

姜继兰, 刘屹岷, 李建平, 等. 印度洋偶极子研究进展回顾[J]. 地球科学进展, 2021, 36(6): 579-591. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.066.
[JIANG Jilan, LIU Yimin, LI Jianping, et al. Indian Ocean Dipole: a review and perspective[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(6): 579-591. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.066.]

印度洋偶极子研究进展回顾^{*}

姜继兰^{1,2}, 刘屹岷^{1,2*}, 李建平^{3,4}, 张人禾⁵

(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, 北京 100029;
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿
科学中心/物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 4. 青岛海洋科学与技术
国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;
5. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438)

摘要: 印度洋偶极子是热带印度洋中重要的年际变率之一, 对印度洋周边国家乃至全球的气候有着重要的影响, 关于其形成机制及气候影响的研究对于气候预测具有重要意义。主要回顾了近10年印度洋偶极子的相关研究进展, 包括印度洋偶极子的基本特征、与热带太平洋中厄尔尼诺—南方涛动之间的关系、与亚洲夏季风之间的关系、对全球气候的影响以及全球变暖背景下的变化等。印度洋偶极子与热带太平洋中厄尔尼诺—南方涛动之间的关系体现为二者之间是相互影响的, 但不同类型的印度洋偶极子对热带太平洋中厄尔尼诺—南方涛动的影响机制尚不明确, 还需进一步的研究。印度洋偶极子与亚洲夏季风之间的关系体现为二者之间存在强烈的相互作用, 印度洋偶极子与印度洋东部夏季风环流之间存在相互促进作用, 而印度洋偶极子与印度夏季风环流之间的相互作用尚需进一步研究。此外, 研究表明全球变暖背景下极端印度洋偶极子的发生将增多, 同时极端印度洋偶极子对我国极端气候事件的发生有着重要影响。以往的研究主要集中于单独的印度洋偶极子或印度洋偶极子和热带太平洋中厄尔尼诺—南方涛动的结合对我国极端气候的影响, 而印度洋偶极子与中高纬环流系统或泛热带海洋之间的协同作用对我国极端气候事件的影响还亟需相关研究。对印度洋偶极子的系统性回顾可为未来印度洋偶极子的研究提供一定的科学基础。

关键词: 印度洋偶极子; 厄尔尼诺—南方涛动; 亚洲夏季风; 相互作用; 全球增暖

中图分类号: P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2021)06-0579-13

1 引言

印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)是热带印度洋中重要的年际变率之一。正IOD的主要特征表现为热带东南印度洋海表面温度(Sea

Surface Temperature, SST)冷异常和热带西印度洋SST暖异常^[1,2]。早于20世纪80年代, Reverdin等^[3]和Nicholls^[4]已揭示出了印度洋中的类偶极子海温结构, 但对IOD的广泛研究是在1994年和1997年强IOD事件发生之后开始的。Saji等^[1]在1999年首

收稿日期: 2021-04-02; 修回日期: 2021-05-25.

*基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项“工业革命以来海陆气相互作用的气候环境影响”(编号:XDB40030204); 国家自然科学基金项目“青藏高原地—气耦合过程和海洋对区域能量和水分循环及全球气候的协同影响”(编号:91637312)资助。

作者简介: 姜继兰(1994-), 女, 四川宜宾人, 博士研究生, 主要从事海气相互作用研究. E-mail: jiangjilan@lasg.iap.ac.cn

*通信作者: 刘屹岷(1965-), 女, 河南信阳人, 研究员, 主要从事气候动力学和数值模拟研究. E-mail: lym@lasg.iap.ac.cn

次提出 IOD 概念,同时定义了衡量 IOD 强度的 IOD 指数,即热带西印度洋($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{E}$)与热带东南印度洋($10^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}, 90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$)区域平均的 SST 异常之差。

最初 Saji 等^[1]提出 IOD 概念时,认为 IOD 是独立于热带太平洋中厄尔尼诺—南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)现象的,由热带印度洋中局地海气相互作用触发^[1,2,5,6]。但后来大量研究指出 IOD 与 ENSO 之间存在密切关系,认为 IOD 主要由热带太平洋中 ENSO 所强迫^[7-11]。Fischer 等^[12]同时揭示了 2 种相互独立的触发机制,一种是独立于 ENSO 的异常 Hadley 环流型,另一种是与 ENSO 相关的异常沃克环流型。因此,IOD 既可由 ENSO 强迫触发也可由独立于 ENSO 的海气相互作用触发^[12,13]。相关研究表明澳大利亚以北的 SST 冷异常^[14]、青藏高原和中亚 4 月异常多的雪盖^[15]、南半球副热带高压系统^[16]、澳大利亚与中国南海(菲律宾海)之间的强气压梯度^[17]以及春季热带西南印度洋温跃层的增暖^[18]等均可通过影响印度洋中的局地海气相互作用而触发独立于 ENSO 的 IOD 事件。此外,大量研究也集中于夏季风环流系统对 IOD 发展的影响,并指出亚洲夏季风环流异常与 IOD 之间存在强的相互作用^[7,13,19-21]。IOD 之所以引起大家的关注,是因为 IOD 具有重要的气候效应。IOD 不仅影响全球热带海洋,还影响全球其他气候要素,比如降水和海冰等^[22-26]。IOD 在 1994 年东亚极端气候异常事件的形成中起着重要作用^[27,28]。因此,研究 IOD 对于气候短期预测具有重要的意义。

关于 IOD 的研究近几十年取得了许多重要的成果,相关的文献和专著对 IOD 与 ENSO 之间的关系、IOD 对印度夏季风降雨的影响、IOD 的遥相关、IOD 的预测等进行了相应的回顾^[29-34],但其中关于 IOD 的基本特征、不同类型 ENSO 对 IOD 的影响以及亚洲夏季风与 IOD 之间的相互作用等方面涉及较少,仍需进一步对相关研究进展进行深入回顾。因此,本文对近 10 年 IOD 相关研究进展的回顾,主要涉及到 IOD 的基本特征、IOD 与 ENSO 之间的关系、IOD 与亚洲夏季风之间的关系、IOD 的气候效应以及全球变暖背景下 IOD 的变化等。

2 IOD 的基本特征

2.1 IOD 的东西极 SST 异常特征

经典正 IOD 以东南印度洋的 SST 冷异常为主,西印度洋的 SST 暖异常相对较弱,IOD 东极的 SST

冷异常主导着 IOD 的发展^[35,36]。一般情况下,IOD 东极 SST 冷异常的演变超前于西极 SST 暖异常的演变^[37,38],Wang 等^[38]认为 IOD 发展过程中热带印度洋上空沃克环流对异常大气扰动位能响应的正反馈机制导致了西极 SST 异常的延迟发展。Sun 等^[39]根据东西印度洋 SST 异常的强度差异将 IOD 分为对称性 IOD 和非对称性 IOD,对称性 IOD 即 IOD 东西极 SST 异常的强度均是显著的,非对称性 IOD 即 IOD 东极 SST 异常很强,西极 SST 异常很弱,整个热带印度洋呈现单极型。此外,部分 IOD 西极 SST 异常发生发展的位置与经典 IOD 存在显著差异,Endo 等^[40]基于 IOD 发展过程中西极 SST 异常形成位置的差异,将 IOD 分为经典 IOD 和中部型 IOD(IOD Modoki),经典正 IOD 的 SST 负(正)异常形成于热带印度洋东部(中西部);而正 IOD Modoki 的 SST 负(正)异常形成于热带印度洋东西部(中部),经典负 IOD 和负 IOD Modoki 反之。两类 IOD 对应着不同的沃克环流结构,经典正 IOD 对应着单一的沃克环流结构,整个赤道印度洋均为表面东风异常,而正 IOD Modoki 的赤道东风异常仅延伸至印度洋中部,其西侧边缘为赤道西风异常,对应着双圈沃克环流结构^[41]。

