

岛屿环流理论发展回顾及展望

王新怡^{1,2,3}, 孙宝楠^{1,2,3}, 王立伟^{1,2,3}, 连展^{1,2,3}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学和数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 为了寻找岛屿环流理论进一步发展的突破口, 使其在长期气候变化背景下海洋的响应以及深海环流等海洋领域前沿研究方向中继续起到指导作用, 首先回顾了岛屿环流理论的发展过程, 对其重要的发展里程碑和实际应用进行了系统梳理。同时, 对岛屿环流理论未来进一步丰富发展的重点方向进行了展望。分析结果显示, 该理论仍存在深入发掘的潜力, 可在积分路径设计、时间变化项的影响和地形及斜压效应的影响等多方面进行细节修正和补充, 拓展其应用的时间和空间尺度。

关键词: 岛屿环流理论; 积分路径设计; 时间变化项; 地形和斜压效应

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2018)08-0122-09

DOI: 10.11759/hyqx20180214001

海洋是由可流动的液体组成的, 持续不断的风吹拂在海洋表面, 引起了一系列复杂的海水流动过程。从稳定不变的地转流到漂流, 理论分析方法帮助我们一步步认识到了海洋中无时无刻不存在的“海洋环流”这一重要现象。Sverdrup^[1]开创性地将风应力旋度与大洋尺度内海水流动联系起来, 使人类首次得到了与实际情况比较一致的海水流动理论解。

通过此种方法, 我们虽然可以通过风应力定量地计算出整个海盆内的海洋环流情况, 但是其建立的理论模型的前提条件为整个海盆内部无遮挡及岛屿存在。这与自然界中实际情况显然是不十分一致的。在大洋中心或边界区域, 往往密布着大小不一的各类岛屿, 大者如澳大利亚大陆, 较小者如台湾岛、吕宋岛及印度尼西亚群岛等数不胜数。Sverdrup 等^[1]的风生大洋环流理论在研究岛屿与大陆间、岛屿与岛屿间水道的海水流动情况时已不适用。针对此种特殊情景, 有学者提出和发展了一套建立在海盆内存在岛屿背景下的理论方法用以研究海洋环流, 我们称之为“岛屿环流理论”。

虽然现今条件下, 随着观测技术和数值模拟技术的飞速发展, 我们对于海洋的认识相较于“岛屿环流理论”初次提出时已经有了极大的提高, 但是理论分析这一工具仍是我们全面认识海洋及其内部控制机制过程中不可或缺的有效手段。尤其是现阶段我们对于海洋的重点逐渐向时间上变化尺度极长、空

间上位于海洋深渊的各类海洋现象聚焦。对于此类现象, 现阶段数值模式和观测数据往往力所不能及。因此, “岛屿环流理论”这一历史悠久的理论工具可能在未来的海洋学发展中焕发出新的生命力。本文的目的就是对这一理论的发展历程和已有的应用情况进行回顾, 并就其未来的发展前景进行展望。

1 岛屿环流理论发展回顾

1.1 理论建立

“岛屿环流理论”的基本目的为通过岛屿所在区域以及远离岛屿的大洋内部风应力, 来计算得到通过岛屿周边海峡和水道的海水流动情况。这种理论方法最早见于发表的文献是由 Veronis 在 1973 年完成的“Model of World Ocean Circulation: I. Wind-driven, two-layer”一文中^[2]。Veronis 用这种方法研究和计算了新西兰岛屿周边的海水流动。他虽然应用了此种方法, 但是并没有给出详细的推导过程和严

收稿日期: 2018-02-14; 修回日期: 2018-04-02

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (GY0217Q06); 国家自然科学基金(41506037)

[Foundation: Basic Scientific Fund for National Public Research Institutes of China, No. GY0217Q06; National Natural Science Foundation of China, No. 41506037]

作者简介: 王新怡(1961-), 女, 山东青岛人, 高级工程师, 本科, 主要从事海洋环流方面研究, E-mail: wangxy@fio.org.cn; 连展, 通信作者, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋环流方面研究, 电话: 0532-88967320, E-mail: lianzhan@fio.org.cn

谨的数学表达形式。

“岛屿环流理论”首次被正式提出是由 Godfrey^[3]完成的。他通过静力平衡等方法,将环绕岛屿的环流结果与沿岛屿西边界以及岛屿与东边大陆围成区域的边界风应力积分建立了简单联系。在此理论中,在大洋纬向断面(图中 E-F 断面)上存在如下平衡关系:

$$P_F - P_E = - \int_E^F (\tau^x + \beta^{-1} f \text{curl} \tau) dx / g \rho_0 \quad (1)$$

