

EN4 两套分析数据中海洋热含量的差异

张敏^{1,2,3}, 赵昌^{1,2,3}, 张远凌^{1,2,3}, 姜文正^{1,2,3}, 王刚^{1,2,3*}

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东青岛 266237;

3. 自然资源部海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东青岛 266061)

摘要:对比分析了 1970—2017 年 EN4.2.1G10 和 EN4.2.1L09 两套数据中海洋热含量的差异及其形成机理。结果表明,两套数据导出的 1985—2005 年间 0~1 000 m 全球海洋热含量存在最大约 5×10^{22} J 的差异,主要分布在热带及亚热带海域($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$),偏差较大的年份是 1985 年、1991 年与 1998 年。差异主要源于两套数据对 XBT-(OSD/CTD)(或 MBT-(OSD/CTD))仪器偏差的校正方式不同;EN4.2.1L09 选取偏差的中位数,而 EN4.2.1G10 选取偏差的平均值。通过对比分析偏差较大的年份间海水温度沿深度的空间分布,我们发现 1985 年与 1991 年两套数据的海洋热含量的差异集中于 0~500 m,主要是由采样时段、深度和温跃层变化所带来,而 1998 年之后由于仪器观测深度更深,两者的差异贯穿于整个深度层(0~1 000 m)。两套数据中海洋热含量的差异夏季最小,冬季最大。在 1985 年后出现的两套数据的差异影响了全球海洋热含量的线性趋势分析和年代际及多年代际变率,其中基于 EN4.2.1G10 的年代际及多年代际分量的幅度在 1985 年后是 EN4.2.1L09 的 2 倍,且存在相位的差异。线性趋势若时间段选取在 1985—2015 年间则对结果影响较大。本研究为使用 EN4 数据估算海洋热含量及相关对比验证研究提供了有益参考。

关键词: EN4.2.1; 海洋热含量; 海洋温度; 年代际及多年代际

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)03-0390-10

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.002

引用格式: ZHANG M, ZHAO C, ZHANG Y L, et al. Discrepancies in the ocean heat content of two EN4 products[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(3): 390-399. 张敏, 赵昌, 张远凌, 等. EN4 两套分析数据中海洋热含量的差异[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(3): 390-399.

全球变暖过程中,地球气候系统增加的热量 90% 以上被储存在海洋中,表现为全球海洋热含量增加^[1-2]。海洋热含量(Ocean Heat Content, OHC)的变化是全球气候变化中最为关键的一环,且过去 60 a 中表现出变暖加速的趋势^[3]。海洋热含量的增加会导致海洋生态系统失衡^[4-5]、海冰及冰架消融^[6]、海平面上升^[7-8]、洋流系统改变^[9-10]、极端气候事件频发^[11]等一系列问题。发端于 20 世纪末 21 世纪初的全球变暖减缓现象^[12]激发了科学家们对海洋热量吸收并存储的关注。诸多研究认为,海洋表层以下热含量的增加是全球变暖减缓的主因^[13-17]。虽然 21 世纪初开始 Argo 的布放丰富了全球海洋的观测数据,使近期海洋热含量的估算更加准确^[18],但对于研究年代际、多年代际甚至百年尺度等长期的海洋热含量的变化,仍然需要时空精度较低的历史观测数据的支撑。以往的研究一直致力于改进历史观测数据的质量,以期能够更准确地重构过去海洋的状态^[18-21]。然而,由于过去海洋观测数据有限,不同的海洋重构数据集存在较大的差异。这也导致如海洋增暖幅度等热点问题,基于不同数据所得到的结果不尽相同^[22]。

收稿日期: 2019-04-02

项目资助: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——海洋中热量传输路径的时空演变及其影响机制(2018Q01)和新一代数据分析方法的发展及应用(2018Y02); 国家重点研发计划项目——海洋环境高性能数值模拟应用软件研制(2016YFB0201100); 全球变化与海气相互作用专项——南海与菲律宾海混合与深海环流(GASI-IPOVAI-01-03)

作者简介: 张敏(1983-),女,副研究员,博士,主要从事海洋与气候变化的数据分析方面研究. E-mail: zhangmin@fio.org.cn

* **通讯作者:** 王刚(1977-),男,副研究员,博士,从事海洋内波、数据分析等方面研究. E-mail: wangg@fio.org.cn

(李燕 编辑)

目前海洋热含量研究中常用的基于观测的重构数据包括 Ishii^[23], EN4^[24], IAP^[25], 以及本世纪以来基于 Argo 的格点数据重构的 IPRC, SCRIPPS^[26] 等。这几套数据产品构建的全球海洋热含量时间序列存在差异^[27], 差异主要来源于各数据集对仪器偏差的处理方法、格点数据的构建方法以及对气候态的定义等^[18,21,28]。此外, Ishii 和 EN4 常作为“真实”数据, 用于对比验证模式模拟结果^[29]。在 2000 年 Argo 计划实施之前的三十余年, 海洋次表层温度主要由抛弃式温度剖面仪(eXpendable BathyThermograph, XBT)观测获得, XBT 数据占 1970—2001 年间所有次表层温度数据的 41%, 这也是目前所有历史数据的主要组成部分^[3]。由于 XBT 上仅有温度传感器而无压力传感器, 其观测海水温度对应的深度由降速方程和 XBT 进入水中的时间计算获取, 从而引入了 XBT 数据的系统偏差; 并且, XBT 的下降速率随着保存期限也会产生漂移^[19]。这两者是造成 XBT 观测数据偏差的主要原因。针对 XBT 以及后续的 MBT(机械型温度计)数据偏差的校正, 国际上不同的研究单位和小组提出了多种订正方案以减小数据的系统性偏差^[18,21,23,28,30]。