2.2 IOD 的季节锁相特征

IOD 具有强季节锁相特征,该特征强烈依赖于印度洋上的夏季风环流。在夏季,当苏门答腊沿岸的东南风异常叠加到气候态东南风上时,会加强风—蒸发—SST(Wind-Evaporation-SST, WES)反馈和风—温跃层—SST 反馈(Wind-Thermocline-SST, Bjerknes 反馈),促进东南印度洋 SST 冷异常的发展。在冬季,气候态风场从夏季的东南风转变为西北风,异常东南风则会减弱总的风速,耗散掉原来的 SST 冷异常^[1,42,43]。此外,印度洋西边界反射的海洋波动也会在冬季减弱甚至截断印度洋东部的沿岸上升流,抑制 SST 冷异常的发展^[44,45]。因此,经典正 IOD 一般从春末夏初开始发展,夏季加强,秋季达到峰值,冬季逐渐消亡。当然也有部分 IOD 发生发展的时间不同于经典 IOD,Du 等^[36]根据 IOD 发生峰值季节和存在时间的不同,将 IOD 分为 3 类(发展和成熟均在夏季的不合季节的 IOD,发展和成熟均在秋季的正常的 IOD,发展在夏季成熟在秋季的延长的 IOD),其中强调了不合季节的 IOD 发生的原因,即由沿着赤道印度洋纬向风的改变而导致。

2.3 IOD的偏度特征

正负IOD事件存在强的偏度特性,正IOD事件的振幅比负IOD事件的振幅更强^[43]。Hong等^[46,47]指出正IOD事件东南印度洋的SST冷异常比负IOD事件东南印度洋的SST暖异常更强,并归因于风应力—海洋平流—SST反馈和SST—云—辐射反馈的非对称性。前者指非线性海洋平流在IOD的正负位相,均会促进IOD东极SST冷异常的发展,即加强正IOD的发展而削弱负IOD的发展。后者指东南印度洋的SST冷异常在达到一定程度之后,随着SST冷异常的继续发展,正的云辐射强迫不会继续加强,以致阻碍SST冷异常的发展,而随着SST暖异常的增加,负的云辐射强迫却会线性增加,阻碍SST暖异常的发展。同时,东南热带印度洋更深的平均温跃层也会导致IOD的非对称性,因为正IOD事件中温跃层的变浅相比负IOD事件中温跃层的加深更强^[43,48,49]。Zhang等^[49]也指出正负IOD在东南印度洋的海洋平流的强度差异会促成IOD的非对称性,正IOD的东风异常所对应的冷平流比负IOD期间所产生的平流更强。

3 ENSO与IOD之间的关系

IOD与ENSO之间的关系一直是研究IOD触发机制中的重要科学问题。正如Wang^[50]和Cai等^[51]提出的大洋之间相互作用的概念,其中包括了热带印度洋和热带太平洋之间的相互作用,IOD和ENSO之间就是一种相互作用的关系^[35,52]。ENSO主要通过热带印度洋和热带太平洋之间相互耦合的沃克环流异常(图1)以及海洋路径影响IOD^[50]。El Niño主要影响热带印度洋西部的SST异常^[55,56]。伴随El Niño同时发生的正IOD,其西极的SST暖异常比独立于El Niño的正IOD所对应西极的SST暖异常更强^[6,13](图1)。关于IOD对ENSO的影响,早期研究指出IOD主要通过沃克环流异常以及与纬向风异常相关的海洋波动过程影响同期ENSO的发展^[35,57~60]。伴随正IOD的El Niño事件的强度比独立El Niño事件的强度更强^[60],El Niño和正IOD之间的相互作用有利于东太平洋中超级El Niño的形成^[52]。近期研究表明IOD的发展也可影响次年太平洋中ENSO的发展,Izumo等^[61]表明赤道印度洋的SST异常通过影响赤道西太平洋上的纬向风异常,促进次年ENSO的发展;Yuan等^[44,62~66]的系列研究揭示了海洋过程的影响,表明IOD事件发展中,赤道印度洋上产生的开尔文波会沿着苏门答腊—爪哇沿岸向东传,通过印度尼西亚贯穿流引起西赤道太平洋的温跃层异常以及次表层温度异常,进一步向东传影响滞后1年的太平洋中ENSO的发展,正IOD有利于次年太平洋中La Niña的发展^[67]。下文将主要回顾ENSO对IOD发展的影响。

3.1 El Niño爆发时间与正IOD之间的关系

El Niño爆发时间的不同会导致其不同的演化以及不同的强度^[68,69],相对应IOD的影响存在显著差异。大量研究表明春季和早夏开始发展的El Niño有利于正IOD的发展,而晚夏和秋季开始发展的El Niño不利于正IOD的发展^[10,70,71]。当然El Niño也不是发展越早越有利于促进正IOD的发展,Roxy等^[72]指出从前冬开始发展的El Niño所引发的正IOD比从春夏开始发展的El Niño所引发的正IOD弱。因为在前冬,El Niño所导致的东南印度洋的反气旋式环流会抵消气候态的气旋式环流,从而减弱蒸发,促进SST暖异常的发展,不利于正IOD的发展。El Niño与IOD之间季节循环的位相锁定关系对于IOD的发生和发展来说非常重要。

3.2 El Niño空间多样性与正IOD之间的关系

Ashok等^[73]和Weng等^[74]根据El Niño发展过程中SST暖异常形成位置的差异,提出一类不同于经典El Niño的El Niño Modoki,即SST暖异常形成于热带太平洋中部,而SST冷异常形成于热带太平洋东西部的El Niño。同时期,类似于这两类El Niño,Yu等^[75]和Kao等^[76]提出东部型El Niño(EP-El Niño)和中部型El Niño(CP-El Niño)。EP-El Niño的SST暖异常形成于热带太平洋东部,而CP-El Niño的SST暖异常形成于热带太平洋中部。不同类型的El Niño对IOD的影响是不同的,Zhang等^[8]提出EP-El Niño与IOD之间的关系主要由El Niño振幅所决定,弱EP-El Niño伴随着弱的大气响应,在印度洋东部导致弱的表面东风异常,不利于诱发局地海气相互作用,而强EP-El Niño能导致印度洋洋东部强的表面东风异常,因此强EP-El Niño更利于正IOD的发生。CP-El Niño与IOD之间的关系主要由CP-El Niño的SST暖异常的纬向位置所决定,SST暖异常的位置偏西时,热带太平洋上的大气对流也偏西,在苏门答腊沿岸没有显著的东南风异常,不能有效地触发WES反馈和Bjerknes正反馈;SST暖异常的位置偏东时,苏门答腊沿岸存在显著的东南风异常,则CP-El Niño的SST暖异常位置偏东更利于正IOD发展。Wang等^[77]根据El Niño对中国南部降水和台风路径的不同影响,进一步将El Niño

