



ENSO气温关联网络结构特征差异及成因分析

胡恒儒 龚志强 王健 乔盼节 刘莉 封国林

**Analysis of structural differences and causes of ENSO temperature network**

Hu Heng-Ru Gong Zhi-Qiang Wang Jian Qiao Pan-Jie Liu Li Feng Guo-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 249201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210825

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210825>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## ENSO 气温关联网络结构特征差异及成因分析\*

胡恒儒<sup>1)</sup> 龚志强<sup>2)3)†</sup> 王健<sup>1)</sup> 乔盼节<sup>4)</sup> 刘莉<sup>5)</sup> 封国林<sup>1)3)</sup>

1) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225009)

2) (常熟理工学院电子与信息工程学院, 苏州 215100)

3) (国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081)

4) (昆明理工大学理学院, 昆明 650504)

5) (南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

(2021 年 4 月 29 日收到; 2021 年 6 月 19 日收到修改稿)

基于全球地表气温资料, 分别构建了 El Niño 和 La Niña 事件对应的全球气温关联网络, 并分析网络结构特征的差异, 探究可能的成因. 结果表明, 与 La Niña 事件气温网络 (简称 La Niña 网络) 相比, El Niño 事件气温网络 (简称 El Niño 网络) 中格点温度序列间的相关性减弱, 气温网络的连通度显著降低, 连通性下降, 在热带和南温带区域连通性变化尤为显著. 赤道东太平洋、赤道西太平洋、赤道印度洋和赤道大西洋的网络连通度相对较大, 在 El Niño 网络中的减少异常明显, 是导致两类网络结构特征差异性的 4 块关键区域. 在此基础上初步探讨了两类网络特征差异的原因, 即随着 Niño3.4 区域的海温升高, 赤道东太平洋、赤道印度洋等区域海温升高, 对外长波辐射加强, 对流活动增加, 低纬度与中纬度区域的相互作用增强, 南北温带气温变化的方差加大, 造成关键区格点气温序列与全球其他地区的相关性减弱, 全球格点气温网络连通性下降.

**关键词:** 气候系统复杂网络, 厄尔尼诺和南方涛动, 非线性动力学, 网络结构

**PACS:** 92.60.Wc

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210825

## 1 引言

气候系统的变化受许多因素的驱动, 其中最显著的是厄尔尼诺和南方涛动 (El Niño-southern oscillation, ENSO)<sup>[1,2]</sup>. ENSO 作为热带太平洋地区典型的年际大尺度海气相互作用现象, 具有相对于长期平均状态的不规则暖相位 (El Niño) 和冷相位 (La Niña) 交替出现的特征, 并可以通过改变赤道太平洋地区的 Walker 环流对本地区和其他地区的气候异常产生广泛的影响<sup>[3-8]</sup>.

2004 年以来, 复杂网络理论在复杂性系统的研究中得到了广泛的应用<sup>[9-12]</sup>. 气候系统作为非线性复杂巨系统之一<sup>[13-15]</sup>, 其内部存在典型的非线性

相互作用<sup>[16]</sup>. Tsonis 和 Roebber<sup>[17]</sup> 率先提出了气候系统复杂网络的概念, 旨在利用复杂网络这一工具从整体论的角度开展气候异常问题研究. 500 hPa 高度场的关联网络中, 网络的超级节点可以让气候系统更具有稳定性, 物质和能量的传输也更为高效<sup>[18]</sup>. 龚志强等<sup>[19-21]</sup> 研究了全球表面气温场网络的动力学统计性质和北半球环流系统的结构特征, 实现了复杂网络理论在气候诊断分析中的应用.

气候系统复杂网络已有一部分研究聚焦于 ENSO 现象, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 连续刊登文章介绍基于复杂网络理论的 ENSO 事件识别和预测研究<sup>[22,23]</sup>. ENSO 复杂网络的研究成果主要包括: 1) 定量刻画了与 ENSO 相联系的全球遥相关特征.

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFA0606301) 和国家自然科学基金 (批准号: 42075057, 41875100) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gongzq@cma.gov.cn

Tsonis 和 Swanson<sup>[18]</sup> 采用月尺度资料揭示了 El Niño 网络的连通度较 La Niña 网络显著降低, 指出前者网络的稳定性相对较低, 造成 El Niño 年全球温度的可预测性较 La Niña 年偏低. Yamasaki 等<sup>[24]</sup> 采用逐日资料也揭示了全球不同区域的温度网络结构特征在 El Niño 年份对应网络中连边数较 La Niña 的情况显著减少. 2) 不同类型 ENSO 事件的客观识别. Radebach 等<sup>[25]</sup> 系统分析了全球气候网络空间结构的时间演化特征, 初步建立了这种演化与两类 ENSO 事件的联系. Wiedermann 等<sup>[26]</sup> 基于动态的全球温度网络定量描述了不同类型 ENSO 事件的网络局地性和发散性结构特征, 结合网络传递性变量定义了一种能够有效区别中部型和东部型 ENSO 事件的新指数. Lu 等<sup>[27]</sup> 也利用气温网络参数——总节点度指标成功区分出 EP 型和 CP 型 ENSO 事件. 3) 利用气温网络相变刻画海温状态的转变. Lu 等<sup>[28]</sup> 将海温强异常事件等效视为海温强迫对气温网络的攻击, 利用气温网络中的相变指标指示热带太平洋地区海温状态的转变, 并作为评判气候系统是否变化的依据. 可以看出, 与 ENSO 相关的复杂网络研究中, 目前多为构建全球地表温度网络, 通过分析 El Niño/La Niña 年的网络特征量的变化来实现监测、诊断和预测研究. 值得注意的是, 相关成果大多未涉及一个共性问题: ENSO 事件中赤道中东太平洋的海温异常, 在不同关键海区的网络结构特征和气候要素会有怎样的差异, 以及海温升高究竟如何引起全球温度网络结构特征的变化.

本文首先分别构建了 El Niño 和 La Niña 事件对应的全球气温关联网, 分析 La Niña 事件网络 (以下简称 La Niña 网络) 和 El Niño 事件网络 (以下简称 El Niño 网络) 的结构特征量的差异性, 然后区分不同关键海区对网络特征差异的影响, 最后联系海气相互作用探究 ENSO 关键区域海温升高与全球气温关联网结构特征变化之间的可能联系, 浅析 ENSO 事件网络结构特征发生改变的原因.

## 2 数据和方法

### 2.1 资料

本研究选取的气象要素资料均来自 <https://psl.noaa.gov/data/>, 在 NCEP/NCAR 再分析项目中获取全球月平均表面气温数据集, 水平分辨率取为  $5^\circ \times 5^\circ$ ; 全球月平均净长波辐射通量 OLR 数

据集和 500 hPa 垂直速度场 Omega 数据集, 水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ <sup>[29]</sup>; 以及全球月平均海表温度 (SST) 数据, 水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ . 另外每月 Niño3.4 指数来自 NOAA 地球系统研究实验室 (ERSL) 通过 [https://psl.noaa.gov/gcos\\_wgsp/Timeseries/Nino34/](https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34/) 获取. 为保持数据集之间的一致性, 资料长度都选取 1950—2020 年.

