科学通报 2013 年 第 58 卷 第 18 期：1706 ~ 1710
进 展 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

估计变动气候中大气和海洋经向热量输送

杨海军

北京大学气候与海-气实验室, 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871
E-mail: hjyang@pku.edu.cn

2012-11-19 收稿, 2012-12-18 接受, 2013-04-12 网络版发表
国家自然科学基金(40976007, 41176002)、国家重点基础研究发展计划(2012CB955201)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006022)资助

摘要 气候系统准平衡态的维持决定于大气-海洋的经向热量输送. 由于全球海陆分布南北半球严重不对称, 海洋向极热量输送关于赤道也是非对称的. 然而, 全球热量输送的一个最显著特征就是大气-海洋总经向热量输送关于赤道反对称. 这暗示着大气经向热量输送会弥补海洋热量输送的非对称性, 同时也说明大气与海洋热量输送之间存在着某种约束关系. 对这一基本问题的深入研究有可能揭示一些气候系统的关键约束因素, 减少复杂气候系统的自由度或不确定性, 使得人们能以更简洁的方式理解气候系统及其变化. 在变动气候背景下, 大气-海洋经向热量输送的变化以及这二者之间可能存在的"Bjerknes 补偿"关系的研究, 是目前气候变化研究领域前沿课题之一. "Bjerknes 补偿"所暗示的大气-海洋经向热量输送的协同变化揭示了海气系统的一个耦合方式, 将极大加深人们对复杂气候系统变化的理解.

关键词
经向热量输送
Bjerknes 补偿
耦合机制

估计大气-海洋系统中的经向热量输送是一个"古老"的问题. 大气和海洋将热量从赤道到极地的经向输送, 维持着地球系统热量收支的准平衡状态. 海气系统总经向热量输送可以通过积分大气层顶净辐射通量得到. 大气层顶净辐射通量定义为向下的太阳短波辐射与向上的长波辐射(OLR)之差. 早在 20 世纪 70 年代, 卫星观测的辐射通量刚刚出现之后, Vonder Haar 与 Oort[1]就估计了经向热量输送, 随后科学家们对此进行了大量研究[2~12]. 经向热量输送的准确估计直接依赖于对大气层顶进出辐射通量的精确观测, 目前最可靠的观测来自地球辐射收支实验(ERBE)与 Nimbus-7 卫星观测[9]. 这些观测给出了海气系统总经向热量输送的一个最显著特征: 向极热量输送关于赤道反对称, 最大输送约发生在 35°N/35°S, 大小约为±5.5 PW(1 PW=10^{15} W)(图 1)[11,12].

大气和海洋对总经向热量输送的分配问题一直是描述和理解气候与气候变化的中心议题[12]. 通常大气经向热量输送可以根据观测资料直接计算出来, 海洋经向热量输送即为总热量输送与大气输送之差. 尽管理论上海洋热量输送也可以直接计算, 但由于直接的海洋观测非常稀少, 大多数研究都用这种间接方法估计海洋热量输送. 这个方法假设陆地和海洋上的大气观测是准确的[11]. 总热量输送在大气和海洋中分配的大致图像是: 30°N/30°S 向极, 大气经向输送远大于海洋输送; 在热带区域, 越靠近赤道, 海洋输送越占主导(图 1)[12~14]. 具体说来, 大气经向热量输送在 43°N 和 40°S 附近达到极大值, 约为 5.0±0.14 PW. 在总经向热量输送达到极值的 35°N/35°S, 大气输送约占北(南)半球总输送的 78%(92%)[11]. 然而, 越往低纬度, 海洋输送分量所占比例越大, 在赤道附近超过了大气输送分量, 其极值位于赤道以北, 约为 2 PW. 南半球的海洋经向输送要弱得多, 主要因为南大西洋向赤道的热量输送减弱了海洋总的向南热量输送[12]. 这种热量输送在大气和海洋中的分配特征也是地球气候的一个显著特征. 研究表明, 即使在地质时间尺度上, 海陆板块构造显著改变, 甚或

引用格式: 杨海军. 估计变动气候中大气和海洋经向热量输送. 科学通报, 2013, 58: 1706–1710
英文版见: Yang H J. Assessing the meridional atmosphere and ocean energy transport in a varying climate. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-5665-x

