

## 冬季大气遥相关和海温关键区的复杂网络性质\*

左冬冬<sup>1)</sup> 龚志强<sup>2)†</sup> 冯爱霞<sup>3)</sup> 支蓉<sup>2)</sup>

1) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

2) (国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081)

3) (国家气象信息中心资料服务室, 北京 100081)

(2013年10月14日收到; 2013年11月6日收到修改稿)

基于大气遥相关指数和海表温度关键区, 以各关键区高度场平均值和海表温度关键区平均值之间的相关系数作为连边条件, 建立体现大气遥相关和海表温度关键区相互作用的关联网, 进而给出了大气和海洋关键区相互作用的空间图像. 同时基于网络的结构特征量, 研究了该网络的基本性质, 给出了关键区中的网络关键节点, 并分析了关键节点对网络性质的影响. 研究表明: 大气遥相关和海温关键区关联网具有一定的小世界性质, 即网络具有小的平均路径长度和较大的集群系数; 网络的平均路径长度在阈值为0.1—0.4时系统基本保持稳定, 即网络的性质保持不变, 进而证明了以信度为0.01下的相关系数0.19作为连边阈值的有效性. 对于网络中的单个节点网络特征分析发现, 东亚-太平洋遥相关1区和2区以及太平洋-北美遥相关1区和4区在网络中具有较大的节点度, 即大气中这4个区域在大气遥相关和海表温度关键区中作用较强; 北太平洋涛动区域1, 东亚-太平洋遥相关区域3的节点度则相对最小, 即这个区域在大气遥相关和海表温度关键区相互作用中的影响较小. 通过依次去除网络中度大的节点进一步证明了网络具有一定的鲁棒性. 该研究对于重点把握遥相关和海温的一些重要区域具有一定指示意义, 也从另一角度提供了研究海气相互作用新方法.

关键词: 关联网, 遥相关区域, 海洋关键区域

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.049201

## 1 引言

自 Watts 和 Strogatz<sup>[1]</sup> 在《Nature》杂志上发表关于小世界 (small world) 网络以及 Barabasi 和 Albert<sup>[2]</sup> 在《Science》上发表“无标度网络”以来, 近十几年间, 全球范围内开展了复杂网络的相关研究. 该方法为其他学科提供了一种看问题的全新视角. 一些科研工作者将复杂网络的理论与方法成功地运用到其他学科领域<sup>[3,4]</sup> 来研究复杂现象, 例如: 生物网、因特网、社会网等, 并取得了许多的成果.

由于气候系统的非线性和复杂性, 对该系统的研究具有挑战性. 目前气象工作者对该方向的研究已经取得了丰硕的成果<sup>[5-15]</sup>. 复杂网络的发

展为复杂科学问题研究提供了一种全新的视角, 为此许多气象工作者也利用该方法来研究气象上的一些问题, 也取得了不少的进展. 如: Tsonis 等<sup>[16-18]</sup> 利用太平洋十年涛动 (Pacific decadal oscillation, PDO), 北大西洋涛动 (the North Atlantic oscillation, NAO), 厄尔尼诺/南方涛动 (the El Niño/southern oscillation, ENSO) 和北太平洋涛动 (the north pacific oscillation, NPO) 的指数来构建网络, 研究了它们之间的同步协调关系; Yamasaki 等<sup>[19]</sup> 研究了 La Nina 事件对全球温度关联网的影响; 龚自强等<sup>[20,21]</sup> 研究了基于环流系统关联网的北半球各种遥相关年代际尺度的变化特征和全球温度关联网动力学统计性质; 王晓娟等<sup>[22]</sup> 研究了极端事件对温度关联网稳定性的影响; Feng

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB955903) 和国家自然科学基金 (批准号: 41205040, 41105055) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gzzq0929@126.com

等<sup>[23]</sup>研究了海气双层网络的拓扑结构和动力行为.

目前已经有较多有关遥相关和海温场关键区域的研究,应用的方法比较多<sup>[24-26]</sup>,而利用复杂网络研究气象问题却更多的是从单层面、单节点上来分析单个要素的网络行为特征.气候系统往往更多的是区域之间的相互影响、相互作用,不仅是单个节点上的相互作用,构建区域之间网络更能体现出一种稳定的、更深层次上的相互作用关系,通过对这种区域构建的网络来理解它们之间的动力学行为.而在复杂的气候系统中大气中的遥相关和海洋中的一些具有指示意义的海洋区域常是受关注较多的,而某个遥相关常包含多个区域,在相互作用中并不是所有的区域都发挥着相当的作用地位,而是一些区域影响较大,一些区域影响较小.因此本文根据文献<sup>[27]</sup>提出的遥相关指数,按照遥相关指数定义选取该遥相关的代表的区域与海洋中的一些关键区建立连接,来理解它们的空间结构特征,并比较这些区域对网络性质的影响,从而从网络这一层面上加强对遥相关和海洋关键区域的理解.

