

海南岛秋季降水异常对应的 热带大尺度环流和海温

李 勇^{1,2} 陆日宇¹ 何金海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, 季风系统研究中心, 北京 100029

2 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

摘 要 海南岛的地理环境特殊, 具有独特的降水变化特征。作者利用海南岛 7 个站的月降水资料、NCEP 再分析资料及 NOAA 的海温资料, 研究了近 45 年海南岛降水的变化规律, 并给出了产生降水异常的一个可能的物理机制。结果表明, 海南岛降水具有明显的季节变化, 一年中秋季的 9、10 月份降水最大, 而且这两个月降水的年际方差占全年降水总方差的 47.1%。秋季降水的年际异常对应的环流形式主要表现为对流层中下层存在的两个异常的气旋和反气旋中心。当降水偏多时, 有两支异常的气流分别从热带太平洋和印度洋吹向海南岛附近地区, 为该地区提供了更多的水汽, 有利于岛上降水。而当降水偏少时, 两支异常的气流变为从大陆吹向海洋, 使海南岛上空水汽偏少, 不利于岛上降水。另一方面, 这种与秋季降水异常对应的环流异常是由赤道中东太平洋海表温度异常造成的, 异常的海温将使热带地区的沃克环流发生异常, 并最终使海南岛附近环流发生异常, 导致降水异常。

关键词 海南降水 赤道中东太平洋海温 沃克环流

文章编号 1006-9895(2006)05-1034-09

中图分类号 P426

文献标识码 A

Tropical Large-Scale Atmospheric Circulation and Sea Surface Temperature Corresponding to Autumn Precipitation in Hainan Island

LI Yong^{1,2}, LU Ri-Yu¹, and HE Jin-Hai²

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

Abstract The statistic characteristics as well as the forming mechanics of precipitation in Hainan Island are investigated by using the latest 45-year monthly rainfall data at 7 stations over the Hainan region, NCEP data and SST data. The results show that the seasonal change of precipitation is very obvious to all stations in Hainan Island. The precipitation between May and August covers about 80 percent of total. The maximal value appears in September and October and the minimal value appears in January every year. The maximal interannual variability of precipitation is also found in September and October. Meanwhile, the spatial distribution of precipitation is severely asymmetric and the highest precipitation occurs in the eastern and central region where the precipitation is two times larger than that of the western region. The terrain is an important factor, which makes the spatial distribution of precipitation much complicated.

Abnormal autumn precipitation in Hainan Island corresponds to abnormal atmospheric general circulation in the

middle-low troposphere. There is an abnormal cyclone which is located in the Indo-China peninsula and an abnormal anticyclone which lies in the east of Taiwan when precipitation is more than normal. An abnormal eastward airflow which comes from the Indian Ocean and another westward airflow which comes from the tropical Pacific converge in South China Sea and go forward to northwest. The two airflows supply plentiful water vapor which contributes to rainfall. An inverse circulation sense is observed when precipitation is less than normal.

Based on the correlation and composite analysis, the possible influence of the sea surface temperature (SST) in the equatorial central-eastern Pacific on autumn precipitation in Hainan Island is revealed. Abnormal SST leads to abnormal precipitation in Hainan Island by modifying the Walker circulation. When negative (positive) SST anomalies appear, the Walker circulation is stronger (weaker) than normal. The enhanced (weakened) Walker circulation leads to the abnormal eastward (westward) airflow in the Indian Ocean and the abnormal westward (eastward) airflow in the tropical pacific.

Key words Hainan Island, precipitation, SST, the equatorial central-eastern Pacific, Walker circulation

1 引言

近年来，随着海南的开发建设，人们越来越关注海南岛的气候变化。海南是我国一个独特的农业区，该地区气候异常将直接影响岛上农作物的生长，特别是暴雨等强降水过程不仅给当地造成了巨大的经济损失，还直接威胁人们的生命安全。因此，深入认识海南降水的变化规律及产生的原因，有助于我们对该地区降水异常进行预测，从而有利于农业生产的稳定发展，减少各种损失。

与海南岛相邻的华南地区降水变化一直以来受到人们的广泛关注，对此已有不少研究^[1~3]。此外，海南岛位于南海的北部，南海季风作为亚洲季风的重要成员，对我国及全球的天气气候有重要影响^[4~7]，因而，也得到了广泛研究。

尽管海南岛与华南地区、南海临近，但海南岛的降水变化有其独特性的一面，譬如，海南岛大部分地区每年的最大降水量不是出现在华南前汛期和南海季风爆发的 5 月份。相对于华南地区和南海季风，已有的专门针对我国海南岛降水变化规律的研究还很少，而且仅停留在一些早期的观测事实上^[8~10]。

海南岛的面积虽然不大，但具有降水类型多样、时空差异大、降水成因复杂等特点。那么，海南岛降水的变化是不是纯粹局地的特殊现象？如果它还受到大尺度大气环流的影响，这种影响又体现在哪些方面？此外，大气环流的变化往往不是孤立发生的，而是受到诸如海表温度等外强迫作用的影响。那么，海南岛降水与大气环流及海表温度之间有何确切的联系？造成海南岛降水异常的物理

