

云南西南部 2010 年代 5~6 月降水 突变减少的成因分析

韩迁立¹ 肖子牛² 陈权亮³

1. 云南省红河州气象局气象灾害防御技术中心, 云南 蒙自 661199

2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3. 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, 成都 610225

摘要: 5~6 月是云南干季和雨季转换的关键期, 其间降水量的多寡对当地农业生产和生态环境有重要影响, 也是雨季开始期早晚的重要指标。本文利用 1971~2022 年云南 5~6 月站点观测降水资料和同期 NCEP/NCAR 再分析资料对该区域 5~6 月降水的变化特征进行分析研究, 结果发现: 云南西南部 5~6 月降水呈现显著下降的趋势, 并在 2009 年发生气候突变, 2010 年之后显著减少。进一步的分析表明, 热带西印度洋海温异常, 会导致中南半岛北部和云南地区上空 200hPa 高层大气辐散和 700hPa 辐合减弱, 不利于大气垂直上升运动和降水; 还会导致中亚和孟加拉湾地区 500hPa 高度场正异常, 使得中高纬地区东移南下的冷空气和南支槽前的西南气流减弱, 不利于云南西南部地区降水天气过程的形成; 同时, 西印度洋海温异常也导致大气低层从南海海域到中南半岛形成异常反气旋环流, 云南出现西北风异常, 西南风的水汽输送减弱, 进而造成云南西南部 5~6 月降水减少。热带西印度洋海温持续上升及其在 2010 年代末期的突变增暖, 是导致云南西南部降水突变减少的关键驱动因子。

关键词: 云南西南部; 5~6 月降水; 热带西印度洋海温; 大气环流; 水汽输送

Analysis of the Causes of Sudden Decrease in Precipitation in Southwestern Yunnan during May to June in the 2010s

Abstract: The period of May to June marks a critical transition from the dry season to the rainy season in Yunnan, where the amount of precipitation during this time significantly impacts local agricultural production and the ecological environment. Furthermore, it serves as an important indicator of the early or late onset of the rainy season. This study examines the variability characteristics of precipitation in Yunnan during May to June, utilizing observational precipitation data from 1971 to 2022 along with concurrent NCEP/NCAR reanalysis data. Our analysis reveals a significant decreasing trend in the cumulative precipitation in southwest Yunnan from May to June, with a climate change point occurring in 2009, followed by a marked reduction after 2010. Further investigation indicates that the warm anomaly sea surface temperature (SST) in the tropical western Indian Ocean weakens the divergence at 200hPa and convergence at 700hPa over the northern Indo-China Peninsula and Yunnan, hindering vertical atmospheric uplift and precipitation. Additionally, it causes a positive anomaly in the 500hPa height field over Central Asia and the Bay of Bengal, weakening the cold air from mid-to-high latitudes and the southwest airflow ahead of the southern branch trough, thereby inhibiting the formation of precipitation weather processes in southwest Yunnan. Concurrently, an anomalous anticyclonic circulation emerges from the South China Sea to the Indo-China Peninsula in the lower atmosphere, resulting in anomalous northwest winds in Yunnan and a weakened moisture transport from the southwest winds, further contributing to the decrease in precipitation in southwest Yunnan from May to June. The continuous increase in the SST of the tropical western

Indian Ocean and its abrupt warming in the late 2010s are identified as the key drivers for the abrupt decrease in precipitation in southwest Yunnan.

Keywords: Southwest Yunnan; precipitation in May and June; sea surface temperature in the western tropical Indian Ocean; atmospheric circulation; water vapor transport

1、引言

云南省位于低纬高原季风气候区,受印度季风和东亚季风共同影响,干湿季分明,雨季(5~10月)降水量占全年降水量的85%以上,干季(11月至次年4月)降水量不到15%(许美玲等,2011;晏红明等,2018)。5~6月是云南省干季和雨季转换的关键期(陶云,2006),也是省内大部分地区大春作物栽种的关键时期,5~6月降水量的多寡对人畜饮水和工农业生产有重要的影响。

对多年气象资料的分析表明,云南5月降水的主要模态为全区一致型和东西差异型,其全区域一致型的降水异常与太平洋的海温异常事件有密切的联系,当北太平洋中部海温偏高和赤道中东太平洋海温偏低时,有利于云南全区一致型降水偏多,反之则有利于降水偏少(晏红明,2022)。此外,印度洋的水汽输送对云南地区的降水有重要影响,当印度洋为异常偏西水汽输送,尤其是孟加拉湾为异常的西南风水汽输送时,云南5月降水偏多(马涛等,2017)。除海洋温度和水汽输送以外,陆地热力状态对云南初夏降水异常的空间分布也有重要作用。例如,北半球春季雪盖与云南5月降水具有水密切的关联。当北半球雪盖面积增加时,云南西部地区降水偏少、东部地区降水偏多,呈现出东西型的空间分布特征(何媛等,2013)。同时,热带地区的大气低频振荡对云南低纬度高原降水有显著的锁相作用,研究表明,MJO持续位于第4~6位相(赤道印度洋中部至西太平洋)可能造成云南5月降水偏多,位于第7~8位相(赤道太平洋中部以东)和第1~3位相(赤道印度洋中西部)降水偏少(赵尔旭等,2015;李汀等,2012)。在全球变暖的背景下,中国西南地区气候变干,干旱事件频繁发生(杨金虎等,2015;Wang et al., 2016, Xiao et al., 2018)。尤其是云南南部地区6月份降雨量明显偏少(胡学平等,2014)。在云南南部澜沧江流域,夏季降水在2002年前后也发生了显著的年代际变化,降水量经历了由多到少的年代际突变,而其主要贡献来自于6月降水量的明显减少(高慧等,2019)。

5~6月是云南从干季到雨季转换的重要时段,但造成其降水异常的原因较为复杂,形成机理目前还不十分清楚。因此,有必要对云南5~6月份的降水异常变化及其空间分布做进一步的研究,以丰富和完善人们对云南干季和雨季转换期降水变化异常及其影响因子的认识,为气候预测和气象服务提供科学参考。

本文将利用1971~2022年最新的气象观测资料和同期NCEP/NCAR提供的月平均再分析资料,对云南5~6月降水变化的主要特征和相关的大气环流特征进行深入研究,以揭示全球气候变暖背景下云南地区5~6月降水异常的产生机理,为气候预测提供一些有参考意义的分析思路。

