

2020 年 6-7 月西南地区东部降水异常偏多的水汽输送特征*

李永华¹ 周杰¹ 何卷雄² 卢楚翰³ 向波¹

1 重庆市气候中心, 重庆 401147

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

3 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

摘要 利用 1961-2020 年西南地区东部 118 个气象站逐日降水量资料和 1979-2020 年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 逐月再分析资料以及美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的逐 6h 全球再分析资料, 采用相关、回归、聚类、混合单粒子拉格朗日综合轨迹(HYSPLITv5.0)模型模拟等方法对 2020 年 6-7 月西南地区东部降水异常偏多特征、大尺度水汽输送特征及水汽收支状况和主要水汽源地及贡献等进行了分析, 定义了关键区水汽强度指标, 分析了关键区水汽强度与海温的联系。结果表明, 2020 年 6-7 月西南地区东部平均降水量异常偏多 5 成, 为 1961 年以来最多, 除贵州中部和四川东北部的局部地区降水较常年略偏少外, 其余地区降水均较常年明显偏多。2020 年 6-7 月 200hPa 上高空急流位置偏南, 西南地区东部正好位于急流轴以南地区, 高层强辐散流出, 低层强辐合流入, 配合从低层到高层的深厚的强烈的垂直运动, 为降水提供了良好的动力条件, 而西太平洋副热带高压(副高)明显西伸, 有利于其西南侧的暖湿气流向西南地区东部输送, 使得该区域降水偏多。采用拉格朗日方法计算的定量的水汽轨迹追踪结果表明 2020 年 6-7 月西南地区东部降水的水汽路径 70.5%来自于孟加拉湾、南海和阿拉伯海等南方路径, 17.5%来自于北方路径, 11.9%来自于局地。前冬赤道中东太平洋海温偏高和热带印度洋全区海温偏高, 西太平洋副高明显偏西、偏强, 孟加拉湾和南海地区为东风距平, 有利于南海地区向西的水汽偏强, 不利于孟加拉湾地区向东的水汽输送; 与此同时, 菲律宾至我国南海附近为异常反气旋, 使得中南半岛北部地区为偏南风距平, 有利于中南半岛北部地区向北的水汽输送偏强, 共同造成该地区降水偏多。

关键词 西南地区东部 水汽输送 水汽强度指标 拉格朗日轨迹模式

文章编号:

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2105.21002

Characteristics of Water Vapor Transport Associated with Abnormal Precipitation over the East of Southwestern China in June and July, 2020

LI Yonghua¹, ZHOU Jie¹, HE Juanxiong², LU Chuhan³, and XIANG Bo¹

1 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

2 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2021-01-08; 网络预出版日期

作者简介 李永华, 男, 1972 年出生, 博士, 正研级高工, 主要从事气候诊断预测及区域气候变化研究。E-mail: lyhcq@163.com

通讯作者 周杰, E-mail: zhoujie1226@126.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41875111, 国家重点研发计划项目 2018YFE0196000, 国家自然科学基金项目 42075008、40975058

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41875111), National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFE0196000), National Natural Science Foundation of China (Grant 42075008, 40975058)

Abstract In this paper, the anomalous characteristics of precipitation in the east of southwestern China (ESWC) in June-July, 2020 and the related large-scale characteristics of water vapor transport, water vapor budget and water vapor source are analyzed by using correlation, regression, clustering, Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLITv5.0) model simulation and other statistical methods based on the daily precipitation data of 118 stations and other reanalysis data. Then some indexes of water vapor intensity in key areas are defined, and the relationship between water vapor intensity in key areas and sea temperature is investigated. The results show that the average precipitation in the ESWC in June-July, 2020 is 50% more than that in normal year, which is the highest since 1961. Precipitation in most areas is obviously higher than that in normal year, except for some areas in central Guizhou and northeastern Sichuan. The configuration of tropospheric atmospheric circulation field in June-July, 2020 is a typical rainy circulation situation in the ESWC. at 200hPa, the position of the upper jet stream leans to the south and the ESWC is located just south of the jet axis, with strong divergence outflow from the upper layer and strong convergence inflow from the lower layer, which provides favorable dynamic conditions for precipitation. In addition, the Western Pacific Subtropical High (WPSH) obviously extends westward, and the warm and humid airflow in the southwest side of the WPSH is transported to the ESWC, which is conducive to more precipitation in this region. The quantitative water vapor trajectory tracking results calculated by Lagrange method show that: there are 70.5% of the water vapor paths associated with precipitation in the ESWC in June-July, 2020 come from the southern routes such as Bay of Bengal, South China Sea and Arabian Sea, 17.5% from the northern route and 11.9% from the local area. In previous winter, the SST of the equatorial Middle East Pacific and the Indian Ocean was relatively high, the WPSH is obviously strong and westward, resulting in the east wind anomaly in the Bay of Bengal and the South China Sea, which is favorable for the westward water vapor transport in the South China Sea, but unfavorable for the eastward water vapor transport in the Bay of Bengal. Meanwhile, the anomalous anticyclone from the Philippines to the South China Sea makes the south wind anomaly in the northern part of Indo-China Peninsula, which is conducive to the strong northward water vapor transport in this area. These together resulted in more precipitation in the ESWC.

Keywords the East of Southwestern China, Water vapor transport, Water vapor intensity index, Lagrange trajectory model

1 引言

水汽是降水形成的必要条件之一，特别是大范围、持续性的降水除了有利的大气环流场提供动力条件外，还需有充沛的水汽做支撑。不少学者都对我国的水汽输送问题进行了研究。谢义炳和戴武杰（1959）通过对黄淮地区连续降水的个例分析指出该地区夏季降水的水汽主要来自于孟加拉湾和西太平洋。黄荣辉等（1998）对比分析了夏季东亚和印度季风区水汽输送的差别，指出东亚季风区夏季的水汽辐合主要与水汽平流有关，而印度季风区的水汽辐合主要是由风场的辐合造成的。Simmonds et al.（1999）指出我国东南部的水汽主要来自于南海和孟加拉湾，而东北及华北部分地区的水汽主要来自于中纬度西风带。徐祥德等（2003）分析了长江流域旱、涝年整层水汽输送结构，指出长江流域降水偏多年水汽主要来自于孟加拉湾、南海和西太平洋。丁一汇和胡国权（2003）分区域计算了1998年我国大洪水时期的水汽收支，指出南海季风的爆发与我国东部地区强降水的水汽收支紧密相关。何金海等（2005）研究发现西北地区降水偏多年的水汽主要来自于北冰洋、孟加拉湾和西太平洋。苗长明等（2015）分析了江南南部初夏降水与水汽输送的联系，指出该区域初夏降水的水汽输送推进时间与夏季风前沿推进时间一致，其水汽源地主要是青藏高原南侧和澳大利亚北部到

印度洋和阿拉伯海南部。叶敏和封国林(2015)定义了一系列指标,对长江中下游地区夏季降水的水汽路径进行了客观定量化的研究。邹梦等(2017)直接从水汽输送异常入手,分析了热带印度洋-西太平洋水汽输送异常的前两个模态,指出第一模态对应长江中下游地区降水偏多,这种水汽输送异常可能与前冬 ENSO 有关;第二模态对应华南降水偏多,这种水汽输送异常主要与同期热带印度洋偶极子有关。杨柳等(2018)对比分析了我国东部季风区不同雨型水汽输送的差异,指出北方型主要受亚洲季风水汽影响,中间型和长江型主要受太平洋水汽影响,华南型主要受印度洋、太平洋和南海水汽共同影响。Tang et al. (2017)则对北京 190 次降水进行分析,发现降水的海洋水汽来源受到夏季风强度的深刻影响,夏季风强度对水汽来源有调制作用,不同源地的水汽输送强度与夏季风变化之间的关系需要进一步分析。

以上关于水汽通道的相关研究大多都是采用的欧拉方法,它可以确定一个固定区域内水汽等要素随时间的变化,以分析不同区域降水的水汽来源,这对于揭示降水与区域水汽平衡的关系具有重要意义。但是欧拉方法对水汽输送的描述只是定性的,无法定量地刻画具体的水汽源地和水汽路径(江志红等, 2011)。需要特别指出的是,严格意义上的水汽输送应是水分子的运动。由于水汽有相变(如降水,蒸发,升华等),大气水分不具有守恒示踪性,很难追踪单个水汽分子的运动路径。因此,上述所讨论的水汽输送实际上是和环流形势相关联的大尺度水汽场的平流、辐合和辐散运动,所提及的“水汽通道”主要反映的是相关地区的大气水分和环流形势(李永华等, 2010)。而除了欧拉方法外,另一种方法——拉格朗日法可以通过确定空气块在不同时间的位置,定量地刻画出具体的水汽路径和水汽源地,以克服欧拉方法的不足(杨浩等, 2014)。由于拉格朗日方法的这个优点,越来越多的国内外学者开始采用该方法来定量地分析不同区域降水的水汽路径和水汽源地。江志红等(2013)利用拉格朗日轨迹模式,对江淮梅雨异常年水汽输送的差异进行了定量的分析。Sun and Wang (2015)定量分析了 2000-2009 期间华南、长江中下游和华北地区夏季和冬季有降水 and 无降水两种情况下大陆、西太平洋和印度洋的水汽贡献。陈红专等(2019)利用混合单粒子拉格朗日综合轨迹(HYSPLIT)模型分阶段对 2017 年 6-7 月湖南省的持续性暴雨过程的水汽输送和水汽收支特征进行了分析。周玉淑等(2019)利用 HYSPLIT 模型对比分析了发生在四川盆地的两次暴雨过程的水汽源地和通道。Chu et al. (2017, 2020, 2019)利用 HYSPLIT 模型分析了我国华南前汛期降水的水汽来源以及我国东部不同区域盛夏降水的水汽来源。Dong et al. (2019)利用 FLEXPART 模型分析了梅雨期长江流域水汽输送与青藏高原关键区域的联系。

2020 年 6-7 月西南地区东部总降水量为 572.4mm,较常年偏多 5 成,位于 1961 年以来同期第 1 位。期间,该区域共发生了 7 场区域性暴雨过程。这些区域性暴雨过程首尾间隔时间短、落区重叠、涉及范围广,给人民生命安全带来较大威胁,给经济社会造成较大损失。这样大范围、持续性的暴雨过程必定有源源不断的水汽供应,本文在分析 2020 年 6-7 月西南地区东部降水的大尺度水汽输送特征和水汽收支情况的基础上,利用 HYSPLIT 模型模拟降水时期气团的运动轨迹,确定该时期西南地区东部降水的主要水汽源地和通道,并初步分析引起水汽输送异常的原因,以期加深对西南地区东部水汽输送特征的认识,也为汛期降水预测提供参考。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所用资料主要包括:

(1) 降水资料。由中国气象局国家气象信息中心提供的《中国地面基本气象要素日值数据集(V3.0)》,该数据集包含了中国 2474 个气象站的本站气压、气温、降水量、蒸发量、相对湿度、风向风速、日照时数和 0cm 低温数据,这些数据都经过了严格的质量控制。本文选取 1961-2020 年西南地区东部(27°N-32°N, 105°E-110°E) 118 个气象站点(图 1)的

20 时-20 时（北京时间）的逐日降水量资料进行分析。

图 1 西南地区东部 118 个气象站点分布

Fig.1 The distribution of 118 meteorological stations over the East of Southwestern China (ESWC)

（2）大气环流资料。由欧洲中期天气预报中心（ECMWF）提供的 1979-2020 年 ERA5 逐月再分析资料，要素包括：位势高度、温度、纬向风、经向风、垂直速度和比湿。水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，垂直层次为 1000-1hPa 共 37 层。

