

中国东海黑潮海温变化特征及成因分析

易香妤¹, 董文杰¹, 李劭怡¹, 李源¹, 徐丹亚², 王彰贵²

(1. 中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519082; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 利用新建的中大温盐资料集、HadISST 和 ICOADS 的逐月海温资料, 对东海黑潮关键区 30 a(1981—2010 年)气候态海表温度气候特征进行分析, 并利用 SODA 海表资料尝试找出海表温度变化的特征及原因。结果表明: 在东海黑潮关键区范围内, 1981—2010 年海表温度整体呈现增温趋势, 春冬两季增暖幅度最大, 1997 年是海温气候异常由负到正的转折点; 利用 SODA 表层和次表层温度和海流资料分析看出, 海表温度的增强主要是由经向平流增强带来的增温效应; 此外, 1 000 m 以浅东海黑潮关键区 1997 年后比 1997 年前海水增暖系统更加深厚, 500 m 以浅东海黑潮主流区流速表层约每 10 a 增加 0.6 cm/s, 趋势随深度增加而减小, 年际变化较显著且与 ENSO 变化周期一致, 海表海温约每 10 a 增加 0.2~0.3 °C, 海下 100 m 附近增速最大。

关键词: 东海黑潮; 海洋增温; 海表温度异常; 气候变化; 海洋观测资料; 经向平流

中图分类号: P731.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)03-0038-14

1 引言

黑潮是西北太平洋一支强大的西边界暖流, 是热带太平洋向高纬度地区输送水量、热量和能量的主要通道, 其来源于菲律宾以东, 130°E 以西海域^[1], 具有流速快、流幅窄、流量大和高温高盐等明显特征^[2-4]。长期以来, 黑潮流域的海温对我国气候的影响一直受到科学家的关注, 黑潮不但能对区域气候产生影响^[5-6], 同时也会对全球大气环流和气候产生一定影响^[7]。王闪闪等^[8]的研究表明, 黑潮区域的净热量释放是全球海洋中最大的, 热量的流动可引起大气环流异常, 从而引起周边甚至更远地区气候和天气的变化。在当前全球变化的新形势下, 黑潮海温的研究更加具有深远意义。目前国内外已有许多学者研究黑潮的变化以及黑潮与中国区域甚至全球气候要素的关系。赵焯等^[9]研究了春季中国东海黑潮区大气热源异常对中国东部降水的影响, 结

果表明, 春季中国东海黑潮区上空为显著大气热源, 大气对该热源的响应在不同时空尺度会表现出不同形式。

目前大多数研究是针对黑潮海温在某个季节或区域对大气要素变化的影响, 或者大范围黑潮海域与大气的相互作用, 例如, 刘明洋等^[10]探讨了黑潮延伸体区域海表温度锋的时空变化特征; 宋春阳等^[11]根据气候态资料分析了 2017 年中国近海海表温度特征。但是, 受限于早年资料不足、技术发展不够先进、观测资料不确定性大且覆盖不全等原因, 在中国东海黑潮关键区, 针对其海温在全球变化形势下的长期变化趋势及其变化原因的研究还不够多。由于黑潮的路径长, 范围广, 自身形态变化复杂, 本研究的重点在于综合多种现有资料, 参照前人工作, 通过海表放热量确定最能代表黑潮特征的东海黑潮关键区, 针对此关键区分析东海黑潮海表及次表层温度的长期变化趋势, 并尝试分析找

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-06-24。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1406201、2016YFA0602700、2018YFC1506903); 国家自然科学基金(U1811464)。

作者简介: 易香妤(1995-), 女, 硕士, 主要从事全球气候变化、海洋观测及分析研究。E-mail: yixy6@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 董文杰(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事全球气候变化及其影响研究。E-mail: dongwj3@mail.sysu.edu.cn

出其变化的原因。

2 数据及方法

2.1 实测海温数据

本文所采用实测海温数据取自中国近海海洋观测资料集。它是由中山大学整理构建的一套新的中国近海海洋温盐资料集(1978—2018年)(以下简称“中大温盐资料集”)。其原始数据来源于美国国家海洋数据中心(National Oceanographic Data Center, NODC)、全球海洋实时观测网(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo)、中国海域走航资料和近岸盐温深测量系统(Conductivity/Temperature/Depth, CTD)等。其中NODC的数据包括1978—2005年的舍弃式海水温深度自计仪(eXpendable BathyThermograph, XBT)、海洋站点资料(Ocean Station Data, OSD)、机械式深海温度计(Mechanical BathyThermograph, MBT)、锚定浮标站(MooRed Buoys, MRB)、漂流浮标(DRifting Buoys, DRB)、廓线漂流浮标(Profiling FLoats, PFL)等器测温盐资料以及世界海洋数据集(World Ocean Database, WOD)资料(网址: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database>), 涵盖日本海和中国近海(黄海、渤海、东海和南海)1978—2018年逐月温盐数据;数据库还包括2006年9月—2019年3月南海Argo浮标248个(网址: <https://www.seanoe.org/data/00311/42182/>), 以及国家海洋局第二海洋研究所10次走航CTD温盐观测资料, 包括1994年南海观测数据1次, 1998年南海季风实验8次, 1998年南海海洋环境补充调查1次。3种资料的详情及其对应时间见表1。

参考其他机构的全球温盐分布情况, 针对上述各种实测温盐资料10 m以上的表层数据进行简单的质量控制, 剔除温度 $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及盐度 $< 10\text{‰}$ 或 $> 40\text{‰}$ 等不合理数据, 并进行格式统一, 然后利用Cressman方法进行插值计算, 整合成本文所需数据, 其分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

2.2 再分析海洋数据

美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic

and Atmospheric Administration, NOAA)机构下的国际综合海洋大气数据集(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set, ICOADS)是收集量最大的海洋表面观测数据集, 包括了来自多国船只(商业、海军和研究)的测量数据, 各类浮标、海岸站点以及海洋台站数据等, 免费提供全球过去3个世纪的海洋表面数据, 以及简单的网格化分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ (1960年以后为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)的逐月数据产品(网址: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.coads.1deg.html>)。随着数百年来测量原理和技术的发展, ICOADS数据集包含了众多不同观测系统的观测结果, 因此ICOADS可能是现有资料最完整且种类最多的海表数据集。

哈德莱中心(Hadley Centre)全球海冰和海表温度(Global Sea Ice and Sea Surface Temperature, HadISST)涵盖了1871年至今完整的全球逐月海表温度和海冰数据, 并对1981年以前海洋数据库(主要是船舶航行)和ICOADS的海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)资料采用了最优插值法, 与1982年以后原位数据以及调整后的卫星SST数据结合起来组成了完整的数据集, 数据空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ^[12]。

对于中国东海黑潮海温的研究, 本文对1981—2010年HadISST的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ SST逐月资料(网址: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html>)、ICOADS提供的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ SST逐月资料(网址: <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.nodc:ICOADS-netCDF#>)以及简单海洋数据同化资料(Simple Ocean Data Assimilation, SODA) $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的海洋温度、海洋流速和海表净热量通量逐月资料(网址: https://www.atmos.umd.edu/~ocean/index_files/soda3_readme.html)进行对比分析, 同时利用2.1节建立的中大温盐资料集对分析结果进行简单验证, 资料分辨率及时间详见表1。