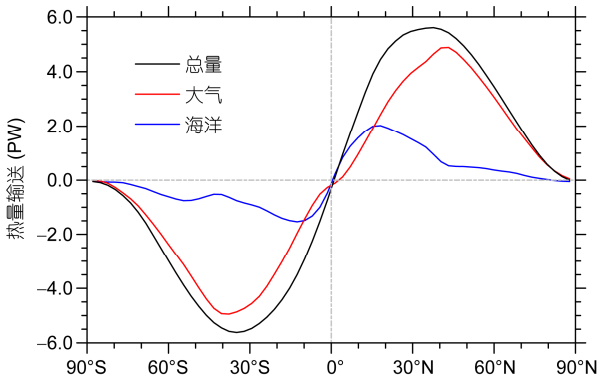


图 1　海气系统总的经向热量输送(黑线)、大气经向热量输送(红线)和海洋经向热量输送(蓝线)[11]

总热量输送根据大气层顶的净辐射通量计算得到, 大气输送根据 ERA40 资料计算, 海洋输送为前二者之差

在一个陆地完全被水覆盖的星球上, 这样的热量分配特征也不会有太大改变[14].

1　存在问题

“古老”的热量输送问题到目前为止并没有得到完美解决, 近年来又焕发出新的生命力. 因为在目前变动的气候背景下, 如人们正在经历并有望继续经历的全球持续性变暖, 基本的地球能量平衡有可能被暂时打破, 并且有可能向另一气候态漂移, 科学家们不得不重新思考有关地球能量平衡的一些根本性问题. 例如, 对于我们捻熟于心并视为当然成立的平均气候经向热量输送廓线(如图 1 所示), 如今人们仍有疑问: (1) 为什么总经向热量输送几乎关于赤道反对称, 而不管海洋热量输送具有极大非对称性这个事实? (2) 中高纬度总的热量输送中海洋的“真实”贡献到底是多少? 考虑到大气经向热量输送中的相当大一部分是以潜热输送的形式完成的, 而大气潜热事实上是由来自海洋的水汽供应维持着.

第一个问题的提出来自于南北半球海陆对比具有显著差异这个事实. 南半球的海洋经向热量输送非常弱(图 1)——这里有一种假象: 南大西洋热量输送指向赤道, 抵消了南太平洋和印度洋向南的输送, 从而减少了南半球海洋对总极向输送的贡献. 尽管有这样明显的半球非对称性, 大气-海洋结合在一起的总经向热量输送却存在显著的半球反对称性. 这样的反对称结构为什么存在、它又是如何维持的, 目前我们并不清楚. 有些研究认为在大气-海洋热量输送之间存在一个负反馈: 如果海洋输送减弱, 则大气输送就会补偿[15]. 但是, 这个负反馈过程我们并不清楚, 至于如何补偿就更不清楚了.

第二个问题的存在是因为相对短而稀疏的海洋观测资料妨碍了对海洋热量输送的精确估计. 不管是直接还是间接估计, 目前对海洋热量输送的估计还有很大的不确定性. 比如对中纬度海洋, 早期认为它占北半球总输送量的 50%左右[10], 后来又认为它只占 10%[11]. 然而, 因为大气热量输送的大部分是以潜热输送的形式完成的, 并且大气中水汽主要来源于海洋, 所以相当部分归于大气的热量输送其实应该是海洋大气共同完成的[12,16]. 对大气质量输送的详细诊断表明, 如果忽略水汽的贡献, 中纬度大气质量输送将减少高达 80%[14]. 换而言之, 如果没有海洋的水汽供应, 中纬度干空气的热量输送将远远低于湿空气的热量输送. 海洋实际上在目前观测到的中纬度大气热量输送中扮演至关重要角色. 重新评估中纬度海洋的真实贡献显得尤为重要.

