

南印度洋表层副热带环流的漂流示踪

张连漪^{①②}, 杜岩^{①*}, 郑少军^①, 贺志刚^③, 彭世球^①

① 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301;

② 中国科学院大学, 北京 100049;

③ 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005

* 联系人, E-mail: duyan@scsio.ac.cn

2016-06-02 收稿, 2016-07-30 修回, 2016-08-01 接受, 2016-11-07 网络版发表

国家自然科学基金(41525019, 41306018, 41521005)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA11010103)、国家海洋局“全球变化与海气相互作用”专项(GASI-IPOVAI-02)、热带海洋环境国家重点实验室(LTO)自主项目(LTOZZ1501)和国际合作创新研究项目(CAS/SAFEA)资助

摘要 基于历史表层漂流浮标数据, 利用轨迹跟踪方法分析了南印度洋表层副热带环流的平均态特性. 浮标路径反映出南印度洋海水由高纬向低纬输运的过程大体可分为2种: 海水沿南印度洋东边界北上, 汇入南赤道流后绕过马达加斯加岛北侧, 沿非洲东岸跨越赤道进入北半球; 或者由南印度洋中部北上, 受南赤道流影响转向, 到达马达加斯加岛东部后返回南印度洋构成副热带环流. 漂流浮标获得的流速和能量结果表明, 部分海区流的空间变率十分显著, 如阿古拉斯回流区、马达加斯加北部、南印度洋西部海盆和澳大利亚西侧海区等. 特别地, 虽然可能受到如季节变化和涡旋扰动等因素的干扰, 在漂流浮标拉格朗日式的观测下没有发现显著的副热带逆流, 但是可以通过平均动能和涡动能分布观察到逆流的微弱特征. 此外, 基于浮标示踪, 还反推留尼汪岛附近漂流浮标的可能来源, 得到其沿南副热带环流的3种移动路径, 这对海上搜索具有现实指示意义.

关键词 漂流浮标, 南印度洋, 副热带环流, 海上搜索, MH370

漂流浮标(surface drifters)是在20世纪后期发展起来的观测海洋的有效手段之一. 它通过卫星传回定位数据, 实现对水体的实时追踪. 在全球浮标项目(Global Drifter Program)的支持下, 浮标观测已基本覆盖了全球海洋^[1~7]. 近年来很多研究表明印度洋对气候变化造成的影响比以往估计的要强^[8~12]. 基于漂流浮标前人已有研究分析印度洋流场的时空分布和变率^[13~19]. 相比北印度洋而言, 南印度洋环流受到陆地影响和季风控制较少, 流动相对稳定^[11,12]; 但是由于远离陆地, 南印度洋副热带环流的研究并不充分, 基本结构尚有待进一步探讨.

前人曾指出西南印度洋的副热带环流流动相对太平洋和大西洋更强^[20]. 在低纬度海区, 西澳大利

亚流与印度尼西亚贯穿流(Indonesian Throughflow, ITF)合并汇入南赤道流(South Equatorial Current, SEC)^[12,18]. SEC遇到马达加斯加岛分为2支: 东南马达加斯加流和东北马达加斯加流^[18,21]. 东南马达加斯加流向西南汇入阿古拉斯流(Agulhas Current, AC)形成副热带环流圈, 东北马达加斯加流流至东非沿岸再次分离, 一支流向赤道成为东非沿岸流, 另一支进入莫桑比克海峡^[22,23]. 在南非东南端, 阿古拉斯流在惯性、风应力、海底地形等因素作用下, 一方面形成阿古拉斯回流(Agulhas Return Current, ARC), 回到印度洋; 另一方面形成阿古拉斯环(Agulhas Ring)向西逸入大西洋^[24~27]. 但是西南印度洋流动能量的分布较为复杂, 仍需要进一步探讨. 阿古拉斯回流呈

引用格式: 张连漪, 杜岩, 郑少军, 等. 南印度洋表层副热带环流的漂流示踪. 科学通报, 2016, 61: 3596–3605

Zhang L Y, Du Y, Zheng S J, et al. Subtropical surface circulation in the southern Indian Ocean derived from surface drifters (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3596–3605, doi: 10.1360/N972016-00338

现为向东的蛇形弯曲^[26,28],部分并入南印度洋副热带环流的再环流(re-circulation),部分在澳大利亚西部转向北形成西澳大利亚流或者并入南极绕极流进入太平洋^[29]。但是海水从南印度洋高纬度进入低纬度的路径与方式尚未明晰,多尺度扰动对环流的影响尚需进一步研究,尤其在澳大利亚西部沿岸,向极的利文流(Leeuwin Current)与西侧向赤道的流动形成剪切,涡旋扰动过程明显。

利用漂流浮标对全球海洋以及印度洋环流系统已有不少工作,学者们利用欧拉或拉格朗日观点得出海流的速度分布和扩散率等特征^[1,3~5,15,16,18,19],而本文主要采取浮标轨迹分类追踪的方式观察海水的运动轨迹,这与前人的工作略有不同,浮标轨迹再现了南印度洋副热带环流的基本结构。此外基于副热带环流结构,寻找留尼汪岛附近浮标的来源,追溯海水的流动轨迹,发现在中纬度东南印度洋海水可以通过3条路径回到热带海区,这一结果可在一定程度为海上搜救工作(如MH370)提供参考。

1 数据与方法

本文采用的浮标数据来自大西洋海洋与气象实验室(Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, AOML)。AOML基于多普勒频移的方法,通过美国-法国卫星系统(American-French satellite-based system)接收浮标发射的信号,得到漂流浮标的位置,浮标被标定于15 m深度,用以观测表层海水的流动情况,浮标数据汇编中心(The Drifter Data Assembly Center)对数据进行质量控制,并通过克里金(Kriging)方法将其插值为6 h间隔的数据矩阵,记录的参数包括浮标编号、逐点时间及位置、当地的经纬向流速和温度、以及速度和温度的误差^[2~4]。本文选取主体轨迹在南印度洋副热带(50°S~0°, 20°~130°E)的308个长时间序列浮标(数据序列大于500),以反映环流和涡旋的信息。浮标数据以网格化方式处理,网格区域为20°~130°E, 50°S~30°N,空间分辨率为0.5°×0.5°,浮标轨迹上各点的速度计算采用中心差分方法,再按照搜索范围(±0.25°)将逐点速度赋予网格点速度并取平均,公式为

$$X_{i,j} = \frac{1}{n} \sum X_k, \quad (1)$$

式中, X 表示物理量,如速度 u, v ; n 表示同一网格点内数据点总数, k 表示浮标序号, i 和 j 表示网格点序号;

