

北太平洋经向翻转环流和热盐输送研究综述

刘洪伟^{1,2,3,4}, 张启龙^{1,2,3}, 段永亮⁵, 徐永生^{1,2,3}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 国家海洋局第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237; 5. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋与气候研究中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 北太平洋经向翻转环流是北太平洋所有经向翻转环流圈的总称, 目前它拥有五个环流圈, 即副热带环流圈(the subtropical cell, STC)、热带环流圈(the tropical cell, TC)、副极地环流圈(the subpolar cell, SPC)、深层热带环流圈(the deep tropical cell, DTC)和温跃层环流圈(the thermohaline cell, THC)。这些环流圈是北太平洋经向物质和能量交换的重要通道, 它们的变化对海洋上层热盐结构和气候变化皆有重要影响。迄今, 人们已对 STC、TC 和 DTC 的结构形态、变化特征与机理开展了广泛而深入的研究, 并对 STC 的极向热输送特征也做了一些初步分析。但应指出的是, 关于 SPC 和 THC 的研究仍较少, 迄今尚不清楚这两个环流圈的三维结构和变异机理; 而且, 对北太平洋经向翻转环流的热盐输送研究尚处于起步阶段, 目前对各环流圈的热盐输送特征、变化规律和变异机理仍知之甚少, 这些科学问题亟待深入研究。

关键词: 北太平洋; 经向翻转环流; 热盐输送

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2016)01-0155-06

doi: 10.11759/hyxx20150210001

北太平洋经向翻转环流(NPMOC)是北太平洋所有经向翻转环流圈的总称, 目前它拥有五个环流圈: 副热带环流圈(the subtropical cell, STC)^[1-2], 热带环流圈(the tropical cell, TC), 副极地环流圈(the subpolar cell, SPC)^[3]、深层热带环流圈(the deep tropical cell, DTC)^[4]和温跃层环流圈(the thermohaline cell, THC)^[5]。STC 是连接海洋表层副热带下沉和赤道上升的经圈环流, 表层的向极流将赤道和热带的暖水输送到副热带, 而温跃层中的向赤道流则将副热带的冷水向赤道输送。因此, STC 被认为是北太平洋热带和副热带上层海洋热盐交换的桥梁^[1, 6-7], 它的变化可以影响到北太平洋热带和副热带之间的热盐结构, 从而对热带北太平洋海表温度和 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)的年代际变化产生重要影响^[8-13], 继而影响到全球的气候变化^[1, 6-7, 14]。不仅如此, STC 还是北太平洋赤道潜流水源的重要贡献者^[3]。TC 是一个在赤道上升、热带下沉的经向环流圈, 它将表层暖水向下输送, 并为赤道潜流提供部分水源^[3]。由于 DTC 位于北太平洋的 TC 和 STC 之间, 并对 STC 的向南输送有阻挡作用, 因而 DTC 的存在和变化直接影响到北太平洋副热带冷水到达赤道的多寡^[4]。SPC 和 THC 在北太平洋高纬海域的热量交换中均有重要作用^[5],

它们的变化对北太平洋副热带和副极地之间的热盐结构和气候变化皆有重要影响。由于这些环流圈是北太平洋经向物质和能量交换的重要通道, 因此, 自 20 世纪 90 年代以来, 人们已就其结构形态、变化特征与机理及其对 ENSO 的影响进行了较多研究, 并对 STC 的热输送特征和变异机制进行了初步分析, 取得了一些重要成果。本文对北太平洋经向翻转环流和经向热盐输送方面的研究进展进行了综述, 并提出了需要进一步研究的科学问题, 以期为深入开展北太平洋经向翻转环流的热盐输送研究提供有利的参考依据。

收稿日期: 2015-02-10; 修回日期: 2015-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(41406012); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放基金(SOED1613); 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室开放基金(GCMAC1501); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目—物理海洋与气候(U1406401)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41406012; Open Fund of State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics(Second Institute of Oceanography), No.SOED1613; Open Fund of Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, SOA, No.GCMAC1501; NSFC-Shandong Joint Fund for Marine Science Research Centers, No.U1406401]

