

世纪之争：海洋是否为“热机”？ ——Sandström 猜想发表一百周年侧记*

黄姣凤¹ 管玉平^{2,3**} 刘宇^{2,4}

1. 首都师范大学物理系, 北京 100037; 2. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋动力学重点实验室, 广州 510301;
3. 浙江海洋学院海洋科学系, 舟山 316004; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 传统的理论认为, 热盐环流是由低纬度加热、高纬度冷却驱动的热机. 这个理论遇到了新的挑战, 新的理论认为海洋把热能转化为机械能的效率极低, 所以热盐环流不是热机, 而是由风和潮汐提供机械能驱动的热量(或其他物理量)运输机. 海洋是否为“热机”的论战之所以“复兴”, 是因为这事关对海洋在气候系统中的作用. 海洋是否是热机这个问题可溯源到 1908 年 Sandström 发表的实验结果, 这是首次为揭示大洋深海环流驱动机制提出的一个猜想假说(常被称为 Sandström 定理), 并发表了实验结果. 那时的人类社会可能关心的只是天气现象, 现在则更加关注气候变化. 不言而喻, 这场争论结束之日, 就是人类破解海洋环流奥秘之时. 值 Sandström 实验 100 年之际——2008 年——也恰是 Bjerknes 环流定理发表 110 年, 谨撰此文, 以期从寻觅先行者的认识足迹中启迪来者.

关键词 热盐环流 Sandström 定理 深海环流

大洋中的热盐环流是物理海洋和气候变化的前沿领域之一^[1-7]. 与上层风生洋流相比, 热盐环流贯穿至深海. 由于深海的物理过程相当缓慢, 仪器观测困难, 且成本高昂, 实测数据十分匮乏, 针对热盐环流变异的观测也是近几年的事^[8-11]. 目前, 研究热盐环流的主要手段包括现场观测, 理论分析和数值模拟^[12-14], 此外, 人们一直试图通过实验研究来寻找其驱动机制. 热盐环流的主要概念涉及深水的形成和经向翻转流, 但我们对其他认知甚少; 近年来相关论文显著增多. 但是, 事实上连它的定义还未统一, 而且它的驱动机制仍在争论之中^[15, 16]. 这可追溯到 1908 年瑞典海洋学者 Sandström^[17]所做的实验工作. 问题的实质是, 上层海洋赤道与极地间(即水平)的温差能否驱动深海洋流? 换言之, 海洋是否是“热机”?

物理上把热机定义为任何使热变成机械功的装置. 19 世纪初, Carnot 就认识到热机的效率仅取决于热源和冷源的温度差, 而与工质无关. 根据 Carnot 热机工作原理, 如果把大气看做是以气体为工质的热机, 海洋是以液态水为工质的“热机”, 其理论效率必然都等于相应工质为理想气体时的热机效率. 这样, Carnot 定理就为研究大气或海洋环流提供一个很好的理论工具. 用热机原理解释地球流体现象由来已久, 如, 挪威海洋学、气象学家 Sverdrup^[18] 在 1917 年就用于大气环流, 后来, 前苏联海洋学者 Shuleikin^[19] 用于季风环流, 美国学者 Riehl^[20] 则用于台风环流的维持. 大气环流基本上可以看做是由下垫面的温度差异造成的, 故称“热力环流”. 尽管“大气热机”的效率很低, 约为 0.8% 而相应 Carnot 效率 33%^[21], 用热机概念解

2007-08-29 收稿, 2008-01-28 收修改稿

* 国家“九七三”计划(批准号: 2006CB403605)、中国科学院资源环境领域知识创新工程重要方向(编号: KZSW2-YW-214)、国家自然科学基金(批准号: 90411011, 40676022)和广东省自然科学基金(批准号: 5003672)资助项目

** 通信作者, E-mail: liuy255@scsio.ac.cn; guan@scsio.ac.cn

释大气环流却非常成功。然而,用“热机”解释大洋深海环流遇到了挑战:其一,如果海洋是“热机”的话,其效率^[22, 23]仅为 10^{-7} — 10^{-6} 的量级,这不足以把海面在低纬度所接收到的太阳辐射与高纬度向外辐射的热能转化成维持深海洋流所需要的机械能;再者,按照“海洋热机”说的观点,深海经向环流的强度应该和赤道与极地间的温差成正比,可是“海洋热机”学说不能用来解释越来越多的古气候记录,特别是上次盛冰期深海放射性碳测值^[24-31]。下面简要介绍围绕海洋是否为“热机”已经经历 100 年的争论。

1 大洋深海环流驱动的两个学说

1.1 深海环流的传统浮力驱动理论——“海洋热机”学派

20 世纪中叶,美国海洋学家 Stommel 等^[32-39]建立的深海环流理论为我们今天普遍接受的大洋深海环流奠定了动力学基础。众所周知,大气和海洋的热源位置不同。太阳辐射的绝大部分被地球表面吸收后再以感热和潜热形式加热大气,而外层空间作为冷源,从而驱动了大气环流。即大气是热源在下加热,而上层冷却,所以这是典型的 Rayleigh-Bénard 对流。虽然海底地热对深海环流有一定的影响^[37-39],但海洋主要是太阳从表层加热,高纬度海区冷却也在海洋表面。即海洋在低纬度海区加热、高纬度海区冷却,但是都在同一个高度上。Stommel^[36]认为,由于太阳对海表加热不均,赤道向极地的海表温度逐渐降低形成温差和盐度差从而驱动了深海环流。这是现有热盐环流理论的一个基本出发点,称之为 Stommel 浮力驱动假设。

