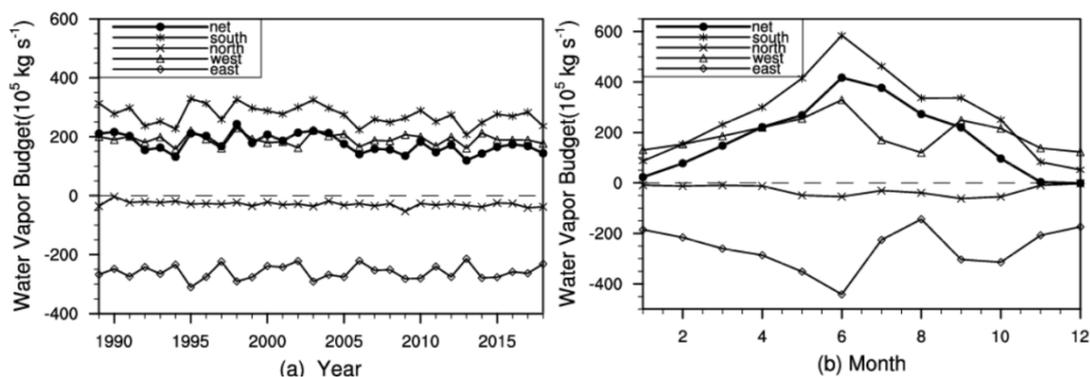
### 3.2. 水汽收支的时空变化特征

#### 3.2.1. 水汽收支的时间变化

图 9(a)为逐年平均水汽收支在四个边界上的变化情况。由图可知雅鲁藏布大峡谷地区的南边界和西边界为水汽输入边界, 南边界为主要输入边界。东边界和北边界为水汽输出边界, 逐年水汽净收支为波动变化的趋势, 主要由南部边界水汽输入减少和北部边界水汽输出增加导致。其中 1995~2005 年这十年是大峡谷地区水汽输入高峰期, 呈平缓增长的趋势, 最大值为 1998 年, 2004 年之后水汽输入开始缓慢减少, 2006~2013 年是大峡谷地区水汽输入低谷期, 最小值在 2013 年, 此变化在图 7(a)中也可得到体现。西、南边界的变化趋势基本相同, 达到水汽输入的峰值和谷值的年份也基本相同。东边界和南边界的变

化基本呈负相关, 在 1995 年分别达到各自的水汽输入和输送的峰值。整体而言, 东边界对水汽输出起最大的贡献作用, 南边界对该地区净水汽收支的贡献较大, 与水汽收支关系最密切, 西边界次之, 北边界变化极小且维持较低量值。

由图 9(b)可知, 北边界的水汽输出量值远小于其他三个边界, 影响较小。南边界与西边界的逐月变化基本同步, 与东边界在 6 月同时达到各自水汽输送强度的峰值, 随后东边界与西边界在 6 月至 8 月快速减少, 东边界减量更大, 具有明显的季节性, 揭示了夏季雅鲁藏布大峡谷地区净水汽收支的显著增加, 与图 8(b)相对应, 可降水量的高峰期也主要集中在夏季, 可见该地区水汽净收支与可降水量的关系密切。西边界与南边界都是水汽输入边界, 但在强度上具有差异上, 这种差异很大程度表明了冬半年和夏半年水汽输送路径变化的差异, 即冬季水汽主要来源于中纬度的偏西风, 而在夏季, 来自南边界孟加拉湾地区的偏南风水汽输送最强(卓嘎等, 2012) [6]。从净收支的变化趋势来看, 各月份都呈现水汽的净收入, 趋势与南边界相似, 并在 6 月份达到水汽净输入强度的峰值, 在 11 月至次年 1 月为水汽净输入强度的谷值, 强度量值接近 0 线。