除了上述关于平均气候的问题外, 关于变动气候中经向大气和海洋热量输送的变化也有大量未解决的科学问题. 这是目前气候变化研究的基础前沿领域之一, 在最近五年间已经吸引了广泛的注意. 这里的变动气候, 既包括气候的自然变率, 如海气耦合系统的年际、年代际及百年时间尺度气候变化, 又包括气候的强迫变率, 如与人类活动有关的大气中 CO_2 增加对气候系统的影响、两极海冰与陆冰的融化对大尺度海洋经向翻转流的冲击、火山爆发引起的气候突变等等. 过去 30 年间, 大量研究关注了气候态的总经向热量输送及其在大气-海洋热量输送中的分配, 但是对另一个同等重要的问题却关注很少, 即大气与海洋两分量热量输送的变率问题. 对后一问题研究较少的可能原因是缺乏可靠的长时间序列大气海洋通量的直接观测. 这个问题相当重要, 一个小的热量输送异常可能对应于大的气候状态漂移[17]. 假设在某种情况下, 海气系统总的经向热量输送减少了 10%——总量(5~6 PW)的 10%约为 0.5 PW. 对中高纬如 40°N 以北的地球表面积来说(~5.6×10^{13} m^2), 0.5 PW 的热量相当于 9 W m^{-2} 的大气辐射强度变化[12]. 这个数值远大于 CO_2 加倍可能造成的辐射通量异常(约 3~4 W m^{-2}), 也远远超过了自 1750 年以来人类活动对全球净辐射通量的影响(0.6~2.4 W m^{-2})[18]. 可以设想这个变化将会引起区域气候的重大改变.

近年来热量输送变化问题得到极大关注还因为

大西洋经向翻转流(AMOC)的变化对全球气候具有深远的影响. AMOC 的变化能非常明显地在海洋经向热量输送上体现出来. 根据 1957~2004 年间 25°N 附近的现场观测, AMOC 减弱了 30%, 向北的海洋热量输送减少了超过 20%[19]. 如此显著的海洋环流变化看起来似乎与观测到的北大西洋北部表层海水显著变淡一致[20]. 然而, 最新的强化观测表明, AMOC 具有非常强的短期气候变率, 变动范围在 4.0~34.9 Sv 之间[21]. 平均 AMOC 强度与它的标准差在量值上甚至是相当的. 观测到的 AMOC 变化, 正如 Bryden 等人[19]警告的那样, 非常不幸地与目前观测本身的不确定性量值相当, 也与 AMOC 的短期变率相当[21,22]. 从长期趋势来看, AMOC 是否在减弱, 以及它是否会引起北大西洋向极热量输送的减弱, 是全球气候变化中最重要的问题之一.

在无外热源强迫情况下, 在年代际或更长时间尺度上, 大气和海洋热量输送的变化倾向于呈现互为补偿的特征, 这就是所谓的“Bjerknes 补偿”假说(Bjerknes compensation)[17,23,24]. 20 世纪 60 年代, Bjerknes[25]提出: 如果大气层顶的辐射通量以及海洋的热容量变化不大的话, 气候系统总的热量输送也不会变化太多. 这暗示着海洋和大气热量输送异常变化应该是大小相等方向相反. 换而言之, 气候系统内部变率导致的大气或海洋任何一方的热量输送出现显著改变, 则另一方将不得不补偿. 这种简单的情景就是著名的“Bjerknes 补偿”假说. 如果它成立, 那么大气和海洋热量输送变化之间的关系可以看作气候系统的一个内部约束, 它会在相当大程度上减少气候系统的自由度或不确定性, 使我们更加深入洞悉海洋-大气耦合过程.

“Bjerknes 补偿”暗示, Bryden 等人[19]发现的北大西洋向北的海洋热量输送的减少将或多或少被向北的大气热量输送增加所补偿, 从而总的向北热量输送并不会变化太多, 因而西半球高纬度的气候也就变化不大. 值得强调的是, “Bjerknes 补偿”假设的前提是稳定的气候态, 大气层顶净辐射通量应该保持稳定, 地气系统没有额外的热强迫. 在全球变暖情况下, 地气系统有额外的热强迫, 地球总的经向热量输送如何变化、大气和海洋如何分配这种变化、“Bjerknes 补偿”在何种程度上成立是急待深入研究的问题. 在前面给出的例子中, 总的热量输送减弱 10%并不意味着海洋和大气的热量输送一定会成比例地都减弱 10%, 二者的变化有无穷多的组合. 如果“Bjerknes 补偿”在某种程度上成立, 将大大减少海气热量输送变化的任意性.

“Bjerknes 补偿”假说值得广泛而深入研究. 不幸的是, 如此干净利落的假说目前仅在有限的几个耦合模式中得到证实[17], 还没有被大多数其他耦合模式特别是实际观测资料所验证. 其正确性急待进一步确认. 如果它是合理的, 将会极大简化气候系统的复杂性, 减少系统的自由度. 然而, 正如所料, 一个新的研究前沿往往伴随着对一些基本性问题的争论. “Bjerknes 补偿”的适用性就是如此. 比如, 最初的研究认为它仅适用于北半球高纬度地区[17,23], 接下来的研究又认为它仅在热带地区成立[24]. 后者的研究又与 Held[13]的关于热带海洋-大气热量输送分配的框架性理论研究相左. Held[13]认为热带大气和海洋热量输送的变化应该是同向的, 而非 Bjerknes 所预言的反向. 另外, 目前的研究认为“Bjerknes 补偿”只局限在北半球, 甚或西半球. 至于为什么“Bjerknes 补偿”在南半球以及北半球的东半球不明显需要明确的解释. 要了解变动气候背景下经向大气和海洋热量输送这方面的详细研究进展, 请进一步参考 Vallis 与 Farneti[26].