修正 XBT 数据偏差时需考虑下面多种因素: 温度和深度偏差的同步订正、仪器的差异、海水温度的影响、不同时期历史偏差不一致等^[21]。以往研究常采用同期的就近海洋站(Ocean Station Data, OSD)和温盐深仪(Conductivity Temperature Depth, CTD)的观测来订正 XBT 和 MBT 数据。其中 EN4 根据 2 种校正方案提供了两套数据。前人^[27]虽然比较了 Ishii, EN4 和 IAP 三套数据在海洋热含量分析中的异同, 但未考虑 EN4 两套数据产品的差异。本研究采用集合经验模分解方法, 研究 1970—2017 年间 EN4 中的海水温度和海洋热含量, 重新审视 2 种方式校正的 EN4 产品在估算全球海洋热含量变化时的差异, 为 EN4 两套数据应用于全球气候变化等重点科学问题的研究提供参考。

1 数据和方法

1.1 数 据

本文用做对比的两套数据均来自于英国气象局质量控制的温盐数据产品(EN4.2.1 版本)。作为最新的 EN4 数据集, 与以往的 EN 数据集相比, EN4 在数据质量控制方面进行了很大的改进, 并提供数据的不确定性估计^[24]。EN4 的主要观测数据来自全球海洋数据库(World Ocean Database, WOD, 最新版本 WOD09)、CORA(Coriolis Ocean datasat for ReAnalysis), 北极观测海洋学项目(Arctic Synoptic Basin-wide Observation, ASBO)、全球温盐剖面计划(Global Temperature and Salinity Profile Program, GTSP), 以及 Argo 全球数据中心(Argo Global Data Assembly Centers, GDACs)自 2000 年以来的 Argo 数据集^[24]等。而在没有观测数据的地方, EN4 采用 1971—2000 年的气候态平均值进行重构。

EN4 采用最优插值方法在每个海洋层进行数据校正和重构。在处理 XBT 或 MBT 数据与 OSD/CTD 数据平均值之间的差异时采用了不同的统计量: EN4.2.1G10^[20]采用了算数平均值(以下简称为 EN4G10), 而 EN4.2.1L09^[19]采用了中位值以减少异常值对差异估计的影响(以下简称为 EN4L09)。两者都包含全球 1900 至今的海水温度和盐度数据, 时间分辨率为月, 空间水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 从约水下 5~5 500 m 深度分为 42 个垂向层。20 世纪 60 年代中期开始, 由于 XBT 的使用, 海洋次表层温度数据覆盖率大幅增加, 故本文截取 1970—2017 年 EN4.2.1 的两套校正数据进行对比。

1.2 方 法

OHC_{depth} 表示某一深度以上水层中的海洋热含量, 计算公式为

$$OHC_{\text{depth}} = \int_{-d}^0 \rho C_p t dz, \quad (1)$$

式中, t 是海水摄氏温度, ρ 和 C_p 分别为海水密度和比热容。本研究主要对比两套数据中 0~1 000 m 海洋热含量的差异及其产生机制。由于 1 000 m 以浅水层观测数据覆盖率较高, 我们的比较仅限于该深度范围。

本研究结合集合经验模分解方法(EEMD)^[31]对比分析 EN4.2.1 两套数据海洋热含量在不同时间尺度上的差异。EEMD 是在经验模分解方法^[32]的基础上提出的一种噪声辅助的分解方法。其分解的原理是将白噪声引入原始数据中,由于白噪声具有正态分布特点,使得混合后的信号具有相对均匀的极值点,弱化了原始信号中极值点间的距离比差异,从而降低了模态混叠的问题;另一方面,由于白噪声具有零均值特性,经过多次添加随机白噪声后,平均得到的集合经验模分解 IMF 分量中的白噪声部分可相互抵消,实现原始信号的不同频率模态分量的有效分解。因而,EEMD 可以有效地分解出非线性信号在不同时间尺度上的分量,以及非线性趋势项。该方法的详细介绍可参见 Wu 等^[31]和 Huang 等^[32],在本研究中所使用的 MATLAB 的 EEMD 代码可以从 <http://rcada.ncu.edu.tw/research1.htm> 下载。

2 结果与讨论

2.1 EN4 两套数据 0~1 000 m 海洋热含量的时空差异

图 1 显示了 EN4G10 和 EN4L09 在全球及各个海盆 0~1 000 m 海洋热含量的时间序列及差异。总体来看,两套数据在分析时段的前段(1970—1985 年)及后段(2006—2017 年)较为一致,主要差异出现在 1985—2005 年间,可达约 5×10^{22} J。此差异的量级与不同仪器的残余偏差导致的数据集之间的差异相当^[20]。在 1985—2005 年间,EN4G10 和 EN4L09 在太平洋、大西洋和印度洋均表现出明显的差异。值得注意的是,虽然南大洋 EN4G10 和 EN4L09 的差异不大,但这并不代表南大洋数据质量高。这是因为此海区观测数据稀少,EN4 以 1970—2000 年的气候态均值进行补充,导致两套数据的差异不大。即便如此,1985—2005 年间南大洋海区两套数据之间也出现了细微的差异。此外,两套 EN4 数据在 1985—2005 年间还存在周期约为 6~7 a 的际年差异,其中 1985 年、1991 年及 1998 年差异最大。

