

基于二分图的温度网络拓扑性质研究*

周 磊¹⁾ 支 蓉¹⁾²⁾ 冯爱霞¹⁾ 龚志强^{2)†}

¹⁾(扬州大学物理科学与技术学院,扬州 225002)

²⁾(国家气候中心,中国气象局诊断预测室,北京 100081)

(2009 年 10 月 16 日收到;2010 年 4 月 1 日收到修改稿)

利用中国地区 435 个台站 1961—2002 年逐日平均温度序列,将温度变化发生在 9 天时间尺度上的特征编码在网络中,通过研究二分图温度网络(BGT 网络)中节点与项目的关系,揭示出 9 天时间尺度上温度变化的特征及其在空间上的拓扑统计性质.网络中各节点 *RRRD*, *RrDD*, *eeed*, *DRRD*, *DDRR* 等所代表的温度波动模态在网络中异常频发,对 9 天尺度温度变化的预报有一定的指导意义.统计网络的节点度分布,集群系数等拓扑结构特征量,发现 BGT 网络服从正态分布特征.BGT 网络项目内节点度的多样性大体上表现为江南和华南地区偏少,华东和华中地区偏多,华北地区偏少,东北部分地区偏多的四极型分布特征;且这种区域特征与文献[15]中根据温度波动网络(FT 网络)划分的复杂区域存在一定的异同性,两种网络从不同的角度共同揭示了区域内温度变化的背景信息.因此,二分图温度网络的构建为从时间和空间尺度相结合的角度研究温度变化的特性和规律,提供了一条可能的有效途径.

关键词: 二分图温度网络, 气候系统, 拓扑结构

PACC: 9260X

1. 引 言

温度变化的研究主要通过发生在时间和空间上的特性来反映,通常利用温度资料,对温度变化在时间尺度上的特性进行再分析^[1-4],以揭示温度变化的规律性.在空间上,就温度变化在各台站之间的联系,研究温度变化的区域特征^[5].随着复杂网络的兴起,人们对于复杂网络的研究已深入到各个领域^[6-9],利用复杂网络研究温度变化在时间及空间上的性质已取得了一系列成果.Tsonis 等^[10-12]构建高度场关联网络,并分析其长程和短程相关的变化.龚志强等^[13]分尺度研究全球格点温度序列的关联性特征,验证了温度序列之间既存在数量比较大的关联“噪声”,又存在短程和长程等真实关联,在此基础上构建了全球温度关联网络并讨论了网络在不同尺度下的气候态特征及其时空演变.周磊等^[14-15]对温度资料进行分析从时间尺度上构建温度波动网络(FT 网络),揭示出温度序列所具有的

类混沌属性;依据此方法对中国地区的 435 个台站依次独立的构建 FT 网络,并给出各台站网络的统计性质,探讨同类统计性质在空间上的区域特征.但目前利用网络对温度变化进行时间和空间上的研究,往往是相互独立的,如何通过一种有效的工具将温度变化的这两种性质统一编码在网络中,进而构建时间演变和空间关联相结合的两层网络,是当前气候系统复杂网络研究亟待解决的一个难点问题.

依据文献[14],本文利用复杂网络的二分图原理构建温度网络.有效的将发生在时间和空间上的温度变化编码在网络中,通过分析二分图网络的基本统计性质,进而研究温度变化的时域特征.二分图网络对温度变化的研究主要有以下优点:1)从温度资料中抽取代表连续 9 天温度变化的波动模态,将温度发生在 9 天时间尺度上的变化编码在网络中;2)从网络的空间拓扑结构角度考察温度波动模态的拓扑性质,略去历史资料对温度变化的影响;3)通过研究二分图网络中节点与项目的关系,揭示

* 国家自然科学基金(批准号:40930952, 40875040, 40705031 和 40705036),国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB400503)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: gzq0929@126.com

出温度波动模态与台站之间的联系.

与 FT 网络相比,可以通过对比研究两种网络的同类统计性质,分析温度波动模态在两种网络中的作用差异.进而分析在滤除历史资料对温度变化影响的情况下,温度波动模态在空间上的拓扑性质.

2. 二分图原理

二分图是图论中一种在理论研究和实际应用中都有重要意义的特殊模型.在二分图中,所有节点被分成两个集合 M 和 N ,其中 M 或 N 中任意两个在同一集合中的点都不直接相连^[16].二分图描述网络中的一种称为“隶属网”,其中一类节点是参与某种活动、事件或者组织的“参与者”,例如演员、科研人员等;而另一类节点则是它们参与的活动、事件或者组织(称为“项目”),例如影片、科学论文等^[17].

