

董岳, 滕辉, 邱云, 等. 南印度洋海表温度距平冬季重现特征与机制的初步分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(6): 37–47, doi:10.12284/hyxb2022043

Dong Yue, Teng Hui, Qiu Yun, et al. A preliminary analysis of the characteristics and mechanisms for the recurrence of wintertime SST anomalies in the southern Indian Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(6): 37–47, doi:10.12284/hyxb2022043

南印度洋海表温度距平冬季重现特征 与机制的初步分析

董岳¹, 滕辉¹, 邱云^{1*}, 林新宇¹

(1. 自然资源部第三海洋研究所海洋动力学研究室, 福建 厦门 361005)

摘要: 本文主要利用 1958–2016 年 GECCO2 等资料通过超前/滞后相关分析方法, 分析了南印度洋海表温度距平 (SSTA) 冬季–冬季重现的时空特征, 并探讨了海洋和大气强迫对其形成的贡献。结果显示, SSTA 冬季–冬季重现主要发生在南印度洋 15°S 以南海域, 特别是在马达加斯加岛至澳大利亚西南部之间的海域 (15°~45°S, 70°~100°E) 重现信号最为显著。重现信号除了主要发生在次年冬季外, 在部分海域重现信号发生较早, 可在次年秋季发生并持续至随后的冬季。进一步分析表明, 混合层深度冬深夏浅的变化 (即海洋重现机制) 是研究海域 SSTA 冬季重现的主因。另外, 在马达加斯加岛南部海域和澳大利亚西南部海域海面净热通量对 SSTA 的重现也有直接的贡献。

关键词: 南印度洋; 海表温度; 冬季重现; 季节变化

中图分类号: P731.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)06-0037-11

1 引言

相对于大气而言, 由于海洋有较大的热容量, 海洋热力结构的变化具有显著的缓慢性 and 持续性, 从而使海洋具有较强的“记忆”能力, 可以把大气环流的变化信号通过海气相互作用贮存在海洋内部, 再反过来作用于大气环流, 在气候系统变化中承担了重要的调节角色^[1-3]。海洋的这种持续性特征使气候系统的可预报性得以增强^[4-5]。因而, 开展上层海洋温度异常的持续性问题研究对理解海–气相互作用过程、气候系统季节与年际变化及其预测都有重要的科学价值。

海表温度距平 (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) 冬季–冬季重现 (下文简称 SSTA 冬季重现) 是上述提及的海洋“记忆”的一种重要表现形式。它是

指冬季 SSTA 的滞后相关存在显著的季节锁相: 次年夏季较小, 而随后冬季较大, 因此冬季 SSTA 会在次年冬季重现而在其间的夏季不具有持续性。Namias 和 Born^[6-7] 最先在北太平洋中纬度海域发现这一现象, 并认为 SSTA 冬季重现的现象与混合层深度的季节变化密切相关。具体而言, 冬季大气强迫异常会在同期较深的季节性混合层内形成海温异常, 随后春、夏季混合层变浅, 该海温异常就保存在了混合层之下, 当混合层在次年冬季再次加深时, 温度异常就会重新回到混合层内并出现在海表, 从而影响了海表温度的变化。Alexander 和 Deser^[8] 使用上层海洋观测资料很好地证实了 Namias-Born 提出的假设, 这就是所谓的混合层重现机制^[9]。

之后的大量研究表明, SSTA 冬季重现多在中纬度海洋^[10] 出现, 包括北太平洋^[1, 9, 11-14]、南太平洋^[15] 和

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2021-11-04。

基金项目: 国家自然科学基金 (42130406, 41906013); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项 (海三科 2022027, 海三科 2018001, 海三科 2018030); 全球变化与海气相互作用 (二期) 专项 (GASI-04-WLHY-01)。

作者简介: 董岳 (1997—), 女, 湖南省岳阳市人, 主要从事印度洋海洋环流动力学研究。E-mail: dongyue@tio.org.cn

* 通信作者: 邱云 (1979—), 男, 福建省平潭县人, 博士, 研究员, 主要从事热带海洋环流动力学与海气相互作用研究。E-mail: qiuyun@tio.org.cn

北大西洋^[16-18],且均认为混合层深度的季节变化是其成因。Hanawa 和 Sugimoto^[10]首次系统研究了全球海洋的 SSTA 冬季重现,所识别出的 7 个重现区均位于中纬度海区,且与模态水形成区域有很好的对应,其中 4 个位于北半球,余下 3 个位于南半球。Zhao 和 Li^[14]的分析发现,北太平洋和北大西洋大气环流异常也表现出类似于海表温度的冬季重现现象,并且对这两个海区 SSTA 的冬季重现有重要的贡献。这意味着海洋混合层的季节变化并不是影响 SSTA 重现的唯一过程,大气环流异常也可能是一个重要的因素。

Byju 等^[19]近期的研究发现,SSTA 冬季重现不仅出现在已为人们熟知的中纬度海区,而且也会发生在热带海域。由于热带海域混合层深度季节变化不大,因此,他们认为热带海域 SSTA 的重现机制势必与中纬度海域的形成机制不同,并认为大气强迫可能主导了热带海域 SSTA 的重现。

综上,已有的大多数研究集中于北半球海域,虽然南印度洋中纬度海域也是主要的重现区之一,但相关的深入研究并不多见^[10,19]。上述提及的 Hanawa 和 Sugimoto^[10]的工作首次发现了西南印度洋存在较为显著的 SSTA 冬季重现,但由于他们的工作侧重于揭示 SSTA 冬季重现在全球海洋的分布特征,故并未针对性地分析西南印度洋的重现机制。Byju 等^[19]的研究也注意到类似的重现信号,不过因其主要关注的是热带海域,因而也未深入研究西南印度洋海温重现的成因。因此,本文将利用滞后相关分析研究南印度洋 SSTA 冬季重现的时空分布特征,并从海洋和大气的角度探讨其可能的成因。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用的逐月海温来自德国汉堡大学发布的 GECCO2(German contribution to Estimating the Circulation and Climate of the Ocean System version 2)模式输出数据,水平网格分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间跨度为 1958–2016 年。GECCO2 海温资料垂向上共有 20 层,其中 100 m 以浅垂直分辨率约为 10 m,100 ~ 300 m 之间的分辨率介于 10~40 m。

此外,本文还使用了其他 3 套逐月海温数据集,包括 ECMWF ORAS4 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Ocean Reanalysis System 4)^[20]、HadiSST (The Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature)^[21] 以及美国伍兹霍尔海洋研究所发布的 OAFflux (Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes)^[22]

海气热通量数据。这 3 套数据的时间跨度与 GECCO2 一样,均为 1958–2016 年,分辨率均为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。研究海域气候态月平均混合层深度由 GECCO2 和 ORAS4 的温盐数据计算得到,定义为温度比 10 m 处温度低 0.2°C 的深度^[23]。大气数据来自美国环境预报中心和美国国家大气研究中心(National Center for Environmental Prediction–National Centers for Atmospheric Research, NNCEP-NCAR)逐月的再分析数据^[24],包括海面热通量和风速数据,所用的时段也为 1958–2016 年,水平分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 。

