

任倩, 周长艳, 何金海, 等. 2017. 前期印度洋海温异常对夏季高原“湿池”水汽含量的影响及其可能原因 [J]. 大气科学, 41 (3): 648–658. Ren Qian, Zhou Changyan, He Jinhai, et al. 2017. Impact of preceding Indian Ocean sea surface temperature anomaly on water vapor content over the Tibetan Plateau moist pool in summer and its possible reason [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (3): 648–658, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1610.16161.

前期印度洋海温异常对夏季高原“湿池”水汽含量的影响及其可能原因

任倩¹ 周长艳¹ 何金海² 岑思弦¹ 邓梦雨¹

1 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 利用 Hadley 中心提供的逐月海温资料、ERA-Interim 再分析资料以及 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的逐月向外长波辐射 (OLR) 资料探讨了 1979~2011 年夏季青藏高原“湿池”的水汽含量与前期印度洋海温异常的关系, 并对可能的原因进行了分析。结果表明, 夏季青藏高原水汽 (去趋势) EOF 第二模态与前期印度洋海温存在密切的正相关, 前期 3~4 月关键区 (5°S~20°N, 45°E~75°E) 的海温异常可以作为夏季高原水汽的预测信号。在暖水年, 赤道附近显著的东风异常对夏季高原水汽输送起到了至关重要的作用。500 hPa 上副热带高压显著增强并西移, 600 hPa 上赤道附近为显著的异常东风, 将水汽从西太平洋、南海、孟加拉湾向西输送到印度半岛, 并在异常反气旋环流西侧的南风作用下, 将水汽带向青藏高原。高层风场上, 西太平洋地区辐合, 青藏高原上空辐散。以上环流形势表明暖水年夏季青藏高原水汽偏多; 冷水年则相反。就影响机制而言, 前期春季印度洋海温显著偏暖, 引起其上空异常的对流上升运动, 驱动异常沃克环流从春到夏显著维持, 副热带高压的季节性北跳和异常增强西移, 有利于赤道东风异常的增强和西移, 并经过水汽输送通道将水汽带向青藏高原上空。

关键词 海温关键区 高原“湿池” 赤道异常东风 沃克环流

文章编号 1006-9895(2017)03-0648-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1610.16161

Impact of Preceding Indian Ocean Sea Surface Temperature Anomaly on Water Vapor Content over the Tibetan Plateau Moist Pool in Summer and Its Possible Reason

REN Qian¹, ZHOU Changyan¹, HE Jinhai², CEN Sixian¹, and DENG Mengyu¹

1 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorology Administration, Chengdu/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Using SST (sea surface temperature) data from the Hadley Center, ERA-Interim reanalysis data, and OLR data from NOAA, the relationship between the summer water vapor content over the Tibetan Plateau moist pool and the

收稿日期 2016-04-13; 网络预出版日期 2016-11-04

作者简介 任倩, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为高原天气气候。E-mail: renqiannxd@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41305082, 国家自然科学基金重大研究计划项目 91437216

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41305082), Major Research Plan of National Natural Science Foundation of China (Grant 91437216)

preceding SST anomalies in the Indian Ocean during 1979–2011 and its possible reasons are studied. The results show that the second leading EOF mode of the detrended water vapor content in summer over the Tibetan Plateau moist pool is positively related to SST anomalies over the key area (5°S – 20°N , 45°E – 75°E) in March and April, thus SST over this key area can be regarded as a precursor of the summer water vapor content. In warm years, the significant easterly anomalies near the equator play a crucial role in the transport of water vapor. The subtropical high in the western Pacific strengthens and moves westward at 500 hPa. At 600 hPa, the significant easterly anomalies are favorable for water vapor transport from the western Pacific, the South China Sea and the Bay of Bengal to India. Under the influence of southerly winds on the western flank of the anticyclone, large amounts of water vapor are transported to the Tibetan Plateau. There is divergence over the Tibetan Plateau and convergence over the western Pacific in the upper troposphere. The above anomalous circulation indicates that the summer water vapor content is much higher over the Tibetan Plateau moist pool in warm years than in cold years, and vice versa. As far as the mechanism is concerned, the significant warm SST anomalies in Indian Ocean can induce anomalous convective updrafts at the springtime, and the anomalous Walker circulation can maintain from the spring to summer. As the WPSH (western Pacific subtropical high) moves northward seasonally with anomalous intensification and westward expansion, equatorial easterly anomalies enhance and move westward as well, which eventually bring more water vapor to the Tibetan Plateau through the above transport path.

Keywords SST key area, Tibetan Plateau moist pool, Equatorial easterly anomaly, Walker circulation

1 引言

青藏高原是我国最大、海拔最高的高原，它独特的地理条件决定了其在天气气候变化中与众不同的影响作用。高原素有“湿池”之称（朱福康，2000），夏半年 600 hPa 以上的水汽分布场上，青藏高原是大值中心（王霄等，2009），高原南侧可降水量的最大值可以达到 14 mm，高原东南部则是一个明显的高湿中心。青藏高原“湿池”对我国夏季水汽输送有非常重要的作用。它是我国东部和北部地区水汽输送的“转运”站（徐祥德，2009），不仅为长江流域梅雨的形成提供了重要的水汽来源（Xu et al., 2003; 徐祥德等，2003），还是长江中下游地区旱涝、暴雨（Xu et al., 2008; 丁一汇和胡国权，2003; 胡国权和丁一汇，2003; 周玉淑等，2005），以及 2008 年中国南方冰冻雨雪等灾害性天气气候的上游水汽输送关键区（施晓晖等，2009; 黄艳等，2010）。高原东南部的“水汽转向点”与长江上游西南异常降水区域相吻合（苗秋菊等，2004）；高原东部及附近地区的水汽收支对周边降水有重要影响（周长艳等，2005; 施小英和施晓晖，2008）。同时，在夏季高原热源的作用下，青藏高原成为了对流层水汽输送到平流层的重要通道（Fu et al., 2006; 杨健和吕达仁，2003; Ye et al., 1998; Gettelman et al., 2004）。此外，全球气候变化背景下，青藏高原的大气水循环过程和对周边及下游地区降水产生的影响都发生了一定的变化（周长艳等，2006, 2009, 2010）。

关于夏季高原“湿池”的水汽源地，江吉喜和范梅珠（2002）在分析了 1998 年夏季水汽输送后指出，高原上的水汽来源是孟加拉湾和阿拉伯海，并且主要从 85° – 95°E 地区进入高原。黄福均和沈如金（1984）研究表明，夏季高原的水汽除了来自南海或孟加拉湾以外，在高原西南部还存在着一条重要的水汽通道；Tetsuo 和陈隆勋（2000）通过个例分析指出夏季青藏高原的水汽输送通道主要有两条，一条是从高原东南部进入高原，另外一条在高原西部 80°E 附近。王霄等（2009）的研究也指出，除了来自南海—孟加拉湾的东南侧水汽输送外，还有阿拉伯海—孟加拉湾水汽通过西南侧和喜马拉雅山中段进入高原。以上研究都表明，水汽的主要通道是高原东南、西南侧，孟加拉湾、南海及印度洋等地是夏季高原水汽的重要来源。那么，海洋热力异常是否会通过影响水汽来源和水汽输送通道进而影响高原水汽收支？