式中, P_F 和 P_E 分别为 F 点和 E 点的海水压强, τ^x 为 x 方向风应力, f 为科氏参数, β 为科氏参数变化速率, g 为重力加速度, ρ_0 为海水密度。根据地转平衡关系,可以将该等式推广到 D-E-F 断面上:

$$P_F - P_D = - \left(\int_{DEF} \rho_0^{-1} \tau^l dl + f_F T_0 \right) / g \quad (2)$$

式中, T_0 为通过整个 D-E-F 断面的海水流量。

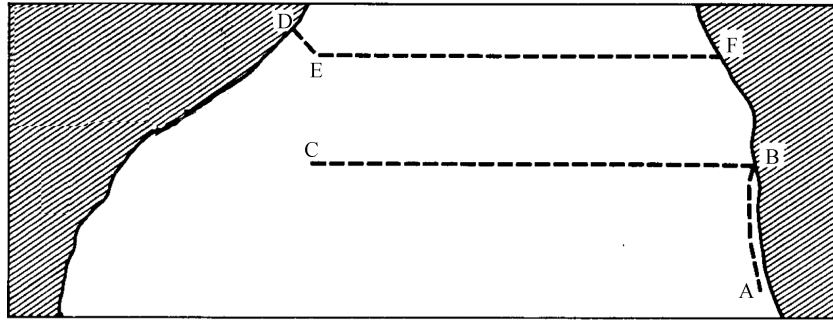


图 1 大洋内部理想断面(引自文献[3]图 1)
Fig. 1 The ideal section in the ocean interior^[3]

在此基础上,便可以很方便地得到通过目标研究区域的海水经向流量,如由公式(1)和(2)可得图 2 中两点压强差为:

$$P_Q - P_T = \left(\int_{TSRQ} \rho_0^{-1} \tau^l dl + (f_Q - f_T) T_0 \right) / g \quad (3)$$

这里 T_0 为通过区域 Q-R-S-T, 即新西兰岛和南美大陆之间的平均海水经向流量。若假设岛屿周围不存在海水压强梯度力, 即 $P_Q - P_T = 0$, 则公式(3)便

可以变化为最经典的岛屿环流表达形式:

$$T_0 = \frac{1}{f_Q - f_T} \oint_{TSRQ} \tau^l / \rho_0 dl \quad (4)$$

通过此方法,可以发现岛屿附近的环流完全由沿固定线路风应力决定,而与海水涡旋黏性、底摩擦和海水密度等其他要素无关。这个方法的表达形式非常简单,但是却可得到非常有意义的结果,可以使得我们在研究岛屿周边海流结构时方便地确定重点关注对象。

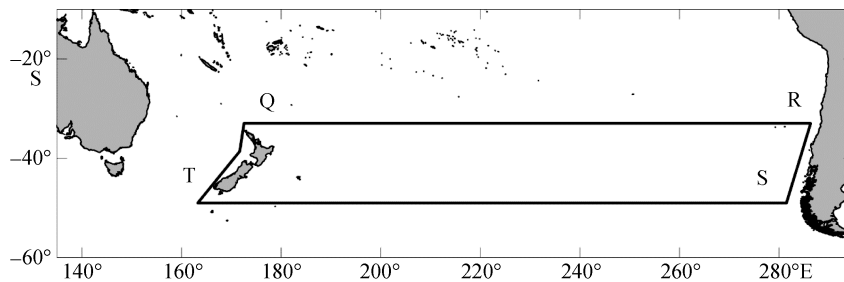


图 2 Godfrey 的研究区域和采用的积分路径(重绘自文献[3]图 2)
Fig. 2 The study region and path integral in the work of Godfrey^[3]

Godfrey^[3]提出的岛屿环流理论是建立在一系列的简化和理想条件下的,其进行的主要简化有:忽略除西边界流外的一切摩擦效应;忽略非线性效应;忽略海流时变效应;忽略海底地形变化效应;忽略海水斜压效应。

虽然进行了如此多的假设和简化,但是原始的

绕岛环流在太平洋-印度洋贯穿流(因其主要流经海域为印度尼西亚海域,以下将其简称为印尼贯穿流)的应用中仍然显示了与实际观测的良好的一致性^[3]。Godfrey^[4]通过仔细比对,量化评估了原始岛屿环流中忽略项的实际影响,进一步确认了该理论结果的合理性。

该理论方法被 Godfrey 提出后,立即得到了研究学者们的重视。对该理论的进一步深化研究屡见不鲜,以 Wajsowicz 和 Pedlosky 等为代表的一大批海洋学家对该理论进行了丰富和修正,大大拓展了该理论的适用范围。与 Godfrey 采用的以静力平衡为基础的推导方式不同,不同学者采用了不同的数学推导方法。