作者简介: 刘洪伟(1985-), 女, 河北衡水人, 汉族, 助理研究员, 博士, 主要从事物理海洋方面研究, 电话: 0532-88298823, E-mail: liuhongwei@qdio.ac.cn

1 北太平洋经向翻转环流

本节分别综述北太平洋经向翻转环流的结构特征、变化规律和变异机理方面的研究进展。

1.1 北太平洋经向翻转环流的结构特征和变化规律

Bryan^[5]在对比分析海洋环流模式的模拟能力时发现,在北太平洋有三个经向翻转环流圈,即 THC、SPC 和 STC,并给出了它们所在的位置。其中,THC 位于 $25^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$,它的垂向范围最深可达 3 000 m 以深,而 SPC 和 STC 均较浅,仅限于 500 m 以浅水层,分别位于 $25^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 和 $0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 。后来, Lu 等^[3]利用三层半海洋模式研究 STC 对赤道潜流的贡献时发现,在北太平洋($0^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$)共有 3 个环流圈,即 TC、STC 和 SPC,而在南太平洋($0^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{S}$)仅有 TC 和 STC。其中,北太平洋的 TC 和 STC 分别位于 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 和 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间,而 SPC 则位于 $30^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 。这些环流圈也都较浅,皆位于 500 m 以浅水层。周天军等^[15]基于 GOALS 模式的模拟结果得出,在南、北太平洋各存在着一个 STC,其中北太平洋的 STC 在 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 下沉,而在 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 上升。显然,周天军等^[15]的模拟结果与 Lu 等^[3]和 Bryan^[5]的结果有很大差异。这表明,使用不同的模式得到的结果有较大差异。

由于以往的研究结果皆是通过数值模拟手段得到的,因此需要用观测资料来加以证实。于是, Liu 等^[4]运用 SODA 资料较为系统地研究了北太平洋经向翻转环流的三维结构。他们的结果表明,在北太平洋($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$)除了 TC、STC 和 SPC 外,还有一个 DTC。其中,TC 位于 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 之间,并在 $175^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{W}$ 之间发生翻转;STC 位于 $7^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间,其翻转区域较 TC 西移了约 20° ,大致在 $155^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 之间;SPC 位于 $35^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 之间,是一个较弱的环流圈;而 DTC 位于 100~1 200 m 水层,并在 3°N 附近下沉、在 10°N 附近上升,其翻转区域大致在 $160^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{W}$ 之间。

随着调查资料的增多和高分辨率同化数据的不断涌现,针对北太平洋某些环流圈变化特征的研究也在逐步深入。Liu 等^[4]通过 SODA 资料的分析发现,北太平洋 STC 的中心位置存在着明显的季节变动,并与 DTC 的强弱变化有着密切的联系。其中,在冬、春季节, DTC 较弱且下沉,其上边缘下移至 150 m 附近,因而使得 STC 向南扩展,并靠近 TC,从而在 $0^{\circ}\sim 18^{\circ}\text{N}$ 之间形成了一个较大尺度的环流圈,这有利

于北太平洋副热带冷水直接到达赤道;而在夏、秋季节, DTC 增强且上升,其上边缘可上移至海面,因而迫使 STC 北缩,范围变小,并远离 TC,在此情况下,北太平洋副热带冷水难以抵达赤道。很显然, DTC 的存在和变化将直接影响到北太平洋副热带冷水到达赤道的多寡,这对 Lu 等^[16]提出的有关“位涡障碍”导致北太平洋副热带冷水不能直接到达赤道的观点提出了质疑。

由于 STC 的向赤道输送减少对赤道太平洋海表温度(SST)的升高有直接的影响,因此 STC 的年际和年代际变化也已引起了人们的重视,并对其开展了较多研究。在以往的研究中,通常将经过 9°N (或 10°N)断面的南向体积输送作为北半球 STC 的强度指标,而将经过 9°S (或 10°S)断面的北向体积输送作为南半球 STC 的强度指标。研究发现, STC 的强度皆存在着显著的年际和年代际变化。其中, STC 的年际变化与 ENSO 循环相联系,即在 El Niño 期间它减弱,而在 La Niña 期间则增强^[17-19]; STC 的年代际变化特征主要表现为: 20 世纪 70~90 年代它处于减弱时期,而在 1990 年之后则开始增强^[11, 18-21]。Lohmann 等^[22]分析了 TC 和 STC 的年代际变化与 Niño4 区 SST 之间的关系,也得到了 TC 和 STC 的异常减弱与赤道西太平洋 SST 异常上升相联系的事实。而且,经过 5°S 和 5°N 这两个断面的向赤道体积输送也存在着与 ENSO 相联系的年际变化^[13, 23]。但是, Capotondi 等^[18]却认为, STCs 的向赤道输送变化并不能直接对 ENSO 产生影响。这与以前有关 STCs 的向赤道输送变异对 ENSO 有影响的观点明显不同^[8-9]。

