

全球地表温度大气遥相关路径研究*

菅娜¹⁾ 叶谦³⁾ 韩战钢²⁾ 陈清华^{2)†}

(1)中国环境科学研究院大气环境研究所, 100012, 北京; 2)北京师范大学系统科学学院, 100875, 北京;
3)北京师范大学地理科学学部, 100875, 北京)

摘要 基于复杂网络方法,分析不同区域地表温度之间存在的相关关系及其时滞,建立了体现大气遥相关的全球地表温度网络,进而给出地表温度网络遥相关路径.研究表明:网络连接的空间距离在3 500和7 000 km处有1个峰值,这与大气Rossby波的1/2和1倍波长一致.地表温度网络中,影响传播的主导节点在北半球分布在东亚、向西延伸的北太平洋、美国东海岸及邻接的北大西洋地区;在南半球分布在50° S纬度带.遥相关现象在南半球比北半球更显著,典型遥相关路径与不同的环流作用有明确对应:1)北太平洋中部到墨西哥的连接反映了西风带的作用;2)北大西洋传播到非洲北部、格陵兰岛到里海的连接,均属于连接北大西洋到欧亚大陆的跨欧亚波列的一部分;3)俄罗斯喀拉海到北太平洋的连接与北大西洋涛动(NAO)密切关联;4)南半球的连接反映了大气西风带和Rossby波的影响.大气遥相关路径分析有利于深化对地表温度变化的认识,可为减缓气候全球变化提供理论基础.

关键词 气候变化;地表温度;气候复杂网络;拓扑结构;遥相关路径

中图分类号 P46

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021024

0 引言

全球温度在近百年尺度上表现出显著的增暖趋势,在过去100 a间上升了0.74 °C,大气温室气体浓度尤其是大气CO₂浓度上升是造成变暖的主要原因^[1].除了百年尺度的长期趋势,全球温度变化表现出明显的年际和年代际变率.全球温度升温幅度在不同地区还表现出显著空间差异^[2].

遥相关代表全球尺度上的能量传输和气候动力学,一直是气候学家们感兴趣的课题,受到国内外学者广泛关注,在全球气候变化中发挥着重要作用^[3].它们反映了大气和海洋环流的重要变化,是理解大气中物理关系和过程的关键,因为一个地点的天气变化与另一个遥远地点的天气变化之间可能存在联系^[4-5].地表温度作为气候系统相互作用的重要因素,其变化和遥相关密切相关.

经验正交函数分解(EOF)是气候数据中发现空间和时间模式的标准工具,被广泛应用于遥相关空间分析上^[6-7].它将信号分解为可变量模式(EOFs),每种模式能够解释数据中观察到的方差,具有一定的时效性.但是它依赖于降维,在展开过程中会或多或少损失关联信息^[8],因此,EOF方法无法有效分析气候系

统的非线性依赖,也无法直接给出遥相关路径.

近20 a来,复杂系统科学研究领域最重要的发展,就是在数学图论的基础上逐步完善了复杂网络的思想和方法.复杂网络理论在气候科学中得到应用,形成了气候网络^[9-10].气候网络是把地球上不同地理位置的气候时间序列进行统计关联而建立的网络.网络节点是空间某一位置的时间序列,连边是2个空间位置上时间序列的统计关联,边的强度由节点之间相关性的强度量化^[11].气候网络方法已经被广泛应用于大气遥相关的研究中,并取得了较好的效果:Tsonis等^[12]通过复杂网络方法建立了气压关联网络,分析遥相关路径和短程连接;Gong等^[13-14]从低频到高频振荡等多种尺度的温度来关联网络,揭示不同时间尺度范围内的温度网络具有不同属性;Ying等^[15-16]应用复杂网络方法研究全球CO₂浓度的遥相关特征;Boers等^[17]通过建立全球极端降雨事件的复杂网络,揭示南亚-中亚地区与欧洲和北美温带以及南半球温带的联系.