2.3 东海黑潮关键区的选取

东海黑潮关键区的选取参照丁良模^[13]的方法, 即通过估算分析中国近海的海面放热量(感热+潜热), 证明东海黑潮关键区的海面放热量具有代表黑潮全域的意义。参照此研究结果选取 $125^{\circ} \sim 130^{\circ}\text{E}$, $26^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 海区范围作为黑潮关键区, 此关

键区既是黑潮流经的主干区,也是著名的气团变性试验 (Air - Mass Transformation EXperiment, AM-TEX)的核心试验海区。东海黑潮关键区的大致位置如图 1 所示。

2.4 中国东海黑潮关键区气候态的确定

基于上述中大温盐资料集,对东海黑潮关键区内逐年表层海温观测样本数进行统计(见图 2)。从

图中可以看出,1994—2018年时间段内搜集到的资料较少,以“连续整 30 a 为气候态”、“选取时间段内关键区内数据资料足够多”以及“包含变化明显气象海洋事件(例如厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)等)”为 3 个挑选指标,同时由于 20 世纪 80 年代后海洋增暖情况较为明显^[14],最终选取 1981—2010 年作为中国东海黑潮关键区海温的研究对象和气候平均值。

表 1 不同数据详情及其对应时期

	资料类型	资料统计年限
中大温盐 资料集	NODC_MBT	1978 年 1 月—1993 年 7 月
	NODC_OSD	1978 年 1 月—2001 年 2 月
	NODC_XBT	1978 年 1 月—2001 年 6 月
	NODC_MRB	1993 年 12 月—2000 年 4 月
	NODC_DRB	2000 年 1—3 月
	NODC_PFL	2000 年 1 月—2001 年 6 月
	NODC 其他仪器资料	2002—2005 年
其他海洋数据	Argo(248 个浮标)	2006 年 9 月—2019 年 3 月
	CTD(7 次走航观测)	1994 年 8 月 28 日—9 月 10 日南海观测,1998 年南海季风实验 6 次,1998 年 6 月 12 日—7 月 6 日南海海洋环境补充调查
	WOD	1981 年 1 月—2010 年 12 月
	HadISST	1981—2010 年(1°×1°)
	ICOADS	1981—2010 年(1°×1°)
	SODA	1981—2010 年(0.5°×0.5°)

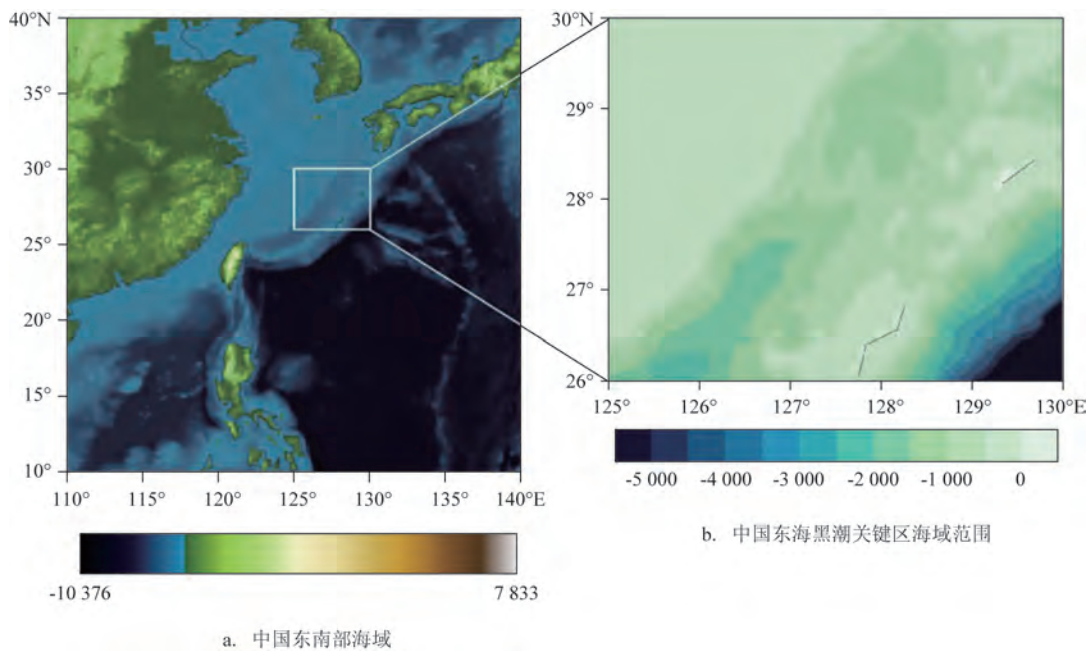


图 1 东海黑潮关键区海域范围及水深(单位:m)

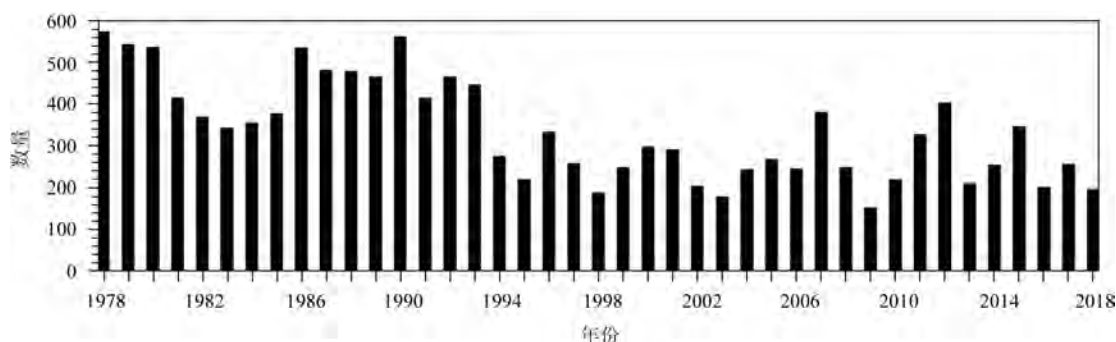


图2 1978—2018年东海黑潮关键区内中大温盐资料集观测样本数量分布

3 1981—2010年东海黑潮关键区海表温度变化特征及成因分析

3.1 东海黑潮关键区 SST 变化趋势

针对所选取的东海黑潮关键区,我们将1981—2010年各资料源的气候态月平均SST进行了对比,结果见图3。结果显示ICOADS和中大温盐资料集的气候态月平均值较为接近,而HadISST资料与前述两种资料相比,5—10月夏秋两季较接近,其中7—8月SST偏高0.2℃左右,但11月—次年4月秋冬两季海表温差别较大,2月平均SST偏低可达1℃。形成这种差别的原因,可能是中大温盐资料集与ICOADS相似,都是直接收集观测资料集进行整合,而HadISST的数据包含了走航的海洋数据库、ICOADS SST以及卫星SST资料并进行了最优插值。其优点是资料多,通过插值涉及的分析范围更广,也能平滑数据,但资料和插值算法可能也会导致更大的系统误差和随机误差,而对于小尺度范围解析的可信度,ICOADS和中大温盐资料集或许会占更多优势。