印度洋海温异常对夏季东亚大气环流有重要的影响。厄尔尼诺次年夏季，印度洋海温增暖可以通过激发 Kelvin 波，引起异常西太平洋反气旋，从而影响低层水汽输送（Wu et al., 2009, 2010）。谷良雷等（2006）研究发现 4 月阿拉伯海海温越高（低），南亚夏季风越强（弱），春季的阿拉伯海海温对南亚夏季风的预报很有意义。热带印度洋海温的增暖（变冷）通过海气相互作用激发印度洋—西太平洋异常的 Walker 环流圈，加强（减弱）西太平洋副热带高压（简称西太副高）的强度，进而有利于南海夏季风爆发的推迟（提早）（袁媛和李崇银，2009；

梁肇宁等, 2006), 而南海夏季风对东亚大陆地区水汽输送有非常重要的影响(谢安等, 2001; 柳艳菊等, 2005; 任保华等, 2007)。此外, 前人研究已经指出, 印度洋海温异常与高原夏季降水也有一定的关系。前期春季(同期夏季)印度洋海温呈现负(正)距平时, 印度夏季风偏强(弱), 青藏高原夏季降水偏多(少)(假拉和周顺武, 2003)。前冬印度洋海温的偶极振荡与高原汛期降水和温度也有一定的关系(刘青春等, 2005)。

以上研究表明, 印度洋海温异常对青藏高原夏季气候以及东亚大气环流都有一定的影响, 那么它与高原“湿池”又有什么样的联系呢? 本文试图通过时滞相关的办法, 研究印度洋海温与高原“湿池”水汽含量的关系, 从而找到能够预测高原“湿池”水汽异常的稳定的前期信号, 进而讨论这种前期信号影响青藏高原“湿池”的可能原因, 为研究高原“湿池”异常对我国天气气候的影响做好铺垫。

2 资料与方法

2.1 资料选取

以往夏季青藏高原水汽的计算大多采用的是 NCEP/NCAR 的湿度资料, 垂直分层较少(600 hPa 以上只有 8 层), 水平分辨率较低($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)。本文采用 ERA-Interim (ECMWF interim reanalysis) 的比湿资料通过积分来计算水汽含量, 垂直分层有 14 层, 水平分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$, 资料精度较高。选取的研究范围为 ($25.5^{\circ}\text{N} \sim 40.5^{\circ}\text{N}$, $73.5^{\circ}\text{E} \sim 105^{\circ}\text{E}$), 时段为 1979~2011 年。海表温度资料选用 Met Office Hadley Center 提供的逐月历史海表温度资料 (Rayner et al., 2003), 时段为 1979~2011 年, 水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$; 环流资料采用 ERA-Interim 提供的 1979~2011 年逐月再分析资料, 要素包括: U 风场、 V 风场、 w 场、比湿场、地面气压场、海平面气压场、位势高度场等, 水平分辨率均为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$, 以及美国 NOAA 提供的 1979~2011 年逐月向外长波辐射 (OLR) 场资料, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

2.2 方法简介

(1) 计算青藏高原“湿池”的水汽, 即计算单位面积气柱中的总水汽含量(大气可降水量, 单位: mm):

$$W = -1/g \int_{p_s}^p q dp, \quad (1)$$

水汽通量:

$$Q = -1/g \int_{p_s}^p q V dp, \quad (2)$$

其中, g 为重力加速度, q 是比湿(单位: kg kg^{-1}), p_s 为地表面气压(单位: hPa), p 为大气顶部气压(单位: hPa), V 为风矢量。为了体现青藏高原上空水汽的特征, 参考王霄等的研究(2009), 在进行整层积分时, 若地表面气压 p_s 大于等于 600 hPa, 将 p_s 取为 600 hPa, 当 p_s 小于 600 hPa 时, p_s 不变; p 取为 100 hPa。另外, 夏季水汽是指将 6~8 月的水汽含量进行平均。

(2) 在全球变暖背景下, 印度洋—西太平洋海温 (Wang and Mehta, 2008) 和夏季青藏高原水汽都有明显的年代际线性增长趋势。本文在分析两者相关关系时, 为避免线性趋势对相关结果的影响, 将计算得到的海温场和夏季青藏高原水汽先进行去除线性趋势处理。

(3) 所用统计方法包括经验正交函数分解 (EOF)、时滞相关分析、合成分析以及回归分析等。

3 夏季青藏高原水汽的时空分布

图 1 为青藏高原夏季 (6~8 月) 水汽 (去趋势后) 的 EOF 分解前两个模态特征向量空间分布及其时间系数的演变。由第一模态 (图 1a) 可以看出, 青藏高原夏季水汽呈现东西反向型分布, 其方差贡献率为 33%, 表明东西反向型分布是青藏高原夏季水汽去除年代际线性趋势后的主要特征。第一模态对应的时间系数 (PC1, 如图 1b 所示) 能够反映第一模态的年际变化特征, 时间系数的正 (负) 位相分别对应高原水汽东多 (少) 西少 (多) 的分布型。第二特征向量的分布如图 1b 所示, 呈现全区一致型分布, 大值区位于高原西南部, 并呈西南向东北递减的形势, 其对应的时间系数 (图 1d) 的正 (负) 值分别对应青藏高原范围内水汽一致偏多 (少)。第二模态的方差贡献率仍然能达到 28%, 表明第二模态所表征的分布型仍然具有重要的研究意义。本文重点关注青藏高原水汽全区一致型的变化及其影响因子, 因此主要关注第二模态, 有关第一模态的研究及其与第二模态的区别在以后的工作中开展。所以, 本文将第二模态对应的时间序列作为表征青藏高原夏季水汽的指数 (Tibetan Plateau Water Vapor Index, 简称 TPWVI)。

