

北半球温带气旋客观研究方法及模拟和预估的研究进展

张颖娴 丁一汇

(国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 温带气旋是影响中高纬度地区大范围天气气候变化的重要天气系统之一, 研究其气候特征、活动规律和变化趋势对改进天气预报和理解全球气候变化具有重要意义。从主要温带气旋的识别方法、当前气候时期温带气旋的变化、气候情景下未来温带气旋变化的预估以及不确定性分析等4个方面, 全面回顾了北半球温带气旋的研究进展: (1) 20世纪80年代后, 基于再分析数据和大气环流模式(GCM)的发展, 温带气旋研究从主观分析开始向客观识别方法发展; (2) 再分析和模式数据均显示北半球存在两个温带气旋主活动中心 and 两个次活动中心, 主活动中心分别位于北太平洋和北大西洋地区, 次活动中心分别位于地中海和蒙古地区; (3) 在人类活动影响的气候变化情景下, 大多数模式模拟得到北半球大部分地区温带气旋数目将减少, 个别地区的温带气旋数目将增加; (4) 由于不同研究中对阈值、物理量和大气层的选取存在差异, 这使得对当前气候时期和GCM模拟研究中的温带气旋及其变化和趋势问题还存在许多不确定性。因此, 目前亟待解决的问题是对于温带气旋的不同研究方法和研究结果做更多具体的比较分析, 从而给出对温带气旋更深入的认识。

关键词: 温带气旋, 客观判定和追踪方法, 温带气旋的气候态特征和变化, 气候情景

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.01.001

A Review of the Research on Objective Method and Simulation and Projection of Extratropical Cyclone over the Northern Hemisphere

Zhang Yingxian, Ding Yihui

(National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Extratropical cyclone is one of the important synoptic systems which affect climate/weather variability over a wide area of mid- and high latitudes, and it is meaningful to research its climatic characteristics, activity patterns, and variation tendency. A comprehensive review of research progress of extratropical cyclones over the Northern Hemisphere from four aspects, involving identification methods, changes during present climate period, changes estimated under the future climate scenarios, and uncertainty analysis of extratropical cyclones, is discussed: (1) In view of the development of reanalysis data and GCM, the research method of extratropical cyclones shifts from subjective analysis to objective identification; (2) There are two main activity centers and two subordinate activity centers displayed by reanalysis and model data, with the main activity center located in the North Pacific and North Atlantic region, and the subordinate activity center located in Mediterranean and Mongolian regions; (3) Under the influence of climate change scenarios by human activities, extratropical cyclones will diminish in most parts of the Northern Hemisphere, and increase in individual districts; (4) Different thresholds, different physical quantities, and considerations of different atmospheric vertical levels add to a picture which can be combined to get an uncertainty view of cyclones, their variability, and trends, in the real world and in GCM studies. Hence, the urgent need for an in-depth understanding of cyclones is more specific intercomparison studies which can demonstrate the differences between the approaches and their results.

Keywords: extratropical cyclones, objective detecting and tracking method, climatologies and variations of extratropical cyclones, climate scenario

收稿日期: 2013年7月24日; 修回日期: 2014年3月25日
第一作者: 张颖娴(1982—), Email: zhangyingxian@cma.gov.cn
资助信息: 国家科技支撑计划课题(2009BAC51B02); 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417205); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406017)

0 引言

温带气旋是出现在南、北半球中高纬度地区具有斜压性的低压涡旋, 在全球大气环流中起着重要的作用, 热带和极地之间的热量、水汽和动能传输, 很大程度上都通过温带气旋的移动和发展来实现。另外,

温带气旋是影响中高纬度地区大范围天气变化的重要天气系统之一, 温带气旋及其锋面系统, 受斜压不稳定驱动, 能够造成明显或激烈的天气现象, 如极端温度、极端强降水、强风暴和风暴潮等, 造成生命和财产的巨大损失。亚洲、北美东部、北太平洋和北大西洋是北半球温带气旋活动最频繁的地区。我国地处东亚大陆, 受东亚温带气旋影响剧烈。温带气旋活动时常伴有冷空气的侵袭, 降温、风沙、雪、霜冻、大风和暴雨等天气现象随之而来。东亚气旋的活动范围广泛, 其移动和发展带来的影响能从我国内陆一直延伸至西太平洋的辽阔海域。因此, 研究温带气旋的气候特征、活动规律和变率趋势对理解东亚乃至全球的天气、气候变化以及极端气候事件具有重要意义。

早在100多年前, 菲茨洛依就对温带气旋中地气流结构作了较真实的描述。第一次世界大战之后, 随着地面观测网的扩充, 挪威学派在总结和吸取过去研究成果的基础上提出了挪威气旋模式, 第一次概括出气旋内三维空气运动、降水和地面锋面之间关系的天气学模式, 为短期预报提供了理论基础, 在气象学发展中起着重大的作用。到了20世纪30年代, 由于高空观测网的建立, 发现了高空波动及高空波动与温带气旋之间的联系, 从而使气象学家对温带气旋的发生发展、大尺度结构以及能量收支等有了较深入的认识^[1]。之后提出的一些气旋发展理论和观测结果至今仍是预报的主要依据, 其中Petterssen^[2]和Palmén等^[3]对此做了全面的总结。对于温带气旋的气候学研究, 早期的学者主要依靠人工主观判断来进行统计分析, 随着再分析数据和天气气候模式的发展, 20世纪80年代以后气象学家开始尝试用数值算法来客观判定和追踪温带气旋, 目前已成为温带气旋研究的客观方法之一。客观方法的发展使得客观分析温带气旋变化以及利用气候模式模拟和预估温带气旋成为可能。

本文从温带气旋的客观研究方法(第二部分)出发, 对主要方法进行总结, 在第三和第四部分分别讨论用客观方法分析当前气候时期北半球温带气旋强度和数目的变化情况, 以及温带气旋模拟和气候情景下未来预估的研究进展, 最后在第五部分给出了全文的总结及对未来温带气旋研究工作的展望。

1 温带气旋的客观识别和追踪方法研究

1.1 温带气旋的客观识别

早期温带气旋的判定和追踪主要依靠人工分析天气系统来实现^[4-7], 人工分析方法的优势在于, 经验丰富的预报员能较好地分析复杂的天气系统, 但人工分析在判定气旋位置和数字化过程中不可避免会产生

随机误差, 而且人工方法需要消耗大量的时间, 这都是人工方法趋于淘汰的原因。因此, 在再分析数据和天气气候模式发展的基础上, 利用逐日海平面气压场或高度场判定和追踪温带气旋的客观数值算法^[8-10]发展了起来。Rice^[11]第一个将客观判定温带气旋的算法应用于格点数据。之后的几十年中, 更成熟的客观方法被科学家们发展并采用, 比如, Wernli等^[12]发展了一个通过在气压局地最小值周围搜索闭合等值线的数值算法。除此之外, 温带气旋的客观研究也逐渐应用于高分辨率的全球及区域气候模式^[13-14]。

天气尺度系统的强度通常用模式、再分析等海平面气压场或高度场的带通(band-pass)时间序列的变化来表征^[15-20]。这种带通统计分析方法常被用于分析与低频振荡(如北大西洋涛动)有关的风暴路径, 分析人为温室气体效应下风暴活动的变化^[21-24]等方面的研究。这种方法的不足之处在于它没有办法考虑单个风暴系统本身的特征, 如加深速率、生命期和传播速率^[19, 25-26], 以及单个风暴体的自身结构^[27]等。

在大多数的研究中, 一般将海平面气压场的局地最小值或对流层低层涡度场的局地最大值定义为温带气旋的中心^[28-32]。König等^[33]在研究中将这两种指标联系起来, 共同识别温带气旋。Murray等^[34]、Haak等^[35]和Jung等^[36]将迭代和插值方法也应用到了温带气旋的客观判定中。另外, Benestad等^[37]在截断傅里叶级数的基础上发展了一个微积分气旋的客观判定方法。依赖于海平面气压场来识别温带气旋往往在高海拔地区会由于垂直外推和模式数据中地形差异的影响而产生不可靠的结果, 因此多数研究者忽略了高海拔地区的温带气旋系统^[38]。将海平面气压场的局地最小值作为判定温带气旋的指标会漏掉一些小尺度的系统^[39], 这些小尺度系统往往出现在快速移动的气旋过程中, 或气旋的生成和消亡阶段^[40-41]。在一些地区, 中纬度气旋和一些低压系统有着不同的结构和特征, 比如季风低压和局地热低压等^[7]。相比而言, 最大局地涡度指标可以判定到小尺度的系统, 但最大局地涡度有时往往同局地气压最小不一致, 并且会判定到一些人工判定中不存在的系统。高分辨率的涡度场又包含较多的噪声, 诸如锋面等结构可能被分解^[41], 因此采用涡度来追踪温带气旋时, 常常需要做许多平滑和降低分辨率的工作。一般而言, 研究者通过和实际天气过程比较来检验数值算法再现气旋气候形态的能力。Haak等^[35]还通过计算客观识别与人工识别的温带气旋的中心强度及位置的偏差, 检验客观数值算法识别气旋过程的能力。