此外,在东海黑潮关键区,不同资料在1981—2010年SST的趋势大体一致,四季都呈现出增暖趋势,这与冯琳等^[15]得出的在东中国海SST具有明显的长期升高的线性变化趋势的结论相似。表2为各资料4个季节的平均SST以及变化趋势,可以看到平均SST在春冬两季差别更大,夏秋差别较小,HadISST在春冬两季的平均温度较其他两种资料更低;同时也发现3种资料都显示在春季和冬季的增

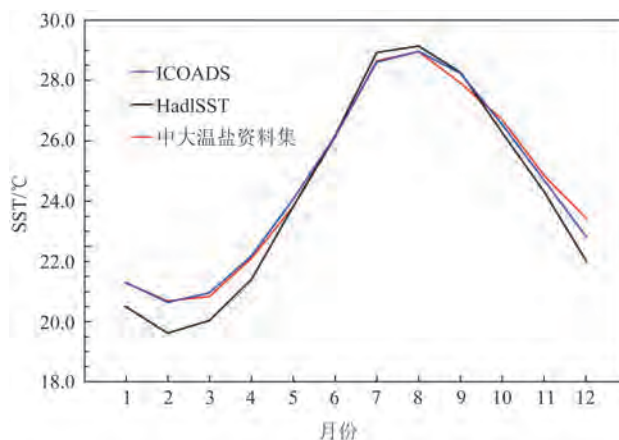


图3 东海黑潮关键区3种资料源1981—2010年气候态月平均SST对比

表2 东海黑潮关键区各数据平均SST变化趋势

类别	季节	中大温盐 资料集	HadISST	ICOADS
平均SST/℃	春季	22.35	21.74	22.39
	夏季	28.07	28.05	27.88
	秋季	26.33	26.26	26.46
	冬季	21.66	20.74	21.59
SST线性趋势/ (℃/10 a)	春季	0.57	0.41	0.28
	夏季	0.34	0.24	0.20
	秋季	0.29	0.32	0.25
	冬季	0.39	0.44	0.34

温幅度更大,中大温盐资料集的增温速度最大在春季,达到0.57℃/10 a,冬季次之,为0.39℃/10 a,而HadISST和ICOADS则是冬季增暖速度更大,增速分别达到0.44℃/10 a和0.34℃/10 a。

为了更加直观地表现东海黑潮关键区SST增温趋势,选取3种资料1981—2010年的月平均序列

和年平均值资料分别作为气候态平均场,并在此基础上计算各自 30 a 的年平均异常值和月平均异常值,海表面温度异常(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)结果如图 4 所示。

图 4 为东海黑潮关键区的年平均和月平均 SSTA 值序列叠加显示。1981—2010 年 30 a 间,3 种资料在关键区的 SST 都呈现出增温趋势,且中大温盐资料集、HadISST 和 ICOADS 的异常值年际变化趋势分别为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 以及 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (见表 3)。对于此现象,前人大多着眼于更长时间或更大范围海域的海温变化,例如苏勤等^[16]研究得出近百余年来,西北太平洋 SST 整体上以 $3.9 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 的速度显著性逐年线性递增,1870—1910 年间表现出缓慢的递减趋势,1910—1930 年间的 SST 为近百余年来的波谷,曲线走势非常平缓,1930 年以后 SST 持续性递增至今;张秀芝等^[14]研究得出近 100 多年来中国近海各海区都呈增温趋势,20 世纪 80 年代以后增暖更加明显,20 世纪 90 年代至今

最暖;但目前还鲜有单独关注东海黑潮区域在 20 世纪 80 年代后的海温变化趋势。从图 4 中可以直观看出,1981—2010 年间东海黑潮关键区在 1997 年前后温度由长期负异常变为长期正异常,但此序列未通过 M-K 突变检验,所以不能算作突变点,但从图 4 可看出东海黑潮关键区海温变暖的趋势毋庸置疑。中大温盐资料集的 SST 年异常值在 1998 年升高近 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, HadISST 和 ICOADS 的 SST 年异常值在 1998 年升高近 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这种突然升高的异常现象很可能与 1997—1998 年的强 El Niño 现象有关。

王彰贵等^[17]研究指出,1997—1999 年出现了本世纪最强的 El Niño 现象,并伴有海温增温速度快、持续时间长和强度大等特点,1997 年 12 月上旬,中、东热带太平洋的海水增暖高达 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,比 1982/1983 年

表 3 东海黑潮关键区年平均 SSTA 变化趋势(单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)

数据类型	中大温盐资料集	HadISST	ICOADS
温度异常线性趋势	0.38	0.37	0.28

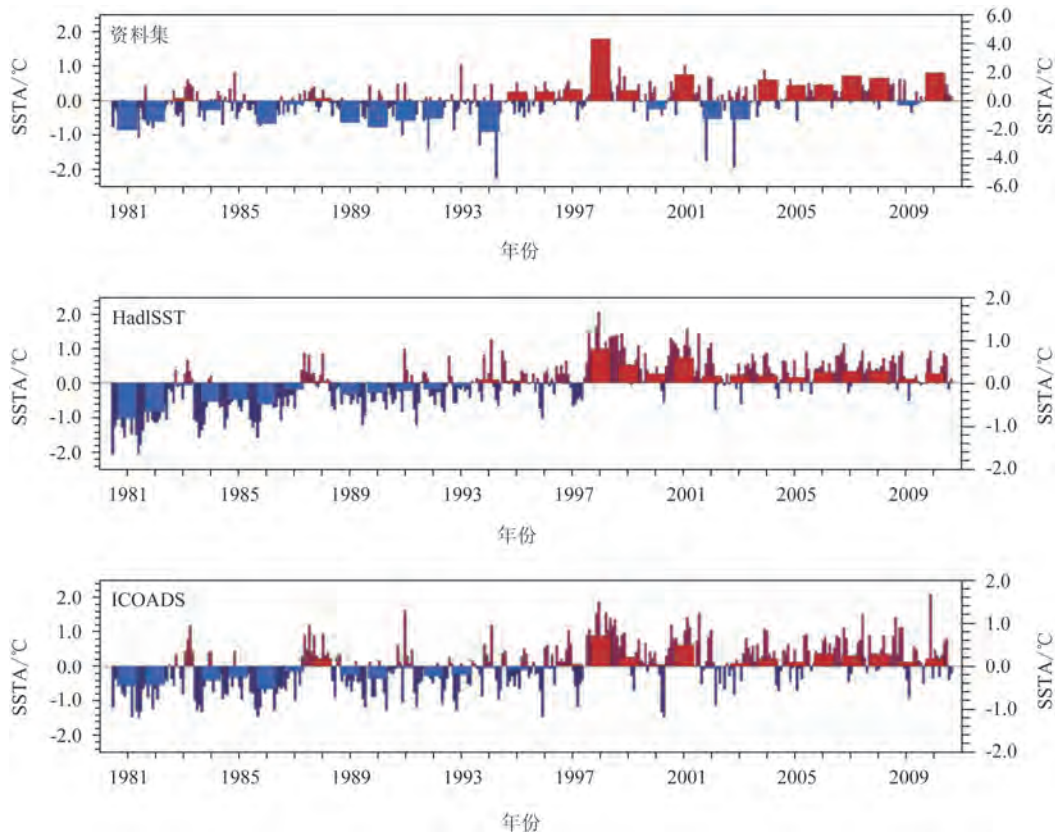


图 4 东海黑潮关键区 1981—2010 年月平均 SSTA(深蓝、深红对应右侧坐标)叠加年平均 SSTA(浅蓝、浅红对应左侧坐标)对比图(使用各资料 1981—2010 年 SST 平均作为气候态平均)