为避免极地格点距离较近引起的高度相关性, 本文选取  $70^\circ\text{N}$ — $70^\circ\text{S}$  以内的格点构建网络. 沿纬向 29 个格点, 沿经向 72 个格点, 总共 2088 个格点作为网络的节点. 为消除季节变化趋势, 对格点的温度序列作距平值处理 (原始值减去每个月的气候平均值). 为研究冷暖 ENSO 事件的网络结构特征的差异性, 对于 Niño3.4 指数距平的 3 个月滑动平均值, 将连续 5 个月  $\geq (\leq) + 0.5 (-0.5)$  的月份定义为 El Niño (La Niña) 事件. 同时, 由于冬季气温的异常振幅大于夏季, 为避免虚假的高相关值, 只提取发生 ENSO 事件的年份中 11 月—3 月的数值进行分析<sup>[17]</sup>. 结果共选取了 51 个 El Niño 事件月份和 52 个 La Niña 事件月份作为每个格点的时间序列, 分别用来构建 ENSO 不同位相的全球气温关联网.

### 2.2 全球 ENSO 气温关联网的构建

图 1 给出了 El Niño 事件和 La Niña 事件中全球所有格点间气温序列的皮尔逊相关系数概率分布图. 可以看出, El Niño 事件对应的节点间的相关系数在 0 值附近的峰值要高于 La Niña 的情况. 此外, 对格点的气温序列作随机化处理<sup>[20]</sup>, 即将每一对节点中 1 个节点的时间序列的顺序打

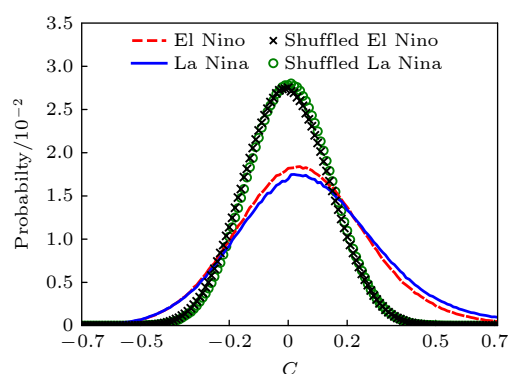


图 1 不同 ENSO 相位下格点气温序列相关系数概率分布, 其中 shuffled 表示对格点气温序列作了随机化处理

Fig. 1. Probability distribution of correlation coefficient of grid temperature series under different ENSO phases, where shuffle represents randomization of grid temperature.

乱重排后, 计算两个节点的时间序列相关联的相关系数, 随机化处理可以破坏原来时间序列的周期性和趋势特征等, 同时显著减弱两个序列之间的相关性. 结果发现, 经随机化处理的 El Niño 和 La Niña 序列的相关系数具有明显的正态分布特征, 其概率分布在 0 值附近的峰值明显增大, 且 El Niño 和 La Niña 两种情况的相关系数概率分布曲线近乎重合. 由此说明, 全球气温节点间存在具有物理意义的相关性特征, 且这种相关强度在 La Niña 年份要强于 El Niño 年份, 而气温序列的随机化处理则会严重破坏此类特征.

为了较好地定义网络中节点对之间的连边, 计算了所有可能节点对的时间序列之间的皮尔逊相关系数. 这里设定一个阈值  $Q$ , 只有当节点间的相关系数绝对值  $|C_{ij}| \geq Q$  时, 才认为它们显著相关, 节点间存在连边. 结合已有的工作<sup>[21]</sup>和相关系数的显著性检验, 本文选取的阈值为  $Q = 0.5$ , 以保障节点间的连边真实有效. 该选择考虑了参数化和非参数化两种检验, 一方面, 节点序列长度为 50, 在  $N = 50$  的  $t$  检验中  $C = 0.5$  的关联系数通过了 0.05 信度; 另一方面,  $C = 0.5$  是气温网络构建中

常用的相关系数阈值<sup>[17-20]</sup>, 且是一个相对稳态值<sup>[30]</sup>.

对于复杂网络而言, 通常是借助网络结构特征量进行分析研究. 本文从系统内部关联作用的强弱、不同尺度下连边数目的多少、格点要素变化的区域同步性特征和信息的传递效率 4 个方面定义结构特征量, 定量描述系统的关联结构复杂性.

1) 连通度, 又称区域权重连通度. 本文将节点间的连接强度按照节点密度的大小乘以一定的系数, 消除了纬度差异带来的节点分布不均匀的问题. 如果节点  $i$  与位于  $\lambda_N$  纬度的共  $N$  个其他节点有连边, 则连通度  $\tilde{C}_i$  的定义为<sup>[31]</sup>

$$\tilde{C}_i = \frac{\sum_{j=1}^N \cos \lambda_j}{\sum_{\text{over all } \lambda \text{ and } \varphi} \cos \lambda}, \quad (1)$$

其中  $\varphi$  代表经度. 连通度代表了 1 个节点能够连接到的全局区域的比例, 连通度越高, 该节点在网络中的作用越强, 对网络的影响也就越大, 反之则相反.

2) 连通距离, 又称链路距离. 若两个格点之间有连边, 则它们间的地表实际距离即为连通距离, 公式如下<sup>[32]</sup>:

$$S = 2R \times \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{la_1 - la_2}{2} + \cos la_1 \times \cos la_2 \times \sin^2 \frac{lo_1 - lo_2}{2}}, \quad (2)$$

式中  $la$  代表纬度,  $lo$  代表经度,  $R$  是地球半径为 6371 km. 连通距离用来统计网络连边距离数量分布的变化, 连通距离值大, 代表节点间存在越远距离的遥相关作用.

3) 集聚系数. 在节点  $i$  相连的  $k_i$  个节点中, 实际连边数  $E_i$  与最大可能存在边数  $\frac{1}{2}k_i(k_i - 1)$  之间的比值定义为节点  $i$  的集聚系数, 公式如下<sup>[31,33]</sup>:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)}. \quad (3)$$

所有节点集聚系数的平均值为平均集聚系数, 系数越大说明系统内部的区域同步性越好, 反之则相反.

4) 特征路径长度. 在关联网络中, 节点  $i$  与相互连接的节点  $j$  所要经过的最少连边数为最短路径长度  $d_{ij}$ , 所有节点对之间最短路径长度的平均值代表网络的特征路径长度, 公式如下<sup>[33]</sup>:

$$L(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in G, i \neq j} d_{ij}. \quad (4)$$

特征路径长度越小, 说明任意两个节点之间建立联

系需要经历的中间过程越短, 网络内部信息的传递效率则越高.

### 3 ENSO 气温网络结构特征分析

#### 3.1 全球网络特征

图 2 给出了 ENSO 气温网络结构特征量的空间分布图. 如图 2(a) 中连通度的空间分布所示, El Niño 和 La Niña 气温关联网络都是具有超级节点的网络, 但 El Niño 网络连通度的值是明显小于 La Niña 的. 全球连通度高的区域主要集中在热带的赤道大西洋、赤道印度洋、西太平洋和中东太平洋 4 个部分, 在温带地区也存在少量超级节点, 而且连通度在南北半球并不是对称分布. 图 2(b) 和图 2(c) 给出了集聚系数和最短路径长度的空间分布, 可以看出它们与连通度的分布也有一定的对应关系, 这表明三者反映网络的体系结构时具有很好的 consistency, 而且在热带地区气温链接保存得更加完好.