1.2 温带气旋的追踪

温带气旋的追踪通常将当前时刻客观判定的气旋系统分配给下一时刻客观判定的气旋系统，这种分配需要在一定区域内搜索最可能的下一时刻客观判定的气旋系统^[42-45]。Alpert等^[46]、König等^[33]、Ueno^[30]和Blender等^[47]以当前时刻气旋位置为中心，择取一定的距离为半径，搜索下一时刻的气旋位置。Geng等^[48]和Raible^[49]在所确定的半径内，搜索最近距离的气旋位置为气旋路径，若搜索半径内没有客观判定的气旋，则此气旋消亡。Murray等^[34, 40]和Haak等^[35]将局地引导气流的影响应用到搜索下一时刻气旋位置的研究中。通过追踪确定的温带气旋过程可以研究和探讨气旋过程的加深速率、移动速度和生命期等特征。在追踪的

基础上，爆发性温带气旋的研究也有了可能^[27, 50-51]。

一些研究者^[41, 48, 52-56]用客观方法研究发现客观判定的温带气旋数目在北半球中纬度大洋盆地有极大值（图1），这些地区与风暴路径的分布是一致的。就北半球温带气旋的气候特征来看，北半球的北大西洋和北太平洋是主要的气旋活动区，冬季这两个区域的气旋强度变化有较强的相关性^[57]。气旋的次活动区分别在亚洲和地中海地区，北半球冬季气旋活动最强，夏季气旋活动最弱。冬季大洋西海岸气旋的最大加深速率最大，且移动速度最快，而高海拔的下游地区是主要的气旋生成和消亡区，如落基山、格陵兰、阿尔卑斯山、西藏和日本的下游地区等^[39, 58]。

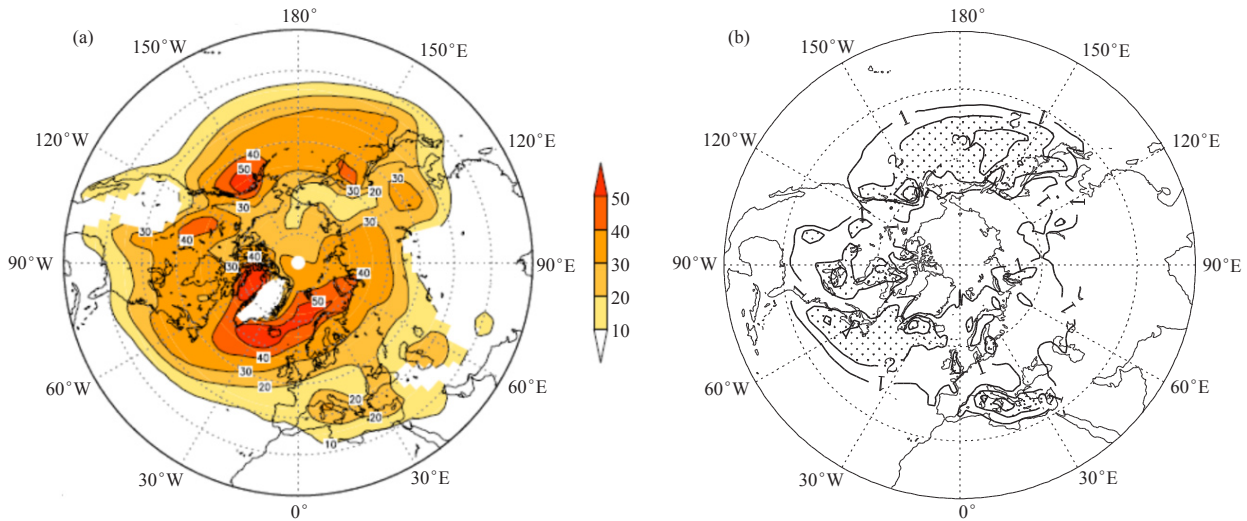


图1 (a) NCEP-NCAR再分析数据获得的1958/1959—2006/2007年北半球冬半年（10月至次年3月）平均温带气旋活动频率（ 10° 经度 $\times 30^\circ$ 纬度区域内的气旋个数）^[55]；(b) ERA40再分析数据获得的1958—2001年北半球冬季（12月—次年2月）平均温带气旋活动频率（ 2.5° 经度 $\times 2.5^\circ$ 纬度区域内的气旋个数）^[56]

2 当前气候时期北半球温带气旋的变化研究

2.1 北半球温带气旋的整体变化

就北半球温带气旋的整体变化来看，McCabe等^[59]认为20世纪50年代末之后北半球冬季（11月—次年3月）气旋发生频数在高纬度增加，而在中纬度明显减少，这意味着风暴路径有向极偏移的趋势，而全球变暖很可能是造成温带气旋频数和强度变化的主要原因。Raible等^[60]的研究结果更加确定了北半球风暴频率同北半球冬季温度有很强的相关性，全球变暖很可能是北半球风暴路径北移的一个重要原因。1958—1999年，北半球冬季温带气旋各气候特征呈现年际和年代际的变化，其中东太平洋和北美地区温带气旋的强度、发生频率和加深速率呈现减弱、减小和减慢的趋势，西太平洋和大西洋地区温带气旋的这些

特征则呈现相反的变化趋势。大西洋地区气旋频率同北大西洋涛动（NAO）相关性大，并且反映出了20世纪70年代NAO位相的转换；东太平洋气旋频率同太平洋北美型（PNA）遥相关有着很大的相关性^[54]。

2.2 北半球主要活动区的温带气旋变化

Schneiderer等^[61]利用ERA40再分析数据对冰岛地区的温带气旋进行了研究分析，结果表明1958—2001年冰岛地区气旋数目呈现增加趋势，这一结论和Bartholy等^[62]的结论有着较大的一致性。Serreze等^[63]采用客观判定和追踪方法对1952—1989年北冰洋地区的气旋活动进行了分析，结果表明冬季气旋活动频繁，最强的气旋系统基本上都出现在冰岛和挪威的海域，冬季气旋的移动路径主要是从挪威移向北冰洋；夏季气旋活动和冬季类似，只是在加拿大和北极的海

域, 气旋活动比冬季加强; 冬季气旋的中心气压值比夏季时平均弱5~10hPa; 对于气旋的变化来说, 春季、夏季和冬季的温带气旋数目呈现出增加的趋势。另外, Serreze^[64]还对北冰洋地区1973—1992年气旋的气压倾向、最大加深速率、气旋生成和消亡进行了统计分析。冰岛低压地区的气旋活动与NAO之间有着一定的联系, 当NAO极端负位相时, 冷季节的气旋发生是常年的两倍, 并且强度减小, 但气旋生成位置和气旋最大加深速率与常年相同^[52]; NAO正位相时, 冷季节冰岛地区的气旋没有明显的增加现象, 但是60°N以北地区的气旋活动无论是冷季节还是暖季节都显著增加, 特别是北冰洋和加拿大附近的海域, 这种现象和降低的平均海平面气压有关。Zhang等^[65]认为从中纬度地区移动进入北冰洋的温带气旋使得北冰洋地区温带气旋数目增多和强度增强。另外, 北冰洋气旋活动呈现显著的低频变化特征, 20世纪60年代位于负位相, 90年代位于正位相。

对于北大西洋区域, Sick-möller等^[53]和Gulev等^[54]通过对再分析数据的分析, 得到北大西洋的温带气旋数目呈现减少的变化趋势, 这一变化特点也同样出现在了北太平洋地区。Blender等^[47]采用一种拉格朗日方法, 利用欧洲中心的高分辨率资料, 对1990—1994年北大西洋/欧洲地区气旋路径进行了分析, 其将气旋的移动路径分为三类: 静止、沿纬圈移动、向北偏东方向移动, 统计发现冬季静止气旋的数目呈增加的趋势, 原因可能是气候变化引起的, 但很大程度上也可能是再分析资料修订引起的。Geng等^[48]采用客观判定和追踪方法, 利用欧洲中心1958—1998年再分析资料分析了冬季北大西洋温带气旋的活动密度、最大加深速率、移动速度和中心气压梯度, 结果表明这几十年冬季北大西洋温带气旋强度呈现增强的趋势; 气旋密度大的区域气旋强度大, 移动速率快, 加深速率快; 密度小的区域气旋强度小, 移动速率慢, 加深速率也

慢, 分析还表明, 北大西洋温带气旋的变化与对流层低层大尺度的斜压波及NAO有关, 北大西洋的SST也会影响气旋的变化, 但具体原因尚须进一步研究。Trigo^[66]的研究工作表明, 欧洲北部呈现气旋数目增加和欧洲中部呈现气旋数目减少的变化特征。ERA40和NCEP数据的分析均体现出了这一结果, 二者没有明显差异^[66]。但并非所有再分析数据在各个地区均呈现相同或相似的变化, 不同再分析数据在相同地区也会有相反的情况, 这主要是原数据的差异造成的^[37]。张颖娴等^[56]发现北大西洋/北美地区气旋活动频率具有明显的年际变化特征, 整体呈现显著的升高趋势, 但较高纬度和较低纬度地区呈现显著相反的分布形式(图2), 北大西洋/北美地区呈现出较高纬度大气斜压性增强而较低纬度大气斜压性减弱的变化特征(图3a和3b), 大气斜压性的这种变化可能造成了北大西洋/北美地区风暴路径向高纬度偏移的变化特征。