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

高度场(500 hPa)、海平面气压场资料来源<sup>[28]</sup>是NCEP再分析格点逐月月平均资料,分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ;海温场的资料来源<sup>[29]</sup>是NOAA格点逐月月平均资料,分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ .时间都为1953年12月至2013年2月,由于环流系统中的各种遥相关在冬季相对更稳定,为此只分析12月至2月即冬季构成的时间序列.

### 2.2 研究方法

根据Wallace和Gutzler<sup>[27]</sup>提及的遥相关,选取其中比较典型的6个遥相关分别为:NAO, NPO, 东亚/太平洋遥相关(the east Asia/Pacific, EAP)、太平洋/北美遥相关(the Pacific/north American pattern, PNA)、西大西洋遥相关(the western Atlantic pattern, WA)、欧亚遥相关(the Eurasian pattern, EU).按照各遥相关的指数定义选取出各遥相关类型的代表区域,共16个.另外在海洋上选取常关注的7个区域分别为:北印度洋(north

Indian Ocean, NIO)、西太平洋(west Pacific, WP)、赤道中东太平洋(middle east Pacific, MEP)、北太平洋(north Pacific, NP)、北大西洋(north Atlantic, NA)、大西洋赤道区域(equatorial Atlantic, EA)、南大西洋(south Atlantic, SA).表1给出了上述23个区域的经纬度区间.

根据表1列出的各区域范围求出该范围内所对应要素的平均值,构成区域平均的时间序列 $H_i(j)$ ,并对该序列进行标准化,计算公式如下:

$$H'_i(j) = \frac{H_i(j) - \langle H_i \rangle}{\sqrt{\langle H_i^2 \rangle - \langle H_i \rangle^2}}, \quad (1)$$

其中 $H_i(j)$ 表示 $i$ 区域的时间序列第 $j$ 个值, $\langle H_i \rangle$ 为 $i$ 区域的时间序列的平均值.利用标准化后的时间序列数据计算任意两个区域的相关系数 $C_{ij}$ 为

$$C_{ij} = \frac{1}{180} \sum_{k=1}^{180} H'_i(k)H'_j(k), \quad (2)$$

$C_{ij}$ 的范围为 $-1 \leq C_{ij} \leq 1$ , $C_{ij} = 1$ 表示完全正相关, $C_{ij} = -1$ 表示完全负相关, $C_{ij} = 0$ 表示不相关.把区域看成网络的节点,通过(2)式计算两两区域间的相关系数 $C_{ij}$ ,利用 $C_{ij}$ 的绝对值大小是否超过指定的阈值作为判断两节点之间是否存在连边的条件,这样便建立起23个区域之间的关联网络.

对网络的分析,通常借助网络性质的统计量<sup>[30,31]</sup>,通过计算统计量的大小并结合网络的特性进行分析,为此下文将逐个介绍常见的几个网络特征量.

节点度计算公式如下:

$$k_i = \sum_j a_{ij}, \quad (3)$$

其中, $a_{ij}$ 为网络的邻接矩阵的元素,描述 $i, j$ 两节点是否存在连接, $a_{ij} = 1$ 表示点 $i$ 和点 $j$ 之间存在连边,反之则无.度在网络中代表节点在网络中的影响力或重要程度,度越大表征其影响力越大,在整个网络中的作用越强,反之亦然.

网络的平均路径长度计算公式如下:

$$\langle l \rangle = \frac{2}{N(N+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij}, \quad (4)$$

其中, $N$ 为网络的节点总数, $d_{ij}$ 表示 $i$ 节点到 $j$ 节点的最短路径长度.平均路径长度描述了网络中任意两节点之间的距离平均值,用来描述网络的传输效率.

表1 类似于大气遥相关和部分海洋区域计算范围

	区域1	区域2	区域3	区域4
			大气部分	
NAO	W35°—W5° N55°—N75°	W35°—W5° N20°—N40°		
NPO	E155°—W175° N55°—N75°	E150°—180° N15°—N35°		
EAP	E110°—E140° N10°—N30°	E110°—E140° N30°—N50°	E110°—E140° N50°—N70°	
PNA	W175°—W145° N10°—N30°	180°—W150° N35°—N55°	W130°—W100° N45°—N65°	W100°—W70° N20°—N40°
WA	W70°—W40° N45°—N65°	W70°—W40° N20°—N40°		
EU	E5°—E35° N45°—N65°	E60°—E90° N45°—N65°	E130°—E160° N30°—N50°	
			海洋部分	
NIO	E70°—E100° S15°—N15°			
WP	E135°—E165° S10°—N10°			
MEP	W150°—W90° S5°—N5°			
NP	E175°—W135° N40°—N50°			
NA	W45°—W15° N50°—N60°			
EA	W45°—W15° S10°—N10°			
SA	W30°—0° S40°—S25°			