Wajsowicz^[5]以原始运动学方程做为出发点,更加系统化地推导了得到岛屿环流理论的整个过程。在推导过程中,方程每一项的取舍具有清晰的物理背景,使得数学方法和物理意义出现了良好的结合。Wajsowicz 的工作非常细致,考虑并设计了多种情景,深入探讨了岛屿环流理论的适用范围,结合数值模式结果,分析了该理论在印尼贯穿流研究中的作用。她的研究范围涵盖多个方面,如她设计了两个岛屿同时存在的情景,首次将岛屿环流理论拓展到多个岛屿。她还考虑了压强梯度力等因素在理论中起到的作用。仍然基于静力近似,借由压强梯度力和摩擦力等的平衡关系,给出了一个修正项,用以考虑岛屿西侧的摩擦等效应。除此之外, Munk 和 Stommel 摩擦理论也被用于估算摩擦效应对最终结果可能造成的影响。Wajsowicz 的工作是继 Godfrey 提出岛屿环流理论之后,对该理论进行的最为系统的分析和整理工作之一,使得该理论的完备性上了一个新的台阶,推动了该理论的应用和发展。

Pedlosky 等^[6]和 Pratt^[7]等人也开展了类似的工作,但是他们的工作重点放在摩擦效应的研究上。如 Pratt^[7]应用尺度简化的方法,近似地得到了摩擦力作用下通过狭窄水道的水通量理论解,通过分析可以发现,该解和经典的 Munk 边界层摩擦理论解虽然比较近似,但是仍然存在差异。具体结果显示,当海峡越宽时,两者逐渐趋于一致,而当海峡较窄时,通过研究海峡的海水通量则要小于不存在岛屿时的结果。除此之外, Pedlosky 等^[6]还研究了岛屿形状可能对理论造成的影响,通过摩擦理论的分析,给出了若岛屿为长条形时理论的修正项。

在众多科学家的努力下,基于经典风生大洋环流理论框架下的岛屿环流理论发展已经比较完备,理论经受住了不同数值模式和海洋观测数据的检验,在合理的误差范围以及简化尺度下,二者符合良好。后续的理论研究主要集中在对经典理论适用范围的分析 and 延拓方面。这方面的工作也可以大致分为 3 个方向:第一为非平底海洋情景;第二为斜压海洋

情景;第三为非稳恒风应力驱动情景。

我们首先来回顾下对于第一类情景的理论研究历程,即岛屿环流理论在非平底大洋下的改变形式。这部分工作最具有代表性的仍是 Wajsowicz 所开展的。经典的岛屿环流理论推导过程中,忽略了所有地形变化项,对方程进行了较大的简化。Wajsowicz 较早地分析了地形变化项在其中的作用,并定性地讨论了存在地形起伏时海水输运量可能的变化^[5]。在后续工作中, Wajsowicz 又将理想地形变化推广到了更加近似实际的情景。通过数值试验结合理论研究的方法,在规则海槛地形以及连续变化地形的情景设计中,讨论了地形作用对通过研究断面海水通量的影响,还有一些类似的工作在这里不一一列举。通过对这些工作分析可以发现,当考虑海底存在地形变化时,岛屿环流理论的表达形式出现了很大的改变,地形项的无法消去导致公式的简洁程度受到了影响。因为地形变化而随之产生的摩擦效应和斜压效应等往往无法定量表达,这就导致了在研究存在地形变化的岛屿环流时往往更多地依赖数值模式结果进行定性描述,应用解析的方式得到的通过研究断面海水流量精确表达形式的难度往往较大。

在经典岛屿环流的推导过程中,压强梯度力项也被忽略了。为了揭示在斜压海洋中本理论的适用性,有许多学者开展了相关的工作。对这一问题的研究,是由实际海洋现象的观测所驱动的。在 20 世纪 60—70 年代,即有学者注意到澳大利亚东岸的压强梯度与大洋尺度的风场存在联系^[8],如何从动力学角度给予解释一直困扰大家。直到 Godfrey 提出了岛屿环流理论之后,提供了解决这一问题的一个良好理论手段。当海水存在垂直层化时,压强梯度力项与地形变化项是互相依存的, Wajsowicz 给出的修正项实际上提供了两种效应的综合表达^[5, 9],她还利用 Levitus 数据对斜压效应导致的印尼贯穿流流量给与了估算。

上面提到的海水密度垂直变化只是斜压海洋的表现形式之一,海水水平密度变化在某些情景下也很明显。若研究的岛屿南北方向覆盖范围较长,因为太阳热辐射的不均匀性等原因,则在岛屿的南端和北端则可能出现非常大的密度梯度。此时通过研究岛屿一侧的海水输运情况已经超出了一直讨论的基于风生环流的岛屿环流理论,可将之称为“广义岛屿环流理论”。在这种情况下,控制海水流动的动力机制主要为地转关系,即海水所受科氏力和压强梯度

力互相平衡。研究浮力驱动下的大尺度海流运动工作有许多,如 McCreary 等^[10]和 Godfrey 等^[11]等,但是将注意力集中在地转平衡下岛屿附近环流情况的工作较有代表性的为 Spall^[12]所开展的。Spall 将注意力集中在通过岛屿近赤道端和近极地端的海水流量比例,通过尺度简化等方法,他推导得到了两者的解析表达形式,在某些情况下,通过岛屿两端的海水输运量差别较大。