气候网络方法可以被看作是研究气候相互关系空间格局的一种补充方法,它采用非线性相似性测度多元数据集内相互依赖结构的全部复杂性,可以很好地反映气候系统中的非线性作用^[18-19].大量研究表

* 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0602503)

† 通信作者:陈清华(1976—),男,博士,教授.研究方向:复杂系统理论及应用. E-mail: qinghuachen@bnu.edu.cn

收稿日期:2021-01-12

明,应用复杂网络的统计量,不仅可以给出传统气象上的主要遥相关性,在描述遥相关上更具有优越性^[20].本研究将采用复杂网络的方法,构建全球地表温度网络,分析地表温度网络的遥相关路径,探究温度和遥相关关联的特征和规律,以加深对地表温度变化的认识.

1 数据和方法

1.1 研究数据 本文使用的数据为2003年1月10日—2016年12月31日的NCEP/NCAR日平均再分析资料.资料沿纬向有144个格点,沿经向有72个格点,共计10368个格点,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$.为了保证格点均匀地覆盖全球($90^\circ \text{S} \sim 90^\circ \text{N}$),这里选择726个网格点.这些格点在纬向和子午线方向距离相同,为830 km.

1.2 研究方法

1.2.1 去季节和去趋势 首先,去除季节性变化,减去多年日历日的平均值并除以其标准偏差;其次去除包含的年际变化.为了简单起见,这里不考虑闰年日.将地表温度时间序列记为 $T_i(l)$,其中: i 代表节点, $i=1,2,\dots,726$; l 代表总时间, $l=(1,2,\dots,14) \times 365$.

1.2.2 计算节点间关联 网络上每对节点 i 和 j 之间的相关性连接可通过计算相关系数 $X_{i,j}(\tau)$ 来得到.计算公式分别为

$$X_{i,j}(-\tau) = \frac{\langle T_i(l)T_j(l-\tau) \rangle - \langle T_i(l) \rangle \langle T_j(l-\tau) \rangle}{\sqrt{\langle (T_j(l) - \langle T_j(l) \rangle)^2 \rangle} \sqrt{\langle (T_j(l-\tau) - \langle T_j(l-\tau) \rangle)^2 \rangle}} \quad (1)$$

$$X_{i,j}(\tau) = \frac{\langle T_i(l-\tau)T_j(l) \rangle - \langle T_i(l-\tau) \rangle \langle T_j(l) \rangle}{\sqrt{\langle (T_j(l-\tau) - \langle T_j(l-\tau) \rangle)^2 \rangle} \sqrt{\langle (T_j(l) - \langle T_j(l) \rangle)^2 \rangle}} \quad (2)$$

式中: τ 是时滞(单位为d), $\tau = -\tau_{\max}, -\tau_{\max} + 1, \dots, \tau_{\max} - 1, \tau_{\max}$, $\tau_{\max} = 800$; 为了避免边缘效应,此处 τ 的范围是 $1 \sim l - \tau_{\max}$.角括弧 $\langle \rangle$ 表示该区域内时间 l 上的平均.

计算正连接权重和负连接权重,公式定义为

$$W_{i,j}^+ = \frac{\max(X_{i,j}) - \langle X_{i,j} \rangle}{\sigma(X_{i,j})}, \quad (3)$$

$$W_{i,j}^- = \frac{\min(X_{i,j}) - \langle X_{i,j} \rangle}{\sigma(X_{i,j})}, \quad (4)$$

式中: $\max(X_{i,j})$ 、 $\min(X_{i,j})$ 、 $\langle X_{i,j} \rangle$ 和 $\sigma(X_{i,j})$ 分别表示 τ 范围内相关系数的最大、最小、平均值和标准差;分母 $\sigma(X_{i,j})$ 的处理是为了去除时间序列中自相关导致的偏

差^[20].定义 $P_{i,j}^+$ 为 $X_{i,j}(\tau)$ 的最大值,即 $P_{i,j}^+ = \max(X_{i,j})$; $P_{i,j}^-$ 为 $X_{i,j}(\tau)$ 的最小值,即 $P_{i,j}^- = \min(X_{i,j})$.取得最大值和最小值对应的时滞分别为 $\tau_{i,j}^+$ 和 $\tau_{i,j}^-$.正向连接(或负向连接)的方向由 $\tau_{i,j}^+$ 和 $\tau_{i,j}^-$ 的符号来定义.基于这种方法,获得了一个加权和有方向的全球地表温度网络,且每个连接包含特定的时滞.