温度变化研究包括空间分布和时间演化两类,两者不能独立开来研究.首先时间上的变化是发生在特定的空间作用型中,而空间上的分布则是通过温度变化在时间尺度上得以体现.因此,可以把温度发生在时间和空间上的变化看作两个集合,而任意一个集合内各元素之间的相连都要通过另外一个集合中的元素来实现.例如研究温度变化在时间上的相互作用关系要发生在特定的空间区域中,而要研究温度变化的空间分布类型要由发生在时间上的同步性来反映.

基于二分图原理,我们将台站作为项目;各台站内部不同的温度转换则用温度波动模态表示^[14],定义为二分图网络事件的参与者.构建二分图温度网络(BGT网络),研究两类集合的统计性质.

3. BGT 网络的构建

3.1. 资料及粗粒化

我们所选用的温度资料是中国气象局公布的全国 740 个常规测站中无缺测的 435 个台站的逐日平均温度序列 $T_n(t)$, ($t = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, 14976, n = 1, 2, \dots, 435$), 资料长度 1961—2002 年.

运用最小二乘法拟合出任一台站温度序列 $T_n(t)$ 中连续三天的温度变化的斜率 k ,

$$k(i/3) = \frac{\sum_{t=1}^i t * T(t) - \frac{1}{i}(\sum_{t=1}^i T(t))(\sum_{t=1}^i t)}{\sum_{t=1}^i t^2 - \frac{1}{i}(\sum_{t=1}^i t)^2}, \quad (1)$$

$$i = 3, 6, 9, \dots, 14976.$$

根据(1)式计算不同温度波动值可能出现的概率 $P(k)$ 为

$$P(k) = \int_{-\infty}^k \frac{\text{Num}(x)}{N} dx, \quad (2)$$

其中 $\text{Num}(x)$ 为对应一种温度波动模态 x 发生的次数.我们将温度波动 $P(k)$ 划分为 5 个等概率区间,把落在这 5 个区间的 $k(t)$ 分别用符号表示为 R, r, e, d, D ,

$$s_i = \begin{cases} R, & 0 > P(k) > 0.2, \\ r, & 0.2 \geq P(k) > 0.4, \\ e, & 0.4 \geq P(k) > 0.6, \\ d, & 0.6 \geq P(k) > 0.8, \\ D, & 0.8 \geq P(k) > 1.0, \end{cases} \quad (3)$$

其中 R 代表温度的快速上升, r 代表缓慢上升, e 代表相对平稳, d 代表缓慢下降, D 为快速下降.通过上述粗粒化处理,将单个台站 42 年温度序列 $T_n(t)$ 转化为相应的符号序列,即

$$S_n = (s_1 s_2 s_3 \dots), (s_i \in (R, r, e, d, D), n = 1, 2, 3, \dots, 435). \quad (4)$$

通过粗粒化滤除了温度变化的细节问题,实现了温度变化过程的模态化,文献[14,15]构建了温度波动模态随时间的转化网络,研究温度变化在历史资料中所表现的性质,揭示出温度序列的类混沌属性.

3.2. BGT 网络

在符号序列 S_n 中,称有 m 个特征字符构成的字串为 m 字串.对给定的 m ,可以有 5^m 种不同的 m 字串,这些 m 字串即为各种波动模态,即连续 m 个不同温度涨落的组合.取 $m = 4$,共有 625 种波动模式: $RRRR, RRRr, RRRr, RRRD, RRrR, RRre, RRrd, RRrD$, 一种波动模态对应了一种温度变化过程,反应了连续 9 天的温度变化情况.

以 625 种波动模态作为 BGT 网络的一类集合,体现了 9 天尺度的温度变化,将温度随时间的变化编码其中;以 435 个台站作为 BGT 网络的另一类集合,这一类集合体现温度变化的空间特征;这样,在 BGT 网络中,一类集合反映了温度在时间尺度上的变化,另一类反映了温度在空间尺度上的变化,通

过二分图原理, 将这两类集合统一编码在 BGT 网络中, 通过研究这两类集合之间的相互作用关系, 揭示 BGT 网络表现出的拓扑性质, 将研究温度变化发生在时间和空间上的尺度结合到了一起.