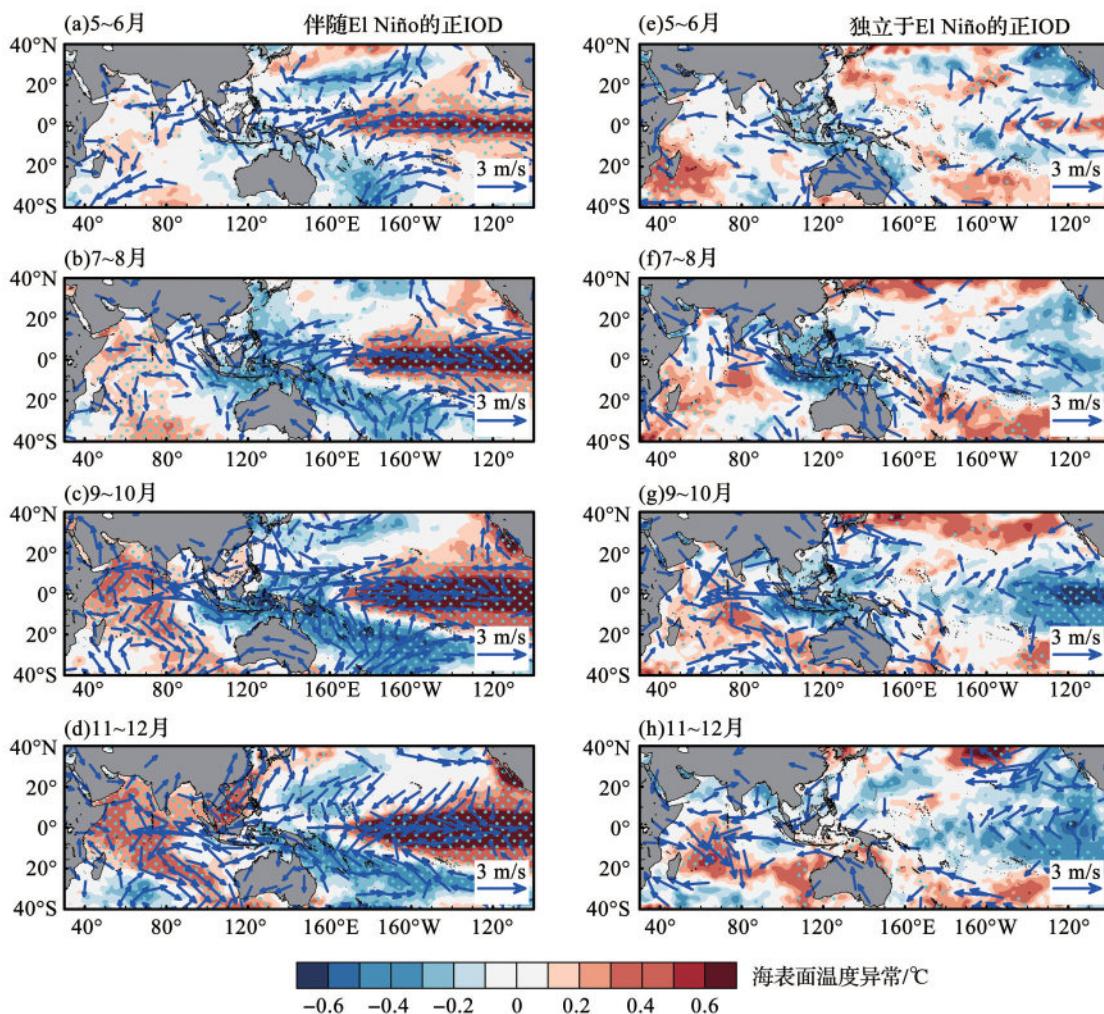


图1 正IOD年SST异常(阴影,单位:°C)和925 hPa风异常(矢量箭头,单位:m/s)的双月平均合成图

Fig. 1 Bimonthly averaged composite SST anomaly (shading, °C) and 925 hPa wind anomaly (vectors, m/s) for positive IODs

(a)~(d)伴随El Niño的正IOD年(包括:1951年、1963年、1972年、1977年、1982年、1987年、1991年、1994年、1997年、2002年、2006年和2015年的合成图;(e)~(h)为独立于El Niño的正IOD年(包括:1961年、1967年、2011年和2019年的合成图。数据为来自哈德莱中心的SST^[53]和来自NCEP/NCAR再分析资料1^[54]的风场。图中打点区域表示通过显著性水平 α 为0.1的双侧学生t检验,图中仅给出了通过显著性水平 α 为0.1的风矢量

(a)~(d) for positive IODs co-occurring with El Niño, including 1951, 1963, 1972, 1977, 1982, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2006, 2015;
(e)~(h) for positive IODs independent on El Niño, including 1961, 1967, 2011, 2019. SST and wind field data are obtained from Hadley Center^[53] and NCEP/NCAR reanalysis1^[54], respectively. Cyan stiples indicate the 0.1 significance level from a Student's two-tailed t test. Only wind vectors that are significant at the 0.1 significance level are plotted

Modoki分为El Niño Modoki I 和 El Niño Modoki II。El Niño Modoki II发生时,赤道太平洋上的沃克环流上升区向西移,印度洋东部出现异常上升运动,印度洋西部出现异常下沉运动,赤道印度洋上西风异常发展,不利于正IOD的触发;而经典El Niño和El Niño Modoki I发生时,沃克环流的下沉分支在赤道西太平洋和东印度洋发展,东南印度洋出现显著的东南风异常,促进SST冷异常发展,有利于正IOD的发生与发展^[78,79]。2015年的极端El Niño是经典

El Niño 和 El Niño Modoki II 的混合,印度洋上减弱的沃克环流和加强的沃克环流竞争,结果导致赤道印度洋西部(中东部)出现西风(东风)异常,弱的Bjerknes正反馈过程使得IOD发展很弱^[79]。

4 IOD与亚洲夏季风之间的关系

IOD的发生和发展强烈依赖于夏季季风环流场^[1],Cai等^[43]指出IOD的季节锁相与印度洋上的基本环流以及亚洲夏季风的爆发、转换和衰退密切相

关。Huang 等^[80]利用耦合试验验证了在没有 ENSO 的情况下,强西北太平洋夏季风有利于正 IOD 的发展。与 Kajikawa 等^[81]文中的结论一致。Zhang 等^[82]指出强南海夏季风 (South China Sea Summer Monsoon, SCSSM) 有利于促进正 IOD 的发展,同时 Zhang 等^[55]也给出了 SCSSM 和 ENSO 在促进 IOD 发展中的相对作用,SCSSM 主要通过影响印度洋东部的局地经向环流,导致苏门答腊沿岸的东南风异常,对 IOD 东极的发展起主要作用,而 ENSO 主要通过与海洋过程相耦合的沃克环流异常影响 IOD 西极的发展(图2)。孟加拉湾夏季风的早爆发^[83],或初夏孟加拉湾上空的降水正异常^[37],均有利于加强东南印度洋的东南风异常,从而导致热带东南印度洋的变冷以及西印度洋的增暖,触发独立于 ENSO 的 IOD。同时,IOD 的发生与发展也会对东亚夏季风产生显著影响。IOD 可通过改变对流层低层流场直接对夏季风产生影响,正 IOD 有利于加强南海夏季风,负 IOD 有利于减弱南海夏季风。此外,IOD 也可通过影响南亚高压和西北太平洋副热带高压,进而对亚洲夏季风产生影响,正 IOD 对应着偏弱的南亚高压与西北太平洋副热带高压,负 IOD 反之^[84,85]。1994年夏季,IOD 通过罗斯贝波列的传播引起东亚环流的改变,导致对流层低层向北季风流的削弱^[27]。

相对于印度洋东部的夏季风而言,印度夏季风

与 IOD 的关系较为复杂。早期部分研究指出弱印度夏季风通过减弱西部赤道印度洋的上翻,同时加强苏门答腊沿岸的上翻,促进正 IOD 的发展^[20,86,87];而正 IOD 的发展有利于加强印度夏季风、非洲沿岸向北的越赤道气流以及赤道印度洋中部的气旋性西风,进而对 IOD 产生负反馈,促进正 IOD 的耗散^[42]。但也有部分研究指出印度夏季风的加强有利于正 IOD 的发生和发展,Drbohlav 等^[13]指出非 El Niño 年,加强的夏季风环流会加强西北印度洋的西风和东南印度洋的东南风,形成以东南印度洋 SST 冷异常为主的正 IOD。Krishnan^[21]也指出正 IOD 和强印度夏季风同时发生时,加强的印度夏季风降水和夏季风经向环流会促进赤道南侧强东风异常的发展,导致东南印度洋强 SST 冷异常的发展。从以上回顾可以看出,目前关于印度夏季风对 IOD 发生与发展的影响还没有十分明确的结论,需进一步深入研究。而关于 IOD 对印度夏季风降水影响的观点则较为一致,观测和模式结果均表明正 IOD 增加印度夏季风降水^[21,42,88,89],减少 El Niño 所导致的印度地区降水负异常^[88,90-92]。Hrudya 等^[93]也指出 IOD 与印度夏季风降水之间的关系在夏季不同月份间存在显著差异,并且在 1951—1980 年和 1986—2015 年这两个时段内也存在着显著的变化。Hrudya 等^[94]近期较全面地回顾了 IOD 和 ENSO 对印度夏季风降水的影响。

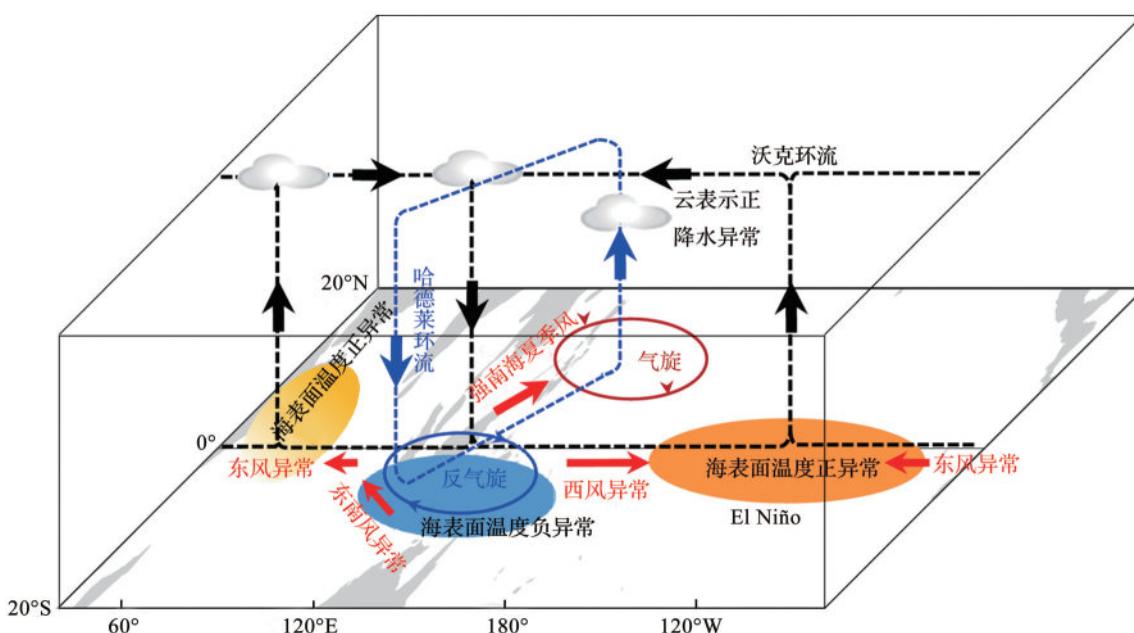


图2 夏季 SCSSM 和秋季 ENSO 影响 IOD 的过程示意图(据参考文献[55]修改)

