

复杂网络方法在东亚地区夏季极端降水研究中的应用^{*}

何苏红¹ 龚志强² 叶芳³ 封国林²

HE Suhong¹ GONG Zhiqiang² YE Fang³ FENG Guolin²

1. 陆军工程大学理学院,南京,211101

2. 中国气象局国家气候中心,北京,100081

3. 国防科技大学气象与海洋学院,南京,211101

1. *Institute of Science, Army Engineering University, Nanjing 211101, China*

2. *Laboratory for Climate Diagnosing of National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

3. *College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China*

2016-12-13 收稿,2017-05-23 改回。

何苏红,龚志强,叶芳,封国林. 2017. 复杂网络方法在东亚地区夏季极端降水研究中的应用. 气象学报, 75(6):894-902

He Suhong, Gong Zhiqiang, Ye Fang, Feng Guolin. 2017. Application of complex network method to summer extreme rainfall in East Asia. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(6):894-902

Abstract Based on daily rainfall data over East Asia for the period of 1971 to 2007, nonlinear correlations between different grid points are calculated by event synchronization method, and an extreme rainfall network over East Asia is built. By using complex network method, regional characteristics of extreme rainfall over East Asia are analyzed and a dynamics prediction model is constructed. Spatial distribution of degree shows that spatial synchronization is better in northern inland region than in coastal region. It is found that grid points in different regions have different spatial correlation extents, and the northern inland has larger spatial correlation extent than the coastal region. Furthermore, the results show that the prediction accuracy is higher in coastal region than in northern inland region. This is partly because of the short average link distance among grid points, and partly because of the extreme precipitation intensity. The prediction model constructed from the perspective of space and time continuity has the ability to predict extreme rainfall in East Asia on a certain level, and it has some potential application values in the research of extreme rainfall.

Key words Complex network, Extreme rainfall, Predict simulation, Event synchronization method

摘要 利用1971—2007年东亚地区夏季(6—8月)逐日格点降水资料,借助事件同步法建立格点之间的非线性相关,构建了极端降水复杂网络,从复杂网络的角度研究了东亚地区极端降水的区域性特征,并利用复杂网络中的关联强度和关联方向信息,从极端降水时、空记忆性的角度构建了预测模型。复杂网络结构特征量表明:北部陆地地区的夏季极端降水空间同步性好,而沿海地区的夏季极端降水空间同步性差。不同地区的格点与周围格点的关联空间范围不一样,沿海地区格点之间远距离连接少,关联空间范围小,北部陆地地区格点之间远距离连接多,关联空间范围较大。极端降水预测模拟结果显示沿海地区的预测准确率一般高于北部陆地地区,其原因是该地区极端降水强度大、降水密集度高且空格点的平均连接距离小、直接关联性强。研究表明,从时、空记忆的角度构建的预测模型对东亚地区的极端降水具有一定的预测能力,在极端降水

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(41605048、41575082、41530531 和 414775064)、国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006021)。

作者简介:何苏红,主要从事气候系统复杂网络的应用研究。E-mail: hsh2046@sina.com

通讯作者:龚志强,主要从事动力-统计相结合的季节降水预测研究。E-mail: gongzq@cma.gov.cn

研究中存在一定的潜在应用价值。

关键词 复杂网络, 极端降水, 预测模拟, 事件同步法

中图法分类号 P426.6 P468.0

1 引言

极端(强)降水一般指远强于某地气候态降水强度且具有极低发生概率的降水事件。由于该类事件在短时间内产生大量降水,可导致严重的洪涝灾害,甚至诱发滑坡、泥石流等地质灾害,对生命安全、社会财产及生态系统造成严重影响。尤其在全球气候变暖的背景下(IPCC,2001),各地区极端降水事件频繁发生并不断加剧(Meehl, et al, 2000; Easterling, et al, 2000; Karl, et al, 1998)。目前,关于极端降水的研究已成为中外气候学研究的热点问题之一(Dankers, et al, 2007)。

当前动力模式对极端降水预报能力较弱,其重要原因在于气候系统内部站点(或格点)等基本单元之间的极端降水相互作用机制还不够清晰,这使得从非线性相互作用和联系的角度研究极端降水的时、空特性及可预测性就显得尤为重要。气候系统复杂网络理论作为一种新兴的复杂系统结构分析的有效方法(Watts, et al, 1998; Barabási, et al, 1999),能够从宏观整体角度分析站点(或格点)间的相互作用和联系,能通过简单的网络结构特征量表征基本单元是否具有近似的动力学行为特征。目前,复杂网络理论在气候系统研究领域得到了广泛应用。例如 Tsonis 等(2008)构建了 500 hPa 高度场的关联网络,分析了其远距离和短距离相关的变化;龚志强等(2008, 2012)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、空演变规律;Wang 等(2009)将复杂网络方法应用到中国气温变化的研究中,发现中国的气温网络为全局耦合型,而不同于全球尺度上赤道外地区的“小世界”性质。以上研究结果均表明复杂网络是分析气候系统内部各种复杂动力学行为的新的有效工具。但是,关于气候系统复杂网络的研究目前主要还是集中在高度场和温度场(龚志强等, 2012; 支蓉等, 2012; 季飞等, 2011; 王晓娟等, 2009; Gong, et al, 2011, 2016)。研究者们通常利用皮尔逊(Pearson)关联法(Tsonis, et al, 2008)计算两个格点上气候变量(例如气温)时间序列的相关系数,进而构建气候系统复

