



新中国成立70年来的中国大气科学研究: 天气篇

孟智勇^{1*}, 张福青², 罗德海³, 谈哲敏⁴, 方娟⁴, 孙建华³, 沈学顺⁵, 张云济², 汪曙光⁴, 韩威⁵, 赵坤⁴, 朱磊⁶, 胡永云¹, 薛惠文¹, 马亚平¹, 张丽娟¹, 聂绩¹, 周瑞琳¹, 李飒¹, 刘泓君¹, 朱宇宁¹

1. 北京大学大气与海洋科学系, 北京 100871;

2. Department of Meteorology and Atmospheric Science, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA;

3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

4. 南京大学大气科学学院, 南京 210023;

5. 国家气象中心, 北京 100081;

6. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

* E-mail: zymeng@pku.edu.cn

收稿日期: 2019-08-07; 收修改稿日期: 2019-10-14; 接受日期: 2019-10-30; 网络版发表日期: 2019-12-05

国家自然科学基金项目(批准号: 41425018)、国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC1501601)、国家自然科学基金项目(批准号: 41675045)、国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC1501904)、国家自然科学基金项目(批准号: 41875066、41675108、41875051)和重大自然灾害监测预警与防范专项课题(编号: 2018YFC1506702)资助

摘要 天气指某一个地区距离地表较近的大气层在短时间内的具体状态. 大气中气象要素的空间分布可表现为各种瞬息万变的天气现象, 这些天气的分布和变化是由不同时空尺度的天气系统引起的. 天气与民生息息相关, 其发展演变一直是大气科学研究和应用的重点领域. 天气学的发展与观测系统、动力学理论和数值模式的发展密切相连. 中国从20世纪50年代初开始建设观测网, 到目前已建成门类齐全、布局合理的地基、空基和天基综合气象观测系统. 特别是新一代稠密雷达网以及风云卫星系列的发展以及多次大型野外观测试验的实施使我们对天气的认识从宏观的天气形势深入到中小尺度天气系统精细热动力、云微物理结构和演变特征. 观测系统的发展同时也促进了理论、数值模式和模拟的发展, 中国已由初期主要以引进国外模式为主发展到目前主要发展具有中国自主知识产权的数值模式系统, 基于高分辨数值模拟结果对不同尺度天气的发生发展机理和可预报性有了深入理解. 此外, 天气学已由初期的独立发展逐渐向多学科交叉方向转变, 气候和环境的变化与天气演变之间的相互作用已成为大气科学的热点和前沿问题. 文章重点回顾过去70年来中国在对天气演变起重要作用的天气现象及其短期变化过程的物理本质、演变规律和预报方法领域所取得的重大科学和技术成果, 主要根据正式发表的文献从大气动力学、天气尺度天气特征、台风及热带天气、强对流天气特征、数值天气预报及资料同化, 以及天气与气候、大气物理及大气环境等交叉领域六个方面分别加以综述.

关键词 大气科学, 天气, 研究, 70年进展

中文引用格式: 孟智勇, 张福青, 罗德海, 谈哲敏, 方娟, 孙建华, 沈学顺, 张云济, 汪曙光, 韩威, 赵坤, 朱磊, 胡永云, 薛惠文, 马亚平, 张丽娟, 聂绩, 周瑞琳, 李飒, 刘泓君, 朱宇宁. 2019. 新中国成立70年来的中国大气科学研究: 天气篇. 中国科学: 地球科学, 49: 1875–1918, doi: 10.1360/SSTe-2019-0175
英文引用格式: Meng Z, Zhang F, Luo D, Tan Z, Fang J, Sun J, Shen X, Zhang Y, Wang S, Han W, Zhao K, Zhu L, Hu Y, Xue H, Ma Y, Zhang L, Nie J, Zhou R, Li S, Liu H, Zhu Y. 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Synoptic meteorology. Science China Earth Sciences, 62: 1946–1991, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9534-6>

1 引言

天气现象瞬息万变且与人民的生产生活密切相关. 天气的发展演变一直是大气科学科研和业务领域的关注重点. 引起各种天气变化和分布的高压、低压和高压脊、低压槽等具有典型特征的大气运动系统称为天气系统. 各种不同时空尺度的天气系统相互交织、相互作用、外加地形影响表现为极为复杂的演变特征. 一般来讲, 水平范围2km以下的天气系统称为小尺度天气系统(雷暴、龙卷等), 生命期为几分钟到几小时. 2~2000km的称为中尺度天气系统(超级单体、海陆风、飑线、台风、锋面、气旋、反气旋等), 生命期为几小时到几天, 其中200~2000km的也称为天气尺度天气系统(台风、锋面、气旋、反气旋等), 生命期为一天到几天. 2000km以上的称为大尺度天气系统(阻塞高压、副热带高压等), 生命期为几天到十几天. 人们有时把等于或大于天气尺度的天气系统统称为大尺度天气系统. 天气系统总是处在不断新生、发展和消亡之中. 各种天气系统有着不同的生消条件和能量来源. 天气学主要研究大气中发生的各种天气现象的演变规律、生消条件、能量来源、相互作用等的物理机制, 以及天气分析预报原理和方法.

天气学的发展与观测系统、动力学理论和计算机的发展密切相连. 20世纪20年代以前, 国际上天气学的研究主要集中于地面上各种气压系统及其天气分布的分析. 20年代以后, 由于探空仪的使用, 天气学的研究扩展到了三维空间, 挪威学派提出了极锋学说, 瑞典气象学家提出了气团学说. 30年代以后, 天气学开始和动力气象学相结合, 长波理论等的提出和应用使天气学进入一个新的发展阶段, 西风带大尺度天气系统、强对流风暴、热带天气和大气环流等方面有了大量研究. 50年代以后, 计算机和气象卫星的发展极大提高了天气系统的数值模拟和诊断分析能力, 热带气象、中小尺度天气系统和强对流天气的研究更加深入(林元弼等, 1988).

中国1949年以前只有少数地面站, 缺少高空观测, 更无完整的气象服务系统. 1950年中国开始布设观测网, 50年代起中国气象学家在大气动力学、西风带和热带的天气现象及其演变规律(如寒潮、锋面、梅雨、台风和强对流天气)、数值天气预报和资料同化等方面取得了一系列重要研究成果. 大气动力学是天

气学发展的重要理论基础, 本文第2节将回顾中国科学家过去70年来在大气动力学方面的重点研究成果. 考虑天气系统的多尺度特征, 第3节到第5节将总结不同尺度天气系统的研究成果, 第3节将重点介绍与降水相关的天气尺度天气系统方面的研究成果, 第4节将重点介绍台风和热带天气方面的研究成果, 第5节将重点介绍强对流天气方面的研究成果. 数值天气预报和资料同化是观测、统计和大气动力学的有机结合, 是目前最主要的天气预报手段, 第6节将重点介绍数值天气预报及资料同化方面的研究成果. 天气作为大气科学的重要一环, 其与大气科学的其他分支有着千丝万缕的联系, 气候变化背景下天气系统的演变有何特征, 气溶胶与空气污染与天气系统演变之间的相互作用如何都是目前的前沿和热点问题, 第7节将重点介绍天气与气候、大气物理及环境等交叉领域的研究成果. 第8节将对各方面的成果加以综述并提出未来可能的发展途径. 为避免重复, 大气物理与大气环境篇以及气候与气候变化篇已经涵盖的内容(如青藏高原影响、大气环流突变、沙尘天气、雷达和卫星等观测技术的发展、天气对大气污染的影响等), 本文没有过多涉及. 中国多年来天气学领域的研究内容和成果很多, 限于篇幅和作者的学识水平, 如未能很好展现各方面的重要成果, 还请读者谅解.

