

越赤道气流的季节变化及其对南海 夏季风爆发的影响

高辉¹ 薛峰²

1 国家气候中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 基于NCEP/NCAR资料分析了对流层越赤道气流的季节变化, 指出越赤道气流中心在低层位于925 hPa, 在高层位于150 hPa。东半球的越赤道气流是一种典型的季风型气流, 而西半球越赤道气流具有信风特征。研究结果还表明, 低层的索马里和南海越赤道气流对南海夏季风的爆发有至关重要的作用, 在季风爆发前2候, 索马里急流有一次迅速的增强, 这一增强有利于加速孟加拉湾地区西风的向东扩展, 并使控制在南海上空的西太平洋副高东撤; 同时, 南海越赤道气流的迅速增强也推动副高北上, 共同促使南海夏季风全面爆发。不仅如此, 二者对季风爆发的早晚也有重要影响, 当前期这两支越赤道气流建立偏早、强度偏强时, 南海夏季风爆发易偏早。反之, 当其建立偏晚、强度偏弱时, 季风爆发易偏晚。

关键词 越赤道气流 季节变化 南海夏季风

文章编号 1006-9585 (2006) 01-0057-12 **中图分类号** P434 **文献标识码**

Seasonal Variation of the Cross-equatorial Flows and Their Influences on the Onset of South China Sea Summer Monsoon

GAO Hui¹ and XUE Feng²

1 *National Climate Center, Beijing* 100081

2 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029

Abstract Based on NCEP/NCAR reanalysis data, the seasonal variation of the cross-equatorial flows (CEFs) is analyzed. It is shown that, in the lower and upper level of the troposphere, the CEFs centers are located in 925 hPa and in 150 hPa, respectively. Besides, the CEFs are monsoonal types in the Eastern Hemisphere while they are characterized by the trade winds in the Western Hemisphere. Moreover, the Somali CEF and the South China Sea CEF play crucial roles in the onset of the SCS summer monsoon (SCSSM). Two pentads prior to the onset of SCSSM, there was a rapid enhancement of the Somali CEF, which accelerates the eastward extension of the westerlies over the Bay of Bengal and the eastward retreat of the western Pacific subtropical high over the South China Sea (SCS). In the meantime, the rapid enhancement of the CEF in the SCS is advantageous to the northward march of the subtropical high. The SCSSM starts finally under the common actions of the two CEFs. Furthermore, the SCSSM onset tends to occur earlier when the two CEFs are stronger and establish earlier, and vice versa.

Key words Cross-equatorial flow, seasonal variation, South China Sea summer monsoon

收稿日期 2004-07-14 收到, 2005-08-11 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程项目 KZCX3-SW-221 及国家自然科学基金资助项目 40233027、40221503

作者简介 高辉, 男, 1976 年出生, 博士, 主要从事季风研究。E-mail: gaohui@mail.iap.ac.cn

1 引言

作为热带大气环流的重要组成部分,越赤道气流在南北半球间物理量交换中扮演着重要角色。早在上世纪 20 年代初, Simpson^[1] 就注意到印度洋低空越赤道气流的存在及其对印度夏季风的影响。李宪之^[2] 也创见性地指出半球冷空气活动通过越赤道气流对另一半球产生影响。陶诗言等^[3] 发现,在东亚低纬经向环流期间,澳洲附近从南半球向北半球的质量输送也最强烈;而在东亚纬向环流期间,澳洲附近的冷空气活动不显著,越赤道向北输送也较弱。Findlater^[4] 研究发现,低层的索马里越赤道气流是全球最强的越赤道气流。其后,我国气象工作者对越赤道气流进行了全面深入的研究,相继发现了东半球的其他几支低空越赤道气流通道,如南海(105°E)越赤道气流^[5,6] 和西太平洋越赤道气流^[7,8]。一些工作还研究了这些气流尤其是索马里和南海越赤道气流的季节和年际变化对东亚夏季风尤其是我国天气和气候的影响^[9-12]。

南海季风试验结果表明,越赤道气流对初夏东亚季风的建立尤其是南海夏季风的爆发有重要作用。谢安等^[13] 发现,大多数年份的 4、5 月间在 105°E 附近有赤道涡旋形成,这个涡旋引导它上游的赤道西风或南半球西风进入南海南部,为南海的季风爆发创造有利条件,而南海越赤道气流的逐渐加强与这一涡旋的形成有密切关系。另一方面,南海夏季风爆发前后,南海西部 70~90°E 处赤道西风的加强和北抬东伸对夏季风爆发有直接影响,而这一过程要通过索马里越赤道气流的加强得以实现^[14],这其中,来自孟加拉湾南部地区的水汽输送对南海季风的爆发具有重要意义^[15]。张秀芝等^[16] 也论述了东印度洋赤道两侧涡旋对的出现对季风爆发的作用。何金海等^[17,18] 指出,赤道印度洋西风加强并向东向北迅速扩展与传播以及相伴随的中低纬相互作用和西太平洋副高连续东撤是南海夏季风建立的大尺度特征之一。同时,105°E 越赤道气流的建立也在季风爆发中具有重要作用。李崇银等^[19] 也发现索马里急流的建立对南海夏季风的爆发有重要影响。

另一方面,过去关于越赤道气流季节变化的

研究几乎都集中在对流层低层(主要是 850 hPa),且范围仅局限于东半球,至于对流层高层和西半球越赤道气流是如何变化以满足全球大气质量守恒?东西半球越赤道气流是否具有相似的季节变化特征?这些问题并未得到很好解决,而弄清这些问题又是研究半球间大气环流相互作用的关键,因此,本文将对此做细致分析。另外,从过去的研究中不难看出,在东半球低层的越赤道气流中,索马里和南海越赤道气流对东亚夏季风的建立有重要作用,但究竟哪一支气流对南海季风环流的建立贡献更大,这也是一个需要进一步讨论的问题,因为这涉及对南海夏季风爆发的预测,本文将对这一问题作进一步研究。

2 资料简介

本文所用资料主要为 NCEP/NCAR 逐日再分析资料的水平风场部分,该资料水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ^[20,21]。根据需要,将逐日资料处理为逐候资料,资料时段为 1969~2000 共 32 年。

1969~1998 年南海夏季风爆发日期序列由何金海等^[18] 提供,该序列系从夏季风环流形势、气流来源和要素突变 3 个方面结合“日期优势候”对过去各种方法确定的南海夏季风建立日期进行了归纳、比较、反复验证后得出的一个较为合理的南海夏季风建立日期序列。