2.2 方法

本文采用滞后相关分析方法定义 SSTA 冬季重现^[14]。滞后相关的做法为计算由各年份起始月 m 构成的时间序列与滞后其 k 个月所对应月份的时间序列之间的相关系数。考虑到研究区域位于南半球,8 月份是冬季盛期,因此以 8 月作为参考月。那么,起始月 $m=8$ 和滞后时间 $k=1$,具体代表的是本研究时段内 8 月时间序列和 9 月时间序列之间的相关,以此类推。

类似 Zhao 和 Li^[14]的做法,本文 SSTA 冬季重现的判别标准是:8 月份 SSTA 与次年冬季($k=10\sim 12$,即次年 6–8 月) SSTA 之间的相关系数高于其与次年夏季($k=4\sim 6$,即 12 月至次年 2 月) SSTA 的相关系数,

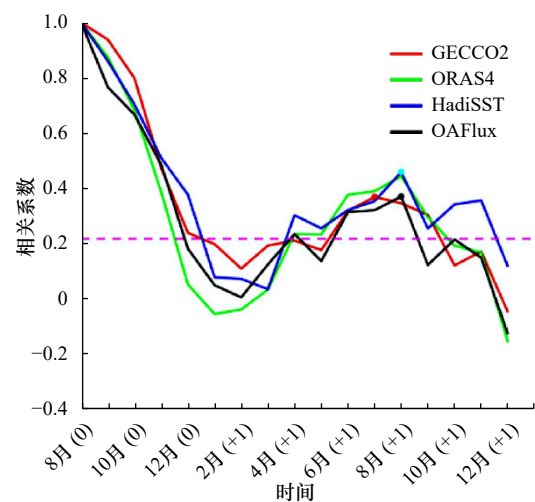


图 1 南印度洋内 A 点 (30.5°S , 100.5°E) 的 8 月 SSTA 与同年 8 月 [8 月 (0)] 至次年 12 月 [12 月 (+1)] SSTA 之间的滞后相关系数曲线

Fig. 1 Lag correlations between the monthly sea surface temperature anomalies (SSTA) in August and the monthly SSTA from August of the current year [August (0)] to December of the following year [December (+1)] at the grid point A (30.5°S , 100.5°E) in the southern Indian Ocean (SIO)

粉色虚线代表 95% 的置信水平

The pink dashed line indicates the 95% confidence level

且前者须超过 95% 置信水平。这里以研究区域 A 点 (30.5°S, 100.5°E) 为例, 图 1 给出了 A 点 8 月 SSTA 与同年 8 月至次年 12 月 SSTA 之间的滞后相关系数曲线。从 GECCO2 的结果可见, 相关系数从起始月 8 月的自相关系数值 1 随滞后月份的增加逐渐减小并在次年夏季盛期(2 月)达到最小值 0.11, 之后随着滞后月份的增加, 相关系数逐渐增大, 在次年冬季(7 月)达到最大值 0.37(超过 95% 的置信水平)。这说明该处 SSTA 在两个相邻的冬季重现, 而在其间的夏季不持续, 为典型的 SSTA 冬季重现。其他 3 套数据集得到的结果与 GECCO2 基本一致, 但也存在一些细微的差别。具体而言, 不同数据集之间最大滞后相关系数所对应的月份略有不同, GECCO2 最大滞后相关系数出现在次年 7 月, 而其他 3 套数据集则出现

在次年 8 月。

3 SSTA 冬季重现的时空分布特征

首先, 本文使用 GECCO2、ORAS4、HadiSST 和 OAFflux 这 4 个数据集得到南印度洋 SSTA 冬季重现的水平分布特征(图 2)。由图可见, 所有数据集得到的 SSTA 12 个月滞后自相关(即冬季滞后相关)的分布形态均较为相似: 显著的正相关主要位于 15°S 以南, 特别是在马达加斯加岛至澳大利亚西南部之间的海域。15°S 以北海域相关系数较小或为负相关(图 2a, 图 2d, 图 2g, 图 2j)。6 个月滞后自相关(夏季滞后相关)的分布形态在各个数据集之间也较为一致: 整个南印度洋大部分海域相关系数都较小或负相关, 仅在马达加斯加岛东部海域及澳大利亚西部海域存在小

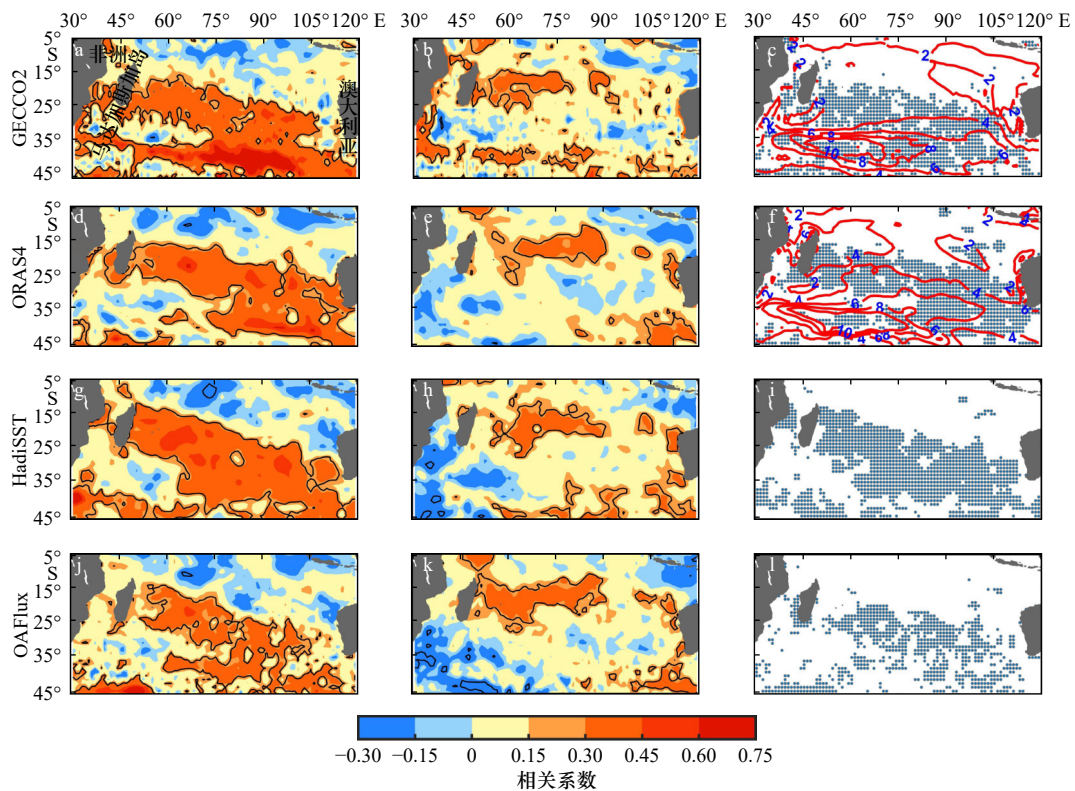


图 2 由 GECCO2 得到的南印度洋 8 月与次年 8 月(即滞后 12 个月)的 SSTA 自相关系数的空间分布 (a), 8 月与次年 2 月(即滞后 6 个月)的 SSTA 自相关系数的空间分布 (b), SSTA 冬季重现的空间分布 (c)。d-f、g-i、j-l 分别同 a-c, 但来自 ORAS4、HadiSST、OAFflux 数据集