（3）轨迹模拟资料。由美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心（NCEP/NCAR）提供的一天 4 次的再分析资料，要素包括：位势高度、温度、纬向风、经向风和垂直速度。水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，垂直层次为 17 层。

（4）海温资料。由美国国家海洋和大气管理局（NOAA）发布的逐月海温资料，空间分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 。

（5）海温指数。由中国气象局国家气候中心提供的新百项指数中的 Niño3.4 区海温指数和热带印度洋全区一致海温模态（Indian Ocean Basin-Wide, IOBW）指数（热带印度洋（ 20°S - 20°N , 40° - 110°E ）区域平均的海温距平）。

文中气候态指 1981-2010 年，距平值均是相对于 1981-2010 年的平均值而言。

2.2 轨迹模式简介

本文水汽轨迹分析采用美国国家海洋和大气管理局的空气资源实验室开发的 HYSPLITv5.0（Draxler and Hess, 1998）模型。HYSPLIT 模型的轨迹模拟方法是通过对质点的移动路径的空间和时间上的位置矢量进行积分，由质点的初始位置和第一猜测位置的平均速率计算得到气块的追踪位置，所以对气块进行后向积分便可知水汽的来源（江志红等, 2011; 周玉淑等, 2019）。

本文中模拟区域选取西南地区东部区域（ 27°N - 32°N , 105°E - 110°E ），水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，垂直方向上选取 500m、1500m、3000m 三个高度层次作为模拟的初始高度。整个模拟空间的轨迹初始点为 27 个，模拟其后向追踪 10 天的三维运动轨迹，每 6 小时输出一组轨迹点的位置，并插值得到相应位置上的物理属性（如温度、高度、气压、相对湿度等），每隔 6 小时所有轨迹初始点重新后向追踪模拟 10 天。对追踪出的大量轨迹进行聚类（Draxler and Hess, 1998），确定最终的轨迹数目。

2.3 水汽通道比湿和水汽通量贡献率的计算

定义：

$$Q_a = \left(\sum_{i=1}^m Q_i / \sum_{j=1}^n Q_j \right) \times 100\% \quad (1)$$

上式中， Q_a 表示该通道的贡献率， Q_i 、 Q_j 是通道上最终位置的比湿或水汽通量， m 表示该通道所包含轨迹数， n 是模拟的轨迹总数。

2.4 水汽通量流函数和势函数的计算

水汽通量的流函数（ ψ ）和势函数（ χ ）计算公式如下：

$$\begin{cases} \nabla^2 \psi = k \cdot \nabla \times \mathbf{Q} \\ -\nabla^2 \chi = \nabla \cdot \mathbf{Q} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_\psi = k \times \nabla \psi \\ \mathbf{Q}_x = -\nabla \chi \end{cases} \quad (3)$$

上式中， k 是常用算子； $\mathbf{Q}$ 是整层大气水汽输送通量（公式 4）； $\mathbf{Q}_x$ 是水汽通量的辐散分量； $\mathbf{Q}_\psi$ 是水汽通量的非辐散分量，具体计算方法参见参考文献丁一汇等（1989）。

2.5 欧拉方法的水汽收支计算

单位边长整层大气水汽输送通量 $\mathbf{Q}$ 的计算公式为：

$$\mathbf{Q} = -\frac{1}{g} \times \int q \mathbf{V} dp \quad (4)$$

上式中， q 为比湿 (kg kg^{-1})， $\mathbf{V}$ 为水平风速矢量 (m s^{-1})， g 为重力加速度，取 9.8 m s^{-2} 。

各方向上水汽通量收支的计算公式为：

$$Q_L = \int \left(-\frac{1}{g} \times \int q V_n dp \right) dl \quad (5)$$

上式中， l 为计算区域的周长， V_n 是风沿区域周线的法向分量。

3 西南地区东部 2020 年 6-7 月降水特征

3.1 空间分布特征

图 2 是西南地区东部 2020 年 6-7 月降水量和降水量距平百分率的空间分布。由图 2a 可知，西南地区东部 2020 年 6-7 月降水总量在 315-1138mm 之间，湖北西部和重庆南部降水量较多，在 600mm 以上，其中湖北建始站降水量最多，达到 1138mm。2020 年 6-7 月降水量在 1000mm 以上的有 1 站（湖北建始），600mm 以上共有 38 站。贵州中部和四川东北部降水量较少，在 500mm 以下。2020 年 6-7 月降水量距平百分率的空间分布（图 2b）主要表现为西南地区东部大部地区降水量较常年偏多，湖北西部、重庆南部和贵州北部降水量较常年偏多明显，其中贵州正安和重庆黔江站降水量偏多 1.5 倍，降水量偏多 1 倍以上的站点有 11 个，仅贵州中部和四川东北部局部降水量较常年略偏少。

图 2 2020 年 6-7 月西南地区东部降水量（a，单位：mm）及降水距平百分率（b，单位：%）的空间分布
Fig.2 Spatial distribution of precipitation (a, units: mm) and percentage of precipitation anomaly (b, units: %) over the ESWC in June and July 2020

3.2 时间变化特征

图 3 是西南地区东部 1961-2020 年 6-7 月区域平均的降水量距平百分率和 2020 年 6-7 月逐日区域平均降水量的变化。2020 年 6-7 月西南地区东部总降水量为 572.4mm，为 1961 年以来同期第 1，较常年偏多 5 成（图 3a）。从逐日降水量的时间序列（图 3b）可见，2020 年 6-7 月西南地区东部降水并不只是集中在某一个局部时间段，而是在整个时间域基本都有降水发生。利用文献（周杰等, 2021）中的方法，根据 2020 年 6-7 月西南地区东部的逐日降水量对 2020 年 6-7 月的区域性暴雨事件进行了识别，共有 7 场区域暴雨过程（图 3b 和表 1），

分别是 6 月 2 日、6 月 17 日、6 月 21-22 日、6 月 27 日、6 月 30 日-7 月 1 日、7 月 16-17 日和 7 月 26 日区域暴雨过程。根据周杰等(2021)的研究,综合指数 ≤ 0.7 为轻度事件, $0.7 < \text{综合指数} \leq 1.72$ 为中度事件, $1.72 < \text{综合指数} \leq 3.63$ 为重度事件, 综合指数 > 3.63 为极端事件。按此划分,“6·2”和“6·17”为轻度暴雨过程,“6·21-22”、“6·27”和“6·30-7·1”为中度暴雨过程,“7·16-17”和“7·26”为重度暴雨过程,7 场区域暴雨过程总体体现出首尾间隔时间短、落区重叠、涉及范围广、致灾风险大的特征。

图 3 西南地区东部 1961-2020 年 6-7 月降水距平百分率(a, 单位: %) 及 2020 年 6-7 月逐日平均降水量(b, 单位: mm) 变化(图 b 中红色圆点所在日期代表区域暴雨过程的发生日期)

Fig.3 Time series of average percentage of precipitation anomaly in June and July during 1961-2020 (a, units: %) and daily average precipitation from June to July in 2020 (b, units: mm) over the ESWC (The date of the red dot in (b) represents the occurrence date of the regional heavy rainfall events)

表 1 2020 年 6-7 月西南地区东部的区域性暴雨事件
Table 1 the regional heavy rainfall events over the ESWC from June to July 2020

序号	时间	极端强度 (mm)	累积强度 (mm)	累积面积 (10^4 km^2)	最大面积 (10^4 km^2)	持续时 间(d)	综合 指数	综合强度
1	6/2	87.7	138.0	9.41	9.41	1	0.08	轻度
2	6/17	109.0	257.3	8.5	8.5	1	0.18	轻度
3	6/21-22	149.3	427.4	12.46	8.13	2	0.83	中度
4	6/27	124.5	1093.1	18.25	18.25	1	1.39	中度
5	6/30-7/1	205.1	460.1	10.03	5.74	2	0.88	中度
6	7/16-17	191.4	1672.9	27.62	18.23	2	2.94	重度
7	7/26	262.2	1096.6	22.33	22.33	1	2.32	重度

注：表 1 中综合指数和综合强度的定义详见周杰等(2021)的研究。
Note: For the definition of comprehensive index and comprehensive strength in Table 1, please refer to Zhou et al. (2021).

4 2020 年 6-7 月大气环流及水汽输送特征

4.1 主要大气环流特征

大气环流异常是导致降水异常的直接原因。图 4 给出了 2020 年 6-7 月对流层高、中、低层的大气环流形势。对流层高层 200hPa 上(图 4a), 东亚至西太平洋(50°E-180°E)上空 32.5°N-40°N 区域纬向风强度明显偏强位置偏南, 副热带西风高空急流偏强偏南。急流最大中心有 3 个, 分别位于 70°E-90°E、95°E-110°E 和 150°E-170°E 附近, 其中 95°E-110°E 附近的急流中心靠近西南地区东部。对流层中层 500hPa 上, 西太平洋副热带高压较常年明显偏西偏强(图 4b), 使得副高西南侧的西南气流也明显偏西, 可到达我国西南地区东部, 为该区域降水提供了充沛的水汽来源。与此同时, 在 500hPa 中高纬地区, 乌拉尔山高压脊异常发展, 冷空气从乌拉尔山高压脊前部不断向南输送, 最后与副高西南侧的暖湿气流交汇于包括西南地区东部在内的长江流域, 形成范围大、持续时间长的暴雨。对流层低层 850hPa 上, 从中南半岛至我国西南地区东部, 存在一支与中层西伸的副高相对应的西南低空急流(图 4c), 为西南地区东部降水提供充沛的水汽条件。与此同时, 高层强辐散流出, 低层强辐合

流入,配合从低层到高层的深厚的强烈的垂直运动(图 4d),为降水提供了良好的动力条件。

总之,2020 年 6-7 月对流层高、中、低层环流场的配置是典型梅雨的环流形势。200hPa 上急流明显存在,长江流域正好位于急流轴以南地区,高层强辐散流出,对应低层强辐合流入。高低空急流的耦合作用,进一步使得低空西南风加强,低层辐合加强,进而垂直运动加强,形成一个从高层到低层的正反馈作用,使得降水过程维持。梅雨通常指发生在长江中下游地区(陶诗言等, 1958, 1988; 赵俊虎等, 2018),但 2020 年 6-7 月西南地区东部也明显多雨,主要因副高的明显偏西,使得副高西南侧的暖湿气流能够到达西南地区东部。

图 4 2020 年 6-7 月平均大气环流形势。(a) 200hPa 纬向风距平(单位: m s^{-1} ; 绿线为气候态 30m s^{-1} 等值线, 蓝线为 2020 年 6-7 月平均 30m s^{-1} 等值线); (b) 500hPa 位势高度场距平(阴影, 单位: gpm)及风场距平(矢量, 单位: m s^{-1}) (绿线为气候态 5880 线, 蓝线为 2020 年 6-7 月平均 5880 线); (c) 850hPa 风场距平(矢量, 单位: m s^{-1})和垂直速度场(阴影, 单位: Pa s^{-1}) (d) 区域平均的垂直速度高度-时间剖面图(单位: 10^{-1}Pa s^{-1}) ((a) - (c) 中黑色矩形框代表西南地区东部位置; (c) 中灰色阴影分别代表 850hPa 地形)

Fig.4 Characteristics of average atmospheric circulation in June-July 2020. (a) 200hPa zonal wind anomaly (units: m s^{-1} ; the green line is 30m s^{-1} isoline in climatological mean; The blue line is an average 30m s^{-1} isoline in June to July, 2020); (b) 500hPa geopotential height field anomaly (shadow, units: gpm) and wind field anomaly (vector, units: m s^{-1}) (The green line is the 5880 isoline in climatological mean, and the blue line is the average 5880 isoline in June and July, 2020); (c) wind field anomaly (vector, units: m s^{-1}) and vertical velocity field (shadow, units: Pa s^{-1}) at 850hPa; (d) regional average of vertical velocity height-time profile (units: 10^{-1}Pa s^{-1}) (The black rectangular frame in (a)-(c) shows the location of the ESWC; The shaded gray areas in (c) represent 850hPa terrain.)

