

热带印度洋赤道辐合带的季节和年际变化特征

杨童¹, 牛广山^{2*}

¹成都信息工程大学, 大气科学学院, 四川 成都

²河南省焦作市气象局, 河南 焦作

收稿日期: 2021年9月22日; 录用日期: 2021年10月22日; 发布日期: 2021年10月29日

摘要

赤道辐合带(ITCZ)是一个靠近赤道的行星尺度强降水带, 同时也是哈德莱(Hadley)环流圈的上升中心。为了研究长期不同时间尺度上热带印度洋赤道辐合带的位置、强度和宽度的长期变化特征, 本文利用了1979年至2017年的逐月降水观测资料定义并计算出赤道辐合带及其位置、强度和宽度, 分析了其季节和年际变化特征。结果表明: 1) 赤道辐合带是南北半球之间气流辐合、气压最低的地区, 是热带气候系统的重要组成部分。它的位置和强度的变化会影响热带印度洋降水区域、强度和大气环流状况。2) 印度洋赤道辐合带中心位置的移动具有明显的季节和年际变化特征, 夏季位于赤道以北, 冬季位于赤道以南, 春秋季节则位于赤道附近地区; 而夏季ITCZ的中心位置常年位于北纬13°, 东经73°附近。3) 赤道辐合带的宽度常年南北跨越大约20个纬度, 但南北界波动幅度不大, 近年来宽度都有较弱的变窄。4) 降水量的中心强度可表示赤道辐合带的强弱, 它的最大中心强度值随时间变化波动明显, 2000年前后的最大中心强度存在明显地由平均高值向平均低值的转变, 而近年来强度逐渐变强。5) 印度洋和太平洋、大西洋上的赤道辐合带存在一定的区别和联系, 在印度洋和大西洋上赤道辐合带都是呈散点式分布, 而在太平洋上却呈东西带状分布。

关键词

印度洋赤道辐合带, 降水量, 中心强度, 宽度

Seasonal and Interannual Variation Characteristics of the Tropical Indian Ocean's Intertropical Convergence Zone

Tong Yang¹, Guangshan Niu^{2*}

¹College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Meteorological Bureau of Jiaozuo City, Henan Province, Jiaozuo Henan

Received: Sep. 22nd, 2021; accepted: Oct. 22nd, 2021; published: Oct. 29th, 2021

*通讯作者。

Abstract

The Intertropical Convergence Zone (ITCZ) is a belt of planetary-scale heavy rainfall near the equator and the ascending center of the Hadley Circulation. In order to study the long-term variation characteristics of the position, intensity and width of the tropical Indian Ocean Equatorial Convergence Zone on different time scales over a long period of time, this paper uses monthly precipitation observations from 1979 to 2017 to calculate the ITCZ and its position, intensity and width, and analyzes its seasonal and interannual variation characteristics. The results showed that: 1) The equatorial convergence zone is the region with the lowest air pressure between the northern and southern hemispheres, and it is an important part of the tropical climate system. Changes in its location and intensity will affect rainfall area, intensity and atmospheric circulation in the tropical Indian Ocean. 2) The central location of the Indian Ocean Equatorial Convergence Zone has obvious seasonal and interannual characteristics, with summer located north of the equator, winter located south of the equator, and spring and autumn located near the equator. In summer; the center of ITCZ is located at 13°N and 73°E throughout the year. 3) The width of the equatorial convergence zone spans about 20 latitudes from north to south throughout the year, but the fluctuation range between the north and south is not large, and in recent years, the width of the equatorial convergence zone has narrowed slightly. 4) The central intensity of precipitation can indicate the strength of the equatorial convergence zone. The value of the maximum central intensity fluctuates obviously with time. The maximum central intensity of precipitation around 2000 has an obvious change from the average high value to the average low value, but in recent years, the intensity has gradually become stronger. 5) Equatorial convergence zones in the Indian Ocean, the Pacific Ocean and the Atlantic Ocean have certain differences and connections; the equatorial convergence zones in the Indian Ocean and the Atlantic Ocean have scattered distribution, but in the Pacific Ocean it is an east-west belt distribution.

Keywords

The Intertropical Convergence Zone in the Indian Ocean, Precipitation, The Intensity of Center, Width

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

赤道辐合带(Intertropical Convergence Zone, 简称 ITCZ)作为热带气候系统的重要组成部分, 是南北半球两个副热带高压带之间气压最低、气流汇合的带区, 其亦可被定义为热带对流带、气压槽和低层风场辐合带等。它的位置和强度的变化会影响赤道地区降水范围、强度和大气环流状况的变化, 从而造成整个热带甚至全球的气候异常, 所以理解赤道辐合带的变化是气候变化研究中的重要问题。热带海洋是全球热量和水汽的重要来源, 而印度洋是世界第三大洋, 也是全球海温最高、体积最大的暖水区之一, 其强对流对于全球气候变化具有重要影响。同时, 热带印度洋气候受海-陆-气相互作用的强烈影响, 其气候特征与热带太平洋、大西洋相比既有相似又有显著不同[1] [2]。

最近的研究结果显示, 近几十年来, 印度洋的赤道辐合区降水都在增大和加强, 但是辐合区位置变化不大, 因为在年平均气候态上, 赤道辐合带常年处于 7°N 附近, 并没有与接受太阳短波辐射通量最多

的赤道重合, 并且随着季节南北移动。而热带地区又是热量和水汽输送最集中的地区, 即热带是能量产生的源地。同时赤道辐合带的变化对气候系统和天气也有一定的影响, 比如西太平洋上的台风百分之八十都形成于赤道辐合带中, 这便成为了热带扰动发生的主要源地。又由于在热带地区经常高温高湿、气流辐合上升, 所以有利于对流云系发展, 经常发生暴雨和雷阵雨, 同时也有利于热带低压的发展[3]。而赤道辐合带的建立、加强、减弱和消失过程都与其他天气系统的加强减弱有着密切的关系, 它的活动和变化不仅对热带地区的大气环流状况有影响, 而且对中纬度地区的天气和全球大气环流的变化都有重要影响。同时, 赤道辐合带有利于气旋的生成和发展, 其发生发展作用主要表现在: 一是提供能量的来源, 二是形成有利的大气环流场, 三是赤道辐合带附近风速垂直切变较小; 根据第二类条件不稳定机制, 赤道辐合带有利于热带气旋暖心结构的形成[4] [5]。