2、资料和方法

本文所用资料包括1971~2022年云南西南部41个国家气象观测站(图1)5~6月降水资料;同期美国国家环境预测中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的全球200hPa、500hPa、850hPa、700hPa标准气压层的逐月再分析水平风场和位势高度(Kistler R, et al. 2001),分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$;欧洲中期天气预报中心提供的第5套(ERA5)全球200hPa标准气压层逐月再分析水平风场(Hersbach, et al. 2020),分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。美国国家大气和海洋管理局(NOAA)提供的逐月再分析海洋表面温度(Huang, et al. 2017),分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 。

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24066

收稿日期 2024-4-17, 收修订稿日期 2024-9-05

作者简介 韩迁立,男,1984年出生,研究生在读,主要从事天气气候预测。E-mail: 379703407@qq.com

通讯作者 肖子牛,研究员。E-mail: xiaozn@lasg.iap.ac.cn

资助项目 云南省自然科学基金项目(202201AS070069),云南省重点研发计划项目(202203AA080010),云南省气象局科研项目(YZ202314)

Funded by: Key Fund Project of Natural Science in Yunnan Province (202201AS070069), Key Research and Development Program of

Yunnan Province (202203AA080010), Scientific Research Project of Yunnan Provincial Meteorological Bureau (YZ202314)

本文用到的方法有：回归分析（黄嘉佑，2000）、MK 气候突变检验（魏凤英，2007），合成分析等。

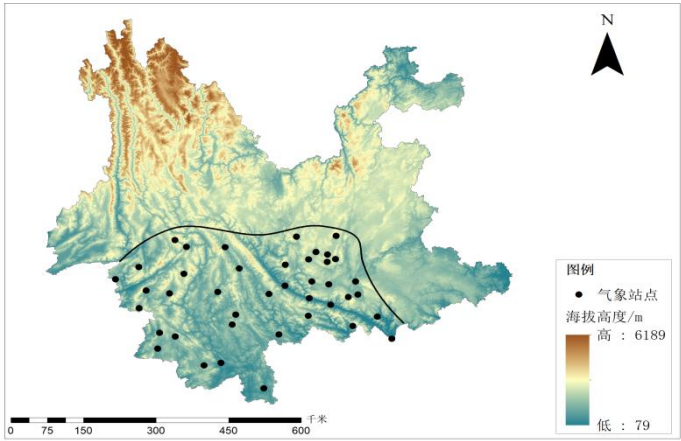


图 1 云南地形和所选气象观测站点（黑色实线框选区域为云南西南部地区）

Fig.1 The topography of Yunnan province and Selected Meteorological Observation Sites (The area enclosed by the solid black line represents southwest Yunnan)

3、云南 5~6 月降水的主要特征

3.1、降水空间分布特征

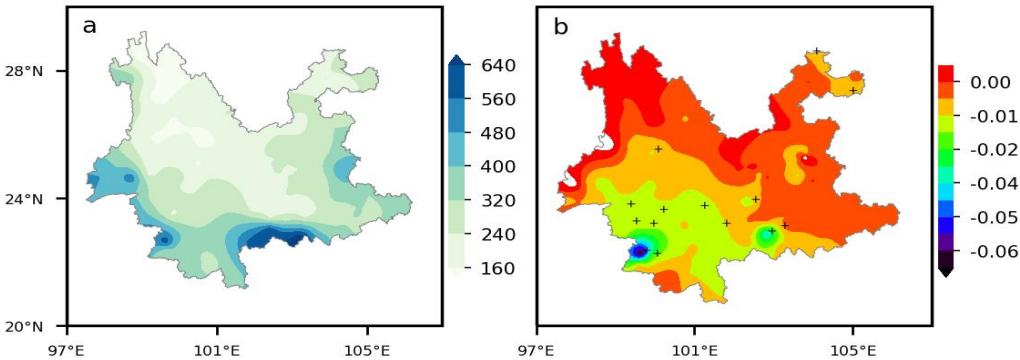


图 2 1971-2022 年云南省 5~6 月多年平均降水量 (a) 和降水量变化趋势 (b) [降水量单位: mm, 图中‘+’号标注站点通过 0.05 显著性检验]

Figure 2: Multi-year average cumulative precipitation (a) and precipitation trend (b) from May to June in Yunnan Province from 1971 to 2022 [Precipitation unit: mm, '+' symbols indicate stations passing the 0.05 significance test]

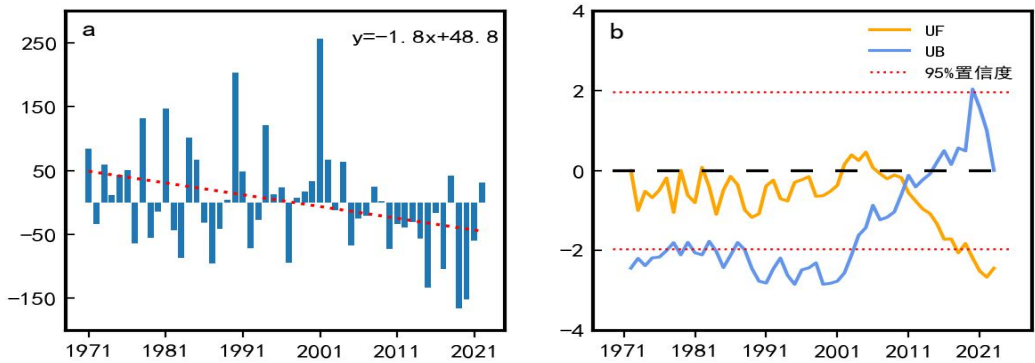


图 3 1971-2022 年 5~6 月云南西南部降水距平年际变化 (a) 和 MK 检验 (b) [降水量单位: mm]

Figure 3: Interannual variation of cumulative precipitation anomalies (a) and Mann-Kendall (MK) test results (b) in southwest Yunnan from May to June, 1971-2022 [Precipitation unit: mm]

