东海黑潮 PN 和 TK 断面流量的多时间尺度变化特征

许 达[1,2]，马 超[1,2]，鞠 霞[3,2*]

（1. 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室，山东 青岛 266100；
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室，山东 青岛 266237；
3. 自然资源部 第一海洋研究所海洋环境科学与数值模拟重点实验室，山东 青岛 266061）

摘 要：根据日本海洋数据中心提供的 1972—2017 年 PN 断面共 181 个航次和 1987—2010 年 TK 断面共 92 个航次的 CTD 调查资料，利用动力高度法估算了这 2 个断面的流量，分析了其季节、年际和长期变化特征。主要结果表明，PN 断面流量季节变化为冬、春和夏季大而秋季小，TK 断面流量季节变化为冬、夏季大而春、秋季小，二者共同点为最大（小）流量均出现在夏（秋）季。PN 断面年平均流量的年际变化不明显，但冬季和夏季流量分别具有准 3 a和准 2 a 的显著变化周期；TK 断面年平均流量具有准 4 a 和准 6 a 的显著变化周期，冬季流量具有准 4 a 和准 7 a的显著变化周期，但夏季流量无显著变化周期。此外，PN 断面流量在 1976 年附近出现了一次较大幅度的增加。PN 断面流量具有较大的长期增加趋势，增长率约为 0.3 Sv/a，在 1972—2017 年增加了约 13 Sv，结合 NCEP 海面风应力资料，结果显示，北太平洋更高纬度带（35°N 和 40°N）的风应力旋度对 PN 断面流量的影响更强。

关键词：黑潮流量；PN 断面；TK 断面；多时间尺度变化

中图分类号：P722.6，P731.2　　文献标识码：A　　**文章编号**：1671-6647(2020)03-0400-12

doi：10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.003

引用格式：XU D, MA C, JU X. Multi-timescale variations of the Kuroshio volume transport through PN and TK sections in the East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(3): 400-411. 许达，马超，鞠霞. 东海黑潮 PN 和 TK 断面流量的多时间尺度变化特征[J]. 海洋科学进展，2020，38(3)：400-411.

黑潮是北太平洋副热带海区的西边界流，它起源于菲律宾以东海域，由北赤道流向北分支形成。黑潮经台湾岛和与那国岛之间的通道进入中国东部海域，流经东海陆坡，然后通过吐噶喇海峡进入日本以南海域，最终汇入太平洋内区。黑潮具有流速强、流量大、高温高盐等特点[1]，其流量与路径的变异，将造成近海物质和能量交换的变化，从而控制着东海及其临近海域的水文状况，影响我国东南沿岸地区的气候变化。流量（体积输运）的大小是描述黑潮变异最重要和显著的指数之一[2]，因此，本文旨在利用更长时间的现场观测资料，对东海黑潮流量的变化规律有更进一步的认识。

对黑潮变异认识的持续加深与观测方式和数据资料的不断丰富密切相关。电磁海流计（Geomagnetic Electro Kinetograph，GEK）、南森瓶、温盐深仪、声学多普勒流速剖面仪（Acoustic Doppler Current Profilers，ADCP）以及卫星高度计等直接或间接测流方式的应用，进一步呈现出黑潮具有季节内、季节、年际以及年代际等多尺度变化规律。自 1955 年起，日本长崎海洋气象台对东海黑潮进行了长期水文观测，观测断面位于冲绳岛西北的 PN（G）断面和吐噶喇海峡的 TK 断面，这对于了解东海黑潮流量的多尺度时空变

收稿日期：2019-01-24

资助项目：国家自然科学基金项目——黑潮多时空尺度变化规律及其与近海交换过程研究（41676004），黑潮延伸体海域海-气耦合过程及其对东亚边缘海环流的影响（41376001），冬季渤海盐度分布结构近反相变化的机制研究（41506034）和黄海暖流形态与变化对暖舌结构影响的动力机制研究（41430963）

作者简介：许 达（1994-），男，硕士研究生，主要从事海洋环流方面研究. E-mail：xuda@stu.ouc.edu.cn

* **通讯作者**：鞠 霞（1983-），女，助理研究员，硕士，主要从事近海环境演变方面研究. E-mail：juxia@fio.org.cn

（李 燕 编辑）

化具有十分重要的作用。PN 和 TK 这 2 个代表性断面的流量变化也是本文研究东海黑潮变异的关键。对于东海黑潮流量，很多学者基于不同的计算方法对其进行了估算，并在季节、年际和年代际尺度上分析了其变化特征，其中，季节和年际变化研究较为广泛，年际以上变化相对较少。对黑潮流量的计算方法主要有动力高度法、逆方法、改进的逆方法和海表面高度反演法。动力高度法在估算 PN 和 TK 断面流量（地转体积输运量），分析其多尺度时空变化特征上应用广泛。国内外许多学者以不同时间序列，在季节和年际尺度上对这两个断面的流量变化进行许多研究。分析时间序列长的数据资料对研究东海黑潮流量的季节和年际变化特征更具有说服力。在季节变化尺度上，对于时间序列在 10～25 a 的 PN 断面资料，汤毓祥等[3]和孔彬等[4]认为冬、夏强而春、秋弱，秋季最小。对于东海下游的 TK 断面，前人得到的季节变化规律基本一致，汤毓祥等[3]认为春、夏强而秋、冬弱，春季最大，冬季最小，且通过 TK 断面的流量小于 PN 断面。对于时间序列在 25～35 a 的 G-PN 断面的季节变化，Guan[2]与孙湘平等[5]认为春、夏强而秋冬弱，春季最大，秋季最小；Nisihzawa[6]认为季节变化不明显；汤毓祥等[3]认为春、夏和冬季相差甚小，最大差值仅为 0.3 Sv，夏最大，秋最小。在年际变化尺度上，汤毓祥等[3]认为 PN 断面具有 1.8 和 8 a 的显著周期；孙湘平等[5]认为不同季节，黑潮流量的年际变化不同，PN 断面冬季具有 3.3 a 显著周期，夏季具有 4.7 和 14 a 的显著周期；Saiki[7]认为 PN 断面流量具有 5.5 和 8 a 的显著周期；另外，在年际变化上，东海黑潮流量与日本以南海域发生黑潮大弯曲现象密切相关，如 Qiu 和 Miao[8]以及 Kawabe[9]分别研究了两者的年际变化特征与机制。

不同的计算方法使得对东海黑潮流量变化的认识不同。黑潮海表面高度差异与地转输运之间高度相关[10]，可用来观测黑潮流量变化。Kawabe[9]利用验潮站所测得的长时间连续的海表高度资料，估算了 TK 断面黑潮流量的变化。卫星高度计资料也是一种观测黑潮流量长期变化的有效方法[11]，Andres 等[12]利用经验关系反演出 PN 断面 12 a（1992—2004 年）的流量变化，平均流量为（18.7±0.2）Sv，标准偏差为 1.8 Sv。Yuan 等[13-14]基于逆方法或改进的逆方法研究了东中国海黑潮流量的变异，袁耀初和苏纪兰[15]认为 PN 断面多年（1985—1998 年）平均值为 27.0 Sv，季节变化为夏季最大，秋季最小，通过 TK 断面的流量也是夏季最大。魏艳州等[16]基于逆方法分析了 20 多 a（1987—2010 年）PN 和 TK 断面流量的季节和年际变化，认为这两个断面流量变化具有较好的一致性，季节变化呈夏强秋弱，年际尺度上存在准 4 a 和 1 a 的变化周期。逆方法和改进的逆方法是基于多个断面的 CTD 观测数据，对单个断面的流速和流量的计算仍是以动力高度法为主。