3.3. BGT 网络模型

由于我们更加关心同一类节点之间的相互

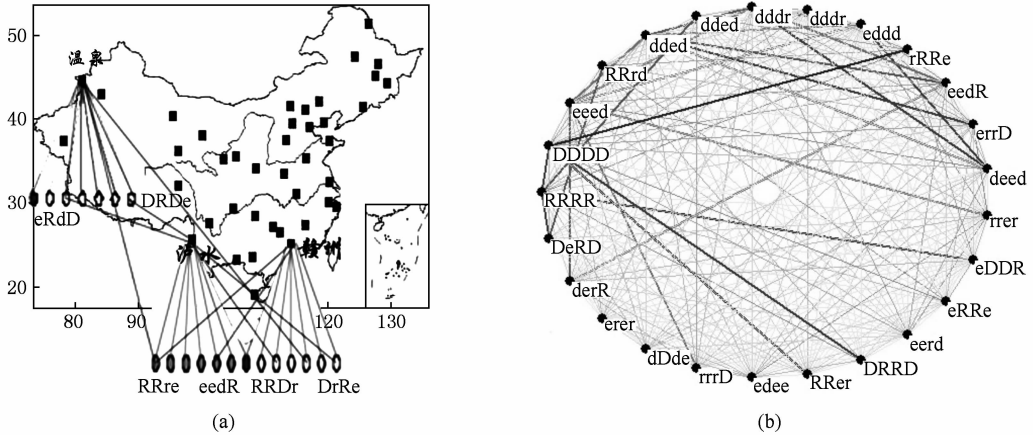


图 1 二分图网络模型及其单模式投影图

图 1(a) 描述二分图及其投影的草图. 以地图中台站作为 BGT 网络的项目, 台站内温度变化的波动模态作为节点, 所有温度波动模态之间的相互作用通过台站来体现, 如果某个温度波动模态参与到这个台站的温度变化中, 则这两种分属于不同种类的集合之间就存在连边, 以此来体现温度波动模态在空间上的作用类型. 不同类节点之间的边属于二分图, 同类集合内部的边属于向参与者的投影图^[18], 在 BGT 网络中所有温度波动模态之间的相互作用要通过台站向下投影来形成, 以反映它们之间的相互作用.

图 1(b) 为 BGT 网络的单投影模式, 为部分温度波动模态作用在 435 个台站上的投影. 如果两种模态之间的连边数目越大, 则这两种模态之间的相互作用越强, 空间分布型上则表示这两种温度波动模态之间的作用也越强. 图中用线条的粗细来反映两种模态间作用的强弱.

以 435 个台站名称作为网络的项目, 625 种波动模态作为网络的节点, 利用二分图隶属图原理构建 BGT 网络. 与单序列单模态构建的 FT 网络相比, BGT 网络中节点种类的增加, 更能细致的表现出温度变化的多种类型, 更为全面地体现温度变化特征, 因此很好地解决了单模态网络中因节点种类

作用关系, 常把二分图向一类节点投影, 得到单模式网络, 这时参与每个项目的所有参与者之间都存在表示在此项目中产生相互作用的关系的边, 而每个项目在投影图中则表示为一个完全图, 整个单模式网络成为完全图的集合. 这种表示项目的完全图被称为一个“项目完全子图”^[18].

多, 样本量少而网络连通性差, 各种节点间相互作用信息体现不强等缺陷.

4. BGT 网络节点统计性质

4.1. 节点度特性

节点度是节点属性中简单而又重要的概念, 一个节点的度越大就意味着这个节点在网络中所占的比重越大, 在某种意义上对网络的影响也越重要. 网络中所有节点度的平均值, 即为网络的平均节点度 $\langle k \rangle$ ^[19]. BGT 网络的节点度在一定程度上反映了某一种节点在网络中的数目, 为各种波动模态在全国范围内的发生频次, 以此提取出在 9 天尺度上较为频发的温度变化过程.

BGT 网络的平均节点度数为 2780.5, 各节点之间的度数存在明显的差异性, 图 2 体现出了网络节点度的差异性, 同时给出了平均值曲线, 并计算平均方差, 给出了二倍均方差线. 其中节点 RRRD, RrDD, eeed, DRRD, DRRR 等的度数与平均值的差均超过了二倍均方差, 这些模态占有模态比重的 3.5%, 在温度变化中属于异常偏高的模态, 对整个空间分布上的温度变化起到重要的作用, 对 9 天尺

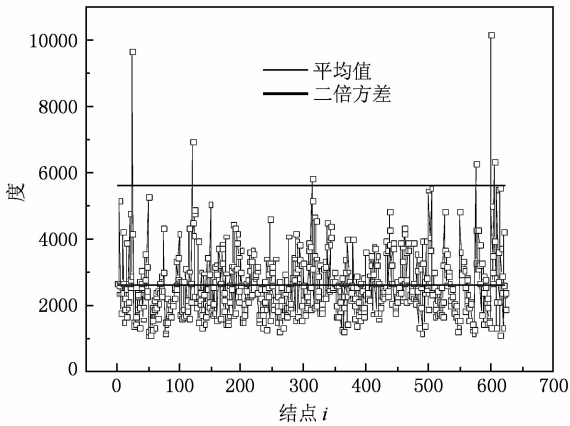


图2 网络节点度的差异性

度上的温度转换预测具有一定的意义. 相对于 FT 网络, 二分图网络所表现出的温度波动模式之间的差异性较显著, 更为准确的提取出重要的温度波动模式, 较 FT 网络更为精确.

