

文章编号: 1004-4965 (2009) 05-0621-07

印度洋偶极子研究进展综述

肖莺^{1,2}, 张祖强³, 何金海¹

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 武汉区域气候中心,
湖北 武汉 430074; 3. 国家气候中心, 北京 100081)

摘 要: 印度洋偶极子 (IOD) 是影响亚洲气候异常的重要系统之一。自 1999 年 IOD 提出以来, 国内外学者对其形成机理及其与 ENSO 相互作用的研究取得了很大进展。综述了近年来国内外学者关于印度洋偶极子的定义、时空分布特征、形成机理、与 ENSO 的关系、对东亚气候的影响等问题的研究成果, 提出了目前该领域存在的科学问题。

关 键 词: 印度洋偶极子; 综述; ENSO; 东亚气候

中图分类号: P461.2

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2009.05.014

1 引 言

作为目前已知发生在赤道太平洋最强的海温年际气候异常, 厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 造成全球许多地区的气候异常, 受到全世界的普遍关注。很多学者从不同角度对 ENSO 现象进行分析, 揭示了其发生、发展、维持和消亡各阶段的特征^[1]及其形成的动力学机理^[2]。相比之下, 热带印度洋海温变率远小于太平洋, 但其纬向距平的变化同样十分明显, 并通过海-气相互作用影响亚洲气候。1994 年夏季, 中国、日本等亚洲许多地区气候显著异常, 这一年发生在太平洋的弱 El Niño 事件并不能很好地解释这一气候异常现象, 在 Behera 等^[3]、Vinayachandran 等^[4]研究的基础上, Saji 等^[5]提出热带印度洋东西海温距平符号相反的分佈 (即印度洋偶极子, 简称 IOD) 可以较好地解释 1994 年气候异常。Guan 等^[6-7]进一步研究认为 IOD 至少通过两种方式影响 1994 年夏季东亚环流, 导致东亚气候异常。Kumar 等^[8]通过对 140 年历史资料进行分析, 发现 ENSO 与印度夏季风的反相关关系自 1970 年代中后期已不显著, 出现了迅速而且明显的减弱, 而 Ashok 等^[9]认为 IOD 恰恰就是引起 ENSO-印度季风降水关系减弱的原因之一。因此, IOD 作为下垫面海洋一种的外强迫信号, 对短期气候预测有着十分重要的意义。近年来已经成为研究热带海-气相互作用的热点问题, 取得了许多新的研究成果。本文主要回顾和综述近年来围绕 IOD 形成及其与 ENSO 关系等所取得的研究进展以及目

前尚待解决的科学问题。

2 印度洋海温纬向变化特征

2.1 IOD 的由来

IOD 概念最先由 Saji 等^[5]在 1999 年提出, 通过 EOF 分析发现: 第一模态表现为整个海盆的海温为同一符号, 与 ENSO 有较好的关系; 第二模态在热带海区表现出较强的纬向海温距平梯度, 具有东西符号相反的特征。谭言科等^[10]通过对印度洋区域的海温进行 EOF 分析, 得到类似的结果 (图 1)^[10]。根据 EOF 分析得到的第二模态特征, Saji 将印度洋西部 (50~70 °E, 10 °S~10 °N) 和东部 (90~110 °E, 10 °S~EQ) 区域平均的海表温度距平之差定义为 IOD 指数。当处于偶极子正位相时期, 印度洋海温异常呈西正东负的分佈形式; 相反, 当处于偶极子负位相时期, 印度洋海温异常呈西负东正的分佈形式。

2.2 IOD 的演变过程

根据 IOD 指数的大小, Saji 等^[5]利用 1958—1999 年的海温资料, 挑选出 6 个 IOD 正位相年 (1961、1967、1972、1982、1994、1997 年) 进行合成。合成结果如图 2^[5]所示。在 5—6 月, 海温负距平最先出现在龙目岛海峡附近, 同时东南赤道印度洋上出现东南风异常。7—8 月, 负距平加强且沿着印度尼西亚海岸向赤道方向延伸, 而西印度洋开始出现正距平。随后, 赤道纬向风加强并且海温异常呈偶极型分佈。9—10 月上述特征迅速达到盛期, 紧接

收稿日期: 2008-02-29; 修订日期: 2008-07-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2006CB403606) 资助

通讯作者: 肖莺, 女, 江西省吉安市人, 硕士, 研究方向: 热带海气相互作用。E-mail: xiaoying15036@163.com

着快速衰亡。由此可见, IOD作为海气耦合现象具有明显的季节锁相特征——春季开始出现、秋季达到盛期、冬季衰亡。李崇银等^[11]通过合成分析, 得到与Saji类似的结果。Anderson等^[12]的研究结果表明这种偶极子分布形态

不仅仅存在于海表温度的变化中, 次表层海温变化同样也具有这种特征。除此以外, 海平面异常^[13]、向外长波辐射异常^[14]、斜温层上次表层海温^[15]这些物理变量都显示出类似的特征。

