

# 关于遥相关问题的研究现状综述

王 娜

内蒙古工业大学理学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2023年5月14日; 录用日期: 2023年6月14日; 发布日期: 2023年6月30日

## 摘 要

地球科学中的气候系统是一个复杂的物理系统。人类在远古时期就注意到了一些独特的自然现象, 通过生活实践想要理解地球系统各个要素之间的联系, 也总结了一些规律, 比如瑞雪兆丰年等。但是这些基于人类经验得到的规律不能准确地描述地球系统的变化, 复杂网络是探究地球系统变化的一个新角度。识别遥相关现象最主要可以为遥远地区的气候变化提供一定程度的预测。本文分类整理了近十年对遥相关问题的最新研究, 重点对利用复杂网络方法和事件同步方法研究遥相关问题的文献进行了概述, 以及对遥相关路径和预测的研究。我们旨在想要为研究遥相关问题的人们提供一些研究思路和方法总结。

## 关键词

遥相关, 路径, 预测, 复杂网络, 事件同步

# A Review of the Research Status of Teleconnection

Na Wang

School of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia

Received: May 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 14<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The climate system in earth science is a complex physical system. Since ancient times, human beings have noticed some unique natural phenomena. Through life practice, they want to understand the relationship between various elements of the earth system, and they have also summarized some rules, such as good snow and good years. But these rules based on human experience do not accurately describe changes in the Earth system. A complex network is a new angle to explore the change in the earth's system. The identification of teleconnection phenomena can, above all, provide a degree of prediction of climate change in distant regions. We categorize the latest research on telecon-

nection problems in the last ten years, focusing on the literature on teleconnection problems using complex network methods and event synchronization methods, as well as the research on teleconnection paths and predictions. We aim to provide some research ideas and methods summary for those who study teleconnection problems.

## Keywords

Teleconnection, Path, Prediction, Complex Network, Event Synchronization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 遥相关的定义

遥相关的定义在文献中给出了很多种, 也被叫做长程相关、远距离相关等。对于遥相关的研究历史悠长, 最早可以追溯到 1935 年, Ångström [1]首先提出了描述远程大气环流变化和异常之间的相关性。遥相关是一种通过描述地球——大气动量交换过程来浓缩大气模式的方法[2]。远距离区域内两种大气模式或环流系统的时间变化之间的显著相关性被称为遥相关[3]。遥相关将大尺度气象和气候信息与区域水文过程结合起来, 以评估气候现象和径流之间的物理相互作用[4]。事实上, 遥相关是气候现象之一, 其变化会导致气候的异常, 特别是世界上许多地区的温度和降水模式, 揭示它们与气候参数之间的关系对于更好地理解每个地区的振荡和气候变化非常重要。

除了大气科学中有遥相关之外, 生态学中也有遥相关存在。土地类型转换对其周围土地生态服务价值产生影响的现象称为土地利用变化与生态服务价值的遥相关[5]。地理距离较远的种群中时变特征的变化通常表现出相关的波动, 这一特征被称为空间同步性[6]。生态学中的空间同步概念是指在同个地区的植物和动物群落中可以观察到的某些特征的协调时间波动[7]。为了简单起见, 将这里的“空间同步”坚持使用通用术语“遥相关”。这些远距离相互作用统统被称为遥相关, 其标志是气候变量的显著相关性。深入了解不同遥相关的动力学和模式是深入理解气候科学的必要条件, 气候科学对社会、经济和生态系统具有直接影响。这里, 我们主要关注的是大气科学中的遥相关。

大气遥相关是全球范围内一致的气候响应, 通常通过远距离相关性来识别, 这在很大程度上被纳入了气候分析。识别具有类似气候行为的区域可以发现包括遥相关在内的远距离空间关系。气候中存在远距离遥相关是一个公认的事实, 因为大气通过波浪和热量与动量的平流将遥远的地区连接起来[8]。Routson 等[9]重新评估了过去北美洲西部特大暴雨和特大干旱与全球海面温度变化联系起来的证据, 结果发现, 海面温度和北美洲西部气候之间存在强烈的遥相关。大气遥相关分析是加深对地球气候变化认识的有效途径, 可为缓解全球气候变化提供理论依据。

