

气候系统复杂网络 及其应用

龚志强 支 蓉 冯爱霞 张志森 封国林◎著



科学出版社

气候系统复杂网络及其应用

龚志强 支 蓉 冯爱霞 张志森 封国林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者们在多年理论联系实践的科学研究基础上,借鉴国内外在气候系统复杂性领域的最新研究进展,系统总结近几年课题组的研究成果而撰写的专著。本书以气候系统复杂网络的构建和应用为主线,共分为8章。第1章介绍气候系统复杂性研究进展;第2章至第6章分别介绍全球温度场和高度场的时空关联性、气候系统复杂网络的构建及其稳定性特征等;第7章介绍气候系统复杂网络的应用,包括温度关联指数、三维海气相互作用指数的定义及其在长江流域夏季降水预测中的应用等;第8章相对独立,主要介绍全球温度场和高度场的信息熵分布和传输等。

本书可供大气科学、地理学和物理学等领域的科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

气候系统复杂网络及其应用/龚志强等著. —北京:科学出版社,2014.6
ISBN 978-7-03-040658-3

I. ①气… II. ①龚… III. ①气候系统-研究 IV. ①P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 101020 号

责任编辑:李上男 朱海燕 李秋艳 / 责任校对:张小霞

责任印制:赵德静 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年6月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:415 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

气候系统具有典型的非线性和非平稳性特征,气候系统的整体行为也并非子系统行为的简单线性叠加,如何从宏观整体的角度把握系统的发展趋势,分析系统内部的多时空尺度演化,历来是复杂系统研究的重要科学问题。2004年以来,以复杂系统内部的信息传递为纽带的信息论的建立,以复杂系统内部相互作用为基础的复杂网络理论的提出,在一定程度促进了复杂网络理论、关联性研究和信息论三者的有机结合,进而形成了复杂性科学领域的新成果——气候系统复杂网络。多年的发展历程表明,气候系统复杂网络在气候学领域的广泛应用,为有效刻画气候系统内部的信息传递,进而从整体论的角度来理解气候系统内部各种错综复杂的相互作用等开辟了一条新的可能途径。

作者通过多年的理论联系实践的科学研究,并借鉴国内外在气候系统非线性和复杂性领域的最新研究成果,在中国气象局干部培训学院丑纪范院士的鼓励与指导下,在同行和有关专家的帮助与支持下,终于完成了《气候系统复杂网络及其应用》一书。

全书以气候系统复杂网络的构建和应用为主线,分别从网络构建的数理基础、网络构建的数理方法和网络构建的气候学意义等方面进行介绍。全书分为8章,第1章介绍气候系统复杂性研究进展,扼要总结了关于气候系统复杂网络研究的各种理论的发展历程等;第2章和第3章分别介绍了全球温度场与高度场的时空关联性及其稳定性,如全球温度场和高度场关联性的空间分布与时间演化性特征,全球变暖和极端事件对全球温度场关联性的影响等;第4章至第6章主要介绍气候系统复杂网络的构建及其稳定性特征,如全球温度场、环流场和海气相互作用复杂网络,温度序列复杂网络的构建,极端事件和遥相关等对网络稳定性的影响等;第7章主要介绍了气候系统复杂网络的应用,主要包括温度关联指数、三维海气相互作用指数的定义及其在长江流域夏季降水预测中的应用,遥相关的年代际配置等;第8章则主要介绍了气候系统内部的信息传输,并在此基础上讨论了全球温度场和高度场时间信息熵的分布与可预测性等。

全书自成系统,章节之间既相互独立,又相互联系,同时还兼顾了在大气科学中的应用。为方便相关科研工作者对这一研究领域的新理论与方法有一个较全面和深刻的理解,在编写过程中,作者既注意了全书的可读性,力图以简洁数理描述、清晰的图像、简化的气候模型等,使各种方法的介绍通俗易懂。

同时,从解决气候研究中的热点问题出发,将各种关联性和信息传递等统一在复杂网络的框架下,充分展现气候系统内部相互作用的宏观整体图像,进而保证了内容的科学性。本书所涉及的各种非线性和复杂性科学的分析方法,均具有清晰的统计和物理意义,因此具有广泛的适用性和实用性,不仅适用于大气科学领域的研究,同时也适用于地理学、物理学等研究领域。

总之,将气候系统内部的相互作用统一于复杂网络的框架下,实现气候学与复杂网络理论的有机结合,是本书最突出的特点,也是交叉科学研究领域一个新的研究热点。本书将最终的落脚点定位于科学理论在实际气候业务中的应用,为气候系统复杂网络研究从理论研究向实际应用的转化提供范例。同时希望能够与读者相互交流,相互启发,促进气候系统复杂网络研究的深入。

本书在国家重点基础研究发展计划(课题号:2012CB955203)、国家自然科学基金(课题号:41205040 和 41305075)和中国气象局公益性行业专项(课题号:GYHY201306021)的共同资助下完成。在完成本书的过程中,得到了周磊、张世轩、赵俊虎、王阔、曾宇星、苏海晶、颜鹏程、苏涛等研究生的热情支持和帮助。他们不仅为本书提供了不少有价值的研究成果,而且花费了大量的精力进行审校,在此致以深深的谢意!