4.2 2020 年 6-7 月水汽输送特征

大范围、持续性的降水除了有利的环流场提供动力条件外,还需要有源源不断的水汽输送。图 5 给出了 2020 年 6-7 月平均整层的水汽输送特征。由图 5a 可知,2020 年 6-7 月水汽输送主要有 3 支:一支来自于印度洋的阿拉伯海和孟加拉湾向东的水汽输送;一支来自于热带西太平洋向西的水汽输送;还有一支来自于我国南海向东北方向的水汽输送,而北方的水汽输送相较南方海洋而言明显较小,这与李永华等(2010)研究结果基本一致。2020 年 6-7 月来自于阿拉伯海和孟加拉湾的向东的水汽输送较常年明显偏弱,来自于热带西太平洋和我国南海地区向西的水汽输送和来自于中南半岛北部的向东北方向的水汽输送明显偏强,总体水汽输送较常年偏西偏强,可输送至我国西南地区东部(图 5b),这有利于西南地区东部降水偏多(李永华等, 2010)。2020 年 6-7 月水汽输送明显体现出西太平洋副高偏西的特征:副高南部向西的水汽输送较常年明显西伸;随着副高西北侧的转向气流,副高南部向西的水汽输送在我国海南岛附近向东北转向,源源不断地向西南地区东部输送水汽,并在西南地区东部形成明显的水汽辐合(图 5c)。

另外,从 2020 年 6-7 月西南地区东部各边界和区域的水汽收支情况(表 2)也能看出,2020 年 6-7 月西南地区东部有水汽净流入,流入量为 $359.00 \times 10^5 \text{ kg s}^{-1}$,较常年($225.36 \times 10^5 \text{ kg s}^{-1}$)偏多 $133.64 \times 10^5 \text{ kg s}^{-1}$ 。西南地区东部的水汽净流入主要是南边界水汽流入较常年明显增多,北边界水汽较常年流出偏少,使得南北方向上的水汽流入量较常年明显增多;而在东、西方向上,尽管西边界水汽流入量较常年偏多,但是东边界的水汽流出量也明显较常年偏多,东西方向上以水汽流出为主。

水汽通量的流函数和势函数也能表征水汽的输送特征,水汽流函数表示水汽的输送方向,势函数则能解释高水汽含量维持的状况(丁一汇和胡国权, 2003; 江志红等, 2011; 陈红专等, 2019)。图 6a 是 2020 年 6-7 月平均水汽输送的流函数及非辐散分量的空间分布,由图

可知，在赤道印度洋、西北太平洋和西北大西洋分别存在一个大值中心。在赤道以南地区存在着一支向西的水汽输送，该支水汽一直向西输送到非洲中东岸，并在索马里附近越过赤道向东北方向转向，经过阿拉伯海、孟加拉湾、中南半岛和南海等地输送至我国长江流域。另外，在赤道以北的太平洋地区也存在一支向西的水汽输送，与赤道以南的水汽输送略有不同的是，该支水汽在赤道西太平洋和我国南海附近向东北转向流入我国长江流域。图 6b 是 2020 年 6-7 月平均水汽输送的势函数及辐散分量的空间分布。由图 6b 可知，势函数的负值中心主要位于我国长江流域，正值中心主要位于大西洋，表明我国长江流域是全球最明显的水汽汇区，大西洋是全球的水汽源区。从势函数的辐散分量中也可以看出，我国西南地区东部的水汽最主要的来源为南非东面印度洋的水汽经过阿拉伯海、孟加拉湾和我国南海汇入。

图 5 2020 年 6-7 月平均整层水汽异常情况。(a) 水汽输送矢量场 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), (b) 水汽输送异常场 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), (c) 水汽通量散度异常场 (单位: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (图中黑色矩形框代表西南地区东部的位置)

Fig.5 Anomalous water vapor integrated from the surface to 300hPa in June-July 2020. (a) Water vapor transport (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), (b) anomalous water vapor transport (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), (c) anomalous divergence (units: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (The black rectangular frame shows the location of the ESWC)

表 2 2020 年 6-7 月西南地区东部各边界和区域水汽收支 (单位: 10^5kg s^{-1})

Table 2 the water vapor budget through the four boundaries of the ESWC and the regional net water vapor budget (units: 10^5kg s^{-1}) in June-July 2020

	西边界	东边界	南边界	北边界	区域收支
2020 年	313.09	-849.57	1030.35	-134.87	359.00
1981-2010 年	184.32	-450.31	676.16	-184.81	225.36
平均					

图 6 2020 年 6-7 月平均整层水汽流函数 ((a) 中阴影, 单位 10^6kg s^{-1}) 及非辐散分量 ((a) 中矢量, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 和势函数 ((b) 中阴影, 单位: 10^6kg s^{-1}) 及辐散分量 ((b) 中矢量, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Fig.6 the distribution of integrated stream function (shadow in (a), units: 10^6kg s^{-1}) and its nondivergent component (vector in (a), units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and potential function (shadow in (b), units: 10^6kg s^{-1}) and its divergent component (vector in (b), units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) of the water vapor transport in June-July 2020

以上采用欧拉方法计算了水汽输送场和水汽通量流函数和势函数, 定性了解了水汽输送路径以及水汽的源、汇区; 同时也从西南地区东部区域和各边界的水汽收支情况定量地分析了该区域边界上的水汽来向, 但是水汽到底是从哪条路径由海洋上空输送到西南地区东部, 不同海洋输送的水汽占总水汽输送的比例又是多少? 下面采用气团拉格朗日轨迹追踪方法进一步分析。

HYSPLIT 是基于拉格朗日方法开发的气团轨迹追踪模型, 它能跟踪气团的轨迹运动, 可以很好地反映气团在运动过程中的三维变化, 追踪水汽来源。下面采用 HYSPLIT 模型模拟了 2020 年 6 月 1 日-7 月 31 日逐日水汽后向轨迹, 分析不同通道的水汽输送特征。

通过对 2020 年 6 月 1 日-7 月 31 日逐日水汽后向轨迹模拟共得到 6507 条轨迹, 然后将这些轨迹进行聚类, 确定最终的轨迹数目。由图 7a 可知, 空间方差增长率在聚类数目小于 6 以后迅速增长, 故确定最终的轨迹通道为 6 条。图 7b 给出了该时段西南地区东部的 6 条水汽通道分别是: ①阿拉伯海通道, 水汽主要来源于印度洋阿拉伯海, 经过孟加拉湾——緬

甸中部——我国云南一带进入我国西南地区东部；②孟加拉湾通道，水汽主要来自于孟加拉湾，经中南半岛北部——我国云南一带进入我国西南地区东部；③南海通道，水汽主要来自于我国南海地区，经南海南部——海南——广西——云南一带进入我国西南地区东部；④局地通道，水汽主要来自于与西南地区东部邻近的两湖地区和江西等地；水汽通道⑤和⑥都来自于北方，⑤是西北水汽通道 1，水汽主要来自于西西伯利亚，经哈萨克斯坦到达我国新疆，再由青海、四川进入我国西南地区东部；⑥西北水汽通道 2，水汽主要来自于地中海，自地中海一直向东进入我国新疆地区，同样再由青海、四川等地进入我国西南地区东部。

从水汽通道的高度变化（图 7c）可知，来自于阿拉伯海、孟加拉湾、南海和局地的水汽通道的高度大都在 900hPa 以下，在进入西南地区东部之前都有一定程度的上升，特别是阿拉伯海和孟加拉湾通道由于要经过云贵高原，上升更加突出。来自于阿拉伯海和孟加拉湾的水汽最终到达西南地区东部 700hPa 高度，来自于南海和局地的水汽最终到达 850hPa 高度。来自于西北 1 的水汽通道的高度变化不大，基本维持在 700hPa 附近；而来自于西北 2 的水汽通道高度位于对流层中层 500hPa 附近，在进入西南地区东部高度明显下降，最终在西南地区上空 700hPa 附近与来自于阿拉伯海和孟加拉湾的水汽汇合。从水汽通量的变化（图 7d）可知，来自于低纬海洋通道（阿拉伯海通道、孟加拉湾通道和南海通道）的水汽通量明显大于来自于高纬内陆通道（西北通道 1 和西北通道 2）的水汽通量，来自于局地的水汽通量介于二者之间。阿拉伯海通道的水汽通量在海洋上时有一个明显增加的过程，而后进入陆地，翻越云贵高原后又略有减小。孟加拉湾的水汽通道与阿拉伯海类似，在海洋上时有短暂增大，进入陆地后又有一个减小过程，后一直维持到西南地区东部。南海的水汽通道同样与阿拉伯海类似，在水汽在经过南海地区时，水汽通量不断增大，进入陆地后略有减小。局地水汽通量随时间的变化不大，基本保持不变。而来自于北方的西北通道 1 和西北通道 2 的水汽通量相较于其他通道明显小得多，且基本上随时间不变。

表 3 给出了西南地区东部不同水汽通道的各个物理量的贡献率，由该表可知，在 6 个水汽通道中，来自孟加拉湾通道的轨迹数目（1900 条）最多，其次是阿拉伯海通道（1398 条）和南海通道（1287 条），西北 1 通道轨迹数（524 条）最少。来自于南方的水汽路径占总路径的 70.5%，北方路径占总路径的 17.6%，局地路径占 11.9%。同样也是孟加拉湾通道的比湿贡献率（30.36%）最大，其次是南海通道（24.37%）和阿拉伯海通道（21.89%）。就水汽通量贡献率而言，孟加拉湾通道的水汽通量贡献率仍然最大，高达 31.13%，阿拉伯海通道以 30.41% 的贡献率紧随其后，南海通道贡献率为 20.89%，位列第三。局地的水汽贡献和水汽通量贡献都小于 3 条海洋通道，而来自于北方的两条通道的水汽贡献和水汽通量的贡献均最小。综合 6 个通道看，2020 年 6-7 月西南地区东部的水汽主要来自于孟加拉湾，其次是南海和阿拉伯海。另外从假相当位温可以看出，来自于海洋的水汽（孟加拉湾、南海和阿拉伯海）都具有暖湿的特点（假相当位温大），而来自于北方的水汽则具有干冷的特点（假相当位温小）。

图 7 2020 年 6 月 1 日-7 月 31 日水汽轨迹聚类空间方差增长率（a，单位：%）、水汽通道空间分布及占比（b，单位：%），水汽通道的高度变化（c，单位：hPa）以及水汽通量的变化（d，单位： $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）

Fig.7 change in TVS (total spatial variance) as clusters combined (a, units: %), the spatial distribution of water vapor passages (b, units: %), change in height of vapor passages (c, units: hPa), and change in water vapor flux of vapor passages (d, units: $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) from June 1 to July 31, 2020

表 3 各水汽通道轨迹总数、比湿和水汽通量贡献率以及假相当位温

Table 3 the total number of trajectories, contribution of specific humidity and water vapor flux from vapor passages and potential pseudo-equivalent temperature