北太平洋是温带气旋非常活跃的另一主要地区。Graham等^[67]分析了过去50年北太平洋冬季气旋的气候特征和变化情况, 发现强气旋的频率和强度显著增加, 与之相对应的25°—40°N地面极端风速值也显著增加, 阿拉斯加湾的气旋型环流风速由西北风转为了西南风。加强的气旋活动明显是由于对流层上层风速的加强和加大的北太平洋中部垂直风速切变造成的, 而这些变化的原因很可能是由观测到的年代际或更长时间尺度的厄尔尼诺遥相关型的调整造成的。气旋的变化是稳定的, 并不像其他气候要素特征变化得那么突然, 热带西太平洋海温的增加是这些变化的一个合理原因, 但仍有可能存在其他的原因机制。另外, Favre等^[68]研究表明, 东北太平洋地区温带气旋自20世纪70年代之后强度呈现增强的趋势, 气旋移动的路径向南偏移。这些变化的原因可能是季节性阿留申低压气压偏低、北太平洋年代际振荡呈正位相、北美西海岸海表温度呈正距平以及太平洋中部气压呈负距平

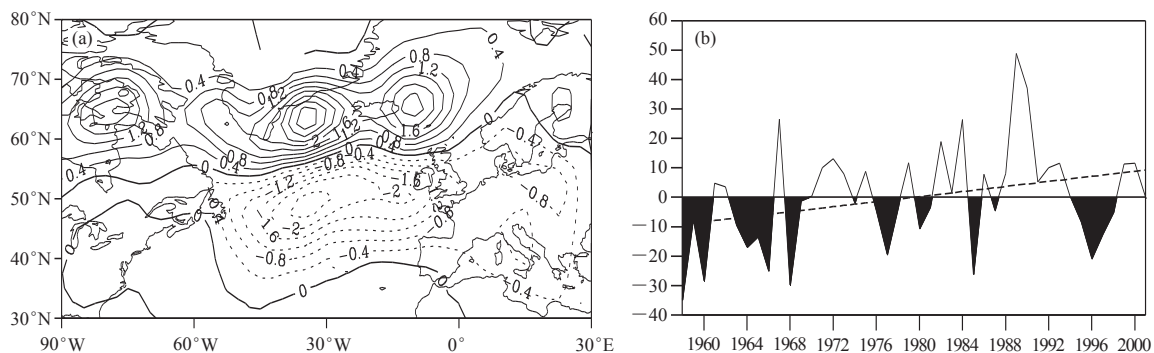


图2 1958—2001年北大西洋/北美地区年气旋活动频率EOF第一模态的空间分布(a, 特征向量乘以1个标准差)和标准化的时间序列(b, 虚线为线性趋势)^[56]

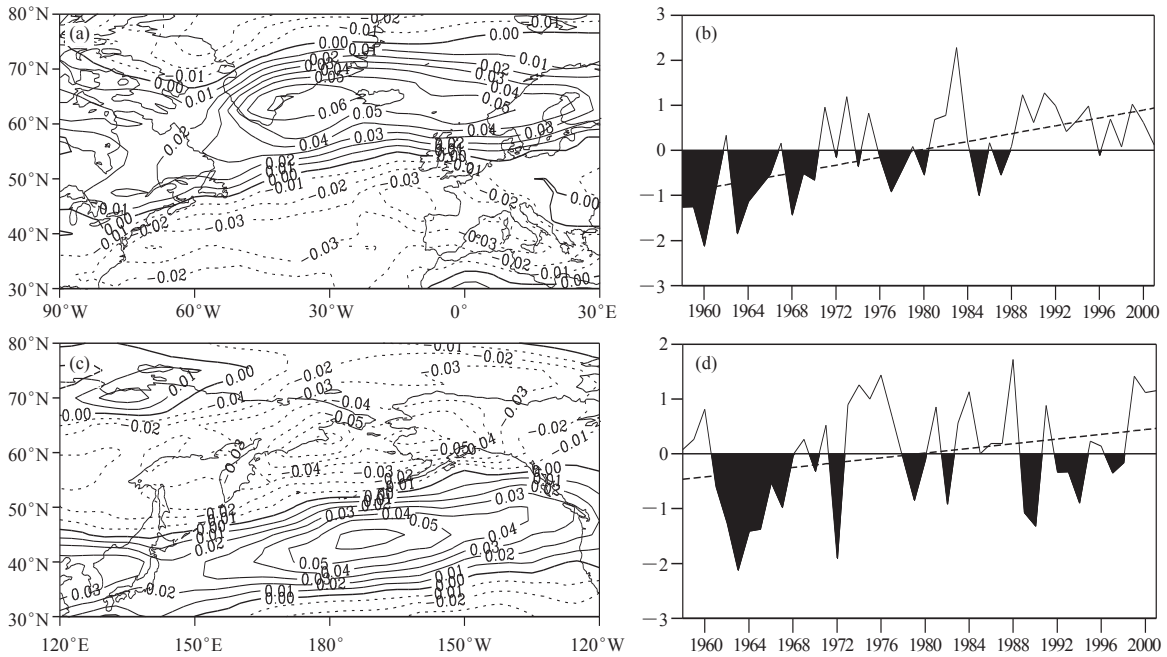


图3 1958—2001年北大西洋 (a、b) 和北太平洋地区 (c、d) 400 hPa 年均大气斜压性指数的EOF 第一模态空间分布 (a、c) 和标准化的时间序列 (b、d, 虚线为线性趋势) [56]

而引起的。热带太平洋海温的正距平也是影响中纬度地区气旋路径南移的一个原因，向南偏移的气旋路径更有利于热带大气的向北输送，同时阻止了与反气旋相关的极地气团的向南传输。北太平洋地区温带气旋强度增强的现象同样被Gulev等^[54]和Simmonds等^[69]发现。张颖娟等^[56]对北太平洋风暴路径的研究表明，北太平洋风暴路径同北大西洋具有相反的变化形式，即北太平洋20世纪后半叶风暴路径呈现向低纬度偏移的变化特征 (图4)，该地区大气斜压性的同位相变化可以在一定程度上解释风暴路径向低纬度偏移的原因 (图3c和3d)。

地中海地区的温带气旋是次天气尺度系统^[70]，相比较北半球的其他低压系统，地中海气旋强度较弱，

空间尺度较小，生命期也较短 (小于大西洋天气尺度系统，平均2~2.5d的生命期)。Trigo等^[71]利用欧洲中心1979—1996年的高分辨率数据，采用客观判定和追踪方法研究分析了地中海地区的温带气旋。气旋的主要生成地区在爱琴海、热那亚港湾和中东地区，其中中东地区正是亚洲夏季风侵入地中海地区的必经地，这也可能是中东地区气旋频繁生成的原因之一。热那亚港湾地处山脉的下游，因此是背风气旋的主要源地。另外，研究表明，地中海地区气旋的主要移动路径包括：冬季沿着伊比利亚半岛从大西洋移入的气旋路径；夏季从阿特拉斯山脉向北非扩展的气旋路径；热那亚港湾附近复杂的气旋路径和向地中海东海岸移动的气旋路径^[71-72]。之后，Bartholy等^[73]利用再分

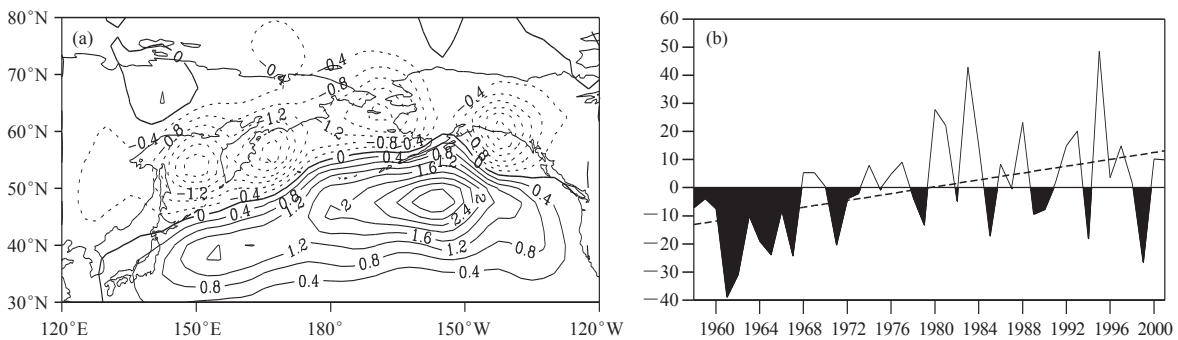


图4 1958—2001年北太平洋地区年气旋活动频率的EOF第一模态的空间分布 (a, 特征向量乘以1个标准差) 和标准化的时间序列 (b, 虚线为线性趋势) [56]

