

肖子牛,石文静,段玮. 2016. 云南夏季降水量在 21 世纪初的突变减少及原因分析. 气象, 42(3):261-270.

云南夏季降水量在 21 世纪初的突变减少及原因分析^{*1}

肖子牛¹ 石文静¹ 段 玮²

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(LASG), 北京 100029

2 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

提 要: 利用 1960—2013 年云南 125 个台站观测资料和美国环境预报中心/国家大气研究中心再分析资料, 以及 1960—2013 年美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的逐月平均全球海表温度资料, 分析了云南地区降水量变化的特征以及与之相关联的大气环流背景场。分析结果表明: 云南降水量在 2002 年发生了一次显著减少的突变, 而这次突变主要是由于夏季降水的明显减少而形成的。进一步的分析揭示了该地区夏季降水减少主要与印度洋热带赤道地区低层东风加强和高空西风加强有关, 亚洲地区中高纬度温度的升高也对该地区夏季降水量显著减少有重要作用。

关键词: 云南夏季降水, 突变, 大气环流, 海温

中图分类号: P461

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.3.001

Abrupt Decrease of Yunnan Summer Rainfall in the Early 21st Century and Its Possible Reasons

XIAO Ziniu¹ SHI Wenjing¹ DUAN Wei²

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 Meteorological Science Institute of Yunnan Province, Kunming 650034

Abstract: Based on the observation data from 125 stations in Yunnan Province, the reanalysis data from National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research and the monthly extended reconstructed sea surface temperature data from the National Oceanic and Atmospheric Administration in 1960—2013, the variation of the Yunnan rainfall and its related atmospheric circulation were analyzed. Major results are as follows: Yunnan rainfall experienced an abrupt decrease in 2002, which is mainly attributed to the notable reduction of Yunnan summer rainfall. Further analyses verified that the prominent decrease in Yunnan summer rainfall seems to be related to the intensified easterly of lower troposphere and strengthened westerly of upper troposphere over tropical Indian Ocean. Besides, the increasing temperature of the Asia continent in middle and high latitudes also play an important role in the abrupt decrease of Yunnan summer rainfall.

Key words: Yunnan summer rainfall, sudden change, atmospheric circulation, sea surface temperature

引 言

2016 年世界气象日的主题是“直面更热、更旱、

更涝的未来”(Hotter, drier, wetter. Face the Future)。近年来, 尽管全球平均温度的上升有所迟缓(Blau, 2014; Gleisner et al, 2015), 但全球气候变暖的格局并没有改变。美国国家航空航天局

* 国家自然科学基金项目(41375069、41490642 和 41205067)共同资助

2016 年 2 月 29 日收稿; 2016 年 3 月 3 日收修定稿

第一作者: 肖子牛, 主要从事气候动力学、海气相互作用以及短期气候预测的研究. Email: xiaozn@lasg.iap.ac.cn

(NASA, <http://www.nasa.gov/>)最新数据显示,2015 年全球平均温度再创新高,成为 1880 年有历史记录以来最暖的一年。然而据国家气候中心最新数据监测(http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/Monitoring/cn_global_extreme.php),2015 年进入岁末秋冬以后,寒冷事件频发,中国的霸王级寒潮逞威,美国的怪兽暴风雪肆虐。在全球变化的背景下,区域气候对全球变暖的响应到底如何,我们面对的气候是会在更热背景下遭遇更多冷的极端事件?在汛期的雨季是会迎来更多的降水,还是更多的干旱事件?在全球变化背景下区域气候的变异,会对我们每个地区带来完全不一样的影响,如何认识和应对不同区域的气候变化,是人们越来越关心的问题,也是 2016 年世界气象日的主题所在。

在全球变化的背景下,人们熟悉的气候也在悄然发生改变,异常气候事件的发生给经济社会带来重大的影响,异常状态的长期存在,意味着气候发生了年代际以上的长期变化,因而年代际变化是目前大气科学重要的研究课题之一。事实上,年代际尺度的气候变化是气候系统的重要特征,我国位于亚洲季风区,受到季风系统的控制,具有显著的年代际变化特征。一些研究认为亚洲季风存在减弱的趋势(Wang, 2001),造成了中国南涝北旱的格局(王会军等, 2013; 丁一汇等, 2013; 阙志萍等, 2014)。而 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水发生了新的年代际变化,黄淮流域降水增加,长江流域降水减少(王会军等, 2012; 黄荣辉等, 2013; 吕俊梅等, 2014)。而太平洋年代际涛动(PDO)在 20 世纪 90 年代末由正位相转变为负位相可能是产生这一变化的主要原因。进入 21 世纪以来,我国西南连续出现了干旱的极端事件(黄荣辉等, 2012; 杨辉等, 2012; 李聪等, 2012),造成严重的影响,成为人们关注的一个焦点问题(钱维宏等, 2012; 郭荣芬等, 2013; 张万诚等, 2014; 陶云等, 2014)。齐冬梅等(2012)分析了西南地区夏季降水变化特征,指出东亚夏季风减弱是西南地区年降水减少的一个重要影响原因。周秀华等(2015)研究了西南地区夏、秋季降水的周期特征及与季风活动的关系,认为最近西南地区的干旱是夏季和秋季 30 年周期的叠加所造成的,其中夏季风减弱和提前结束趋势对降水的减少有重要的影响。

云南地区处于西南地区边缘,水资源十分丰富,但由于受到东亚季风和西南季风的共同影响,异常气候的成因十分复杂。21 世纪以来,云南及周边地

区连续发生严重的干旱事件,是否意味着该地区气候发生了年代际的转折,开始进入了一个降水显著减少的时期?这是一个值得深入研究的问题。本文将利用云南地区夏季降水量资料,分析其年代际演变特征,探究 21 世纪初该地区是否存在干旱化突变的转折,并讨论引起变化的原因。