2 地表温度网络特征分析

2.1 网络性质分析 图1描述了正向连接权重、最大相关系数、正向时滞及距离($D_{i,j}$)的关系.从 $W_{i,j}^+$ 和 $D_{i,j}$ 的关系图可以看出,相距较近(<2000 km)的地理格网往往具有很强的正相关关系,这是由于邻近的空间自相关引起的.但是,在7000 km处 $W_{i,j}^+$ 存在另外一个峰,这个位置刚好对应Rossby波1倍波长的物理距离. $P_{i,j}^+$ 和 $D_{i,j}$ 的分布图展示了随着 $D_{i,j}$ 的增加 $P_{i,j}^+$ 逐渐减少的模式.在近距离内, $P_{i,j}^+$ 也存在和 $W_{i,j}^+$ 类似的邻近效应,但是在距离7000 km处并没有展现出同样的“凸包”,而在10000 km左右, $P_{i,j}^+$ 有不太明显的上升.短距离高的权重值表示基于邻近的空间自相关,长距离连接权重代表遥相关.从 $\tau_{i,j}^+$ 和 $W_{i,j}^+$ 之间的关系图可知,高权重值大多都拥有较短的传播时间,一般在5 d内有1个尖峰,短距离(<2000 km)内连接权重高值的传播时间不超过3 d.根据 $P_{i,j}^+$ 与 $\tau_{i,j}^+$ 的关系图所展示结果来看,短的时间内有1个尖峰,而其他时间的相关系数差别不大.进一步分析 $W_{i,j}^+$ 和 $P_{i,j}^+$ 的散点图,发现二者呈“V”字形关系.在 $W_{i,j}^+ > 10$ 以后, $W_{i,j}^+$ 和 $P_{i,j}^+$ 展现出线性相关趋势,而在 $W_{i,j}^+$ 较小(<5)时, $P_{i,j}^+$ 变化较大,可以达到最大值.这表明:地表温度的时间序列可能包含对连接定义有影响的缓慢趋势或自相关,因此 $W_{i,j}^+$ 更适合作为衡量连接权重强度的指标.

图2描述了 $W_{i,j}^-$ 、 $P_{i,j}^-$ 与 $D_{i,j}$ 之间的关系.尽管 $W_{i,j}^-$ 的强度 $< W_{i,j}^+$,但整体来看, $W_{i,j}^-$ 与 $D_{i,j}$ 的分布模式类似于 $W_{i,j}^+$ 与 $D_{i,j}$ 的分布情况.邻近效应在负向连接权重比较明显,在距离3500和7000 km处分别有2个峰值.最小相关系数中大多数值分布为 $[0, 0.3]$,并且随距离的变化不敏感,这表明 $P_{i,j}^-$ 不适合作为衡量连接强度的参数.同样地, $W_{i,j}^-$ 与 $\tau_{i,j}^-$ 的关系图也发现短的时间(大约为5 d)内有1个尖峰,且值越小,时间越短. $P_{i,j}^-$ 与 $\tau_{i,j}^-$ 的关系图和正向连接情况类似.进一步分析 $W_{i,j}^-$ 和 $P_{i,j}^-$ 的关系图,可以发现在 $W_{i,j}^- < -5$ 时,二者呈线性相关,而在 $W_{i,j}^-$ 较大(> -5)时,二者关系呈垂直分布.以上特征说明 $W_{i,j}^-$ 更适合作为连接强度的判定依据.