1962 年,Stommel^[40]为研究现代大洋的深海环流形成,设想了这样一个实验装置:一排垂直导管的底端与深蓄水池相连,顶端则用一个具有温度分布的水平管道连接。以揭示垂直运动的极端不对称性:冷却端的下沉区域很小,而加热端的上升区却很大。在此基础上,Rossby^[41]做了一系列相关实验,在一个侧面与顶部均做隔热处理的方形容器内放入流体,并在其底部分别加热和冷却(图 1)以确保整个底部区域有明显的温度差。观察发现,底部流体由于受热不均导致密度差,在冷热区域间产生

快速流动,进而有遍及整个容器的环流存在。Rossby 认为在底部加热和冷却并不影响对实际海洋环流形成的解释,在热量由赤道向两极输送的过程中,必然伴随着某种垂直运动来完成大洋环流。由此推论:一个水平分布的热强迫驱动了一个贯穿整个深度的环流。

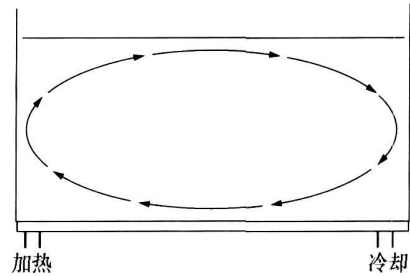


图 1 Rossby 实验示意图

Stommel 假定和 Rossby 实验构成了“海洋热机”学说的基础。目前,在大洋深海环流的研究中居主导地位,称之为“海洋热机”学派。

1.2 深海环流新的机械能驱动理论——海洋非“热机”学派

近 10 年来,人们已经认识到 Stommel 假说的局限性。Munk 和 Wunsch^[42]、黄瑞新^[37, 43]和 Nilsson 等^[44]提出了新的观点,“热盐环流”^[21, 45]应该是由风和潮汐提供机械能驱动的输送热量、淡水及其他物质的经向翻转流,而海表热通量和淡水通量(即浮力差)则是建立热盐环流的前提条件;于是,海洋混合所需的机械能成为模式的外参量,且该参数随着气候变化而改变。当忽略潮汐能量对大洋环流的贡献时,海洋和大气联合起来工作就像一个热机;尽管单一大气可以视为热机^[46, 47]。但是新的观点认为,由于海洋把热能转化为机械能的效率极低,海洋就不能称为热机^[21, 37],无疑,这是对传统热盐环流观点的挑战。

其实,这一观点可回溯到 20 世纪初的 Sandström 实验。Sandström 认为一个理想的海洋系统应遵守机械能守恒原理,他设计了如图 2 所示装有海水的实验装置。1908 年^[17]发表的是前两个实验结果,后来,1916 年^[48]又补充了第三个实验:实验一(图 2(a));当加热位于冷却之上时,观察不到环流,只有稳定的分层现象;实验二(图 2(b));当加热位于冷却之下时,可以观察到很强的环流;实验三(图 2(c));当加

热和冷却位于同一水平高度时,也不出现环流。

Defant^[49]总结 Sandström 实验得到热对流能够驱动深海环流的基本条件:只有加热位置低于冷却时,系统内部才能存在闭合的稳定流动,并命名为 Sandström 定理(Theorem); Vallis^[50]认为称 Sandström 效应(Effect)更贴切,也有叫 Sandström 猜想(Conjecture)的;既然 Sandström 的结论仍存

异议,我们倾向于后者的称谓则更能激励人们去确定。按照 Sandström 猜想:大气在下垫面受热、上边界冷却,因此大气是热机;对于海洋而言,虽然热膨胀可以导致低纬区域海平面比高纬区域高 1 m,但海洋基本上可以近似为通过相同水平面的海表在低纬度加热高纬度冷却的系统,海洋就不是热机。

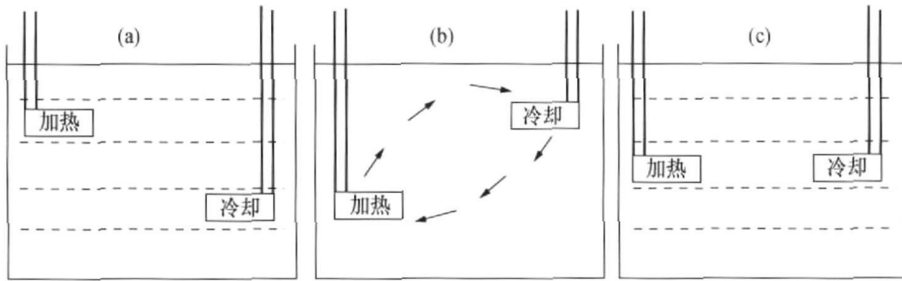


图 2 Sandström 实验示意图

(a) 加热位于冷却之上; (b) 加热位于冷却之下; (c) 加热和冷却处于同一水平高度

最近,管玉平和黄瑞新^[51]用机械能驱动新观点从理论上进行了探讨,初步结果显示其热盐环流的多平衡态与传统 Stommel 理论有着本质的区别。后者的多平衡态(图 3(a))有两个热主导的快变过程(其中一个不稳定)和一个盐主导的慢变过程;而机械能驱动的(图 3(b))则是一个热主导的快变过程和两个盐主导的慢变过程(其中一个不稳定)。“热盐

环流”的机械能观点与上述古海洋记录一致的原因在于上次盛冰期的“热盐环流”为盐主导型^[52]。机械能驱动深海环流的观点已逐渐被一些学者^[53-59]所接受。

2 Sandström 实验一百年

自从 1908 年 Sandström 发表其实验结果以来,引发了持续至今的争论:水平方向非均匀加热是否造成“水平对流”^[60]并作为解释大洋深海环流驱动机制?