1 资料和方法

在本文中所用分析资料包括:(1)1960—2013 年云南省 125 个测站的降水观测资料;(2)1960—2013 年美国环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的逐月平均水平风场、气温场和位势高度场再分析资料(Kalnay et al, 1996),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 等经纬度间隔;(3)1960—2013 年美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的逐月平均全球海表温度资料(NOAA Extended Reconstructed SST V3b)(Smith et al, 2004),分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。

采用的主要统计方法有回归分析、合成分析、滑动 t 检验等。文中夏季被定义为 6—8 月平均。全文所用的相关信度检验均为 t 分布检验。

2 云南降水量和无降水日的突变特征

近年来,中国西南地区极端干旱事件频发,对当地的社会经济造成了深远的影响。王林等(2012)研究了西南干旱的变化特征和发展趋势,指出其具有显著的多时间尺度特征。针对云南地区在进入 21 世纪后频繁出现的干旱事件,较先考察该地区年平均降水量的逐年变化情况。图 1a 给出了年降水量从 1960—2013 年的变化曲线,从图中可以看到,除了明显的年际变化以外,年降水量在 2000 年后有显著的减弱趋势。用滑动 t 检验分析可以看到,云南地区的年降水量在 2002 年经历了一个明显减少的突变,其显著性超过了 0.01 的显著性水平检验(图 1b)。

我们进一步考察了与降水密切相关的大雨以上强降水日数(图 1c 和 1d)、降水日数(图 1e 和 1f)和无降水日数(图 1g 和 1h)的逐年变化情况,也可以发现该地区降水日数在 20 世纪 90 年代有所减少,但显著的减少发生在 2002 年以后(图 1e 和 1f)。从无降水日数的演变特征能更清晰地看到无降水日数的显著增加(图 1g 和 1h)。经过分析可以发现,强

降水雨量是云南地区年雨量的主要贡献者(图略)。图 1c 显示了强降水日数的逐年变化,可以看到,云南地区大雨以上的强降水日数也同样是在 2002 年

发生了显著的减少(图 1d)。这些突变点都发生在 2002 年,而且其显著性均通过了 0.01 的显著性水平检验。

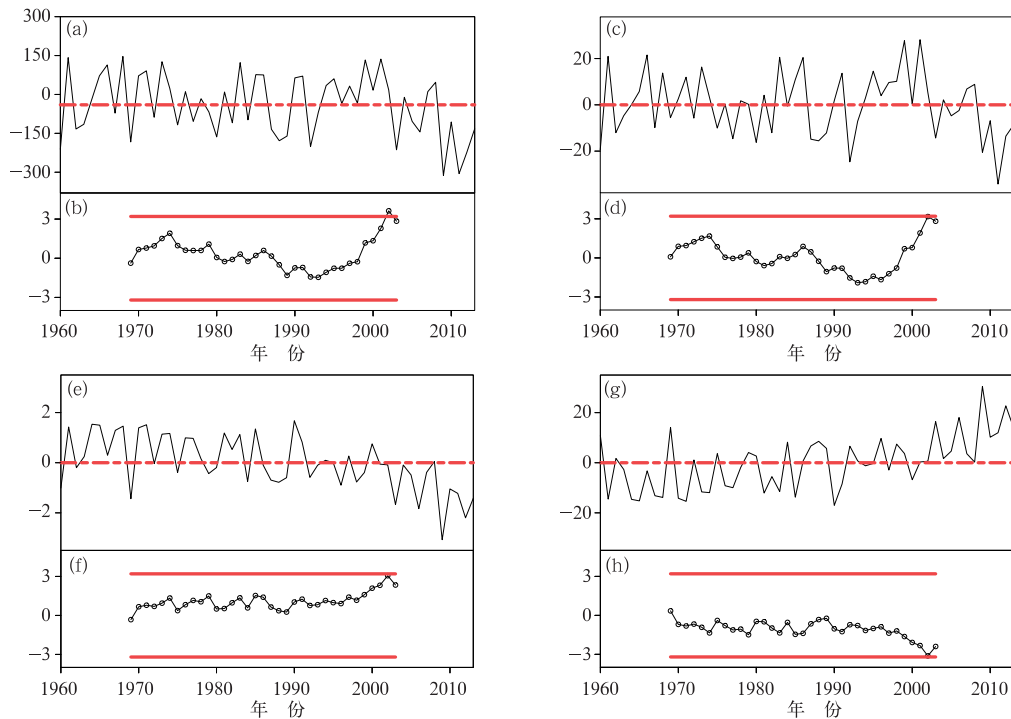


图 1 1960—2013 年云南省 125 站年平均降水量(a,b;单位:mm)、大雨以上日数(c,d;单位:d)、降水日数(e,f;单位:d)和无降水日数(g,h;单位:d)的距平时间序列及其滑动 t 检验

(实线为距平时间序列,带空心圆的黑色实线为滑动 t 检验,

粗实线为 0.01 的显著性水平,突变点在 2002 年)

Fig. 1 Anomaly series and sliding movement t -test analysis of the annual rainfall (a,b; unit: mm), the rainfall days over heavy rain (c,d; unit: d), the rainfall days (e,f; unit: d), and the non-rainfall days (g,h; unit: d) during 1960—2013 from 125 stations in Yunnan Province

(Black solid lines denote anomaly series, black solid lines with circle denote sliding movement t -test series, and heavy lines denote the 0.01 level of significance)

