岳如画,徐海明. 2017. 春季赤道印度洋纬向一垂直环流的变化特征及其与 Walker 环流的关系 [J]. 大气科学, 41 (1): 213-226. Yue Ruhua, Xu Haiming. 2017. Variations of the spring equatorial Indian Ocean zonal-vertical circulation and its correlation with the Walker circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 213-226, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1601.15259.

春季赤道印度洋纬向一垂直环流的变化特征及其与 Walker 环流的关系

岳如画^{1,2} 徐海明^{1,2}

1 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/气象灾害教育部重点实验室,南京 210044 2 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044

摘 要 利用 1951~2010 年 20CR (20th Century Reanalysis Version 2) 再分析资料和 NOAA 海表温度资料研究了 赤道印度洋纬向一垂直环流的季节性差异、变化特征及其与 Walker 环流的关系。本文首先分析了四个季节赤道印 度洋上空纬向一垂直环流的结构特征,发现春季和秋季存在严格东西方向上的赤道印度洋纬向一垂直环流。随后, 针对春季赤道印度洋纬向一垂直环流变化特征作进一步的分析,研究结果表明,春季纬向一垂直环流的强度及其 变率在 1951~2010 年间持续增强,而该垂直环流的中心位置则表现出明显的年代际变化特征: 1981 年之前垂直 环流的中心位置表现为向西移动,而在 1981 年后则转为向东移。春季赤道印度洋纬向一垂直环流与 Walker 环流 之间的相关关系同样存在年代际转折,1981 年之前两者之间并不存在显著的相关,而在 1981 年之后,两者之间 的关系显著增强。不同年代际时段内赤道印度洋纬向一垂直环流与海温的关系也发生了明显的改变,1981~2010 年赤道印度洋纬向一垂直环流主要受到前期和同期太平洋上的 ENSO 型海温信号的影响,而在此之前该垂直环流 主要受到前期和同期赤道东印度洋海温的影响。

关键词 赤道印度洋纬向─垂直环流 变化特征 相关关系 文章编号 1006-9895(2017)01-0213-14 中图分类号 P461 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1601.15259

Variations of the Spring Equatorial Indian Ocean Zonal–Vertical Circulation and Its Correlation with the Walker Circulation

YUE Ruhua^{1, 2} and XU Haiming^{1, 2}

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disasters of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the 20CR reanalysis dataset and the sea surface temperature (SST) dataset provided by NOAA, seasonal differences and variations of the equatorial Indian Ocean zonal–vertical circulation (EIOZVC) and its correlation with the Walker circulation are investigated. First, structures of the EIOZVC in the four seasons are analyzed,

收稿日期 2015-09-25; 网络预出版日期 2016-01-22

作者简介 岳如画,女,1991年出生,硕士研究生,主要从事海一气相互作用研究。E-mail: yueruhua91@163.com

通讯作者 徐海明, E-mail: hxu@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41275094、41490643、41575077,国家重大科学研究计划项目 2012CB955602,江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD),江苏省高校"青蓝工程"

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41275094, 41490643, and 41575077), National Basic Research Program of China (Grant 2012CB955602), A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD), Qinglan Project of Jiangsu Province

and the results suggest that the EIOZVC in a strictly zonal direction only appears in the spring and autumn. Further studies on variations of the EIOZVC in the spring show that the intensity of the EIOZVC and its variability increased during the period of 1951–2010, while the position of the EIOZVC center experienced a remarkable interdecadal variation: prior to 1981, the EIOZVC center shifted westward; however, it shifted eastward after 1981. There is also a noticeable interdecadal variation in the correlation between the EIOZVC and the Walker circulation in the spring. No high correlation is found between them prior to 1981, whereas the two circulations are found to be highly correlated after 1981. The relationship between the spring EIOZVC and seasonal mean SSTs over the Indian and Pacific Oceans also exhibits different patterns between the two periods, indicating that the EIOZVC is influenced primarily by the Pacific ENSO-like SST signals in the previous winter and the subsequent spring after the year of 1981. Before 1981, however, the EIOZVC was mainly influenced by the equatorial eastern Indian Ocean SSTs.

Keywords Equatorial Indian Ocean zonal-vertical circulation (EIOZVC), Variation, Correlation

1 引言

热带环流系统影响着全球天气与气候,作为其 重要的组成部分,赤道纬向一垂直环流的活动和变 化与热带、中纬度地区乃至全球大气环流的变化都 有密切关系。

对于赤道上空纬向一垂直环流的研究, 过去大 多数工作着眼于太平洋上的 Walker 环流。Walker 环流延伸横跨整个热带太平洋,由底层从东向西吹 的信风、西太平洋附近的上升气流、高层与信风反 向的西风和东太平洋的下沉气流构成(Gill, 1982)。 Bjerknes 认为这种环流结构与南方涛动有很大关 系。当南方涛动处于暖海温(El Niño)时, Walker 环流减弱,其上升支较常年偏东,La Niña 期间则 相反 (Bayr et al., 2014)。在年代际尺度上, 迄今 已有很多研究指出 Walker 环流的强度在过去 60 年 间有所减弱(Tanaka et al., 2004; Vecchi et al., 2006; Zhang and Song, 2006; Nicholls, 2008; Collins et al., 2010; Vecchi and Wittenberg, 2010; Power and Kociuba, 2011)。部分学者用环流上升支的能量和 质量守恒原理来解释这种减弱,即由于温室效应的 加剧,海表面温度进一步上升,伴随降水量和水汽 通量增长率的差异,大气对流循环减弱,最终影响 到低层风场以纬向风为主的 Walker 环流 (Tanaka et al., 2004; Trenberth et al., 2005; Held and Soden, 2006; Vecchi and Soden, 2007); 也有学者持不同 观点,认为 Walker 环流的减弱并非由于大范围海温 升高引起的大气环流变化, 而是由于海温纬向梯度 的减弱(Tokinaga et al., 2012a)或 El Niño 频率的 升高(Nicholls, 2008)。近年来,有研究通过对近 期高质量观测资料的分析发现, Walker 环流在过去 20 到 30 年间有增强的趋势 (Meng et al., 2011; Luo et al., 2012; Sohn et al., 2013; L'Heureux et al.,