注: 例如 PNA 的指数定义为:  $PNA = 1/(4[z^*(20^\circ N, 160^\circ W) - z^*(45^\circ N, 165^\circ W) + z^*(55^\circ N, 115^\circ W) - z^*(30^\circ N, 85^\circ W)])$ , 根据该指数定义中所包含的 4 项, 分别以该 4 项对应的经纬度为中心选取 4 个区域.

节点的集群系数计算公式:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)}, \quad (5)$$

其中,  $E_i$  表示与  $i$  节点连接的两节点也相连接的个数,  $k_i$  为  $i$  节点的度大小. 整个网络的集群系数  $C$  是各节点的集群系数的平均值, 显然  $0 \leq C \leq 1$ ,  $C = 0$  表示当且仅当所有的节点均为孤立节点, 即没有任何连接边;  $C = 1$  表示当且仅当网络是全局耦合的, 即网络中的任意两节点都相连. 集群系数

描述了网络节点的群居或集团现象.

节点的中介系数计算公式如下:

$$BC_k = \frac{\sigma_{ij}(k)}{\sigma_{ij}}, \quad (6)$$

其中,  $\sigma_{ij}(k)$  表示从  $i$  节点到  $j$  节点经过  $k$  节点的最短路径个数,  $\sigma_{ij}$  表示  $i$  节点到  $j$  节点的最短路径个数.  $k$  节点的中介系数的平均值为:  $k$  点对任意一对节点的中介系数的平均值. 节点中介系数是网络中心性的一个衡量指标.

### 3 区域关联网络结构性分析

#### 3.1 阈值选取与网络整体性质分析

由于连边阈值对网络的后续计算有较大的影响, 选择合理和可信的阈值是后续研究结论的正确性保证. 为此图 1 给出了在不同阈值下网络结构统计量的变化情况.

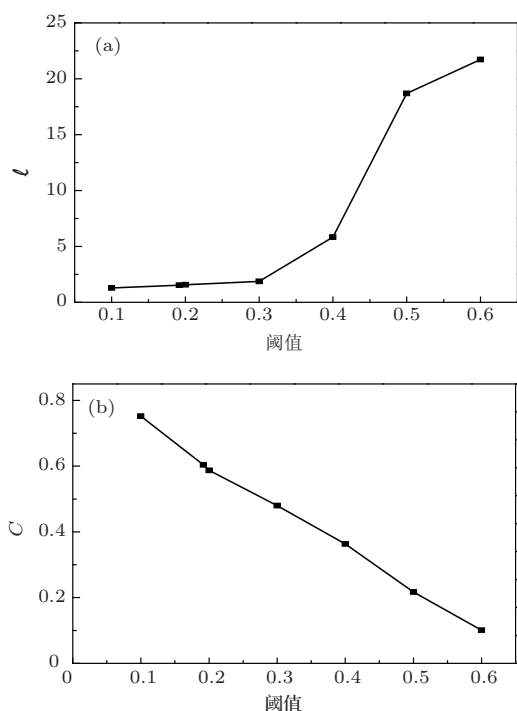


图 1 网络的统计量随阈值的变化 (a) 网络的平均路径长度  $l$  随阈值的变化; (b) 网络的聚类系数  $C$  随阈值的变化

从图 1(a) 可以看出, 网络的平均路径长度  $l$  在阈值小于 0.4 时变化较小, 但当阈值大于 0.4 后平均路径长度迅速地变大; 聚类系数的大小变化 (图 1(b)) 表现为: 随着阈值的变大聚类系数逐渐减小. 平均路径长度和聚类系数是描述复杂网络的两个基本统计量, 他们的变化大致反映了网络结构的变化情况. 从图 1 可以看出, 在阈值为 0.4 前后网络的结构发生了明显的变化. 利用大于 0.4 的值作为阈值来分析网络会因选值的差异导致结果存在较大的差异. 另外由于区域间存在的是稳定的相互作用, 为此阈值应取在小于 0.4 的范围内, 同时在考虑到相关系数的信度检验后, 本文以达到 0.01 信度的 0.19 作为连边阈值进行讨论. 图 2 则是阈值为 0.19 时得到的网络空间连接图像.