前人已有的研究表明, 赤道辐合带的建立、加强、减弱和消失过程都与其他天气系统的加强减弱有着密切的关系。例如: 赤道上西风的加强会直接影响赤道辐合带的加强; 副热带高压的加强会导致副高南侧(ITCZ 北部)偏东气流的加强, 进而使赤道辐合带加强; 澳大利亚上的高压也会影响 ITCZ 强度的变化, 高压加强的同时, 会使东南信风北推加强, 进而使 ITCZ 加强[6] [7]。而台风北上和赤道高压北上都分别在低纬偏东气流和赤道高压的控制下引起赤道辐合带的北抬并且减弱消失; 副热带高压偏南西伸至南海会使赤道西风撤退, 从而导致 ITCZ 消失; 中纬度西风槽的东移也会引起 ITCZ 的减弱消失, 它通过影响副高减弱东退而使偏东气流减弱, 从而使赤道辐合带消失[8] [9]。

2. 资料与方法

2.1. 资料概况

印度洋是世界第三大洋, 也是全球海温最高、体积最大的暖水区之一, 它位于亚洲、大洋洲、非洲和南极洲之间, 地区属热带海洋性气候和热带季风气候, 大部分位于热带、亚热带范围内, 赤道地带全年气温为 28℃, 比同纬度的太平洋和大西洋海域的气温高, 而且印度洋气温的分布随纬度改变而变化。

重点对印度洋地区的赤道辐合带的季节和年际变化特征进行分析, 所用的数据是第二版全球降水气候学项目(GPCP)逐月降水量分析产品(1979 年至 2017 年), 由极地轨道环境卫星(NOAA)提供观测数据。陆地上的降雨率(Ferraro) Geo-IR (Xie)由 SSMI/SSMIS 降雨率校准, 用于对较高纬度(海洋和陆地)的 TOVS/AIRS 经验降水估计值进行采样, 量表分析, 以对陆地上的卫星估计值进行偏差校正, 并与基于 1988 年之前使用的降水指数(OPI)采样的卫星估计值进行合并[10]。由于所选的资料都是在 1979 年之后, 所测得的资料可靠性和科学性都比较强。本文选取的观测资料均满足: 时间序列较长(1979~2017 年), 资料较为完整, 缺测值较少, 站点在所选年份之前没有变动的特点。所研究区域的经度范围: 30°E~105°E, 纬度范围为: 30°N~66.5°S。

2.2. 研究方法

通过利用 1979 年至 2017 年的逐月降水数据资料, 以降水量为主要气象要素, 编程画图来计算长期不同时间尺度上热带印度洋赤道辐合带的位置、强度和宽度, 并分析印度洋赤道辐合带的季节和年际变化特征。赤道辐合带的位置在填色图上用降水量的中心位置表示, 其降水量的最大强度为 ITCZ 的强度大小, 降水量数值在大于 10 mm/day 的地区为 ITCZ 的大致范围。在得到了 1979 年至 2017 年的逐年 7 月的最大降水中心强度的时间序列图之后, 通过数据标准化中的 z-score 标准化计算方法进行数据处理, 这种方法基于原始数据的均值和标准差(standard deviation)进行的标准化。这种标准化方法适用于变量的最大值和最小值未知的情况, 或有超出取值范围的离群数据的情况[11]。标准化的公式: 新数据 = (原数据 - 均值)/标准差, ($Z_{ij} = (X_{ij} - \bar{X}_i)/S_i$), 其中: Z_{ij} 为标准化后的变量值; X_{ij} 为实际变量值。标准化后

的变量值围绕 0 上下波动, 变量值大于 0 说明高于平均水平, 反之, 变量值小于 0 说明低于平均水平; 变量值越接近于 0 表示越接近平均水平, 反之则越偏离平均水平。

在计算印度洋赤道辐合带的强度指数时, 参考副热带高压强度指数的定义, 通过计算逐年强度值大于某一数值的次数累计来分析。根据逐年赤道辐合带分布图上各个格点的强度值, 指定在印度洋范围上的经纬度所有格点中大于 10 mm/day 的次数累计相加, 可得到逐年赤道辐合带的强度指数, 进一步通过数据标准化处理得到逐年赤道辐合带的强度偏离平均状态的曲线图。

3. 研究结果

3.1. 印度洋赤道辐合带的季节和年际变化特征

3.1.1. 印度洋赤道辐合带的季节变化特征

赤道辐合带是南北半球之间气流辐合、气压最低的东西狭长气流带, 它作为哈德莱环流圈的上升支, 是热带气候系统的重要组成部分, 但赤道辐合带并非与接受太阳短波辐射通量最多的赤道重合, 而是随着季节南北移动[12][13], 夏季位于赤道以北, 冬季位于赤道以南。本文重点研究热带印度洋的赤道辐合带的季节和年际变化特征, 研究区域集中在 30°E~105°E 和 30°N~66.5°S。本文利用 1979 年至 2017 年共 39 年间热带印度洋的年降水量数据, 得到了多年平均状态下的赤道辐合带的强度、位置以及中心强度状况图, 如图 1 所示, 赤道辐合带的中心位置位于 2°N, 112°E 附近的印度尼西亚地区, 赤道辐合带强度的大小可以用降水量强度来表示, 研究中把强度大于 10 mm/day 的格点记为 ITCZ 的位置, 可以看出平均状态下的赤道辐合带范围位于赤道印度尼西亚地区(5°S~5°N), 南北跨越了近 10 个纬度。同时在赤道印度洋中部地区也有自印尼地区向西延升的降水量强度不大的带状降水带。而研究中的印度洋逐年季平均、逐年 7 月平均状态的赤道辐合带都需要和多年平均状态下的赤道辐合带进行比较, 从而得出不同时间尺度上的特征状况。

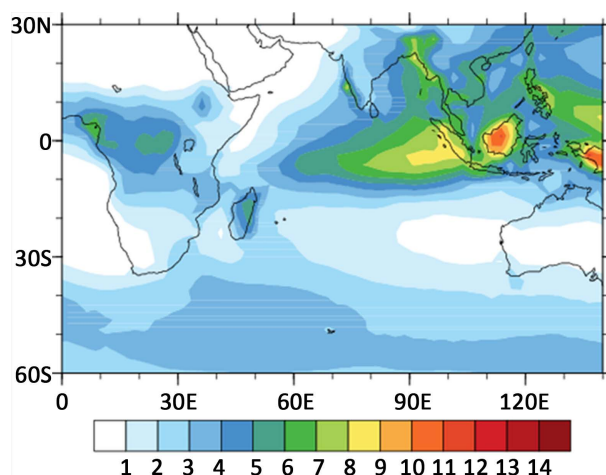


Figure 1. Annual average distribution of ITCZ in the Indian Ocean from 1979 to 2017 (unit: mm/day)

图 1. 1979 年~2017 年印度洋 ITCZ 的年平均分布状态(单位: mm/day)

图 2 展示了逐年不同季节的平均降水量分布状态图, 可以看出, 在不同季节, 热带印度洋赤道辐合带的位置和强度特征具有显著的差异。春季赤道辐合带的中心位置位于赤道附近的印度尼西亚地区, 由于太阳辐射的原因, 降水量范围是四个季节中最小的, 即 ITCZ 的宽度最窄(10°S~5°N), 同时降水量最大中心强度也最小低至 12 mm/day。夏季太阳直射向北移动, 这时 ITCZ 位于赤道以北地区, 赤道辐合带的

