

# 气候网络研究新进展

邹 勇<sup>1</sup>, DONGES F. Jonathan<sup>1,2</sup>, KURTHS Jürgen<sup>1,2</sup>

(1. 波茨坦气候影响研究所, 波茨坦 14473; 2. 柏林洪堡大学物理系, 柏林 12489)



**摘要:**复杂气候网络的方法是识别分析地球气候系统时空斑图的强有力工具, 有助于加深潜在物理过程的认识。简要概述当前复杂网络方法在地球气候系统中的应用, 对于所取得的成果做一个阶段性小结。就这一热点问题, 讨论存在的主要问题, 提出一些解决的办法, 并且强调复杂网络方法必须和地球物理过程中的气候学问题紧密相连, 同时还指出非线性方法在这一问题中的重要性。

**关键词:**气候网络; 相互作用网络; 时空斑图; 非线性时间序列分析

中图分类号: O415

文献标识码: A

## Recent Advances in Complex Climate Network Analysis

ZOU Yong<sup>1</sup>, DONGES F. Jonathan<sup>1,2</sup>, KURTHS Jürgen<sup>1,2</sup>

(1. Potsdam Institute for Climate Impact Research, 14473 Potsdam, Germany;

2. Department of Physics, Humboldt University Berlin, 12489 Berlin, Germany)

**Abstract:** The complex climate network approach provides a compelling perspective for identifying and analyzing spatial and temporal patterns in the Earth's climate system, which are deepening our understanding for the underlying physical processes. We review some recent results published in the literature, discuss the main problems of climate network research and provide some feasible solutions. We suggest that the use of complex network approaches has to be tailored carefully to the purpose of investigating climatological problems and geophysical processes. We further point out the importance of applying nonlinear measures of time series analysis for constructing climate network.

**Key words:** complex climate network; interaction networks; spatio-temporal patterns; nonlinear time series analysis

## 0 引言

地球气候系统长期演化的动力学性质和基本运动特征,吸引了大批研究人员的注意力。尤其是在当今全球变化的大背景下更为突出,已经成为气候动力学最重要的课题之一。气候系统的属性(静力属性、热力学属性、动力学性、水分属性等)在太阳辐射的作用下产生一系列复杂的物理过程,其各个组成成分之间通过

收稿日期:2010-09-30

基金项目:莱布尼茨协会 ECONS 项目(Leibniz Association (ECONS));德国联邦研究教育部 PROGRESS 项目(Federal Ministry for Education and Research(BMBF)(PROGRESS))

作者简介:邹勇(1978-),男,江苏无锡人,博士,主要研究方向为复杂网络应用、非线性动力学、时间序列分析。

物质和能量的交换而产生多个层次上的相互作用,并且这些物理过程(还有化学过程和生物过程)和相互作用通常都表现为非线性的本质,于是整个气候系统构成了一个网络系统,在时间和空间上通常产生一些有趣的斑图(pattern)。对于气候学而言,认识这些斑图的形成机理和演变趋势是非常重要的。气候的地带性和非地带性的区域差异,足以表征气候的自然地理特征。地球不同组成成分自身也是一个复杂系统,比如说大气圈、生物圈和水圈,如何理解和揭示它们之间复杂的相互作用关系,是当代气候科学面临的巨大挑战。把地球系统中相互依赖的子系统、组成成分和过程重新建立更大的或者更高层次的网络,需要我们运用网络的网络(network of networks)的新概念和方法,将错综复杂相互作用的成分融合在一起,用数学语言描述(比如图论的方法),我们就可以很好地认识地球系统(比如人类温室气体排放增长所表现的脆弱性(vulnerability)等)<sup>[1]</sup>,尤其在当今全球变暖的情况下,可以为地球系统的可持续发展战略提供一定的理论依据<sup>[2-3]</sup>。最近认识地球系统中的拐点元素,也是气候变化中急需处理的问题<sup>[1]</sup>。比如由于厄尔尼诺南涛动(El Niño Southern Oscillation, ENSO)的异常变化或亚马逊河流域森林的大批砍伐,全球气候变化加剧,可能马上要穿过拐点并且不可逆,将对人类赖以生存的气候系统带来巨大的影响。本文中,我们将借助复杂网络理论作为工具,分析全球地表温度场网络的性质,探讨气候系统的一些本质特征。

在过去的十多年中,复杂网络的方法已经成功运用到很多不同学科的复杂系统中,研究其复杂性现象,比如:因特网、食物网、基因表达和神经网络等的生物网络、社会网络<sup>[4-6]</sup>,真实网络的结构与动力学之间相互关系也得到了足够的重视<sup>[7-8]</sup>。或许地球物理学家们对于地球气候系统的知识已经有了很多积累,或许从事复杂网络研究的专家们对复杂网络的结构和动力学也认识了很多,但是气候网络的研究还处于刚起步阶段。当前我们所说的气候网络,通常是指把地球上不同地方的气候时间序列(比如某个气候变量的再分析或者模型数据)进行统计关联(statistical association)而建立的网络。它的一个重要目标就是将地球气候这一动力系统运用网络的方法进行重新展现,由此可以得到原来系统内部的相互作用关系。复杂网络方法为地球气候系统提供了崭新描述。比如说 ENSO 对于全球关联网络的影响<sup>[9-10]</sup>,大气和洋流在地表空气温度场网络形成过程中扮演的物质与能量传递的作用<sup>[11-12]</sup>等。