机制又是什么？本文的目的就是对这些问题进行探讨。

2 资料

本研究用到三部分资料，第一部分为中国气象局气象信息中心资料室的我国海南 7 个站的月降水资料；第二部分为美国 NCEP/NCAR 再分析逐月资料 ($2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$)；第三部分资料为 Climate Diagnostics Center 的 NOAA Extended Reconstructed SST ($2^{\circ}\times 2^{\circ}$) 逐月资料。

我们在海南岛选取了 7 个气象站，包括海口、陵水、琼海、三亚、琼中、儋县及东方站（图 1）。虽然各站有记录的降水资料长度不同，但上述各站点 1960 年以后的降水资料基本上是完整的，因此我们主要分析 1960 年至 2004 年这一时段。

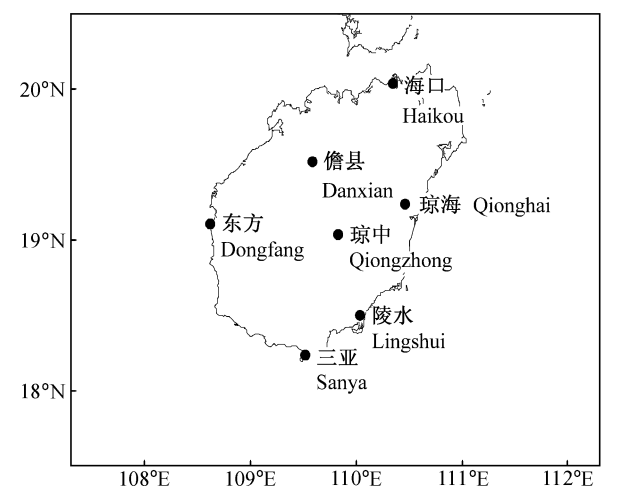


图 1 海南岛 7 个地面气象观测站的位置图
Fig. 1 Locations of 7 surface meteorological observational stations in Hainan Island

3 结果分析

3.1 海南岛降水的统计分析

对 1960 年至 2004 年海南岛 7 个观测站各月平均降水量进行统计(表 1)可知:降水的季节变化相当明显。最大降水量出现在秋季的 9 月或 10 月,降水最小值则出现在 1 月份。全年降水主要在 5 月至 10 月出现,各站点这一时期的降水量占该年总降水量的 76%以上,三亚站的这一比例甚至高达 89%。所以,每年 5 月至 10 月是海南岛的雨季,相对少雨的时段则为每年 11 月至次年 4 月。这表明海南岛降水具有明显的季风性特征,但同时它还具有不同于华南和南海的独特特征。

除了具有明显的季节变化外,海南岛降水的空间分布也存在差异。平均而言,东部及中部地区降水较多,而西部则降水偏少。东部、中部一带的站点(如琼海、陵水、琼中、儋县等站)年平均降水量超过 1600 mm,而位于西部的东方站降水量还不到中东部某些站点的一半。这种降水空间分布的不均匀性与岛上的地理环境有较大的关系。海南岛平均海拔 220 m 左右,但中部 500 m 以上的山地约占全岛近四分之一的面积。中部琼中站海拔更是超过

2400 m,很容易产生地形雨,使得该站年降水量为各站之冠。秋季东部地区处于迎风坡,空气上升运动强烈,易发生强对流天气,相反,背风的西部地区降水明显偏少。

为了定量研究海南岛降水的年际变化,我们计算了各站点逐月降水量的年际均方差(表 2)。由表 2 可知,年际降水均方差与平均降水量有相似的季节变化,夏秋时期较大,冬春时期则较小。除东方站外,其余 6 个站降水均方差最大值均出现在 9、10 月,这两个月的降水方差占全年降水总方差的 47.1%。同时,从表 1 可知,这两个月恰好也是一年中降水最多的月份,降水量约占全年降水总量的 33.3%。

因此,本文选取 9、10 月份的总降水量作为研究海南岛秋季降水量变化的指标。同时,考虑到东方站降水量和均方差最大值出现在夏季 8 月,而且其位置在海南岛的西缘,降水量的年际变化规律可能有别于其他 6 个站的情况,故下面计算降水序列时仅取表 1 中前面 6 个站代表海南岛降水。下文提到的海南岛秋季降水均指这 6 个测站平均的 9 月和 10 月降水量之和。图 2 给出了海南岛各月降水量及年际均方差,从图中可以清楚地看到,海南岛 6 个站的平均降水量从 1 月开始增加,在 9、10 月达

表 1 海南岛各站多年平均降水量(单位: mm)
Table 1 Climatological precipitation (mm) at 7 stations in Hainan Island

