李扬, 陈权亮, 蔡宏珂, 等. 2019. 全球变暖背景下热带太平洋海温长期趋势研究 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 723−734. LI Yang, CHEN Quanliang, CAI Hongke, et al. 2019. Long Term Trend of Tropical Pacific Temperature under Global Warming [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(6): 723−734. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18072

全球变暖背景下热带太平洋海温长期趋势研究

李扬　陈权亮　蔡宏珂　汪正林

成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室，成都 610225

摘　要　热带太平洋对全球的气候有重要作用。然而，关于全球变暖背景下热带太平洋海温长期趋势的研究，迄今为止仍有争议。本文利用多套海表温度资料和次表层海温资料，基于无参的趋势估计方法（Theil-Sen趋势），分析了热带太平洋海表温度长期趋势及赤道太平洋次表层海温长期趋势。多套资料的结果均表明在全球变暖背景下，热带太平洋冷舌区为长期冷趋势，而冷舌区之外的热带太平洋区域为长期暖趋势，即似La Niña（La Niña-like）海温长期趋势。此海温长期趋势是由热带太平洋冷舌模态所引起。当冷舌模态为正位相时，对应热带太平洋冷舌区为冷海温异常，而冷舌区之外的热带太平洋为暖海温异常。冷舌模态时间序列主要为长期趋势，而造成冷舌模态长期趋势的机制是全球变暖强迫下的海洋动力反馈过程。赤道太平洋的表层和次表层海温似La Niña型的长期趋势，是冷舌模态在表层海温和次表层海温上的不同体现。

关键词　全球变暖　热带太平洋　海温长期趋势

文章编号　1006-9585(2019)06-0723-12　　**中图分类号**　P467　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18072

Long Term Trend of Tropical Pacific Temperature under Global Warming

LI Yang, CHEN Quanliang, CAI Hongke, and WANG Zhenglin

Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, *College of Atmospheric Sciences*, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225

Abstract　The tropical Pacific plays an important role in modulating the global climate. However, large discrepancies remain among the various estimates of the long-term trend in the tropical Pacific under global warming. Using multiple sea surface temperature (SST) and subsurface temperature datasets, this study investigates the long-term trend of SST in the tropical Pacific and the long-term trend of subsurface temperature in the equatorial Pacific based on the Theil−Sen trend estimation method. Our results indicate a cooling trend in the Pacific cold tongue region and a warming trend in the rest of the tropical Pacific under global warming. That is, the long-term trend of oceanic temperature has a La Niña-like pattern. Furthermore, this La Niña-like pattern in the tropical Pacific is induced by the cold tongue mode (CTM). A positive CTM is characterized by the cold temperature anomaly in the Pacific cold tongue region and the warm temperature anomaly in the rest of the tropical Pacific. Moreover, the time series of the CTM mainly exhibits a strong long-term trend, which is induced by the ocean dynamical processes in response to global warming. The La Niña-like pattern of the long-term trend of the SST and subsurface temperature in the equatorial Pacific indicates the different aspects of the CTM.

收稿日期　2018-06-11；**网络预出版日期**　2018-10-25

作者简介　李扬，男，1990年出生，博士，主要从事海气相互作用研究。E-mail: liyang0711@gmail.com

通讯作者　陈权亮，E-mail: chenql@cuit.edu.cn

资助项目　国家自然科学基金项目41805054，成都信息工程大学科研基金项目KYTZ201724

Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grant 41805054), Scientific Research Fund of Chengdu University of Information Technology (Grant KYTZ201724)

Keywords Global warming, Tropical Pacific, Long-term trend of oceanic temperature

1 引言

热带太平洋为全球气候提供了丰富的感热和潜热，并且它拥有全球最重要的海温年际变化模态，即El Niño（Rasmusson and Carpenter，1982）。El Niño能对全球经济和环境产生广泛的影响。例如，由El Niño引起的热带太平洋信风变化在亚澳季风系统中扮演着重要的角色（Yang et al.，2017a，2017b）。那么，在全球变暖这一大背景下，热带太平洋海温如何变化？这是近期的热点问题，也是很有研究意义的科学问题。比如，已有的研究表明，全球变暖背景下的热带太平洋海温长期趋势对El Niño的形态变化（Larkin and Harrison, 2005；Ashok et al.，2007；Kao and Yu，2009；Kug et al.，2009；Yeh et al.，2009；Ren and Jin, 2011）具有重要影响（Duan et al.，201；Li et al.，2017）。

然而，热带太平洋海温长期趋势与全球变暖的关系一直以来都有争议（Vecchi et al.，2008；Collins et al.，2010）。争议主要集中在热带太平洋的东西海温梯度，即在全球变暖背景下热带西太平洋更暖还是东太平洋更暖。已有的一些研究认为全球变暖引起热带东太平洋更暖，将此称作似El Niño（El Niño-like）海温型。一些学者们也从观测（Graham，1995；Wang，1995；Trenberth and Hoar，1996；Zhang et al.，1997；Knutson and Manabe，1998）和模式（Knutson and Manabe，1995；Tett，1995；Meehl and Washington，1996；Roeckner et al.，1996；Timmermann et al.，1999；Cai and Whetton，2000；Jin et al.，2001）证实了这种海温型。例如，Wang（1995）利用再分析资料发现自1976年以来热带东太平洋有变暖趋势；Trenberth and Hoar（1996）利用南方涛动指数，推测20世纪90年代初中东太平洋持续增暖可能是由全球变暖所引起；Knutson and Manabe（1998）发现自1949年起热带东太平洋的增暖趋势强于西太平洋。同时，Meehl and Washington（1996）通过增加耦合模式中CO_2浓度发现了全球变暖导致似El Niño海温型出现的可能机理，他们认为云反射反馈会引起似El Niño海温型，这是由于西太平洋更厚的云层会反射更多的太阳辐射，引起东西海温梯度变小，Walker环流变弱，从而导致东西海温梯度进一步变小，如此循环往复最终形成似El Niño海温型。另外，Held and Soden（2006）认为由于在全球变暖背景下水汽和降水的增长率不同，即水汽和降水增长率分别约为每摄氏度7%和2%，根据质量守恒原理，边界层和自由大气的质量交换一定要减小。这将引起Walker环流减弱，减弱的Walker环流导致El Niño-like海温型（Vecchi and Soden，2007）的出现。

与此同时，热带东太平洋比西太平洋更冷的现象，即似La Niña（La Niña-like）海温型也在观测（Cane et al.，1997；Karnauskas et al.，2009；Compo and Sardeshmukh，2010；Zhang et al.，2010；Solomon and Newman，2012；L'Heureux et al.，2013；李建平等，2013；Drenkard and Karnauskas，2014；Yang et al.，2014；Li et al.，2015；Funk and Hoell，2015）和模式（Zhang et al.，2010；Yang et al.，2014；Funk and Hoell，2015）中得到验证。Solomon and Newman（2012）利用多套海表温度资料分析了热带太平洋海温长期趋势，他们发现多套资料均表现出赤道西太平洋的增暖强于赤道东太平洋，而当去除ENSO信号后，多套资料均表现为赤道西太平洋为增暖趋势，而赤道东太平洋为变冷趋势。L'Heureux et al.（2013）随后利用多套海平面气压资料也发现Walker环流有增强的趋势，当去除ENSO信号后，Walker环流的增强趋势更加显著。Funk and Hoell（2015）分析了观测资料和CMIP5模式资料，都得到当去除ENSO信号后，赤道西太平洋为暖趋势，而赤道东太平洋为冷趋势，整个热带太平洋为非常明显的似La Niña海温型。另外，已有的研究表明，造成全球变暖背景下热带太平洋似La Niña海温型的主要机制为海洋动力反馈（Clement et al.，1996；Sun and Liu，1996；Cane et al.，1997；Seager and Murtugudde，1997；Zhang et al.，2010）。其具体过程为，由于赤道东太平洋有非常强的上翻流，因此在全球变暖背景下赤道东太平洋强的上翻流会导致该区域海温变暖速度减慢，从而引起赤道西太平洋海温相对较暖，而东部相对较冷，即海