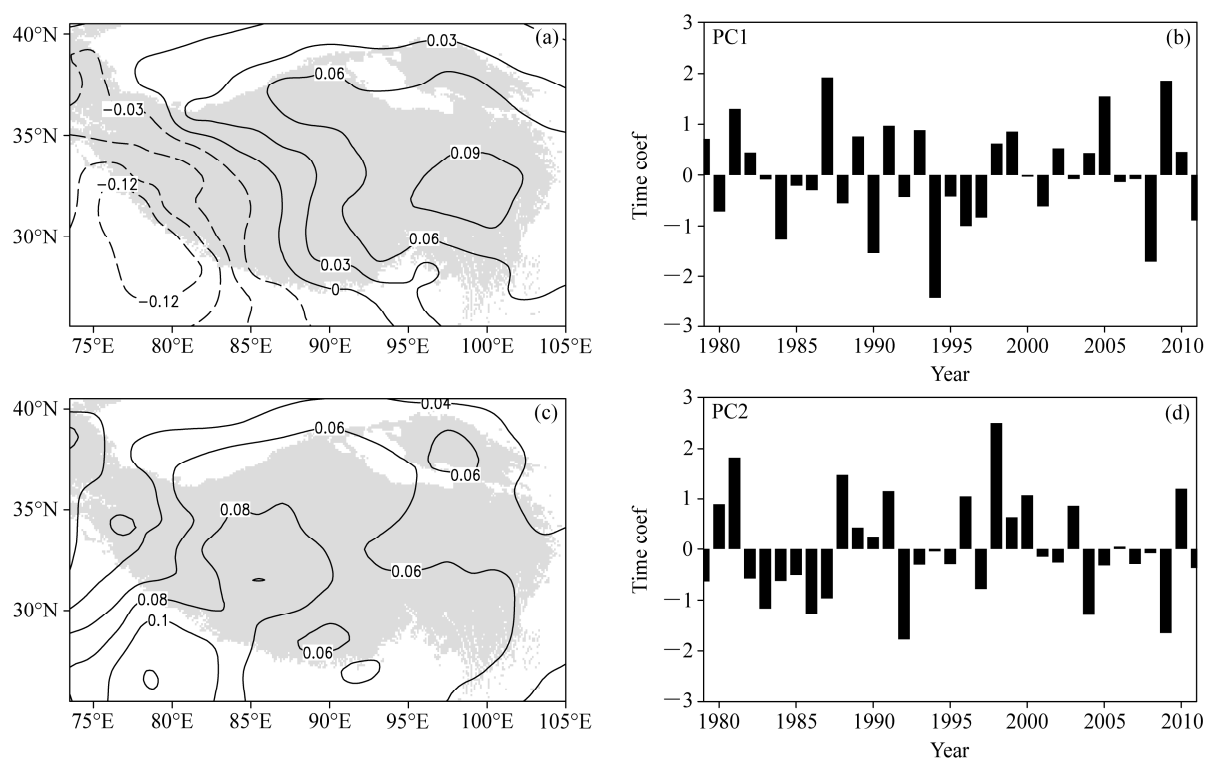


图1 青藏高原夏季水汽(去趋势) EOF 分解前两个模态 (a) EOF1、(c) EOF2 的空间分布及其对应的标准化时间序列 (b) PC1、(d) PC2。图 a、c 中阴影为青藏高原

Fig. 1 Spatial patterns of the first two leading EOF modes (a) EOF1, (c) EOF2 of the summer water vapor content (detrended) over the Tibetan Plateau and the corresponding normalized time series (b) PC1, (d) PC2. Shaded areas in Figs. a and c indicate the Tibetan Plateau

4 夏季青藏高原水汽与前期印度洋海温异常的关系

为了寻找高原夏季水汽与海洋热力异常的关系, 首先将海温场去除了线性趋势, 计算了 TPWVI 与前期各月(前一年 11 月至当年 6 月)印度洋海温的相关系数, 如图 2 所示。结果表明, 从前一年秋末开始, 在印度洋的部分地区已经出现了一定的正相关, 相关系数通过了 95% 的信度水平。该相关区显著发展并一直维持到当年 5 月份, 并在 3~4 月相关系数绝对值达到了最大, 通过 99% 信度水平的区域也达到最大。以上结果表明, 前期印度洋海温与高原水汽相关显著, 可以作为夏季高原水汽很好的前期预测信号。因此选取 3~4 月作为高原夏季水汽的前期预测关键时段, 相关大值区(5°S~20°N, 45°E~75°E)作为前期预测关键区。将关键区(5°S~20°N, 45°E~75°E) 3~4 月海温进行标准化, 定义为海温指数(SST Index, 简称 SSTI)。

图 3 为夏季青藏高原水汽指数 TPWVI (实线) 与海温指数 SSTI (虚线) 的时间序列, 由图可见,

二者存在明显的正相关, 相关系数达到了 0.53, 通过了 99% 的信度水平。取 SSTI 大于 0.8 的年份为暖水年(表示该年 3~4 月关键区海温异常偏高), 取海温指数小于 -0.8 的年份为冷水年(表示该年 3~4 月关键区海温异常偏低)。从图 3 中可见, 暖水年包括 1981 年、1988 年、1998 年、2003 年、2010 年, 冷水年为 1985 年、1989 年、1992 年、2008 年、2011 年, 暖(冷)水年对应着当年夏季高原水汽偏多(少)。因此, 前期 3~4 月关键区海温异常偏高(低)是预报高原夏季水汽的一个很好指标。

5 前期海温异常影响夏季青藏高原水汽的可能原因

大气环流异常是导致夏季高原水汽异常的直接原因。为了进一步揭示前期海温异常与夏季高原水汽的关系, 本文分别计算了暖、冷水年夏季大气环流的合成差值场(暖水年减去冷水年)以及 SSTI 回归的夏季大气环流异常场(图略), 回归场上的环流分布与差值场基本一致。