首先是大家熟悉的 Jeffreys 在 1925 年^[61]就对 Sandström 结论的准确性提出了质疑。后来,Stommel^[40, 62, 63]为验证海水下沉总是集中在很小的区域,而设想了一套实验。基于这两方面,1965 年 Rossby^[44]发表了其著名的颠覆 Sandström 结论的实验结果,与 Stommel 等^[32-36]理论以及数值模拟^[64-67]一起构成了现代大洋热盐环流理论的基础。从 1958-1965 年形成了海洋热机学说的基本框架。之后步入发展阶段,主要是改进底部非均匀加热^[68, 69]、考虑旋转^[70-74]、底部倾斜^[75, 76]等因素的影响。

其实,Jeffreys 文章被长期忽视的另一面是他重新阐述^[77-80]了 Sandström 实验:由温差维持的环流从冷却区到加热区的通道一定位于回路的下方。

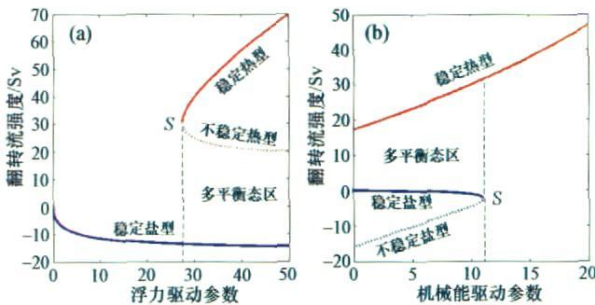


图 3 传统 Stommel 观点与机械能观点的多平衡态差异

(a) 传统 Stommel 观点; (b) 机械能观点

热盐环流用子午翻转流强度表示,单位为 Sv; 红线代表由热主导的快变过程,即热型翻转流:上层从赤道流向北极,在极区下沉,到深层后由极区流向赤道。蓝线代表由盐主导的慢变过程,即盐型翻转流:下层从赤道流向北极,在极区上升,到上层后由极区流向赤道。热型(取正值)与盐型(取负值)的流向相反,分别对应着不同的气候态。热盐环流在热型和盐型之间的转换可导致气候突变, S 为临界点;实线为稳定态,点线为不稳定态;浮力驱动参数的单位为 $m^4 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$,机械能驱动参数的单位为 $m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-1}$

Straub^[81], Greatbatch 和 Lu^[82] 指出 Stommel 假设^[36]与其前面的理论^[32-35]不一致, Olbers^[83]指出 Stommel 假定与地转平衡的概念相矛盾.

1998 年,也就是在 Sandström 实验发表 90 周年, Munk 和 Wunsch^[42]、黄瑞新^[43, 37]、Wunsch^[84] 的文章对海洋热机学说提出了挑战. 尽管之前 Walin^[85] 曾提出过, 但反响没有这么大. 从此, 大洋深海环流研究进入一个新的时期: 海洋非热机论的声音越来越大.

除了 Wunsch^[86] 用环状模型说明 Sandström 猜想外, 实验室研究的一项重要进展是 2005 年王伟和黄瑞新^[22] 发表的实验结果 (图 4): 既与 Sandström 结果不同, 无论加热、冷却在上方还是下方, 还是处于同一水平位置, 总有环流发生, 但 these 环流圈很浅薄, 且只出现在与冷热源有接触的边界层附近; 也没有观测到 Rossby 所报道的存在于整个空间的环流. Wunsch^[87] 认为如果该实验能外推到实际海洋的话, 是对“海洋热机”学说的一次挑战.

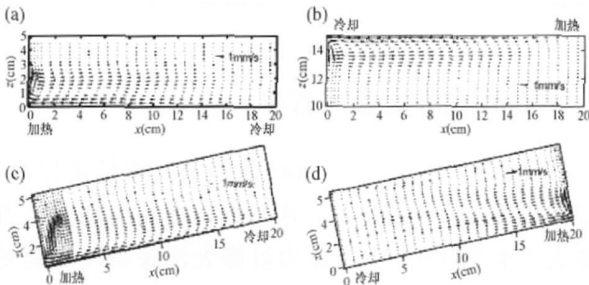


图 4 王伟和黄瑞新实验示意图^[22]

- (a) 加热和冷却在底部同一水平; (b) 加热和冷却在上方同一水平;
(c) 加热的位置低于冷却的位置; (d) 加热的位置高于冷却的位置

澳大利亚的一个实验小组, 发表一系列研究结果, 如 Mullarney^[88], Coman^[89] 和 Hughes 等^[90, 91], 依然坚持海洋是“热机”的观点; 尤其是不能重现 Sandström 的实验结果, 故不存在 Sandström 的结论^[89].