2 大气动力学研究

大气动力学根据物理学和流体力学的基本原理研究大气中各种动力过程的演变. 大气动力学的研究起源于北欧. 20世纪20年代, 以Vilhelm Bjerknes为代表的挪威学派提出了锋面气旋学说. 到了30年代, 由于无线电探空仪的使用, 人们对高空大气运动有了新的认识, Rossby提出了地转适应(Rossby, 1938)和长波理论(Rossby, 1939), 引出了行星波的能量频散、西风带急流、行星波的不稳定性等一系列研究. 50年代以来, 随着计算机和观测手段的不断改善, 中小尺度动力学、热带波动、大气环流形成的数值模拟得以迅速发展(林元弼等, 1988). 中国大气动力学研究的创始人是赵九章, 他早在20世纪30年代末就提出了信风形成的热力学理论(Jaw, 1937). 过去70年来, 中国气象学家在大气适应过程的尺度理论、行星波动力学、大气环流及其异常现象等方面取得了一系列重要研究成果.

2.1 大气适应过程的尺度理论

大气适应过程和演变过程是大气中两种最基本的动力过程,它是风场和气压场之间相互调整和适应的过程.继Rossby(1938)最早提出地转适应过程理论,Yeh(1957)20世纪50年代末提出了适应过程的尺度理论,指出适应的方向取决于大气运动的尺度是否大于Rossby变形半径.60年代初,曾庆存(1963a, 1963b, 1963c)进一步提出了地转适应过程与准地转演变过程在时间尺度上的可分性并存在相互作用.陈秋士(1963)接着讨论了热成风适应问题,指出如果起始非热成风流场的热成风涡度大于温度场的热成风涡度,上升运动加强;反之,下沉运动加强,从而提出了流场和温度场之间调整的临界水平尺度.之后,适应的尺度概念被进一步发展到中小尺度适应过程(叶笃正和李麦村, 1964).

70年代末,伍荣生和巢纪平(1978)根据旋转流体的基本性质,提出了大气适应的多时间尺度特征.与此同时,大气适应过程的尺度概念被进一步扩展到旋转适应过程,即在地球旋转作用下,扰动会趋于带状环流结构(曾庆存, 1979a; 曾庆存和叶笃正, 1980, 1981, 1982).基于大气运动的多时间尺度特征(叶笃正和李麦村, 1979; 李麦村, 1979; Yeh和Li, 1982),李麦村(1982)讨论了位涡适应过程,提出斜压大气运动可分为地转适应阶段、准地转位涡适应阶段及平衡态阶段,位涡适应的形成是通过长波频散不平衡能量得到的,证明在非线性情况下位涡守恒的准地转演变必然导致准平衡态,这种平衡态比地转平衡更为普遍.21世纪初,吴国雄等人根据位涡性质,提出了热力适应理论(吴国雄和刘屹岷, 2000; 刘屹岷等, 2001),讨论了存在非绝热加热时大气动力特征向外加热强迫适应的原理,并以此解释了热带大气运动的频散和发展以及副热带高压的形成.

2.2 行星波动力学

大气运动不稳定性的研究对于理解行星波的演变有重要科学意义.1946年,赵九章在国际上最早研究基本气流垂直切变的斜压不稳定(Jaw, 1946),首先提出了行星波不稳定概念,指出实际大气在斜压状态下可以是不稳定的,即振幅将随时间增长而形成天气图上观测到的气压槽、脊的分布和发展.这一发现引起了国际同行的高度重视和广泛认可,为后来Charney

(1947)和Eady(1949)深入研究斜压不稳定并得到大气长波和斜压波的不稳定判据奠定了基础,成为现代天气预报的理论基础之一.随之,Kuo(1949)得到了大气长波的正压不稳定判据(即Kuo氏定理),提出当扰动和波的振幅增长到一定程度后必须考虑非线性问题.Zeng(1989)将Arnold(1965)提出的两维不可压缩理想流体的非线性稳定性定理推广为大气运动中普遍的不稳定性变分原理,对应于Arnold第一定理,得到了各种情况下的不稳定性判据,特别是首次得到了关于非定常流、地形扰动流和非地转流的不稳定性判据.穆穆等对应于Arnold第二定理,建立了一系列准地转流体运动的非线性稳定性判据;特别对于经典的Phillips模型与Eady模型,建立了最优的非线性稳定性判据(Mu, 1992; Mu等, 1994; Liu和Mu, 1996);若非线性稳定性判据条件被破坏,则一定存在线性不稳定的normal mode,因而是线性不稳定的.此外,Mu等(1996)还研究了有限振幅扰动的非线性对称稳定性问题.

继Rossby提出大气长波理论,叶笃正在40年代末首先将群速度引入到大气扰动的演变中,提出了长波能量频散理论(Yeh, 1949).他指出大尺度扰动能量是以波的群速度传播,并与它的频率密切相关.他利用Rossby波相速和群速之差来刻画大气扰动的频散性,从动力学上解释了大尺度扰动在纬向气流里的“上下游效应”,为现代大气环流二维和三维遥相关动力学奠定了坚实的理论基础,开辟了大气波动力学的新领域,是大气动力学最重要的经典理论之一,被广泛应用于天气预报和大尺度大气扰动动力学研究.

随着大气长波频散理论的提出,与遥相关有关的行星波动力学研究取得了重要进展.50年代起人们开始研究准定常行星波的形成原因.叶笃正和朱抱真(1958)指出地形与非绝热加热是形成准定常行星波的根本原因.随着更多观测事实的揭露,人们越来越关注三维球面大气中大尺度扰动在非均匀急流上的传播及其与基本气流的相互作用.Huang和Gambo(1982a, 1982b, 1984)把叶笃正建立的Rossby波频散理论推广到了冬夏季球面三维大气中,从理论、观测事实和数值模拟多个层面深入研究了准定常行星波在北半球冬夏季的三维传播特征,发现受地形和冬季定常热源强迫,北半球冬季对流层中层亚洲和北美东海岸为负位相,落基山和大西洋西海岸为正位相(图1a);指出准定常行星波在实际基本气流中的三维传播不能直接从中