作 者

2013 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 气候系统复杂性研究进展	1
1.1 气候系统复杂网络研究进展	1
1.1.1 气候系统的复杂性	1
1.1.2 气候系统空间结构特征	2
1.1.3 复杂网络研究	3
1.1.4 典型的网络模型	4
1.1.5 气候系统复杂网络	6
1.2 气候系统关联性进展	10
1.2.1 关联性分析方法研究	10
1.2.2 全球环流系统空间关联性研究	11
1.2.3 全球温度场空间关联性研究	15
1.2.4 全球温度场与环流场间的关联性	19
1.3 信息论和气候系统可预报性研究进展	19
1.3.1 天气气候的可预测性及其预测	19
1.3.2 信息论	20
1.3.3 信息论在气象学的应用	23
1.4 本章小结与讨论	24
参考文献	25
第 2 章 全球温度场时空关联性	35
2.1 全球温度场时空关联性特征	35
2.1.1 温度场关联性研究方法	35
2.1.2 全球温度场关联性时空分布特征	36
2.2 时间延迟对全球温度场关联性的影响	49
2.2.1 时间延迟的关联性分析方法	49
2.2.2 时间延迟对全球温度场关联性	50
2.3 全球变暖和极端事件对全球温度场关联性的影响	54
2.3.1 增/降温趋势对全球温度场关联性的影响	54
2.3.2 极端温度事件对全球温度场关联性的影响	57
2.4 本章小结与讨论	61
参考文献	62
第 3 章 全球高度场时空关联性	64
3.1 全球高度场时空关联性特征	64
3.1.1 高度场关联性分析方法	64

3.1.2	高度场关联性的空间分布	64
3.1.3	关联系数与延迟天数的关系	66
3.1.4	关联系数随时间的演变	71
3.2	北太平洋关联中心特征	72
3.2.1	北太平洋负关联中心的空间分布特征	73
3.2.2	北太平洋负关联中心超前关联特征	77
3.3	本章小结与讨论	79
	参考文献	80
第4章	气候系统复杂网络的构建	81
4.1	全球温度场复杂网络	81
4.1.1	复杂网络性质及结构特征量	81
4.1.2	温度关联网络的构建	82
4.1.3	温度关联网络的结构特征	83
4.2	环流系统复杂网络	88
4.2.1	环流系统关联网络的构建	88
4.2.2	环流系统关联网络的结构特征	89
4.3	全球海气相互作用双层网络	91
4.3.1	海气双层网络的构建	92
4.3.2	海气双层网络的结构特征	93
4.4	四种气候要素空间关联结构特征	100
4.4.1	四种要素关联网络的构建和结构特征	100
4.4.2	网络平均顶点度的时间演变特征	105
4.5	本章小结与讨论	106
	参考文献	107
第5章	温度序列的复杂网络特征	111
5.1	温度序列的复杂网络拓扑性质	111
5.1.1	三种时间序列的构造	112
5.1.2	三种序列的粗粒化方法	112
5.1.3	三种波动网络	114
5.2	中国温度变化的网络区域性研究	122
5.2.1	温度资料粗粒化	122
5.2.2	温度序列波动网络构建	122
5.2.3	网络特征量的空间分布特征	123
5.3	二分图的温度网络拓扑性质研究	130
5.3.1	二分图原理	131
5.3.2	二分图温度网络的构建	131
5.3.3	二分图温度网络节点统计性质	133
5.3.4	二分图温度网络项目统计性质	135
5.4	本章小结与讨论	138

参考文献	139
第 6 章 气候系统复杂网络的结构稳定性	141
6.1 温度系统网络的结构稳定性	141
6.1.1 网络结构稳定性分析	141
6.1.2 资料长度的影响	141
6.1.3 准周期振荡的影响	143
6.1.4 极端事件的影响	145
6.1.5 El Niño 年和 La Niña 年的影响	149
6.1.6 关键区域的影响	151
6.2 环流系统网络的稳定性	152
6.2.1 遥相关型对网络稳定性的影响	153
6.2.2 南极偶极子对网络稳定性的影响	156
6.3 三维海气作用关键区的年代际变化和空间配置	157
6.3.1 主模态组分的年代际变化	158
6.3.2 关键区不同组合态的空间配置	161
6.4 本章小结与讨论	166
参考文献	167
第 7 章 气候系统复杂网络的应用研究	169
7.1 温度关联指数的定义和应用	169
7.1.1 TPTI 指数的定义	169
7.1.2 TPTI 指数的年代际特征	173
7.1.3 TPTI 指数和中国夏季降水的关系	173
7.1.4 TPTI 指数对应的中国夏季降水的环流特征	176
7.1.5 TPTI 指数与 El Niño 和 La Niña 的可能联系	179
7.2 北半球遥相关型的年代际配置特征	182
7.2.1 北半球中高纬度环流系统空间结构的时间演变特征	182
7.2.2 北半球中高纬度环流系统遥相关型的年代际配置特征	184
7.2.3 遥相关型与中国夏季降水的可能联系	196
7.2.4 多因子物理统计模型的构建	198
7.2.5 基于多因子物理统计模型的中国夏季降水预测方法	200
7.2.6 独立样本回报检验	201
7.3 动态北太平洋指数在长江中下游夏季降水预测中的应用研究	202
7.3.1 动力和统计相结合的相似误差订正方法	203
7.3.2 相似误差场的选取	204
7.3.3 基于 MNPI 与 NPI 的降水预报	204
7.3.4 长江中下游地区夏季降水预测的相似误差订正分析	207
7.3.5 2003~2009 年独立样本回报	208
7.3.6 单因子加权相似误差订正方法在中国汛期降水预测中的应用	216
7.4 三维海气相互作用和长江中下游汛期降水	217

