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 (in Chinese), 24(4): 513−524. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18159

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

高慧[1,2]　肖子牛[1]　赵亮[1]

1 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
2 中国科学院大学，北京 100049

摘　要　基于台站资料和三套格点化降水资料，分析了21世纪初澜沧江流域夏季降水的年代际变化特征，并着重研究了其在不同月份的特点以及可能带来的旱涝风险。分析结果发现：澜沧江流域夏季降水发生了显著的年代际变化，在2002年前后，澜沧江流域夏季降水量经历了由多到少的年代际突变，且该突变主要发生在流域的中、下游。同时，在夏季的不同月份，降水的年代际变化也具有不同的特点，主要表现为：初夏（6月）降水量明显减少，而盛夏（7月）降水略有增加，且7月降水呈现集中的趋势。夏季降水量在时间分布上的变化使得澜沧江流域中、下游湿季明显缩短，进而对流域旱涝灾害产生显著的影响，主要表现为：使流域6月干旱频率增加，初夏干旱风险加大，7月极端强降水的发生频率增加，盛夏洪涝风险加大。进一步对突变前、后的水平环流场进行对比分析发现：2002年以后，澜沧江流域6月对流层低层有偏北风异常，不利于西南季风的向北推进，对流层高层有辐合异常，不利于降水的发生。在孟加拉湾地区对流层低层有明显的偏东北风异常，高层有偏西风异常，表明孟加拉湾季风偏弱，不利于印度洋和孟加拉湾向流域的水汽输送，不利于降水的形成。在这样的高、低层异常环流系统的配合下，2002年以后6月降水量显著减少。

关键词　澜沧江流域　夏季降水　突变　时空变化特征
文章编号　1006-9585(2019)04-0513-12　　**中图分类号**　P426.6　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18159

A Study on the Abrupt Change of Summer Rainfall over Lancang River Basin and the Associated Atmospheric Circulation in the Early 21st Century

GAO Hui[1,2], XIAO Ziniu[1], and ZHAO Liang[1]

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

Abstract　In the early 21st century, the Lancang River Basin (LCRB) experienced an abrupt decrease in summer precipitation. Based on this conclusion, rainfall spatiotemporal variation characteristics and their effects on the frequency of droughts and floods were analyzed. The main results are as follows: The significant rainfall decreasing trend mainly occurred in June over the middle and low reaches of the LCRB, while the weak opposite trend mainly occurred in July over the middle and low reaches of the LCRB. These variations in characteristics led to the shortening of the LCRB wet

收稿日期　2018-12-11；**网络预出版日期**　2019-04-24
作者简介　高慧，女，1993年出生，硕士，主要从事极端降水研究。E-mail: gaohui16@mails.ucas.ac.cn
资助项目　中国科学院国际合作局对外合作重点项目GJHZ1729，中国科学院战略性先导科技专项XDA20060501、XDA20100304
Funded by　the External Cooperation Program of BIC, Chinese Academy of Sciences (Grant GJHZ1729), Chinese Academy of Sciences Strategic Priority Research Program (Grants XDA20060501 and XDA20100304)

period, which further contributed to an increase in droughts in June and the occurrence of heavy rain in July. The facts above indicate that in recent decades, the LCRB has experienced a notable increase in the risks of droughts in presummer and floods in midsummer. A further study of large-scale atmospheric circulation variation possibly associated with the remarkable rainfall decrease in June indicated that northerly anomalies existed over the lower troposphere of the LCRB, which hindered water vapor transport from the Indian Ocean and the Bay of Bengal (BOB). Moreover, cyclone anomalies in the higher troposphere of the LCRB formed an anomalous convergence, which was detrimental to the occurrence of rain. In addition, obvious northerly and westerly anomalies were present in the low and high troposphere over the BOB, respectively, indicating the monsoon in the BOB was weak, which hindered water vapor transport from the Indian Ocean and BOB as well. Due to such large-scale atmospheric circulation anomalies, the LCRB June rainfall has decreased significantly since 2002.

Keywords Lancang River Basin, Summer precipitation, Abrupt change, Spatiotemporal variation characteristic

1 引言

澜沧江流域地处青藏高原东南侧，海拔从上游的5000多米下降到下游的数百米，跨越5种气候带，气候十分复杂。澜沧江流域径流充沛，为周围的居民提供了丰富的水资源，同时，作为国际河流澜沧江—湄公河的上游，其气候变化对当地和下游国家的水文、生态、经济均具有重要的影响，而近年来澜沧江流域多次发生破纪录的干旱。2012年调查显示，水量丰富的澜沧江遭遇60年不遇的三季连旱。与此同时，流域下游洪涝灾害也频繁发生。如1998年7月思茅洪涝，2016年景东“7·2”特大暴雨，造成公路被毁，农田被淹，房屋倒塌，给流域周围的经济和生态带来了严峻的挑战。从灾害发生的状况可以看到，澜沧江流域降水的时空分布不均给这一地区造成了严重的灾害影响。由于全球变暖，全球水循环加快(Allen and Ingram, 2002)，极端降水事件的频率有可能受其影响而增加。Donat et al.（2017）的研究表明，过去的60年全球平均的极端降水强度增强。同时也有研究表明极端降水的空间差异性也比过去更强了（Alexander et al., 2006）。因此，研究流域降水的时空变化特征，具有重要的科学意义和实际应用价值。

虽然有关中国西南地区的旱涝情况已有不少研究，如杨金虎等（2015）、Wang et al.（2016）和Xiao et al.（2018）的研究指出，在全球变暖的背景下西南地区气候变干，但极端降水事件增加。但是对澜沧江流域旱涝的年代际变率研究还不多，结论也不太一致。如李斌等（2011）的研究指出，澜沧江流域自20世纪90年代以后，干季普遍出现变干趋势。但周婷等（2011）的研究则表明，流域干旱强度与覆盖范围随时空分布呈规律性变化，旱季呈显著下降趋势。史婉丽等（2013）指出澜沧江流域极端旱涝都有增加趋势，而邵明阳（2014）则指出，流域暴雨灾害天气出现频度总体来看呈现相对稳定状态，上升趋势不明显。因此，澜沧江流域干湿状况的变化特征还需要更多的研究来加以证实。同时，由于澜沧江流域干湿分明，夏季降水约占全年50%以上，其他季节贡献相对较小，因此以往对干旱的研究大部分集中在春旱和秋旱。实际上，夏季降水的多寡对雨季的旱涝情况有十分重要的贡献。其次，澜沧江流域南北空间跨度较大，不同的流域段气候迥异。流域夏季降水的逐月特征也不太一样，即使平均降水量不变，降水量时间分布形态的变化仍有可能对旱涝灾害产生重要影响。因此，对夏季旱涝发生规律的认识还有待深化，进一步研究澜沧江流域夏季降水的变化特征及其更为细致的空间特征是十分必要的。

为此，本文首先用统计学方法检测了澜沧江流域夏季降水在21世纪初发生的突变，然后通过时空对比，分析了该流域夏季降水在不同流域段的时间分布特点，以及降水突变在夏季不同月份的差异。最后对降水发生显著减少的月份在突变前后的环流场特征进行了对比分析，对造成降水显著减少的可能原因进行了初步探究。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所用的降水数据有4套：一套是由中国气象科学数据共享服务网（http://data.cma.cn/[2018-07-01]）提供的1961～2017年澜沧江流域19个气象站点的逐日降水资料，它是本文使用的主要降水