建立气候网络的第1步,定义节点和联结。网络节点是指空间的某一个位置上的时间序列(比如温度等气候变量);联结就是两个不同空间位置上时间序列的统计关联(比如线性相关系数)。如果考虑无权重网络,则需要选取阈值,即若两时间序列的统计关联值大于阈值,则认为它们之间有连接,否则没有连接。考虑到气候系统的特殊性,节点和连接的定义有时候是需要做适当修整的,我们将在下文讨论。当前建立的气候网络主要还是非常简单的无向无权重网络,当然节点的自身联结正像很多网络分析那样也去除了。构建气候网络,我们实际上隐含做了如下假设:整个气候系统是一个振子网络,每一个振子网络可以概括表示地球上该点的动力学行为(比如某种未知方式),而我们最终感兴趣的是整个振子网络的统计特性和集合性动力学表征。另外,我们所建立的气候网络和神经科学中建立的功能脑网络<sup>[13-15]</sup>(functional brain networks)具有以下相似性。首先,这两种网络都是运用时间序列分析的工具对空间上不同点之间进行统计关联建立网络,只不过由于研究对象不同而用了不同的数据(在脑网络中,通常采用 fMRI 技术测量得到数据或者 EEG 数据)。其次,这两网络都是来源于潜在的动力系统,都可以归为功能网络(functional network)或者称为相互作用网络(interaction network),但是和脑网络不同,得到的气候网络在拓扑意义上的相互作用通常并不能反应节点间的因果关系(causality),讨论两个温度时间序列之间的因果关系是没有意义的,其根本原因是温度序列之间不存在直接相互作用的驱动-响应关系,相反通常表现出间接相关性(比如由于大气环流造成)。

由于潜在物理场的连续性(比如温度或气压),地理上的临近点之间通常具有较高的相关性,并且随距离快速衰减。同时,长距离的相关性也会存在,这在气候研究领域被称为遥相关性(teleconnections)<sup>[16]</sup>。由于我们所建立的气候网络来源于连续的物理场,并且网络的结构受到统计意义上的不确定性<sup>[17]</sup>影响,很多网络指标是不能够直接用来反应气候系统的规律性的。比如说,空间上靠得比较近的两点之间很有可能有很高的统计相似值;或者空间两点之间在物理场内具有较强的相互作用,但是由于构建网络方法的原因却没能

在网络中得到反应。尤其在计算下文的平均路径长度(average path length)和类聚系数(clustering coefficient)时<sup>[4,18]</sup>,由于受到地理位置的直接影响,我们就不能够直接用作气候网络的有序参数(order parameter)。这说明,把由统计关联得到的“小世界网络”性质硬性加到气候网络中,是不合适的<sup>[15]</sup>。

运用复杂网络方法研究分析地球气候网络主要包括5个步骤:1)数据的选择和预处理;2)统计关联矩阵的计算;3)网络邻接矩阵的建立;4)网络统计特征量的计算分析;5)网络指标在原气候系统内的阐释。下文结构如下:首先在第2部分介绍如何构建气候网络,第3部分进行网络分析(包括静态和动态两方面),然后在第4部分,分析网络特征量的物理意义和气候学研究中通常采用的经验正交函数的关系,今后工作的展望放在第5部分,最后进行总结。

## 1 网络构建

### 1.1 数据选择及预处理

目前在气候网络的研究中<sup>[9-12]</sup>,用的最多的数据来源于美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NACR)的再分析数据<sup>[19]</sup>和模型数据(比如,世界气候研究计划耦合多模式数据(哈德莱大气气候模式第3版,IPCC AR4 Hadley Center HadCM3)<sup>[20]</sup>)。NCEP/NCAR的再分析数据被认为是全球实测数据的最好替代,因为它包含了实测数据的信息(实测数据的缺点是时间和空间上的精度非常不均匀),借助气候模型,运用过滤和插值的方法,产生了时空尺度上高精度的序列。再分析数据包含了地面和大气的很多变量,但是当前人们主要采用温度序列<sup>[9-11]</sup>,或者和气压有关的变量<sup>[21]</sup>。我们在文[11-12]中,对再分析数据和模型数据建立的网络作了定性的比较,发现两者的差别不是很大,本文中我们针对具体的网络指标具体说明所采用的数据,并且采用月平均全球地面空气温度场数据(global surface air temperature SAT),其分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (网络的节点数 $N=10\ 224$ ),时间序列长度为720个月。

假设地球经度-纬度 $(\phi, \lambda)$ 上的某点温度时间序列为 $T_i(t)$ 。运用相平均法(phase averaging),我们可以减小由于太阳辐射造成的年度周期变化(annual cycle,年度周期变化通常由于季节性变化导致),这一数据的预处理在气候网络中是广泛应用的<sup>[9-11]</sup>,经过预处理的序列称为 $x_i(t)$ 。

### 1.2 统计关联

气候网络的一个重要目的是研究地球气候系统组成成分之间的相互依赖性质(interdependency),这种依赖性从给定的温度时间序列中只能够在统计意义下进行分析,因此我们需要注意不能够和因果关系混淆。本文主要讨论两种统计方法:线性相关系数(linear correlation coefficient)和非线性互信息(nonlinear mutual information)。关于其它的方法,将在后面再讨论。

运用线性相关系数建立气候网络的代表工作主要包括文[9-10];运用非线性互信息的工作包括文[11-12]。目前,相关系数都是整个网络中温度序列之间两两比较计算的。线性相关系数 $P_{ij}$ 可以通过计算参数经验 Pearson 系数或者非参数 Spearman 系数获得。参数经验 Pearson 相关系数可以用来估计两个正态分布时间序列的线性关系;非参数 Spearman 相关系数就可以舍弃对于序列正态分布的假设,针对我们所采用的数据,参数经验 Pearson 相关系数被广泛采用<sup>[9-10,12]</sup>。如果把相关系数取绝对值,则其范围为 $[0, 1]$ ,1表示完全相关(正负),0表示不相关。本文中的非线性互信息(Mutual information MI)是这样计算的:

$$M_{ij} = \sum_{\mu, \nu} p_{ij}(\mu, \nu) \log \frac{p_{ij}(\mu, \nu)}{p_i(\mu) p_j(\nu)} \quad (1)$$