Fig. 2 Spatial distribution of SSTA autocorrelation between August and August of the following year (12-month lag autocorrelation) (a), SSTA autocorrelation between August and February of the following year (6-month lag autocorrelation) (b), and SSTA winter-to-winter recurrence in the southern Indian Ocean (c) from GECCO2. d-f, g-i, and j-l are the same as a-c, but come from ORAS4, HadiSST and OAFflux respectively

黑色实线代表 95% 置信水平。c 和 f 中红色等值线分别为由 GECCO2 和 ORAS4 计算得到的 8 月与 2 月气候态月平均混合层深度比值, 数值即为比值的大小, 蓝色实心点代表符合 SSTA 冬季重现标准的网格点

The thin solid black lines indicate the 95% confidence level. The red contours in c and f represent the ratio of climatological mixed layer depth (MLD) in August and MLD in February computed from GECCO2 and ORAS4, respectively, and the number is the magnitude of the ratio. The blue dots represent the grid points that meet the definition of SSTA winter-to-winter recurrence

范围的显著相关(图 2b, 图 2e, 图 2h, 图 2k)。SSTA 滞后自相关分布的这种季节性差异, 说明在南印度洋中纬度海域的 SSTA 冬季重现现象可能较为显著。根据 SSTA 冬季重现的定义, 我们进一步给出其重现的分布范围(图 2c, 图 2f, 图 2i, 图 2l)。由图可见, 上述 4 个数据集所显示的重现区均与冬季滞后相关的显著区大体对应, 主要位于 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{S}$ 之间马达加斯加岛至澳大利亚连线的大片海域。由 8 月与 2 月气候态月平均混合层深度的比值可以发现(图 2c, 图 2f), 在 SSTA 重现区, 混合层深度季节变化也较大。这些重现区比 Hanawa 和 Sugimoto^[10] 的结果大, 他们识别的 SSTA 重现区主要位于东南印度洋海域 ($25^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{S}$, $55^{\circ}\sim 73^{\circ}\text{E}$)。导致这种差异的原因可能是他们所采用的 SSTA 冬季重现标准更为严格。具体而言, Hanawa 和 Sugimoto^[10] 使用了 5 个海温数据集来研究全球海洋的 SSTA 冬季重现区域, 采用的判别标准是: (1) 滞后相关系数在达到最大值之前有一个最小值; (2) 滞后相关系数的最大值超过 99% 的显著性水平; (3) 5 个

海温数据集中至少有 3 个数据集同时满足前述两个条件。因而他们识别的区域也相对较小。另外, 图 2 还显示, 在低纬度海域重现信号较弱, 这一结果与 Byju 等^[19] 的结论是一致的。

图 3 给出的是 SSTA 滞后自相关系数的纬度-时间分布, 用于说明 SSTA 冬季重现的季节演变特征。由于沿着纬度方向 $70^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 之间的重现信号最为显著, 故本文进行平均的经度范围选取为 $70^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 。从该经度范围内的平均结果看, 上述全部 4 个数据集的滞后自相关系数值均呈现较为一致的季节变化。具体而言, 大致以 20°S 为界, 20°S 以北自相关系数随时间增加逐渐减小并在次年冬季甚至变为负值, 意味着在该纬度范围内无 SSTA 重现信号; 20°S 以南, 从起始冬季 8 月逐渐减小, 12 月至次年 3 月之间达到最小值, 随后开始增大, 比较显著的相关主要发生在次年秋、冬季(4-10 月), 说明这种异常海温信号在次年重现滞后可以持续达半年左右。需要指出的是, 不同数据集的结果存在一定的差异。具体而言, OAFlux 虽

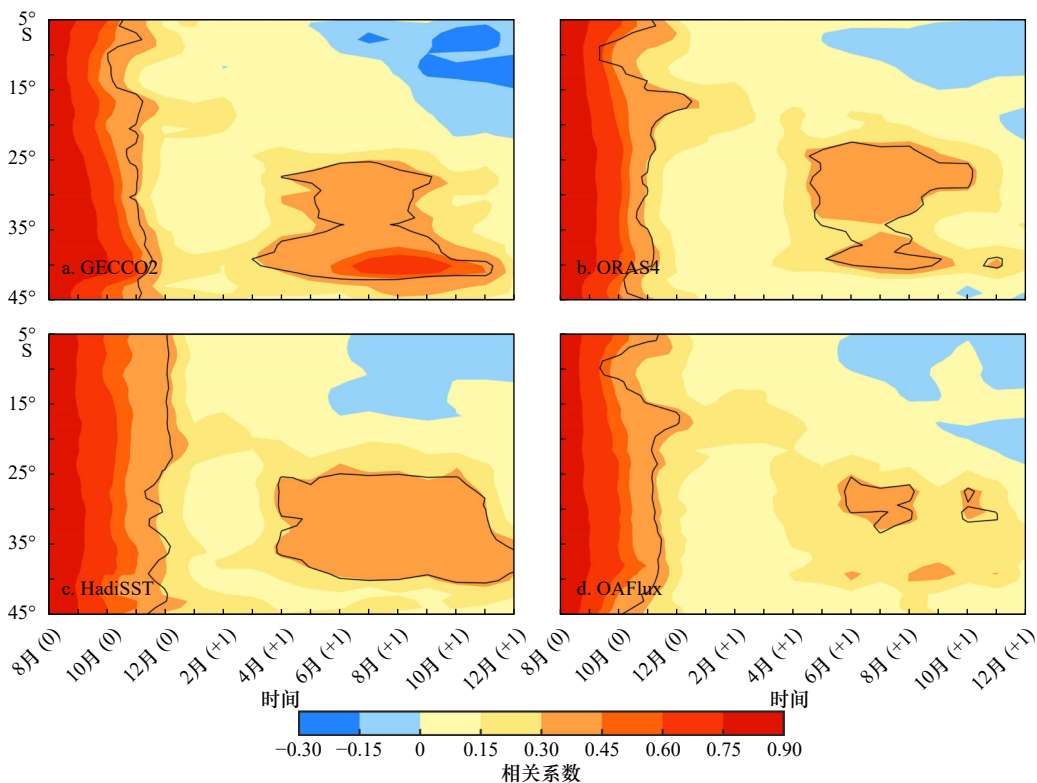


图 3 由 GECCO2 计算得到的 8 月 [8 月 (0)] SSTA 与同年 8 月 [8 月 (0)] 至次年 12 月 [12 月 (+1)] SSTA 之间的滞后相关系数的纬向分布 (a), 经度平均范围为 $70^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 。b、c、d 同 a, 但分别由 ORAS4、HadiSST、OAFlux 计算得到