与此同时, 大洋环流的热力学研究取得重要进展. 按 Munk 和 Wunsch^[42] 估计的 2TW 能量供应, Gade 和 Gustafsson^[92] 分析这对应 3.1Sv 的经向翻转流. Marchal^[80] 用热力学得到环流在加热区上升, 冷却区下沉. 特别是 Nycander 等^[59] 的研究表明: 当没有考虑风强迫时, 热成流可以到深海 (图 5(a))

蓝色); 一旦考虑风的作用, 则与传统认识相反, 机械能驱动环流在深海 (图 5(b) 红色), 而热成流仅存在于热的表层 (图 5(b) 蓝色). 这对传统大洋环流概念是颠覆性的, 不仅是热盐环流, 而且对风生环流也要重新认识. 另一方面, 管玉平和黄瑞新^[51] 的结果表明深海环流的不稳定是盐度造成的, 而非 Stommel^[36] 认为的是温度所致. 如果说受混合系数及热扩散系数等不确定因素的制约, 王伟和黄瑞新的实验还不足以从根本上动摇“海洋热机”说基础的话, 那么, Nycander 等的结果是非热机论的有力佐证. 这不难解释 Coman 等的结论, 因为他们的实验没有考虑风强迫因素, 而实际海洋是有风作用的. 可见, 恰恰是 Coman 和 Hughes 等的结果不能外推解释现实海洋.

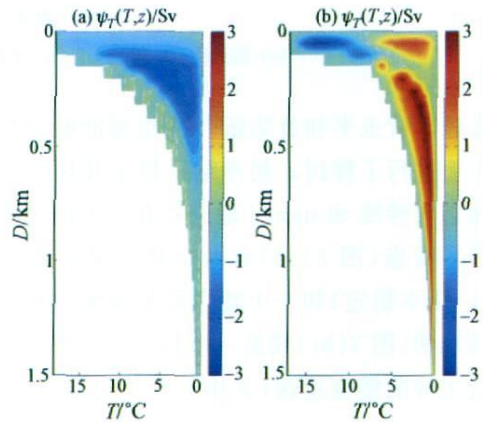


图 5 Nycander 等的风作用数值实验

- (a) 不计风作用时的热盐环流; (b) 考虑风时的热盐环流

另外, 从事大洋环流模拟^[93] 的学者, 总是利用风来驱动 OGCM (ocean general circulation model), 并最终得到大洋热盐环流的平衡态, 从 Nycander 等的结果看, 这在一定程度上支持了“机械能驱动”的观点. 周天军等^[94] 利用耦合模式进行大洋热盐环流变率研究时, 则显示热盐环流的变化受表层温度和盐度变化的共同驱动, 这是否意味着“热力驱动”亦有贡献? 前面已经说明这不是“热力”的贡献, 而是影响热盐环流的另一个重要因子——淡水^[51] (即盐度) 变化的贡献, 有关文献这里不再罗列. 关于大洋环流能量问题的讨论可参阅文献 [45, 95-97], 而值得一提的是, Gnanadesikan 等^[98] 认为海洋的热运输与能量没有必然的联系, 也就不需要研究环流能量, 尽管环流状态的能量有待研究,

但用能量观点^[51]研究状态之间的转换无比优越,这正是研究气候变化所关心和需要的。

如果海洋不是热机,那么深海环流的生成机制究竟是什么?

3 驱动深海环流的新观点

尽管深海环流的驱动机制尚在探讨之中,但目前普遍认可的观点^[56]:一是低纬度海区的垂直混合,二是南大洋的风生上升流.这两个过程意味着^[99,100]经向翻转流对外强迫有不同的敏感性,因此对未来全球气候变化也有不同的响应。

Toggweiler 和 Samuels^[101-103]首先指出 Drake 通道效应(Drake Passage Effect),即,增强的南大洋风通过南极绕极流而使北大西洋热盐环流加强. Wunsch^[84]估算有 70% 的风能直接进入南极绕极流.这方面已进行了大量研究,并形成一个重要方向^[56,104,105]:风生上升流驱动深海环流.例如,南大洋的风^[106-108]不仅能影响,而且还能强化^[109]北大西洋深海的经向翻转流. Nof^[110]认为仅风应力就能控制经向输运无须透热强迫,而 Rahmstorf 和 England^[111]则认为是热盐强迫控制北大西洋经向翻转流.最近, Russell 等^[112]的结果表明,西风的极向移动与增强可减弱全球海洋层化,进而提高南大洋的热储藏。

另一个重要观点是垂直混合^[37,42,56,113]驱动深海环流.内波破碎是产生混合的重要过程,海表的风和内潮均^[45,114,115]可使内波破碎.也就是说,混合所需要的能量^[42,116,117]来自风和潮汐.一般认为低纬度的垂直混合增强经向翻转流^[118-120].即使短暂的垂直混合,如台风^[121],都能有效地起到驱动作用.在概念和半球模式中,如果保持供给总的混合能量不变,那么,层化强的海区混合将会减小^[122].不过,在耦合气候模式^[123,124]中没有出现.可见,当考察海洋混合时,与所用模式^[125]有关.混合与湍流密切相关,该领域的研究总是富有挑战性.目前,尽管这方面的工作不少,但对垂直混合影响经向翻转流的认识却最少。

潮汐不只是会使海平面升降,它至少直接调控海洋的混合,进而影响深海环流^[126-129],甚至气候变化^[130,131].虽然现代大洋的潮汐几乎是不变的,但古潮流研究表明^[132],上次盛冰期的潮汐流耗散

比现代海洋要高 50%. 大家知道,上次盛冰期的风应力比现代要强得多,同样,那时的外海因浅海的消失而使潮汐流耗散比现代强.因此,潮汐的另一个作用就是不断地为海洋混合提供机械能,与风一道控制着深海环流。