7.4.1 长江中下游汛期降水及影响因素	218
7.4.2 三维海气相互作用指数	218
7.4.3 基于三维海气相互作用指数的长江中下游降水的订正	219
7.5 本章小结与讨论	222
参考文献	224
第8章 气候系统信息特征及可预测性研究	227
8.1 信息熵的适用性研究	227
8.1.1 信息熵的计算	228
8.1.2 计算方法对信息熵的影响	230
8.1.3 实际气象资料信息熵与样本量	232
8.2 全球温度场和高度场信息熵的时空特征	234
8.2.1 气象要素信息熵的定义与计算	235
8.2.2 温度场信息熵	236
8.2.3 高度场信息熵	242
8.3 北半球高度场的可预测精度与经向信息传输	245
8.3.1 高度场的可预测性判断方法	246
8.3.2 可预测精度和经向信息传输整体特征	248
8.3.3 不同时间尺度上的可预测精度和信息传输	253
8.3.4 不同季节对可预测精度和信息传输的影响	263
8.4 本章小结与讨论	266
参考文献	267

第 1 章 气候系统复杂性研究进展

气候系统的复杂性、关联性研究等由来已久,以信息传递为纽带的信息论是非线性研究的重要成果,气候系统复杂网络研究则是方兴未艾。本章将扼要介绍前人关于气候系统复杂网络的研究工作,包括一些基本概念、主要的性质以及基本原理等;简短回顾各种理论的发展历程,总结已有的一些重要研究成果,提出可能的结合点及研究方向。在此基础上,简要介绍本书所涉及的主要研究内容及一些可能的创新性之处。

1.1 气候系统复杂网络研究进展

1.1.1 气候系统的复杂性

1974 年国际上首次提出气候系统的概念。1979 年世界气候大会明确提出应将气候系统的 5 个圈层(岩石、水、冰雪、大气、生物)结合起来研究。20 世纪 80 年代初进一步提出了地球系统的概念,将岩石圈拓展为固体地球圈(包括岩石圈、上下地幔和内外地核),而气候系统实际上就是地球系统的表层系统(图 1.1)。

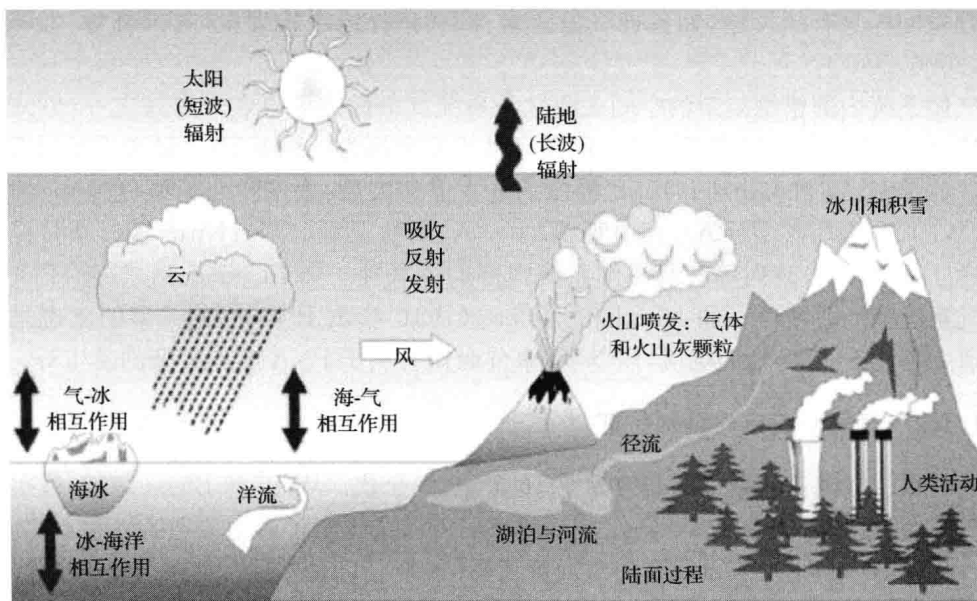


图 1.1 气候系统示意图

随着气候变化研究逐渐扩展到全球范围,人们逐渐认识到气候系统是一个很复杂的系统(Lorenz,1963;曾庆存,1979;Eckmann et al.,1985;郭秉荣等,1986;Essex et al.,1987;Tsonis,1996;穆穆等,2002;李建平和丑纪范,2003)。气候变化不仅受发生在大气