中心位置位于缅甸老挝一带(18°N, 93°E), 通常夏季大气中水汽含量比较丰富, 则降水量强度较强, 从图清晰可见, 夏季 ITCZ 中心强度最大高达 40 mm/day, 此时 ITCZ 开始增强, 6~8 月 ITCZ 进入强盛期; 同时赤道辐合带范围最大, 南界位于赤道附近, 北界位于 30°N 附近, 南北跨域了近 30 个纬度。秋季伴随着太阳直射点的南移, 赤道辐合带的中心位置也南移至印度尼西亚地区, 和春季分布位置大致相同, 基本位于 5°S, 110°E 附近, 但 ITCZ 的范围比春季有所增大, 最大中心强度位置则与春季较一致, 相比夏季强度中心值有一定的减弱。而冬季随着太阳直射点的进一步南移, 赤道辐合带移至赤道以南的印度洋中部地区, 自马达加斯加到印度尼西亚地区呈带状分布, 这时 ITCZ 位于 25°S~3°N 之间, 赤道辐合带的最大中心强度和春秋季相似, 强度值较弱。因此从逐年季平均降水量图可得出结论: 热带印度洋赤道辐合带具有明显的季节变化特征, 总体来说, 夏季偏北, 冬季偏南, 春秋季位于赤道附近[14] [15]。

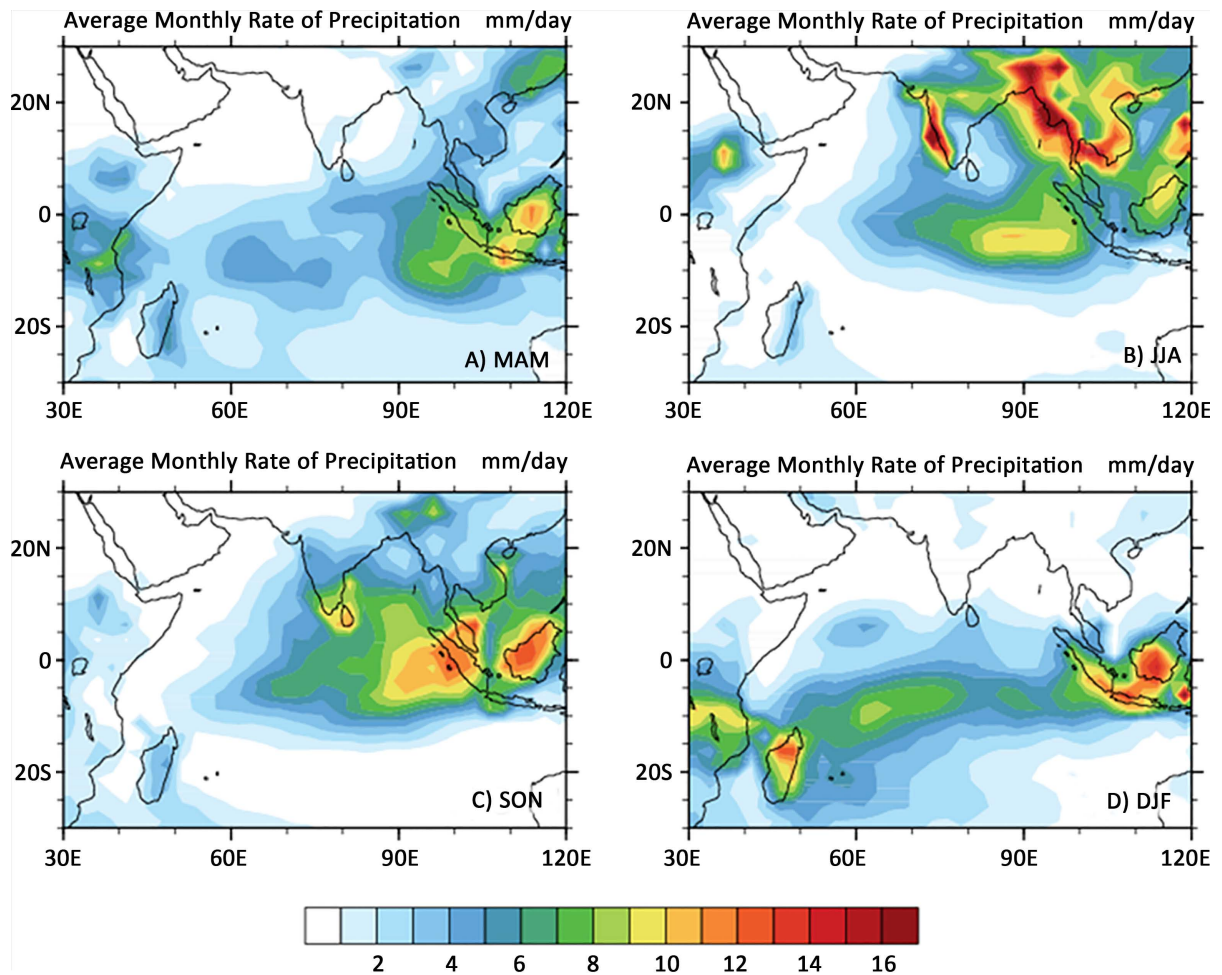


Figure 2. Average distribution of ITCZ in different seasons from 1979 to 2017(unit: mm / day)

图 2. 1979 年~2017 年 ITCZ 在不同季节平均下的分布状态(单位: mm/day)

3.1.2. 1979 年至 2017 年的逐年 7 月 ITCZ 的变化特征

ITCZ 的位置总体上随着太阳直射的南北移动而移动, 夏季, ITCZ 的位置基本上位于赤道以北。而降水量的范围也随着 ITCZ 的移动向北移, 强度中心在 0°~30°N 以内出现两个及以上, 一般位于印度半岛的西南地区、中南半岛的西南地区以及青藏高原南部, 强度达 35 mm/day, 而赤道以南的印度洋上基本没有降水。当夏季 ITCZ 偏北时, 印度洋的暖湿气流通过西南通道向北输送, 有利于在我国西南地区形