云南地区雨、旱季分明(陈艳等,2006;宋洁等,2011;黄荣辉等,2012;郭志荣等,2014),夏季降水量占全年降水的 70% 以上。周秀华等(2015)的分析表明,云南近年来的干旱主要是由于夏、秋季降水的减少引起。该地区 2002 年发生的降水减少突变是否也是夏、秋季的降水量突变引起的? 图 2 给出了各季节降水量的变化及其滑动 t 检验的结果。从图中看到,云南地区平均降水在冬季降水量基本没有变化,在春季有少许增加趋势外,夏季和秋季均有减少趋势,但只有夏季降水量的减少达到了突变,超过了 0.01 显著性水平。因此,云南降水量在 2002 年发生了突变,而这个突变主要是由于夏季降水经历

了一次减少突变而产生的。

3 夏季降水量发生突变的环流特征

云南地区夏季降水量在 2002 年发生显著减少突变是什么原因造成的? 首先我们分析发生突变前后高、低层大气环流的特点和差异。图 3 给出了 2002 年前后夏季平均的 850、700 和 200 hPa 水平风场的合成场。比较 1960—2001 年合成环流和 2002—2013 年合成环流,在对流层低层 850 hPa 合成风场上可以发现(图 3a 和 3b),2002 年之前索马里越赤道气流是偏弱的,而 2002 年之后索马里越赤

道气流明显增强,同时,2002年以后青藏高原以东地区地面为异常偏北风,在蒙古上空有明显的异常反气旋环流存在;而在2002年之前,我国东部基本为偏南异常气流控制,蒙古地区上空是一个相对的气旋性异常环流。在2002年前后的差值风场上,这些特征能更为明显地体现出来(图3c)。700 hPa的

异常风场有类似的情况(图3d和3e),只是位于西北印度洋的风场更显现出了系统一致性,2002年以后形成了一个显著的反气旋异常环流。在2002年前后的差值场中,蒙古地区上空和西北印度洋分别为一个反气旋异常环流所控制(图3f)。

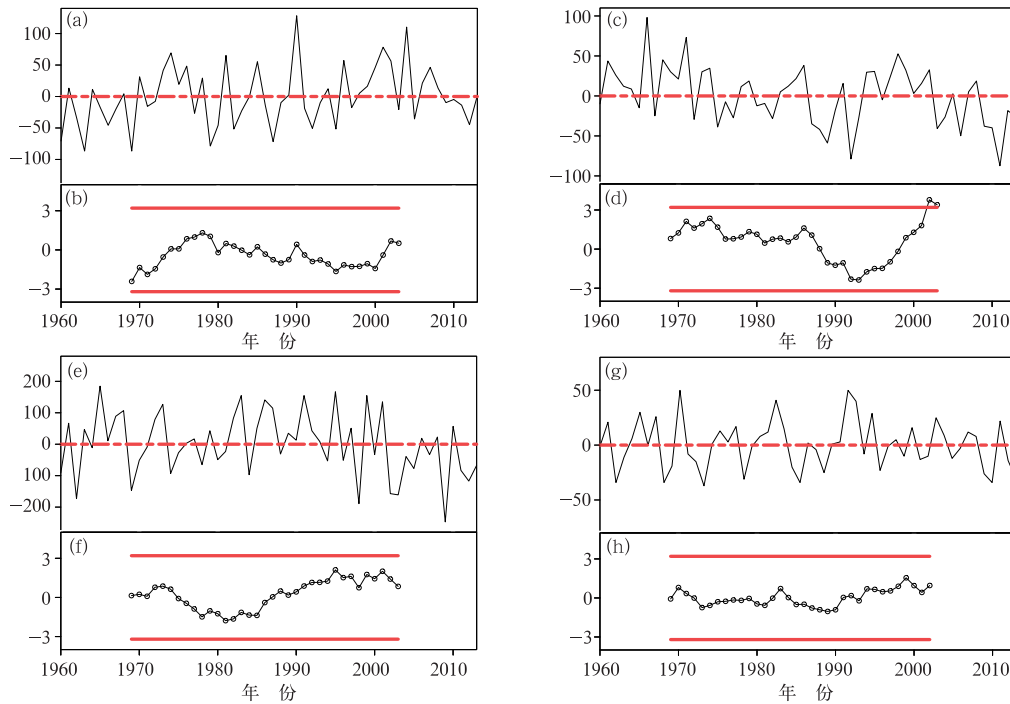


图2 1960—2013年云南省125站平均春季降水量(a,b)、夏季降水量(c,d)、秋季降水量(e,f)、冬季降水量(g,h)的距平时间序列及其滑动 t 检验(黑色实线为距平时间序列,带空心圆的黑色实线为滑动 t 检验,粗实线为0.01的显著性水平;单位:mm,突变点在2002年)

Fig. 2 Anomaly series and sliding movement t -check analysis of the spring rainfall (a,b), the summer rainfall (c,d), the autumn rainfall (e,f), and the winter rainfall (g,h) during 1960—2013 from 125 stations in Yunnan Province (unit: mm)
(Black solid lines denote anomaly series, black solid lines with circle denote sliding movement t -check series, and heavy lines denote the 0.01 level of significance)

从图3中还可以看到,在对流层高层的200 hPa风场上(图3g~3i),主要的异常差异出现在低纬度热带地区。2002年以前为东风异常气流控制,而在2002年以后为异常西风气流。此外在中高纬度中亚到东亚地区,定常波列的配置在2002年前后完全反相位,从 60°E 到 120°E 由A—C—A变为C—A—C(A表示异常反气旋环流,C为异常气旋环流)。

从以上分析可以看到,2002年前后大气环流的配置场最显著的变化是印度洋热带地区的纬向风场和亚洲大陆中部的蒙古地区异常环流,事实上,其相

位在2002年前后经历了完全相反的变化,显著性超过了0.05显著性水平检验。进一步要问,这两个显著变化的特征是不是与云南地区夏季的降水有关联?2002年前后这些环流背景特征是否也发生了突变?