物理量	阿拉伯海通道	孟加拉湾通道	南海通道	局地	西北 1	西北 2
轨迹总数/条	1398	1900	1287	775	524	623
比湿贡献率/%	21.89	30.36	24.37	13.45	5.47	4.45
水汽通量贡献率/%	30.41	31.13	20.89	9.57	4.55	3.45
假相当位温/K	352.11	350.40	351.70	347.35	339.39	333.65

4.3 水汽强度分析

从前面的分析可知,无论是采用欧拉方法计算的定性的整层水汽输送来源,还是采用基于拉格朗日方法计算的定量的水汽输送轨迹,总体都体现出 2020 年 6-7 月西南地区东部降水的水汽主要来自于孟加拉湾、南海和阿拉伯海等南方洋面的暖湿气流,而北方的干冷空气也有水汽的输送,但相对于南方海洋的水汽输送小得多。鉴于此,本节选择西南地区东部水汽主要来源的南方海洋四个关键区(图 8)来定义水汽强度指标。关键区域 1(阿拉伯海)范围为 0-20°N、50-80°E,区域 2(孟加拉湾)范围为 0-20°N、80-100°E,区域 3(中南半岛北部)范围为 15-25°N、100-110°E,区域 4(南海)范围为 5-20°N、110-120°E。考虑到水汽通量是一个矢量,具有纬向和经向特征,因此每个关键区域定义两个水汽强度指标:①纬向水汽强度指标是指该区域内纬向水汽通量的平均值;②经向水汽强度指标是指该区域内经向水汽通量的平均值。由此四个关键区共定义了 8 个水汽强度指标,即:阿拉伯海纬向水汽强度、阿拉伯海经向水汽强度、孟加拉湾纬向水汽强度、孟加拉湾经向水汽强度、中南半岛北部纬向水汽强度、中南半岛北部经向水汽强度、南海纬向水汽强度和南海经向水汽强度。

图 8 1979-2020 年 6-7 月平均整层水汽输送的空间分布(单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) (图中黑色矩形框分别为水汽强度指标选取的 4 个区域,从西到东依次是:区域 1 (0-20°N, 50-80°E), 区域 2 (0-20°N, 80-100°E), 区域 3 (15-25°N, 100-110°E), 区域 4 (5-20°N, 110-120°E))

Fig.8 Spatial Distribution of Average Water Vapor Transport in June-July from 1979 to 2020 (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) (The black rectangular boxes in the figure are the four areas selected by the water vapor intensity index, which are in turn from west to east: zone 1 (0-20°N, 50-80°E), zone 2 (0-20°N, 80-100°E), zone 3 (15-25°N, 100-110°E), zone 4 (5-20°N, 110-120°E))

表 4 各关键区水汽强度指标和风场强度指标与西南地区东部 6-7 月降水量的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between water vapor intensity index (wind field intensity index) in key areas and precipitation in the ESWC in June and July

水汽指标	水汽场指标与降水 相关系数	风场指标	风场指标与降水相 关系数
阿拉伯海纬向水汽强度	0.04	阿拉伯海纬向风强度	-0.18
阿拉伯海经向水汽强度	-0.08	阿拉伯海经向风强度	-0.17
孟加拉湾纬向水汽强度	-0.58**	孟加拉湾纬向风强度	-0.56**
孟加拉湾经向水汽强度	0.06	孟加拉湾经向风强度	0.01
中南半岛北部纬向水汽强度	-0.01	中南半岛北部纬向风强度	-0.11
中南半岛北部经向水汽强度	0.64**	中南半岛北部经向风强度	0.63**
南海纬向水汽强度	-0.58**	南海纬向风强度	-0.57**
南海经向水汽强度	-0.19	南海经向风强度	0.02

注: **表示通过 0.01 的显著性检验

Note: ** means passing the significance test of 0.01.

表4给出了各关键区水汽强度指标与西南地区东部6-7月降水量的相关系数,由此可知,在以上定义的8个水汽强度指标中,有3个指标与西南地区东部6-7月降水量有显著的相关关系:孟加拉湾纬向水汽强度指标、南海纬向水汽强度指标与降水量呈显著负相关,中南半岛北部经向水汽强度指标与降水呈显著正相关。这表明当孟加拉湾纬向水汽强度为负异常(向东的水汽输送减弱)、中南半岛北部经向水汽强度为正异常(向北的水汽输送增强)、南海纬向水汽强度为负异常(向西的水汽输送增强)时,西南地区东部6-7月降水量偏多,这种水汽输送的特征正好与2020年6-7月的水汽输送特征(图5b)一致,明显体现出副高西伸的水汽输送特征。由此可见,以上定义的水汽强度指标具有较好的指示意义。

表4同时也给出了四个关键区的纬向风、经向风强度指标(类似水汽强度指标定义)与西南地区东部6-7月降水量的相关系数。由表4可知,孟加拉湾纬向风强度、南海纬向风强度与降水量呈显著负相关,中南半岛北部经向风强度与降水量呈显著正相关。表明当孟加拉湾西风减弱、南海东风和中南半岛北部地区南风增强时,西南地区东部6-7月降水容易偏多,这同样也体现出西太平洋副高明显西伸的风场特征,风场和水汽场都体现出了一致的特征。

4.4 水汽输送异常的可能原因

图9(a-c)给出了与西南地区东部6-7月降水量显著相关的3个水汽强度指标与前冬海温的相关分布。由该图可知,孟加拉湾纬向水汽强度指标主要与前冬赤道中东太平洋海温和赤道东印度洋海温呈显著负相关(图9a),中南半岛北部经向水汽强度指标主要与前冬赤道中东太平洋和北印度洋呈现显著正相关(图9b),南海纬向水汽强度指标主要与前冬赤道中东太平洋和北印度洋海温呈显著负相关(图9c)。2019/2020年冬季印度洋和赤道中东太平洋海温均较常年偏高(图9d),有利中南半岛北部地区向北输送的水汽偏强,南海地区向西输送的水汽偏强,则中南半岛北部经向水汽强度偏强,南海纬向水汽强度偏弱,从而造成2020年6-7月西南地区东部降水偏多。图9(e-g)给出的是与西南地区东部6-7月降水量显著相关的3个水汽强度指标与同年5-7月海温的相关分布。由该图可知,5-7月,3个水汽强度指标主要与印度洋北部海温呈现显著的相关,而与赤道中东太平洋海温相关不再显著。孟加拉湾纬向水汽强度指标及南海纬向水汽强度指标与印度洋北部海温仍呈显著负相关(图9e、图9g),中南半岛北部经向水汽强度指标与其仍呈显著正相关(图9f)。2020年5-7月印度洋北部海温持续偏高(图9h),同样也有利中南半岛北部地区向北输送的水汽偏强,南海地区向西输送的水汽偏强,使得2020年6-7月西南地区东部降水偏多。

除此之外,我们也计算了3个水汽强度指标分别与Niño3.4指数和IOBW指数的超前滞后相关系数,以及它们与IOBW去掉冬季平均的Niño3.4海温的超前滞后的偏相关系数(图10)。由该图可知,Niño3.4指数主要在前冬和初春(1-3月)与3个水汽强度呈现显著相关,在5-7月,相关则不再显著。3个水汽强度指标与IOBW的超前滞后相关系数曲线表现出与Niño3.4指数相似的特征:1-3月显著相关,而5-7月相关不显著。而它们与IOBW(去掉冬季平均的Niño3.4)的偏相关系数则体现出明显不同的特征:1-3月相关不显著,5-7月(尤其是6-7月)呈显著相关。

由于赤道中东太平洋海温本身与印度洋海温存在相关关系,所以3个水汽强度指标与IOBW指数的相关系数曲线同它们与Niño3.4指数相关曲线的变化特征相似:在1-3月显著相关,5-7月则相关不显著;而当IOBW指数去掉前冬Niño3.4的影响后,则主要体现在5-7月(尤其是6-7月)显著相关。这些表明赤道中东太平洋海温主要在1-3月影响3个水汽强度指标,而印度洋海温则主要在5-7月(尤其是6-7月)影响它们,也就是印度洋在春夏季发挥了电容器的效应,传递了冬季赤道中东太平洋的影响(Xie et al., 2009, 2016)。通常,在El Niño发展年的秋冬季,东亚副热带地区会通过Rossby波遥相关作用在菲律宾附

近激发异常反气旋，通过该反气旋影响东亚气候 (Zhang et al., 1999; Wang and Zhang, 2002)。而在 El Niño 衰减年的夏季，由于赤道中东太平洋异常暖水已经减弱，此时副高偏西、偏强以及菲律宾附近异常反气旋环流的维持多是印度洋海温滞后响应的结果 (Xie et al., 2009, 2016; 袁媛等, 2017)。

2019/2020 年冬季，赤道中东太平洋海温较常年稍偏高，呈现一个弱 El Niño 状态。在 2020 年 5-7 月，印度洋海温表现出持续偏暖的特征，受此影响，西太副高明显偏西、偏强，赤道中西太平洋至热带印度洋是东风距平，有利于南海地区向西的水汽偏强，不利于孟加拉湾地区向东的水汽输送；同时，菲律宾至我国南海附近的反气旋维持，有利于中南半岛北部地区向北的水汽输送偏强，造成 2020 年 6-7 月西南地区东部降水偏多。

图 9 不同水汽强度指标 ((a)、(e) 孟加拉湾纬向水汽强度指标，(b)、(f) 中南半岛北部经向水汽强度指标，(c)、(g) 南海纬向水汽强度指标) 与前冬 ((a) - (c)) 和 5-7 月 ((e) - (g)) SST 的相关分布 (图中深、浅阴影区分别代表通过 0.01 和 0.05 的显著性检验) 以及 2019/2020 年冬季 (d) 和 2020 年 5-7 月 (h) SSTA 的空间分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.9 Correlation distribution between different water vapor intensity indexes ((a),(e) is Bay of Bengal meridional water vapor intensity index; (b),(f) is North Indochina zonal water vapor intensity index; (c),(g) is South China Sea zonal water vapor intensity index) and SST in previous winter ((a)-(c)) and in MJJ ((e)-(g)) (The dark and light shaded areas represent passing the significance test of 0.01 and 0.05 respectively) and spatial distribution of SSTA in winter of 2019/2020 (d) and in MJJ of 2020 (h) (units: $^{\circ}\text{C}$)

图 10 不同水汽强度指标与 Niño3.4、IOBW 和 IOBW (去掉冬季平均的 Niño3.4) 的超前滞后相关系数曲线图 ((a) 孟加拉湾纬向水汽强度指标，(b) 中南半岛北部经向水汽强度指标，(c) 南海纬向水汽强度指标，图中灰色虚线为 0.05 显著性检验线)

Fig.10 Lead-lag correlation coefficient between different water vapor intensity indexes and Niño3.4, IOBW and IOBW (excluding the average Niño3.4 in winter) ((a) is Bay of Bengal meridional water vapor intensity index; (b) is North Indochina zonal water vapor intensity index; (c) is South China Sea zonal water vapor intensity index. The gray dotted line is the 0.05 significance test line)

为了进一步印证上述的分析结果，计算去趋势后的前冬 Niño3.4 区海温指数和 5-7 月 IOBW 指数分别与 6-7 月平均的 500hPa 位势高度场和 850hPa 风场的回归，结果如图 11 和图 12 所示。由图 11 可知，Niño3.4 区海温指数和 IOBW 指数回归的 6-7 月 500hPa 高度场上，热带地区为显著的正高度距平，尤其是西太平洋地区，表明西太平洋副高明显偏西、偏强 (图 11a, b)。2 个指数在回归的 850hPa 风场上也表现出一致的特征：孟加拉湾和南海地区为东风距平 (图 12a, b)，有利于南海地区向西的水汽偏强，不利于孟加拉湾地区向东的水汽输送；与此同时，菲律宾至我国南海附近的反气旋维持 (图 12a, b)，使得中南半岛北部地区为偏南风距平，有利于中南半岛北部地区向北的水汽输送偏强，造成 2020 年 6-7 月西南地区东部降水偏多。