Fig. 2 Schematic diagram of the SCSSM (JJA) and ENSO (SON) affecting the IOD (modified after reference [55])

5 IOD 的气候效应

IOD 作为印度洋中重要的海气相互作用现象, 对海洋过程和印度洋周边乃至全球的气候均存在显著影响。相关研究表明正 IOD 可通过局地风异常或海洋波动过程加强印度尼西亚贯穿流^[95]、促进夏秋季印度洋东部赤道潜流及上翻的年际变率的发展^[96,97], 进一步的研究也表明在夏秋季, 与正 IOD 相关的强赤道潜流维持着赤道印度洋东部的上翻^[98]。IOD 的发展可通过影响热带环流系统而引起赤道印度洋海表盐度的变化^[99]。IOD 对印度洋周边地区降水及环流的影响主要包括: 正 IOD 导致赤道印度洋东部、印度尼西亚地区以及澳大利亚南部降水减少, 非洲东侧沿岸降水增加^[2,25,26,100–104], 印度大陆夏季风降水增加^[91], 北印度洋热带气旋活动频次减少^[105], 南亚高压和副热带高压减弱^[84]等。此外, IOD 对其他区域的气候也存在显著影响, 比如与欧洲、南北美和南非的陆地表面温度及降雨等均有显著联系^[22,23]。IOD 的发展也会影响南极海冰的分布, 当去除 ENSO 的影响之后, 正 IOD 导致北半球秋季印度洋中 60°E (90°E) 附近海冰的增加(减少)^[24]。超强 IOD 的发展可能导致极端气候事件, 比如 2015 年的强正 IOD 导致秋季南海地区出现过去 140 年以来破纪录的 SST 暖异常, 对海洋环境造成了严重的影响^[106]; 2018 年和 2019 年连续发生的正 IOD 和 CP El Niño 共同导致澳大利亚夏季的干旱及严重的森林火灾^[107,108]; 2019 年的极端正 IOD 导致大西洋的热带气旋活动异常增加^[109]、冬季东亚地区出现极端暖异常^[110]以及 2020 年初夏东亚地区极端梅雨的发生^[111,112]。

IOD 对中国的气候同样存在显著影响^[29,113,114]。夏秋季正 IOD 的发展导致秋季中国西南地区低层受异常气旋环流控制, 降水增加^[115]。进一步研究表明, 夏季 IOD 对中国南部降水的影响是较弱的, 而秋季正(负)IOD 显著增加(减少)中国南部的降水, 并且正 IOD 对中国南部降水的影响更强^[116]。正 IOD 的发展促进华西区域秋季降水增加^[117]。近期研究也表明正 IOD 可通过调整冬季青藏高原的降水, 从而加深其南部雪深, 增加次年夏季长江流域的降水^[118]。此外, IOD 与 ENSO 对我国降水的影响存在相互加强或抵消效应, 1994 年夏季正 IOD 同 El Niño Modoki 的结合效应, 导致中国南方地区严重的洪涝灾害以及长江流域严重的干旱; 1983 年夏季强 El Niño Modoki 负位相、中等强度的 El Niño 和正 IOD, 共同导致了长江流域的洪涝灾害和中国南方地区严重的干旱^[28]。El Niño (La Niña) 和正(负)

IOD 的结合对应着秋季中国南部(黄土高原地区)显著的降雨正异常^[119]。2019 年 CP El Niño 与超强正 IOD 的结合导致了 8~10 月长江中下游地区的极端干旱^[120]。独立于 El Niño 的和伴随 El Niño 的正 IOD 对我国降水的季节演变存在不同的影响, 纯正 IOD 年, 中国南部地区在 IOD 发展年春季(夏秋季)对应着降水负(正)异常; 中国北部和西北部地区在 IOD 发展年秋季和衰退年夏季出现降水正异常; 中国东北地区在 IOD 发展年夏季(秋季)和衰退年(冬季)夏季出现降水负(正)异常。同 El Niño 相结合的正 IOD 年, 中国南部从 IOD 发展年夏季到次年春季(发展年春季和衰退年夏季)均存在一致的降水正(负)异常; 中国西北部地区在 IOD 发展年夏季异常湿, 中国北部地区在 IOD 发展年秋季异常干^[121]。Heng 等^[122]指出 El Niño 加强了正 IOD 对中国南部地区降水发展和峰值阶段的影响, 对其衰减阶段的影响较小。年代际时间尺度上, 20 世纪 70 年代以来正 IOD 的增多加强了中国西南部低纬度高地地区降雨和 IOD 之间的关系, 可能会引起该区域干旱频发^[123]。

6 全球变暖背景下 IOD 的变化

在全球变暖背景下, 热带印度洋 SST 异常增暖存在空间不一致性, 大量观测和模式预估研究表明, 热带印度洋的平均态海温的增暖呈现正 IOD 型海温分布^[43,124–127], 即表现为印度洋东部的增暖比印度洋西部缓慢, 沿着赤道印度洋出现东风异常, 赤道印度洋东部的温跃层变浅, 有利于苏门答腊沿岸上翻和 SST 冷异常的发展^[36,43,125,126,128–130]。Zheng 等^[125,126]指出赤道印度洋东部温跃层的变浅, 使得 IOD 的偏度减弱, 但由于在全球变暖背景下, 大气反馈过程削弱所导致的效应与温跃层变浅所导致的效应相反, 最终使得 IOD 的方差没有显著的变化。在全球变暖背景下, 印度洋中平均态的改变有利于极端正 IOD 的发生^[129–132]。Cai 等^[133]的研究进一步表明, 在全球变暖背景下强的正 IOD 将增加而中等强度的正 IOD 将减少, 极端正 IOD 所导致的极端气候和天气事件也会增加。因此, 进一步研究全球变暖背景下 IOD 的变化及其影响十分重要。

关于全球变暖背景下 IOD 变化的研究, 大多是基于模式数据进行的。那么, 模式对印度洋平均态模拟的偏差, 则可能会影响对 IOD 未来变化的预估。相关研究表明大部分模式模拟的印度洋气候态 SST, 均在赤道西(东南)印度洋呈现暖(冷)偏

差^[134~136]。模式模拟的秋季赤道东西印度洋偏强的气候态 SST 梯度,伴随着赤道印度洋上强的东风异常,赤道东印度洋偏浅的温跃层及加强的 Bjerknes 反馈,有利于正 IOD 的发生,同时导致模拟的 IOD 相比于观测具有更强的振幅^[134,137]。Wang 等^[135,138]的研究也表明赤道东印度洋温跃层的偏浅会导致对增暖背景下未来 IOD 发生频率增加的低估。此外,IOD 具有强的气候效应,对 IOD 振幅的模拟偏差会影响对全球变暖背景下 IOD 所影响区域降水趋势的预估^[139]。进一步提高模式对印度洋平均态的模拟技巧,以及运用历史海温变化的归因分析结果作为约束条件进行海温未来变化的预估^[140,141],将有助于提高 IOD 的气候预测与预估水平。

7 总结和展望

关于 IOD 的研究被提出至今已有二十多年,对其形成机制和气候效应的研究已相对全面。总的来说,IOD 是热带印度洋中重要的年际变率之一,它既可由热带太平洋中 ENSO 触发也可由印度洋中局地海气相互作用触发。热带印度洋的表面风异常可通过 WES 反馈、Bjerknes 反馈^[1,2]以及海洋波动过程^[44,45,142]等影响 IOD 的发生与发展。

