

# 1—30 d 尺度温度关联网络动力学统计性质研究<sup>\*</sup>

龚志强<sup>1, B)</sup> 周磊<sup>1)</sup> 支蓉<sup>3, 4)</sup> 封国林<sup>2, B)†</sup>

1) 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

2) 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029)

3) 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

4) 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

(2008 年 1 月 22 日收到, 2008 年 4 月 29 日收到修改稿)

利用美国国家环境预报中心再分析资料中的温度资料, 从低频和高频振荡等多种尺度构建温度关联网络, 并分析其动力学统计性质及转换条件. 研究表明: 1 和 30 d 尺度下温度关联网络分别属于小世界网络和类全局耦合网络. 温度关联网络在两种类型之间转化的时间尺度条件为 11—12 d. 1 d 尺度节点的连边数南北半球呈准对称分布, 赤道附近的低纬度地区存在三个连边数较大的区域: 热带印度洋海域、赤道东太平洋海域和赤道东大西洋海域. 海陆气候子系统的关联性差异导致 30 d 尺度温度关联网络中陆地节点的联边数较少, 节点之间的关联性相对海洋要差许多. 1 d 尺度下, 中纬度和低纬度气候子系统都具有小世界效应, 但低纬度气候子系统温度关联网络的顶点度分布分为指数分布和 Gauss 分布, 中纬度气候子系统的顶点度分布则为类 Gauss 分布. 30 d 尺度下, 海洋子系统是一个类全局耦合网络, 陆地子系统温度关联网络具有典型的小世界效应. 1 d 尺度下, 温度关联网络为小世界网络的关联阈值范围为 0.2—0.9, 30 d 尺度下, 温度关联网络为类全局耦合网络的关联阈值范围为 0—0.6.

关键词: 多尺度, 小世界网络, 全局耦合网络, 关联阈值

PACC: 9260X

## 1. 引言

1998 年以来, Watts 和 Strogatz<sup>[1]</sup>关于小世界网络以及 Barabási 和 Albert<sup>[2]</sup>关于无标度网络的开创性工作, 掀起了复杂网络研究的热潮, 为复杂性科学的发展开辟了新的道路, 从而引起科学工作者对网络的结构复杂性及网络行为之间关系的广泛关注. 要理解网络结构与网络行为之间的关系, 就需要对实际网络的结构特征有很好的认识, 并在此基础上建立合适的网络结构模型. 网络的模型主要有全局耦合网络、随机图、小世界网络、无标度网络、等级网络等.

全局耦合网络(globally coupled network)<sup>[3]</sup>中, 任意两个节点之间都有边直接相连. 因此在具有相同节点数的所有网络中, 全局耦合网络具有最小的平均道路长度  $L_{gc} = 1$  和最大的聚类系数  $S_{gc} = 1$ . 全局

耦合网络反映了许多实际网络具有的聚类和小世界效应.

Erdos 和 Renyi<sup>[4]</sup>提出的 ER 随机图, 其任意两个节点都以某一固定概率  $P_{random}$  连接, 因此 ER 随机图的平均每个节点连接的边数  $k_{random} = P_{random}(N - 1) \approx P_{random}N$ , 其中  $N$  为随机图节点总数. 平均道路长度  $L_{random} \propto \ln N / \ln k_{random}$ , 平均道路长度为网络规模的对数增长函数, 这种特性是典型的小世界特征. 因为  $\ln N$  随  $N$  增长得很慢, 因此对于规模较大的网络也可能具有较小的平均道路长度. 聚类系数  $S_{random} = P = k_{random} / N \ll 1$ , 这就意味着大规模的稀疏 ER 随机图, 没有聚类性.

Watts 和 Strogatz 提出了 WS 小世界网络模型是完全耦合网络等规则网络向随机图的过渡. 因为小世界网络中既具有大量概率较高最邻近耦合连接, 同时又有一定概率的任意两节点之间的连接, 因此小世界网络的聚类系数和平均道路长度等介于规则

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:40675044)、国家重点基础研究发展规划(批准号:2006CB400503)和国家科技支撑计划(批准号:2007BAC03A01)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: fenggl@cma.gov.cn

网络与 ER 随机图之间,具有较小平均道路长度和较大的聚类系数,且  $L_{WS} > L_{random}$ ,  $S_{WS} \gg S_{random}$ . 小世界网络模型能够刻画许多实际网络的动力学统计性质,如生态网、经济网、Internet 网和社会网等<sup>[5-9]</sup>.

在太阳辐射的作用下,气候系统内部产生一系列复杂的物理过程和非线性相互作用,系统各个组成部分之间通过物质和能量的交换,紧密联结构成一个开放的复杂系统.近 10 多年来,国内外学者对气候系统的研究已经取得了不少进展.如 Tomas 等<sup>[10]</sup>对越赤道波动的传播时空结构进行了分析, Carrera<sup>[11]</sup>研究了南北半球大气物质交换的重大事件, Santhanam 等<sup>[12]</sup>利用地表气压场研究了大气中关联统计性质等, Wallace 等<sup>[13]</sup>研究了全球温度场的关联特征.越来越多的科研工作者认识到,气候系统本身也是一个存在各种强弱关联的复杂网络.气候系统的变化具有显著的尺度特征,因此,有必要在前人研究的基础上进一步讨论气候系统各种气候要素在几种典型尺度下的关联性,同时运用复杂网络的有关理论和方法研究气候系统复杂网络的动力学统计性质,进而为我们从一个全新的角度描述气候系统的复杂性,建立气候系统的关联模型等提供可能的思路.本文利用美国国家环境预报中心(NCEP)逐日温度再分析资料,从多尺度角度初步构建了温度关联网络,并分析其动力学统计性质及转换条件,对不同尺度下的气候子系统网络的性质也做了一定的讨论.