析数据对地中海西部地区气旋活动进行了更长时间序列（1957—2002年）的气候特征分析，更加着重研究年际、年代际的变化。

2.3 东亚温带气旋的变化

2000年后，研究者开始将客观判定和追踪方法应用到东亚温带气旋的研究中^[74-78]。姚素香等^[76]利用NCEP/NCAR再分析数据和客观识别方法分析得到蒙古地区春季（3—5月）气旋活动频数存在明显的年代际变化，20世纪50年代气旋活动频数较少，60年代开始到70年代后期气旋活动频数较多，从70年代末至2000年又进入一个气旋活动频数较少的时期；贝加尔湖东部地区在50年代初气旋活动频数较多，50年代中期到60年代中期气旋活动频数较少，而60年代后期到70年代后期气旋活动频数又较多，此后气旋活动频数又逐渐减少；而我国东北地区气旋频数年代际变化并不十分明显，只是气旋活动频数在80年代以后年际变化幅度略大。王艳玲^[74]以40°N为界划分南方/北方气旋，1948—2002年，北方气旋主要活动高频区在蒙古—中国东北地区，活动频数有逐年减少的趋势，5月和9月是北方气旋活动的峰值月；南方气旋活动频数有逐年增加的趋势，8月是南方气旋活动的峰值月。王新敏^[77]的研究表明，东亚北方气旋20世纪70年代中期到80年代，气旋数目呈明显增加态势，80年代末到90年代又开始回落；春季是一年中北方气旋多发季节，冬季最少，5月发生频数最多，1月发生频数最少；90年代与80年代相比，北方气旋高频活动中心明显向北偏移，偏移了大概2个纬度；70年代末到90年代末，蒙古气旋频数减少、强度减弱。Zhang等^[51]利用ERA40再分析数据补充获得了东亚主要的气旋活动路径（图5），其中有2条海上气旋活动路径，2条蒙古气旋活动路径，1条黄河气旋活动路径和1条江淮气旋活动路径。另外，20世纪60年代至80年代中期40°—60°N、80°—140°E地区气旋数目（北方气旋）呈现增加的趋势，而80年代中期之后温带气旋数目则锐减，这主要是由于80年代以后该地区的大气斜压性减弱，更高纬度地区的大气斜压性增强，从而导致了气旋源地的北移。较低纬带（20°—40°N、110°—160°E）气旋数目线性增加，这主要是由位于40°—55°N的北太平洋风暴轴有向低纬度偏移的变化趋势造成的^[79]。

另外，爆发性温带气旋也是一个研究的重点。当位于 φ 纬度的气旋24小时中心气压至少下降 $24 \times \sin\varphi / \sin 60^\circ$ hPa时，我们称这个气旋为爆发性气旋或气象炸弹^[80]。Zhang等^[51]的研究表明东亚地区爆发性气旋

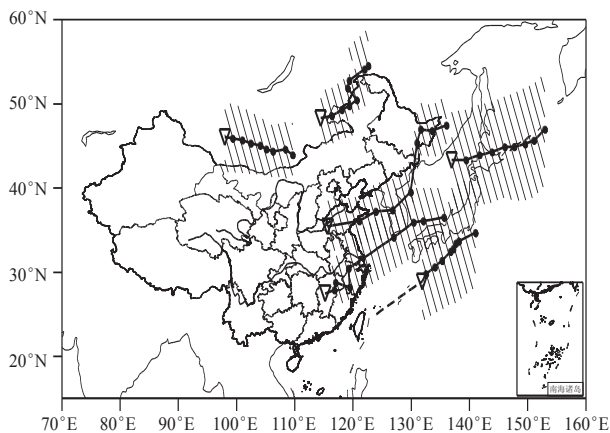


图5 k-means聚类分析方法获得的东亚温带气旋主要活动路径，三角形为每条气旋路径的起点，阴影区为每条路径的影响范围^[51]

绝大多数都发生在东亚的东海岸，日本和西北太平洋上，极少数发生在内陆。内陆的爆发性气旋主要集中在巴尔喀什湖西北方地区和蒙古地区。同北美内陆地区相比较，东亚内陆更不易发生爆发性气旋。和北美地区相比，东亚内陆地区的气旋较少爆发性发展。东亚地区的风暴数目少于北美地区，强度也弱于北美地区。

IPCC^[81]通过总结研究者的科研结果，得到过去50年北半球极端温带气旋的频率和强度可能存在增加和增强的趋势，风暴路径可能存在向极地移动的变化特征。一些再分析数据的研究分析表明高纬度地区气旋有增强的趋势，但是由于对于观测系统的变化将怎样影响再分析数据中气旋的加剧还没有足够的认识，因此IPCC/AR4认为对于温带气旋的这些变化虽然有不少的共识但仍然具有较低的信度。另外，由于研究者采用的气旋追踪方法及再分析数据的不同，因此IPCC/AR4也同样认为对于区域尺度上温带气旋的变化研究者的共识较低。

3 气候模式对北半球温带气旋的模拟和预估研究

研究温带气旋的客观算法的目的之一，是将其应用在GCM的模拟数据中，检验模式模拟温带气旋的能力和对未来温带气旋可能变化的情景预估。研究GCM对温带气旋的模拟可以帮助确定影响气旋气候态变化的原因和机制问题，例如探讨温带气旋对海洋边界条件的敏感性^[82]或对温室气体浓度增加的敏感性。

3.1 20世纪当前气候时期的温带气旋模拟研究

比较和检验用再分析数据驱动的GCM而模拟的温带气旋的气候态是检验GCM模拟可靠性非常重要的步骤。需要注意的是，大部分GCM的空间和时间分辨率

同典型的再分析数据的分辨率并不一致,有些分辨率高,有些分辨率不足。Pinto等^[83]的研究表明统一空间分辨率对于温带气旋的模拟研究非常重要。另外,时间分辨率的统一也是必要的,时间分辨率越低,客观方法获得的气旋路径数目也就越少^[84-85]。生命期短、强度弱的气旋系统要比生命期长、强度强的气旋系统更容易受到降低时间分辨率的影响。

Ulbrich等^[86]研究分析了当前温室气体浓度强迫下的16个海气耦合模式对风暴路径(海平面气压场变化的天气尺度滤波方差)的模拟能力,证实了这些模式对风暴轴年均空间分布结构的模拟能力。虽然GCM很难再现个例气旋,然而即使分辨率较低的GCM也能呈现出一些基本的气旋活动的气候态特征。Raible等^[87]将判定和追踪气旋系统的客观方法应用于一个分辨率较低的气候模式来模拟气旋的一些气候特征,发现当前温室气体强迫下气旋数目少于观测值,这种现象在地中海地区的气旋活动高频区最为显著。Bengtsson等^[58]指出在落基山的气旋生成地区,ECHAM5气候模式模拟的气旋强度要弱于观测值,但模拟的气旋强度

和ERA40再分析数据的分析结果比较一致。这一结果与Pinto等^[83]用ECHAM4气候模式的模拟结果是一致的,该模式模拟的地中海大部地区的气旋数目也少于观测值。GCM的模拟结果同样能够呈现出温带气旋对大尺度环流型变化的依赖性。其中,Bengtsson等^[58]和Raible等^[82]发现用气候模式能够呈现出北半球风暴路径对ENSO变化的真实存在的响应。Orlanski^[88]的研究表明除了ENSO之外,亚洲大陆大气波的侵入也能在某种程度上解释北太平洋风暴轴的变化,这种观点有观测数据上的支持^[89]。张颖娴^[90]检验了国际耦合模式比较计划5(CMIP5)的6个全球气候系统模式(BCC-CSM1.1, CanESM2, GFDL-ESM2M, HadGEM2-CC, MPI-ESM-LR和NorESM1-M)对北半球温带气旋的模拟情况。与ERA40再分析资料相比,6个模式均模拟出了北半球温带气旋中心气压值线性降低的变化趋势,但对于温带气旋过程数变化的模拟情况存在比较大的差异,有3个模式模拟得到气旋过程数增加,这与再分析数据结果相反(表1)。

有许多因素导致了气候模式的模拟值同观测值

表1 全球气候模式系统模拟的1958—2001年北半球温带气旋过程数和气旋中心气压值的线性变化趋势^[90]

模式	BCC-CSM1.1	CanESM2	GFDL-ESM2M	HadGEM2-CC	MPI-ESM-LR	NorESM1-M
气旋过程数	-0.0074	0.0031	-0.0191	-0.0189	0.0097	0.0002
中心气压值	-0.0182	-0.0282*	-0.0082	-0.0051	-0.0186	-0.0083