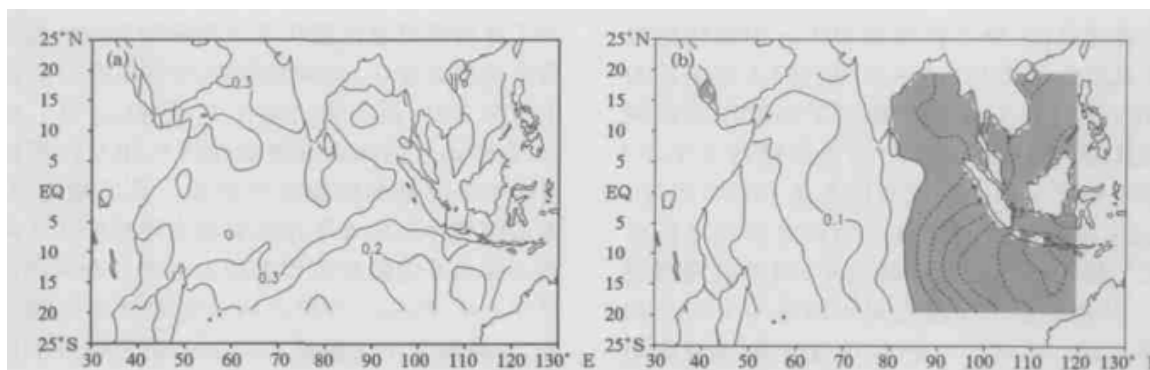


图1 热带印度洋海表温度距平EOF分析得到的第一(a)和第二(b)特征向量^[10]
它们的方差贡献分别为39.9%和9.3%。阴影区为负值, 等值线间隔为0.05。

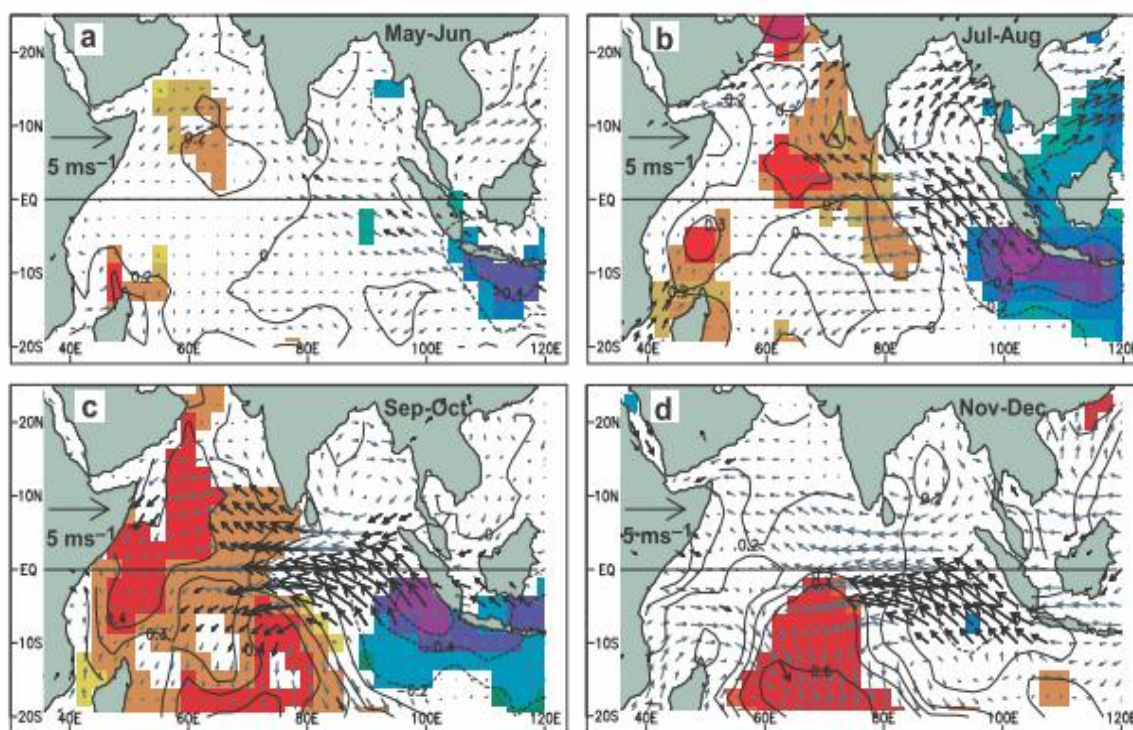


图2 合成事件中海温异常(等值线、填色区)和风场异常(矢量)的演变过程^[5]

a. 5—6月; b. 7—8月; c. 9—10月; d. 11—12月。超过90%信度的海温和风场异常分别由阴影和黑体箭头标记。

2.3 其他海区海温的偶极变化

除上述热带印度洋偶极子外, Behera等^[16]发现南印度洋副热带地区海温的年际变化也呈现偶极变化特点, 并在南半球夏季存在位相锁定。贾小龙等^[17]的研究证实了Behera的结果, 发现两海区(65~80°E, 25~40°S和10~20°S, 95~105°E)平均标准化海温年际变化曲线呈明显的反相变化特征, 并将这现象称为南印度洋偶极