杂网络。在处理过程中,皮尔逊关联法要求气候变量必须是连续的且呈正态分布。与高度场和气温场相比,降水的时间连续性差,且更具有非正态的特征,传统方法很难通过降水时间序列计算格点间的关联而建立表征相互作用的复杂网络,因此,目前涉及降水复杂网络的研究相对较少。

Quiroga 等(2002)在研究脑电图信号序列时提出了一种简单快速的网络构建方法——事件同步法,并给出定义:如果两个格点上发生的两个事件的时间间隔小于同步延迟时间,则将这两个事件称为同步事件。与传统方法注重气候变量大小变化不同的是,事件同步法首先定义事件,然后从事件时间同步的角度出发建立格点之间的非线性相关,这可以在一定程度上解决时间连续性差及非正态分布的问题。事件同步法的优点是可以应用到任何可以定义事件的时间序列,目前在脑电信号、心脏搏动、股票交易、气象等领域有着广泛的应用,气象上主要是用该方法处理极端事件,例如极端气温、极端降水等。Malik 等(2012)首次尝试利用事件同步法构建了南亚地区夏季极端降水复杂网络,初步进行了南亚地区夏季极端降水时空特性的研究。Boers 等(2014)同样把这种方法用于南亚地区冬季极端降水的研究上,从复杂网络的角度研究了南亚两个子区域极端降水的传输方向,从而实现了一个区域洪涝的预警。这一工作使复杂网络理论在气象上的预测应用跨上了一个新台阶。Weimer 等(2015)也尝试利用复杂网络的方法对欧洲的极端高温进行预测研究,并发现复杂网络方法与传统方法相当,甚至在有些区域具有更高的预测技巧。中国处于全球变率最大的东亚季风区,频繁的季风活动会对气候变化产生很大的影响,从而给研究工作带来困难(何文平等, 2012)。东亚与南亚、欧洲等地区具有不一样的气候特征,而目前还没有基于复杂网络方法开展东亚极端降水时、空特性及预测方面的研究工作。因此,本研究尝试利用事件同步法构建东亚地区夏季极端降水复杂网络,然后从网络的角度分析此区域格点间极端降水相互作用和联系,并进一步利用复杂网络中格点的关联强度和关联方向信息,构建极端降水

的动力预测模型,并利用此模型对极端降水进行预测试验,这些工作将为东亚地区极端降水的预测提供新的思路。

2 资料

采用日本 APHRODITE 逐日亚洲陆地降水数据集中的东亚夏季(6—8月)资料,研究区域(10° — 55° N, 100° — 135° E),分辨率是 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,共 1575 个格点,研究资料长度为 1971—2007 年。高精度的格点数据可以在一定程度上克服实测站点分布不均的问题,APHRODITE 资料是目前唯一覆盖整个亚洲地区的时间跨度长、分辨率高的降水资料(韩振宇等,2012)。为了验证该数据集的可靠性,选用中国国家气象中心 731 站点的逐日降水资料,并由逐日资料处理得到同时段的夏季降水资料。图 1 是 APHRODITE 资料及站点观测资料的夏季累计降水量空间分布对比。中国夏季累计降水量存在很强的空间不均匀性,两套资料对此空间分布特征的描述基

本一致,都体现了自西北向东南增多的空间分布特征。虽然累计降水量在江南西部等地区存在一定的差异,但由于本研究并不是针对精确的降水量进行比较分析,所以目前的差异对研究结果影响不大。此外,也统计了夏季降水日数的空间分布(图略),发现 APHRODITE 降水资料和站点观测资料的结果具有较强的一致性。韩振宇等(2012)也从气候态、不同等级降水量分布以及长期变化等方面进行了分析,肯定了 APHRODITE 降水资料在中国降水特征分析中的适用性。因此,采用 APHRODITE 降水资料开展极端降水复杂网络的构建等研究工作是可行的。

将 37 a 的 APHRODITE 逐日降水资料按升序排列,通过百分位阈值方法(Boers, et al, 2014)确定极端降水事件阈值 L_i^j (i 为格点序号)。选取第 10 个百分位值的降水作为极端降水阈值,不同的格点具有不同的阈值,同一个格点阈值是确定的。