少于3个浮标的网格点不计入考虑范围。本文借鉴Poulain的方法^[1]检验能量分布情况,计算平均动能(mean kinetic energy, MKE)和涡动能(eddy kinetic energy, EKE),公式分别为

$$MKE = \frac{1}{2} \times (u_g^2 + v_g^2), \quad (2)$$

$$EKE = \frac{1}{2} \times [(u')^2 + (v')^2], \quad (3)$$

式中,下标 g 表示网格点数据,其中, $u' = u_k - u_g$, $v' = v_k - v_g$ 表示逐点速度与所属网格平均速度的差值,称为余流速度(residual velocity)。

2 结果与讨论

2.1 基本流动与涡旋

南印度洋已有浮标轨迹如图1所示。图1(a)中浮标轨迹历时1051 d,该浮标2005年12月16日在南印度洋中部释放向西移动,约210 d后进入东南马达加斯加流,在涡旋系统影响下经过约250 d并入阿古拉斯回流、南印度洋流向东移动,历经220 d左右到达澳大利亚西南部并北上进入西澳大利亚流,120 d后到达低纬度转向西汇入SEC,最终于2008年11月1日到达东非沿岸。图1(b)为选取的308个浮标的全部轨迹图,其中包含了60个从马达加斯加岛向南运动回到副热带环流圈(图1(c))的浮标和81个绕过马达加斯加岛北部进入热带(图1(d))的浮标。

各个水层上的地转流动可以通过动力高度计算获得,其空间尺度和时间尺度更大,浮标流场会反映出海洋表层更多小空间尺度和短时间尺度的流动信息,但是浮标运动也是受到地转流控制的,因此在某种程度上可以将浮标的速度看作是地转流及Ekman流作为背景流场上叠加的扰动。在表层流场上,浮标结果展示出了更多关于流动细节上的信息(图2(a)和(b)),例如阿古拉斯回流的摆动和马达加斯加岛附近流动的分叉,但是表层地转流并没有显示出副热带逆流和东南印度洋的气旋式环流结构^[20,30]。利用高度计卫星资料也可以计算获得表层地转流场分布^[31],相比卫星的欧拉式观测,浮标属于拉格朗日式的观测,包含了卫星资料所不能得到的小尺度情况,能连续追踪同一水体的连续移动或者变化情况,故对于海上漂流示踪来说,拉格朗日方法更为有效。

能够进入热带的浮标更多(约占全部的1/3)经过

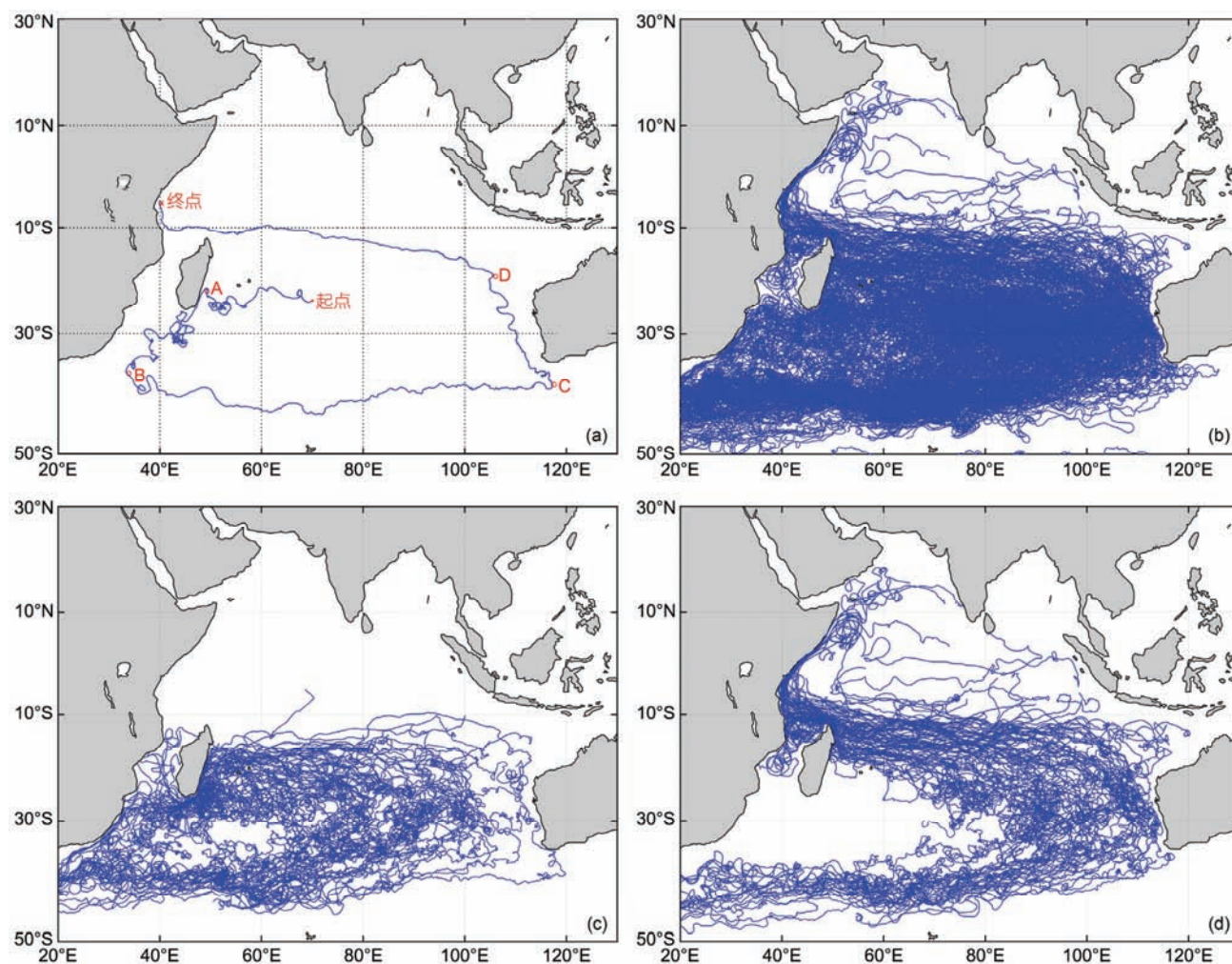


图1 (网络版彩色)漂流浮标实际轨迹图. (a) 代表性浮标轨迹(ID: 53417), 自释放 210 d后到达A点, 460 d左右到达B点, 680 d到达C点, 800 d到达D点; (b) 全部浮标轨迹合成; (c) 构成闭合环流圈的浮标轨迹; (d) 向北进入热带的浮标轨迹