文中将云南省125个测站的夏季平均降水量定义为云南夏季降水指数。图4给出了云南地区夏季平均降水时间序列回归的700和200 hPa矢量风场,我们主要考察图中超过0.05显著性水平检验的黑色加粗部分。从图4a可以看到,在低层700 hPa

上,亚洲中部蒙古地区上空的气旋环流有利于云南地区夏季平均降水的增加,而在低纬度热带地区,西北印度洋局地纬圈环流偏强、异常的气旋环流以及索马里越赤道气流偏弱有利于云南夏季降水偏多。但值得注意的是在突变年 2002 年前后,蒙古地区上空的异常环流均与云南夏季降水的多寡有关联。但是在热带地区,2002 年之前几乎不存在与云南夏季降水相关的低纬度环流系统,而 2002 年以后西北印度洋的异常环流和赤道纬向风均与云南夏季降水存在较强的联系。对比图 3 和图 4 可见,蒙古上空和西北印度洋的环流背景确实是影响云南夏季平均降

水的重要环流特征,其在 2002 年前后的形势转变有可能是造成该地区夏季降水突变的原因。而在高层 200 hPa 上可以看到,热带低纬度地区的东风异常有利于云南夏季降水的增加,这与图 3 揭示的特征是一致的。但对比中高纬度波列的特征可以发现,波列的位置和配置与图 3 反映的异常环流并不十分一致,因此图 3 显示的中纬度波列的变化特征,可能和云南夏季平均降水的显著减弱没有明确的关联。综上所述,影响云南夏季降水多寡的低层关键环流系统是蒙古上空和西北印度洋上空的环流系统,高层的关键环流系统是低纬度地区的纬向风。

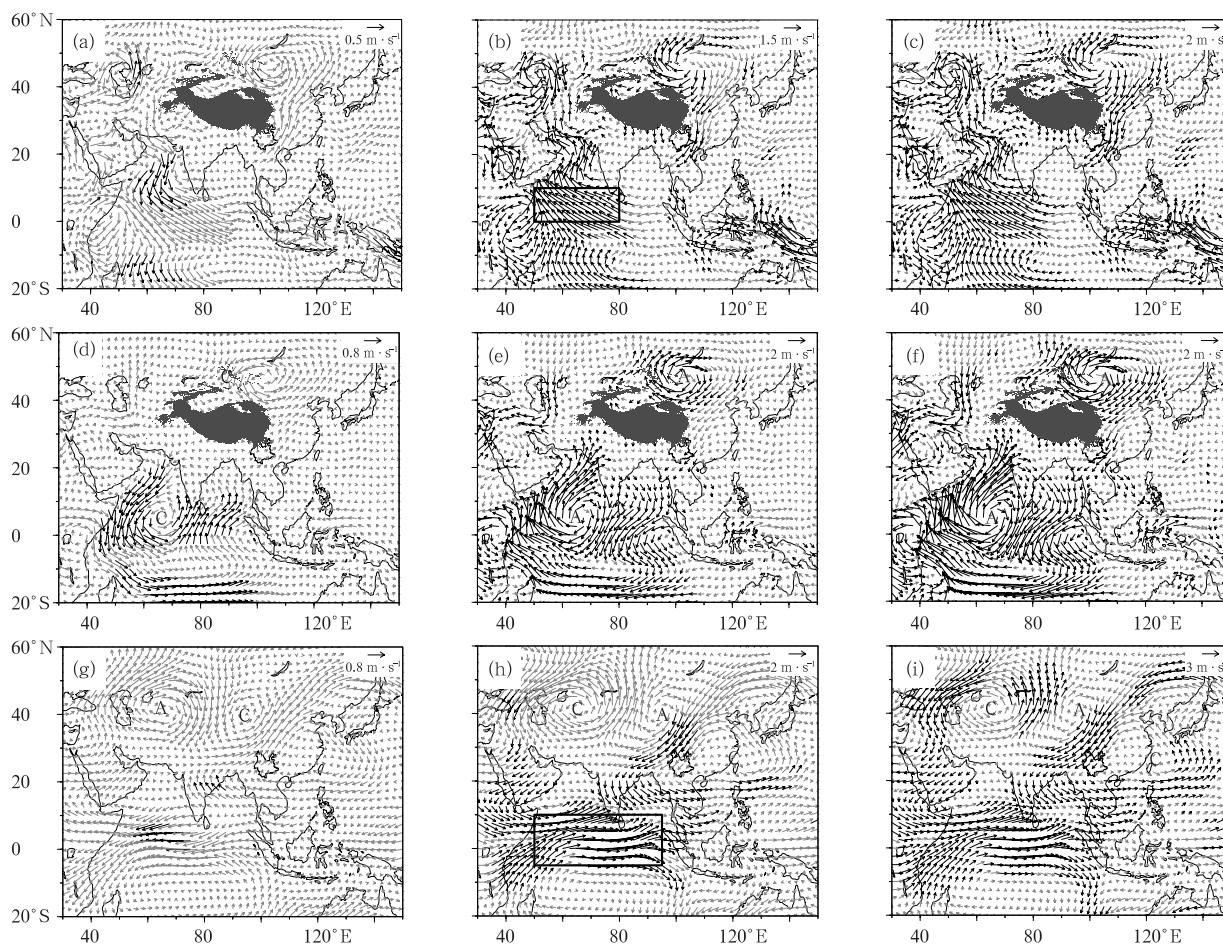


图 3 1960—2001 年(a,d,g)和 2002—2013 年(b,e,h)夏季平均的 850 hPa(a,b,c)、700 hPa(d,e,f)、200 hPa(g,h,i)水平风场与气候平均的水平风场的差值场及两个时间段的差值场(c,f,i)(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(黑色加粗箭头为 0.05 显著性水平检验,灰色阴影区为青藏高原,“A”代表反气旋,“C”代表气旋)