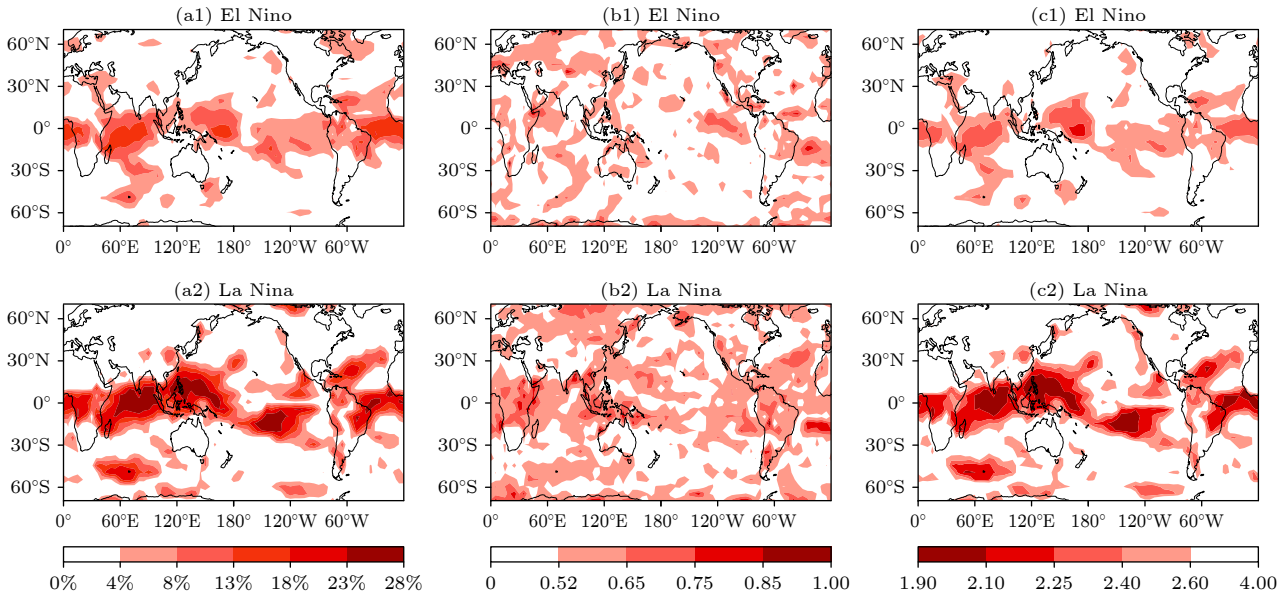


图 2 网络特征量空间分布 (a1), (a2) 连通度; (b1), (b2) 集聚系数; (c1), (c2) 特征路径长度

Fig. 2. Spatial distribution of network characteristic quantity: (a1), (a2) Connectivity degree; (b1), (b2) agglomeration coefficient; (c1), (c2) characteristic path length.

为了区分温带与热带的网络结构特征差异性, 以南北纬 30°为界, 划分为北温带、热带和南温带 3 个区域分别计算网络结构特征, 并给出概率分布, 此处差异率定义为

$$D = \tilde{C}_{La\ Ni\tilde{n}a} / \tilde{C}_{El\ Ni\tilde{n}o} - 1.$$

表 1 所列计算的连通度平均值与差异率, 可以看出, La Niña 气温关联网络的连通度在全球、南北温带和热带地区均高于 El Niño 网络, 且差异率在热带和南温带最为显著, 而在北温带的差异最小. 在网络特征量的概率分布图 (图 3) 中, 较 La Niña 网络而言, El Niño 网络具有偏小的集聚系数和偏大的特征路径长度, 即后者的气温网络紧凑程度偏低, 区域变化一致性较弱. 此外, 热带和南温带连通度、链路数量连通距离、集聚系数、最短路径长度的概率分布与全球特征较为一致, 但北温带网络特征量的概率分布对应的两种网络的差异较小, 即其对全球 El Niño 气温网络紧凑程度的影响相对偏弱, 区域变化一致性的贡献相对较小. 这可能与南北半球海陆气候差异性有关, 即海陆分布不对称性. 因此, El Niño 网络较 La Niña 网络具有偏低的连通性, 使其网络稳定性偏低, 这种特征在热带和南温带更为显著. Tsonis 等<sup>[31]</sup>的研究表明, 热带网络拥有规则的、几乎全连通的网络特征, 而温带网络更像是无标度网络, 故整个网络是两者的“融合”, 既有小世界特性, 保证了信息的有效传递, 又具有无标度特性, 保证了结构的稳定性.

表 1 连通度平均值与差异率

Table 1. Average connectivity and difference rate.

	$\tilde{C}_{El\ Ni\tilde{n}o}$	$\tilde{C}_{La\ Ni\tilde{n}a}$	差异率 $D$
全球	0.035	0.055	55%
北温带	0.024	0.025	2%
热带	0.057	0.097	72%
南温带	0.020	0.033	63%

### 3.2 关键区影响性分析

从图 2 可以看出, 气温网络中热带海洋区域对连通性具有重要的影响, 因此, 考虑了各大洋关键区对全球气温网络的影响. 为了避免区域范围不同可能导致的失衡性, 尽量保持各个关键区面积相等 (表 2). 确定区域后, 分别计算了区域内节点与全球其他区域节点气温序列的相关, 以此来分析不同关键区域对全球气温关联网络 (大洋关键区-全球气温关联网络) 的作用.

大洋关键区-全球气温关联网络的连通度空间分布如图 4 所示. 可以看出, 大洋关键区-全球气温关联网络中连通度表现出与全球网络类似的特征.

表 2 各大洋关键区的划分范围

Table 2. Range of key regions in the oceans.

	纬度	经度
赤道大西洋	5°N—10°S	40°W—10°E
赤道印度洋	10°N—5°S	60°E—100°E
赤道西太平洋	20°N—5°N	110°E—150°E
赤道东太平洋	5°N—5°S	170°W—120°W