本文主要回顾了 IOD 的相关特征、IOD 与 ENSO 之间的关系、IOD 与亚洲夏季风之间的关系、IOD 的气候效应以及全球变暖背景下 IOD 的变化。在揭示 IOD 季节锁相以及正偏度特征的基础上,已有研究提出了一些不同于经典 IOD 的其他类别 IOD,比如不合季节的 IOD^[36]、非对称性 IOD^[39]以及 IOD Modoki^[40]等。在 IOD 与 ENSO 之间的关系方面,ENSO 可通过大气桥及海洋路径对 IOD 产生影响^[50],且 ENSO 不同的爆发时间^[10,70~72]以及不同的 SST 异常位置^[8,9,78,79]均会对 IOD 产生不同的影响。IOD 通过海气相互作用^[35,59~61]及印度尼西亚贯穿流^[62~66]对 ENSO 的发生发展产生影响。关于亚洲夏季风与 IOD 之间的关系方面,强西北太平洋夏季风^[80]、强 SCSSM^[55,82]、孟加拉湾夏季风的早爆发^[83]等均有利于正 IOD 的发展。正 IOD 的发展也有利于印度夏季风降水的增加^[21,42,88,89]。关于 IOD 对气候的影响方面,IOD 对海洋过程以及印度洋周边地区甚至全球气候均具有重要影响,尤其对我国降水、气温等的分布具有显著的影响。在全球变暖背景下,极端 IOD 的增多将可能导致极端气候事件频发。综上所述,IOD 对气候预测具有重要意义,进一步加强对 IOD 的研究是极其重要的。

尽管已有丰富的成果,当前 IOD 相关的研究仍存在有待完善的方面。概括起来主要有以下几个方面:

(1) 不同分布型 IOD 的起源和气候影响问题。基于 IOD 东西极 SST 异常强度差异的不同类型的 IOD,比如以西印度洋暖海温异常为主的 IOD,以东南印度洋冷海温异常为主的 IOD 等,其形成的物理过程和对应气候影响的差异尚不清楚。

(2) 与 IOD 相关联的印度洋与太平洋相互作用问题。在 IOD 与太平洋最显著的年际变率 ENSO 的相互影响方面,不同类型的 ENSO 对 IOD 的影响有显著差异。那么,如前所述不同类型的 IOD 对 ENSO 的影响是否存在显著差异,以及在 IOD 与 ENSO 的相互作用过程中海洋桥和大气桥的相对贡献均有待进一步研究。伴随 La Niña 的正 IOD 事件的触发机制也缺乏理解,比如 1967 年的正 IOD 事件,亦须深入研究。

(3) 亚洲季风与 IOD 相互作用问题。印度夏季风对 IOD 发展有怎样的影响,其相互作用的物理过程如何,已有研究结果间存在争议,需进一步展开研究。

(4) IOD 对东亚极端气候事件产生影响的物理过程尚需深入研究。2019 年极端正 IOD 的发生对我国 2019 年夏末初秋长江中下游地区的干旱以及 2020 年初夏长江中下游地区的极端梅雨均有显著的影响,表明 IOD 对我国极端气候事件的产生有着显著影响。但 IOD 与中高纬环流系统或泛热带海洋之间的协同作用对我国极端气候事件的影响,还需开展相关研究。

(5) 热带海气系统的年代际变化对 IOD 的影响问题。热带海气系统的年代际变化对 IOD 年际变化的调制作用,ENSO 与 IOD 关系的年代际变化,以及 IOD 的年代际变化对周边国家气候的影响值得进一步展开研究。

总之,不同类型 IOD 形成物理过程与气候影响的差异,IOD 与季风的相互作用,热带海气系统的年代际变化对 IOD 的影响,以及 IOD 与中高纬环流系统或泛热带海洋之间的协同作用对我国极端气候事件的影响方面还亟需大量工作,以提高亚洲季风的气候预测水平,减少极端天气气候事件所带来的危害。

参考文献(References) :

- [1] SAJI N H, GOSWAMI B N, VINAYACHANDAN P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 1999,

- 401(6 751):360-363.
- [2] 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(6 751): 356-360.
- [3] REVERDIN G, CADE D L, GUTZLER D. Interannual displacements of convection and surface circulation over the equatorial Indian Ocean [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1986, 112(471):43-67.
- [4] NICHOLLS N. Sea surface temperatures and Australian winter rainfall [J]. *Journal of Climate*, 1989, 2(9):965-973.
- [5] TAN Yanke, ZHANG Renhe, HE Jinhai. Features of the interannual variation of Sea Surface Temperature anomalies and the air-sea interaction in Tropical Indian Ocean [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(1): 53-66.[谭言科,张人禾,何金海.热带印度洋海温的年际异常及其海气耦合特征[J].*大气科学*,2003, 27(1): 53-66.]
- [6] BEHERA S K, LUO J J, MASSON S, et al. A CGCM study on the interaction between IOD and ENSO [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(9):1 688-1 705.
- [7] ANNAMALAI H, MURTUGUDDE R, PTEMRA J, et al. Coupled dynamics over the Indian Ocean: spring initiation of the Zonal Mode [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(12/13): 2 305-2 330.
- [8] ZHANG W J, WANG Y L, JIN F F, et al. Impact of different El Niño types on the El Niño/IOD relationship [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 8 570-8 576.
- [9] DONG D, HE J H, LI J P. Linkage between Indian Ocean Dipole and two types of El Niño and its possible mechanisms [J]. *Journal of tropical meteorology*, 2016, 22:172-181.
- [10] FAN L, LIU Q Y, WANG C Z, et al. Indian Ocean Dipole modes associated with different types of ENSO development [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 2 233-2 249.
- [11] STUECKER M F, TIMMERMANN A, JIN F F, et al. Revisiting ENSO/Indian Ocean Dipole phase relationships [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44:2 481-2 492.
- [12] FISCHER A S, TERRAY P, GUILYARDI E, et al. Two independent triggers for the Indian Ocean Dipole/zonal mode in a coupled GCM [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(17): 3 428-3 449.
- [13] DRBOHLAV H K L, GUALDI S, NAVARRA A. A diagnostic study of the Indian Ocean Dipole mode in El Niño and non-El Niño years [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20 (13) : 2 961-2 977.
- [14] TANIZAKI C, TOZUKA T, DOI T, et al. Relative importance of the processes contributing to the development of SST anomalies in the eastern pole of the Indian Ocean Dipole and its implication for predictability [J]. *Climate Dynamics*, 2017, 49: 1 289-1 304.
- [15] YUAN C X, LI W J, GUAN Z Y, et al. Impacts of April snow cover extent over Tibetan Plateau and the central Eurasia on Indian Ocean Dipole [J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39: 1 756-1 767.
- [16] ZHANG L Y, DU Y, CAI W J, et al. Triggering the Indian Ocean Dipole from the southern hemisphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47: 9.
- [17] LU B, REN H L. What caused the extreme Indian Ocean Dipole event in 2019? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47: 8.
- [18] DU Y, ZHANG Y, ZHANG L Y, et al. Thermocline warming induced extreme Indian Ocean Dipole in 2019 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(18). DOI:10.1029/2020GL090079.
- [19] BEHERA S K, KRISHNAN R, YAMAGATA T. Unusual ocean-atmosphere conditions in the tropical Indian Ocean during 1994 [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 3 001-3 004.
- [20] LOSCHNIGG J, MEEHL G A, WEBSTER P J, et al. The Asian monsoon, the tropospheric biennial oscillation, and the Indian Ocean zonal mode in the NCAR CSM [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16: 1 617-1 642.
- [21] KRISHNAN R, SWAPNA P. Significant influence of the boreal summer monsoon flow on the Indian Ocean response during dipole events [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22: 5 611-5 634.
- [22] SAJI N H, YAMAGATA T. Possible impacts of Indian Ocean Dipole mode events on global climate [J]. *Climate Research*, 2003, 25(2): 151-169.
- [23] CHAN S C, BEHERA S K, YAMAGATA T. Indian Ocean Dipole influence on South American rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(14):63-72.
- [24] NUNCIO M, YUAN X. The influence of the Indian Ocean Dipole on Antarctic Sea Ice [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28 (7): 2 682-2 690.
- [25] NUR'UTAMI M N, HIDAYAT R. Influences of IOD and ENSO to Indonesian rainfall variability: role of atmosphere-ocean interaction in the Indo-Pacific sector [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 33:196-203.
- [26] LESTARI D O, SUTRIYONO E, SABARUDDIN, et al. Severe drought event in Indonesia following 2015/16 El Niño/positive Indian Dipole Events [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, 1011. DOI:10.1088/1742-6596/1011/1/012040.
- [27] GUAN Z Y, YAMAGATA T. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(10): 4.
- [28] WENG H Y, WU G X, LIU Y M, et al. Anomalous summer climate in China influenced by the tropical Indo-Pacific Oceans [J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36:769-782.
- [29] XIAO Ying, ZHANG Zuqiang, HE Jinhai. Summary of research progress on Indian Ocean Dipole [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, 25(5):621-627.[肖莺,张祖强,何金海.印度洋偶极子研究进展综述[J].*热带气象学报*,2009, 25 (5):621-627.]
- [30] LIU Huafeng, ZHANG Xiangming, TANG Youmin, et al. Research progress of Indian Ocean Dipole and its predictability [J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(3):405-414.[刘华锋,章向明,唐佑民,等.印度洋偶极子及其可预报性研究进展[J].*海洋科学进展*, 2014, 32(3):405-414.]
- [31] SCHOTT F A, XIE S P, MCCREARY J P. Indian Ocean circu-