通过分析水汽输送通量可以直接了解高原上

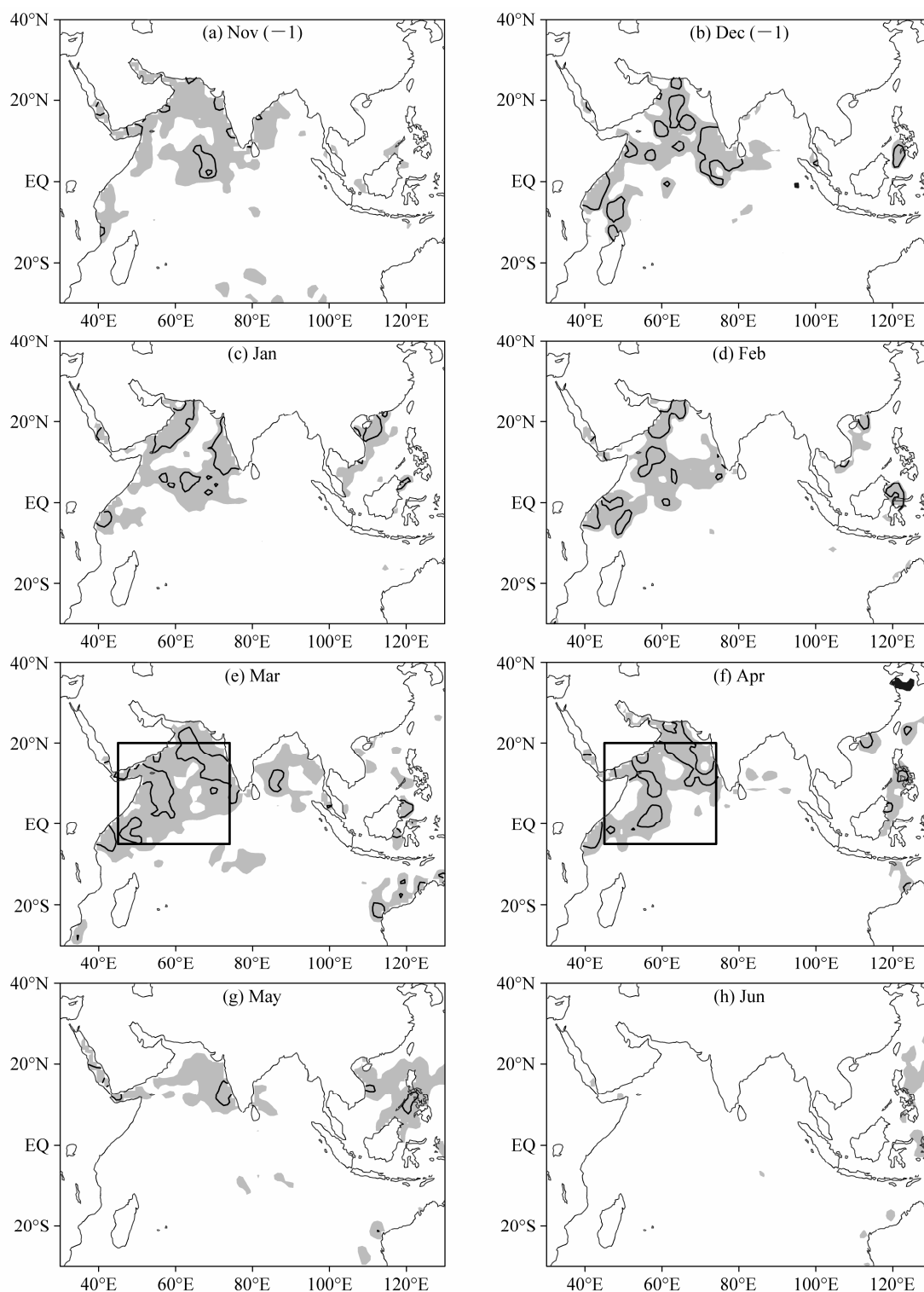


图2 TPWVI与(a)前一年11月、(b)前一年12月、当年(c)1月、(d)2月、(e)3月、(f)4月、(g)、5月、(h)6月印度洋海温相关系数分布。浅(深)色阴影表示达到95%信度水平的正(负)相关区域,只有图f中有一小部分负相关区域。等值线表示相关系数大于或等于99%信度水平边界值。图e、f中的方框表示关键区(5°S~20°N, 45°E~75°E)

Fig. 2 Distributions of the correlation coefficients between TPWVI (Tibetan Plateau Water Vapor Index) and SST over Indian Ocean from (a) November, (b) December in last year to (c) January, (d) February, (e) March, (f) April, (g) May, (h) June in this year. Light (dark) shaded areas indicate positive (negative) correlations that have passed the test 95% confidence level, only a small part of negative correlation region is shown in Fig. f. Contours indicate correlation coefficients exceeding 99% confidence level. The boxes in Figs. e, f indicate the key areas (5°S–20°N, 45°E–75°E)

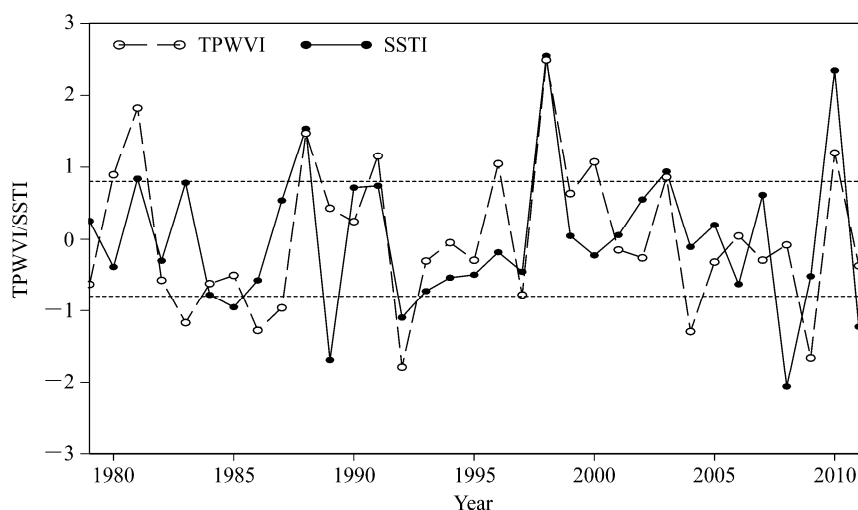
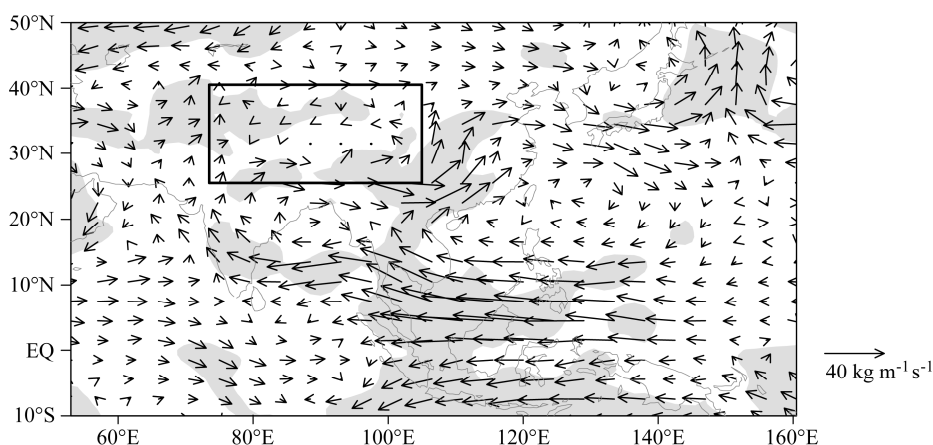


图3 TPWVI (虚线) 与 SSTI (实线) 随时间的变化

Fig. 3 Time series of TPWVI (dashed line) and SSTI (SST Index, solid line)

图4 印度洋海温关键区(5°S~20°N, 45°E~75°E)暖水年与冷水年合成的夏季水汽输送通量差值场(单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)。阴影表示通过95%信度水平的区域, 方框代表青藏高原Fig. 4 Composite differences in atmospheric water vapor transport fluxes (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) between the warm years and the cold years over the SST key area (5°S~20°N, 45°E~75°E) in Indian Ocean in summer. Shaded areas indicate differences that have passed the test at 95% confidence level. The box indicates the Tibetan Plateau

空的水汽来源和输送途径,如图4所示。由图可知,赤道以北存在较强的反气旋水汽输送通量,该反气旋不仅控制着东亚—西太平洋地区,还影响着孟加拉湾地区附近的水汽输送。菲律宾岛附近存在显著的东风异常,将西太平洋、南海等地的水汽向西输送到中南半岛,并在此分成两支。一支在西太平洋反气旋西侧的南风作用下向北主要输送到我国中南部大部分地区;另外一支则继续在东风异常的作用下向西输送,将来自西太平洋、南海以及孟加拉湾的水汽输送至印度半岛,并在孟加拉湾附近反气旋切变的作用下转向通过高原西南侧进入青藏高

原地区,并且沿着高原南侧向东输送,造成高原水汽增多。因此,暖水年高原水汽异常偏多的输送通道可总结为西太平洋、南海—中南半岛—孟加拉湾、印度半岛—青藏高原,输送过程中水汽通量均通过了95%的信度水平。正是这样一条水汽通道,将西太平洋的水汽源源不断地输送到高原上空,赤道附近显著的东风异常起到了至关重要的作用。