月 Month	海口 Haikou	陵水 Lingshui	琼海 Qionghai	三亚 Sanya	琼中 Qiongzhong	儋县 Danxian	东方 Dongfang
Jan	20.2	11.7	33.1	7.0	36.4	17.5	7.3
Feb	35.3	11.9	45.2	11.4	39.1	23.3	12.6
Mar	50.0	24.0	57.6	22.1	44.4	35.7	20.1
Apr	92.4	69.3	115.5	40.6	115.1	83.7	33.2
May	183.3	158.2	203.5	130.7	256.7	232.3	78.5
Jun	224.6	217.9	208.9	188.1	217.4	206.3	141.0
Jul	222.4	198.3	178.2	178.5	239.7	252.3	131.6
Aug	240.0	214.0	276.5	214.8	315.5	305.8	203.3
Sep	263.4	322.9	359.5	265.3	400.5	321.5	179.3
Oct	193.0	285.1	312.7	214.7	462.9	214.8	117.2
Nov	82.7	98.2	146.5	54.9	198.3	80.4	29.0
Dec	36.2	27.0	73.0	13.1	67.0	34.7	11.8
总计 Sum	1643.5	1638.5	2010.2	1341.2	2393.0	1808.3	964.9

注: 黑体字表示平均值超过 260 mm; 计算儋县站 2、3、4 月平均值时没有包括 1968 年(缺测)。
Note: The values exceeding 260 mm are darkened, the year 1968 is not included in calculating average of Feb, Mar and Apr for the Danxian station (no data).

表 2 海南岛各站降水量的年际均方差 (单位: mm)
Table 2 Precipitation (mm) standard deviation at 7 stations in Hainan Island

月 Month	海口 Haikou	陵水 Lingshui	琼海 Qionghai	三亚 Sanya	琼中 Qiongzong	儋县 Danxian	东方 Dongfang
Jan	19.6	12.2	23.7	9.5	21.8	17.0	9.6
Feb	33.0	14.0	43.4	21.4	25.7	22.0	19.4
Mar	40.4	29.1	48.8	34.2	39.7	32.4	24.8
Apr	62.3	68.7	105.7	36.0	89.0	68.1	43.5
May	62.9	115.2	124.0	126.9	153.1	90.3	61.0
Jun	115.4	127.2	116.6	91.2	88.7	79.4	113.9
Jul	122.2	112.6	100.1	85.8	92.0	106.3	129.6
Aug	116.6	82.7	114.6	91.4	125.1	135.7	136.0
Sep	171.7	198.2	194.7	135.1	222.7	168.7	129.1
Oct	160.6	179.7	200.3	143.8	305.9	173.6	84.5
Nov	105.8	130.9	160.2	74.2	157.1	87.5	39.3
Dec	36.4	35.1	53.0	23.8	51.8	34.8	18.1

注：黑体字表示均方差超过 135 mm；计算儋县站 2、3、4 月年际均方差时没有包括 1968 年(缺测)。
Note: The values exceeding 135 mm are darkened, the year 1968 is not included in calculating standard deviation of Feb, Mar and Apr for the Danxian station (no data).

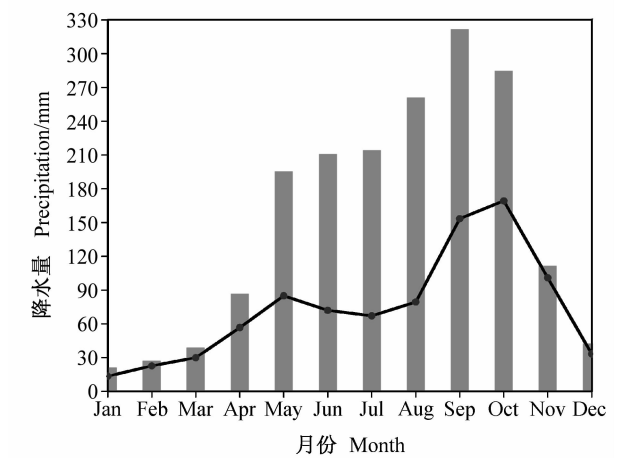


图 2 海南岛各月降水量 (柱线) 及年际均方差 (折线)
Fig. 2 Climatological precipitation (bar) and standard deviation (curve) in Hainan Island from Jan to Dec

到最大值，此后迅速减小。降水的年际均方差虽然在 6、7 月有所减小，但到 9、10 月显著增大。

3.2 海南岛秋季降水的年际变化

图 3 给出了海南岛秋季 9、10 月份降水量的年际变化曲线，从图中可以看到，降水最大值出现在 1973 年，降水量达到 535.5 mm，而 2004 年的总降水量仅为 82.0 mm，因此，海南岛降水量具有明显的年际变化。

3.3 海南岛秋季降水异常对应的大尺度环流

图 4 为海南岛秋季降水时间序列与同期位势高

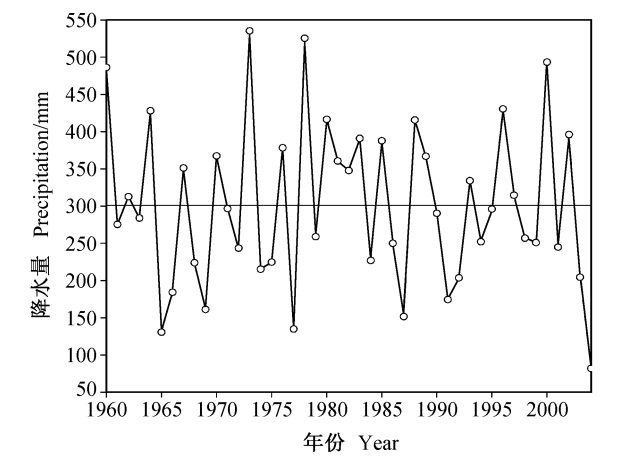


图 3 1960~2004 年海南岛秋季降水量时间序列
Fig. 3 Time series of the Sep - Oct precipitation in Hainan Island from 1960 to 2004