## 2. 结果及分析

### 2.1. 资料和格点温度序列的关联性

温度资料来源<sup>[14]</sup>是 NCEP 对全球 1948—2005 年的气象资料进行再分析形成格点逐日平均温度资料(地面资料),分辨率为  $5^\circ \times 5^\circ$ , 沿纬向有 72 个格点, 沿经向有 36 个格点, 共计 2592 个格点, 每个格点对应有长度为 1948—2005 年的温度序列  $T_i(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, 21170$ ;  $i = 1, 2, \dots, 2592$ ). 由 1971—2000 年温度资料计算得到的各格点一年中对应每一天的温度基准序列  $\bar{T}_i(l)$  ( $l = 1, 2, \dots, 365$ ;  $i = 1, 2, \dots, 2592$ ). 为了去除日温度资料中包含的季节振荡信号,我们对数据进行距平处理,即将各格点的温度原始序列  $T_i(j)$  减去对应每一天的温度基准序  $\bar{T}_i(l)$  列而得到温度距平序列  $T'_i(j)$ , 即

$$T'_i(j) = T_i(j) - \bar{T}_i(l). \quad (1)$$

$T'_i(j)$  为一个 2592 个格点温度距平序列集合, 其中  $i = 1, 2, \dots, 2592$ ;  $j = 1, 2, \dots, 21170$ . 在此基础上,我们对原始数据作标准化处理,

$$X_i(j) = \frac{T'_i(j) - T'_i}{\sigma_i}, \quad (2)$$

其中  $T'_i$  表示平均值,  $\sigma_i = \sqrt{T'^2_i - T'^2_i}$ . 任意两格点温度序列之间的关联系数  $C_{ik}$  为<sup>[15]</sup>

$$C_{ik} = \frac{1}{21170} \sum_{j=1}^{21170} X'_i(j) X'_k(j) \quad (i = 1, 2, \dots, 2592; k = i + 1, \dots, 2592; j = 1, 2, \dots, 21170). \quad (3)$$

$C_{ik}$  的范围为  $-1 \leq C_{ik} \leq 1$ ,  $C_{ik} = 1$  表示完全正相关,  $C_{ik} = -1$  表示完全负相关,  $C_{ik} = 0$  表示不相关. 格点为温度关联网络中的节点, 因此两两计算关联系数一共可以有  $2592(2592 - 1)/2$  对组合, 即  $2592(2592 - 1)/2$  个关联系数  $C_{ik}$ . 然后我们计算关联系数  $C_{ik}$  的概率分布  $P_{1d}(C_{ik})$ . 在此基础上, 我们对格点逐日温度资料做 2 d 滑动平均处理, 然后进行类似计算, 得到概率分布  $P_{2d}(C_{ik}), \dots$ , 做 30 d 滑动平均处理得到概率分布  $P_{30d}(C_{ik})$ .

图 1 为多种尺度下关联系数的概率分布. 由文献<sup>[13]</sup>可知, 以 10—15 d 为界限, 关联系数的概率分布存在两种类型. 一种是 1—10 d 尺度的单峰分布, 既存在一定关联噪声, 又存在一定真实关联. 这一尺度范围内, 格点之间的关联相对较弱, 关联系数的均值随着尺度的增加而略有增加. 另一种是 15 d 及以上尺度的双峰分布, 这一尺度范围内  $\mu \approx -0.02$ ,

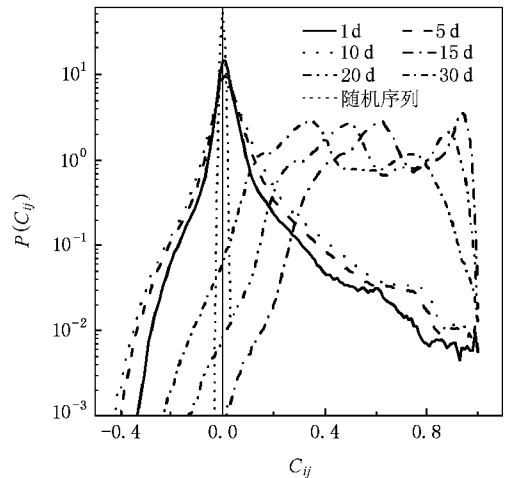


图 1 温度序列和随机序列间关联系数的概率分布. 1—30 d 不同尺度格点间关联系数和随机序列间关联系数的概率分布

0.02 域内关联噪声较少, 格点之间的关联性相对较强, 概率分布的两个峰值均有一定的偏离, 并且随着尺度的增加关联系数的均值略有下降. 出现这一现象的原因可能是 10 d 左右及以下的尺度以邻近格点间的短程关联为主, 而距离较远格点间的长程关联则大多对应关联噪声等虚假信号; 15 d 左右及以上的尺度可能既存在短程关联, 又由于相对大的尺度表现为一种气候平均态, 能够在一定程度减弱噪声和外强迫等影响, 距离较远的格点之间的长程关联也能够得到很好的体现.

## 2.2. 温度关联网络的构建

本文以格点作为温度关联网络的节点, 以温度序列之间的关联系数作为连边条件, 构建温度关联网络. 设定当两个节点之间的关联系数  $C_{ik} \geq 0.5$  时这两节点之间存在连边, 否则不存在连边. 这里  $C_{ik} = 0.5$  阈值的选择考虑了参数化和非参数化两种检验. 一方面, 1 d 尺度下, 节点温度序列长度为 21170,  $C_{ik} = 0.5$  的关联系数通过了 0.05 的信度检验. 另一方面, 关联系数的随机试验中,  $C_{ik} = 0.5$  是一个稳态值<sup>[16]</sup>. 下面我们还将进一步讨论不同阈值条件下关联网络的性质差异. 这样我们就得到了以格点作为网络节点, 以节点间关联系数  $C_{ik} \geq 0.5$  作为连边条件的温度关联网络. 对于 15 d 及以上尺度我们也作类似处理并构建关联网络. 图 2 为 1 d 尺度和 30 d 尺度下温度关联网络的部分示意图. 这里给出了 W32.5°—E7.5°, N27.5°—S17.5° 范围内节点的部分关联图, 图中的点为网络节点, 线表示两节点间关联系数  $C_{ik} \geq 0.5$  存在连边. 从图 2 可以看出: 两种尺度下的关联网络存在明显的差别. 1 d 尺度下主要以邻近节点间的短程关联为主, 长程关联的比例很小. 而 30 d 尺度下, 邻近节点之间几乎是完全关联, 长程关联的比例显著增加. 因此, 这两种尺度下的温度关联网络可能是两种不同类型的网络, 具有不同的动力学性质. 下面我们分 1 d 尺度和 30 d 尺度两种情况分别讨论网络的动力学性质.