从图 2 的节点连接情况可以看出, 海洋中的节点主要与其上方周围的大气节点连接, 而较少与较

远的节点连接, 该点直观地说明区域之间的相互作用首先表现为与该区域附近的区域相互作用, 然后再间接地和相离较远区域进行相互作用. 另外, 根据计算得到网络的平均路径长度大小为 1.53, 由网络的平均路径长度大小定义可知其值表示了网络中任意两节点之间最短路径长度的平均值, 从此可看出网络中节点之间的连接是十分紧密的, 任意两节点之间的连接只要经过少于两个节点就能将一节点的波动传到另一节点, 即具有高效的传输效率. 区域之间的交流紧密性有利于将一区域的不稳定快速地传递到其他区域, 从而保持该区域的稳定. 同时按照聚类系数计算公式计算得到聚类系数的大小为 0.6. 聚类系数表征了网络中节点之间的区域结构特征, 其大小为 0 至 1 之间, 1 表示任意两点都相连, 即全耦合网络, 0 表示网络中的任意三节点无三角形结构. 聚类系数为 0.6 表明该网络具有较强的社区结构特征, 具有该特征的网络在信息传输方面表现出: 当其中的一个区域受到外胁迫作用后会带动整个社区成员一起变化, 然后再通过该社区结构向整个网络传播, 同时该网络还具有在受到外界干扰下能够保持网络的结构不变性, 即维持网络的稳定性. 这种具有较小平均路径长度和较大聚类系数的网络又被称为小世界网络 [1].

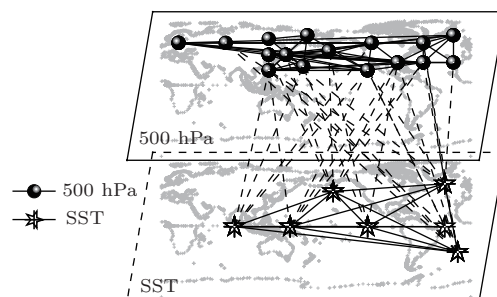


图 2 阈值为 0.19 时的网络空间连接图 (图中标注的 SST 平面表示海温层, SST 层中的五角星为表 1 所述海温区域的中心点 (代表点), 500 hPa 层含义类似; 同层间的连线用实线表示, 用虚线表示层与层间的连线; 定义在海平面气压的 NPO, NAO, 为简化图像将该点画至 500 hPa 层中)

另外, 从图 2 中可以看到, 赤道区域的海温与中高纬度的大气建立了较多连接, 把连接看成是一种作用关系, 则二者间的关系是密切的, 该关系可能是直接的作用关系, 也有可能是间接式的相互作用关系. 图中的连接现象同较多学者的研究有着较多的符合. 例如, 周波涛等 [32] 指出, Haley 环流与 NPO 存在着密切关系, 当 Hadley 环流位于正位相时, NPO 偏强, 反之则弱. 而赤道地区海温偏高会加强 Hadley 环流, 反之减弱, 为此, 赤道区

域的海温变化便可通过 Hadley 环流间接地影响到 NPO, 然后再将变化通过大气内部作用传递给其他类型的遥相关区域. 本文也得到了低纬度地区的中东太平洋区域与 NPO 区域 2 建立有连接. Pozo-Vazquez 等 [33] 认为太平洋-北美遥相关型可能是联系热带强迫和北大西洋地区热带外环流变化的机制. 另外, 还有研究 [34] 指出黑潮的输送与 PDO 及 ENSO 有较好的关系, 并且在年际尺度上, 黑潮输送异常滞后于 PDO 及 ENSO 变化, 且呈现负相关. 而黑潮运输的变化将会直接影响其上空的大气环流的变化, 从而影响到遥相关的变化.

图 2 中还可看出, 大气中有较多的区域与中纬度的海洋连接, 而较多的研究认为冬季中纬度地区的海洋对大气的作用较小, 为此图 2 中显示的连线应是大气对海洋的强迫作用. 该点能较多地从他人研究中得到, 如: 李博等 [35] 利用模式分析指出北太平洋冬季大尺度的大气环流异常能通过影响湍流热通量从而决定 SST 的变率, 该文也进一步证明

了热带外地区大气环流与海洋的相互关系中大气对海洋的强迫可能是主要的. 另外, 周天军等 [36,37] 利用一个耦合模式讨论了北大西洋冬季的海气相互作用特征, 证实了大气对海洋的强迫作用. 综上可得到, 图 2 中的连线暗含的区域作用关系是多样的, 对于各区域间详细的物理机制值得进一步深入探讨和研究. 以上仅简单地分析了一些连线可能代表的含义, 图 2 中的连线情况能较直观地反映出区域与区域间存在作用关系, 可为其他研究提供一种整体上对区域作用的把握, 具有较强的指示作用.