图 11 前冬 Niño3.4 区海温指数 (a) 和 5-7 月 IOBW 指数 (b) 与 6-7 月平均的 500hPa 位势高度场的回归 (图中深浅阴影区分别代表通过 0.01 和 0.05 的 F 检验的区域，图中黄色矩形框为西南地区东部位置)

Fig.11 Regression of the average geopotential height field of 500hPa in June-July using the Niño3.4 SST index in previous winter (a) and IOBW index in MJJ (b) (The shaded areas represent the areas that have passed the F test of 0.01 and 0.05 respectively, and the yellow rectangular box is the location of the ESWC)

图 12 前冬 Niño3.4 区海温指数 (a) 和 5-7 月 IOBW 指数 (b) 与 6-7 月平均的 850hPa 风场的回归 (图中深浅阴影区分别代表通过 0.01 和 0.05 的 F 检验的区域, 图中黄色矩形框为西南地区东部位置)

Fig.12 Regression of the average wind field of 850hPa in June-July using the Niño3.4 SST index in previous winter (a) and IOBW index in MJJ (b) (The shaded areas represent the areas that have passed the F test of 0.01 and 0.05 respectively, and the yellow rectangular box is the location of the ESWC)

5 结论与讨论

通过对 2020 年 6-7 月西南地区东部降水量异常偏多及其水汽输送特征的分析, 得出如下主要结论:

(1) 2020 年 6-7 月西南地区东部总降水量为 572.4mm, 较常年显著偏多 5 成, 位于 1961 年以来第 1 位。除贵州中部和四川东北部的局部地区降水较常年偏少外, 其余地区降水均较常年偏多。降水大值区主要位于湖北西部、重庆南部和贵州北部。整个 6-7 月, 西南地区东部共发生 7 场区域性暴雨过程, 这些暴雨过程首尾间隔时间短、落区重叠、涉及范围广、致灾风险大。

(2) 2020 年 6-7 月对流层高、中、低层环流场的配置是一个西南地区东部典型多雨的环流形势, 该区域正好位于 200hPa 急流轴以南地区, 同时西太平洋副高明显西伸, 副高西南侧的暖湿气流能够到达西南地区东部, 是该区域降水偏多的主要原因。

(3) 采用采用拉格朗日方法计算的定量的水汽轨迹追踪结果表明 2020 年 6-7 月西南地区东部降水的水汽路径 70.5%来自于孟加拉湾、南海和阿拉伯海等南方路径, 17.5%来自于北方路径, 11.9%来自于局地。就南方海洋的通道而言, 孟加拉湾通道的比湿和水汽通量贡献率都是最大的, 分别为 30.36%和 31.13%。南海通道的比湿贡献率 (21.89%) 较阿拉伯海通道的 (24.37%) 略大, 阿拉伯海通道的水汽通量贡献率 (30.41%) 较南海通道的 (20.89%) 大。

(4) 前冬赤道中东太平洋海温偏高和热带印度洋全区海温偏高, 西太平洋副高明显偏西、偏强, 孟加拉湾和南海地区为东风距平, 有利于南海地区向西的水汽偏强, 不利于孟加拉湾地区向东的水汽输送; 与此同时, 菲律宾至我国南海附近为异常反气旋, 使得中南半岛北部地区为偏南风距平, 有利于中南半岛北部地区向北的水汽输送偏强, 共同造成 2020 年 6-7 月西南地区东部降水偏多。

本文分析了 2020 年 6-7 月西南地区东部降水的水汽输送特征, 定义了关键区水汽强度指标, 初步分析了水汽强度与海温的关系, 今后需从气候态的角度或更多的典型降水异常年份入手, 对其他外强迫因子对西南地区东部水汽输送及其降水的影响机制作进一步的分析。

参考文献 (References)

- 陈红专, 叶成志, 陈静静, 等. 2019. 2017年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J]. 气象, 45(9): 1213–1226.
- Chen Hongzhan, Ye Chengzhi, Chen Jingjing, et al. 2019. Analysis of water vapor transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 45(9): 1213–1226
- Chu Q C, Wang Q G, Feng G L. 2017. Determination of the major moisture sources of cumulative effect of torrential rain events during the preflood season over South China using a Lagrangian particle model [J]. J. Geophys. Res., 122: 8369–8382.
- Chu Q C, Wang Q G, Feng G L. 2020. The roles of moisture transports in intraseasonal precipitation during the preflood season over South China [J]. Int. J. Climatol., 40(4): 2239–2252.
- Chu Q C, Zhi R, Wang Q G, et al. 2019. Roles of moisture sources and transport in precipitation variabilities during boreal summer over East China [J]. Climate Dyn., 53: 5437–5457, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04877-z>.
- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究[J]. 气象学报, 61(2): 129–145. Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A

- study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 61(2): 129–145.
- 丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 293. Ding Yihui. 1989. Diagnostic analysis method in synoptic dynamics [M]. Beijing: China Science Press, 293 (in Chinese).
- Dong L L, Xu X D, Zhao T L, et al. 2019. Linkage between moisture transport over the Yangtze River Basin and a critical area of the Tibetan Plateau during the Meiyu [J]. *Climate Dyn.*, 53: 2643–2662. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04648-w>.
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition [J]. *Australian Meteorological Magazine*, 47: 295–308.
- 何金海, 刘芸芸, 常越. 2005. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析[J]. *干旱气象*, 23(1): 10–16. He Jinhai, Liu Yunyun, Chang Yue. 2005. Analysis of summer precipitation anomaly and feature of water vapor transport and circulation in Northwest China [J]. *Arid Meteorology (in Chinese)*, 23(1): 10–16.
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J]. *大气科学*, 22(4): 460–469. Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22(4): 460–469.
- 江志红, 梁卓然, 刘征宇, 等. 2011. 2007年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J]. *大气科学*, 35(2): 361–371. Jiang Zhihong, Liang Zhuoran, Liu Zhengyu, et al. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River Basin in 2007 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(2): 361–371.
- 江志红, 任伟, 刘征宇, 等. 2013. 基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析[J]. *气象学报*, 71(2): 295–304. Jiang Zhihong, Ren Wei, Liu Zhengyu, et al. 2013. Analysis of water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze-Huaihe River valley using the Lagrangian method [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 71(2): 295–304.
- 李永华, 徐海明, 高阳华, 等. 2010. 西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征[J]. *气象学报*, 68(6): 932–943. Li Yonghua, Xu Haiming, Gao Yanghua, et al. 2010. The characteristics of moisture transport associated with drought/flood in summer over the east of the southwestern China [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 68(6): 932–943.
- 苗长明, 丁一汇, 郭品文, 等. 2015. 水汽输送与江南南部初夏雨季及降水变化的联系[J]. *气象学报*, 73(1): 72–83. Miao Changming, Ding Yihui, Guo Pinwen, et al. 2015. Linkage of the water vapor transport distribution with the rainy season and its precipitation in the South Part of Jiangnan during the early summer [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 73(1): 72–83.
- Simmonds I, Bi D, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor transport associated with rainfall over China in summer [J]. *J. Climate*, 12: 1353–1367.
- Sun B and Wang H J. 2015. Analysis of the major atmospheric moisture sources affecting three sub-regions of East China [J]. *Int. J. Climatol.*, 35: 2243–2257.
- Tang Y, Song X F, Zhang Y H, et al. 2017. Using stable isotopes to understand seasonal and inter-annual dynamics in moisture sources and atmospheric circulation in precipitation [J]. *Hydrological Processes*, 31(26): 4682–4692. <https://doi.org/10.1002/hyp.11388>
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓傲. 1958. 东亚的梅雨与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J]. *气象学报*, 29(2): 119–134. Tao Shiyan, Zhao Yujia, Chen Xiaobao. 1958. The relationship between may-yü in far east and the behavior of circulation over Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 29(2): 119–134.
- 陶诗言, 朱文妹, 赵卫. 1988. 论梅雨的年际变异[J]. *大气科学*, 12 (特刊): 2–13. Tao Shiyan, Zhu Wenmei, Zhao Wei. 1988. Interannual variability of Meiyu rainfalls [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 12(s): 2–13.
- Wang B, Zhang Q. 2002. Pacific-East Asian teleconnection. part II: how the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development [J]. *J. Climate*, 15(22):3252–3265.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo–Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22(3):730–747.
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33, 411–432.
- 谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算[J]. *气象学报*, 30(2): 171–185. Xie Yibing, Dai Wujie. 1959. Certain

- computational results of water vapor transport over eastern china for a selected synoptic case [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 30(2): 171–185.
- 徐祥德, 陈联寿, 王秀荣, 等. 2003. 长江流域梅雨带水汽输送源——汇结构[J]. *科学通报*, 48(21): 2288–2294. Xu Xiangde, Chen Lianshou, Wang Xiurong, et al. 2003. Source-sink structure of water vapor transport in Meiyu belt of Yangtze River basin [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 48(21): 2288–2294.
- 杨浩, 江志红, 刘征宇, 等. 2014. 基于拉格朗日法的水汽输送气候特征分析—江淮梅雨和淮北雨季的对比[J]. *大气科学*, 38(5): 965–973. Yang Hao, Jiang Zhihong, Liu Zhengyu, et al. 2014. Analysis of climatic characteristics of water vapor transport based on the Lagrangian method: A comparison between Meiyu in the Yangtze–Huaihe River region and the Huaibei rainy season [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (5): 965–973.
- 杨柳, 赵俊虎, 封国林. 2018. 中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异[J]. *大气科学*, 42 (1): 81–95. Yang Liu, Zhao Junhu, Feng Guolin. 2018. Characteristics and differences of summertime moisture transport associated with four rainfall patterns over eastern China monsoon region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42 (1): 81–95.
- 叶敏, 封国林. 2015. 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*, 39 (4): 777–788. Ye Min, Feng Guolin. 2015. Objective quantification of moisture transport that influences summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze river [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (4): 777–788.
- 袁媛, 高辉, 柳艳菊. 2017. 2016年夏季我国东部降水异常特征及成因简析[J]. *气象*, 43(1):115–121. Yuan Yuan, Gao Hui, Liu Yanju. 2017. Analysis of the characteristics and causes of precipitation anomalies over eastern China in the summer of 2016 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 43(1):115–121.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Nino on the precipitation in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 16(2): 229–241.
- 赵俊虎, 陈丽娟, 王东阡. 2018. 2016年我国梅雨异常特征及成因分析[J]. *大气科学*, 42(5): 96–107. Zhao Junhu, Chen Lijuan, Wang Dongqian. 2018. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2016 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(5): 96–107.
- 周杰, 李永华, 赵俊虎, 等. 2021. 西南地区东部区域性暴雨事件的客观识别及其变化特征[J]. *高原气象*, 40(3): 1–15. Zhou Jie, Li Yonghua, Zhao Junhu, et al. 2021. Objective identification and variation characteristics of regional heavy rainfall events in the east of southwestern China [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 40(3): 1–15.
- 周玉淑, 颜玲, 吴天贻, 等. 2019. 高原涡和西南涡影响的两次四川暴雨过程的对比分析[J]. *大气科学*, 43(4): 814–831. Zhou Yushu, Yan Ling, Wu Tianyi, et al. 2019. Comparative Analysis of Two Rainstorm Processes in Sichuan Province Affected by the Tibetan Plateau Vortex and Southwest Vortex [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(4): 814–831.
- 邹梦, 乔少博, 吴永萍, 等. 2017. 热带印度洋—西太平洋水汽输送异常对中国东部夏季降水的影响[J]. *大气科学*, 41(5): 988–998. Zou Meng, Qiao Shaobo, Wu Yongping, et al. 2017. Effects of Anomalous Water Vapor Transport from Tropical Indian Ocean–Western Pacific on Summer Rainfall in Eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(5): 988–998.