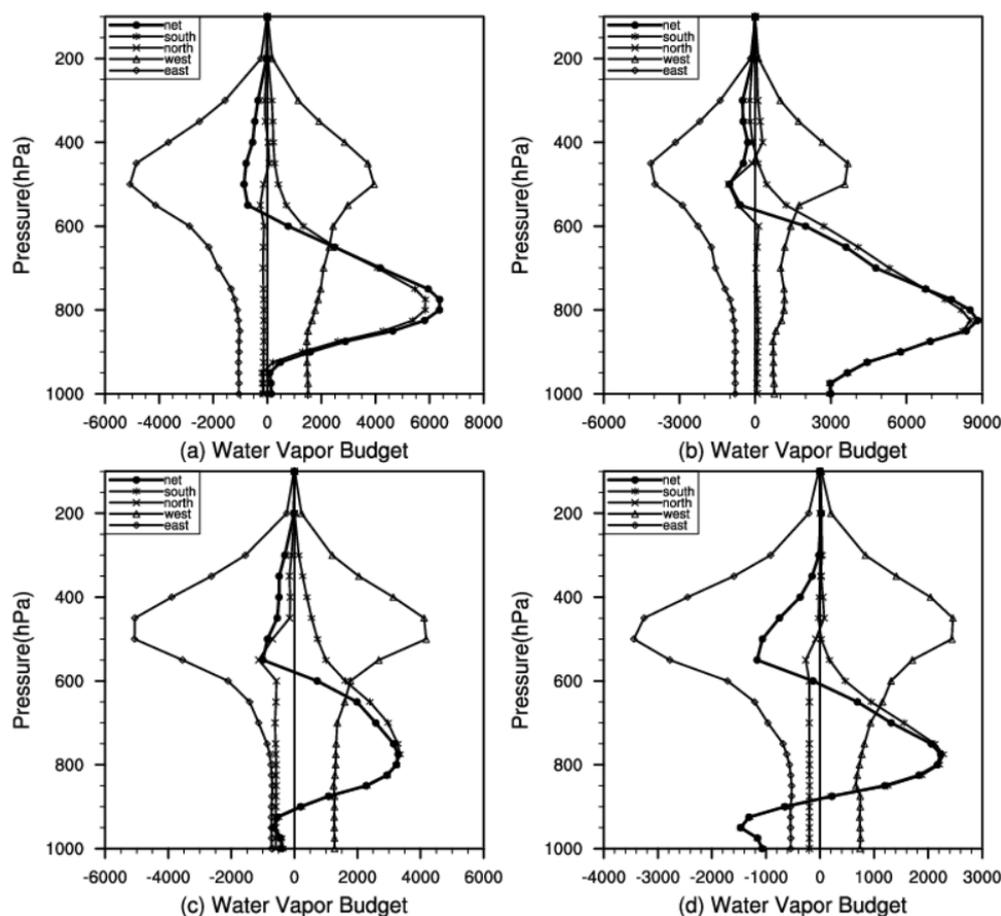


**Figure 9.** Annual (a) and monthly (b) changes in the average water vapor budget (unit:  $10^5 \text{ kg s}^{-1}$ ) and net budget (unit:  $10^5 \text{ kg s}^{-1}$ ) of each boundary in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region from 1989 to 2018: eastern boundary ( $27^\circ\sim 33^\circ\text{N}$ ,  $98^\circ\text{E}$ ), western boundary ( $27^\circ\sim 33^\circ\text{N}$ ,  $92^\circ\text{E}$ ), northern boundary ( $33^\circ\text{N}$ ,  $92^\circ\sim 98^\circ\text{E}$ ), and southern boundary ( $27^\circ\text{N}$ ,  $92^\circ\sim 98^\circ\text{E}$ )  
**图 9.** 雅鲁藏布大峡谷地区 1989~2018 年各边界平均水汽收支(单位:  $10^5 \text{ kg s}^{-1}$ )和净收支(单位:  $10^5 \text{ kg s}^{-1}$ )的逐年(a)和逐月(b)变化: 东边界( $27^\circ\sim 33^\circ\text{N}$ ,  $98^\circ\text{E}$ ), 西边界( $27^\circ\sim 33^\circ\text{N}$ ,  $92^\circ\text{E}$ ), 北边界( $33^\circ\text{N}$ ,  $92^\circ\sim 98^\circ\text{E}$ ), 南边界( $27^\circ\text{N}$ ,  $92^\circ\sim 98^\circ\text{E}$ )

### 3.2.2. 水汽收支的垂直变化分布

从水汽收支的垂直变化角度(图 10)看, 东、西边界在 500 hPa 上几乎呈对称形态, 呈现负相关的关系。东边界为主要水汽输出源地, 除夏季外东边界的输出皆大于西边界的输入, 在 500 hPa 上其水汽输出的四季总和约为西边界水汽输入的 1.3 倍。西边界在冬季由于强烈的西风, 水汽输送的强度较其他三个边界明显增大。南边界的水汽输送集中在 800 hPa 上, 且在夏季为最大正值, 春秋为微小负值, 冬季为较小负值, 对应该地区夏季降水量最大, 春秋较小, 冬季极小。北边界主要集中在 500 hPa 左右的气层中。在低层大和高层大气中, 水汽输出几乎为 0, 但北边界为印度洋和孟加拉湾的暖湿水汽向高原腹地输送的水汽通道, 因此即使强度不大, 具有重要意义。