4 结束语

1898 年 Bjerknes 发表环流定理标志着一个时代的开始^[133],今年已 110 年.然而 1908 年 Sandström 发表的实验结果,尽管后人也称其为 Sandström 定理,却没有像 Bjerknes 环流定理那样成功,引发了一个世纪的论争,至今尚未定论,故我们称之为 Sandström 猜想.巧合的是 100 年后,其同胞 Nylander^[52]等用数值实验不仅仅是印证,而且跑得更远.把这个大洋深海环流驱动机制的争论展示出来的目的是期待它早日解决,为人类认识深海环流铺平道路。

致谢 文稿是在美国伍兹霍尔海洋研究所黄瑞新先生激励下完成的,王东晓博士和三位评审人提出了宝贵的建议和修改意见。

参 考 文 献

- 1 周天军,王绍武,张学洪.大洋温盐环流与气候变率的关系研究:科学界的一个新课题.地球科学进展,2000,15(6):654-660
- 2 Clark PU, Pisas NG, Stocker TF, et al. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature*, 2002, 425: 863-869
- 3 Rahmstorf S. Ocean circulation and climate during the past 120000 years. *Nature*, 2002, 419: 207-214
- 4 孙亮,穆穆.温盐环流稳定性以及年代际变率的研究进展.海洋学报,2003,25(4):111-118
- 5 Wang SW, Zhou TJ, Cai JN, et al. Abrupt climate change around 4 ka BP: Role of the thermohaline circulation as indicated by a GCM experiment. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21(2): 291-295
- 6 刘宇,管玉平,林一骅.大洋热盐环流研究的一个焦点:北太平洋是否有深水形成.地球科学进展,2006,21(11):1185-1192
- 7 王召民.大西洋热盐环流与气候突变.气候变化研究进展,2007,3(1):1-7
- 8 Bryden HL, Longworth HR, Cunningham SA. Slowing of the Atlantic overturning circulation at 26°N. *Nature*, 2005, 438:

- 655—657
- 9 Schiermeier Q. A sea change. *Nature*, 2006, 439 (7074): 256—260
 - 10 Cunningham SA, Kanzow T, Rayner D, et al. Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26°N. *Science*, 2007, 317: 935—938
 - 11 Kanzow T, Cunningham SA, Rayner D, et al. Flow compensation associated with the meridional overturning. *Science*, 2007, 317: 938—941
 - 12 周天军, 张学洪, 王绍武. 大洋温盐环流与气候变率的关系. *科学通报*, 2000, 45(4): 421—425
 - 13 张学洪, 俞永强, 刘海龙. 海洋环流模式的发展和应用 I 全球海洋环流模式. *大气科学*, 2003, 27(4): 607—617
 - 14 赵艳玲, 张 铭, 司广宇. 海洋环流模式研究回顾与展望. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 7(3): 281—290
 - 15 Wunsch C. What is the thermohaline circulation. *Science*, 2002, 298(5596): 1179—1181
 - 16 Rahmstorf S. Thermohaline circulation: The current climate. *Nature*, 2003, 421: 699
 - 17 Sandström JW. Dynamicsche versuche mit meerwasser. *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*, 1908, 36: 6—23
 - 18 Sverdrup HU. Der nordatlantische passat. *Veröff Geophys Inst Univ Leipzig*, 1917, 2: 96
 - 19 Shuleikin VV. *Physics of the Sea*. USSR: Academy of Science Press, 1953, 259(in Russian)
 - 20 Riehl H. A model of hurricane formation. *J Appl Phys*, 1950, 21: 917—925
 - 21 Huang RX. Ocean, energy flow in. In: Cleveland CJ, ed. *Encyclopedia of Energy*. Oxford: Elsevier, 2004, 4: 497—509
 - 22 Wang W, Huang RX. An experimental study on thermal circulation driven by horizontal differential heating. *J Fluid Mech*, 2005, 540: 49—73
 - 23 Welander P. On the ocean heat engine: stiffness of chaotic systems and climate prediction. *Tellus B*, 1991, 43(4): 116—120
 - 24 Shackleton NJ, Duplessy JC, Arnold M, et al. Radiocarbon age of last glacial Pacific deep water. *Nature*, 1988, 335(6192): 708—711
 - 25 Adkins JF, Boyle EA. Changing atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ and the record of deep water paleoventilation ages. *Paleoceanography*, 1997, 12: 337—344
 - 26 Sikes EL, Samson CR, Guilderson TP, et al. Old radiocarbon ages in the southwest Pacific Ocean during the last glacial period and deglaciation. *Nature*, 2000, 405: 555—559
 - 27 Goldstein SJ, Lea DW, Chakraborty S, et al. Uranium-series and radiocarbon geochronology of deep-sea corals: Implications for southern ocean ventilation rates and the oceanic carbon cycle. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 193: 167—182
 - 28 Broecker WS, Barker S, Clark E, et al. Ventilation of the glacial deep Pacific Ocean. *Science*, 2004, 306(5699): 1169—1172
 - 29 Broecker WS, Clark E, Hajdas I, et al. Glacial ventilation rates for the deep Pacific Ocean. *Paleoceanography*, 2004, 19, PA2002, doi: 10. 1029/2003PA000974
 - 30 Keigwin LD. Radiocarbon and stable isotope constraints on Last Glacial Maximum and Younger Dryas ventilation in the western North Atlantic. *Paleoceanography*, 2004, 19, PA4012, doi: 10. 1029/2004PA001029
 - 31 Hughen K, et al. ^{14}C activity and global carbon cycle changes over the past 50000 years. *Science*, 2004, 303: 202—207
 - 32 Stommel H. The abyssal circulation. *Deep Sea Res*, 1958, 5: 80—82
 - 33 Stommel H, Arons AB, Faller AJ. Some examples of stationary planetary flow patterns in bounded basins. *Tellus*, 1958, 10: 179—187
 - 34 Stommel H, Arons AB. On the abyssal circulation of the world ocean- I. Stationary planetary flow patterns on a sphere. *Deep Sea Res*, 1960, 6: 140—154
 - 35 Stommel H, Arons AB. On the abyssal circulation of the world ocean, II. An idealized model of the circulation pattern and amplitude in oceanic basins. *Deep Sea Res*, 1960, 6: 217—233
 - 36 Stommel H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus*, 1961, 13: 224—230
 - 37 Huang RX. Mixing and energetics of the oceanic thermohaline circulation. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 727—746
 - 38 Scott JR, Marotzke J, Adcroft A. Geothermal heating and its influence on the meridional overturning circulation. *J Geophys Res*, 2001, 106 (C12): 31141—31154, doi: 10. 1029/2000JC000532
 - 39 Mullarney JC, Griffiths RW, Hughes GO. The effects of geothermal heating on the ocean overturning circulation. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L02607, doi: 10. 1029/2005GL024956
 - 40 Stommel H. On the smallness of sinking regions in the ocean. *Proc Nat Acad Sci USA*, 1962, 48: 766—772
 - 41 Rossby T. On thermal convection driven by non-uniform heating from below: An experimental study. *Deep Sea Res*, 1965, 12: 9—16
 - 42 Munk WH, Wunsch C. The moon and mixing: Abyssal recipes II. *Deep Sea Res I*, 1998, 45: 1977—2010
 - 43 黄瑞新. 论大洋环流的能量平衡. *大气科学*, 1998, 22(4): 562—574
 - 44 Nilsson J, Brostrom G, Walin G. The thermohaline circulation and vertical mixing: Does weaker density stratification give stronger overturning. *J Phys Oceanogr*, 2003, 33: 2781—2795
 - 45 Wunsch C, Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans. *Ann Rev Fluid Mech*, 2004, 36: 281—314