其中, $p_i(\mu)$ 是时间序列 $x_i(t)$ 的概率密度函数, $p_{ij}(\mu, \nu)$ 是 $(x_i(t), x_j(t))$ 联合密度函数。在文[12]中,我们把线性相关系数和非线性互信息方法作了系统的比较,发现在很多情况下两者都能够得到大致相同的结果,在某些特设情况下,互信息的方法稍微优越一点。根据定义 $P_{ij}$ 和 $M_{ij}$ 是对称的,即 $P_{ij} = P_{ji}, M_{ij} = M_{ji}$ 。从根本上来讲,在计算 $P_{ij}$ 和 $M_{ij}$ 时还可以加一个时间滞后。是否选用时间滞后应该和研究目标及物理过程的时间尺度等有关系。例如如果我们比较关心气候网络在小时间尺度上的变化规律<sup>[10,22]</sup>,那么在计算 $P_{ij}$ 和 $M_{ij}$ 时,加一个时间滞后是必须的。但在当前气候网络的研究范围内,我们更多地是关心气候系统的长期演化过程,很多形成地表空气温

度场的物理过程在一个月內都已经完成了,因此在月平均数据中,可以不用时间滞后<sup>[11]</sup>。

### 1.3 阈值的选择

得到了统计关联矩阵  $C_{ij}$  ( $C_{ij} = |P_{ij}|$  或  $C_{ij} = M_{ij}$ ) 以后,通常需要选取一个阈值,把  $C_{ij} > \tau$  的两点之间定义为有连接。于是,网络的邻接矩阵可以定义为

$$A_{ij} = \Theta(C_{ij} - \tau) - \delta_{ij} \tag{2}$$

其中,  $\delta_{ij}$  为 Kronecker,用来表示去除自身连接,  $\Theta(\cdot)$  为 Heaviside 函数。所得到的网络  $A_{ij}$  是对称的、无向无权重的简单网络。

选择阈值不是很简单。从统计角度看,需要建立的网络能够包含具有统计意义的连接而去除一些伪连接(例如由于噪声影响或者测量误差造成)。如果阈值太大,很多有意义的连接也会被滤除;如果阈值太小,那么邻接矩阵就包含了很多冗余信息,给下一步分析带来困难。因此,取阈值时,需要考虑对关联值进行显著性测试(significance testes)。当前,主要存在两种不同的标准:1) 固定阈值  $\tau_0$ <sup>[9,21,23]</sup>;2) 固定连接密度  $\tau = \rho_0$ <sup>[11-12]</sup>。第1种方法隐含假设阈值在整个网络中是均匀的;第2种方法主要方便于不同网络之间比较。当然还可以运用其它方法,比如显著性水平(significance level)(很大程度上克服了第1种方法的均匀假设),或者干脆取多个不同的阈值,分别分析,让读者决定哪个阈值更好。阈值的选取对于下文讨论的网络指标的影响,我们已经在文[12,14]中作了详细的讨论,通过比较发现,阈值的影响并不像想象中的那么非常敏感,只要在合理的选择范围内,通常可以得到比较一致的结论。本文采用固定连接密度的方法。

## 2 网络分析

### 2.1 结构统计特性

原则上,所有复杂网络的统计指标<sup>[5-6]</sup>都可以用来分析气候网络,但根据气候网络的特殊性,这些指标有时候需要做一定的修正。本文主要涉及以下指标<sup>[12,24]</sup>(下标  $v$  表示网络中的节点):

1) 面积权重连接(Area Weighted Connectivity, AWC):

$$AWC_v = \frac{\sum_i^N A_{vi} \cos(\lambda_i)}{\sum_i^N \cos(\lambda_i)} \tag{3}$$

这个指标和度的定义很相近,它考虑了地球表面上运用经纬度( $\phi_i, \lambda_i$ )表示时,不同的地方具有不同的面积。通常情况下,AWC 进行归一化处理,所以  $0 \leq AWC_v \leq 1$ 。

2) 类聚系数(clustering coefficient):单节点类聚系数  $c_v$  描述了  $v$  的相邻节点之间同样也是有连接的概率<sup>[4]</sup>,揭示了网络中的小团簇的特征。全网络平均类聚也就是一个全局平均值  $c = \langle c_v \rangle$ 。

3) 平均路径长度(特征长度)(average path length):任意两点之间的最短路径  $d_{ij}$  是指从节点  $i$  到  $j$  需要跨过的最小步长,如果节点间没有连接,假设  $d_{ij} = N - 1$ 。当然在处理没有连接的节点的时候,还可以采用其他方法<sup>[7]</sup>。平均路径长度  $L$  就是  $d_{ij}$  在整个网络上的平均值

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i < j} d_{ij} \tag{4}$$

没有连接的节点在计算均值时是需要去除的<sup>[18]</sup>。

4) 节点介数中心度(Node Betweenness Centrality, BC):假设系统信息是沿着网络的最短距离传播的,并且有  $\sigma_{ij}$  条路径连接两个节点  $i$  和  $j$ 。这时候节点  $v$  在  $i$  和  $j$  之间信息传递过程中所起的作用可以用式(5)计算