4.2. 节点度分布

图3分别为 BGT 网络和 FT 网络的累计节点度分布图, 图3(a)为 BGT 网络累计节点度分布, 服从半支的正态高斯分布; 图3(b)为 FT 网络的累计节点度分布, 在半对数坐标下服从衰减的指数分布, 代表随机挑选的网络过程. 在考虑随时间变化的温度波动模式时, 各种模式的发生具有一定的特性, 文献[14]发现了温度序列的波动特征具有和 Lorenz 系统变量相似的混沌特征. 而 BGT 网络, 舍去了温度波动在历史资料中的变化特征, 在 9 天时间尺度上温度波动模式的发生频次总体上是服从正态分布的, 这和气象系统中类似与温度资料等的本身分布特征相似^[20].

4.3. 二分图网络的集群系数与度的关系

计算度为 k 的所有节点集群系数的平均值 $C(k)$,

$$C(k) = \frac{\sum_i C_i \delta_{k_i, k}}{\sum_i \delta_{k_i, k}}, \quad (5)$$

其中 C_i 是节点 i 的集群系数, $\delta_{k_i, k} = 1$ 如果 $k_i = k$; $\delta_{k_i, k} = 0$ 如果 $k_i \neq k$.

集群系数^[19]反映网络的紧密程度, 通常用 $C(k)$ 与 k 的关系来表明网络的层次特征. 当 $C(k)$ 与 k 之间满足特定的关系时, 网络存在“层次结构”, 也就是网络节点聚合成许多小群体, 而这些小

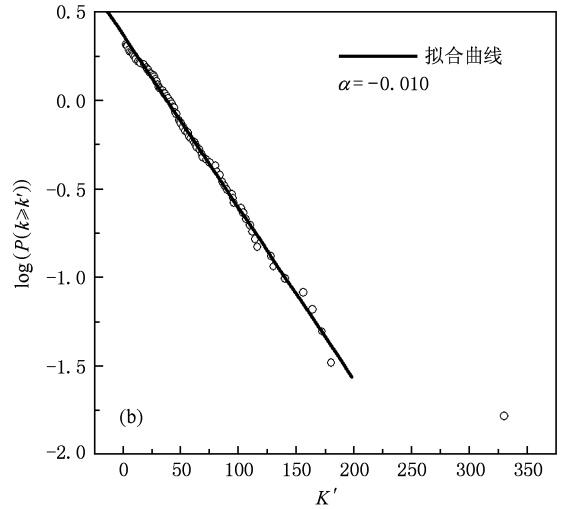
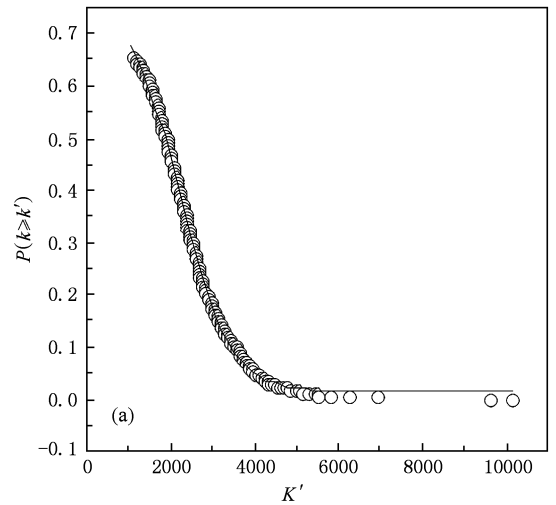


图3 BGT 网络与 FT 网络的累计节点度分布

群体又在某一个层次上聚合成较大的群体, 如此形成一个分层次的群体结构^[21]. 在 FT 网络中, 反映温度波动模式之间在历史资料上的相互作用, 网络的群集结构主要反映了温度变化在时间尺度上的群发性; BGT 网络舍去历史资料的影响, 关注各种模式的空间拓扑性质, 网络的群集结构主要反映在空间上的群发性.

图4为 BGT 网络和 FT 网络的集群系数随节点度的累计分布图, BGT 只考虑温度变化的拓扑性质, 而不考虑随时间变化的特性, 网络的集群系数随节点度分布显示出半支的正态分布, 体现温度变化在空间上的群发性与温度波动模式发生频次之间的正态关系. 而 FT 网络中, 集群系数与节点度的关系为指数分布, 代表着随机优选的网络演化过程, 即网络集群系数的大小独立于节点度, 在随时间变化的实际温度资料中, 温度变化的群发性有时

会反映在小的时间尺度上,也有时会反映大的时间尺度上^[22-23].与网络的累计节点度分布相似,这表明在忽略了时间尺度上的温度变化,温度波动模态在空间作用型上的拓扑性质,服从正态分布.