- 46 Barry L, Craig GC, Thuburn J. Poleward heat transport by the atmospheric heat engine. *Nature*, 2002, 415(6873): 774—777
- 47 Ozawa H, Ohmura A, Lorenz RD, et al. The second law of thermodynamics and the global climate system: A review of the maximum entropy production principle. *Rev Geophys*, 2003, 41(4), 1018, doi: 10. 1029/2002RG000113
- 48 Sandström JW. Meteorologiska studien im schwedischen Hochgebirge. Göteborgs Kungl Vetenskaps-och Vitterhetssamhälles Handl. 1916, 17: 1—48
- 49 Defant A. *Physical oceanography*. Pergamon, 1961, 1: 728
- 50 Vallis GK. *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation*. London: Cambridge University Press, 2006, 770
- 51 Guan YP, Huang RX. Stommel's box model of thermohaline circulation revisited: The role of mechanical energy supporting mixing and the wind-driven gyration. *J Phys Oceanogr*, 2008, 38: 909—917
- 52 Adkins JF, McIntyre K, Schrag DP. The salinity, temperature, and $\delta^{18}\text{O}$ of the glacial deep ocean. *Science*, 2002, 298: 1769—1773
- 53 Toggweiler JR, Russell J. Ocean circulation in a warming climate. *Nature*, 2008, 451: 286—288
- 54 Adkins JF, Pasquero C. Deep ocean overturning—then and now. *Science*, 2004, 306: 1143—1144
- 55 Rahmstorf S. Thermohaline ocean circulation. In: Elias SA, ed. *Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Amsterdam: Elsevier, 2006
- 56 Kuhlbrodt T, Griesel A, Montoya M, et al. On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation. *Rev Geophys*, 2007, 45, RG2001, doi: 10. 1029/2004RG000166
- 57 de Boer AM, Sigman DM, Toggweiler JR, et al. Effect of global ocean temperature change on deep ocean ventilation. *Paleoceanography*, 2007, 22, PA2210, doi: 10. 1029/2005PA001242
- 58 Johnson HL, Marshall DP, Sproson DAJ. Reconciling theories of a mechanically driven meridional overturning circulation with thermohaline forcing and multiple equilibria. *Climate Dyn*, 2007, 29(7—8): 821—836
- 59 Nycander J, Nilsson J, Döös K, et al. Thermodynamic analysis of ocean circulation. *J Phys Oceanogr*, 2007, 37: 2038—2052
- 60 Stern ME. *Ocean Circulation Physics*. New York: Academic Press, 1975, 246
- 61 Jeffreys H. On the motions produced by differences of temperature and humidity. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1925, 51: 347—356
- 62 Stommel H. An example of thermal convection. *Trans Amer Geophys Un*, 1950, 31(4): 553—554
- 63 Stommel H, Veronis G. Steady convection in a horizontal layer of fluid heated uniformly from above and cooled non-uniformly from below. *Tellus*, 1957, 9: 401—407
- 64 Somerville RC. A non-linear spectral model of convection in a fluid unevenly heated from below. *J Atmos Sci*, 1967, 24: 665—676
- 65 Beardsley RC, Festa JF. A numerical model of convection driven by surface stress and non-uniform horizontal heating. *J Phys Oceanogr*, 1972, 2: 444—455
- 66 Pierce DW, Rhines PB. Convective building of a pycnocline: a two-dimensional nonhydrostatic numerical model. *J Phys Oceanogr*, 1997, 27: 909—925
- 67 Rossby T. Numerical experiments with a fluid heated non-uniformly from below. *Tellus A*, 1998, 50: 242—257
- 68 Killworth PD, Manins PC. A model of confined thermal convection driven by non-uniform heating from below. *J Fluid Mech*, 1980, 98: 587—607
- 69 Pierce DW, Rhines PB. Convective building of a pycnocline: laboratory experiments. *J Phys Oceanogr*, 1996, 26: 176—190
- 70 Hignett B, Ibbetson A, Killworth PD. On rotating thermal convection driven by non-uniform heating from below. *J Fluid Mech*, 1981, 109: 161—187
- 71 Speer KG, Whitehead JA. A gyre in a non-uniformly heated rotating fluid. *Deep-Sea Res A*, 1988, 35(6): 1069—1077
- 72 Ivey GN, Taylor JR, Coates MJ. Convectively driven mixed layer growth in a rotating, stratified fluid. *Deep Sea Res I*, 1995, 42(3): 331—349
- 73 Condie SA, Griffiths RW. Convection in a rotating cavity: Modelling ocean circulation. *J Fluid Mech*, 1989, 207: 453—474
- 74 Park YG, Whitehead JA. Rotating convection driven by differential bottom heating. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29(6): 1208—1220
- 75 Hart JE. Stability of the flow in a differentially heated inclined box. *J Fluid Mech*, 1971, 47: 547—576
- 76 Jacobs P, Ivey GN. The influence of rotation on shelf convection. *J Fluid Mech*, 1998, 369: 23—48
- 77 Godske CL. Note on the apparent discrepancy between Bjerknes-Sandström and H Jeffrey's. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1936, 62: 446—449
- 78 Jeffrey's H. Note on Dr. Godske's paper. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1936, 62: 449—450
- 79 Colin de Verdière A. On the oceanic thermohaline circulation. In: Willebrand J, Anderson DLT eds. *Modelling Oceanic Climate Interactions*. Berlin: Springer-Verlag, 1993, 151—184
- 80 Marchal O. Particle transport in horizontal convection: Implications for the "Sandström theorem". *Tellus A*, 2007, 59(1): 141—154
- 81 Straub D. An inconsistency between two classical models of the