型振荡。

3 IOD 的时空变率

3.1 年际变化特征

研究发现, IOD存在明显的年际变化特征。图3^[18]给出1900—1997年IOD指数的功率谱分析。IOD指数年际变

化周期主要是4~5年和准2年。李东辉等^[19]利用耦合气候系统模式(FGCM-1.0)模拟的IOD表现出1~5年周期变化,其中具有统计性检验的周期集中在1~3年之间。从年际变率的空间分布特征来看,印度洋西部和东南部海表温度具有很大的季节和年际变化特征^[20]。

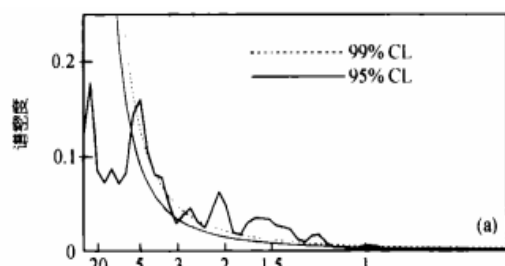


图3 赤道印度洋海温偶极子指数的时间变化功率谱^[18]
细实线和虚线分别表示95%和99%信度。

3.2 年代际变化特征

李崇银等^[11]指出:印度洋赤道地区海温异常在1962年前主要以西高东低为主,之后正好相反。殷永红等^[21]发现近20年来偶极子模的强度存在着年代际的差异:1980年代偏弱,1990年代偏强。晏红明等^[22]认为,印度洋1948年以来的海温变化主要特征是:1950—1960年代为偏冷期,1970年代为冷暖交替的过渡期,1980—1990年代为偏暖期。在这种不同年代际的背景下,袁慧珍^[23]发现在夏季暖态相对于冷态,偶极子正位相强度增加、负位相强度减小;在秋季暖态相对于冷态,偶极子正、负位相的强度都有所增加。

4 IOD 的形成机制

为了进一步理解IOD现象及其对气候的影响,许多学者对IOD的形成机制进行了一系列的研究,形成了许多假说与理论。

(1) ENSO为IOD的直接触发机制。Latif等^[24]认为热带印度洋在具有较深的温跃层并缺乏赤道上翻流情况下,温跃层深度的变化对SST的影响有限,这导致热带印度洋不能产生其自身的年际变率而必须被动地受到热带太平洋ENSO的影响。Harry等^[25]的研究表明:印度洋偶极子的发展与衰亡是由东印度洋中海-气相互作用的季节

变化激发出的;而这种相互作用被视为对太平洋ENSO的响应。Yu等^[26-27]发现1997—1998年间印度洋海温在很大程度上受到由ENSO激发的大尺度大气环流的影响。

然而,并非所有IOD事件的发生都伴有ENSO现象。表1^[28]显示,在选取的15个IOD年份中,纯IOD年占60%。可见有的IOD事件发生时并无ENSO现象伴随。同样,许多ENSO事件发生时并无IOD事件发生(表略)。因此,ENSO与IOD并不是互为发生的前提条件。

表1 IOD事件发生的年份^[28] 标有星号的年份为纯粹IOD年,不带星号为伴随ENSO事件的IOD年。

	IOD正值年份	IOD负值年份
1	1961*	1958*
2	1963	1960*
3	1967*	1964
4	1972	1970
5	1977*	1989*
6	1982	1992*
7	1994*	1996*
8	1997	

(2) ENSO可以通过印度洋局地海-气相互作用来间接引发IOD事件。Wang等^[29]通过观测资料分析发现南印度洋和西北太平洋的相互作用主要是由表面风决定的。除此之外,其他独立于ENSO的印度洋局地强迫或是远距离作用力也可以导致这种耦合模态的产生。Lau等^[30]的数值试验结果表明印度洋上表面加热与动量通量是导致海温异常偶极子型分布特征的关键。然而,Saji等^[31]利用17个耦合气候模式的集合进行研究,发现ENSO并不是触发IOD的唯一机制。

(3) IOD完全是印度洋大气与海洋耦合作用的产物,其形成与ENSO无关,哪怕是在ENSO与IOD都发生的年份。Saji等^[5]对70~90°E,5°S~5°N范围的赤道纬向风异常(Ueq)求区域平均(图4^[5]),表明IOD指数与Ueq几乎呈反向变化,相关性极好。Ashok等^[32]发现:相较于ENSO的贡献,IOD模态最主要还是由印度洋局地海气耦合过程造成的。Behera等^[33]利用SINTEX-F1模式对IOD进行研究表明:IOD主要是由印度洋内在的过程决定。ENSO对IOD的作用,仅当IOD与ENSO共同发生时会影响IOD事件的周期、强度、形成过程。