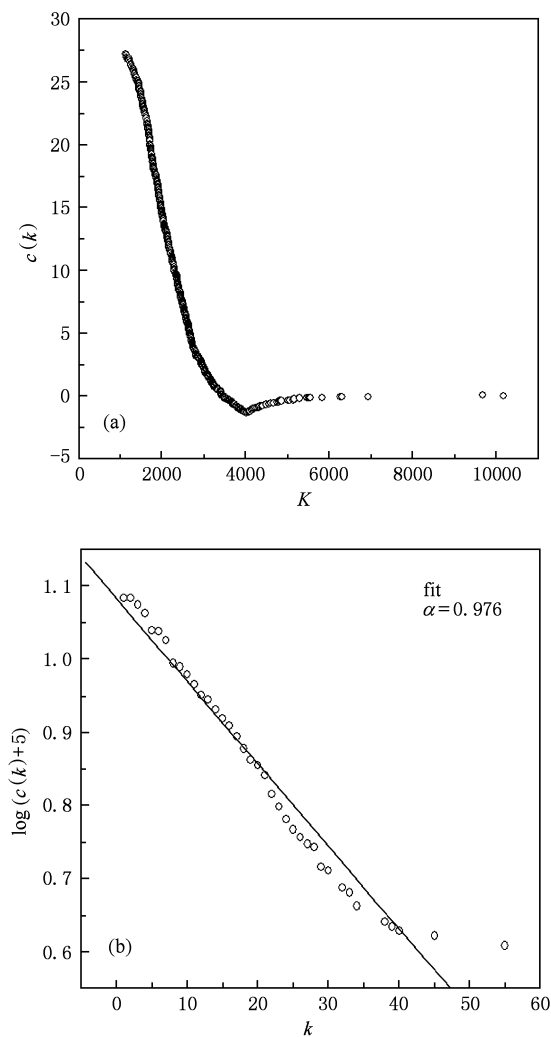


图4 BGT网络与FT网络集群系数随节点度的累计分布图

5. BGT网络项目统计性质

5.1. BGT网络项目内节点度的多样性

计算了各个台站中的节点度多样性,表示不同台站内部参与到温度变化中波动模态的种类数目,为了体现出各台站在节点度多样性上的差异,计算了节点度多样性在435个台站中的平均值,并与各台站中度多样性的数值相减,给出全国分布图(图5所示).

由图5,BGT网络在中国东部地区大体上表现

为江南和华南地区偏少,华东和华中地区偏多,华北地区偏少,东北部分地区偏多的四极型分布特征(依次为图5中由南至北的四个方框所示).选用了近40年来的温度资料,所构建出的625种波动模态总体上在全国范围内的温度变化中都有所出现,但是在个别台站中,某些特定的温度波动模态没有出现,并在空间分布上体现出了一定的区域特征,这些模态的出现必然和区域特征相联系,进而构成了波动模态分布的空间分布型.

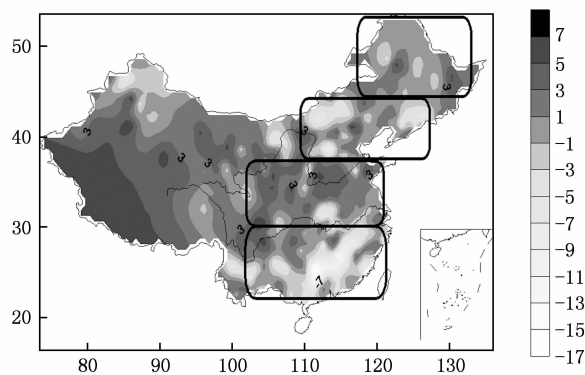


图5 项目内节点度多样性的全国分布图

5.2. 节点度的多样性与复杂性

度的多样性体现出了温度变化的复杂特征:一方面,如果某区域所参与温度变化的模态种类越多,则表示该区域中的温度变化复杂性越强;另一方面,如果某块区域中所参与的温度波动模态越少,则该区域中的温度变化复杂性越弱.图6为FT网络划分的复杂区域.对比图5和图6,两类网络的统计特征量所表现出的区域分布具有一定的相似特征,但在特定的区域上,存在着一定的差别,表现出各自的特性.如在温度变化复杂性强的西部地域其节点多样性较丰富,而复杂性同样较强的南方地区其节点度的多样性则较弱,单凭度的多样性来定义温度变化的复杂性具有一定的局限性.在对这两块区域进行分析研究后发现,这两种性质在这些区域上的表现具有各自的特性.