## 2.3. 温度关联网络的动力学统计性质研究

聚类系数  $S$ 、平均道路长度  $L$  和平均顶点度  $k$  是描述网络性质的重要特征量. 文献 [17] 指出, 网络中节点  $i$  的顶点度  $k_i$  定义为该节点连接其他节点的数目, 所有顶点度的平均值即为平均顶点度  $k$ . 节点  $i$  与  $j$  之间的距离为  $d_{ij}$  (即任意两个节点

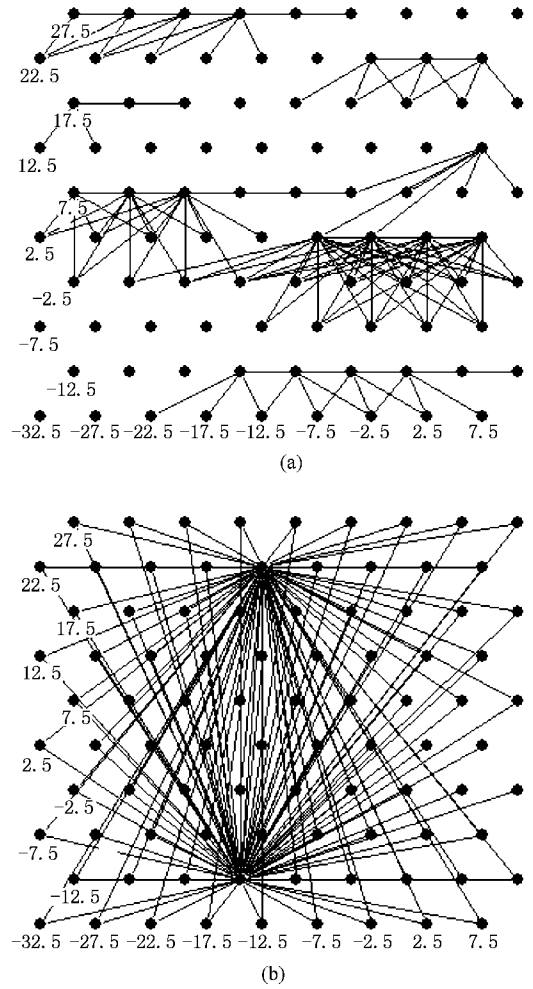


图 2 温度关联网络的部分示意图 (a) 1 d 尺度 (b) 30 d 尺度. 纵坐标为纬度, 负值表示南纬, 正值表示北纬, 横坐标为经度, 负值表示东经, 正值表示西经

相互连接所要经过的连边数), 网络的平均道路长度  $L$  定义为任意两个节点之间距离的平均值, 即

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i>j} d_{ij}. \quad (4)$$

网络中, 假设节点  $i$  有  $k_i$  条边将它与其他节点相连, 这  $k_i$  个节点就称为节点  $i$  的直连节点. 显然这  $k_i$  个节点之间最多可以有  $k_i(k_i-1)/2$  条边. 而这  $k_i$  个节点之间实际存在的边数  $E_i$  与总的可能边数  $k_i(k_i-1)/2$  之间的比值就定义为节点  $i$  的聚类系数  $S_i$ , 即

$$S_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}. \quad (5)$$

所有节点聚类系数的平均值即为网络的平均聚类系数  $S$ , 即

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{N}.$$

对于随机网络而言,其平均道路长度

$$L_{\text{random}} \approx \ln M / \ln k,$$

平均聚类系数<sup>[17]</sup>

$$S_{\text{random}} \approx k / M,$$

其中  $M$  为网络中的节点数,  $k$  为平均顶点度. 这里我们取随机网络的平均顶点度  $k_{\text{random}} = 48$ , 则这样可以确保随机网络中每个节点具有相同的节点数和相同的连边数<sup>[16]</sup>. 因此,  $L_{\text{random}} \approx 2.030$ ,  $S_{\text{random}} \approx 0.018$ .

表 1 给出了两种尺度下温度关联网络的平均聚类系数、平均道路长度和平均顶点度. 从表 1 可知, 1 d 尺度下温度关联网络具有小的平均道路长度和大的聚类系数, 并且和随机关联网络相比,  $L_{1d} = 6.803$

$> L_{\text{random}}$ ,  $S_{1d} = 0.620 \gg S_{\text{random}}$ . 根据 Watts 等<sup>[1]</sup>的研究可知, 该尺度的温度关联网络属于小世界网络. 因此, 网络的关联主要以邻近格点之间短程关联为主, 同时也存在少量的距离较远节点之间的远程关联, 这里的远程关联主要对应某一纬度范围内的横向关联. 30 d 尺度下, 温度关联网络具有较大的聚类系数, 平均道路长度小于随机关联网络的平均道路长度, 非常高的平均顶点度, 即  $L_{30d} = 1.477 > L_{\text{random}}$ ,  $S_{30d} = 0.870 \gg S_{\text{random}}$ . 根据文献 [18], 30 d 尺度下温度关联网络近似为一种全局耦合网络. 这就意味着网络具有高聚类性和小世界效应, 同时整个网络中大部分节点之间存在直连关系, 这样的网络其性质相对于小世界网络更稳定. 节点之间不仅存在大量的短程关联, 同时存在大量的长程关联, 这里的长程关联既包含纬度相近但经度相距较远的节点之间的横向关联, 又包含经度相距较远的各种纵向关联.

