

龙泉驿区暴雨水汽输送变化特征

黎金鑫, 毛文书, 杨慧鑫, 董自正

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2022年7月31日; 录用日期: 2022年9月2日; 发布日期: 2022年9月9日

摘要

为分析龙泉驿区41年来暴雨水汽输送变化特征, 利用1980~2010年的FNL再分析资料, 网格距 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 时间间隔为6 h, 龙泉驿区本站24小时逐日降水量观测资料, 对1980~2020年41年发生在龙泉驿区共93次典型暴雨过程的水汽输送特征进行合成分析。研究表明: 1) 龙泉驿区6月暴雨的水汽来源主要来自于孟加拉湾, 受到西南气流的影响, 水汽经过云南后抵达四川, 从而为龙泉驿区暴雨的发生提供充足的水汽条件。6月龙泉驿区850 hPa平均水汽通量散度值达到 $-10 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 有利于暴雨的发生。2) 龙泉驿区7月暴雨水汽输送主要来自孟加拉湾和南海, 一条水汽通道由孟加拉湾进入青藏高原, 随后抵达四川龙泉驿区上空; 另外一条水汽通道由南海途径贵州、重庆抵达四川龙泉驿区上空。7月龙泉驿区850 hPa水汽通量散度最大值可达 $-20 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。3) 龙泉驿区8月暴雨水汽分别来自于孟加拉湾和南海, 二者的水汽在东风与西风的共同作用下在广西汇聚, 受偏南气流的影响, 途径贵州, 重庆后抵达四川龙泉驿区上空。8月龙泉驿区850 hPa平均水汽通量散度值为 $-15 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 左右。4) 龙泉驿区9月暴雨水汽输送主要来自于南海, 南海的水汽在副热带高压的影响下, 途径台湾, 两广, 经贵州, 重庆后抵达四川龙泉驿区上空。9月龙泉驿区850 hPa水汽通量散度最大值可达 $-25 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。

关键词

龙泉驿区, 暴雨, 水汽输送, 水汽通量, 水汽通量散度

Variation Characteristics of Storm Water Vapour Transfer in Longquanyi District

Jinxin Li, Wenshu Mao, Huixin Yang, Zizheng Dong

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jul. 31st, 2022; accepted: Sep. 2nd, 2022; published: Sep. 9th, 2022

Abstract

In order to analyse the characteristics of water vapour transport during the 41 years of heavy rain-

fall in Longquanyi District, the FNL reanalysis data from 1980 to 2010, with a grid distance of $1^\circ \times 1^\circ$ and a time interval of 6 h, and 24-hour daily precipitation observations at the Longquanyi District station, were used to synthesize and analyse the water vapour transport characteristics of a total of 93 typical heavy rainfall processes that occurred in Longquanyi District during the 41 years from 1980 to 2020. The study shows that: 1) the water vapour source of the June rainstorm in Longquanyi District mainly comes from the Bay of Bengal, which is influenced by southwest air currents and reaches Sichuan after passing through Yunnan, thus providing sufficient water vapour conditions for the occurrence of rainstorms in Longquanyi District. 850 hPa average water vapour flux dispersion value in Longquanyi District in June reaches $-10 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$, which is favourable to the occurrence of rainstorms. 2) The water vapour transport in July in Longquanyi area mainly comes from the Bay of Bengal and the South China Sea, with one water vapour channel entering the Qinghai-Tibet Plateau from the Bay of Bengal and then arriving over Longquanyi area in Sichuan, and the other water vapour channel arriving over Longquanyi area in Sichuan from the South China Sea via Guizhou and Chongqing, with the maximum value of 850 hPa water vapour flux dispersion reaching $-20 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ in July. 3) The water vapour of the August rainstorm in Longquanyi District came from the Bay of Bengal and the South China Sea respectively, and the water vapour from both converged in Guangxi under the joint action of the easterly and westerly winds, and arrived over Longquanyi District in Sichuan under the influence of the southerly airflow via Guizhou and Chongqing. The average water flux dispersion value at 850 hPa in August in Longquanyi District was about $-15 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$. 4) In September, the water vapour transport in the Longquanyi area mainly comes from the South China Sea, under the influence of subtropical high pressure, the water vapour from the South China Sea arrives over the Longquanyi area in Sichuan via Taiwan, Guangdong, Guizhou and Chongqing, and the maximum value of 850 hPa water flux dispersion in the Longquanyi area in September can reach $-25 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$.

Keywords

Longquanyi District, Heavy Rainfall, Water Vapour Transport, Water Vapour Flux, Water Vapour Flux Dispersion

Copyright © 2022 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

水汽输送是暴雨过程中相当重要的部分,分析水汽的源与汇,对暴雨预报的准确性有着很大的提升。目前我国对水汽输送的特征已有很多成果。杨显玉等[1]在分析三江源区夏季异常水汽输送后,发现三江源的水汽输送主要有南北两支通道,不同时段所输送的主要通道不同,这种差异性可以区分降水的异常情况。王曼等[2]选取10年影响云南南海的台风样本共25个,分析其平均水汽输送特征后发现,台风的水汽输送一共有三个方向,东侧面水汽输入最大,北侧面水汽输入最小,这两个方向的水汽来源自南海,南侧面水汽输入较东侧面小、比北侧面大,水汽来源自南海和孟加拉湾。刘煜等[3],通过拉格朗日方法分析若尔盖地区的水汽输送特征后发现,湿润期的水汽输送路径是受到西南季风影响的南支输送路径,该路径起始于阿拉伯海、孟加拉湾,从西-南方向进入青藏高原,再到达若尔盖地区,而干旱时期的水汽输送路径主要受到西风带的影响,由亚欧大陆到达青藏高原北部。周长艳等[4]在分析一次四川特大暴雨的水汽输送后发现,此次暴雨过程的水汽来源和气候平均状态并不完全一致,除了南海、西太平洋地区的偏南风水汽输送,孟加拉湾北部的西南风水汽输送以及高原主体上空的偏西风水汽输送以外,还出