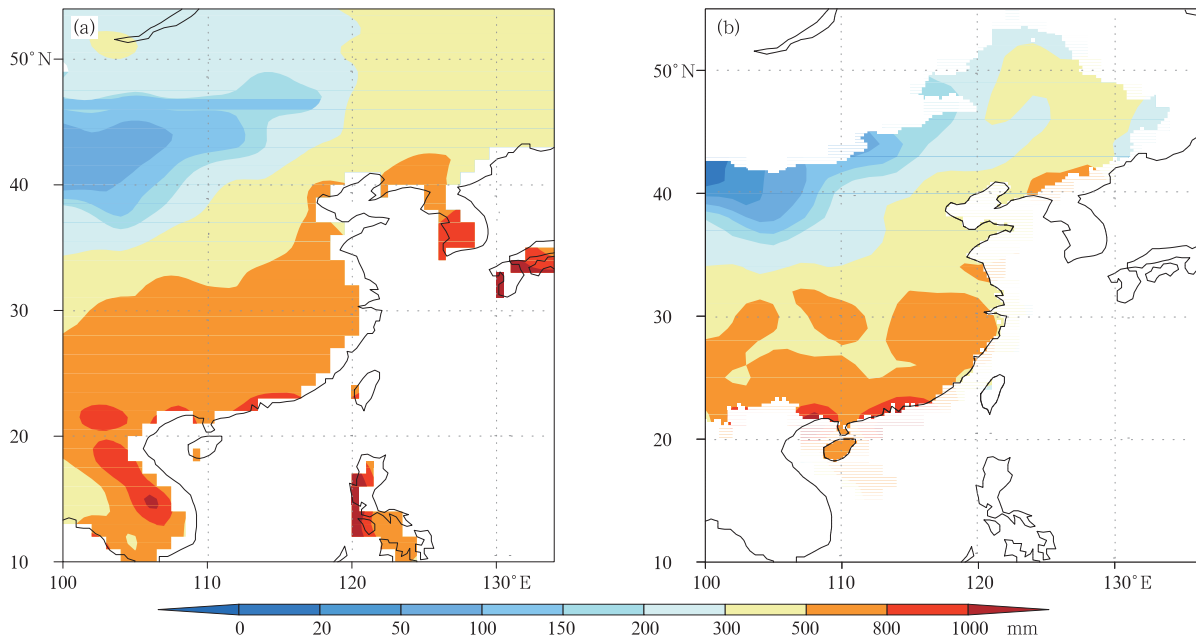


图 1 夏季累计降水量空间分布

(a. 格点资料, b. 站点资料)

Fig. 1 Comparison of spatial distributions of cumulative precipitation in summer between gridded data (a) and station data (b)

3 极端降水复杂网络的构建

假如格点 i 在 t_i^l 时刻发生了极端降水事件,格

点 j 在 t_m^j 时刻发生了极端降水事件 ($l = 1, 2, \dots, s_i$, $m = 1, 2, \dots, s_j$), s_i 和 s_j 分别是格点 i 和 j 发生的极端降水事件的总次数。如果两个事件的时间间隔小

于 τ_{lm}^{ij} , 那么这两个事件称为同步事件 (Quiroga, et al, 2002), τ_{lm}^{ij} 定义为

$$\tau_{lm}^{ij} = \min(t_{l+1}^i - t_l^i, t_l^i - t_{l-1}^i, t_{m+1}^j - t_m^j, t_m^j - t_{m-1}^j) / 2 \quad (1)$$

计算格点 i 与 j 发生同步事件的次数, 定义 $c(i|j)$

$$c(i|j) = \sum_{l=1}^{s_i} \sum_{m=1}^{s_j} J_{lm} \quad (2)$$

式中

$$J_{lm} = \begin{cases} 1 & 0 < t_l^i - t_m^j < \tau_{lm}^{ij} \\ 1/2 & t_l^i = t_m^j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$c(i|j)$ 反映了极端降水事件在格点 j 先发生、然后很快在格点 i 发生的次数, 类似亦可以得到 $c(j|i)$ 。

构建对称矩阵 Q 和非对称矩阵 q

$$Q_{ij} = \frac{c(i|j) + c(j|i)}{\sqrt{s_i s_j}} \quad (4)$$

$$q_{ij} = \frac{c(i|j) - c(j|i)}{\sqrt{s_i s_j}} \quad (5)$$

Q_{ij} 反映了格点 i 与 j 极端降水的同步强度, q_{ij} 则反映了这两个格点之间极端降水的时间延迟关系 (Malik, et al, 2012)。 $Q_{ij} \in [0, 1]$, $Q_{ij} = 1$ 代表格点 i 与 j 的极端降水事件完全同步。 $q_{ij} \in [-1, 1]$, $q_{ij} > 0$ 表示格点 i 发生的极端降水事件大部分落后于格点 j , $q_{ij} = 1$ 则代表格点 i 发生的极端降水事件总是落后于格点 j , 反之, 则表示格点 i 发生的极端降水事件超前于格点 j 。

为了选取主要的关联, 剔除次要的关联, 取 5% 的分位数作为 Q 的阈值 θ^Q , 即只有 5% 的格点相连, 将对称矩阵 Q 转换成无权重的对称矩阵 A^Q

$$A_{ij}^Q = \begin{cases} 1 & Q_{ij} > \theta^Q \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

同理, 计算 q 的阈值 θ^q , 将非对称矩阵 q 转换成无权重的非对称矩阵 A^q

$$A_{ij}^q = \begin{cases} 1 & q_{ij} > |\theta^q| \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

进一步构建代表极端降水复杂网络的非对称矩阵 A^{Qq}

$$A_{ij}^{Qq} = A_{ij}^Q A_{ij}^q \quad (8)$$

A^{Qq} 中包含了两层信息: 一是格点极端降水同步关联情况, 二是格点极端降水时间延迟方向。

4 极端降水复杂网络结构特征量的分析

中国已有不少学者利用站点(或格点)气象数据

分析达到绝对阈值或相对阈值条件的降水极值的空间分布及变化特点, 从而研究极端降水的区域性特征。杨金虎等(2008)对中国年极端降水事件的时、空特征进行了探讨分析, 翟盘茂等(1999, 2007)总结了气候变化背景下极端降水事件变化观测研究的主要进展, 并讨论了中国各地区极端降水事件的变化特征, Chen 等(2013)提出了持续时间长并容易引起洪涝灾害的极端降水事件的判断方法, 讨论了这类事件在中国区域的空间分布, Ren 等(2012)、Zou 等(2015)借助“糖葫芦串”模型的思路, 定义区域强降水事件, 并分析此类极端降水事件的时、空特性。黄琰等(2011)从极值概率分布的角度研究了中国极端降水极值的分布及变化情况。与已有研究不同的是, 本研究将从复杂网络的角度研究东亚地区夏季极端降水的区域性特征。为了反映格点间极端降水的相互作用关系, 引入复杂网络结构特征量——度, 其定义为

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^N A_{ij}^Q}{N-1} \quad (9)$$