图 2a 给出了云南省 5~6 月降水量多年平均的空间分布，从图 2a 可见，云南地区 5~6 月降水量地区差异很大，东部地区平均累计降水量为 240~320mm，其中东部边缘区域超过 400mm；中部和北部大部地区为 160~240mm，局部地区少于 160mm；西部大部地区平均降水量为 160~320mm，西部边缘地区超过 400mm；南部大部地区为 240~400mm，南部边缘地区超过 480mm，其中红河、绿春等山区测站降水量超过 600mm。总体来看，5~6 月降水量的最大区域集中在云南西南部区域。

采用一元线性回归拟合各观测站点 5~6 月降水的标准化时间序列的变化趋势，回归系数的空间分布特征如图 2b 所示，云南西南部大部分地区回归系数为-0.01~-0.04，其它地区为-0.01~0，通过 95%置信度检验的站点主要位于云南西南部。由此可知，云南 5~6 月降水大值区主要集中在西南部地区，降水的显著减少主要是由于该地区的降水变化趋势所贡献。因此，以下我们重点对云南西南部 5~6 月降水变化趋势做进一步分析研究。

3.2、云南西南地区降水的变化趋势

图 3a 给出了云南西南部 41 个国家气象观测站点 1971~2022 年 5~6 月降水距平的年际变化和线性趋势，降水量平均下降速率为-1.8mm/a，减少趋势通过了 95%置信度检验。进一步的 MK 分析检验发现（图 3b），UF 曲线和 UB 曲线在 2009 年相交，表明 2009 年云南西南部地区 5~6 月降水发生了突变，UF<0 表示降水量呈现负异常为主的特征，变化趋势通过 95%置信度检验。

4、与云南西南部降水相关联的大气环流

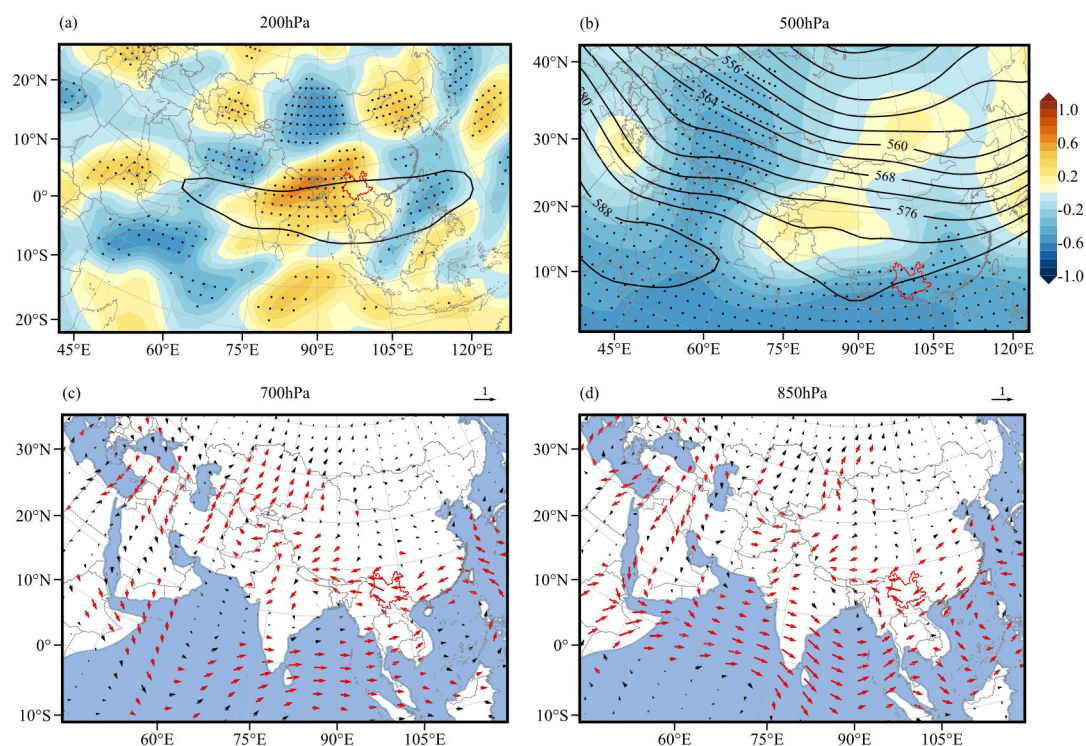


图 4 1971-2022 年云南西南部 5~6 月降水与 200hPa 散度和 500hPa 位势高度的相关系数 (a-b) 及其与 700hPa 和 850hPa 风场的相关系数矢量 (c-d)。图中打点区域和红色风矢相关性通过 95% 置信度检验，(a) 中黑实线为南亚高压 200hPa 特征线，表征了其气候平均位置，(b) 中黑实线为气候态 500hPa 等值线，数值均为平均位势高度，单位：dagpm

Figure 4: Correlation coefficients between precipitation in southwest Yunnan from May to June during 1971-2022 and divergence at 200hPa, as well as geopotential height at 500hPa (a-b), and correlation coefficient vectors with wind fields at 700hPa and 850hPa (c-d). The dotted areas and red wind vectors represent correlations that have

passed the 95% confidence level test. The solid black line in (a) represents the characteristic line of the South Asian High at 200hPa, indicating its climatological mean position, while the solid black line in (b) represents the climatological 500hPa contour line. Values represent average geopotential height in dagpm.

为了探究云南西南部 5~6 月降水在 2010 年代发生突变减少的原因, 首先我们分析与之相关的大气环流特征, 通过比较 2010 年前后两个时期大气环流特征的不同, 再进一步探究降水突变减少的原因和机制。

4.1、云南西南地区降水与大气环流变化的关系

通过计算云南西南部 5~6 月降水与高、低层风场和中、高层 500hPa 高度场的相关系数, 发现: 云南西南部 5~6 月降水与 200hPa 南亚高压主要活动区域范围内的散度场显著正相关 (图 4a), 与 700hPa 孟加拉湾和南海海域的气旋性环流显著正相关 (图 4c), 即云南西南部 5~6 月份的降水偏多需要高、低层形成有利于该地区上升对流活动发展的环流配置。

从影响该地区的主要天气系统来看, 云南西南部 5~6 月降水与 500hPa 副热带高压、南支槽以及中亚地区伊朗高压脊主要活动区域范围内的位势高度场显著负相关 (图 4b), 表明上述地区 500hPa 高度场为负异常时, 副热带高压偏弱、南支槽较深、伊朗高压脊偏弱, 这种高度场异常的配置有利于中亚中高纬地区高空东移南下的冷空气和南支槽前的西南气流在云南上空交汇, 并形成降雨天气过程。