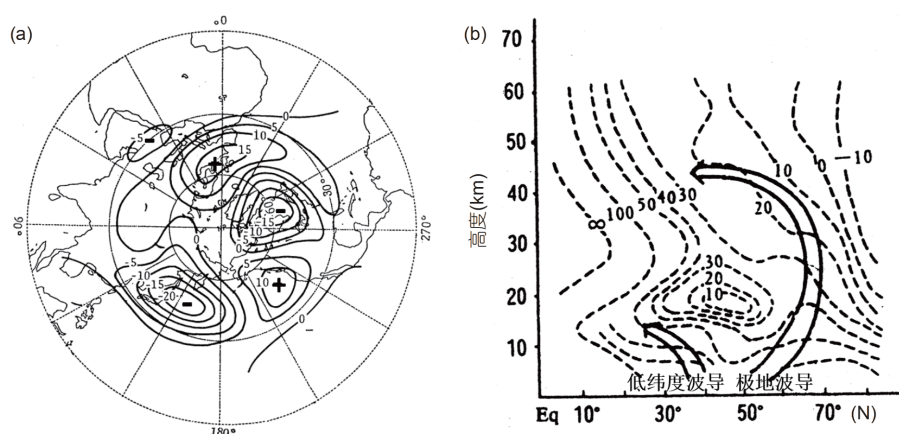


图1 受北半球地形和定常热源强迫所致的观测得到的1972~1977年平均1月行星波(纬向波数1~3)500hPa扰动高度场(a)和理想地形强迫产生的波数为1的定常行星波传播波导示意图(实箭头)(b)

(a) 单位: dm; 引自Huang和Gambo(1982b); (b) 虚线表示定常行星波1波折射指数平方的分布, 引自陈文和黄荣辉(2005)

纬度对流层下层向低纬度传播, 而是存在两支波导, 分别称为极地波导和低纬度波导(图1b), 极地波导中波在高纬度地区从对流层垂直传播到平流层, 并在平流层向赤道方向传播, 低纬度波导中波从中纬度对流层下层向低纬度对流层顶传播。Chen等(2002, 2003)得到了行星波活动的年际变化。Zeng(1982, 1983)利用波包概念揭示了非均匀基流下瞬变波的演变规律。Wu和Chen(1989)利用原始方程模式证明了Charney和Drazin(1961)提出的无加速原理, 即在一定条件下, 波与基本环流不发生相互作用。这些研究系统地揭示了大气环流的三维演变特性。

针对北大西洋地区最显著的大气遥相关模态北大西洋涛动(NAO), Luo等(2007)利用描述行星尺度-天气尺度波相互作用的理论模型研究了NAO事件的形成以及衰退过程, 指出NAO事件是天气尺度波演变的结果, NAO是否被激发取决于前期天气尺度波涡度强迫的空间结构, 从理论上完整地解释了NAO正负位相事件的10~20天的生命过程。

2.3 大气环流及其异常现象

1950年, 叶笃正提出了平均状态大气环流的形成和维持机制。50年代, 中国学者研究了青藏高原对大气环流形成的动力和热力作用(叶笃正和顾震潮, 1955)、东亚及其邻近地区大气环流的冬、夏平均结构及其季节变化过程(Staff Members of Academia Sinica, 1958, 1959a, 1959b)。Wu(1984)指出大气环流对地

形和热力的响应是非线性的。

阻塞形势是中高纬度大气环流一个典型持续性异常现象, 具有相当正压、准双周、准定常的特征, 主要产生在大西洋和太平洋风暴轴的下游(Berggren等, 1949; Rex, 1950), 往往伴随着经向型环流的出现以及急流的大弯曲, 其形成、维持与崩溃与天气过程的持续或转折密切相关。大量研究表明, 阻塞环流的形成与波流相互作用、行星波-地形-热源相互作用、天气尺度波的涡度强迫等因素有关(朱正心和朱抱真, 1982; Ji和Tibaldi, 1983)。Yeh(1949)和叶笃正(1962)对北半球阻塞高压的移动规律、建立、维持和崩溃的物理过程以及相关天气等多个方面进行了研究, 从Rossby波能量频散的角度解释了阻塞的形成及衰退机制。罗德海和纪立人(1989)从位势涡度方程出发导出了描述大气阻塞振幅的Schrödinger方程, 但未能描述阻塞的生命过程和急流弯曲。90年代末, 海温对阻塞高压形成和维持的影响受到关注, 研究发现西太平洋暖池的海温有利于阻塞高压的维持(陆日宇和黄荣辉, 1996), 热带海洋加热的异常会引起乌拉尔地区高度场的响应, 有利于乌拉尔地区上游瞬变波的加强和活跃, 从而导致乌拉尔地区阻塞高压的形成(李双林等, 2001)。随后, Luo(2000, 2005)和Luo D等(2014)利用尺度分离假设, 建立描述阻塞行星波和天气波相互作用的非线性理论, 该理论可以完整地描述阻塞10~20天的生命周期以及先期存在的天气尺度波在阻塞形成中的作用(图2), 指出阻塞是一个非线性初值问题, 并能解释阻

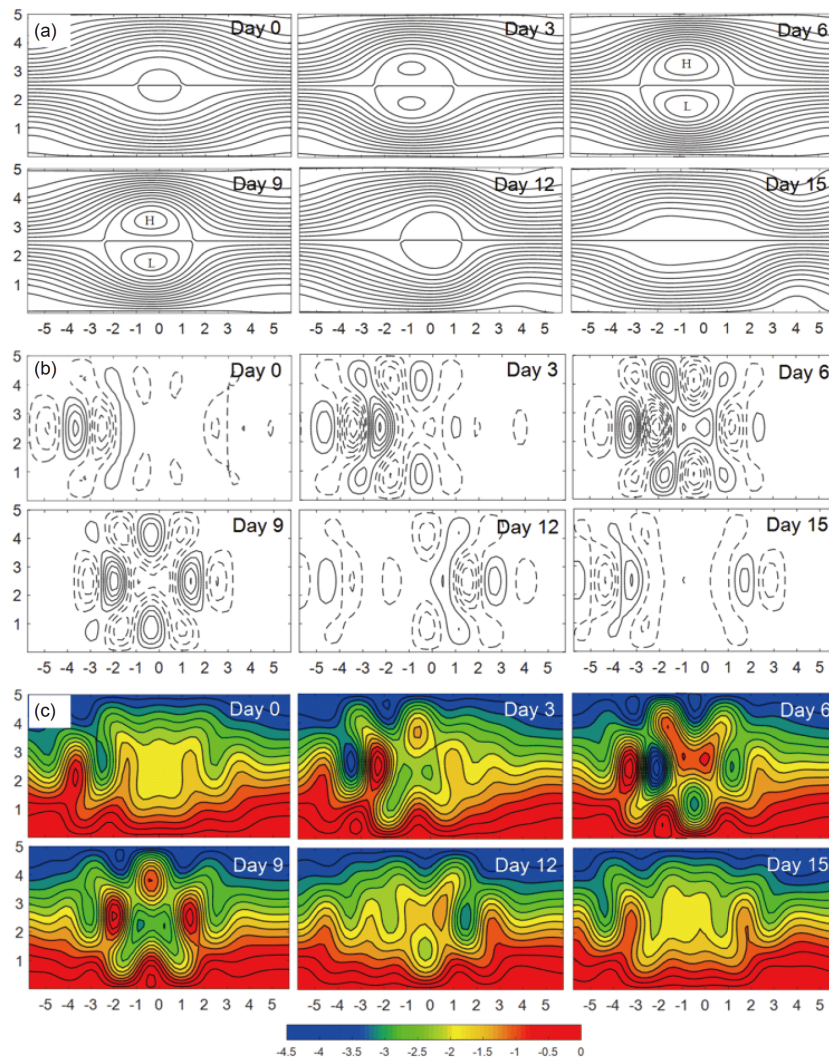


图 2 行星尺度阻塞环流(a)、天气尺度波流场(b)和大气阻塞环流总流场(c)
(a)~(c)的结果基于NMI模式. 引自Luo D等(2014)

塞的观测事实. Mu和Jiang(2008)利用Mu等(2003)提出的条件非线性最优扰动(conditional nonlinear optimal perturbation, CNOP). CNOP代表了满足一定物理约束条件下, 在预报时刻具有最大非线性发展的一类初始扰动)方法也证明了阻塞是一个非线性初值问题.