注: ERA40获得气旋过程数和气旋中心气压值的线性趋势系数为-0.0067和-0.0370**；*, **表示通过显著性水平为0.05和0.01的检验。

之间的差异。例如, ECHAM4模拟的气旋路径比实际的气旋路径更加的偏向纬向,尤其是在北大西洋地区。这主要是由于模拟结果中海平面气压和上层大气斜压性存在偏差造成的^[83],相似的偏差也出现在了ECHAM5的模拟结果中。Pinto等^[91]进一步研究分析表明,模拟的气旋路径同NCEP再分析结果的偏差和模拟的上层大气急流轴、斜压性的偏差以及模拟的减弱的阻塞频率有关。Löptien等^[92]比较了不同模式的模拟结果,发现ECHAM5/OM1的模拟结果在气旋各特征方面都要优于ECHAM4的模拟结果。Greeves等^[32]运用HadGMAM1大气模式模拟分析大西洋风暴路径,发现模拟的大西洋风暴路径不能延伸至欧洲大陆,甚至短于该模式旧版本模拟的风暴路径的长度。在太平洋, HadGMAM1模拟气旋活动频率最大值的位置偏西,接近于日期变更线而不是与观测到的风暴路径从东北太平洋延伸至美洲大陆一样。研究者认为这主要是由于模式在对流层低层过多的非绝热加热造成的。模式误差的另一个可能原因是模拟的北太平洋地区的Eady增长率要高于ERA40的计算结果。Greeves等^[32]认为英国Hadley中心的气候模式对温带气旋的模拟再现主要依

赖于动力核心和水平分辨率:低分辨率模式的半拉格朗日动力核心不能产生小尺度的涡动,这导致了涡动动能的偏弱和气旋特征的弱小;欧拉动力核心引起的分辨率的降低会对风暴轴位置产生影响,但其强度的模拟结果不会产生误差。Roeckner等^[93]分析了增加气候模式的分辨率所产生的影响,发现当增加水平分辨率时中纬度西风带有向极地偏移的误差;增加垂直分辨率时中纬度西风带有向低纬度偏移的误差,西风带的误差从而会相应地作用于温带气旋的模拟结果上。

IPCC^[81]总结得到人为因素造成了温带气旋活动向极地偏移的结论达到中等信度。虽然温带气旋活动向极地偏移尚未正式归因,但来自地转风和海浪高度的间接证据发现,人为因素的确影响了全球海平面气压分布和大气风暴轴变化的趋势性。虽然人为强迫怎样影响温带气旋风暴路径的物理机制认知得到了加强,但不同机制在温带风暴路径向极地偏移中起到了多大的作用仍然不清楚。

3.2 温室气体增加导致的气候变暖条件下温带气旋未来变化预估

除了用气候模式分析当前气候时期温带气旋的

变化和原因外,不少研究者还用气候模式对未来不同气候变化情景下气旋的特征进行了模拟预估^[83, 91-92]。一些研究结果表明未来人为引起的气候变化下温带气旋活动会发生变化^[23, 55, 58, 82-83, 94-97]。不同温室气体浓度驱动的气候模式的集合模拟结果表明,极端强度气旋的数目在冬季将增多,然而总气旋数目北半球和南半球都有微弱减少的趋势^[98](图6)。至21世纪末时,气旋数目减少趋势的信号是加强的,这证实了气旋数目变化对所选情景的敏感性。北半球温带气旋数目减少的结论也在其他的一些研究中被证实^[58, 92, 99-101]。Lambert等^[98]指出未来北半球极端温带气旋事件发生频

率将增加,然而此结论并没有被其他研究者所证实。相反,一些研究中认为增强的气旋强度仅发生在有限的地区,比如Bengtsson等^[58]研究中的英国和阿留申群岛地区。Pinto等^[101]仅考虑了发展性气旋过程,发现未来北半球极端气旋的数目有增加的趋势(极端气旋的定义为发展性气旋最强的10%)。在解释未来气候情景下极端气旋事件变化趋势的不一致性的问题时,科学家认为极端事件的不同定义(例如,用气旋中心气压极端低压或气压拉普拉斯值的99%百分位值作为极端事件的阈值)在很大程度上决定了根本的变化趋势。

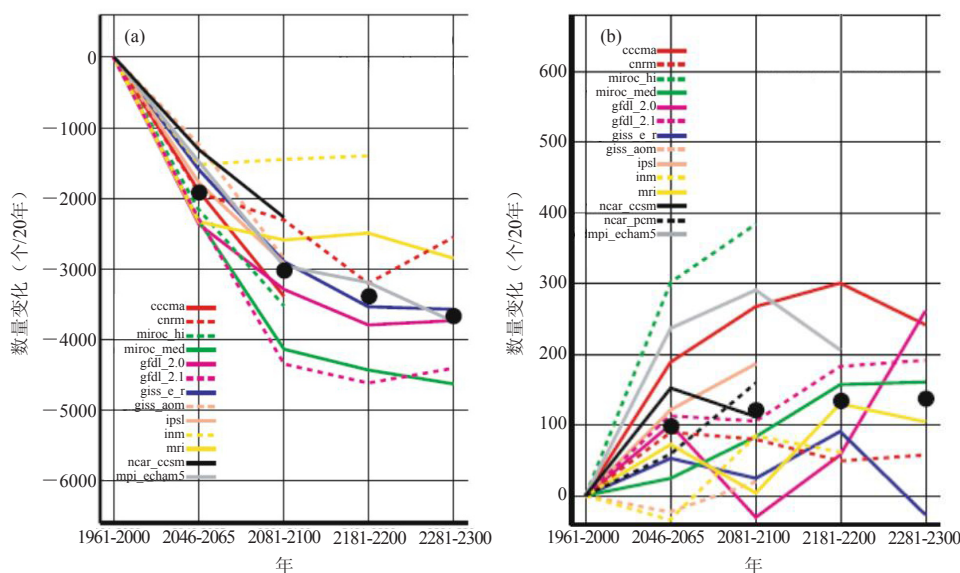


图6 不同气候模式模拟得到的SRES A1B情景下北半球温带气旋数距平变化序列(相对于1961—2000年)^[98]
(a) 温带气旋总数, (b) 强温带气旋数

Hadley中心和ECHAM的GCMs都发现认为不管从哪个物理量(气压拉普拉斯值,最低气压和气旋路径数目)的统计来看,未来大西洋东北部至欧洲中部地区极端气旋特征有增加的趋势^[102-103]。但是对于极端气旋增加的具体位置和幅度,不同模式之间还是存在一定差异^[103]。Ulbrich等^[86]运用16个耦合模式的23个集合结果证实,虽然不同模式和模式驱动存在很大的不同,但都得到了温室气体是导致大西洋东北部至欧洲中部地区和阿留申地区气旋活动增加的原因。研究表明,在16个GCMs中ECHAM5-OM1的模拟结果是当前气候条件和未来气候情景下最接近集合模式平均结果的。Pinto等^[100]利用ECHAM5-OM1气候模式模拟研究得到未来SRES情景下,位于北大西洋中部至亚洲大陆的对流层风暴活动是增加的。Ulbrich等^[24]用ECHAM4模拟的东北大西洋风暴路径的增强同向东移动的NAO中心有关,向东移动的北NAO中心又和欧洲西北部增

加的强气旋有关^[101]。另外,Jiang等^[104]认为增加的温室气体浓度会导致气旋半径的增加和向北方移动的趋势,但气旋强度和移动速度的增加幅度很小。另外,Löptien等^[92]用ECHAM5的情景数据发现温带气旋的移动速率有减慢的倾向,而加深速率有增快的倾向。

不少的GCM模拟结果都表明气候变化下地中海海域的温带气旋变化最为显著^[58, 83, 99, 103-106]。他们给出证据表明即使考虑不同的模式、情景和分析技术,地中海地区冬季气旋活动均显著减少,而地中海地区夏季气旋数目却增加。就气旋强度来说,Pinto等^[100]认为在温室气体导致的气候变化下地中海地区强气旋有减少的倾向。但与之相反,Lionello等^[105]发现了极端强气旋的增加,虽然增加并不显著。Muskulus等^[14]用区域气候模式研究表明地中海地区总的温带气旋数目是增加的,强气旋则是减少的。而Gaertner等^[107]运用集合的区域气候模式结果表明地中海地区极端气旋强度

是增强的,这种增强被归因为该地区热带气旋发展。Lionello等^[13]发现地中海地区夏季和秋季风暴轴强度显著减弱,但夏季气旋数目却是增加的。

IPCC^[81]总结得到增加的人为温室气体强迫将导致未来中纬度地区温带气旋数目减少,以及对流层风暴轴继续向极地移动均达到中等共识信度水平。CMIP3模拟得到温带气旋区域性的变化比较显著,部分地区的结果也达到中等共识信度水平。然而,CMIP3许多模式中平流层不足的分辨率是否可能会影响区域性的结果仍存在不确定性。另外,由于研究中采用的分析方法不同,物理量不同,以及分析的大气层次不同,将导致区域气候模式预估下的温带气旋结果具有低的共识信度水平。