最近, Liu 等^[24]利用 SODA 资料较为系统地研究了北太平洋 TC 和 STC 的年际变化。但与以往研究不同的是,他们将经过 3°N 断面(TC 的中心所在纬度)的北、南向输送分别作为 TC 的上、下支强度指标,而将经过 STC 中心位置(存在着经向移动)所在断面的北、南向输送分别作为其上、下支强度指标^[24]。他们认为, TC 的上、下支强度具有同位相年际振荡,但其下支落后于上支约 5 个月;而 STC 上、下支强度的年际变化则是反向的,其下支落后于上支约 1 个月。并且, TC 和 STC 的下支强度均在 El Niño 期间减弱,而在 La Niña 期间增强,但它们的年际变化均落后于 ENSO(用 Niño3 区 SSTA 作为 ENSO 指数)约 4 个月。这与 Capotondi 等^[18]的结果相吻合,即 STC 向赤道输送的年际变化并不能对 ENSO 产生影响,而是对 ENSO 的一种响应。此外,自 20 世纪 70 年代以来, TC

和 STC 的下支强度均呈减弱趋势,但它们的上支强度却无此现象。

1.2 北太平洋经向翻转环流的变异机理

McCreary 等^[2]基于两层半海洋模式的模拟结果认为,STC 的强度是由副热带南侧下沉为零的纬度上的风应力和科氏参数决定的,而与副热带 Ekman 抽吸速度及热带风场强度无关。这一观点得到了 Lu 等^[3]的三层半海洋模式结果的支持。而且,他们还指出,TC 的强度是由热带太平洋的非等密度水混合决定的。但后来的资料分析和数值模拟研究均得到了与之不同的结果。Liu 等^[24]通过分析 SODA 和风应力资料认为,在北半球,TC 和 STC 向极输送的季节和年际变化都是由局地纬向风异常引起的,而其向赤道输送则与所在纬度上的海平面东、西向坡度的季节和年际变化有关。Lee 等^[20]的数值模拟结果表明,近赤道风应力异常引起了 STC 向赤道输送的变化,而 Capotondi 等^[18]则认为,STC 向赤道输送的年际变化在 10°S 和 13°N 断面最显著,这与局地风异常和第一斜压 Rossby 波有关。在这两个断面上,纬向风异常激发了西传的第一斜压 Rossby 波,使得温跃层深度发生剧烈变化,从而导致 STC 向赤道输送的变化增大^[25]。而容新尧等^[26]的数值试验结果却显示,赤道及其两侧的纬向风异常对 STC 的向赤道输送变化都有重要影响,而赤道外风应力旋度变化引起的斜压 Rossby 波对 STC 向赤道输送的影响却较小。此外, Lohmann 等^[22]基于敏感性数值试验得出,赤道太平洋(5°S~5°N)风应力异常引起了 TC 的年代际变化,而赤道外风应力异常对 STC 的年代际变化却有重要作用。

综上所述不难看出,人们已对 STC、TC 和 DTC 的结构特征、变化规律和变异机制开展了广泛而深入的研究,但对 THC 和 SPC 的研究却较少,迄今尚不清楚这两个环流圈的三维结构和变异机理。

2 北太平洋经向翻转环流的热盐输送

对于全球气候系统而言,热带存在太阳辐射盈余,而极地则存在太阳辐射亏损。为了保持整个系统的热量平衡,在低纬与高纬之间必须存在着强的经向热量输送。在此热量输送过程中,海洋环流起着至关重要的作用,它将低纬度海域的热量向高纬海域输送,并把大量的热量释放给大气,再由大气环流将热量向更高纬度输送。北太平洋是太平洋低纬与高纬海域经向热量和盐量交换的主要通道。其中,极