3 越赤道气流的垂直中心

图 1 为 1971~2000 年平均的 1 月和 7 月 1 000~100 hPa 沿赤道经向风经度-高度剖面图。可见,无论冬夏,越赤道气流在垂直方向主要集中于对流层低层(1 000~850 hPa)和高层(200~100 hPa)。早期由于资料垂直层数较少,几乎所有的研究均认为 850 hPa 是低层越赤道气流的中心层^[6,7],但从图 1 可见,低层中心位于 925 hPa。在低层,大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的越赤道气流在索马里和南美洲附近可在垂直方向上向西延伸至 700 hPa 附近,其他地区越赤道气流相对浅薄,均出现在 850 hPa 以下。对高层越赤道气流则主要集中在 200 hPa^[19],但高层中心却是位于 150 hPa。对流层中层经向风速很小,几乎接近于零,没有

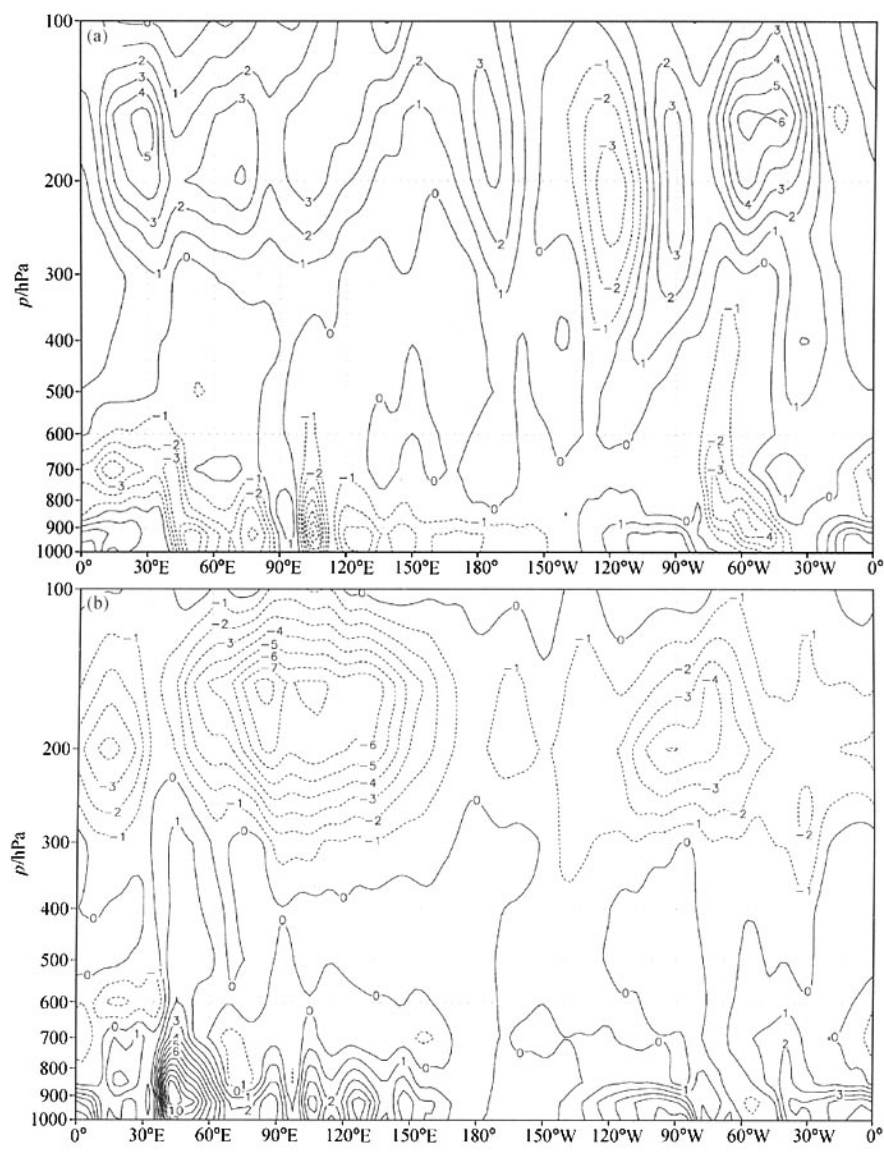


图 1 1971~2000 年平均的 1 月 (a) 和 7 月 (b) 沿赤道逐层经向风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 1 Longitude-height cross-section of the meridional wind (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) averaged between 2.5°S and 2.5°N from 1971 to 2000 in January (a) and July (b)

出现大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的越赤道气流通。在春秋两季 (图略), 尽管各通道处经向风强度均有不同程度的减弱, 但强风速中心所在高度均未发生变化, 低层仍位于 925 hPa, 高层仍位于 150 hPa。

为更好地表明高低层越赤道气流的中心层次, 分别作了 850 hPa、925 hPa 和 150 hPa、200 hPa 层的 1、7 月赤道经向风如图 2。由图可见, 低层

越赤道气流在夏季由南向北, 高层由北向南, 冬与夏大致相反。在 1 月, 低层东半球的 925 hPa 向南越赤道气流均强于 850 hPa, 尤其是在索马里地区, 前者接近 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 后者不到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在西半球二者差别不明显。在高层, 虽然 150 hPa 和 200 hPa 经向风速差别较小, 但在每一个越赤道气流通处, 150 hPa 风速均强于 200 hPa。在