度场的相关系数分布，由图可见，对流层中下层高度场的形势较为一致。在我国台湾以东存在一个显著正相关区，并且这个正相关中心在 850 hPa 高度场上的位置比在 700 hPa 和 500 hPa 上的要偏东一些。除了这一正相关区外，其他低纬度地区均为负相关区，特别是在中南半岛上空有一显著负相关中心，这一负相关中心与上述正相关中心构成一个东北-西南方向的跷跷板结构。表明当秋季海南岛降水偏多时，该地区出现由东北指向西南的异常气压梯度，这一异常气压梯度的出现有利于热带太平洋

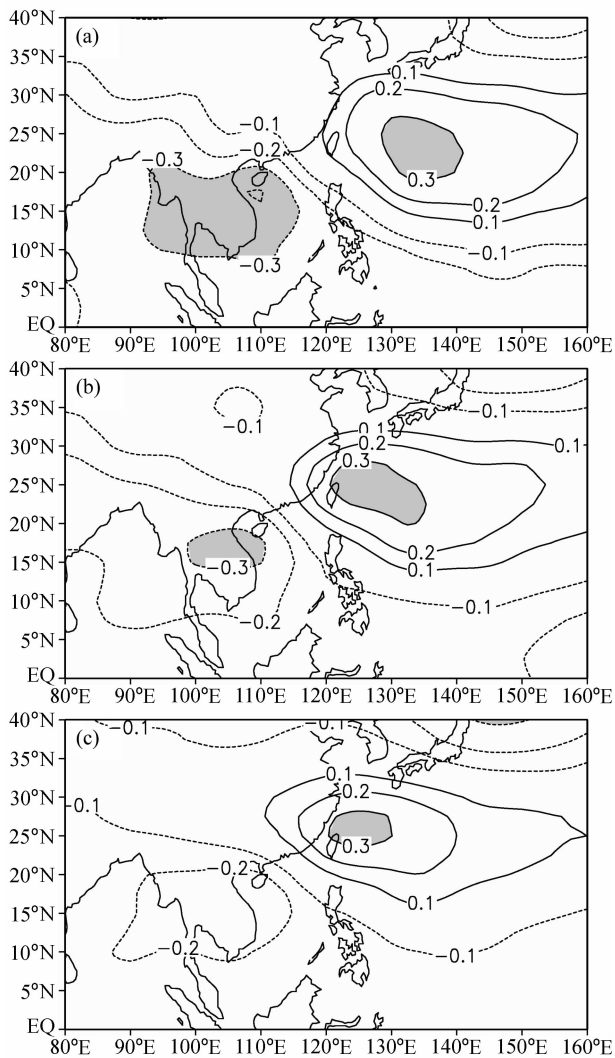


图4 海南岛秋季降水序列和850 hPa (a)、700 hPa (b)、500 hPa (c) 高度场的相关系数分布 (阴影表示通过95%统计信度)
Fig. 4 Correlation coefficient between Sep–Oct precipitation in Hainan Island and the 850 hPa (a), 700 hPa (b), 500 hPa (c) heights (The regions with 95% significance level are shaded)

上的偏东气流到达海南岛附近上空。

此外,我们还可以看到,虽然在对流层中下层高度场异常基本上是正压结构的,但低层显著区域范围明显偏大。中南半岛地区850 hPa高度场上的显著负相关区包括了整个中南半岛及印度洋部分地区,但是到了500 hPa高度,负相关区已不显著,说明对流层下层环流异常对于海南岛降水的影响可能更加明显。

为了进一步说明海南岛降水异常所对应的环流异常,我们根据1960年至2004年海南秋季降水时间序列进行合成分析。海南岛秋季降水高于平均值

一个标准差的年份为:1960、1964、1973、1978、1980、1988、1996、2000年,共8年;降水低于平均值一个标准差的年份为:1965、1966、1969、1977、1987、1991、2004年,共7年。

我们将上述8个降水偏多年进行合成(图5a)。可以看到,在对流层下层850 hPa风场上,太平洋上30°N有一个反气旋环流中心,而且纬向尺度非常大,赤道中东太平洋为东风,北印度洋地区和南海南部为西风区,我国海南岛处于东风区中。降水偏少年(图5b)与偏多年环流形势较为一致,但存在明显不同之处。首先,海南岛上空风向略有变化,由降水偏多年的偏东风变为偏东北风。此外,赤道中东太平洋至我国海南岛的东风区以及赤道印度洋西风区的风速大小也比降水偏多年小。