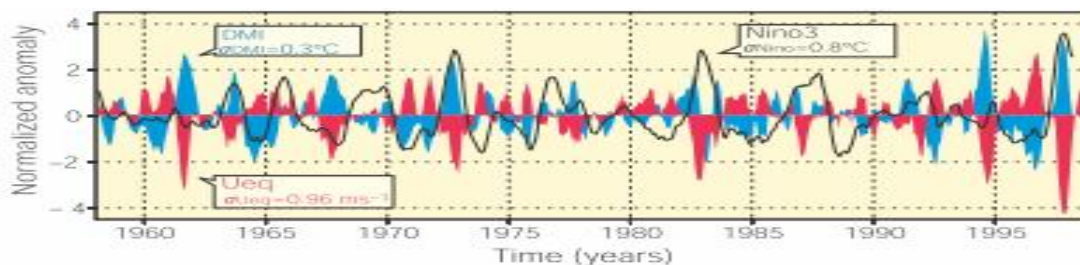


图4 1958—1999年IOD指数(蓝色)、Niño3(黑实线)、Ueq(红色)的时间序列^[5]
三者都进行了标准化。

(4) 局地海-气反馈作用也是IOD的触发机制之一。Hilary等^[34]将这种反馈作用大致分为5类。① 风-蒸发-海温反馈。主要发生在苏门答腊离岸东南风加强, 导致海表面蒸发以及潜热冷却时期(Baquero-Bernal等^[35]、Li等^[36])。② 海岸涌升。发生当苏门答腊沿岸的东南风异常强迫冷、深海水涌上时(Behere等^[3]、Murtugudde等^[37])。③ Bjerknes提出的赤道风-斜温层-海表温度反馈(Shinoda等^[38]、Fischer等^[39])。该反馈作用会导致初始扰动的不稳定增长。当情况有利于不稳定增长时可能导致IOD现象的发生。④ Spencer等^[34]认为高纬度冷空气的经向平流以及赤道东风异常可能导致IOD事件的发生, 但目前IOD研究领域里, 在一定程度上没有得到足够的重视。⑤ 赤道东风异常导致移向Ekman流, 将暖水输送到西南印度洋, 造成该海域海温升高。

(5) 印度尼西亚贯穿流也可能是IOD的触发机制之一。Annamalai等^[40]发现印度尼西亚贯穿流减弱会导致东南印度洋冷却, 从而触发IOD在春季或夏季形成, 而IOD的形成反过来又增强贯穿流。Song等^[41]认为贯穿流异常的深度变化会引起印度洋的变化。王东晓等^[42]认为热带东印度洋在1997—1998年El Niño期间的异常, 一定程度上是由热带西太平洋海温距平通过贯穿流的平流输送引起的。

(6) 海洋Rossby和Kelvin波作为IOD触发机制。Webster等^[43]提出1997年El Niño期间, 这些波的传播反射会影响赤道印度洋斜温层的深度, 从而影响表面变量的变化。这种影响过程在Rao等^[13]、Feng等^[44]海洋模式研究过程中得以重现。

(7) 其他触发IOD的可能因素。Li等^[45]对动力和热力过程的相对作用进行了模式研究。对混合层热量收支的诊断显示: 垂直温度对流和南北方向的温度平流对西印度洋的异常增暖起着重要作用。Lau等^[46]发现: 当无ENSO发生时, 南半球冬季位于澳大利亚南部的纬向海平面气压异常可作为IOD的一个触发机制。李东辉等^[47]认为南海夏季风与IOD正相关显著, 当南海夏季风强度增强(减弱)时, 后期秋季热带印度洋会出现正(负)IOD模态。

5 IOD与ENSO之间的关系

IOD与ENSO的相互关系长期以来一直是研究的核心焦点问题。因此, 尽管本文第4部分已经部分涉及, 但我们仍然认为值得专门对这一问题进行深入总结讨论。

(1) ENSO主动: Nagura等^[48]发现El Niño的建立时间会影响到赤道东印度洋(EEIO)的表面风异常, 通过风场异常作用于EEIO的海温, 从而影响IOD中东部极子的形成。

(2) IOD主动: 巢清尘等^[49]分析1960—1999年的850 hPa风场指出, 在热带西太平洋西风距平爆发前, 赤道东印度洋已经有距平西风持续维持了2年左右(西南季风), 然后西风距平快速地向东扩展到热带西太平洋, 有利于西太平洋西风爆发, 这是El Niño发生不可缺少的条件之一。

(3) ENSO与IOD相互作用: 吴国雄等^[50]发现赤道印度洋和东太平洋海表温度年际变化有显著的正相关, 指出这种正相关是由于沿赤道印度洋上空纬向季风环流和太平洋上空Walker环流之间显著的耦合造成的。认为印度洋上空位相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耦合去影响中东太平洋的海-气相互作用。孟文等^[51]的数值模拟结果、曹杰等^[52]的交叉谱分析也证实了这一点。