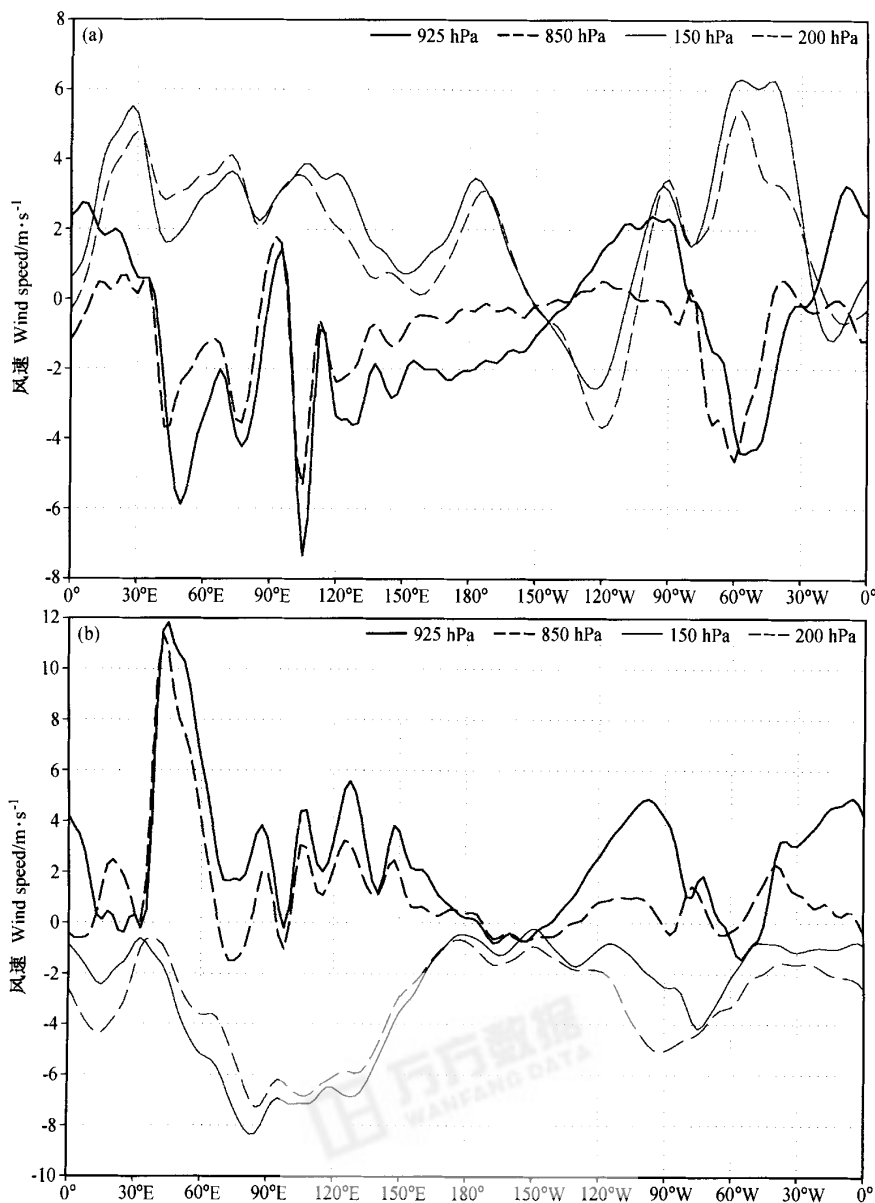


图2 1971~2000年平均的1月(a)和7月(b)沿赤道经向风

Fig. 2 The meridional wind averaged between 2.5°S and 2.5°N from 1971 to 2000 in January (a) and July (b)

7月, 无论东西半球, 925 hPa 气流均强于 850 hPa, 虽然在索马里处二者差别不如1月明显, 但在东半球 60°E 以东, 这一差别是非常显著的, 925 hPa 经向风风速约为 850 hPa 的 1.5~2 倍。西半球情况更是如此, 东太平洋和西大西洋上空 925 hPa 风速极大值均超过 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 但 850 hPa 上风速不到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。7月 150 hPa 越赤道气流强度也强于 200 hPa。

1 000 hPa 经向风的分布与 925 hPa 基本相似(图略), 但各支气流强度均有所减弱。由于 850 hPa 层是气象上常用的标准层, 大多数关于越赤道气流的研究都集中于这一层, 但上述分析表明越赤道气流在低空是一个浅薄的系统, 选取 850 hPa 层进行研究不够全面, 925 hPa 层上的越赤道气流更具有代表性。因此, 下面主要考虑 925 hPa 层上越赤道气流的季节变化特征。

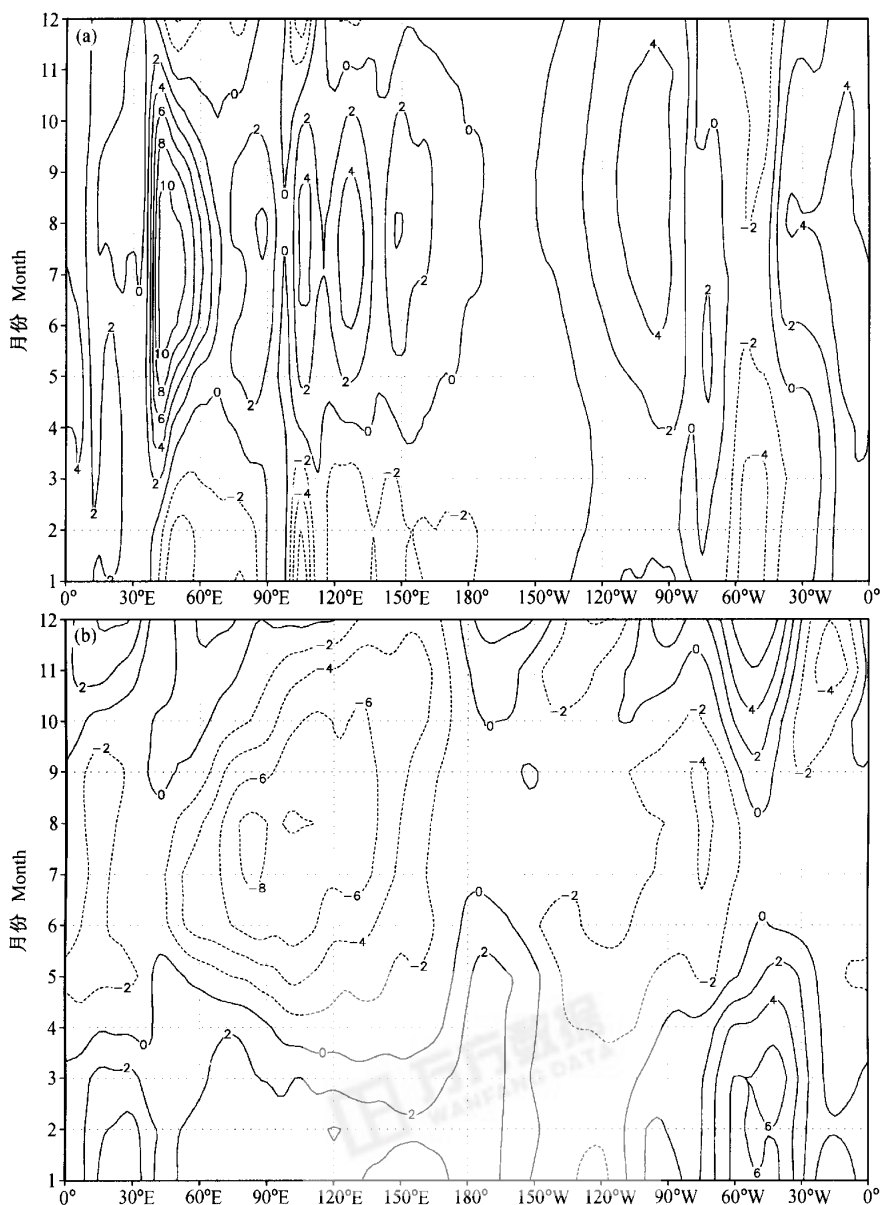


图 3 1971~2000 年平均的逐月 925 hPa (a) 和 150 hPa (b) 沿赤道经向风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Longitude-time cross-section of the meridional wind (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) averaged between 2.5°S and 2.5°N from 1971 to 2000 at 925 hPa (a) and 150 hPa (b)