经典岛屿环流理论假设海水流动为随时间缓慢变化,在对变化速度超过一定限制的风应力驱动下不再适用。因此,对岛屿环流理论在不同时间尺度下是否仍然成立,一直是人们研究的重点问题。Wajsowicz^[13]、Firing 等^[14]和 Pedlosky 等^[15]分别应用数值实验和理论解析的方法,研究了岛屿环流理论在时变风应力驱动下的适用性。其中 Firing 的工作成果及其推导得到的“时变岛屿环流理论”作为较早开展的经典基础工作之一,在他的理论框架下分别考虑了大洋内区艾克曼输运、与艾克曼输运相应的艾克曼抽吸以及长罗斯贝波这三种效应对大洋西侧的岛屿周边海流影响。基于此理论计算得到的理论解虽然不能和实测数据完美吻合,但是可以较好地表现海水输运量的基本变化态势。后续还有学者应用这一方法理论于其它岛屿周边海流随时间变化的问题研究中,如 Zhuang 等^[16]在菲律宾岛沿岸和 Chen 等^[17]在马达加斯加沿岸的应用等,它已经成为了一个海洋学研究中的重要理论工具。

时间变化项在整个岛屿环流理论推导过程中体现在两个方面,一个即是上述大部分工作重点关注的波动在大洋内区传播导致的海洋特征要素随时间变化。另一个则为波动抵达岛屿沿岸后,以凯尔文波等的波动形式绕岛屿岸线的传播过程导致各类要素随时间变化。因为波动传播速度的差异,前者时间变化量级往往长于后者。因此,后者可省略的要求更宽泛。Yang 等^[18]利用这一特点,研究了吕宋海峡海水通量和北赤道流系的一系列关系。若仅考虑波动在大洋内传播的时间尺度,岛屿环流理论已经不适用于研究此问题的季节变化,但是正因为绕岛屿岸线传播的波动时间尺度较小,而岛屿环流理论的一部分仍然成立。基于此的研究也为我们提供了一个较新颖的研究思路。

1.2 实际应用

自从岛屿环流理论被正式提出以来,其在各个

海区都得到了多方面的应用及检验,如 Chen 等^[17]在非洲东岸马达加斯加岛附近应用本理论计算了相应流函数。Seung^[19]应用一个简化的理想模型,研究了通过朝鲜半岛和日本岛之间的对马海峡的对马暖流的各种特征。在南大洋海区,本方法也有应用。Cai^[20]应用岛屿环流理论方法计算了南大洋的海水流函数分布,用以研究南大洋海洋流圈特点。在大西洋加勒比海附近,众多岛屿紧密排列成岛链状,Wajsowicz 拓展了岛屿环流中考虑岛屿的数目,提出了岛屿数量为 N 时的理论模型^[21],并应用其计算了加勒比海周边的海水流函数。

虽然岛屿环流理论在全球各种海区都有相关应用开展,但是该理论最广泛并且成熟的应用的研究目标为印尼贯穿流及太平洋西侧周边海域的海洋环流^[3,9,22]。

太平洋海盆西侧存在南海、爪哇海、苏拉威西海、哈马黑拉海和弗洛勒斯海等边缘海。本海域密布众多岛屿,如澳大利亚大陆(岛)、加里曼丹岛、吕宋岛、菲律宾岛等。印尼贯穿流通过印度尼西亚海域,由太平洋进入印度洋(图 3),是全球热盐输送带的重要组成部分,对全球气候变化有着重要影响^[23]。该海域岛屿紧邻太平洋海盆,历来被视为岛屿环流理论良好的应用场所。Godfrey 在首次提出岛屿环流理论之后,使用此理论计算得到了印尼贯穿流的年平均流量,与实际观测数据相符良好^[3]。

各类研究证明,印尼贯穿流的主轴由太平洋流经望加锡海峡,最终进入印度洋^[24]。在 Godfrey^[3]和 Wajsowicz^[25]的工作中,都将澳大利亚大陆视为一个大岛,绕其边界逆时针流动的海流即印尼贯穿流主轴。除此之外,还有一部分海水通过吕宋海峡由太平洋进入南海并继续向南流动,最终汇入印度洋。这一部分海流我们通常将其称为印尼贯穿流的南海分支^[26],它与印尼贯穿流主轴等多个海流结构共同组成了连接太平洋和印度洋的海洋环流系统。围绕这整个环流系统中其中不同海流结构的相互关系、吕宋海峡和望加锡海峡等关键通道的水通量变化特征和关系、南海对整个印尼贯穿流的影响的科学问题,不同学者应用岛屿环流理论从不同方面开展了分析研究。