(4) ENSO与IOD相互独立: Webster等^[43]认为IOD是印度洋海气系统内部自我维持的结果, 且IOD在热带海洋海温季节、年际尺度的气候变率中可能起到独立的作用。利用小波分析, Saji等^[53]从以下3点说明ENSO与IOD是各自独立、相关性小的事件。① IOD功率在1960、1990年代达到峰值, 而ENSO的峰值出现在1970—1980年代; ② ENSO的宽带谱较为连续, 由1970年代直至1980年代末, 而IOD功率谱分为2段; ③ 在年代际时间尺度上, 强ENSO事件对应着弱IOD事件, 反之亦然。

6 IOD及与ENSO共同作用对东亚气候的影响

IOD虽然只是一种局地海温异常现象, 但通过海-气相互作用会影响到天气系统以及气候系统的变化。海表温度、风场、降水场之间的耦合可导致印度洋周边国家的气候并产生季节性变化, 有时这种作用超过ENSO对该区气候的影响。

6.1 IOD对气候的影响

事实上, 中国学者很早就注意到印度洋海温异常对气候的影响。罗绍华等^[54]发现阿拉伯海和南孟加拉湾的前期海温变化与后期长江中下游夏季降水有较好的相关性, 为预报长江中下游夏季降水和旱涝趋势提供了可能性。图5a、5b^[55]分别给出了IOD指数正负极值的年份6—8月汛期降水场的合成分析。从图5a可以看到, IOD指数为正位相时, 汛期华北及江淮流域干旱少雨, 而华南沿海地区为多雨带。此外云南、河套地区北部、东北北部也为正的降水距平区。当印度洋偶极指数为负位相, 汛期雨带分布基本为南北多雨而长江流域少雨。闫晓勇等^[56]研究表明: IOD对东亚季风区天气气候影响显著, 特别是夏季。晏红明等^[57]的研究表明赤道印度洋中西部SST异常变化会通过季风来影响中国汛期降水。对于1994年东亚地区气候异常, Guan等^[17]研究认为IOD事件至少通

过两种方式影响东亚地区的夏季环流: ① 在青藏高原, 对流层上部由IOD产生的涡源激发的Rossby波列从华南向东北方向传播; ② 由IOD引起的位于印度、孟加拉湾附近的非绝热加热激发的位于热源西侧的Rossby波型及由此延伸的至东亚的波列。Behera等^[58]的研究发现印度

洋偶极子的影响不仅仅局限于赤道印度洋地区, 还影响到南方涛动、印度夏季风甚至东亚季风区的夏季天气气候变化。Saji等^[59]运用偏相关方法去除ENSO事件对气候影响后, 来研究IOD事件对气候的影响, 发现IOD与印度周边国家的温度和降水量相关关系甚好。

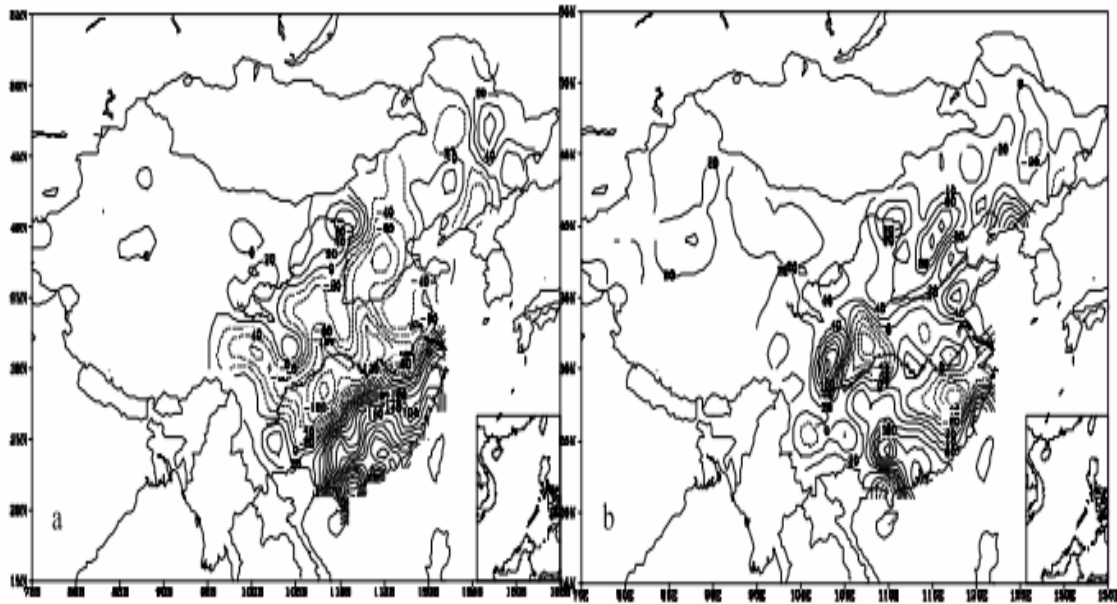


图5 IOD指数高值年(a)、低值年(b)的中国汛期6—8月降水距平分布^[55]