式中, N 是格点总个数, k_i 反映了第 i 个格点连接其他格点的数目, 某格点的度越大说明与该格点极端降水同步的格点数越多。

图2是格点度的空间分布, 直观显示了格点之

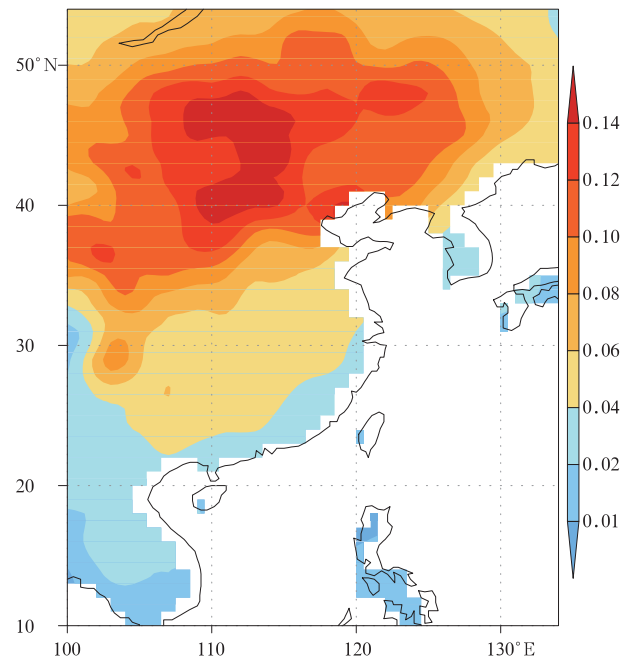


图2 格点度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of degree

间极端降水的同步性。从图 2 可以看出,蒙古国及中国内蒙古的中部地区,格点的度超过 0.1,而中南半岛、菲律宾、中国南海、朝鲜、日本等沿海地区,格点的度低于 0.04,甚至有的沿海地区格点的度只有 0.01。这说明大部分的沿海地区夏季极端降水空间同步性差,北部陆地地区的夏季极端降水空间同步性好。同时可以观察到从沿海地区向内陆地区延伸,格点的度在逐渐增大,即极端降水空间同步性在逐渐增强,这与闵岫等(2008)的研究结果一致。图 2 表明北部陆地地区格点之间长距离连接较多,关联空间范围较大,而沿海地区格点之间长距离连接较少,关联空间范围较小。初步分析度大的地方是因为格点具有大尺度的空间连接,即在那些区域极端降水与大尺度天气系统的联系更加紧密。从环流背景上看,东南沿海地区以东亚夏季风环流的影响为主,北部陆地地区主要受东亚夏季风环流和西风带大尺度环流的共同影响;从天气系统上看,东南沿海地区以局地热力对流形成的小尺度天气系统为主,北部陆地地区主要受大尺度的西太平洋高压、高

空槽等天气系统的共同影响。

图 2 只能大致反映各格点降水同步性的大小,却无法获知哪些格点与该格点降水同步。为了进一步研究极端降水的区域性特征,挑选了 5 个典型区域:内陆极端降水区、东北亚极端降水区、长江极端降水区、华南极端降水区和中南半岛极端降水区,并在 5 个区域分别挑选 24 个格点(图 3 中粉红色格子),等值线的值表示了某一格点与所选 24 个格点的连边个数。图 3a—e 均表明越接近粉红色格子区域的格点,与所选 24 个格点的降水同步性越好。同时可以明显看出不同地区的格点与周围格点的同步空间范围是不一样的,内陆极端降水区和东北亚极端降水区同步空间大,长江极端降水区次之,华南极端降水区和中南半岛极端降水区最小。据此,可以分析如果一个区域发生了极端降水,那么其周边有多大范围、多大可能也发生极端降水。因此极端降水区域关联性的分析,为评估地区性洪涝发生的可能性提供了支持。