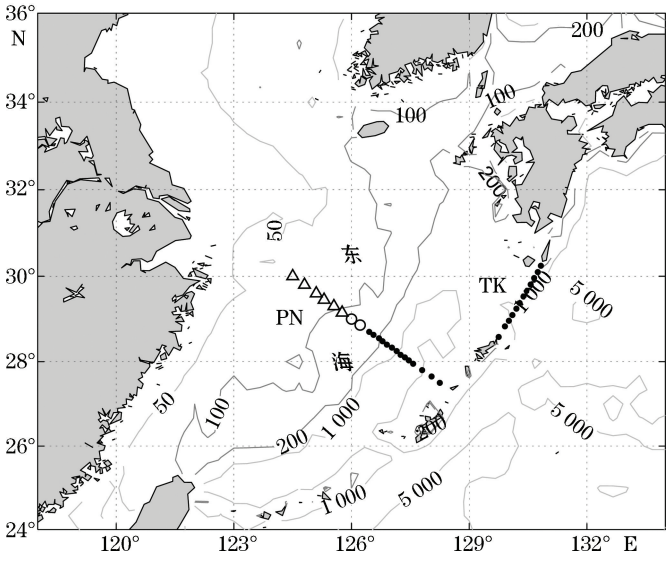
以往研究表明：1）从研究频次上看，对 PN 断面的研究比 TK 断面更广泛；东海黑潮流量的方法，主要有动力高度法、海表面高度差反演法和改进的逆方法，其中动力高度法研究最为广泛，不同方法之间所计算的多年平均流量在 18～30 Sv 范围内变动，差别较大；即便是同一方法，数据时间序列以及具体处理方法的不同，也会导致不同学者对东海黑潮季节和年际变化规律上认识不同。2）季节变化上，东海黑潮的季节变化规律没有被很好的认识，各种研究之间的差异较大，没有一个公认的结论。3）年际变化上，基本认为东海黑潮变异与黑潮大弯曲现象密切相关，但从谱分析结果看，不同研究对流量的年际变化周期存在差异。近年来，关于 PN 和 TK 断面的现场观测资料不断更新，但少有人对其进行持续关注，而且由于观测站位的变更，缺乏对其系统的分析。随着全球气候变化对内区风场及西边界流的影响，黑潮的时空演变更值得进一步探讨。因此本文将基于以上 2 套资料，对东海黑潮不同区域流量的多时间尺度特征进行研究。

1　数据处理

1.1　数据介绍

本文计算 PN 和 TK 断面所用的水文数据是由日本长崎海洋气象厅定期观测所得，数据是由日本海洋数据中心（Japan Oceanographic Data Center，JODC）[17]提供。PN 断面在 1972 年之前被称为 G 断面，观测时间为 1955—1972 年，且基本只在冬、夏季进行；1972 年之后改名为 PN 断面。PN 断面与 G 断面平行，只

是位置稍向西南方向移动，1972-05 开始，PN 断面基本进行四季观测，且站点个数维持在 9 个；1977-08—1996-07，观测站位在原来的基础上不断加密，最多达 22 个站位观测点；1996-10—2010-05，取消了近岸一侧水深相对较浅的 6 个观测站点，为位置相对稳定的 16 个观测站点；2010-12—2017-07，又取消了近岸一侧的两个站点，保持在 14 个观测站点，但这期间有效观测的频率为每年 1～4 次，例如，2011 年缺少春季观测数据，2013 年缺少秋季观测数据，2015 年仅有一次冬季的有效观测数据，2016 和 2017 年又恢复到仅有冬、夏两季观测。由图 1 可以看出，被放弃的近岸一侧的观测站点水深范围仅为 50～200 m，该部分流量对整个 PN 断面的贡献忽略不计。本研究主要选择 PN 断面 1972-05—2017-07 共 181 个航次的调查资料，该资料具有完整的每年 4 次分季节的观测记录，时间跨度为 46 a，无论对季节、年际还是更长时间尺度的变化规律都具有更好的说服力。对于 TK 断面，1987 年之前的观测站位较少（5～6 个），且有的年份（1985 年，1986 年）数据缺少，并且 2010 年之后，JODC 未提供该断面的观测数据，因此，本研究选择 TK 断面 1987-05—2010-02 共 92 个航测的季节性观测资料，时间跨度为 24 a，其站点分布大致相同，个数稳定保持在 12 个。



注：三角形和圆形分别表示 1996-10 和 2010-05 PN 断面被放弃的观测站点（等深线单位：m）

图 1 PN 和 TK 断面的位置

Fig.1 Locations of PN and TK sections

本研究使用的漂流浮标观测数据由美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration，NOAA）大西洋海洋与大气实验室（Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory）[18] 提供。漂流浮标观测来自全球漂流器计划（The Global Drifter Program），该计划是 NOAA 全球海洋观测系统（Global Ocean Observing System）的一个分支。1987-11—2018-06 出现在（115°～138°E，15°～35°N）区域内的漂流浮标共有 1 442 个，记录了海表以下水深 15 m 浮标位置、流速、温度和时间，每个浮标数据时间间隔已被使用克里金法插值为 6 h。漂流浮标所释放的地点主要位于菲律宾以东海域和台湾以东海域，该浮标资料能较好地反映黑潮表层流路特征[19]，本研究在 1 442 个漂流浮标中筛选出 274 个经过 PN 或 TK 断面的浮标，对浮标轨迹线进行分类，以此刻画东海黑潮在 PN 和 TK 断面之间的主要路径和分支路径。

海表 10 m 风速资料由 NOAA 地球系统研究实验室（Earth System Research Laboratory）[20] 提供，NECP-NCAR I 再分析资料月平均的风速数据的时间范围为 1948-01 至今，空间分辨率为 2°。本研究还计算了 1972—2017 年太平洋年平均风应力旋度沿 40°N，35°N 和 28°N 纬线（146°12′E 至太平洋东边界）的积分。

1.2 流量计算

本文选择动力高度法计算 PN 和 TK 断面的地转流速，积分断面上大于零的流速作为整个断面的绝对流量。2 个相邻站位之间，选择所观测最大深度的较小值作为计算这 2 个站位间地转流的最大深度。对于 PN 断面，陈红霞等[21] 认为，零流速面可分别选择 700 m 层（最大深度大于 700 m）和底边界（最大深度小于 700 m），为了便于将计算结果与前人研究进行比较，本文计算 PN 断面的零流速面也如此选择。TK 断面的零流速面统一选在底边界。关于观测数据的垂向分辨率，2001 年之前，PN 和 TK 断面 CTD 数据垂向上分布在水深为 0，10，20，30，50，75，100，125，150，200，250，300，400，500，600，700，800，900，1 000，1 100 和