西部地区温差较大^[24],在这些地区上所反映出来的代表温度变化的波动模态种类比较多,度的多样性较多;另一方面由于西部地区其气候变化类型为温带大陆型干旱气候,腹处全球最大的陆地亚欧大陆,海陆热力性质显著.受此影响,这两块区域的气候变化要相对复杂^[25],温度变化比较复杂.南方

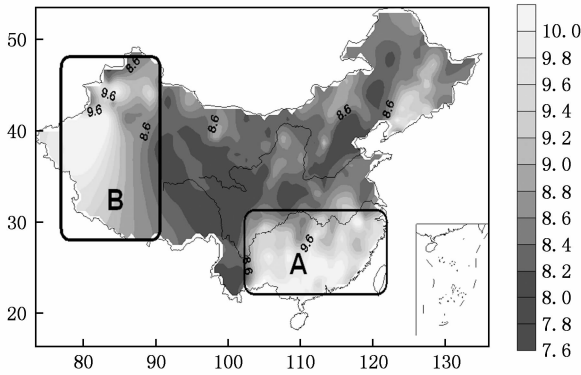


图 6 FT 网络温度变化复杂度分布图

地区温差相对较小^[26],反映出来的温度波动模态种类相对较少,度多样性较弱,但同样由于特殊的地理位置,尤其是包含着属于亚热带热带海洋性气候的东南沿海地区,温度高、湿度大、烟雾浓度大、日照时间长、太阳辐射量大,面对的是全球最大的海洋太平洋,温度变化复杂^[27].

度的多样性与温度变化的复杂特征存在着一定的异同性.在复杂性较强的南方地区,虽然这些台站中节点度的多样性较弱,但由于南方地区本身的特殊地理位置与环境导致了该区域的温度变化的强复杂特征.影响温度变化的复杂性是有多种因素的,度的多样性对温度变化复杂性没有决定性的作用,但是与复杂性又有一定的联系,如在西部以及其他地区的节点度多样性较强,与这些区域中的强复杂区域具有一定的相似特征.

5.3. BGT 项目内节点度分配性

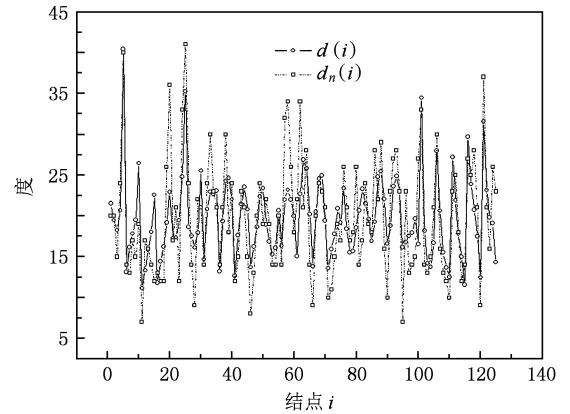
为了体现 435 台站之间其内部节点分配的异同性,依据文献[15],首先计算节点 i 在台站 n 中的度数 $d_n(i)$,则台站 n 内每个节点 i 都对应一个 $d_n(i)$ 值,用序列来表示(图 7),表征在台站 n 中节点度的分配情况.为了体现各台站之间节点度分配的差异性,对每个节点 i 计算 $d_n(i)$ 值在 435 台站中的平均值 $d(i)$,得出 i 的 $d(i)$ 值序列(图 7),通过

$$r_n = \frac{\sum_{i=1}^{625} (d_n(i) - \bar{d}_n)(d(i) - \bar{d})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{625} (d_n(i) - \bar{d}_n)^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{625} (d(i) - \bar{d})^2}},$$

$$(n = 1, 2, \dots, 435) \quad (6)$$

计算序列之间的相似系数 r_n 来反映两者的相似程度.

依次计算台站 n 中 $d_n(i)$ 序列对 $d(i)$ 的相似

图 7 节点 i 对应的平均节点度及任一台站 n 的节点度

系数 r_n ,给出全国分布图,相似系数的分布图存在一定的区域特征(图 8).不同台站之间具有相同或不同的 r_n 值, r_n 值的不同表明台站之间内部节点度的分配情况也存在差异.例如,一节点在某一台站中度数较大(即所代表的温度波动模态在此台站中频繁发生),而在另一台站中度数较小,即在不同台站中反映出来的频发或不频发的温度波动模态种类是不相同的.