例如,有的用岛屿环流理论来解释太平洋海水进入吕宋海峡的机制以及流出南海后的流向^[27],有的用来解释 ENSO 现象与吕宋海峡输运之间的关系^[28],有的用来解释南海上层环流的动力机制^[29],有的用来分析印尼贯穿流主轴和南海分支的年际变化特征和机制^[30],还有的用来分析印尼贯穿流南海分支与

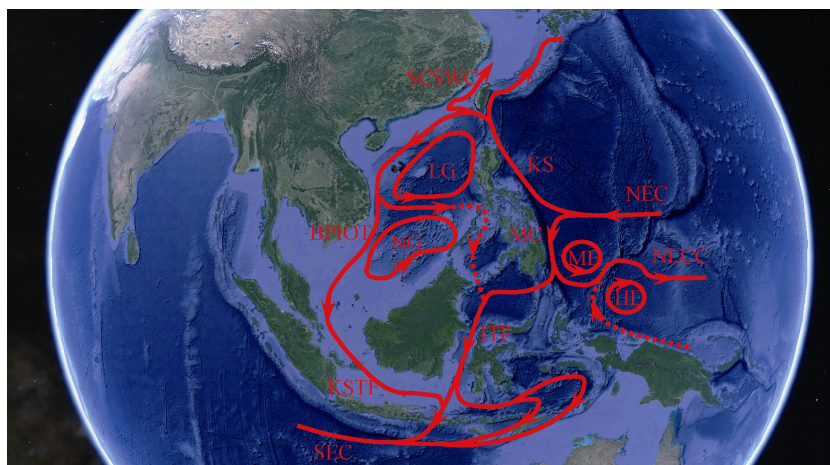


图3 印尼贯穿流及相关流系示意图

Fig. 3 Sketch map of the relationship between the Indonesian throughflow and related flow systems

BPIOT: 印尼贯穿流南海分支; HE: 哈马黑拉涡旋; ITF: 印尼贯穿流; KS: 黑潮; KSTF: 卡里马塔贯穿流; LG: 吕宋流圈; MC: 棉兰老流; ME: 棉兰老涡旋; NEC: 北赤道流; NECC: 北赤道潜流; NG: 南沙流圈; SEC: 南赤道流; SCSWC: 南海暖流
 BPIOT: Branch of Pacific-Indian Ocean Transport; HE: Halmahera Eddy; ITF: Indonesia Through Flow; KS: the Kuroshio Current; KSTF: Karimata Strait Transport Flow; LG: Luzon Current; MC: Mindanao Current; ME: Mindanao Eddy; NEC: North Equatorial Current; NECC: North Equatorial Cromwell Current; NG: Nansha Gyre; SEC: South Equatorial Current; SCSWC: the South China Sea Warm Current

风场的关系等^[31]。总体而言,应用岛屿环流理论在印尼贯穿流及其相关流系的研究成果丰富,可以解释相关海洋现象的各类时空特点。

在该理论的具体应用手段,即风应力积分轨道的选取上,不同学者的计算方法略有差异,但是大部分指导思想都比较一致:通过相近岛屿合并的方法,将澳大利亚大陆和巴布亚新几内亚岛视为一个整体,将菲律宾群岛也视为一个整体,绕此两个大岛流动的海水分别被视为印尼贯穿流主轴和印尼贯穿流南海分支(图4—图5)。除此之外,连展等^[32]建立了一个考虑多个岛屿构成的复杂岛链的积分轨道(图6,图中虚线为风应力积分轨道),该方法可以将

整个印尼贯穿流系统内的多支海流结构视为一个整体进行分析研究。

2 岛屿环流理论未来展望

通过以上对岛屿环流理论产生发展过程以及其不同海区不同海洋现象中应用的系统回顾,可以发现岛屿环流理论作为一种经典的物理海洋研究方法,有重要的研究意义和使用价值。应用此方法,可以很方便的将岛屿周围的海流状况与其决定因素相联系,忽略其中的次要因素,从而掌握关注所现象的成因。极有针对性的省略次要因素,简洁的数学表达形式,是这个理论的最大亮点。

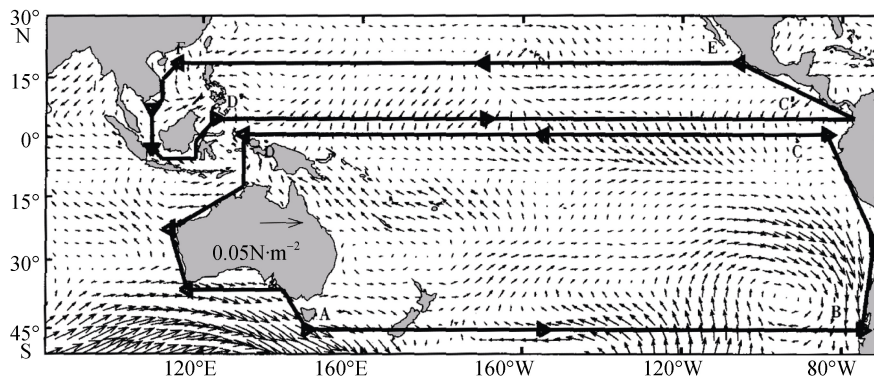


图4 一种岛屿环流理论风应力积分轨道(引自文献[30]图1)