### 3.2 网络单节点性质分析

对复杂网络的描述不仅包含对整体网络性质的描述量, 同时也有对单节点的描述统计量. 例如, 节点度、中介系数和集群系数等. 利用王小凡等 [30] 和邹勇等 [31] 的定义描述分析了代表网络中各个区域的节点性质, 并在表 2 中列出了排序后得到的前 4 项和后 4 项对应区域.

表 2 网络单节点性质排序表

	区域	节点度	区域	中介系数	区域	集群系数
前 4 位	EAP-1	18	EAP-1	0.0775	EA	0.857
	PNA-1	16	PNA-1	0.0639	NAO-2	0.762
	EAP-2	15	EAP-2	0.0506	NAO-1	0.714
	PNA-4	15	PNA-4	0.0505	EU-1	0.694
	...		...		...	
后 4 位	NAO-2	7	NAO-1	0.0044	PNA-4	0.495
	EA	7	NAO-2	0.0026	PNA-1	0.467
	NPO-1	6	EAP-3	0.0026	EU-2	0.444
	EAP-3	4	EA	0.0016	PNA-3	0.444

注: 上述 EAP-1 表示表 1 中叙述的 EAP 区域 1, 其他类同.

从表 2 中的节点度排序可以看出, 在 EAP 遥相关包含的 3 个区域中, 区域 1 和区域 2 都有着较大的度, 而 EAP 区域 3 的度大小仅为 4, 是其他两个区域的近 1/4. 另外, PNA 遥相关包含有 4 个区域, 其中的 1 区和 4 区的度较大, 另外两个区域的节点度分别为 10 和 8. 以上表明, 同一遥相关包含的区域之间是有差异的, 即有的区域作用强些, 有的则弱些. 该观点也体现在中介系数中的 PNA 和 EAP 的区域差异. 节点度描述了节点的连接数, 度大的节点连接的节点数多, 这样的节点变化可以很快地影响网络的整体变化, 而度小的点就必须经过它的连接点甚至是次连接点才能把自身的波动信

息传开, 另外对于具有损耗的系统, 信息在多次传输的过程中强度会逐渐减弱甚至湮灭. 所以度大的节点在一定程度上影响了整个网络的性质, 是值得关注的节点.

网络节点的中介性描述了节点在网络中的输运性质, 该含义可类似比于交通枢纽的特性. 从表 2 的中介系数排序可以看到, 度大的节点多数也是中介系数大的点, 度小的点也有着较小的中介系数, 另外中介系数最大值与最小值之间相差近 23 倍, 该点亦体现区域之间的差异性.

从表 2 的集群系数栏可以看出, EA 区域、NAO 遥相关包含的两个区域和 EU 区域 1 都有着较大的

集群系数, 另外海洋中的几个区域都具有较高的集群系数, 该点在一定程度上阐释了海洋相对于大气更稳定. 为了更直观地理解关键区域和其他区域的作用空间图像, 图3给出了大气中和海洋中度靠前的两个区域空间连接图.

图3(a)和(b)给出了500 hPa高度场上度大的两个区域的空间连接图. 从图中可以直观得到两个度大的区域在海洋中主要都与北印度洋、西太平洋和大西洋的赤道区域建立连接, 说明该区域的变化和这三个区域的变化存在较大关系. 海洋中度靠前的两个区域连接如图3(c)和(d)所示, 图3(c)中的南大西洋连接有较多的区域, 海洋部分仅大西洋的赤道部分未有连接. 从图3(d)的连接情况可以看到, 尽管北大西洋存在较多的连接, 但未与具有较大度的EAP遥相关区域建立连接.

### 3.3 网络鲁棒性分析

根据复杂网络理论, 网络的鲁棒性指: 如果在移走少量节点后网络中的绝大部分节点仍是连通的, 那么就称该网络的连通性对节点故障具有鲁棒性. 一般对节点的干扰又可以分为随机干扰和蓄意干扰. 对鲁棒性的度量一般采用“去除节点数和网络中的总节点数的比例  $f$ ”与“网络的平均路径长度  $l$ ”之间的关系来度量. 图4(a)为网络受到随机

干扰和依次去除度大的蓄意干扰条件下得到的  $f-l$  关系规律图. 当网络受到随机攻击后, 网络的平局路径长度在  $f < 0.4$  时基本不变化, 当  $f > 0.4$  后, 网络出现先增加后迅速减小. 而在蓄意攻击下的网络平均路径变化在一开始就出现明显增加, 在  $f$  为 0.5 左右后平均路径长度迅速减小. 从两者的对比可以看出, 蓄意攻击度大节点迅速破坏了网络的拓扑连接完整性, 使得网络的连通效率的降低, 另外也从侧面表明度大的节点对网络的拓扑性质有着较大影响. 虽然在现实中无法实现把该网络中的节点移除, 但是通过该方法却能明显地看出度大的节点在该网络中的重要性, 另外为了更好地对比单节点对网络的影响, 图4(b)给出了在去除网络单节点后集群系数和平均路径长度相对于原网络的变化量. 从图4(b)可以看出, 随着去除节点度的增大, 网络的平均路径大小增加, 而集群系数是减少的. 表明在该网络中度大的点, 不仅利于网络间的信息传输, 而且有益于形成社区结构增强网络的稳定性.