成降水[16]。

本文选用的逐年 7 月数据中, 热带印度洋夏季赤道辐合带的变化特征有出现明显偏离平均状态的年份, 结合下图可得出赤道辐合带的宽度和强度特征如下: 1) 1979 至 2017 年热带印度洋赤道辐合带的范围出现一定的年际变化特征。1990 年前, 赤道辐合带的范围相对较窄, 其中 1986 年最小出现在印度半岛和缅甸一带, 如图 3 所示, 降水量最大中心强度较弱低至 24 mm/day。而 1994 年印度洋降水量的范围和强度在赤道以北地区相比前几年都出现增大的现象, 并且在 10°N~25°N 出现 5 个强度中心, 分别位于印度半岛西部、印度半岛北部、缅甸南部、中国南部沿海和南海地区; 此外, 赤道辐合带的整体宽度较大, 南北范围覆盖了近 20 个纬度; 相比 2000 年以前, 赤道辐合带的南北范围在 2000 年后普遍变宽。2) 从整体分布上来看, 39 年中的夏季热带印度洋赤道辐合带的中心位置相比之下变化并不明显, 基本位于 20°N 附近。而它的中心强度却出现一定的年际变化特征: 1990 年以前, 赤道辐合带的最大中心强度较弱, 而 1990 年至 2000 年间强度明显增强, 在 1999 年赤道辐合带强度达到最强, 高达 45 mm/day, 中心位置位于印度半岛的西部地区附近, 降水南北覆盖范围不大。2000 年以后, 中心强度值出现明显的转折, 最大强度普遍减弱, 其中最小值出现在 2012 年, 强度值低至 21 mm/day, 而赤道辐合带的范围也较小 (10°N~25°N), 同时在印度洋上也出现了两个弱的降水量强度中心。

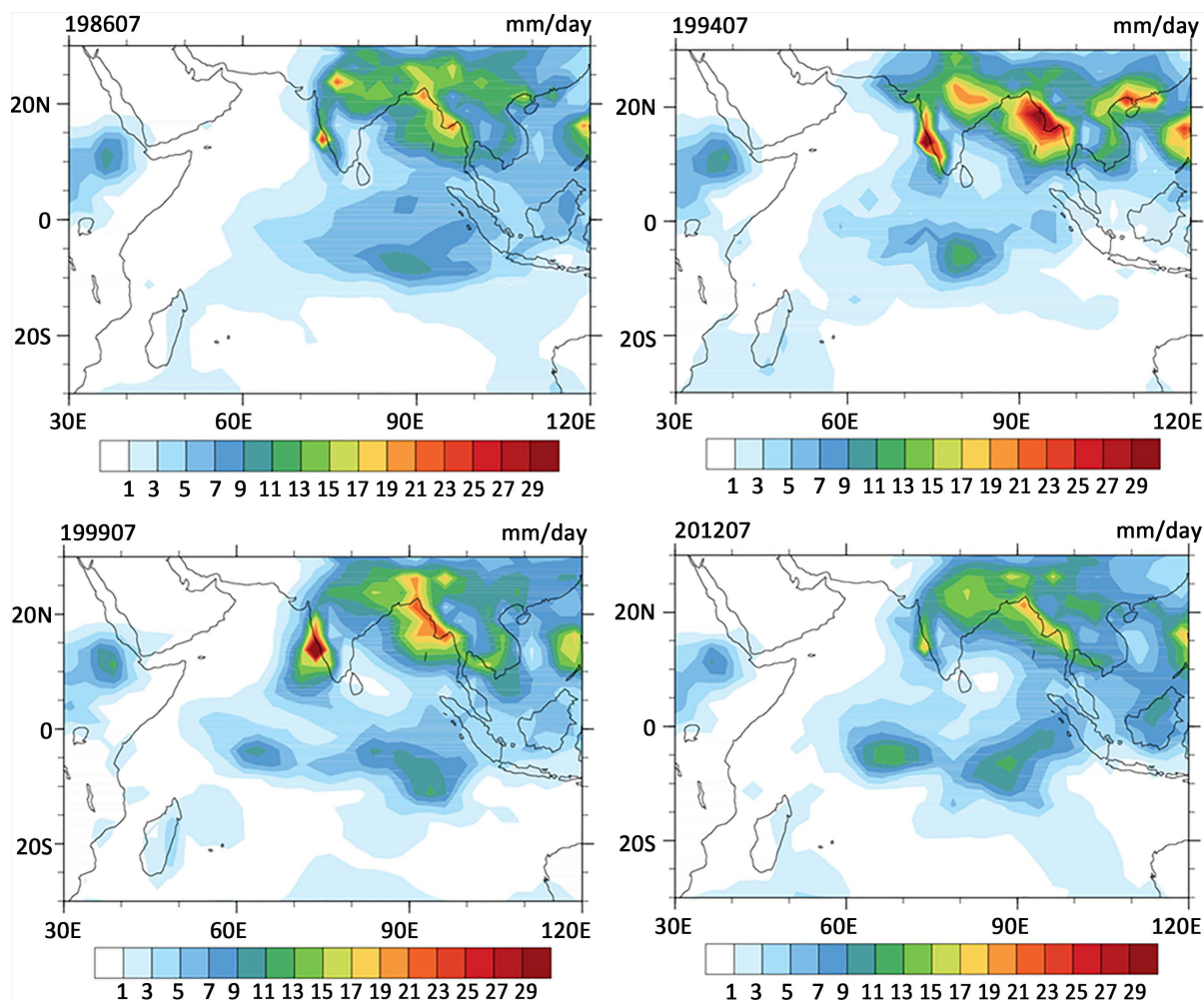


Figure 3. Distribution of ITCZ in July of typical characteristic year (unit: mm/day)

图 3. 典型特征年份 7 月的 ITCZ 的分布状况(单位: mm/day)

3.1.3. 逐年 ITCZ 最大中心强度及强度指数概况

热带印度洋赤道辐合带的最大中心强度有明显的年际变化, 通过印度洋 ITCZ 强度的逐年演变即图 4 可清楚地看出, 这种年际尺度上的强弱变化与降水量强弱有明显的对应关系。由印度洋 ITCZ 最大中心强度时间序列图(1979~2017 年 7 月逐年强度值)可知, 2000 年前后的中心强度存在明显的由平均高值向平均低值的转变。1979 年~1990 年, ITCZ 最大中心强度值高低起伏明显, 在 1982 年和 1983 年连续两年稳定增加, 基本达到 39.6 mm/day, 对应的强度最小值出现在 1986 年; 1990 年~2000 年之间的整 10 年 ITCZ 强度变化以 2 年为一周期都保持着较高的中心水平, 其中强度超过 40 mm/day 的年份出现过 5 次, 并且在 1999 年有着 39 年中的最大值高达 45 mm/day 以上; 2000 年后, 最大中心强度值出现明显的降低, 至 2008 年间, 中心强度值一直呈现偏低的状态, 而 2008 年~2017 年, ITCZ 强度变化幅度较大和 1990 年以前相似。