$$BC_v = \sum_{i, j \neq v} \frac{\sigma_{ij}(v)}{\sigma_{ij}} \tag{5}$$

其中,  $\sigma_{ij}(v)$  表示所有从  $i$  到  $j$  的短路径中经过节点  $v$  的数目<sup>[25]</sup>。

气候网络的一个重要特点是,可以把计算得到的网络指标在实际地理空间上展现出来。比如,节点介数中心度在空间的分布如图 1 所示。

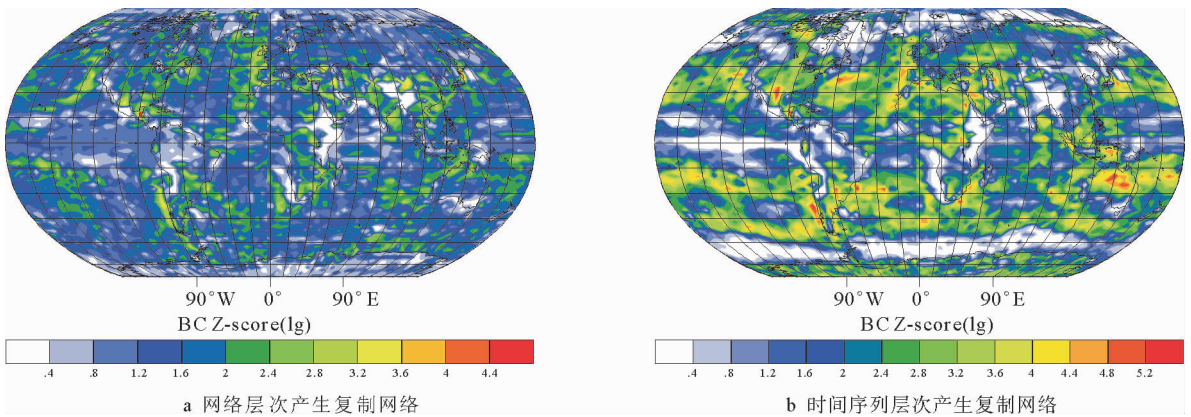


网络层次:零设为气候网络是具有给定度序列的随机网络,保持原有网络的度序列(degree sequence),运用构造模型(configuration model)和重新连接的方法产生很多随机网络(比如通常需要 Monte Carlo 方法模拟产生 100 个网络集合);2) 时间序列层次:零假设为两个温度时间序列是相互独立的,对每一个原始温度时间序列产生很多个胞复制(twin surrogate<sup>[28]</sup>),产生的复制包含了原有序列的线性和非线性特征,然后就可以按照原有建立网络的方法建立多个网络集合(如 100 个)。

为了方便比较原有网络和复制网络的差异,可以计算 Z-score(针对图 1 中的节点介数中心度场而言)

$$Z_v = \frac{BC_v - m(BC_v^r)}{\sigma(BC_v^r)} \tag{6}$$

式中,  $m(BC_v^r)$  和  $\sigma(BC_v^r)$  分别表示节点  $v$  的介数值在复制网络集合中的均值和标准差。Z-score 在物理空间的分布如图 3 所示。这个图和原有图是有很大不同的,我们没有发现明显地类似于原来介数中心度场的支持骨架结构。



图示内容为本文主体内容; | Z | >> 1 意味着我们所得到的节点介数值 BC<sub>v</sub> 和支持骨架结构都是可靠的。

图 3 节点介数中心度场 Z-score 的空间分布(电子版彩图)

### 3 气候学阐释

#### 3.1 洋流的作用

如上所述,很多网络指标可以在物理空间直接展示,并且揭示气候系统的斑图。我们发现在节点介数中心度场里拥有很多弯曲的“波动结构”(如图 1 a 所示),称之为气候网络的支持骨架结构(backbone structure)。由于大气-海洋循环系统在近赤道时科里奥利力(Coriolis force)消失,这些结构大多数是偏南北方向的,并且沿切线方向趋近赤道<sup>[29]</sup>。值得指出的是,上述结构在再分析数据和模型数据时都得到了验证<sup>[11]</sup>。并且,我们针对线性相关系数和非线性互信息做过详细比较,运用互信息可以得到更清晰的支持骨架结构<sup>[12]</sup>。

这些结构大部分都在大陆和海洋的交界处。从大气海洋耦合的物理过程来看,它在很多地方都和洋流具有很大的相似(如图 1 b 所示)。比如,南北美洲的西海岸和秘鲁,阿拉斯加洋流等和这些波动结构很好的吻合;在欧洲海岸,沿着 Canary,挪威洋流的路径。我们发现的这些结构实际上体现了海平面温度场(SST)和地面温度场(SAT)之间通过热量交换而产生的强耦合关系。值得注意的是,这些结构并不能仅仅通过 SST-SAT 温度场差值得到。另外,由于受到数据空间精度的影响,部分沿着 Gulf stream 或者 Kuroshio 等方向靠近西海岸边界的洋流结构并没有在节点介数中心度网络场中体现<sup>[11]</sup>

#### 3.2 经验正交函数分析

经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)在气候动力学中是广泛应用的,用来寻找气候观测变量在时间和空间上的相互关联结构,尤其适用于远程连接的研究<sup>[30]</sup>。还有其他非常类似的方法用于这

一问题的研究,比如主值分析(principal component analysis<sup>[31]</sup>)或者奇异谱分析(singular spectrum analysis<sup>[32-33]</sup>)。EOF分析实质上是针对高维气候数据进行降维的线性方法。比如说,给定温度场 $x(t)$ ,运用空间上的静态正交基底 $e_j$ 进行展开得到

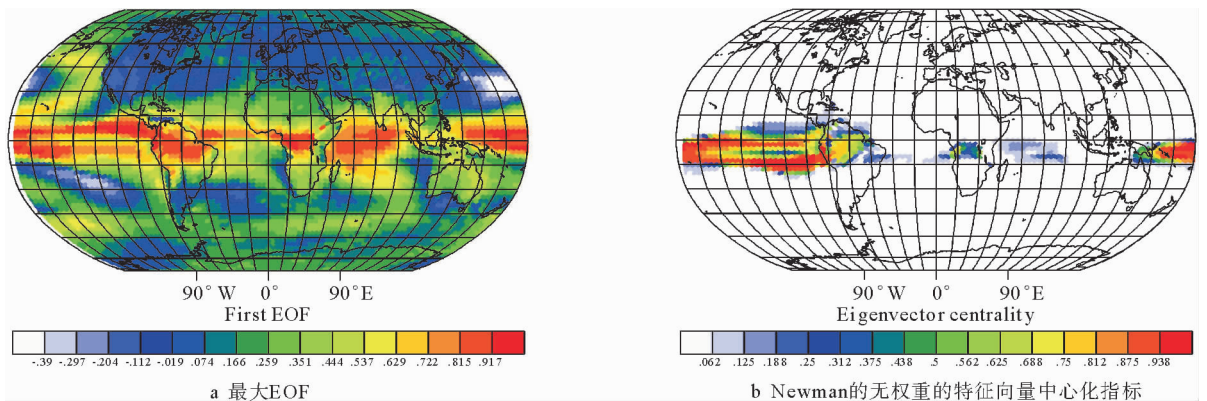
$$x(t) = \sum_{j=1}^N \alpha_j(t) e_j \quad (7)$$