由此可见, 区域关联网络具有一定的鲁棒性, 并且网络中度大的节点不仅有利于网络间的信息传输. 而且还有利于形成具有稳定性的社区结构. 为此这些度大的节点是值得高度关注的关键区域.

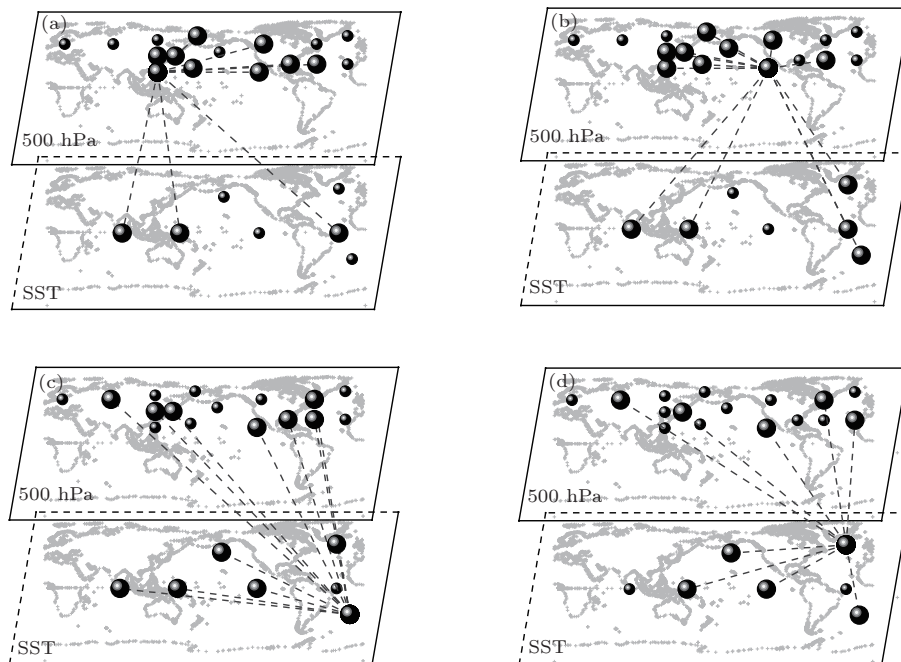


图3 大气和海洋中关键区域空间连接图 (a) EAP 区域 1 的空间连接图像; (b) PNA 区域 1 的空间连接图像; (c) 南大西洋的空间连接图像; (d) 北大西洋的空间连接图像 (图中点和层的含义介绍如图 2 所述, 另外在该图中都用虚线描述节点间的连线, 大圆圈表示有连接的节点, 小圆圈表示未连接的节点)

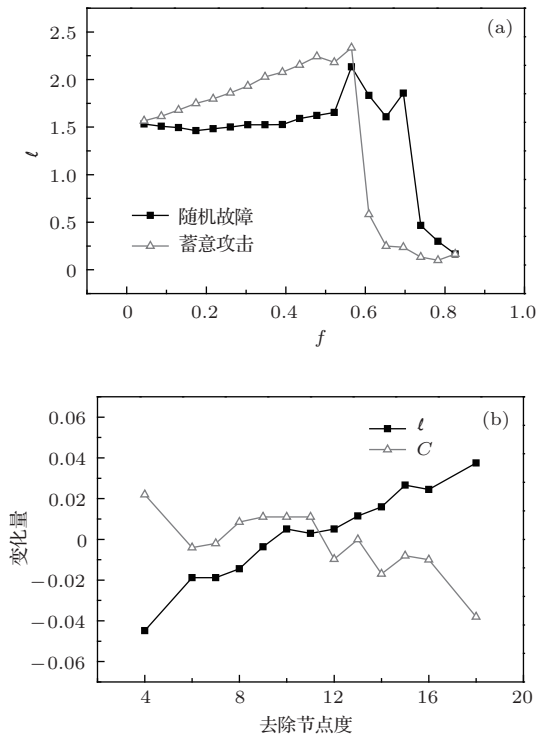


图4 网络鲁棒性分析 (a) 平均路径长度对随机故障和蓄意攻击的响应; (b) 去除单节点对网络集群系数和平均路径长度的影响

## 4 结 论

利用复杂网络的基本原理与方法, 构建起遥相关包含的区域和海温关键区的关联网络, 根据建立的网络计算网络的基本统计量. 从计算的结果得到以下结论:

1) 平均路径长度在阈值小于0.4时基本不变, 大于0.4后平均路径长度开始迅速增大, 而集群系数随阈值的增大是逐渐减小的, 综合考虑该变化和信度约束下, 以0.19构建区域关联网络, 进一步计算得到该网络具有一定的小世界性质;

2) 单节点的对比分析得到: EAP遥相关1区、2区和PNA遥相关1区、4区在网络中不仅有着较大的度, 同时也有较大的中介系数, 而EAP区域3和NPO区域1则较小; 在对比分析后得到, 区域之间的差异较大, 另外大西洋的赤道部分和NAO的区域1和区域2有着较大的集群系数, 但是其他两个量都较小; 由于这些节点在网络中的特殊性, 所以一些值大的节点值得较高的关注;

3) 网络的鲁棒性分析得到, 该网络具有一定的鲁棒性特征, 另外去除网络的单节点分析得出, 网络的集群系数和平均路径长度对度大小的敏感度是不一样的, 度大的节点和度小的节点变化较大.

## 参考文献

- [1] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [2] Barabasi A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [3] Ren G, Lu L L, Wang W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144501 (in Chinese) [任刚, 陆丽丽, 王炜 2012 物理学报 **61** 144501]
- [4] Gao X Y, An H Z, Liu H H, Ding Y H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068902 (in Chinese) [高湘昀, 安海忠, 刘红红, 丁颖辉 2011 物理学报 **60** 068902]
- [5] Feng G L, Hou W, Dong W J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 962 (in Chinese) [封国林, 侯威, 董文杰 2006 物理学报 **55** 962]
- [6] Feng G L, Dai X G, Wang A H, Chou J F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 606 (in Chinese) [封国林, 戴新刚, 王爱慧, 丑纪范 2001 物理学报 **50** 606]
- [7] Feng G L, Dong W J, Jia X J, Cao H X 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1181 (in Chinese) [封国林, 董文杰, 贾晓静, 曹鸿兴 2002 物理学报 **51** 1181]
- [8] Da C J, Chou J F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2595 (in Chinese) [达朝究, 丑纪范 2008 物理学报 **57** 2595]
- [9] Da C J, Feng A X, Gong Z Q, Song J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 039202 (in Chinese) [达朝究, 冯爱霞, 龚志强, 宋健 2013 物理学报 **62** 039202]
- [10] Chou J F 1997 *Bull. Chin. Acad. Sci.* **5** 325 (in Chinese) [丑纪范 1997 中国科学院院刊 **5** 325]
- [11] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Zhi R 2006 *Nonlinear Theories and Methods on Spatial-Temporal Distribution of the Observational Data* (Beijing: Meteorological Press) pp1-227 (in Chinese) [封国林, 董文杰, 龚志强, 侯威, 支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法 (北京: 气象出版社) 第1-227页]
- [12] He W P, Feng G L, Wu Q, Wan S Q, Chou J F 2008 *Nonlinear Processes in Geophysics* **15** 601
- [13] He W P, Feng G L, Dong W J, Li J P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3258 (in Chinese) [何文平, 封国林, 董文杰, 李建平 2004 物理学报 **53** 3258]
- [14] Wan S Q, Feng G L, Zhou G H, Wang B M, Qin M R, Xu X Z 2005 *Acta Meteorol. Sin.* **63** 516 (in Chinese) [万仕全, 封国林, 周国华, 王冰梅, 秦铭荣, 许遐楨 2005 气象学报 **63** 516]
- [15] Zhi R, Lian Y, Feng G L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1837 (in Chinese) [支蓉, 廉毅, 封国林 2007 物理学报 **56** 1837]
- [16] Tsonis A A, Swanson K, Kravtsov S 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** 13705
- [17] Wang G L, Swanson K L, Tsonis A A 2009 *Geophys. Res. Lett.* **36** 07708
- [18] Tsonis A A, Swanson K L 2011 *Int. J. Bifurc. Chaos* **21** 3549
- [19] Yamasaki K, Gozolchiani A, Havilin S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 228501
- [20] Gong Z Q, Zhi R, Hou W, Wang X J, Feng G L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 029202 (in Chinese) [龚志强, 支蓉, 侯威, 王晓娟, 封国林 2012 物理学报 **61** 029202]
- [21] 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]