内部的动力、热力过程控制,更重要的是受海洋、冰雪圈(包括冰川、海冰和大陆上冰雪覆盖)、岩石圈(主要是山脉、陆面、土壤)、生物圈和人类活动的影响,这些不同“圈”层之间的相互作用形成月、季、年、年代际及以上时间尺度的气候变化(Procaccia, 1988; 黄荣辉和徐飞亚, 1996)。

气候系统包含多圈层、多要素、多尺度的共同作用,是一个外有强迫、内有非线性耗散的复杂巨系统,其复杂性主要体现在以下几个方面(Fraedrich, 1986; Nicolis, 1987; 刘式达和刘式适, 1989; Lorenz, 1991; 朱抱真等, 1991; 封国林等, 2006a):

(1) 气候系统由多个子系统组成,它们之间以某种或多种方式发生非线性和非平衡相互作用,导致其在时间上和空间上产生各种复杂形式的相关结构,形成了气候系统的空间复杂性特征;

(2) 气候系统所显示的行为既不是完全有序和可预测的,也不是完全随机和绝对不可预测的,而是有序态、随机态和混沌态共存于一个复杂系统中,并能依系统内外不同参数条件随时间和空间而变化,显示了系统的多样性特征;

(3) 混沌复杂性的一个突出特性就是对初始条件、参数和环境的微小扰动高度敏感,气候系统同样具有这一特征;

(4) 对于一个复杂的非线性系统,系统的整体行为并非简单地与子系统行为相联系,气候系统要求我们必须从整体上去把握它的发展趋势,而不是简单地将所有局部行为进行相加,体现了整体论;

(5) 气候系统的基本动力学行为是大量子系统的统计平均行为,表征其复杂性的各种物理量同样具有统计性,如各种气象要素、熵和拓扑维等物理量(封国林等, 2006b; 侯威等, 2006, 2007)。

气候系统内部错综复杂的空间关联性是系统复杂性的重要表现形式之一(刘式达和刘式适, 1989, 1999)。气候系统的空间关联性主要表现为三种类型:①环流系统内部的关联性。如 Wallace 和 Gutzler(1981)提出的五大遥相关型:太平洋北美型(PNA)、西太平洋型(WP)、东大西洋型(EA)、西大西洋型(WA)和欧亚型(EU); Nitta 等(1986)提出的太平洋-日本型(PJ)波列等。②海洋系统内部的关联性。如 El Niño、La Niña、PDO 等。③海气系统间的关联性。如 Horel 和 Wallace(1981)指出 PNA 遥相关型的出现是大气对赤道太平洋 SST 异常的响应,El Niño 事件时期有利于 PNA 遥相关型的发生等。

1.1.2 气候系统空间结构特征

气候系统空间关联结构的研究始于 19 世纪 30 年代。Walk 和 Bliss(1932)首次提出了著名的南方涛动,20 世纪 70 年代, Bjerknes(1969)又提出了遥相关型的概念。此后,曾庆存(1979)、Wallace 和 Gutzler(1981)、黄荣辉(1990)、Thompson 和 Wallace(1998)对遥相关型进行了广泛的研究。随着社会和科学的进步,人们越来越关注各种遥相关型对气候系统的作用,尤其是多种遥相关型的非线性耦合。自 20 世纪 90 年代以来,世界上已经开展了大量有关这方面的研究,如 1995 年提出的 CLIVAR 计划中,将北大西洋涛动(NAO)、北太平洋涛动(NPO),北极涛动(AO)等列入重点研究对象。除此之外,广大气象学工作者还进一步开展了海气相互作用和陆气相互作用等研究。不过,值得指出的是,以往对气候系统空间结构的研究,基本停留在一种或者多种遥相关型关联性的分析,且主

要考虑负相关作用,从而忽略了从全球尺度研究气候系统的整体特征。2006年,Tsonis等(2006)结合复杂网络理论,充分考虑系统内部的负相关和正相关,从宏观整体角度理解气候系统的空间结构,进而为气候系统结构特征的研究开辟了新的道路。Tsonis等的研究使我们可以用简单的结构特征量和语言来描述系统的结构特征。

有关气候系统空间结构特征方面,国内亦开展了一些相关研究,如封国林等主持的自然科学基金项目“气候系统复杂网络的构建”,付遵涛主持的自然科学基金项目“中国地区气候变化的复杂网络研究”,龚志强等主持的自然科学基金项目“基于气候系统复杂网络的中国东部夏季极端降水和雨型分类研究”等,主要探讨如何研究气候系统的结构特征及其在气候变化研究的可能应用。Wang和Tsonis(2009)对中国区域降水和温度之间关联的空间结构特征进行了分析。总体而言,气候系统空间结构特征研究的重要意义(Tsonis and Roebber,2004;张文等,2007;Yamasaki et al.,2008;封国林等,2001),主要体现在以下几个方面:

(1) 空间结构特征的研究既包括负相关作用,又包括正相关作用,是空间结构复杂性的宏观整体的体现,有利于更好地抓住系统内部本质的关联作用,进而从空间结构特征的角度理解系统的内秉复杂性;