Fig. 3 The differences of the summer winds at 850 hPa (a,b,c), 700 hPa (d,e,f), 200 hPa (g,h,i) between the two periods (a,d,g) 1960—2001, (b,e,h) 2002—2013 and the climatology, as well as (c,f,i) the differences between the two periods (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(The black bold arrows denote the 0.05 level of significance, the grey shadings indicate the domain of the Tibetan Plateau, “A” denotes anticyclone, “C” denotes cyclone)

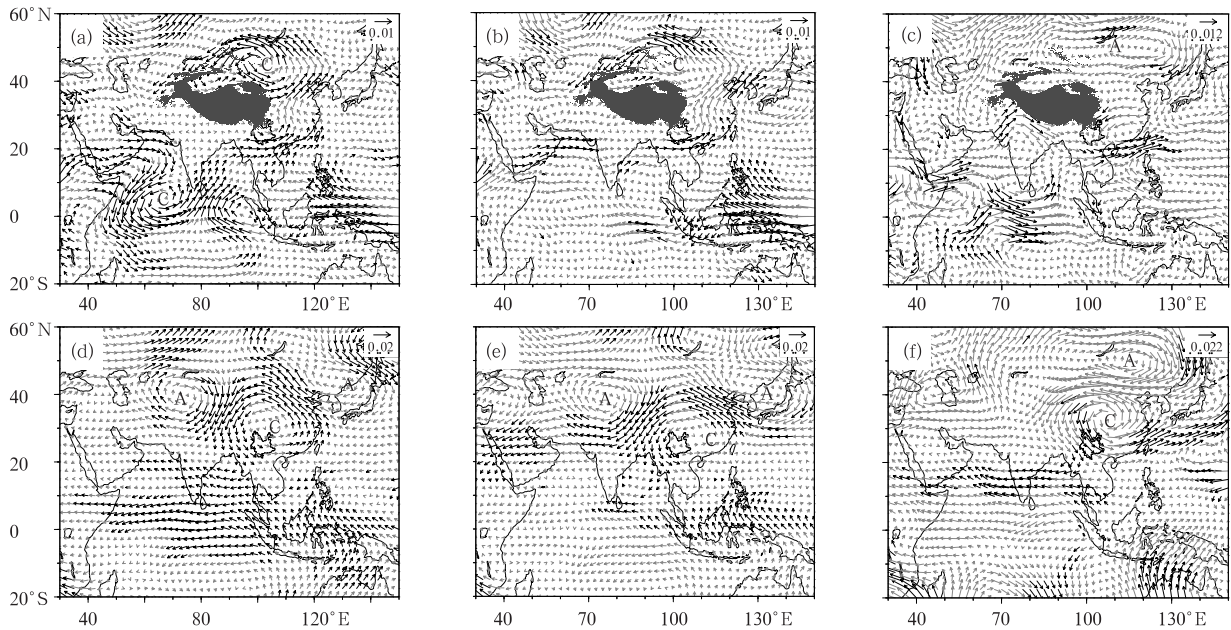


图 4 1960—2013 年(a,d)、1960—2001 年(b,e)和 2002—2013 年(c,f)
云南夏季降水指数与 700 hPa(a,b,c)和 200 hPa(d,e,f)
(图注同图 3)

Fig. 4 Regression coefficients of the summer winds at 700 hPa (a,b,c)
and 200 hPa (d,e,f) against the Yunnan summer precipitation index
for 1960—2013 (a,d), 1960—2001 (b,e), and 2002—2013 (c,f)
(Legends same as Fig. 3)

对比图 3 和图 4 在印度洋热带地区的风场可以发现,低层的纬向风异常主要在印度洋西部,而高层的纬向风异常在整个印度洋海盆都可以看到。因此,我们在图 3b 和 3h 中矩形范围取平均纬向风分析其演变特征。图 5 为西印度洋($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 、 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$)热带赤道地区 850 hPa 纬向风的变化特征,从图 5a 可以看到,西印度洋低层的纬向风自 20 世纪末就开始明显减少,并通过了 0.01 的显著性水平检验。图 6 给出的则是印度洋区域($5^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 、 $50^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}$)200 hPa 纬向风的变化特征,从图 6a 可以看到高层西风在 20 世纪 80 年代后有增强趋势,进入 21 世纪后有明显的西风增强,并在 2002 年附近有超过 0.01 显著性水平的突变。这就意味着热带印度洋近赤道地区,局地纬圈环流在 2002 年有突变减弱的趋势。

与 2002 年突变相关的对流层低层的另外一个环流形势是亚洲中部蒙古地区的气旋环流,从图 4a 可见其气旋性环流特征有利于云南地区夏季降水偏多。在夏季意味着亚洲大陆腹地热低压增强。如果我们利用 1000 hPa 的气压场,也可以清楚地看到

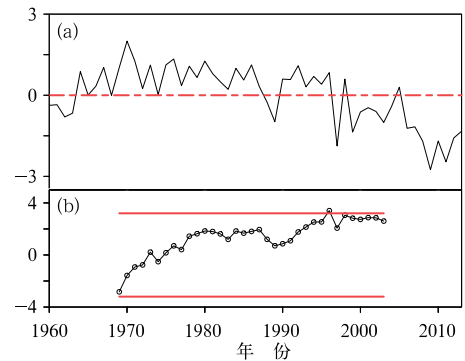


图 5 850 hPa 赤道热带西印度洋区域
($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 、 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$)纬向风的
(a)距平时间演变和(b)滑动 t 检验(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
(黑色实线为距平时间序列,带空心圆
的黑色实线为滑动 t 检验,
图 5b 中粗线为 0.01 显著性水平)

Fig. 5 Anomaly series (a) and sliding movement t -check
analysis (b) of the areal mean 850 hPa zonal wind over
tropical Indian Ocean ($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$; $50^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$)
(unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, black solid lines denote anomaly series,
black solid lines with circle denote sliding movement
 t -test series, and heavy lines
denote the 0.01 level of significance in Fig. 5b)