2.2 显著性连接分析 地表温度网络中统计关联存在一些有意义的真实连接,也存在一些虚假连接.因

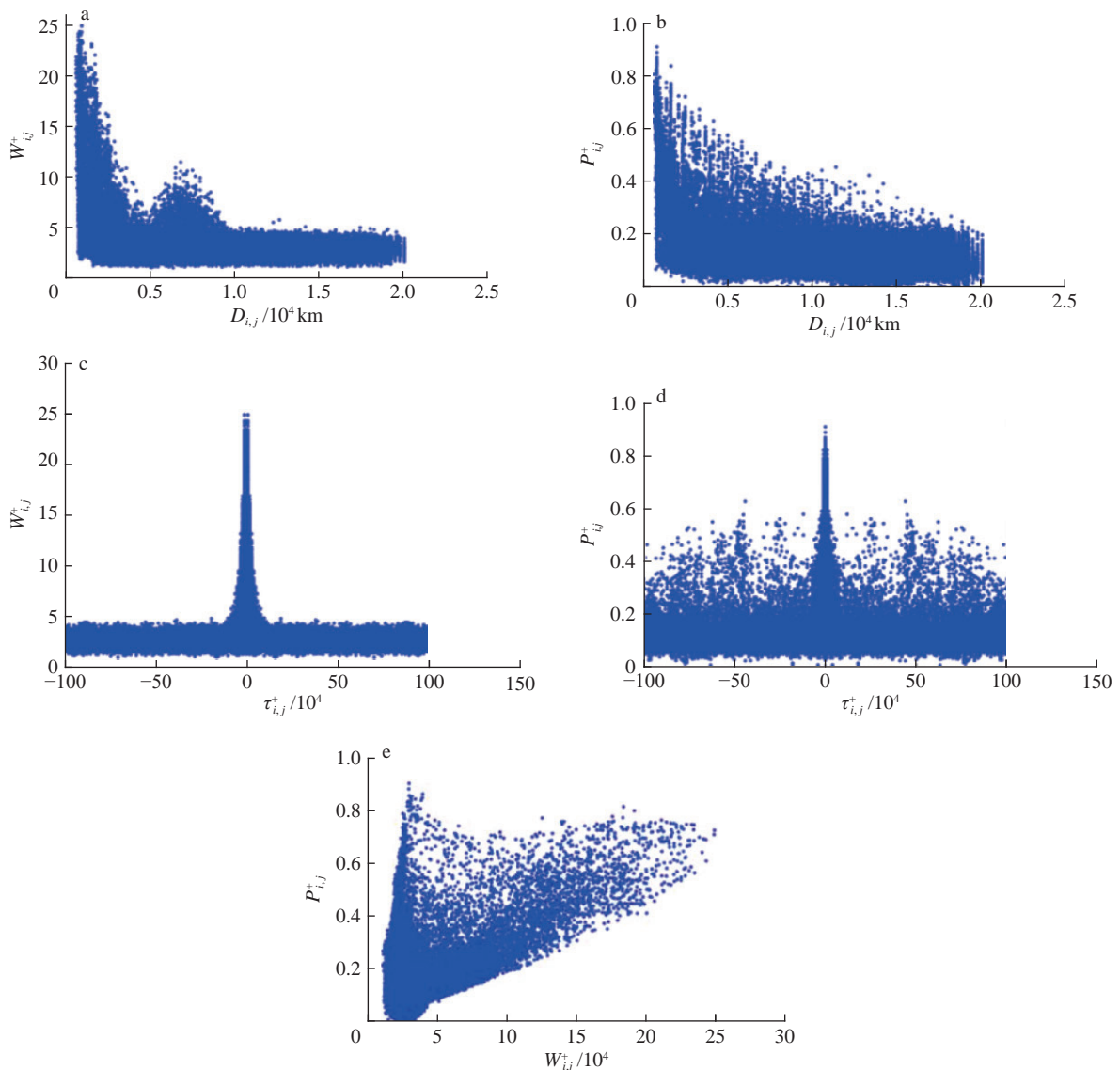


图 1 正向连接权重 (W_{ij}^+) 和空间距离 ($D_{i,j}$) (a)、最大相关系数 (P_{ij}^+) 和 $D_{i,j}$ (b)、 W_{ij}^+ 和 $\tau_{i,j}^+$ (c)、 P_{ij}^+ 和 $\tau_{i,j}^+$ (d)、 P_{ij}^+ 和 W_{ij}^+ (e) 的函数关系