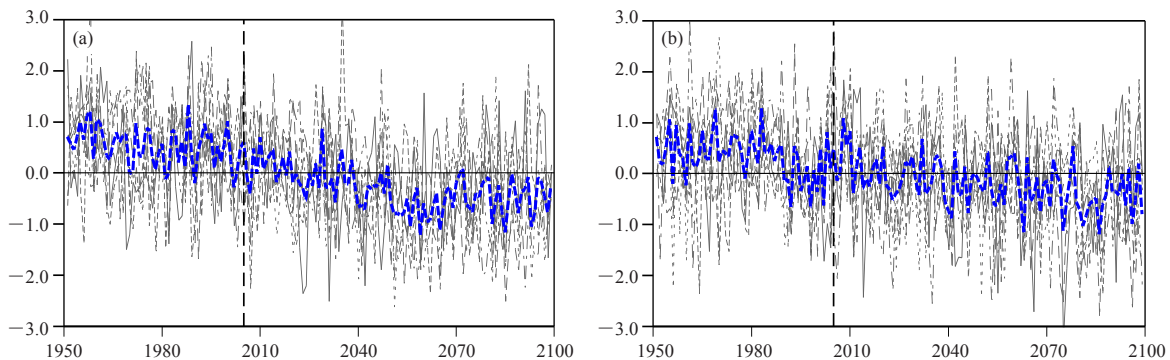


图7 北半球1950—2009年北半球温带气旋过程数(a)和气旋中心气压值(b)的时间变化序列(黑色虚线为各模式模拟情况,蓝色实线为模式集合结果)^[90]

对于东亚温带气旋来说,其变化同北半球的情况非常相似(图8),无论是南方气旋还是北方气旋,其生成和活动频率将显著减少,气旋中心气压值将显著降低^[90]。6个模式的模拟结果均显示对流层中层斜压区未来将向高层和高纬度扩展,斜压区的变化在某种程度上体现了风暴轴的变化。北半球斜压区和风暴轴向高纬度的移动抵消了高纬度地面气旋数目的减少,这也解释了为什么未来北半球较低纬度地面气旋数目比高纬度地区减少更为显著。

4 结语与展望

近几十年来,由于基础格点观测数据的发展和获取,使得有关温带气旋活动的研究呈现增多趋势,气旋识别和气旋活动量化的数值算法的发展也使得气旋活动更细致的研究得以实现。还有更多的研究工作采用了GCM来模拟当前历史时期温带气旋的活动情况并预估未来气候情景下温带气旋活动和强度的变化,这种预估工作主要是研究增加的温室气体强迫下温带气旋的响应情况。另外,多模式的集合模拟结果的应用也更有利于开展温带气旋更深入的研究。从本文前面

另外,张颖娴^[90]对6个全球气候系统模式的模拟结果预估发现,相对于20世纪后50年来说,新RCP4.5浓度路径下的2053—2099时段北半球温带气旋各特征变化的显著性基本都大于2006—2052时段。虽然各模式的模拟结果存在一定的差异性,但共同模拟出了至21世纪末北半球大范围地区的气旋生成和活动将减少,较低纬度减少得更显著。另外,集合模式模拟结果显示未来北半球气旋数目呈现显著减少的趋势,中心气压呈现显著降低的趋势(图7)。大多数模式的模拟结果得到北大西洋风暴轴未来将继续向极地活动偏移,但强度主要将减弱;过半模式的模拟结果为北太平洋风暴轴也将向极地偏移,强度变化则随季节的不同而不同。

的概述可以看到温带气旋的研究是多方面多层次的,综合来看可以获得以下比较一致的结论:对于北半球来说,再分析数据和模式数据均显示存在两个主要的气旋活动高频地区,一个位于北太平洋地区,另一个位于北大西洋地区。另外,当所采用的数据分辨率较高时,还能够呈现出另外两个较为明显的次活动中心,分别位于地中海地区和蒙古地区。在人类活动影响的气候变化情景下,大多数模式模拟得到冬季北半球大部分地区温带气旋数目将减少,而东北大西洋和北太平洋个别地区温带气旋数目将增加。对于北半球平均来说,当气旋强度以其中心气压值来定义时,极端气旋的数目将增加;当气旋强度以其中心气压的拉普拉斯值或涡度来定义时,极端气旋的数目将减少;增加的人为温室气体强迫将导致未来中纬度地区温带气旋数目减少,以及对流层风暴轴继续向极地移动均达到中等共识信度水平。

以上的综述可以看到,虽然温带气旋研究的一些方面在国际上得到了一定的共识,但很多问题仍有较大的分歧。我们发现,即使采用相同的数据,也可能

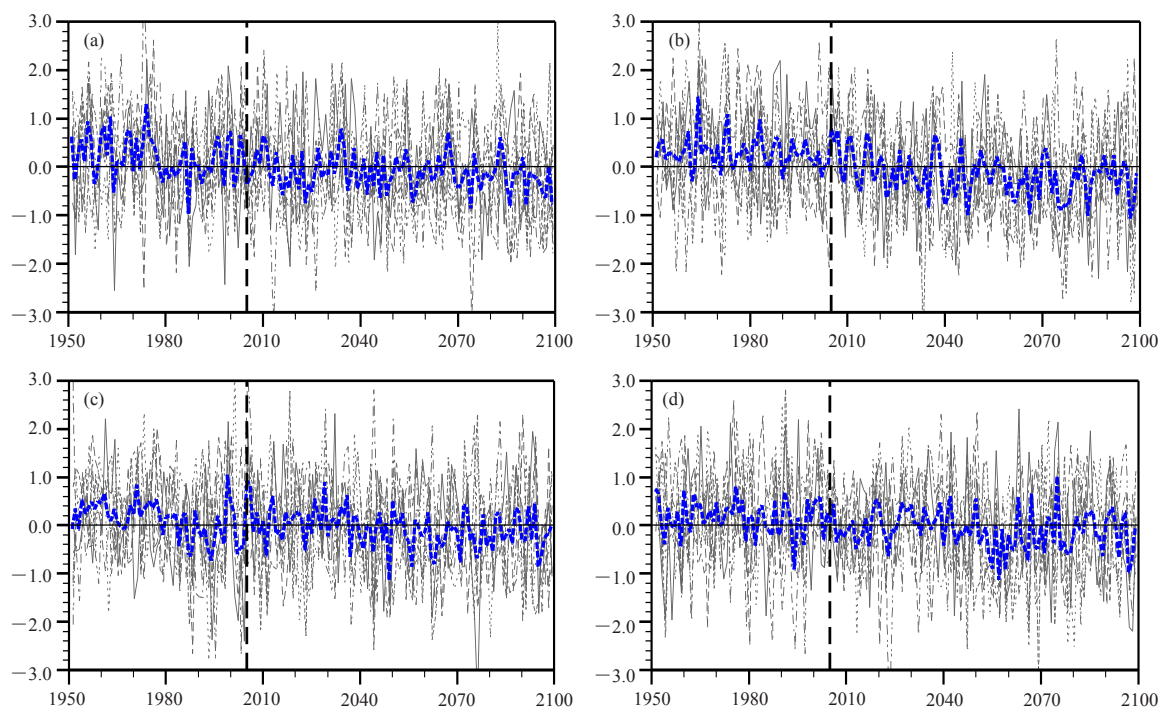


图8 东亚1950—2099年北 (a, b)/南 (c, d) 温带气旋过程数 (a, c) 和气旋中心气压值 (b, d) 的标准化时间变化序列 (黑色虚线为各模式模拟情况, 蓝色实线为模拟集合结果)^[90]

产生关于温带气旋不同的研究结果。其中一个原因在于不同研究者采用了不同的客观研究方法, 包括如何客观识别和追踪温带气旋, 以及温带气旋强度的判定方法。另外, 在利用观测数据和GCM模拟的研究中, 对于不同大气层的不同物理量以及采用不同的阈值都会使得温带气旋的变率和趋势研究产生不一样的结果。由于温带气旋是大气环流中非常复杂的三维天气系统, 它们自身有着许多不同的物理特征, 这些物理特征并不能通过某一种简单的标准的方法来研究, 因此温带气旋的统计分析也不应该只采用某些常用的方法。虽然有证据发现, 人为因素影响了全球大气风暴轴变化的趋势性, 但不同机制在温带风暴路径向极地偏移中起到了多大的作用仍然不清楚。鉴于以上温带气旋的研究现状和存在的问题, 目前亟待解决的问题和未来温带气旋研究的发展方向主要有三方面, 首先是对于温带气旋的不同研究方法和研究结果做更多具体的比较分析, 这种比较分析需要建立在一些共同的个例或时期上, 使得不同方法的综合研究得以实现, 从而提高对温带气旋多方面的认识, 并尽可能地减小温带气旋变化的不确定性; 第二, 利用全球气候模式进一步探讨人类和自然等不同机制在温带风暴变化中所起作用的大小, 对温带气旋及温带风暴路径变化继续归因研究; 第三, 利用多模式多情景预估未来温带气旋的可能变化, 并探讨变化的不确定性。温带