El Niño 现象增暖还高 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1997 年 7 月—1998 年 2 月, 赤道中、东太平洋海水增暖一直高于 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 持续长达 8 M, 足以证明此次 El Niño 现象的增温幅度之大和持续时间之久。

从图 4 中我们还发现, 1998 年 El Niño 现象后十余年, 东海黑潮关键区 SST 正异常的现象依然持续保持, 这种海温异常的维持是全球变暖导致还是与 El Niño 现象相关, 这或许是值得我们关注和研究的一个方向。

3.2 东海黑潮关键区表层增温原因探讨

根据上混合层理论, 若将 SST 视为上混合层的温度, 上混合层内垂直积分下的温度局部变化方程^[18]为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} + K_r \nabla^2 T + \frac{w_e \Delta T}{h} + \frac{1}{\rho c_p h} Q_{net} \quad (1)$$

即 SST 的局部变化 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 取决于海洋内部动力过程, 包括 x 、 y 方向的温度平流项 $(-u \frac{\partial T}{\partial x}, -v \frac{\partial T}{\partial y})$ 、卷挟项 $-\omega \frac{\partial T}{\partial z}$ 、水平扩散项 $-K_r \nabla^2 T$, 以及由海面净热量通量引起的温度变化项 $\frac{1}{\rho c_p h} Q_{net}$ 。

由于本研究选取上层 SST 为研究对象, 根据尺度分析, 将方程省去了垂直方向的卷挟作用和水平扩散项, 省略后的 SST 变化简单方程如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{1}{\rho c_p h} Q_{net} \quad (2)$$

利用 SODA 再分析资料的海表 $0\sim 20\text{ m}$ 平均数据, 计算上式中右边各项物理量, 图 5 为各项物理量的逐年变化异常图。图中可大致看出, 1981—2010 年东海黑潮关键区逐年 SST 整体为增温, 2000—2010 年变化较为平缓, 甚至 2005—2010 年 SST 有所降低, 同样也由于 1997—1998 年超强 El Niño 现象, 使得 1997 年增温率达到最高, 随后 1999 年局部温度为负增长且达到 30 a 中最低; 纬向平流项和海表净辐射通量项在 30 a 间随时间减少, 减少速度逐年降低, 即纬向平流和海表辐射对 SST 的增暖为负影响; 与之相反的是, 经向平流的变化一直为正值, 且 20 世纪 90 年代后一直增强, 表明经向平流项对 SST

的影响逐年增加, 且从 1990 年开始增速越来越快。根据图 4 的年平均(月平均)SSTA 分布的转折点, 分别计算了 1981—1997 年和 1998—2010 年平流项平均值。1981—1997 年平均纬向平流项为 0.41×10^{-7} , 平均经向平流项为 -0.51×10^{-7} , 1998—2010 年平均纬向平流项为 -0.54×10^{-7} , 平均经向平流项为 0.66×10^{-7} , 同样分析可知, 纬向平流带来的温度变化由增温变为降温作用, 而经向平流是由降温变为增温作用。

本研究认为, 在海表 20 m 以上的范围内, 若忽略垂直方向的卷挟作用和水平扩散作用, 1981—2010 年 SST 的增强主要是由于经向平流增强而带来的增温效应, 即由于海水经向流速和温度梯度共同作用导致东海黑潮关键区 SST 升高, 这可能是由于西北太平洋西边界流加强带来的效果, 背后更复杂的原因和机制有待今后的进一步研究。

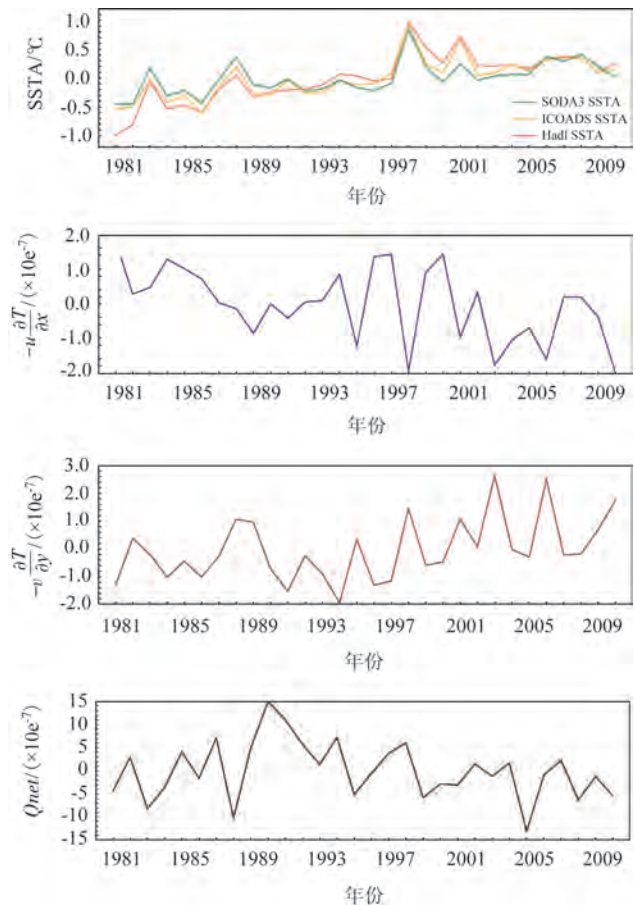


图 5 1981—2010 年东海黑潮关键区 SST 及引起温度变化的各项因子异常值(资料来源于 SODA3.4.1)

4 1981—2010年东海黑潮次表层海温和流速变化趋势

4.1 关键区1000 m以浅海温及其异常变化

除 SST 之外,本研究也关注东海黑潮关键区的次表层温度变化。为了研究这种增温趋势能辐射到的海表以下范围,我们利用 SODA 数据分析了 1981—2010 年东海黑潮关键区不同深度的年平均海温时空分布情况。从图 6a 可以看到,从 1981—2010 年,200 m 以上的海温有较明显的升温趋势,其中在 1987—1988 年和 1997—1998 年,东海黑潮关键区在 150 m 以上有两次明显的突然升温过程。通过文献调研,发现 1987—1988 年和 1997—1998 年正是经历了两次比较强大的 El Niño 现象;同表层相似,每一次 El Niño 现象之后 10 a 内,150 m 以上的海域年平均温度都比这次 El Niño 发生之前更高,这一点在 1997 年 El Niño 现象之后表现尤为明显。