单位: mm。

6.2 IOD与ENSO共同作用对东亚气候的影响

据建华等^[60]利用经验正交函数分解, 发现可以把太平洋 ENSO 与印度洋偶极子作为一个统一的太平洋-印度洋海温异常模态来考虑。杨辉等^[61]定义了一个热带太平洋-印度洋异常综合模指数, 发现在综合模正位相时南亚高压偏弱, 位置偏东、偏南, 反之南亚高压偏强, 位置偏西、偏北。谷德军等^[62]认为当前一年秋冬季的赤道东(西)印度洋、西(中东)太平洋出现海温正(负)异常时, 对应于南海夏季风加强; 反之减弱。另外, 闫晓勇等^[63]利用中科院大气所的 IAP AGCM-II 大气环流模式, 模拟了有无赤道东太平洋海温异常影响下, 印度洋偶极子对东亚季风区天气气候的影响, 结果表明: 单考虑印度洋偶极子时, 东亚地区西南季风的爆发偏晚, 南海夏季风增强, 此时我国大陆降水偏多; 而加大赤道东太平洋暖海温后, 西南季风的爆发将更偏晚, 南海夏季风减弱, 此时华北降水偏少; 印度洋偶极子对东亚季风区的天气气候的影响十分显著, 特别在夏季, 而在 El Niño 期间, 其影响更大, 赤道东太平洋海温异常和印度洋偶极子有协同作用。

7 尚存的科学问题

综上所述, 自IOD现象提出以来, 许多学者对该现象做了大量研究, 取得了重要的研究进展。但是, 关于IOD

对气候的影响以及IOD与ENSO的相互关系的研究还有很多问题不清楚, 有待于进一步深入研究。

(1) IOD发生的根本原因。如前所述, 目前国内外学者关于IOD形成机制还没有统一的认识: 有的学者认为IOD是ENSO事件的一部分, 有的认为ENSO是IOD的触发机制之一, 而有的认为IOD有其自身的形成机制。决定IOD形成的机制是唯一还是存在多种选择, 成为目前IOD研究领域亟待研究的科学问题。

(2) IOD与ENSO循环相互关系的研究。IOD与ENSO在全球气候系统中既相互联系又相互独立。两者的相互关系中谁主谁次? 是通过什么途径来实现相互影响的? 这些问题对于正确理解IOD和ENSO的形成机制至关重要。

(3) IOD对周边气候的影响。很多学者运用统计方法或者数值模拟做过大量研究, 取得了一定的成果。但是由于全球系统中各个系统是相互联系又相互作用的, 如何将IOD的影响与其他因子的气候影响中分离出来, 还需要更进一步探讨。

(4) IOD与ENSO共同作用对气候的影响。海温变化具有全球结构, 不能孤立地只考虑某一海域海温异常的作用。目前, 多海域共同作用下气候异常已受到越来越多的重视。虽然许多学者从多个方面进行研究, 但由于气候系统十分复杂并相互联系, 而且IOD与ENSO之间