造成上述异常水汽输送通道的环流场是怎样的?本文从暖、冷水年的差值图上来进行分析。500 hPa高度场(图5a)上、东亚大陆地区以及赤道西太平洋地区为正异常,西太副高明显增强,并通过

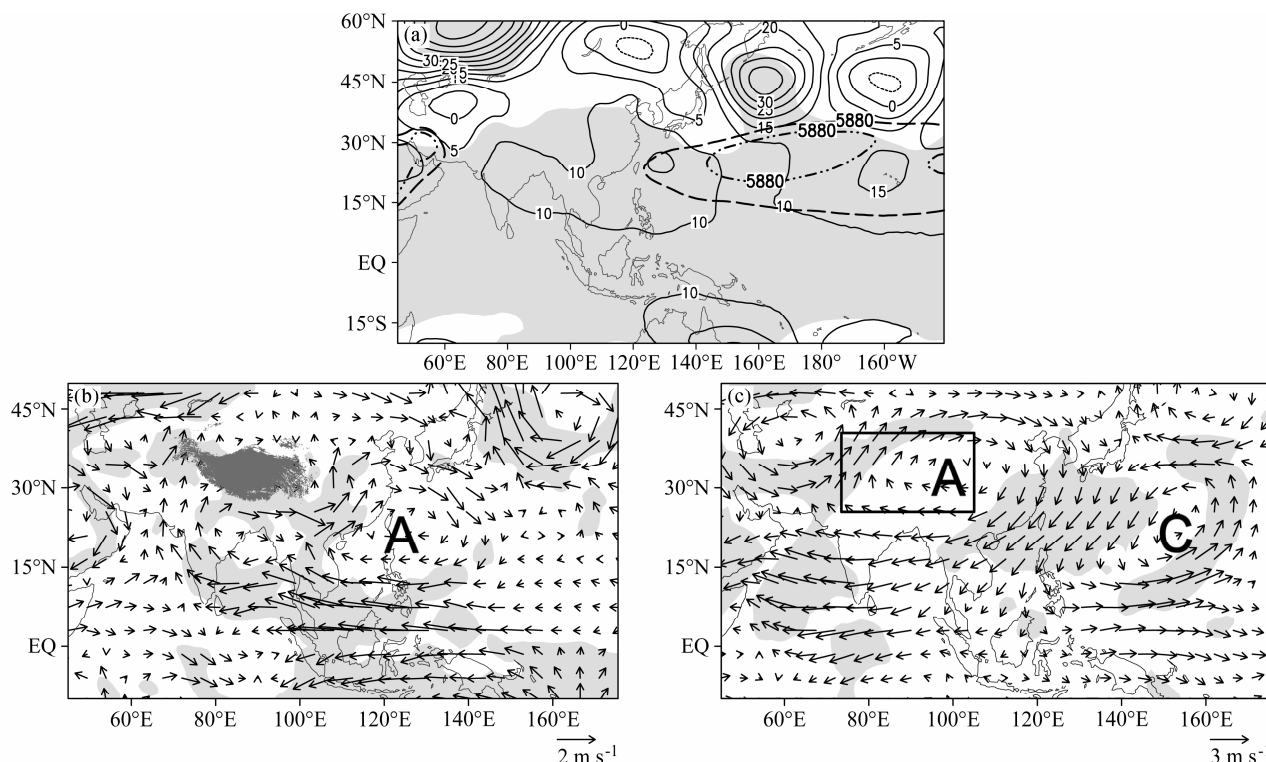


图5 印度洋海温关键区(5°S~20°N, 45°E~75°E)暖水年与冷水年合成的夏季环流差值场:(a) 500 hPa 高度场(单位: gpm);(b) 600 hPa 风场(单位: m s^{-1});(c) 100 hPa 风场(单位: m s^{-1})。图a中的点(长)虚线对应冷(暖)水年平均的5880线。图a、b、c中的浅色阴影表示通过95%信度水平的区域,图b中的深色阴影区表示青藏高原

Fig. 5 Composite differences in (a) 500-hPa geopotential height fields (units: gpm), (b) 600-hPa wind fields (units: m s^{-1}), and (c) 100 hPa wind fields (units: m s^{-1}) between the warm years and the cold years over the SST key area (5°S–20°N, 45°E–75°E) in Indian Ocean in summer. Dotted (long) dashed line in (a) indicates the 5880 gpm contour averaged in cold (warm) years. Light shaded areas in Figs. a, b, c indicate differences that have passed 95% confidence level, dark shaded area in Fig. b indicates the Tibetan Plateau

了95%的信度水平。暖、冷水年对应的5880(单位: gpm)线有较大差异,与冷水年相比,暖水年的5880线范围更大,西伸脊点位置更加偏西。为了验证结果,将SSTI与夏季环流指数中的西太副高强度和西伸脊点指数做相关,相关系数分别为0.44和-0.47,均通过了99%的信度水平,表明前期关键区海温偏暖时,夏季西太副高强度更强,位置也更加偏西,有利于低层反气旋及其南侧东风异常的维持和水汽的向西输送。

与高度场相对应,600 hPa风场图上(图5b),西太平洋反气旋环流明显存在,表明该地区低层辐散。赤道附近是显著的东风异常,将西太平洋、南海和孟加拉湾(夏季青藏高原的水汽源地)的暖湿气流向西输送到印度半岛,并在此转向为异常南风,形成反气旋式切变,有利于将水汽输送到青藏高原。赤道印度洋地区为异常西风,与西太平洋赤道附近的东风异常在东印度洋附近汇合,有利于该

地区产生异常的对流上升运动。600 hPa风场图的结果与水汽通量的分布形势相一致,表明中低层风场是影响高原水汽输送的重要原因,其中,赤道异常东风更是主要因素。与低层反气旋相对应,高层100 hPa风场(图5c)上,西太平洋地区为气旋性环流所控制,高层辐合,低层辐散,高低层配合促使该地区对流减弱,有利于下沉运动的发展;东亚地区高层为反气旋环流所控制,表明南亚高压强度偏强,高原高层辐散增强,加强抽吸作用,有利于中低层水汽的辐合,最终导致高原上空水汽异常增多。

有了以上环流场的结果,那么前期印度洋关键区海温异常如何影响高原夏季水汽呢?于是,将SSTI回归到春、夏季OLR场(图6a、b)、5°S~5°N平均的纬向垂直环流场(图6c、d)和春季600 hPa风场(图6e)上。由图6a、c可知,春季,在印度洋偏暖的海水加热下,使赤道西印度洋地区