1 200 m标准层上，自 2001 年开始，两断面数据垂向分辨率为 1 m，为便于分析，对低分辨率的数据进行垂向插值，垂向间隔统一变为 1 m。为了更好地认识流量的季节变化，将数据进行季节划分：冬季(12，1，2 月)，春季(3，4，5 月)，夏季(6，7，8 月)，秋季(9，10，11 月)，并对缺少观测或观测不完整的季节插值。PN 断面缺少观测的时间：1975 年冬、2010 年夏、2010 年秋、2011 年春、2012 年冬、2013 年秋、2014 年夏、2015 年春、2015 年夏、2015 年秋、2016 年春、2016 年秋、2017 年春；TK 断面缺少观测的时间：1992 年秋、1998 年夏、2003 年秋。以上时间点的流量用三次样条函数插值而得。

2　结果分析

2.1　季节变化

我们分别使用时间序列为 46 a 和 24 a 的 CTD 资料，采用动力高度法对 PN 和 TK 断面的流量进行了计算，与前人的计算相比，这 2 套长时间序列的资料对于认识东海黑潮多尺度时空变化规律具有重要意义。

在季节变化尺度上，东海黑潮变异存在一定的区域差异。由表 1 可看出，PN 和 TK 断面流量季节变化明显，但两者变化并不同步。1972—2017 年，PN 断面呈现出冬、春和夏季流量大(均超过 20 Sv)，且彼此之间相差很小(最大差值仅为 0.2 Sv)、秋季最小(小于 20 Sv)的特点，二者最小差值为 1.8 Sv，最大差值为 2 Sv，这与汤毓祥等[3]结论一致，本研究用更长的时间序列资料予以肯定。即尽管不同学者所使用的时间序列长短不同，流量的统计方法也不尽相同[2-5,14,16]，但共同点是 PN 断面流量的最小值发生在秋季，本研究也予以证实，而目前有争议的地方在于流量最大值发生的季节以及冬、春和夏三个季节的差异是否显著，本研究 46 a 的统计资料显示，冬、春和夏三季流量几乎一致。对于 TK 断面，本文研究结果显示，1987—2010 年，TK 断面流量季节变化明显，最大(最小)值出现在夏季(秋季)，冬、夏季强而春、秋季弱，强弱之间的最小差值为 1.0 Sv，最大差值为 2.8 Sv。此结论与魏艳州等[16]结论相同，但与林葵等[22]以及汤毓祥等[3]结论不同。PN 和 TK 断面流量季节变化并不完全一致，但共同点为最大(小)流量均出现在夏(秋)季。

表 1　PN 和 TK 断面季节平均流量(Sv)

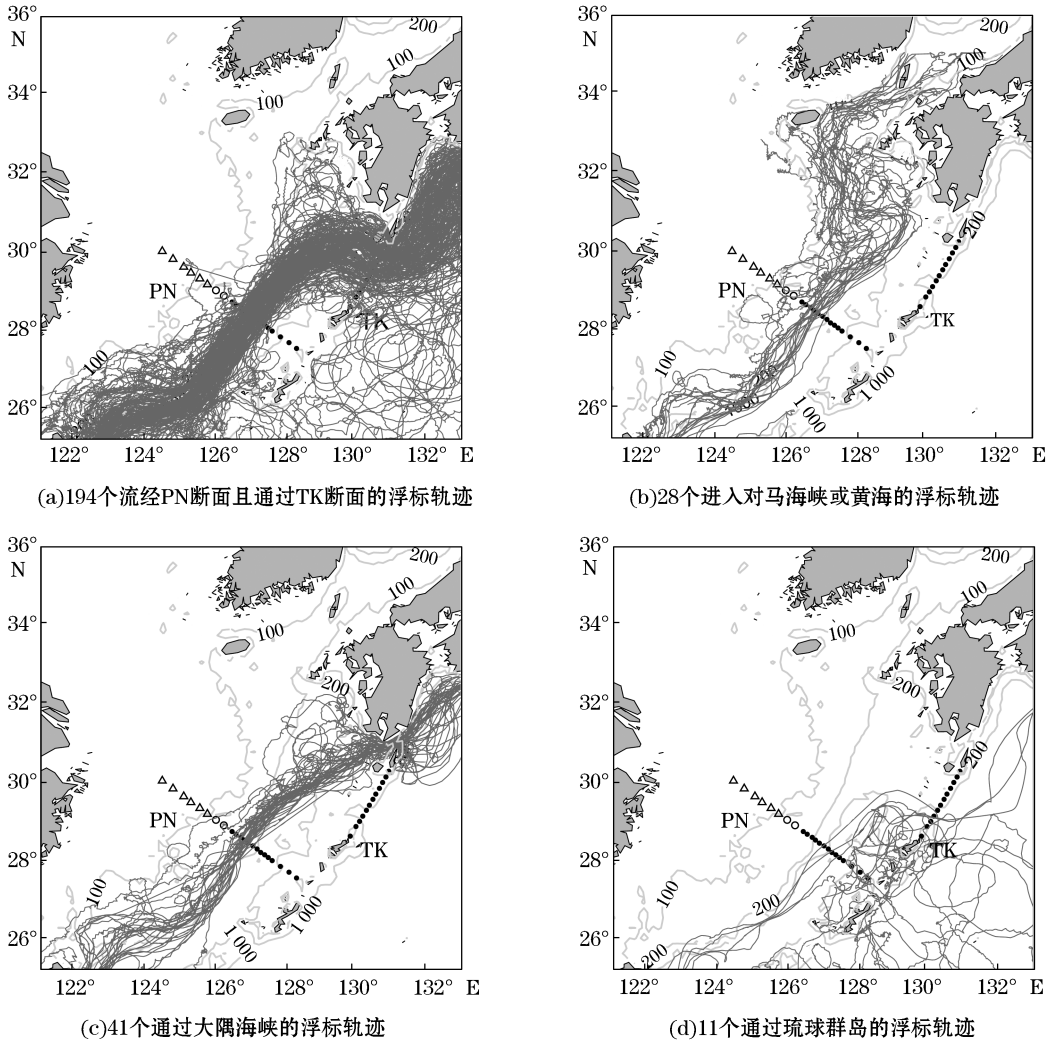
Table 1　Seasonal mean volume transport across PN and TK sections (Sv)