气旋是中高纬度地区最主要的天气气候系统, 继续客观深入地研究气候变化背景下温带气旋的变化特征对深入认识全球气候系统有着重要的科学意义。

参考文献

- [1] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 2005.
- [2] Pettersen S. Weather analysis and forecasting. New York: McGraw-Hill, 1956.
- [3] Palmén E, Newton C W. Atmospheric circulation systems. New York: Academic Press, 1969.
- [4] Reitan C H. Frequencies of cyclones and cyclogenesis for North America, 1951-1970. *Mon Wea Rev*, 1974, 102: 861-868.
- [5] Zishka K M, Smith P J. The climatology of cyclones and anticyclones over North America and surrounding ocean environs for January and July, 1950-77. *Mon Wea Rev*, 1980, 108: 387-401.
- [6] Schinke H. On the occurrence of deep cyclones over Europe and the North Atlantic in the period 1930-1991. *Contrib Atmos Phys*, 1993, 66: 223-237.
- [7] Chen S J, Zhang P Z. Climatology of deep cyclones over Asia and the Northwest Pacific. *Theor Appl Climatol*, 1996, 54: 139-146.
- [8] Hodges K I. A General Method for Tracking Analysis and its Application to Meteorological Data. *Mon Wea Rev*, 1994, 122: 2573-2586.
- [9] Sinclair M R. Objective Identification of Cyclones and Their Circulation Intensity and Climatology. *Wea Forecasting*, 1997, 12: 595-612.
- [10] Simmonds I, Keay K. Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR reanalysis. *J Clim*, 2000, 13: 873-885.
- [11] Rice J. The Derivation of Computer-based Synoptic Climatology of Southern Hemisphere Extratropical Cyclones. Honours Thesis. Department of Meteorology, 1982, University of Melbourne.
- [12] Wernli H, Schwierz C. Surface cyclones in the ERA-40 dataset (1958-2001), part I: Novel identification method and global climatology. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 2486-2507.

- [13] Lionello P, Boldrin U, Giorgi F. Future changes in cyclone climatology over Europe as inferred from a regional climate simulation. *Clim Dyn*, 2008, 30: 657-671.
- [14] Muskulus M, Jacob D. Tracking cyclones in regional model data: the future of Mediterranean storms. *Adv Geosciences*, 2005, 2: 13-19.
- [15] Blackmon M L, Wallace J M, Lee Y-H. Horizontal structure of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales. *J Atmos Sci*, 1984, 41: 961-980.
- [16] Blackmon M L, Lee Y-H, Wallace J M, et al. Time variation of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales as deduced from lag-correlation statistics. *J Atmos Sci*, 1984, 41: 981-991.
- [17] Wallace J M, Lim G, Blackmon M L. Relationship between cyclone tracks, anticyclone tracks and barocline wave guides. *J Atmos Sci*, 1988, 45:439-462.
- [18] Trenberth K E. Storm tracks in the Southern Hemisphere. *J Atmos Sci*, 1991, 48: 2159-2178.
- [19] Ayrault F, Lalaurette F, Joly A, et al. North Atlantic ultra high frequency variability. *Tellus A*, 1995, 47: 671-696.
- [20] Christoph M, Ulbrich U, Haak U. Faster determination of the intraseasonal variability of storm tracks using Murakami's recursive filter. *Mon Wea Rev*, 1995, 123:578-581.
- [21] Schubert M, Perlwitz J, Blender R, et al. North Atlantic cyclones in CO₂-induced warm climate simulations: frequency, intensity, and tracks. *Clim Dyn*, 1998, 14: 827-837.
- [22] Carnell R E, Senior C A. Changes in mid-latitude variability due to increasing greenhouse gases and sulphate aerosols. *Clim Dyn*, 1998, 14: 369-383.
- [23] Carnell R E, Senior C A, Mitchell J F B. An assessment of measures of storminess: simulated changes in northern hemisphere winter due to increasing CO₂. *Clim Dyn*, 1996, 12: 467-476.
- [24] Ulbrich U, Christoph M. A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic gas forcing. *Clim Dyn*, 1999, 15: 551-559.
- [25] Gulev S K. Climate variability of the intensity of synoptic processes in the North Atlantic midlatitudes. *J Clim*, 1997, 10: 574-592.
- [26] Gulev S K, Zokina O, Reva Y. Synoptic and subsynoptic variability in the North Atlantic as revealed by the Ocean Weather Station data. *Tellus A*, 2000, 52: 323-329.
- [27] Lim E-P, Simmonds I. Southern Hemisphere winter extratropical cyclone characteristics and vertical organization observed with the ERA-40 data in 1979-2001. *J Clim*, 2007, 20: 2675-2690.
- [28] Lambert S J. A Cyclone Climatology of the Canadian Climate Centre General Circulation Model. *J Clim*, 1988, 1: 109-115.
- [29] Treut L, Kalnay H E. Comparison of observed and simulated cyclone frequency distribution as determined by an objective method. *Atmdatafem*, 1990, 3: 57-71.
- [30] Ueno K. Inter-annual Variability of Surface Cyclone Tracks, Atmospheric Circulation Patterns and Precipitation in Winter. *J Meteor Soc Japan*, 1993, 71: 655-671.
- [31] Fyfe J C. Extratropical Southern Hemisphere cyclones: Harbingers of climate change? *J Clim*, 2003, 16: 2802-2805.
- [32] Greeves C Z, Pope V D, Stratton R A, et al. Representation of Northern Hemisphere winter storm tracks in climate models. *Clim Dyn*, 2007, 28: 683-702.
- [33] König W, Sausen R, Sielmann F. Objective identification of cyclones in GCM simulation. *J Clim*, 1993, 6: 2217-2231.
- [34] Murray R J, Simmonds I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I : Development and operation of the scheme. *Aust Met Mag*, 1991, 39: 156-166.
- [35] Haak U, Ulbrich U. Verification of an objective cyclone climatology for the North Atlantic. *Meteorol Z N F*, 1996, 5: 24-30.
- [36] Jung T, Gulev S K, Rudeva I, et al. Sensitivity of extratropical cyclone characteristics to horizontal resolution in the ECMWF model. *Q J R Meteorol Soc*, 2006, 132: 1839-1857.
- [37] Benestad R E, Chen D. The use of a calculus-based cyclone identification method for generating storm statistics. *Tellus A*, 2006, 58: 473-486.
- [38] Wang X L L, Swail V R, Zwiers F W. Climatology and changes of extratropical cyclone activity: comparison of ERA-40 with NCEP-NCAR reanalysis for 1958-2001. *J Clim*, 2006, 19: 3145-3166.
- [39] Pinto J G, Spanghel T, Ulbrich U, et al. Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: individual tracks and climatology. *Meteorol Z*, 2005, 14: 823-838.
- [40] Murray R J, Simmonds I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part II : pplication to January and July general circulation model simulations. *Aust Met Mag*, 1991, 39: 167-180.
- [41] Hoskins B J, Hodges K I. New Perspectives on the Northern Hemisphere Winter Storm Tracks. *J Atmos Sci*, 2002, 59: 1041-1061.
- [42] Simmonds I, Keay K. Variability of Southern Hemisphere Extratropical Cyclone Behaviour, 1958-97. *J Clim*, 2000, 13: 550-561.
- [43] Rudeva I, Gulev S K. Climatology of cyclone size characteristics and their changes during the cyclone life cycle. *Mon Wea Rev*, 2007, 135:2568-2587.
- [44] Gaffney S J, Robertson A W, Smyth P, et al. Probabilistic clustering of extratropical cyclones using regression mixture models. *Clim Dyn*, 2007, 29: 423-440.
- [45] Ulbrich U, Brücher T, Fink A H, et al. The central European floods in August 2002. Part II: synoptic causes and considerations with respect to climate change. *Weather*, 2003, 58: 434-442.
- [46] Alpert P, Neeman B U, Shay-el Y. Climatological Analysis of the Mediterranean Cyclones using ECMWF data. *Tellus A*, 1990, 42: 65-77.
- [47] Blender R, Fraedrich K, Lunkeit F. Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic. *Q J R Meteorol Soc*, 1997, 123: 727-741.
- [48] Geng Q, Sugi M. Variability of the North Atlantic Cyclone Activity in Winter Analyzed from NCEP-NCAR Reanalysis Data. *J Clim*, 2001, 14: 3863-3873.
- [49] Raible C C. On the relation between extremes of midlatitude cyclones and the atmospheric circulation using ERA40. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L07703.
- [50] Leslie L M, Lepastrier M, Buckley B W. Climatology of meteorological "bombs" in the New Zealand region. *Meteorol Atmos Phys*, 2005, 89: 207-214.
- [51] Zhang Yingxian, Ding Yihui, Li Qiaoping. A Climatology of Extratropical Cyclones over East Asia during 1958-2001. *Acta Meteor. Sinica*, 2012, 26(3): 261-277.
- [52] Serreze M C, Carse F, Barry R G, et al. Icelandic Low Cyclonic Activity: Climatological Features, Linkages with the NAO, and Relationship with Recent Changes in Northern Hemisphere Circulation. *J Clim*, 1997, 10: 453-464.
- [53] Sick-möller M, Blender R, Fraedrich K. Observed winter cyclone tracks in the Northern Hemisphere in re-analysed ECMWF data. *Q J R Meteorol Soc*, 2000, 126:591-620.
- [54] Gulev S K, Zolina O, Grigoriev S. Extratropical Cyclone Variability in the Northern Hemisphere Winter from the NCEP/NCAR Reanalysis Data. *Clim Dyn*, 2001, 17: 795-809.
- [55] Ulbrich U, Leckebusch G C, Pinto J G. Extratropical cyclone features in present and future climate: A review. *Theor Appl Climatol*, 2009, 96: 117-131.
- [56] 张颖娟, 丁一汇, 李巧萍. 北半球温带气旋活动和风暴路径的年代际变化. *大气科学*, 2012, 36(5): 912-928.
- [57] Mak M, Deng Y. Diagnostic and dynamical analyses of two outstanding aspects of storm tracks. *Dyn Atm Ocean*, 2007, 43: 80-99.
- [58] Bengtsson L, Hodges K I, Roeckner E. Storm tracks and climate change. *J Clim*, 2006, 19: 3518-3543.
- [59] McCabe G J, Clark M P, Serreze M C. Trends in Northern Hemisphere Surface Cyclone Frequency and Intensity. *J Clim*, 2001, 14: 2763-2768.
- [60] Raible C C, Della-Marta P, Schwierz C, et al. Northern Hemisphere extratropical cyclones: a comparison of detection and tracking methods and different reanalyses. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 880-897.