资料。为避免站点分布不均匀和站点迁移等台站资料问题对研究结果产生的影响，使用另三套格点降水资料进行对比验证。一套是NOAA气候预测中心（CPC）基于全球标准测站插值得到逐日降水资料（Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation, GUGBADP; https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html[2018-07-01]），时间范围为1979～2017年，水平分辨率为0.5°（纬度）×0.5°（经度），该资料使用了全球超过3万个气象站数据，经最优插值目标分析方法得到（Xie et al., 2007），一套是结合了卫星和站点观测资料的NOAA气候数据中心（NCDC）提供的逐日降水资料(PERSIANN Precipitation Climate Data Record, PERSIANN-CDR)，时间范围为1983～2017年，水平分辨率为0.25°（纬度）×0.25°（经度）。其使用了人工神经网络算法(Ashouri et al., 2015)。另外一套是由英国东英吉利（East Anglia）大学的气候研究中心（Climatic Research Unit, CRU）基于全球气象站点观测数据构建的逐月降水资料(CRU TS; http://doi.org/10/gcmcz3[2018-07-01])，该资料首先选择1961～1990年的气候平均值计算整个时间段各站点的异常值，通过薄板样条插值法将异常值插值到格点值，再叠加上气候平均值最终得到格点资料（Harris et al., 2014），数据时间覆盖率为1961～2016年，水平分辨率为0.5°（纬度）×0.5°（经度）。

环流场和气温场资料使用的是NCEP/NCAR的逐月再分析资料，时间范围为1961～2017年，空间分辨率为0.25°（纬度）×0.25°（经度）。

由图1可以看到，澜沧江流域南北跨度大（22.5°N～31°N，全长约4909 km）。表1是本文所选气象站点的基本信息，从各站的海拔高度来看，海拔最低的站点（景洪，下游）高度不足600 m，海拔最高的站点（杂多，上游）超过4000 m，流域地形十分复杂。因此根据澜沧江的河道与水系特征（何大明，1995），将流域分为3部分分别研究：昌都以上地区为上游（31°N～32.9°N），属青藏高原，河谷宽广，下蚀作用微弱，为低温少雨的青藏高原高寒气候区；昌都以南至大理为中游（25.4°N～31°N），属高山峡谷区，细长狭窄，孟加拉湾的暖湿气流沿横断山谷地区由南向北向该区输送，常年较为湿润；大理以南为下游（22.58°N～25.4°N），地势开阔平坦，有来自印度洋和孟加拉湾丰沛的水汽输送，既暖又湿。为了避免站点分布不均匀对研究结果的影响，本文在计算全流域相关物理量时，采用的是对上、中、下游对应物理量的值按照不同流域段的面积权重进行加权平均的结果。

表1 所选澜沧江流域观测站基本信息

Table 1 Basic information of the weather stations over the Lancang River Basin (LCRB)

站名	省份	海拔高度/m	纬度	经度	夏季降水贡献
杂多	青海	4066.4	32.9°N	95.3°E	61.34%
玉树	青海	3716.9	33.02°N	97.02°E	59.05%
囊谦	青海	3643.7	32.2°N	96.48°E	62.49%
昌都	西藏	3315	31.15°N	97.17°E	61.16%
德钦	云南	3319	28.48°N	98.92°E	49.38%
香格里拉	云南	3276.7	27.83°N	99.7°E	61.44%
贡山	云南	1583.3	98.67°N	27.75°E	33.99%
维西	云南	2326.1	27.17°N	99.28°E	44.40%
丽江	云南	2445	26.85°N	100.18°E	64.74%
大理	云南	1990.5	25.7°N	100.19°E	54.3%
保山	云南	1652.2	25.12°N	99.18°E	48.94%
景东	云南	1162.3	24.47°N	100.87°E	53.51%
临沧	云南	1502.4	23.88°N	100.08°E	56.28%
澜沧	云南	1054.8	22.57°N	99.93°E	55.9%
景洪	云南	582	22°N	100.78°E	51.82%
思茅	云南	1302.1	22.78°N	100.97°E	56.35%
勐腊	云南	633.4	21.48°N	101.57°E	54.99%
江城	云南	1120.5	22.58°N	101.85°E	56.12%

2.2 分析方法

本文检测夏季降水年代际突变时所用的方法是Lepage检验方法（Lepage, 1971；魏凤英，2007）。Lepage方法是一种无分布双样本的非参数检验方法。基本思想是视序列中每个点前后的两个子序列为两个独立总体，如果两子序列有显著差异，则认为在该点对应的时刻发生突变。

本文描述干旱所用的是由Vicente-Serrano et al.（2010）提出的标准化降水蒸散发指数（Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI），时间尺度为12个月。其计算方法是首先计算不同时间尺度的累积月水分亏缺量（即月降水量与月潜在蒸发量之差），再采用三参数log-logistic型概率分布函数来拟合月水分亏缺量的累积序列，最后进行正态标准化处理。SPEI能抓住影响干旱的主要因素，只需降水量和气温即可求得，计算简单，是一个理想的干旱指数（熊光洁等，2013），同时拥有多尺度特征和能够衡量温度变化对干旱影响的双重优

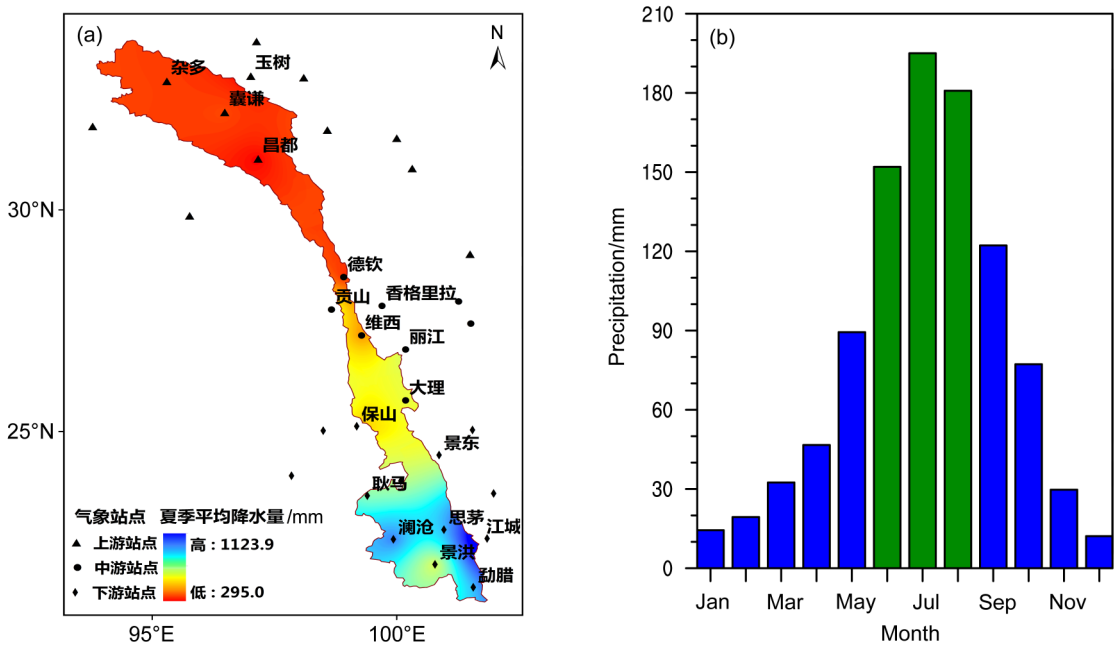

图1 澜沧江流域气候态（1961～2017年）（a）夏季降水量空间分布和（b）降水量逐月变化

Fig. 1 (a) Spatial distribution of summer precipitation amount and (b) monthly variation of precipitation over the Lancang River Basin (LCRB)

点。针对中国地区该指数的适用性已有大量研究（李忆平和李耀辉，2017；杨庆等，2017）。王林和陈文（2012，2014），熊光洁等（2014）的研究均表明SPEI指数对西南地区的干旱有较好的表征能力。