Fig. 4 Path integral used by Liu et al.^[30]

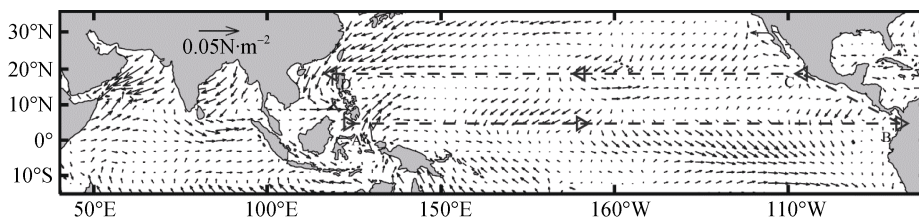


图5 一种岛屿环流理论风应力积分轨道(引自文献[31]图4)

Fig. 5 Path integral used by Liu et al. [31]

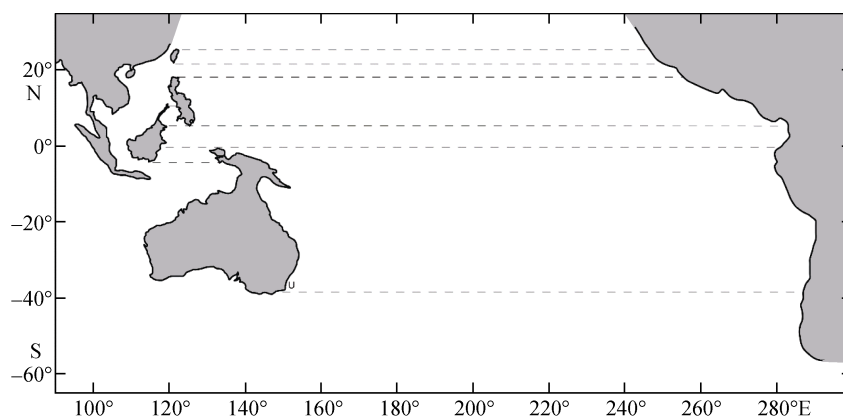


图6 岛链交错存在时的风应力积分轨道(引自文献[32]图2)

Fig. 6 Path integral used by Lian et al. [32]

岛屿环流理论的研究范围相对其原始形态,已经得到了大大扩展。但是其适用的最小时间变化尺度、斜压效应在复杂地形下的表达形式等仍有待进一步研究。具体而言,该理论的进一步完善发展的主要突破点可以体现在以下几个方面。

2.1 积分路径设计

在存在单一或者简单分布的岛屿或岛链时,岛屿环流理论可以简单的依赖大洋内区的风应力积分结果估算岛屿或岛链周边的海水流量。但自然界中实际岛屿的位置往往是互相掩映,交错分布的。并且复杂岛链周边的海水流动往往是互相呼应,上下游联通的。如组成南海域际环流的印尼贯穿流、卡里马塔贯穿流、印尼贯穿流南海分支、南海暖流、台湾暖流和穿过民都洛海峡的流动即同属一个流域系统^[33]。若对其中某一支海流进行割裂行的独立研究,根据该海流的南北纬范围设计简单直观的积分轨道,仅能考虑较小空间范围的因素对其的驱动和影响,而忽略了更广阔区域的风场驱动和其上下游流系之间的相互关系。设计包含更多岛屿和海峡通道风应力积分轨道是解决这一问题的一种思路。基于此种方法,可以将多组不同的海流系统置于同一体系内,对其相互关系进行综合分析。因为岛屿数量众多和

流系结构复杂,该研究思路最合适的应用场所仍然为南海和印尼海周边海域,除此之外,日本群岛、印度洋中部和西岸群岛、加勒比群岛等其它海域也是此研究思路的良好应用场所。

2.2 时间变化项的影响

经典岛屿环流理论中,时间变化项属于可忽略的小量,即得到的理论解为不随时间变化的常数。而不能忽略的是,在多数海峡通道中,其海水输运值存在非常明显的多尺度时变特征,如年际尺度、季节尺度、季节内尺度等。应用量纲分析,可以发现经典的岛屿环流理论根据斜压波动的特征调整时间,在海流时变尺度逐渐减小时已经变得不再适用。该适用“门槛”在岛屿环流理论的应用过程中尤其值得引起注意。同时,推广后包含时变效应的岛屿环流理论^[14]的应用也有待于进一步丰富。通过此方法,可能使得我们从大尺度风生环流的角度分析各海峡短周期的流量变化特征,如卡里马塔海峡秋冬季存在反向的特征,仅从年平均角度对其开展研究并不充分,另外,还可以藉由此途径,将短期时变特征和更长时间尺度下的流量变异置于同一理论框架下,分析二者之间的相互关系,给出其互相制约的关键因素。