2013; Mcgregor et al., 2014; Bayr et al., 2014), 增强的原因可能与大西洋增暖带来的东太平洋变 冷(Mcgregor et al., 2014)、印度洋增暖快于太平 洋(Luo et al., 2012)或者中部型 El Niño 出现增 多(Bayr et al., 2014; Sohn et al., 2013)有关。

很多研究认为 Walker 环流只是赤道带纬向环 流圈中的一部分,在赤道印度洋、大西洋等地区上 空同样存在纬向一垂直环流圈(Flohn and Fleer, 1975; Newell, 1979; Holton, 2004)。赤道印度洋 上空的纬向一垂直环流方向与 Walker 环流相反,暖 空气在印尼群岛及东印度洋一带上升, 西移至西印 度洋附近下沉,再在低层向东流。商树荣和蒋尚成 (2002)通过分析卫星资料反演的纬向一垂直环流 后发现,赤道印度洋纬向一垂直环流的强度、位置 和范围在一年之中存在较大变化,秋季垂直环流的 强度最强、位置最东;冬季环流的范围最大。而在 年代际尺度上, Yu and Zwiers(2010)发现年平均 的赤道印度洋纬向一垂直环流在 1957~2002 年间 有不显著的增强趋势。热带印度洋是热带海洋的一 个重要组成部分,由于印度洋特殊的地理位置,与 亚澳季风系统、ENSO 系统和非洲季风系统都存在 一定联系,其海—气相互作用对局地和全球气候变 化有着重要影响。Nicholson (2014) 指出赤道印度 洋纬向一垂直环流对东非的降水预报有很重要的 作用。Hastenrath et al. (2011)发现赤道印度洋表 层西风的强度与赤道东非降水在秋季存在显著负 相关。Pohl and Camberlin(2006)则发现其使用高 低层风切变定义的赤道印度洋纬向环流指数与东 北非洲降水在春季和秋季均存在显著的相关。相对 于 Walker 环流的大量研究工作, 对赤道印度洋纬向 一垂直环流的了解还较为有限,由于热带印度洋是 世界上最明显的季风区之一,其上空的垂直环流与 季风的变化密切相关,本文将对赤道印度洋纬向-- 垂直环流的季节性差异及其在春季的变化特征展 开讨论。

此外,自具有全球尺度的 ENSO 影响信号提出 后,人们逐渐把全球的海洋联系起来。有学者根据 观测资料分析提出了"热带大气桥"的思想(Klein et al.,1999),指出热带太平洋和热带印度洋可以 通过二者上空的大气相联系并产生相互作用。吴国 雄和孟文(1998)认为赤道印度洋上空的季风纬向 环流和太平洋上空的 Walker 环流类似于一对齿轮 耦合在一起,其啮合点位于印尼群岛附近,齿轮式 耦合的年际异常与 ENSO 事件存在很好的对应关 系。作为印度洋和太平洋上空的纬向一垂直环流, 赤道印度洋纬向一垂直环流与 Walker 环流之间的 关系究竟如何、其关系是否随着时间改变,也是值 得研究的问题。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所使用的资料包括:(1)美国国家大气海洋 局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 简称 NOAA) 提供的 20 世纪再分析资料(20th Century Reanalysis Version 2, 简称 20CR) 中的月平 均风场资料(Compo et al., 2011),该资料的水平 分辨率为 2°×2°,本文选取时段为 1951 年 1 月至 2010年12月; (2) NOAA 提供的月平均海表温度 资料 ERSST V3b (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature V3b; Smith et al., 2008), 该资 料的水平分辨率为 2°×2°,本文选取时段为 1951 年1月至2010年12月;(3) 欧洲中期天气预报 中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 简称 ECMWF) 提供的 ERA-40 (Uppala et al., 2005) 和 ERA-interim (Simmons et al., 2007) 再分析资料中的逐月纬向风场资料,资料的水平分 辨率为 2°×2°,选取时间段分别为 1958~1978 年 和 1979~2010 年,两者相接成为时间范围 1958~ 2010年的数据,以下称 ERA40in。

2.2 方法

选取赤道印度洋上空(4°S~4°N, 60°~90°E) 区域平均的表层纬向风、经向风作为表层纬向风强 度指数(U_{EQ})、表层经向风强度指数(V_{EQ})。通过 分析多年平均(1951年至2010年60年平均,下 文除特别指出外均相同)的U_{EQ}和V_{EQ}的季节变化, 以及不同季节热带印度洋上空高低层辐散风场的 情况,讨论赤道印度洋纬向一垂直环流的季节性差 异。

为探究赤道印度洋纬向一垂直环流的强度变 化,采用(4°S~4°N,60°~90°E)区域平均的850 hPa和200 hPa纬向风切变(低层减高层,指数大 表示环流强)的标准化时间序列作为赤道印度洋纬 向一垂直环流强度指数(U_{Shear}),其趋势由最小二 乘线性回归分析求得。类似的,采用赤道太平洋上 空(4°S~4°N,160°E~100°W)区域平均的850 hPa 和200 hPa纬向风切变(高层减低层,指数大表示 环流强)的标准化时间序列作为Walker环流强度指 数(U_{Shear}PC;何敏,1999)。

除了风切变指数外,纬向质量通量流函数(ψ) 可以较为直观地体现纬向一垂直环流的强度和位 置情况。ψ定义为

$$\psi(p) = 2\pi a / g \int_{p'}^{p'} u_{\mathrm{D}} \,\mathrm{d}\,p \,, \qquad (1)$$