3 结果分析

3.1 澜沧江流域夏季降水的年代际变化

图1a是由澜沧江流域19站（有文字标注）及周围15站（无文字标注）插值得到的流域夏季降水量空间分布图。由图可见，流域夏季降水量自北向南逐渐增加，从最北部不到300 mm增加到南部超过1000 mm，气候差异明显，因此将流域分区讨论是十分有必要的。从图1b可以看到，夏季（6～8月）是一年中降水最多的时段。从台站来看，各站夏季降水贡献除德钦、贡山、维西、保山4站不足50%，其余站点均超过50%，丽江更是高达61.44%（表1），所有台站平均的夏季降水贡献为53.52%。因此，夏季是流域一年中降水最集中的季节。一方面，其降水量多少不仅决定当季径流的丰枯，也对随后的秋季旱涝产生影响。另一方面，其降水的集中程度决定了洪涝灾害的危险程度。因此从年代际尺度的降水量变化和次季节尺度强降水事件的变化两个方面讨论澜沧江流域的夏季降水具有重要意义。

图2a给出夏季澜沧江19站平均的降水量距平序列。可以看出，21世纪以来，流域夏季降水量基本处于年代际少雨位相，但这种变化是否存在突变，需要进行统计检验。使用Lepage突变检验法对澜沧江流域19个气象站夏季降水进行检验（结果如图2b）。可以看出，1992年和2002年的Lepage统计量为极大值，且通过了显著性检验，表明流域夏季降水在1992年和2002年发生了年代际突变。结合图2a的降水量时间序列可知，流域夏季降水在1992年由少雨位相向多雨位相转变，2002年由多雨位相向少雨位相转变。由于Wang et al.（2017）已经研究了西南地区1994年发生的年代际变化，本文将重点关注2002年左右的年代际突变问题。

为了验证该套站点资料分析结果的可信度，使用另外3套降水资料（GUGBADP、PERSIANN-CDR、CRU TS）进行对比验证，发现四者的时间序列基本一致（图略）。此外，对照4套夏季降水资料的突变检验结果可以看到，虽然对于整个流域的夏季降水量（图2d），除了站点资料，另外3套对照资料均未显示在2002年有突变，但对中、下游合成的夏季降水量（图2e）来说，4套资料的突变检验结果均显示在2002年发生了年代际突变，

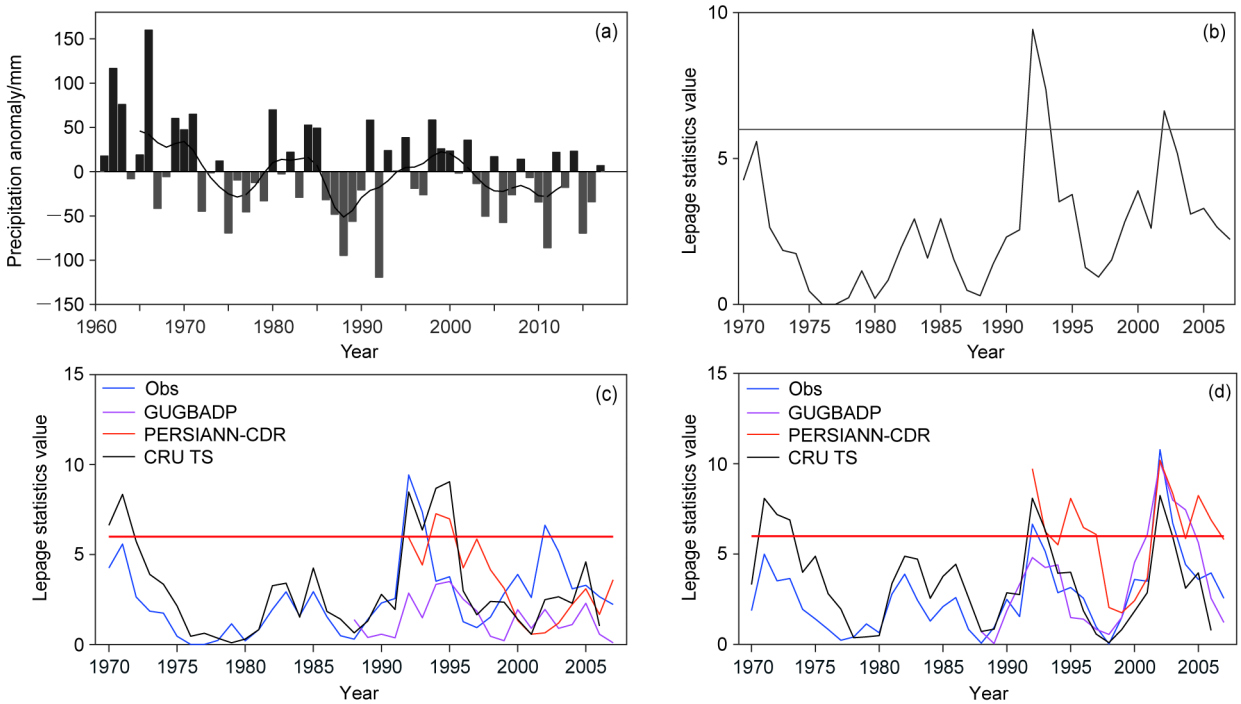

图 2　1961～2017 年澜沧江流域（a）19 站平均的夏季降水量距平（黑色曲线为 9 年滑动平均的结果）及其（b）Lepage 突变检验，（c）、（d）4 套不同降水资料的澜沧江流域夏季降水的突变检验结果，其中（c）为全流域夏季降水量的突变情况，（d）为中、下游夏季降水量合成的突变情况。（b）、（c）、（d）中横线代表 95% 信度检验线

Fig. 2　(a) Temporal series of the LCRB summer precipitation anomalies with a 9-year sliding average (black curve line) and (b) their Lepage test for the LCRB summer precipitation. The Lepage test for summer precipitation over (c) the whole basin and (d) the middle–low reaches of the LCRB. In Fig. 2b, Fig. 2c, and Fig. 2d, the horizontal line indicate the 95% confidence level

因此认为基于站点资料得出的年代际突变结论是可信的。

同时也使用站点资料对澜沧江流域春、秋、冬季以及全年的降水量进行了突变检验，但没有发现它们有通过检验的突变点（图略）。因此，该流域降水的年代际减少主要发生在夏季，而夏季是该流域雨季的最主要时段，因而夏季降水的年代际突变是非常值得关注的变化特征。

3.2　澜沧江不同流域段夏季降水的年代际变化

由于澜沧江流域南北跨度很大，受到不同的天气系统影响，在不同的流域段夏季降水的变化是否具有一致的年代际变化？为了进一步考察澜沧江不同流域段夏季降水的年代际突变特征，使用 Lepage 检验法对流域上、中、下游夏季降水分别进行突变检验（如图 3）。图 3 分别给出了澜沧江上、中、下游 1961～2017 年夏季降水量距平序列，从图 3a 中可以直观地看到，澜沧江上游夏季的降水年代际变化不显著，2010 年以后虽然降水负异常年较多发生，但没有明显的干化趋势。澜沧江的中游和下游（图 3c、3e）具有显著的不同周期的年代际变化特征，但两者均在 2002 年以后呈现出明显的降水负异常趋势。图 3b、d、f 分别给出了流域上、中、下游夏季降水的 Lepage 突变检验结果，结果显示，澜沧江流域中游和下游地区的 Lepage 统计量均在 2002 年出现了极大值，并且超过了 0.05 的显著性水平。因此，澜沧江流域夏季降水在 2002 年的突变主要发生在中、下游地区，这与前述另外 3 套降水资料的突变检验结果一致。中、下游降水量发生了从高于均值到低于均值的转变，即发生了由异常多雨向异常少雨时期的年代际突变。