4 越赤道气流的季节变化

图 3 为 925 hPa 层上越赤道气流逐月变化图。可见, 东西半球越赤道气流表现出截然不同的季节变化特征。东半球的越赤道气流具有典型的季风特征。在夏季, 东半球主要为向北的越赤道气

流, 40°E 以东 5 个气流通道中心分别位于 45°E (索马里)、 85°E (苏门答腊)、 105°E (南海)、 125°E (西太平洋) 及 150°E (巴布亚新几内亚) 处, 7、8 月这 5 支气流风速达到全年最强。在冬季, 上述 5 支越赤道气流方向转为向南且气流通道略有偏移, 其中 45°E 和 75°E 气流以及 120°E 以东几支气流均合并, 1 月各支向南越赤道气流风

速达到全年最强,这与早期的一些研究结论相似。但就气候平均的气流强度而言,夏季在这五支越赤道气流中,除索马里急流外,以 125°E 处气流为次强大,并非以前认为的 105°E 处次强大^[5]或 85°E 处次强大^[7]。而在冬季则以 105°E 处气流最为强大,索马里次之。

在西半球以及东半球 $0\sim 30^{\circ}\text{E}$ 的范围内,低空越赤道气流主要有 3 条通道,分别位于东太平洋、赤道非洲和西大西洋上空,这 3 支气流为信风型越赤道气流,主要表现为无论在夏季或冬季,东太平洋和赤道非洲上空均盛行南风,西大西洋为北风且强度在大多数月份都超过 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,并且这 3 支越赤道气流的强中心均不出现在冬季或夏季。

在对流层高层,越赤道气流的方向刚好与低层相反,夏季盛行向南越赤道气流,冬季为向北越赤道气流,这在东半球尤其明显。东半球仍然是一种季风型越赤道气流。但和低层相比,西半球越赤道气流的信风特性减弱,季节变化显著,这可能与对流层高层的行星季风系统主要受太阳辐射季节变化有关^[22, 23]。相对而言,地面热力特性对高层越赤道气流影响较小。

对流层高层的另一个显著特性是越赤道气流不再以通道而是以区域形式出现。在东半球,冬季整个半球经向风速几乎都达到 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,夏季则集中于 $40\sim 170^{\circ}\text{E}$ 范围。西半球的情况较为复杂,夏半年 ($5\sim 10$ 月) 经向风主要为北风,中心位于 $60\sim 110^{\circ}\text{W}$,冬半年 (11 月~次年 4 月) 主要为南风,中心位于 $30\sim 80^{\circ}\text{W}$ 。和东半球相反,西半球夏半年越赤道气流强度弱于冬半年。

5 索马里和南海越赤道气流对南海夏季风爆发的影响

5.1 南海夏季风爆发前后热带环流特征

前面指出,925 hPa 是夏季低层越赤道气流最为活跃的层次,但考虑到上述季风爆发日期序列是基于 850 hPa 得出的,这里仍讨论 850 hPa 层以求统一。图 4 为 1969~1998 年南海夏季风爆发前后各 10 候合成的 $0\sim 20^{\circ}\text{N}$ 平均的 850 hPa 纬向风分布。由图可知,在 $100\sim 120^{\circ}\text{E}$ 范围内,纬向风在季风爆发前基本为东风,而在爆发后均为西风。

虽然上述季风爆发时间的确定不仅仅依赖于纬向风场(还参考了位温、向外长波辐射(OLR)等),但毋庸置疑的是, $u_{850\text{ hPa}} > 0$ 确实是一个能很好确定南海夏季风爆发日期的标准。从图上还可以看出,南海地区的纬向风明显是由孟加拉湾东扩而来。虽然赤道印度洋西风在南海夏季风爆发前 8 候就开始出现,但此时的西风主要源于北半球中高纬度(图略),不能将其视作热带季风,季风爆发前 8 候至前 2 候,赤道印度洋西风风速仅由 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,真正意义上的增强是出现在季风爆发前 2 候,西风强度由 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增至 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而在季风爆发后,西风风速的增强又明显变缓。显然,南海夏季风爆发前 2 候赤道印度洋西风的迅速增强和向东扩展对南海夏季风的爆发起到了至关重要的作用。

赤道印度洋西风主要由索马里急流越过赤道后在地转偏向力的作用下转向形成。而南海地区的西风也受到 105°E 越赤道气流的影响,为此,作了南海夏季风爆发前后各 10 候沿赤道 ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$ 平均) 850 hPa 经向风剖面如图 5。可见,在索马里沿岸,季风爆发 2 候以前,经向风速增长较缓慢,平均每 2 候约增加 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在季风爆发后,经向风速同样增长缓慢,速率也近似为每 2~3 候增长 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,但在季风爆发前 2 候,经向风速有一次迅速的增长,速率约为爆发前后的 3 倍。这表明在南海夏季风爆发前 2 候,索马里急流强度的迅速增强有利于赤道西风的增强,从而有利于南海夏季风的爆发。从该图还可以看出,南海越赤道气流在季风爆发前 2 候强度也有所增强,虽然大小只是由 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $2.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,但由于南海越赤道气流强度较弱,这一增长也是相当显著的。在前 2 候之前及季风爆发之后,南海越赤道气流同样变化缓慢。在其他几支越赤道气流通道处,季风爆发前后经向风变化特征不明显。这说明,在 $30\sim 150^{\circ}\text{E}$ 之间的几支低层越赤道气流中,确实只有索马里和南海越赤道气流对南海夏季风的爆发有重要作用。

图 6 为季风爆发前 3 候至季风爆发候逐候 850 hPa 水平风场。在前 3 候,赤道印度洋上的西风带位置偏南,主要由印缅槽后部南下气流形成,此时索马里急流已经建立,但通道中心偏西,并没有右转连通赤道印度洋西风,从而无法使孟加