- [61] Schneiderit A, Blender R, Fraedrich K, et al. Icelandic climate and North Atlantic cyclones in ERA-40 reanalyses. *Meteorol Z*, 2007, 16: 17-23.
- [62] Bartholy J, Pongrácz R, Pattantyús-Ábrahám M. European cyclone track analysis based on ECMWF ERA-40 data sets. *Int J Climatol* 2006, 26: 1517-1527.
- [63] Serreze M C, Box J E, Barry R G, et al. Characteristics of Arctic synoptic activity, 1952-1989. *Meteorol Atmos Phys*, 1993, 51: 147-164.
- [64] Serreze M C. Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic. *Atmos-Ocean*, 1995, 33: 1-23.
- [65] Zhang X D, Walsh J E, Zhang J, et al. Climatology and interannual variability of arctic cyclone activity 1948-2002. *J Clim*, 2004, 17: 2300-2317.
- [66] Trigo I F. Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: A comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Clim Dyn*, 2006, 26: 127-143.
- [67] Graham N E, Diaz H F. Evidence for Intensification of North Pacific Winter Cyclones since 1948. *Bull Amer Meteor Soc*, 2001, 82: 1869-1893.
- [68] Favre A, Gershunov A. Extra-tropical cyclonic/anticyclonic activity in North-Eastern Pacific and air temperature extremes in Western North America. *Clim Dyn*, 2006, 26: 617-629.
- [69] Simmonds I, Keay K. Surface fluxes of momentum and mechanical energy over the North Pacific and North Atlantic Oceans. *Meteorol Atmos Phys*, 2002, 80: 1-18.
- [70] Maheras P, Flocas H A, Patrídas I, et al. A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: Spatial and temporal distribution. *Int J Climatol*, 2001, 21: 109-130.
- [71] Trigo I F, Davies T D, Bigg G R. Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. *J Clim*, 1999, 12: 1685-1696.
- [72] Barry R G, Chorley R J. *Atmosphere, weather and climate*. London: Routledge, 1992.
- [73] Bartholy J, Pongrácz R, Pattantyús-Ábrahám M. Analyzing the genesis, intensity, and tracks of western Mediterranean cyclones. *Theor Appl Climatol*, 2009, 96: 133-144.
- [74] 王艳玲. 近50a东亚—西太平洋温带气旋活动的气候特征及异常分析. 南京: 南京信息工程大学硕士论文, 2005.
- [75] 王艳玲, 郭品文. 春季北方气旋活动的气候特征及与气温和降水的关系. *南京气象学院学报*, 2005, 228(3): 391-397.
- [76] 姚素香, 张耀存, 周天军. 近50a春季东亚温带气旋活动频数的气候特征及其变化. *南京气象学院学报*, 2003, 26(3): 317-323.
- [77] 王新敏. 东亚北方温带气旋的变化及其对中国北方沙尘暴的影响研究. 南京: 南京信息工程大学硕士论文, 2007.
- [78] 王新敏, 邹旭恺, 翟盘茂. 北半球温带气旋的变化. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 154-157.
- [79] 张颖娴, 丁一汇, 李巧萍. ERA40再分析资料揭示的北半球和东亚地区温带气旋生成频率变化. *气象*, 2012, 38(6): 646-656.
- [80] Sanders F, Gyakum J R. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb". *Mon Wea Rev*, 1980, 108: 1589-1606.
- [81] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2012.
- [82] Raible C C, Blender R. North hemisphere midlatitude cyclone variability in GCM-simulations in different ocean representations. *Clim Dyn*, 2004, 22: 239-248.
- [83] Pinto J G, Spanghel T, Ulbrich U, et al. Assessment of winter cyclone activity in a transient ECHAM4-OPYC3 GHG experiment. *Meteorol Z*, 2006, 15: 279-291.
- [84] Blender R, Schubert M. Cyclone tracking in different spatial and temporal resolutions. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 377-384.
- [85] Zolina O, Gulev S K. Improving the accuracy of mapping cyclone numbers and frequencies. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 748-759.
- [86] Ulbrich U, Pinto J G, Kupfer H, et al. Changing Northern Hemisphere storm tracks in an ensemble of IPCC climate change simulations. *J Clim*, 2008, 21: 1669-1679.
- [87] Raible C C, Yoshimori M, Stocker T F, et al. Extreme midlatitude cyclones and their implications to precipitation and wind speed extremes in simulations of the maunder minimum versus present day conditions. *Clim Dyn*, 2007, 28: 409-423.
- [88] Orlanski I. A new look at the Pacific storm track variability: Sensitivity to tropical SSTs and upstream seeding. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 1367-1390.
- [89] Chang E K M. The impact of wave packets propagating across Asia on Pacific cyclone development. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 1998-2015.
- [90] 张颖娴. 北半球温带气旋的气候学及其变率研究. 北京: 中国气象科学研究院博士论文, 2012.
- [91] Pinto J G, Ulbrich U, Leckebusch G C, et al. Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Clim Dyn*, 2007, 29: 195-210.
- [92] Löptien U, Zolina O, Gulev S, et al. Cyclone life cycle characteristics over the Northern Hemisphere in coupled GCMs. *Clim Dyn*, 2008, 31: 507-532.
- [93] Roeckner E, Brokopf R, Esch M, et al. Sensitivity simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J Clim*, 2006, 19: 3771-3791.
- [94] Knippertz P, Ulbrich U, Speth P. Changing cyclones and surface wind speeds over North Atlantic and Europe in a transient GHG experiment. *Clim Res*, 2000, 15: 109-122.
- [95] Watterson I G. The intensity of precipitation during extratropical cyclones in global warming simulations: A link to cyclone intensity? *Tellus A*, 2006, 58: 82-97.
- [96] Froude L S R, Bengtsson L, Hodges K I. The predictability of extratropical storm tracks and the sensitivity of their prediction to the observing system. *Mon Wea Rev*, 2007, 135: 315-333.
- [97] Froude L S R, Bengtsson L, Hodges K I. The prediction of extratropical storm tracks by the ECMWF and NCEP ensemble prediction systems. *Mon Wea Rev*, 2007b, 135: 2545-2567.
- [98] Lambert S J, Fyfe J C. Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Clim Dyn*, 2006, 26: 713-728.
- [99] Finnis J, Holland M M, Serreze M C, et al. Response of northern hemisphere extratropical cyclone activity and associated precipitation to climate change, as represented by the community climate system model. *J Geophys Res*, 2007, 112.
- [100] Pinto J G, Fröhlich E L, Leckebusch G C, et al. Changes in storm loss potentials over Europe under modified climate conditions in an ensemble of simulations of ECHAM5/MPIOM1. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2007, 7: 165-175.
- [101] Pinto J G, Zacharias S, Fink A H, et al. Environmental factors contributing to the development of extreme cyclones and their relationship with NAO. *Clim Dyn*, 2009, 32: 711-737.
- [102] Leckebusch G C, Ulbrich U. On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Glob Planet Change*, 2004, 44: 181-193.
- [103] Leckebusch G C, Koffi B, Ulbrich U, et al. Analysis of frequency and intensity of winter storm events in Europe on synoptic and regional scales from a multi-model perspective. *Clim Res*, 2006, 31:59-74.
- [104] Jiang J, Perrie W. The impacts of climate change on autumn North Atlantic midlatitude cyclones. *J Clim*, 2007, 20: 1174-1187.
- [105] Lionello P, Dalan F, Elvini E. Cyclone in the Mediterranean Region: the present and the doubled CO₂ climate scenarios. *Clim Res*, 2002, 22: 147-159.
- [106] Geng Q, Sugi M. Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulfate aerosols—study with a high-resolution AGCM. *J Clim*, 2003, 16: 2262-2274.
- [107] Gaertner M A, Jacob D, Gil V, et al. Tropical cyclones over the Mediterranean Sea in climate change simulations. *Geophys Res Lett*, 2007 34: L14711.