## 2. 研究遥相关的方法

近几十年来, 遥相关问题受到气候学家们的广泛关注, 因此研究遥相关的方法多种多样。Chang 等[10]探索了全球海温异常与北美和中美地区的长期非线性和非平稳遥相关信号之间的系统关系, 在通过综合经验模式分解、小波分析和滞后相关分析发现季节降水的主要变化和全球海温异常之间的可能联系之后, 提取了统计上显著的海温区域, 以识别已知和未知的遥相关。Yang 等[11]应用偏相关分析探讨了亚洲中纬度干旱地区的气候驱动因素, 并以新疆为例评估了海洋大气相互作用对新疆长期干旱变化的遥相关效

应。Harwood 等[12]利用动态贝叶斯网络研究北极变暖与中纬度大气环流之间的联系以及其他驱动因素的作用,并且评估该网络对遥相关分析的适用性。Silva 等[13]提出一种利用格兰杰因果关系来检测气候遥相关强度的新方法,该方法被明确定义为一种统计检验,可以检测任意两个时间序列之间的关系,通过比较相关性和格兰杰因果关系在不同时间尺度上的遥相关,发现两种方法均能持续恢复已知季节性降水对与厄尔尼诺南方涛动相关的海面温度模式的响应。Gao 等[14]通过非齐次泊松方法揭示中国夏季高温极值与六种大气遥相关模式的统计关联,并且将这种关联与泊松回归模型揭示的大气遥相关月度夏季高温极值的联系进行比较,还进行了大气环流复合分析,以说明这些遥相关模式对中国夏季热浪的影响。Kim 等[15]使用南大洋辐射冷却的多模型实验揭示了由短波副热带云反馈介导的从南大洋到热带太平洋的遥相关。Graafland 等[16]以气候系统为例,对比了复杂网络和贝叶斯网络的拓扑结构,建议使用贝叶斯网络作为数据驱动的建模和预测,因为贝叶斯网络可以更好地揭示数据集中的各种远程遥相关。但是,我们关注的重点是复杂网络方法揭示的遥相关,下文中将重点介绍。

## 2.1. 复杂网络方法研究遥相关

复杂网络将复杂系统中的实体抽象描述为节点,将实体之间存在的某种关系抽象描述成连边。它是一种由数量巨大的节点和节点之间错综复杂的关系构成的用来描述和理解复杂系统的重要方法和工具,可以从宏观角度分析节点之间的相互作用和连接。复杂网络理论为从统计学角度研究气候系统中的局部和非局部统计相互关系,即遥相关,提供了一个强大的框架。利用线性皮尔逊相关系数[17][18]或非线性互信息[19]作为区域间动力相似性的度量,在局部、中尺度和全球[20][21]拓扑尺度上系统地比较由同一全球气候数据集构建的气候网络。由于底层物理场的连续性,相邻的网格点是动态相关的,这些局部相关性通常在一个典型的长度范围内迅速衰减。气候学界将结构丰富的长程相关性称为遥相关。

在现代气象观测分析中用到最多的一种方法就是复杂网络,可以证明气候事件同步性和揭示潜在的遥相关。复杂系统通常表现出长程相关性,因此典型的观测值显示出长距离的统计相关性。Wang 等[22]使用复杂网络分析东亚树木年轮宽度时间序列中记录的极端值,该方法能够揭示气候树木年轮宽度记录的同步性,这些同步变化表明气候遥相关发生了重组。Gregory 等[23]使用复杂网络方法预测了泛北极和区域 9 月的平均海冰范围,揭示了区域之间的遥相关关系。Gong 等[24]依据复杂网络方法构建环流系统,发现遥相关极大地缩短了网络的平均最短路径长度,从而有利于网络上本地波动信息的快速传递和环流系统的稳定性。Ekhtiari 等[25]提出扩展复杂网络技术的应用,将离散小波变换的时间尺度分解与耦合气候网络分析的概念相结合,在多个时间尺度上捕获全球海表温度和降水之间的相互依赖性。Ying 等[26]基于复杂网络方法识别和量化不同区域 CO<sub>2</sub> 浓度的长期依赖关系,进一步揭示了网络中主要存在长距离联系。