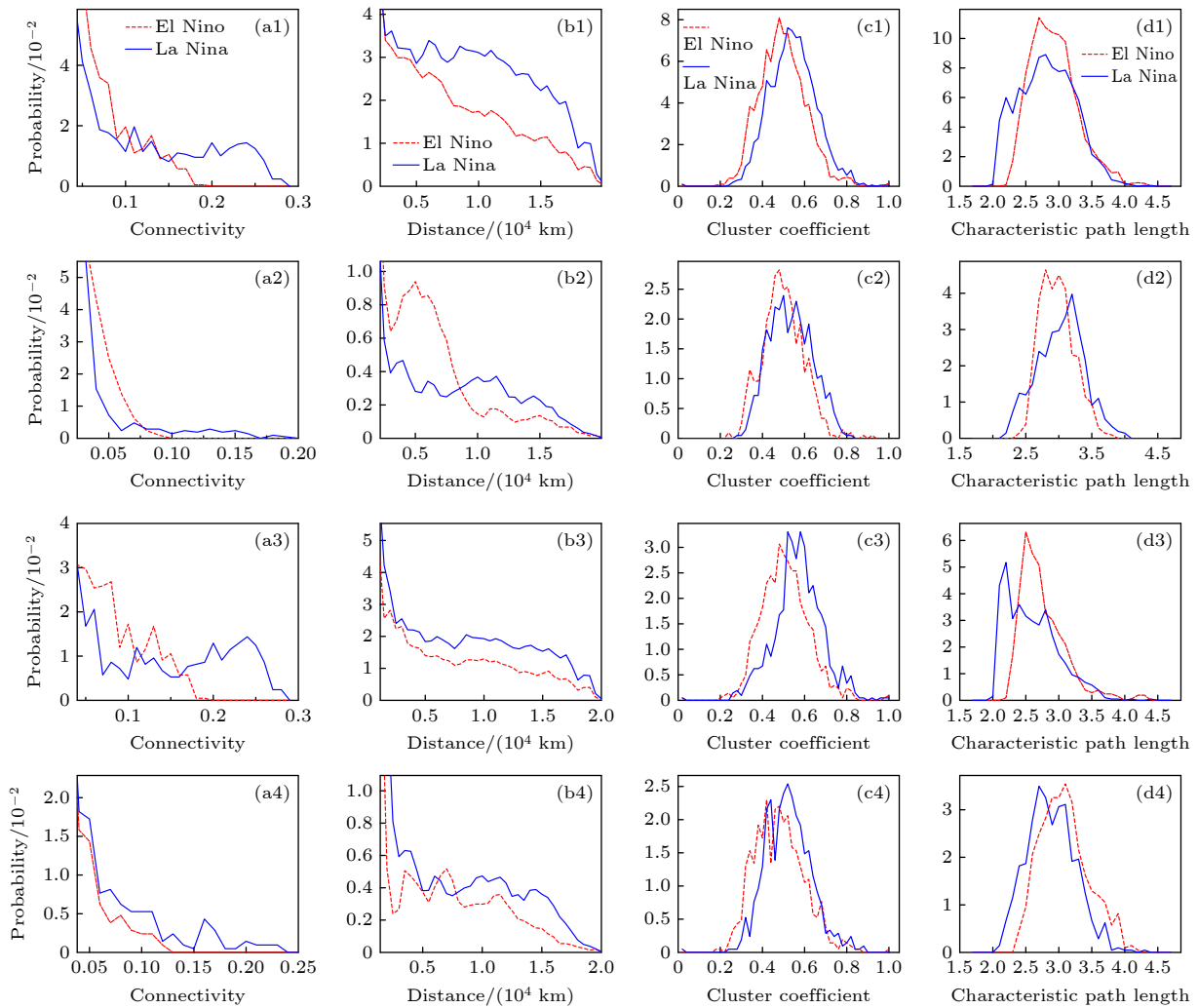


图3 不同区域网络特征量的概率分布 (a1)—(a4) 连通度; (b1)—(b4) 连通距离; (c1)—(c4) 集聚系数; (d1)—(d4) 最短路径长度. 由上到下4行依次对应全球网络、北温带网络、热带网络和南温带网络

Fig. 3. Probability distribution of (a1)–(a4) connectivity degree, (b1)–(b4) connectivity distance, (c1)–(c4) agglomeration coefficient, and (d1)–(d4) shortest path length of different regional network characteristic quantities. From top to bottom, four rows correspond to the global network, the northern temperate network, the tropical network, and the southern temperate network.

除了大西洋关键区中两者网络差别较小外, 赤道印度洋、赤道西太平洋和赤道东太平洋关键区与全球气温网络的连通度都表现出 El Niño 事件远低于 La Niña 事件的特征. 通过对连通度和连通距离概率分布 (图5) 的分析可以看到, La Niña 网络比 El Niño 网络拥有更高的连通度分布和更多数量的链接, 这使得前者具有更高的信息传递能力, 且稳定性更高. 此外, 由图4可以看出, 在不同相位的 ENSO 事件中, 赤道印度洋、赤道大西洋以及赤道东太平洋关键区之间的连通度分布始终存在, 表明这几块区域间气温的关联性较强, 这可能与热带地区存在的 Hadley 等纬向环流有关, 即赤道区域的海温变化可以加强或者减弱纬向环流, 并通过它影响到大气内部作用, 传递给其他遥相关区域.

## 4 El Niño 和 La Niña 网络结构特征差异的成因分析

### 4.1 El Niño 和 La Niña 年大洋关键区海气要素异常特征

为了进一步分析 ENSO 不同相位时全球气温关联网络结构特征差异的成因, 本节分别给出了 El Niño 和 La Niña 年份对应的全球海温距平和长波辐射的合成图 (图6). 可以看出, 海温和净长波辐射空间分布的特征是一致的, El Niño 事件对应赤道东太平洋、赤道印度洋和赤道大西洋的海温异常偏高, 这些区域的海洋向大气释放热量, 长波辐射转为负值, 海气热交换较强, 并通过 Walker 环

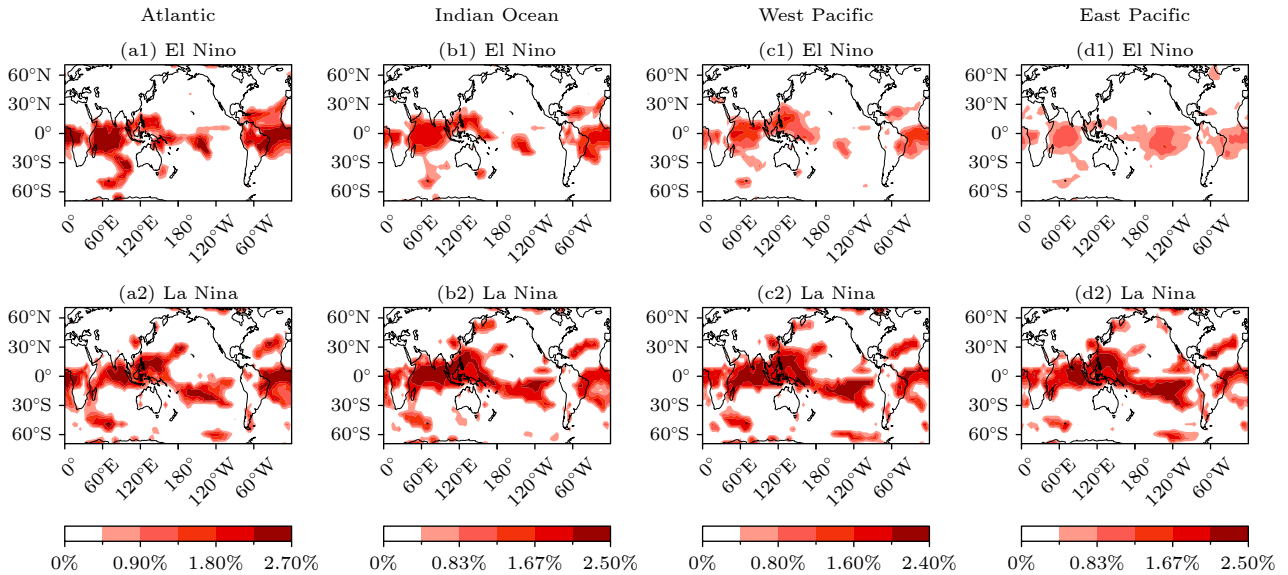


图 4 大洋关键区-全球气温关联网络连通度的空间分布图 (a1), (a2) 大西洋关键区与全球相关; (b1), (b2) 印度洋关键区与全球相关; (c1), (c2) 赤道西太平洋关键区与全球相关; (d1), (d2) 赤道东太平洋关键区与全球相关

Fig. 4. Spatial distribution of the connectivity between key regions of the ocean and global temperature network: (a1), (a2) Atlantic Ocean key region relevant to global; (b1), (b2) Indian Ocean key region relevant to global; (c1), (c2) equatorial western Pacific key region relevant to global; (d1), (d2) equatorial eastern Pacific key region relevant to global.