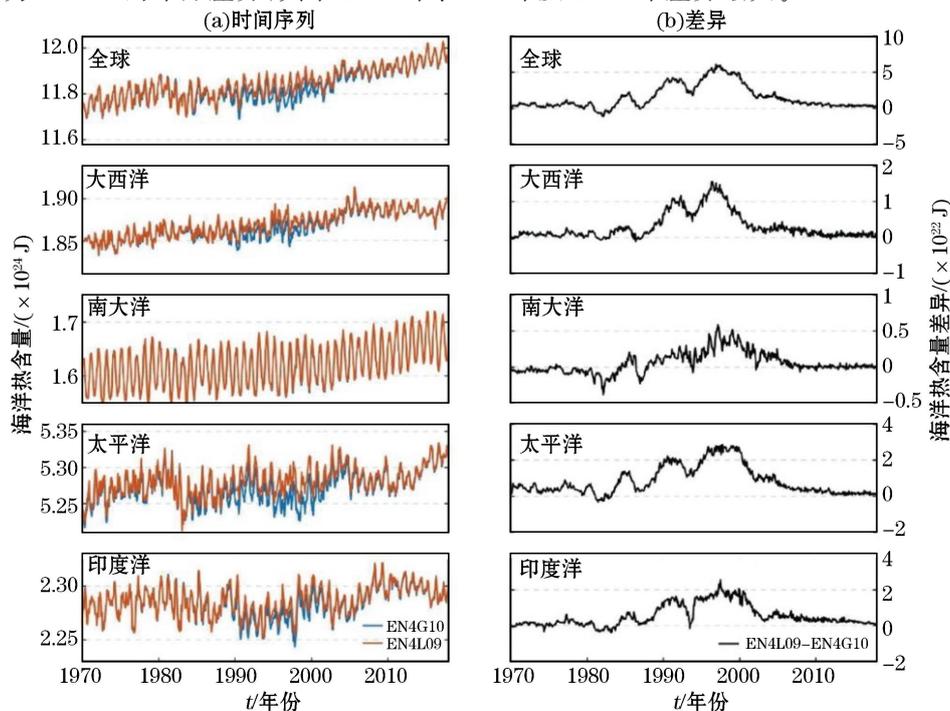


图 1 1970—2017 年 EN4G10 和 EN4L09 海洋热含量(0~1 000 m)在全球及各个海盆的时间序列及差异

Fig.1 Time series of the OHC in upper 1 000 m from 1970 to 2017 for the global, Atlantic, Southern Pacific and Indian Oceans and corresponding discrepancies between EN4G10 and EN4L09

进一步分析 1985 年、1991 年和 1998 年这 3 a 中,EN4G10 和 EN4L09 两套数据年平均差异的空间特征(图 2)。两套数据的年平均差异主要集中在热带及亚热带海域($30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$),且随着观测数据覆盖率的增加而增大。1985 年,差异主要分布在东太平洋和南大西洋;1991 年,在大西洋的差异明显大于太平洋;1998 年,差异随着观测数据的增加而明显增大,且空间分布比较均衡,主要与大洋 XBT 观测站位大致吻合。

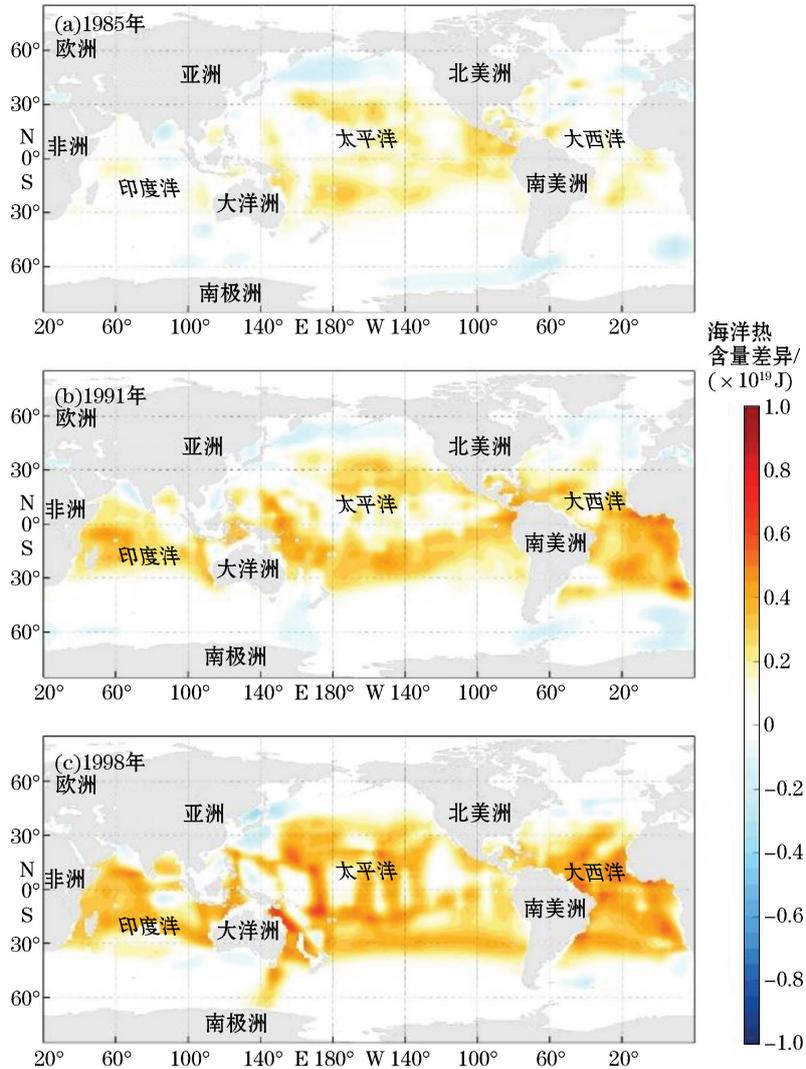


图 2 1985 年、1991 年和 1998 年 EN4G10 和 EN4L09 海洋热含量(0~1 000 m)年平均差异的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of OHC discrepancies between EN4G10 and EN4L09 in upper 1000 m for the years 1985, 1991 and 1998