(2) 基于空间关联性的结构特征研究,包括从年际到年代际等各种尺度,因此其研究的意义显而易见,如年代际尺度的气候变率长期作用于农林渔工及生态系统等,对全球人们的生活有着重要的影响;

(3) 区域空间结构特征的研究,有助于研究极端事件等对气候系统的影响,进而揭示气候系统性质的稳定性条件,亦有助于开展极端事件影响评估的研究;

(4) 结构特征量可以体现系统内部区域作用的强弱,区域气候要素变化的同步性及区域之间信息传递的效率等,可以为遥相关指数的定义,气候子系统的划分及子系统间能量与信息传递等研究提供新的有效手段和研究工具。

因此,气候系统空间结构特征的研究既是一个崭新的研究领域,又具有重要的气候学意义,同时也为社会经济可持续发展,以及为社会发展规划提供科学依据。

1.1.3 复杂网络研究

自1998年Watts和Strogatz(1998)构造出一种介于规则网络和随机网络之间的网络(WS网络)以来,复杂性研究新热点——复杂网络吸引了国内外越来越多科学工作者的注意力。这种研究方法把复杂系统简化为点以及连接点的线段的集合。点代表系统的基本单元,称为节点;线段代表节点之间的相互作用,称为边。

复杂网络的研究领域十分广泛,加入复杂网络研究的学者主要来自图论、统计物理学、计算机网络研究、生态学、社会学以及经济学等领域,研究所涉及的网络主要有生命科学领域的各种网络如细胞网络、蛋白质与蛋白质作用网络、蛋白质折叠网络、神经网络、生态网络、Internet网络、社会网络、流行性疾病的传播网络、科学家合作网络、人类性关系网络、语言学网络,等等(Watts and Strogatz,1998;Barabasi and Albert,1999;Garlaschelli et al.,2003;Gallagher and Appenzeller,1999;Adamic and Huberman,1999;Albert et al.,2000;Newman,2001;Redner,1998;Ravasz et al.,2002;Jeong et al.,2001;Lloyd and May,2001)。绝大多数实际的复杂网络都具有如下几个基本特征。

(1) 网络行为的统计性质。网络节点数可以有成百上千万,甚至更多,从而使得大规模性的网络行为具有统计特性;

(2) 节点动力学行为的复杂性。各个节点本身可以是各非线性系统,具有分岔和混沌等非线性动力学行为;

(3) 网络连接的稀疏性。一个 N 个节点的具有全局耦合结构的网络的连接数目为 N^2 量级,而实际大型网络的连接数目通常为 N 的量级;

(4) 连接结构的复杂性。网络连接结构既非完全规则也非完全随机;

(5) 网络的时空演化复杂性。复杂网络具有空间和时间的演化复杂性,展示出丰富的复杂行为,特别是网络节点之间不同类型的同步化运动。

复杂网络研究的快速兴起,具有一定的偶然性,但也是现代数学和统计物理理论发展的必然结果。总体而言,当前复杂网络取得突破性发展的主要原因包括:

(1) 越来越强大的计算设备和迅猛发展的 Internet,使得人们开始能够收集和处理规模巨大且种类不同的实际网络数据;

(2) 学科之间的相互交叉使得研究人员可以广泛比较各种不同类型网络数据,从而揭示复杂网络的共性;

(3) 以还原论和整体论相结合为重要特色的复杂性科学的兴起,也促使人们开始从整体上研究网络的结构和性能之间的关系。

过去关于实际网络结构的研究常常着眼于包含几十个,至多几百个节点的网络,而当前关于复杂网络的研究中则常可以看到包含几万个到几百万个节点的网络。网络规模尺度上的变化也促使网络分析方法作出相应的改变,甚至很多问题的提法都要相应改变。相应的,复杂网络研究所使用的主要方法是数学上的图论、物理学中的统计物理学方法和社会网络分析方法。其主要研究内容则大致可以分为:

- (1) 揭示刻画网络系统结构的统计性质,以及度量这些性质的合适方法;
- (2) 建立合适的网络模型以帮助人们理解这些统计性质的意义与产生机理;
- (3) 基于节点的特性和整个网络的结构性质分析与预测网络的行为;
- (4) 提出改善已有网络性能和设计新的网络的有效方法;
- (5) 网络中信息传递的有效性;
- (6) 网络对扰动和袭击的抵抗能力与恢复能力;
- (7) 网络上的级联动力学过程和网络的同步。

1.1.4 典型的网络模型

网络大致可以分成规则网络、随机网络、小世界网络和标度自由网络,等等。

规则网络:如果节点按确定的规则连边,所得到的网络称为规则网络。例如,将节点排成一个圆,假定每个节点与它近邻的 4 个节点连边,我们就得到一维有限规则网[图 1.2(a)]。类似的将节点排在二维球面整数坐标格点上,假定每个节点只能与它最邻近的节点连边,我们就得到二维有限规则网。类似还可以定义高维规则网。规则网络的连边数固定,每个节点仅与其邻近节点连接,这种网络的性质相对稳定,但网络中信息传递的效率较低。