其中,地球半径 a、气压 p、重力常数 g、纬向辐散 风 u_D (Yu and Boer, 2002)。计算时将 4°S 和 4°N 之间纬向辐散风进行平均,并由 10 hPa 积分到 1000 hPa,乘以常数得到赤道地区的纬向质量通量流函 数。对赤道印度洋上空的纬向质量通量流函数进行 EOF (Empirical Orthogonal Function)分析可探究 赤道上空纬向一垂直环流的强度和位置变化情况。

3 赤道印度洋上空纬向一垂直环流 的季节性差异

图 1a、b 分别给出了多年平均的 UEQ 和 VEQ 随 季节的演变(基于 20CR 月平均风场资料计算得到, 下文除特别指出外均使用该风场资料)。从图 1a 可 以看出,赤道印度洋上空表层风场的纬向风分量除 在1月、2月为负值(东风)外,其余月份均为正 值(西风), UEO的较大值出现在 4~5 月和 10~11 月。另外,由图1还可以看到, VEO在4月和11月 最接近 0 值 (图 1b),表明在这两个月赤道印度洋 上空表层风场的经向风分量最小,而在其他月份经 向风分量较大。Hastenrath (2007)认为,由于南印 度洋东南信风与赤道印度洋上空的东西纬向气压 差均在夏季达到最大,冬季则最小,而在春季和秋 季两个过渡季节,科氏力与气压梯度力的共同作用 使得南印度洋的东南信风在南半球的较高纬度转 向,有利于赤道印度洋上空西风带的发展。综上可 以看出,在冬季风和夏季风的转换季节,即春季和

秋季,赤道印度洋上空存在较强的西风气流。

热带印度洋是世界上季风现象最显著的地区 之一,伴随着季风的爆发和撤退,大范围风场存在 明显的季节转换。6~9月(JJAS)印度夏季风盛行, 赤道辐合带(ITCZ)的位置达到最北;1~2月(JF) ITCZ 的位置达到最南;3~5月(MAM)和10~ 12月(OND)为过渡时段,这两个时段也分别对应 着东非的两个雨季。Pohl and Camberlin(2011)根 据 ITCZ 的这种季节性迁徙,将3~5月、6~9月、 10~12月和1~2月划分为春季、夏季、秋季和 冬季四个季节,本文也采用上述热带印度洋的季节 定义。 图 2a、c 分别给出了冬季和夏季热带印度洋上 空 200 hPa 的辐散风场,可以看到赤道上空的辐散 风除了有由东向西的纬向分量,还有很大的经向分 量;850 hPa 的辐散风场也有类似的特征(图 3a、c)。 故在冬(夏)季,高、低层的东南(东北)和西北 (西南)辐散风,结合东部和西部的上升和下沉运 动形成垂直环流圈,该垂直环流在具有纬向一垂直 环流分量的同时也具有较大的经向分量。春季(图 2b 和图 3b)和秋季(图 2d 和图 3d)的情况则明显 不同,由于赤道印度洋上空辐散风的经向分量很 小,赤道印度洋东部上升中心和西部下沉中心之间 有较为连续的纬向辐散风,850 hPa 上存在由赤道



图 1 多年平均的(a) 纬向风 U_{EO} 指数和(b) 经向风 V_{EO} 指数的季节变化(单位: m s⁻¹)

Fig. 1 Seasonal variations of long-term mean indexes of (a) zonal wind (U_{EQ}) and (b) radial wind (V_{EQ}). Units: m s⁻¹



图 2 多年平均的 (a) 冬季 (JF)、(b) 春季 (MAM)、(c) 夏季 (JJAS) 和 (d) 秋季 (OND) 热带印度洋上空 200 hPa 辐散风场 (箭头,单位: m s⁻¹) 和速度势 (等值线,单位: m² s⁻¹)

Fig. 2 Long-term mean 200-hPa divergent wind field (vectors, units: $m s^{-1}$) and velocity potential field (contours, units: $m^2 s^{-1}$) in the (a) winter (January–February, JF), (b) spring (March–April–May, MAM), (c) summer (June–July–August–September, JJAS), and (d) autumn (October–November–December, OND)

西印度洋向赤道东印度洋的西风,而在 200 hPa上则吹东风气流。高、低层的东风和西风气流,再结合东部和西部的上升和下沉运动,在春、秋季节赤道印度洋上空形成严格东西方向的纬向一垂直环流。

综合以上结果表明,赤道印度洋上空的纬向— 垂直环流存在明显的季节性差异,春季和秋季赤道 印度洋上空存在东西方向的纬向—垂直环流,而在 冬季和夏季,赤道印度洋纬向—垂直环流为热带印 度洋上空垂直环流在东西方向的分量。接下来,本 文将就春季赤道印度洋纬向—垂直环流的变化作 进一步的研究。

4 春季赤道印度洋纬向一垂直环流 的变化特征

4.1 环流强度

图 4a 为基于 20CR 的风场资料计算得到的 1951~2010 年春季赤道印度洋纬向一垂直环流强 度指数(U_{Shear})随时间的演变。通过对其进行 11 年滑动平均和线性趋势分析后发现,除了明显的年 际变化之外,春季赤道印度洋纬向一垂直环流还呈 现明显的长期增强趋势。为了进一步验证该结果的



图 4 (a) 20CR 和 (b) ERA40in 资料计算的 1951~2010 年春季 U_{Shear} 指数(柱状图)及其 11 年滑动平均(虚线)。倾斜直线为线性回归,指数的 线性趋势标注在图左下方,星号表示趋势通过 95%的信度检验 [根据 Wilks (2011)提出的考虑有效自由度的 t 检验]