综上, 低层大气主要为水汽输入, 中层大气为水汽输出, 高层大气由于湿度降低, 水汽收支大致相等且都接近于 0。中、高层大气中的水汽输送收支全年几乎一致, 而低层大气中, 夏季水汽输入最多, 春秋次之, 冬季最少, 此与该地区全年降水规律可相对应。这三层大气中, 偏南气流主要由低层大气输入至该地区, 这是因为水汽通道位于南边界, 从印度洋和孟加拉湾来的暖湿气流通过水汽通道进入该地区, 但受地形阻挡, 只有小部分水汽能进入高原腹地。而水汽输出则主要发生在中层, 因为大峡谷的东西侧海拔较高, 中高层的水汽输送依然很强, 形成一个低层辐合、高层辐散的适宜形成降水的形势。



**Figure 10.** Vertical variation of average water vapor budget (unit:  $105 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at four boundaries in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region in spring (Figure a), summer (Figure b), autumn (Figure c), and winter (Figure d)

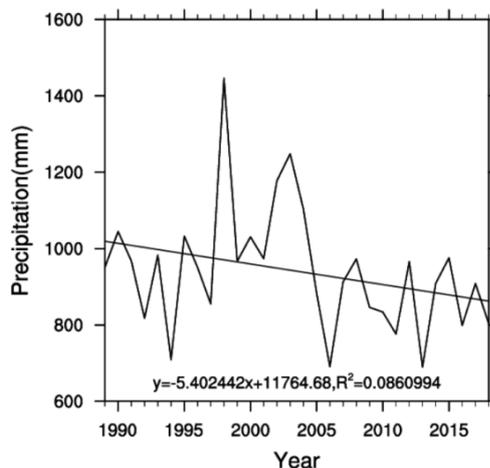
**图 10.** 雅鲁藏布大峡谷地区春季(图 a)、夏季(图 b)、秋季(图 c)和冬季(图 d)平均水汽收支(单位:  $105 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )在四个边界上的垂直变化

### 3.3. 降水高低值年可降水量和水汽通量的差异分析

由夏季逐年平均降水量变化(图 11)可知, 98 年为降水量最多年, 13 年为降水量最少年, 其降水量强度差异相差将近一倍, 雅鲁藏布江盛夏降水无显著线性趋势, 降水主要以 3~4 a 显著周期的年际振荡为主(边巴卓嘎等, 2022) [13]。在全球变暖背景下该流域无论是年降水, 或是夏季降水并无显著线性趋势(杨志刚等, 2014) [14], 而是以年际振荡为主(Sang *et al.*, 2016) [15]故将降水量最值年的可降水量和水汽通量进行差异分析。从上往下看, 可降水量和水汽通量逐渐递增。但除了中低层雅鲁藏布江流域的东南侧, 流域内的可降水量和水汽通量差异并不明显, 水汽通量的箭杆长度大多数可以忽略不计。水汽通量从孟加拉湾自东向西输送, 在印度上空分为两路一路沿着喜马拉雅山脉南侧往西北方向前进, 说明流域南侧边界的喜马拉雅山脉对南来的印度洋暖湿气流有一定的“阻隔”作用, 一路做气旋式旋转且越往低层越明显。在中层高度上, 可降水量差值与水汽通量差值在青藏高原东侧达到最大, 可降水量之差最大为  $-7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2}$ , 在雅鲁藏布大峡谷东南侧可降水量之差为正值。此时高原地形槽的发展旺盛, 孟加拉湾槽的程度达到最强。受副热带西风北跳的影响, 流域上空的水汽主要来自于阿拉伯海地区和孟加拉湾地区, 流域内的风向在西南季风的作用下主要以西南风向为主, 不断向雅鲁藏布大峡谷辐合。在低层, 水汽通量进一步增强, 可降水量之差在雅鲁藏布大峡谷南侧及青藏高原东南侧达到最大, 由于青藏高原的平均海拔