式中,系数 $\alpha_j(t)$ 通常用来表示原始数据中的方差。EOF分析也就是选取 $e_j$ 并且使得原始数据场在正交子空间 $e_j$ 上的方差最大化。显而易见, $e_1$ 描述了最大方差, $e_2$ 为次大方差,以此类推, $e_N$ 是最小方差。

EOF在最大正交子空间 $e_1$ 上的投影是可以通过计算线性相关系数矩阵 $\mathbf{P}$ 的特征向量得到的,即

$$\mathbf{P}e_j = v_j e_j \quad (8)$$

式中, $v_j$ 为相应的特征值。实际上,EOF $e_1$ 和Newman对于权重特征向量中心化指标(Eigenvector Centrality, EC)是等价的<sup>[18]</sup>。在我们当前建立无权重气候网络中,由于连接密度 $\rho$ 比较低,因此,EC<sub>0</sub>场在赤道热带区域的主要结构还是基本上能够和EOF吻合的(见图4)。



a 图运用 HadCM3 模型的地面温度场,从线性相关系数矩阵 $\mathbf{P}$ 中计算得到的最大特征值向量场; b 图网络连接密度 $\rho = 0.01$ 。为便于比较两图都已经进行归一化处理。

度 $\rho = 0.01$ 。为便于比较两图都已经进行归一化处理。

图4 最大 EOF 和 Newman 无权重特征向量中心化指标(电子版彩图)

## 4 发展方向

### 4.1 社区结构

远程连接(远程遥相关)在地球气候系统中起了关键作用,它们不仅影响当地的气候变化,而且通常可以导致上千公里以外的气候变化。最显著的例子如 ENSO 不仅影响了太平洋沿岸的国家,还不同程度地间接影响了全球其他很多地方。气候系统还有其它重要的遥相关作用,主要以大气涛动指数说明:比如太平洋十年涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)、北大西洋涛动(Northern Atlantic Oscillation, NAO)、北极涛动(Arctic Oscillation, AO)等组成了几个关键的气候系统的涛动现象,它们之间是相互作用在一起的,而且在特定的时间尺度上表现了同步协调的关系<sup>[34]</sup>。这些涛动的出现也为我们理解气候网络可能存在社区结构(community structure)提供了一些理论依据。

粗略地讲,网络中的子网络形成社区结构的一个条件是子网络内部具有很多连接,但是和网络中的其它部分的连接不多。一般情况下,社区结构并没有一个严格定义,通常依赖于提前设定的某些规则或者参数<sup>[35]</sup>。在气候网络的框架下,我们说的社区是指某一个具体地理区域内的某一气候物理量场(比如地面温度场)所能够共同表现的相似动力学行为。因此气候网络中的社区研究或者有助于验证已有的气候区域,或者可以揭示一些未知的相似结构,这需要更深入的研究分析。由于认识复杂网络的社区结构本身就是一个热点问题,在本节中我们只能从某些方面做一个初步探索。并且,我们仅局限于模块贪婪最大化的快速算法

(greedy maximization of modularity)<sup>[36]</sup>。图5显示了10个最大的社区结构,这些结构大部分表现了陆地-海洋之间的动力学差异,由于这些社区结构出现的机理、相互之间的作用关系、对算法的依赖性等,都还有待进一步深入研究。比如说,我们既有一个最大社区结构(包含印度洋、大西洋、非洲和北美洲的大部分地区),还有较为独立的社区(比如南美洲),或者一些很局部的社区结构(印度,东南亚地区)。从气候的形成机理上看(包括全球范围和区域相对小范围内),我们必须综合考虑太阳的辐射、大气环流、海陆分布、地形地貌、洋流、冰雪覆盖等诸多因素的影响。由于一个特定地区气温的变化很有可能是同时与多个大气涛动有关联的,而各个不同的涛动影响的区域气温的方式和途径又是不同的,因此,我们图5中得到的社区结构,还仅停留在网络算法的直接应用层次上。由此可见,在运用社区结构识别的算法时,还必须考虑气候系统的特殊性,作一定的修整。是否可以直接运用现有算法<sup>[37]</sup>,还值得探讨。

#### 4.2 区域子网络

当前气候网络的大部分研究工作是针对全球范围的,由此认识一些时空层次上的斑图。由于系统内部的不均匀性,存在很大的区域差异,因此根据研究对象和目标的不同,有时候有必要在区域范围内进行更为详细的刻画。根据当前的热点,我们主要提出以下两点:

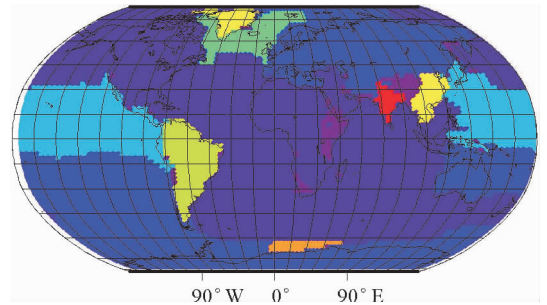
1) 国家或者区域。比如说,运用中国范围内的数据,建立国家范围内的气候网络。此时需要解决一个技巧问题,那就是虽然国家或者地区之间一般都具有很明显的分界线,但是我们分析的区域气候系统却没有分界。由于我们建立的气候网络,人为所限定的地理边界(仅取特定国家内部的数据分析)定会给网络分析带来很多边界效应。中国地域广阔,气候区域差异明显,网络方法的应用只有和国家的实际情况相结合,才能够真正在区域范围内开展研究,才能够提供特有的区域特征<sup>[38-40]</sup>。