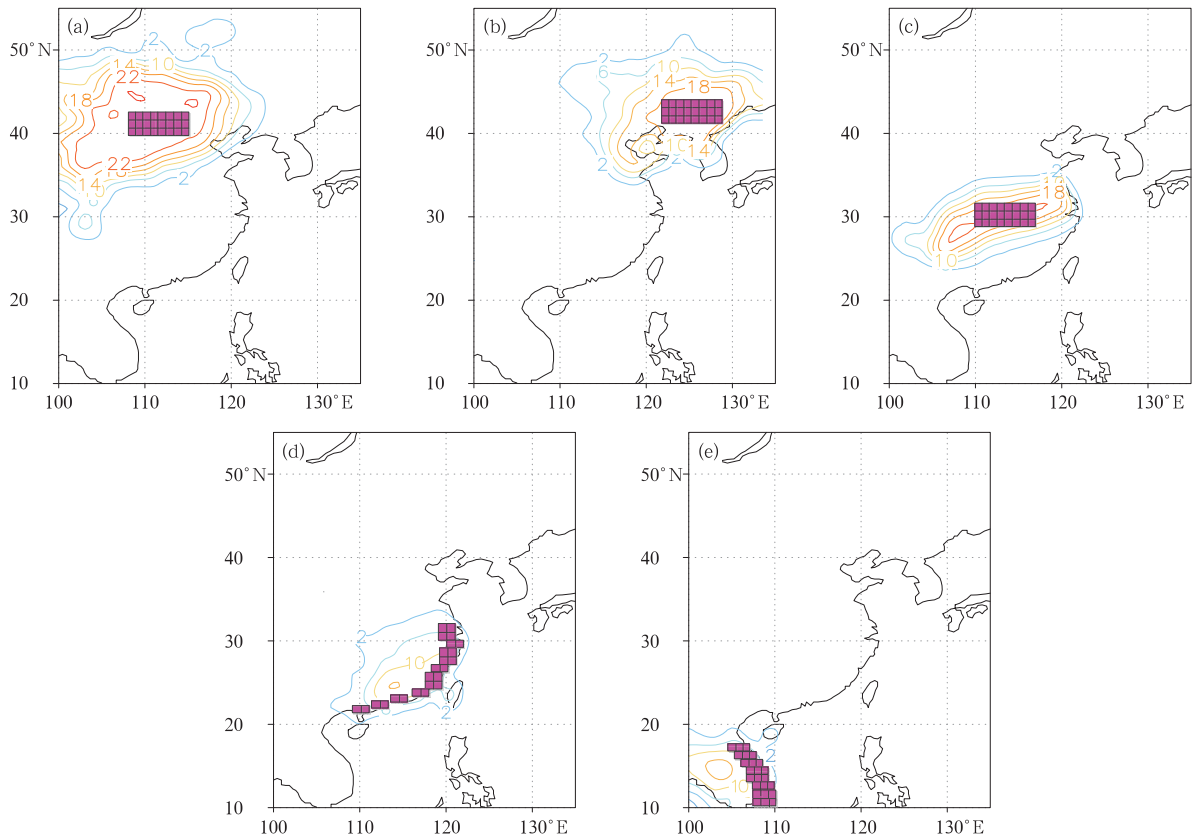


图 3 其他格点与 24 个指定格点(粉红色格子)的连边个数分布

Fig. 3 Links between a set of 24 reference grid points (gridded red matrix) and other grid points

如果将 A^Q 换成式(7)中的 A^q , 就可以计算格点极端降水时间延迟方向。 A^q 表示的是一个有向网络, 其格点度分为出度 k_i^{out} 和入度 k_i^{in} , 出度是指从某一格点指向其他格点的边数, 入度则是指从其他格点指向该格点的边数(周磊等, 2008)。以文中构建的极端降水复杂网络为例, 一个格点出度的大小反映的是该格点比其他格点极端降水滞后的程度, 而一个格点入度的大小反映的则是该格点比其他格点极端降水超前的程度。将二者之差记作 Δk_i , $\Delta k_i = k_i^{\text{out}} - k_i^{\text{in}}$ 。

图4是出度减入度的空间分布, 北部陆地地区的 $\Delta k_i > 0$, 说明该地区极端降水事件比较滞后; 而沿海地区的 $\Delta k_i < 0$, 说明该地区极端降水事件比较超前。极端降水事件的发生受水汽输送、地形、天气系统等多种因素的影响。一方面, 受东亚夏季风的影响, 东亚地区的水汽主要来源于印度洋上的赤道气团和西太平洋上的热带海洋气团; 另一方面, 夏季, 东亚沿海地区的主要影响天气系统为西太平洋副热带高压(副高), 受副高脊线北跳的影响, 雨带也逐渐北移。因此, 内陆地区出现极端降水事件的时间一般要滞后于沿海地区。从图4还可以看出, 东北平原地区的出度减入度最小, 这可能与其特殊的地形及天气系统东北低压的频繁出现有关。

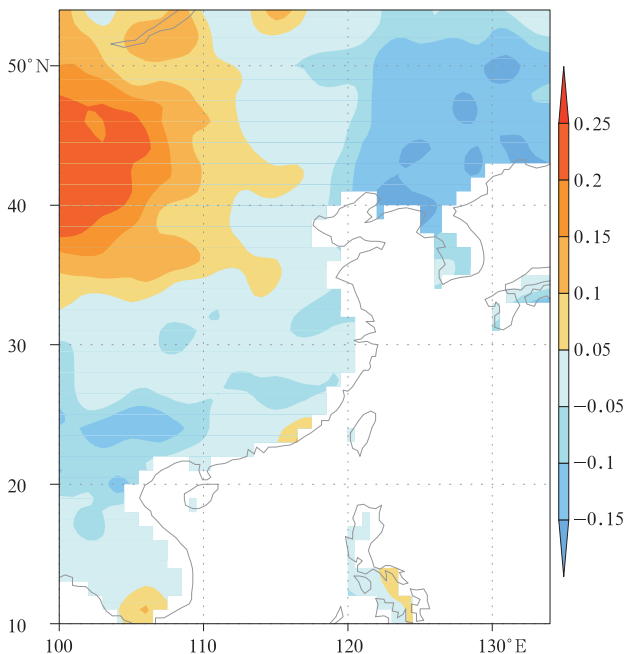


图4 出度减入度的空间分布

Fig. 4 Distribution of outdegree minus indegree

利用事件同步法构建的复杂网络是一个双向网络, 其中不仅包含了格点间强降水关联强度信息, 而且还包含了关联方向信息, 因此, 借助出度减入度的空间分布可以用来分析格点之间极端降水的超前滞后关系, 因而可从统计学的角度研究水汽输送的方向。

5 动力预测模型的构建

曹鸿兴等(2007)对大气记忆性进行了系统研究, 认为大气记忆性与其可预测性存在很强的关联。虽然极端降水强度大、空间尺度小、持续时间短, 但仍然存在一定的时、空记忆性。空间某一格点的极端降水并不是孤立发生的, 它可能会受到前一时刻周围格点极端降水的影响, 如果这种影响越大, 该格点发生极端降水的概率也越高。本研究从第3部分建立的极端降水复杂网络中提取关联强度和关联方向信息, 将极端降水的发生、发展和消亡过程以类似元胞自动机的形式进行(曹兴芹, 2006), 建立动力学方程, 实现对极端降水的预测模拟。