附图:

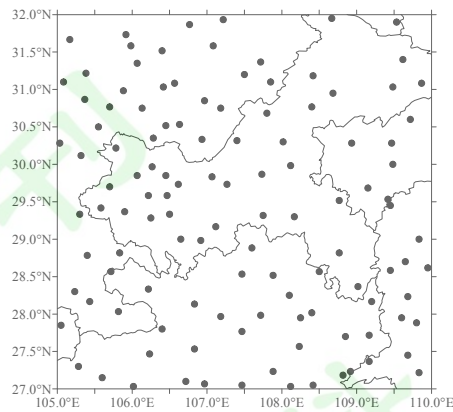


图 1 西南地区东部 118 个气象站点分布
Fig.1 The distribution of 118 meteorological stations over the East of Southwestern China (ESWC)

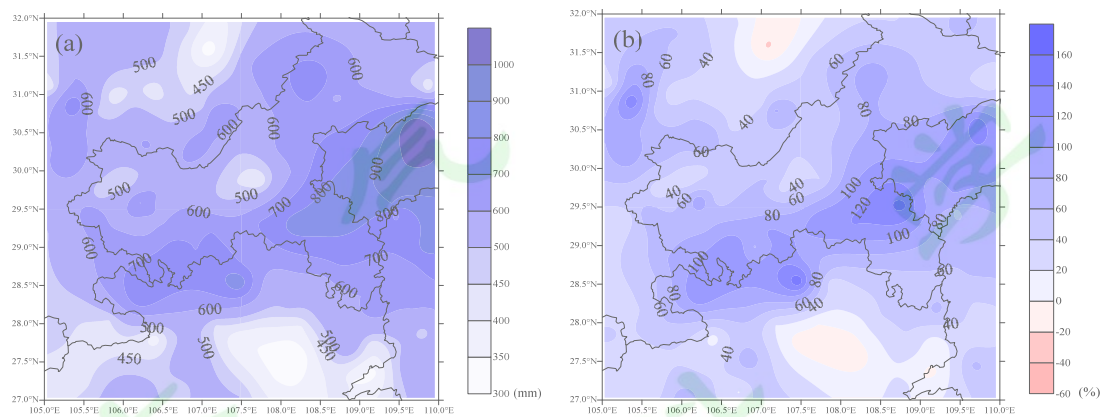
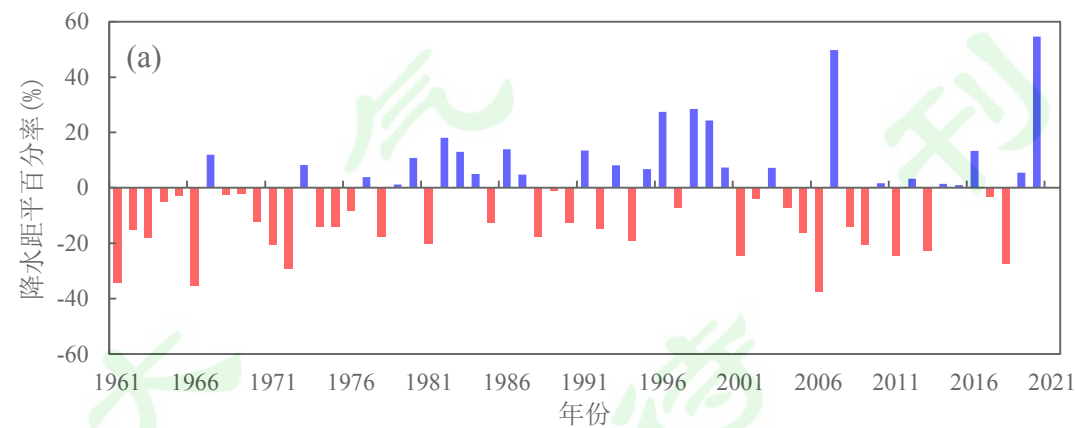


图 2 2020 年 6-7 月西南地区东部降水量 (a, 单位: mm) 及降水距平百分率 (b, 单位: %) 的空间分布
Fig.2 Spatial distribution of precipitation (a, units: mm) and percentage of precipitation anomaly (b, units: %) over the ESWC in June and July 2020



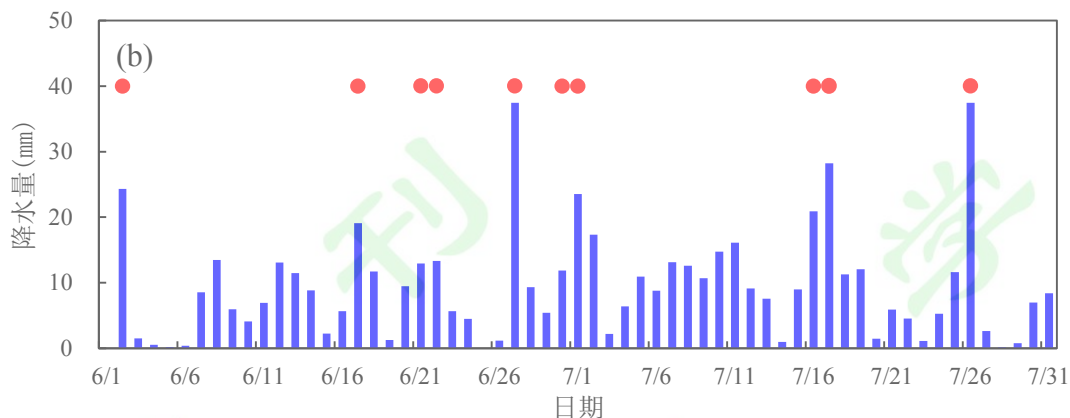


图3 西南地区东部 1961-2020 年 6-7 月降水距平百分率 (a, 单位: %) 及 2020 年 6-7 月逐日平均降水量 (b, 单位: mm) 变化 (图 b 中红色圆点所在日期代表区域暴雨过程的发生日期)

Fig.3 Time series of average percentage of precipitation anomaly in June and July during 1961-2020 (a, units: %) and daily average precipitation from June to July in 2020 (b, units: mm) over the ESWC (The date of the red dot in (b) represents the occurrence date of the regional heavy rainfall events)

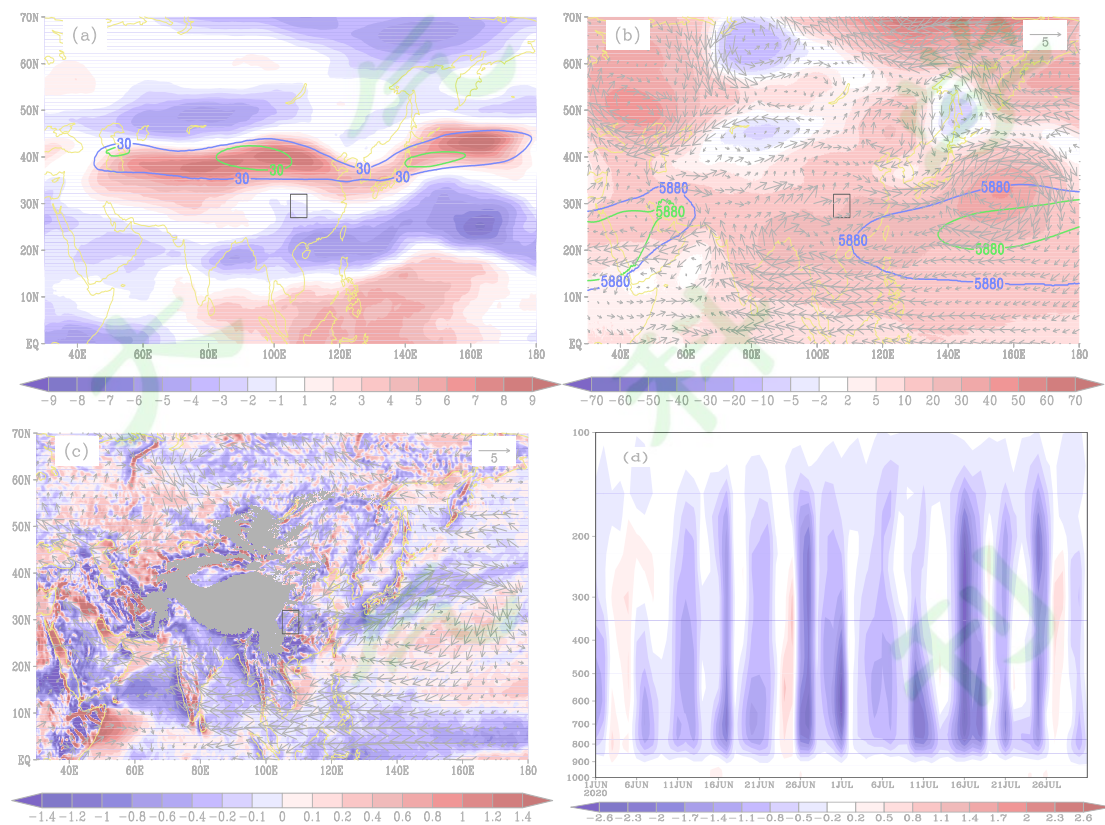


图4 2020 年 6-7 月平均大气环流形势。(a) 200hPa 纬向风距平(单位: m s^{-1} ; 绿线为气候态 30m s^{-1} 等值线, 蓝线为 2020 年 6-7 月平均 30m s^{-1} 等值线); (b) 500hPa 位势高度场距平 (阴影, 单位: gpm) 及风场距平 (矢量, 单位: m s^{-1}) (绿线为气候态 5880 线, 蓝线为 2020 年 6-7 月平均 5880 线); (c) 850hPa 风场距平 (矢量, 单位: m s^{-1}) 和垂直速度场 (阴影, 单位: Pa s^{-1}) (d) 区域平均的垂直速度高度-时间剖面图(单位: 10^{-1}Pa s^{-1}) ((a) - (c) 中黑色矩形框代表西南地区东部位置; (c) 中灰色阴影分别代表 850hPa 地形)

Fig.4 Characteristics of average atmospheric circulation in June-July 2020. (a) 200hPa zonal wind anomaly (units: m s^{-1} ; the green line is 30m s^{-1} isoline in climatological mean; The blue line is an average 30m s^{-1} isoline in June to

July, 2020); (b) 500hPa geopotential height field anomaly (shadow, units: gpm) and wind field anomaly (vector, units: m s^{-1}) (The green line is the 5880 isoline in climatological mean, and the blue line is the average 5880 isoline in June and July, 2020); (c) wind field anomaly (vector, units: m s^{-1}) and vertical velocity field (shadow, units: Pa s^{-1}) at 850hPa; (d) regional average of vertical velocity height-time profile (units: $10^{-1} \text{ Pa s}^{-1}$) (The black rectangular frame in (a)-(c) shows the location of the ESWC; The shaded gray areas in (c) represent 850hPa terrain.)