随机网络:给定网络节点总数 N ,网络中任意两个节点以概率 p 连边,生成的网络全

体记为 $G(N, p)$, 构成一个概率空间。由于网络连边数目是一个随机变量 X , 取值可以从 0 到 $N(N-1)/2$, 有 n 条连边的网络数目为 $\binom{N(N-1)/2}{n}$, 其中一个特定网络出现的概率为 $P(G_n) = P^n (1-p)^{[N(N-1)/2]-n}$ 。因此, 可生成的不同网络的总数为 $2^{N(N-1)/2}$, 它们服从二项分布。网络平均连边数为 $pN(N-1)/2$ 。

随机网络中每个节点的连边数满足 Poisson 分布, 且存在非邻近节点间的连边, 信息在网络中传递的效率较规则网络高, 但是网络的性质相对不稳定, 移除网络中部分连边可能会导致网络的瘫痪[图 1.2(c)]。

小世界网络: 现实生活中的大量网络, 既不是规则网络, 又不是随机网络, 就网络性质而言, 既具有高效的信息传递功能, 同时又能够长期保持稳定, 其中最为经典的例子就是“六度分离”: 社会学家 Milgram(1967) 发现, 任意一对美国人之间, 平均可以找到不多于 6 人的线路将他们联系起来, 在这条链上按顺序相邻的人两两之间相互认识。Watts 和 Strogatz(1998) 在 *Nature* 杂志上发表了一篇开创性的论文, 提出了网络科学中著名的小世界网络概念。小世界网络的基本思想是: 假如有一个节点总数为 N , 每个节点与它最近邻的 $K = 2k$ 个节点相连边的一维有限规则网, 通常要求 $N \gg K \gg 1$; 对规则网络的 N 个节点, 以概率 $pK/2$ 在任意两个节点间连边, 但不改动规则网络的原有连边, 也不允许自身到自身的连边和重复连边。这样得到的网络即为小世界网络[图 1.2(b)]。Watts 和 Strogatz 说明小世界网络实际上是规则网络和随机网络的叠加, 在 p 值较小的一个范围同时具有大的集聚系数和短的平均路径长度, 称为小世界效应。许多现实网络均具有小世界效应。

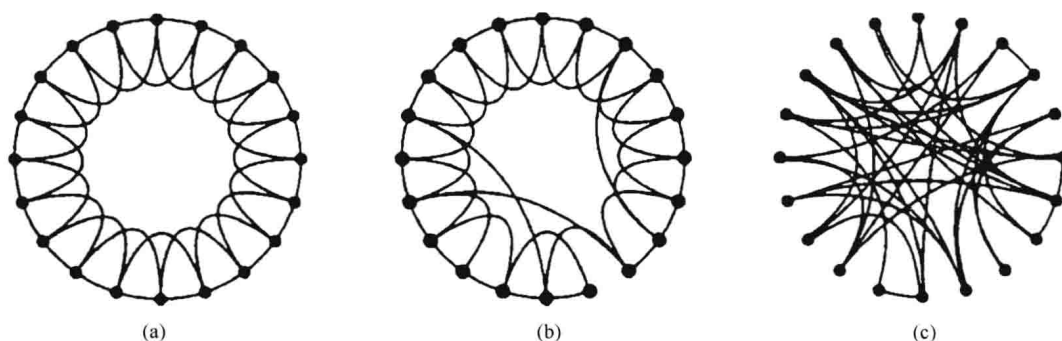


图 1.2 三种网络示意图

(a) 规则网络; (b) 小世界网络; (c) 随机网络

无标度网络: 实际网络中存在一种奇怪的现象, 网络中大多数节点仅有少量连边, 而少数节点拥有大量连边, 因为节点的异质性, 于是特征尺度消失了, 为了给这类网络一个名称, Barabasi 和 Albert(1999) 提出了“无标度”网络的概念。无标度网络模型的主要思想如下: 一个给定 N_0 个节点的小网络, 每个时间步重复增加一个节点, 从这个节点上引出 $m(m \leq N_0)$ 条边, 独立地选取现存的节点之一相连, 概率正比于该节点现有的配位数 (满足相加为 1)。当时间很长时, 人们将得到的配位数按 k^{-3} 分布, 而且保持恒定。这样一个“富者愈富, 贫者愈贫”的模型指出了隐含在许许多多网络中的生长机制。模型更重要的意义在于使人们认识到, 网络结构是由演化过程决定的。“无标度”模型与随机网络