表 1 温度关联网络和随机网络的聚类系数、平均道路长度和平均顶点度

网络类型	尺度	$S$	$S_{\text{random}}$	$L$	$L_{\text{random}}$	$k$	$k_{\text{random}}$
温度关联网络	1d	0.620	—	6.803	—	21.436	—
	30d	0.870	—	1.477	—	790.81	—
随机关联网络	—	—	0.0185	—	2.030	—	48

气候系统是一个相对稳定的系统, 同时在这个系统内部不断进行着信息的传递或能量的输送. 这种信息的传递主要以波动的方式从某一区域(如热带的 El Niño 区域等)开始, 然后通过一定的方式影响邻近的节点或通过一定的遥相关作用影响空间距离较远的节点, 很多时候这种信息传递可能在多个区域同时存在, 正是这种交互的作用而使整个网络保持稳定的状态. 对于 1 d 尺度而言, 其平均道路长度为 6.803, 每一条连边对应的时间为 1 d, 因此对于某一区域发生的温度异常, 其对整个网络的平均作用时间可能要 6—7 d. 30 d 尺度下, 平均道路长度为 1.477, 这里每一条连边对应的时间为 30 d, 因此某一区域发生温度异常, 其对整个网络的平均作用时间可能需要 30—60 d 才能完成. 因为 30 d 尺度本身是一个相对稳定的气候平均态, 因此其传播即气候态的传递所需的时间相对较长.

显然, 1 和 30 d 尺度下, 温度关联网络属于不同的类型, 下面进一步讨论温度关联网络在不同类型之间转换的时间尺度条件. 图 3 给出了不同尺度下温度关联网络的聚类系数和平均道路长度的变化情况. 由图 3(a)可以看出, 1—11 d 尺度, 聚类系数在 0.6—0.7 之间有小幅度增长; 聚类系数在 11—12 d 之

间发生了显著的跳跃, 而 12—30 d 尺度, 聚类系数在 0.85—1 之间小幅下降. 由图 3(b)可以看出, 1—11 d 尺度, 平均道路长度在 4—8 之间有小幅度下降; 平均道路长度在 11—12 d 之间发生了显著的跳跃; 而 12—30 d 尺度, 平均道路长度在 1—2 之间小幅增长. 因此, 1—11 d 尺度, 温度关联网络属于小世界网络; 12—30 d 尺度则属于近似的全局耦合网络. 温度关联网络在两种类型之间转化的时间尺度条件为 11—12 d.

#### 2.4. 温度关联网络节点连边数的空间分布

图 4 给出了 1 d 尺度温度关联网络每个节点连边数的空间分布及纬向平均. 从图 4(a)可以看出, 在赤道附近的低纬度地区存在三个连边数较大的区域: 热带印度洋海域、赤道东太平洋海域和赤道东大西洋海域. 三个区域中最显著的是赤道东太平洋海域, 这恰好对应发生 El Niño 现象的区域<sup>[17,18]</sup>, 由此可以初步判定, El Niño 现象在 1 d 等小尺度上就有一定的体现. 同时, 这一区域是海温变化相对敏感的区域, 其发生变化可能在很短的时间内对全球的许多区域都产生一定的影响. 根据文献 [19,20], 热带印度洋和赤道东大西洋的海温与赤道东太平洋海温

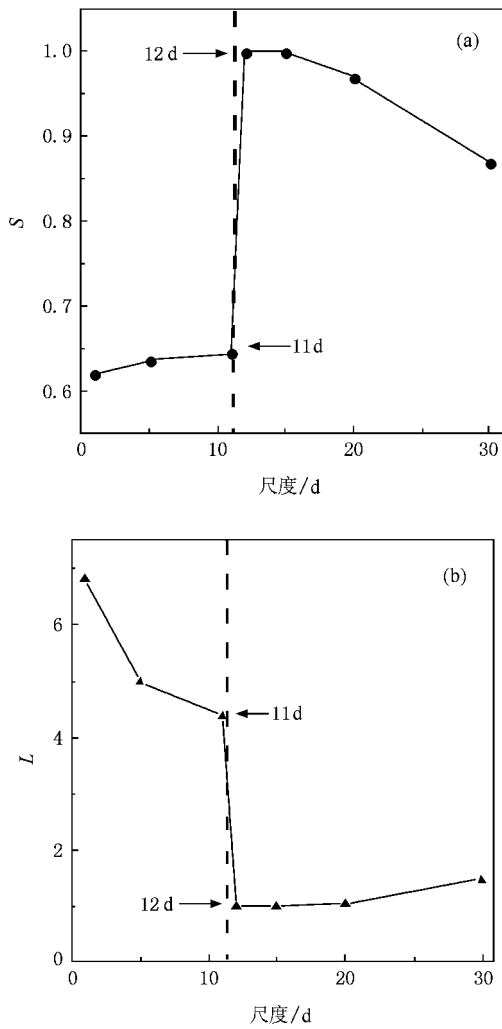


图 3 不同尺度下温度关联网的聚类系数和平均道路长度  
虚线为小世界网和全局耦合网的分界线。(a) 聚类系数 (b) 平均道路长度

的关联性较强 相比较而言,赤道东大西洋的海温与赤道东太平洋海温的关联性弱一些,因此在热带印度洋区域连边数相对较多,赤道东大西洋次之.就整体而言,节点的连边数南北半球呈准对称分布,大体表现为低纬度区域节点连边数较多,中纬度区域连边数较少、两极地区连边数较多的分布特征(图 4 (b)).1 d 尺度下,两极地区节点的连边数相对较高,其主要的原因可能是两极地区节点与节点之间的空间距离相对较短,因此相互之间的关联性较好.但对于中纬度和低纬度两个区域,其节点的连边数存在较显著的差异,因此这两个区域的温度变化可能属于不同的气候子系统<sup>[21, 22]</sup>.