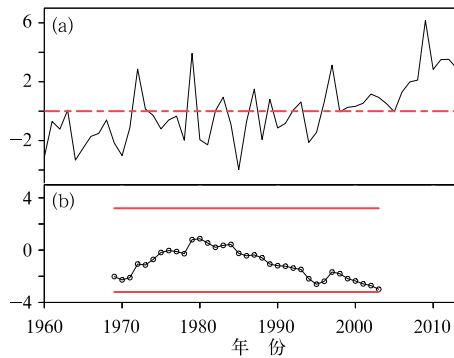


图 6 同图 5, 但为 200 hPa 赤道印度洋区域 (5°S~10°N, 50°~95°E)
 Fig. 6 Same as Fig. 5, but for 200 hPa zonal wind over tropical Indian Ocean (5°S-10°N, 50°-95°E)

其在前后两个时段的明显差异。图 7 给出了欧亚地区 2002 年前后夏季平均的 1000 hPa 高度场的合成场及其差值, 从图中可以看到, 在 2002 年以前, 欧亚大陆腹地低层气压偏低, 而 2002 年以后该地域内夏季气压明显升高增强。

接下来进一步分析温度场变化的可能影响。云南夏季降水指数与 850 hPa 温度的回归系数场如图 8a 所示, 从图中可以看到, 云南夏季降水与亚洲中部的低层温度呈正相关关系, 而与亚洲低纬度地区低层温度表现为负相关。但从其滑动的 *t* 检验结果 (如图 8b 和 8c) 来看, 随着北印度洋海温近 50 年来一致的增暖, 亚洲地区对流层低层高纬度地区与低纬度地区的温度差均倾向于云南地区夏季出现降水

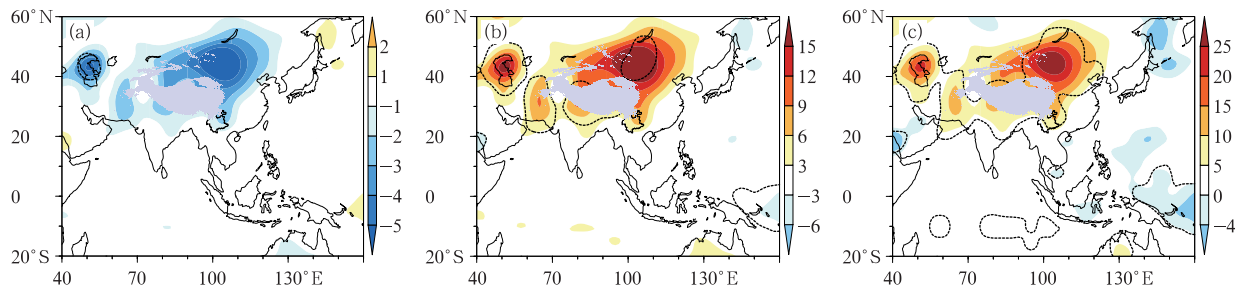


图 7 (a)1960—2001 年和(b)2002—2013 年夏季平均的 1000 hPa 高度场与气候平均的高度场的差值场及(c)两个时间段的差值场 (单位:m, 加粗黑色虚线包围区通过了 0.05 的显著性水平检验, 灰色阴影区为青藏高原)
 Fig. 7 The differences of the geopotential height at 1000 hPa between the two periods (a) 1960—2001, (b) 2002—2013 and the climatology, as well as (c) the differences between the two periods (unit: m)
 (The black bold arrows denote the 0.05 level of significance; the grey shadings indicate the domain of the Tibetan Plateau)

减少。但是这一趋势的变化, 并没有在 21 世纪初发生突变。

我们知道, 云南地区的天气气候受到太平洋和印度洋的共同影响, 最近几十年内印度洋海温的迅速升高是否是云南夏季降水量发生突变的原因。本文计算了由云南夏季降水指数与海温场的回归系数场, 如图 9 所示。从图中可以看到, 云南夏季降水与印度洋的海温有较为密切的关系, 尤其是南印度洋的海温有显著相关。当南印度海温偏低的时候, 有利于云南夏季降水量增加; 相反, 当南印度洋海温异常偏高时, 云南夏季降水量将异常偏少, 其显著性超过 0.05 的显著性水平。因此, 最近几十年印度洋海

温的显著升高, 将有利于造成云南地区降水量的异常偏少。

类似地, 我们分析了图 9 方框范围内平均海温异常的变化情况 (图 10), 从图 10a 和 10b 可以看到, 夏季南印度洋海温自 1960 年以来一直处于增暖变化之中, 但在 20 世纪 80 年代到本世纪初增暖较为平缓。值得注意的是最近 10 年又出现了显著增暖, 且在 2002 年有突变发生。

综上分析, 云南地区在本世纪初出现的夏季降水的减少突变, 很可能和热带印度洋赤道地区纬圈环流的减弱有关。为了说明这一点, 图 11 中给出了 1960—2013 年云南夏季降水指数与夏季热带印度

洋沃克环流的回归系数场以及 2002 年前后夏季平均的热带印度洋沃克环流与气候平均态的差值场。从图 11a 中可以看到,热带印度洋赤道地区的局地沃克环流偏强有利于云南夏季降水偏多,反之局地沃克环流偏弱对应云南夏季降水偏少,这与前文的分析结果非常一致。对比图 11b 和 11c 发现,突变年 2002 年之前局地的沃克环流偏强,2002 年之后