的关系尚无定论,再加上目前海-气耦合模式并不十分完善,所以有待于进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] RASMUSSEN E M, CARPENTER T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Nino[J]. *Mon Wea Rev*, 1982, 110(5): 354-384.
- [2] 巢纪平. 厄尔尼诺和南方涛动动力学[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 309.
- [3] BEHEAR S K, KRISHNAN R, YAMAGATA T. Unusual ocean-atmosphere conditions in the tropical Indian Ocean during 1994[J]. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(19): 3 001-3 004.
- [4] VINAYACHANDRAN P N, SAJI H N, YAMAGATA T. Response of the equatorial Indian Ocean to an anomalous wind event during 1994[J]. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(11): 1 613-1 616.
- [5] SAJI N H, GOSWAMI B N, VINAYACHANDRAN P N, et al. A dipole in the tropical Indian Ocean[J]. *Nature*, 1999, 401(16751): 360-363.
- [6] GUAN Z, YAMAGATA T. Summertime response of the tropical atmosphere to the Indian Ocean dipole sea surface temperature anomalies[J]. *J Meteor Soc*, 2003, 81(3): 533-561.
- [7] GUAN Z, YAMAGATA T. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections[J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(10): 1 544.
- [8] KUMAR K K, RAJAGOPALAN B, CANE M A. On the weakening relationship between the Indian monsoon and ENSO[J]. *Science*, 1999, 284(5423): 2 156-2 159.
- [9] ASHOK K, GUAN Z, YAMAGATA T. Weakening of the ENSO-Indian monsoon rainfall relationship: The Indian Ocean connection[R]. *CLIVAR Exchang*, 2002, 1: 10-11.
- [10] 谭言科, 张人禾, 何金海, 等. 热带印度洋海温的年际变化与ENSO[J]. *气象学报*, 2004, 62(6): 831-840.
- [11] 李崇银, 穆明权. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响[J]. *大气科学*, 2001, 25(4): 433-443.
- [12] ANDERSON D. Extremes in the Indian Ocean[J]. *Nature*, 1999, 401(6751): 337-339.
- [13] RAO S A, BEHERA S K, MASUMOTO Y, et al. Interannual variability in the subsurface tropical Indian Ocean with a special emphasis on the Indian Ocean Dipole[J]. *Deep-Sea Res II*, 2002, 49(7): 1 549-1 572.
- [14] YAMAGATA T, BEHERA S K, RAO S A, et al. The Indian Ocean dipole: a physical entity[R]. *Clivar Exchanges*, 2002, 4: 1-6.
- [15] TIAN J, LIU H, QIAN W. A dipole mode at thermocline layer in the tropical Indian Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 22(1): 15-24.
- [16] BEHERA S K, YAMAGATA T. Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean[J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(2): 327-330.
- [17] 贾小龙, 李崇银. 南印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(6): 1 238-1 249.
- [18] 李崇银, 穆明权, 潘静. 印度洋海温偶极子和太平洋海温异常[J]. *科学通报*, 2001, 46(20): 1 747-1 751.
- [19] 李东辉, 俞永强, 刘海龙, 等. FGCM-1.0耦合模式对热带印度洋偶极子的模拟[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(10): 1 230-1 236.
- [20] BEHERA S K, SALVEKAR P S, YAMAGATA T. Simulation of interannual SST variability in the tropical Indian Ocean[J]. *J Climate*, 2000, 13(19): 3 487-3 499.
- [21] 殷永红, 史历, 倪允琪. 近20年来热带印度洋与热带太平洋海气系统相互作用特征的诊断研究[J]. *大气科学*, 2001, 25(3): 355-371.
- [22] 晏红明, 肖子牛, 谢应齐. 近50年热带印度洋海温距平场的时空特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(2): 180-188.
- [23] 袁慧珍. 印度洋偶极子及其与中国降水关系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006: 14-15.
- [24] LATIF M, BARNETT T P. Interactions of the tropical oceans[J]. *J Climate*, 1995, 8(4): 952-964.
- [25] HENDON H H. Indonesian rainfall variability: impacts of ENSO and local air-sea interaction[J]. *J Climate*, 2003, 16(11): 1 775-1 790.
- [26] YU L, RIENECKER M M. Mechanisms for the Indian Ocean warming during the 1997—1998 El Nino[J]. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(6): 735-738.
- [27] YU L, RIENECKER M M. Indian Ocean warming of 1997—1998[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(C7): 16 923-16 939.
- [28] YAMAGATA T, BEHERA S K, RAO S A, et al. Comments on “Dipoles, temperature gradients and tropical climate anomalies”[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84(10): 1 418-1 422.
- [29] WANG B, WU R, LI T. Atmosphere—warm ocean interaction and its impacts on Asian—Australian monsoon variation[J]. *J Climate*, 2003, 16(12): 1 195-1 211.
- [30] LAU N C, NATH M J. Atmosphere—ocean variations in the Indo-Pacific sector during ENSO episodes[J]. *J Climate*, 2003, 16(1): 3-20.
- [31] SAJI N H, XIE S P, YAMAGATA T. Tropical Indian Ocean variability in the IPCC twentieth-century climate simulation[J]. *J Climate*, 2006, 19(17): 4 397-4 417.
- [32] ASHOK K, GUAN Z, YAMAGATA T. A look at the relationship between the ENSO and the Indian Ocean dipole[J]. *J Meteorol Soc Japan*, 2003, 81(1): 41-56.
- [33] BEHERA S K, LUO J, MASSON S, et al. A CGCM study on the interaction between IOD and ENSO[J]. *J Climate*, 2006, 19(9): 1 688-1 705.
- [34] HILARY S, ROWAN S, JULIA S, et al. Indian Ocean climate and dipole variability in Hadley Centre Coupled GCMs[J]. *J Climate*, 2005, 18(13): 2 286-2 307.
- [35] BAQUERO-BERNAL A, LATIF M, LEGUTKE S. On dipolelike variability of sea surface temperature in the tropical Indian Ocean[J]. *J Climate*, 2002, 15(11): 1358-1368.
- [36] LI T, WANG B, CHANG C, et al. A theory for the Indian Ocean dipole-zonal mode[J]. *J Atmos Sci*, 2003, 60(17): 2 119-2 135.
- [37] MURTUGUDDE R, MCCREARY J, BUSALACCHI A. Oceanic processes associated with anomalous events in the Indian Ocean with relevance to 1997—1998[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(C2): 3 295-3 306.
- [38] SHINODA T, HENDON H H, ALEXANDER M A. Surface and subsurface dipole variability in the Indian Ocean and its relation with ENSO[J]. *Deep-Sea Res*, 2004, 51(5): 619-635.
- [39] FISCHER A S, TERRAY P, GUILYARDI E, et al. Two independent triggers for the Indian Ocean dipole/zonal mode in a coupled GCM[J].