3 天气尺度天气特征研究

中国天气学研究创始人是竺可桢, 他于1925年首先对中国的天气类型做了分类(竺可桢, 1925). 接着, 沈孝凰(1932)对江淮气旋做了研究, 李宪之(1935)研究了南半球和西北太平洋之间的关系, 提出了两个半球

之间大气环流的相互作用. 涂长望(1938)基于中国少量风筝探空观测, 对中国各季节不同气团的性质做了研究. 过去70年来, 中国的天气尺度天气特征研究主要围绕暴雨、寒潮、雨雪冰冻等高影响天气展开.

暴雨是中国主要气象灾害之一. 随着夏季风向北推进, 6~8月先后在华南、长江和华北出现三条雨带, 分别与不同的天气系统有关. 从20世纪50年代开始, 中国一直关注暴雨天气的研究和预报技术开发(陶诗言等, 1958a, 1958b; 谢义炳, 1959), 陶诗言等(1958a)从大气环流观点出发, 探讨了梅雨的开始和结束时期以及亚洲大气环流季节变化特征. 中国科学院地球物理研究所(今中国科学院大气物理研究所)在国际刊物

《Tellus》上发表论文论述东亚大气环流的特征, 为日后暴雨的研究和预报打下了坚实基础(Staff Members of Academia Sinica, 1958, 1959a, 1959b), 这些论文具有高度的原创性和前瞻性. 中国气象学者还对若干次极端暴雨事件(例如1954年7月(长江)、1958年7月(黄河)、1963年8月(华北)、1975年8月(河南)、1981年7月(四川)、1994年6月(珠江)、1998年7月(长江)、2003年7月(淮河)、2016年7月(华北、北京)、2012年7月21日(北京; Zhang等, 2013; Zhong L Z等, 2015))开展了攻关研究(陶诗言等, 1980, 2001; 丁一汇等, 1978, 1993; 周秀骥等, 2003; 赵思雄等, 2004; 倪允琪等, 2006; 谈哲敏和赵思雄, 2010; 张人禾和刘屹岷, 2013), 这些研究揭示了中国大暴雨的一些共同特点, 包括大尺度环流系统停滞少动、常伴有中低纬系统之间的相互作用等, 在锋面、低涡、地形等与暴雨形成的关系方面做出了一系列创新性成果. 近几年对中国暴雨机理的研究已推进到了产生强降水的对流演变过程, 特别是通过对高分辨率观测和数值模拟(最细网格距达444m)资料的分析, 揭示了一些新的中小尺度现象和机理, 例如产生暴雨的对流涡旋热泡柱、稳定少动的中尺度出流边界、中尺度对流雨带排列对于产生极端降水的重要性, 以及环境大气热力状况、局地下垫面强迫、等熵抬升、对流反馈的协同作用等(Zhang等, 2009; Zhang和Zhang, 2012; Wang等, 2014; Luo和Chen, 2015; Wu和Luo, 2016; Liu X等, 2018), 也揭示了云微物理过程与对流系统内部动力过程耦合从而影响暴雨精细化分布的机理(Luo等, 2010).

3.1 锋面

锋面是不同性质气团的交界面, 常伴有强降水和(或)剧烈天气. 20世纪50年代初, 谢义炳和陈玉樵(1951)发现东亚锋面和急流的结构明显不同于西半球的北美地区, 亚洲“热带锋”和相关联的副热带急流比北美更强, 他们首先揭示了中国暖锋不显著的原因与东亚多层锋区结构的存在, 指出在东亚上空有多层锋区结构, 即在极锋上面还有副热带锋区, 极锋下面有冰洋锋, 锋区与高空急流一一对应. 该研究明确了东亚高空副热带急流的存在及其和极锋急流的相互作用. 该研究进一步发现, 多层锋区与双急流是东亚冷空气活跃和热带暖湿季风气流明显北推相互作用的结果, 锋区低层是对流不稳定层结, 有利于对流活动. 这

一东亚锋区与急流的多重结构研究成果修改了Palmén的经典极锋概念模型, 强调在极锋上空暖空气中仍存在很大斜压性. 至今双急流及其相互作用仍是大气环流研究的重要课题.

20世纪90年代末到21世纪初, 基于中尺度试验观测资料, 中国科学家先后开展了春季东亚强冷锋的结构和动力学过程(李振军和赵思雄, 1996, 1997)以及锋面上中尺度扰动(伍荣生等, 2004)的深入研究. 谈哲敏和伍荣生(1990, 1991)在国际上首次提出了Ekman动量近似理论并用于中尺度锋生动力学研究, 建立了一套适用于讨论边界层与锋生相互作用的完整方程组和守恒定律, 指出边界层锋生要比自由大气的锋生时间长, 该成果较好地解决了摩擦对锋生作用的争论, 为建立地面锋动力学的理论框架起了开创性作用. 谈哲敏和伍荣生(2000a, 2000b)利用一个包含地形、边界层摩擦作用的二层锋面简化模型, 讨论了地形、边界层对冷锋和暖锋锋面结构以及环流的动力学影响问题, 揭示了锋面的倾斜主要与暖区的地转流分布、锋面移动速度、锋面与地形的相对位置有关.

不同于“经典”的锋面, 中国江淮流域梅雨过程中常出现相当位温的等值线密集带(湿度的高梯度带), 是来自北方或西北方的冷空气与南方暖湿气流的交界面, 具有锋的性质(赵国藏等, 1953). 基于此, 谢义炳(1956)提出了梅雨锋的概念, 他强调在剖面分析中用相当位温代替温度, 用以有效识别梅雨锋. 之后, 中国学者从大气环流观点出发指出东亚梅雨是东亚夏季环流的一个特点, 是季风现象之一(陶诗言等, 1958a), 是初夏大气环流中季风槽的一种表现形式(Chen, 1983), 梅雨的开始和结束与东亚大气环流的季节变化、特别是印度季风的爆发关系密切.