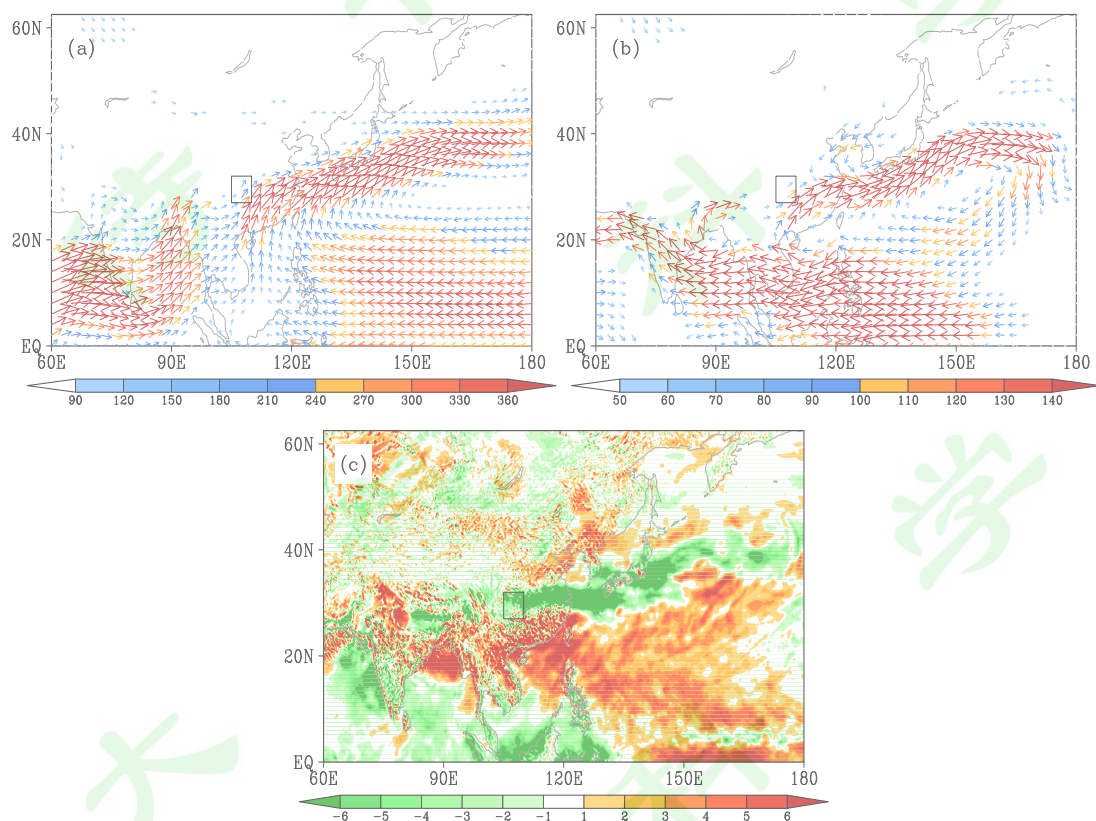


图 5 2020 年 6-7 月平均整层水汽异常情况。(a) 水汽输送矢量场 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), (b) 水汽输送异常场 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), (c) 水汽通量散度异常场 (单位: $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (图中黑色矩形框代表西南地区东部的位置)

Fig.5 Anomalous water vapor integrated from the surface to 300hPa in June-July 2020. (a) Water vapor transport (units: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), (b) anomalous water vapor transport (units: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), (c) anomalous divergence (units: $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (The black rectangular frame shows the location of the ESWC)

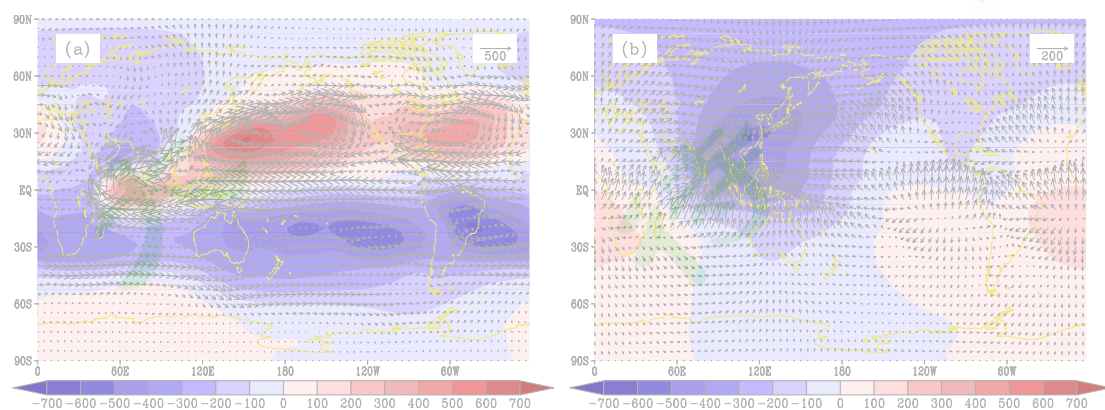


图 6 2020 年 6-7 月平均整层水汽流函数 ((a) 中阴影, 单位: 10^6 kg s^{-1}) 及非辐散分量 ((a) 中矢量, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) 和势函数 ((b) 中阴影, 单位: 10^6 kg s^{-1}) 及辐散分量 ((b) 中矢量, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Fig.6 the distribution of integrated stream function (shadow in (a), units: 10^6 kg s^{-1}) and its nondivergent component (vector in (a), units: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and potential function (shadow in (b), units: 10^6 kg s^{-1}) and its divergent component (vector in (b), units: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) of the water vapor transport in June-July 2020

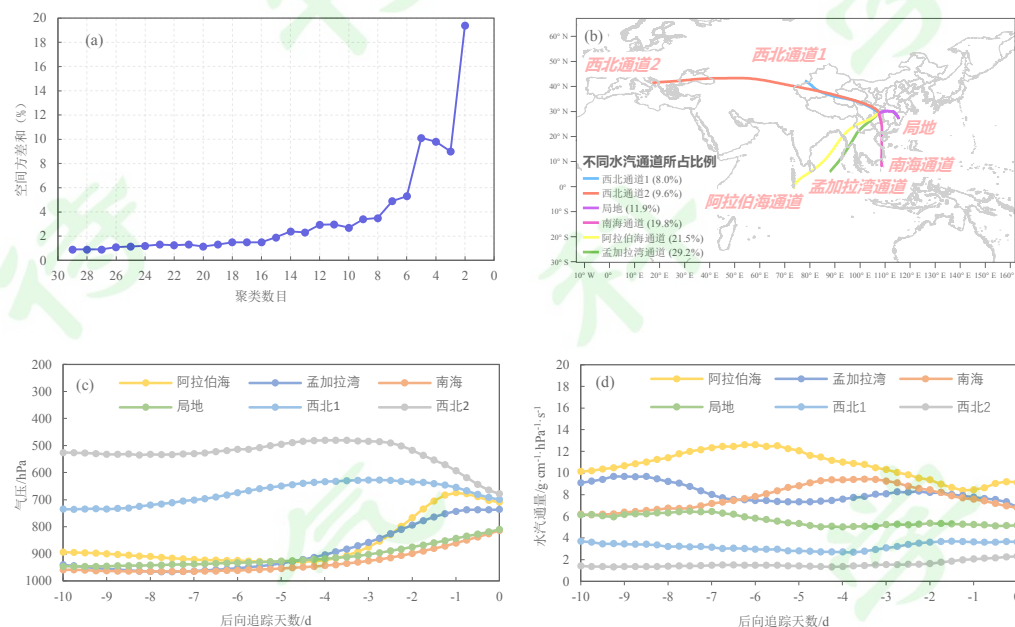


图 7 2020 年 6 月 1 日-7 月 31 日水汽轨迹聚类空间方差增长率 (a, 单位: %), 水汽通道空间分布及占比 (b, 单位: %), 水汽通道的高度变化 (c, 单位: hPa) 以及水汽通量的变化 (d, 单位: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Fig.7 change in TVS (total spatial variance) as clusters combined (a, units: %), the spatial distribution of water vapor passages (b, units: %), change in height of vapor passages (c, units: hPa), and change in water vapor flux of vapor passages (d, units: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) from June 1 to July 31, 2020

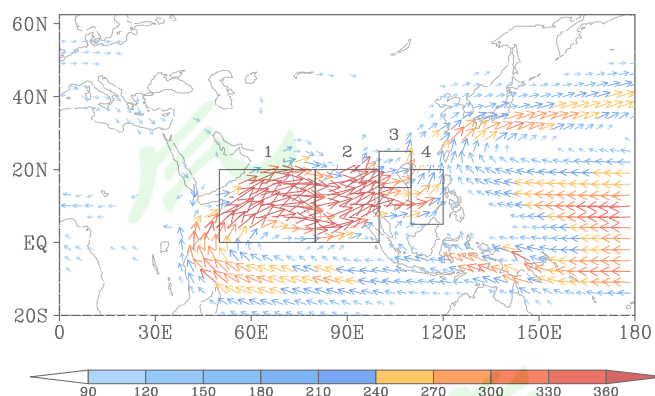


图 8 1979-2020 年 6-7 月平均整层水汽输送的空间分布 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) (图中黑色矩形框分别为水汽强度指标选取的 4 个区域, 从西到东依次是: 区域 1 (0-20°N, 50-80°E), 区域 2 (0-20°N, 80-100°E), 区域 3 (15-25°N, 100-110°E), 区域 4 (5-20°N, 110-120°E))

Fig.8 Spatial Distribution of Average Water Vapor Transport in June-July from 1979 to 2020 (units: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) (The black rectangular boxes in the figure are the four areas selected by the water vapor intensity index, which are in turn from west to east: zone 1 (0-20°N, 50-80°E), zone 2 (0-20°N, 80-100°E), zone 3 (15-25°N, 100-110°E), zone 4 (5-20°N, 110-120°E),

zone 4 (5-20°N, 110-120°E))