图5c为秋季降水偏多年与偏少年风矢量的差值场(偏多年减偏少年),由图可以看到,我国台湾以东地区存在一个反气旋性异常中心,而中南半岛上空存在一个气旋性异常中心。这两个异常中心恰好对应位势高度场上两个正负相关中心。在这两个异常中心之间,有一个狭长的东南风异常区,并且一直伸展到赤道中东太平洋东风区。此外,在中南半岛异常气旋的南边,赤道印度洋上空也有一支异常西风气流,这支异常偏西气流在南海上空转向向北,与来自太平洋的偏东气流汇合并吹向我国海南岛附近地区,使海南岛上空产生异常东南气流。这两支异常气流将使热带太平洋和印度洋上的水汽更易到达我国海南岛附近地区。

3.4 影响我国海南岛秋季降水的可能物理机制

前面的分析表明海南岛秋季降水的年际变化与对流层低层风场上的两支异常气流密切相关。可能正是由于这样两支异常气流的出现,才使得海南岛降水出现显著的年际变化。那么,风场上为什么会出现这样两支异常的气流?下面我们从纬向环流的角度来讨论这一问题。

从图6a中可以看到,平均而言,对流层存在4个纬向风大值中心。赤道印度洋对流层中下层为西风,上层为东风。而赤道东太平洋对流层中下层为东风,上层则为西风。日界线以西的广大地区整个对流层基本上为上升气流,其中,90°E和160°E附近为两个上升速度较大的区域。而日界线以东的东太平洋地区对应的是平均的下沉气流。这种纬向风场和垂直气流实际上反映了赤道地区的沃克环流。

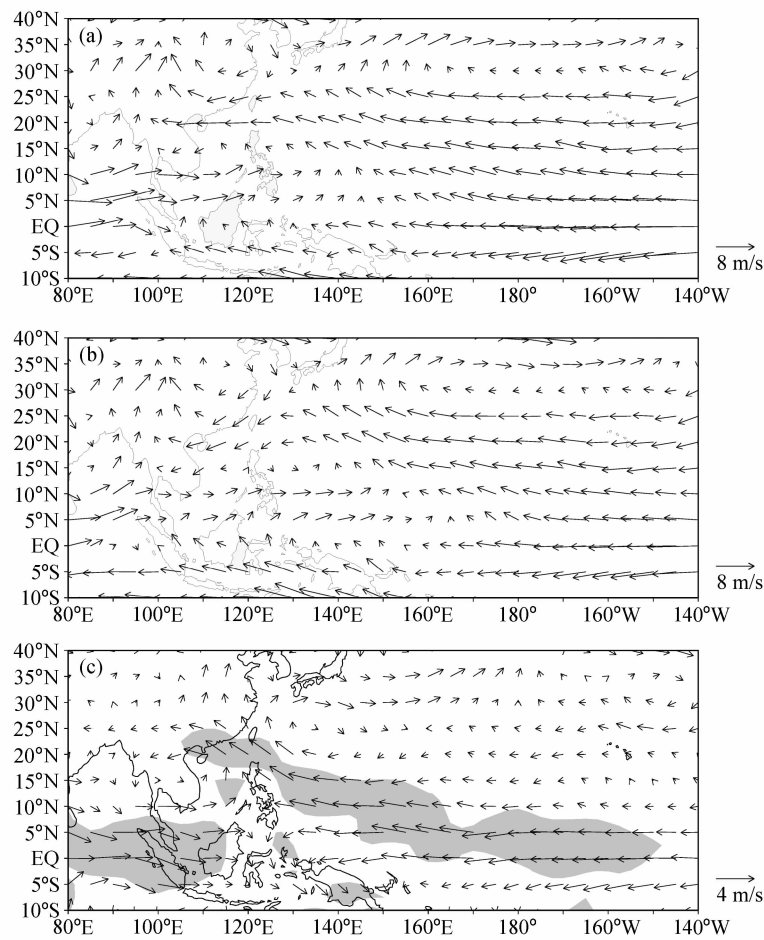


图 5 850 hPa 水平风矢量场：(a) 降水偏多年；(b) 降水偏少年；(c) 偏多年减偏少年。阴影表示通过 95%统计可信度
Fig. 5 Horizontal wind at 850 hPa (a) in more precipitation years, (b) in less precipitation years and (c) the difference field (more minus less). The regions with 95% significance level are shaded