断　面	冬　季	春　季	夏　季	秋　季
PN	21.5	21.5	21.7	19.7
TK	20.1	19.1	21.4	18.6

2.2　年际变化

从动力计算结果来看，PN 断面流量最大值为 32.8 Sv(冬，2002 年)，最小值为 3.1 Sv(秋，1974 年)，TK 断面流量最大值为 29.2 Sv(夏，1987 年)，最小值为 6.0 Sv(春，2000 年)。PN 和 TK 断面流量多年平均值分别为 21.1 和 19.8 Sv。结合表 1 可看出，无论是季节平均还是多年平均，PN 断面流量均强于 TK 断面。黑潮通过 PN 和 TK 断面的流量并不相等，在相同时间范围内(1987—2010 年)年平均流量的最大差值可达 10.5 Sv，但某些年份 TK 断面流量则更强，即 1987，1999，2004 和 2010 年，两断面流量差值分别为－4.6，－0.1，－0.3 和－3.4 Sv，这是因为：一方面，零流速面的选取和浅水订正的不足可能使得两断面流量计算结果不一致；另一方面，东海黑潮流况复杂，黑潮经过 PN 断面后出现一分支在日本九州西南海域进入对马海峡和黄海，或通过九州以南大隅海峡进入太平洋[1,23-25]，而琉球群岛东侧海水也有汇入黑潮 PN 断面以北的分支[24]，这也可能会使 PN 和 TK 断面流量变得不一致。本文利用 1987—2018 年经过 PN 或 TK 断面的 274 个漂流浮标数据，对东海黑潮在 PN 和 TK 断面之间的主要路径和分支做了初步分析，其中有 194 个浮

标经过 PN 断面后通过 TK 断面(吐噶喇海峡)进入太平洋(图 2a),占总数的 70.8%;28 个浮标经过 PN 断面后进入对马海峡和黄海(图 2b),占总数的 10.2%;41 个浮标经过 PN 断面后通过大隅海峡进入太平洋(图 2c),占总数的 15.0%;11 个浮标通过琉球群岛(奄美大岛与冲绳岛之间的通道)流入或流出东海(图 2d),占总数的 4.0%,该部分浮标有的自太平洋进入东海后又经过 TK 断面返回太平洋,有的经过 PN 断面后直接向东进入太平洋。另外,也有浮标通过 PN 断面后向南或通过 TK 断面向西的逆向流动,但像这样能捕获黑潮逆流的浮标数量极少。由此可以看出,东海黑潮在中游(PN 断面)至下游(TK 断面)之间存在多个与邻近区域水交换的通道,使得两断面流量存在一定差异。



(a)194个流经PN断面且通过TK断面的浮标轨迹

(b)28个进入对马海峡或黄海的浮标轨迹

(c)41个通过大隅海峡的浮标轨迹

(d)11个通过琉球群岛的浮标轨迹

注:浅灰色线为水深等值线(m),深灰色线为漂流浮标轨迹

图 2 1987-11—2018-06 流经 PN 或 TK 断面 274 个漂流浮标轨迹图

Fig.2 Trajectories of 274 drifters passing through the PN or TK section from November 1987 to June 2018

图 3 是 1987—2010 年 Niño3.4 年平均指数异常以及同期 PN 和 TK 断面年平均流量异常时间变化图。Niño3.4 指数所代表的赤道太平洋海区(170°～120°W,5°N～5°S)是 ENSO 海洋-大气耦合作用的关键区域[26],该指数常被用来判断厄尔尼诺现象的发生。PN 和 TK 断面年平均流量与 Niño3.4 指数的相关系数分别 0.11 和 0.15,相关性较差,但由图 3 可以看出,1996—2003 年 Niño3.4 指数与 PN,TK 断面年平均流量的峰谷值对应较好,其他年份如 1990—1995 年,PN 断面流量与 Niño3.4 指数变化基本一致,2006—2009 年 TK 断面流量与 Niño3.4 指数变化基本一致。尽管个别年份差异大导致相关系数较小,但从年际以上的尺

度看，东海黑潮流量变化可能与 ENSO 有关。

东黑潮流量变化受多种因素影响（PDO、ENSO 等），不仅具有周期性、趋势性等特征，还存在随机性、突变性，具有多尺度变化规律。Morlet 小波分析能清晰地揭示隐藏在时间序列中的多种变化周期，能反映时域和频域良好的局部化特征[27]。该部分重点探究东海黑潮流量的年际变化规律，分别对 PN 和 TK 断面年平均、冬季和夏季流量做小波分析，并对结果做显著性分析和检验。由于许多地球物理时间系列具有红噪声特征（即方差随着尺度的增加或频率的下降而增加），所以本文参照 Torrence 和 Compo[27] 采用傅立叶红噪声谱作为背景谱对小波谱进行显著性分析和检验。

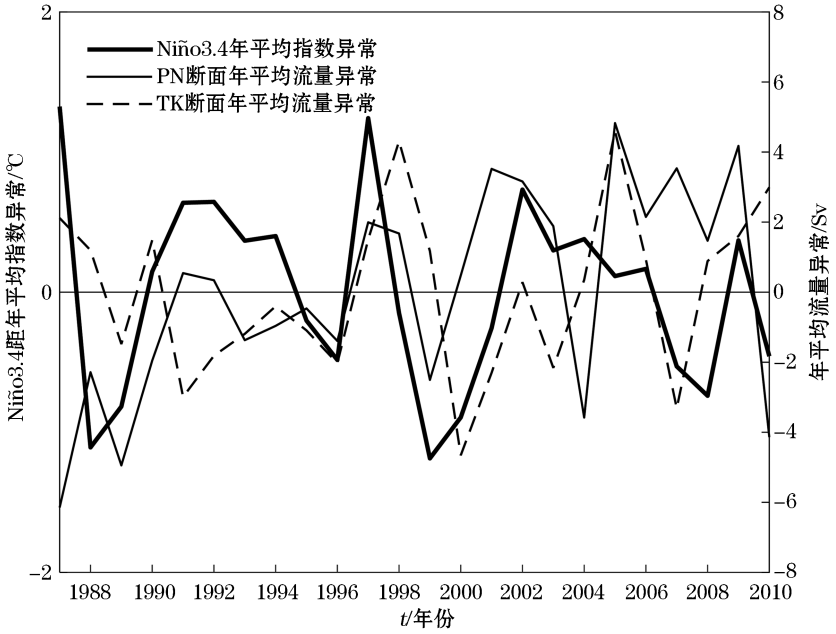


图 3　1987—2010 年 Niño3.4 年平均指数异常、PN 和 TK 断面年平均流量异常

Fig.3　Time series of annual mean of Niño3.4 index and KVT anomalies across PN and TK Sections from 1987 to 2010

2.2.1　PN 断面

图 4～6 分别为 PN 断面年平均流量距平、冬季流量距平、夏季流量距平的小波分析图。各图 b 中灰色线与数字表示小波功率谱等值线与谱值，黑色粗的封闭曲线包围区域表示置信度大于 90% 的区域，黑色锥形线及其下方的白色阴影部分为边界效应影响域。PN 断面年平均流量距平如图 4a 所示，1990 年之前、1999 年、2004 年以及 2010 年，均为负距平，平均为－4.9 Sv，最大发生在 1974 年，为－14.2 Sv，该时段内流量偏小；在 1990—1998 年、2000—2003 年、2005—2009 年、2011—2017 年时间段内，均为正距平 3.8 Sv，最大为 7.3 Sv（2005 年）。