温梯度增强，增强的海温梯度会导致赤道太平洋地区信风增强，而当信风增强后，赤道东太平洋的上翻流会增强，从而引起赤道东太平洋海温进一步变冷。

从前人的工作中可以看出，热带太平洋海温长期趋势的研究还有争议。这可能一方面是因为不同的海温资料之间有差异，另一方面可能和计算趋势的方法有关。现有计算趋势的主要方法为最小二乘法，但是此方法受离群值影响较大。基于以上两点，本文将利用多套表层和次表层海温资料，运用无参的趋势估计方法来计算热带太平洋海温长期趋势。所谓无参的趋势计算方法，是计算样本中任意两点斜率的中位数来代表样本的趋势，这样能有效避免离群值所造成的偏差。本文安排如下，第二部分简要介绍观测资料和方法，第三部分分析全球变暖背景下热带太平洋海温长期趋势，第四部分探讨引起热带太平洋海温长期趋势的原因，最后为小结。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所使用的海表温度资料共有4套，次表层海温资料共有3套（表1）。所有资料的气候态时段为1961~1990年。

2.2 方法

本文使用了标准化的经验正交函数（NEOF），它是将EOF得到的时间序列除以其标准差且空间型乘以此标准差（Zheng et al.，2013）。本文采用无参数的趋势估计方法（Theil，1950；Sen，1968），公式如下：

$$T = \mathrm{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right), \forall j < i, 1 \leqslant j < i \leqslant N, \quad (1)$$

其中，Median表示中位数函数，∀表示穷举所有情况，N表示样本数量，T为所有任意两点斜率的中位数，即为Theil-Sen趋势。该趋势的检验方法为无参的Mann-Kendall方法。另外，本文还采用了皮尔逊相关系数来描述两个变量的线性相关，用r来表示相关系数，公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

其中，x和y为两组变量，$\bar{x}$、$\bar{y}$表示平均值。另外，本文用有效自由度来检验相关系数的显著性（Bretherton et al.，1999；Li et al.，2013），公式如下：

$$\frac{1}{N^{\mathrm{eff}}} \approx \frac{1}{N} + \frac{2}{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{N-j}{N}\rho_{XX}(j)\rho_{YY}(j), \quad (3)$$

其中，N^{eff}为有效自由度，ρ_{XX}和ρ_{YY}分别为两组序列X和Y在滞后时间j上的自相关系数。

3 热带太平洋海温长期趋势

3.1 热带太平洋海表温度长期趋势

如图1a-1d所示，4套资料的海表温度长期趋势大致呈现出整个热带太平洋地区一致增暖的现象。尽管HadISST1和Kaplan资料在赤道东太平洋部分地区呈现出变冷的趋势，但整个热带太平洋总体还是变暖的趋势。不同的资料呈现出海表温度长期趋势的不一致，可能和不同资料的插值方法或者噪音有关。Compo and Sardeshmukh（2010）认为

表1 本文所用资料

Table 1 Details of the datasets used in this study

	资料名称（参考文献）	研究机构	时段	水平分辨率（纬度×经度）	垂直分辨率
海表温度资料	HadISST1（Rayner et al.，2003）	英国Hadley中心	1870~2012年	1°×1°	–
	第三版ERSST（Smith and Reynolds，2004）	美国NOAA		2°×2°	–
	第二版COBE（Ishii et al.，2005）	日本气象厅		1°×1°	–
	Kaplan（Kaplan et al.，1998）	美国哥伦比亚大学		5°×5°	–
次表层海温资料	SODA 2.2.4（Carton and Giese，2008）	美国马里兰大学帕克分校	1871~2010年	0.5°×0.5°	40层
	Ishii（Ishii and Kimoto，2009）	日本海洋科学技术中心	1945~2010年	1°×1°	24层
	ORAS4（Balmaseda et al.，2013）	欧洲中期天气预报中心	1958~2010年	1°×1°	42层

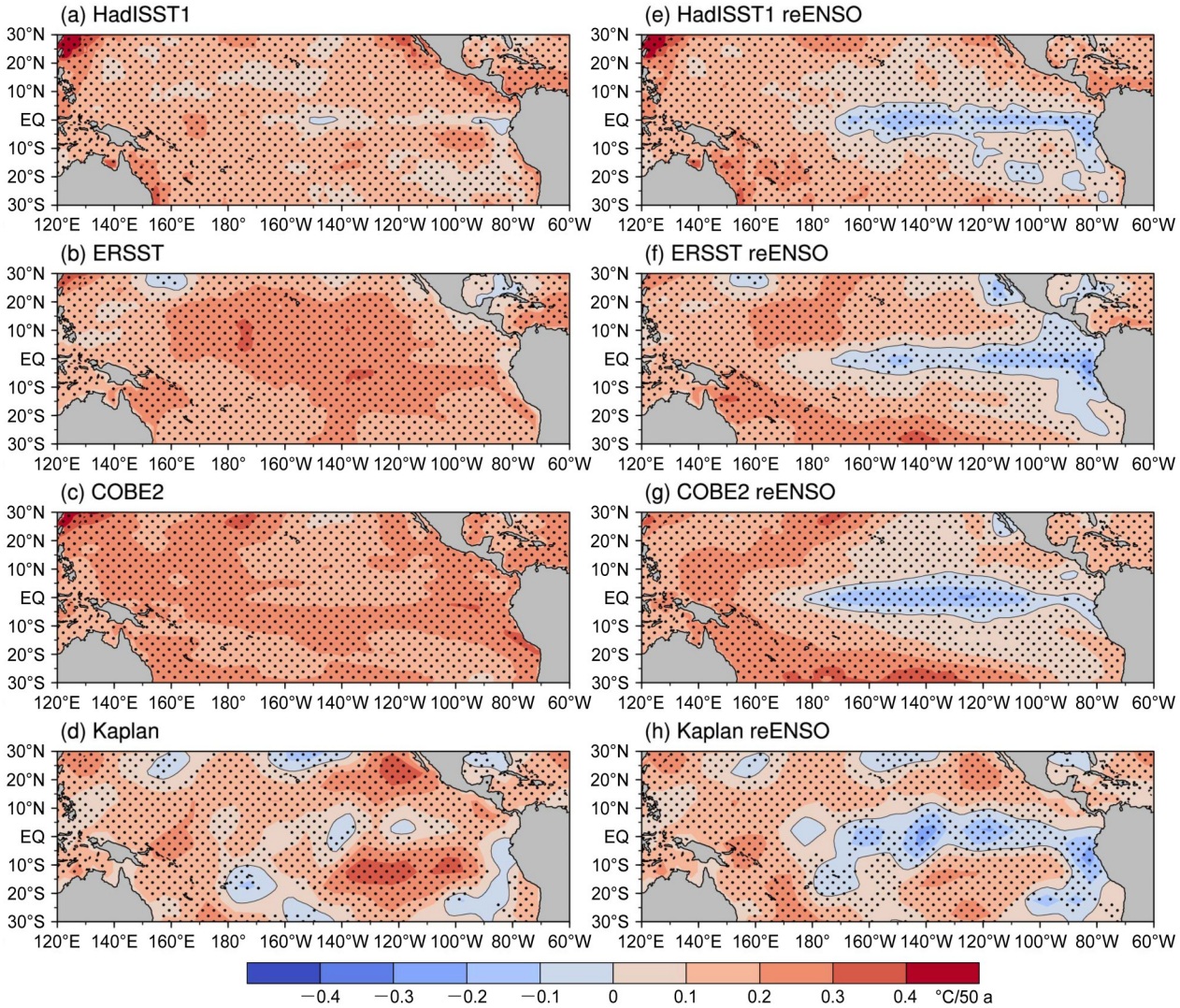

图 1 （a）HadISST1、（b）ERSST、（c）COBE2、（d）Kaplan 海表温度资料在 1870~2012 年的热带太平洋海表温度距平长期趋势（单位：°C/50 a）。（e）到（h）同（a）到（d），但为去除 ENSO 后 4 套海表温度距平长期趋势。图中打点部分表示通过 95% Mann−Kendall 检验