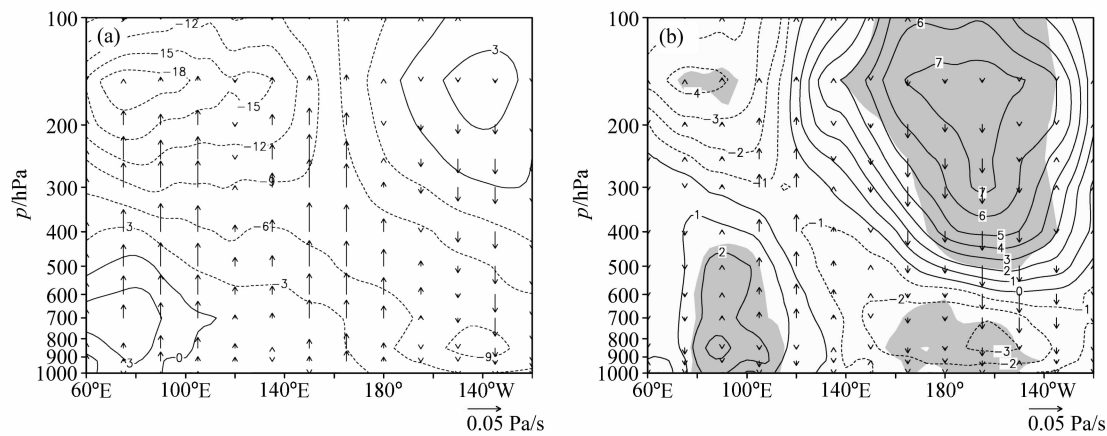


图 6 赤道地区 (5°S~5°N) 纬向风 (等值线, 单位: m/s) 与垂直速度 (箭头) 的经度-高度剖面图：(a) 1960~2004 气候平均态；(b) 海南岛秋季降水异常时期差值场 (降水偏多年减降水偏少年)。阴影表示通过 95%统计可信度
Fig. 6 Longitude-altitude cross sections of zonal wind (contour, units; m/s) and vertical velocity ($-dp/dt$, vector) in the equatorial regions (5°S-5°N): (a) Climatological mean of 1960-2004; (b) difference between the more and less Sep-Oct precipitation years (more minus less). The regions with 95% significance level are shaded

图 6b 是海南岛秋季降水偏多年与偏少年风场的差值场。结合气候态的情况 (图 6a) 可以看到, 降水偏多年比降水偏少年纬向风强很多, 在赤道印度洋和赤道中东太平洋均存在差异显著的区域。具体来说, 海南岛降水偏多年赤道印度洋对流层中下层西风显著偏强, 对流层上层则有偏强的东风。同时, 赤道中东太平洋对流层下层东风及对流层上层西风也显著偏强。与此相对应, 在西太平洋 120°E 附近出现较强的异常上升气流, 在赤道中东太平洋出现异常下沉气流。这种风场的分布表明海南岛秋季降水偏多时沃克环流异常偏强。异常偏强的沃克环流使赤道太平洋地区的东风及印度洋地区的西风异常加强, 这就与我们前面提到的对流层中下层的两支异常气流相对应。相反, 在降水偏少年, 沃克环流异常偏弱, 对应对流层中下层赤道太平洋地区有异常西风, 印度洋有异常东风。因此, 对应于海南岛秋季降水异常, 热带地区的沃克环流也出现了异常。

通过以上分析, 我们知道了海南岛秋季降水异常对应着赤道附近沃克环流的异常。那么, 沃克环流的异常又是如何发生的? 前面我们看到, 当海南岛秋季降水异常的时候, 赤道中东太平洋上空的风场出现了显著的异常, 该地区是海气耦合相互作用的关键区域, 这就使得我们考虑大气环流的异常是否与海温存在某种关系。

先看海南岛降水与赤道太平洋海温的关系。图 7 是海南岛秋季降水异常时海表温度差值场 (降水偏多年减降水偏少年), 从图中可以看到, 在海南岛秋季降水出现异常的时候, 赤道中东太平洋海表温度存在明显异常, 最大异常中心位于 160°W 附近。当该地区海温异常偏低的时候海南岛降水是偏

多的。相反, 当该地区海温偏高时, 海南岛降水偏少。

为了进一步说明赤道中东太平洋海温与海南岛秋季降水的关系, 我们计算了海南岛秋季降水序列与同期赤道中东太平洋 ($8^{\circ}\text{S} \sim 8^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{E} \sim 240^{\circ}\text{E}$) 区域平均海温序列的相关系数, 结果表明, 两者存在显著负相关关系, 相关系数为 -0.39 , 达到了 99% 统计显著水平。

图 8 是根据赤道中东太平洋海表温度序列得到的合成差值场。由图 8a 可以看到, 当秋季海温异常偏低时, 赤道太平洋上空存在异常东风气流, 而赤道印度洋上空存在着异常西风气流, 这两支异常气流有助于将两个大洋上的水汽带到我国海南岛附近, 使得这一地区降水偏多。图 8a 所示的风场与图 5c 很相像, 两者之间的差异主要表现为海温对应的东风异常主体在华南, 而降水对应的东风异常主体出现在海南以东和华南。这种差异说明除了中东太平洋海温之外, 应该还有其他因素影响海南秋季降水变化。同样, 纬向风及垂直速度场 (图 8b) 的形势也与根据降水做的差值场 (图 6b) 很相像。可见, 当秋季赤道中东太平洋海温异常偏低时, 赤道地区沃克环流显著加强, 从而使海南岛附近地区盛行异常的东南风, 有利于该地区的降水。与此相对应, 当秋季海温异常偏高时, 赤道地区沃克环流显著减弱, 从而不利于该地区的降水。