2) 拐点元素(tipping element)。最近一个世纪以来,全球气候有变暖的趋势,尤其是20世纪70年代末期到现在,全球变暖有加速增强的趋势,前景是令人担忧的。全球变暖很可能对人类生活带来巨大的冲击,而且这种影响对于人类的生存环境是灾难性的。因此,气候变化的研究最近几年吸引了大批人员,并且人们已经分析得到地球系统的几个重要的拐点元素<sup>[1]</sup>。拐点元素是指地球气候系统的大尺度组分由于某些区域上的强大变化被迫穿过临界值而进入快速增长的新模态,给人类和生态系统带来了巨大冲击。其中人类的活动就很可能的主要推动力。比如,亚马逊流域的森林砍伐、厄尔尼诺南涛动的频繁、印度季风气候、格林兰岛冰川的减少等等都是和人类活动时候所采取的政策相关的拐点元素。在运用网络的方法研究这些拐点元素时,需要详细分析在不同的变化环境下,网络是否能够给我们提供更新的认识,提供诸如气候变化的早期警示等信息。

#### 4.3 其它方向

以下所列的5个研究方向,顺序不分先后,同等重要。和社区结构或区域子网络不同,它们更偏向复杂网络方法应用的细节问题,并且它们在很多方面都是相互嵌套在一起的。

1) 其它物理量场。从气候系统所采集的观测值(再分析数据或是模型数据)通常都包含了地表和大气的很多物理量,比如海平面气温(sea surface temperature)、海平面压力(sea level pressure)、地势高度(geopotential height)、水平垂直风速(horizontal/vertical wind speed)等等。当前的研究工作主要还是以地表气温变量(surface air temperature)为主<sup>[9-11]</sup>,以气压变量为辅<sup>[21]</sup>。如何将不同的物理量融合在一起,构建气候网络,提供更全面的认识,值得深入研究。另外正如我们在引言中讨论的那样,由于气候系统的不同组分本身,组分之间,存在不同层次上的相互作用,如果从另一个角度出发,运用网络的网络的新概念,或许



运用 HadCM3 模型的地面温度场,线性相关系数建立气候网络,连接密度为  $\rho = 0.005$ 。

图5 运用贪婪最大化快速算法得到的10个最大的社区结构(电子版彩图)



能够提供更多的认识。整个气候系统同时具有时间和空间上的多尺度效应,并且组分之间存在多层次的反馈作用过程,将地球的不同组分,如大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈等,运用复杂网络的构建方法,如何建立一个更高层次的“地球网络”,还有待深入研究。

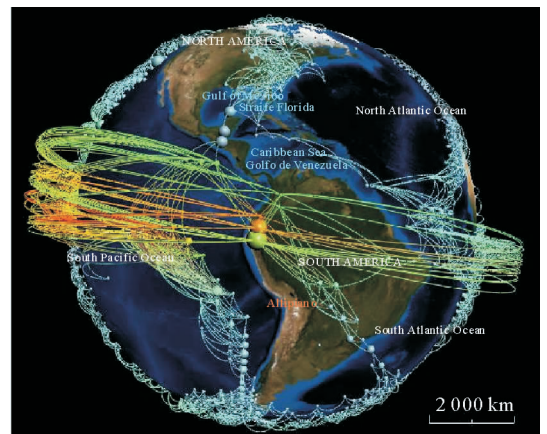
2) 网络节点面积的影响。在引言中介绍气候网络的建立时,我们是通过经度-纬度对地球表面进行网络分割的(例如  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ , 每小块就作为网络节点。很明显,这种空间采样所取得的网络节点所占有的地理面积不同,由此所定义的节点在网络中的权重也就不一样。比如说,在计算度分布时,就应该考虑面积权重连接(式(3))。面积对于网络分析的影响根据所选用特征量的不同而不同,大多数网络指标,运用适当的节点分离不变性(node splitting invariance)的特点,可以得到更为准确的网络指标<sup>[41]</sup>。需要值得指出的是,节点权重在脑网络的研究中,我们认为也应该得到重视。

3) 统计关联的其它计算方法。当前,我们所建立的网络还是简单的无向无权重网络。为了更好地认识网络,很有必要考虑网络的有向性,比如考虑气温变化的先后顺序而定义方向性。此时只需在计算相关系数(包括线性系数和非线性互信息)时考虑引入时间滞后,或者运用其他方法计算这种关联,比如计算传递熵(transfer entropy)<sup>[42]</sup>,或者运用诸如时间序列的回归性特征<sup>[43-45]</sup>、排序图(order pattern)<sup>[46]</sup>等估计耦和方向。由于气候系统的非线性本质,在时间和空间上同时体现多尺度效应,当然,还应该考虑在研究非线性动力学时常用的其它方法<sup>[47-48]</sup>。在这一点上,我们更应该借鉴脑网络中运用的方法,比如可以运用计算 Granger causality 的方法构建“因果关系网络”<sup>[49-50]</sup>;或者在频域范围进行分析(功率谱或者引入小波变换)等。本文所列的只是我们所知道的几类方法,对于其他方法不可能全部罗列。