3.3　不同流域段降水的年代际变化及其在次季节尺度的分布特征

由上述分析可知，澜沧江流域夏季降水在不同流域段具有不同的年代际变化特征，自 2002 年以后，其中游和下游地区发生了一次突变而进入显著的少雨时期。是整个夏季降水都发生了突变，还是在夏季的不同阶段有所不同？为此，进一步考察澜

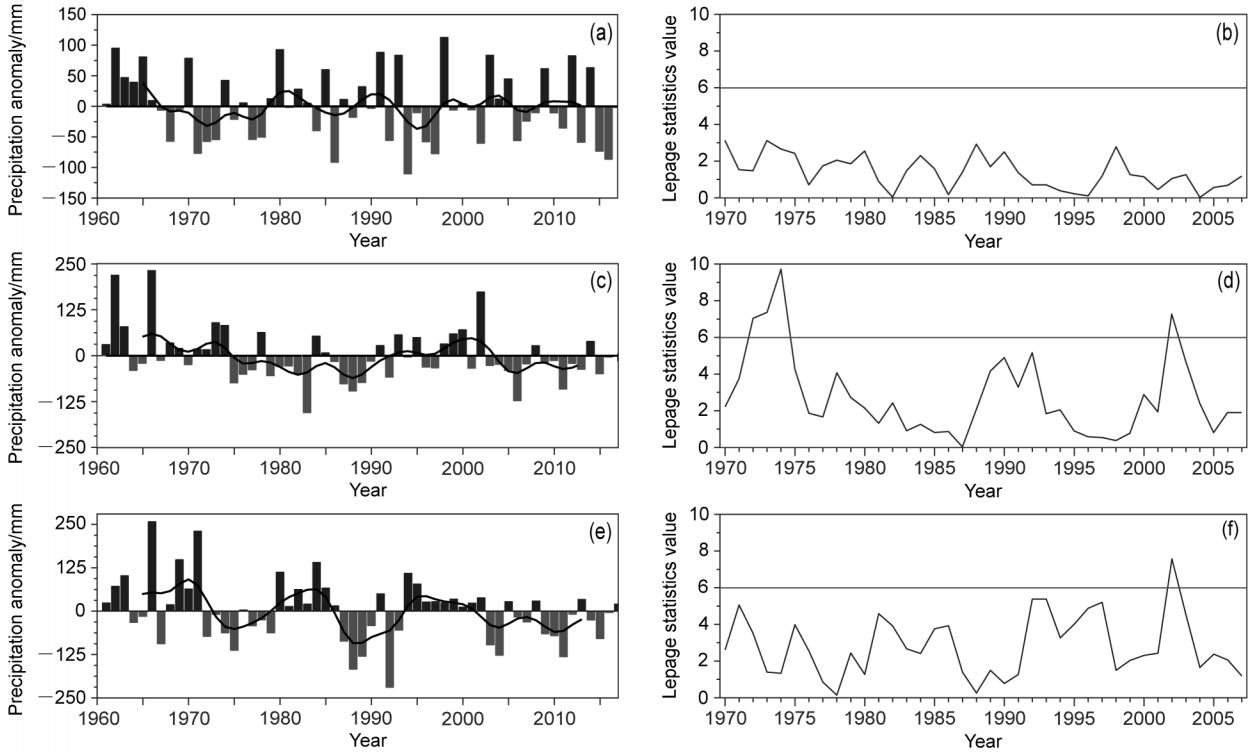

图3 澜沧江流域（a、b）上游、（c、d）中游、（e、f）下游1961～2017年夏季降水量距平序列（左列，黑色曲线为9年滑动平均的结果）及突变检验（右列，横线表示0.05的显著性水平）

Fig. 3 Temporal anomalies (left panel, black curves denote 9-year sliding averages) and Lepage test (right panel, horizontal lines denote 95% confidence levels) for summer precipitation over (a, b) the upper reaches, (c, d) the middle reaches, and (e, f) the low reaches of the LCRB

沧江流域夏季降水发生突变的季节内特征。图4a、4b、4e、4f中黑、蓝、红色线分别给出澜沧江流域上、中、下游及全流域气候态（1961～2017年）、2002年前（1961～2002年）和2002年后（2003～2017年）平均日降水量的逐候演变情况，其中逐候资料由逐日资料平均得出。图4c、4d、4g、4h中填色部分为对应流域段平均日降水的候—年演变情况。从图4a中可以看到，上游日降水量在2002年前后均维持双峰结构，主、次峰分别在6月底7月初和8月底9月初，日最大降水也对应发生在这两个时段。其中，与2002年相比，2002年后春季降水量有微弱增加，而7月中旬到8月中旬降水量减少。若按1 mm/d等值线划分上游的干、湿季，上游湿季自1961年以来基本维持在5～10月（如图4c），无明显变化趋势。与上游明显不同，中游降水量2002年以前在7月有一主峰，在3～4月、6分别有一个次峰。2002年以后，位于7月的主峰更加明显且提前出现，6月的次峰大幅减弱，而5月则出现了一个新的雨峰。图4d中2002年以后两条未闭合的4 mm/d等值线包围的时段逐渐缩短，表明湿季有缩短趋势。此外，从图4d还可以注意到，2002年之前夏季极大值雨量出现的时间比较分散，2002年之后出现时间更加集中于7月，这些结果表明中游湿季缩短且强降水更加集中。下游降水随时间的变化为单峰结构，峰值在7月。2002年以后，5月中旬到7月上旬降水量减少，其中6月减少最为明显，而同时7月中旬降水量增加，表明了湿季缩短，最大降水的发生日期也逐渐集中在7月中旬（图4e、4g）。全流域主要表现为中游和下游的贡献，其变化状况也表现为6月降水明显减少、7月中旬有所增加。同时夏季雨峰更明显，降水更集中。这与Xiao et al.（2018）研究指出的西南干旱气候背景下洪涝事件增多的结论一致。

澜沧江为南北纵向河流，为进一步探究突变前后夏季降水变化在流域的空间分布，分析了每日平均降水量2002年后与2002年前差值随纬度和时间的变化特征，图5a给出了降水差值的逐侯序列和时间（侯）—纬度演变图，从图5a可以看到，每日平均降水量差异呈现增减交错的余弦式振荡特征，这种振荡特征在5～9月最明显，5月中旬和7