Fig. 4 Temporal variation of the springtime U_{Shear} index (bars) during 1951–2010 based on the (a) 20CR and (b) ERA40 datasets, and its 11-year moving average (dashed lines). Inclined straight lines show the linear trends fit to the U_{Shear} , trend coefficients are labeled on the bottom left corners of the corresponding panels, asterisks indicate the trends are statistically significant at the 95% confidence level according to a *t* test proposed by Wilks (2011) that considers the effective degrees of freedom

可信性,采用ERA40in的风场资料同样计算了U_{Shear}指数(图4b)。两种资料计算得到的U_{Shear}指数在两者的共同时段内(1958~2010年)存在很好的正相关(相关系数通过99%的信度检验)。

仔细分析图 4 还可以发现,图中 U_{Shear} 的变化 幅度在后期明显大于前期。施能等(2001)指出, 气候变化也体现在要素的气候变率上,气象要素变 率的改变与异常天气的频率及强度紧密联系,对于 气象要素变率的变化可以简单地采用滑动均方差 来表征。图 5 给出了 20CR 资料计算的春季 U_{Shear} 指数的 11 年滑动均方差(图 5a),同时也给出了 ERA40in 资料计算的结果(图 5b)。从图中可以看 到,无论采用 20CR 资料还是 ERA40in 资料计算的 U_{Shear} 指数的滑动均方差都表现出明显的上升趋势, 说明赤道印度洋纬向一垂直环流强度的变化幅度 在持续增大,后期的波动明显大于前期。以 20CR 资料计算的结果为例,1981~2010 年 U_{Shear}序列的 均方差为 1.2,而 1951~1980 年为 0.6,后 30 年达 到前 30 年的 2 倍。

4.2 环流位置

4.1 节的分析清楚表明,春季赤道印度洋纬向 一垂直环流的强度在增强、变化幅度也在增大,那 么,该纬向一垂直环流的位置是否也发生了相应的 改变呢?为此,这一小节中我们将通过分析印度洋 赤道垂直平面上的纬向质量通量流函数(ψ)来探 讨这个问题。图6给出了多年平均赤道上空ψ垂直 剖面分布图,其正值代表顺时针环流,负值代表逆 时针环流。由图6可见,赤道上空存在三个主要的 上升运动区,分别位于赤道非洲、印度尼西亚和南 美上空,而三个下沉运动区则分别位于西印度洋、 太平洋冷舌区和大西洋上空。三个上升运动区和三 个下沉运动区之间构成了三个主要纬向一垂直环 流,分别位于印度洋、太平洋和大西洋上空。

对 1951~2010 年春季赤道印度洋上空的 ψ 距 平场进行 EOF 展开后发现,其第一特征向量的空间 分布与多年平均的 ψ 分布类似 (图 7a),其对应的 标准化时间系数则表现为长期的显著增大趋势 (图 7c),表明垂直环流的强度在增强(注意 ψ 的负值 代表逆时针环流,故 ψ 的减小对应逆时针环流增 强)。第一特征向量对应的时间系数与之前利用风 切变定义的强度指数 Ushear 间也存在显著的正相 关,相关系数达 0.90,远远超过了 99%的信度检验。 这表明两种不同方法定义的赤道印度洋纬向一垂



图 5 (a) 20CR 和 (b) ERA40in 资料计算的 U_{shear} 指数的滑动均方差 随时间的演变(实线)及其 11 年滑动平均(虚曲线)。图中水平虚线是 滑动均方差的平均值

Fig. 5 Time series of sliding mean square deviation of the U_{Shear} index (solid line) and its 11-year moving average (dashed curve) based on the (a) 20CR and (b) ERA40in dataset. Horizontal dashed lines indicate the averages of sliding mean square deviation



图 6 多年平均的春季纬向质量通量流函数 (ψ ; 4°S~4°N 平均)的垂 直剖面分布。等值线间距: 5×10¹⁰ kg s⁻¹; 实 (虚)线为正 (负),代 表顺 (逆)时针方向环流

Fig. 6 Vertical cross section of the long-term mean zonal mass flux stream function (ψ , averaged over 4°S~4°N) in the spring. The contour interval is 5× 10¹⁰ kg s⁻¹. Solid (dashed) lines indicate the positive (negative) ψ , which represent clockwise (anticlockwise) circulations

直环流强度指数所揭示的春季垂直环流强度长期 变化特征相一致,也进一步验证了上述结论的可靠 性。另外,由图还可以清楚看到,第二特征向量的 空间分布(图7b)表现为西部减弱、东部增强的反 相变化分布,体现了纬向一垂直环流中心位置的变 化。由于其对应的时间系数(图7d)表现为先减弱、 后增强的变化趋势,表明纬向一垂直环流在1981 年之前中心位置逐渐西移,而在1981年之后,纬 向一垂直环流的中心位置则转为向东移动,明显表



图 7 春季赤道印度洋上空纬向质量通量流函数(ψ)距平场的 EOF (a)第一、(b)第二特征向量的空间分布(粗等值线)和对应的(c、d)标准 化时间系数(点实线)。(a)、(b)中细等值线为多年平均的ψ,等值线间距为5×10¹⁰kg s⁻¹;(c)中倾斜直线为时间系数的线性回归,趋势标注在图 右下角,星号表示通过95%的信度检验;细实线为同时期的U_{Shear}指数,其与时间系数的相关系数(R)标注在图右下角,星号表示通过99%的信度 检验;(c)、(d)中的虚线分别为时间系数的11 年滑动平均

Fig. 7 The (a) first and (b) second EOF modes of the spring zonal mass flux stream function (ψ) anomalies over the equatorial Indian Ocean (thick contours) and (c, d) their corresponding standardized time coefficients (thick solid lines with dots). Thin contours in (a) and (b) indicate the long-term mean ψ with the contour interval of 5×10^{10} kg s⁻¹. The inclined straight line in (c) shows the linear trend fit to the time coefficient; the trend coefficient is labeled on the bottom right corner of the figure; the asterisk indicates a statistically significant trend at the 95% confidence level. The thin solid line in (c) indicates the simultaneous U_{Shear} index; the correlation coefficient (*R*) between the U_{Shear} and time coefficient is labeled on the bottom right corner of the figure; the asterisk indicates a statistically significant correlation at the 95% confidence level. Dashed lines in (c) and (d) indicate the 11-year moving averages of time coefficients