- ocean buoyancy driven circulation. *Tellus A*, 1996, 48: 477—481
- 82 Greatbatch RJ, Lu J. Reconciling the Stommel box model with the Stommel-Arons model: A possible role for Southern Hemisphere wind forcing? *J Phys Oceanogr*, 2003, 33: 1618—1632
- 83 Olbers D. A gallery of simple models from climate physics. In: Imkeller P, von Storch J-S eds. *Stochastic Climate Models*. Progress in Probability, Vol. 49, Birkhäuser, 2001, 3—63
- 84 Wunsch C. The work done by the wind on the oceanic general circulation. *J Phys Oceanogr*, 1998, 28: 2332—2340
- 85 Walin G. On the possibility of a reversed thermohaline circulation. In: Lundberg P, ed. *Nordic Perspectives on Oceanography: Studies in Honour of Börje Kullenberg*, 11 May 1986. Göteborg: 1990, 145—154
- 86 Wunsch C. Thermohaline loops, Stommel box models, and the Sandström theorem. *Tellus A*, 2005, 57: 84—99
- 87 Wunsch C. Journal club. *Nature*, 2006, 439(7076): 513
- 88 Mullarney JC, Griffiths RW, Hughes GO. Convection driven by differential heating at a horizontal boundary. *J Fluid Mech*, 2004, 516: 181—209
- 89 Coman MA, Griffiths RW, Hughes GO. Sandström's experiments revisited. *J Mar Res*, 2006, 64: 783—796
- 90 Hughes GO, Griffiths RW, Mullarney JC, et al. A theoretical model for horizontal convection at high Rayleigh number. *J Fluid Mech*, 2007, 581: 251—276
- 91 Hughes GO, Griffiths RW. Horizontal convection. *Ann Rev Fluid Mech*, 2008, 40: 185—208
- 92 Gade HG, Gustafsson KE. Application of classical thermodynamical principles to the study of the oceanic overturning circulation. *Tellus A*, 2004, 56: 371—386
- 93 Jin XZ, Zhang XH, Zhou TJ. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16: 197—215
- 94 周天军, 宇如聪, 刘喜迎, 等. 一个气候系统模式中大洋热盐环流对全球增暖的响应. *科学通报*, 2005, 50(3): 269—275
- 95 Paparella F, Young WR. Horizontal convection is non-turbulent. *J Fluid Mech*, 2002, 466: 205—214
- 96 Siggers JH, Kerswell RR, Balmforth NJ. Bounds on horizontal convection. *J Fluid Mech*, 2004, 517: 55—70
- 97 Huang RX, Jin XZ. Gravitational potential energy balance for the thermal circulation in a model ocean. *J Phys Oceanogr*, 2006, 36: 1420—1429
- 98 Gnanadesikan A, Slater RD, Swathi PS, et al. The energetics of ocean heat transport. *J Climate*, 2005, 18: 2604—2616
- 99 Schmittner A, Weaver A. Dependence of multiple climate states on ocean mixing parameters. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 1027—1030
- 100 Prange M, Lohmann G, Paul A. Influence of vertical mixing on the hysteresis: Analysis of an OGCM. *J Phys Oceanogr*, 2003, 33: 1707—1721
- 101 Toggweiler JR, Samuels B. Is the magnitude of the deep outflow from the Atlantic Ocean actually governed by Southern Hemisphere winds? In: Heimann M, ed. *The Global Carbon Cycle*. Berlin; Heidelberg; Springer-Verlag, 1993, 303—331
- 102 Toggweiler JR, Samuels B. Effect of Drake Passage on the global thermohaline circulation. *Deep Sea Res I*, 1995, 42: 477—500
- 103 Toggweiler JR, Samuels B. On the ocean's large scale circulation in the limit of no vertical mixing. *J Phys Oceanogr*, 1998, 28: 1832—1852
- 104 Lumpkin R, Speer K. Global ocean meridional overturning. *J Phys Oceanogr*, 2007, 37(10): 2550—2562
- 105 Toggweiler JR, Russell J. Ocean circulation in a warming climate. *Nature*, 2008, 451(7176): 286—288
- 106 McDermott DA. The regulation of northern overturning by Southern Hemisphere winds. *J Phys Oceanogr*, 1996, 26: 1234—1255
- 107 Oke P, England M. Oceanic response to changes in the latitude of the Southern Hemisphere subpolar westerly winds. *J Climate*, 2004, 27: 1040—1054
- 108 Hirabara M, Ishizaki H, Ishikawa I. Effects of the westerly wind stress over the southern ocean on the meridional overturning. *J Phys Oceanogr*, 2007, 37(8): 2114—2132
- 109 Tsujino H, Sugihara N. Thermohaline circulation enhanced by wind forcing. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 1506—1516
- 110 Nof D. Does the wind control the import and export of the South Atlantic? *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 2650—2667
- 111 Rahmstorf S, England M. Influence of Southern Hemisphere winds on North Atlantic deep water flow. *J Phys Oceanogr*, 1997, 27: 2040—2054
- 112 Russell JL, Dixon KW, Gnanadesikan A, et al. The Southern Hemisphere westerlies in a warming world: Propping open the door to the deep ocean. *J Climate*, 2006, 19: 6382—6390
- 113 Marotzke J, Scott JR. Convective mixing and the thermohaline circulation. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 2962—2970
- 114 St Laurent L, Garrett C. The role of internal tides in mixing the deep ocean. *J Phys Oceanogr*, 2002, 32: 2882—2899
- 115 Garrett C, St Laurent L. Aspects of deep ocean mixing. *J Oceanogr*, 2002, 58: 11—24
- 116 Wang W, Huang RX. Wind energy input into the Ekman layer. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 1267—1275
- 117 Wang W, Huang RX. Wind energy input into the surface waves. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 1276—1280
- 118 Scott JR, Marotzke J. The location of diapycnal mixing and the meridional overturning circulation. *J Phys Oceanogr*, 2002, 32(12): 3578—3595