进一步通过数据标准化处理的方法可以得出逐年 ITCZ 中心强度与平均水平的偏离状态。本文使用的是 z-score 标准化计算方法, 这种方法基于原始数据的均值和标准差进行数据的标准化, 适用于变量的最大值和最小值未知的情况, 或有超出取值范围的离群数据的情况。从图 5 可以清晰看出, 标准化处理前后的折线图走势几乎一致, 只是数据处理前后的变量值有所改变。数据标准化后的变量值围绕 0 上下波动, 变量值大于 0 说明异常高于平均水平, 反之, 变量值小于 0 说明异常低于平均水平; 变量值越接近于 0 表示越接近平均水平, 反之则越偏离平均水平。由图可得, 2000 年前后的中心强度值有明显的转变, 2000 年前的 ITCZ 中心强度基本高于平均水平, 相反 2000 年后变量值基本小于 0, 表示 ITCZ 中心强度基本低于平均水平, 同样表现出 ITCZ 中心强度的年际变化特征比较显著。

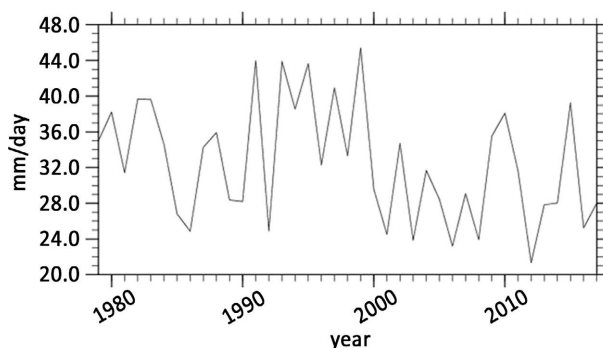


Figure 4. Sequence diagram of ITCZ maximum center intensity from 1979 to July 2017

图 4. 1979 年至 2017 年逐年 7 月 ITCZ 最大中心强度的时序图

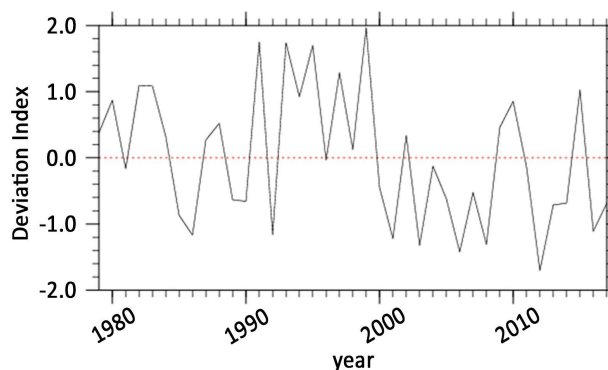


Figure 5. Deviation between center intensity and average level year by year after data standardization

图 5. 数据标准化后逐年中心强度与平均水平的偏离情况

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. ITCZ 最大中心强度异常偏离平均状态的年份概况

年份	偏离指数	年份	偏离指数
1982	1.09	1999	1.97
1983	1.08	2001	-1.22
1986	-1.17	2003	-1.32
1991	1.75	2006	-1.42
1992	-1.16	2008	-1.31
1993	1.74	2012	-1.70
1995	1.70	2015	1.02
1997	1.28	2016	-1.11

经过数据标准化处理, 以偏离指数绝对值大于 1.0 作为衡量 ITCZ 最大中心强度强弱的标准。从 39 年印度洋 ITCZ 的中心强度值可知, 共有 16 年的数据都大于 1.0, 并且 ITCZ 中心强度异常偏强年共有 8 年, 异常偏弱年也有 8 年, 具体见表 1, 由此可见, 41% 的年份都明显偏离平均状态。其中 2000 年前后, ITCZ 中心强度出现由异常偏强向异常偏弱的显著性转变, 2000 年前, 偏离指数呈现正值, 表示最大中心强度值是大于平均状态的变量值; 而 2000 年后, 偏离指数呈现负值, 表示中心强度值是小于平均状态的变量值。ITCZ 异常偏强年最强出现在 1999 年, 结合图 3 可见, ITCZ 的最大中心强度出现最大值, 这时偏离状况也达到鼎盛期, 指数高达 1.97; 相对地 ITCZ 异常偏弱年最弱出现在 2012 年, 这时 ITCZ 的最大中心强度最小, 偏离指数低至-1.70。

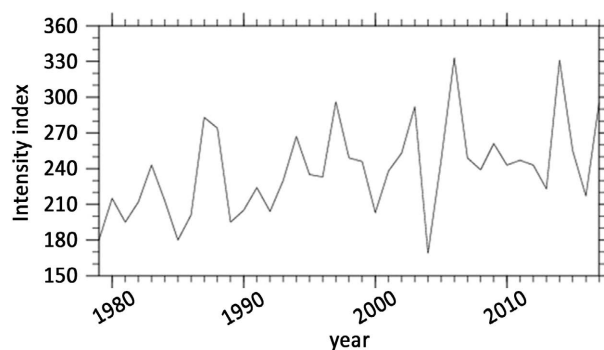


Figure 6. Time series of annual intensity index of the equatorial convergence zone of the Indian Ocean

图 6. 印度洋赤道辐合带的逐年强度指数时序图

为了说明热带印度洋 ITCZ 强度指数的年际变化特征, 这里统计了 1979 年~2017 年 ITCZ 的逐年强度, 把印度洋范围上 7 月强度值大于 10 mm/day 的格点数累计, 得到热带印度洋赤道辐合带强度指数时序图。由图 6 可知, 强度指数最大值出现在 2006 年, 格点数累计高达 333, 对应的强度指数最小低至 169 在 2004 年。由于强度格点数累积次数可以清晰看出 ITCZ 的分布范围, 结合表 1 可以看出, 出现 ITCZ 的范围和中心强度最大值的地理位置并不是一致对应的, 比如 2006 年仅有 23 mm/day 的最大中心强度在分布范围却南北跨越很大, 而 ITCZ 范围最窄的年份对应的中心强度并非最低, 强度值也达 30 mm/day 以上。并且在 39 年中 ITCZ 的强度指数大于 280 的年份出现过 6 次, 除了 2006 年还分别出现在 1987 年、1997 年、2003 年、2014 年和 2017 年, 同样强度指数小于 200 的年份出现过 5 次, 分别

是 1979 年、1981 年、1985 年、1989 年和最小值的 2004 年。由图中折线趋势可得, 自 1979 年到 2017 年以来, ITCZ 的强度指数一直呈现缓慢增加的趋势, 同时可预测出未来 ITCZ 的强度可能会持续保持一定水平的增大。

为了解印度洋 ITCZ 强度指数与平均水平的偏离状态, 同样使用 z-score 标准化处理的计算方法。标准化后的变量依然围绕 0 上下波动, 变量值大于 0 说明异常高于平均水平, 反之, 变量值小于 0 说明异常低于平均水平。从图 7 可以清晰看出, 其实标准化处理前后的折线图走势几乎保持一致, 只是纵坐标从原来的强度指数变为偏离平均水平的状态。相同的自 1979 年到 2017 年以来, ITCZ 的强度指数偏离情况一直缓慢增强, 并且继 2004 年出现异常偏弱于平均状态最强后, 近 10 年出现异常偏弱状态的频数减少, 和图 6 相对应的也可看出未来几年 ITCZ 异常偏强的现象将会持续以较高水平出现。无论 ITCZ 强度指数是否经过数据标准化处理均表明, 结果并不改变热带印度洋 ITCZ 强度指数年际变化的基本特征。