现出一种年代际的转折。

5 春季赤道印度洋纬向一垂直环流 与 Walker 环流的相关性

许多研究认为热带太平洋与印度洋的相互作 用主要通过二者上空的大气相联系。吴国雄和孟文 (1998)指出 Walker 环流与热带印度洋上空纬向季 风环流之间存在显著耦合,纬向季风环流的异常可 以通过印度洋和太平洋上空大气系统的齿轮式耦 合来影响赤道中东太平洋的海气相互作用并触发 ENSO 事件发生(孟文和吴国雄,2000)。也有研究 认为 ENSO 事件是印度洋偶极子的触发机制之一, 指出 El Niño 的建立将导致赤道东印度洋的表面风 场异常,继而作用于赤道东印度洋的海温并导致 IOD(Indian Ocean Dipole)形成(Fischer et al.,2005; Nagura and Konda, 2007)。Yu and Zwiers (2010) 发现年平均的赤道印度洋纬向一垂直环流与 Walker 环流的强度都与 ENSO 的变化相关。

为了揭示赤道印度洋纬向一垂直环流与 Walker 环流两者之间的相关关系,对春季 Walker 环流强度指数(U_{ShearPC})与赤道印度洋纬向一垂直 环流强度指数(U_{Shear})的相关性进行分析。由于我 们关注的是年际变化尺度上的相关性,因此计算两 者的相关系数之前均去除了两个强度指数的长期 线性趋势。相关分析表明,在1951~2010年之间, U_{ShearPC}与 U_{Shear}间存在显著正相关,相关系数为 0.36,通过 99%的信度检验。

图 8 给出了 U_{Shear}和 U_{ShearPC}的 15 年滑动相关 系数。由图可见,两者的滑动相关系数从 20 世纪



图 8 春季赤道印度洋纬向一垂直环流强度指数与 Walker 环流强度指数之间的 15 年滑动相关系数。虚线:相关系数通过 95%的信度检验 Fig. 8 15-year sliding correlation coefficients between intensity index of the spring equatorial Indian Ocean zonal-vertical circulation and the Walker circulation. Dashed line shows the value at/above the 95% confidence level

60年代中后期起逐步增大,并在1981年通过了95%的信度检验,说明两者的关系经历了由相关性较弱到显著正相关的转变。分时段进行考虑后,如图 9 所示,1981~2010年赤道印度洋纬向一垂直环流强度与 Walker 环流间存在显著正相关,相关系数为0.53,通过99%的信度检验;而1981年之前赤道印度洋纬向一垂直环流强度与 Walker 环流间不存在显著相关。

综上可见,赤道印度洋纬向一垂直环流与 Walker 环流在近 30 年间耦合较好,而在之前的 30 年则不存在显著的相关关系。

6 春季赤道印度洋纬向─垂直环流 强度与海温的关系

很多学者从不同角度出发,发现海温在赤道上 空纬向一垂直环流的变化中起着重要的作用。例 如,Tokinaga et al. (2012a)指出,海温纬向梯度的 减弱是过去 60 年间 Walker 环流强度减弱的原因, 由于赤道西太平洋和赤道东印度洋的增暖速度慢 于赤道东太平洋和赤道西印度洋,致使赤道东西太 平洋间的海温梯度减小,Walker 环流减弱(Tokinaga et al., 2012b)。Luo et al. (2012)则认为近几十年 加剧的印度洋增暖使得赤道西太平洋信风增强,从 而加强了 Walker 环流。如前文所述,1981年后春 季赤道印度洋纬向一垂直环流与 Walker 环流的强 度之间存在较好的正相关,且 1981~2010 年春季 赤道印度洋纬向一垂直环流强度的变化率明显高



图 9 1951~2010 年春季赤道印度洋纬向一垂直环流强度指数(实线)与 Walker 环流强度指数(虚线)。两者在 1951~2010 年之间的相关系数标注 在图右上角,分时段的相关系数标注在图底部,星号表示通过 99%的信度检验

Fig. 9 Intensity indexes of the spring equatorial Indian Ocean zonal-vertical circulation and Walker circulation during 1951–2010. The correlation coefficient for the period of 1951–2010 is labeled on the top right corner of the figure, while the correlation coefficients for the two separate periods (1951–1980 and 1981–2010) are labeled on the bottom of the figure, respectively; asterisks indicate statistically significant correlations at the 99% confidence level

于之前 30 年。为了解海温在其中起了什么样的作用,分别用前后 30 年的春季 U_{Shear} 指数与距平海温做回归。

图 10 给出了 1951~1980 年前期冬季、同期春季和后期夏季、秋季的海温距平对春季 U_{Shear} 指数的回归场。可以清楚看到,赤道印度洋纬向一垂直环流强度变化与前期冬季和同期春季的赤道东印度洋海温异常显著相关,而后期夏季和秋季则与赤道中东太平洋的海温异常有关,表明前期冬季和同期春季赤道东印度洋海温的升高(降低)使得春季赤道印度洋纬向一垂直环流强度偏强(弱),并通过纬向一垂直环流进而影响到后期夏季和秋季赤道中东太平洋的海温异常偏低(高)。由此可见,