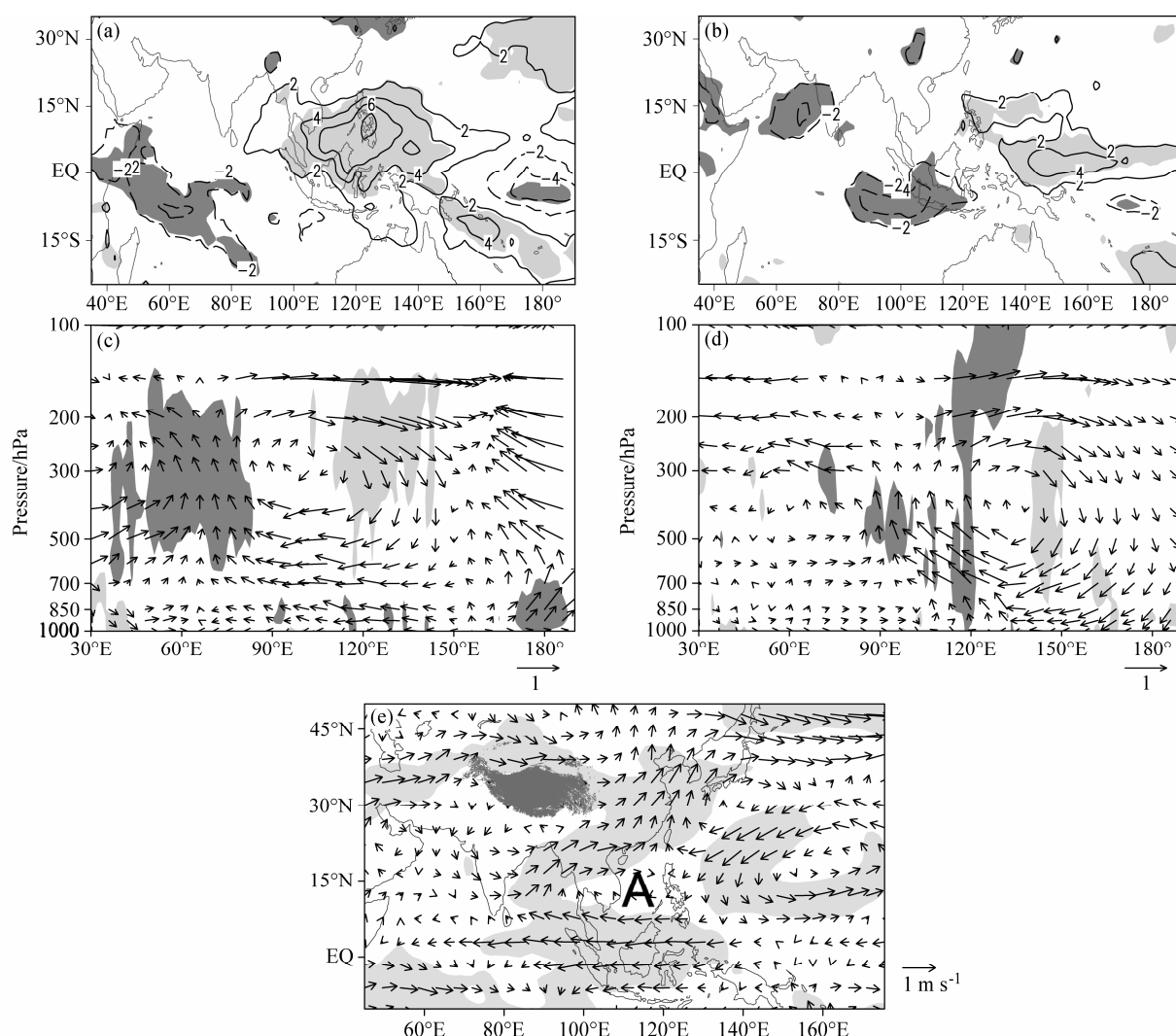


图6 SSTI回归的(a、b) OLR场(单位: W m^{-2})和(c、d) $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 平均的纬向垂直环流分布(水平经向风速的单位为 m s^{-1} , 垂直风速的单位为 0.01 hPa s^{-1}): (a、c) 春季; (b、d) 夏季。浅(深)色阴影区为达到90%信度水平的正(负)值区域。(e) SSTI回归的春季600 hPa风场(单位: m s^{-1}), 深色阴影区表示青藏高原, 浅色阴影区表示达到95%信度水平的区域

Fig. 6 (a, b) OLR (units: W m^{-2}) and (c, d) zonal-vertical circulations averaged over $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ (units of meridional wind speed is m s^{-1} , units of vertical wind speed is 0.01 hPa s^{-1}) regressed against SSTI: (a, c) Spring; (b, d) summer. Light (dark) shaded areas indicate positive (negative) value passed 90% confidence level. (e) 600-hPa wind field (units: m s^{-1}) regressed against SSTI in spring, dark shaded area indicates the Tibetan Plateau, light shaded areas indicate value passed 95% confidence level

上空的对流增强, 垂直上升抽吸作用加强。引起中低层风场上出现由西太平洋吹向印度洋显著的东风异常, 进而引起西太平洋较强的下沉运动, 对流明显减弱, 如此环流驱动便形成了印度洋—西太平洋之间较强的异常纬向沃克环流。600 hPa风场(图6e)上, 印度洋西南部为一定的西风异常, 西太平洋到东印度洋赤道附近为很强的东风异常, 这与对流的结果相一致(图6a)。该东风异常向西到达孟加拉湾以后转向为西南风, 在西太平洋形成反气旋

环流, 中心位于菲律宾以西的南海地区, 有利于西太副高的显著增强(图略)。该反气旋将水汽经孟加拉湾带向中南半岛和我国东部地区, 对我国东部地区的降水有一定影响, 但反气旋南侧东风异常基本维持在赤道, 虽然向西可达中印度洋, 但是位置较偏南, 对高原水汽没有明显输送。

到了夏季, 一方面, 印度洋盛行西南季风, 西太平洋盛行东南季风, 东风异常叠加在东南季风上(图5b), 加强了西太平洋向西的能量输送, 使赤

道西太平洋水汽不断向西,到达印度洋东部。印度洋西南季风的存在使得印度洋海温增暖引起的异常对流上升发生明显东移,春季印度洋上存在的西风异常也发生东移。强大的东风异常与一定的西风异常在东印度洋相遇,导致夏季对流上升运动维持并最终东移到东印度洋(图 6b、d),继续驱动异常沃克环流的存在。沃克环流在西太平洋的异常下沉支维持并加强了夏季西太平洋地区低层的异常辐散和高层的异常辐合,导致了东风异常在夏季的稳定存在,西太平洋反气旋从春到夏也是异常维持。随着上升支的东移,沃克环流下沉支也发生一定的东移现象,有利于东风异常将更多的西太平洋水汽向西输送。

另一方面,随着夏季西太副高的明显北跳,西太平洋异常反气旋环流北移(图 5b),反气旋中心北移至菲律宾以北,其南侧的东风异常也同样发生北移,孟加拉湾地区由春季西风异常转变为显著东风异常。此外,前期春季印度洋海温增暖,对应夏季西太副高是异常西伸、强度增强的(图 5a),这在前人研究中也有所体现。春季印度洋海温一致偏暖会导致夏季赤道以北东亚副热带地区的位势高度异常偏高,西太副高增强(Li et al., 2013);春季印度洋除西南部以外的海温一致偏冷,对应副热带高压的偏东偏弱(徐志清和范可, 2012);3~4 月印度洋海温会影响后期副热带高压及南海夏季风的建立早晚(梁肇宁等, 2006)。夏季西太副高的西伸增强,引起西太平洋异常反气旋的维持并增强,以及东风异常增强并向西延伸到印度半岛,使得西太平洋水汽在夏季向西输送增强,并最终在印度半岛转向使水汽输送到青藏高原上空(图 4)。东风异常和西太平洋反气旋的增强,导致西太平洋低层辐散加强,引起对流下沉运动增强,进一步维持了异常沃克环流,从而在夏季产生持续存在的异常东风,将水汽带向青藏高原。由此可见,前期印度洋海温异常通过驱动异常沃克环流对夏季高原水汽输送有着至关重要的作用。