图 5 为 30 d 尺度温度关联网每个节点连边数的空间分布及纬向平均.由图 5(a)可以看出:就全球而言,以海岸线为界,陆地系统和海洋系统的差异较显著.一般而言,陆地节点的连边数较少,节点之间的关联性相对海洋要差许多.在大西洋、印度洋和太平洋组成的海洋系统内部,温度关联网节点之间的关联性非常强,每个节点的连边数较大.这说明海洋系统,特别赤道两侧的海洋系统,温度变化的同步性相对较好.三大洋组成的海洋系统内部的温度关联网可能是一个全局耦合网络.大洋洲、非洲南部、南美洲南部以及南极洲四区域虽然被海洋包围,但其连边数明显低于周围的海域,这也是海陆差异的一个重要体现.就整体而言,节点连边数的分布并不像 1 d 尺度那样呈现南北半球的准对称分布,主要表现在南半球中纬度区域节点的连边数明显多于北半球中纬度区域,主要原因可能也是海陆气候子系统的关联性差异,即海陆分布不对称性所致.因

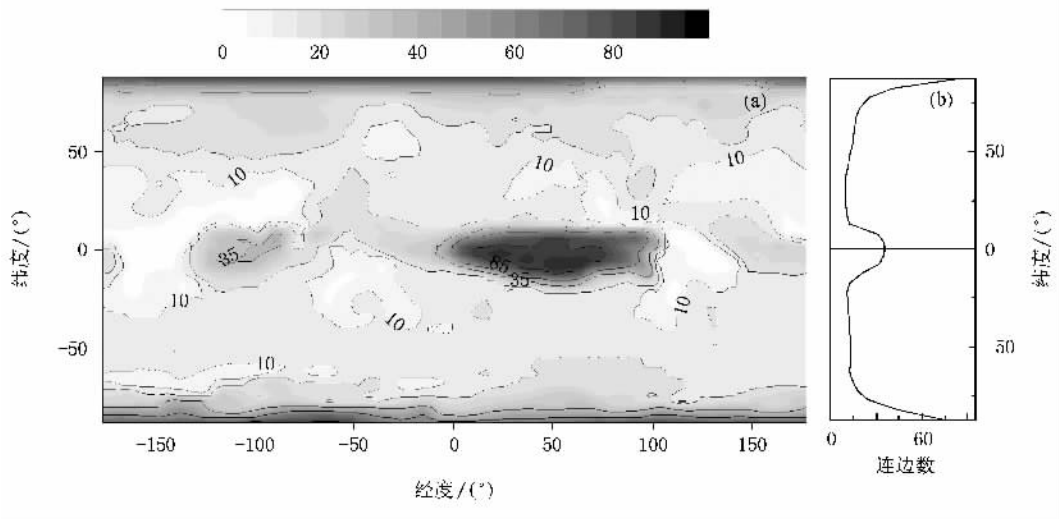


图 4 1 d 尺度温度关联网节点连边数的空间分布及纬向平均 (a) 空间分布 (b) 纬向平均

此 相对于 1 d 尺度而言 ,30 d 尺度下海洋系统的关 联性对全球的温度变化可能起更重要的作用 .

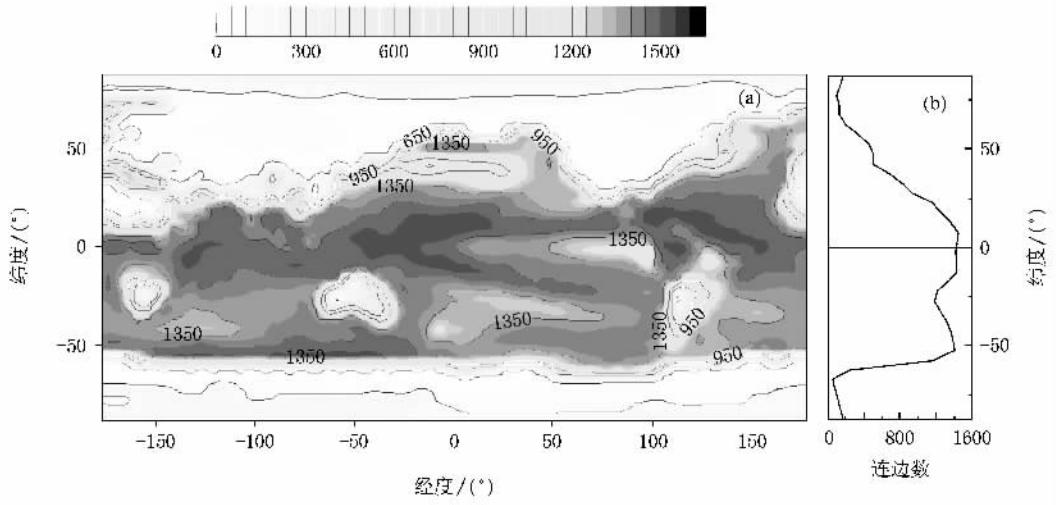


图 5 30 d 尺度温度关联网节点连边数的空间分布及纬向平均 ( a 空间分布 ( b 纬向平均

### 2.5. 不同气候子系统网络的动力学统计性质

针对 1 d 尺度中纬度和低纬度之间的差异 ,30 d 尺度海洋系统与陆地系统之间的差异 ,我们分别就两种尺度下的子系统讨论其网络的动力学统计性质 .对于 1 d 尺度情况 ,结合图 4 的节点连边数空间分布特征 ,选取 N17.5°—S17.5°范围内的节点 ,共计 576 个节点作为低纬度气候子系统 .取 N27.5°—N62.5°和 S27.5°—S62.5°范围内共计 720 个节点作为中纬度气候子系统 .表 2 给出了两种尺度下四种系统聚类系数、平均道路长度和平均顶点度 .显然 ,低纬度和中纬度气候子系统的温度关联网均满足  $L_{1d} > L_{random}$  ,  $S_{1d} \gg S_{random}$  ,两个子系统都具有小世界效应 .换而言之 ,两个子系统的温度关联网中存在大量邻近节点之间的连边 ,同时也存在少数长程连边 .图 6 为两子系统温度关联网顶点度累计分布 .顶点度分布是复杂网络性质的一个重要统计特征量 ,顶点度分布种类主要有幂律分布<sup>[23 24]</sup>、Gauss 分布<sup>[25]</sup>、指数分布<sup>[26]</sup>、双幂律分布<sup>[27]</sup>等 .由图 6(a)可以看出 ,低纬度子系统顶点度概率累计分布  $P(k > k')$  在  $k < 40$  的范围内服从指数分布 ,即

$$P(k > k') = 611.31e^{-\frac{k}{15.5}} + 37.11. \quad (6)$$

而  $k > 40$  的范围内顶点度分布则服从 Gauss 分布 (图 6(b)) ,即

$$P(k > k') = 86.01 + \frac{-4501.1}{36.92\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{k-104.4}{36.92})^2}. \quad (7)$$