Fig. 1 Long-term trend of tropical Pacific SSTA (Sea Surface Temperature Anomaly) (°C/50 a) over the period of 1870−2012: (a) HadISST1; (b) ERSST; (c) COBE2; (d) Kaplan. (e)−(h) As in (a)−(d), but for the long-term trend of SSTA without the ENSO signal. Stippled regions indicate the significance at the 95% confidence level (nonparametric Mann−Kendall test)

对于全球海温长期趋势而言，ENSO 可以看作是噪音，它会影响长期趋势的结果。基于此结论，需要将 ENSO 信号从热带太平洋原始海温中剔除。为了剔除 ENSO 信号，首先将代表 ENSO 的 Niño3 指数回归到原始海表温度上，然后用原始海表温度减去 Niño3 指数回归所得的海表温度，剩余的海表温度为去除 ENSO 信号后的量。随后，利用 Theil-Sen 方法来计算去除 ENSO 信号后的海表温度长期趋势。如图 1e−1h 所示，4 套海表温度资料在去除 ENSO 后，计算所得长期趋势都呈现出赤道太平洋冷舌区变冷，而冷舌区之外的其他热带太平洋区域变暖。即，热带太平洋海表温度长期趋势呈现出似 La Niña 海温空间分布型。这一结果与前人（Cane et al.，1997；Karnauskas et al.，2009；Compo and Sardeshmukh，2010；Zhang et al.，2010；Solomon and Newman，2012）关于热带太平洋海表温度长期趋势的计算结果一致。

3.2 赤道太平洋次表层海温长期趋势

由以上可知，赤道太平洋海表温度在去除 ENSO 信号后，长期趋势呈现出似 La Niña 海温型。

为了进一步验证赤道太平洋冷舌区海温变化，本部分利用3套次表层海温来分析赤道次表层海温长期趋势如何变化。图2为赤道太平洋（5°S~5°N）次表层海温从表层到温跃层（20 °C等温线）的平均海温异常随时间的变化。因为考察的是海温长期变化，所以对3套次表层海温资料做9年高斯低通滤波来滤除高频信号。如图2所示，尽管3套资料在各自时段的变化有所不同，但它们在重合的时段（1958~2010年）基本上描绘出了相似的次表层海温变化，如在赤道太平洋冷舌区显著的冷暖海温交替变化。若把ENSO这一干扰信号剔除后，如图3所示，尽管3套资料的海温异常大小有差异，但都呈现出自1980年之后赤道东太平洋显著的变冷。

为了进一步探讨赤道次表层海温的长期变化趋势，图4给出了赤道太平洋从表层到温跃层的平均次表层海温长期趋势。SODA 2.2.4和ORAS4都展现出赤道东太平洋次表层海温变冷，而西太平洋次表层海温变暖（图4a、4c）。当ENSO信号剔除后，这两套资料在赤道东太平洋展现出了更冷的趋势，以及在赤道西太平洋更暖的趋势（图4a、4c）。尽管Ishii资料的原始海温在整个赤道太平洋都为暖趋势，但当去除ENSO信号后，也呈现出在赤道东太平洋变冷而西太平洋变暖（图4b）。另外，用SODA 2.2.4和Ishii资料求得的3套资料在重合时段的海温长期趋势与其整个时段的趋势分布基本一致，而当去除ENSO后，长期趋势也表现为显著的“西暖东冷”，或为似La Niña型的趋势分布（图4d-4e）。从以上结果可得到，赤道太平洋的表层和次表层海温的长期趋势均表现为似La Niña型的趋势分布。

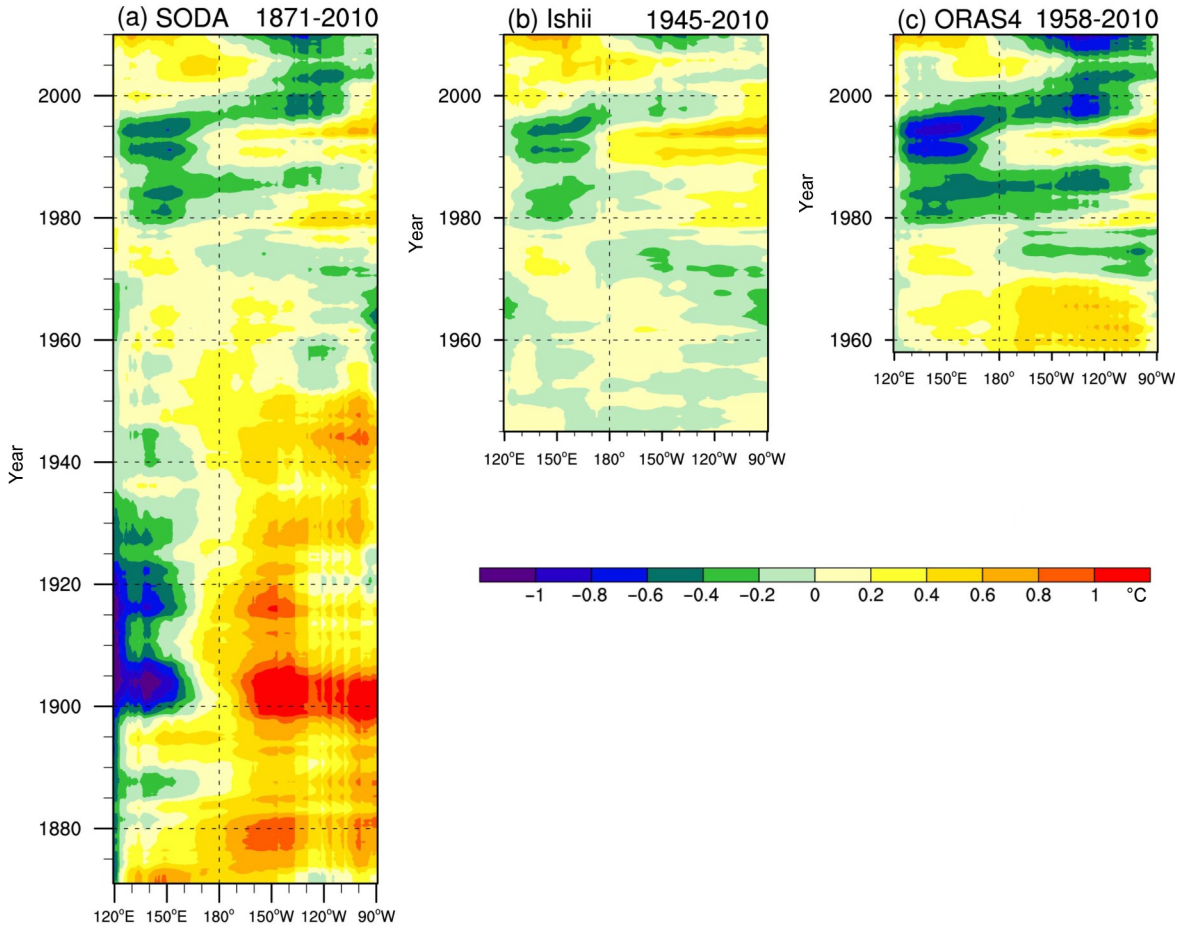

图2 赤道太平洋（5°S~5°N平均）次表层月平均海温异常（从表层到20 °C等温线平均海温异常；单位：°C）随时间的演变：（a）SODA2.2.4；（b）Ishii；（c）ORAS4。3套次表层海温资料都用9 a高斯低通滤波滤除高频信号