Figure 1 (Color online) Trajectories of surface drifters. (a) Typical trajectory (ID: 53417), 210 days later reach A, 460 days later reach B, 680 days reach C, and 800 days later reach D since it released; (b) trajectories of all surface drifters available in the SIO; (c) trajectories returning to the subtropical gyre; (d) trajectories flowing northward

南印度洋东侧(最远经度大于 100°E), 随着西澳大利亚流到低纬度, 在SEC作用下向西, 绕过马达加斯加岛北部在东非沿岸分离, 一部分继续北上并入东非沿岸流, 另一部分进入莫桑比克海峡(图1(d)). 在东南印度洋, 澳大利亚沿岸出现了向极的利文流(图2(b)和(d))^[32-34], 此区域MKE和EKE形成了鲜明对比, 平均流较弱, 但扰动很强, 为涡旋多发带. Feng等人^[35]的研究表明, 在澳大利亚西岸, 中尺度涡旋通过正压和斜压不稳定从平均流汲取能量, 沿岸的大尺度压强梯度力克服了风的作用使得中纬度东边界流的扰动能量大幅度增长.

在低纬西印度洋, 马达加斯加岛附近存在3个分

叉点, 分别位于马达加斯加北部东非沿岸、马达加斯加东岸和马达加斯加西南端. 前人的研究表明东非沿岸和马达加斯加岛西南端的分叉点会受到涡旋扰动的影响, 因为莫桑比克海峡内常年存在直径大于300 km并向南传播的反气旋涡, 这些反气旋涡将浮标带入海峡引发流动分叉^[22]. 在马达加斯加岛东岸, SEC遇到马达加斯加岛后海流分向南北, 可以发现图1(c)中向南海流的最北端和图1(d)中向北海流的最南端存在重合, 由于浮标轨迹并未进行时间分类(仅是方向分类), 向南和向北流动的重合纬度跨度约有 4° , 说明SEC分叉点会出现摆动. 前人亦曾指出此处分叉点存在显著的季节变动, 在6和7月最靠南, 11

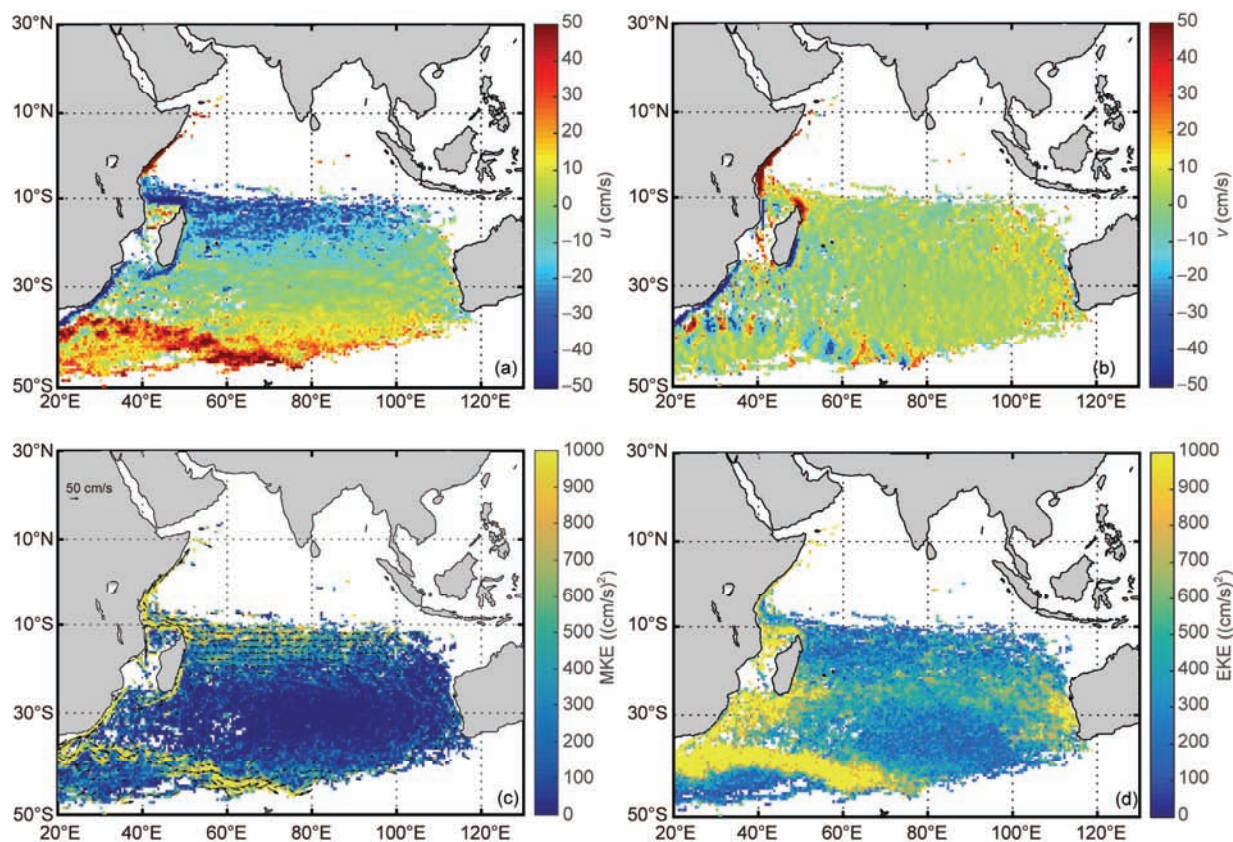


图2 网格化浮标数据(浮标数量少于3个的网格未采用)。 (a) 纬向速度 u , 向东为正; (b) 经向速度 v , 向北为正; (c) 平均动能MKE, 箭头表示强海流方向和相对大小(流速大于 20 cm/s); (d) 平均涡动能EKE