- J Climate, 2005, 18(17): 3 428-3 449.
- [40] ANNAMALAI H, MURTUGUDDE R, POTEMRA J, et al. Coupled dynamics over the Indian Ocean: Spring initiation of the zonal mode[J]. Deep-Sea Res, 2003, 50(12): 2 305-2 330.
- [41] SONG Q, GORDON A L. Significance of the vertical profile of the Indonesian Throughflow transport to the Indian Ocean[J]. Geophys Res Lett, 2004, 31(16): 16 307.
- [42] 王东晓, 刘赞, 刘钦燕, 等. 1997—1998年El Niño期间印度洋和西太平洋上层海洋的联系[J]. 自然科学进展, 2003, 13(9): 957-963.
- [43] WEBSTER P J, MOORE A M, LOSCHNIGG J P, et al. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98[J]. Nature, 1999, 401(6751): 356-360.
- [44] FENG M, MEYERS G. Interannual variability in the tropical Indian Ocean: A two-year time scale of IOD. Deep-Sea Res, 2003, 50(12): 2 263-2 284.
- [45] LI T, ZHANG Y, LU E, et al. Relative role of dynamic and thermodynamic processes in the development of the Indian Ocean dipole: An OGCM diagnosis[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(23): 251-253.
- [46] LAU N C, NATH M J. Coupled GCM simulation of atmosphere-ocean variability associated with the zonally asymmetric SST changes in the tropical Indian Ocean[J]. J Climate, 2004, 17(2): 245-265.
- [47] 李东辉, 张瑰, 朱益民, 等. 热带印度洋秋季偶极子模态与南海夏季风强度变化的关系[J]. 热带气象学报, 2006, 22(5): 439-446.
- [48] NAGURA M, KONDA M. The seasonal development of an SST anomaly in the Indian Ocean and its relationship to ENSO[J]. J Climate, 2007, 20(1): 38-52.
- [49] 巢清尘, 巢纪平. 热带西太平洋和东印度洋对ENSO发展的影响[J]. 自然科学进展, 2001, 11(12): 1 293-1 300.
- [50] 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.
- [51] 孟文, 吴国雄. 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, 2000, 24(1): 15-25.
- [52] 曹杰, 董慧林, 陶云. 热带印度洋和热带太平洋海温振荡规律的研究[J]. 热带气象学报, 2003, 19(1): 9-16.
- [53] SAJI N H, YAMAGATA T. Structure of SST and surface wind variability during Indian Ocean Dipole mode events: COADS observations[J]. J Climate, 2003, 16(16): 2 735-2 751.
- [54] 罗绍华, 金祖辉, 陈烈庭. 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析[J]. 大气科学, 1985, 9(3): 314-320.
- [55] 肖子牛, 晏红明, 李崇银. 印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系[J]. 热带气象学报, 2002, 18(4): 335-344.
- [56] 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.
- [57] 晏红明, 严华生, 谢应齐. 中国汛期降水的印度洋SSTA信号特征分析[J]. 热带气象学报, 2001, 17(2): 109-116.
- [58] BEHERA S K, YAMAGATA T. A new East Asian winter monsoon index and associated the Indian Ocean dipole impact on Darwin pressure: Implication for southern oscillation index[R]//The Second International Symposium on Physico Mathematica Problems Related to Climate Modeling and Prediction. Shanghai: CAS TWAS WMOFORUM, 2002.
- [59] SAJI N H, YAMAGATA T. Possible impacts of Indian Ocean dipole mode events on global climate[J]. Clim Res, 2003, 25(2): 151-169.
- [60] 据建华, 陈琳玲, 李崇银. 太平洋-印度洋海温异常模态及其指数定义的初步研究[J]. 热带气象学报, 2004, 20(6): 617-624.
- [61] 杨辉, 李崇银. 热带太平洋-印度洋海温异常综合模对南亚高压的影响[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 99-110.
- [62] 谷德军, 纪忠萍, 王东晓, 等. 不同时间尺度上南海夏季风强度与海洋热力条件的关系[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 14-20.
- [63] 闫晓勇, 张铭. 赤道东太平洋海温异常期间印度洋偶极子对东亚季风区影响的数值模拟[J]. 热带气象学报, 2004, 20(4): 375-382.

PROGRESSES IN THE STUDIES ON INDIAN OCEAN DIPOLES

XIAO Ying^{1, 2}, ZHANG Zu-qiang², HE Jin-hai¹

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074, China;

3. National Climate Center, Beijing 10081, China)

Abstract: Indian Ocean Dipole(IOD) is one of the important systems influencing climate change in Asia. Since the concept was proposed in 1999, great advances have been achieved in the studies on the mechanism of IOD and its interaction with the ENSO by scholars at home and abroad. In this study, recent progresses are summarized in the studies on IOD's temporal and spatial characteristics, mechanisms, its interaction with the ENSO, and IOD itself and the impact of IOD ENSO couplings on the climate of East Asia. On the basis of previous researches, existing scientific issues are put forward for this field.

Key words: the Indian Ocean Dipole; reviews; ENSO; East Asian climate