梅雨锋的结构十分复杂, 在其东段和西段、对流层不同高度、不同发展阶段、夏季风爆发的初期和盛期都有所不同. 在对流层低层往往伴随明显的夏季风西南风和北面偏东风之间的风向切变, 梅雨降水与其切变线上的水汽辐合直接相关. 由于北方大陆的空气温度高于来自海洋的季风温度, 梅雨锋会向南倾斜, 这种南倾现象可能是梅雨期间存在多层锋区结构或风切变垂直轴线向南倾的反映(谢义炳, 1956). 同时, 梅雨锋的向南倾斜还会造成梅雨锋区与切变线的分离现象(谢义炳, 1956), 这种分离现象被后来的研究所证实(邱炳焕和丁一汇, 1979). 王作述(1963)发现, 伴随切变

线的形成、成熟和消失,梅雨锋从后倾逐渐变陡,最后变为南倾。邱炳焕和丁一汇(1979)发现,梅雨期从开始到发展和最盛时期斜压性出现的层次由850hPa逐渐升高到450~600hPa,低层逐渐具有向南倾的热带辐合带性质。梅雨锋东段和中段具有典型的中纬度斜压锋面特征,西段则具有暖心结构和弱水平气压梯度,以及很强的低层水平风切变(Chen和Chang, 1980)。胡伯威(1997)也证实了这一特征。梅雨锋在对流层上半部为斜压结构,下半部为相当正压结构(王德翰和韦统建, 1982; 丁一汇, 1993)。梅雨锋往往伴随着850~700hPa与西南季风相联系的低空急流及其北侧与副热带高空锋相联系的副热带高空急流(张丙辰和章震越, 1990; 张庆红, 1999; 陶诗言等, 1980),低空急流为梅雨期暴雨输送水汽,高空急流与南亚高压提供高空气流的辐散机制。

3.2 急流

急流是影响东亚及中国天气的重要天气系统。20世纪50年代初,中国科学家对急流的研究主要集中于高空急流。仇永炎(1956)基于观测分析发现冬季东亚沿岸为北半球最强的高空急流中心所在。东亚大气环流的季节转换、中国大部分地区雨季的开始和结束都与高空西风急流位置的南北移动以及强度变化有紧密联系。东亚梅雨的开始和结束与6~7月亚洲上空南支高空西风急流的二次北跳过程密切相关(陶诗言等, 1958a)。高空西风急流的北跳与南移过程同时也是6月及10月大气环流突变的重要表现之一(叶笃正等, 1958)。

80年代,低空急流对中国暴雨的影响开始受到关注。由于低空急流对极端天气、航空安全、区域气候、风能、空气污染等有重要影响,已成为全球大气科学研究的热点问题和前沿领域。东亚的低空急流多见于对流层低层,与多发生于边界层内的北美低空急流的成因有一定区别。高守亭和孙淑清(1984)提出,次天气尺度低空急流的超地转特征主要是由变压风叠加在地转风场上所致,高低空急流相互作用引起的上下层质量调整是造成低层出现变压风的一个重要原因。随着观测资料的增多以及数值模式能力的提高,低空急流空间分布、演变特征和形成机制研究得以进一步深入。Du等(2012, 2014)以及Du等(2015a)发现中国低空急流具有边界层急流和天气尺度急流两类,它们具

有不同的时空特征和形成机制,中国南方和东北地区的低空急流分别为与梅雨锋和东北冷涡相关的对流层低层急流,而塔里木盆地和青藏高原地区多为边界层急流,上述急流均具备不同程度的日变化特征,惯性振荡作用对边界层急流日变化起主要作用,海陆热力对比和地形对东南沿海地区的海岸边界层急流的形成有重要影响。Liu等(2012)揭示了云贵高原东部西南低空急流的时空分布特征。He等(2016)指出地表辐射加热是决定夜间西南低空急流形成发展的关键因子,而云贵高原地形的作用次之。Du和Rotunno(2014)建立了Du-Rotunno理论模型,成功解释了中国东部的低空急流活动(Du等, 2015b),定量揭示了美国低空急流的形成机理,该研究成果得到了同行的普遍关注和高度评价。

在急流与暴雨的关系方面,陶诗言等(1980)指出暴雨多发生在低空急流的左前端,距急流2~3个纬度。张小玲等(2010)对2007年的各种暴雨类型和急流的关系做了系统研究,发现准静止锋型暴雨通常持续时间长,高低空急流的耦合非常重要,台风暴雨、冷锋型暴雨、西南涡和东北冷涡暴雨发生时,可能只有高空急流或低空急流存在,而局地暴雨的发生通常由局地热力或地形抬升引起,缺乏高低空急流的动力条件配合。Li和Zhang(2014)指出中国梅雨季降水的强度和落区与东亚副热带急流和极锋急流的不同配置有关,东亚副热带急流和极锋急流加强会导致降水增大。Du和Chen(2018)从集合预报和高分辨率模拟角度揭示了低空急流与华南不同类型暴雨的关系,提出天气尺度低空急流和内陆的锋面暴雨有关,而边界层急流则与海岸暖区暴雨密切相关,并提出了双低空急流配合对暖区暴雨对流触发的概念模型(Du和Chen, 2019)(图3),为暖区暴雨的触发提供了新的见解。

3.3 低涡

中国北方夏季与暴雨相关的重要低压系统之一是东北冷涡。冷涡是不同于锋面气旋的低涡,是常发生于中高纬地区的中高层冷性涡旋。20世纪60~70年代,谢义炳基于其国际上最早开展的冷涡研究(Hsieh, 1949),系统讨论了中国华北和东北冷涡与暴雨的关系(谢义炳, 1956),提出冷涡是近于垂直的、从地面到平流层下部的深厚冷性系统,低层存在气旋生成和发展。这项工作具有开拓性,具有重要的理论意义和应用价值。

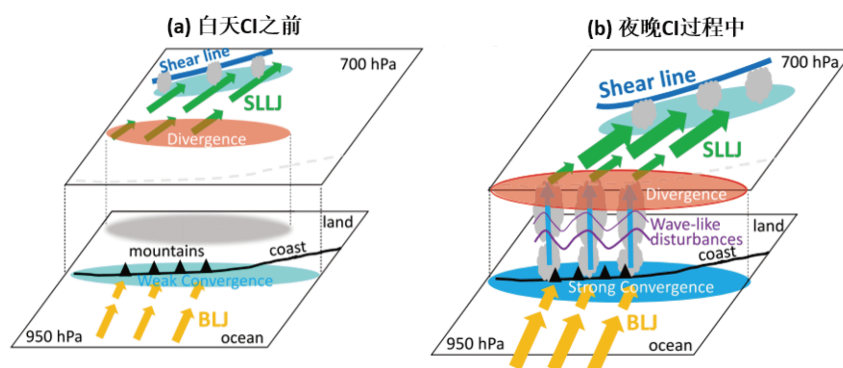


图3 与双低空急流相关的海岸附近对流触发概念图

(a)在触发之前,靠近海岸的950hPa弱边界层急流出口处存在弱辐合,与天气尺度低空急流入口相关的700hPa辐散距离海岸较远;(b)随着冷锋(切变线)的南移和边界层急流的发展,海岸附近低层辐合和中层辐散增强,产生上升气流,中尺度抬升进一步产生带有小尺度扰动的波状对流。引自Du和Chen(2019)

中国关于冷涡暴雨的研究80年代开始增多。陶诗言等(1980)指出东北低压或冷涡型是中国暴雨的主要形势之一,在上冷下暖的不稳定环境以及低空急流的水汽供应条件下,常在东北地区、华北北部造成暴雨或雷阵雨。暴雨往往出现在冷涡东侧,孙力等(2002)指出冷涡中心附近及其西侧由于对流层中高层大范围 and 较强的西北下沉气流的存在,上升运动受到抑制,而冷涡东侧由于阻塞高压的存在,上升气流能够得到充分发展,低层辐合和高层辐散以及涡度远强于西侧,高能湿舌轴线和水汽通量极大值也位于这一侧,使得冷涡中心东侧成为强降水中心。