6 结论

(1) 夏季青藏高原水汽与前期印度洋海温存在密切的正相关,前期 3~4 月关键区($5^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $45^{\circ}\text{E}\sim 75^{\circ}\text{E}$)的海温异常可以作为夏季高原水汽较好的预测信号,其相关的稳定性好,相关性高。

(2) 在暖水年,夏季高原水汽输送通道可总结

为西太平洋、南海—中南半岛—孟加拉湾、印度半岛—青藏高原,赤道附近显著的东风异常起到了至关重要的作用。500 hPa 上副热带高压显著增强并西移,对应 600 hPa 风场上西太平洋地区为反气旋环流所控制,赤道附近为显著的异常东风,将水汽从西太平洋向西输送,并在反气旋式环流西侧的南风作用下,将水汽带向青藏高原。高层风场上,西太平洋地区的辐合和青藏高原上空的辐散,有利于低层西太平洋异常反气旋和南侧东风异常的维持以及青藏高原地区水汽的辐合。这种环流形势表明暖(冷)水年对应夏季青藏高原水汽偏多(少)。

(3) 就影响机制而言,前期印度洋海温偏暖通过引起其上空异常的对流上升运动驱动异常沃克环流,该异常沃克环流从春到夏显著维持,引起赤道东风异常从春到夏也一直存在,只是位置有所东移。此外,夏季副热带高压北跳,异常东风北移,水汽经孟加拉湾地区向西输送。副热带高压异常西伸、强度增强,有利于西太平洋异常反气旋的增强以及赤道东风异常的增强和西移,维持了异常沃克环流,使得东风异常显著存在并向西影响至印度半岛,并最终在印度半岛转向输送到青藏高原上空。前期印度洋海温异常通过驱动异常沃克环流对夏季高原水汽输送有着非常重要的作用。

参考文献 (References)

- 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, doi:10.11676/qxxb2003.014.
- Fu R, Hu Y L, Wright J S, et al. 2006. Short circuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere by convective transport over the Tibetan Plateau [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 103 (15): 5664–5669, doi:10.1073/pnas.0601584103.
- Gettelman A, Kinnison D E, Dunkerton T J, et al. 2004. Impact of monsoon circulations on the upper troposphere and lower stratosphere [J]. J. Geophys. Res., 109 (D22), doi:10.1029/2004JD004878.
- 谷良雷, 姚济敏, 胡泽勇. 2006. 南亚夏季风典型强弱年与阿拉伯海海温 [J]. 热带气象学报, 22 (4): 374–379. Gu Lianglei, Yao Jimin, Hu Zeyong. 2006. Typical strong and weak South Asian summer monsoon years and sea surface temperature of Arabian Sea [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 22 (4): 374–379, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.04.009.
- 胡国权, 丁一汇. 2003. 1991 年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究 [J]. 气象学报, 61 (2): 146–163. Hu Guoquan, Ding Yihui. 2003. A study on the energy and water cycles over Changjiang–Huaihe River basins during the 1991 heavy rain periods [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (2): 146–163, doi:10.11676/qxxb2003.015.

- 黄福均, 沈如金. 1984. 夏季风时期青藏高原地区水汽来源及水汽收支分析 [M]//青藏高原气象科学实验文集 (二). 北京: 科学出版社, 215–224. Huang Fujun, Shen Rujin. 1984. Analysis of water vapor source and budget over the Tibetan Plateau during the summer monsoon [M]//Collected Works for the Meteorological Experiment over the Tibetan Plateau (Two) (in Chinese). Beijing: Science Press, 215–224.
- 黄艳, 蔡敏, 夏晓丰, 等. 2010. 2008 年长江中下游地区持续性暴雪天气的过程简析及其水汽输送特征分析 [J]. 科技通报, 26 (5): 787–794. Huang Yan, Cai Min, Xia Xiaofeng, et al. 2010. Analysis of sustained heavy snow and the characters of moisture transfer associated with it in 2008 over the lower-middle reaches of Yangtze River [J]. Bull. Sci. Technol. (in Chinese), 26 (5): 787–794, doi:10.3969/j.issn.1001-7119.2010.05.030.
- 假拉, 周顺武. 2003. 印度洋海温异常对印度季风、高原夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 22 (S1): 132–137. Jia La, Zhou Shunwu. 2003. The effect of Indian Ocean SST anomaly on Indian monsoon and summer precipitation over Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 22 (S1): 132–137, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2003.z1.017.
- 江吉喜, 范梅珠. 2002. 青藏高原夏季 TBB 场与水汽分布关系的初步研究 [J]. 高原气象, 21 (1): 20–24. Jiang Jixi, Fan Meizhu. 2002. A primary study of the relationship between TBB fields and water vapor distribution over Qinghai-Xizang Plateau in summer [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 21 (1): 20–24, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.01.004.
- Li Y, Wu B Y, Yang Q M, et al. 2013. Different relationships between spring SST in the Indian and Pacific oceans and summer precipitation in China [J]. Acta Meteor. Sinica, 27 (4): 509–520, doi:10.1007/s13351-013-0501-4.
- 梁肇宁, 温之平, 吴丽姬. 2006. 印度洋海温异常和南海夏季风建立迟早的关系 I: 耦合分析 [J]. 大气科学, 30 (4): 619–634. Liang Zhaoning, Wen Zhiping, Wu Liji. 2006. The relationship between the Indian Ocean sea surface temperature anomaly and the onset of South China Sea summer monsoon. I: Coupling analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 619–634, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.08.
- 刘青春, 秦宁生, 李栋梁, 等. 2005. 印度洋海温的偶极振荡与高原汛期降水和温度的关系 [J]. 高原气象, 24 (3): 350–356. Liu Qingchun, Qin Ningsheng, Li Dongliang, et al. 2005. Relationship between dipole oscillation of sea temperature in Indian Ocean and precipitation and temperature in flood season over Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 24 (3): 350–356, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.03.011.
- 柳艳菊, 丁一汇, 宋艳玲. 2005. 1998 年夏季风爆发前后南海地区的水汽输送和水汽收支 [J]. 热带气象学报, 21 (1): 55–62. Liu Yanju, Ding Yihui, Song Yanling. 2005. The moisture transport and moisture budget over the South China Sea before and after the summer monsoon onset in 1998 [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 21 (1): 55–62, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.01.006.
- 苗秋菊, 徐祥德, 施小英. 2004. 青藏高原周边异常多雨中心及其水汽输送通道 [J]. 气象, 30 (12): 44–47. Miao Qiuju, Xu Xiangde, Shi Xiaoying. 2004. Water vapor transport structure of anomalous rainy centers in the ambient area of Tibetan Plateau [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 30 (12): 44–47, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2004.12.010.
- Tetsuo N, 陈隆勋. 2000. Water budget analysis over the Tibetan Plateau during the northern summer in 1994 [M]//陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展 (一). 北京: 气象出版社, 104–117. Tetsuo N, Chen Longxun. 2000. Water budget analysis over the Tibetan Plateau during the northern summer in 1994 [M]//Tao Shiyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. Research Progress of the Second Atmospheric Science Experiment of Tibetan Plateau (One) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 104–117.
- 施小英, 施晓晖. 2008. 夏季青藏高原东南部水汽收支气候特征及其影响 [J]. 应用气象学报, 19 (1): 41–46. Shi Xiaoying, Shi Xiaohui. 2008. Climatological characteristics of summertime moisture budget over the southeast part of Tibetan Plateau with their impacts [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 19 (1): 41–46, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2008.01.006.
- 施晓晖, 徐祥德, 程兴宏. 2009. 2008 年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制及其前兆性“强信号”特征 [J]. 气象学报, 67 (3): 478–487. Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Cheng Xinghong. 2009. Premonitory of water vapor transport in the upstream key region over the Tibetan Plateau during the 2008 snowstorm disaster in South China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67 (3): 478–487, doi:10.11676/qxxb2009.048.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J. Geophys. Res., 108 (D14), doi:10.1029/2002JD002670.
- 任保华, 郑建秋, 杜建伟. 2007. 一种基于整层水汽通量的南海夏季风爆发指数 [J]. 气候与环境研究, 12 (4): 503–514. Ren Baohua, Zheng Jianqiu, Du Jianwei. 2007. An index of South China Sea summer monsoon onset based on vertically integrated moisture transport [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (4): 503–514, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.04.005.
- Wang H, Mehta V M. 2008. Decadal variability of the Indo-Pacific warm pool and its association with atmospheric and oceanic variability in the NCEP-NCAR and SODA reanalyses [J]. J. Climate, 21 (21): 5545–5565, doi:10.1175/2008JCLI2049.1.
- 王霄, 巩远发, 岑思弦. 2009. 夏半年青藏高原“湿池”的水汽分布及水汽输送特征 [J]. 地理学报, 64 (5): 601–608. Wang Xiao, Gong Yuanfa, Cen Sixian. 2009. Characteristics of the moist pool and its moisture transports over Qinghai-Xizang Plateau in summer half year [J]. Acta Geogr. Sinica (in Chinese), 64 (5): 601–608, doi:10.11821/xb200905009.
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate [J]. J. Climate, 22 (11): 2992–3005, doi:10.1175/2008JCLI2710.1.
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer [J]. J. Climate, 23 (11): 2974–2986, doi:10.1175/2010JCLI3300.1.
- 谢安, 宋焱云, 毛江玉, 等. 2001. 南海夏季风期间水汽输送的气候特征 [J]. 气候与环境研究, 6 (4): 425–434. Xie An, Song Yanyun, Mao Jiangyu, et al. 2001. Climatological characteristics of moisture transport during summer monsoon over South China Sea [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (4): 425–434, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2001.04.07.
- Xu Xiangde, Miao Qiuju, Wang Jizhi, et al. 2003. The water vapor transport