Fig. 3 Lag correlations between SSTA for August and monthly SSTA from the August of the current year [August (0)] through December of the following year [December (+1)] for the longitudinal average between 70°E and 100°E computed from GECCO2 (a), ORAS4 (b), HadiSST (c), and OAFlux (d)

黑实线代表 95% 的置信水平

The thin solid black line indicates the 95% confidence level

然也能显示出与 GECCO2、ORAS4、HadiSST 相似的 SSTA 重现信号,但在 20°S 以南重现期(次年 4 月至 12 月)相关系数较弱,在大部分时间内均未达到 95% 的置信水平。即便存在这些细小的差别,这 4 套数据集大体一致的结果进一步说明了南印度洋中纬度海域的 SSTA 冬季重现信号及其季节分布特征的可靠性。

4 SSTA 冬季重现的可能成因

从以往的研究^[3, 8-9, 14, 19]看(见前文综述部分),影响 SSTA 冬季重现的因素主要有两个:海洋重现机制(即混合层深度的季节变化)以及大气强迫机制。此外,也有研究^[13]发现在北太平洋海洋平流会导致冬季 SSTA 远地重现的发生,即冬季形成的 SSTA 在海洋平流的输运作用下,次年冬季在其他海域重现,这是一类较为特殊且罕见的 SSTA 重现现象。考虑到本研究主要关注的是 SSTA 的局地重现,因此下文我

们将从混合层深度变化及大气强迫这两个角度探究研究海域 SSTA 冬季重现的可能原因。

4.1 混合层深度季节变化的可能作用

前人的研究结论^[8, 25]表明, SSTA 冬季重现与混合层深度的季节变化密切相关,对应于冬深夏浅为标志的混合层季节结构。因此,我们利用 GECCO2 和 ORAS4 三维海温资料从研究混合层深度的季节变化入手,探讨海洋重现机制的可能作用。

图 4 给出的是冬季(8 月)与夏季(2 月)混合层深度以及二者比值的水平分布。可见, 15°S 以北大部分海域混合层深度冬季小于 50 m, 夏季小于 30 m, 季节变化不大, 冬、夏季混合层深度比值一般小于 2。 15°S 以南混合层冬季较深, 特别是 35°S 以南海域混合层深度可达 200 m 左右, 夏季混合层较浅, 最深不超过 60 m, 因而混合层深度季节变化较大, 在大部分海域冬、夏季深度比值大于 3, 图 4e 的混合层分布与 Byju 等^[19]的结果基本一致。混合层深度这种显著的

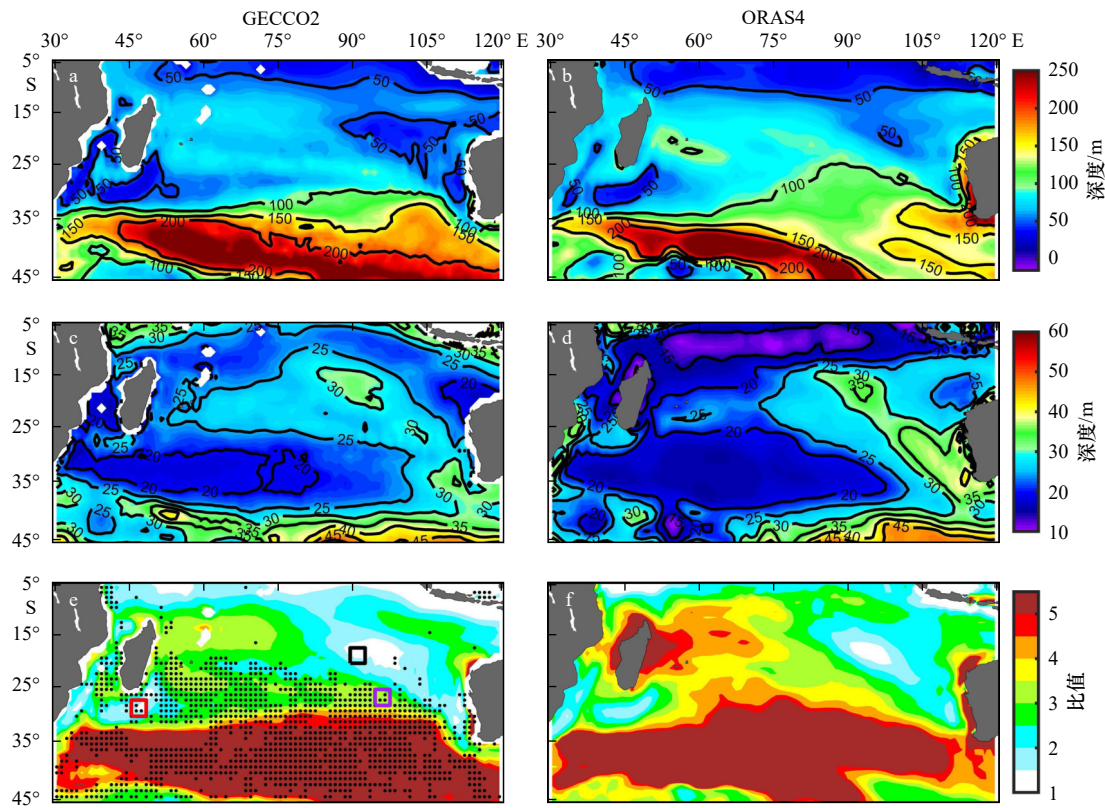


图 4 使用 GECCO2 计算得到的南印度洋 8 月气候态混合层深度(a), 2 月气候态混合层深度(c), 8 月与 2 月气候态月平均混合层深度比值的水平分布(e)。b、d、f 分别同 a、c、e, 但来自 ORAS4

Fig. 4 Climatological mixed layer depth in August(a), climatological mixed layer depth in February (c), the ratio of climatological mixed layer depth in August and mixed layer depth in February (e) computed from GECCO2. b, d, and f are the same as a, c, and e respectively, but come from ORAS4

e 中黑色实心点代表符合 SSTA 冬季重现标准的网格点, 紫色、黑色、红色方框分别为区域 A、B、C

The black dots in e represent the grid points that meet the definition of SSTA winter-to-winter recurrence, and the purple,

black and red box are regions A, B and C respectively

季节变化可能与该海域海表热强迫及风场强迫的季节变化有关^[26-28]。从图 4e 看, SSTA 冬季重现区域与混合层深度季节变化较大的区域基本对应。具体而言, 大部分 SSTA 重现区对应于混合层深度冬夏季比值大于 3 的海域, 说明在这些海域海洋重现机制起重要作用。需要指出的是在马达加斯加岛南部近海, 混合层深度的季节变化并不显著, 这意味着在这些海域的海温重现可能与其他因素有关, 这将在 4.2 节进行讨论。