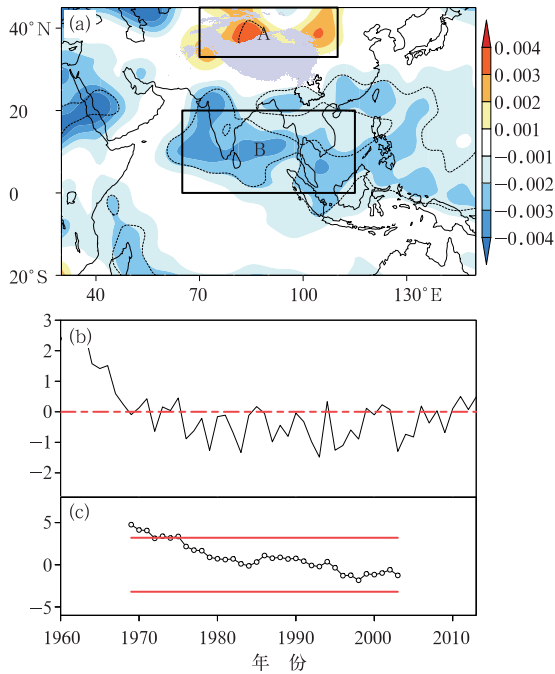


图 8 (a)云南夏季降水指数与 850 hPa 温度的回归系数场(黑色粗虚线所包围的为超过 0.05 的显著性水平检验的区域);(b)区域 A 减去区域 B(如图 8a 中所示)850 hPa 气温差值的距平时间序列变化特征及其(c)滑动 t 检验(单位: $^{\circ}\text{C}$) (黑色实线为距平时间序列,带空心圆的黑色实线为滑动 t 检验,红色实线为 0.01 的显著性水平)

Fig. 8 (a) Regression coefficients of the summer air temperature at 850 hPa against the Yunnan summer precipitation index (Areas covered by the black bold dotted lines denote the 0.05 level of significance; the grey shadings indicate the domain of the Tibetan Plateau); (b) anomaly series and (c) sliding movement t -check analysis of the 850 hPa air temperature differences between A and B (as shown in Fig. 8a) (unit: $^{\circ}\text{C}$) (Black solid lines denote anomaly series, black solid lines with circle denote sliding movement t -test series, and red solid lines denote the 0.01 level of significance)

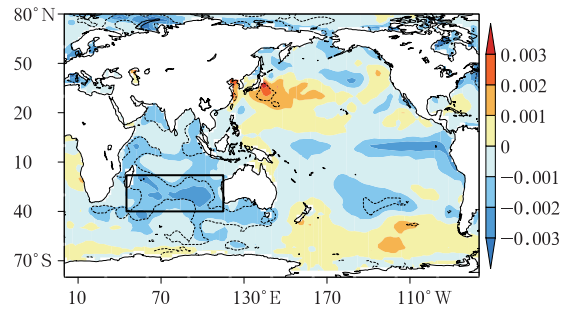


图 9 云南夏季降水时间序列所回归的夏季海温场(黑色加粗虚线包围区为 0.05 的显著性水平检验)
Fig. 9 Regression coefficients of the summer SST against the Yunnan summer precipitation index (Areas covered by the black bold dotted lines denote the 0.05 level of significance)

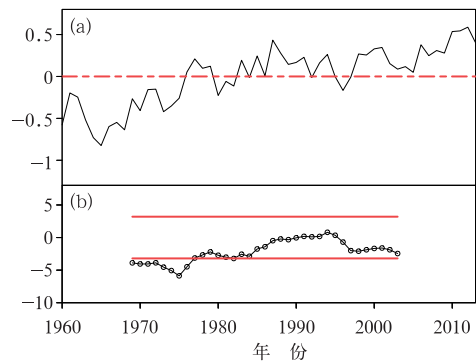


图 10 南印度洋区域($18^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{S}, 45^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$) 平均海温的(a)距平时间演变及其(b)滑动 t 检验 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 黑色实线为距平时间序列, 带空心圆的黑色实线为滑动 t 检验, 红色实线为 0.01 的显著性水平)

Fig. 10 (a) Anomaly series and (b) sliding movement t -check analysis of the areal mean SST over southern Indian Ocean ($18^{\circ}\text{--}40^{\circ}\text{S}, 45^{\circ}\text{--}115^{\circ}\text{E}$) (unit: $^{\circ}\text{C}$) (Black solid lines denote anomaly series, black solid lines with circle denote sliding movement t -test series, and red solid lines denote the 0.01 level of significance)

局地的沃克环流显著减弱,这与云南夏季降水在 2002 年的突变减弱恰好对应。通过文中分析可猜测,印度洋局地沃克环流的变化可能通过其上升支位置和强度的变化而影响哈得来环流的变异,并最终影响云南地区的降水。此外,南印度洋中纬度地区海温的增暖,可能导致了西北印度洋的异常反气旋及索马里越赤道气流的增强,最终也是通过沃克环流的变化而产生影响。但其中的物理动力过程还