在 2011~2012 年, 经向热量输送的 Bjerknes 补偿问题得到了进一步研究. Yang 等人[27]利用耦合气候模式分别测试了北半球高纬度的海冰融化及海面风场强迫对经向热量输送的影响. 在他们的系列试验中, 不管是在北大西洋高纬度注入淡水还是改变全球海平面风的强度, 均对地气系统的总能量收支没有显著改变. 因此这些试验满足 Bjerknes 补偿假说的前提条件. 海洋热量输送的减少几乎完全可以被大气的极向热量输送的增加所补偿, 这种补偿几乎在所有纬度都成立, 与先前研究有所不同. 在淡水试验中[27], AMOC 减弱导致北(南)半球海洋变冷(暖), 在减少向极海洋热量输送的同时增强了南北半球的温度差异, 从而增强的冬季的哈德莱环流. 这反过来增加了大气的极向热量输送, 从而弥补了海洋经向热量输送的减少. 在风强迫试验中(Yang 等人未发表数据), 风减弱会使得风生环流及热盐环流都减弱, 海洋经向热量输送进一步减少. 赤道海水温度升高而赤道外海洋变冷, 赤道大气深对流加强, 导致哈德莱环流上升支向赤道移动并且环流强度增强, 从而反过来增强了大气经向热量输送. 他们的研究强调外强迫变化导致的大尺度海洋-大气环流的调整, 强

调大气环流滞后于海洋环流的变化, 大气环流与海洋环流的反向变化导致了经向热量输送变化的互为补偿. Farneti 与 Vallis[28]的最新工作也得到了类似的结论, 他们利用完全耦合的气候模式(GFDL CM2.1)、中等复杂的气候模式(GFDL ICCM)和一个简单能量平衡模式(EBM), 研究了气候系统内部变率中的能量补偿问题. 在年代际或以上时间尺度上, Bjerknes 补偿能很好成立. 他们认为这种补偿成立的最根本原因在于大气能量输送的高效本性, 即大气对外强迫的响应非常迅速高效, 从而可以很好弥补别的子系统的能量输送变化. 在这些最新研究中, 对云的辐射效应以及云与辐射之间的反馈过程没有仔细研究, 因而对 Bjerknes 补偿的机制的认识是不完善的.

2 研究焦点

我们应当深入研究海气经向热量输送的结构及维持机制, 并密切关注变动气候中经向热量输送的变化以及海洋-大气之间的约束关系, 明确“Bjerknes 补偿”的有效性. 在稳定气候背景下, 需要弄清楚到底是什么机制维持了总经向热量输送半球反对称性. 为什么南北半球海陆对比的显著差异对这种反对称结构影响不大? 海洋经向热量输送, 特别是中高纬度海洋热量输送对总经向热量输送的贡献到底是多少? 风生环流和热盐环流在海洋经向热量输送中的相对贡献是多少? 海洋中的混合过程对热量输送的影响如何定量? 对热量输送的讨论一定要基于质量守恒的前提, 因此定量研究不同深度不同层次海水的热量输送尤为具有挑战性.

在对经向热量输送自然变率的研究中, 应重点关注年代际或更长时间尺度的变率. 通过观测和数值模式研究大气-海洋经向热量输送变化之间的“Bjerknes 补偿”是否成立, 并进一步探讨这个关系在哪些纬度带成立及其补偿程度, 到底是哪些动力和热力过程导致了大气-海洋热量输送必须相互补偿. 在地气系统没有额外热力强迫, 但平均气候态发生漂移的情况下, “Bjerknes 补偿”是否依然成立, 以及大气-海洋大尺度经圈环流如何调整也应是未来研究的重点方向之一.