现了一条新的水汽输送路径：阿拉伯海北部的西南风水汽输送途经高原主体、高原东南部进入四川。充足的水汽条件、良好的水汽辐合辐散形势的共同作用导致了此次暴雨过程雨带稳定、雨量超常。李俊杰[5]等使用 HYSPLIT_4.9 模式计算气流的模拟轨迹，对华南前汛期的水汽输送过程进行后向追踪模拟。结果发现不同 PDO 背景下的水汽输送存在明显差异，锋面降水期间，在 PDO 正位相，西太平洋 - 南海 - 孟加拉湾水汽偏多，夏季风降水阶段，在 PDO 正位相，尽管北印度洋 - 孟加拉湾 - 南海上的整层水汽含量大，但并没有都输送到华南。周长艳等[6]垂直积分的水汽输送通量资料，分析了夏季大尺度水汽输送演变的气候特征及偏南风水汽输送在中国区域内的推进特征。结果表明：夏季各支大尺度水汽输送汇合成一条行星尺度水汽输送大值带，垂直积分的水汽输送通量强辐合区大多位于行星尺度水汽输送大值带中，与降水大值区之间有很好的对应关系。姚文清等[7]通过对长江流域梅雨期暴雨过程的水汽输送特征进行研究，结果发现 6 月与 7 月份水汽输送特征存在差异，6 月来自孟加拉湾和高原地区的西南水汽流明显，且西太平洋副高西南边缘南海区域东南水汽输送更为显著；7 月份印度洋和孟加拉湾两支西南气流为边界水汽流的主体。

水汽输送是暴雨发生时不可忽视的一个问题[8] [9] [10] [11]，水汽输送过程中，还伴随有动量和热量的转移，因而要影响沿途的气温、气压等其它气象因子发生改变，所以水汽输送是水循环过程的重要环节，也是影响当地天气过程和气候的重要原因[12] [13] [14]。研究好水汽运输过程中的特征变化，才能更准确更迅速的对暴雨的发生做出预警预报。

2. 资料与方法

利用 1980~2020 年的 FNL 再分析资料，网格距 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，时间间隔为 6 h，同期龙泉驿区本站的 24 小时逐日降水观测资料，对 1980~2020 年近 41 年发生在龙泉驿区 6~9 月共 93 次各月典型暴雨过程的水汽通量以及水汽通量散度逐月进行合成分析。

3. 龙泉驿区暴雨水汽输送变化特征

3.1. 6 月暴雨水汽输送变化

3.1.1. 水汽通量

由 6 月的水汽通量场(图 1)可知，6 月暴雨的水汽来源主要来自于孟加拉湾，受到西南气流的影响，水汽经过云南后抵达四川，从而为龙泉驿区暴雨的发生提供充足的水汽条件，随着时间的推移，水汽的运输逐渐向南偏移，至 20 时(图 1(d))，龙泉驿区无水汽的运输，暴雨进入消亡的阶段。

3.1.2. 水汽通量散度

为了更好的研究水汽的集中情况，因此我们需要分析暴雨发生时的水汽通量散度。由 6 月 850 hPa 的水汽通量散度场(图 2)可知，02 时(图 2(a))起四川西北部甘孜地区有着非常强的水汽通量负散度，此时该地区降水量较大。而龙泉驿区也有较大的水汽通量负散度达到 $-10 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ，有利于强降水的发生。而至 14 时(图 2(c))时散度变为正值。

3.2. 7 月暴雨水汽输送变化

3.2.1. 水汽通量

由 7 月平均整层水汽通量场(图 3)可知，相较 6 月而言，7 月暴雨水汽输送除了孟加拉湾之外，还有南海的水汽输送。可以看到这两条水汽通道，一是由孟加拉湾进入青藏高原，随后抵达四川；二是由南海途径贵州，重庆抵达四川龙泉驿区。由 02 时(图 3(a))，08 时(图 3(b))可以看出，此时水汽通量的密集程度较大，而 14 时(图 3(c))起开始减弱。