2.2 EN4 两套数据差异的来源

EN4G10 与 EN4L09 的数据源是一致的,造成两套数据集差异的主要原因是在数据校正过程中选取了不同的统计量^[19-20]。由式(1)可以得知,热含量的计算主要依赖于各层的海水温度,为此我们进一步对比 EN4 两套数据海洋垂向各层温度在 1985 年、1991 年及 1998 年的差异。图 3 给出它们的空间分布。总体来看,1985 年与 1991 年 EN4 两套数据的差异主要集中在海洋上层 500 m,而 1998 年的差异体现在海洋整层。除此之外,这 3 a 中的差异都在上 200 m 明显偏大。相对于 EN4G10,EN4L09 的温度呈现正位相的系统性差异,差异主要在 $0.2\sim 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;1991 年与 1998 年,局部海域的差异甚至超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这表明中位值的取法

应该大于平均值,导致了 EN4L09 在 1985—2005 年热含量的估计高于 EN4G10。该结果与前人的研究一致^[19-20]。

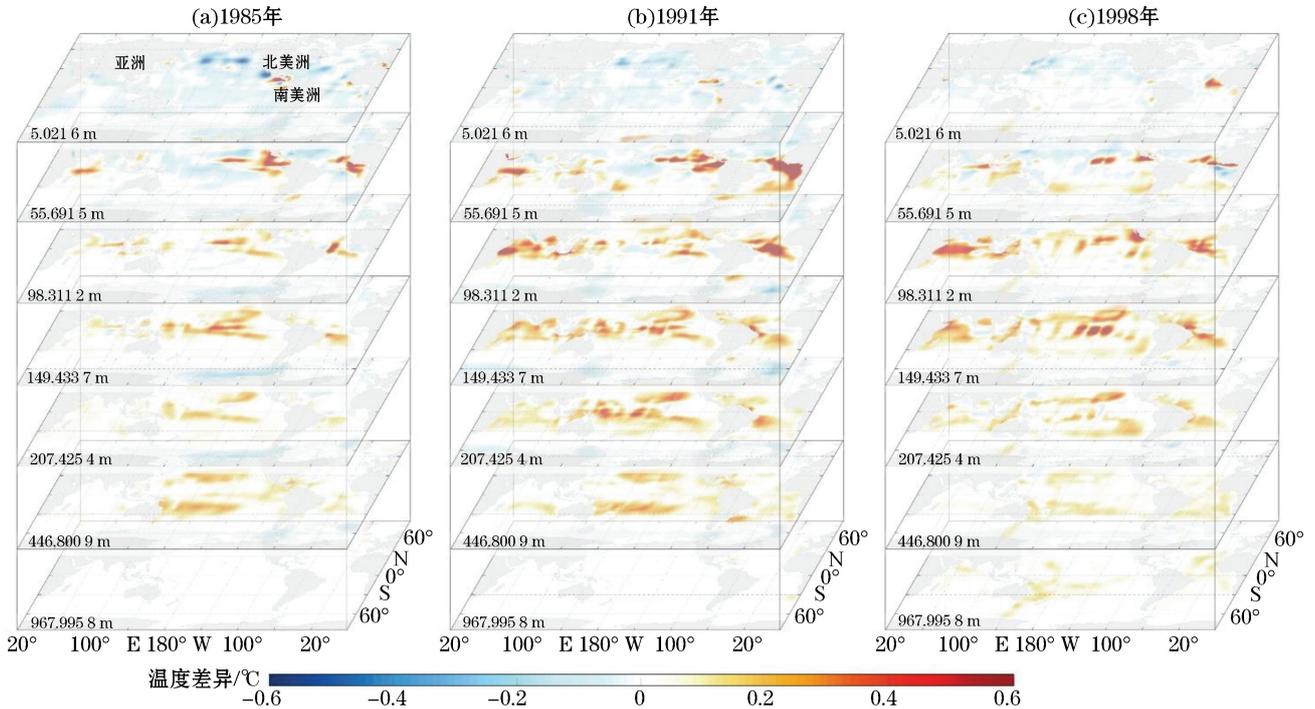


图3 1985年、1991年和1998年 EN4G10 和 EN4L09 两套数据海洋温度在各层差异的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the temperature discrepancies between EN4G10 and EN4L09 at different vertical layers for the years 1985, 1991 and 1998

导致 EN4G10 和 EN4L09 两套数据差异的最根本的原因是 XBT 数据的“不成熟”。XBT 观测及处理引入的偏差进而导致了 XBT 与 CTD 数据对比较正的偏差。因而即使同样的数据源,在计算 XBT 或 MBT 数据与 OSD/CTD 数据平均值之间的差异时,选取算数平均值^[20]和中位值^[19]也会加剧差异。两套数据在 1985 年、1991 年及 1998 年的差异最大值均出现在纬度 $30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$, 深度范围 $50\sim 150\text{ m}$ 。这是由于船舶走航的 XBT 观测主要集中在这一海域,并且这一海域上层温度较高,温跃层变化较为剧烈,从而即使是同一数据源,不同的校正方式下也会出现较大的偏差^[19]。值得注意的是,两套数据差异最大的这几个年份均为强厄尔尼诺年,其中在 1983—1984 年和 1997—1998 年的强厄尔尼诺所造成的海洋表层的温度异常可高达 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[33]。这种强厄尔尼诺现象对 XBT 偏差校正的影响还需要进一步的研究和探讨。

1985 年之前和 2005 年之后, EN4G10 和 EN4L09 两套数据差异相对较小,其原因各不相同。在 1970—1985 年期间,观测数据相对于后期较少,缺失观测数值会采用 1970—2000 年的气候态平均值填补,这部分数据不存在校正方法引入误差的问题;而 2005 年之后,随着大量 Argo 观测数据的纳入,数据的覆盖率大量增加,测量精度也大大提高,从而 EN4 的两套数据的差异较小。