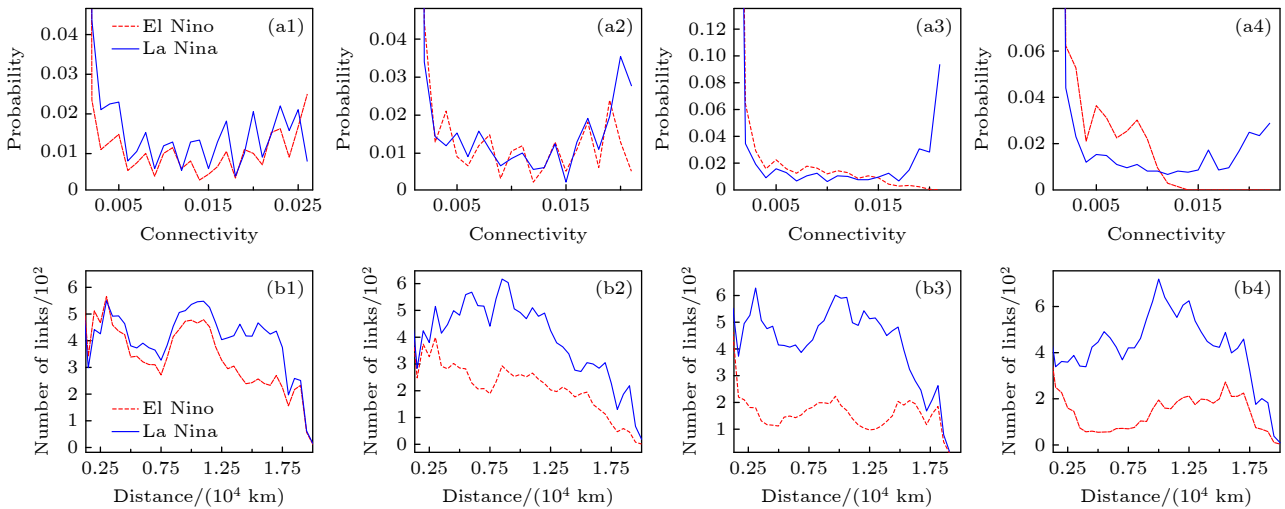


图 5 大洋关键区-全球气温关联网络连通性的概率分布图 (a1)—(a4) 连通度; (b1)—(b4) 链路距离. 其中 (a1), (a2) 为大西洋关键区与全球相关, (b1), (b2) 为印度洋关键区与全球相关, (c1), (c2) 为赤道西太平洋关键区与全球相关, (d1), (d2) 为赤道东太平洋关键区与全球相关

Fig. 5. Probability distribution of the connectivity between key regions of ocean and global temperature correlation network: (a1)—(a4) Connectivity degree; (b1)—(b4) link distance. Panels (a1), (a2) correspond to the key region of the Atlantic Ocean relevant to global, panels (b1), (b2) correspond to the key region of the Indian Ocean relevant to global, panels (c1), (c2) correspond to the key region of the equatorial western Pacific relevant to global, panels (d1), (d2) correspond to the key region of the equatorial eastern Pacific relevant to global.

流和 Hadley 环流等影响全球其他区域的气温. 赤道西太平洋由于受赤道 Walker 环流的影响, El Niño 事件主要呈现海温偏低, 对外长波辐射偏弱, 海气作用较弱的特征. La Niña 年则表现出与 El Niño 年基本相反的特征. 图 7 给出了 4 个大洋关

键区域的海温距平和长波辐射距平、垂直速度距平的概率分布图. 可以看出, 海温距平中赤道东太平洋、赤道印度洋和赤道大西洋 3 个关键海区海温距平的概率分布曲线在 La Niña 年较 El Niño 年的情况均明显向左偏移, 而赤道西太平洋则向右偏

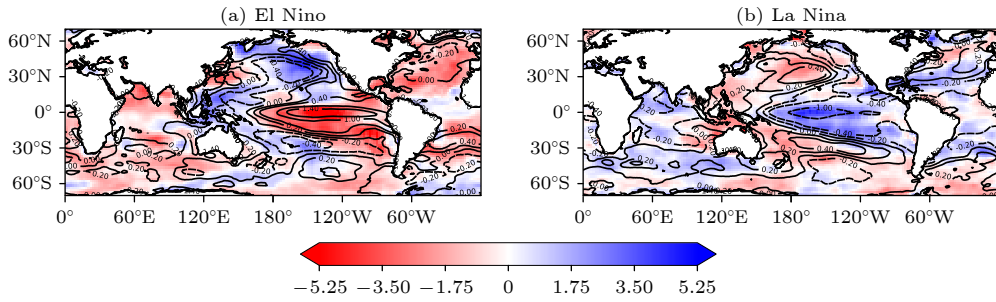


图 6 El Niño 和 La Niña 事件对应的海温距平 (等值线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和净长波辐射距平 (填色部分, 单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ ) 空间分布图 (a) El Niño; (b) La Niña

Fig. 6. Spatial distribution diagram of SST anomaly (isolines, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and net long-wave radiation anomaly (color filling, unit:  $\text{W}/\text{m}^2$ ) corresponding to El Niño and La Niña events: (a) El Niño; (b) La Niña.