Figure 2 Gridding drifters' data (more than 3 drifter records in each bin). (a) Zonal velocity u ; (b) meridional velocity; (c) MKE, arrows mean direction and strength of stronger current (weaker than 20 cm/s are omitted); (d) EKE

和12月最靠北, 这与西向传播的罗斯贝波有关^[21,36]。

能够回到副热带的浮标自南印度洋流北上的流幅很宽, 但相对集中在 10°S 以南, $70^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 的范围内(图1(c))(约占1/4), 进入东南马达加斯加流后, 少数浮标(8个)绕过马达加斯加岛南端进入莫桑比克海峡, 更多(约15个)则进入AC后汇入ARC构成副热带环流^[24]。在研究过程中发现部分浮标在AC会在阿古拉斯环的作用下进入大西洋, 针对印度洋和大西洋的水交换问题值得进一步讨论。在西向强化的影响下, 西南印度洋的流动能量分布更为强劲, 其MKE和EKE均为高值(图2(c)和(d))。莫桑比克海峡内东、西侧的流动反向, 剪切导致涡旋不断南移^[23], 进入AC上游, 并在更南端影响进入南大西洋的阿古拉斯环的脱落时间和频率^[22]。ARC的流轴存在明显向南的水平倾斜且伴随强烈的南北摆动, 甚至可以延伸到 70°E ^[24-26], 因为ARC受到多重因素的影响, 除去阿古拉斯环的脱落, 风应力和海底地形也会引起流动的强烈扰动, 引发不稳

定^[24,27,28,30]; 此外东南马达加斯加流的能量扰动会并入其中(可参见浮标在该区域运动轨迹, 图1(a)), 导致西南印度洋能量分布出现极大值^[21,37]。

若以 50°E 断面为起止位置, 在高低纬度观察图1(c)和(d)中浮标的跨越时间, 则发现2次经过断面的浮标所需平均时长为 29 ± 14 个月, 而漂流浮标从 50°E 北到南所需时长为 14 ± 6 个月, 据此估算浮标绕南印度洋副热带环流的所需时长为 43 ± 20 个月。根据目前的研究进展, 漂流浮标所需时长的差异主要来源于3种因素: 季节的差异、年际的差异、以及行进过程中涡旋影响所导致的差异。前人的研究结果表明南印度洋副热带环流虽然相对稳定, 但是海盆中部的流动仍存在时间变率、流动的大小和方向均会随时间发生改变^[13,15,18]; 同时印度洋固有的海盆模态、偶极子模态和副热带偶极子模态也会影响南印度洋环流的情况^[11,12,38]; 若浮标被卷入涡旋中, 造成在局地海域的滞留, 也会对其路径和行进时间产生较大影响^[19]。

前人指出25°S附近存在微弱的东向副热带逆流(South Indian Ocean Countercurrent, SICC)^[12,39,40],但是据目前的漂流浮标观测,无法清楚显示该流动路径.已有研究表明在多年平均的情况下可以观察到SICC流动,但是短时间内该区域更多反映出涡旋和波动特征^[40],EKE分布(图2(d))可以观察到海盆中部出现高值,这与前人研究相符.SICC流域的扰动能量较周边海域更高,Quartly等人^[37]通过时空过滤法去除海表面高度资料的大尺度的变率后,证实25°S纬带EKE的高值分布,并指出这更有可能是涡旋和Rossby波共同作用的结果;模式数据也显示SEC和SICC会产生垂向剪切,导致斜压不稳定,诱导局地Rossby波变异从而生成涡旋^[39].此外,Zheng等人^[19]曾指出在印度洋中部——SICC流域为涡旋多发区,平均流动较弱,涡旋过程决定了海水的流动过程和交换过程,鉴于涡旋对海气相互作用的影响,该区域对气候变化的响应同样值得重视^[41].南印度洋副热带环流系统较为复杂,高低纬度的水交换和热量交换仍是将来值得重点研究的方向之一.

2.2 浮标轨迹与示踪

漂流浮标可以应用在多方面,例如Rypina等人^[42]曾利用数十年的北太平洋的漂流浮标资料模拟2011年福岛核电站放射性物质泄露在近表层海洋的扩散情况,浮标和观测得到的结果基本相符,证明漂流浮标对追踪海洋表层漂浮物具有可行性.目前尚未有工作利用海上实测数据对马来西亚航空公司(马航)失联客机事件进行追踪,本文基于浮标示踪原理,结合南印度洋副热带环流结构,模拟海上漂流物的移动轨迹,反推其在不同时间时所在位置,为海上搜索位置提供参考.

马航MH370航班在2014年3月8日失踪,并于2015年7月29日法属留尼汪岛发现其残骸,期间共500余天,2016年3月疑似残骸出现在莫桑比克海峡,相关研究推测其终结地点位于东南印度洋^[43,44].本文选取印度洋中所有大于550 d生命期(长于2200个数据点)且会经过以留尼汪岛为中心6°×6°网格点的浮标,并将浮标轨迹网格化.为保证质量,每一网格点至少包含有2个以上的浮标信息(图3(a)).图3中颜色由浅及深表示浮标距离目标网格由远及近的时间,其中需要重点关注的为橙色网格点,即表示距离到达目标地点500~550 d时浮标所处位置.来自赤道印

度洋以北的浮标也会到达留尼汪岛附近海域,但大多数浮标在400 d以内便会到达目标区域,到达前500~550 d的浮标由于数量不足(同一个网格点中未包含2个及以上有效浮标数),被认为不具有代表性被忽略,这表明搜寻地点应以南印度洋为主.