Fig. 2 Time−longitude sections of the monthly ocean temperature anomalies (averaged from surface to 20 °C isotherm depth; units: °C) averaged between 5°S and 5°N for (a) SODA2.2.4, (b) Ishii, and (c) ORAS4. A 9-year Gaussian low-pass filter has been applied to the data

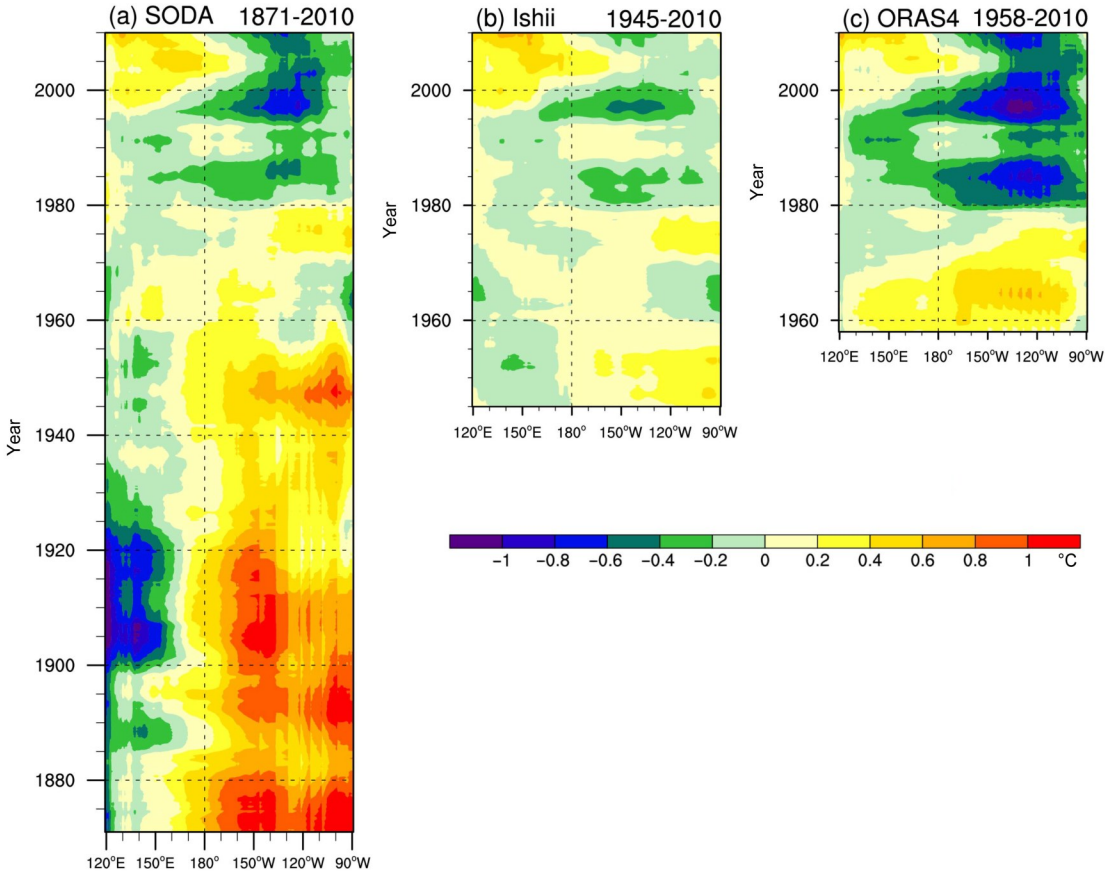

图3 同图2，但为去除ENSO信号后

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the monthly ocean temperature anomalies without the ENSO signal

4 引起热带太平洋海温长期趋势的机制

从以上分析可知，在剔除ENSO信号后，热带太平洋地区呈现出赤道东太平洋冷舌区海温变冷而冷舌区之外的海温变暖的现象，即海温长期趋势为似La Niña型分布。这说明ENSO可能和热带太平洋海温长期变化的背景场是两个独立的模态，很有必要将ENSO信号从原始的海温变化中分离出来，剩余的海温变化可能会比较好的代表热带太平洋海温长期变化。

Zhang et al.（2010）用经验正交分解法（EOF）的对热带太平洋的海表温度进行分解。如图5所示，Zhang et al.（2010）得到的第一模态代表了ENSO，海表温度空间型为经典的“马蹄形”。4套资料得到的ENSO模态是显著的，其中HadISST1和COBE2资料得到的ENSO解释方差约为43%，其余两套资料解释方差约为37%。ENSO模态的标准化时间序列（NPC1）呈现出明显的年际变化特征，并且能表征出20世纪最强的两次El Niño事件，即1982/1983年和1997/1998年El Niño事件。另外，4套资料获得的NPC1与Niño3指数的相关系数达到0.98以上，且通过95%的有效自由度检验。4套资料NPC1的两两相关也都达到0.93以上，通过95%的有效自由度检验（表2）。

表2 热带太平洋海表温度EOF前两个模态时间序列在HadISST1、ERSST、COBE2、Kaplan数据中两两相关

Table 2 Correlation coefficients for the principal components of the first two leading EOF modes between HadISST, ERSST, COBE2, and Kaplan SST datasets

		HadISST1	ERSST	COBE2	Kaplan
NPC1	HadISST1	–	0.93	0.94	0.98
	ERSST	–	–	0.94	0.95
	COBE2	–	–	–	0.95
	Kaplan	–	–	–	–
NPC2	HadISST1	–	0.83	0.88	0.93
	ERSST	–	–	0.90	0.86
	COBE2	–	–	–	0.88
	Kaplan	–	–	–	–