2.3 地形和斜压效应的影响

岛屿环流通常的应用场景为大洋边缘处的岛屿周边, 该类海域地形往往变化较为显著。在岛屿周边海峡通道处的水深一般较浅, 凸起穿越大洋主跃层甚至季节跃层。该特点决定了地形和斜压及其综合效应等在经典岛屿环流理论中省略的作用项往往对海流结构也起着重要作用。尤其是我们将研究的关注点由多年平均的稳恒流动转向年际乃至季节变化时, 忽略这些作用项更是可能导致无法再现真实的海水通量变化特征。为了解决这个问题, 一个可以尝试的方法为通过增加压强修正项, 对原始岛屿环流理论进行扩展。Dwi 等^[34]通过各种方法, 发现了印尼贯穿流和日本群岛以西海水流量与周边海域的压强梯度呈现明显的相关性, 这进一步确认了想要依据理论工具诊断计算以上海流不同时间尺度的变化特征, 压强修正项是不可或缺的。

除此之外, 现今海洋研究的一个重点方向为向深海大洋发展。而对深海大洋, 各类观测数据资料较少, 因此, 导致我们针对海洋深层的环流特征认识较为欠缺, 这就更为理论工具提供了一个展示其特有优势的良好舞台。需要注意的是, 在深层大洋, 驱动洋流的机制已不再主要为风应力, 热盐环流占据了海洋深层环流的主要部分。而针对此种情况, Spall^[12]等已经搭建了较为完备的基础理论框架, 可以将其直接应用于热盐环流驱动的岛屿周边海峡水道海水流动情况的研究中。由理论预先发现问题并提出问题, 指导设计海洋观测具体方案, 是深层海洋环流研究的一个较有效率的方法。

3 总结

岛屿环流理论这一古老而经典的理论工具虽然表达形式简单, 但是其却能抓住主要因素, 将岛屿周边的海水流动的主导控制机制简洁的表达出来, 给出合理的诊断结果。在当代海洋学研究中, 该理论方法仍可占据一席之地, 如在长期气候变化背景下海洋的响应以及深海环流等前沿研究方向中起到指导作用。同时, 该理论仍存在深入发掘的潜力, 可在多方面进行细节的修正和补充, 拓展其应用的时间和空间尺度。

参考文献:

[1] Sverdrup H U, Wind-Driven currents in a baroclinic ocean; with application to the equatorial currents of the

Eastern Pacific[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 1947, 33(11): 318-26.

- [2] Veronis G. Model of world ocean circulation: i. wind-driven, two-layer[J]. J Mar Res, 1973, 31: 228-288.
- [3] Godfrey J S, A sverdrup model of the depth integrated flow for the world ocean allowing for island circulations[J]. Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 1989, 45(1-2): 89-112.
- [4] Godfrey J S, Masumoto Y. Diagnosing the mean strength of the Indonesian Throughflow in an ocean general circulation model[J]. J Geophys Res, 1999, 91: 5037-5046.
- [5] Wajsowicz R C, The circulation of the depth-integrated flow around an island with application to the Indonesian Throughflow[J]. Journal of Physical Oceanography, 1993, 23(7): 1470-1484.
- [6] Pedlosky J. Circulation around islands and ridges[J]. J Mar Res, 1997. 55(2148-2162).
- [7] Pratt L, Pedlosky J. Barotropic circulation around islands with friction[J]. Journal of physical oceanography, 1998, 28(11): 2148-2162.
- [8] Trenberth K E. Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 102(433): 639-653.
- [9] Wajsowicz R C. A relationship between interannual variations in the South Pacific wind stress curl, the Indonesian Throughflow, and the West Pacific warm water pool[J]. J Phys Oceanogr, 1994, 24: 2180-2187.
- [10] McCreary J P, Shetye S R, Kundu P K, Thermohaline forcing of eastern boundary currents: with application to the circulation off the west coast of Australia[J]. J Mar Res, 1986, 44(7): 1-92.
- [11] Godfrey J S, Weaver A J. Is the Leeuwin Current driven by Pacific heating and winds?[J]. Progress in Oceanography, 1991, 27(3): 225-272.
- [12] Spall M A. Islands in zonal flow[J]. J Phys Oceanogr, 2003, 33: 2689-2701.
- [13] Wajsowicz R C. The response of the Indo-Pacific Throughflow to interannual variations in the Pacific wind stress. Part I: idealized geometry and variations[J]. J Phys Oceanogr, 1995, 25: 1805-1826.
- [14] Firing E, Qiu B, Miao W. Time-dependent island rule and its application to the time-varying North Hawaiian Ridge Current[J]. J Phys Oceanogr, 1999, 29: 2671-2688.
- [15] Pedlosky J, Spall M A. Rossby normal modes in basins with barriers[J]. J Phys Oceanogr, 1997, 29: 2332- 2349.
- [16] Zhuang W, Qiu B, Du Y. Low-frequency western Pacific Ocean sea level and circulation changes due to the connectivity of the Philippine Archipelago[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(12):