此,需要设置合适的阈值,尽可能地消除“噪声”.连接阈值的选择较为复杂:如果阈值设置得太大,将滤除很多有意义的连接;如果阈值太小,网络中会包含很多冗余信息,给下一步分析带来困难.本研究使用随机打散重排(shuffling)的方法,重新生成随机网络,确定合适的阈值.具体地,对于每个 $T_i(l)$,将年的记录随机排列,每年年内的顺序保持不变,产生相同长度的随机序列.对于每个节点对的连接,随机选择 2 个节点中的 1 个进行打散重排,另 1 个保持不变,然后计算二者的相关系数,并重新定义连接权重.这样,构建了一个基于打散重排数据的气候网络.

图 3 描述了原始序列和打散重排情况下,正/负向连接权重和空间距离的函数关系.可以看出,连接权重在打散重排网络中显著地小于其原始情况,且不随距离的改变而发生变化,99% 的数据点主要分布在绝

对值 < 5 .因此,将图 3 中的虚线值 5 处看作阈值,据此研究网络中的遥相关.由于 W_{ij}^- 相较于 W_{ij}^+ 展现出较小的重要性,并且基于负向连接的分析,展现出与正向连接类似的情况.因此,后面章节重点分析依据 W_{ij}^+ 的阈值修剪得到的连接.

2.3 网络结构分析 为了研究每个节点对其他节点的依赖和影响程度,本文分析了所构造网络的总的加权度、加权入度和出度的空间分布.

从总的加权度空间分布来看,可以发现 3 个特征:1) 对其他节点的影响程度大的节点,主要分布在北半球的东亚、向西延伸的北太平洋,美国东海岸和邻接的北大西洋这 2 个区域;在南半球,主要分布在以 50°S 为中心的纬度带,尤其是南美洲南部地区,以及从非洲南部的南非,向东至南太平洋中部地区;2) 北半球节点的影响强度大于南半球;3) 整个空间模