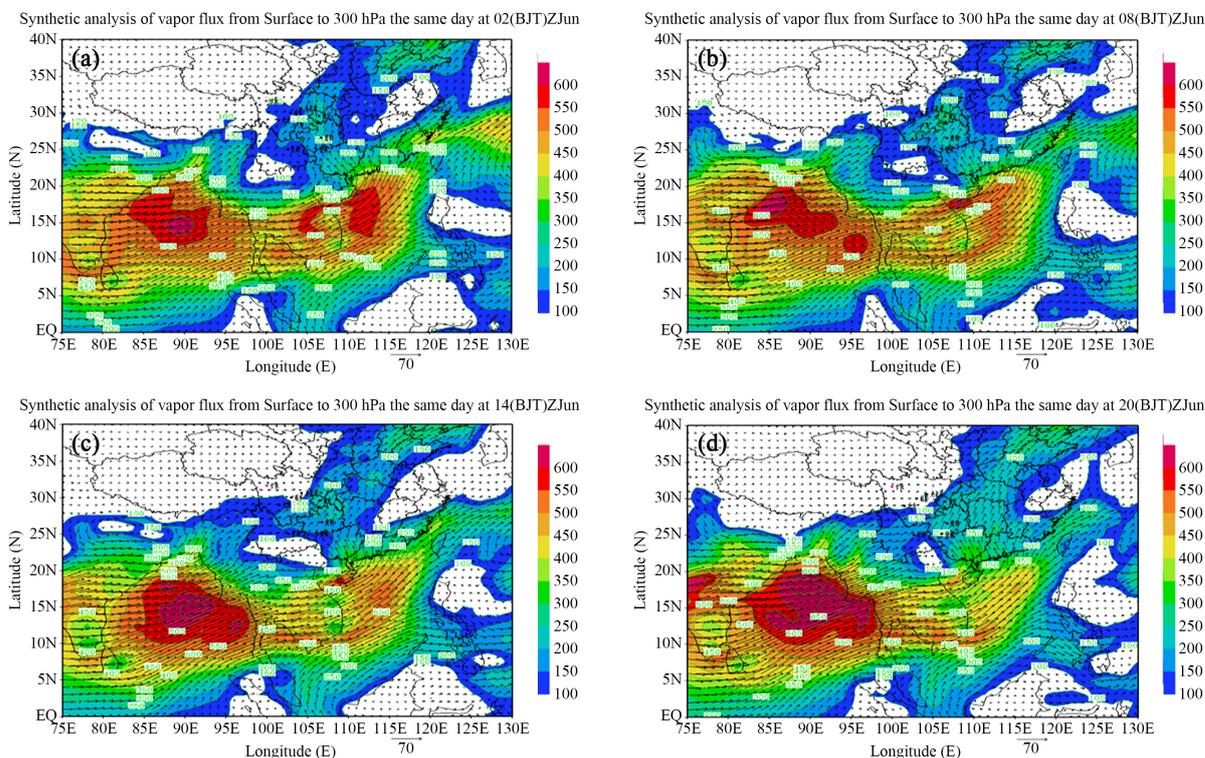


Figure 1. Average whole layer water vapour flux field in June ((a): 02 h, (b): 08 h, (c): 14 h, (d): 20 h)
图 1. 6月平均整层水汽通量场((a): 02时, (b): 08时, (c): 14时, (d): 20时)

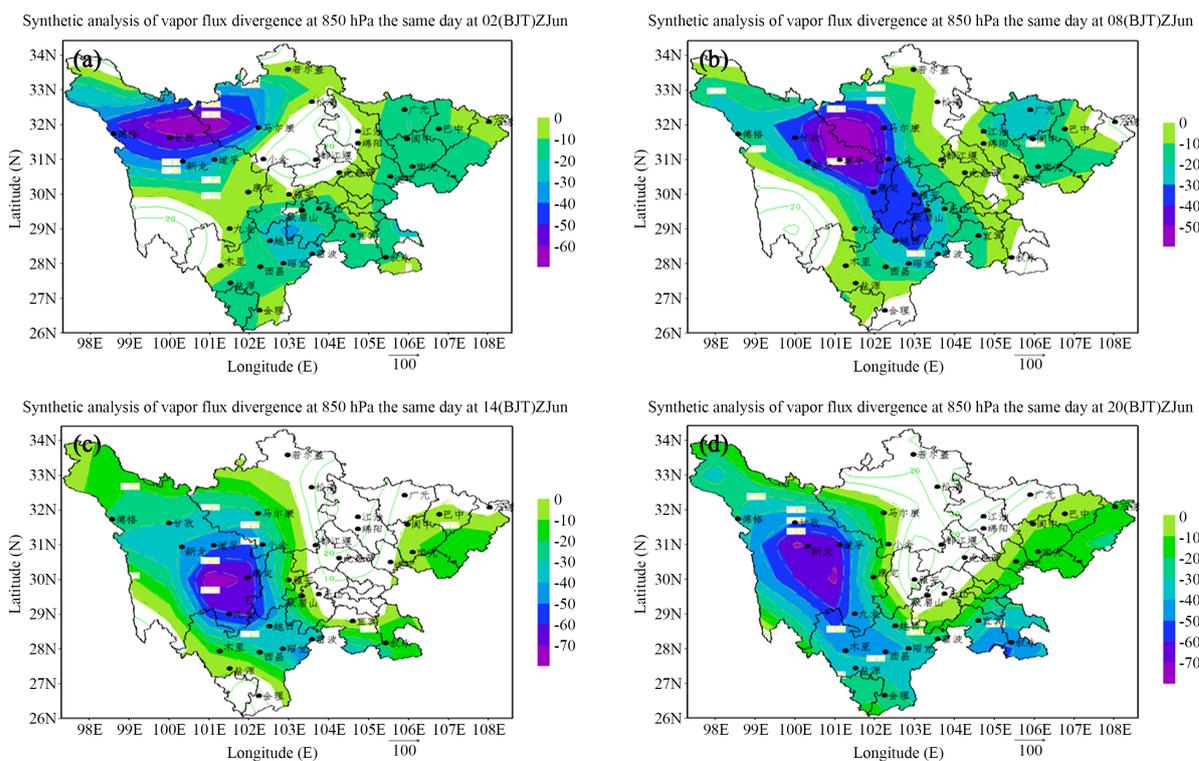


Figure 2. Average 850 hPa water vapour flux divergence field in June ((a): 02 h, (b): 08 h, (c): 14 h, (d): 20 h)
图 2. 6月 850 hPa 平均水汽通量散度场((a): 02时, (b): 08时, (c): 14时, (d): 20时)