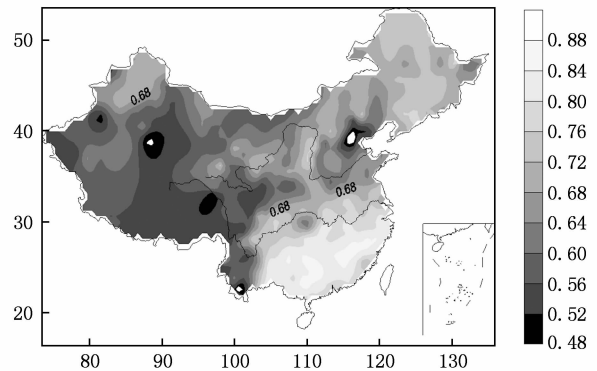


图 8 台站的节点度分配与全国平均节点度分配的相似系数分布图

图 8 中显著的区域特征与文献[15]中节点度的分配性所表现的区域特征一致.虽然 BGT 网络构建的温度波动模态的时间尺度及数目都较 FT 网络大,但依据相同的粗粒化思想与复杂网络原理,所表现出来的网络拓扑性质具有一致性,不受节点种类、数目及时间尺度的影响,进一步说明了粗粒化原理及利用复杂网络研究温度变化的有效性.无论从温度资料中提取 7 天抑或 9 天的温度变化过程,都能有效的体现温度变化在相同区域中的相同效应,进一步揭示了基于复杂网络理论研究中国温度

变化区域特征的有效性,对于不同的天气尺度过程具有一定的普适性,具有进一步推广应用的可能性.

对比 BGT 网络项目的度多样性分布特征,发现两幅图表现出相似的区域特征. 在这些相似的区域中,节点的种类数目与各类节点在这些空间区域中分配的大小都存在一定的相似特征. 揭示出在相似的区域中,所参与的温度波动模态的种类相同,且反映在 9 天时间尺度上的频发及不频发的波动模态类型也一致^[15].

6. 结果与讨论

在复杂网络研究中国温度变化类混沌属性及中国温度变化区域特性的基础上,本文依据二分图原理构建温度网络,将温度波动模态的时间转换和空间分布信息同时编码于网络中,讨论温度波动模态在网络中的相互作用,揭示温度变化在 9 天时间尺度上的作用性质,并通过二分图网络的拓扑统计性质反映温度变化在空间上的特性. 对比研究 FT 网络和 BGT 网络的同类统计性质,分析 BGT 网络的时域特性.

依据二分图网络的不同研究对象,我们首先针对 BGT 网络中节点的统计性质,对网络中节点所表示的温度波动模态进行研究,由节点度数异常偏高的温度波动模态 *RRRD*, *RrDD*, *eed*, *DRRD*, *DDRR*, 将对预测 9 天时间尺度上的温度转换预测具有一定的指导意义. 对节点度分布及集群系数随节点度的分配进行统计,在 FT 网络上,两种统计性质都服从指数分布的,表现出温度变化在历史资料上转换的特性,揭示出温度序列的类混沌属性. 而在 BGT 网络中,这两种统计性质服从正态的高斯分布,体现了 9 天时间尺度上的温度转换过程在空间上的正态分布特性.

BGT 网络项目的度多样性大体上表现为江南和华南地区偏少,华东和华中地区偏多,华北地区偏少,东北部分地区偏多的四极型分布特征,并与 FT 网络划分的温度变化复杂区域具有一定的相似性,两者表现的区域特性具有一定的区别联系,共同揭示出不同区域中温度变化的背景特征. 网络节点度分配性所表现的区域特征与 FT 网络相似,进一步论证了从复杂网络角度提取出来的探究中国温度变化区域特征的可靠性.