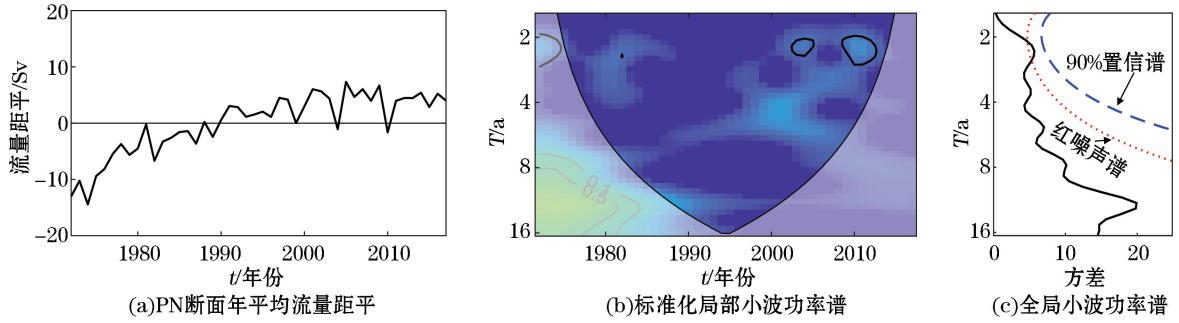


图 4　PN 断面年平均流量的小波分析

Fig.4　Wavelet analysis of annual mean KVT across PN section

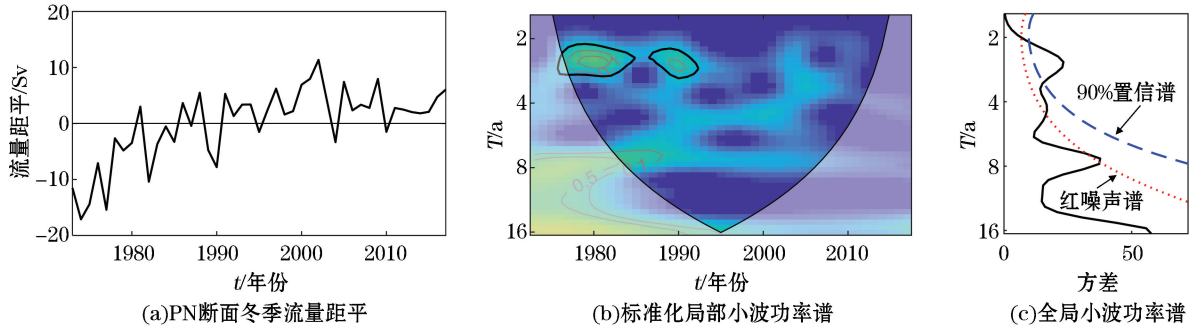


图 5 PN 断面冬季流量的小波分析

Fig.5 Wavelet analysis of KVT across PN section in winter

一些学者通过谱分析发现 PN 断面流量具有显著年际周期变化[5-7,16]，本文研究发现，尽管图 4b 小波功率谱显示在 2002—2012 年具有 2～3 a 的显著周期，但图 4c 全局小波功率谱显示此信号未通过红噪声检验，受噪声干扰较大，故未发现显著周期。图 5a 为 PN 断面冬季流量距平，在 1976—1992 年具有 2～3 a 的显著周期（置信度大于 90%）（见图 5b），峰值在准 3 a。夏季流量变化同样具有 2～3 a 的显著周期（置信度大于 90%），但峰值在准 2 a 且在 1982—1985 年、1998—2005 年、2008—2013 年间，流量变化的 2～3 a 周期比较显著（见图 6）。

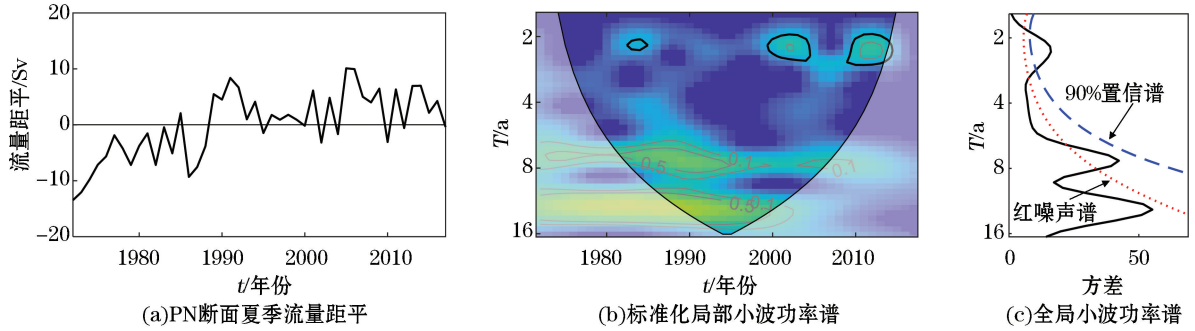


图 6 PN 断面夏季流量的小波分析

Fig.6 Wavelet analysis of KVT across PN section in summer

2.2.2 TK 断面

图 7～图 9 分别为 TK 断面年平均流量距平、冬季流量距平、夏季流量距平的小波分析图。各图 b 中灰色线与数字表示小波功率谱等值线与谱值，黑色粗封闭曲线包围区域表示置信度大于 90%的区域，黑色锥形线及其下方的白色阴影部分为边界效应影响域。与 PN 断面相比，TK 断面年平均流量距平变化幅度较小（图 7a），1989 年、1991—1996 年、2000—2001 年、2003 年及 2007 年，距平小于零，TK 断面流量偏小，平均距平－2.1 Sv，最大发生在 2000 年，为－4.6 Sv；在 1987—1988 年、1990 年、1997—1999 年、2002 年、2004—2006 年及 2008—2010 年，TK 断面流量偏大，平均正距平为 1.8 Sv，最大发生在 2005 年，为 4.5 Sv。

由图 7c 可知，TK 断面流量的变化具有准 4 a 和准 7 a 的显著周期（置信度大于 90%），1995—2005 年间，流量变化的 3～4 a 周期比较显著，其中，1998—2003 年，还具有 6～7 a 的显著周期，说明流量周期变化明显（图 7b）。冬季流量的变化具有 3～7 a 的显著周期（置信度大于 90%），峰值在准 3 a 及 6 a，1993—1998 年间，流量变化 3～5 a 的周期比较显著；1997—2003 年间，具有 5～7 a 的显著周期（图 8）。夏季流量的变化具有 2～5 a 的显著周期，但这个显著周期是由边缘效应所致，故 TK 断面夏季流量变化并无显著周期（图 9）。因此，TK 断面年平均流量与冬季流量变化具有同为 3～7 a 的显著周期，但发生的年份不同。