同时, 云南西南部 5~6 月份的降水与 850hPa 索马里低空急流、孟加拉湾西南气流以及云南南部的东南气流显著正相关 (图 4d), 表明当索马里低空急流、孟加拉湾西南气流以及云南南部的东南气流偏强时, 向云南地区输送水汽为正异常, 云南西南部 5~6 月降水量偏多。以上相关性均通过了 95%置信度检验。

4.2、2010 年前后影响云南西南部降水的大气环流的变化特征

图 5 给出了基于 ERA5 和 NCEP/NCAR 月平均再分析资料计算得到的 2010 年前后 5~6 月 200hPa 平均散度场和 500hPa 平均位势高度场及其差值场。对比图 5a、b 可以发现: 前期高原东部 200hPa 散度场上, 中南半岛北部和云南地区上空高层大气辐散较强 (图 5a); 2010 年之后高原东部 200hPa 散度场上, 中南半岛北部和云南地区上空高层大气辐散与前期相比减弱 (图 5b)。从 2010~2022 年与 1997~2009 年 200hPa 散度场的差值场上来看, 上述特征更为明显, 高原南侧中南半岛北部地区和云南西南部出现了明显的高空辐合异常 (图 5e)。有研究表明 90°E 附近垂直速度在 200hPa 南亚高压东侧以上升运动为主, 西侧以下沉运动为主 (王惠平等, 2020)。结合 200hPa 高空散度场分析可知, 2010 年之后中南半岛北部和云南西南部高空大气垂直上升运动与 2010 年之前相比出现了减弱迹象, 不利于中低层大气中辐合上升运动的维持和发展。

图 5c、d 为 2010 年前后两个时期 5~6 月 500hPa 平均位势高度场, 从图中可以看到 500hPa 高度场上主要的天气系统有南支槽和副热带高压, 以及亚洲中高纬地区高空槽波动。与 2010 年之前 (图 5c) 相比, 2010 年之后 (图 5d) 非洲北部副热带高压势力偏强, 伊朗高压脊从里海南部向北抬升到了里海北部, 500hPa 位势高度差值场上, 孟加拉湾北部和中亚中高纬地区位势高度出现了显著的正距平异常 (图 5f)。受此影响, 中亚中高纬地区的高空槽波动, 在东移过程中受到伊朗高压脊阻挡, 使得东移南下影响云南的冷空气活动减弱; 与此同时, 受西太平洋副热带高压加强西伸影响, 南支槽较浅、槽前西南暖湿气流偏弱, 这样的变化不利于冷暖空气在云南上空交汇, 并形成降雨天气过程, 使得 2010 年以后, 云南南部 5~6 月降水较之前期显著减少, 进入一个初夏的干旱时期。对比图 4 的分析结果, 2010 年以后出现的这些变化与云南西南部 5~6 月降水量异常偏少的特征是一致的。

图 6 给出了低层大气环流 700hPa 和 850hPa 风场的气候平均态及 2010 年前后的差值场。从气候平均 (图 6a、c) 可以看到, 源于索马里越赤道气流的季风环流进入孟加拉湾海域后转为西南气流, 为云南西南部 5~6 月份的降雨天气过程带来了充沛的水汽供应 (周晓霞等,

2006; 张万成等, 2012)。图 6b、d 分别给出了 700hPa 和 850hPa 风场 2010 年前后的差值场, 从图 6b 可见, 2010 年之后阿拉伯海上空 700hPa 风场上出现了反气旋环流异常, 不利于印度洋热带季风环流水汽的持续向东输送, 同时孟加拉湾到中南半岛为异常偏东风, 云南南部为反气旋性环流控制。在 850hPa 风场上可以看到更为显著的类似特征 (图 6d)。对比图 4 及上文的分析结果可以知道, 云南西南部 5~6 月份的降水与 700hPa 孟加拉湾和南海海域气旋性环流、850hPa 孟加拉湾西南气流以及云南南部的偏东气流正相关。因此, 2010 年之后印度洋和南海海域对流层低层 700hPa 和 850hPa 风场上出现的大气环流异常, 不利于索马里越赤道气流向云南西南部地区输送水汽, 从而造成了云南西南部地区降水的显著减少。