- lation and climate variability [J]. *Reviews of Geophysics*, 2009, 47:46.
- [32] XUE P F, RIZZOLI P M, WEI J, et al. Coupled ocean-atmosphere modeling over the maritime continent: a review [J]. *Journal of Geophysical Research—Oceans*, 2020, 125 (6). DOI:10.1029/2019JC014978.
- [33] KUCHARSKI F, BIASTOCHE A, ASHOK K, et al. Chapter5-Indian Ocean variability and interactions [M]// Mechoso C R. Interacting climates of ocean basins: observation, mechanisms, predictability, and impacts. New York: Cambridge University Press, 2020.
- [34] BEHERA S K, DOI T, RATNAM J V. Chapter5-air-sea interactions in tropical Indian Ocean: the Indian Ocean Dipole, editor(s): BEHERA S K, tropical and extratropical air-sea interactions: modes of climate variations [M]. Elsevier, 2021.
- [35] LUO J J, ZHANG R C, BEHERA S K, et al. Interaction between El Niño and extreme Indian Ocean Dipole [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 726-742.
- [36] DU Y, CAI W J, WU Y. A new type of the Indian Ocean Dipole since the mid-1970s [J]. *Journal of Climate*, 2013, 25 (3): 959-972.
- [37] GUI Fayin, TAN Yanke, LI Chongyin, et al. Possible triggering of the Indian Ocean Dipole by early summer rainfall anomalies over the eastern bay of Bengal [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2016, 39(5): 589-599.[桂发银, 谭言科, 李崇银, 等. 初夏孟加拉湾东部降水异常对印度洋海温偶极子的触发作用[J]. 大气科学学报, 2016, 39(5):589-599.]
- [38] WANG Y H, LI J P, ZHANG Y Z, et al. Atmospheric energetics over the tropical Indian Ocean during Indian Ocean Dipole events [J]. *Climate Dynamics*, 2018, 52: 6 243-6 256.
- [39] SUN S W, FANG Y, TANA, et al. Dynamical mechanisms for asymmetric SST patterns associated with some Indian Ocean Dipoles [J]. *Journal of Geophysical Research—Oceans*, 2014, 119: 3 076-3 097.
- [40] ENDO S, TOZUKA T. Two flavors of the Indian Ocean Dipole [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(3) 371-3 385.
- [41] TOZUKA T, ENDO S, YAMAGATA T. Anomalous walker circulations associated with two flavors of the Indian Ocean Dipole [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 5 378-5 384.
- [42] LI T, WANG B, CHANG C P, et al. A theory for the Indian Ocean Dipole-Zonal mode [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(17): 2 119-2 135.
- [43] CAI W J, ZHENG X T, WELLER E, et al. Projected response of the Indian Ocean Dipole to greenhouse warming [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6: 999-1 007.
- [44] YUAN D L, LIU H L. Long-wave dynamics of sea level variations during Indian Ocean Dipole events [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2009, 39(5): 1 115-1 132.
- [45] WANG J, YUAN D L. Roles of western and eastern boundary reflections in the interannual sea level variations during negative Indian Ocean Dipole events [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2015, 45(7): 1 804-1 821.
- [46] HONG C C, LI T, HO L, et al. Asymmetry of the Indian Ocean Dipole. part I: observational analysis [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21: 4 834-4 848.
- [47] HONG C C, LI T, LUO J J. Asymmetry of the Indian Ocean Dipole. part II: model diagnosis [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21: 4 849-4 858.
- [48] OGATA T, XIE S P, LAN J, et al. Importance of Ocean Dynamics for the Skewness of the Indian Ocean Dipole Mode [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26: 2 145-2 159.
- [49] ZHANG L Y, DU Y, CAI W J. Low-frequency variability and the unusual Indian Ocean Dipole events in 2015 and 2016 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45: 1 040-1 048.
- [50] WANG C Z. Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 5 119-5 136.
- [51] CAI W J, WU L X, Lengaigne M, et al. Pantropical climate interactions [J]. *Science*, 2019, 363(6 430): eaav4236.
- [52] HAMEED S N, JIN D, Thilakan V. A model for super El Niños [J]. *Nature communications*, 2018, 9: 2 528.
- [53] RAYNER N A, PARKER D E, HORTON E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2003 108(D14): 37.
- [54] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [55] ZHANG Y Z, LI J P, XUE J Q, et al. The relative roles of the South China Sea summer monsoon and ENSO in the Indian Ocean Dipole development [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 6 665-6 680.
- [56] ABRAM N J, HARGREAVES J A, WRIGHT N M, et al. Palaeoclimate perspectives on the Indian Ocean Dipole [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 237: 20.
- [57] ZHANG R H, TAN Y K. El Niño and interannual variation of the sea surface temperature in the tropical Indian Ocean [C]// Proceedings of the SPIE. 2003. DOI: 10.1117/12.466694.
- [58] TAN Yanke, ZHANG Renhe, HE Jinhai, et al. Relationship of the interannual variations of sea surface temperature in tropical Indian Ocean to ENSO [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(6): 831-840.[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.]
- [59] BEHERA S K, YAMAGATA T. Influence of the Indian Ocean Dipole on the southern oscillation [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2003, 81:169-177.
- [60] ANNAMALAI H, KIDA S, Hafner J. Potential impact of the tropical Indian Ocean-Indonesian Seas on El Niño characteristics [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 3 933-3 952.
- [61] IZUMO T, VIALARD J, LENGAIGNE M, et al. Influence of the state of the Indian Ocean Dipole on the following year's El Niño [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3): 168-172.
- [62] YUAN D L, WANG J, XU T F, et al. Forcing of the Indian Ocean Dipole on the interannual variations of the tropical Pacific-