为了进一步说明混合层季节变化对研究海域 SSTA 冬季重现的作用, 我们在 SSTA 冬季重现发生的主要海域即 15°S 以南选择了 3 个不同类型的区域(图 4e): 混合层深度季节变化较大且 SSTA 重现的区域 A(25.5°~

28.5°S, 94.5°~97.5°E), 混合层深度季节变化较小且 SSTA 不重现的区域 B(17.5°~20.5°S, 89.5°~92.5°E), 以及混合层深度季节变化较小且 SSTA 重现的区域 C(27.5°~30.5°S, 45.5°~48.5°E)进行对比分析(图 5)。虽同为重现区, 但区域 A 和区域 C 的重现过程具有一定的差异。区域 A 的混合层深度冬季较深(可达 80 m 左右), 夏季较浅(仅为 20 m 左右), 具备中纬度海域典型的混合层季节变化特征, 从滞后自相关系数的垂直结构看(图 5b), 可见 SSTA 信号通过海洋次表层通道的持续传递在次年冬季再次出现在海表, 其最强的重现信号与混合层最深的月份(次年 8 月)对应, 这种良好的一致性说明了混合层冬深夏浅的季节变化

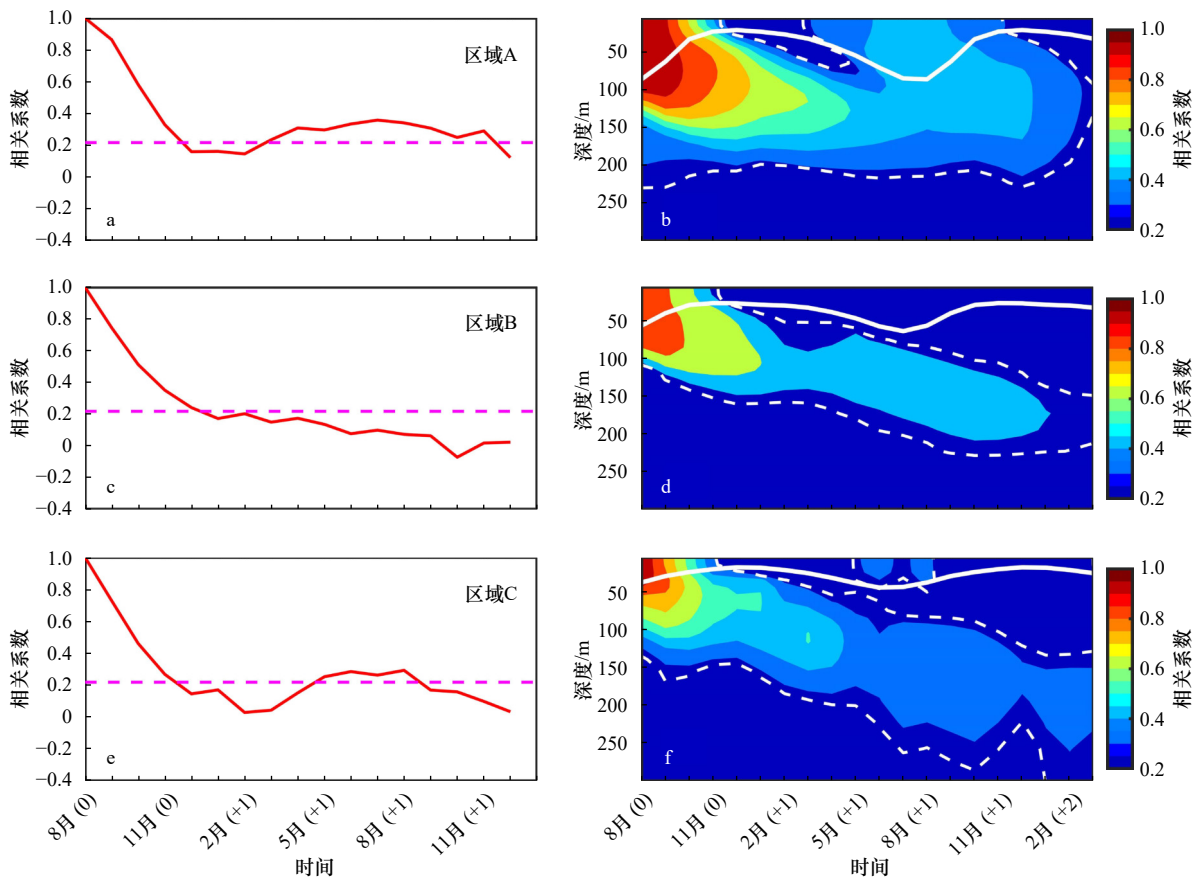


图 5 南印度洋 SSTA 冬季重现与混合层季节变化的关系

Fig. 5 The relationship between SSTA winter-to-winter recurrence and seasonal variability of mixed layer depth in the southern Indian Ocean

a. 区域 A 的 8 月 SSTA 与同年 8 月 [8 月 (0)] 至次年 12 月 [12 月 (+1)] SSTA 之间的滞后相关系数曲线, 粉色虚线表示 95% 的置信水平; c、e 与 a 相同, 但分别为区域 B、C。b. 区域 A 的 8 月 SSTA 与同年 8 月 [8 月 (0)] 至次年 12 月 [12 月 (+1)] 的海表至 300 m 深度的温度异常的滞后相关系数的垂向分布。

白色虚线表示 95% 的置信水平, 白色实线代表气候态月平均混合层深度; d、f 同 b, 但分别为区域 B、C。区域 A 至区域 C 的地理位置见图 4e

a. Lag correlation coefficients between SSTA in August and SSTA from August of the current year [August (0)] to November of the following year [November (+1)] in the Region A, and the pink dashed line indicates the 95% confidence level; c and e are the same as a, but for the regions B and C respectively. b. Vertical distribution of lag correlation coefficients for SSTA in August of the current year [August (0)] to the temperature anomalies from the surface to 300 m from the current year August to December of the following year [December (+1)] in the Region A. Solid white line represents the climatological mixed layer depth, significant value at the 95% confidence level is shown by the white dashed line; d and f are the same as b, but for the regions B and C respectively.