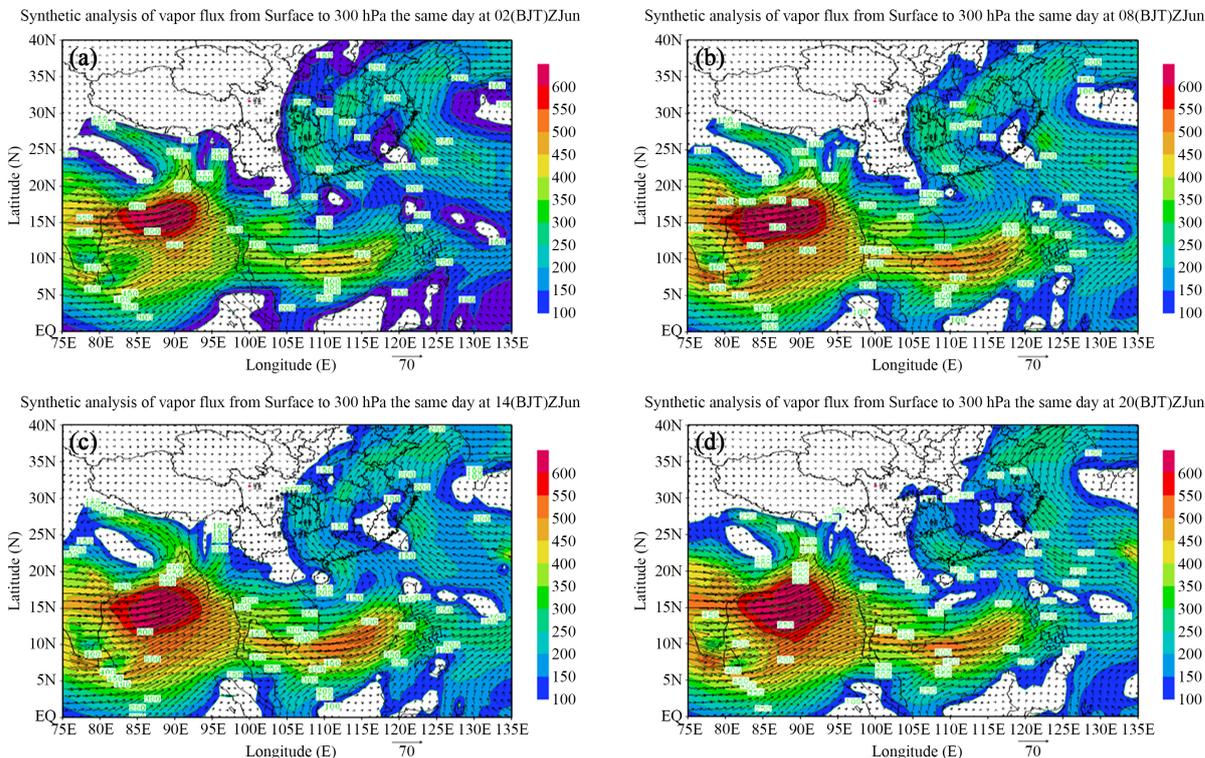


Figure 3. Average whole layer water vapour flux fields in July ((a): 02 h, (b): 08 h, (c): 14 h, (d): 20 h)

图 3. 7月平均整层水汽通量场((a): 02时, (b): 08时, (c): 14时, (d): 20时)

3.2.2. 水汽通量散度

由 7 月 850 hPa 平均水汽通量散度场(图 4)可以看出, 02 时(图 4(a))四川西北部的甘孜, 德格与四川东北部的阆中, 巴中, 南充等地水汽通量负散度较强中心值可达到 $-40 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$, 而龙泉驿区负散度相对较小大约在 $-10 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 左右, 而到 08 时(图 4(b))龙泉驿区负散度有所增强达到 $-20 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$, 随后 14 时(图 4(c))起转为正散度, 暴雨强度减弱。

3.3. 8 月暴雨水汽输送变化

3.3.1. 水汽通量

由 8 月平均整层水汽通量场(图 5)可知, 同 7 月一致, 本月暴雨的水汽主要有两个来源, 分别来自于孟加拉湾和南海。二者的水汽在东风与西风的作用下在广西汇聚, 受偏南气流的影响, 途径贵州, 重庆后抵达四川。8 月龙泉驿区水汽通量密度整体高于 6 月与 7 月。因此 8 月暴雨强度普遍高于 6, 7 月。

3.3.2. 水汽通量散度

由 8 月 850 hPa 平均水汽通量散度场(图 6)可以看出, 02 时(图 6(a))四川整体都处于一个较大的负水汽通量散度之下, 龙泉驿区负散度在 $-15 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 左右, 到 08 时(图 6(b))后, 四川整体负散度皆有所加强, 主要存在两个强中心, 一个是以雅安, 乐山, 峨眉山为中心的强负值区, 一个是以广元, 阆中为中心的强负值区, 二者的中心强度都达到了 $-30 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$, 龙泉驿区的散度同样有所增加, 达到 $-20 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$, 但自 14 时(图 6(c))起四川中部的负散度区消失, 阆中的强负散度中心仍然存在, 但略有东移, 而雅安, 峨眉山的负中心逐渐减弱消散。龙泉驿区的负散度值减弱为 $-10 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$, 而 20 时(图 6(d))则低于 $-10 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 。