东北冷涡的活动还会影响梅雨和华南前汛期暴雨。何金海等(2006)发现梅雨降水量和东北冷涡的强度存在显著的正相关,这可能是由于东北冷涡强年,冷涡引导北方干冷空气南下,与低层西南暖湿气流在梅雨区北缘交汇,有利于加强上干下湿的不稳定层结,导致梅雨量偏多。与梅雨情况类似,华南前汛期降水与东北冷涡的强度也存在显著的正相关(苗春生等, 2006),这可能是由于东北冷涡强年,西太平洋副高位置偏南,前期东亚冬季风偏弱,同期东亚夏季风异常爆发提前且偏强,东亚夏季风向北输送大量的暖湿空气,导致华南地区环流的斜压性加大,低层上升运动发展,导致降水偏多。此外,当东北冷涡与北上的热带系统(如北移台风倒槽、台风外围东风带)相结合时,会激发出极强的暴雨过程(赵思雄等, 1980)。

无锋面的中尺度低压(扰动)也是中国很常见的暴雨影响系统(赵思雄, 1988),西南涡就是其中很重要的

一类。西南涡的研究始于顾震潮(1949)。80年代初,陶诗言等(1980)通过大量个例总结出了西南涡的发生发展特征,指出西南涡在垂直方向上较浅薄,形成初期700hPa出现暖性气旋环流,而500hPa、300hPa常为高压区或高压脊,“雅布”-九龙地区、黑河地区和四川盆地是西南涡三个最易发生的源区,主要活动路径包括偏东、东南和东北路径,其中以偏东路径为主。发展东移的西南涡有可能引发长江流域、淮河流域、华北、东北、华南等下游广大地区的暴雨天气。高守亭(1987)指出西南涡的形成与盆地、河谷和气流分层有关,大气高、低层气流形成的稳定分层流与地形的相互作用有利于涡旋的形成。吴国雄等(1999)提出了西南涡形成的倾斜涡度发展机制,指出由于地形作用引起等熵面倾斜是倾斜涡度发展的重要条件,西南季风气流北上与高原地形相互作用形成较强的南风垂直切变,两者结合导致倾斜涡度发展,垂直涡度快速增长。蒋璐君等(2014)使用TRMM卫星资料对一次西南涡暴雨过程的研究指出,发展阶段的西南涡降水主要位于低涡的东南侧,呈现为大片层云下的层云和对流降水的混合形式。

3.4 华南前汛期暴雨

中国暴雨最集中也是最强的地区位于华南前汛期。华南地区地形复杂,多为暴雨上游的南海地区观测资料缺乏,预报难度很大。陶诗言等(1980)指出华南前汛期暴雨环流型的特点是南支槽与北支槽共同作用,中纬度西风带较为平直,并有短波槽东移,引导冷空气

南下,同时南支西风带有低槽自青藏高原南侧东移,在槽前输送大量暖湿空气,两者交绥于南岭以南地区,造成华南暴雨;同时,根据地面锋面、低空急流等关键天气系统的配置关系,从业务预报角度给出了华南前汛期暴雨4类天气学概念模型:锋面低槽型、锋际低空急流型、锋面低空急流型和低涡锋面型.与华南前汛期区域性极端降水密切相关的天气尺度扰动主要是气旋型和锋面低槽型异常(Huang等, 2018),这些扰动的形成和增强可以得到青藏高原地表感热加热的贡献(Li等, 2014; Wan等, 2017).热带太平洋和印度洋海温会显著影响华南前汛期降水的年际变化,其途径分别是激发Matsuno-Gill型罗斯贝波列和暖大气开尔文波,从而导致南海北部对流层低层西南风异常(Gu W等, 2018; Yuan等, 2019).

次日尺度上,华南常常观测到双雨带共存现象(Luo等, 2019).位于北边的雨带与副热带天气尺度系统的动力抬升密切相关,西太平洋副热带高压的西伸和西南季风气流的增强对于向华南西部和东部输送暖湿空气起着重要作用;而位于南边的雨带水平尺度相对较小,常常发生在华南内陆或沿海的暖区.华南暖区暴雨多表现为很强的对流性和很大的危害性(黄士松, 1986).暖区暴雨由于其弱强迫环境,预报难度更大.1915年以来华南最严重的洪水就是1994年6月发生在珠江流域的暖区暴雨引发的,这次特大暴雨的发生可能是1994年夏季环流异常所致(陶诗言, 1996),边界层风场和喇叭口地形对这次暴雨的增强具有重要贡献(孙建华和赵思雄, 2002a, 2002b).研究表明,内陆暖区降水是地表加热、局地地形抬升、城市热岛与海风相互作用的结果(Wu等, 2019),沿海暖区降水则与低空急流(Zhang和Meng, 2018; Du和Chen, 2019; Zhang和Meng, 2019)、海陆风(Chen等, 2016)、海岸线附近山脉(Wang等, 2014)以及对流活动形成的冷池有关(Wu和Luo, 2016; Liu Z等, 2018).

3.5 寒潮、雨雪冰冻天气

中国地处欧亚大陆东部,冬季风期间寒潮冷涌、雨雪冰冻时有发生,是冬季重要灾害天气之一.20世纪50年代开始,中国气象学者对东亚寒潮的爆发条件、寒潮冷锋的结构以及寒潮天气等开展了大量研究.陶诗言(1959)提出了侵入中国的寒潮有三条主要路径,揭示了寒潮爆发时东亚大型天气过程的特点,

发现青藏高原虽有屏障作用,但低压槽在高原活动频繁,经常也有强寒潮活动,北方和南方的高空槽在高原上空如果发生合并,会引起高原槽经向度加大,导致冷空气侵入高原的东南部,引起寒潮天气.此外,强寒潮冷涌越过赤道还可能引发南半球热带气旋和强降水(赵思雄和曾庆存, 2005).

2008年1月中国南方发生了一次高影响低温、雨雪、冰冻过程.这次过程是亚洲中高纬度地区阻塞形势和里海以东地区切断低压系统的长期维持造成的(陶诗言和卫捷, 2008),该阻塞高压持续维持的重要外强迫因素可能是北大西洋海温正异常(李崇银和顾薇, 2010).Sun和Zhao(2010)通过对这次过程的天气形势、准静止锋、源自青藏高原的云团、下垫面和大气层结过程的相互作用研究,提出了一个持续性雨雪冰冻天气的多尺度系统物理模型及雨雪冰冻的锋面结构与大气层结特征的物理模型(图4):一条准静止锋稳定维持于长江流域,是这次雨雪冰冻过程的重要影响系统,这在冬季并不多见,成为了“冬行夏令”的状态,静止锋西段假相当位温梯度、逆温层的温度、低层的水汽辐合都较大,地面温度维持在 $-1\sim-3^{\circ}\text{C}$ 和弱风环境,这些都有利于冻雨的加强和维持.