Regions A, B and C are shown in fig. 4e

主导了区域 A 冬季海温的重现。相比而言,在区域 C 由于混合层季节变化较弱(冬季和夏季分别为 45 m 和 18 m 左右),较高的自相关系数值并不能在次表层得到维持(图 5e, 图 5f),导致次年冬季的重现信号更主要的似乎是来自海表。这意味着在区域 C 海表热强迫可能起更为重要的作用,而较弱的混合层季节变化在很大程度上限制了海洋重现机制的贡献。区域 B 的 SSTA 演变过程再次说明了弱的混合层季节变化导致冬季 SSTA 信号无法通过海洋内部通道的方式得以重现(图 5c, 图 5d)。

4.2 大气强迫的可能影响

4.1 节的分析表明在南印度洋的马达加斯加岛南部近海,大气强迫可能对 SSTA 冬季海温重现起重要影响。因此,我们接下来用 NCEP 和 GECCO2 大气数据包括海面净热通量和风速,以及潜热通量、感热通量和短波辐射数据来分析大气强迫机制的可能作用。

以 8 月为起始月份的海面净热通量异常自相关系数的空间分布(图 6a, 图 6b)表明,海面净热通量异

常滞后 12 个月自相关系数及其与滞后 6 个月自相关系数的差值在非洲东部近海、马达加斯加岛南部海域以及澳大利亚西部和西北部海域均为正值且值较大,并达到 95% 的置信水平,说明海面净热通量在这些海域均表现出冬季重现。从图 6c 看,在 SSTA 冬季重现区(图 2c, 图 6c)的大部分海域海面净热通量异常与同期 SSTA 呈正相关,意味着海面净热通量对重现区第一年冬季 SSTA 的形成有贡献,特别是在马达加斯加岛东部大体呈东西走向的带状海域以及澳大利亚西南部海域二者呈显著正相关,说明在这两个海域海面净热通量对第一年冬季 SSTA 的形成起重要贡献。图 6d 给出冬季海面净热通量异常与次年冬季 SSTA 滞后相关系数的分布,用于进一步说明海面净热通量异常重现对次年冬季 SSTA 形成的直接作用。可见,海面净热通量异常与次年 SSTA 显著正相关的区域出现在马达加斯加岛南部及澳大利亚西南部海域(图 6d)。这说明,在上述这两个海域(图 6b, 图 6d),海面净热通量冬季重现对 SSTA 冬季重现有直接的

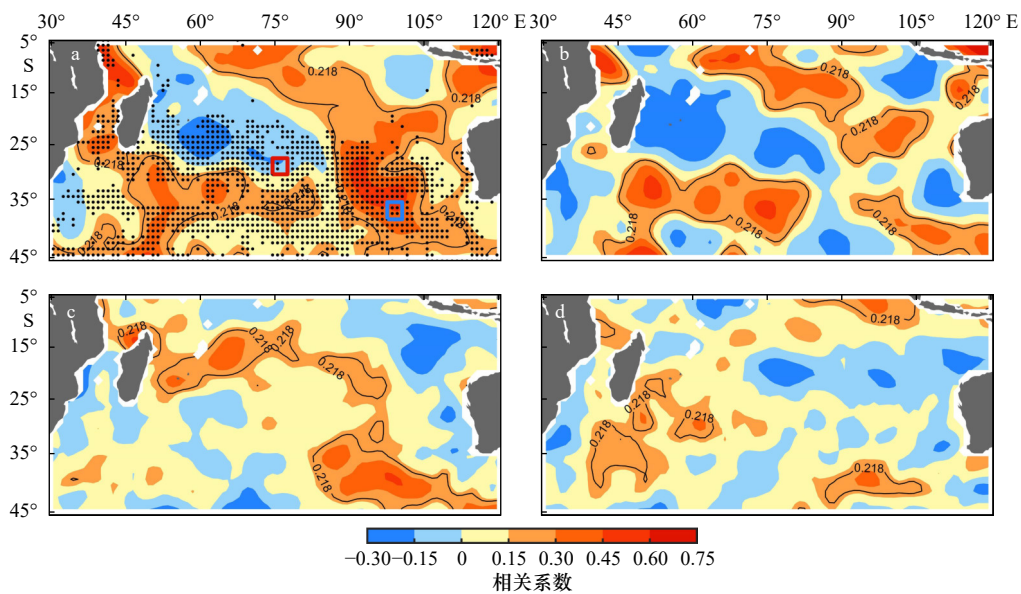


图 6 根据 NCEP 资料计算的 8 月与次年 8 月(即滞后 12 个月)的海面净热通量异常自相关系数的空间分布(a), 8 月与次年 8 月(即滞后 12 个月)的海面净热通量异常自相关系数和 8 月与次年 2 月(即滞后 6 个月)的净热通量异常自相关系数的差值的空间分布(b), 8 月海面净热通量异常与同年 8 月 SSTA 的相关系数的空间分布(c)和 8 月海面净热通量异常与次年 8 月 SSTA 的滞后相关系数的空间分布(d)

Fig. 6 Spatial distribution of net heat flux anomalies (NHFA) autocorrelation between August and August of the following year (12-month lag autocorrelation) (a), the difference between NHFA autocorrelation between August and August of the following year (12-month lag autocorrelation) and NHFA autocorrelation between August and February of the following year (6-month lag autocorrelation) (b), correlation coefficients between NHFA in August and GECCO2 SSTA in August of the current year (c), and lag correlation coefficients between NHFA in August and GECCO2 SSTA in August of the following year (d) derived from NCEP data

a 中黑色实心点代表符合 SSTA 冬季重现标准的网格点,红色和蓝色方框分别为区域 D 和 E,黑色实线代表 95% 的置信水平
The black dots in a represent the grid points that meet the definition of SSTA winter-to-winter recurrence, and the red and blue box are regions D and E respectively. The thin solid black lines indicate the 95% confidence level

贡献。

为了更好地理解大气强迫在南印度洋局部海域 SSTA 重现中的作用,类似上文的做法,我们选取了两个代表性的重现区比较各强迫因子作用的差异(图 6a): D(27.5°~30.5°S, 74.5°~77.5°E), 代表混合层季节变化强且海面净热通量无重现; E(35.5°~38.5°S, 97.5°~100.5°E), 代表混合层季节变化及海面净热通量重现均较强。由图 7 可见,这两个区域的 SSTA 都表现出明显的冬季重现,次表层温度异常的滞后相关均表现出很强的持续性且始终大于 SSTA 自相关,这说明在这两个区域,混合层深度的季节变化都是

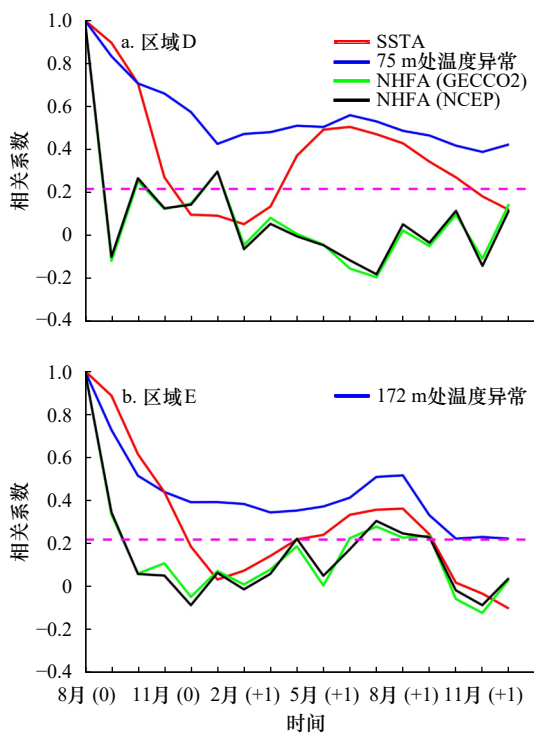


图 7 使用 GECCO2 海温与大气数据以及 NCEP 大气数据计算得到的区域 D(a)和区域 E(b)的 8 月 SSTA 与同年 8 月 [8 月(0)] 至次年 12 月 [12 月(+1)] 的 SSTA 滞后相关系数(红色实线),冬季混合层底部深度处温度异常滞后相关系数(蓝色实线, a 中为 75 m, b 中为 172 m),以及海面净热通量异常(NHFA)滞后相关系数(GECCO2 为绿色实线, NCEP 为黑色实线)