在结构上的不同在图中一目了然(图 1.3)。

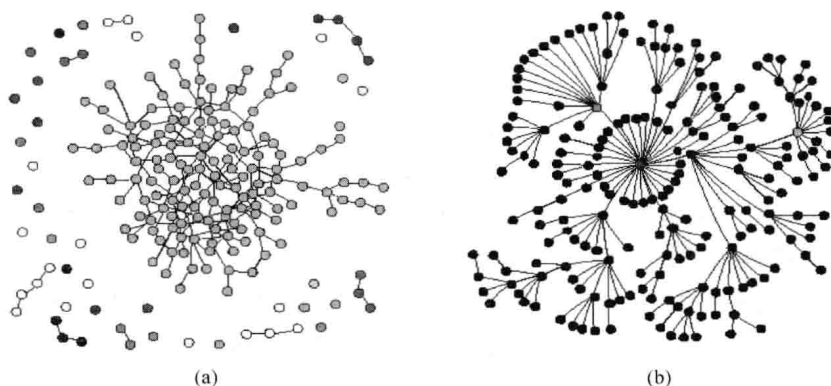


图 1.3 随机网络(a)和“无标度”网络(b)

1.1.5 气候系统复杂网络

气候系统内部的时空关联性是系统集体行为的重要表现形式,刻画了该动力系统的基本性质,为理解其动力过程提供了基础。已有研究成果表明,气象要素场是真实关联和虚假关联并存,短程关联和长程关联交错的复杂系统,且温度场关联性存在 1~7 天、8~20 天、21~30 天的特征时间尺度(支蓉等,2009,2010;支蓉,2010),其显著关联中心在北太平洋地区的时空演变具有准 60 年周期移动特征,这为气候系统复杂网络的构建奠定了基础。同时复杂网络能够将时空动力学特征编码于网络拓扑结构中。因此,复杂网络在气候系统的初始应用,就是研究它的关联拓扑结构特征。

1.1.5.1 全球尺度气候网络的研究

Tsonis 和 Roebber(2004)首次将复杂网络引入气候系统研究中,开创了气候网络研究的新纪元。研究表明全球 500hPa 高度场(大气环流)关联结构表现为“小世界”网络性质,发现赤道地区和中高纬度地区的关联结构截然不同,前者的关联性大,而后者则小许多,属于两个不同的子系统。气候网络这种耦合的结构特征揭示了系统的所有动力学行为都源于两个交织子系统的相互作用,赤道地区子系统在整个气候系统中起着建立南北半球之间联系的作用。龚志强(2009)也得到类似结论,发现 500hPa 高度场 $27.5^{\circ}\text{S} \sim 27.5^{\circ}\text{N}$ 内的节点度的分布同中高纬度的节点度地理分布显著不同,并且界线清晰,表明了两者的具有不同的内在动力学机制,据此网络结构区域特征可以将气候系统分为低纬度子系统和中高纬度子系统。由此也表明,网络的拓扑结构在揭示其内在动力学机制上的可行性和有效性。

气候系统中,与环流场具有同等重要作用的是温度场。龚志强等(2008)讨论了全球地表温度不同时间尺度的网络性质,得出不同时间尺度范围内的温度网络具有不同的属性。1~11 天尺度的温度网络具有“小世界”性质,体现了高频网络的复杂性;11~30 天尺度的则是全局耦合的,表征了低频网络结构的对称性与一致性。在高频尺度上,温度网络节点度在地理分布上纬向特征显著,存在关联结构的关键区域,低频尺度则是海陆差异显

著。同时,网络性质同构建网络的关联阈值间的关系也得到了讨论:指出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外强迫或扰动等作用下的相对稳定性;当关联阈值超出一定范畴以后,其网络的性质也会发生质变,表明如果外强迫足够强,则将对整个气候系统产生重大的影响。Donges 等(2009a)则从线性和非线性两种方式构建地表温度网络,对比分析了局域、介观、全局网络动力拓扑结构的异同。发现两种温度网络在局域、介观上拓扑结构具有高度的相似性,在全局尺度上则有较大的差异。非线性物理过程的引入为检测气候系统的结构提供了新的视角。随后 Donges 等(2009b)基于非线性分析和介数中介性,发现了地表温度场中具有高能量的特殊波列结构,恰与海表洋流相对应,指出了海表洋流在稳定全球(长期平均)气温场中的重要作用。

基于气候系统的层次性,“超网(supernetwork)”或者“网中网(networks of networks)”则是更合理地描述气候系统中相互作用的一种方式和方法。Feng 等(2012)构建了海气相互作用双层网(bilayer networks),直观给出了海表温度场与低空气压场耦合作用的空间主模态。这是传统研究方法和技术如 EOF 分解、SVD 分解、单一海温或气压距平场分析难以实现的。同时给出了集群系数的空间分布,体现了耦合区域的空间影响范围的大小。指出在全球尺度上,印度洋、赤道中东太平洋和 850hPa 西太平洋地区的作用是全球海气系统中最重要空间模态;赤道印度洋对其他海洋的影响较赤道中东太平洋小。Donges 等(2011)利用双层网研究了高度场的三维特征,揭示了一些已知的大气环流特征,有助于解释大气环流中的一些问题尤其是其对气候变化的响应,指出了一些拓扑性质在调节垂直风场中所具有的特殊作用。双层网研究方法是除传统典型相关方法和奇异谱分解方法外,研究两个场之间相关结构的有力工具,具有简单直观的优点。超网则可以研究多个场之间的相关结构特征。