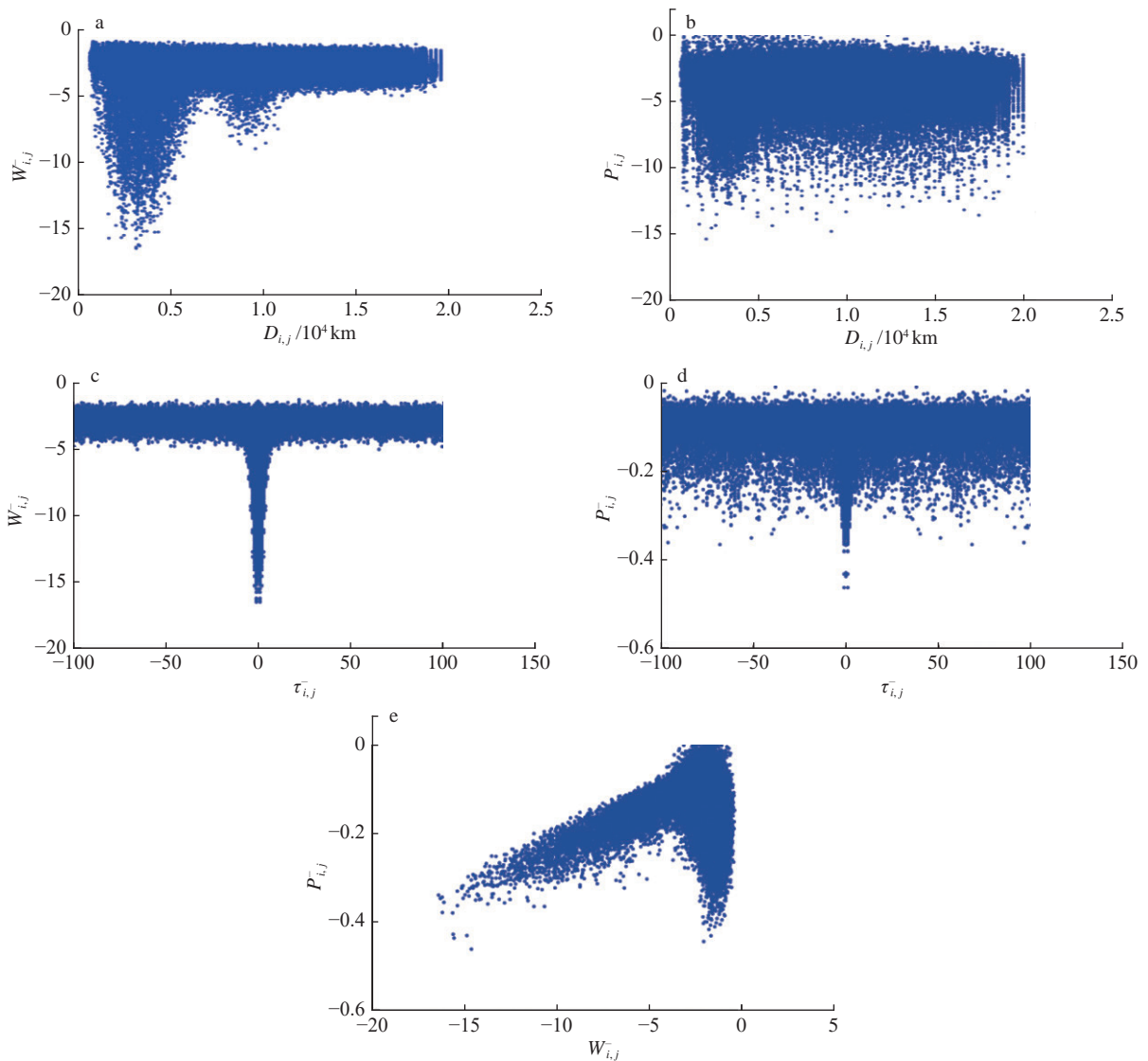


图 2 负向连接权重 ($W_{i,j}^-$) 和 $D_{i,j}$ (a)、最小相关系数 ($P_{i,j}^-$) 和 $D_{i,j}$ (b)、 $W_{i,j}^-$ 和 $\tau_{i,j}$ (c)、 $P_{i,j}^-$ 和 $\tau_{i,j}$ (d)、 $P_{i,j}^-$ 和 $W_{i,j}^-$ (e) 的函数关系