1951~1980年间,春季赤道印度洋纬向一垂直环流的强度主要受到前期和同期赤道东印度洋海温的影响,纬向一垂直环流的变化继而影响到后期太平洋海温。

1981~2010 年海温距平对春季赤道印度洋纬 向一垂直环流强度指数的回归结果显示(图 11), 在前期冬季和同期春季,热带太平洋海温距平与 Ushear 指数间存在大范围的显著相关区,其相关分布 与 El Niño/La Niña 海温异常的分布型相一致。 表 明,前期冬季和同期春季太平洋上 La Niña (El Niño)型的海温分布使得春季赤道印度洋纬向一垂 直环流强度偏强(弱),继而通过纬向一垂直环流 使得后期热带印度洋海温偏冷(暖)。说明前期和



图 10 1951~1980 年(a)前期冬季、(b)同期春季、(c)后期夏季和(d)后期秋季的海温距平场(单位: ℃)与春季 U_{Shear} 指数的回归分析。阴 影区表示通过 95%的信度检验的区域

Fig. 10 SST anomalies (units: °C) in (a) the previous winter, (b) the simultaneous spring, and the subsequent (c) summer and (d) autumn regressed on the spring U_{Shear} index for the period of 1951 to 1980. Shaded areas are for values at/above the 95% confidence level



图 11 同图 10, 但为 1981~2010 年

Fig. 11 Same as in Fig. 10, but for the period of 1981 to 2010



图 12 1951~1980(左列)和 1981~2010(右列)年(a、e)前期冬季、(b、f)同期夏季、(c、g)后期夏季和(d、h)后期秋季的 850 hPa 风场 与春季 U_{Shear}指数的回归分析。阴影区表示纬向风场的回归通过 95%的信度检验的区域

Fig. 12 850-hPa wind fields in (a, e) the previous winter, (b, f) the simultaneous spring and the subsequent (c, g) summer and (d, h) autumn regressed on the spring U_{Shear} index for the periods of 1951 to 1980 (left column) and 1981 to 2010 (right column). Shaded areas are for values at the 95% confidence level

同期太平洋上的 ENSO 型海温异常信号影响到赤道 印度洋纬向一垂直环流的变化,垂直环流的变化继 而影响后期热带印度洋的海温。Xie et al. (2010) 指出,热带印度洋对 ENSO 的响应存在年代际变化, 19 世纪 70 年代中期之后 ENSO 对热带印度洋的影 响明显增强, El Niño 的影响可以持续到其本身已经 消亡的夏季,造成热带印度洋海温异常增暖,与本 文所得结论相一致。从垂直环流强度指数与 850 hPa 风场的回归图(图 12)中也可以看出,1981~2010 年春季太平洋上的纬向风对赤道印度洋纬向一垂 直环流存在显著影响(图 12f),而这种关系在 1951~1980 年则并不显著(图 12b)。

图 13 给出了前后两个时段四季热带太平洋海 温的标准差。可以看出,赤道中东太平洋是海温年 际变化较为明显的区域。对比两图可发现,1981~ 2010 年间赤道中东太平洋海温的标准差明显较 1951~1980 年间增大,海温年际变化较大的区域类 似于 ENSO 事件时海温的分布,说明后一阶段 ENSO 的年际变化明显增强,这可能是造成后一阶段 Ushear 指数与前期冬季和同期春季的热带太平洋海温异常出现大范围显著相关区的主要原因。

7 小结和讨论

以往关于赤道上空纬向一垂直环流的研究大 多着眼于太平洋上 Walker 环流,而针对赤道印度洋 纬向一垂直环流的研究相对较少。本文从赤道印度 洋纬向一垂直环流的角度出发,探讨了其季节性差 异、变化特征及其与 Walker 环流的关系,得到以下 主要结果:

(1)赤道印度洋上空的纬向一垂直环流存在明显的季节性差异,春季和秋季赤道印度洋上空存在东西方向的纬向一垂直环流,而冬季和夏季的赤道印度洋纬向一垂直环流为热带印度洋上空垂直环流在东西方向的分量。

(2) 春季赤道印度洋纬向一垂直环流的强度及 其变率在 1951~2010 年持续增强,而其中心位置



图 13 1951~1980 (左列) 和 1981~2010 (右列) 年 (a、e) 前期冬季、(b、f) 同期夏季、(c、g) 后期夏季和 (d、h) 后期秋季的海温的标准差。等 值线间距为 0.2℃

Fig. 13 Standard deviations of tropical Pacific SST in (a, e) the previous winter, (b, f) the simultaneous spring, and the subsequent (c, g) summer and (d, h) autumn for the periods of 1951 to 1980 (left column) and 1981 to 2010 (right column). The contour interval is 0.2°C

的变化则经历了一次年代际的转折,1981年之前明 显表现为向西移动,而在 1981年之后则转为向东 移动。

(3) 春季赤道印度洋纬向一垂直环流与 Walker 环流的相关性也存在明显的年代际变化,1981 年之 前两者之间并不存在显著的相关,而在 1981 年之 后,两者之间的关系显著增强。

(4)不同年代际时段内春季赤道印度洋纬向— 垂直环流与海温的关系存在明显差异:1951~1980 年,垂直环流强度的年际变化主要受到前期和同期 赤道东印度洋海温的影响,垂直环流的变化继而对 后期夏、秋季的赤道中东太平洋海温异常产生影 响;而在1981~2010年,垂直环流强度的年际变 化主要受到前期和同期赤道太平洋上 El Niño/La Niña 型海温异常的影响,海温异常进而通过该垂直 环流对后期夏季的印度洋海温异常产生影响。

值得指出的是,春季赤道太平洋上空 ψ 距平场 的 EOF 第一特征向量的空间分布表现为西部增强、 东部减弱的反相变化形态(图 14a),其对应的时间 系数呈现出长期的显著增大趋势,对应 Walker 环流 中心位置的向西移动(图 14b);该时间系数与春季 赤道印度洋上空 ψ 距平场 EOF 第一特征向量对应 的时间系数之间的相关关系也存在明显阶段性(图 15),两者在 1981~2010 年存在显著正相关,而在 1951~1980 年则不存在显著相关。前文 4.2 小节已 经提到,赤道印度洋纬向一垂直环流的中心位置在 1981~2010 年有向东移动的趋势,本节也指出 Walker 环流的中心位置随着时间变化向西移动,综