- model at the regional boundary during the Meiyu period [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (3): 333–342, doi:10.1007/BF02690791.
- 徐祥德. 2009. 青藏高原“敏感区”对我国灾害天气气候的影响及其监测 [J]. *中国工程科学*, 11 (10): 96–107. Xu Xiangde. 2009. The effects of sensitive region over Tibetan Plateau on disastrous weather and climate and its monitoring [J]. *Eng. Sci. (in Chinese)*, 11 (10): 96–107, doi:10.3969/j.issn.1009-1742.2009.10.014.
- 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. 2004. Moisture transport source/sink structure of the Meiyu rain belt along the Yangtze River valley [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 49 (2): 181–188, doi:10.1360/03wd0047.
- Xu X D, Shi X Y, Wang Y Q, et al. 2008. Data analysis and numerical simulation of moisture source and transport associated with summer precipitation in the Yangtze River Valley over China [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 100 (1–4): 217–231, doi: 10.1007/s00703-008-0305-8.
- 徐志清, 范可. 2012. 冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态对中国东部夏季降水的可能影响过程 [J]. *大气科学*, 36 (5): 879–888. Xu Zhiqing, Fan Ke. 2012. Possible process for influences of winter and spring Indian Ocean SST anomalies interannual variability mode on summer rainfall over eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (5): 879–888, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11176.
- 杨健, 吕达仁. 2003. 平流层—对流层交换研究进展 [J]. *地球科学进展*, 18(3): 380–385. Yang Jian, Lü Daren. 2003. Progresses in the study of stratosphere–troposphere exchange [J]. *Adv. Earth Sci. (in Chinese)*, 18 (3): 380–385, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2003.03.0380.
- Ye D Z, Wu G X. 1998. The role of the heat source of the Tibetan Plateau in the general circulation [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 67 (1–4): 181–198, doi:10.1007/BF01277509.
- 袁媛, 李崇银. 2009. 热带印度洋海温异常不同模态对南海夏季风爆发的可能影响 [J]. *大气科学*, 33 (2): 325–336. Yuan Yuan, Li Chongyin. 2009. Possible impacts of the tropical Indian Ocean SST anomaly modes on the South China Sea summer monsoon onset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 325–336, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.11.
- 周长艳, 李跃清, 李薇, 等. 2005. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征 [J]. *高原气象*, 24 (6): 880–888. Zhou Changyan, Li Yueqing, Li Wei, et al. 2005. Climatological characteristics of water vapor transport over eastern part of Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 24 (6): 880–888, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.06.006.
- 周长艳, 李跃清, 彭俊. 2006. 高原东侧川渝盆地降水与水资源特征及变化 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1217–1226. Zhou Changyan, Li Yueqing, Peng Jun. 2006. The characteristics and variation of precipitation and water resource of Sichuan and Chongqing basin on the eastern side of the Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (6): 1217–1226, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.16.
- 周长艳, 蒋兴文, 李跃清, 等. 2009. 高原东部及邻近地区空中水汽资源的气候变化特征 [J]. *高原气象*, 28 (1): 55–63. Zhou Changyan, Jiang Xingwen, Li Yueqing, et al. 2009. Features of climate change of water vapor resource over eastern region of the Tibetan Plateau and its surroundings [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 28 (1): 55–63.
- 周长艳, 王顺久, 彭俊. 2010. 金沙江流域及邻近地区空中水汽资源的气候特征分析 [J]. *资源科学*, 32 (12): 2433–2440. Zhou Changyan, Wang Shunjiu, Peng Jun. 2010. Climatic characteristics of water vapor resources over the Jinsha River reaches and its surroundings [J]. *Resour. Sci. (in Chinese)*, 32 (12): 2433–2440.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. *大气科学*, 29 (2): 195–204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (2): 195–204, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.02.04.
- 朱福康. 2000. 高原湿地 [M]//陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展 (二). 北京: 气象出版社, 106–112. Zhu F K. 2000. Plateau moist pool [M]//Tao Shiyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. 2000. Research Progress of the Second Atmospheric Science Experiment of Tibetan Plateau (Two) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 106–112.