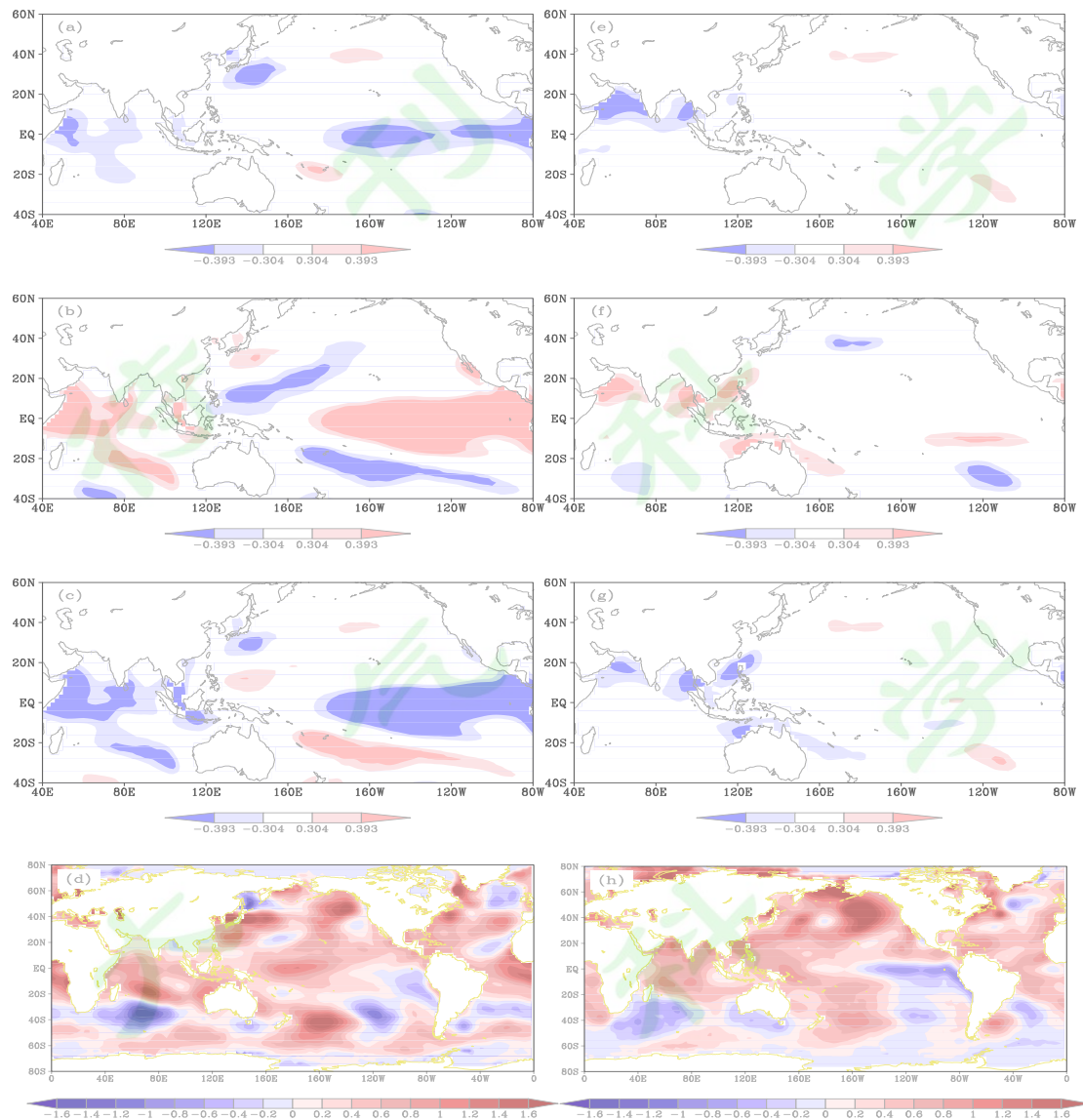


图 9 不同水汽强度指标 ((a)、(e) 孟加拉湾纬向水汽强度指标, (b)、(f) 中南半岛北部经向水汽强度指标, (c)、(g) 南海纬向水汽强度指标) 与前冬 ((a) - (c)) 和 5-7 月 ((e) - (g)) SST 的相关分布 (图中深、浅阴影区分别代表通过 0.01 和 0.05 的显著性检验) 以及 2019/2020 年冬季 (d) 和 2020 年 5-7 月 (h) SSTA 的空间分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.9 Correlation distribution between different water vapor intensity indexes ((a),(e) is Bay of Bengal meridional water vapor intensity index; (b),(f) is North Indochina zonal water vapor intensity index; (c),(g) is South China Sea zonal water vapor intensity index) and SST in previous winter ((a)-(c)) and in MJJ ((e)-(g)) (The dark and light shaded areas represent passing the significance test of 0.01 and 0.05 respectively) and spatial distribution of SSTA in winter of 2019/2020 (d) and in MJJ of 2020 (h) (units: $^{\circ}\text{C}$)

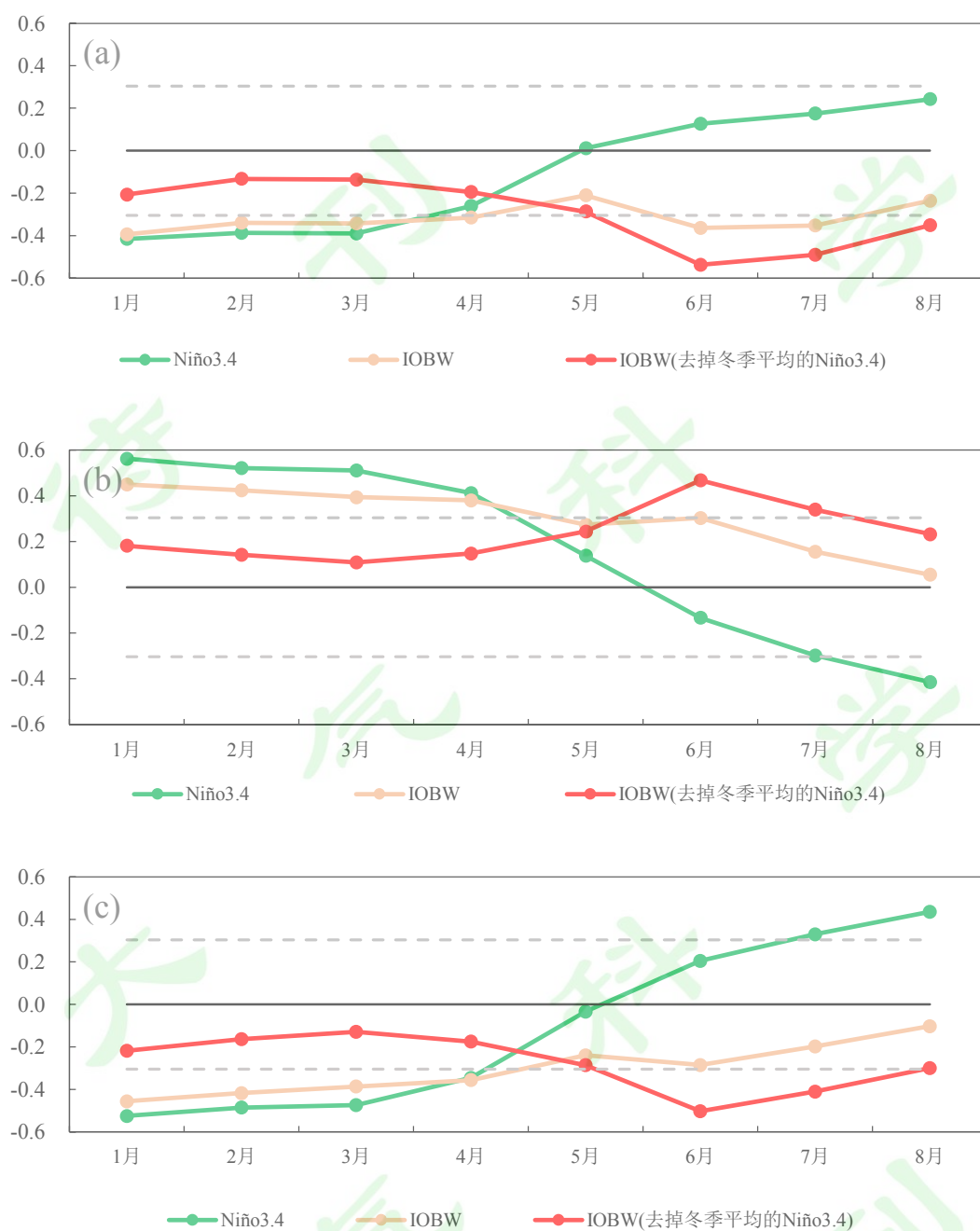


图 10 不同水汽强度指标与 Niño3.4、IOBW 和 IOBW（去掉冬季平均的 Niño3.4）的超前滞后相关系数曲线图（(a) 孟加拉湾纬向水汽强度指标，(b) 中南半岛北部经向水汽强度指标，(c) 南海纬向水汽强度指标，图中灰色虚线为 0.05 显著性检验线）

Fig.10 Lead-lag correlation coefficient between different water vapor intensity indexes and Niño3.4, IOBW and IOBW (excluding the average Niño3.4 in winter) ((a) is Bay of Bengal meridional water vapor intensity index; (b) is North Indochina zonal water vapor intensity index; (c) is South China Sea zonal water vapor intensity index. The gray dotted line is the 0.05 significance test line)

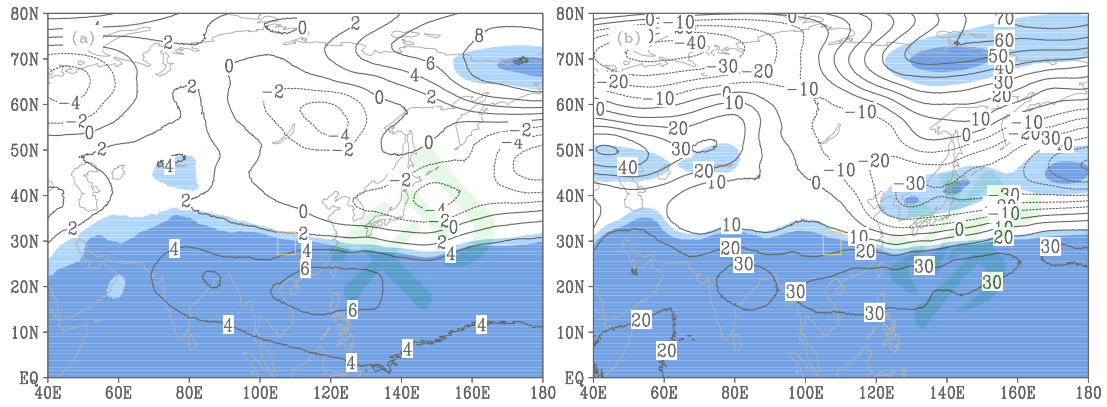


图 11 前冬 Niño3.4 区海温指数 (a) 和 5-7 月 IOBW 指数 (b) 与 6-7 月平均的 500hPa 位势高度场的回归 (图中深浅阴影区分别代表通过 0.01 和 0.05 的 F 检验的区域, 图中黄色矩形框为西南地区东部位置)

Fig.11 Regression of the average geopotential height field of 500hPa in June-July using the Niño3.4 SST index in previous winter (a) and IOBW index in MJJ (b) (The shaded areas represent the areas that have passed the F test of 0.01 and 0.05 respectively, and the yellow rectangular box is the location of the ESWC)

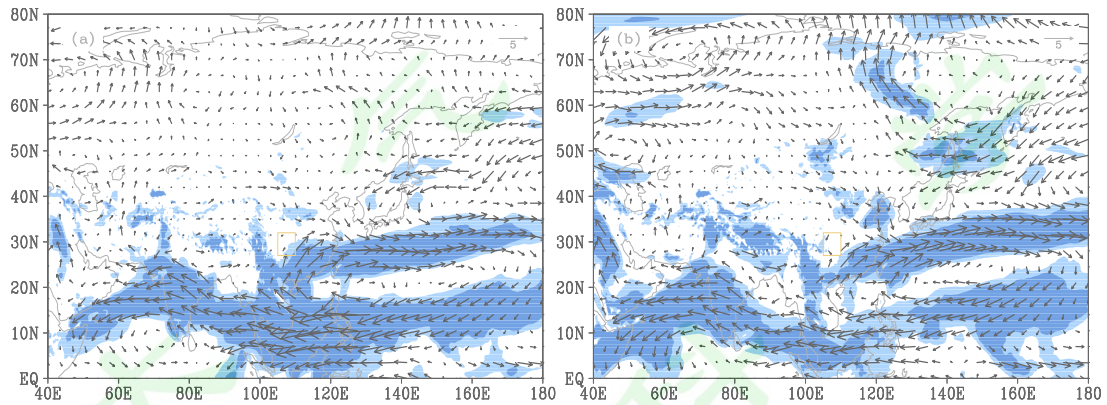


图 12 前冬 Niño3.4 区海温指数 (a) 和 5-7 月 IOBW 指数 (b) 与 6-7 月平均的 850hPa 风场的回归 (图中深浅阴影区分别代表通过 0.01 和 0.05 的 F 检验的区域, 图中黄色矩形框为西南地区东部位置)

Fig.12 Regression of the average wind field of 850hPa in June-July using the Niño3.4 SST index in previous winter (a) and IOBW index in MJJ (b) (The shaded areas represent the areas that have passed the F test of 0.01 and 0.05 respectively, and the yellow rectangular box is the location of the ESWC)