Fig. 7 Lag correlation of August anomalies of temperature at surface (red solid line) and at depth corresponding to the bottom of the climatological winter mixed layer depth (blue solid line, 75 m in a and 172 m in b) from GECCO2, net het flux anomalies from GECCO2 (green solid line) and NCEP (black solid line) in the Region D (a) and Region E (b)

粉色虚线代表 95% 的置信水平,区域 D 和 E 的位置见图 6a
The pink dashed line indicates the 95% confidence level. Regions D and

E are shown in Fig. 6a

SSTA 重现的主导机制。另外,不同于区域 D,区域 E 的海面净热通量异常也表现出冬季重现的特征,说明冬季海面净热通量异常的重现对该区域海温冬季重现也有重要贡献。需要指出的是,区域 E 的 SSTA 重现时间(4-5 月)早于海面净热通量重现时间(7-8 月),这是因为区域 E 是混合层深度季节变化较大的区域,混合层机制对此区域的 SSTA 重现也有贡献,区域 E 的混合层深度在 4-5 月开始加深,温度异常信号通过混合重新回到混合层内并出现在海表,从而影响海表温度的变化。我们对海面热通量各主要分量的分析结果(图 8)显示,区域 E 海面净热通量的重现主要来自短波辐射和感热通量的贡献。

热通量各主要项的 12 个月滞后自相关的空间分布(图 9a, 图 9b, 图 9c)表明,海面净热通量的重现主要来自短波辐射和感热通量的贡献这一结论不仅仅适用于区域 E,在海面净热通量重现的其他一些海域也是如此。具体而言,在澳大利亚西南部海域、非洲东部近海和热带局部海域,感热通量的滞后 12 个月自相关系数较大且达到 95% 的置信水平(图 9b),意味着在这些海域感热通量对海面净热通量重现有贡献;在马达加斯加岛南部以及澳大利亚西部和西北部大片海域,短波辐射的滞后 12 个月自相关较为显著

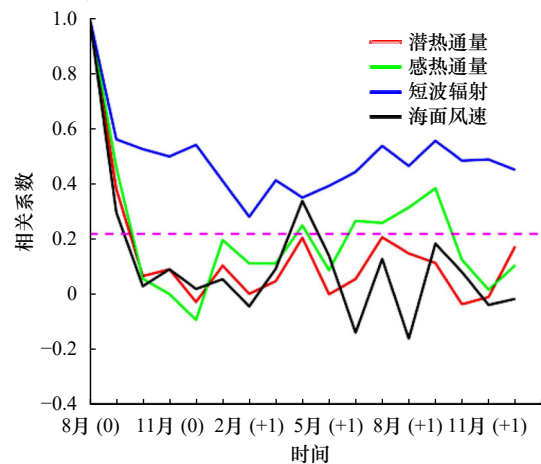


图 8 使用 NCEP 大气数据计算得到的区域 E 的 8 月与同年 8 月 [8 月(0)] 至次年 12 月 [12 月(+1)] 的潜热通量滞后相关系数(红色实线),感热通量滞后相关系数(绿色实线),短波辐射滞后相关系数(蓝色实线),以及海表风速滞后相关系数(黑色实线)

Fig. 8 Lag correlation of August latent heat flux (red solid line), sensible heat flux (green solid line), short wave radiation (blue solid line), and surface wind speed (black solid line) in the Region E computed from NCEP

粉色虚线代表 95% 的置信水平,区域 E 的位置见图 6a
The pink dashed line indicates the 95% confidence level. Regions D and

E are shown in Fig. 6a

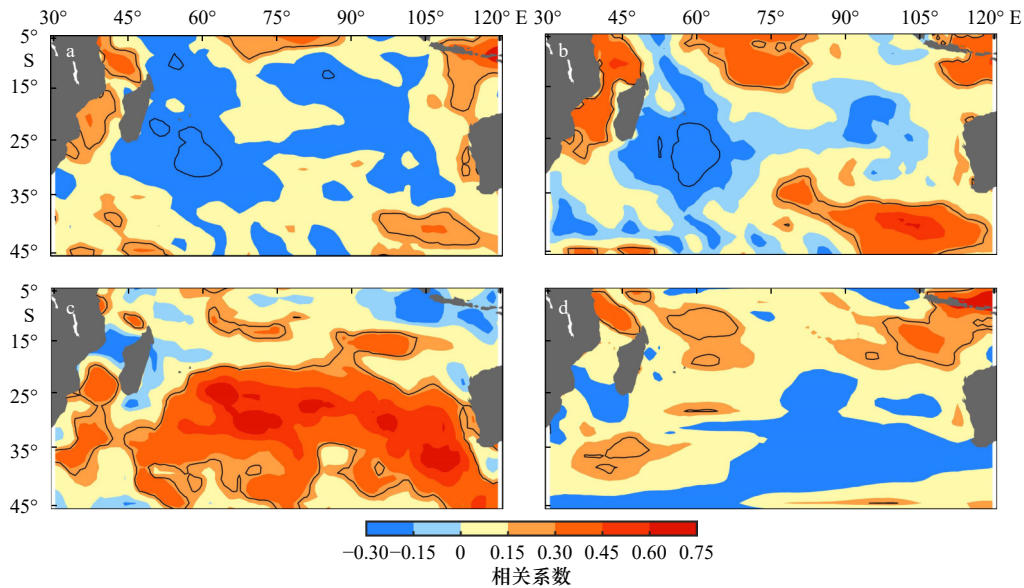


图9 根据NCEP资料计算的8月与次年8月(即滞后12个月)的潜热通量自相关系数的空间分布(a),感热通量自相关系数的空间分布(b),短波辐射自相关系数的空间分布(c),以及海表风速自相关系数的空间分布(d)

Fig. 9 Spatial distribution of latent heat flux autocorrelation between August and August of the following year (12-month lag autocorrelation) (a), sensible heat flux autocorrelation between August and August of the following year (b), short wave radiation autocorrelation between August and August of the following year (c), and surface wind speed autocorrelation between August and August of the following year (d) derived from NCEP data