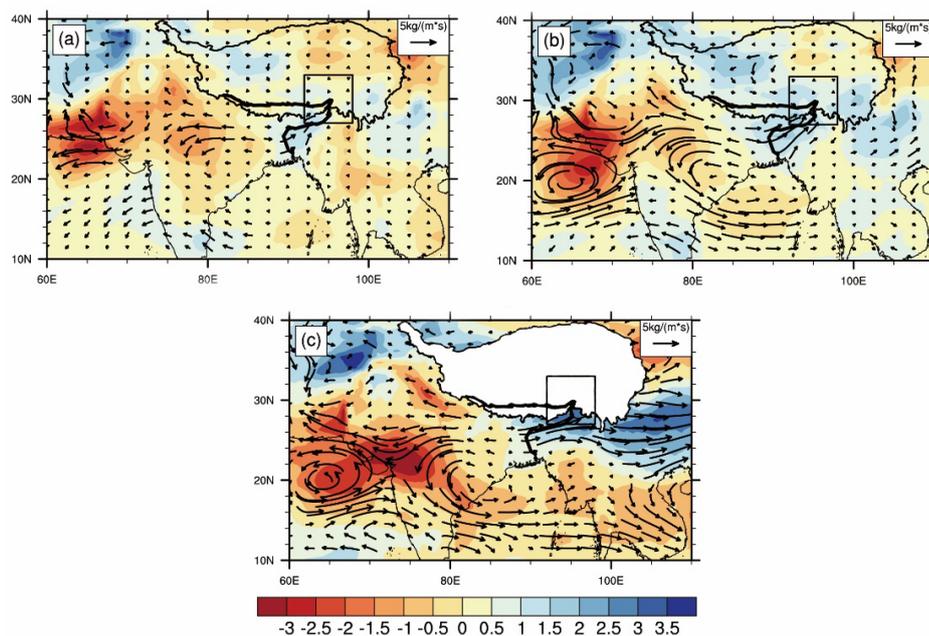
在 4000 米以上, 故同样在图 12(c)将高原上的可降水量之差和水汽通量之差做掩膜处理。

综上雅鲁藏布大峡谷南边界在降水量偏多年夏季可降水量显著偏多, 夏季可降水量异常最高可达  $4\sim 5 \text{ kg m}^{-2}$ , 而青藏高原西南侧的印度季风区北部夏季可降水量偏少, 这两个地区的可降水量差异是否存在因果关系, 该猜想还需要进一步验证。水汽通量沿着水汽通道向雅鲁藏布大峡谷东南部大量辐合, 受地形抬升, 容易形成降水, 这也很好的解释了该地区夏季降水量偏多的原因。



**Figure 11.** Time Series of Average Summer Precipitation (Unit: mm) in the Yarlung Zangbo Grand Canyon Region from 1989 to 2018

**图 11.** 雅鲁藏布大峡谷地区 1989~2018 年夏季平均降水量(单位: mm)时间序列



**Figure 12.** The spatial distribution of the difference in precipitable water (shadow, unit:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$ ) and water vapor flux (arrow, unit:  $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) between the high and low summer precipitation years (1998) and the low summer precipitation years (2013) in the Yarlung Zangbo Grand Canyon region at three levels (upper level (Figure a): 300~400 hPa, middle level (Figure b): 400~600 hPa, and lower level (Figure c): 600~1000 hPa)

**图 12.** 雅鲁藏布大峡谷地区夏季降水高值年(1998 年)和低值年(2013 年)可降水量之差(阴影, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$ )和水汽通量之差(箭头, 单位:  $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )在三个层次(高层(图 a): 300~400 hPa、中层(图 b): 400~600 hPa 和低层(图 c): 600~1000 hPa)上的空间分布

## 4. 结论

利用 ERA-Interim 再分析资料研究雅鲁藏布大峡谷 1989~2018 年的水汽特征, 得出以下结论:

(1) 从可降水量与水汽通量的时空分布特征看, 区域差异和季节差异明显。除冬季外, 其余季节可降水量自西向东递减梯度比较明显。夏季青藏高原是水汽汇, 而雅鲁藏布大峡谷流域则为水汽通道所在处; 夏季流域东南部可降水量呈现倒“U”型的空间分布, 水汽通量受孟加拉湾水汽输送带影响明显; 从降水量的时空变化特征上看, 雅鲁藏布大峡谷年均可降水量总体呈上升的趋势, 但在大峡谷的东南部呈现较弱的下降趋势; 夏季的平均可降水量增加最多, 春季的平均可降水量减少最多, 变化趋势呈现明显的季节差异; 四季可降水量波动程度较为剧烈, 以年际振荡为主, 除了秋季, 其余三季平均可降水量均呈上升趋势, 其中, 按照线性变化率的快慢, 夏季占四季首位, 之后依次是春季、秋季和冬季。说明夏季降水量的增加对年均可降水量增加的贡献最大。年际变化主要是由印度季风活动的不稳定所导致的水汽输送异常。

(2) 从水汽收支的时空特征看雅鲁藏布大峡谷地区的水汽收支在 29 年里起伏不大, 呈现波动减少的趋势。东边界和北边界是水汽输出边界, 南边界和西边界是输入边界, 6 月是水汽输入的高峰期, 南边界为水汽主要来源, 水汽输送量仅在冬季低于西边界, 西边界和南边界的变化差异在很大程度上表明了冬半年和夏半年水汽输送路径变化的差异。