4 台风和热带天气研究

热带地区是全球大气环流重要的热源和水汽源,其气象状态对全球大气具有重要影响.这一地区海气相互作用显著,常通过对季风环流、沃克环流、哈得莱环流和大气低频振荡等的影响而导致世界性的天气、气候异常.这一地区还是台风、季风槽、热带辐合带、热带波动等天气系统活跃的地方,其中的台风每年都会给人类社会造成重大灾害.因此,20世纪60年代以来,台风和热带气象一直是大气科学的研究热点.70年来,中国学者在这一领域开展了系统深入的研究,取得了丰硕的研究成果.

4.1 台风及热带大气动力学

4.1.1 台风

台风是中国主要的致灾天气系统,平均每年西北太平洋地区生成的26个台风中近半数会在中国临近海域活动,其中平均7个登陆中国.中国学者很早就发现西北太平洋台风多是由热带辐合带中的扰动、东风

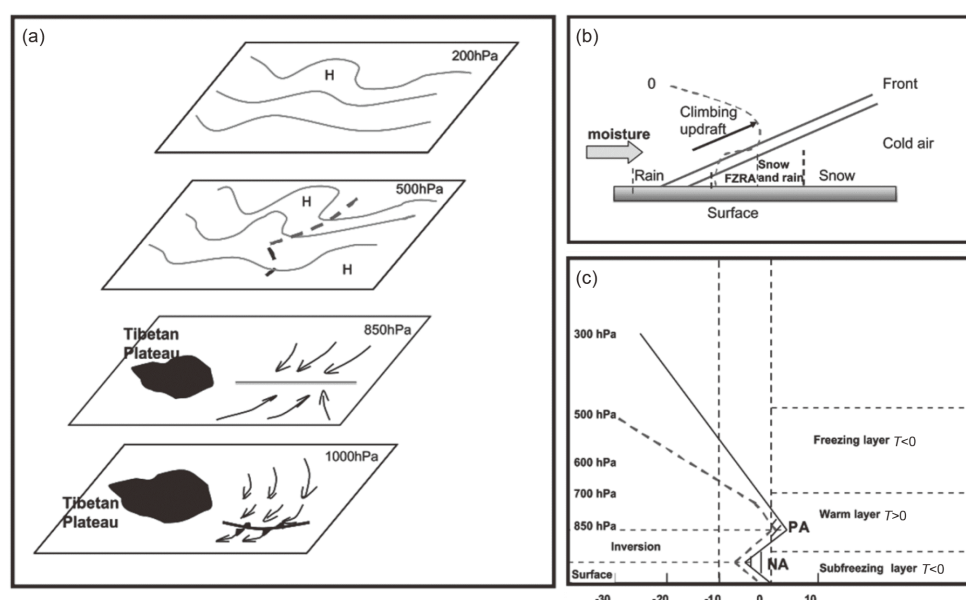


图4 中国南方持续冰冻雨雪事件的多尺度概念模型

(a) 天气尺度概念模型; (b) 准静止锋结构模型; (c) 雨雪冰冻天气的大气层结条件. 引自Sun和Zhao(2010)

波、斜压扰动和高空冷涡所诱生的地面低压发展而来(陈联寿和丁一汇, 1979), 并指出近海台风形成之前通常有明显的中、低空急流(张婉佩, 1978), 此急流即为Gray(1998)总结的台风形成两阶段模型中的风涌. 近年来, 中国学者进一步指出季风涡旋、不同热带波动间协同作用对台风形成有重要影响(张文龙等, 2009; Wu L G等, 2013; Chen和Chou, 2014; Fang和Zhang, 2016), 并在高精度数值模拟基础上, 揭示了风涌、季风涡旋影响台风形成的机制(Yi和Zhang, 2010; Liang等, 2014)以及台风形成中涡旋的多尺度特征及自相似性(Fang和Zhang, 2010, 2011).

台风形成后的发展演变受到大尺度环境气流、周围天气系统、下垫面特征及自身结构的影响(陈联寿和丁一汇, 1979). 在这些因子的作用下, 台风路径有时会发生突变, 如突然转折、打转、旋转、蛇形等(Zhang等, 2018). 针对台风异常路径, 中国学者提出了很多新的观点, 如台风经过台湾岛时会出现跳跃和停滞打转等异常路径(孟智勇等, 1998; Gong等, 2018)、台湾岛地形诱生出一对偏差偶极涡可导致台风路径突然偏折(孟智勇等, 1998); 台风环流与低频环流型(准两周振荡、MJO)相互作用导致台风南侧西南风增强促使台风向北偏转(Wu等, 2011b; Liang和Wu, 2015)等.

在外强迫及自身内部中小尺度过程影响下, 台风

结构和强度也会发生变化. Zhang等(2005a, 2005b)揭示了超强台风温妮(winnie)超大台风眼形成的原因以及涡旋罗斯贝波(vortex Rossby wave)在多眼墙(concentric eye-walls)相互影响过程中的作用, 发现台风外核水汽对内核的增强有抑制作用, 但对台风主环流的增强和水平尺度的增大有促进作用. Zhong等(2009)以及Zhong和Zhang(2014)发展了能解释台风中螺旋雨带形成的涡旋罗斯贝重力混合波理论. Gu等(2015, 2016)指出环境风垂直切变会导致台风非对称结构出现, 由此引起的涡动通量破坏台风暖心并降低台风热机的效率; Gu J F等(2018, 2019)进一步指出在顺时针垂直切变条件下, 台风涡旋更容易进动至逆风切变方向, 有利于涡旋倾斜减小、台风增强. Qiu等(2010)以及Qiu和Tan(2013)指出与外雨带强迫有关的边界层非对称入流辐合和强迫抬升是双眼墙形成初期内核对流触发和维持的主要动力机制. 关于台风结构, 非常值得一提的是, 利用大涡模拟技术, Wu L G等(2018)模拟了水平分辨率为37m情况下台风眼墙中的精细结构, 揭示了其中龙卷尺度的涡旋特征(图5). 为了更好地描述台风风场结构及其对台风强度的影响, Guo和Tan(2017)提出了一个全新的概念, 即丰满度, 并指出强台风一般都具有较大的丰满度(图6). Xu和Wang(2010, 2015)还发现台风增强率与最大风速半径和台风尺度呈反比. 海洋对

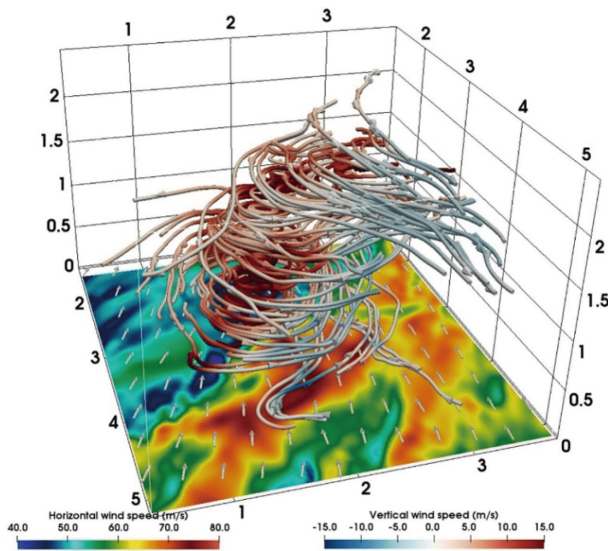


图5 10m高度上的风速(阴影)及与龙卷涡旋相关的水平扰动风流场

冷、暖色系流线分别表示下沉和上升运动。台风中心位于左上角点的外面, 坐标上数字单位: km。引自Wu L G等(2018)