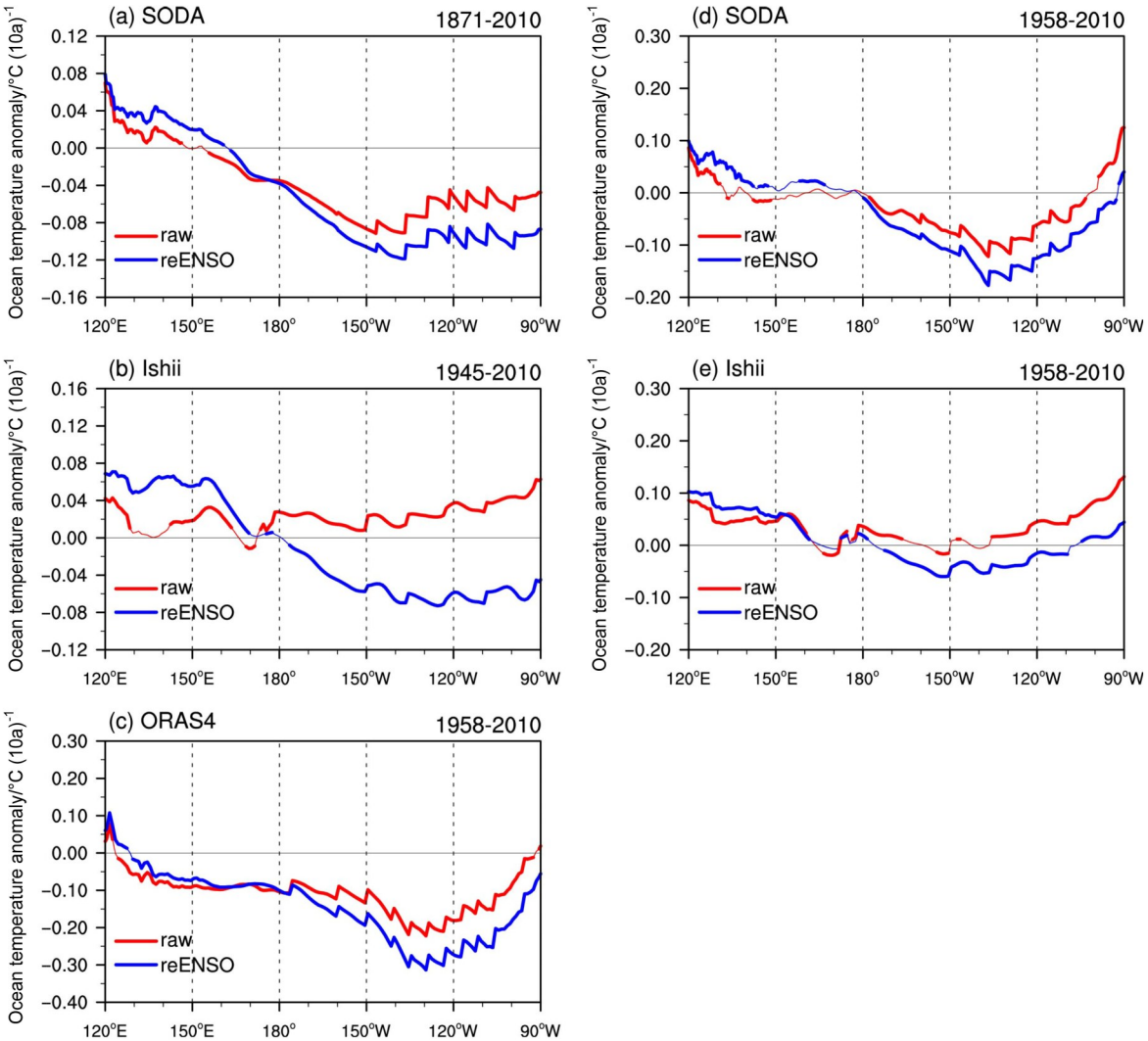

图4　赤道太平洋（5°S~5°N平均）次表层海温（从表层到20 °C等温线平均海温）变化趋势（单位：°C/10 a）。（a）到（c）分别为SODA 2.2.4、Ishii、ORAS4资料次表层海温在1871~2010年、1945~2010年以及1958~2010年的变化趋势。（d）和（e）同（a）和（b），但为SODA 2.2.4和Ishii资料次表层海温在1958~2010年的变化趋势。图中红线和蓝线分别代表原始的和去除ENSO信号后的次表层海温变化趋势，其中加粗部分为通过95% Mann−Kendall检验

Fig. 4　Trends (°C/10 a) of ocean temperature anomalies in the equatorial Pacific (averaged for 5°S−5°N, from surface to 20 °C isotherm depth) for (a) SODA2.2.4 (1871−2010), (b) Ishii (1945−2010), and (c) ORAS4 (1958−2010) datasets. (d) and (e) as in (a) and (b), but for the period 1958−2010. The red and blue lines represent the raw trends and trends without the ENSO signal, respectively. The thick lines indicate the significance at the 95% confidence level (nonparametric Mann−Kendall test)

此外，热带太平洋海表温度EOF分解的第二模态称为冷舌模态（Cold Tongue Mode，CTM）（图6）（Zhang et al.，2010；李建平等，2013；Li et al.，2015，2017，2019），其在统计上也是显著的。CTM代表热带太平洋冷舌区和冷舌区之外的热带太平洋海温呈现出反位相的变化。正的CTM表示热带太平洋冷舌区为冷海温异常，而冷舌区之外的其他热带太平洋区域为暖海温异常，负位相反之。平均来看，4套海温资料得到的CTM解释方差为12%左右，且它的标准化时间序列（NPC2）表现为非常明显的长期变化趋势。CTM在1940年之前基本上为负位相，1940~1980年表现为年际振荡，而1980年之后基本上为正位相。另外，4套资料获得的CTM时间序列两两相关达到0.83以上，且通过95%有效自由度检验。这说明4套资料得到的CTM是可靠的，稳定的。此结果与Zhang et al.（2010）和Li et al.（2015）的结果一致。

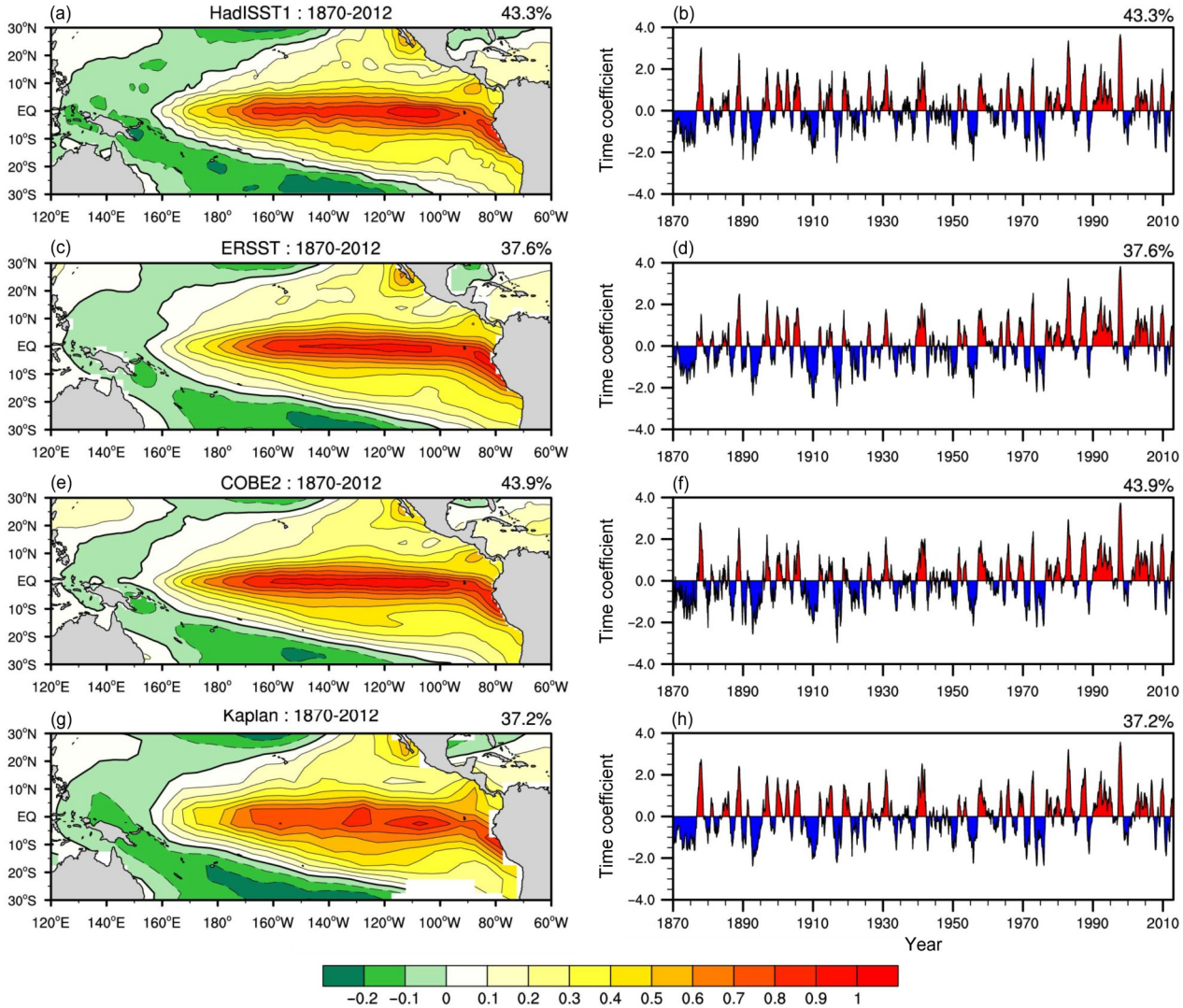

图5 （a、b）HadISST1、（b、d）ERSST、（e、f）COBE2、（g、h）Kaplan海表温度资料在1870~2012年的热带太平洋海表温度EOF第一模态的空间型（左列）及时间序列（右列）。图中右上角百分数代表解释方差