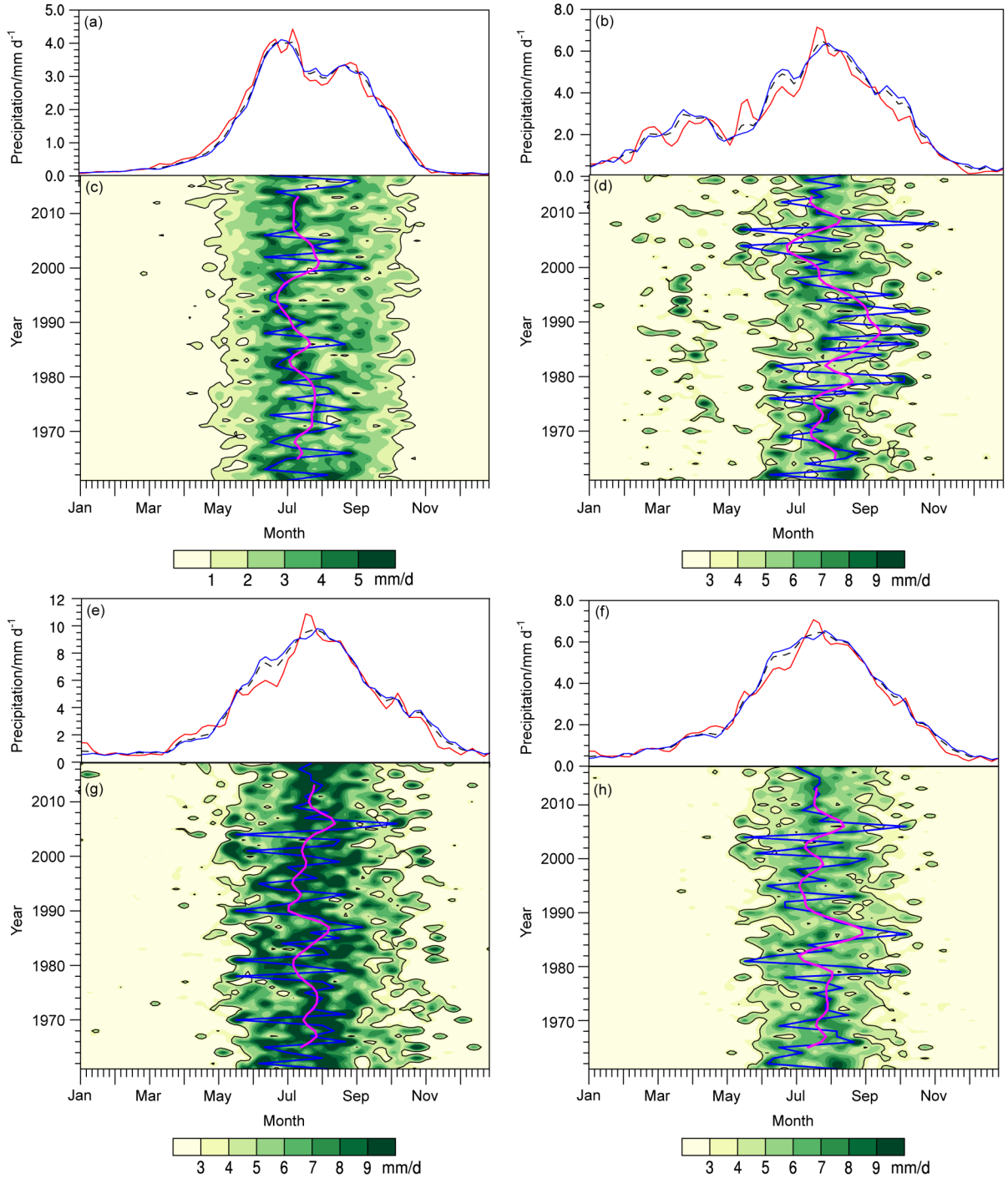

图4 （a）上游1961～2017年（黑色虚线）、1961～2002年（蓝色实线）和2003～2017年（红色实线）经过候平均的日降水量的逐候演变，（c）上游平均日降水量的候—年演变图（填色为对应的日降水量，黑色曲线为1 mm/d等值线，蓝、紫色实线分别为每年5～10月发生最大降水量所在的候及其9年滑动平均结果）；（b、d）、（e、g）、（f、h）同（a、c），但分别为中游、下游及全流域，且黑色等值线的数值变为4 mm/d

Fig. 4 (a) Pentad evolution of average daily precipitation over the upper reaches of the LCRB in 1961–2017 (black dashed line), 1961–2002 (blue solid line), and 2003–2017 (red solid line); (b) pentad–year section of average daily precipitation over the upper reaches of the LCRB (shadings indicates daily precipitation; the black curves denote 1 mm/d contours, the blue and purple solid lines denote the maximum precipitation occurring from May to Oct each year and its 9-year running average); (b, d), (e, g), (f, h) are the same as (a, c) but for the middle reaches, low reaches, and whole basin of the LCRB, respectively, and the 1 mm/d contours are replaced by 4 mm/d contours

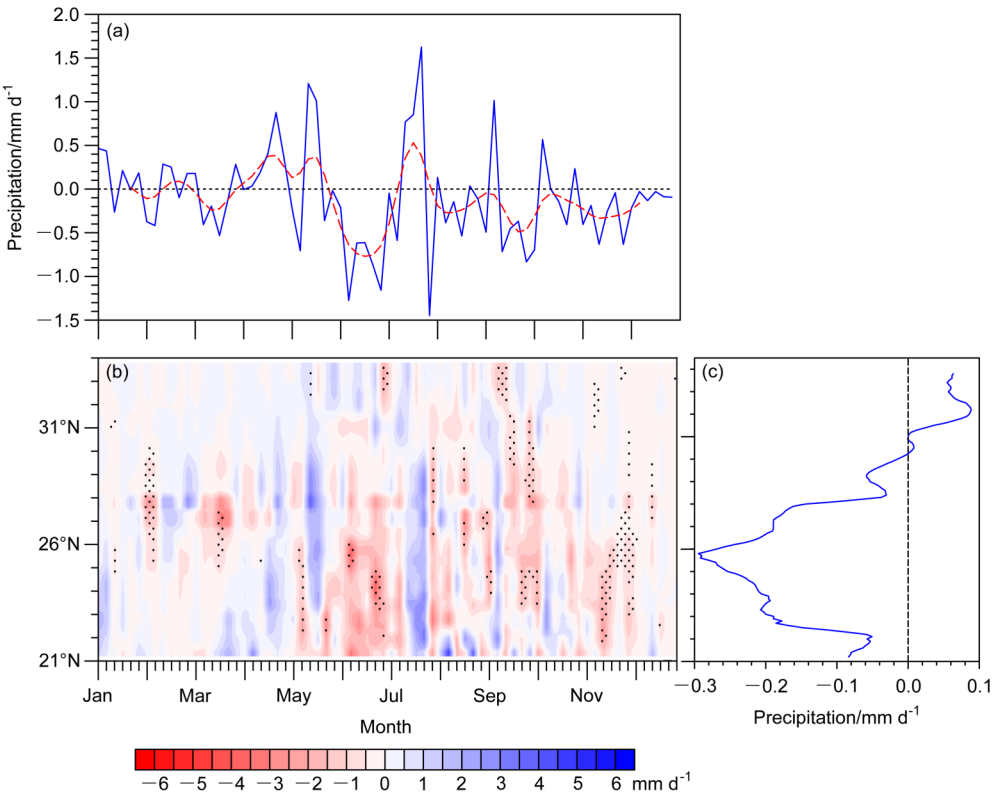

图5 （a）全流域平均、（b）不同纬度的2002年后与2002年前澜沧江流域平均日降水量差值的逐侯变化图，（c）日降水量全年平均差值随纬度变化的廓线

Fig. 5 The differences in pentad evolution of daily precipitation between 2003–2017 and 1961–2002 over (a) the whole basin and (b) different latitudes of the LCRB, and (c) the annual average differences of daily precipitation at different latitudes

月中旬增加，而6月到7月上旬显著减少，9月也明显减少，而8月变化不大。从时间—纬度图（图5b）也可以清楚地看到，2002年以后中游5月中旬降水量增加，下游每日平均降水量在6月减少而7月中旬增加，其中6月减少通过了显著性检验。从全年平均降水量差值随纬度的变化情况（图5c）进一步发现，流域上游每日平均降水量增加，在32.5°N增加最明显，中、下游每日平均降水量整体减少，在26°N减少最为明显。