2.3 EN 两套海洋热含量数据在不同时间段的平均偏差

我们以 1970 年为起点,计算不同长度时间内 EN4G10 与 EN4L09 两套数据的海洋热含量的线性趋势。图 4 显示的是海洋热含量在不同时间段内的平均偏差。在整个 1970—2017 年期间,两套数据的差别不大,且集中于几条主要的观测路径。然而当时间段终点落在差异显著的 1985—2005 年期间时,整个热带及亚热带海域 ($30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$) 表现出较大的差异,格点差异值可高达 $5\times 10^{18}\sim 6\times 10^{18}\text{ J}$ 。由此可以推断,在全球海洋热含量的线性趋势分析中,如果选用 EN4 的数据作为对比数据,那么两套数据在不同时间段的线性趋势

有较大差异;尤其是 1985—2005 年的数据对结果影响较大。因而,如果采用 EN4 分析海洋热含量的趋势,并与其他再分析或者模式数据进行对比,两套数据得到的结论有可能会不一致。

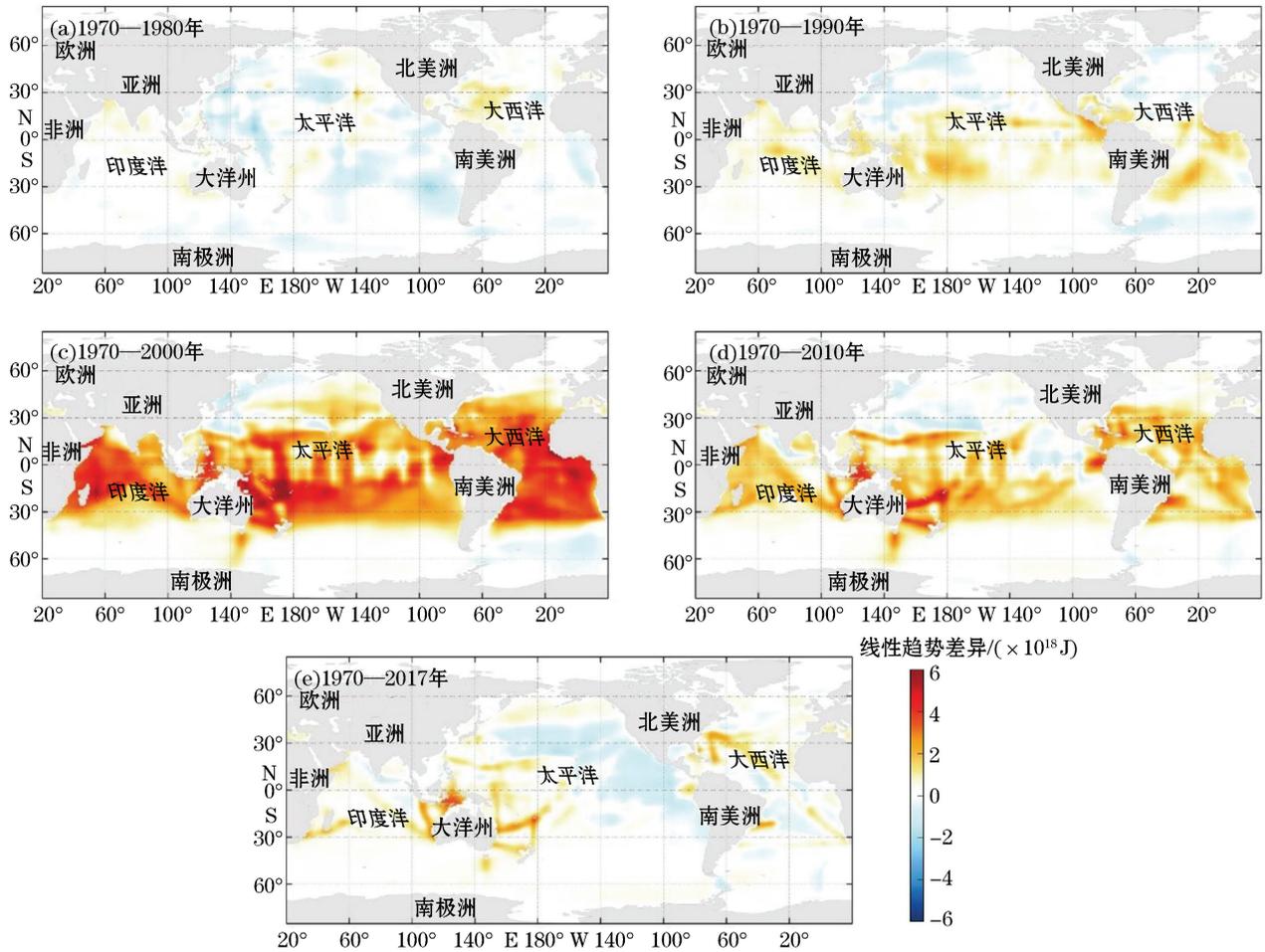


图 4 EN4G10 与 EN4L09 在不同时间段线性趋势差异的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the discrepancies in linear trend of the OHC between EN4G10 and EN4L09 for different time range