出现这一差异的可能原因如下 :低纬度区域即存在关联特别小的区域 (如非洲南部、赤道西大西洋等区域) ,这些区域节点的度分布可能对应了  $k < 40$  时的指数分布 ,赤道地区存在三个关联性较高的区域 (热带印度洋海域、赤道东太平洋海域、赤道东大西洋海域) ,这三个区域的存在 ,在一定程度上造成  $k > 40$  时的 Gauss 分布 .中纬度气候子系统温度关联网的顶点度分布则为类 Gauss 分布 (图 6(b)) .1 d 尺度下 ,两种子系统虽然都具有小世界效应 ,但其顶点度累计分布存在显著的差异 .因此 ,中纬度和低纬度气候子系统是两个相互独立又相互作用的子系统 ,其独立性主要体现在顶点度的分布不同 ,其相互作用主要体现在中纬度系统内部存在的一些相互作用 (如各种遥相关作用等)<sup>[28 29]</sup> ,在很大程度上需要通过低纬度系统过渡 ,两种系统之间可能存在一些相互作用的通道 .关于这一点 ,我们将在以后的工作中进一步加以讨论 .

表 2 四种气候子系统的聚类系数、平均道路长度和平均顶点度

尺度	子系统	S	L	k
1d	低纬度	0.735	4.184	4.669
	中纬度	0.653	4.524	3.272
30d	陆地	0.743	2.329	9.072
	海洋	0.995	1.006	397.68

由图 5 可以看出 ,在中纬度和低纬度气候子系统 ,其关联性的空间分布特征也存在一定的差异 ,这种差异在北半球的表现尤其突出 .因此 ,对于 30 d

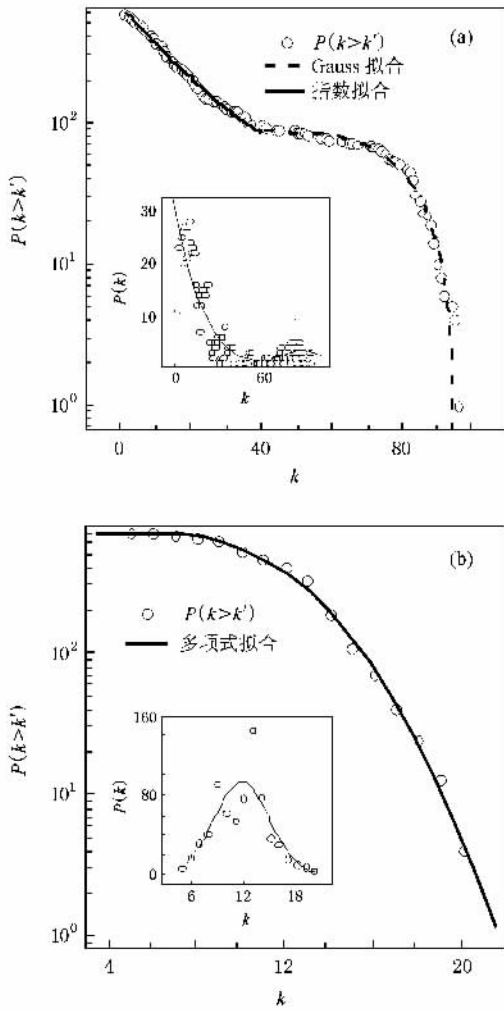


图6 1 d 尺度下低纬度和中纬度气候子系统温度关联网络顶点度累计分布 内插图为顶点度分布。(a) 低纬度子系统 (b) 中纬度子系统

尺度而言,低纬度和中纬度气候子系统也应该是既相互独立又相互作用的。同时,30 d 尺度下海洋气候子系统及陆地气候子系统之间的差异相对于中低纬度的差异更显著,因此我们着重讨论了海洋和陆地气候子系统之间的差异。选取  $N27.5^{\circ}$ — $S57.5^{\circ}$  范围内 1440 个节点作为海洋子系统,由于赤道地区附近陆地上节点具有的关联性类似于海洋系统(图 5),因此一并归入海洋子系统,北极附近节点之间距离过短,故北冰洋上的节点没有考虑在内。取  $N37.5^{\circ}$ — $N72.5^{\circ}$ , $S67.5^{\circ}$ — $S77.5^{\circ}$  的陆地上的 576 个节点作为陆地气候子系统,靠近南极点的节点之间距离较短,因此陆地气候子系统仅包含了南极大陆部分节点。由表 2 可以看出,对于海洋子系统而言, $S_{30d} = 0.995$ , $L_{30d} = 1.006$ 。因此海洋子系统是一个类全局耦合网络,大部分节点之间都存在直接的关联,

节点之间的温度变化在 30 d 尺度上具有较好的同步性。可能的原因如下:就海洋系统而言,其比热相对较大,下垫面差异较小,30 d 尺度又表现为温度变化的均态,因此节点之间差异较小,关联性较好。对于陆地子系统而言, $S_{30d} = 0.743 \gg S_{\text{random}}$ , $L_{30d} = 2.329 \gg L_{\text{random}}$ 。陆地子系统温度关联网络具有典型的小世界效应。陆地的比热相对较低,海拔、植被覆盖、地形等因素的差异造成下垫面差异显著,因此陆地系统节点温度变化的局地性较大,这种局地性导致温度关联网络中存在大量短程的关联。同时,陆地系统中也存在像青藏高原、南极大陆这些气候变化的敏感区,它们使得陆地系统中也存在少量长程关联。此外,同纬度的点之间也可能存在一定量的长程关联。大量的短程连边,少量的长程连边,因此陆地子系统温度关联网络具有典型的小世界效应。