现实生活中,很多城市降水网络的拓扑特征是以集群和模块化组织为特征的,通常具有较强的区域内连通性和区域间的远程连接。Yang 等[27]构建了美国所有区域的降水网络,基于网络的强度、方向和距离分析了美国大陆干旱的时空传播,通过计算关键的拓扑特征,包括平均相似性、距离函数、网络密度、聚类系数和模块性发现,向临界过渡的系统演化明显增强了美国城市区域间降水事件的同步性,从而加强了社区结构以及网络中的远程联系。Ekhtiari 等[28]使用耦合气候网络描述月尺度上海面温度和降水之间的主要协变模式,揭示了与当地和远程统计联系相关的特征性季节模式,结果表明,可以识别海温变化和全球降水模式之间的局部相互作用以及遥相关。Ciemer 等[18]通过复杂网络方法分析日降雨量时间序列的时空相关性,分析感兴趣区域之间遥相关强度的时间演变,揭示偏远地区的遥相关结构。

复杂网络方法能够在空间尺度上对气候系统的拓扑结构和动力学进行新的洞察,这些空间尺度由局部网络度量所揭示。度中心性和相关度量已被用于识别高度中心性区域,并将其与遥相关模式相关联。

通过检查完整网络的拓扑以及没有遥相关连接的网络的拓扑发现, 遥相关的存在使得气候更加稳定, 信息传递效率更高。

## 2.2. 事件同步方法研究遥相关

事件同步方法是量化极端事件同步性的一个有效措施, 最初由 Quiroga 等[29]在研究老鼠和人类脑电图信号序列时提出。在复杂网络基础上使用事件同步建网研究遥相关也趋于普遍。尤其是极端事件的发生会严重影响一个地区的气候、经济、生态系统等。当极端事件同步发生并产生遥相关影响时, 后果不堪设想。事件同步方法用于揭示极端降雨遥相关的全球模式[21], 并预测极端洪水[30]。ENSO 通过大气遥相关对全球偏远地区产生深远影响, ENSO 遥相关模式的变化影响了温度和极端降水事件的统计以及遥相关影响的可预测性[31] [32]。

气候特征相似的地区在时间和空间上有些连贯。因此, 在这些区域内形成的区域天气系统可以表现出同步行为。在跨越数千公里的气候系统中也观察到了同步现象, 这可能是遥相关的迹象。极端降雨事件通常不会发生在孤立的网格点, 一般来说, 当极端降雨发生在网格点时, 也可能发生在附近的网格点。极端降雨事件具有遥相关特征, 这意味着偏远地区极端降雨事件之间存在同步。Shraddha 等[33]分析了亚洲季风区的极端降雨事件同步性的空间模式, 确定了两个季风系统之间的两种不同同步模式, 并且利用极端降雨同步日的相位分布研究了两个季风系统之间的相互作用, 以及每个同步路径占主导地位的特定时间。Boers 等[21]应用复杂网络的框架, 并引入一种校正功能网络中多重比较偏差的技术来揭示极端降雨事件的全球耦合模式, 发现地球上重要连接的距离分布是按幂律衰减的, 较短的幂律分布连接是区域天气系统, 较长的超幂律分布连接形成了全球降水遥相关模式。Qiao 等[34]基于事件同步方法构建了用以研究中国西南地区(SWC)和亚太地区(AP)之间极端降雨的复杂网络, 通过分析不同网格点之间的关系, 研究 SWC 和 AP 之间同步降雨事件的概率作为距离的函数从幂律衰减行为变为遥相关行为的影响因素。Qiao 等[35]基于非线性事件同步方法构建了极端降水网络, 揭示了 SWC 主雨季极端降水事件同步性的时空特征, 选取部分网格点计算每个网格点发生极端降雨的概率, 进一步揭示了西南太平洋极端降雨事件同步的大气机制。