为进一步分析 EN4G10 和 EN4L09 在季节尺度的差异,我们计算了 1985—2005 年两套数据上 1 000 m 海洋热含量全球及各个海盆海洋热含量的气候态平均(图 5)。由图 5 可见,全球及各个海盆的海洋热含量年变化态势基本一致。全球海洋热含量的气候态平均的分布主要受南大洋影响。但南大洋观测数据稀少,数据多为 1971—2000 年的气候态平均所填补,因而 EN4G10 和 EN4L09 的差异不大。全球以及除南大洋之外的其他海盆均表现出季节性差异,其中在 4 月及 10 月差异最大。最大差异范围在 $5 \times 10^{21} \sim 3 \times 10^{22}$ J。由于海洋是在春季到秋季期间释放热量,在秋季到春季期间吸收热量,海洋热含量的峰值根据南北半球的差异一般出现在 4 月和 10 月^[27]。两套数据的季节差异也体现在这 2 个月最大,可能的原因是这 2 个月是海洋吸收热量和释放热量的过渡期,对不同的数据处理方式更为敏感。此外,两套数据在气候态平均的差异会导致以此为基础的距平分析出现问题,进而可能导致在低频信号上两者的巨大差异(图 6)。

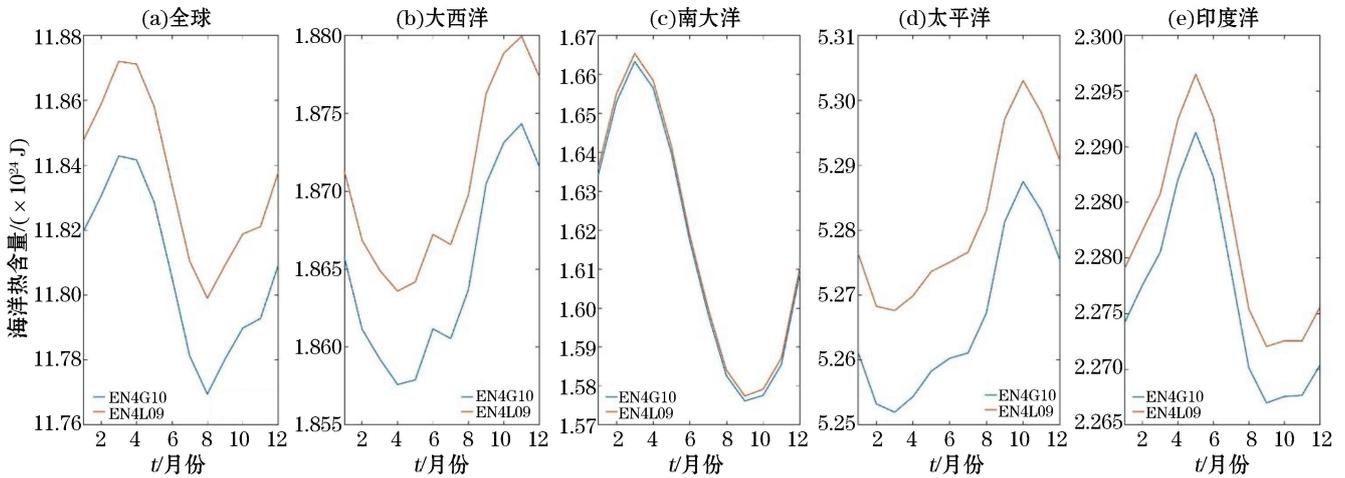
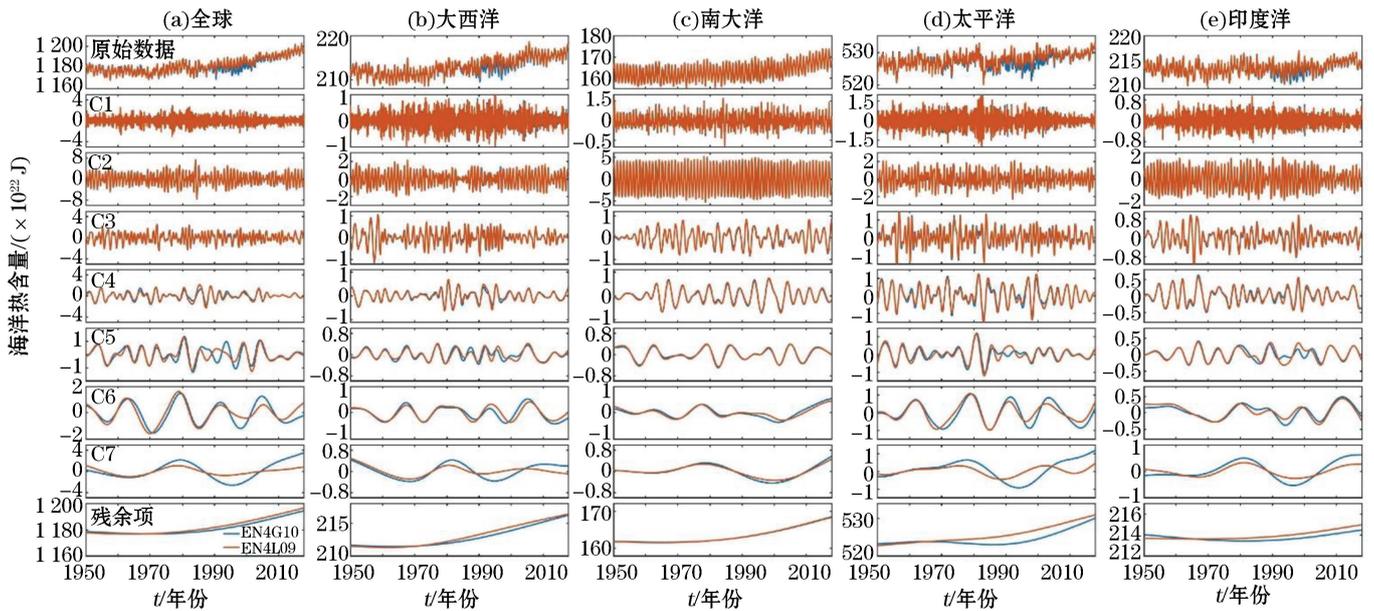