## 2.6. 温度关联网络的动力学统计性质与关联阈值的关系

下面我们进一步讨论 1 和 30 d 两种尺度下全球温度关联网络的性质随连边阈值的变化。温度关联网络与其他一些实体网络不同,其连边的条件是关联系数超过某一阈值,连边不像实体网络那样稳定。因此我们就 1 和 30 d 两种尺度分别给出了不同阈值条件下温度关联网络的聚类系数和平均道路长度的值(图 7)。当阈值为零时,表示所有节点都连接, $S = 1.0$ , $L = 1.0$  是完全耦合网络。当阈值为 1 时,表示所有节点都不连接, $S = 0.0$ , $L = \infty$ ,此时为无关联网络。为了将  $S$  和  $L$  表示在同在一个图中,图 7 中给出了  $L^* = \sqrt{1 - e^{-L}}$ ,图中实线为  $L_{\text{random}}$  对应的  $L^*$  的值,虚线为 10 倍的  $S_{\text{random}}$  的值。由图 7(a) 可以看出,1 d 尺度下,当  $C < 0.2$  时, $L < L_{\text{random}}$ ;当  $C > 0.9$  时, $S < 10S_{\text{random}}$ 。因此,1 d 尺度下温度关联网络为小世界网络的关联阈值范围为 0.2—0.9。当  $C < 0.2$  时, $L < L_{\text{random}}$ , $S \gg S_{\text{random}}$ ,温度关联网络为类全局耦合网络;当  $C > 0.9$  时,温度关联网络内部只有极少数的连边,具有非常小的聚类系数和较大的平均道路长度,可能属于稀疏网络或无关联网络的范畴。从图 7(b) 可以看出,30 d 尺度下,当  $C < 0.65$  时, $L < L_{\text{random}}$ ;当  $C > 0.95$  时, $S > 10S_{\text{random}}$ 。因此,30 d 尺度下温度关联网络为类全局耦合网络的关联阈值范围为 0—0.6;温度关联网络为小世界网络的关联阈值范围为 0.6—0.95;当  $C > 0.95$  时,温度关联网络则具有非常小的聚类系数和较大的平均道路长度,可

能属于稀疏网络或无关联网络的范畴. 显然, 类似于当前的一些研究<sup>[29]</sup>, 温度关联网络具有多尺度性质. 某一尺度下, 网络的动力学统计性质在一定的关联阈值范围内是相对稳定的, 从而保证了气候系统本身在一定的强迫或扰动等作用下仍是相对稳定的; 当关联阈值超出一定范畴以后, 其网络的性质也会发生一定的质变, 这也进一步说明, 如果外强迫足够强 (如人类活动加剧全球增暖<sup>[30]</sup>) 也有可能在一定程度上对整个气候系统产生重大的影响.

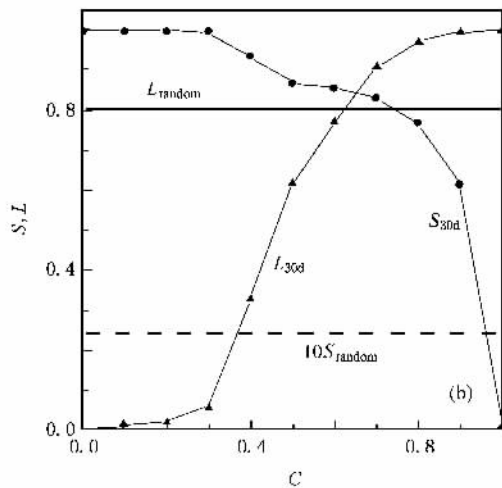
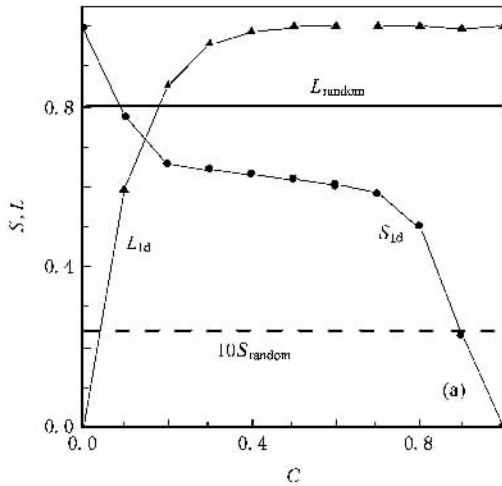


图 7 不同关联阈值条件下温度关联网络的聚类系数和平均道路长度 (a) 1 d 尺度 (b) 30 d 尺度

### 3. 结 论

利用 NCEP 再分析资料中的温度资料, 从多尺度角度初步构建了温度关联网络并分析其动力学统

计性质及转换条件, 同时对不同尺度下的气候子系统网络性质也做了一定的分析.

1) 1—11 d 尺度, 温度关联网络属于小世界网络; 12—30 d 尺度则属于类全局耦合网络. 温度关联网络在两种类型转化的时间尺度条件为 11—12 d.

2) 1 d 尺度就整体而言, 节点的连边数南北半球呈准对称分布, 大体表现为低纬度高、中纬度低、两极地区高的分布特征. 在赤道附近的低纬度地区存在三个连边数较大的区域: 热带印度洋海域、赤道东太平洋海域和赤道东大西洋海域. 其中最显著的是赤道东太平洋海域, 这一区域恰好对应发生 El Niño 现象的区域. 30 d 尺度温度关联网络的陆地节点连边数较少, 节点之间的关联性相对海洋要差许多. 南半球的中纬度区节点连边数明显多于北半球中纬度的情况, 其主要原因可能是海陆气候子系统温度变化的同步性差异.

3) 1 d 尺度下, 中纬度和低纬度气候子系统都具有小世界效应, 即两个子系统的温度关联网络中存在大量邻近节点之间的连边, 同时也存在少数长程连边. 低纬度气候子系统顶点度分布分为指数分布和 Gauss 分布, 中纬度气候子系统温度关联网络的顶点度分布则为类 Gauss 分布. 30 d 尺度下, 海洋子系统是一个类全局耦合网络, 陆地子系统温度关联网络具有典型的小世界效应.