我们分析发现图 8 显示的结果不会因所选取的中东太平洋区域有很大变化。譬如, 我们将该平均区域向东平移 10 个经度, 发现不会改变选取的合成个例。

综合以上分析, 我们可以得到一个影响海南岛秋季降水的可能物理机制: 秋季赤道中东太平洋海

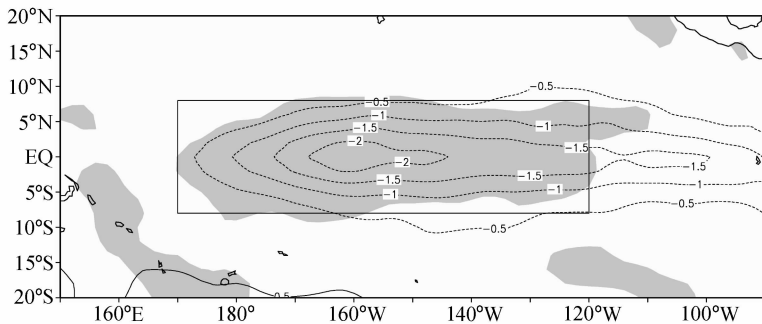


图 7 海南岛秋季降水异常时海表温度差值场 (降水偏多年减降水偏少年, 单位: $^{\circ}\text{C}$)。阴影表示通过 95% 统计可信用

Fig. 7 Difference of sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) between the more and less Sep–Oct precipitation years (more minus less). The regions with 95% significance level are shaded

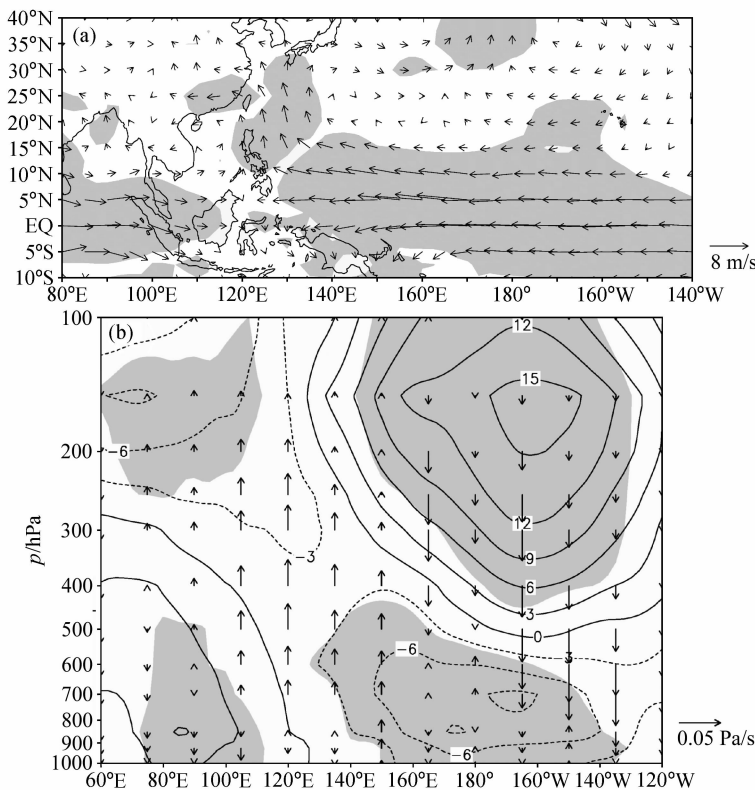


图 8 赤道中东太平洋海温异常对应的合成差值场（海温偏低年减海温偏高年）：(a) 850 hPa 风矢量；(b) 纬向风（等值线，单位：m/s）、垂直速度（箭头）经度高度剖面。阴影表示通过 95%统计可信度

Fig. 8 Differences of horizontal wind at 850 hPa (a) and longitude-altitude cross sections of zonal wind (contour, units: m/s) and vertical velocity ($-dp/dt$, vector) (b) between the higher and lower SST years (lower minus higher). The regions with 95% significance level are shaded

表温度通过影响沃克环流进而使海南岛附近地区对流层中下层风场发生异常，并最终影响海南岛秋季降水，即秋季海温异常偏低（偏高），使得沃克环流显著增强（减弱），造成来自赤道太平洋的异常偏东（偏西）气流和赤道印度洋的异常偏西（偏东）气流，印度尼西亚和菲律宾以南降水偏多（少），进而在南海激发出气旋（反气旋）异常，最终使海南岛降水偏多（少）。

4 结论

本文采用 45 年的月降水资料研究了海南岛降水的变化规律。海南岛降水具有明显的季节变化特征，全年降水的 80%左右出现在 5 月至 10 月间，最大降水量出现在秋季的 9 月或 10 月，而且这两个月降水的年际方差占全年降水总方差的 47.1%。降水在空间分布上也不均匀，海南岛东南部及中部降水量大，西部由于处在背风面因而降水偏少，几