事件同步方法除了用于研究极端降水, 还用于研究其它气候条件产生的遥相关。Mao 等[36]提出了一个将相位相干性与事件同步分析相结合的非线性框架, 以进一步了解受到极端干旱严重影响的东北地区周围海洋与降水之间的遥相关。Qiao 等[37]基于多变量网络方法分析了西南和亚太太平洋降水异常之间的遥相关关系, 发现遥相关是由一些重要的节点控制的。Li 等[38]使用事件同步方法建立强度同步网络研究复合干旱热浪事件的时空变化和传播程度, 引入节点平均距离描述节点所有连边地理距离的平均状态, 节点平均距离与单个节点是否有可能连接到远程节点有关。Li 等[39]采用了社区检测算法从温度变化和温差两方面对温度进行分区, 通过建立温度相关网络, 分析网络的拓扑特征, 发现连边的地理距离可以揭示网络中是否存在遥相关, 连边的地理距离分布统计了不同地理距离下连边的数量, 反映了遥相关的比例。Kurths 等[40]基于小波和事件同步的多尺度方法, 揭示了印度气候网络在多个时间尺度上的遥相关对降水的影响, 还为降水预测提供了一个新的思路。

## 3. 遥相关路径

遥相关代表着全球范围内的能量转移和气候动力学, 受到国内外科学家的广泛关注, 在全球气候变化中发挥着重要作用。反映了大气和海洋环流的重要变化, 对于理解大气中的物理关系和过程至关重要, 其中一个地点的气候变化与另一个遥远地区的气候变化之间可能存在联系。基于复杂网络方法可以建立某种大气污染物之间的相关关系网络, 分析不同区域的污染物浓度之间的相关关系及其时滞, 进而可以



给出网络的遥相关路径[41],例如分析臭氧的拓扑特征[42]、PM<sub>2.5</sub>传输变量的关系[43]、二氧化碳浓度[44]等。Zhou等[45]提出了使用复杂网络寻找和量化遥相关相互作用的远距离节点之间的最佳路径的方法,该方法可以用来量化和提高我们对全球尺度上气候模式出现的理解。Runge等[46]介绍了一种基于降维、因果重构和基于因果效应理论的新型网络测量的数据驱动方法,该方法为描述大气遥相关路径提供了更严格的统计,使得可以更加深入了解与季风动力学相关的太平洋-印度洋相互作用。

给定地点的天气并不是一个孤立的现象,它与相邻地点的天气密切相关。造成这种关系的原因是,大多数气候现象都表现出一种转变,其路径上的所有地方都会受到类似的气象事件的影响。

#### 4. 遥相关预测

遥相关模式是导致世界上许多地区气候异常的现象之一,尤其是温度和降水可以显著改变一个地区的波动和气候变化,所以要对其影响进行统计分析和建模。揭示大气遥相关模式并了解其潜在机制对一般天气预报,特别是极端事件预测具有重要意义。复杂网络揭示的遥相关也可用于预测极端事件。例如,向北迁移的锋面系统的相互作用可以预测安第斯山脉中部的极端降雨事件[47]。Su等[20]提出了一种鲁棒性更高的复杂网络聚类 workflow,将一致聚类和相互对应相结合用以揭示全球极端降水的同步结构,发现在某些气候特征相似的地区天气系统表现出了同步行为,识别这些同步区域可以进一步提高预测技能。Liu等[48]利用复杂网络方法研究亚马逊雨林地区(ARA)的全球影响,发现ARA与青藏高原和西南极冰盖等地区表现出强烈的遥相关性,并且这种潜在的遥相关可以用于预测地球系统中倾斜级联引起的突变。Ahmadi等[49]通过遥相关指数对伊朗的温度和降水波动进行了统计分析和概念建模,使用遥相关统计模型计算指数与温度和降水的相关性,选择相关系数最高的5年作为参数进行气候行为的预测。了解两个区域之间的气候遥相关,不仅可以解释区域尺度气象学如何响应全球气候变化,而且为气候预报提供了必要的基础。