3.4 澜沧江流域夏季降水年代际变化对旱涝的影响

从前面的结果可以看到，与2002年前相比，2002年后流域夏季降水的主要特征为6月降水显著减少，7月则表现为降水时间分布更为集中，而8月降水量的变化不大。因此，主要关注6月和7月降水的变化对夏季旱涝的影响。以下将进一步分析6月干旱指数以及7月极端降水频率的变化情况。图6左列分别给出澜沧江流域上、中、下游及全流域6月的干旱指数从1961～2017年的时间序列。从图中可以看到，澜沧江上游基本维持年际振荡，但中、下游自2002年以后SPEI为显著的负异常值，表明中、下游的干旱化明显。按照SPEI的等级划分，SPEI低于−1即可认为发生了中度干旱。在1961～2002共42年的时间里，中游（图6c）分别在1982年和1999年6月发生了2次中度干旱，而在2003～2017年共15年的时间里，已经发生了5次中度以上程度的干旱，即6月干旱频率增加。下游（图6e）在2002年以前，只有1979年的6月发生过一次中度干旱，在2002以后的15年里发生了4次中度以上程度的干旱，干旱频率也增加。从整个流域看（图6g），2002年以后SPEI基本为负异常，因此全流域在6月面临的干旱风险明显加重。为考察7月降水集中所带来的雨涝风险，根据站点历史降水资料，将日降水的95百分位数定为极端降水阈值，将7月大于该阈值的日降水定义为极端降水来考察雨涝风险的变化。从图7a可以看到，上游极端降水发生频次的变化呈现振荡特征，没有明显的趋势。而中、下游地区（图7d、7f）极端降水频次在19世纪70年代和90年代分别有过两次明显的

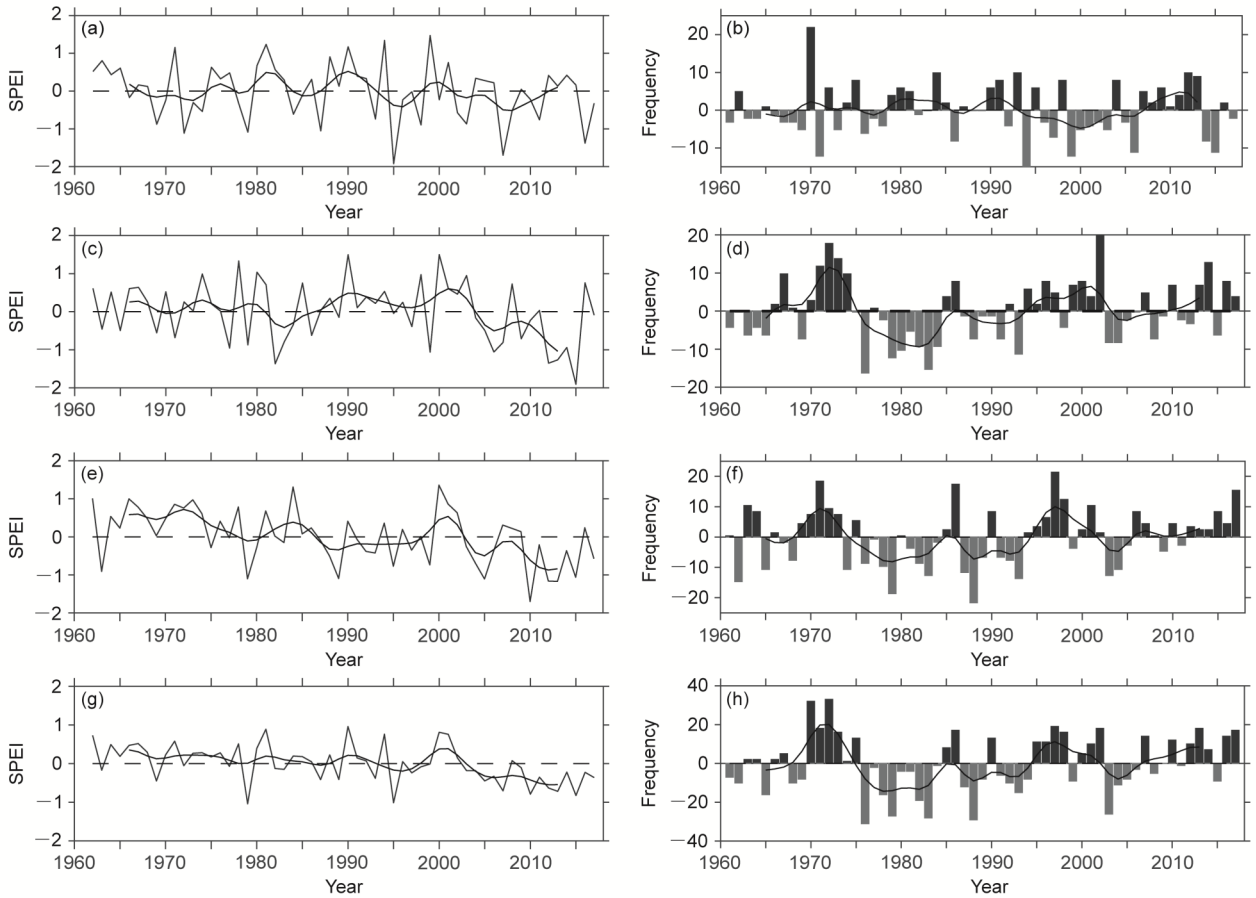

图6　澜沧江流域（a、b）上游、（c、d）中游、（e、f）下游及（g、h）全流域6月SPEI（左列）、7月极端降水频率距平（右列）的时间序列。黑色实线为9年平滑值

Fig. 6　Time series of June Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (left panel) and frequency anomalies of Jul extreme precipitation (right panel) over (a, b) the upper reaches, (c, d) the middle reaches, (e ,f) the low reaches, and (g, h) whole basin of the LCRB. The black curve lines indicate 9-year running averages

正异常时期，自2002年以后，强降水发生频率均为显著增加趋势，因此流域面临的洪涝灾害风险总体增加。

3.5　年代际变化前后的大尺度环流变化特征

由于澜沧江流域夏季降水的显著减少主要来自6月降水变化的贡献，因此，主要考察了与流域6月降水量2002年以后显著减少相联系的大气环流异常。首先定义6月降水量低（高）于气候态0.5个标准差的年份为干（湿）年，接着分析了澜沧江流域干、湿年高低层环流场的差异，如图7a、7c分别给出了干、湿年6月平均的700 hPa和200 hPa的合成场。从中可以看到，在干年澜沧江流域对流层低层有偏北风异常，不利于西南季风的向北推进，对流层高层有辐合异常，不利于降水的发生。在孟加拉湾地区对流层低层有明显的偏东北风异常，高层有偏西风异常，孟加拉湾季风偏弱，不利于印度洋和孟加拉湾向流域的水汽输送，进而不利于降水的形成。此外，做了2002年后与2002年前高低层水平风场的合成场，如图7b、7d，可以看到，高、低层的合成场与对应的干湿年的合成场基本一致，表明2002年以后澜沧江流域6月的环流场不利于降水的形成和发生。

为了深入考察孟加拉湾季风与澜沧江流域6月降水的关系，定义6月孟加拉湾地区（0°～20°N，80°E～100°E）700 hPa与200 hPa的纬向风差值（$u_{700}-u_{200}$）经过标准化的值为孟加拉湾季风指数(Bay of Bengal Monsoon Index, BOBMI)，求得它与澜沧江流域6月降水的相关系数为0.5（信度超过99%），表明二者具有高度正相关关系。从二者的时间演变序列（图7e）也可以看出，二者的变化