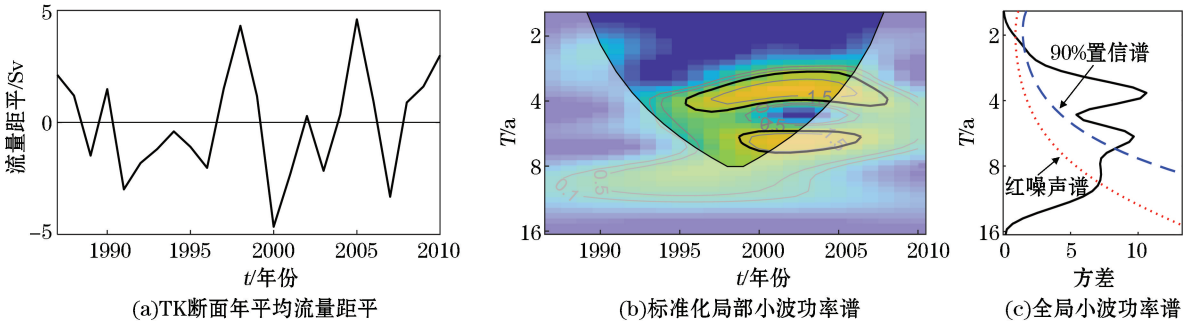


图 7　TK 断面年平均流量的小波分析

Fig.7　Wavelet analysis of annual mean KVT across TK section

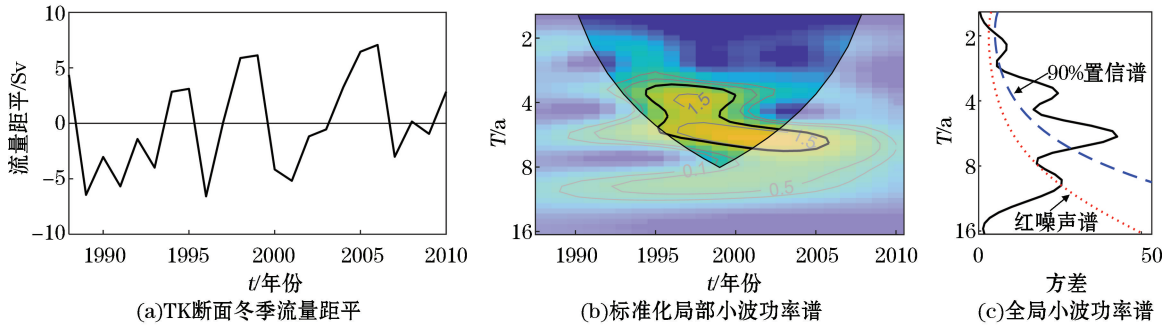


图 8　TK 断面冬季流量的小波分析

Fig.8　Wavelet analysis of KVT across TK section in winter

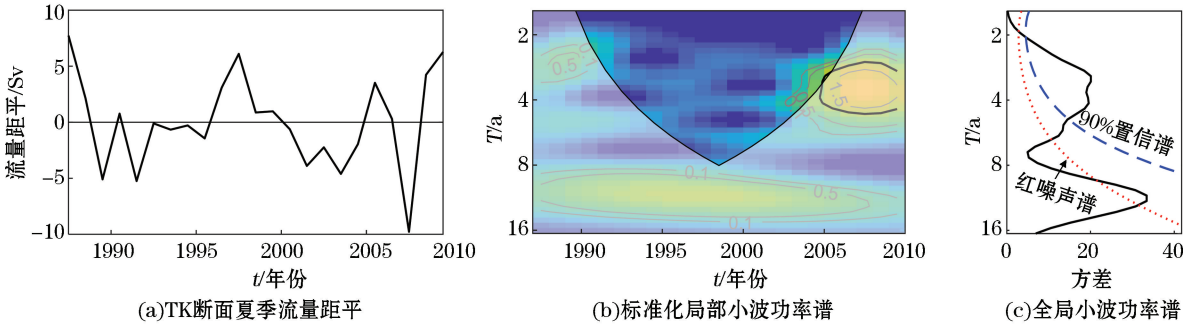


图 9　TK 断面夏季流量的小波分析

Fig.9　Wavelet analysis of KVT across TK section in summer

2.3　长期变化趋势

PN 断面流量的长期变化趋势是增加的。图 10a 分别表示 1972—1976 年、1977—2017 年以及 1972—2017 年的长期变化趋势，这 3 个时间段内流量的长期趋势都是增加的，1972—1976 年的增加趋势较强，增长率约为 1.0 Sv/a，而 1977—2017 年的增加趋势要缓和，增长率约为 0.2 Sv/a。统计结果显示，1972—2017 年全部时间序列的增长率约为 0.3 Sv/a，PN 断面流量增幅约为 13 Sv，这种显著的长期变化趋势是值得关注的，并且，我们发现在 1976 年附近流量变化出现 1 个突变点，增幅约为 7 Sv，这可能与 PDO 在 1976 年发生位相转移有关。Zhang 等[28]也发现在 1976 年附近流量有突增的现象。然而图 10b 显示，TK 断面的长期变

化趋势只是略有增加，增长率约为 0.05 Sv/a。

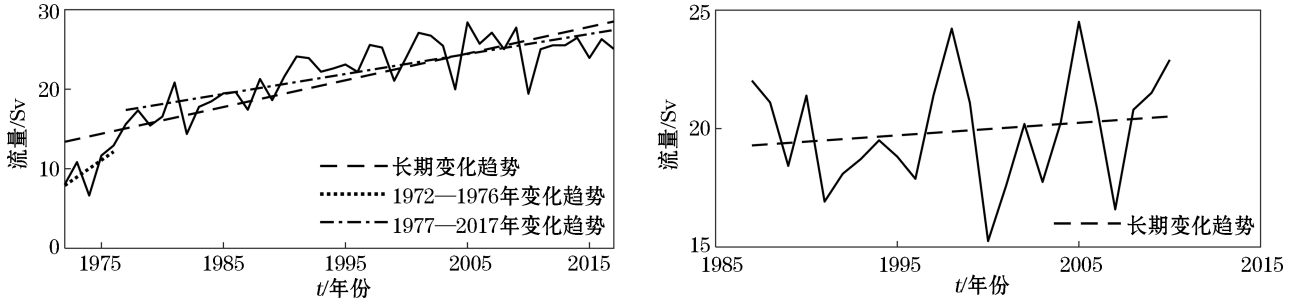


图 10 PN 断面和 TK 断面黑潮年平均流量

Fig.10 Variation of annual mean KVT across the PN and TK sections

对于 PN 断面长期增加趋势，按照经典的 Sverdrup 理论[29]，黑潮流量由北太平洋副热带风应力旋度决定，然而 20 世纪大气再分析(20CRv2)资料显示，该海区风应力旋度在过去一个多世纪是减弱的[30]，意味着黑潮流量减少。这与本文计算结果以及再分析资料显示的黑潮流量增加矛盾。本文利用 1976—2017 年 NCEP-NCAR I 再分析资料(水平分辨率为 2°)，分别计算了太平洋风应力旋度沿 28°N，35°N，40°N 纬线(146°12′E 至太平洋东边界)的积分(图 11)，结果显示更高纬度(35°N 和 40°N)风应力旋度绝对值增加的确与 PN 断面流量长期趋势增加是一致的，而同纬度带(28°N)的风应力旋度长期趋势是减弱的，这说明东海黑潮 PN 断面流量可能与高纬度带的风场密切相关。如果不考虑西边界附近的陆坡地形，副热带内区风场变化激发的正压 Rossby 波，在短时间内沿纬线传播到黑潮区，导致海面坡度调整，从而增加黑潮流速；当考虑陆坡地形作用后，海洋波动调整的传播路径变为沿等位涡(f/H)线传播，至西边界附近时因为水深减小将向低纬度偏移，故此时黑潮流量的变化将与更高纬度风场，如西风带的变化密切相关。