- ic Ocean: roles of the Indonesian Throughflow [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(14): 3 593-3 608.
- [63] YUAN D L, ZHOU H, ZHAO X. Interannual climate variability over the Tropical Pacific Ocean induced by the Indian Ocean Dipole through the Indonesian Throughflow [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(9): 2 845-2 861.
- [64] YUAN D L, XU P, XU T F. Climate variability and predictability associated with the Indo-Pacific Oceanic Channel Dynamics in the CCSM4 Coupled System Model [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 35(1): 23-38.
- [65] ZHAO X, YUAN D L, YANG G, et al. Role of the oceanic channel in the relationships between the basin/dipole mode of SST anomalies in the tropical Indian Ocean and ENSO transition [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(12): 1 386-1 400.
- [66] YUAN D L, HU X Y, XU P, et al. The IOD-ENSO precursory teleconnection over the tropical Indo-Pacific Ocean: dynamics and long-term trends under global warming [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(1): 4-19.
- [67] ZHANG Y, ZHOU W, LI T. Impact of the Indian Ocean Dipole on evolution of the subsequent ENSO: relative roles of dynamic and thermodynamic processes [J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(9): 1-51.
- [68] XU J J, CHAN J C L. The role of the Asian-Australian monsoon system in the onset time of El Niño events [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14: 418-433.
- [69] HORII T, HANAWA K. A relationship between timing of El Niño onset and subsequent evolution [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(6): L06304.
- [70] ZHONG A H, HENDON H H, ALVES O. Indian Ocean variability and its association with ENSO in a global coupled model [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18: 3 634-3 649.
- [71] SOORAJ K, KUG J S, LI T, et al. Impact of El Niño onset timing on the Indian Ocean: Pacific coupling and subsequent El Niño evolution [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 97: 17-27.
- [72] ROXY M, GUALDI S, DRBOHLAV H K L, et al. Seasonality in the relationship between El Niño and Indian Ocean Dipole [J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37: 221-236.
- [73] ASHOK K, BEHERA S K, RAO S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2007, 112: 27.
- [74] WENG H Y, ASHOK K, BEHERA S K, et al. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer [J]. *Climate Dynamics*, 2007, 29: 113-129.
- [75] YU J Y, KAO H Y. Decadal changes of ENSO persistence barrier in SST and ocean heat content indices: 1958-2001 [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 2007, 112 (D13). DOI: 10.1029/2006JD007654.
- [76] KAO H Y, YU J Y. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22: 615-632.
- [77] WANG C Z, WANG X. Classifying El Niño Modoki I and II by different impacts on rainfall in Southern China and typhoon tracks [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26: 1 322-1 338.
- [78] WANG X, WANG C Z. Different impacts of various El Niño events on the Indian Ocean Dipole [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42: 991-1 005.
- [79] LIU L, YANG G, ZHAO X, et al. Why was the Indian Ocean Dipole Weak in the context of the extreme El Niño in 2015? [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 4 755-4 761.
- [80] HUANG B H, SHUKLA J. Mechanisms for the interannual variability in the tropical Indian Ocean. part II: regional processes [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20: 2 937-2 960.
- [81] KAJIKAWA Y, YASUNARI T, KAWAMURA R. The role of the local hadley circulation over the western Pacific on the zonally asymmetric anomalies over the Indian Ocean [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2003, 81: 259-276.
- [82] ZHANG Y Z, LI J P, XUE J Q, et al. Impact of the South China Sea summer monsoon on the Indian Ocean Dipole [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31: 6 557-6 573.
- [83] SUN S W, LAN J, FANG Y, et al. A Triggering mechanism for the Indian Ocean Dipoles independent of ENSO [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28: 5 063-5 076.
- [84] LI C Y, MU M Q. The influence of the Indian Ocean Dipole on atmospheric circulation and climate [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(5): 831-843.
- [85] LI Chongyin, MU Mingquan. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 48(4): 433-443. [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, 48(4):433-443.]
- [86] LAU N C, NATH M J. Atmosphere-ocean variations in the Indo-Pacific sector during ENSO episodes [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16: 3-20.
- [87] KULKARNI A, SABADE S S, KRIPALANI R H. Association between extreme monsoons and the dipole mode over the Indian subcontinent [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2006, 95: 255-268.
- [88] ASHOK K, GUAN Z Y, YAMAGATA T. Impact of the Indian Ocean Dipole on the relationship between the Indian monsoon rainfall and ENSO [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 4 499-4 502.
- [89] GADGIL S, FRANCIS P A, VINAYACHANDRAN P N. Summer monsoon of 2019: understanding the performance so far and speculating about the rest of the season [J]. *Current Science*, 2019, 117: 783-793.
- [90] ASHOK K, GUAN Z, SAJI N H, et al. Individual and combined influences of ENSO and the Indian Ocean Dipole on the Indian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17 (16): 3 141-3 155.
- [91] ANIL N, KUMAR M R R, SAJEEV R, et al. Role of distinct flavours of IOD events on Indian summer monsoon [J]. *Natural Hazards*, 2016, 82: 1 317-1 326.
- [92] BEHERA S K, RATNAM J V. Quasi-asymmetric response of the Indian summer monsoon rainfall to opposite phases of the

- IOD [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 123.
- [93] HRUDYA P, VARIKODEN H, VISHNU R N. Changes in the relationship between Indian Ocean dipole and Indian summer monsoon rainfall in early and recent multidecadal epochs during different phases of monsoon [J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(suppl.1): E305-E318.
- [94] HRUDYA P, VARIKODEN H, VISHNU R. A review on the Indian summer monsoon rainfall, variability and its association with ENSO and IOD [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2021, 133: 1-14.
- [95] LIU Q Y, FENG M, WANG D X, et al. Interannual variability of the Indonesian Throughflow transport: a revisit based on 30-year expendable bathythermograph data [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(12): 8 270-8 282.
- [96] CHEN G X, HAN W Q, LI Y L, et al. Seasonal-to-interannual time-scale dynamics of the Equatorial Undercurrent in the Indian Ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2015, 45(6): 1 532-1 553.
- [97] CHEN G X, HAN W Q, LI Y L, et al. Interannual variability of Equatorial Eastern Indian Ocean upwelling: local versus remote forcing [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(3): 789-807.
- [98] CHEN G X, HAN W Q, SHU Y Q, et al. The role of equatorial undercurrent in sustaining the Eastern Indian Ocean upwelling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(12): 6 444-6 451.
- [99] DU Yan, ZHANG Lianyi, ZHANG Yuhong. Review of the tropical gyre in the Indian Ocean with its impact on heat and salt transport and regional climate modes [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(3): 243-254. [杜岩, 张连漪, 张玉红. 印度洋热带环流圈热盐输运及其对区域气候模态的影响 [J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 243-254.]
- [100] LATIF M, DOMMENGET D, DIMA M, et al. The role of Indian Ocean sea surface temperature in forcing east African rainfall anomalies during December-January 1997/98 [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12: 3 497-3 504.
- [101] BIRKETT C, MURTUGUDDE R, ALLAN T. Indian Ocean climate event brings floods to East Africa's lakes and the Sudd marsh [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 1 031-1 034.
- [102] YAN Hongming, YANG Hui, LI Chongyin. Numerical simulations on the climate impacts of temperature dipole in the equatorial Indian Ocean [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(5): 31-39. [晏红明, 杨辉, 李崇银. 赤道印度洋海温偶极子的气候影响及数值模拟研究 [J]. 海洋学报, 2007, 29(5): 31-39.]
- [103] CAI W J, RENSCH P V, COWAN T, et al. Teleconnection pathways of ENSO and the IOD and the mechanisms for impacts on Australian rainfall [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(15): 3 910-3 923.
- [104] NG B, CAI W J, COWAN T, et al. Influence of internal climate variability on Indian Ocean Dipole properties [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 13500.
- [105] YUAN Junpeng, CAO Jie. North Indian Ocean tropical cyclone activities influenced by the Indian Ocean Dipole mode [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56: 855-865. [袁俊鹏, 曹杰. 印度洋偶极子对北印度洋热带气旋活动的影响研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 570-581.]
- [106] XIAO F A, WANG D X, LEUNG Y T M. Early and extreme warming in the South China Sea during 2015/16: role of an unusual Indian Ocean Dipole event [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(17). DOI: 10.1029/2020GL089936.
- [107] WANG G J, CAI W J. Two-year consecutive concurrences of positive Indian Ocean Dipole and Central Pacific El Niño preconditioned the 2019/2020 Australian "black summer" bushfires [J]. *Geoscience Letters*, 2020, 7(1). DOI: 10.1186/s40562-020-00168-2.
- [108] ZHANG W J, MAO W, JIANG F, et al. Tropical Indo-Pacific compounding thermal conditions drive the 2019 Australian extreme drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(2). DOI: 10.1029/2020GL090323.
- [109] WOOD K M, KLOTZBACH P J, COLLINS J M, et al. Factors affecting the 2019 Atlantic hurricane season and the role of the Indian Ocean Dipole [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(13). DOI: 10.1029/2020GL087781.
- [110] DOI T, BEHERA S K, YAMAGATA T. Wintertime impacts of the 2019 super IOD on East Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(18). DOI: 10.1029/2020GL089456.
- [111] TAKAYA Y, ISHIKAWA I, KOBAYASHI C, et al. Enhanced Meiyu-Baiu rainfall in early summer 2020: aftermath of the 2019 super IOD event [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(22). DOI: 10.1029/2020GL090671.
- [112] ZHOU Z Q, XIE S P, ZHANG R H. Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(12): e2022255118.
- [113] LI Jianping, WU Guoxiong, HU Dunxin. Ocean-atmosphere interaction over the joining area of Asia and Indian-Pacific ocean and its impact on the short-term climate variation in China (Volume I) [M]. Beijing: China Meteorological, 2011. [李建平, 吴国雄, 胡敦欣. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响(上卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2011.]
- [114] LI Jianping, WU Guoxiong, HU Dunxin. Ocean-atmosphere interaction over the joining area of Asia and Indian-Pacific ocean and its impact on the short-term climate variation in China (Volume II) [M]. Beijing: China Meteorological, 2011. [李建平, 吴国雄, 胡敦欣. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响(下卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2011.]
- [115] LIU Xuanfei, YUAN Huizhen. The relationship between Indian Ocean Dipole and autumn rainfall in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29: 644-649. [刘宣飞, 袁慧珍. 印度洋偶极子与中国秋季降水的关系 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29: 644-649.]
- [116] QIU Y, CAI W J, GUO X G, et al. The asymmetric influence of the positive and negative IOD events on China's rainfall [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6.
- [117] LIU Jia, MA Zhenfeng, YANG Shuqun. The relationship be-