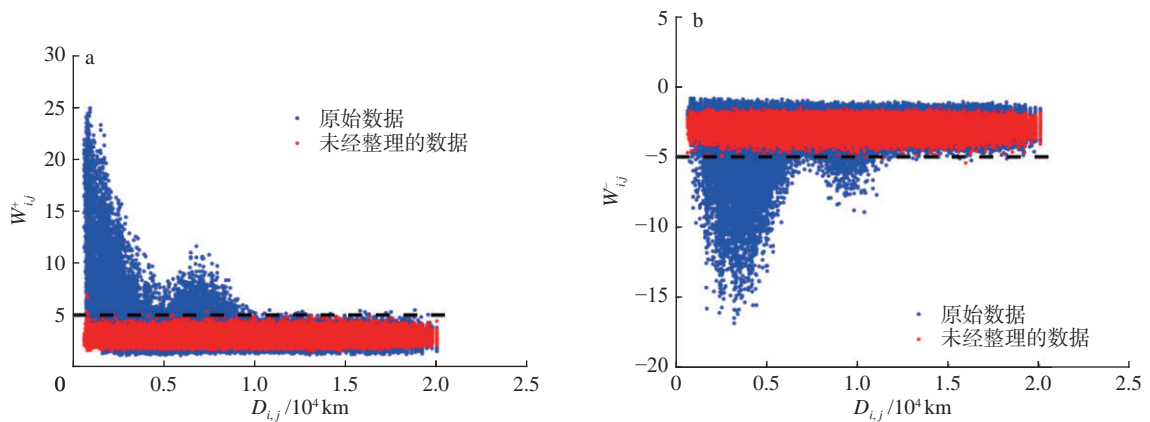


图 3 正向连接权重 (水平线值为 5) (a) 及负向边权重 (水平线值为 -5) (b) 的阈值

式与瞬态热通量分布特征相似。

总的加权度中, 北半球的高值中心主要贡献是加权出度, 这些节点是关键节点, 对其他节点有影响。

非洲南非向东至南太平洋中部高值中心, 主要是对加权入度的贡献, 而南美洲南部、澳大利亚南部的连接权重主要来自加权出度。

2.4 遥相关路径分析 选择符合 1) $D_{i,j} \geq 5000$ km、2) $W_{i,j}^+ \geq 5$ (图 3-a 虚线所示)、3) 纬度距离 $> 20^\circ$ 的这些条件的连边, 分析显著的遥相关路径. 根据遥相关路径, 北半球大致有 4 条典型的遥相关路径:

1) 北太平洋中部连接到墨西哥, 这条路径反映了西风带的作用;

2) 从北大西洋传播到非洲北部的连接, 属于连接北大西洋到欧亚大陆的跨欧亚波列的一部分;

3) 从格陵兰岛到里海的连接属于连接北大西洋到欧亚大陆的跨欧亚波列一部分;

4) 俄罗斯的喀拉海到北太平洋的连接, 是 NAO 在欧亚大陆波列的一部分.

南半球有 3 条典型的遥相关路径:

1) 太平洋南部和南美洲西北部连接, 这条路径是西风带和洪堡海流共同作用的结果;

2) 阿蒙森海和大西洋南部的连接, 这条路径是南半球 Rossby 波影响的结果;

3) 德雷克海峡与西部澳大利亚的连接, 这条路径也是南半球 Rossby 波影响的结果.

3 结论与展望

基于 NCEP 再分析资料的地表温度日数据, 分析地表温度节点与节点之间关联动力结构, 构建地表温度关联网络. 研究表明: 正向连接权重在 7000 km 处有 1 个峰值; 负向连接权重在 3500 和 10000 km 处 2 个峰值, 这些峰值与大气 Rossby 波的 1、1/2 和 3/2 倍的波长一致. 全球温度网络中包含真实存在的连接, 也包含随机的连接. 设置合适的阈值, 可以去掉随机连接, 进而分析有统计意义连接的特征. 加权重是衡量节点间相互影响和依赖程度的重要指标: 加权重高的节点分布在北半球的东亚及临近北太平洋地区、美国东海岸及邻接的北大西洋地区及南半球的 $35^\circ \sim 55^\circ$ S 纬度带, 尤其是从南美洲南部区域、南非向东延伸的太平洋中部区域. 根据不同大气环流过程, 分析了一些典型的遥相关路径: 从北太平洋中部连接到墨西哥的路径, 这条路径受西风带的影响; 格陵兰岛和里海的连接、俄罗斯的喀拉海和北太平洋的连接, 这些连接均属于欧亚大陆波列的一部分; 太平洋南部和南美洲西北部的连接, 这是西风带和洪堡海流共同作用的结果; 最后是从阿蒙森海连接到大西洋南部、从德雷克海峡连接到澳大利亚西部, 这些路径与大气 Rossby 波密切相关.