Fig. 5 Spatial patterns (left column) and corresponding normalized principal components (right column) of the first EOF (Empirical Orthogonal Function) mode of the tropical Pacific SST anomalies from the four SST datasets during the period of 1870−2012: (a, b) HadISST1; (c, d) ERSST; (e, f) COBE2; (g, h) Kaplan. The percentages on the top right of the figures represent the explained variance

已有的研究表明，CTM是一个真实的物理模态，它的长期趋势是由全球变暖背景下的热带太平洋海洋动力反馈所引起（Zhang et al.，2010；李建平等，2013；Li et al.，2015，2017）。具体过程为：在全球变暖背景下赤道东太平洋强的上翻流会导致该区域海温变暖速度减慢，从而引起赤道太平洋海温梯度增强，增强的海温梯度导致赤道太平洋地区信风增强；而信风增强后，赤道东太平洋的上翻流会增强，从而引起赤道东太平洋海温进一步变冷，海温梯度进一步增强，信风也进一步增强；如此循环往复，从而形成全球变暖背景下的热带太平洋海洋动力反馈过程。Li et al.（2015）通过海温热收支方程进一步指出，气候态上翻流和异常海温垂直梯度对应的冷平流是导致赤道东太平洋冷舌区长期变冷的主要动力过程。

以上结果表明，在4套海表温度资料中，热带太平洋海温EOF分解的第一模态为ENSO，代表海温的年际变化，对热带太平洋海温的长期趋势基本不起作用。所得EOF第二模态为CTM，代表全球变暖背景下热带太平洋海温长期趋势。那么赤道太

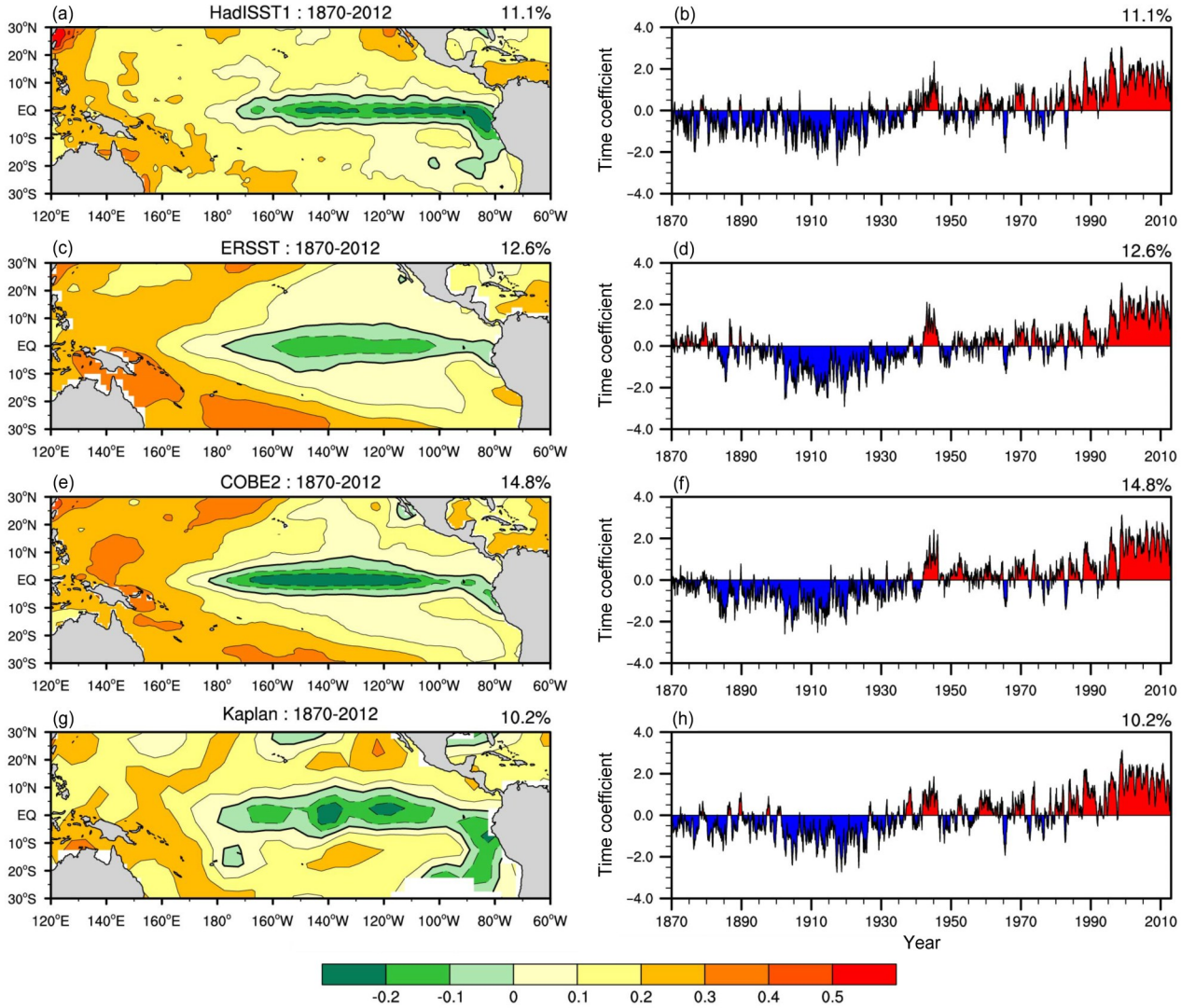

图6　同图5，但为EOF第二模态

Fig. 6　Same as Fig. 5, but for the second EOF mode

平洋的表层和次表层海温“西暖东冷”的长期趋势，或似La Niña型的长期趋势，是CTM在表层海温和次表层海温上的不同体现。换言之，热带太平洋海温长期趋势是由全球变暖背景下的CTM长期趋势所引起。

为了进一步阐明CTM对热带太平洋海温的影响，将热带太平洋海表温度和赤道次表层海温回归到CTM上。由于选取的次表层海温SODA 2.2.4资料的时段为1871~2010年，所以表层海温资料也选取1871~2010年。如图7a所示，当CTM为正位相时，所对应的热带太平洋冷舌区为冷海温异常，而冷舌区之外的其他热带太平洋区域为暖海温异常。这和利用EOF获得的CTM空间型一致。换言之，在全球变暖背景下，CTM对应的赤道太平洋海表温度为“西暖东冷”的长期趋势，或似La Niña型的长期趋势，这与4套海表温度资料所求得的去除ENSO后的热带太平洋海温长期趋势空间分布（图1e–1h）一致。同时，次表层海温在温跃层（图7b红线）以上的赤道东太平洋为冷异常，而在赤道西太平洋为暖异常，这与3套次表层海温资料获得的赤道次表层海温长期趋势有很好的对应关系。因此，在全球变暖背景下，赤道太平洋的表层和次表层海温“西暖东冷”的长期趋势，或似La Niña型的长期趋势，是CTM在表层海温和次表层海温上的不同体现。