- 6759-6773.
- [17] Chen Z H, Wu L X, Qiu B. Seasonal variation of the South Equatorial Current bifurcation off Madagascar[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(2): 618-631.
- [18] Yang J Y, Lin X P, Wu D X. On the dynamics of the seasonal variation in the South China Sea throughflow transport[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2013, 118(12): 6854-6866.
- [19] Seung Y H, Significance of shallow bottom friction in the dynamics of the Tsushima current[J]. *Journal of Oceanography*, 2003, 59(1): 113-118.
- [20] Cai W. Antarctic ozone depletion causes an intensification of the Southern Ocean super-gyre circulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(3): L03712.
- [21] Wajsowicz R C. A modified Sverdrup model of the Atlantic and Caribbean Circulation[J]. *J Phys Oceanogr*, 2002, 32: 973-993.
- [22] Godfrey J S. The effect of the Indonesian throughflow on ocean circulation and heat exchange with the atmosphere: A review[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101: 12217-12237.
- [23] Gordon A L, Dwi S R, Kevin V. Cool Indonesian throughflow as a consequence of restricted surface layer flow[J]. *Nature*, 2003, 425(6960): 824-828.
- [24] Gordon A L, Dwi S R, Amy F. Throughflow within Makassar Strait[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(21): 3325-3328.
- [25] Wajsowicz R C. The circulation of the depth-integrated flow around an island with application to Indonesian Throughflow[J]. *J Phys Oceanogr*, 1993, 23: 1470-1484.
- [26] Fang G H, Dwi S R, Soesilo I. Volume, heat, and freshwater transports from the South China Sea to Indonesian seas in the boreal winter of 2007–2008[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2010, 115(C12): 93-102.
- [27] Qu T D, Du Y, Hideharu S. South China Sea throughflow: a heat and freshwater conveyor[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23): 430-452.
- [28] Qu T D, Kim Y Y, Yaremchuk M. Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea?[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(18): 3644-3657.
- [29] Qu T D. Upper-layer circulation in the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(6): 1450-1460.
- [30] 刘钦燕, 王东晓, 谢强, 等. 印尼贯穿流与南海贯穿流的年代际变化特征及机制[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(6): 1-6.
Liu Q Y, Wang D X, Xie Q, et al. Decadal variability of Indonesian throughflow and South China Sea throughflow and its mechanism[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(6): 1-6.
- [31] Liu Q Y, Wang D X, Xie Q. The South China Sea throughflow: linkage with local monsoon system and impact on upper thermal structure of the ocean[J]. *Chinese Journal Oceanology and Limnology*, 2012, 30(6): 1001-1009.
- [32] 连展, 方国洪, 王新怡, 等. 多岛环流理论在南海域际环流中的应用研究[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(1): 20-31.
Lian Zhan, Fang Guohong, Wang Xinyi, et al. Application of multi-island rule to the study of the inter-ocean circulation of the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(1): 20-31.
- [33] Hu Dunxin, Wu Lixin, Cai Wenju, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate[J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 299.
- [34] Dwi S R, Song Y T. Indonesian throughflow proxy from satellite altimeters and gravimeters[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2015, 120(4): 2844-2855.

Review and outlook of the island rule

WANG Xin-yi^{1, 2, 3}, SUN Bao-nan^{1, 2, 3}, WANG Li-wei^{1, 2, 3}, LIAN Zhan^{1, 2, 3}

(1. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 3. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Received: Feb. 14, 2018

Key words: island rule theory; design of path integral: time-dependent term; variable depth term and baroclinic term

Abstract: The island rule is a classical theoretical tool with simple expression. It can be used to capture the main element and concisely express the dominating mechanism that can control the circulation around the island, and then present a reasonable diagnostic result. This method may be significant in the contemporary ocean study. It will guide many cutting-edge research orientations, such as the response of ocean to the long-term climate change and abyssal ocean circulation. In this paper, the island rule development process is reviewed, and the important milestones and practical applications are analyzed. Meanwhile, the future direction of the development of this method is analyzed. The analysis shows that this theory has abundant development potential; it can be further supplemented and revised in details through some ways, such as the design of path integral, the impact from time-dependent term, and the impacts from the variable depth term and baroclinic term. The suitable practical spatial and temporal scales of this theory need to be broadened.

(本文编辑: 刘珊珊)