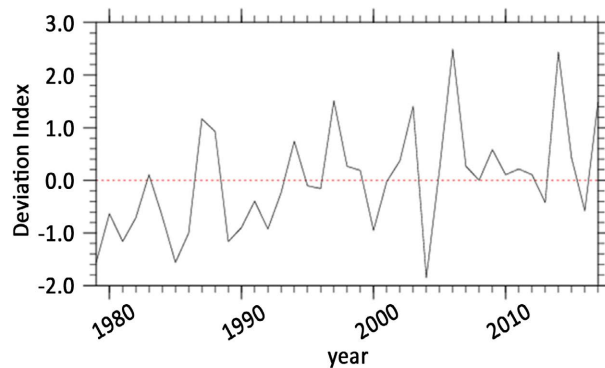


Figure 7. Deviation between annual intensity index and average level after data standardization
图 7. 数据标准化后逐年强度指数与平均水平的偏离情况

基于上述分析, 把偏离指数绝对值大于 1.0 作为衡量 ITCZ 异常偏离平均水平的标准, 这里统计了 1979 年~2017 年印度洋 ITCZ 的强度指数偏离状况符合标准的年份, 由表 2 可得, 39 年的数据经过标准化处理后共有 12 年的数据绝对值大于 1.0, 占总年份数的 30%。而由多年印度洋 ITCZ 偏离状态可知, 39 年间, ITCZ 强度异常偏弱频发年份集中在 1979 年~1986 年, 并且在 1997 年后, ITCZ 强度有向异常偏强的显著性转变, 尤其是 2004 年后的强度异常偏弱频数相对较少。其中 ITCZ 异常偏强年且偏离状况达到鼎盛期出现在 2006 年和 2014 年, 偏离指数分别高达 2.49 和 2.43; 对应的在 2004 年 ITCZ 异常偏弱且偏离指数低至-1.85。

Table 2. System resulting data of standard experiment
表 2. ITCZ 强度指数异常偏离平均状态的年份概况

年份	偏离指数	年份	偏离指数
1979	-1.56	1997	1.51
1981	-1.61	2003	1.40
1985	-1.56	2004	-1.85
1986	-1.00	2006	2.49
1987	1.17	2014	2.43
1989	-1.61	2017	1.48

3.1.4. 逐年印度洋赤道辐合带的参数概况

赤道辐合带作为哈德莱环流圈的上升支, 是热带气候系统的重要组成部分, 但它并非与接受太阳短波辐射通量最多的赤道重合, 而是随着季节南北移动, 且具有强的经向风切变并伴随着强的对流。赤道辐合带位置和强度的变化会影响热带地区降水区域、强度和大气环流状况, 从而造成整个热带甚至全球的气候异常。本文着重分析了夏季印度洋赤道辐合带的年际变化特征, 则可以通过逐年赤道辐合带强度、宽度以及中心位置分析得到 39 年的年际变化基本特征, 探寻热带印度洋赤道辐合带各种参数之间是否存在一定的联系。

如表 3 所示, 总体来看, 夏季印度洋赤道辐合带的宽度都南北跨越了 20 个纬度, 南界大致位于 10°N, 北界大致位于 28°N, 宽度上下波动幅度不大; 赤道辐合带宽度在 1990 年后期有一较弱的增宽过程, 最宽年份出现在 1996 年和 2007 年, 其中范围最宽的 ITCZ 北界一直往北伸展到 31°N 左右, 而 1984 年~1987 年、1997 年~2004 年间赤道辐合带宽度都相对较窄。结合图 7 可得, 未来几年赤道辐合带将会以较小趋势继续扩大[17][18]。热带印度洋赤道辐合带的强度中心基本有 2 个及以上, 但最大中心强度即 ITCZ 的中心位置常年位于 13°N, 73°E 附近; 而 39 年中, 中心位置位于 20°N, 90°E 附近的年份出现过 15 次, 占总年份数的 38%, 其中 2002 年 ITCZ 的中心位置一直向东伸展到 118°E 左右。赤道辐合带的最大中心强度数值年际变化比较明显, 最小值低至 21 mm/day 而最大值却高达 45 mm/day, 其中强度大于 40 mm/day 的年份在 1990 年~2000 年间以 2 年为一周期出现过 5 次, 而近年来中心强度值都有一定的增强趋势。赤道辐合带的强度指数最大值高达 333 出现在 2006 年, 其次大于 330 的还有 2014 年, 强度指数高达 331; 而强度指数最小低至 169 出现在 2004 年。从逐年热带印度洋赤道辐合带的宽度、强度等参数情况可以看出各参数之间并没有一定的相关性。

Table 3. Overview of width, strength and center position of ITCZ from 1979 to July 2017

表 3. 1979 年至 2017 年逐年 7 月 ITCZ 的宽度、强度及中心位置概况

年份	ITCZ 南界	ITCZ 北界	ITCZ 最大中心强度 (mm/day)	ITCZ 强度指数 (次)	ITCZ 中心位置 (纬度)	ITCZ 中心位置 (经度)
1979	7°N	27°N	34.98401	180	13°N	73°E
1980	10°N	29°N	38.21021	215	13°N	72°E
1981	10°N	30°N	31.4283	195	14°N	73°E
1982	8°N	28°N	39.67278	212	13°N	74°E
1983	9°N	27°N	39.61118	243	12°N	74°E
1984	10°N	30°N	34.59972	213	13°N	73°E
1985	11°N	29°N	26.81089	180	26°N	88°E
1986	10°N	28°N	24.85946	201	14°N	73°E
1987	13°N	29°N	34.26694	283	20°N	91°E
1988	8°N	30°N	35.91585	274	13°N	73°E
1989	9°N	29°N	28.35783	195	12°N	74°E
1990	10°N	29°N	28.20009	205	20°N	93°E
1991	8°N	28°N	43.96852	224	13°N	73°E
1992	8°N	27°N	24.87674	204	12°N	73°E
1993	5°N	28°N	43.89304	230	13°N	74°E