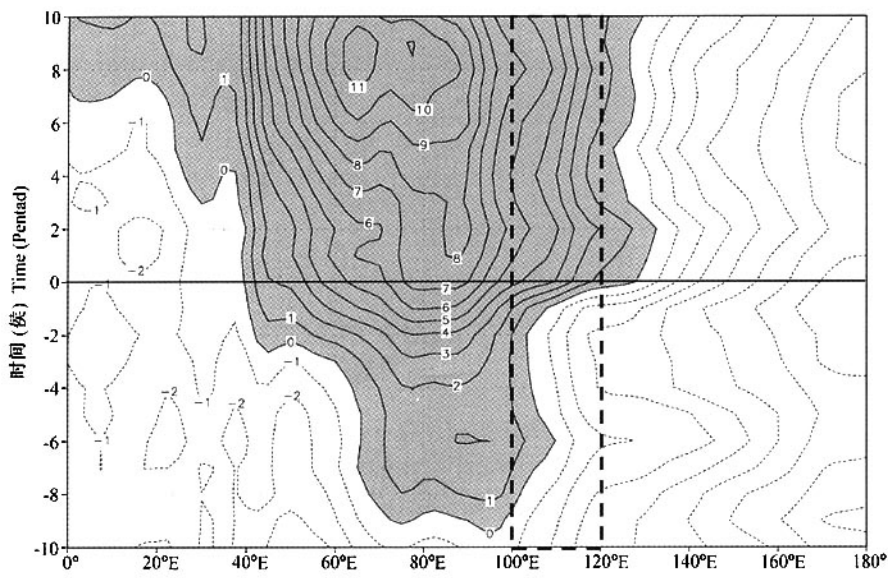


图 4 南海夏季风爆发前后各 10 候 0~20°N 平均的 850 hPa 纬向风剖面 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。纵坐标负值表示季风爆发前候数, 正值表示季风爆发后候数, 0 为爆发候。阴影区为西风区, 虚框表示南海地区经度位置

Fig. 4 Longitude-time cross-section of 850 hPa zonal wind averaged between 0° and 20°N before and after the onset of South China Sea summer monsoon (SCSSM). The positive (negative) numbers in the ordinate represent the pentads after (before) the onset of SCSSM, 0 is the pentad when the SCSSM starts. The westerly areas are shaded and the longitude position of the South China Sea (SCS) is enclosed by the dashed box (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

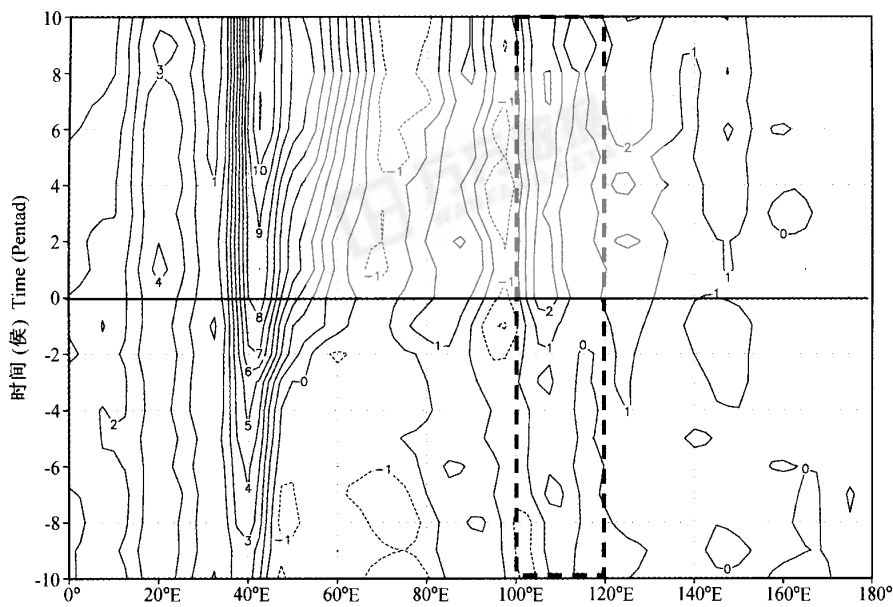


图 5 同图 4, 但为 2.5°S~2.5°N 平均的 850 hPa 经向风

Fig. 5 The same as Fig. 4, but for 850 hPa zonal wind averaged between 2.5°S and 2.5°N