向的热盐输送主要是通过西边界强流(黑潮)和表层的埃克曼环流完成的,而向赤道的热盐输送则主要是由东边界流(加利福尼亚流)和大洋内部的热盐环流(包括经向翻转环流)完成的^[27-29]。因此,自 20 世纪 90 年代以来,人们已对北太平洋经向热盐输送开展了较多研究,但有关北太平洋经向翻转环流热盐输送的研究却较少,仅有零星报道。为了能够全面了解有关北太平洋经向热盐输送方面的研究进展,本节分别对北太平洋经向翻转环流热盐输送和北太平洋经向热盐输送的研究现状进行了概述。

目前,对北太平洋经向翻转环流热盐输送的研究主要集中于 STC 的向极热输送方面。Klinger 等^[30]基于 MOM2 模式的模拟结果指出,STC 存在着较强的向极热输送,其最大值为 0.3×10^{15} W,热输送的强弱变化主要是由风应力和海表温度共同引起的。而且, Riccardo 等^[31]认为,STC 的减弱及其向极热输送的减少使得赤道海域出现了正的海表温度异常。前已提及,在北太平洋共有 5 个环流圈,而仅研究 STC 的向极热输送是远远不够的,还应研究其向赤道的热输送,而且还应探究其它环流圈的经向热输送,唯有如此方能全面了解北太平洋经向热输送的来源和路径。由此可见,关于北太平洋经向翻转环流热盐输送的研究仍不够全面、深入,迄今对各环流圈热盐输送的基本特征、变化规律和变异机理仍知之甚少,亟待深入研究。

虽然对北太平洋经向热盐输送的研究相对较多,但在某些方面仍存在着一些不同的观点和认识。Bryden 等^[32]分析了 24°N 断面的经向热输送,得出净北向热输送为 0.75×10^{15} W。其中,黑潮热输送为 1.73×10^{15} W, Ekman 热输送为 0.93×10^{15} W,而中大洋的地转热输送为 -1.91×10^{15} W。Roemmich 等^[33]利用水文观测数据估算了跨 22°N 断面的热输送为 0.83×10^{15} W。Zhang 等^[34]利用直接观测数据与模式分析了北太平洋 24°N 断面经向热输送的季节变化,结果表明在总的经向热输送(0.62×10^{15} W)中,翻转环流的经向热输送约占 $2/5(0.37 \times 10^{15}$ W)。方国洪等^[35]的数值模拟结果表明,黑潮向东海输送的热量和盐量分别为 2.32×10^{15} W 和 894×10^6 kg/s。张启龙等^[36]利用东海 PN 断面的温盐资料得出,黑潮的多年平均热输送为 1.67×10^{15} W。而孙双文等^[37]的数值模拟结果则表明,黑潮向东海的年均热输送约为 0.17×10^{15} W。Zheng 等^[38]利用 1958~2004 年的 SODA 数据计算了热带太平洋的经向热输送的结果表明,跨 10°N 断面

的热输送为 0.28×10^{15} W, 跨 20°N 断面的热输送为 0.53×10^{15} W。显然, 不同的学者利用不同的数据或方法, 得到的结果有很大的不同。

最近, 厉萍等^[29-30]利用 1958~2007 年的月平均 SODA 资料, 较为系统地研究了北太平洋经向热盐输送的季节变化特征和机制。结果表明, 北太平洋净经向热盐输送存在着明显的区域性特征。其中, 在 $6.5^\circ\sim 12.5^\circ\text{N}$ 之间北太平洋主要向南输送热量和盐量, 其最大值分别为 -0.35×10^{15} W 和 -48.8×10^7 kg/s, 皆出现在 8°N 附近; 而在 12.25°N 以北海域, 北太平洋则主要向北输送热量和盐量, 其最大值分别为 1.49×10^{15} W 和 61.35×10^7 kg/s, 皆位于 24°N 附近; 在 14°N 以南海域热盐输送的季节变化较显著, 而以北海域热盐输送的季节变化则相对较小; 北太平洋净经向热盐输送的季节变化在很大程度上是由同一纬度上的 Ekman 流和西、中、东太平洋地转流共同引起的。