图5 EN4G10 与 EN4L09 中海洋热含量在全球、大西洋、南大洋、太平洋和印度洋的气候态平均
 Fig.5 Annual cycle of OHC of global ocean, the Atlantic Ocean, the Southern Ocean, the Southern Ocean, the Pacific Ocean, and the Indian Ocean derived from EN4G10 and EN4L09



注: 从上而下分别为原始数据、由高频到低频的分量 C1~C7, 以及余项(非线性趋势项)

图6 EN4G10 与 EN4L09 中 0~1 000 m 海洋热含量在全球、大西洋、南大洋、太平洋和印度洋的 EEMD 分解结果
 Fig.6 EEMD decomposition of the OHC (0~1000 m) in global ocean, the Atlantic Ocean, the Southern Ocean, the Southern Ocean, the Pacific Ocean, and the Indian Ocean for EN4G10 and EN4L09

我们进而运用 EEMD 方法对 EN4G10 和 EN4L09 中上 1 000 m 的全球及各个海盆热含量进行分解(图 6)。EEMD 能够借助白噪音辅助的方法, 有效地将海洋热含量数据分解为从高频到低频的不同分量。在年变化及更高频的信号中, 由 EN4G10 和 EN4L09 分解得到的分量差异很小。在年际, 年代际及多年代际等低频信号中(图 6, C5-C7), 两套数据分解得到的分量差异明显, 尤其体现在大西洋、太平洋和印度洋海域(图 6b, 6d, 6e), 在 1980 年以后, 出现振幅及相位不一致的现象。由于 EEMD 方法是自适应的数据分析方法, 其本质遵循了原始数据的特征, 因而数据的加长并不影响前期数据分解的分量和趋势项, 只是更长时间尺度上

的前期的循环过程^[34]。两套数据分解结果的差异提示我们,在选取 EN4 数据分析海洋热含量年代际及多年代际变化时,尤其是用来作为“真实”数据进行对比时,需要针对两套数据的结果分别对比。值得注意的是,在多年代时间尺度上(图 6 中的 C7 分量),全球、大西洋、太平洋及印度洋都显示 EN4G10 的热含量增暖速率远远大于 EN4L09,甚至在太平洋出现了 1980 年后两套数据在多年代时间尺度上的反位相特征。两套数据在年代际及多年代际的差异直接影响全球变暖减缓期间海洋热含量的变化分析。

3 结 语

由于不同海洋温盐数据集的差异,导致了全球及各海域海洋热含量变化分析的不一致性,特别是近 20 a 的全球气候变暖停滞现象的研究,亟需对不同海洋温盐资料进行对比分析。本研究比较了 EN4 的两套数据(EN4G10 和 EN4L09)中海洋热含量的差异、造成差异的原因以及两套数据的差异在不同时间尺度中的特点,重新审视了两种方式校正的 EN4 产品在估算全球海洋热含量变化时的差异,为 EN4 两套数据应用于全球气候变化等重点科学问题的研究提供参考。主要结果如下:

1) EN4G10 和 EN4L09 中全球海洋热含量(0~1 000 m)在 1985—2005 年间差异约为 5×10^{22} J,且主要分布在热带及亚热带海域($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$);

2) 两套数据偏差较大的年份是 1985 年、1991 年和 1998 年。1985 年与 1991 年两套数据的海洋热含量的差异集中于 0~500 m,主要是由采样时段、深度和温跃层变化所带来,而 1998 年之后由于仪器观测深度更深,两者的差异贯穿于整个深度层(0~1 000 m);

3) 两套数据差异主要源于对 XBT-(OSD/CTD)(或 MBT-(OSD/CTD))仪器偏差的校正方式不同:EN4.2.1L09 选取偏差的中位数,而 EN4.2.1G10 选取偏差的平均值;

4) 两套数据海洋热含量的季节性差异夏季最小,冬季最大,其中在 4 月及 10 月差异最大。最大差异范围在 $5 \times 10^{21} \sim 3 \times 10^{22}$ J。在气候态平均的差异会导致以此为基础的距平分析出现问题,进而可能导致在低频信号上两者的巨大差异;

5) 两套数据中,海洋热含量时间序列在 1985 年后出现的差异影响了全球海洋热含量的线性趋势分析和年代际及多年代际变率,其中基于 EN4.2.1G10 的年代际及多年代际分量的幅度在 1985 年后是 EN4.2.1L09 的 2 倍,且存在相位的差异。线性趋势若时间段选在 1985—2015 年间则对结果影响较大。

参考文献(References):

- [1] TRENBERTH K E, FASULLO J T, VON SCHUCKMANN K, et al. Insights into earth's energy imbalance from multiple sources[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(20): 7495-7505.
- [2] VON SCHUCKMANN K V, PALMER M D, TRENBERTH K E, et al. An imperative to monitor Earth's energy imbalance[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 138-144.
- [3] CHENG L J, ABRAHAM J, HAUSFATHER Z, et al. How fast are the oceans warming?[J]. *Science*, 2019, 363(6423): 128-129.
- [4] HAWKINGS J R, WADHAM J L, TTANTER M, et al. The effect of warming climate on nutrient and solute export from the Greenland Ice Sheet[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2015, 1: 94-104.
- [5] ZHANG M, ZHANG Y L, SHU Q, et al. Spatiotemporal evolution of the chlorophyll a trend in the North Atlantic Ocean[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 1141-1148.
- [6] ETOURNEAU J, SGUBIN G, CROSTA X, et al. Ocean temperature impact on ice shelf extent in the eastern Antarctic Peninsula[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 304.
- [7] DOMINGUES C M, CHURCH J A, WHITE N J, et al. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise[J]. *Nature*, 453(7198): 1090-1093.
- [8] LEVITUS S, ANTONOV J I, BOYER T P, et al. World ocean heat content and thermocline sea level change (0~2000 m), 1955—2010[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(10): L10603-L10607.
- [9] MCMANUS J F, FRANCOIS R, GHERARDI J M, et al. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to de-