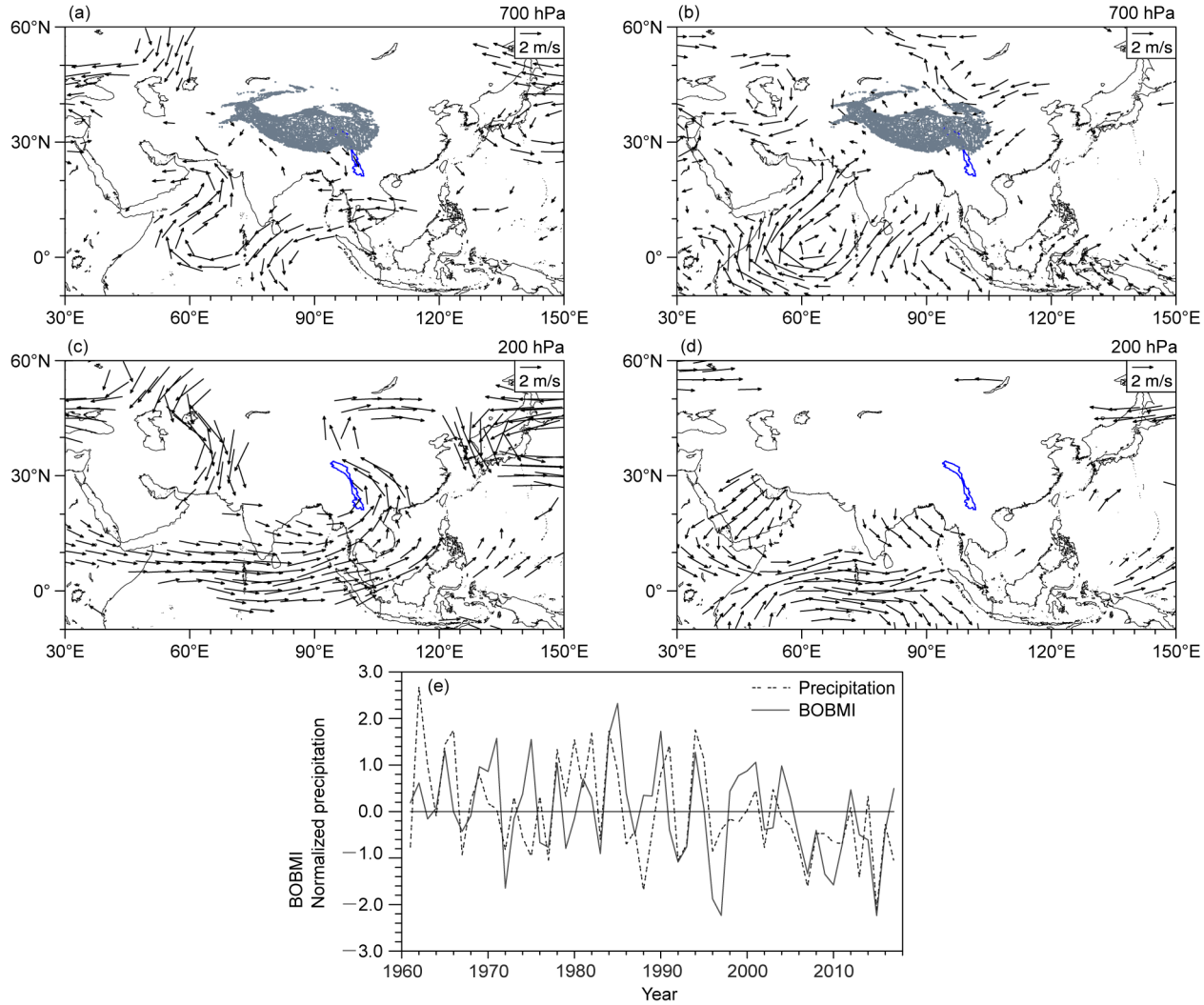

图7 澜沧江流域6月（a、c）偏干年与偏湿年水平风的合成场（黑色箭头，通过95%的信度检验），（b、d） 2003～2017年与1961～2002年水平风的差值场（黑色箭头，通过95%的信度检验）；（e）标准化的澜沧江流域6月降水与孟加拉湾季风指数时间序列

Fig. 7 (a, c) Composite maps of Jun horizontal circulation (black arrows, above the 95% confidence level) between dry years and wet years and (b, d) differences between 2003–2017 and 1961–2002; (e) time series of normalized Jun precipitation over LCRB and Bay of Bengal Monsoon Index (BOBMI)

具有高度的相似性。2002年以后，孟加拉湾季风指数和降水均有有减小趋势，大部分年份处于负位相，表明孟加拉湾季风处于偏弱位相。因此孟加拉湾季风偏弱是导致2002年以后澜沧江流域6月降水减少的重要原因。

4 结论与讨论

夏季是澜沧江流域降水最集中的季节，夏季降水的变化对于流域水资源等方面的影响无疑是十分重要的。为探明流域夏季降水的变化，本文先采用统计学方法找到降水的年代际突变点，然后对比分析了夏季不同月份降水量的年代际变化差异及其对旱涝灾害的影响，最后通过突变前后环流场的对比探讨了其可能原因。主要得到以下结论：

（1）澜沧江流域夏季降水在2002年左右经历了由一次由多变少的年代际突变。此次突变主要发生在流域的中、下游。

（2）在夏季的不同月份，流域的降水量变化情况不同。具体来说，年代际突变后流域中、下游夏季前期（6月）降水量显著减少，导致湿季缩短，盛夏（7月）降水的主要变化是强降水时段更加集中。

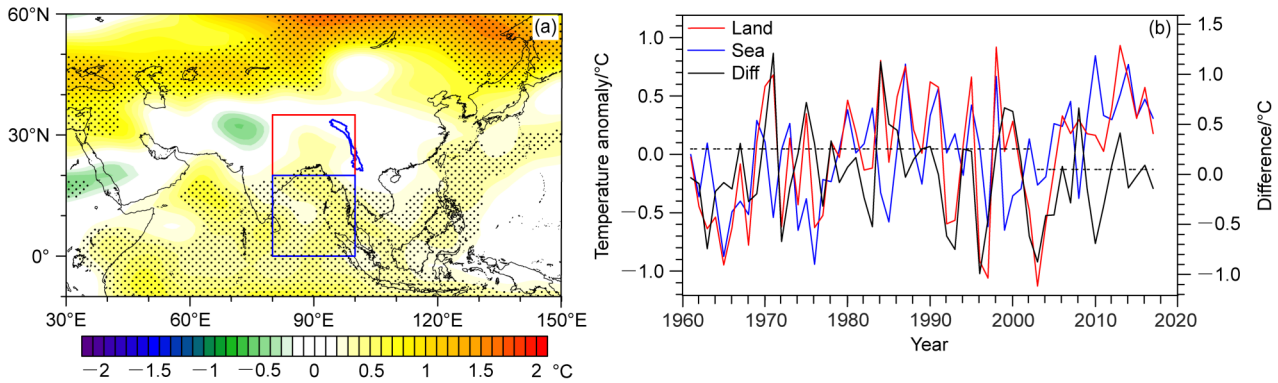

图 8　（a）亚洲地区 2002 年后与 2002 年前 6 月 500 hPa 气温的差值场（填色；红框代表孟加拉湾北侧大陆，蓝框代表孟加拉湾；带点区域表示气温变化通过 95% 的置信水平）；（b）孟加拉湾北侧大陆（红色实线）、孟加拉湾（蓝色实线）6 月 500 hPa 气温的距平序列及二者的差值序列（黑色实线；黑色虚线分别代表 1961～2002 年和 2003～2017 年温差的均值）

Fig. 8　(a) Differences of Jun 500-hPa air temperature (shadings, red rectangle denotes north side continent of Bay of Bengal and blue rectangle denotes Bay of Bengal; areas with dots are above 95% confidence level); (b) time series of 500-hPa Jun air temperature anomaly in the north side continent of Bay of Bengal (red solid line), Bay of Bengal (blue solid line) and their differences (black solid line; black dotted lines denote the air temperature mean anomaly of 1961–2002 and 2003–2017)