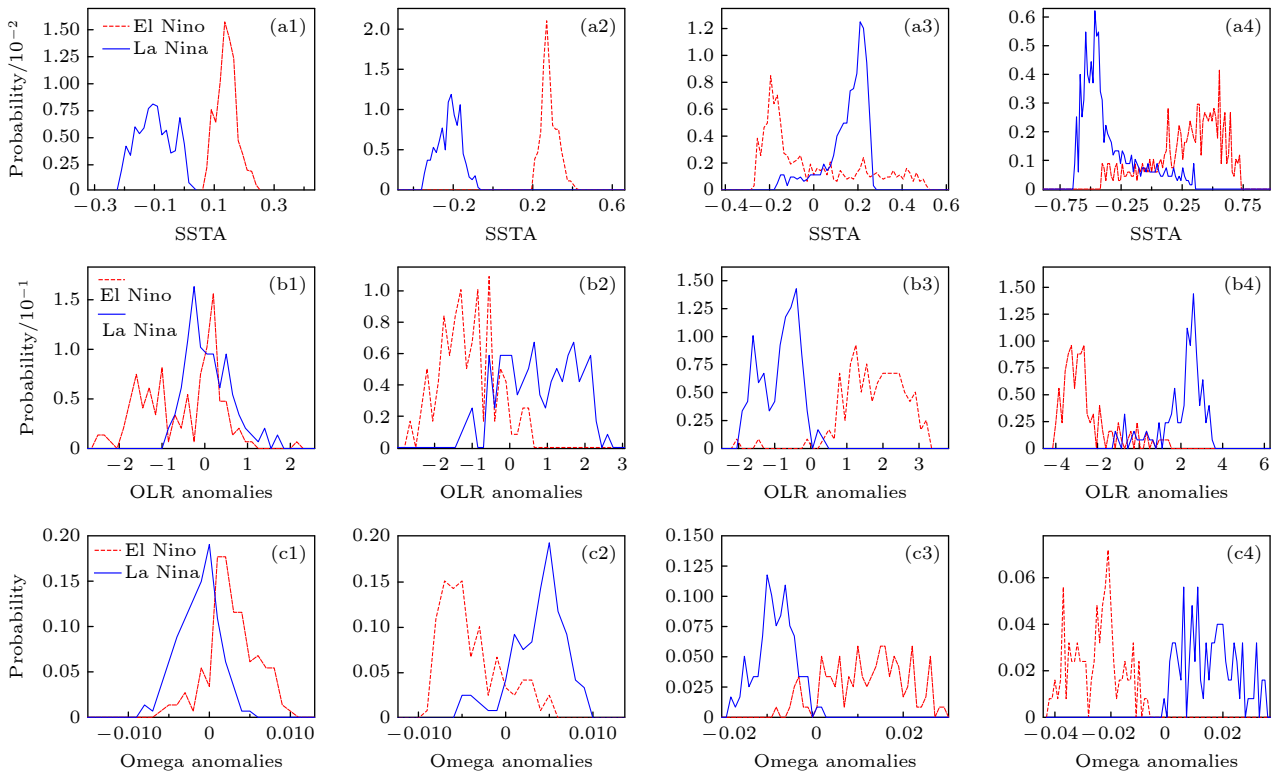


图 7 各关键区海温距平 ((a1)—(a4))、长波辐射距平 ((b1)—(b4)) 和垂直速度距平 ((c1)—(c4)) 的概率分布 (a1)—(c1) 赤道大西洋; (a2)—(c2) 赤道印度洋; (a3)—(c3) 赤道西太平洋; (a4)—(c4) 赤道东太平洋

Fig. 7. Probability distribution of SST anomaly ((a1)—(a4)), long-wave radiation anomaly ((b1)—(b4)) and vertical velocity anomaly ((c1)—(c4)) in each key area: (a1)—(c1) Equatorial Atlantic Ocean; (a2)—(c2) equatorial Indian Ocean; (a3)—(c3) equatorial western Pacific; (a4)—(c4) equatorial eastern Pacific.

移, 这与图 6 中海温距平分布基本一致. 在长波辐射和垂直速度距平的概率分布中赤道东太平洋和赤道印度洋在 La Niña 年向右偏移的特征较为明显, 而赤道大西洋虽然海温偏低, 但长波辐射向右偏移不明显, 垂直速度场出现了向左偏移的特征. 此外, 赤道西太平洋则表现出与赤道中东太平洋相反的特征. 所以我们推测, 正是由于 ENSO 现象中某些区域海温的变化使得全球气温出现波动, 导致气温网络连通性发生改变.

## 4.2 海温对全球气温网络结构的影响

Niño3.4 指数是判别 ENSO 事件的常用指标, 故本节探究 Niño3.4 指数区域海温变化对全球气温网络结构的影响. 分析区域海温升高对气温网络结构特征量、净长波辐射和垂直速度场的改变, 具体做法如下: 1) 选取 Niño 3.4 指数, 计算 1950—2020 年的每年 11 月到次年 3 月的平均海温并排序, 得到海温升序序列; 2) 取窗口宽度为 30 a, 滑

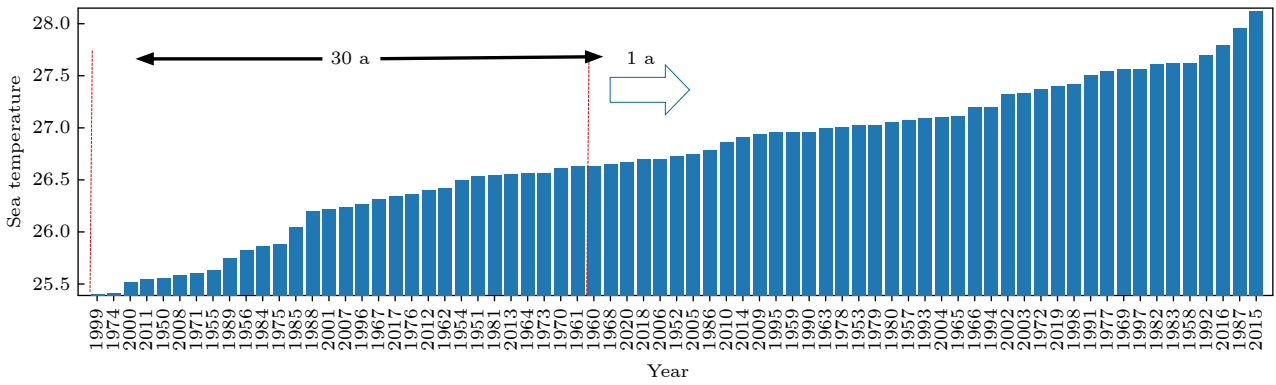


图 8 排序后 Niño 3.4 区域冬半年的海温均值序列, 虚线内窗口宽度 30 a, 滑动步长为 1 a

Fig. 8. Sequence of mean SST of winter half year in Niño 3.4 region after sorting. The window width in the dashed line is 30 a, and the sliding step length is 1 a.

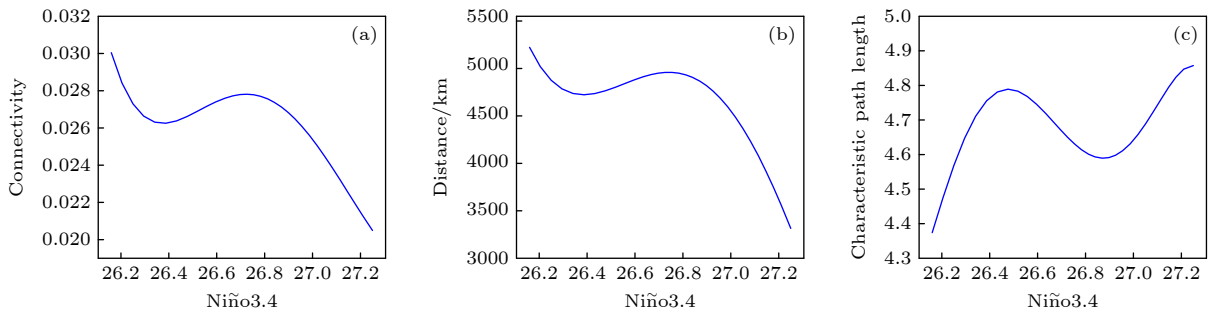


图 9 全球气温关联网结构特征量平均值随 Niño3.4 区域海温升高变化特征 (a) 连通度; (b) 连通距离; (c) 特征路径长度

Fig. 9. Variation characteristics of the mean value of structural characteristics of global temperature correlation network with the rise of SST in Niño3.4 region: (a) Connectivity degree; (b) connectivity distance; (c) characteristic path length.