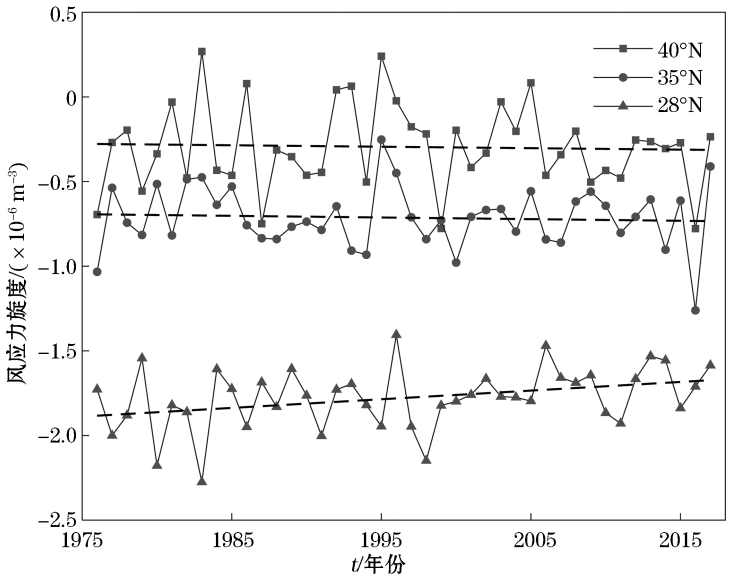


图 11 太平洋年平均风应力旋度沿 40°N，35°N 和 28°N 纬线(146°12′E 至太平洋东边界)积分(实线)及其长期变化趋势(虚线)

Fig.11 Variation (solid) and long-term trend (dashed) of the zonal integral of wind stress curl along 40°N, 35°N and 28°N over the area in the Pacific Ocean between 146.2°E and eastern boundary

通过分析 PN 和 TK 断面流量的季节、年际以及长期变化趋势可以看出，黑潮在不同区域的主要周期存在差异。局地风场和复杂的分支流动可能会造成两断面流量变化的主要周期存在差异。Lee 和 Williams[31]曾提出沿着大西洋湾流流向的风场对海水的输运量贡献很大，冬（夏）季北（南）风也会减少（增加）东海黑潮的流量[32]，但就两断面的走向来看，PN 断面偏“东西”走向，TK 断面偏“南北”走向，且几乎垂直，同一季节局地风场可能会对两断面的流量贡献存在差异。黑潮在 PN 和 TK 断面之间具有复杂的分支流动，如进入黄海、对马海峡以及大隅海峡的分支，通过琉球群岛进出东海的分支，这都可能削弱或改变黑潮的传播信号，从而造成黑潮在不同区域主要周期不一致的现象。

3　结　语

利用动力高度法，本文计算了 PN 断面 46 a（1972—2017 年）和 TK 断面 24 a（1987—2010 年）流量变化，分别以年平均、冬季和夏季流量为基数，对这两个断面流量做了小波分析。通过对东海黑潮季节、年际以及长期变化趋势的研究，发现东海黑潮的流量变化存在一定的区域性差异，同时具有多时间尺度变化特征。具体认识如下：

1）PN 断面流量多年平均值为 21.1 Sv，最大值为 32.8 Sv（冬，2002 年），最小值为 3.1 Sv（秋，1974 年），TK 断面流量多年平均值为 19.8 Sv，最大值为 29.2 Sv（夏，1987 年），最小值为 6.0 Sv（春，2000 年），PN 断面流量的变动幅度大于 TK 断面。

2）季节变化规律：PN 断面流量冬、春和夏季相差很小（最大差值为 0.2 Sv），秋季最小；TK 断面流量冬、夏季强而春、秋季弱，秋季最小。这两个断面流量的季节变化虽不完全一致，但共同点是最大（小）流量均出现在夏（秋）季。

3）年际变化规律：小波分析显示，PN 断面流量的年际变化规律并不显著，可能受噪声信号影响较大；TK 断面流量年际变化显著，具有 3～7 a 的显著周期，发生在 1995—2005 年，峰值为准 4 a 和准 6 a。不同季节，黑潮流量变化的显著周期也不同，PN 断面冬季和夏季变化显著，且均具有 2～3 a 的显著变化周期，但显著周期分别发生在 1976—1992 年和 2000—2013 年间，峰值分别为准 3 a 和准 2 a；TK 断面冬季流量变化显著，具有 3～7 a 的显著周期，主要发生在 1995—2005 年间，峰值为准 4 a 和准 7 a，但夏季流量变化无显著周期。东海黑潮在 PN 和 TK 断面之间存在多个与邻近区域水交换的通道，使得两断面流量存在一定差异。但从年际以上尺度看，东海黑潮流量变化可能与 ENSO 有关。

4）长期变化趋势：PN 断面流量长期变化趋势是增加，增长率约为 0.3 Sv/a，TK 断面流量长期变化趋势增加并不明显，增长率仅为 0.05 Sv/a。PN 断面流量在 1976 年附近有一个突变点，流量有较大幅度增加。北太平洋更高纬度（35°N 和 40°N）风应力旋度绝对值是增加的，与 PN 断面流量长期趋势增加是一致的，而同纬度带（28°N）的风应力旋度长期趋势是减弱的，所以东海黑潮 PN 断面流量可能与高纬度带的风场密切相关。

参考文献（References）：

[1] NITANI H. Beginning of the Kuroshio: its physical aspects[M]. Tokyo: Tokyo University Press, 1972: 129-123.

[2] GUAN B X. Analysis of the variations of volume transport of the Kuroshio in the East China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1983, 1(2): 156-165.

[3] TANG Y X, LIN K, TOMOSI T. Analysis of some features of volume transport of the Kuroshio in the East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(6): 643-651. 汤毓祥，林葵，田代知二. 关于东海黑潮流量某些特征的分析[J]. 海洋与湖沼，1994，25(6)：643-651.

[4] KONG B, CHEN H X, YUAN Y L. Analysis of current structure and seasonal variation at PN Section of the East China Sea Kuroshio during 1991—2011[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(5): 14-26. 孔彬，陈红霞，袁业立. 1991—2011 年东海黑潮 PN 断面流结构与季节变

化分析[J]. 海洋学报，2016，38(5)：14-26.

[5] SUN X P，WANG Y P，YUAN Q K，et al. The variation of the Kuroshio during 1986-1988[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica，1991，22(6)：524-533. 孙湘平，王元培，袁启科，等. 1986-1988 年黑潮的变异[J]. 海洋与湖沼，1991，22(6)：524-533.

[6] NISHIZAWA J. Estimation of the Kuroshio mass transport flowing out of the East China Sea to the North Pacific[J]. La Mer，1982，20：55-59.

[7] SAIKI M. Relation between the geostrophic flux of the Kuroshio in the eastern China sea and its large meanders in south of Japan[J]. Oceanographical Magazine，1982，32：11-18.