有待进一步的研究。

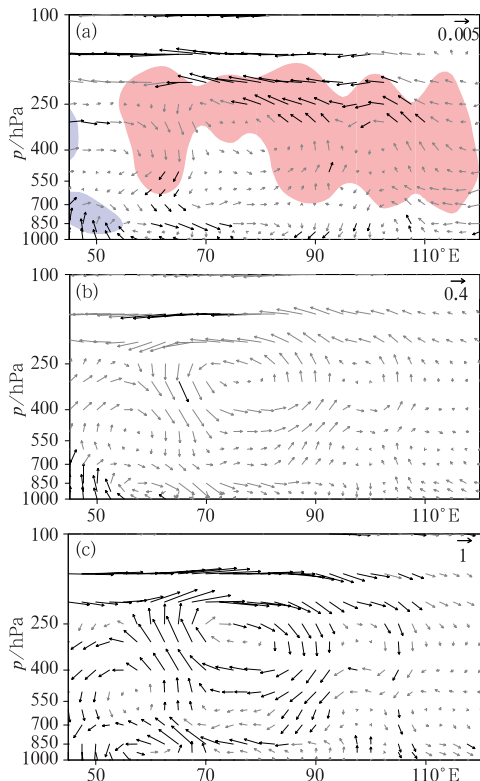


图 11 (a)1960—2013 年云南夏季降水指数与夏季热带印度洋沃克环流(由 $5^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 纬圈平均的纬向风和垂直速度所组成)的回归系数场(红色阴影区为气候平均的上升区,蓝色为下沉区);(b)1960—2001 年和 (c)2002—2013 年夏季平均的热带印度洋沃克环流与气候平均的沃克环流的差值场(加粗黑色箭头代表通过了 0.05 的显著性水平检验,纬向风的单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,垂直速度的单位: $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 11 (a) Regression coefficients of the summer local Walker circulation over tropical Indian Ocean (composed by the zonal wind and vertical velocity averaged in $5^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) against the Yunnan summer precipitation index for 1960—2013 (The red shaded area is the ascending area, and the blue shaded area is the descending area). The differences of the summer local Walker circulation over tropical Indian Ocean between the two periods (b) 1960—2001, (c) 2002—2013 and the climatology (The black bold arrows denote the 0.05 level of significance; unit of the zonal wind is $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; unit of the vertical velocity is $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)

4 结 论

本文分析了 1960—2013 年期间云南平均降水量、降水日数等演变特征及大气环流等背景条件,并得到如下结果:

(1) 云南地区降水量、降水日数和强降水日数等多种指标均在 2002 年发生了有可能导致该地区明显干旱化的突变。数据分析表明,夏季降水量的变化是这一突变现象的主要贡献者。

(2) 分析影响夏季降水的主要大气环流特征可以发现,印度洋赤道地区的高低空纬向气流、西北印度洋的异常环流特征、以及亚洲腹地蒙古上空的异常环流特征与该地区夏季的降水有关,而这些特征均在 2002 年前后发生了显著性的改变。2002 年以后,印度洋赤道热带地区的低层和高层分别出现了异常东风和异常西风,索马里越赤道气流增强,西北印度洋出现异常反气旋环流特征,从孟加拉湾、中南半岛到中国华南的西南气流减弱,而蒙古上空为异常反气旋环流。这些特征有利于云南降水的减少,亚洲大陆中高纬度地区与其南面的低纬热带的温差长期减小,也有利于降水的减少。

(3) 分析结果表明,印度洋增暖及印度洋赤道热带地区纬向环流减弱很可能才是 2002 年后云南降水的减少突变的最主要因子。

参 考 文 献

- 陈艳,丁一汇,肖子牛,等. 2006. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响. *大气科学*, 30(1): 25-37.
- 丁一汇,孙颖,刘芸芸,等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测. *大气科学*, 37(2): 253-280.
- 郭荣芬,肖子牛,鲁亚斌. 2013. 登陆热带气旋引发云南强降水的环境场特征. *气象*, 39(4): 418-426.
- 郭志荣,江燕如,彭丽霞,等. 2014. 5 月南亚高压与云南地区夏季降水的关系. *气象科学*, 34(4): 397-403.
- 黄荣辉,刘永,冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因. *科学通报*, 58(8): 617-628.
- 黄荣辉,刘永,王林,等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析. *大气科学*, 36(3): 443-457.
- 李聪,肖子牛,张晓玲. 2012. 近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征. *气象*, 38(4): 419-424.
- 吕俊梅,祝从文,据建华,等. 2014. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因. *大气科学*, 38(4): 782-794.
- 齐冬梅,周长艳,李跃清,等. 2012. 西南区域气候变化原因分析. *高原山地气象研究*, 32(1): 35-42.

- 钱维宏,张宗婕. 2012. 西南区域持续性干旱事件的行星尺度和天气尺度扰动信号. 地球物理学报, 55(5):1462-1471.
- 阙志萍,李崇银. 2014. 南海和南亚大气季节内振荡月异常对夏季风活动及中国东部夏季降水的影响. 热带气象学报, 30(5):811-824.
- 宋洁,杨辉,李崇银. 2011. 2009/2010年冬季云南严重干旱原因的进一步分析. 大气科学, 35(6):1009-1019.
- 陶云,黄玮,郑建萌,等. 2014. 云南冬季降水的演变特征及成因分析. 高原气象, 33(1):130-139.
- 王林,陈文. 2012. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征. 气象科技进展, 2(4):21-26.
- 王会军,范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征. 大气科学, 37(2):313-318.
- 王会军,孙建奇,祝亚丽. 2012. 中国极端气候及东亚地区能量和水循环研究的若干近期进展. 自然杂志, 34(1):10-17.
- 杨辉,宋洁,晏红明,等. 2012. 2009/2010年冬季云南严重干旱的原因分析. 气候与环境研究, 17(3):315-326.
- 张万诚,马涛,郑建萌,等. 2014. 秋季水汽输送特征及其与云南降水的关系. 气象, 40(3):336-348.
- 周秀华,肖子牛. 2015. 我国西南周边地区夏秋季节降水变化及相应环流特征分析. 大气科学, 39(4):653-666.
- Blau M B. 2014. Global warming gas balance in response to increasing concentrations; detection of an unknown emission saturation mechanism for infrared radiation. J Earth Sci Clim Change. , 5 (182):1-2.
- Gleisner H, Thejll P, Christiansen B, et al. 2015. Recent global warming hiatus dominated by low-latitude temperature trends in surface and troposphere data. Geophys Res Lett, 42 (2): 510-517.
- Kalnay E, coauthors. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bull Amer Meteor Soc, 77:437-471.
- Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854-1997). J Climate, 17:2466-2477.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. Adv Atmos Sci, 18:376-386.