-
- [1] Feng G L, Dong W J 2003 *Acta Pyhs. Sin.* **52** 2347 (in Chinese) [封国林、董文杰 2003 物理学报 **52** 2347]
- [2] Feng G L, Gong Z Q, Dong W J 2005 *Acta Pyhs. Sin.* **54** 5494 (in Chinese) [封国林、龚志强、董文杰 2005 物理学报 **54** 5494]
- [3] Li J P, Shi J E 1993 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **17** 132 (in Chinese) [李建平、史久恩 1993 大气科学 **17** 132]
- [4] Li J P, Chou J F 2003 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **27** 653 (in Chinese) [李建平、丑纪范、2003 大气科学 **27** 653]
- [5] Zhang S Q, Zhang B, Wang A H 2001 *Advance In Earth Science* **16** 467 (in Chinese) [张树清、张柏、汪爱华 2001 地球科学进展 **16** 467]
- [6] Pei W D, Chen Z Q, Yuan Z Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 373
- [7] Huang W, Jiang R, Hu M B, Wu Q S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1306
- [8] Zhang H F, Small Michael, Fu X C, Wang B H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3639
- [9] Meng Q K, Zhu J Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3632
- [10] Tsonis A A, Swanson K L, Roebber P J 2006 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **87** 585
- [11] Tsonis A A, Swanson K L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 228502
- [12] Tsonis A A, Swanson K L, Kravtsov S 2007 *Geo. Res. Lett.* **34** 13705.
- [13] Gong Z Q, Zhou L, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Pyhs. Sin.* **57** 5351 (in Chinese) [龚志强、周 磊、支 蓉、封国林 2008 物理学报 **57** 5351]
- [14] Zhou L, Gong Z Q, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Pyhs. Sin.* **57** 7380 (in Chinese) [周 磊、龚志强、支 蓉、封国林 2008 物理学报 **57** 7380]
- [15] Zhou L, Gong Z Q, Zhi R, Feng G L 2009 *Acta Pyhs. Sin.* **58** 7351 (in Chinese) [周 磊、龚志强、支 蓉、封国林 2009 物理学报 **58** 7351]
- [16] Newman M E J, Watts D J, Strogatz S H 2002 *National Academy of Sciences.* **99** 2566
- [17] He D R, Liu Z H, Wang B H 2008 *Complex Systems and Complex Networks* (Beijing: High Education Press) p121 (in Chinese) [何大韧、刘宗汪、汪秉宏 2008 复杂系统与复杂网络(北京:高等教育出版社)第 121 页]
- [18] Zhou T, Ren J, Medo M, Zhnag Y C 2007 *Phys. Rev. E* **76** 046115
- [19] Wang X F, Li X, Chen G R 2006 *The theories and application of complex network* (Beijing: Tsinghua University Press) p10 (in Chinese) [汪小帆、李翔、陈关荣 2006 复杂网络理论及其应用(北京:清华大学出版社)第 10 页]
- [20] Xiong K G, Yang J, Wan S Q, Feng G L, Hu J G 2009 *Acta Pyhs. Sin.* **58** 2843 (in Chinese) [熊开国、杨 杰、万仕全、封国林、胡经国 2009 物理学报 **58** 2843]

- [21] Ravasz E, Baraba'si A L 2003 *Phys. Rev. E* **67** 026112
- [22] Zhang P P, Chen K, He Y, Zhou T, Su B B, Jin Y, Chang H, Zhou Y P, Sun L C, Wang B H, He D R 2006 *Physica A* **360** 599
- [23] Barabasi A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [24] Xiao D X, Xie J, Xu C L 2007 *Modern Agriculture* **22** 27 (in Chinese) [肖道刚、谢 军、徐长乐 2007 现代农业 **22** 27]
- [25] Hu L Q 1994 *Xinjiang Meteorologica* **17** 6 (in Chinese) [胡列群 1994 新疆气象 **17** 6]
- [26] Lu Y Z, Zuo W 2004 *Monitoring and Analysis of Environment* **03** 47 (in Chinese) [鲁远曙、左 卫 2004 环境监测与分析 **03** 47]
- [27] Zhuang S, Huang G P 1999 *Fujian Environment* **21** 35 (in Chinese) [庄苏、黄公仆 1999 福建环境 **21** 35]

Topological analysis of temperature networks using bipartite graph model*

Zhou Lei¹⁾ Zhi Rong¹⁾²⁾ Feng Ai-Xia¹⁾ Gong Zhi-Qiang^{2)†}

1) (Department of Physics, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

2) (Laboratory for Climate diagnose and prediction, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

(Received 16 October 2009; revised manuscript received 1 April 2010)

Abstract

Using the daily main observational temperature data of 435 stations in China from 1961 to 2002, temperature change on 9-day scale has been compiled in network. Research on the connection between nodes and items in bipartite graph temperature (BGT) network, reveals the temperature change on 9-day scale and the topological statistics in the space. The nodes of *RRRD*, *RrDD*, *eed*, *DRRD* and *DDRR* have remarkably high degree, which is helpful to predict the temperature change on 9-day scale. Calculation of the topological parameters of this network, including degree distribution and clustering coefficients, shows the normal school character of the bipartite graph model temperature network. The distribution of nodes' degree diversity in each item presents quadruple type character, and has similar characteristics as the complex regions defined by the fluctuant temperature network (FT network), displaying the background information of temperature change in the region by this two kind of network respectively. Thus, temperature network modeled by bipartite graph model present a possible and available approach to research the characteristic and rule about temperature change from the combination of the time and space scale.

Keywords: bipartite graph temperature network, climate system, topological structure

PACC: 9260X

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40930952, 40875040, 40705031 and 40705036) and the State Key Development Program for Basic Research (Grant No. 2006CB400503).

† Corresponding author. E-mail: gzc0929@126.com