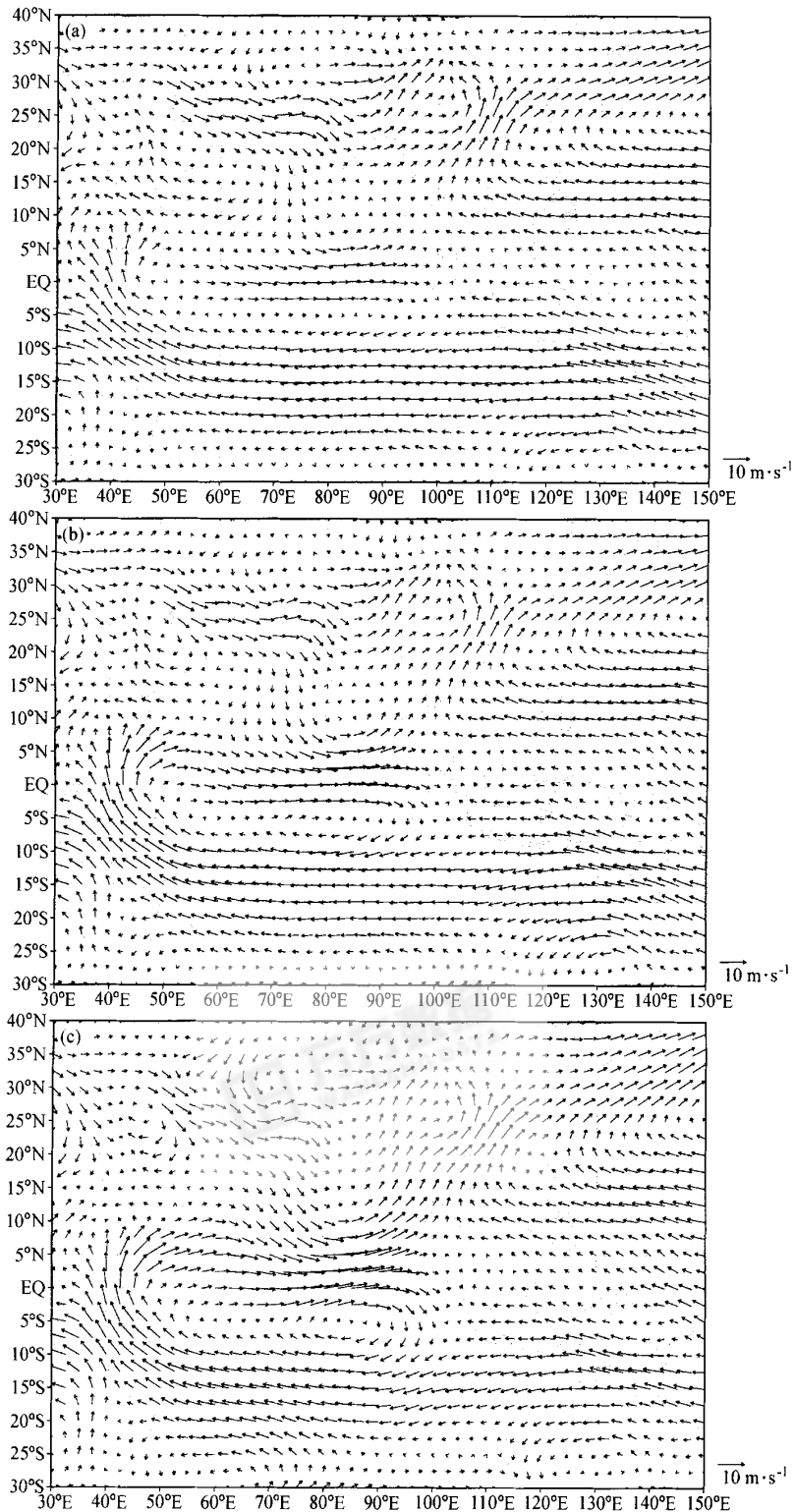


图 6 南海夏季风爆发前 3 候 (a)、前 2 候 (b)、前 1 候 (c) 及爆发候 (d) 850 hPa 水平风场
Fig. 6 Horizontal wind at 850 hPa prior to the SCSSM onset, (a) 3 pentads, (b) 2 pentads, (c) 1 pentad, and (d) the pentad when the SCSSM starts

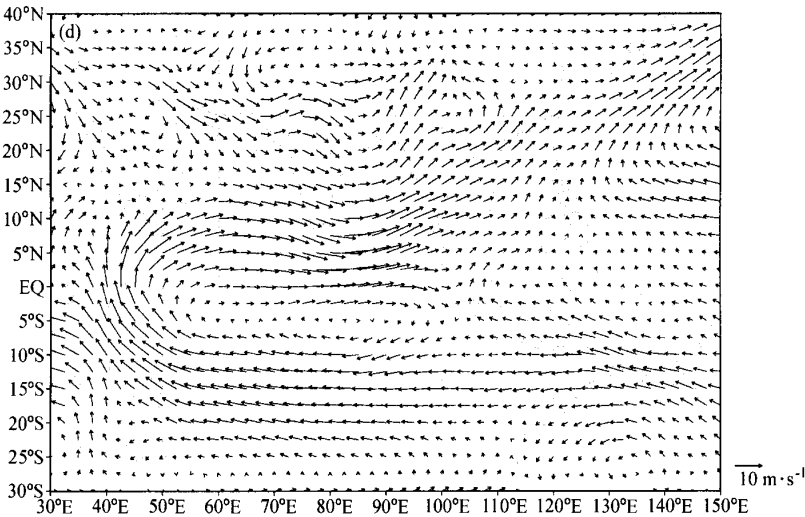


图 6 (续)

拉湾西风东传。105°E 越赤道气流虽然已见雏形，但强度相当微弱，无法推动副高北上。因而在该候，副高稳定控制在南海上空，南海夏季风环流难以建立。在前 2 候，索马里急流右转与赤道印度洋西风连通，孟加拉湾地区西风同时受到北半球中高纬度和南半球热带环流的影响，严格地讲，此时孟加拉湾热带季风并没有全面建立，其强度也不足以传到南海地区。105°E 越赤道气流强度变化不大，副高仍然位于南海上空。注意此时南海西北部虽然有西南风出现，但主要由副高西北侧气流流入。在前 1 候，索马里急流强度继续增强，它的右转进一步加强了孟加拉湾地区的西风，此时，孟加拉湾地区的西风主要来自两个半球的热带地区，因而可以认为在该候孟加拉湾夏季风已经全面建立。另外，105°E 越赤道气流强度也有所增强，推动了副高的北上。在这两支气流的作用下，南海的西北地区已经出现了来自热带的西南风。在爆发候，索马里和南海越赤道气流的强度均大大增强，前者使赤道印度洋-孟加拉湾西风随之加强并继续东传以推动副高东撤，而后者则继续推动副高北上，在二者的共同作用下，副高最终撤离南海上空，南海西南季风得以全面爆发。因此，无论索马里急流还是 105°E 越赤道气流都对南海夏季风的爆发有至关重要的作用，但索马里急流的触发作用更早。

下面我们以 1998 年为例来说明这两支越赤道

气流对季风爆发的影响。南海季风试验的研究结果表明，该年南海夏季风在 5 月第 5 候全面爆发^[24]。图 7 为该年 5 月 1~31 日 (2.5°S~2.5°N, 40~50°E) 平均的 850 hPa 经向风 (索马里急流)、(2.5°S~2.5°N, 100~110°E) 平均的 850 hPa 经向风 (105°E 越赤道气流) 和 (0~20°N, 100~120°E) 平均的 850 hPa 纬向风 (南海西风)。可见，在 1998 年，索马里急流全面增强出现在 5 月 11 日左右，但 105°E 越赤道气流稳定转为南风的时间几乎和南海地区全面转为西风的时间一致，都出现在 5 月 21 日以后。这也表明，索马里急流对南海夏季风爆发的触发作用更早，作用时间约在季风爆发前 2 候。相比之下，105°E 越赤道气流的作用稍晚。

5.2 索马里和南海越赤道气流强弱对南海夏季风爆发早晚的影响

越赤道气流不仅对南海夏季风的爆发有重要的触发作用，而且可以影响到季风爆发的早晚。在研究的 1969~1998 的 30 年中，我们分别选取 3 个季风爆发偏早和偏晚的年份进行合成分析，这 3 个早年分别为 1972 年 (季风爆发于 5 月第 2 候)、1994 年 (5 月第 1 候) 和 1996 年 (5 月第 2 候)，3 个季风爆发晚年分别为 1973、1987 和 1991 年 (季风均在 6 月第 2 候爆发)。图 8 为合成的逐候索马里急流强度。显见，在季风爆发偏早年，索马里南风急流在第 14 候开始建立，至第 18 候出