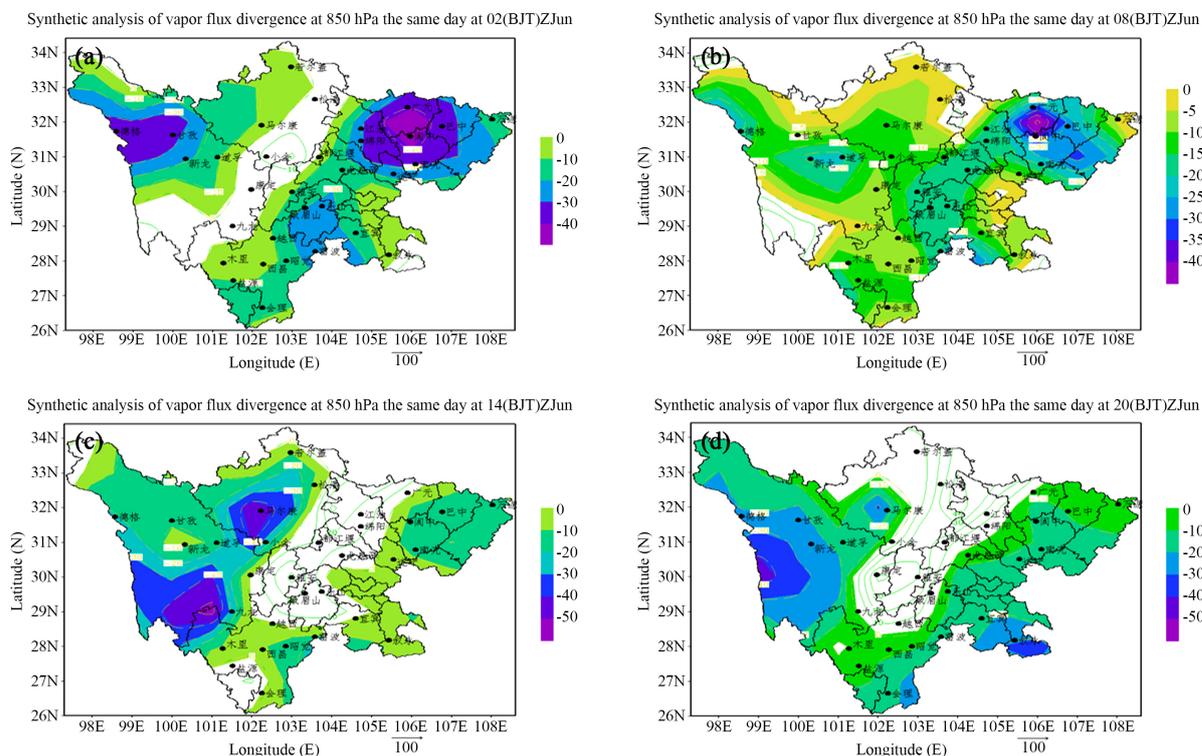


Figure 4. Average 850 hPa water vapour flux divergence field in July ((a): 02 h, (b): 08 h, (c): 14 h, (d): 20 h)
图 4. 7月 850 hPa 平均水汽通量散度场((a): 02 时, (b): 08 时, (c): 14 时, (d): 20 时)

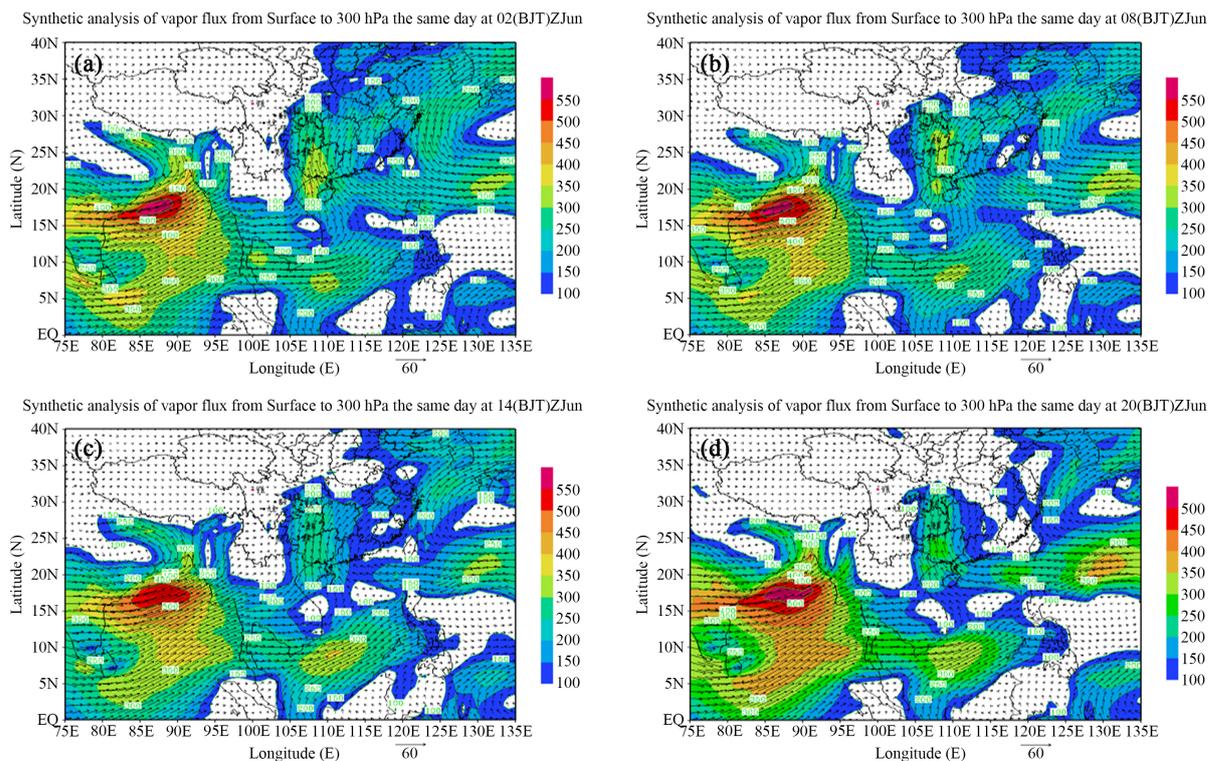


Figure 5. Average whole layer water vapour flux fields in August ((a): 02 h, (b): 08 h, (c): 14 h, (d): 20 h)
图 5. 8月平均整层水汽通量场((a): 02 时, (b): 08 时, (c): 14 时, (d): 20 时)