Continued

1994	10°N	31°N	38.54315	267	18°N	93°E
1995	6°N	28°N	43.63858	235	13°N	72°E
1996	3°N	30°N	32.28294	233	12°N	73°E
1997	8°N	28°N	40.92524	296	13°N	73°E
1998	10°N	29°N	33.30723	249	20°N	91°E
1999	10°N	27°N	45.38377	246	13°N	74°E
2000	10°N	27°N	29.57269	203	12°N	73°E
2001	12°N	28°N	24.51365	238	18°N	93°E
2002	11°N	28°N	34.71928	253	16°N	118°E
2003	9°N	30°N	23.84372	292	13°N	74°E
2004	10°N	28°N	31.68043	169	26°N	91°E
2005	10°N	27°N	28.45317	247	13°N	73°E
2006	9°N	26°N	23.19903	333	20°N	92°E
2007	5°N	30°N	29.08238	249	21°N	91°E
2008	10°N	28°N	23.92536	239	20°N	91°E
2009	9°N	27°N	35.51673	261	13°N	74°E
2010	8°N	26°N	38.09362	243	13°N	74°E
2011	8°N	27°N	31.63967	247	14°N	73°E
2012	10°N	27°N	21.34885	243	20°N	91°E
2013	5°N	29°N	27.83428	223	12°N	74°E
2014	9°N	25°N	28.03072	331	13°N	72°E
2015	12°N	27°N	39.23317	255	21°N	92°E
2016	11°N	30°N	25.24011	217	20°N	91°E
2017	10°N	29°N	27.99535	295	20°N	93°E

3.2. 印度洋和太平洋、大西洋赤道辐合带变化的区别和联系

3.2.1. 印度洋和太平洋赤道辐合带的变化区别与联系

太平洋作为地球上的最大的海洋,有着独特的气候分布状况,和印度洋又有着一定的共同点和明显的区别。为了比较热带太平洋和印度洋 ITCZ 的变化特征,计算了 39 年年平均状态下太平洋 ITCZ 的分布状况,如图 8 所示,太平洋上的降水量分布自西太平洋到东太平洋呈东西狭长带状分布,与印度洋有着明显的区别就是太平洋 ITCZ 的分布特征十分明显,呈东西带状分布,中心位置一般位于南美洲的北部地区和印度尼西亚地区;而印度洋 ITCZ 分布则地区性较强,中心位置一般位于亚洲南部地区的印度尼西亚和缅甸一带;两大洋 ITCZ 的宽度也相差不大,南北跨越接近 20 个纬度[19]。而印度洋和太平洋又有着大致相同的特征:它们各自年平均状态下 ITCZ 的最大中心强度都不大,维持在 15 mm/day 左右。同时两大洋作为热带海洋还有着密不可分的联系,各自的海气分布状况都同时影响着赤道以及整个地球

的气候状况, 并且呈现不同的月、季节和年际分布特征。

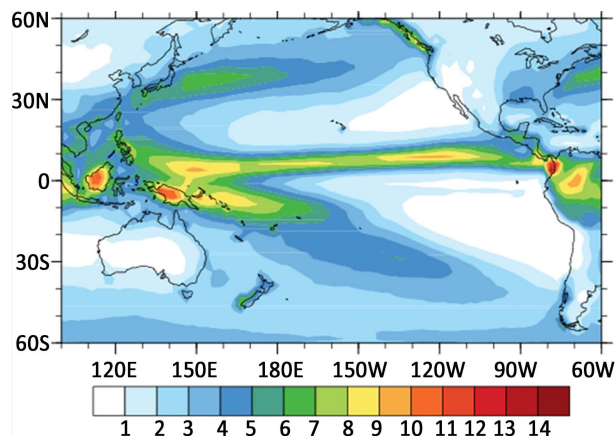


Figure 8. Annual average distribution of the Pacific equatorial convergence zone(unit: mm / day)

图 8. 太平洋赤道辐合带的年平均分布状况图(单位: mm/day)

3.2.2. 印度洋和大西洋赤道辐合带的变化区别与联系

大西洋作为世界第二大洋, 位于欧洲、非洲与南、北美洲和南极洲之间, 和太平洋、印度洋上的海气分布状况有着共同点和明显的区别。同样通过 39 年年平均状态下大西洋 ITCZ 的分布特征(图 9)可知, ITCZ 在大西洋上的分布特征和印度洋上有着相似处在于 ITCZ 范围分布地区性特征也较为明显, 一般是呈散点式分布在南美洲中北部、大西洋中部地区和非洲中部地区, 而两大洋的 ITCZ 南北范围相差较小都跨越了大概 10 个纬度; ITCZ 中心位置是 ITCZ 最大中心强度的位置, 从年平均状态下可以看出, 大西洋 ITCZ 的中心位置一般位于南美洲北部地区, 与太平洋和印度洋相似的地方还在于年平均状态下的最大中心强度也并不高, 最大值也不超过 15 mm/day。赤道地区的三大热带海洋作为水汽源地和热源中心, 对全球各种大气环流系统以及天气气候都具有重大影响。

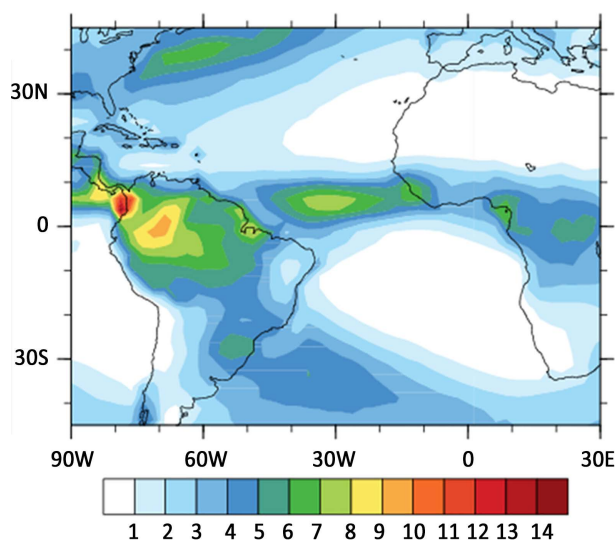


Figure 9. Annual average distribution of the Atlantic equatorial convergence zone (unit: mm/day)

图 9. 大西洋赤道辐合带的年平均分布状况图(单位: mm/day)

4. 结论与展望

4.1. 主要结论

本文利用由极地轨道环境卫星观测提供的全球降水气候学项目(GPCP)逐月降水量分析产品得到的 1979 年至 2017 年的逐月降水数据资料, 以降水量为主要气象要素, 定义出了赤道辐合带, 并计算了长期不同时间尺度上热带印度洋赤道辐合带的位置、强度和宽度, 在此基础上, 分析赤道辐合带的季节和年际变化特征, 因赤道辐合带夏季变化特征显著, 本文着重研究讨论了逐年 7 月印度洋赤道辐合带的变化, 得出如下结论:

1) 赤道辐合带是南北半球之间气流辐合, 气压最低的地区, 也是哈德莱环流圈的上升支, 同时也是热带气候系统的重要组成部分。它的位置和强度的变化会影响热带印度洋降水区域、强度和大气环流状况的变化。