越来越多的机器学习技术被用于评估遥相关模式与区域气候之间的联系。Kalu等[50]引入了一种同化的深度学习神经网络来改进对陆地蓄水量动力学的建模,该深度学习框架的关键预测因子和输入包括径流、降雨量、土壤湿度、蒸散、全球遥相关模式和海面温度,通过这些因子可以对未来进行预测并深入研究气候遥相关模式与陆地蓄水量之间的联系。Gao等[51]开发了一个基于卷积神经网络的深度学习模型,用于预测东北太平洋海面温度对华北地区温度的远程影响。Builes-Jaramillo等[52]使用非线性技术,分析了亚马逊和热带北大西洋之间的遥相关,发现通过热带大西洋海表温度偶极子可以对亚马逊干旱进行预警。Xu等[53]提出了一种改进的尺度空间聚类算法,将气候序列划分为多尺度气候带,利用尺度方差分析方法在特征尺度上识别气候带,基于滑动时间窗口的时间关联规则算法挖掘时空遥相关模式,发现一些未知的遥相关模式可以进一步用于指导陆地气候的预测。在未来深度挖掘机器学习技术的遥相关研究可能会使我们更加快速地对极端气候事件进行提前预知。

#### 5. 结论

遥相关模式对气候的影响一直是地球科学领域关心的课题之一。关于遥相关问题的研究已经有非常多的文献,本文回顾了近十年来遥相关研究的最新成果,其中主要对复杂网络方法和事件同步方法研究遥相关问题的文献进行了重点概述。这些研究涉及了很多气候变化模式引起的遥相关现象,比如降雨、温度和干旱等。作者的能力有限,可能并没有将研究遥相关问题的所有文献进行研究。前人的工作主要是针对某一区域的遥相关现象进行了全面的综述,以寻求影响该地区大气环境的主要气候变化模式及其遥相关的显著特征。不同于前人的是,本文分类整理了近年来关于遥相关路径、预测方面的文献,并且重点关注的是用复杂网络和事件同步方法对遥相关的研究。未来可以重点关注一下遥相关的详细过程和