从 1981—2010 年东海黑潮关键区 1000 m 以内(共 28 层)海温及其异常分布也可以看到(见图 6b),海温正异常最明显的时期是在 1997—1998 年(如前所述 El Niño 事件发生时期),100 m 以上达到正异常 1 °C,且在 200 m 以上均有明显正异常现象,这种正异常直到 2010 年仍在 200 m 以上海域有所体现。从图 6 还可看出,1997 年前 300 m 以上海域呈降温状

态,300 m 以下呈升温状态,而 1997 年之后,1 000 m 以浅的整个海域几乎均为正异常,伴随 300 m 以下海水的短期负异常,此现象表明 1997 年后,海水增暖现象使得 1 000 m 以上整层海水增暖系统比 1997 年以前更加深厚。上述结论与谭能志^[19]研究得到的 1945—2010 年“温度在 300 m 以浅显著增温,300~500 m 为过渡层,500 m 以深以下降温”有类似结论。

4.2 次表层流速和温度变化

根据上述研究,考虑到台湾东北部东海黑潮的主流区流幅比较狭窄,二节以上的强流带不到 25 n mile(约 45 km)宽^[20],东海黑潮最大流速一般也在 1.5~3.0 节(约 0.75~1.5 m/s)间^[21],因此上述选取的东海黑潮关键区太大,不仅包含黑潮的主流区,还包含了黑潮主流周围的次尺度涡。本文取 PN 断面附近多年平均流速最大的一点(28°N, 127°E)来代表东海黑潮,分析黑潮流速最近 30 a 的变化趋势,这一点的变化情况在一定程度上能反应出 30 a 黑潮海温和流速的变化。由于此点的海洋再分析资料分辨率较粗,图中只给出 500 m 以浅流速的结果,为便于分析,也同时给出海温变化进行对比分析。

从全年来看,50 m 以浅流速最大能达到 0.8 m/s 以上(见图 7),且黑潮流速的年际变化显著。1987—1988 年、1993 年、1997 年、2001—2005 年东海黑潮流速明显增强,温度升高,尤其在 1977—1978 年和

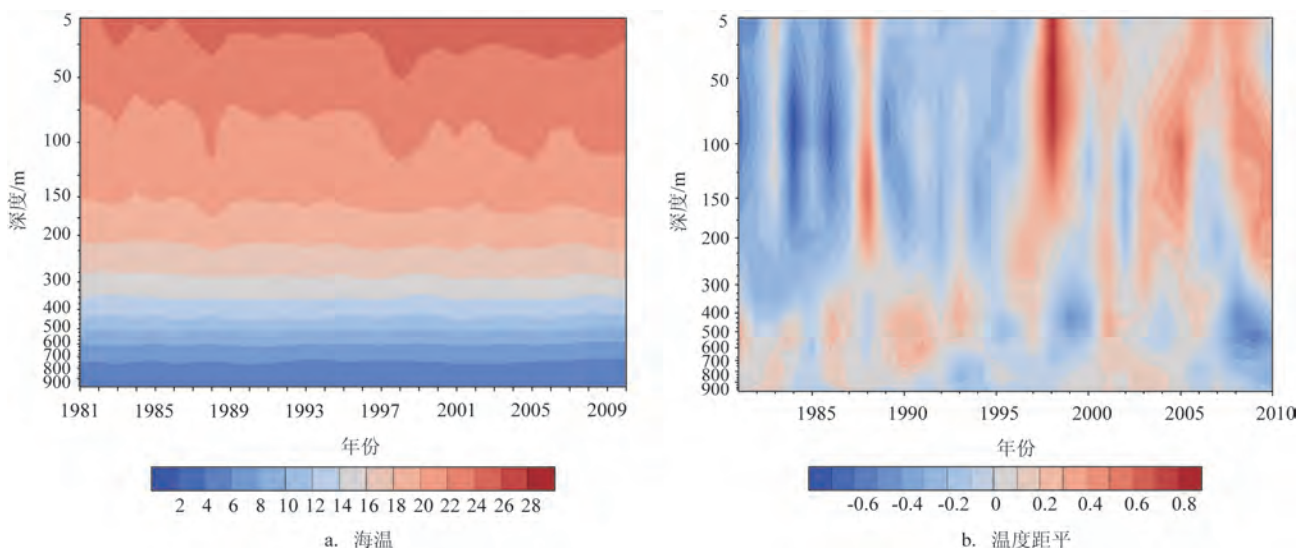


图6 1981—2010年东海黑潮关键区海温及其异常分布深度-时间剖面图(单位: °C)