4 参考文献

- [1] 葛全胜, 王芳, 王绍武, 等. 对全球变暖认识的七个问题的

确定与不确定性[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 1

- [2] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Computational Geometry, 2013, 18(2): 95
- [3] BJERKNES J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature[J]. Tellus, 1966, 18(4): 820
- [4] BJERKNES J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. Monthly Weather Review, 1969, 97: 163
- [5] 龚道溢, 王绍武. 大气环流因子对北半球气温变化影响的研究[J]. 地理研究, 1999, 18(1): 31
- [6] 符淙斌, 曾昭美. 最近530年冬季北大西洋涛动指数与中国东部夏季旱涝指数之联系[J]. 科学通报, 2005, 50(14): 1512
- [7] GHIL M, ALLEN M R, DETTINGER M D, et al. Advanced spectral methods for climatic time series[J]. Reviews of geophysics, 2002, 40(1): 1
- [8] DOMMENGET D, LATIF M. A Cautionary note on the interpretation of EOFs[J]. Journal of Climate, 2002, 15(2): 216
- [9] 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(5): 585
- [10] TSONIS A A, SWANSON K L, WANG G. On the role of atmospheric teleconnections in climate[J]. Journal of Climate, 2008, 21(12): 2990
- [11] GUEZ O C, GOZOLCHIANI A, HAVLIN S. Influence of autocorrelation on the topology of the climate network[J]. Physical Review E-Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics, 2014, 90(6): 29
- [12] TSONIS A A, SWANSON K, KRAVTSOV S. A new dynamical mechanism for major climate shifts[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(13): 256
- [13] GONG Z Q, WANG X J, ZHI R, et al. Circulation system complex networks and teleconnections[J]. Chinese Physics B, 2011, 20(7): 495
- [14] 龚志强, 支蓉, 侯威, 等. 基于复杂网络的北半球遥相关年代际变化特征研究[J]. 物理学报, 2012, 61(2): 539
- [15] YING N, ZHOU D, HAN Z G, et al. Rossby waves detection in the CO₂ and temperature multilayer climate network[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(2): 1
- [16] YING N, ZHOU D, CHEN Q, et al. Long-term link detection in the CO₂ concentration climate network[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 1403
- [17] BOERS N, GOSWAMI B, RHEINWALT A, et al.

- Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections[J]. *Nature*, 2019, 566(7744): 373
- [18] LI R, DONG L, ZHANG J, et al. Simple spatial scaling rules behind complex cities[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1841
- [19] FAN J, MENG J, ASHKENAZY Y, et al. Network analysis reveals strongly localized impacts of El Nino[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(29): 7543
- [20] FOUNTALIS I, BRACCO A, DOVROLIS C. Spatio-temporal network analysis for studying climate patterns[J]. *Clim Dyn*, 2014, 42: 879

Atmospheric teleconnections path of global surface temperature

YING Na¹⁾ YE Qian³⁾ HAN Zhangang²⁾ CHEN Qinghua^{2)†}

(1)Institute of Atmospheric Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 100012, Beijing, China;

2)School of Systems Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

3)Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Analysis of surface air temperature (SAT) teleconnections is considered a key issue in climate change research. In this paper, complex network approach was used to analyze correlation and time lags between different regions of SAT, to establish a global SAT network reflecting atmospheric teleconnections to give their teleconnections path. Enhanced distribution of large weights is observed at 3 500 km, 7 000 km, corresponding to 1/2, 1 wavelength of Rossby wave. Dominant nodes in the SAT network are recognizable in East Asia and the westward-extending North Pacific Ocean, the east coast of the United States, the adjacent North Atlantic region in-the Northern Hemisphere. In southern hemisphere, the patterns of density nodes are found to lie on a band centered near 50° S in the subtropical region. The wave structure is found more pronounced in the Southern Hemisphere. Typical teleconnection paths are found to correspond to different circulation effects. The connection from central North Pacific to Mexico reflects the action of the westerly wind belt. The connections from the North Atlantic propagation to northern Africa, from Greenland to the Caspian Sea are part of the trans-Eurasian wave train connecting North Atlantic to Eurasia. The Russian Kara Sea to North Pacific connection is closely related to North Atlantic Oscillation (NAO). The Southern Hemisphere connection reflects influence of atmospheric westerly belt and Rossby wave. Analysis of teleconnections is therefore useful to understand better surface temperature changes, providing some theoretical basis in mitigating global changes.

Keywords climate change; surface air temperature; climate complex network; topological structure; teleconnections

【责任编辑: 陆有忠】