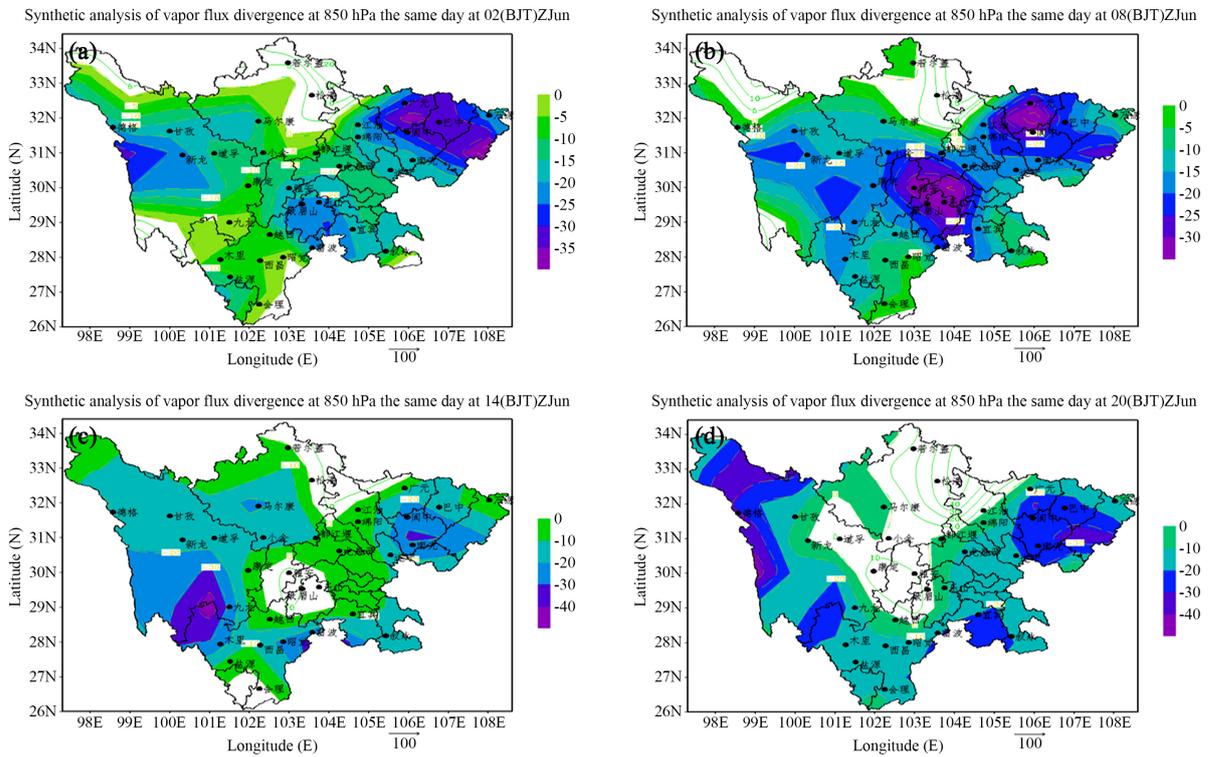


Figure 6. August mean 850 hPa water vapour flux divergence field ((a): 02 h, (b): 08 h, (c): 14 h, (d): 20 h)
图 6. 8 月平均 850 hPa 水汽通量散度场((a): 02 时, (b): 08 时, (c): 14 时, (d): 20 时)