- [117] CAI W J, HUANG Y, ZHOU W X, et al. Relationship between Indian Ocean Dipole and Huaxi Qiuyu [J]. *Plateau Meteorology*, 2015, 34(4): 950-962. [刘佳, 马振峰, 杨淑群. 印度洋偶极子和华西秋雨的关系[J]. 高原气象, 2015, 34(4): 950-962.]
- [118] ZHANG Y, ZHOU W, CHOW E C H, et al. Delayed impacts of the IOD: cross-seasonal relationships between the IOD, Tibetan Plateau snow, and summer precipitation over the Yangtze-Huaihe River region [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 4 077-4 093.
- [119] XU K, ZHU C W, WANG W Q. The cooperative impacts of the El Niño-Southern Oscillation and the Indian Ocean Dipole on the interannual variability of autumn rainfall in China [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36: 1 987-1 999.
- [120] XU K, MIAO H Y, LIU B Q, et al. Aggravation of record-breaking drought over the mid-to-lower reaches of the Yangtze river in the post-monsoon season of 2019 by anomalous Indo-Pacific oceanic conditions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(24). DOI: 10.1029/2020GL090847.
- [121] LI C X, ZHAO T B. Seasonal responses of precipitation in China to El Niño and positive Indian Ocean Dipole Modes [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(7): 372.
- [122] HENG C, YOON S K, KIM J S, et al. Inter-seasonal precipitation variability over Southern China associated with commingling effect of Indian Ocean Dipole and El Niño [J]. *Water*, 2019, 11(10): 2 023.
- [123] XU C X, AN W L, WANG S Y S, et al. Increased drought events in southwest China revealed by tree ring oxygen isotopes and potential role of Indian Ocean Dipole [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 645-653.
- [124] LUO Y, LU J, LIU F, et al. The positive Indian Ocean Dipole-like response in the tropical Indian Ocean to global warming [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33: 476-488.
- [125] ZHENG X T, XIE S P, VECCHI G A, et al. Indian Ocean Dipole response to global warming: analysis of ocean-atmospheric feedbacks in a coupled model [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 1 240-1 253.
- [126] ZHENG X T, XIE S P, DU Y. Indian Ocean Dipole response to global warming in the CMIP5 multimodel ensemble [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26: 6 067-6 080.
- [127] HUI C, ZHENG X T. Uncertainty in Indian Ocean Dipole response to global warming: the role of internal variability [J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51(9/10): 3 597-3 611.
- [128] CAI W, COWAN T, SULLIVAN A. Recent unprecedented skewness towards positive Indian Ocean Dipole occurrences and its impact on Australian rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(11). DOI: 10.1029/2009GL037604.
- [129] CAI W J, SANTOSO A, WANG G J, et al. Increased frequency of extreme Indian Ocean Dipole events due to greenhouse warming [J]. *Nature*, 2014, 510(7 504): 254-258.
- [130] CAI W J, WANG G J, GAN B, et al. Stabilised frequency of extreme positive Indian Ocean Dipole under 1.5 °C warming [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1 419.
- [131] KRISHNAN R, SANJAY J, GNANASEELAN C, et al. Assessment of climate change over the Indian Region: a report of the Ministry of Earth Sciences (MoES) [M]. Springer Nature, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-4327-2.
- [132] WANG G J, CAI W J, YANG K, et al. A unique feature of the 2019 extreme positive Indian Ocean Dipole event [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47 (18). DOI: 10.1029/2020GL08615.
- [133] CAI W J, YANG K, WU L X, et al. Opposite response of strong and moderate positive Indian Ocean Dipole to global warming [J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 27-32.
- [134] CAI W J, COWAN T. Why is the amplitude of the Indian Ocean Dipole overly large in CMIP3 and CMIP5 climate models? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1 200-1 205.
- [135] WANG G J, CAI W J, SANTOSO A. Assessing the impact of Model Biases on the projected increase in frequency of extreme positive Indian Ocean Dipole events [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(8): 2 757-2 767.
- [136] MCKENNA S, SANTOSO A, GUPTA A S, et al. Indian Ocean Dipole in CMIP5 and CMIP6: characteristics, biases, and links to ENSO [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13.
- [137] LI G, XIE S P, DU Y. Monsoon-induced biases of climate models over the Tropical Indian Ocean [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(8): 3 058-3 072.
- [138] WANG G J, CAI W J, SANTOSO A. Simulated thermocline tilt over the tropical Indian Ocean and its influence on future sea surface temperature variability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(6): 9.
- [139] WELLER E, CAI W J. Realism of the Indian Ocean Dipole in CMIP5 Models: the implications for climate projections [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(17): 6 649-6 659.
- [140] SUN Y, ZHANG X B, ZWIERS F W, et al. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(12): 1 082-1 085.
- [141] ZHOU T J, ZHANG W X. Anthropogenic warming of Tibetan Plateau and constrained future projection [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(4): 10.
- [142] EFFY J B, FRANCIS P A, RAMAKRISHNA S V, et al. Anomalous warming of the western equatorial Indian Ocean in 2007: role of ocean dynamics [J]. *Ocean Modelling*, 2020, 147: 101542.

Indian Ocean Dipole: A Review and Perspective^{*}

JIANG Jilan^{1,2}, LIU Yimin^{1,2*}, LI Jianping^{3,4}, ZHANG Renhe⁵

(1. State Key Laboratory of Numerical Modelling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System (FDOMES)/ Key Laboratory of Physical Oceanography/ Institute for Advanced Ocean Studies, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Pilot Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 5. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: The Indian Ocean Dipole (IOD) is one of the dominant interannual variabilities in the tropical Indian Ocean, which has important impacts on countries around the Indian Ocean and even the global climate. The research on the formation mechanism of IOD and its climatic effects is of great significance for climate prediction. This study mainly reviews the related research progress of IOD during the past 10 years, such as its basic characteristics, its relationship with El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Asian summer monsoon, its climate effect, and its variation under the global warming. The relationship between IOD and ENSO is reflected in their mutual influence. The influence mechanism of different types of IOD on the development of ENSO is not clear and needs further investigation. A strong interaction between IOD and the Asian summer monsoon is found. The positive IOD and the summer monsoon circulation in the eastern Indian Ocean mutually promote, while the interaction between the IOD and the Indian summer monsoon needs further study. Furthermore, the extreme positive IOD will increase under the global warming, which has an important influence on extreme climatic events in China. Researches primarily focus on the effect of IOD alone or the combination effect of IOD and ENSO on extreme climatic events in China, but the synergistic effect between IOD and the mid-high latitude circulation system or the pan-tropical ocean on extreme climatic events in China needs further studies. A systematic review of IOD research progress during the past 10 years can provide a scientific basis for the future research of IOD.

Key words: Indian Ocean Dipole; ENSO; Asian summer monsoon; Interaction; Global warming.

* **Foundation item:** Project supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences "Climatic and environment impacts of sea-land-air interaction since the industrial revolution" (Grant No. XDB40030204); The National Natural Science Foundation of China "The synergistic influence of coupling process of land-atmosphere of the Tibet Plateau and the ocean on regional energy and water cycles and global climate" (Grant No. 91637312).

First author: JIANG Jilan (1994-), female, Yibin City, Sichuan Province, Ph. D student. Research areas include sea-air interaction.

E-mail: jiangjilan@lasg.iap.ac.cn

* **Corresponding author:** LIU Yimin (1965-), female, Xinyang City, Henan Province, Professor. Research areas include climate dynamics and numerical modeling. **E-mail:** lym@lasg.iap.ac.cn