动力学, 这些可能关键取决于长期观测和地球系统模型的持续发展。希望本文能为跨学科使用气候现象以及对遥相关问题感兴趣的读者快速入门提供一点帮助。

## 参考文献

- [1] Ångström, A. (1935) Teleconnections of Climatic Changes in Present Time. *Geografiska Annaler*, **17**, 242-258. <https://doi.org/10.1080/20014422.1935.11880600>
- [2] Schwing, F.B., Mendelsohn, R., Bograd, S.J., *et al.* (2010) Climate Change, Teleconnection Patterns, and Regional Processes Forcing Marine Populations in the Pacific. *Journal of Marine Systems*, **79**, 245-257. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.027>
- [3] Bridgman, H.A. and Oliver, J.E. (2014) *The Global Climate System: Patterns, Processes, and Teleconnections*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [4] Wang, J., Wang, X., *et al.* (2020) Teleconnection Analysis of Monthly Streamflow Using Ensemble Empirical Mode Decomposition. *Journal of Hydrology*, **582**, Article ID: 124411. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124411>
- [5] 曹若兰, 莫宏伟. 韶山市土地利用变化对周围土地生态服务价值的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 307-314+388.
- [6] Liebhold, A., Koenig, W.D. and Bjørnstad, O.N. (2004) Spatial Synchrony in Population Dynamics. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **35**, 467-490. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132516>
- [7] Shestakova, T.A., Gutiérrez, E. and Voltas, J. (2018) A Roadmap to Disentangling Ecogeographical Patterns of Spatial Synchrony in Dendrosciences. *Trees*, **32**, 359-370. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1653-0>
- [8] Deza, J.I., Masoller, C. and Barreiro, M. (2014) Distinguishing the Effects of Internal and Forced Atmospheric Variability in Climate Networks. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **21**, 617-631. <https://doi.org/10.5194/npg-21-617-2014>
- [9] Routson, C.C., Woodhouse, C.A., Overpeck, J.T., *et al.* (2016) Teleconnected Ocean Forcing of Western North American Droughts and Pluvials during the Last Millennium. *Quaternary Science Reviews*, **146**, 238-250. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.017>
- [10] Chang, N.B., Imen, S., Bai, K., *et al.* (2017) The Impact of Global Unknown Teleconnection Patterns on Terrestrial Precipitation across North and Central America. *Atmospheric Research*, **193**, 107-124. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.018>
- [11] Yang, R. and Xing, B. (2022) Teleconnections of Large-Scale Climate Patterns to Regional Drought in Mid-Latitudes: A Case Study in Xinjiang, China. *Atmosphere*, **13**, Article No. 230. <https://doi.org/10.3390/atmos13020230>
- [12] Harwood, N., Hall, R., Di Capua, G., *et al.* (2021) Using Bayesian Networks to Investigate the Influence of Subseasonal Arctic Variability on Midlatitude North Atlantic Circulation. *Journal of Climate*, **34**, 2319-2335. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0369.1>
- [13] Silva, F.N., Vega-Oliveros, D.A., Yan, X., *et al.* (2021) Detecting Climate Teleconnections with Granger Causality. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2021GL094707. <https://doi.org/10.1029/2021GL094707>
- [14] Gao, M., Zhang, H., Zhang, A., *et al.* (2022) Nonhomogeneous Poisson Process Model of Summer High Temperature Extremes over China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-919065/v1>
- [15] Kim, H., Kang, S.M., Kay, J.E., *et al.* (2022) Subtropical Clouds Key to Southern Ocean Teleconnections to the Tropical Pacific. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119**, e2200514119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2200514119>
- [16] Graafland, C.E., Gutierrez, J.M., Lopez, J.M., *et al.* (2020) The Probabilistic Backbone of Data-Driven Complex Networks: An Example in Climate. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 11484. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67970-y>
- [17] Agarwal, A., Caesar, L., Marwan, N., *et al.* (2019) Network-Based Identification and Characterization of Teleconnections on Different Scales. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 8808. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45423-5>
- [18] Ciemer, C., Boers, N., Barbosa, H.M.J., *et al.* (2018) Temporal Evolution of the Spatial Covariability of Rainfall in South America. *Climate Dynamics*, **51**, 371-382. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3929-x>
- [19] Donges, J.F., Zou, Y., Marwan, N., *et al.* (2009) Complex Networks in Climate Dynamics: Comparing Linear and Nonlinear Network Construction Methods. *The European Physical Journal Special Topics*, **174**, 157-179. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2009-01098-2>
- [20] Su, Z., Meyerhenke, H. and Kurths, J. (2022) The Climatic Interdependence of Extreme-Rainfall Events around the Globe. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **32**, Article ID: 043126. <https://doi.org/10.1063/5.0077106>
- [21] Boers, N., Goswami, B., Rheinwalt, A., *et al.* (2019) Complex Networks Reveal Global Pattern of Extreme-Rainfall