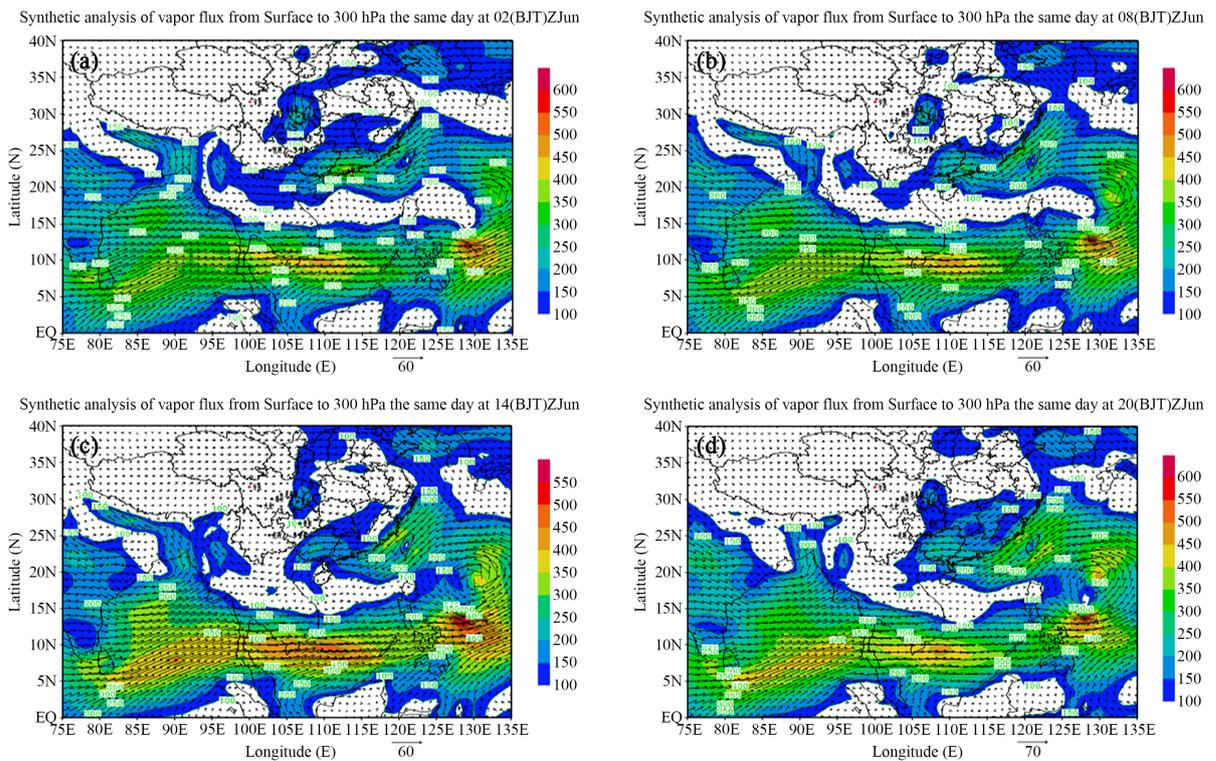


Figure 7. Average whole layer water vapour flux fields in September ((a): 02 h, (b): 08 h, (c): 14 h, (d): 20 h)
图 7. 9 月平均整层水汽通量场((a): 02 时, (b): 08 时, (c): 14 时, (d): 20 时)

3.4.9 月暴雨水汽输送变化

3.4.1. 水汽通量

由9月平均整层水汽通量场(图7)可以看出,本月暴雨的水汽运输主要来自于南海,而孟加拉湾的水汽受偏西气流的影响,无法直接抵达四川。南海的水汽受西风的影响,在副热带高压的影响下,途径台湾,广东,广西,贵州,重庆后抵达四川。而在02时(图7(a))时龙泉驿区水汽通量密度是最大的,之后略有缩小。

3.4.2. 水汽通量散度

由9月850 hPa 平均水汽通量散度场(图8)可以得到,02时(图8(a))四川东部和四川西北部皆有较大的水汽通量负散度,东北部的阆中,广元等地区中心强度可达 $-40 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 。龙泉驿区的水汽通量散度也达到 $-20 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 左右,至08时(图8(b))四川大部份地区都处于负散度区域,阆中为中心的强负散度区域有所减弱,范围也有所减少。但龙泉驿区增强到 $-25 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 水汽聚集增大,但到14时(图8(c)),龙泉驿区水汽通量散度变为正值,暴雨强度有所减弱。至20时(图8(d))龙泉驿区又变为负散度区。

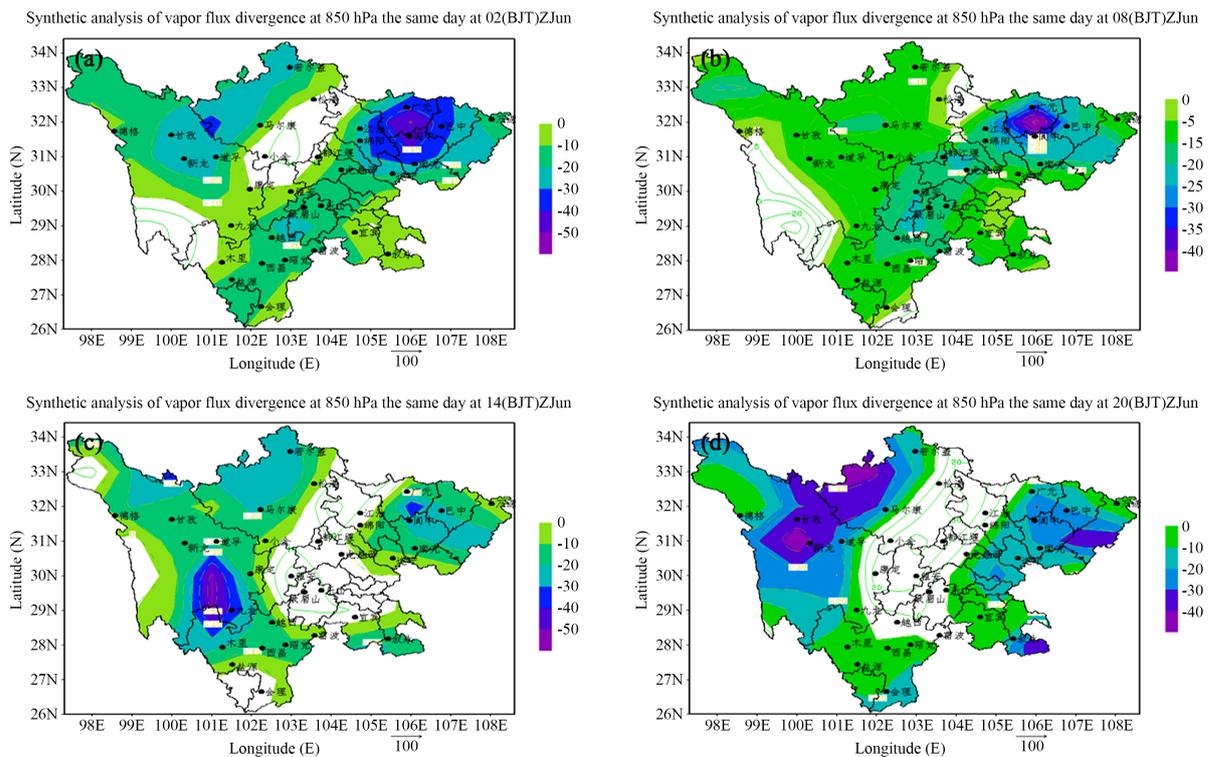


Figure 8. Water vapour flux divergence field at 850 hPa averaged over September ((a): 02 h, (b): 08 h, (c): 14 h, (d): 20 h)
图 8. 9 月平均 850 hPa 水汽通量散度场((a): 02 时, (b): 08 时, (c): 14 时, (d): 20 时)