图3(a)表明,漂流浮标自南印度洋高纬度进入低纬度主要有3条路径:内部(80°±5°E)、中部(90°±5°E)和外部路径(100°±5°E).典型路径如图3(b)所示:轨迹从印度洋中高纬度起始北上,在海盆中部受涡旋影响移动路径不确定性较大,进入低纬度后在纬向流的作用下迅速向西,抵达留尼汪岛附近.北上过程中,漂流浮标会进入尺度不等的涡旋系统,漂流浮标移动路径会发生偏移.Zheng等人^[19]曾指出南印度洋涡旋在9~11月发生数量上升,之后减少,涡旋的季节变化同样会影响漂流浮标的运动过程.部分浮标会在流经目标区域后25 d左右绕过马达加斯加岛南北两端,其中进入莫桑比克海峡的浮标会在流出后100~200 d穿越至海峡中部(图3(c)),由于海峡内长年存在反气旋涡^[22],浮标易滞留于海峡中部.

目前,航班失联地点大体可以由卫星推算而知,即位于东南印度洋^[43,44],在相应时间内,确实有浮标可以从东南印度洋移动至残骸发现地点附近,这也为本文的轨迹推演提供了一定的支持.结合浮标轨迹与卫星研究工作可以确定两处可能性较大地点(图3(a)黑色方框),分别是(35°S, 95°E)和(38°S, 92°E)附近.

对于海洋中的漂流物(如飞机残骸),它与浮标形状显著不同,在海水中受力也有所差异;在漂流物随时间、比重发生变化的情况下,则较易被涡旋卷入深水中,则很可能在海洋中长时间滞留,无法到达大陆沿岸或者岛屿,或者不易被发现.虽然浮标受力与海上漂浮物不同,但是可以说浮标流动更偏向于理想情况,因为浮标主体标定于水下15 m,更不易受到表层海浪和风的影响,由此也说明浮标轨迹是真实的海流运动轨迹,其总体归纳出的海水流动可以作为背景流场,这对于任何海上运动的物体均可以作为参考.对于海上漂流残骸,其最大特征是空间尺度较小且形状不规则,不易被当下的观测手段察觉,分辨率最高的卫星也难以识别尺度为米量级的海面漂浮物体;而且相关模式计算并不能给予观测上的支持,而本方法最重要的意义就是遵照海水的实际流动.前人的工作也支持这一观点^[42],漂流浮标对于海上漂流物的参考意义仍是有价值的.

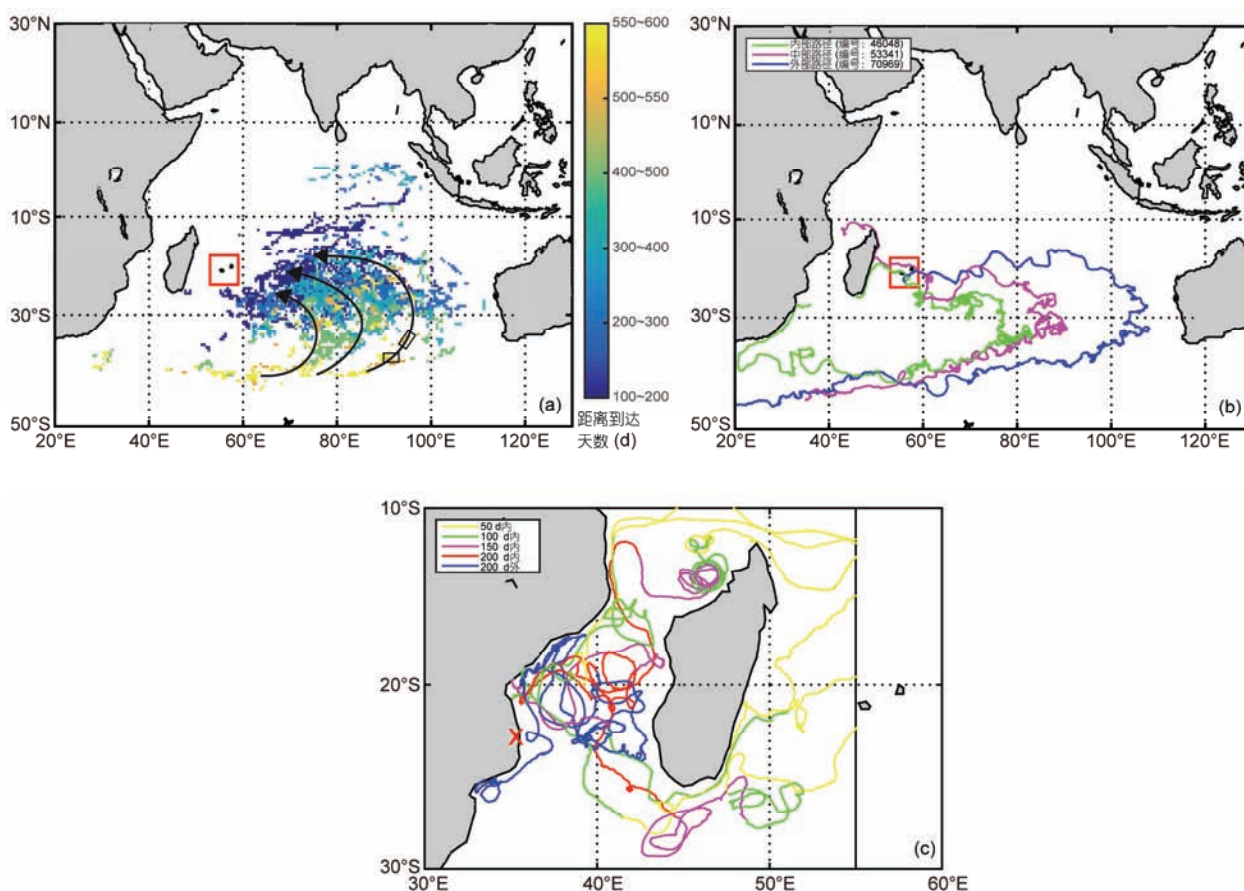


图3 浮标反推马航MH370 残骸移动轨迹. (a) 网格化浮标轨迹前推时间(最少包括 2 个浮标), 其中红色区域为以法属留尼汪岛为中心的 $6^\circ \times 6^\circ$ 区域, 黑色箭头表示浮标的移动路径, 黑色方框表示浮标与卫星推测终结地点结合的区域(35°S , 95°E)和(38°S , 92°E); (b) 与(a)中箭头对应的 3 条典型浮标移动路径, 绿色、粉色和蓝色分别表示内部、中部和外部路径; (c) 经 55°E 断面(黑线标注)进入莫桑比克海峡的典型浮标路径, 红色x表示残骸发现位置之一