1.1.5.2 区域气候网络的研究

由于气候网络还处于起步阶段,国际上主要是研究全球尺度上的气候系统或者在全球的尺度下划分出几个区域进行对比分析研究。我国则主要从温度这一气象要素出发,率先进行了区域气候网络研究。如周磊等(2008)基于我国的站点资料,应用符号动力学方法,构建了有向加权温度波动网络,与混沌、随机网络进行对比分析,指出在全球变暖的背景下,我国的温度以波动上升为主且温度变化具有类混沌特征;表明温度系统在统计意义上并不是随机的而是同 Lorenz 系统具有一定的相似性,具有一定的规律性可循,但其网络性质要比 Lorenz 系统更加复杂。由于我国地区广阔,气候区域差异显著,进一步研究发现不同的温度变化模态具有不同的空间尺度,其频发模态可分为全国型、次全国型、东部型、西南混合型,而根据网络性质表现的共性,我国温度变化可分为强复杂区(华南和新疆西部)、弱复杂区(内陆大部分地区)和中度复杂区(东北区域)。这一系列工作为温度变化的区域特征研究奠定了理论基础(周磊等,2009)。此外,在温度变化模态种类上,时空相结合的温度模态网络表现出江南、华南偏少,华东、华中地区偏多,华北地区偏少,东北偏多的四极型空间分布特征(周磊等,2010),且温度变化模态的频发对天气尺度的温度预报有一定的指导意义。Wang 和 Tsonis(2009a)则将研究全球温度网络的方法应用到我国的温度研究中,发现我国的温度网络为全局耦合型,且不同于全球尺度上赤道外地区

“小世界”性质,说明我国的温度网络具有不同的局部精细拓扑结构。此外,应用社团结构(community structure)划分方法还发现我国温度网络可明显地分为四个部分,分别为东北区、西北区、西南区和东部区。

1.1.5.3 气候系统复杂网络与大气遥相关

许多观测事实表明,全球各个区域环流的变化与异常具有相关性,即一个区域环流的变化与异常可以引起另一些区域环流的变化与异常,这种区域性环流变化与异常的相关性称为大气环流的遥相关。气候网络研究最初,Tsonis 和 Roebber(2004)就指出在北美和东北太平洋存在超大的节点度,这对应了大气环流中的 PNA。进一步研究表明(Tsonis et al., 2006),北半球节点度较大节点的空间分布也表现出了太平洋北美型的一些特征;当仅画出 30°N 以北的节点度的空间分布时,不仅出现了 NAO 的双极子型模态,而且它还是该区域网络中的主导模态。即气候网络中节点度较大节点的空间分布对应了大气环流中的主要遥相关型。传统上,Wallace 定义的遥相关型仅能描述空间上的长程相关,而复杂网络的节点度空间分布不仅能描述这一特征,还可以描述遥相关的局域长程相关,得到传统定义无法得到的其他空间拓扑结构性质(如空间分布的集群性、无标度性等)。

龚志强(2009)及 Gong 等(2011)构建了 500hPa 环流系统网络,发现中高纬度子系统网络度的空间分布可以实现各种遥相关的图像化,并可以定量描述遥相关型在环流系统中的作用强弱。在北半球 AO 对北半球环流系统的影响最大,相应的南极涛动(AAO)对南半球系统的影响最大。此外,对北半球遥相关年代际变化特征(龚志强等,2012)的研究指出,AO、NAO、EU、PNA 和 WP 等遥相关的作用中心在年代际尺度上存在显著的移动特征,且在 1970 年代中后期和 1990 年代初期均对应有显著的跃变过程。基于这些遥相关型的年代际变化特征,直接从遥相关型的作用强弱而不是信号本身的强弱定义了新的 AO、NAO、EU、PNA 和 WP 指数,更能直接体现其在气候系统变化中的作用。如,在 1976 年以前以 PNA、EUPA 和 WP 三种模态的共同作用为主导,1977 年以后 NAO 的作用显著增强,为五种模态共同作用,1985 年以后 AO 的作用增强,其他模态的作用则相对较弱。研究上述遥相关型指数同我国夏季降水的可能联系,发现五种指数与我国主要区域的降水存在很好的关联,为年代际尺度检测和判断我国降水变化趋势特征提供了有意义的指导。将这些新定义的遥相关指数作为我国夏季降水的回归函数因子,基于多因子模型,用年代际尺度推导年际变率,数值试验验证了该方法的有效性。2005 年夏季降水的独立样本检验则表明了其在我国夏季降水预测中应用的潜在可能性(龚志强,2009)。

Tsonis 等(2008)通过复杂网络结合 EOF 分解研究了遥相关在气候中的作用。指出遥相关的存在使得气候系统更加稳定、信息传输效率更高,并验证了结论的可靠性,还指出 NAO 是北半球中高纬度的气候稳定和信息传输高效的主导模态,其他模态仅是对热带信号的线性响应。

因此,应用复杂网络的主要统计量,不但给出了传统气象上的主要遥相关型,而且在描述遥相关上更具有优越性。利用这一新方法研究各遥相关型的年代际变化和其在气候系统中的作用,为气候变化、突变以及气候内部的信号、信息传输的动力学机理提供了新的解释,并可用于我国实际降水预测。