此外, 张启龙等^[36]的研究还表明, 黑潮热输送的年际和年代际变化都很明显, 并在 1976 年前后发生了一次由弱到强的气候跃变。而孙双文等^[37]的数值模拟结果也表明, 黑潮对东海的热量输运具有冬季大、夏季小的季节特征, 而其年际变化则与厄尔尼诺现象密切相关。但应指出的是, 他们模拟的黑潮热输送量都明显偏小。

由此可见, 关于北太平洋经向翻转环流热盐输送的研究尚不够全面、深入, 因而对各环流圈热盐输送的基本特征、变化规律和变异机理仍不清楚, 而且对各环流圈在北太平洋经向热盐输送中的贡献迄今仍不得而知。

3 需要进一步研究的科学问题

综上所述可知, 当前人们已在北太平洋经向翻转环流的结构特征和变异机理方面开展了较多研究, 并对北太平洋经向热盐输送进行了一些分析, 但对北太平洋经向翻转环流热盐输送的研究却极少。因此, 迄今尚有许多科学问题仍未得到圆满解答, 亟待深入研究。当前, 需要进一步研究的科学问题主要如下。

前文已提到, 在北太平洋共有 5 个翻转环流圈 (TC、STC、DTC、SPC 和 THC)。目前人们已对 STC、TC 和 DTC 的结构特征、变化规律和变异机制开展了广泛而深入的研究, 但对 THC 和 SPC 的研究却极少, 迄今尚不清楚这两个环流圈的三维结构和变异机理。因此, 研究这两个环流圈的三维结构、变化特

征和机理, 不仅有助于揭示北太平洋经向翻转环流的结构特征, 而且也有助于全面了解北太平洋经向热盐交换的过程和机制。

以往的研究表明, 北太平洋经向翻转环流属于多环结构, 而且大部分环流圈皆存在着显著的季节和年际变化。那么, 这些环流圈对北太平洋经向热盐输送的贡献究竟有多大? 而且, 各环流圈的热盐输送是否也存在着季节和年际变化? 因此, 深入研究各环流圈经向热盐输送的基本特征及其变化规律, 并分别探讨各环流圈之间在热盐输送过程中的相互联系和相互作用, 不仅有助于揭示北太平洋内部的热盐输送通道, 而且也有助于认识北太平洋经向翻转环流热盐输送的变化特征。

众所周知, 北太平洋经向翻转环流的季节和年际变化主要是由北太平洋风应力和海洋波动 (Rossby 波) 等动力要素共同引起的, 而 STC 的向极热输送则与风应力和 SST 有关。那么, 风应力和海洋波动是否对环流圈的热盐输送变化也有影响? 浮力通量 (太阳辐射、蒸发、降水)、水温和盐度等热力要素对热盐输送变化的影响如何? 这些科学问题迄今仍不清楚, 值得深入研究。因此, 研究不同海域的动力强迫和热力要素对环流圈热盐输送变化的影响, 有利于揭示北太平洋经向翻转环流热盐输送的变异机理。

参考文献:

- [1] Liu Z, Philander S G H, Pacanowski R C. A GCM study of tropical-subtropical upper-ocean water exchange[J]. Journal of Physical Oceanography, 1994, 24: 2606-2623.
- [2] McCreary J, Lu P. Interaction between the subtropical and equatorial ocean circulations: The subtropical cell[J]. Journal of Physical Oceanography, 1994, 24: 466-497.
- [3] Lu P, McCreary J P, Klinger B A. Meridional circulation cells and the source waters of the Pacific equatorial undercurrent[J]. Journal of Physical Oceanography, 1998, 28: 62-84.
- [4] Liu H W, Zhang Q L, Duan Y L, et al. The three-dimensional structure and seasonal variation of the North Pacific meridional overturning circulation[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 30(3): 33-42.
- [5] Bryan K. Poleward heat transport in the ocean[J]. Tellus, 1991, 43: 104-115.
- [6] McCreary J, Yu Z. Equatorial dynamics in the 2.5 layer model [J]. Progress in Oceanography, 1992, 29(1): 61-132.
- [7] 王启, 刘秦玉. 太平洋副热带经圈环流的研究[J]. 中国科学基金, 2000, 1: 1-5.
Wang Qi, Liu Qinyu. The study on the Pacific sub-