(3) 大峡谷地区四季水汽收支特征: 600 hPa 以下的低层大气为主要的的水汽输入层, 南边界的水汽输入贡献最大。600 hPa 以上中高层大气主要为水汽输出, 水汽净输入的最大贡献层在 800 hPa 上下。中、高层大气中的水汽输送收支全年几乎一致, 而低层大气中, 夏季水汽输入最多, 春秋次之, 冬季最少, 春季和秋季都呈现东边界、北边界输出, 西边界、南边界输入的规律。

(4) 在降水高低值年, 青藏高原东南部有异常的气旋式水汽(孟加拉湾北部)从西南方输入, 且水汽输送的强度较强, 导致夏季降水量偏多年在雅鲁藏布大峡谷的可降水量和水汽通量偏多。

与近年来研究雅鲁藏布江流域的水汽输送特征(张文霞等, 2016) [2]相比, 本文不仅研究了在不同高度的可降水量和水汽通量的垂直空间分布, 还结合可降水量在空间分布和时间上的变化趋势, 来探讨可降水量和水汽通量与雅鲁藏布大峡谷地区的水汽输送的关联。但需要指出的是, 本次研究使用的 ERA-Interim 再分析资料空间分辨率为  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ , 但流域范围小、地形复杂, 因此对于雅鲁藏布大峡谷地区边界的定义还是过于粗糙。因此, 未来将从边界定义等角度继续细化深入对雅鲁藏布大峡谷地区水汽输送特征的研究, 以及对目前尚不明确的猜想如印度夏季风影响雅鲁藏布江流域夏季降水年际变化的机制进行更完善的分析, 解决实际问题。

## 参考文献

- [1] 高登义. 雅鲁藏布江水汽通道考察研究[J]. 自然杂志, 2008(5): 301-303.
- [2] 张文霞, 张丽霞, 周天军. 雅鲁藏布江流域夏季降水的年际变化及其原因[J]. 大气科学, 2016, 40(5): 965-980.
- [3] 杨逸畴, 高登义, 李渤生. 雅鲁藏布江下游河谷水汽通道初探[J]. 中国科学(B 辑化学生物学农学医学地学), 1987(8): 893-902.
- [4] Sun, L., Yang, Y., Fu, Y., et al. (2022) Summertime Atmospheric Water Vapor Transport between Tibetan Plateau and Its Surrounding Regions during 1990-2019: Boundary Discrepancy and Interannual Variation. *Atmospheric Research*, **275**, 106237. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106237>
- [5] Yuan, X., Yang, K., Lu, H., et al. (2023) Impacts of Moisture Transport through and over the Yarlung Tsangpo Grand Canyon on Precipitation in the Eastern Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, **282**, 106533. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106533>
- [6] Lei, F. and Zhou, T.J. (2012) Water Vapor Transport for Summer Precipitation over the Tibetan Plateau: Multidata Set Analysis. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **117**, D20114. <https://doi.org/10.1029/2011JD017012>

- 
- [7] 卓嘎, 罗布, 周长艳. 1980-2009 年西藏地区水汽输送的气候特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 783-794.
- [8] Bao, X.H. and Zhang, F.Q. (2013) Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 Reanalysis Datasets against Independent Sounding Observations over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, **26**, 206-214. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00056.1>
- [9] 谢欣汝, 游庆龙, 保云涛, 孟宪红. 基于多源数据的青藏高原夏季降水与水汽输送的联系[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 78-92.
- [10] 李琳静. 雅鲁藏布江流域水汽输送及降水特征研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27200/d.cnki.gkmlu.2022.000915>
- [11] 许建伟, 高艳红, 彭保发, 等. 1979-2016 年青藏高原降水的变化特征及成因分析[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 234-244.
- [12] 范思睿, 王维佳, 刘东升, 等. 基于再分析资料的西南区域近 50a 空中水资源的气候特征[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 65-72.
- [13] 边巴卓嘎, 赤曲, 周顺武, 等. 雅鲁藏布江河谷盛夏降水年际变化及其与环流的联系[J]. 大气科学学报, 2022, 45(3): 469-479. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201010005>
- [14] 杨志刚, 卓玛, 路红亚, 等. 1961-2010 年西藏雅鲁藏布江流域降水量变化特征及其对径流的影响分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 166-172.
- [15] Sang, Yan Fang, Singh, *et al.* (2016) Precipitation Variability and Response to Changing Climatic Condition in the Yarlung Tsangpo River Basin, China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **121**, 8820-8831. <https://doi.org/10.1002/2016JD025370>