- [22] Wang X J, Gong Z Q, Zhou L, Zhi R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6651 (in Chinese) [王晓娟, 龚志强, 周磊, 支蓉 2009 物理学报 **58** 6651]
- [23] Feng A X, Gong Z Q, Wang Q G, Feng G L 2012 *Theor. Appl. Climatol.* **10** 704
- [24] Zong H F, Zhang Q Y, Chen L T 2008 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **32** 220 (in Chinese) [宗海锋, 张庆云, 陈烈庭 2008 大气科学 **32** 220]
- [25] Jin D C, Guan Z Y, Cai J X, Jiang L L 2010 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **34** 947 (in Chinese) [金大超, 管兆勇, 蔡佳熙, 江丽俐 2010 大气科学 **34** 947]
- [26] Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, Feng A X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 079201
- [27] Wallace J M, Gutzler D S 1981 *Monthly Weather Review* **109** 784
- [28] Kistler R, Kalnay E, Kanamitsu M 2001 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **82** 247
- [29] Smith T M, Reynolds R W 2003 *J. Climate* **16** 1495
- [30] Wang X F, Li X, Chen G R 2006 *Complex Network Theory and Its Application* (Vol. 1) (Beijing: Tsinghua University Press) pp9–11 (in Chinese) [王小帆, 李翔, 陈关荣 2006 复杂网络理论及应用第1版 (北京: 清华大学出版社) 第9—11页]
- [31] Zou Y, Donges F J, Kurths J 2011 *Complex Systems and Complexity Science* **8** 27 (in Chinese) [邹勇, Donges F J, Kurths J 2011 复杂系统与复杂性科学 **8** 27]
- [32] Zhou B T, Wang H J, Cui X 2008 *Chin. J. Geophys.* **51** 999 (in Chinese) [周波涛, 王会军, 崔绚 2008 地球物理学报 **51** 999]
- [33] Pozo-Vazquez D, Esteban-Parra M J, Rodrigo F S, Castro-diez Y 2001 *J. Climate* **14** 3408
- [34] Gu D J, Wang D X, Yuan J N 2004 *J. Tropical Oceanography* **23** 30 (in Chinese) [谷德军, 王东晓, 袁金南 2004 热带海洋学报 **23** 30]
- [35] Li B, Zhou T J, Lin P F, Bao Q 2011 *Acta Meteorol. Sin.* **69** 52 (in Chinese) [李博, 周天军, 林鹏飞, 包庆 2011 气象学报 **69** 52]
- [36] Zhou T J, Yu R C, Gao Y Q, Drange H 2006 *Acta Meteorol. Sin.* **64** 1 (in Chinese) [周天军, 宇如聪, 郜永祺, Drange H 2006 气象学报 **64** 1]
- [37] Zhou T J, Yu R C, Gao Y Q, Drange H 2006 *Acta Meteorol. Sin.* **64** 18 (in Chinese) [周天军, 宇如聪, 郜永祺, Drange H 2006 气象学报 **64** 18]

# Properties of complex network between atmospheric teleconnection and the key areas of SST in winter\*

Zuo Dong-Dong<sup>1)</sup> Gong Zhi-Qiang<sup>2)†</sup> Feng Ai-Xia<sup>3)</sup> Zhi Rong<sup>2)</sup>

1) (Department of Physics, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

2) (Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

3) (Data Service Space, National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

( Received 14 October 2013; revised manuscript received 6 November 2013 )

## Abstract

Based on the index of atmospheric teleconnection and the key areas of the sea, taking the relationship between the average of the height fields of the key areas and the average of the key areas of SST as boundary condition, the associated network that embodies the interaction between atmospheric teleconnection areas and the key areas of SST is constructed. Then the image of the interaction between atmospheric and ocean is given. Based on the structural characteristics of network, the basic nature of the network and the key nodes of the interaction network are studied and the influence of the key nodes on network is analysed. The Results show that the associated network belongs to the small world that has a smaller average path length and a larger clustering coefficient. Besides, the average path length has a stable value in the threshold less than 0.4. In other words, in this case the characteristics of network remain unchanged, and then it is proved that using the correlation 0.19 as the condition of edge connection is effective. The single node characteristic is analysed in the network and the results show that the areas of the East Asia-Pacific 1 and 2 and the Pacific/North American pattern 1 and 4 have larger node degrees. That is to say, these four atmosphere regions have stronger effect than other regions in the atmosphere and sea, the North Pacific Oscillation 1 and the East Asia-Pacific 3 have low node degrees, so these two regions have low effects on the region interaction. In addition, it is proved that the network has certain robustness by removing nodes in turn. The study is of significance to grasp some important areas of the teleconnection and the sea, and also it provides a new method to study air-sea interaction.

**Keywords:** associative network, teleconnection regions, key areas of the sea

**PACS:** 92.60.Wc

**DOI:** [10.7498/aps.63.049201](https://doi.org/10.7498/aps.63.049201)

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB955903) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41205040, 41105055).

† Corresponding author. E-mail: [gzq0929@126.com](mailto:gzq0929@126.com)