- tropical cell[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2000, 1: 1-5.
- [8] Gu D, Philander S G H. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics[J]. Science, 1997, 275: 805-807.
- [9] Kleeman R, McCreary J P, Klinger B A. A mechanism for generating ENSO decadal variability[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 26: 1743-1746.
- [10] Nonaka M, Xie S P, McCreary J P. Decadal variations in the subtropical cells and equatorial Pacific SST[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 29: 1116.
- [11] McPhaden M, Zhang D. Slow down of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean[J]. Nature, 2002, 415: 603-608.
- [12] Zhang Q, Yang H J, Zhong Y F, et al. An idealized study of the impact of extratropical climate change on El Niño–Southern Oscillation [J]. Climate Dynamic, 2005, 25: 869-880.
- [13] Zhang L P, Wu L X, Yu L S. Oceanic origin of a recent La Nina-Like trend in the Tropical Pacific[J]. Advances In Atmospheric Sciences, 2011, 28(5): 1109-1117.
- [14] Wang Q, Huang R. Decadal variability of pycnocline flows from the subtropical to the Equatorial Pacific[J]. Journal of Physical Oceanography, 2005, 35: 1861-1875.
- [15] 周天军, 宇如聪, 刘喜迎, 等. 全球变暖形势下的北太平洋副热带-热带浅层环流的数值模拟[J]. 自然科学进展, 2005, 15(3): 367-371.
- Zhou Tianjun, Yu Rucong, Liu Xiyi, et al. Numerical simulation of the North Pacific subtropical-tropical meridional cell to global warming[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(3): 367-371.
- [16] Lu P, McCreary J P. Influence of the ITCZ on the flow of thermocline water from the subtropical to the equatorial Pacific Ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 1995, 25: 3076-3088.
- [17] Huang R X, Wang Q. Interior communication from the subtropical to the tropical oceans[J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 31: 3538-3550.
- [18] Capotondi A, Alexander M A. Anatomy and decadal evolution of the Pacific subtropical-tropical cells (STCs)[J]. Journal of Climate, 2005, 18: 3739-3758.
- [19] Schott F A, Stramma L, Wang W et al. Pacific subtropical cell variability in the SODA 2.02/3 assimilation[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35: L10607.
- [20] Lee T, Fukumori I. Interannual-decadal variations of tropical-subtropical exchange in the Pacific Ocean: Boundary versus interior pycnocline transport[J]. Journal of Climate, 2003, 16: 4022-4041.
- [21] Yamanaka G, Ishizaki H, Tsujino H, et al. Impact of effective ocean optical properties on Pacific subtropical cell and its mechanism for interdecadal variability[J]. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2010.
- [22] Lohmann K, Latif M. Tropical Pacific decadal variability and the subtropical cells[J]. Journal of Climate, 2005, 18: 5163-5178.
- [23] Izumo T. The equatorial undercurrent, meridional overturning circulation, and their roles in mass and heat exchanges during El Niño events in the tropical Pacific Ocean[J]. Ocean Dynamics, 2005, 55: 110-123.
- [24] Liu H W, Zhang Q L, Hou Y J, et al. The interannual variability in the North Pacific meridional overturning circulation[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(3): 665-680.
- [25] Capotondi A, Alexander M, Deser C. Why are there Rossby wave maxima in the Pacific at 10°S and 13°N[J]? Journal of Physical Oceanography, 2003, 33: 1549-1563.
- [26] 容新尧, 张人禾, 苏京志. 副热带-热带太平洋密跃层水量交换年际变化的模拟研究[J]. 海洋学报, 2011, 33(5): 9-22.
- Rong Xinyao, Zhang Renhe, Su Jingzhi. Numerical study of interannual variations of the subtropical-tropical pycnocline mass exchange in the Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(5): 9-22.
- [27] Rothstein L M, Zhang R H, Busalacchi A J, et al. A numerical simulation of the mean water pathways in the subtropical and tropical Pacific Ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 2008, 28: 322-343.
- [28] 厉萍, 张启龙, 刘洪伟, 等. 北太平洋经向热输送的季节变化[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(3): 275-284.
- Li Ping, Zhang Qilong, Liu Hongwei, et al. Seasonal variation of the North Pacific meridional net heat transport [J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(3): 275-284.
- [29] 厉萍, 张启龙, 刘洪伟, 等. 北太平洋经向盐量输送的季节变化[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(4): 1-7.
- Li Ping, Zhang Qilong, Liu Hongwei, et al. Seasonal variation of meridional salt transport in the North Pacific Ocean [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(4): 1-7.
- [30] Klinger B A, Marotzke J. Meridional heat transport by the subtropical cell[J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 30: 696-705.
- [31] Riccardo F, Molteni F, Kucharski F. Pacific interdecadal variability driven by tropical–extratropical interactions[J]. Climate Dynamic, 2014, 42: 3337-3355.
- [32] Bryden H, Roemmich D H, Church J A. Ocean heat transport across 24°N in the Pacific[J]. Deep Sea Research, 1991, 38: 297-324.
- [33] Roemmich D, Gilson J, Cornuelle B, et al. Mean and time-varying meridional transport of heat at the tropical subtropical boundary of the North Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2001, 106(C5): 8957-8970.
- [34] Zhang D, Johns W E, Lee T N. The seasonal cycle of meridional heat transport at 24°N in the North Pacific and in the global ocean[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2002, 107(C7, 3083): 1-24.
- [35] 万国洪, 魏泽勋, 崔秉昊, 等. 中国近海域际水、热、盐输运: 全球变网格模式结果[J]. 中国科学 D 辑, 2002, 32(12): 7-73.
- Fang Guohong, Wei Zexun, Cui Binghao, et al. Interbasin freshwater, heat and salt transport through the coastal oceans near China from a variable-grid