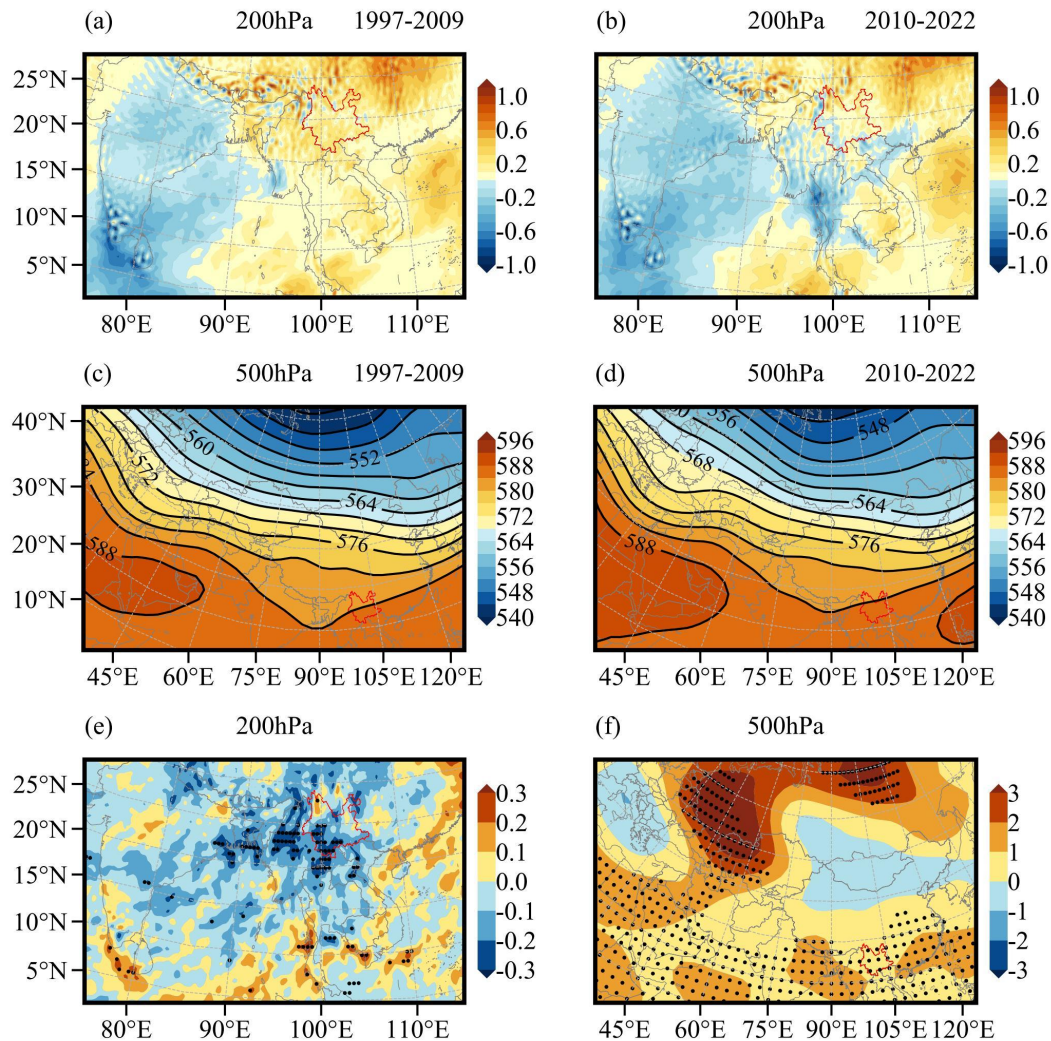


图 5 1997-2009 年 (a)、(c) 与 2010-2022 年 (b)、(d) 200hPa 平均散度场和 500hPa 平均位势高度场, 2010-2022 年与 1997-2009 年 200hPa 平均散度场 (e) 之差和 500hPa 平均位势高度场之差 (f), 图中打点区域通过年代际差异场 95% 置信度显著性检验, [单位: 位势高度 dagpm, 散度 $10^{-5}/s$]

Figure 5: Average Divergence Fields at 200hPa and Average Geopotential Height Fields at 500hPa from 1997-2009 (a, c) and 2010-2022 (b, d), along with the Difference in Average Divergence Fields at 200hPa (e) and the Difference in Average Geopotential Height Fields at 500hPa (f) between 2010-2022 and 1997-2009. The dotted areas in the figure represent regions that have passed the significance test for interdecadal differences at a 95% confidence level. [Units: Geopotential Height in dagpm, Divergence in $10^{-5}/s$]

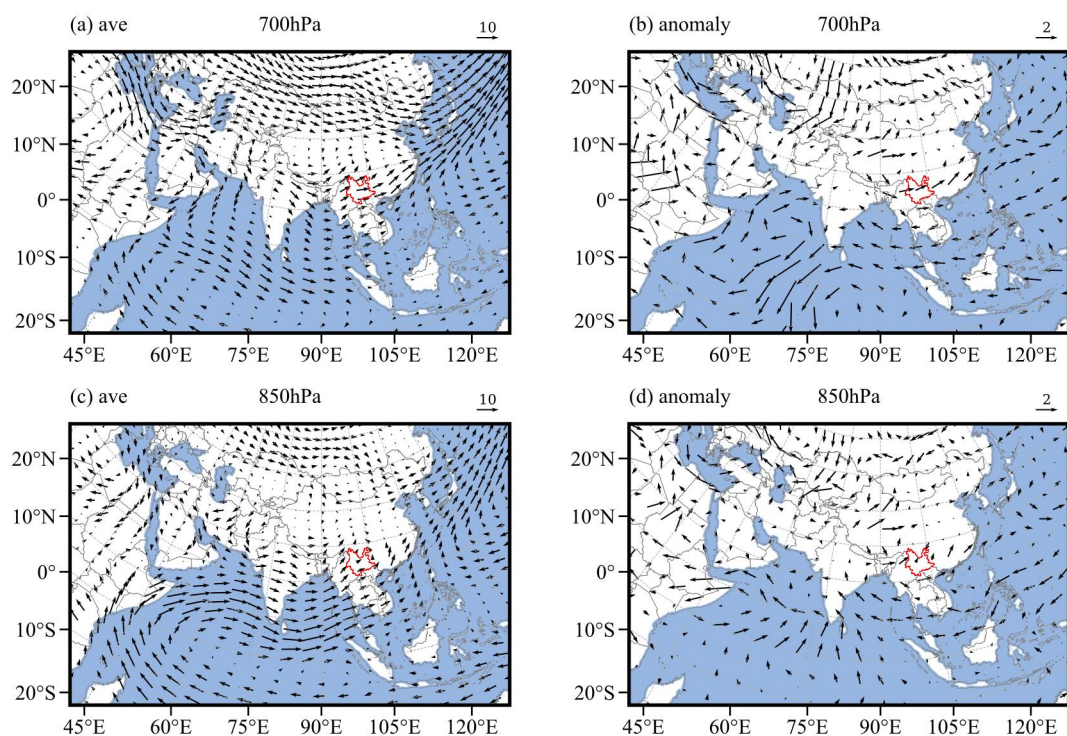


图 6 1971-2022 年 700hPa 和 850hPa 平均风场(a-b), 2010-2022 年 700hPa 和 850hPa 平均风场与 1997-2009 年 700hPa 和 850hPa 平均风场之差(c-d)[单位: m/s]

Figure 6: Average wind fields at 700hPa and 850hPa from 1971 to 2022 (a-b), and the difference in average wind fields at 700hPa and 850hPa between the periods of 2010-2022 and 1997-2009 (c-d) [units: m/s].