无论运用什么样的方法建立气候网络,进行结构分析,所得到的结果都应该进行显著性分析。我们建议既要从事时间序列入手,也要从网络层次进行,以保证结果的可靠性。另外当前所讨论的方法都仅停留在空间序列的两两比较,这在部分场合还是不够的。例如在分析 3 个序列之间关系的时候,就要考虑间接作用的影响,这在气候系统中也是常见的(印度季风 Indian Monsoon 受到 ENSO 和 NAO 的共同影响,同时 ENSO 对 NAO 也有影响)。此时,需要运用一些新的方法,比如考虑运用条件互信息(conditional mutual information)<sup>[51]</sup>或者和回归性相关的方法<sup>[52]</sup>。但文献<sup>[51-52]</sup>中所提出的方法在直接应用于实验数据之前,还需要测试。

4) 演化气候网络(evolving climate network)的研究刚开始<sup>[53]</sup>,还有很多问题尚未解决。比如为了得到更好的数据模拟结果,通常需要时间精度较好的时间序列(比如每 6h),但随之带来的问题也很多,例如如何处理大量的空间数据,如何解决季节性变化对于统计关联计算的影响等,都亟待解决。在这种情况下,我们还需要运用并行计算,提高运算速度。不同网络指标之间随时间的协调变化在很大程度上还不清楚<sup>[53]</sup>。耗时耗力计算得到的结果,如何展示出来又是一个问题。比如可以借助 Google Earth 等工具,或者借助已有计算机条件开发适合气候网络要求的图像处理工具。运用我们自主设计的具有互动界面的软件(管理图像显示, Coordinated Graph Visualization, CGV)<sup>[54]</sup>,图 6 展示了一个气候网络中连接介数中心度(edge betweenness centrality)的三维图。连接介数中心度的定义可以参考文献<sup>[7, 18]</sup>,该指标描述了连接在网络中的重要性,提供了和图 1 中节点介数中心度场相辅相成的信息。

5) 如前所述,全球变暖和气候变化是当今气候研究的关心主要问题。气候变化会给人们的生活带来不可预测的冲击,对经济、社会、生态环境等系统产生巨大影响。值得重视的是,随之而来的极端事件(比如极端



为了显示清晰,只有具有较高介数中心度值的连接在三维图中有显示。

图 6 连接介数中心度场在互动界面软件 CGV 中的显示(电子版彩图)

气候现象,强 El Niño 等) 的出现频率等,都是气候变化的非常有意义的研究方向<sup>[55]</sup>。我们应该运用复杂网络的方法,将气候系统变化的不同方面连接起来,研究极端事件对于网络性质的影响,进而探讨系统的稳定性。

## 5 结论

地球气候系统与人类的生活息息相关。当前这一复杂系统也正在经历变化<sup>[56]</sup>,所以很多科研工作者致力于更好地理解其规律,确定其发展的趋势。近两三年来,气候科学开始运用复杂网络的方法来分析系统的复杂性。其主要出发点就是将空间上气候时间序列变量定义为网络中的节点,序列间的统计关联作为网络中的连接。实际上这一方法在计算神经科学中运用很久了,但在气候系统中才刚开始,而且正在快速发展。其主要目的是期望运用网络的方法,提供地球气候系统的未知结构和性质。同时,我们也看到当前所取得结果还是非常初步的,为了更好地理解气候系统,我们还需要进一步深入研究。

感谢 Norbert Marwan, Hanna Schultz, Jobst Heitzig, Alexander Radebach, Thomas Nocke 所提供的帮助。

## 参考文献:

- [1] Lenton T M, Held H, Hall J W, et al. Tipping elements in the earth's climate system [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(6):1786 - 1793.
- [2] Schellnhuber H J, Wenzel V. *Earth Systems Analysis: Integrating Science for Sustainability*[M]. New York: Springer, 1998.
- [3] Donner R V, Sakamoto T, Tanizuka N. Complexity of spatio-temporal correlations in japanese airtemperature records [C]// Donner R V, Barbosa S M. *Nonlinear Time Series Analysis in the Geosciences: Applications in Climatology, Geodynamics and Solar-Terrestrial Physics*. New York: Springer, 2008:125 - 154.
- [4] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small-world" networks [J]. *Nature*, 1998, 393:440 - 442.
- [5] Newman M E J. The structure and function of complex networks [J]. *SIAM Review*, 2003, 45(2):167 - 256.
- [6] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks [J]. *Review of Modern Physics*, 2002, 74(1):47 - 97.
- [7] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: structure and dynamics [J]. *Physics Reports*, 2006, 424(4 - 5):175 - 308.
- [8] Arenas A, Diaz-Guilera A, Kurths J, et al. Synchronization in complex networks [J]. *Physics Reports*, 2008, 469(3):93 - 153.
- [9] Tsonis A A, Swanson K L. Topology and predictability of El Niño and La Niña networks [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(22):228502.
- [10] Yamasaki K, Gozolchiani A, Havlin S. Climate networks around the globe are significantly affected by El Niño [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(22):228501.
- [11] Donges J F, Zou Y, Marwan N, et al. The backbone of the climate network [J]. *Europhysics Letters*, 2009, 87:48007.
- [12] Donges J F, Zou Y, Marwan N, et al. Complex networks in climate dynamics [J]. *European Physical Journal Special Topics*, 2009, 174(1):157 - 179.
- [13] Zhou C S, Zemanová L, Zamora-López G, et al. Hierarchical organization unveiled by functional connectivity in complex brain networks [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(23):238103.
- [14] Zhou C S, Zemanová L, Zamora-López G, et al. Structure function relationship in complex brain networks expressed by hierarchical synchronization [J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9:178.
- [15] Bialonski S, Horstmann M T, Lehnertz K. From brain to earth and climate systems: small-world interaction networks or not? [J] *Chaos*, 2010, 20(1):013134.
- [16] Tsonis A A, Swanson K L, Wang G. On the role of atmospheric teleconnections in climate [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(12):2990 - 3001.
- [17] Kramer M A, Eden U T, Cash S S, et al. Network inference with confidence from multivariate time series [J]. *Physical*