Figure 3 Track of lost MH370 flight derived by drifters. (a) Gridding result of long drifters (data more than 2200) in the south Indian Ocean with more than 2 drifters in each bin. The red square is a $6^\circ \times 6^\circ$ bin with the center of Reunion Island. Black arrows mean three different pathways of drifter movement. The black squares (35°S , 95°E), (38°S , 92°E) show the object regions which are deduced by drifters and satellites. (b) Typical trajectories correspond to the arrows in (a). The green, pink, and blue trajectories indicate internal, middle, and external pathways respectively. (c) Typical trajectories that enter into the Mozambique Channel via 55°E meridional section and the red cross means the spot where suspected wreckage was found

3 结论

本文通过对漂流浮标的处理和分析, 得到南印度洋表层副热带环流结构(图4). 南印度洋副热带环流的过程可概述为(以SEC为开端): SEC到达西边界分为2支, 一支沿马达加斯加岛北上成为东北马达加斯加流, 另一支南下成为东南马达加斯加流. 东北马达加斯加流绕过马达加斯加北部, 在东非沿岸再次分流, 一支为东非沿岸流流向赤道, 另一支进入莫桑比克海峡; 东南马达加斯加流经过马达加斯加岛南端后大部分进入AC, 少部分受到莫桑比克涡旋系统的影响会进入海峡. AC少部分进入南大西洋, 大部分会在变成ARC回到印度洋变成南印度洋流. 南印

度洋流部分从海盆中部直接北上形成环流系统, 另一部分会在澳大利亚西部北上形成西澳大利亚流, 与向极的LC形成流动剪切引发流动不稳定. 西澳大利亚流最终与印度尼西亚贯穿流会合并入SEC形成副热带环流圈.

漂流浮标揭示的南印度洋副热带环流存在几处结构值得进一步关注. 在 25°S 附近浮标轨迹并未显示明显的副热带逆流; 在澳大利亚以西海域, 向赤道的西澳大利亚流和向极的利文流产生强烈的剪切, 致使此处的副热带环流结构不明显, 中尺度涡旋主导了基本的流动形式, 这也使得南印度洋副热带环流显著不同于其他的副热带海区; 阿古拉斯回流的

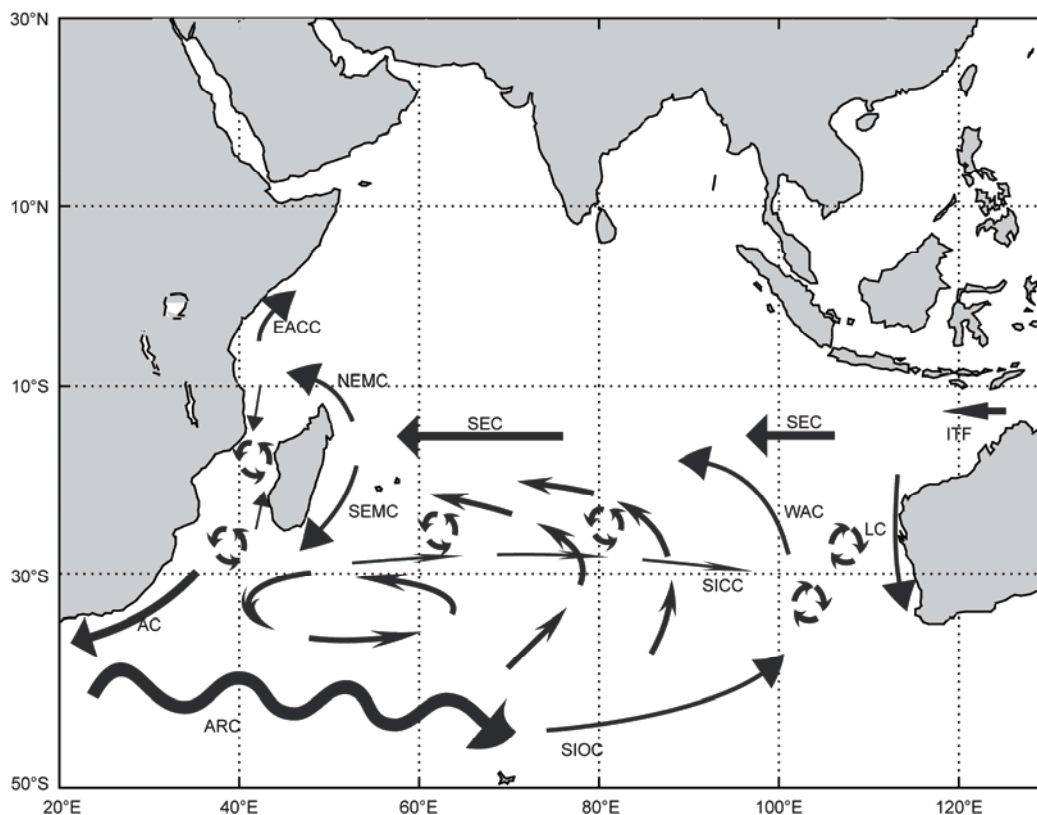


图 4 南印度洋副热带表层环流示意图。箭头标示(由西向东)包括阿古拉斯流(AC), 阿古拉斯回流(ARC), 东非沿岸流(EACC), 东北、东南马达加斯加流(NEMC, SEMC), 南赤道流(SEC), 南印度洋流(SIOC), 副热带逆流(SICC), 西澳大利亚流(WAC), 利文流(LC), 印度尼西亚贯穿流(ITF)。箭头粗细表示流动强度的相对大小

Figure 4 Schematic diagram of subtropical surface gyre in the SIO. Current branches indicate Agulhas Current (AC), Agulhas Return Current (ARC), East African Coastal Current (EACC), Northeast and Southeast Madagascar Current (NEMC and SEMC), South Equatorial Current (SEC), South Indian Ocean Current (SIOC), Subtropical Countercurrent (SICC), West Australia Current (WAC), Leeuwin Current (LC), Indonesian Throughflow (ITF). The thickness of line indicates the current strength relatively