图中黑色实线代表95%的置信水平

The thin solid black lines indicate the 95% confidence level

(图9c),其分布范围与海面净热通量滞后自相关的显著区域大体一致(图6a),说明了短波辐射对海面净热通量异常重现的主导作用。

5 结论

本文利用GECCO2、ORAS4、HadiSST和OAFflux海温数据分析了南印度洋海表温度冬季-冬季重现的分布特征及可能的形成机制。这4套数据集得到的结果较为一致,其结果均显示,在研究海域,SSTA冬季重现主要发生在南印度洋15°S以南海域,尤其是马达加斯加岛至澳大利亚西南部之间的海域重现信号最为显著。重现信号发生的时间也略有差异,大部分海域发生在次年冬季,也有局部海域重现信号发

生较早,出现在次年秋季并持续至随后的冬季。

进一步分析表明,在南印度洋,SSTA冬季重现的发生与混合层深度的季节变化是密切联系的。在15°S以南海域,混合层冬季较深夏季较浅,尤其是35°S以南海域,冬季混合层深度是夏季的5倍以上,SSTA冬季重现区基本与混合层深度季节变化显著的区域相对应,这意味着混合层(即海洋重现机制)对SSTA冬季重现有主导作用。除了混合层深度季节变化的影响外,在马达加斯加岛南部海域和澳大利亚西南部海域,海面净热通量也有类似SSTA的冬季重现现象,对SSTA的重现也有贡献。初步分析显示,海面净热通量的重现主要来自短波辐射和感热通量的贡献,其可能成因有待下一步工作深入研究。

参考文献:

- [1] Liu Zhengyu, Liu Yun, Wu Lixin, et al. Seasonal and long-term atmospheric responses to reemerging north Pacific Ocean variability: a combined dynamical and statistical assessment[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(6): 955-980.
- [2] Gastineau G, Frankignoul C. Influence of the North Atlantic SST variability on the atmospheric circulation during the twentieth century[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(4): 1396-1416.
- [3] 赵霞, 杨光. IPCC耦合模式对北太平洋海-气系统冬季重现的模拟[J]. *海洋学报*, 2019, 41(9): 114-125.
Zhao Xia, Yang Guang. The winter-to-winter recurrence in the North Pacific air-sea system: IPCC-AR4 model evaluation[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(9): 114-125.
- [4] Rodwell M J, Folland C K. Atlantic air-sea interaction and seasonal predictability[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, 128(583): 1413-1443.

- [5] Folland C K, Scaife A A, Lindsay J, et al. How potentially predictable is northern European winter climate a season ahead?[J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(6): 801–818.
- [6] Namias J, Born R M. Temporal coherence in North Pacific sea-surface temperature patterns[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(30): 5952–5955.
- [7] Namias J, Born R M. Further studies of temporal coherence in North Pacific sea surface temperatures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(6): 797–798.
- [8] Alexander M A, Deser C. A mechanism for the recurrence of wintertime midlatitude SST anomalies[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1995, 25(1): 122–137.
- [9] Zhao Xia, Li Jianping. Winter-to-winter recurrence and non-winter-to-winter recurrence of SST anomalies in the central North Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C5): C05027.
- [10] Hanawa K, Sugimoto S. ‘Reemergence’ areas of winter sea surface temperature anomalies in the world’s oceans[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(10): L10303.
- [11] Alexander M A, Deser C, Timlin M S. The reemergence of SST anomalies in the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(8): 2419–2433.
- [12] Alexander M A, Timlin M S, Scott J D. Winter-to-winter recurrence of sea surface temperature, salinity and mixed layer depth anomalies[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 49(1/4): 41–61.
- [13] Sugimoto S, Hanawa K. Remote reemergence areas of winter sea surface temperature anomalies in the North Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(1): L01606.
- [14] Zhao Xia, Li Jianping. Winter-to-winter recurrence of sea surface temperature anomalies in the Northern Hemisphere[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(14): 3835–3854.
- [15] Ciasto L M, Thompson D W J. Observational evidence of reemergence in the extratropical Southern Hemisphere[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(6): 1446–1453.
- [16] Taws S L, Marsh R, Wells N C, et al. Re-emerging ocean temperature anomalies in late-2010 associated with a repeat negative NAO[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(20): L20601.
- [17] Timlin M S, Alexander M A, Deser C. On the reemergence of North Atlantic SST anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(18): 2707–2712.
- [18] de Coëtlogon G, Frankignoul C. The persistence of winter sea surface temperature in the North Atlantic[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(9): 1364–1377.
- [19] Byju P, Dommengot D, Alexander M A. Widespread reemergence of sea surface temperature anomalies in the global oceans, including tropical regions forced by reemerging winds[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(15): 7683–7691.
- [20] Balmaseda M A, Mogensen K, Weaver A T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139(674): 1132–1161.
- [21] 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*, 2003, 108(D14): 4407.
- [22] Yu Lisan, Weller R A. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(4): 527–540.
- [23] de Boyer Montégut C, Madec G, Fischer A S, et al. Mixed layer depth over the global ocean: an examination of profile data and a profile-based climatology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C12): C12003.
- [24] 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): 437–472.
- [25] Namias J, Yuan Xiaojun, Cayan D R. Persistence of North Pacific sea surface temperature and atmospheric flow patterns[J]. *Journal of Climate*, 1988, 1(7): 682–703.
- [26] Nardelli B B, Guinehut S, Verbrugge N, et al. Southern Ocean mixed-layer seasonal and interannual variations from combined satellite and in situ data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(12): 10042–10060.
- [27] Rao R R, Molinari R L, Festa J F. Evolution of the climatological near-surface thermal structure of the tropical Indian Ocean: 1. Description of mean monthly mixed layer depth, and sea surface temperature, surface current, and surface meteorological fields[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(C8): 10801–10815.
- [28] Schiller A, Oke P R. Dynamics of ocean surface mixed layer variability in the Indian Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(6): 4162–4186.

A preliminary analysis of the characteristics and mechanisms for the recurrence of wintertime SST anomalies in the southern Indian Ocean

Dong Yue¹, Teng Hui¹, Qiu Yun¹, Lin Xinyu¹

(1. *Ocean Dynamic Laboratory, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China*)

Abstract: This study mainly uses the GECCO2 reanalysis data from 1958 to 2016 to analyze the spatiotemporal characteristics of the southern Indian Ocean sea surface temperature anomalies (SSTA) winter-to-winter recurrence through lag correlation analysis, and investigate the roles of oceanic reemergence mechanism and atmospheric forcing. The results show that the winter-to-winter recurrence of SSTA occurs south of 15°S in the southern Indian Ocean, especially between Madagascar and southwestern Australia (15°–45°S, 70°–100°E). The recurrence mainly occurs in the winter of the following year, but there are also some areas where the recurrence occurs in the following fall and continue to the subsequent winter. Further analysis shows that the difference between the deep winter mixed layer and shallow summer mixed layer, known as the oceanic reemergence mechanism, is the main cause of the recurrence of SSTA in the southern Indian Ocean. In addition, the net heat flux also directly contributes to the recurrence of SSTA in southern Madagascar and southwestern Australia.

Key words: southern Indian Ocean; sea surface temperature; winter-to-winter recurrence; seasonal variability