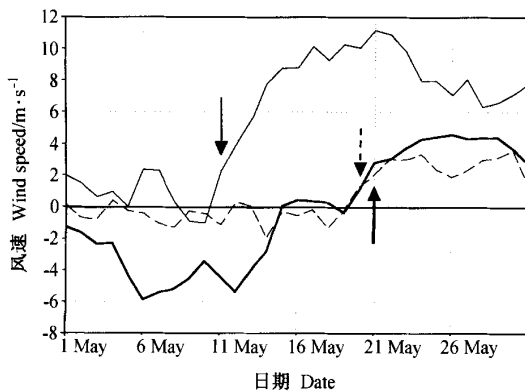


图 7 1998 年 5 月 1~31 日 ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{E}$) 平均的 850 hPa 经向风 (索马里急流, 细实线), ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 平均的 850 hPa 经向风 (南海越赤道气流, 细虚线) 和 ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 平均的 850 hPa 纬向风 (南海西风, 粗实线). 细实箭头、细虚箭头和粗实箭头分别指出索马里、南海越赤道气流及南海夏季风全面爆发的时间

Fig. 7 850 hPa meridional wind from May 1 to 31 in 1998 averaged over ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{E}$) (the Somali jet, thin solid line), ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$) (the SCS cross-equatorial flow, thin dashed line) and 850 hPa zonal wind over ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) (the SCS westerly, thick solid line). The onset date of the Somali jet, the SCS cross-equatorial flow and the SCSSM is shown by the thin solid, thin dashed and thick solid arrow, respectively

现了一次中断, 其后全面建立, 强度不断增强。而在季风爆发晚年, 索马里急流直至第 18 候才由北风转为南风, 至第 21 候出现中断, 其后全面建立。因此, 在季风爆发早年, 索马里南风急流在第 19 候稳定建立, 季风爆发晚年, 索马里急流在第 22 候稳定建立, 前后相差 3 候。另外, 在第 14~25 候之间, 除第 18 候外, 季风爆发早年索马里急流强度均明显强于季风爆发晚年。

同样, 南海越赤道气流 (105°E) 的强弱对季风爆发早晚也有一定的影响 (图 9)。季风爆发早年, 105°E 附近在第 22 候出现稳定的南风分量。但在季风爆发晚年, 该地区南风分量的出现要晚一候左右。另外, 除第 24 候外, 季风爆发早年南海越赤道气流的强度要强于季风爆发晚年。

上述结果表明, 索马里和南海越赤道气流尤其是索马里越赤道气流对南海夏季风的爆发有至关重要的作用, 不仅如此, 二者对季风爆发的早晚也有不同程度的影响, 当前期这两支南风气流

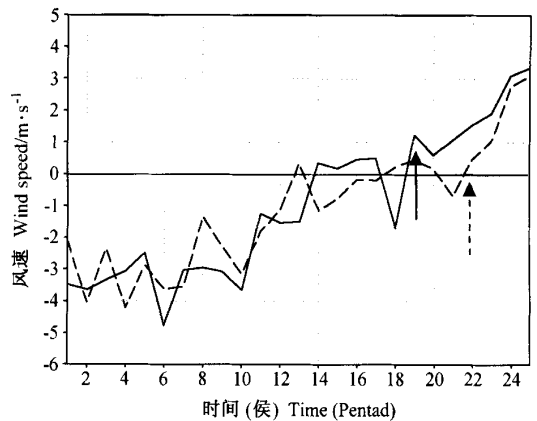


图 8 南海夏季风爆发早年 (实线) 和爆发晚年 (虚线) 合成的 ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{E}$) 平均的 850 hPa 经向风. 实 (虚) 箭头表示早 (晚) 年索马里急流稳定为南风的时刻

Fig. 8 The composite 850 hPa meridional wind averaged over ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{E}$) for the earlier years (solid line) and later years (dashed line) of the SCSSM onset. The date when the Somali jet turns into the stable southerly is shown by the solid arrow for the earlier years and by the dashed arrow for the later years

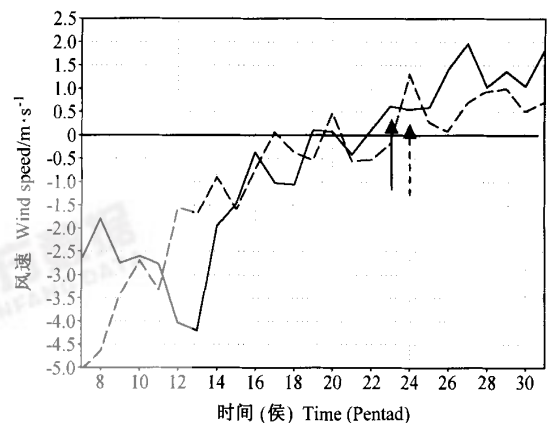


图 9 同图 8, 但为 ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 平均经向风, 实 (虚) 箭头表示早 (晚) 年南海越赤道气流稳定为南风的时刻

Fig. 9 The same as Fig. 8, except over ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$), the date when the SCS cross-equatorial flow turns into the stable southerly is shown by the solid arrow (dashed arrow) for the earlier years (the later years)

建立偏早、强度偏强时, 南海夏季风爆发易偏早; 反之, 当这两支南风气流建立偏晚、强度偏弱时, 季风爆发易偏晚。

6 结论

基于 NCEP/NCAR 再分析资料和南海夏季风建立日期资料, 本文讨论了越赤道气流的季节变化特征以及低层的索马里和南海越赤道气流对南海夏季风爆发的影响, 现将主要结论归纳如下:

(1) 越赤道气流中心在低层位于 925 hPa, 并非以前认为的 850 hPa, 在高层位于 150 hPa 而不是 200 hPa。在低层, 125°E 处的越赤道气流是除索马里急流外影响亚洲夏季风的次强气流, 而在冬季, 105°E 处的气流最强大。东半球的越赤道气流具有典型的季风特征, 而西半球越赤道气流则为信风型。

(2) 索马里和南海越赤道气流对南海夏季风的爆发有至关重要的作用, 在南海夏季风爆发前 2 候, 索马里急流有一次迅速的增强, 这一增强有利于加速孟加拉湾地区西风的向东扩展, 并使控制在南海上空的西太平洋副高东撤; 同时, 南海越赤道气流的迅速增强也推动副高北上, 共同促使南海夏季风全面爆发。不仅如此, 二者对季风爆发的早晚也有重要影响, 当前期这两支南风气流建立偏早、强度偏强时, 南海夏季风爆发易偏早; 反之, 当这两支南风气流建立偏晚、强度偏弱时, 则季风爆发易偏晚。