4) 1 d 尺度下, 温度关联网络为小世界网络的关联阈值范围为 0.2—0.9. 当  $C < 0.2$  时, 温度关联网络为类全局耦合网络. 30 d 尺度下, 温度关联网络为类全局耦合网络的关联阈值范围为 0—0.6, 温度关联网络为小世界网络的关联阈值为 0.6—0.95. 网络的动力学统计性质在一定的关联阈值范围内是相对稳定的, 从而保证了气候系统本身在一定的强迫或扰动等作用下仍是相对稳定的. 当关联阈值超出一定范畴以后, 其网络的性质也会发生一定的质变. 这也进一步表明, 如果外强迫足够强, 有可能在一定程度上对整个气候系统产生重大的影响.

温度关联网络的构建为我们从整体上理解区域之间温度变化的内在联系提供了新的可能途径. 不同尺度下温度关联网络性质差异的研究将有助于我们更好地认识区域之间关联的尺度条件, 进而对气候变化的区域特征从一种或多种有效关联的尺度角度进行研究.

- [ 1 ] Watts D J , Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [ 2 ] Barabási A L , Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [ 3 ] Stanley H E 1971 *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena* ( Oxford : Oxford University Press ) p12
- [ 4 ] Erdos P , Renyi A 1960 *Publ. Math. Inst. Hung. Acad.* **5** 17
- [ 5 ] Jeong H , Tombor B , Albert R , Oltvai Z N , Barabási A L 2000 *Nature* **407** 651
- [ 6 ] Liljeros F , Edling C , Amaral L N , Stanley H E , Aberg Y 2001 *Nature* **411** 907
- [ 7 ] Jeong H , Mason S , Barabási A L , Oltvai Z N 2001 *Nature* **411** 41
- [ 8 ] Pastor-Satorras R , Vespignani A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3200
- [ 9 ] Bouchaud J P , Mezard M 2000 *Physica A* **282** 536
- [ 10 ] Tomas R A , Webster P J 1994 *J. Atmos. Sci.* **51** 1417
- [ 11 ] Carrera M L 2001 *Ph. D. Thesis* ( Montreal : McGill University Press ) p25
- [ 12 ] Santhanam M S , Patra P K 2001 *Phys. Rev. E* **64** 016102
- [ 13 ] Wallace J M , Zhang Y , Renwick J A 1995 *Science* **270** 780
- [ 14 ] Kistler R , Kalnay E , Collins W 1999 2001 *Bull. Am. Meteor. Soc.* **82** 247
- [ 15 ] Murirhead R J 1982 *Aspects of Multivariate Statistical Theory* ( New York : John Wiley & Sons Press ) p10
- [ 16 ] Bollabas B 1985 *Random Graphs* ( London : Academic Press ) p20
- [ 17 ] Shukla J , Wallace J M 1983 *J. Atmos. Sci.* **40** 1613
- [ 18 ] Wang S W 1995 *Advance in Climate Diagnose* ( Beijing : Metrological Press ) p15 ( in Chinese ) [ 王绍武 1995 气候诊断研究进展 ( 北京 : 气象出版社 ) 第 15 页 ]
- [ 19 ] Mechl G A 1987 *Mon. Wea. Rev.* **115** 27
- [ 20 ] Houghton R W , Tourne Y 1992 *J. Climate* **5** 765
- [ 21 ] Tsonis A A , Elsner J B 1989 *Bull. Am. Meteor. Soc.* **70** 16
- [ 22 ] Duane G S , Webster P J , Weiss J B 1999 *J. Atmos. Sci.* **56** 4183
- [ 23 ] Newmann M E J 2001 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **98** 404
- [ 24 ] Faloutsos M , Faloutsos P , Faloutsos C 1999 *Comp. Comm. Rev.* **29** 251
- [ 25 ] Amaral L A N , Scala A , Barthelemy M , Stanley H E 2000 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **97** 11149
- [ 26 ] Fu C H , Zhang Z P , Chang H , He D R 2008 *Physica A* **387** 1411
- [ 27 ] Dorogovtsev S N , Mendes J F F 2001 *Proc. Roy. Soc. London B* **268** 2603
- [ 28 ] Meehl G A 1996 *J. Geophys. Res.* **101** 1503
- [ 29 ] Dorogovtsev S N , Samunikhin A N , Mendes J F F 2002 *Europhys. Lett.* **57** 334
- [ 30 ] Houghton J T , Ding Y , Griggs D J 2001 *Climate Change* ( Cambridge : Cambridge University Press ) p156

# Analysis of dynamical statistical characteristics of temperature correlation networks of 1—30 d scales<sup>\*</sup>

Gong Zhi-Qiang<sup>1)B)</sup> Zhou Lei<sup>1)</sup> Zhi Rong<sup>3)†)</sup> Feng Guo-Lin<sup>2)B)†)</sup>

1) *College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China*

2) *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia,*

*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

3) *Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081, China*

4) *College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

( Received 22 January 2008 ; revised manuscript received 29 April 2008 )

## Abstract

Based on reanalysis data of National Center of Environment Prediction of America, temperature correlation networks of different time scales are constructed and their dynamical statistical properties are also analyzed. Results show that temperature correlation networks of 1 and 30 d belong to small world and semi-globally coupled network, respectively. The time scale condition is 11—12 d for networks to shift from one type to the other. For 1 d scale, the total number of links at each geographic location is semi-symmetrical between north and south hemisphere, the equatorial nodes have a larger number of connections in three regions: the equatorial Indian ocean, equatorial east Pacific ocean and equatorial east Atlantic ocean. Sub-system networks of both mid-latitude and low-latitude belong to the small world network, while the accumulative degree distribution of low-latitude follows the exponential and Gaussian distributions and that of mid-latitude follows the semi-Gaussian distribution. The range of correlation condition value for temperature network belonging to small world network is 0.2—0.9. Meanwhile for the 30 d scale, ocean nodes show a larger number of connections than the land nodes. The ocean and the land sub-system networks belong to the semi-globally coupled and the small world networks, respectively. The range of correlation condition value for temperature network belonging to semi-globally coupled network is 0—0.6.

**Keywords** : mutli-scale, small world network, global coupled network, correlation condition value

**PACC** : 9260X

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 40675044 ), the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2006CB400503 ) and the State Key Program of Science and Technology of China ( Grant No. 2007BAC03A01 ).

<sup>†</sup> E-mail : fenggl@cma.gov.cn