2) 热带印度洋赤道辐合带中心位置的移动季节性变化特征显著, 夏季位于赤道以北, 冬季位于赤道以南, 春秋季节则位于赤道附近地区。降水强度中心基本都有 2 个及以上, 从所选的连续 39 年 7 月的降水数据可得, 夏季最大中心强度即赤道辐合带的中心位置常年位于 13°N, 73°E 附近, 但夏季赤道辐合带的中心位置没有固定于同一位置, 而是存在较小幅度的波动。

3) 一般情况下, 赤道辐合带宽度南北跨越了大约 20 个纬度, 但宽度随时间有着年际变化的基本特征; 夏季, 赤道辐合带南界大致位于 10°N, 北界大致位于 28°N, 南北界波动幅度不大, 但近年来赤道辐合带宽度都维持较弱水平的持续变宽。

4) 降水量的中心强度可表示为赤道辐合带的强弱, 最大中心强度值年际变化特征显著, 赤道辐合带强度最小值只有 21 mm/day, 而最大值却高达 45 mm/day。1990 年~2000 年间赤道辐合带中心强度普遍以较高的水平存在, 2000 年后, 最大中心强度值出现明显地降低, 一直到 2008 年中心强度普遍维持偏低的状态。印度洋赤道辐合带最大中心强度存在明显的年代际变化, 同时还存在自 2010 年至今的不断增强的长期趋势。赤道辐合带强度值大于 10 mm/day 的格点累计可以表示印度洋的强度指数, 强度指数最大时高达 333, 出现在 2006 年, 相反强度指数最小时低至 169, 出现在 2004 年。

5) 印度洋、太平洋和大西洋上的赤道辐合带的区别和联系分别是: 其范围分布的地区性特征在印度洋和大西洋相似, 都是呈散点式分布, 而太平洋上的赤道辐合带分布特征却呈东西带状分布。并且在年平均状态下三大洋赤道辐合带的最大中心强度都维持在 15 mm/day 左右, 强度相差不大。

4.2. 存在的问题与展望

首先, 由于时间有限, 针对印度洋赤道辐合带的变化特征研究还不够深入, 目前只利用了降水量的逐年数据, 结果还不够具有代表性, 今后需要利用更多数据比如风场和 OLR 数据等, 进行更多更深入地分析来完善本文, 看在不同物理量场上赤道辐合带的特征是否具有 consistency;

其次, 本文的降水量数据只到 2017 年, 近几年的数据缺失不能够很好地研究出近年来印度洋赤道辐合带的变化状况, 从而对未来的变化也没有得到很好地预测, 而且对影响赤道辐合带的变化的机理问题并没有深入地探讨, 未来的工作仍旧需要尽可能多地增加更多的评估。

最后, 在研究夏季印度洋赤道辐合带的变化情况时, 本文只研究了逐年 7 月的 ITCZ 的情况, 没有对其他月份进行逐一地分析研究, 结果的代表性不足, 今后将尽可能多地分析每年的各个月份, 增强结果的严谨准确性, 从而得到逐年四季不同的赤道辐合带的强度、宽度及中心强度大小特征, 分析印度洋赤道辐合带的季节和年际变化特征。

参考文献

- [1] 杨静, 郑小童. 全球变暖不同阶段热带辐合带的移动及其与大气能量输送的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学)

- 学版), 2020, 50(4): 1-11.
- [2] 陈瑞莹, 何卓琪, 王卫强, 高郭平. 赤道印度洋上层环流辐合辐散的年际变异成因分析[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(4): 765-776.
- [3] Lashkari, H. and Jafari, M. (2021) Annual Displacement and Appropriate Index to Determine ITCZ Position in East Africa and the Indian Ocean Regions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **133**, 1111-1126. <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00797-y>
- [4] 曹西, 陈光华, 黄荣辉, 陈文. 夏季西北太平洋热带辐合带的强度变化特征及其对热带气旋的影响[J]. 热带气象学报, 2013, 29(2): 198-206.
- [5] 黄小燕, 管兆勇, 何洁琳, 何立. 南海 ITCZ 异常变化及其对非移入性南海热带气旋(TC)活动的可能影响[J]. 大气科学, 2017, 41(1): 1-14.
- [6] 林爱兰, Tim Li, Fu, X., Luo, J.-J. 印度洋海气相互作用对热带夏季大气环流气候态的影响[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1123-1136
- [7] Lin, J. (2007) The Double-ITCZ Problem in IPCC AR4 Coupled GCMs: Ocean-Atmosphere Feedback Analysis. *Journal of Climate* **20**, 4497-4525. <https://doi.org/10.1175/JCLI4272.1>
- [8] Zhang, C. (2001) Double ITCZs. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **106**, 11785-11792. <https://doi.org/10.1029/2001JD900046>
- [9] 王毅, 崔凤娟. 赤道中印度洋上层环流结构与季节变化特征分析[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(2): 241-247.
- [10] 吴国雄, 孟文. 赤道印度洋-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, 1998, 22(4): 470-480.
- [11] 闫晓勇, 张铭. 印度洋偶极子对东亚季风区天气气候的影响[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(3): 435-444.
- [12] 赵珊珊, 周天军, 杨修群, 朱益民, 谭言科, 孙旭光. 热带印度洋偶极子与中国夏季年际气候异常关系的年代际变化[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 549-560.
- [13] Chen, G.X., Han, W.Q., Li, Y.L., Wang, D. and McPhaden, M.J. (2015) Seasonal-to-Interannual Time Scale Dynamics of the Equatorial Undercurrent in the Indian Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, **45**, 1532-1553. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0225.1>
- [14] Kang, S.M., Shin, Y. and Xie, S.P. (2018) Extratropical Forcing and Tropical Rainfall Distribution: Energetics Framework and Ocean E, Kman Advection. *npj Climate and Atmospheric Science*, **1**, Article No. 20172. <https://doi.org/10.1038/s41612-017-0004-6>
- [15] 孙舒悦, 任荣彩. ENSO 与印度洋海盆海温多尺度相互作用及其对气候影响的研究进展[J]. 气象科技, 2015, 43(5): 858-865.
- [16] Byrne, M.P., Pendergrass, A.G., Rapp, A.D. and Wodzicki, K.R. (2018) Response of the Intertropical Convergence Zone to Climate Change: Location, Width, and Strength. *Current Climate Change Reports*, **4**, 355-370. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0110-5>
- [17] Zelinsky, R.C. and Zhang, C. (2019) The Relationship between the ITCZ and MJO Initiation over the Indian Ocean. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **76**, 2275-2294. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0327.1>
- [18] 蒋尚城. 全球 ITCZ 的气候特征研究[J]. 气象学报, 1988(2): 241-245.
- [19] 陈烈庭. 印度洋-南海海温、季风和我国夏季短期气候异常的关系[J]. 地球科学进展, 1992(6): 97-98.