4. 结论

如今我国对水汽运输的研究已颇有心得,但大多只研究单次暴雨过程的水汽条件,而本文利用龙泉驿区本站的逐日降水资料和 FNL 全球再分析资料,对龙泉驿区 1980 年至 2020 年 41 年 6~9 月共 93 次暴雨天气过程的水汽输送通量和水汽通量散度进行合成分析,可以得到以下结论。

1) 龙泉驿区 6 月暴雨的水汽来源主要来自于孟加拉湾, 受到西南气流的影响, 水汽经过云南后抵达四川, 从而为龙泉驿区暴雨的发生提供充足的水汽条件, 随着时间的推移, 水汽的运输逐渐向南偏移, 龙泉驿区无水汽的运输, 暴雨进入消亡的阶段。6 月龙泉驿区 850 hPa 水汽通量散度值达到 $-10 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 有利于强降水的发生。

2) 龙泉驿区 7 月暴雨水汽输送除了孟加拉湾之外, 还有南海的水汽输送。一条水汽通道是由孟加拉湾进入青藏高原, 随后抵达四川; 另一条水通道是由南海途径贵州, 重庆抵达四川龙泉驿区。7 月龙泉驿区 850 hPa 水汽通量散度值达到 $-20 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。

3) 龙泉驿区 8 月暴雨水汽输送通道同 7 月一致, 水汽主要有两个来源, 分别来自于孟加拉湾和南海, 二者的水汽在东风与西风的作用下在广西汇聚, 受偏南气流的影响, 途径贵州, 重庆后抵达四川。8 月龙泉驿区水汽通量密度整体高于 6 月与 7 月, 因此 8 月暴雨强度普遍高于 6, 7 月。8 月龙泉驿区 850 hPa 水汽通量散度值达到 $-15 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。8 月水汽通量散度主要存在两个强中心, 一个是以雅安, 乐山, 峨眉山为中心的强负值区, 一个是以广元, 阆中为中心的强负值区, 二者的中心强度都达到了 $-30 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 龙泉驿区的散度同样有所增加, 达到 $-20 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。

4) 龙泉驿区 9 月暴雨水汽输送主要来自于南海, 南海的水汽在副热带高压的影响下, 途径台湾, 广东, 广西, 贵州, 重庆后抵达四川龙泉驿区上空。9 月龙泉驿区 850 hPa 水汽通量散度最大值可达到 $-25 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。

总之, 从水汽条件整体来看, 龙泉驿区 6 月暴雨和 9 月暴雨的水汽输送主要来自于孟加拉湾, 而 7~8 月暴雨的水汽输送主要由孟加拉湾和南海共同提供, 而从水汽的辐合辐散情况来看, 在 20 时~08 时的水汽辐合情况普遍好于 08 时~20 时, 同时符合四川多夜雨的实际情况。

参考文献

- [1] 杨显玉, 吕雅琼, 文军, 等. 三江源区域夏季降水异常的水汽输送及源地特征的研究[J]. 高原气象, 2022, 41(2): 465-476.
- [2] 王曼, 许美玲, 段旭, 等. 影响云南高原地区的南海西行台风水汽输送特征[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 584-59
- [3] 刘煜, 刘蓉, 王欣, 等. 基于拉格朗日方法评估青藏高原若尔盖地区水汽输送特征[J]. 高原气象, 2022, 41(1): 58-67.
- [4] 周长艳, 唐信英, 邓彪. 一次四川特大暴雨灾害降水特征及水汽来源分析[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1636-1647.
- [5] 李俊杰, 范伶俐, 梁梅, 等. 不同 PDO 背景下华南前汛期锋面和季风降水的水汽输送差异[J]. 大气科学学报, 2022, 45(4): 539-551.
- [6] 周长艳, 何金海, 李薇, 等. 夏季东亚地区水汽输送的气候特征[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 18-27.
- [7] 姚文清, 徐祥德, 张雪金. 1998 年长江流域梅雨期暴雨过程的水汽输送特征[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 496-503.
- [8] 田红, 郭品文, 陆维松. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(4): 496-502.
- [9] 唐东升, 王建德, 刘文泉. 夏季华南降水与水汽输送气流及大气加热场的关系[J]. 南京气象学院学报, 1994(2): 148-152.
- [10] 李永华, 周杰, 何卷雄, 等. 2020 年 6-7 月西南地区东部降水异常偏多的水汽输送特征[J]. 大气科学, 2022, 46(2): 309-326.
- [11] 胡泊, 张志森, 乔少博, 等. 1990 年代末东亚北部地区夏季水汽输送年代际变化特征及其影响机制[J]. 大气科学, 2016, 40(5): 933-945.
- [12] 叶敏, 封国林. 长江中下游地区夏季降水的水汽路径的客观定量化研究[J]. 大气科学, 2015, 39(4): 777-788.
- [13] 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系[J]. 大气科学, 2011, 35(4): 589-606.
- [14] 陈艳, 丁一汇, 肖子牛, 等. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响[J]. 大气科学, 2006(01): 25-37.