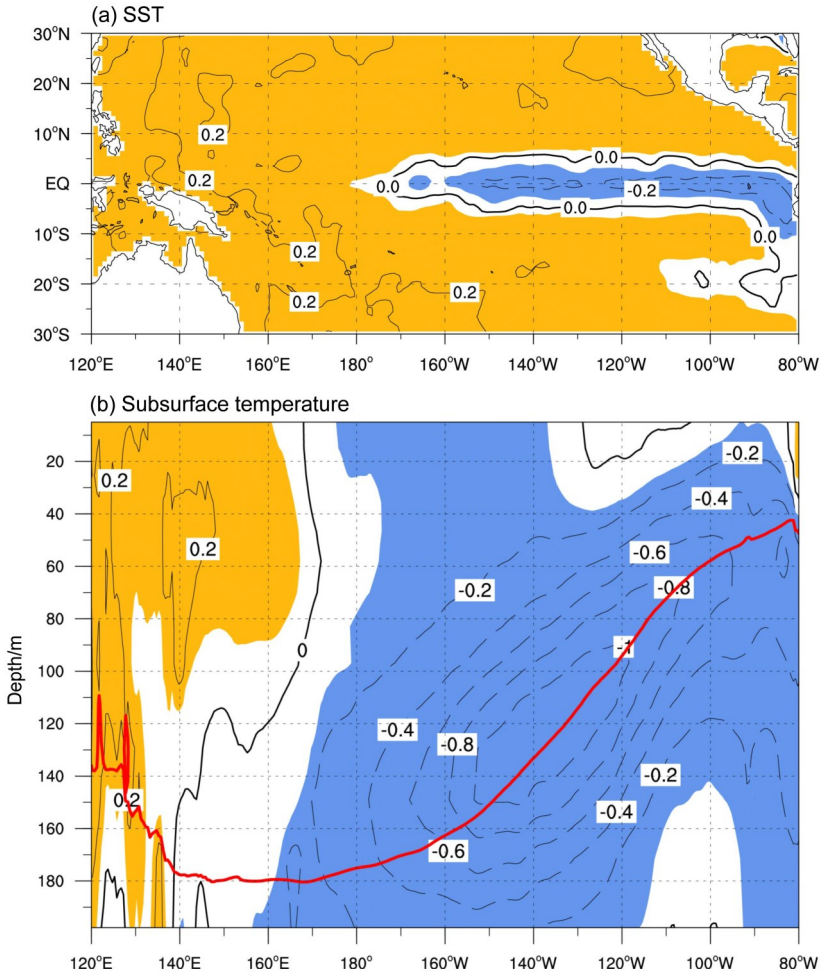

图7 CTM的标准化时间序列（NPC2）回归到（a）海表温度异常（单位：℃）和（b）次表层海温异常（5S°~5°N平均，单位：℃）。海表温度来自HadISST1资料，次表层海温来自SODA 2.2.4资料。图中填色部分代表超过95%显著性水平，（b）图红线代表温跃层深度（20 ℃等温线）

Fig. 7 (a) SST anomalies (℃) of the HadISST1 dataset in the tropical Pacific and (b) ocean temperature anomalies (averaged for 5°S–5°N; units: ℃) of the SODA2.2.4 dataset in the equatorial Pacific regressed upon the normalized principal component of cold tongue mode (NPC2). The shading indicates the correlation coefficients that exceed the 95% confidence level. The red line in (b) indicates the thermocline depth (20 ℃ isotherm)

5 小结

本文利用多套表层和次表层海温资料，基于无参的趋势估计方法，计算了热带太平洋海温长期趋势，得出以下结论：

（1）4套海表温度资料（HadISST1、ERSST、COBE2、Kaplan）的长期趋势大致呈现出整个热带太平洋地区一致增暖的现象。但当去除ENSO后，4套资料计算所得长期趋势基本都呈现出热带太平洋冷舌区变冷，冷舌区之外的热带太平洋区域变暖。但需注意，4套资料获得的海表温度长期趋势的空间分布略有不同，这可能是由不同资料所对应的插值方法和空间分辨率上的差异所引起。

（2）3套次表层海温资料（SODA2.2.4、Ishii、ORAS4）在去除ENSO信号后，不管在各自所对应的整个资料时段还是在3套资料的重合时段（1958~2010年），获得的赤道表层到温跃层的次表层海温长期趋势均为“西暖东冷”。与海表温度资料类似，3套次表层海温资料之间也略有差异，导致了3套资料在重合时段的长期趋势略有不同（图4c-4e）。

（3）基于前人的研究（Zhang et al.，2010；李建平等，2013；Li et al.，2015，2017）可知，引起全球变暖背景下热带太平洋海温长期趋势的主要原因是CTM。正的CTM代表热带太平洋冷舌区海温为冷异常，而冷舌区之外的其他热带太平洋区域

为暖异常，负位相反之。CTM的长期趋势是由全球变暖背景下的热带太平洋海洋动力反馈过程所引起。赤道太平洋的表层和次表层海温“西暖东冷”的长期趋势，或似La Niña型的长期趋势，是CTM在表层海温和次表层海温上的不同体现。

参考文献（References）

Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection[J]. J. Geophys. Res., 112(C11): C11007. doi: 10.1029/2006jc003798

Balmaseda M A, Mogensen K, Weaver A T. 2013. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4[J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 139(674): 1132-1161. doi:10.1002/qj.2063

Bretherton C S, Widmann M, Dymnikov V P, et al. 1999. The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field[J]. J. Climate, 12(7): 1990−2009. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1990: tenosd>2.0.co;2

Cai W J, Whetton P H. 2000. Evidence for a time-varying pattern of greenhouse warming in the Pacific Ocean[J]. Geophys. Res. Lett., 27 (16): 2577−2580. doi:10.1029/1999gl011253

Cane M A, Clement A C, Kaplan A, et al. 1997. Twentieth-century sea surface temperature trends[J]. Science, 275(5302): 957−960. doi:10. 1126/science.275.5302.957

Carton J A, Giese B S. 2008. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA)[J]. Mon. Wea. Rev., 136(8): 2999−3017. doi:10.1175/2007mwr1978.1

Collins M, An S I, Cai Wenju, et al. 2010. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño[J]. Nature Geosci, 3(6): 391−397. doi:10.1038/ngeo868

Compo G P, Sardeshmukh P D. 2010. Removing ENSO-related variations from the climate record[J]. J. Climate, 23(8): 1957−1978. doi:10.1175/2009jcli2735.1

Clement A C, Seager R, Cane M A, et al. 1996. An ocean dynamical thermostat[J]. J. Climate, 9(9): 2190−2196. doi: 10.1175/1520-0442 (1996)009<2190:aodt>2.0.co;2

Duan W S, Tian B, Xu H. 2014. Simulations of two types of El Niño events by an optimal forcing vector approach[J]. Clim. Dyn., 43(5−6): 1677−1692. doi:10.1007/s00382-013-1993-4

Drenkard E J, Karnauskas K B. 2014. Strengthening of the Pacific equatorial undercurrent in the SODA reanalysis: Mechanisms, ocean dynamics, and implications[J]. J. Climate, 27(6): 2405−2416. doi:10. 1175/jcli-d-13-00359.1

Funk C C, Hoell A. 2015. The leading mode of observed and CMIP5 ENSO-residual sea surface temperatures and associated changes in indo-Pacific climate[J]. J. Climate, 28(11): 4309−4329. doi:10.1175/ jcli-d-14-00334.1

Graham N E. 1995. Simulation of recent global temperature trends[J]. Science, 267(5198): 666−671. doi:10.1126/science.267.5198.666

Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming[J]. J. Climate, 19(21): 5686−5699. doi: 10.1175/ jcli3990.1

Ishii M, Shouji A, Sugimoto S, et al. 2005. Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection[J]. Int. J. Climatol., 25(7): 865−879. doi:10.1002/joc.1169