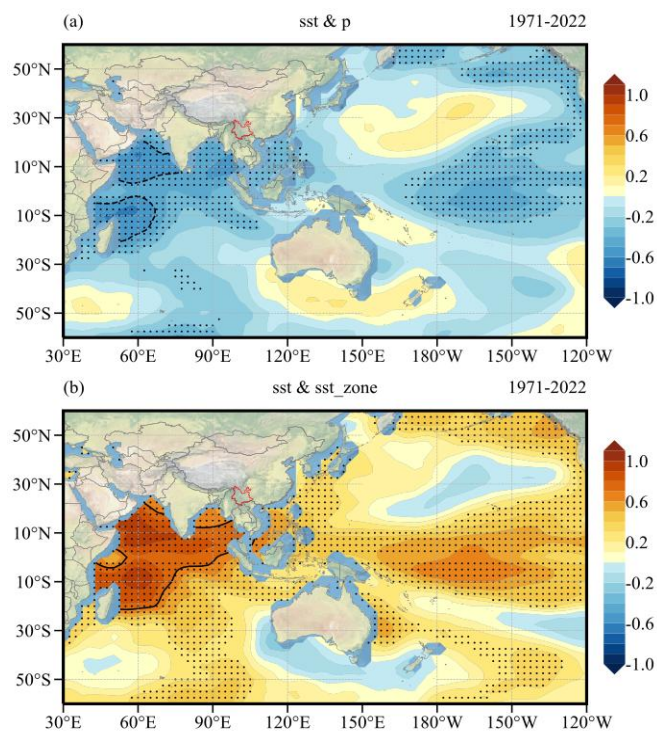


图 7 1971~2022 年 5~6 月云南西南部降水 (a) 和关键区域平均海温 (b) 与印度洋和太平洋海温的相关系数。图中打点区域相关性通过 95% 置信度检验。(a) 中黑色虚线框选区域为关键区域 (50°E~95°E, 20°S~20°N) $R < -0.5$, (b) 中黑色实线框选区域 $R > 0.7$ 。

Figure 7: Correlation coefficient R between precipitation in southwest Yunnan during May-June (a) and the average sea surface temperature (SST) in the key region (b) with the SST in the Indian Ocean and Pacific Ocean from 1971 to 2022. The dotted regions in the figure indicate areas where the correlation is statistically significant at the 95% confidence level. The black dashed box in (a) outlines the key region ($50^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$) and $R < -0.5$, while the black solid box in (b) outlines the area where $R > 0.8$.

5、2010 年代导致云南西南部降水突变减少的可能外强迫因子

通过以上分析可知，2010 年代云南西南部 5~6 月降水突变减少与大气环流的异常变化密切相关，由于海温是影响大气环流变化的最重要外强迫，以下我们将进一步研究海温变化对云南西南部 5~6 月降水显著减少的可能影响，从而探究明晰云南西南部降水突变减少的驱动因子。

5.1、海温异常

对云南西南部 5~6 月份的降水与全球海温进行相关分析发现，显著相关区位于热带太平洋中东部海域和热带西印度洋，两者之间的负相关性在热带西印度洋最为显著，相关系数可以高达 $-0.4\sim -0.6$ ，并通过了 95%置信度检验（图 7a）。为了探究明晰热带西印度洋的海温变化是否对与云南西南部降水有显著相关关系的大气环流具有重要影响，我们将热带西印度洋海温与云南西南部降水高度相关的海域（ $R < -0.5$ ）称为关键区域（ $50^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ），关键区域平均海温与热带西印度洋海温的相关系数 $R > 0.8$ （图 7b）。

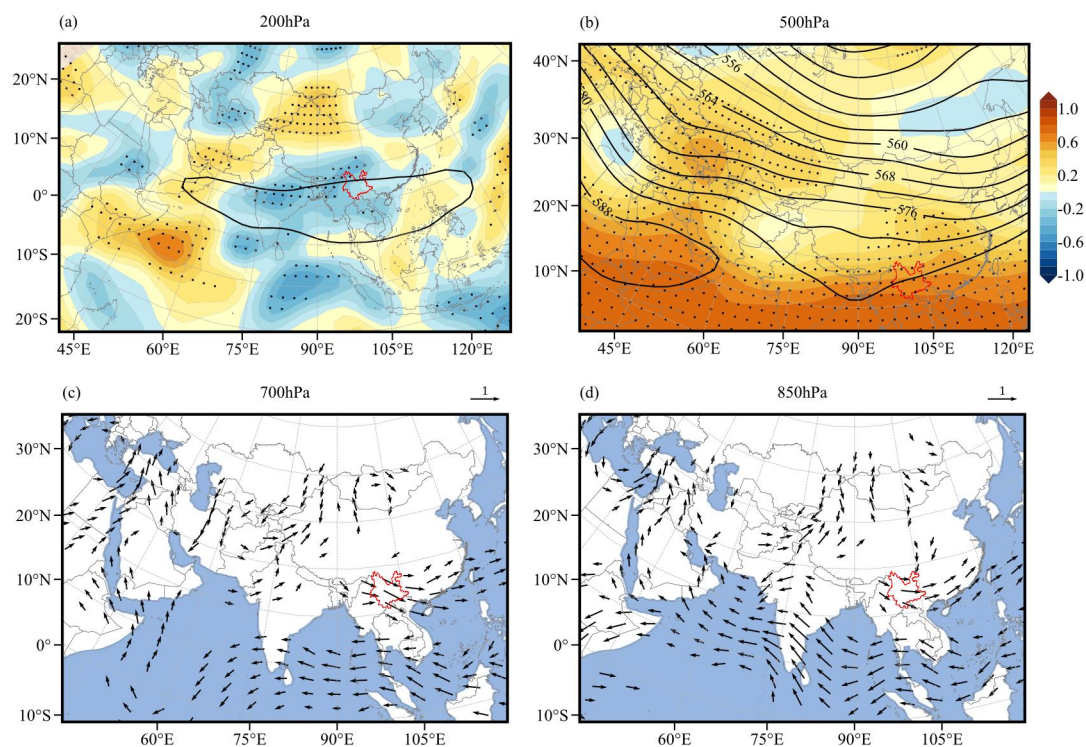


图 8 1971~2022 年 5~6 月关键区域（ $50^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ）海温与 200hPa 散度和 500hPa 位势高度的相关系数分布(a-b)及其与 700hPa 和 850hPa 平均风场的相关系数矢量(c-d)。（a）中黑实线为多年平均的南亚高压 200hPa 特征线，表征了其气候平均位置，（b）中黑实线为气候态 500hPa 等值线，数值均为平均位势高度，单位：dagpm。

Figure 8: Correlation Coefficient Distribution of Sea Surface Temperature with 200hPa Divergence and 500hPa Geopotential Height in the Key Region ($50^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$) during May to June from 1971 to 2022 (a-b), along with Correlation Coefficient Vectors of the Average Wind Fields at 700hPa and 850hPa (c-d). The black solid line in (a) represents the multi-year average 200hPa characteristic line of the South Asian High (SAH),

indicating its climatological mean position. The black solid line in (b) depicts the climatological 500hPa contour, with values representing the average geopotential height in dagpm units.