图 14 春季赤道太平洋上空纬向质量通量流函数 (ψ) 距平场的 (a) EOF 第一特征向量的空间分布(粗等值线)及(b) 对应的标准化时间系数(点 实线)。(a) 中细等值线为多年平均的 ψ, 等值线间距为 5×10¹⁰ kg s⁻¹; (b) 中倾斜直线为时间系数的线性回归,趋势标注在图右下角,星号表示通 过 95%的信度检验; 虚线为时间系数的 11 年滑动平均

Fig. 14 (a) The first EOF mode of the spring zonal mass flux stream function (ψ) anomalies over the equatorial Pacific (thick contours) and (b) the corresponding time coefficient (solid line with dots). The thin contours in (a) indicate the long-term mean ψ with the contour interval of 5×10^{10} kg s⁻¹. The inclined straight line in (b) is the fitted linear trend line of the time coefficient; the trend coefficient is labeled on the bottom right corner of the figure; the asterisk indicates a statistically significant trend at the 95% confidence level. The dashed line in (b) indicates the 11-year moving average of the time coefficient



图 15 春季赤道太平洋上空纬向质量通量流函数(ψ)距平场 EOF 第 一特征向量对应的时间系数与春季赤道印度洋上空ψ距平场 EOF 第一 特征向量对应的时间系数的 15 年滑动相关系数。虚线:通过相关系数 的 95%信度检验

Fig. 15 15-year sliding correlation coefficient between the corresponding time coefficient of the first EOF mode of the spring zonal mass flux stream function (ψ) anomaly field over the equatorial Pacific and the corresponding time coefficient of the first EOF mode of the spring ψ anomaly field over the equatorial Indian Ocean. Dashed line: 95% confidence level for the correlation coefficient

合以上可以提出假设:是否由于赤道印度洋纬向— 垂直环流与 Walker 环流中心位置的靠拢,加强了两 者上升支的耦合,使得 1981~2010 年间两者强度 的年际变化出现了显著正相关?关于这一点还有 待进一步分析研究。

参考文献(References)

- Bayr T, Dommenget D, Martin T, et al. 2014. The eastward shift of the Walker circulation in response to global warming and its relationship to ENSO variability [J]. Climate Dyn., 43 (9–10): 2747–2763, doi:10.1007/s00382-014-2091-y.
- Collins M, An S I, Cai W J, et al. 2010. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño [J]. Nat. Geosci., 3 (6): 391–397, doi:10.1038/ngeo868.
- Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D, et al. 2011. The twentieth century reanalysis project [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137 (654): 1–28, doi:10.1002/qj.776.
- Fischer A S, Terray P, Guilyardi E, et al. 2005. Two independent triggers for the Indian Ocean dipole/zonal mode in a coupled GCM [J]. J. Climate, 18 (17): 3428–3449, doi:10.1175/JCLI3478.1.
- Flohn H, Fleer H. 1975. Climatic teleconnections with the equatorial Pacific and the role of ocean/atmosphere coupling [J]. Atmosphere, 13 (3): 96–109, doi:10.1080/00046973.1975.9648391.
- Gill A E. 1982. Atmosphere–Ocean Dynamics [M]. New York: Academic Press, 662pp.
- Hastenrath S. 2007. Circulation mechanisms of climate anomalies in East Africa and the equatorial Indian Ocean [J]. Dyn. Atmos. Oceans, 43 (1–2): 25–35, doi:10.1016/j.dynatmoce.2006.06.002.
- Hastenrath S, Polzin D, Mutai C. 2011. Circulation mechanisms of Kenya rainfall anomalies [J]. J. Climate, 24 (2): 404–412, doi:10.1175/ 2010JCLI3599.1.
- 何敏. 1999. 热带环流强度变化与我国夏季降水异常的关系 [J]. 应用气

象学报, 10 (2): 171–180. He Min. 1999. Relationship between tropical circulation intensity and summer precipitation anomaly in China [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 10 (2): 171–180, doi:10.3969/j.issn. 1001-7313.1999.02.005.

- Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming [J]. J. Climate, 19 (21): 5686–5699, doi:10.1175/ JCLI3990.1.
- Holton J R. 2004. An Introduction to Dynamic Meteorology [M]. 4th ed. San Diego: Academic Press, 535pp.
- Klein S A, Soden B J, Lau N C, et al. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge [J]. J. Climate, 12 (4): 917–932, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<0917: RSSTVD>2.0.CO;2.
- L'Heureux M L, Lee S, Lyon B. 2013. Recent multidecadal strengthening of the Walker circulation across the tropical Pacific [J]. Nat. Climate Change, 3(6): 571–576, doi:1038/nclimate1840.
- Luo J J, Sasaki W, Masumoto Y. 2012. Indian Ocean warming modulates Pacific climate change [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 109 (46): 18701–18706, doi:10.1073/pnas.1210239109.
- Mcgregor S, Timmermann A, Stuecker M F, et al. 2014. Recent Walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming [J]. Nat. Climate Change, 4 (10): 888–892, doi:10.1038/ nclimate2330.
- Meng Q J, Latif M, Park W, et al. 2012. Twentieth century Walker circulation change: Data analysis and model experiments [J]. Climate Dyn., 38 (9–10): 1757–1773, doi:10.1007/s00382-011-1047-8.
- 孟文, 吴国雄. 2000. 赤道印度洋—太平洋地区海气系统的齿轮式耦合 和 ENSO 事件 II. 数值模拟 [J]. 大气科学, 24 (1): 15–25. Meng Wen, Wu Guoxiong. 2000. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific–Walker circulation and the ENSO. Part II: Numerical simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (1): 15–25, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.01.02.
- Nagura M, Konda M. 2007. The seasonal development of an SST anomaly in the Indian Ocean and its relationship to ENSO [J]. J. Climate, 20 (1): 38–52, doi:10.1175/JCLI3986.1.
- Newell R E. 1979. Climate and the ocean: Measurements of changes in sea-surface temperature should permit us to forecast certain climatic changes several months ahead [J]. Amer. Sci., 67 (4): 405–416.
- Nicholls N. 2008. Recent trends in the seasonal and temporal behaviour of the El Niño–Southern Oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 35 (19): L19703, doi:10.1029/2008GL034499.
- Nicholson S E. 2014. The predictability of rainfall over the Greater Horn of Africa. Part I: Prediction of seasonal rainfall [J]. J. Hydrometeorol., 15 (3): 1011–1027, doi:10.1175/JHM-D-13-062.1.
- Pohl B, Camberlin P. 2006. Influence of the Madden-Julian oscillation on East African rainfall. I: Intraseasonal variability and regional dependency [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 132 (621): 2521–2539, doi:10.1256/ qj.05.104.
- Pohl B, Camberlin P. 2011. Intraseasonal and interannual zonal circulations over the equatorial Indian Ocean [J]. Theor. Appl. Climatol., 104 (1–2): 175–191, doi:10.1007/s00704-010-0336-1.