空间上，降水量减少最明显区域的纬度在 26°N（即中、下游交界区），增加最明显的纬度在 32.5°N（即上游）。就极端事件而言，中、下游地区夏季干旱和洪涝灾害风险都加大，其中 6 月中、下游地区干旱频率增加，7 月极端强降水频率增加。

（3）对比澜沧江流域 2002 年前、后 6 月的水平环流场发现，2002 年以后澜沧江流域对流层低层有偏北风异常，不利于西南季风的向北推进，对流层高层有辐合异常，不利于降水的发生。在孟加拉湾地区对流层低层有明显的偏东北风异常，高层有偏西风异常，孟加拉湾季风偏弱，不利于印度洋和孟加拉湾向流域的水汽输送，进而不利于降水的形成。这些高低层的异常系统相互配合，致使 2002 年以后 6 月降水量显著减少。

综上所述，本文揭示了近年来澜沧江中、下游流域的年代际突变和干旱化趋势，夏季降水的减少主要是 6 月降水量显著减少所致。与此同时，澜沧江流域夏季极端事件增多、雨量集中，其中 7 月强降水频率增加明显。澜沧江是东南亚重要国际河流的上游，近年来澜沧江—湄公河流域的气候变化问题受到越来越多的关注，本文这些特征分析只局限于上游的澜沧江，在其下游湄公河流域是否也存在这些特征，需要进一步研究。

此外，由于孟加拉湾季风的减弱可能与海陆上空热力对比的变化有关，因此，我们对 2002 年以后的热力变化对 6 月孟加拉湾季风减弱的可能影响进行了探讨。图 8a 是 2002 年前、后 6 月 500 hPa 热力场的合成场，打点区域代表气温变化通过了 95% 的信度检验。由图可见，2002 年以后，亚洲北部大陆（40°N 以北）及热带印度洋上空增温明显，而亚洲中、南部（20°N～40°N）增温不明显甚至有所下降，表明热带印度洋比其北部次大陆升温快，这可能不利于季风的形成。进一步选取孟加拉湾北侧大陆（20°N～35°N，80°E～100°E）与孟加拉湾（0°～20°N，80°E～100°E）的温度变化进行分析。如图 8b，红、蓝色实线分别是上述两个区域的气温距平序列，黑色是二者的差值序列，两条黑色虚线分别代表 1961～2002 年和 2003～2017 年气温差值的平均水平。可以直观地看到，孟加拉湾及其北侧大陆在 2002 年以后气温均呈明显的上升趋势，气温均值明显高于气候态，表明二者所代表的区域在变暖。值得注意的是，2002 年以后二者的差值有所减小，差值的均值由 2002 年以前的 0.3℃变为不足 0.1℃，表明孟加拉湾地区的陆海温差减小，因此导致孟加拉湾季风处于偏弱状态。

参考文献（References）

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res., 111(D5): D05109. doi:10.1029/2005JD006290

Allen M R, Ingram W J. 2002. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle [J]. Nature, 419(6903): 224–232. doi: 10.1038/nature01092

Ashouri H, Hsu K L, Sorooshian S, et al. 2015. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 96(1): 69–83. doi:10.1175/BAMS-D-13-00068.1

Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. 2017. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions [J]. Nature Climate Change, 6(5): 508–513. doi:10.1038/nclimate2941

Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—The CRU TS3.10 dataset [J]. International Journal of Climatology, 34(3): 623–642. doi: 10.1002/joc.3711

何大明. 1995. 澜沧江——湄公河水文特征分析 [J]. 云南地理环境研究, 7(1): 59–73. He Daming. 1995. Analysis of hydrological characteristics in Lancang–Mekong River [J]. Yunnan Geographic Environment Research (in Chinese), 7(1): 59–73.

Lepage Y. 1971. A combination of Wilcoxon's and Ansari-Bradley's Statistics [J]. Biometrika, 58(1): 213–217. doi:10.2307/2334333

李斌, 李丽娟, 李海滨, 等. 2011. 1960～2005年澜沧江流域极端降水变化特征 [J]. 地理科学进展, 30(3): 290–298. Li Bin, Li Lijuan, Li Haibin, et al. 2011. Changes in precipitation extremes in Lancang River Basin, 1960–2005 [J]. Progress in Geography (in Chinese), 30(3): 290–298. doi:10.11820/dlkxjz.2011.03.005

李忆平, 李耀辉. 2017. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展 [J]. 干旱气象, 35(5): 709–723. Li Yiping, Li Yaohui. 2017. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 35(5): 709–723. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0709

邵明阳. 2014. 澜沧江流域干旱特征与海温异常关联性研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 28–29. Shao Mingyang. 2014. Research of the drought characteristics in the Lancang River Basin and the association with SST anomalies [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 28–29.

史婉丽, 禹雪中, 廖文根. 2013. 澜沧江流域干旱气候变化特征及影响因素分析 [J]. 水电能源科学, 31(3): 1–5. Shi Wanli, Yu Xuezhong, Liao Wengen. 2013. Variations of drought and influencing factors in Lancang River Basin [J]. Water Resources and Power (in Chinese), 31(3): 1–5.

Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J l, et al. 2010. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index [J]. Journal of Hydrometeorology, 11(4): 1033–1043. doi:10.1175/2010JHM1224.1

王林, 陈文. 2012. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征 [J]. 气象科技进展, 2(4): 21–26. Wang Lin, Chen Wen. 2012. Characteristics of multi-timescale variabilities of the drought over last 100 years in Southwest China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2(4): 21–26. doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.04.003

王林, 陈文. 2014. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析 [J]. 高原气象, 33(2): 423–431. Wang Lin, Chen Wen. 2014. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(2): 423–431. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00048

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

Wang L, Huang G, Chen W, et al. 2017. Wet-to-dry shift over Southwest China in 1994 tied to the warming of tropical warm pool [J]. Climate Dyn., 2018(3): 3111–3123. doi: 10.1007/s00382-018-4068-8

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 66–69. Wei Fengying. 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Predicition Technology (2nd ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 66–69.

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

Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. Journal of Hydrometeorology, 8(3): 607–626. doi:10.1175/JHM583.1

熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 2013. 基于SPEI的中国西南地区1961～2012年干旱变化特征分析 [J]. 气候变化研究进展, 9(3): 192–198. Xiong Guangjie, Zhang Bokai, Li Chongyin, et al. 2013. Characteristics of drought variations in Southwest China in 1961–2012 based on SPEI [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 9(3): 192–198. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.03.006

熊光洁, 王式功, 李崇银, 等. 2014. 三种干旱指数对西南地区适用性分析 [J]. 高原气象, 33(3): 686–697. Xiong Guangjie, Wang Shigong, Li Chongyin, et al. 2014. Analysis of applicability of three drought indices for drought events in Southwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(3): 686–697. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00007

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 (in Chinese), 35(10): 1333–1340.

杨庆, 李明星, 郑子彦, 等. 2017. 7种气象干旱指数的中国区域适应性 [J]. 中国科学: 地球科学, 47(3): 337–353. Yang Qing, Li Mingxing, Zheng Ziyan, et al. 2017. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China [J]. Science China Earth Sciences (in Chinese), 60(4): 745–760. doi: 10.1007/s11430-016-5133-5

周婷, 李传哲, 于福亮, 等. 2011. 澜沧江—湄公河流域气象干旱时空分布特征分析 [J]. 水电能源科学, 29(6): 4–7, 193. Zhou Ting, Li Chuanzhe, Yu Fuliang, et al. 2011. Spatial and temporal distribution characteristics analysis of meteorological drought in Lancang–Mekong River Basin [J]. Water Resources and Power (in Chinese), 29(6): 4–7, 193.