Ishii M, Kimoto M. 2009. Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections [J]. J Oceanogr, 65(3): 287−299. doi:10.1007/s10872-009-0027-7

Jin F F, Hu Z Z, Latif M, et al. 2001. Dynamical and cloud-radiation feedbacks in El Niño and greenhouse warming[J]. Geophys. Res. Lett., 28(8): 1539−1542. doi:10.1029/2000gl012078

Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO[J]. J. Climate, 22(3): 615−632. doi: 10.1175/ 2008jcli2309.1

Kaplan A, Cane M A, Kushnir Y, et al. 1998. Analyses of global sea surface temperature 1856−1991[J]. J. Geophys. Res., 103(C9): 18567−18589. doi:10.1029/97jc01736

Karnauskas K B, Seager R, Kaplan A, et al. 2009. Observed strengthening of the zonal sea surface temperature gradient across the equatorial Pacific Ocean[J]. J. Climate, 22(16): 4316−4321. doi: 10.1175/2009jcli2936.1

Knutson T R, Manabe S. 1995. Time-mean response over the tropical Pacific to increased in a coupled ocean−atmosphere model[J]. J. Climate, 8(9): 2181−2199. doi: 10.1175/1520-0442(1995)008<2181: tmrott>2.0.co;2

Knutson T R, Manabe S. 1998. Model assessment of decadal variability and trends in the tropical Pacific Ocean[J]. J. Climate, 11 (9): 2273−2296. doi: 10.1175/1520-0442(1998)011<2273:maodva>2. 0.co;2

Kug J S, Jin Feifei, An S I. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño[J]. J. Climate, 22(6): 1499−1515. doi:10.1175/2008jcli2624.1

L' Heureux M L, Lee S, Lyon B. 2013. Recent multidecadal strengthening of the Walker circulation across the tropical Pacific[J]. Nature Climate Change, 3(6): 571−576. doi:10.1038/nclimate1840

Larkin N K, Harrison D E. 2005. On the definition of El Niño and associated seasonal average US weather anomalies[J]. Geophys. Res. Lett., 32(13): L13705. doi:10.1029/2005gl022738.

李建平, 任荣彩, 齐义泉, 等. 2013. 亚洲区域海—陆—气相互作用对全球和亚洲气候变化的作用研究进展[J]. 大气科学, 37(2): 518−538. Li Jianping, Ren Rongcai, Qi Yiquan, et al. 2013. Progress in air-land-sea interactions in Asia and their role in global and Asian climate change[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 37(2): 518−538. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12322

Li J P, Sun C, Jin F F. 2013. NAO implicated as a predictor of Northern Hemisphere mean temperature multidecadal variability[J]. Geophys. Res. Lett., 40(20): 5497−5502. doi:10.1002/2013gl057877

Li Y, Li J P, Zhang W J, et al. 2015. Ocean dynamical processes associated with the tropical Pacific cold tongue mode[J]. J. Geophys. Res. Oceans, 120(9): 6419−6435. doi:10.1002/2015jc010814

Li Y, Li J P, Zhang W J, et al. 2017. Impacts of the tropical Pacific cold

tongue mode on ENSO diversity under global warming[J]. J. Geophys. Res. Oceans, 122(11): 8524−8542. doi: 10.1002/2017jc013052

Li Y, Chen Q L, Liu X R, et al. 2019. Long-term trend of the tropical Pacific trade winds under global warming and its causes[J]. J. Geophys. Res. Oceans, 124(4): 2626−2640. doi: 10.1029/2018JC014603

Meehl G A, Washington W M. 1996. El Niño-like climate change in a model with increased atmospheric CO_2 concentrations[J]. Nature, 382(6586): 56−60. doi:10.1038/382056a0

Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño[J]. Mon. Wea. Rev., 110(5): 354−384. doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0354:vitsst>2.0.co;2

Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. J. Geophys. Res., 108(D14): 4407. doi:10.1029/2002jd002670

Ren H L, Jin F F. 2011. Niño indices for two types of ENSO[J]. Geophys. Res. Lett., 38(4): L04704. doi:10.1029/2010gl046031

Roeckner E, Oberhuber J M, Bacher A, et al. 1996. ENSO variability and atmospheric response in a global coupled atmosphere-ocean GCM[J]. Clim. Dyn., 12(11): 737−754. doi:10.1007/s003820050140

Seager R, Murtugudde R. 1997. Ocean dynamics, thermocline adjustment, and regulation of tropical SST[J]. J. Climate, 10(3): 521−534. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<0521:odtaar>2.0.co;2

Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 63 (324): 1379−1389. doi:10.1080/01621459.1968.10480934

Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854−1997) [J]. J. Climate, 17(12: 2466−2477. doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<2466:ieros>2.0.co;2

Solomon A, Newman M. 2012. Reconciling disparate twentieth-century Indo-Pacific Ocean temperature trends in the instrumental record[J]. Nature Clim Change, 2(9): 691−699. doi: 10.1038/nclimate1591

Sun D Z, Liu Z. 1996. Dynamic ocean-atmosphere coupling: A thermostat for the tropics[J]. Science, 272(5265): 1148−1150. doi:10.1126/science.272.5265.1148

Tett S. 1995. Simulation of El Niño-Southern Oscillation-like variability in a global AOGCM and its response to CO_2 increase[J]. J. Climate, 8(6): 1473−1502. doi:10.1175/1520-0442(1995)0081473:soenso>2.0.co;2

Theil H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis[J]. Indag. Math., 12: 85−91.

Timmermann A, Oberhuber J, Bacher A, et al. 1999. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming [J]. Nature, 398(6729): 694−697. doi:10.1038/19505

Trenberth K E, Hoar T J. 1996. The 1990-1995 El Niño Southern Oscillation event: longest on record[J]. Geophys. Res. Lett., 23(1): 57−60. doi:10.1029/95gl03602

Vecchi G A, Soden B J. 2007. Global warming and the weakening of the tropical circulation[J]. J. Climate, 20(17): 4316−4340. doi: 10.1175/jcli4258.1

Vecchi G A, Clement A, Soden B J. 2008. Examining the tropical pacific's response to global warming[J]. Eos Trans. AGU, 89(9): 81−83. doi:10.1029/2008eo090002

Wang B. 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades[J]. J. Climate, 8(2): 267−285. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0267:icieno>2.0.co;2

Yang C X, B S Giese , L X Wu . 2014. Ocean dynamics and tropical Pacific climate change in ocean reanalyses and coupled climate models[J]. J. Geophys. Res., 119(10): 7066−7077. doi: 10.1002/2014jc009979

Yang R W, J Wang , T Zhang , S He . 2017a. Change in the relationship between the Australian summer monsoon circulation and boreal summer precipitation over central China in the late 1990s[J], Meteorology and Atmospheric Physics. doi: 10.1007/s00703-017-0556-3

Yang R W, Z Xie , J Cao . 2017b. A dynamic index for the westward ridge point variability of the western Pacific subtropical high during summer[J]. J. Climate, 30(9): 3325−3341. doi: 10.1175/jcli-d-16-0434.1

Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate [J]. Nature, 461(7263): 511−514. doi:10.1038/nature08316

Zhang W J, Li J P, Zhao X. 2010. Sea surface temperature cooling mode in the Pacific cold tongue[J]. J. Geophys. Res., 115(C12): C12042. doi:10.1029/2010jc006501

Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900−93[J]. J. Climate, 10(5): 1004−1020. doi: 10.1175/1520-0442(1997)010<1004:eliv>2.0.co;2

Zheng F, Li J P, Clark R T, et al. 2013. Simulation and projection of the Southern Hemisphere annular mode in CMIP5 models[J]. J. Climate, 26(24): 9860−9879. doi:10.1175/jcli-d-13-00204.1