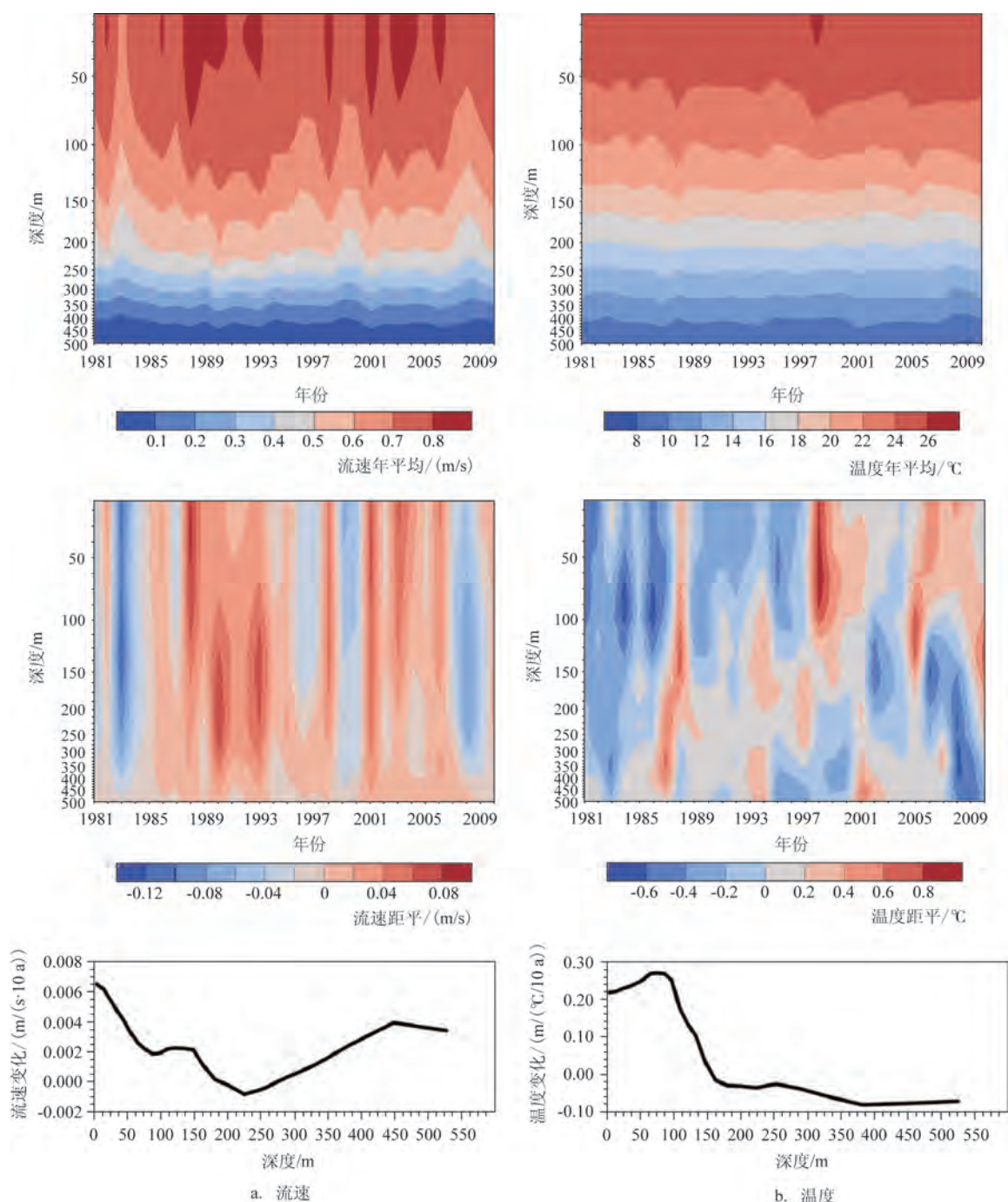


图7 1981—2010年东海黑潮主流区500 m以浅流速、温度及变化趋势

1997—1998年增温显著,这与ENSO变化周期一致。流速的变化趋势结果显示,1981—2010年,表层流速大约每10 a增长0.6 cm/s,增长趋势随深度递减,220 m后海流增长趋势逐渐变大。对于温度变化,150 m以浅的温度在1997年出现最大正异常,1997年后一直保持正距平。东海黑潮主流区温度

变化趋势结果与前面的分析相似,100 m以浅海温增暖最为显著,即每10 a增加0.2~0.3 °C,且在100 m左右增速达到最大。

图8—11为东海黑潮1981—2010年4个季节流速、温度的分布以及各层变化趋势图。整体来看夏季流速最大,200 m以浅范围内基本超过0.7 m/s,

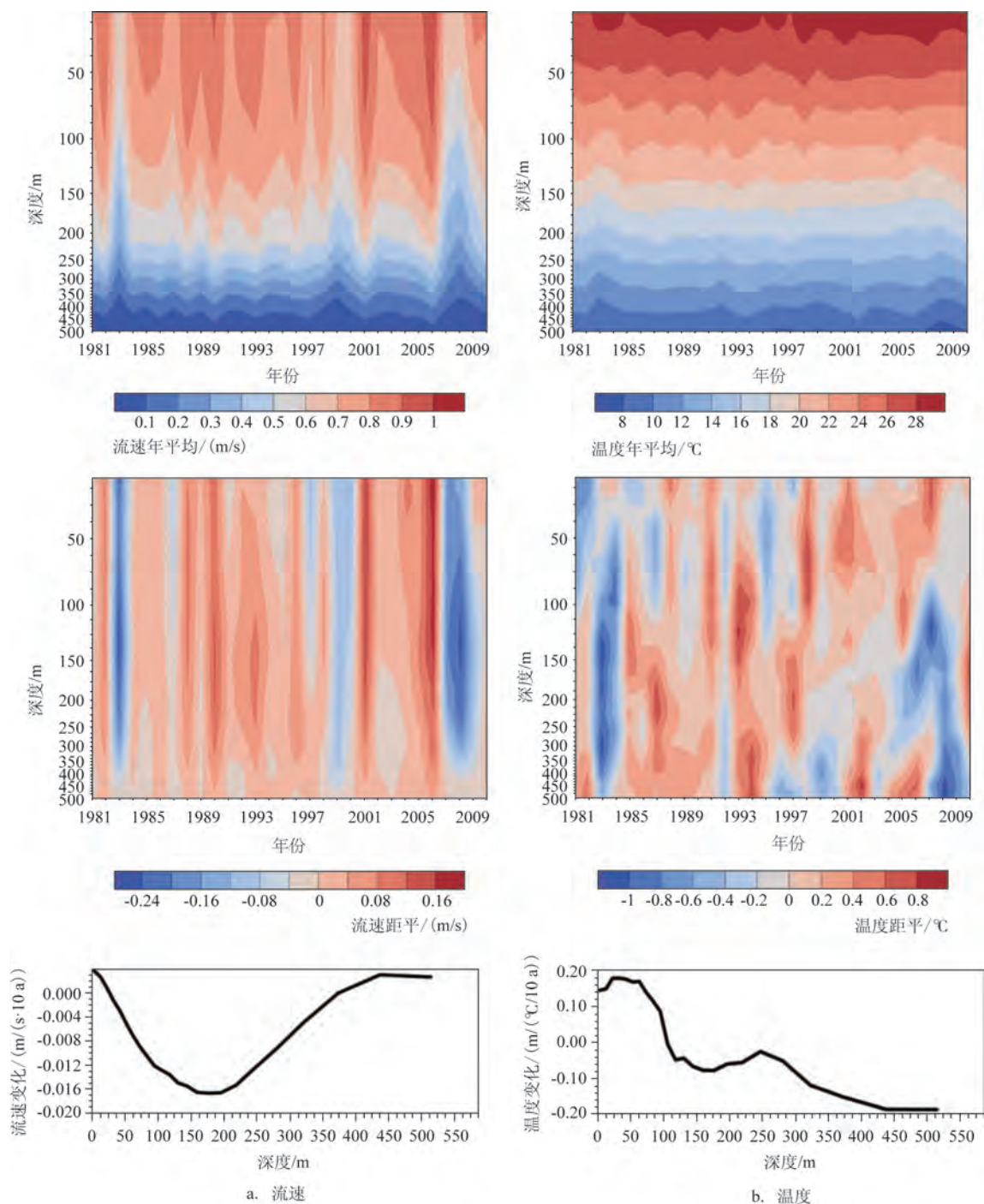


图9 1981—2010年夏季东海黑潮主流区500 m以浅流速、温度及变化趋势

定;秋季表层500 m以浅随深度增速趋势逐渐减小,越到深处越稳定;冬季增速在150 m左右达到最强,之后随深度逐渐减小。对于温度而言,秋冬季节各层均为增加趋势,且增温趋势最强之处均在50~100 m处,随后又随深度增加趋势减缓;而春夏两季最强在50 m左右,其中春季在50 m处的增温趋势能达

到0.4 °C/10 a,但在150 m及以下则表现为降温趋势。

5 结论与展望

本研究得到的结论如下:

(1)通过自建的中大温盐资料集、HadISST以及

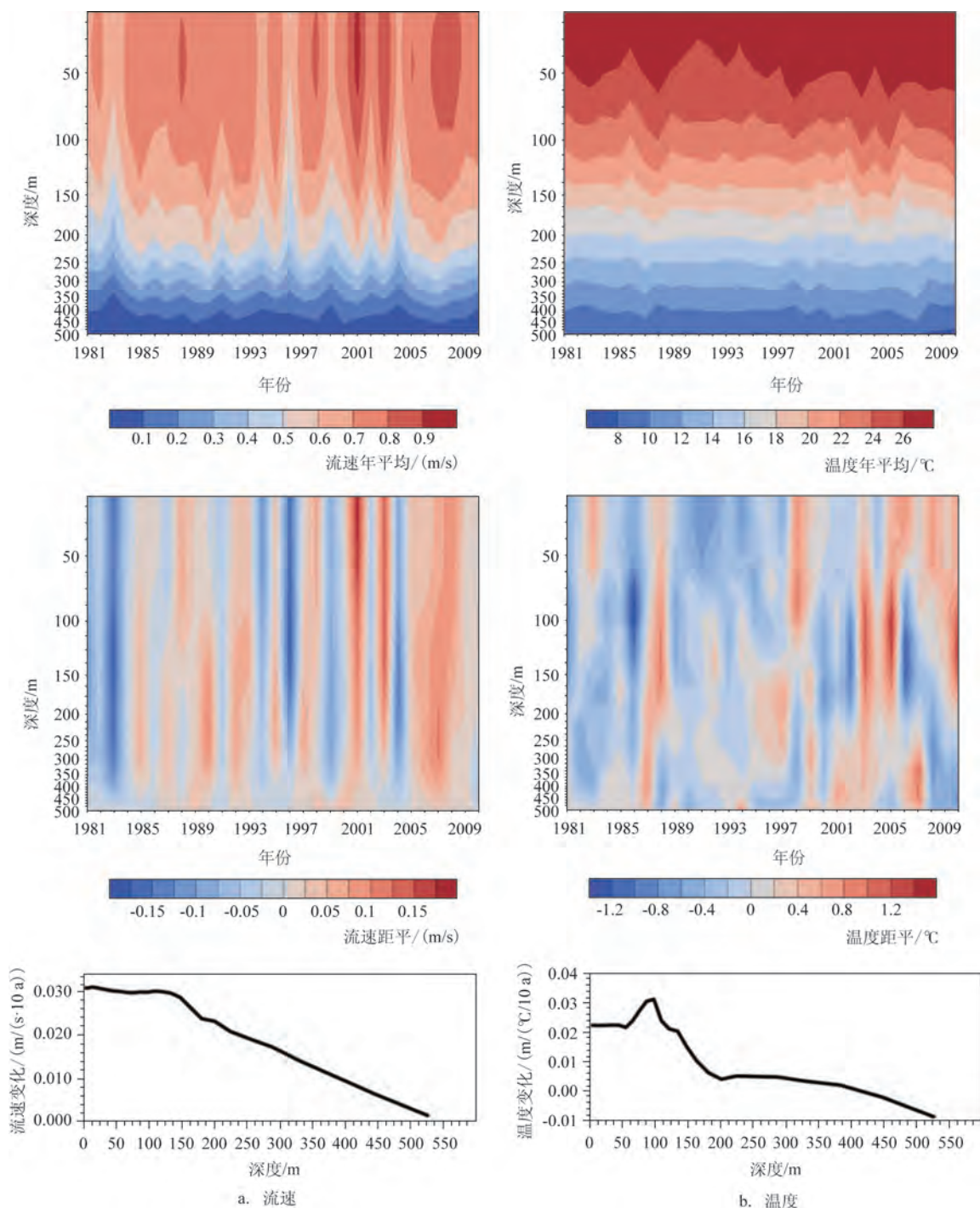


图10 1981—2010年秋季东海黑潮主流区500 m以浅流速、温度及变化趋势

ICOADs资料分析得出,在东海黑潮关键区($125^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$, $26^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$),1981—2010年SST整体呈现出增温趋势,春冬两季增暖幅度最大,1997年是海温异常由负到正的转折点。

(2)通过温度局部变化方程计算得出,在海表20 m以浅范围内,若忽略垂直方向的卷挟作用和水

平扩散作用,东海黑潮1981—2010年SST的增强主要是由于经向平流增强带来的,即由于经向流速和温度梯度共同作用导致东海黑潮关键区SST升高。

(3)东海黑潮关键区次表层在1981—1997年300 m以浅海域呈负温度异常,300 m以下呈正异常,而1997—2010年0~1 000 m左右的整个海域几

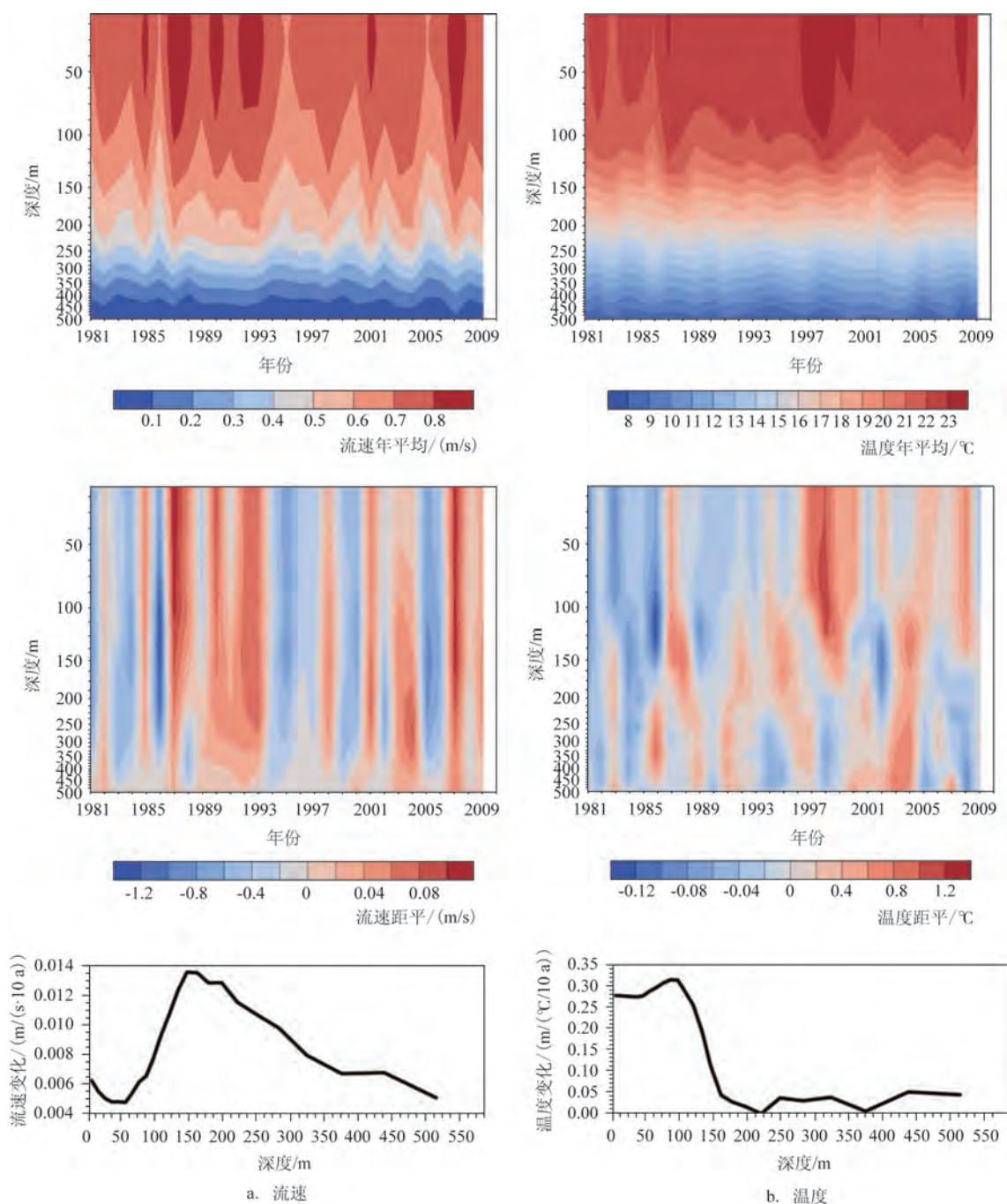


图 11 1981—2010 年冬季东海黑潮主流区 500 m 以浅流速、温度及变化趋势

乎均为正异常,这表明在东海黑潮 1 000 m 以浅范围内 1997 年后比 1997 年前海水增暖系统更加深厚。

(4)通过选取 PN 断面附近多年平均流速最大的一点代表东海黑潮关键区情况,分析发现黑潮 50 m 以浅流速最大能达到 0.8 m/s 以上,且流速的年际变化显著,与 ENSO 的变化周期一致。1981—2010 年