动步长为 1 a, 计算每一个窗口的平均海温 (图 8);  
3) 构建各窗口所对应的 30 a 气温关联网, 计算网络结构特征量.

图 9 给出了全球气温网络结构特征量与 Niño 3.4 区域海温之间的对应关系. 可以看出, 随着 Niño 3.4 区域海温的升高, 全球气温网络连通性呈现波动下降的趋势, 连通距离也具有类似的特征, 而特征路径长度则表现出相反的变化特征, 即全球温度网络的连通性与 Niño 3.4 区域的海温之间存在反向变化的关系.

此外, 从图 10 可以看出, 随着 Niño 3.4 区域海温的升高, 赤道东太平洋区域的长波辐射、垂直速度均呈现线性减少的趋势, 由正距平转为负距平, 表明海洋与大气之间的热力交换和动力作用由正作用转为负作用; 赤道西太平洋区域则与之相反, 由负距平转为正距平, 即海洋与大气之间的热力交换和动力作用由负作用转为正作用. 与赤道东、西太平洋这两个区域不同的是, 赤道印度洋和大西洋区域的变化幅度较小. 因此可以说, 相较于于

印度洋和大西洋, 赤道东、西太平洋区域的海气热对流作用十分强烈, 这在一定程度上会加剧网络的不稳定性, 进而造成网络连通性的降低.

为了进一步分析海温变化影响气温网络连通性的变化机理, 计算了不同纬度区域平均的格点气温方差变化, 结果如图 11 所示. 可以看出, 北温带区域气温变化的方差随着 Niño 3.4 区域海温的升高呈上升的趋势, 南温带区域也有类似的特征. 因此, Niño 3.4 区域海温的升高会加剧东西太平洋海温梯度的明显变化, 加强东西太平洋关键区的海气相互作用, 造成低纬度与中高纬度之间气温变化的一致性减弱, 相互作用增强, 南北温带区域气温波动加大, 导致气温网络大量链路的断裂, 网络连通性明显下降, 故而造成 El Niño 全球气温关联网的连通性明显低于 La Niña 的情况. Tsonis 和 Swanson<sup>[18]</sup> 的研究也表示, 正是因为 El Niño 年中月平均气温变化的方差要比 La Niña 年大出 20%, 快速而剧烈的气温涨落破坏了网络中格点之间稳定的链接, 才会导致前者网络的可预测性下降.

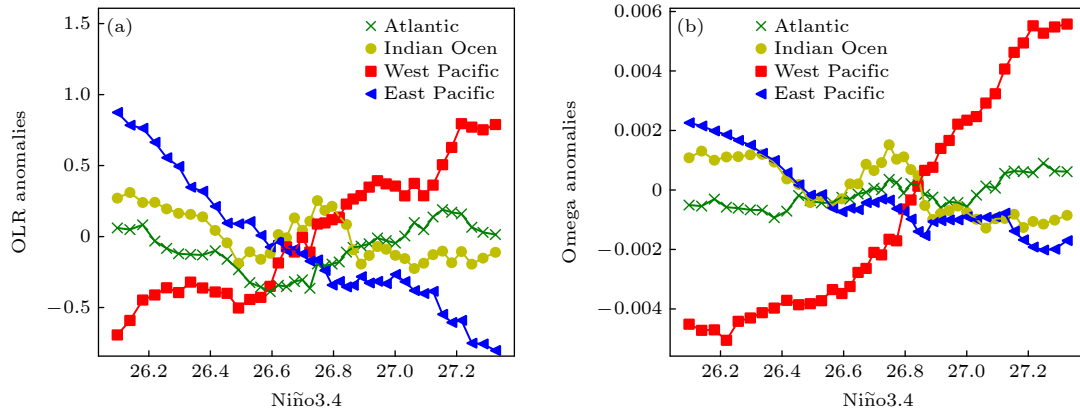


图 10 大洋关键区域长波辐射、垂直速度场随 Niño3.4 指数升高的变化特征

Fig. 10. Variation characteristics of long wave radiation and vertical velocity fields in key regions of the ocean with Niño3.4 index increasing.

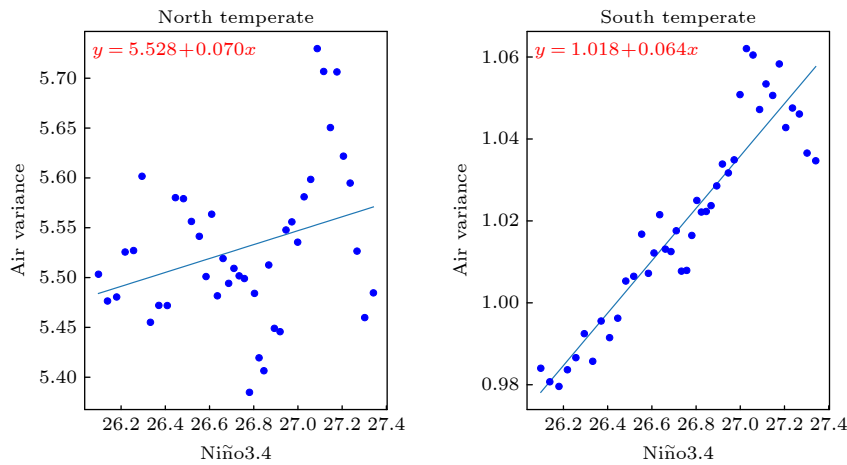


图 11 南温带 (30°S—65°S) 和北温带 (30°N—65°N) 平均气温方差随 Niño3.4 区域海温升高的变化图

Fig. 11. Variance of mean temperature in the south and north temperate regions (30°S–65°S, 30°N–65°N) with the increase of SST in Niño3.4.

## 5 结 论

本文从气候网络的角度,研究了 ENSO 不同相位下温度关联网络的结构特征差异性及其可能成因. 基于 NCEP 再分析全球表面气温资料,分别构建了 El Niño 事件和 La Niña 事件对应的温度关联网络,分析两者网络结构特征差异性,找出其中的关键区域并研究其对网络特征差异的影响,随后结合海气相互作用探究 ENSO 关键区海温升高与全球气温关联网络连通性变化之间的可能联系,浅析导致 ENSO 不同位相网络结构特征差异性可能的物理原因. 初步得到的研究结论如下:

1) 与 La Niña 网络相比, El Niño 网络中格点温度序列间的相关性减弱,气温网络的连通度显著

偏低,连通性下降,网络信息传递效率减弱,这种特征在热带和南温带区域尤为显著.

2) 大洋关键区-全球气温关联网络的特征量差异表明,赤道东太平洋、赤道西太平洋、赤道印度洋和赤道大西洋区域对全球 ENSO 气温关联网络连通度影响相对较大,在 El Niño 网络中的减少异常明显,是导致两类网络结构特征差异性的 4 块关键区域. 其中差异性最为显著的是赤道东太平洋区域,正好对应于 ENSO 现象发生的区域.