如果一个格点 i 在 t 时刻发生了极端降水事件, 它将对周围的格点 j 产生影响, 在方程建立过程中尝试考虑格点 i 的降水量、格点 i 与 j 的关联大小和关联方向、格点 i 与 j 的距离等因素。如果格点 j 受其他发生极端降水格点的影响大到一定的程度, 那么格点 j 在下一时刻就很可能发生极端降水。定义 ρ_j 来反映格点 j 受其他发生极端降水格点的影响程度

$$\rho_j(t) = \frac{\sum_{i \in V(t-m)} \frac{1}{L_{ij}} A_{ij}^{Q_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{L_{ij}} A_{ij}^{Q_i}} \quad (10)$$

式中, N 是所有格点总数, $V(t-m)$ 是在 $(t-m)$ 时刻发生极端降水的格点集合, L_{ij} 是格点 i 与 j 的距离, 可以采用如下计算方法

$$L_{ij} = R \sqrt{(\delta\phi_{ij})^2 + (\cos(\phi_m) \delta\varphi_{ij})^2} \quad (11)$$

式中, $\delta\phi_{ij}$ 和 $\delta\varphi_{ij}$ 是格点 i 与 j 的纬度差和经度差, ϕ_m 是这两个格点的经度平均值, R 是地球半径(Malik, et al, 2012)。

设 ρ_j 的阈值为 ρ_0 , 如果格点 j 受其他发生极端降水的格点的影响大到一定的程度(即 $\rho_j > \rho_0$), 那么格点 j 在下一时刻就会发生极端降水, 反之则不

会发生。这样就可以预测各格点是否发生极端降水事件了。为了反映预测效果,定义两个比率 $\frac{\epsilon_p}{E_p}$ 和 $\frac{E_p}{E_T}$, 其中 ϵ_p 是正确预测的事件数, E_p 是预测的事件数, E_T 是事件总数。利用 1971—1985 年的东亚夏季极端降水资料确定阈值 ρ_0 , 事先给 ρ_0 赋一个值, 按上述原理对此 15 a 的极端降水进行预测, 把 $\frac{\epsilon_p}{E_p} \approx \frac{E_p}{E_T}$ 时的 ρ_0 值称为阈值。例如, 当 $m=1$, 即利用当天的降水数据预测第 2 天的极端降水, $\rho_0 \approx 0.59$ 。

6 模拟结果与分析

图 5 是后 21 a (1986—2007 年) 预测准确率 ($\epsilon = \frac{\epsilon_p}{E_p}$) 的空间分布, 可以看出, 中南半岛、菲律宾、中国南海、华南、蒙古国东部等地区, 预测准确率超过 50%, 而北部陆地地区预测准确率却只有 20% 左右。除蒙古国东部以外, 沿海地区的预测准确率一般要高于北部陆地地区。改变式(10)中的 m 值, 例如令 $m=2$, 即利用当天的降水数据预测第 3 天的极端降水, 模拟结果显示预测准确率下降较快。为了进一步研究影响极端降水预测准确率的因素, 还计算了格点的平均连接距离

$$l_i = \frac{\sum_{j=1}^N L_{ij} A_{ij}^Q}{n_i} \quad (12)$$

式中, L_{ij} 是格点 i 与 j 的距离, n_i 是与格点 i 有连接的格点总个数。图 6 是格点平均连接距离空间分布, 可以看出沿海地区的格点平均连接距离要比北部陆地地区小一些。对比图 2、5 和 6, 可发现度大的即关联多的区域对应的格点平均连接距离也大, 但是预测准确率反而低, 这说明真正影响预测准确率的一个因素不是格点之间连接数的多少, 而是格点平均连接距离的大小。这也是为什么沿海地区格点之间的连接少, 但预测准确率高的一個原因。同时从式(10)还可以分析出, 如果极端降水的格点数目越多、降水强度越大、降水越密集, 对应预测的有用信息就越多, 预测准确率就越高, 此结论已通过对极端降水个例的预测模拟得到验证。

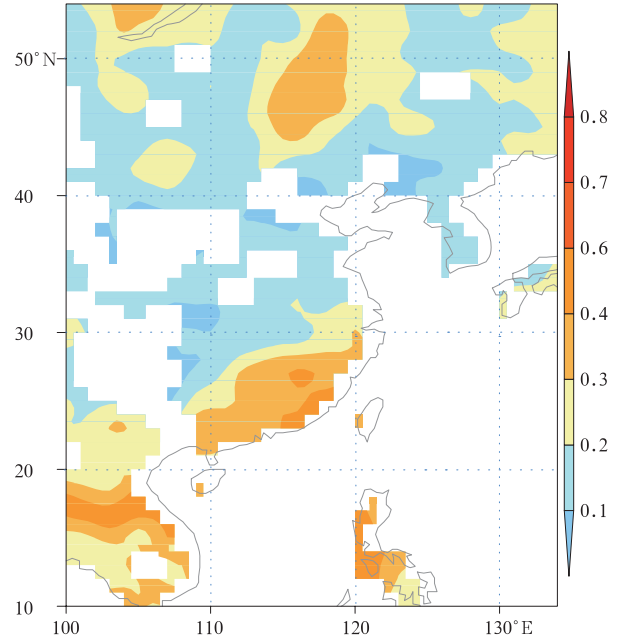


图 5 预测准确率的空间分布

(利用当天降水数据预测第 2 天的极端降水)

Fig. 5 Spatial distribution of prediction accuracy ϵ for the last half of the data with 1 d delay