- Teleconnections. *Nature*, **566**, 373-377. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0872-x>
- [22] Wang, X., Xie, F., Zhang, Z., *et al.* (2021) Complex Network of Synchronous Climate Events in East Asian Tree-Ring Data. *Climatic Change*, **165**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03008-0>
- [23] Gregory, W., Tsamados, M., Stroeve, J., *et al.* (2020) Regional September Sea Ice Forecasting with Complex Networks and Gaussian Processes. *Weather and Forecasting*, **35**, 793-806. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0107.1>
- [24] Gong, Z.-Q., Wang, X.-J., Zhi, R. and Feng, A.-X. (2011) Circulation System Complex Networks and Teleconnections. *Chinese Physics B*, **20**, 495-503.
- [25] Ekhtiari, N., Agarwal, A., Marwan, N., *et al.* (2019) Disentangling the Multi-Scale Effects of Sea-Surface Temperatures on Global Precipitation: A Coupled Networks Approach. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **29**, Article ID: 063116. <https://doi.org/10.1063/1.5095565>
- [26] Ying, N., Zhou, D., Chen, Q., *et al.* (2019) Long-Term Link Detection in the CO<sub>2</sub> Concentration Climate Network. *Journal of Cleaner Production*, **208**, 1403-1408. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.093>
- [27] Yang, X., Wang, Z.H. and Wang, C. (2022) Critical Transitions in the Hydrological System: Early-Warning Signals and Network Analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, **26**, 1845-1856. <https://doi.org/10.5194/hess-26-1845-2022>
- [28] Ekhtiari, N., Ciemer, C., Kirsch, C., *et al.* (2021) Coupled Network Analysis Revealing Global Monthly Scale Co-Variability Patterns between Sea-Surface Temperatures and Precipitation in Dependence on the ENSO State. *The European Physical Journal Special Topics*, **230**, 3019-3032. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-021-00168-z>
- [29] Quiroga, R.Q., Kreuz, T. and Grassberger, P. (2002) Event Synchronization: A Simple and Fast Method to Measure Synchronicity and Time Delay Patterns. *Physical Review E*, **66**, Article ID: 041904. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.041904>
- [30] 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. *Nature Communications*, **5**, Article No. 5199. <https://doi.org/10.1038/ncomms6199>
- [31] Perry, S.J., McGregor, S., Gupta, A.S., *et al.* (2017) Future Changes to El Niño-Southern Oscillation Temperature and Precipitation Teleconnections. *Geophysical Research Letters*, **44**, 10608-10616. <https://doi.org/10.1002/2017GL074509>
- [32] Yeh, S.W., Cai, W., Min, S.K., *et al.* (2018) ENSO Atmospheric Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing. *Reviews of Geophysics*, **56**, 185-206. <https://doi.org/10.1002/2017RG000568>
- [33] Shradha, G., Zhen, S., Niklas, B., *et al.* (2022) Interconnection between the Indian and the East Asian Summer Monsoon: Spatial Synchronization Patterns of Extreme Rainfall Events. *International Journal of Climatology*, **43**, 1034-1049. <https://doi.org/10.1002/joc.7861>
- [34] Qiao, P., Gong, Z., Liu, W., *et al.* (2021) Extreme Rainfall Synchronization Network between Southwest China and Asia-Pacific Region. *Climate Dynamics*, **57**, 3207-3221. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05865-y>
- [35] Qiao, P., Gong, Z., Liu, W., *et al.* (2022) Asymmetrical Synchronization of Extreme Rainfall Events in Southwest China. *International Journal of Climatology*, **42**, 5935-5948. <https://doi.org/10.1002/joc.7569>
- [36] Mao, Y., Zou, Y., Alves, L.M., *et al.* (2022) Phase Coherence between Surrounding Oceans Enhances Precipitation Shortages in Northeast Brazil. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2021GL097647. <https://doi.org/10.1029/2021GL097647>
- [37] Qiao, P., Liu, W., Zhang, Y., *et al.* (2021) Complex Networks Reveal Teleconnections between the Global SST and Rainfall in Southwest China. *Atmosphere*, **12**, Article No. 101. <https://doi.org/10.3390/atmos12010101>
- [38] Li, K., Wang, M. and Liu, K. (2021) The Study on Compound Drought and Heatwave Events in China Using Complex Networks. *Sustainability*, **13**, Article No. 12774. <https://doi.org/10.3390/su132212774>
- [39] Li, K., Wang, M. and Liu, K. (2022) The Study of Temperature Regionalization in China Using Complex Networks. *International Journal of Climatology*, **42**, 4445-4459. <https://doi.org/10.1002/joc.7478>
- [40] Kurths, J., Agarwal, A., Shukla, R., *et al.* (2019) Unravelling the Spatial Diversity of Indian Precipitation Teleconnections via a Non-Linear Multi-Scale Approach. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **26**, 251-266. <https://doi.org/10.5194/npg-26-251-2019>
- [41] 营娜, 叶谦, 韩战钢, 等. 全球地表温度大气遥相关路径研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 314-319.
- [42] 营娜, 陈建华, 李冬, 等. 基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2395-2402.
- [43] Zhao, Z.D., Zhao, N. and Ying, N. (2021) Association, Correlation, and Causation among Transport Variables of PM<sub>2.5</sub>. *Frontiers in Physics*, **9**, Article ID: 684104. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.684104>
- [44] Ying, N., Zhou, D., Han, Z., *et al.* (2020) Climate Networks Suggest Rossby-Waves-Related CO<sub>2</sub> Concentrations to Surface Air Temperature. *Europhysics Letters*, **132**, Article No. 19001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/132/19001>