- global ocean circulation model[J]. Science in China (Series D), 2002, 32(12): 7-73.
- [36] 张启龙, 侯一筠, 齐庆华, 等. 东海黑潮热输送变异与经向风异常[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(2): 126-134.
- Zhang Qilong, Hou Yijun, Qi Qinghua, et al. Variations in the Kuroshio heat transport in the East China Sea and meridional wind anomaly[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(2): 126-134.
- [37] 孙双文, 万彪. 黑潮对中国近海热盐运输的季节和年际变化[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2009, 3: 98-107.
- Sun Shuangwen, Wan Biao. Seasonal and interannual variations of the heat and salt transports between Kuroshio and the costal oceans near China[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2009, 3: 98-107.
- [38] Zheng Y X, Giese B S. Ocean heat transport in Simple Ocean Data Assimilation: Structure and mechanisms [J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2009, 114: C11009, doi: 10.1029/2008JC005190.

Investigation into the North Pacific meridional overturning circulation, and heat and salt transport: Progress report

LIU Hong-wei^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Qi-long^{1, 2, 3}, DUAN Yong-liang⁵, XU Yong-sheng^{1, 2, 3}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics (Second Institute of Oceanography, SOA), Hangzhou 310012, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 5. Center for Ocean and Climate Research, First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Received: Feb., 10, 2015

Key words: North Pacific; meridional overturning circulation; heat and salt transport

Abstract: The North Pacific meridional overturning circulation (NPMOC) is the general name given to the five North Pacific overturning cells: the subtropical cell (STC), the tropical cell (TC), the subpolar cell (SPC), the deep tropical cell (DTC), and the thermocline cell (THC). These cells are important for the leakage of meridional material and energy exchange. The NPMOC and its variation play an important role in the upper ocean thermohaline structure and climate change. The structure of the STC, TC, and DTC, and the level and mechanism of variation in these are currently being extensively analyzed, and a preliminary analysis of poleward heat transport by the STC has been completed. Less research has been undertaken on the SPC and THC; however, the three-dimensional structure and mechanism of variation remains unknown. In addition, research into heat and salt transport by the NPMOC is still at an initial stage, with little knowledge at present about the characteristics and the level and mechanism of variation within each cell. Therefore, this requires further investigation in the future.

(本文编辑: 李晓燕)