参考文献

- [1] Simpson G. The southwest monsoon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1921, **47** (1): 151~173
- [2] 李宪之. 东亚寒潮侵袭的研究. 中国近代科学论著丛刊——气象学 (1919~1949). 北京: 科学出版社, 1955. 35~118
Li Xianzhi. Study on the cold surge invasion in East Asia. *Publications of Recent Sciences in China—Meteorology* (1919—1949) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1955. 35~118
- [3] 陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征. 气象学报, 1962, **32** (2): 91~103
Tao Shiyan, Xu Shuying, Guo Qiyun. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in Eastern Asia in summer. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1962, **32** (2): 91~103
- [4] Findlater J. Cross-equatorial jet streams at low level over Kenya. *Meteor. Mag.*, 1966, **95**: 353~364
- [5] 陈于湘. 夏季西太平洋越赤道气流的谱分析. 大气科学, 1980, **4** (4): 363~368
Chen Yuxiang. The spectral analysis of the low-level cross-equator air flow over the western Pacific during the Northern summer. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1980, **4** (4): 363~368
- [6] 陈隆勋, 金祖辉. 夏季东亚季风环流系统内中期变化的南北半球相互作用. 全国热带夏季风会议文集, 昆明: 云南人民出版社, 1982. 218~231
Chen Longxun, Jin Zuhui. Interactions between the north and South Hemispheres and medium-range variations in the East Asian summer monsoon circulations. *Collection of Tropical Monsoon Conference* (in Chinese), Kunming: Yunnan People's Press. 1982. 218~231
- [7] 王兴东, 陶诗言. 西太平洋越赤道气流的初步研究. 海洋学报, 1984, **6** (2): 160~173
Wang Xingdong, Tao Shiyan. Preliminary study of the cross-equatorial flows over the western Pacific. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1984, **6** (2): 160~173
- [8] 汤明敏, 黄土松, 周德佩. 全球越赤道气流的时空变化. 热带气象, 1985, **1** (4): 287~295
Tang Mingmin, Huang Shisong, Zhou Depei. On the spatial and temporal variation of the cross equatorial currents around the globe. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1985, **1** (4): 287~295
- [9] 王继志, 李麦村. 源于澳洲过赤道气流与中国夏季风环流与降水. 大气科学, 1982, **6** (1): 1~10
Wang Jizhi, Li Maicun. Cross-equator flow from Australia and monsoon over China. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1982, **6** (1): 1~10
- [10] 李曾中, 李月安, 晁淑懿. 越赤道气流与我国洪涝灾害关系的初探. 应用气象学报, 1998, **9** (增刊): 132~136
Li Zengzhong, Li Yuean, Chao Shuyi. Relationship between flood disasters over China and cross-equatorial flow (CEF). *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1998, **9** (Suppl.): 132~136
- [11] 施宁, 施丹平, 严明良. 夏季越赤道气流对南海季风及华东旱涝的影响. 热带气象学报, 2001, **17** (4): 405~414
Shi Ning, Shi Danping, Yan Mingliang. The effects of cross-equatorial current on South China Sea monsoon onset and drought/flood in East China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2001, **17** (4): 405~414
- [12] 王会军, 薛峰. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响. 地球物理学报, 2003, **46** (1): 18~25
Wang Huijun, Xue Feng. The interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-hemispheric water vapor transport and the East Asian summer rainfall. *Chi-*

- nese J. *Geophys.* (in Chinese), 2003, **46** (1): 18~25
- [13] 谢安, 刘霞, 叶谦. 赤道涡旋与南海夏季风爆发. *气象学报*, 1997, **55** (5): 611~619
Xie An, Liu Xia, Ye Qian. Equatorial vortex and the onset of summer monsoon over South China Sea. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55** (5): 611~619
- [14] 谢安, 刘霞, 叶谦. 上游赤道西风在南海夏季风爆发中的重要作用. *应用气象学报*, 1998, **9** (2): 129~140
Xie An, Liu Xia, Ye Qian. The role of upstream equatorial westerly wind in the summer monsoon onset over the South China Sea. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1998, **9** (2): 129~140
- [15] 谢安, 宋焱云, 毛江玉, 等. 南海夏季风期间水汽输送的气候特征. *气候与环境研究*, 2001, **6** (4): 425~434
Xie An, Song Yanyun, Mao Jiangyu, Ye Qian. Climatological characteristics of moisture transport during summer monsoon over South China Sea. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (4): 425~434
- [16] 张秀芝, 李江龙, 闫俊岳, 等. 南海夏季风爆发的环流特征及指标研究. *气候与环境研究*, 2002, **7** (3): 321~331
Zhang Xiuzhi, Li Jianglong, Yan Junyue, et al. A study of circulation characteristics and index of the south china sea summer monsoon. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (3): 321~331
- [17] 何金海, 丁一汇, 高辉, 等. 南海夏季风建立日期与季风指数. 北京: 气象出版社, 2001. 40pp
He Jinhai, Ding Yihui, Gao Hui, Xu Haiming. *Definition of the Onset Dates of South China Sea Summer Monsoon and the Intensity Index* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001, 40pp
- [18] 何金海, 徐海明, 周兵, 等. 关于南海夏季风建立的大尺度特征及其机制的讨论. *气候与环境研究*, 2000, **5** (4): 333~344
He Jinhai, Xu Haiming, Zhou Bing, et al. Large scale features of the South China Sea summer monsoon onset and its possible mechanism. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (4): 333~344
- [19] 李崇银, 吴静波. 索马里跨赤道气流对南海夏季风爆发的重要作用. *大气科学*, 2002, **26** (2): 185~192
Li Chongyin, Wu Jingbo. Important role of the Somalian cross-equator flow in the onset of the South China Sea summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 185~192
- [20] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77** (3): 437~471
- [21] Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP NCAR 50-year reanalysis; monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **82** (2): 247~268
- [22] 曾庆存, 张邦林. 大气环流的季节变化与季风. *大气科学*, 1998, **22** (6): 807~813
Zeng Qincun, Zhang Banglin. On the seasonal variation of Atmospheric general circulation and the monsoon. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22** (6): 807~813
- [23] Xue Feng, Zeng Qingcun. Diagnostic study on seasonality and interannual variability of wind field. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (4): 537~544
- [24] 丁一汇, 李崇银. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 5~12
Ding Yihui, Li Chongyin. *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and its Interaction with the Ocean* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 5~12