3) 对 Niño 3.4 区域的海温采用窗口为 30 a,步长为 1 a 的滑动平均值升序处理,构建对应的 30 a 气温关联网络并计算结构特征量,发现随着 Niño3.4 区域的海温升高,赤道东、西太平洋关键区域的海洋-大气热力和动力作用明显增强,对外长波辐射加强,对流活动增加,低纬度与中纬度区

域的相互作用增强, 导致南北温带气温变化的方差加大, 造成 4 大关键区格点气温序列与全球其他地区的相关性减弱, 全球温度关联网连通性下降。

温度关联网不仅可以帮助我们理解不同区域之间内在的联系, 也可以作为评估 ENSO 影响性的指标. 研究表明, 一些除了气温之外的动力学因素也是导致 ENSO 不同相位下网络结构特征差异的可能原因, 为此有必要在未来进一步考虑不同气象要素构建的气候网络, 分析其中的结构特征将进一步明确 ENSO 影响性的物理机理。

## 参考文献

- [1] Timmermann A, An S I, Kug J S, Jin F F, Cai W J, Capotondi A, Cobb K M, Lengaigne M, McPhaden M J, Stuecker M F, Stein K, Wittenberg A T, Yun K S, Bayr T, Chen H C, Chikamoto Y, Dewitte B, Dommenges D, Grothe P, Guilyardi E, Ham Y G, Hayashi M, Ineson S, Kang D Y, Kim S Y, Kim W M, Lee J Y, Li T, Luo J J, McGregor S, Planton Y, Power S, Rashid H, Ren H L, Santoso A, Takahashi K, Todd A, Wang G, Wang G, Xie R, Yang W H, Yeh S W, Yoon J H, Zeller E, Zhang X B 2018 *Nature* **559** 535
- [2] Michael J M, Stephen E Z, Michael H G 2006 *Science* **314** 1740
- [3] Jia X, Lin H, Derome J 2009 *Clim. Dyn.* **32** 495
- [4] Xie S P 1998 *J. Clim.* **11** 189
- [5] Huang R, Zhang R, Yan B 2001 *Sci. China, Ser. D Earth Sci.* **44** 1089
- [6] Wang L, Chen W, Huang R 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L20702
- [7] Lian Y, Shen B, Li S, Zhao B, Gao Z, Liu G, Liu P, Cao L 2013 *Adv. Atmos. Sci.* **30** 193
- [8] Li J P, Sun C, Ding R Q 2018 *Decadal Coupled Ocean-Atmosphere Interaction in North Atlantic and Global Warming Hiatus*//Beer T, Li J P, Alverson K *Global Change and Future Earth: The Geoscience Perspective* (Cambridge: Cambridge University Press) pp131-143
- [9] Wang G L, Tsonis A A 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5091
- [10] Boers N, Goswami B, Rheinwalt A, Bookhagen B, Hoskins B, Kurths J 2019 *Nature* **566** 373
- [11] Fang J Q, Bi Q, Li Y 2007 *Front. Phys. China* **2** 109
- [12] Noeke T, Buschmann S, Donges J F, Marwan N, Schulz H J, Tominski C 2015 *Nonlinear Processes Geophys.* **22** 545
- [13] Fu Z T, Li Q I, Yuan N M, Yao Z H 2014 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **19** 83
- [14] Fu Z T, Shi L, Xie F H, Piao L 2016 *Physica A* **449** 390
- [15] Li J P, Chou J F 2003 *Chin. J. Atmos. Sci.* **27** 653 (in Chinese) [李建平, 丑纪范 2003 *大气科学* **27** 653]
- [16] Yuan N M, Lu Z H 2019 *Nat. Clim. Change* **10** 13
- [17] Tsonis A A, Roebber P J 2004 *Physica A* **333** 497
- [18] Tsonis A A, Swanson K L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 228502
- [19] Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, Feng A X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 079201
- [20] Gong Z Q, Zhou L, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5351 (in Chinese) [龚志强, 周磊, 支蓉, 封国林 2008 *物理学报* **57** 5351]
- [21] Gong Z Q 2009 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [龚志强 2009 博士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [22] Ludescher J, Gozolchiani A, Bogachev M I, Bunde A, Havlin S, Schellnhuber H J 2014 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111** 2064
- [23] Ludescher Josef A G, Mikhail I B, Armin B, Shlomo H, Hans J S 2013 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **110** 11742
- [24] Yamasaki K, Gozolchiani A, Havlin S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 228501
- [25] Radebach A, Donner R V, Runge J, Donges J F, Kurths J 2013 *Phys. Rev. E* **88** 052807
- [26] Wiedermann M, Radebach A, Donges J F, Kurths J, Donner R V 2016 *Geophys. Res. Lett.* **43** 7176
- [27] Lu Z H, Yuan N M, Chen L, Gong Z Q 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2019GL086533
- [28] Lu Z H, Yuan N M, Fu Z T 2016 *Sci. Rep.* **6** 1
- [29] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R, Joseph D 1996 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **77** 437
- [30] Bollabas B 1985 *Random Graphs* (London: Academic Press) p20
- [31] Tsonis A A, Swanson K L, Roebber P J 2006 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **87** 585
- [32] Robusto C C 1957 *Am. Math. Mon.* **64** 38
- [33] Albert R, Barabási A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47

# Analysis of structural differences and causes of ENSO temperature network\*

Hu Heng-Ru<sup>1)</sup> Gong Zhi-Qiang<sup>2)3)†</sup> Wang Jian<sup>1)</sup>Qiao Pan-Jie<sup>4)</sup> Liu Li<sup>5)</sup> Feng Guo-Lin<sup>1)3)</sup>1) (*College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*)2) (*School of Electronics and Information Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou 215100, China*)3) (*Laboratory for Climate Research, National Climate Center, Beijing 100081, China*)4) (*Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China*)5) (*College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*)

( Received 29 April 2021; revised manuscript received 19 June 2021 )

## Abstract

Based on the global surface temperature data, the global temperature correlation networks corresponding to El Niño and La Niña events are constructed respectively, and the differences in their effects on the network topological structure properties are analyzed. The results show that compared with the La Niña temperature network, the correlation between grid temperature series in El Niño temperature network is weakened, and the connectivity of the network is significantly reduced, especially in the tropical region and the southern temperate region. The network connectivity degree of equatorial eastern Pacific, equatorial western Pacific, equatorial Indian Ocean and equatorial Atlantic Ocean are relatively large, and the decrease in El Niño network is notable. They are also the four key regions leading to the differences of the structural characteristics of the two types of network. On this basis, the reason for the difference between the two types of network characteristics is preliminarily discussed. With the increase of SST in Niño3.4 region, the SST in equatorial eastern Pacific, equatorial Indian Ocean and other areas rise, which strengthens outgoing long wave radiation and convection activities, and the interaction between low latitude and mid-latitude areas, and the variance of air temperature changes in the north and south temperate regions increase. As a result, the correlation between the temperature series of the four key regions and the rest of the world is weakened, therefore the connectivity of the global grid temperature network is reduced.

**Keywords:** complex network of climate system, ENSO, nonlinear dynamics, network structure

**PACS:** 92.60.Wc

**DOI:** [10.7498/aps.70.20210825](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210825)

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFA0606301) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42075057, 41875100).

† Corresponding author. E-mail: [gongzq@cma.gov.cn](mailto:gongzq@cma.gov.cn)