Power S B, Kociuba G. 2011. What caused the observed twentieth-century

weakening of the walker circulation? [J]. J. Climate, 24 (24): 6501–6514, doi:10.1175/2011JCLI4101.1.

- 商树荣, 蒋尚城. 2002. 卫星双通道反演的赤道纬向环流的气候特征及 与 ENSO 关系的研究 [J]. 热带气象学报, 18 (1): 56-64. Shang Shurong, Jiang Shangcheng. 2002. The climatic characteristics of equatorial zonal circulation retrieved with dual satellite channels and its relationship with ENSO [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 18 (1): 56-64, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2002.01.007.
- 施能,马丽,袁晓玉,等. 2001. 近 50 a 浙江省气候变化特征分析 [J]. 南京气象学院学报, 24 (2): 207–213. Shi Neng, Ma Li, Yuan Xiaoyu, et al. 2001. Climate variation features over Zhejiang Province in the last 50 years [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 24 (2): 207–213, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2001.02.009.
- Simmons A J, Uppala S, Dee D, et al. 2007. ERA-Interim: new ECMWF reanalysis products from 1989 onwards [J]. ECMWF Newslett., 110: 25–35.
- Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. J. Climate, 21 (10): 2283–2296, doi:10.1175/ 2007JCLI2100.1.
- Sohn B J, Yeh S W, Schmetz J, et al. 2013. Observational evidences of Walker circulation change over the last 30 years contrasting with GCM results [J]. Climate Dyn., 40 (7): 1721–1732, doi:10.1007/s00382-012-1484-z.
- Tanaka H L, Ishizaki N, Kitoh A. 2004. Trend and interannual variability of Walker, monsoon and Hadley circulations defined by velocity potential in the upper troposphere [J]. Tellus A, 56 (3): 250–269, doi:10.1111/j. 1600-0870.2004.00049.x.
- Tokinaga H, Xie S P, Deser C, et al. 2012a. Slowdown of the Walker circulation driven by tropical Indo–Pacific warming [J]. Nature, 491 (7424): 439–443, doi:10.1038/nature11576.
- Tokinaga H, Xie S P, Timmermann A, et al. 2012b. Regional patterns of tropical Indo–Pacific climate change: Evidence of the Walker circulation weakening [J]. J. Climate, 25 (5): 1689–1710, doi:10.1175/JCLI-D-11-00263.1.
- Trenberth K E, Fasullo J, Smith L. 2005. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor [J]. Climate Dyn., 24 (7–8): 741–758, doi:10.1007/s00382-005-0017-4.
- Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131 (612): 2961–3012, doi:10.1256/qj.04.176.
- Vecchi G A, Soden B J. 2007. Global warming and the weakening of the tropical circulation [J]. J. Climate, 20 (17): 4316–4340, doi:10.1175/ JCLI4258.1.
- Vecchi G A, Soden B J, Wittenberg A T, et al. 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing [J]. Nature, 441 (7089): 73–76, doi:10.1038/nature04744.
- Vecchi G A, Wittenberg A T. 2010. El Niño and our future climate: Where do we stand? [J]. Interdisciplinary Reviews Climate Change, 1 (2): 260– 270, doi:10.1002/wcc.33.
- Wilks D S. 2011. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences [M]. 3rd ed. Waltham: Academic Press, 669pp.

- 吴国雄, 孟文. 1998. 赤道印度洋一太平洋地区海气系统的齿轮式耦合 和 ENSO 事件 I. 资料分析 [J]. 大气科学, 22 (4): 470–480. Wu Guoxiong, Meng Wen. 1998. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific–Walker circulation and the ENSO. Part I: Data analyses [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 470–480, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.09.
- Xie S P, Du Y, Huang G, et al. 2010. Decadal shift in El Niño influences on Indo–Western Pacific and East Asian climate in the 1970s [J]. J. Climate, 23 (12): 3352–3368, doi:10.1175/2010JCLI3429.1.
- Yu B, Boer G 2002. The roles of radiation and dynamical processes in the El Niño-like response to global warming [J]. Climate Dyn., 19 (5–6): 539–554, doi:10.1007/s00382-002-0244-x.
- Yu B, Zwiers F W. 2010. Changes in equatorial atmospheric zonal circulations in recent decades [J]. Geophys. Res. Lett., 37 (5): L05701, doi:10.1029/2009GL042071.
- Zhang M H, Song H. 2006. Evidence of deceleration of atmospheric vertical overturning circulation over the tropical Pacific [J]. Geophys. Res. Lett., 33 (12): L12701, doi: 10.1029/2006GL025942.