流动变率十分显著。

漂流浮标真实地反映海流的流动情况, 可以为卫星和模式数据提供流速校正并为特定时间或者特定区域的研究提供实测参考。本文利用浮标轨迹反推MH370飞机残骸可能的漂流过程, 进而推断其

终结地点, 结果显示东南印度洋(35°S, 95°E)和(38°S, 92°E)海域最有可能是飞机终结的可能地点。基于漂流浮标的工作仍有很多可以挖掘的空间, 如关于海水输运和热量输运的研究, 这对于理解海洋的热盐交换, 进而探讨对气候的影响极为重要。

致谢 感谢中国科学院南海海洋研究所池建伟、张莹和王闵杨等人给予讨论。感谢AOML(Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory)提供漂流浮标数据, 资料网址: <ftp://ftp.aoml.noaa.gov/phod/pub/buoydata/>。

参考文献

- 1 Poulain P M. Adriatic sea surface circulation as derived from drifter data between 1990 and 1999. *J Mar Syst*, 2001, 29: 3–32
- 2 Lumpkin R. Decomposition of surface drifter observations in the Atlantic Ocean. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1753, doi: 10.1029/2003GL017519
- 3 Lumpkin R, Johnson G C. Global ocean surface velocities from drifters: Mean, variance, El Niño-southern oscillation response, and seasonal cycle. *J Geophys Res*, 2013, 118: 2992–3006

- 4 Lumpkin R, Pazos M. Measuring surface currents with surface velocity program drifters: The instrument, its data, and some recent results. In: Griffa A, Kirwan A D, Mariano A J, et al, eds. *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 39–67
- 5 Poulain P M, Warn-Varnas A, Niiler P P. Near-surface circulation of the Nordic seas as measured by Lagrangian drifters. *J Geophys Res*, 1996, 101: 18237–18258
- 6 Fratantoni D M. North Atlantic surface circulation during the 1990's observed with satellite-tracked drifters. *J Geophys Res*, 2001, 106: 22067, doi: 10.1029/2000JC000730
- 7 Ohshima K I, Wakatsuchi M, Fukamachi Y, et al. Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. *J Geophys Res*, 2002, 107: 3195, doi: 10.1029/2001JC001005
- 8 Du Y, Cai W J, Wu Y L. A new type of the Indian Ocean dipole since the mid-1970s. *J Clim*, 2013, 26: 959–972
- 9 Han W, Vialard J, McPhaden M J, et al. Indian Ocean decadal variability: A review. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2014, 95: 1679–1703
- 10 Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, 401: 360–363
- 11 Schott F A, McCreary J P. The monsoon circulation of the Indian Ocean. *Prog Oceanogr*, 2001, 51: 1–123
- 12 Schott F A, Xie S P, McCreary J P. Indian ocean circulation and climate variability. *Rev Geophys*, 2009, 47: RG1002, doi: 10.1029/2007RG000245
- 13 Benny N P, Ambe D, Mridula K R, et al. Mean and seasonal circulation of the south Indian Ocean estimated by combining satellite altimetry and surface drifter observations. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2014, 25: 91–106
- 14 Michida Y, Yoritaka H. Surface currents in the area of the Indo-Pacific throughflow and in the tropical Indian Ocean observed with surface drifters. *J Geophys Res*, 1996, 101: 12475–12482
- 15 Peng S Q, Qian Y K, Lumpkin R, et al. Characteristics of the near-surface currents in the Indian Ocean as deduced from satellite-tracked surface drifters. Part I: Pseudo-eulerian statistics. *J Phys Oceanogr*, 2015, 45: 441–458
- 16 Peng S Q, Qian Y K, Lumpkin R, et al. Characteristics of the near-surface currents in the Indian Ocean as deduced from satellite-tracked surface drifters. Part II: Lagrangian statistics. *J Phys Oceanogr*, 2015, 45: 459–477
- 17 Saji P K, Shenoi S C, Almeida A, et al. Inertial currents in the Indian Ocean derived from satellite tracked surface drifters. *Oceanol Acta*, 2000, 23: 635–640
- 18 Shenoi S S C, Saji P K, Almeida A M. Near-surface circulation and Kinetic energy in the tropical indian ocean derived from Lagrangian drifters. *J Mar Res*, 1999, 57: 885–907
- 19 Zheng S, Du Y, Li J, et al. Eddy characteristics in the south Indian Ocean as inferred from surface drifters. *Ocean Sci*, 2015, 11: 361–371
- 20 Stramma L, Lutjeharms J R E. The flow field of the subtropical gyre of the south Indian Ocean. *J Geophys Res*, 1997, 102: 5513–5530
- 21 Chen Z, Wu L, Qiu B, et al. Seasonal variation of the South Equatorial Current bifurcation off Madagascar. *J Phys Oceanogr*, 2014, 44: 618–631
- 22 Schouten M W, de Ruijter W P M, van Leeuwen P J, et al. Eddies and variability in the Mozambique Channel. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 2003, 50: 1987–2003
- 23 De Ruijter W P M, Ridderinkhof H, Lutjeharms J R E, et al. Observations of the flow in the Mozambique Channel. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 141–143
- 24 Boebel O, Rossby T, Lutjeharms J, et al. Path and variability of the Agulhas return current. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 2003, 50: 35–56
- 25 Le Bars D, De Ruijter W P M, Dijkstra H A. A new regime of the Agulhas current retroflection: Turbulent choking of Indian–Atlantic leakage. *J Phys Oceanogr*, 2012, 42: 1158–1172
- 26 Lutjeharms J R E, Anson I J. The Agulhas return current. *J Marine Syst*, 2001, 30: 115–138
- 27 Rouault M, Penven P, Pohl B. Warming in the Agulhas current system since the 1980's. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L12602, doi: 10.1029/2009GL037987
- 28 Naik D K, Saraswat R, Khare N, et al. Hydrographic changes in the Agulhas recirculation region during the Late Quaternary. *Clim Past*, 2014, 10: 745–758
- 29 Stramma L. The south Indian-Ocean current. *J Phys Oceanogr*, 1992, 22: 421–430
- 30 Reid J L. On the total geostrophic circulation of the Indian Ocean: Flow patterns, tracers, and transports. *Prog Oceanogr*, 2003, 56: 137–186
- 31 Ducet N, Le Traon P Y, Reverdin G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2. *J Geophys Res*, 2000, 105: 19477–19498
- 32 Feng M. Annual and interannual variations of the Leeuwin Current at 32°S. *J Geophys Res*, 2003, 108: 3355, doi: 10.1029/2002JC001763