在目前全球变暖过程中, 海气系统经向热量输送如何调整, 以及海气之间的“Bjerknes 补偿”关系是否仍然成立, 是否会扮演一个约束机制以避免气候系统发生显著漂移将必然是未来气候变化研究中的一个最热门的课题之一. 综上所述, 估计变动气候中的大气-海洋经向热量输送不仅会极大加深对海气耦合物理过程的理解, 而且可以指导科学地预测未来气候变化的总体方向.

参考文献

1 Vonder Haar T H, Oort A H. A new estimate of annual poleward energy transport by the oceans. J Phys Oceanogr, 1973, 3: 169–172
2 Oort A H, Vonder Haar T H. On the observed annual cycle in the ocean-atmosphere heat balance over the Northern Hemisphere. J Phys Oceanogr, 1976, 6: 781–800
3 Trenberth K E. Mean annual poleward energy transports by the oceans in the Southern Hemisphere. Dyn Atmos Oceans, 1979, 4: 57–64
4 Masuda K. Meridional heat transport by the atmosphere and the ocean: Analysis of FGGE data. Tellus, 1988, 40A: 285–302
5 Carissimo B C, Oort A H, Vonder Haar T H. Estimating the meridional energy transports in the atmosphere and ocean. J Phys Oceanogr, 1985, 15: 82–91
6 Savijärvi H I. Global energy and moisture budgets from rawinsonde data. Mon Weather Rev, 1988, 116: 417–430
7 Michaud R, Derome J. On the mean meridional transport of energy in the atmosphere and oceans as derived from six years of ECMWF analyses. Tellus, 1991, 43A: 1–14
8 Peixoto J P, Oort A H. Physics of Climate. New York: American Institute of Physics, 1992. 520
9 Bess T D, Smith G L. Earth radiation budget: Results of outgoing longwave radiation from Nimbus-7, NOAA-9, and ERBS satellites. J Appl Meteorol, 1993, 32: 813–824
10 Trenberth K E, Solomon A. The global heat balance: Heat transports in the atmosphere and ocean. Clim Dyn, 1994, 10: 107–134
11 Trenberth K E, Caron J M. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. J Clim, 2001, 14: 3433–3443
12 Wunsch C. The total meridional heat flux and its oceanic and atmospheric partition. J Clim, 2005, 18: 4374–4380
13 Held I M. The partitioning of the poleward energy transport between the tropical ocean and atmosphere. J Atmos Sci, 2001, 58: 943–948
14 Czaja A, Marshall J. The partitioning of poleward heat transport between the atmosphere and ocean. J Atmos Sci, 2006, 63: 1498–1511
15 Stone P H. Constraints on dynamical transports of energy on a spherical planet. Dyn Atmos Oceans, 1978, 2: 123–139

16 Bryden H L, Imawaki S. Ocean heat transport. In: Siedler G, Church J, Gould J, eds. Ocean Circulation and Climate. San Diego: Academic Press, 2001. 455–474
17 Swaluw E, Drijfhout S S, Hazeleger W. Bjerknes compensation at high northern Latitudes: The ocean forcing the atmosphere. J Clim, 2007, 20: 6023–6032
18 IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 996
19 Bryden H L, Longworth H R, Cunningham S A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N. Nature, 2005, 438: 655–657
20 Curry R, Mauritzen C. Dilution of the Northern North Atlantic Ocean in recent decades. Science, 2005, 308: 1772–1774
21 Cunningham S A, Kanzow T, Rayner D, et al. Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5°N. Science, 2007, 317: 935–938
22 Church J A. A change in circulation? Science, 2007, 317: 908–909
23 Shaffrey L C, Sutton R T. Bjerknes compensation and the decadal variability of the energy transports in a coupled climate model. J Clim, 2006, 19: 1167–1181
24 Vellinga M, Wu P. Relations between northward ocean and atmosphere energy transport in a coupled climate model. J Clim, 2008, 21: 561–575
25 Bjerknes J. Atlantic air-sea interaction. Adv Geophys, 1964, 10: 1–82
26 Vallis G K, Farneti R. Meridional energy transport in the atmosphere-ocean system: Theory and numerical experiments. Q J R Meteorol Soc, 2009, 135: 1643–1660
27 Yang H, Wang Y, Liu Z. A modelling study of the Bjerknes compensation in the meridional heat transport in a freshening ocean. Tellus, 2013, 65, doi: 10.3402/tellusa.v65i0.18480
28 Farneti R, Vallis G K. Meridional energy transport in the coupled atmosphere-ocean system: Compensation and partitioning. J Clim, 2013, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00133.1