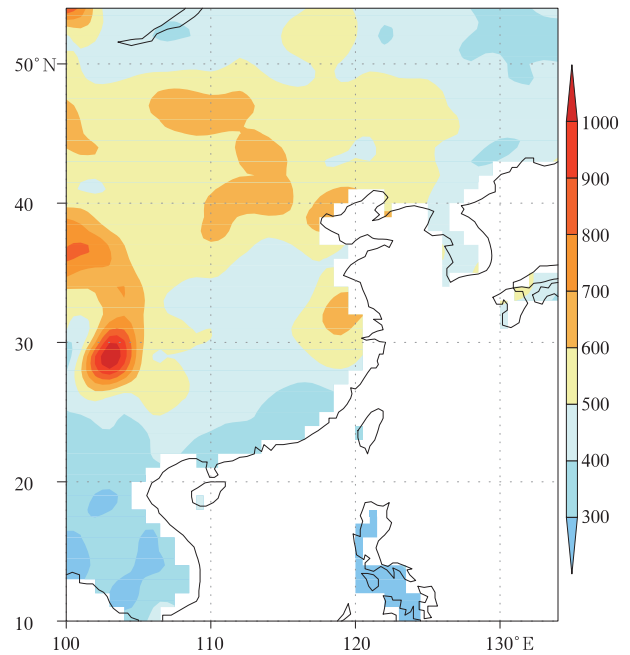


图 6 格点平均连接距离空间分布(单位: km)

Fig. 6 Distribution of average link distance (unit: km)

7 结 论

利用事件同步法构建了东亚地区的极端降水复

杂网络,借助复杂网络结构特征量分析了极端降水的区域特性。在极端降水时、空记忆性的基础上构建了快速简单的预测模型,并研究了影响预测率的因素。主要结论如下:

(1) 事件同步法是从事件的时间同步角度出发建立格点之间的关联,所构建的强降水复杂网络是一个双向网络,其中既包含关联强度信息(反映格点间强降水事件发生的同步性),又包含关联方向信息(反映格点间强降水事件发生的时序)。事件同步法的这种独特优势为研究极端降水的时、空特性及可预测性提供了一条新途径。

(2) 复杂网络结构特征量——度的空间分布表明:从沿海地区向内陆地区延伸,极端降水空间同步性在逐渐增强。北部陆地地区格点之间的远距离连接较多,关联空间大,而沿海地区格点之间的远距离连接较少,关联空间小。同时,出度减入度的空间分布揭示东亚北部陆地地区出现极端降水事件的时间一般要滞后于沿海地区,这与目前东亚夏季降水雨带北移的结论是一致的。出度减入度的空间分布为研究水汽输送方向提供了一个新方法。

(3) 虽然沿海地区格点之间的长距离连接少,但预测模型对 1986—2007 年的极端降水预测模拟结果却显示该地区的预测准确率一般要高于北部陆地地区,这可能是由于陆地地区的格点平均连接距离小的缘故。同时研究结果还表明如果极端降水的格点数目越多、降水强度越大、降水越密集,对应预测的有用信息就越多,预测准确率就越高。

本研究尝试从极端降水时空记忆性的角度建立预测模型,在沿海地区达到了一定的预测效果,这说明在后期极端降水预测研究中时、空记忆性是可以考虑的一个因素。但由于东亚夏季极端降水的过程十分复杂,受水汽输送、地形、天气系统等多种因素的影响,仅仅考虑时、空记忆性还是不够的。在后期工作中将进一步将东亚地区划分成若干典型极端降水区域,从复杂网络的角度深入研究典型极端降水区域间极端降水相互传递作用规律,分析极端降水可能的传递方向、极端降水从一个区域输送到另一个区域的时间跨度等。另外,还可进一步考虑东亚夏季风、西北太平洋海温等因素对东亚地区夏季极端降水的影响,研究东亚夏季风指数、西北太平洋海温指数等与极端降水预测准确率之间的年变化对应关系,探讨能否将 1—2 种关系较好的指数转化为影

响预测模型的外强迫参数,并通过数值试验和拟合分析等,将外部强迫因子转化为极端降水的控制参数,进而提高模型的预测准确率。

参考文献

- 曹鸿兴,朱正心,虞海燕. 2007. 自忆性建模及其气候应用. 贵州气象, 31(3): 6-9. Cao H X, Zhu Z X, Yu H Y. 2007. Self-memorization modeling and its application to climate. J Guizhou Meteor, 31(3): 6-9 (in Chinese)
- 曹兴芹. 2006. 复杂系统的元胞自动机方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 30-40. Cao X Q. 2006. The cellular automata studying of complex system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 30-40 (in Chinese)
- 龚志强,周磊,支蓉等. 2008. 1—30 d 尺度温度关联网络动力学统计性质研究. 物理学报, 57(8): 5351-5360. Gong Z Q, Zhou L, Zhi R, et al. 2008. Analysis of dynamical statistical characteristics of temperature correlation networks of 1 - 30 d scales. Acta Phys Sinica, 57(8): 5351-5360 (in Chinese)
- 龚志强,侯威,封国林. 2012. 赤道中东太平洋海温关联指数及其与 ENSO 强弱作用年相关的研究. 气象学报, 70(5): 1074-1083. Gong Z Q, Hou W, Feng G L. 2012. Study of tropical middle-eastern Pacific sea surface temperature correlation index and probable correlation with ENSO effects. Acta Meteor Sinica, 70(5): 1074-1083 (in Chinese)
- 韩振宇,周天军. 2012. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性. 大气科学, 36(2): 361-373. Han Z Y, Zhou T J. 2012. Assessing the quality of APHRODITE high-resolution daily precipitation dataset over contiguous China. Chinese J Atmos Sci, 36(2): 361-373 (in Chinese)
- 何文平,王柳,万仕全等. 2012. 旱涝预测的演化建模方法. 物理学报, 61(11): 119201. He W P, Wang L, Wan S Q, et al. 2012. Evolutionary modeling for dryness and wetness prediction. Acta Phys Sinica, 61(11): 119201 (in Chinese)
- 黄琰,封国林,董文杰. 2011. 近 50 年中国气温、降水极值分区的时空变化特征. 气象学报, 69(1): 125-136. Huang Y, Feng G L, Dong W J. 2011. Temporal changes in the patterns of extreme air temperature and precipitation in the various regions of China in recent 50 years. Acta Meteor Sinica, 69(1): 125-136 (in Chinese)
- 季飞,支蓉,龚志强等. 2011. 全球环流系统关联性的时空演化特征研究. 气象学报, 69(6): 1038-1045. Ji F, Zhi R, Gong Z Q, et al. 2011. Analysis of temporal and spatial characteristics of correlations between the global circulation systems. Acta Meteor Sinica, 69(6): 1038-1045 (in Chinese)
- 闵岫,钱永甫. 2008. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究. 水科学进展, 19(6): 763-771. Min S, Qian Y F. 2008. Regionality and persistence of extreme precipitation events in China. Adv Water Sci, 19(6): 763-771 (in Chinese)
- 王晓娟,龚志强,周磊等. 2009. 温度关联网络稳定性分析 I: 极端