[8] QIU B，MIAO W F. Kuroshio path variations south of Japan：bimodality as a self-sustained internal oscillation[J]. Journal of Physical Oceanography，2000，30：2124-2137.

[9] KAWABE M. Variations of current path，velocity，and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander[J]. Journal of Physical Oceanography，1995，25：3103-3117.

[10] NITANI H. Variation of the Kuroshio south of Japan[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan，1975，31：154-173.

[11] IMAWAKI S，UCHIDA H，ICHIKAWA H，et al. Satellite altimeter monitoring the Kuroshio transport south of Japan[J]. Geophysical Research Letters，2001，28(1)：17-20.

[12] ANDRES M，PARK J H，WIMBUSH M，et al. Study of the Kuroshio/Ryukyu current system based on satellite-altimeter and in situ measurements[J]. Journal of Oceanography，2008，64：937-950.

[13] YUAN Y C，MASAHIRO E，HIROSHI I，et al. A study of the Kuroshio in the East China Sea and the currents east of the Ryuku Islands[J]. Acta Oceanologica Sinica，1991，10(3)：373-391.

[14] YUAN Y C，YANG C H，WANG Z G. Variability of the Kuroshio in the East China Sea and the currents east of Ryukyu Islands I. Variability of the Kuroshio in the East China Sea and the meso-scale eddies near the Kuroshio in 2000[J]. Haiyang Xuebao，2006，28(2)：1-13. 袁耀初，杨成浩，王彰贵. 2000 年东海黑潮和琉球群岛以东海域的变异 I. 东海黑潮及其附近中尺度涡的变异[J]. 海洋学报，2006，28(2)：1-13.

[15] YUAN Y C，SU J L. China's research on Kuroshio and Ryukyu currents since 1995[J]. Science Bulletin，2000，45(22)：2353-2356. 袁耀初，苏纪兰. 1995 年以来我国对黑潮及琉球海流的研究[J]. 科学通报，2000，45(22)：2353-2356.

[16] WEI Y Z，HUANG D J，ZHU X H. Temporal and spatial variability of the Kuroshio at PN and TK sections during 1987-2010[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica，2013，44(1)：30-37. 魏艳州，黄大吉，朱小华. 1987-2010 年 PN、TK 断面黑潮流场的时空变化[J]. 海洋与湖沼，2013，44(1)：30-37.

[17] Japan Oceanographic Data Center (JODC). Serial Station Data[EB/OL]. [2018-09-01]. http://www.jodc.go.jp/.

[18] Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory，National Oceanic and Atmospheric Administration (AOML，NOAA). Global Drifter Data[EB/OL]. [2018-09-01]. https://www.aoml.noaa.gov/data/.

[19] YU L，XIONG X J，GUO Y L，et al. Analysis of the path and axis features of the Kuroshio at the depth of 15 m based on drifting buoy data[J]. Advances in Marine Science，2014，32(3)：316-323. 于龙，熊学军，郭延良，等. 根据漂流浮标资料对黑潮 15m 层流路及流轴特征的分析[J]. 海洋科学进展，2014，32(3)：316-323.

[20] Earth System Research Laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration (ESRL，NOAA). NCEP/NCAR Reanalysis Data Ⅰ[EB/OL]. [2018-09-01]. https://www.esrl.noaa.gov/.

[21] CHEN H X，LIU N，YUAN Y L，et al. Study on the selection of level of no motion for calculating geostrophic flow in the East China Sea Kuroshio area[J]. Advances in Marine Science，2007，25(4)：383-390. 陈红霞，刘娜，袁业立，等. 东海黑潮地转流计算中的零流面选取的问题[J]. 海洋科学进展，2007，25(4)：383-390.

[22] LIN K，TANG Y X，GUO B H. Study on velocity structure and volume transport of the Kuroshio in the Tokara Strait[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica，1995，26(3)：247-253. 林葵，汤毓祥，郭炳火. 吐噶喇海峡黑潮流速结构和流量的研究[J]. 海洋与湖沼，1995，26(3)：247-253.

[23] LIE H J，CHO C H，LEE J H. Separation of the Kuroshio water and its penetration onto the continental shelf west of Kyushu[J]. Journal of Geophysical Research，1998，103：2963-2976.

[24] GUO X Y，MIYAZAWA Y，YAMAGATA T. The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea：the origin of the Tsushima warm current[J]. Journal of Physical Oceanography，2006，36(12)：2205-2231.

[25] ISOBE A. Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves[J]. Journal of Physical Oceanography，2008，64(4)：569-584.

[26] TRENBERTH K E，HOAR T J. El Niño and climate change[J]. Geophysical Research Letters，1997，24(23)：3057-3060.

[27] TERRENCE C，COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society，1998，79：61-78.

[28] ZHANG Q L, HOU Y J, YAN T Z. Inter-annual and inter-decadal variability of Kuroshio heat transport in the East China Sea[J]. International Journal of Climatology, 2012, 32: 481-488.

[29] SVERDRUP H U. Wind-driven currents in a baroclinic ocean: with application to the equatorial currents of the Eastem Pacific[J]. National Academy of Sciences, 1947, 33(11): 318-326.

[30] WU L X, CAI W J, ZHANG L P, et al. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(3): 161-166.

[31] LEE T N, WILLIAMS E. Wind forced transport fluctuations of the Florida Current within the straits of Florida[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1988, 6(2): 115-126.

[32] ICHIKAWA H, BEARDSLEY R C. Temporal and spatial variability of volume transport of the Kuroshio in the East China Sea[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1993, 40(3): 583-605.

Multi-timescale Variations of the Kuroshio Volume Transport Through PN and TK Sections in the East China Sea

XU Da[1,2], MA Chao[1,2], JU Xia[3,2]

(1. *Physical Oceanography Laboratory*, *Ocean University of China*, Qingdao 266100, China;
2. *Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao)*, Qingdao 266237, China;
3. *Lab of Marine Science and Numerical Modeling*, *First Institute of Oceanography*, *MNR*, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on the CTD measurements of 181 voyages at PN section from 1972 to 2017 and 92 voyages at TK section from 1987 to 2010, the seasonal, inter-annual and long-term variations of the Kuroshio volume transport (KVT) across the two sections are analyzed with dynamic height method. The results show that the KVT across PN section is larger in winter, spring and summer than in autumn, while the KVT across TK section is larger in winter and summer than in spring and autumn. The KVT across the two sections both reach their maximum (minimum) in summer (autumn). The significant periods of KVT vary with sections and seasons. The variation of annual mean of KVT across PN section, though not obvious, does show a 3-year period in winter and a 2-year period in summer. That of KVT across TK section shows 4-year and 6-year periods, and 4-year and 7-year periods are found in winter KVT but no significant periods in summer. The KVT across PN section shows an abrupt increase in about 1976, and a long-term increasing trend with increment of 13 Sv from 1972 to 2017 at a growth rate of 0.3 Sv per year. According to the analysis based on the NCEP sea surface wind stress data, wind stress curl has a greater impact on the KVT cross PN section at higher latitudes (35°N and 40°N) of the North Pacific.

Key words: Kuroshio volume transport; PN section; TK section; multi-timescale variation

Received: January 24, 2019