乎为东部降水的一半。

海南岛秋季降水的异常与大尺度环流异常有明显的联系。当海南岛秋季降水偏多时，对流层中下层风场上存在两个异常中心。一个是位于我国台湾东部的异常反气旋中心，另外一个异常气旋中心位于中南半岛上空，这两个异常中心的存在使得两支异常气流分别从赤道太平洋和印度洋吹向海南岛附近地区，有利于该地区水汽的堆积。而当海南岛降水偏少时，风场上异常反气旋变成了异常气旋，异常气旋则变成了异常反气旋，使得海南岛上空气流转向，不利于该地区的降水。

在一定程度上，与秋季海南岛降水异常对应的环流异常是由于赤道中东太平洋海表温度异常引起的。秋季海温异常偏低，使得赤道地区沃克环流异常增强，从而导致了从赤道太平洋和赤道印度洋吹向海南岛的两支异常气流的出现，使海南岛上空盛行异常东南气流，岛上降水偏多。而当赤道中东太

平洋海温异常偏高时,沃克环流被削弱,海南岛附近的两支异常气流恰好与海温偏低时相反,变为由大陆吹向海洋,导致海南岛降水偏少。

尽管本文指出了赤道中东太平洋海温异常可能是影响海南岛秋季降水的一个机制,但并不是所有秋季海温异常的年份海南岛降水都会出现相应的异常,这说明海南岛秋季降水除了受到赤道中东太平洋海温异常的影响之外,还受到诸如海陆分布等其他因素的影响。此外,台风活动对南海 9、10 月降水也有重要影响,但本文没有研究它对降水异常的作用。同时,本文只研究了秋季的降水异常,而其他季节降水异常(如春季干旱)也对海南的经济发展有重要影响,而这些季节的降水异常可能有着与秋季 9、10 月份不同的产生机制。因此,对于海南岛降水异常变化还需进一步深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 吴尚森, 梁建茵. 华南前汛期旱涝时空分布特征. 热带气象, 1992, **8** (1): 87~92
Wu Shangsen, Liang Jianyin. Temporal and spatial characteristics of the drought and flood during the rainy season in South China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1992, **8** (1): 87~92
- [2] 丁伟钰, 梁经萍. 南海地区 OLR 变化与华南汛期降水的联系. 热带气象学报, 2002, **18** (3): 276~282
Ding Weiyu, Liang Jingping. Relationship between the variations of OLR over South China Sea and the precipitation in rainy seasons in South China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2002, **18** (3): 276~282
- [3] 陈艺敏, 钱永甫. 西太平洋暖池海温对华南前汛期降水影响的数值试验. 热带气象学报, 2005, **21** (1): 13~23
Chen Yimin, Qian Yongfu. Numerical study of influence of the SSTA in western Pacific warm pool on precipitation in the first flood period in South China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21** (1): 13~23
- [4] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 1999, **23** (3): 257~266
Li Chongyin, Zhang Liping. Summer monsoon activities in the South China Sea and its impacts. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1999, **23** (3): 257~266
- [5] 马淑杰, 孙淑清. 南海夏季风持续异常的特征及其对全球环流的影响 I. 诊断分析. 气候与环境研究, 2001, **6** (4): 435~447
Ma Shujie, Sun Shuqing. Characteristics persistent anomalies of the South China Sea summer monsoon and its influences on the global atmospheric circulation. Part I. Diagnostic analysis. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (4): 435~447
- [6] 吴尚森, 梁建茵, 李春晖. 南海夏季风强度与我国汛期降水的关系. 热带气象学报, 2003, **19** (增刊): 25~36
Wu Shangsen, Liang Jianyin, Li Chunhui. Relationship between the intensity of South China Sea summer monsoon and the precipitation in raining seasons in China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19** (supplement): 25~36
- [7] 马淑杰, 孙淑清. 南海夏季风持续异常的特征及其对全球环流的影响 II. 数值试验. 气候与环境研究, 2003, **8** (3): 356~369
Ma Shujie, Sun Shuqing. Characteristics persistent anomalies of the South China Sea summer monsoon and its influences on the global atmospheric circulation. Part II. Numerical experiment. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (3): 356~369
- [8] 卫林, 黄增明, 郑剑非, 等. 海南岛的降水与天气系统的关系. 广东水利水电, 1982, (2): 10~16
Wei Lin, Huang Zengming, Zheng Jianfei, et al. The relationship between precipitation in Hainan Island and synoptic systems. *Guangdong Water Resources and Hydropower* (in Chinese), 1982, (2): 10~16
- [9] 黄增明, 高素华, 卫林, 等. 海南岛的降水变化与天气成因. 广东水利水电, 1982, (2): 17~27
Huang Zengming, Gao Suhua, Wei Lin, et al. Precipitation in Hainan Island and synoptic cause of formation. *Guangdong Water Resources and Hydropower* (in Chinese), 1982, (2): 17~27
- [10] 陈世训, 高绍凤, 王杰夫. 海南岛降水的特性及其经济开发. 热带气象, 1986, **2** (4): 355~362
Chen Shixun, Gao Shaofeng, Wang Jie fu. The character of precipitation and its relationship with the economic development in Hainan Island. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1986, **2** (4): 355~362