将关键区域($50^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$)的海温的标准化时间序列,与 200hPa 散度场、500hPa 位势高度场以及 700hPa 和 850hPa 风场分别进行相关分析,相关分析的结果如图 8 所示。从图 8a 中我们可以注意到,关键区海表温度与 200hPa 散度场在云南地区以西为显著负相关,而在索马里附近海域显著正相关,这与图 4a 中从云南西南部降水得到的相关系数的分布特征几乎完全一致,只是符号相反(图 8a),说明关键区的异常海温确实对云南西南部降水的异常具有重要的影响作用。与之相类似,关键海区海表温度与 500hPa 高度场的相关系数分布特征(图 8b)与图 4b 得到的大气环流特征也基本吻合,符号正好相反。也就是说西北印度洋关键区海表温度升高将会导致 500hPa 伊朗高压脊向北收缩,中高纬地区东移南下影响云南的冷空气减弱,南支槽变浅,槽前西南气流偏弱,进而导致云南西南部 5~6 月降水减少;图 8c 和图 8d 分别给出了关键区海表温度与 700hPa 和 850hPa 风场的相关。从图中可以看到,在关键区域($50^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$)异常暖海温影响下,印度洋热带赤道地区出现与季风环流相反的偏东风异常,以及从中国南海到中南半岛出现异常的反气旋环流,云南南部出现西北风异常。这些特征与图 4c 和图 4d 中展现的特征也基本是相反的,在其影响作用下将使得云南西南部地区水汽输送减弱,降水减少。

综上所述,关键区海温对形成云南西南部 5~6 月降水异常的高层和低层大气环流配置有重要的影响,是驱动云南西南部 5~6 月降水异常变化的重要外强迫因子。

5.2、关键区海温与云南西南部降水变化的关系

关键区的海温变化是否也是造成 2010 年前后云南西南部 5~6 月降水发生突变减少的原因呢?我们进一步利用关键区海表温度的标准化时间序列与云南西南部降水量进行时间序列对比分析(如图 9a 所示)。可以发现关键区海表温度的时间序列变化与云南西南部降水量的时间序列变化完全相反,并且关键区海表温度在 2010 年代末期由负转正且出现持续升温趋势。进一步的 MK 检验分析发现(图 9b),关键区海表温度的 UF 曲线和 UB 曲线在 2004 年相交,UF>0 表示海温呈现正异常为主的特征,表明 2004 年热带西印度洋关键区域海温($50^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$)发生了突变性升温,变化趋势通过了 95%置信度检验,升温趋势显著。

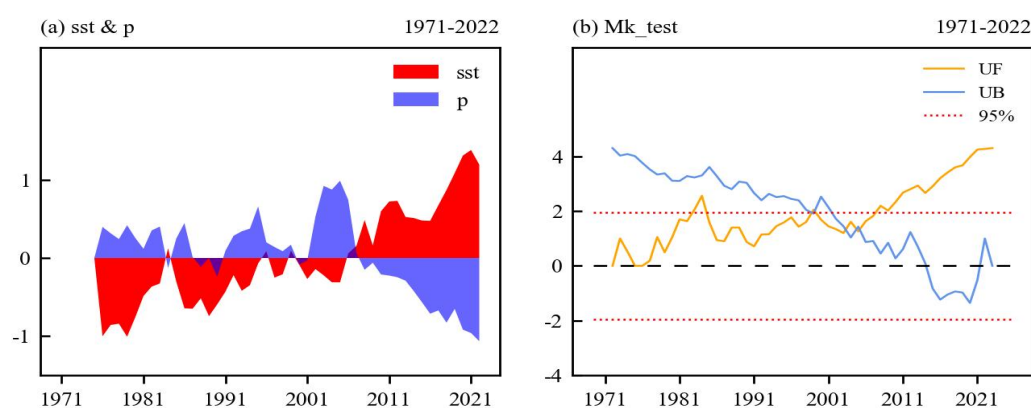


图 9 5~6 月热带西印度洋关键区域($50^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$)海洋表面温度与云南西南部降水的标准化时间序列的 5 年滑动平均 (a) 及其 MK 气候突变检验 (b)

Figure 9: Five-Year Moving Average of Standardized Time Series of Sea Surface Temperature in the Key Region of the Tropical Western Indian Ocean ($50^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$) and Precipitation in Southwestern Yunnan from May to June (a), along with the Mann-Kendall (MK) Climate Change Detection Test (b)

由此可知,热带西印度洋海温的持续上升以及在 2010 年代的突变升高,很可能是导致云南西南部 5~6 月份的降水在 2010 年代发生了突变减少的关键驱动因子。

6. 结论与讨论

本文利用 1971~2022 年云南西南部 41 个国家气象观测站 5~6 月降水资料和同期 NCEP/NCAR 月平均再分析资料,采用回归分析、MK 突变检验、合成分析等方法,对云南西南部 5~6 月降水与同期对流层不同高度层次上的大气环流和海温的相互关系进行了分析研究,得到以下主要结论:

(1) 云南省初夏干旱日趋严重,5~6 月累计降水量显著减少,但其显著减少主要发生在云南西南部地区。云南西南部地区 5~6 月降水量比云南其它地区大,降水量的下降趋势也比其它地区明显,下降速率为 -1.8mm/a ,并在 2009 年发生了突变减少。

(2) 影响云南 5~6 月降水异常变化的因子,除了中南半岛北部和云南地区在初夏对流层高、低层辐散辐合的背景外;500hPa 中高纬地区东移南下的冷空气活动和南支槽前的西南气流是重要的影响天气系统;对流层低层南海到中南半岛的异常反气旋环流,印度洋热带地区的西风水汽输送和云南南部的西北风异常,是判断云南西南部地区 5~6 月份降水量减少的重要指标。

(3) 热带西印度洋海温异常是造成云南西南部 5~6 月份降水异常的重要外强迫因子,其持续上升很可能是导致云南西南部降水突变减少的关键驱动因子。

关于云南省汛期前的降水变化的气候影响因子,以前的研究多侧重于太平洋海温变化,本研究发现热带西印度洋海温的重要作用,并揭示了其持续上升是导致云南西南部 5~6 月降水突变减少的关键驱动因子,这对开展云南省汛期前降水量的预报有重要的参考意义。

致谢:感谢云南气象局晏红明、段玮和杨素雨老师在本文研究过程中给予的宝贵建议和鼓励帮助!