- Review E, 2009, 79:61916.
- [18] Newman M E J. Analysis of weighted networks [J]. *Physical Review E*, 2004, 70(5):56131 - 56131.
- [19] Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis; monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(2):247 - 268.
- [20] Meehl G A, Covey C, Delworth T, et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(9):1383 - 1394.
- [21] Tsonis A A, Swanson K L, Roebber P J. What do networks have to do with climate? [J] *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87:585 - 595.
- [22] Gozolchiani A, Yamasaki K, Gazit O, et al. Pattern of climate network blinking links follows El Niño events [J]. *Europhysics Letters*, 2008, 83:28005.
- [23] Tsonis A A, Roebber P J. The architecture of the climate network [J]. *Physica A*, 2004, 333:497 - 504.
- [24] Donges J F. *Complex networks in the climate system* [D]. Potsdam: University of Potsdam, 2009.
- [25] Freeman L C. A set of measures of centrality based on betweenness [J]. *Sociometry*, 1977, 40(1):35 - 41.
- [26] Pidwirny M. *Surface and subsurface ocean currents: ocean current map* [C]. Department of Geography, Okanagan University College: *Fundamentals of Physical Geography*, 2006.
- [27] Trenberth K E. The definition of El Niño [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(12):2771 - 2777.
- [28] Thiel M, Romano M C, Kurths J, et al. Twin surrogates to test for complex synchronisation [J]. *Europhysics Letters*, 2006, 75(4):535 - 541.
- [29] Vallis G K. *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [30] von Storch H, Zwiers F W. *Statistical Analysis in Climate Research* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [31] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter [J]. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(4):784 - 812.
- [32] Vautard R, Ghil M. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series [J]. *Physica D*, 1989, 35:395 - 424.
- [33] Bretherton C S, Smith C, Wallace J M. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data [J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(6):541 - 560.
- [34] Tsonis A A, Swanson K L, Kravtsov S. A new dynamical mechanism for major climate shifts [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13):L13705.
- [35] Costa L da F, Rodrigues F A, Travenço G, et al. Characterization of complex networks: a survey of measurements [J]. *Advances in Physics*, 2007, 56:167.
- [36] Clauset A, Newman M E J, Moore C. Finding community structure in very large networks [J]. *Physical Review E*, 2004, 70(6):066111.
- [37] Steinhilber K, Chawla N V, Ganguly A R. An exploration of climate data using complex networks [C]. *Proceedings of the Third International Workshop on Knowledge Discovery from Sensor Data*. Paris, 2009:23 - 31.
- [38] 周磊, 龚志强, 支蓉, 等. 利用复杂网络研究中国温度序列的拓扑性质 [J]. *物理学报*, 2008, 57:7380 - 7389.  
Zhou Lei, Gong Zhiqiang, Zhi Rong, et al. An approach to research the topology of Chinese temperature sequence based on complex network [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57:7380 - 7389.
- [39] 周磊, 龚志强, 支蓉, 等. 基于复杂网络研究中国温度变化的区域特征 [J]. *物理学报*, 2009, 58:7351 - 7358.  
Zhou Lei, Gong Zhiqiang, Zhi Rong, et al. Study on the regional characteristics of the temperature changes in China based on complex network [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58:7351 - 7358.
- [40] Wang G L, Tsonis A A. A preliminary investigation on the topology of Chinese climate networks [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(11):5091 - 5096.
- [41] Heitzig J, Donges J F, Zou Y, et al. Consistently weighted measures for complex network topologies [DB/OL]. [2010 - 08 - 23]. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010EGVGA...12.1897H>.
- [42] Schreiber T. Measuring information transfer [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(2):461 - 464.

- [43] Romano M C, Thiel M, Kurths J, et al. Estimation of the direction of the coupling by conditional probabilities of recurrence [J]. *Physical Review E*, 2007, 76:036211.
- [44] Marwan N, Romano M C, Thiel M, et al. Recurrence plots for the analysis of complex systems [J]. *Physics Report*, 2007, 438(5-6):237-329.
- [45] Zou Y. Exploring recurrences in quasiperiodic dynamical systems[D]. Potsdam:University of Potsdam,2007.
- [46] Groth A. Visualization of coupling in time series by order recurrence plots [J]. *Physical Review E*, 2005,72(4):1-8.
- [47] Sprott J C. *Chaos and Time Series Analysis*[M]. Oxford:Oxford University Press, 2003.
- [48] Kantz H, Schreiber T. *Nonlinear Time Series Analysis*[M], 2nd edition. Cambridge:Cambridge University Press, 2004.
- [49] Granger C W J, Hatanaka M. *Spectral Analysis of Economic Time Series*[M]. Princeton:Princeton University Press, 1964.
- [50] Mosedale T J, Stephenson D B, Collins M, et al. Granger causality of coupled climate processes: oceanfeedback on the North Atlantic oscillation [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(7):1182-1194.
- [51] Frenzel S, Pompe B. Partial mutual information for coupling analysis of multivariate time series [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(20):204101.
- [52] Nawrath J, Romano M C, Thiel M, et al. Distinguishing direct from indirect interactions in oscillatory networks with multiple time scales [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(3):038701.
- [53] Radebach A. Evolving climate networks-investigating the evolution of correlation structure of the earth's climate system [D]. Berlin:Humboldt University, 2010.
- [54] Tominski C, Abello J, Schumann H. CGV-an interactive graph visualization system [J]. *Computers & Graphics*, 2009, 33(6):660-678.
- [55] 王晓娟, 龚志强, 周磊, 等. 温度关联网稳定性分析 I-极端事件的影响[J]. *物理学报*, 2009, 58:6651-6658.  
Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Zhou Lei, et al. Analysis of the stability of temperature networks part I -the influence of extreme events [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58:6651-6658.
- [56] Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC Fourth Assessment Report*[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2007.