- 
- [45] Zhou, D., *et al.* (2015) Teleconnection Paths via Climate Network Direct Link Detection. *Physical Review Letters*, **115**, Article ID: 268501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.268501>
- [46] Runge, J., Petoukhov, V., Donges, J.F., *et al.* (2015) Identifying Causal Gateways and Mediators in Complex Spatio-Temporal Systems. *Nature Communications*, **6**, Article No. 8502. <https://doi.org/10.1038/ncomms9502>
- [47] Boers, N., Bookhagen, B., Marwan, N., *et al.* (2016) Spatiotemporal Characteristics and Synchronization of Extreme Rainfall in South America with Focus on the Andes Mountain Range. *Climate Dynamics*, **46**, 601-617. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2601-6>
- [48] Liu, T., Chen, D., Yang, L., *et al.* (2023) Teleconnections among Tipping Elements in the Earth System. *Nature Climate Change*, **13**, 67-74. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01558-4>
- [49] Ahmadi, M., Kamangar, M., Salimi, S., *et al.* (2022) A New Approach in Evaluation Impacts of Teleconnection Indices on Temperature and Precipitation in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, **150**, 15-33. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04138-w>
- [50] Kalu, I., Ndehedehe, C.E., Okwuashi, O., *et al.* (2022) An Assimilated Deep Learning Approach to Identify the Influence of Global Climate on Hydrological Fluxes. *Journal of Hydrology*, **614**, Article ID: 128498. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128498>
- [51] Gao, L., Yang, Y.M., Li, Q., *et al.* (2022) Deep Learning for Predicting Winter Temperature in North China. *Atmosphere*, **13**, Article No. 702. <https://doi.org/10.3390/atmos13050702>
- [52] Builes-Jaramillo, A., *et al.* (2018) Nonlinear Interactions between the Amazon River Basin and the Tropical North Atlantic at Interannual Timescales. *Climate Dynamics: Observational, Theoretical and Computational Research on the Climate System*, **50**, 2951-2969. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3785-8>
- [53] Xu, F., Shi, Y., Deng, M., *et al.* (2017) Multi-Scale Regionalization Based Mining of Spatio-Temporal Teleconnection Patterns between Anomalous Sea and Land Climate Events. *Journal of Central South University*, **24**, 2438-2448. <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3655-x>