- glacial climate changes[J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 834-837.
- [10] CHEN X Y, TUNG K K. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation[J]. *Nature*, 2018, 559(7714): 387-391.
- [11] TRENBERTH K E, CHENG L J, JACOBS P, et al. Hurricane Harvey links to ocean heat content and climate change adaptation[J]. *Earth's Future*, 2018, 6(5): 730-744.
- [12] TRENBERTH K E, FASULLO J T. Tracking Earth's energy[J]. *Science*, 2010, 328(5976): 316-317.
- [13] CHEN X Y, TUNG K K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration[J]. *Science*, 2014, 345(6199): 897-903.
- [14] ROEMMICH D, CHURCH J, GILSON J, et al. Unabated planetary warming and its ocean structure since 2006[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(3): 240-245.
- [15] XIE S P. Oceanography: leading the hiatus research surge[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4): 345-346.
- [16] LIU W, XIE S P, LU J. Tracking ocean heat uptake during the surface warming hiatus[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 10926.
- [17] ZHANG M, WU Z H, QIAO F L. Deep Atlantic Ocean warming facilitated by the Deep Western Boundary Current and Equatorial Kelvin Waves[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(20): 8541-8555.
- [18] ABRAHAM J P, BARINGER M O, BINDOFF N L, et al. A review of global ocean temperature observations: implications for ocean heat content estimates and climate change[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(3): 450-483.
- [19] LEVITUS S, ANTONOV J I, BOYER T P, et al. Global ocean heat content 1955—2008 in light of recently revealed instrumentation problems[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7): 471-478.
- [20] GOURETSKI V, RESEGHETTI F. On depth and temperature biases in bathythermograph data: development of a new correction scheme based on analysis of a global ocean database[J]. *Deep Sea Research I: Oceanographic Research Papers*, 2010, 57(6): 812-833.
- [21] CHENG L J, ZHU J, ABRAHAM J. Global upper ocean heat content estimation: recent progress and the remaining challenges[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, 8(6): 333-338.
- [22] RHEIN M, RINTOUL S R, AOKI S, et al. Observations: Ocean[C]//STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. *Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, GB: Cambridge University Press, 2013: 255-316.
- [23] ISHII M, KIMOTO M. Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections[J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(3): 287-299.
- [24] GOOD S A, MARTIN M J, RAYNER N A. EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objectively analyses with uncertainty estimates[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118: 6704-6716.
- [25] CHENG L J, TRENBERTH K E, FASULLO J, et al. Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015[J]. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1601545.
- [26] WU X B, YAN X H, JO Y H, et al. Estimation of subsurface temperature anomaly in the North Atlantic using a self-organization map neural network[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(11): 1675-1688.
- [27] WANG G J, CHENG L J, ABRAHAM J, et al. Consensuses and discrepancies of basin-scale ocean heat content changes in different ocean analyses[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 50(7-8): 2471-2487.
- [28] BOYER T, DOMINGUES C M, GOOD S A, et al. Sensitivity of global upper-ocean heat content estimates to mapping methods, XBT bias corrections, and baseline climatologies[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(13): 4817-4842.
- [29] KUMAR A, WEN C H, XUE Y, et al. Sensitivity of subsurface ocean temperature variability to specification of surface observations in the context of ENSO[J]. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(4): 1437-1446.
- [30] WIJFFELS S E, WILLIS J, DOMINGUES M, et al. Changing expendable bathythermograph fall rates and their impact on estimates of thermosteric sea level rise[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(21): 5657-5672.
- [31] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [32] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1998, 454: 903-995.
- [33] United States Climate Prediction Center. Historical El Niño/La Niña episodes (1950—present)[EB/OL]. [2019-02-15]. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>.
- [34] WU Z H, HUANG N E, WALLACE J M, et al. On the time-varying trend in global-mean surface temperature[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37: 759-773.

Discrepancies in the Ocean Heat Content of Two EN4 Products

ZHANG Min^{1,2,3}, ZHAO Chang^{1,2,3}, ZHANG Yuan-ling^{1,2,3}, JIANG Wen-zheng^{1,2,3}, WANG Gang^{1,2,3}

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;*

3. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling (MASNUM), MNR, Qingdao 266061, China)*

Abstract: We analyze and compare the differences in the ocean heat content (OHC) from 1970 to 2017 in upper 1000 m between EN4.2.1G10 and EN4.2.1L09 datasets. The results show that distinct discrepancy ($\sim 5 \times 10^{22}$ J) exists in the time series of the OHC from 1985 to 2005 and mainly locates in tropical/sub-tropical areas ($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$). The discrepancy originated from the correction methods applied to the XBT and MBT data; EN4.2.1L09 computed the median of the differences between XBT and OSD/CTD while EN4.2.1G10 computed the mean of the differences. Ocean temperatures at each vertical layer in the years 1985, 1991 and 1998 with largest discrepancies were compared, and the comparison showed that the differences between the two datasets in 1985 and 1991 are mainly located at the depth $0 \sim 500$ m because of the sampling periods and thermocline changes. For 1998, the discrepancy exists throughout the entire vertical level due to the data coverage in the vertical. The discrepancy between the two datasets also shows seasonal variations, with the largest difference in winter and the smallest difference in summer. For the OHC linear trend analysis, its results are sensitive to time intercept between 1985 and 2015. For the components of decadal to multidecadal timescale, amplitude and phase differences between the two datasets were found after 1985.

Key words: EN4.2.1; ocean heat content; ocean temperature; decadal and multidecadal variation

Received: April 2, 2019