- 119 Furue R, Endoh M. Effects of the Pacific diapycnal mixing and wind stress on the global and Pacific meridional overturning circulation. *J Phys Oceanogr*, 2005, 35(10): 1876—1890
- 120 Palmer M D, Naveira Garabato AC, Stark JD, et al. The influence of diapycnal mixing on quasi-steady overturning states in the Indian Ocean. *J Phys Oceanogr*, 2007, 37(9): 2290—2304
- 121 Boos WR, Scott JR, Emanuel KA. Transient diapycnal mixing and the meridional overturning circulation. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34(1): 334—341
- 122 Mohammad R, Nilsson J. The role of diapycnal mixing for the equilibrium response of thermohaline circulation. *Ocean Dyn*, 2004, 54(1): 54—65
- 123 Marzeion B, Drange H. Diapycnal mixing in a conceptual model of the Atlantic meridional overturning circulation. *Deep-Sea Res II*, 2006, 53: 226—238
- 124 Marzeion B, Levemann A, Mignot J. The role of stratification-dependent mixing for the stability of the Atlantic overturning in a Global Climate Model. *J Phys Oceanogr*, 2007, 37(11): 2672—2681
- 125 Dalan F, Stone PH, Kamenkovich IV, et al. Sensitivity of the oceans' climate to diapycnal diffusivity in an EMIC, Part I: Equilibrium state. *J Climate*, 2005, 18: 2460—2481
- 126 Polzin KL, Toole JM, Ledwell JR, et al. Spatial variability of turbulent mixing in the Abyssal Ocean. *Science*, 1997, 276, 93—96
- 127 Webb DJ, Sugimotohara N. Vertical mixing in the ocean. *Nature*, 2001, 409, 37
- 128 Rudnick DL, Boyd TJ, Brainard RE. From tides to mixing along the Hawaiian Ridge. *Science*, 2003, 301, 355—357
- 129 Garrett C. Internal tides and ocean mixing. *Science*, 2003, 301: 1858—1859
- 130 Wunsch C. Moon, tides and climate. *Nature*, 2000, 405(6788): 743—744
- 131 Munk W, Bills B. Tides and the climate: Some speculations. *J Phys Oceanogr*, 2007, 37(2): 135—147
- 132 Egbert GD, Ray RD, Bills BC. Numerical modelling of the global semidiurnal tide in the present day and in the last glacial maximum. *J Geophys Res*, 2003, 109, C03003, doi: 10. 1029/2003JC001973
- 133 Thorpe AJ, Volkert H, Ziemianski MJ. The Bjerknes' circulation theorem: A historical perspective. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84(4): 471—480