参考文献(References)

- 许美玲,段旭,杞明辉等.2011.云南省天气预报员手册[M].北京:气象出版社,39-49.
- Xu Meiling, Duan Xu, Qi Minghui, et al. 2011. Handbook for Weather Forecasters in Yunnan Province [M]. Beijing: China Meteorological Press, 39-49.
- 晏红明,李清泉,王东阡.2018.云南雨季的时空特征及与大气环流变化的关系[J].热带气象学报,34(1):12-22.
- Yan Hongming, Li Qingquan, Wang Dongqian. 2018. Studies on spatial-temporal characteristics of yunnan rainy season and its relationship with atmospheric circulation[J]. Journal of Tropical Meteorology, 34(1): 12-22.
- 陶云,郑建萌,万云霞等.2006.云南雨季开始期演变特征分析[J].气候与环境研究,11(2):229-235.
- Tao Yun, Zheng Jianmeng, Wan Yunxia, et al.2006.Evolution Feature of the Rainy Season Onset Time of Yunnan Province[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),11(2):229-235.
- 晏红明.2022.海温异常对云南 5 月降水主要模态的影响[J].高原山地气象研究,2022,42(2):1-11.
- Yan Hongming.2022.Influence of SSTA on Main Precipitation Patterns in Yunnan in May[J].Plateau and Mountain Meteorology Research,2022,42(2):1-11.
- 马涛,张万诚,郑建萌,等.2017.水汽输送与云南 5 月降水关系研究[J].灾害学,32(2):109-116.
- Ma Tao, Zhang Wancheng, Zheng Jianmeng, et al. 2017. Research on the Relationship between Water Vapor Transportation and May Rainfall in Yunnan [J]. Journal of Catastrophology, 32(2): 109-116.
- 赵尔旭,罗冬莉,赵刚,等.2015.热带低频振荡对云南 5 月旱涝的影响[J].云南大学学报(自然科学版),37(4): 526-532.
- Zhao Erxu, Luo Dongli, Zhao Gang, et al. 2015. On the impact of the tropical low-frequency oscillation on the drought and flood of Yunnan in May [J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 37(4): 526-532.
- 李汀,严欣,琚建华.2012. MJO 活动对云南 5 月降水的影响[J].大气科学, 36 (6):1101-1111.
- Li Ting, Yan Xin, Ju Jianhua. 2012.Impact of MJO Activities on Precipitation in May over Yunnan[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 36 (6):1101-1111.

何媛, 杨若文, 文军, 等. 2013. 北半球春季雪盖对云南 5 月降水的影响[J]. 高原气象, 32 (6): 1712-1719.

He Yuan, Yang Ruowen, Wen Jun, et al. 2013. Influences of Snow Cover of the Northern Hemisphere on Precipitation of Yunnan Province in May [J]. Plateau Meteorology, 32(6): 1712-1719.

杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 2015. 近 60 年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识[J]. 地理科学, 35(10): 1333-1340.

Yang Jinhu, Zhang Qiang, Wang Jinsong, et al. 2015. Extreme and Persistent Feature of Drought and Flood of Southwest China in Past 60 Years[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(10): 1333-1340.

Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2016. Understanding and detecting super-extreme droughts in Southwest China through an integrated approach and index [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 142(694): 529- 535. doi:10.1002/qj.2593

Xiao C, Wu P L, Zhang L X, et al. 2018. Increasing flash floods in a drying climate over Southwest China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 35(8): 1094-1099. doi:10.1007/s00376-018-7275-7

胡学平, 王式功, 许平平, 等. 2014. 2009-2013 年中国西南地区连续干旱的成因分析[J]. 气象, 40(10): 1216-1229.

Hu Xueping, Wang Shigong, Xu Pingping, et al. 2014. Analysis on Causes of Continuous Drought in Southwest China During 2009-2013[J]. Meteorological Monthly, 40(10): 1216-1229.

高慧, 肖子牛, 赵亮. 2019. 21 世纪初澜沧江流域夏季降水的突变及相应的大气环流异常特征[J]. 气候与环境研究, 24(4): 513-524.

Gao Hui, Xiao Ziniu, Zhao Liang. 2019. A Study on the Abrupt Change of Summer Rainfall over Lancang River Basin and the Associated Atmospheric Circulation in the Early 21st Century [J]. Climatic and Environmental Research, 24(4): 513-524.

Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 82(2): 247-268

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.

Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al., 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons [J]. J Climate, 30(20): 8179-8205

黄嘉佑. 2000. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 135-139.

Huang Jiayou. 2000. Meteorological Statistics Analysis and Forecasting Methods[M]. Beijing: China Meteorological Press, 135-139.

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 69-72.

Wei Fengying. 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Techniques [M]. Beijing: China Meteorological Press, 69-72.

王惠平, 施春华, 郭栋等. 2020. 南亚高压强度与邻近地区垂直速度的相互依赖关系[J]. 地球物理学报, 63(9): 3240-3250

Wang Huiping, Shi Chunhua, Guo Dong, et al. 2020. The interdependent relationship between the intensity of the South Asia High and the vertical velocity in its adjacent region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(9): 3240-3250.

周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2006. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响[J]. 气象学报, 66(1): 59-70

Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2006. Moisture transport in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 66(1): 59-70.

张万诚, 汤阳, 郑建萌, 等. 2012. 夏季风水汽输送对云南夏季旱涝的影响[J]. 自然资源学报, 27(2): 293-301

Zhang Wancheng, Tang Yang, Zheng Jianmeng, et al. 2012. Impacts of the Vapor Transportation by Summer Monsoon on Drought and Flooding in Summer of Yunnan [J]. Journal of Natural Resources, 27(2): 293-301.