表层流速大约每 10 a 增长 0.6 cm/s,增长趋势随深度递减;100 m 以浅海温增暖最为显著,约每 10 a 增加 0.2~0.3 °C,且在 100 m 左右增速达到最大。

(5)将 4 个季节分开来看,春季几乎 500 m 以浅均为正异常,秋季异常现象最不明显。ENSO 现象对于春冬两季流速和温度的影响最大。各层的流

速在秋冬两季为增长趋势,而春夏则为减少趋势。秋冬季节各层温度均为增长趋势,且在50~100 m处增温趋势最强,而春夏两季最强在50 m左右,春季在50 m处的增温趋势能达到0.4 °C/10 a,而在150 m及以下则表现为降温趋势。

然而本研究还存在一些不足之处。例如:对于中大温盐资料集的原始资料收集还不够完善,个别地区的数据有待仔细排查和修正,之后会继续完善观测数据集的收集和处理工作;受到观测资料限制,本研究选取的年限不够长,东海黑潮关键区海温增强现象更为复杂的原因、增温现象背后的动力学分析、ENSO事件与东海黑潮温度和流速的具体关联、影响范围和物理机制等问题还需展开进一步研究。

致谢:诚挚感谢美国麻省大学海洋科学和技术学院终身正教授、吾兹霍尔海洋研究院物理海洋系兼职科学家陈长胜教授对中大中国近海海洋温盐资料收集提供的大力支持。

参考文献:

- [1] Nitani H. Beginning of the Kuroshio[M]//Kuroshio: Physical Aspects of the Japan Current. Seattle: University of Washington Press, 1972: 129-163.
- [2] Stommel H M, Yoshida K. Kuroshio: its physical aspects[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972: 129-164.
- [3] Su J, Guan B, Jiang J. The Kuroshio, part 1, physical features[J]. Oceanography and Marine Biology: An Annual Review, 1990, 28: 11-71.
- [4] Bryden H L, Roemmich D H, Church J A. Ocean heat transport across 24°N in the Pacific[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1991, 38(3): 297-324.
- [5] 翁学传, 张启龙, 杨玉玲, 等. 东海黑潮热输送及其与黄淮平原区汛期降水的关系[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(3): 237-245.
- [6] 张启龙, 翁学传, 程明华. 华北地区汛期降水与热带西太平洋暖池和黑潮的关系[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 575-583.
- [7] 谷德军, 王东晓, 袁金南. 黑潮输送的异常及其与大尺度海气相互作用的关系[C]//推进气象科技创新加快气象事业发展——中国气象学会2004年年会论文集(下册). 北京: 气象出版社, 2004.
- [8] 王闪闪, 管玉平, Li Z J, 等. 黑潮及其延伸区海表温度变化特征与大气环流相关性的初步分析[J]. 物理学报, 2012, 61(16): 169201.
- [9] 赵焯, 徐海明, 徐蜜蜜, 等. 春季中国东海黑潮区大气热源异常对中国东部降水的影响[J]. 气象学报, 2015, 73(2): 263-275.
- [10] 刘明洋, 谭言科, 李崇银, 等. 黑潮延伸体区域海表温度锋的时空变化特征分析[J]. 热带气象学报, 2017, 33(6): 903-911.
- [11] 宋春阳, 姜华, 张守文, 等. 2017年中国近海海表温度特征[J]. 海洋预报, 2019, 36(1): 1-9.
- [12] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D14): 4407.
- [13] 丁良模. 黑潮关键区的海面放热量对长江地区梅雨降水的影响[J]. 海洋学报, 1992, 14(3): 47-54.
- [14] 张秀芝, 裘越芳, 吴迅英. 近百年中国近海海温变化[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 799-807.
- [15] 冯琳, 林霄沛. 1945~2006年东中国海海表温度的长期变化趋势[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(1): 13-18.
- [16] 苏勤, 郑崇伟, 杨艳, 等. 近百年来西北太平洋 SST 长期变化趋势研究[J]. 海洋预报, 2014, 31(2): 50-55.
- [17] 王彰贵, 蔡怡, 张丽. 1997/98年厄尔尼诺特征及97年气候异常[J]. 海洋预报, 1998, 15(3): 124-131.
- [18] Cai R S, Tan H J, Kontoyiannis H. Robust surface warming in offshore China seas and its relationship to the East Asian Monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales[J]. Journal of Climate, 2017, 30(22): 8987-9005.
- [19] 谭能志. 1945-2010年东海黑潮区PN断面温度的季节/年际/年代际变化[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
- [20] 管秉贤. 黑潮——一支世界著名的大洋强流[J]. 海洋科学, 1978, 2(2): 1-6.
- [21] 伍伯瑜. 黑潮流系——Ⅱ黑潮流系的水文特征[J]. 海洋通报, 1985, 4(6): 59-66.

The characteristics of sea temperature variation in the Kuroshio area in the East China Sea and its causes

YI Xiang-yu¹, DONG Wen-jie¹, LI Shao-yi¹, LI Yuan¹, XU Dan-ya², WANG Zhang-gui²

(1. Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082 China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082 China)

Abstract: Based on the monthly mean sea temperature dataset of the newly-built China Sea Ocean Observation

database, HadISST dataset and ICOADS, this paper analyzes the climatic characteristics of sea surface temperature in the Kuroshio area in the East China Sea from 1981 to 2010, and examine the characteristics of sea surface temperature variation and its cause using SODA. The results show that the sea surface temperature reveals an increasing trend with the maximum rate in spring and winter and with a transition point in 1997 when the sea temperature anomaly turning from negative to positive. The increase of sea surface temperature is mainly caused by the intensification of meridional advection. Moreover, the extension of sea temperature increase above the depth of 1 000 m is deeper after 1997 compared to that before 1997. The current speed in the sea surface increases 0.6 cm/s every 10 years above the depth of 500 m in the Kuroshio area in the East China Sea, which weakens with depth and shows significant interannual variation in accordance with the ENSO cycle. The sea surface temperature increases 0.2~0.3 °C every 10 years with the maximum rate near 100 m.

Key words: Kuroshio in the East China Sea; ocean warming; SST anomaly; climate change; ocean observation database; ocean meridional advection