- 事件的影响. 物理学报, 58(9): 6651-6658. Wang X J, Gong Z Q, Zhou L, et al. 2009. Analysis of the stability of temperature networks. Part I: The influence of extreme events. Acta Phys Sinica, 58(9): 6651-6658 (in Chinese)
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征. 气候与环境研究, 13(1): 75-83. Yang J H, Jiang Z H, Wang P X, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China. Climatic Environ Res, 13(1): 75-83 (in Chinese)
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测. 气象学报, 57(2): 208-216. Zhai P M, Ren F M, Zhang Q. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes. Acta Meteor Sinica, 57(2): 208-216 (in Chinese)
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究. 气候变化研究进展, 3(3): 144-148. Zhai P M, Wang C C, Li W. 2007. A review on study of change in precipitation extremes. Adv Climate Change Res, 3(3): 144-148 (in Chinese)
- 支蓉, 龚志强, 王启光等. 2012. 全球增暖和极端事件对全球温度场关联性的影响. 气象学报, 70(4): 728-735. Zhi R, Gong Z Q, Wang Q G, et al. 2012. The influence of global warming and extreme events on the correlation of the global temperature field. Acta Meteor Sinica, 70(4): 728-735 (in Chinese)
- 周磊, 龚志强, 支蓉等. 2008. 利用复杂网络研究中国温度序列的拓扑性质. 物理学报, 57(11): 7380-7389. Zhou L, Gong Z Q, Zhi R, et al. 2008. An approach to research the topology of Chinese temperature sequence based on complex network. Acta Phys Sinica, 57(11): 7380-7389 (in Chinese)
- Barabási A L, Albert R. 1999. Emergence of scaling in random networks. Science, 286(5439): 509-512
- Boers N, Bookhagen B, Barbosa H M J, et al. 2014. Prediction of extreme floods in the eastern Central Andes based on a complex networks approach. Nat Commun, 5: 5199
- Chen Y, Zhai P M. 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951-2010. Climate Res, 57(2): 143-155
- Dankers R, Christensen O B, Feyen L, et al. 2007. Evaluation of very high-resolution climate model data for simulating flood hazards in the Upper Danube Basin. J Hydrol, 347(3-4): 319-331
- Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. Bull Amer Meteor Soc, 81(3): 417-425
- Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, et al. 2011. Circulation system complex networks and teleconnections. Chinese Phys B, 12(7): 079201
- Gong Z Q, Hutin C, Feng G L. 2016. Methods for improving the prediction skill of summer precipitation over East Asia - West Pacific. Wea Forecasting, 31(4): 1381-1392
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press, 1-785
- Karl T R, Knight R W. 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. Bull Amer Meteor Soc, 79(2): 231-241
- Malik N, Bookhagen B, Marwan N, et al. 2012. Analysis of spatial and temporal extreme monsoonal rainfall over South Asia using complex networks. Climate Dyn, 39(3-4): 971-987
- Meehl G A, Karl T R, Easterling D R, et al. 2000. An introduction to trends in extreme weather and climate events: Observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. Bull Amer Meteor Soc, 81(3): 413-416
- Quiroga R Q, Kreuz T, Grassberger P. 2002. Event synchronization: A simple and fast method to measure synchronicity and time delay patterns. Phys Rev E, 66(4): 041904
- Ren F M, Cui D L, Gong Z Q, et al. 2012. An objective identification technique for regional extreme events. J Climate, 25(20): 7015-7027
- Tsonis A A, Swanson K L. 2008. Topology and predictability of El Niño and La Niña networks. Phys Rev Lett, 100(22): 228502
- Wang G L, Tsonis A A. 2009. A preliminary investigation on the topology of Chinese climate networks. Chinese Phys B, 18(11): 5091-5096
- Watts D J, Strogatz S H. 1998. Collective dynamics of "small-world" networks. Nature, 393(6684): 440-442
- Weimer M, Mieruch S, Schädler G, et al. 2015. Predicting climate extremes: A complex network approach. Nonlin Processes Geophys Discuss, 2(5): 1481-1505
- Zou X K, Ren F M. 2015. Changes in regional heavy rainfall events in China during 1961 - 2012. Adv Atmos Sci, 32(5): 704-714