- 33 Smith R L, Huyer A, Godfrey J S, et al. The Leeuwin Current off Western Australia, 1986–1987. *J Phys Oceanogr*, 1991, 21: 323–345
- 34 Thompson R O R Y. Observations of the Leeuwin Current off Western-Australia. *J Phys Oceanogr*, 1984, 14: 623–628
- 35 Feng M, Wijffels S, Godfrey S, et al. Do eddies play a role in the momentum balance of the Leeuwin Current? *J Phys Oceanogr*, 2005, 35: 964–975
- 36 Yamagami Y, Tozuka T. Interannual variability of South Equatorial Current bifurcation and western boundary currents along the Madagascar coast. *J Geophys Res*, 2015, 120: 8551–8570
- 37 Quartly G D, Buck J J H, Srokosz M A, et al. Eddies around Madagascar—The retroflexion re-considered. *J Marine Syst*, 2006, 63: 115–129
- 38 Behera S K, Yamagata T. Subtropical SST dipole events in the Southern Indian Ocean. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 327–330
- 39 Palastanga V, van Leeuwen P J, Schouten M W, et al. Flow structure and variability in the subtropical Indian Ocean: Instability of the South Indian Ocean Countercurrent. *J Geophys Res*, 2007, 112: C01001, doi: 10.1029/2005JC003395
- 40 Siedler G, Rouault M, Lutjeharms J R E. Structure and origin of the subtropical South Indian Ocean Countercurrent. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L24609, doi: 10.1029/2006GL027399
- 41 Small R J, deSzoeko S P, Xie S P, et al. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dyn Atmos Oceans*, 2008, 45: 274–319
- 42 Rypina I I, Jayne S R, Yoshida S, et al. Drifter-based estimate of the 5 year dispersal of fukushima-derived radionuclides. *J Geophys Res*, 2014, 119: 8177–8193
- 43 Pleter O T, Constantinescu C E, Jakab B I. Reconstructing the Malaysian 370 flight trajectory by optimal search. *J Navigation*, 2015, 69: 1–23
- 44 Ashton C, Shuster Bruce A, Colledge G, et al. The search for MH370. *J Navigation*, 2014, 68: 1–22

Subtropical surface circulation in the southern Indian Ocean derived from surface drifters

ZHANG LianYi^{1,2}, DU Yan¹, ZHENG ShaoJun¹, HE ZhiGang³ & PENG ShiQiu¹

¹ State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Using trajectory tracing method from 308 long-lived surface drifters, the subtropical surface circulations in the southern Indian Ocean (SIO) are investigated in the views of both Lagrangian and Euler.

Analysis of the results from the Lagrangian view confirm the two pathways of seawater transport from high to low latitude based on different types of drifter trajectory. One pathway is that the seawater formed in high latitude flows northward along the eastern boundary of SIO, joins the westward South Equatorial Current (SEC), and reaches east of the Mozambique along the north side of the Madagascar Island, then bifurcates into northward and southward branches: the northward branch cross the equator and finally joins the north Indian Ocean circulation system; the southward branch meanders along the Mozambique Channel and forms a series of mesoscale eddies. The other pathway is that the seawater flows northward through the central SIO, then turns to west following the SEC, and flows back to the south when reaches the east of the Madagascar Island. Based on the trajectory of drifters, the mean life cycle of subtropical circulation is about 43 ± 20 months.

In Euler view, zonal and meridional velocity, mean kinetic energy (MKE), and eddy kinetic energy (EKE) are calculated in $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grid using Poulain's method. The high MKE reaches over 1000 (cm/s)^2 in the regions of South Equatorial Current, Agulhas Current/Agulhas Return Current, Eastern Madagascar Current, and Eastern African Coastal Current, the two latter of which are western boundary currents. The EKE has similar spatial distribution with the MKE in the region west of Australia. The spatial variations of current in several areas are significantly modulated by mesoscale eddies, such as in the regions of Agulhas Retroflexion, western basin of SIO, and west of Australia. Agulhas system, especially in the area of Agulhas Retroflexion, has highest MKE and EKE, due to the interaction with the bottom topography and the wind stress curl induced instability. West of Australia, the EKE is remarkably larger than the MKE due to active mesoscale eddies. In particular, Leeuwin Current can be detected by drifters in the region. For the South Indian Ocean Countercurrent (SICC), although previous studies suggested an eastward current near 25°S , this study does not find drifters following eastward along this proposed current. However, similar result in EKE distribution as previous studies suggest that the eddy activities are much more significant than the mean current in this proposed SICC region.

Ocean surface drifters have important role in track the missing crafts. The long-lived drifters passing around the Reunion Island are collected and traced back to their origins and to rebuild the track of missing MH370's wrecks. Three possible pathways are rebuilt and two possible crash sites are identified around 35°S , 95°E and 38°S , 92°E , which are consistent with former results from satellite but show more evidences and details. The latest news said that some wrecks were found in the coast of Mozambique, which can be further validated by analysis of drifter trajectories in this study. Along both pathways, passing by north or south of Madagascar Island, surface drifters can reach the coast of Mozambique in different landing time. Both the currents/circulations in the SIO basin and Mozambique Channel contribute to the routes of the wrecks.

In this study, the subtropical surface circulation in the SIO is investigated from surface drifters, which help us to understand the mass transport between high and low latitude. A few puzzles still remain, such as there is none of trajectory supporting the SICC at the sea surface. The use of surface drifters on tracing the MH370's wrecks provides a good try to search missing craft in the ocean, and thus suggests more possible applications in the future in this isolated ocean.

surface drifters, the Southern Indian Ocean, subtropical circulation, ocean searching, MH370

doi: 10.1360/N972016-00338