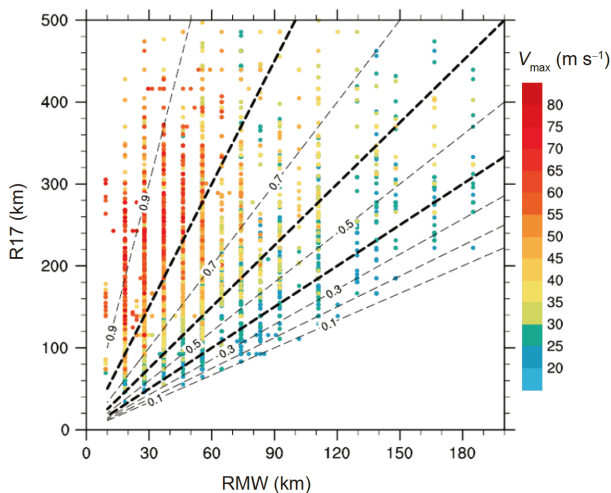


图6 不同丰满度(TCF)情况下, 台风强度 $V_{\max}$ (彩色圆点)与最大风速半径(RMW)和 17 m s^{-1} 风圈半径(R17)之间的关系。虚线表示不同大小的丰满度: $\text{TCF} \leq 0.4$ 、 $0.4 < \text{TCF} \leq 0.6$ 、 $0.6 < \text{TCF} \leq 0.8$ 、 $\text{TCF} > 0.8$ 。粗虚线代表丰满度大小分别为0.4、0.6、0.8。引自Guo和Tan(2017)

台风强度有重要影响, Xu等(2016)指出海温不仅决定台风的最大可能强度, 而且对台风最大可能增长率也有很大影响; Guo和Tan(2018)则指出快速衰减的厄尔尼诺使得西太平洋台风快速增强发生的位置普遍偏西。

台风降水强度和落区会受到台风结构、台风与其他天气系统的相互作用、地形等的重要影响。台风降

水在登陆之前多位于其左前象限, 登陆后则多发生在右前象限, 台风登陆造成的水汽供应的变化可以通过改变湿静力稳定度的分布改变降水落区(Chan和Liang, 2003)。中小尺度地形强迫抬升可使台风降水大幅度增强(陶诗言等, 1980; 丁一汇, 2015)。多个有利因子共同作用往往导致台风极端暴雨的发生。例如, 季风背景下强盛的低空急流提供了丰沛的水汽, 低空暖湿空气增强了大气的不稳定度, 同时多种抬升机制并存是2006年“碧利斯”登陆后在湖南、江西等地造成极端暴雨的重要原因(Gao等, 2009), 该台风在登陆期间呈现的一波非对称降水结构主要取决于环境场垂直风切变(石顺吉等, 2009); 2009年莫拉克台风在台湾造成的极端降水主要是地形抬升以及台风与季风低压、暖湿气流和附近的另一个台风相互作用导致(Wu, 2013), 莫拉克台风和低频季风气流的相互作用导致台风移速很慢、台风南侧低频气流加强以及降水出现非对称结构(Wu等, 2011a)。除了本体降水, 台风还会导致远距离降水。中国台风远距离暴雨事件高发区位于环渤海地区和川陕交界处, 7月发生频率最高, 西北或偏西路径进入南海北部或在华南、东南、和东部沿海转向的台风易于产生远距离暴雨(丛春华等, 2012), 台风远距离暴雨与台风和中纬度西风槽的强度关系十分密切(Wang等, 2009; Wen等, 2015)。

4.1.2 副热带高压

副热带高压对于中国天气气候的影响十分突出, 是影响中国夏季雨带进退的重要天气系统之一。20世纪50~60年代, 中国学者对西太平洋副热带高压和青藏高原对中国天气的影响做过广泛研究(叶笃正等, 1958; 叶笃正和朱抱真, 1958; 陶诗言, 1963), 系统概括了副高的发生、发展过程及其预报问题, 发现了青藏高原上空的南亚高压与西太平洋副热带高压进退的关系, 当南亚高压向东移动时, 西太平洋副热带高压会向西伸, 并提出了副热带高压东西进退的预报判据。

20世纪70年代以后对副热带高压的研究更为全面和深刻, 发现夏季青藏高原上空由于加热作用是一个暖性反气旋(叶笃正和高由禧, 1979; 纪立人等, 1984)。西太平洋暖池区域海温异常导致的对流活动的变化会影响副热带高压南北位置的变化, 大气环流则出现从东南亚至北美的一个东亚-西太平洋遥相关型(黄荣辉

和李维京, 1988).

由于资料匮乏等的条件限制, 副高形成和变异动力原因方面的深入研究直至20世纪90年代才开始. 通过理论分析和数值模拟, 中国学者发现Hadley环流和副高的形成机制并不相同, 近地层沿副高主体的下沉运动是副高出现或加强的伴随现象而非副高形成的原因, 并进一步提出了“大气热力适应”理论, 指出夏季副高形成的基本因子是感热加热, 副高结构的非对称性是辐射冷却的结果, 而对流凝结加热对西太平洋副高和南亚高压的形成起着修正作用, 在上述基础上, 得到“四叶型”加热拼图的副高形成理论(吴国雄和刘屹岷, 2000; 刘屹岷等, 1999a, 1999b; 吴国雄等, 1999; Wu和Liu, 2003). 21世纪初, 吴国雄等(2002)发现陆面加热和季风降水对副热带高压的形成有重要作用.

4.1.3 热带波动和MJO

热带地区除了台风、副高、季风槽等人们所熟知的系统外, 还有各种天气尺度波动, 如赤道Rossby波、Kelvin波、Rossby-Gravity混合波、重力波等(Matsuno, 1966). 早期, 人们并未把这些理论波动结果和热带天气变化联系起来, 直至Wheeler和Kiladis(1999)指出热带波动会和大气对流通过耦合过程来控制热带天气变化. 随后, 热带波动和MJO一起成为热带气象的研究热点.

热带波动和对流的关系研究是近年来的国际前沿问题. Han和Khouider(2010)通过建立波动和对流数学

模型, 揭示了不同水平风切变对波动的影响. Zhou和Kang(2013)利用一个将对流动量传输参数化的简单数学模型, 成功获得了与观测到的热带两天波动非常相似的不稳定Rossby-Gravity混合波, 揭示了对流动量对热带波动的重要影响. 然而, 国际上大量关于热带波动和对流的理论结果多不能解释对流耦合的波动比非耦合的波动慢很多, 其中最大难点是对流的参数化问题. Liu等(2019)指出20世纪70年代郭晓岚提出的wave-CISK理论产生“短波灾难”(Emanuel等, 1994)的原因是其难以产生缓慢的大气长波, 为此他们考虑了wave-CISK参数化方案中长期被忽视的对流记忆效应, 获得了与实际观测移动速度相当的Kelvin波, 该研究将逐渐淡出热带对流舞台的Wave-CISK重新拉回到人们的视野, 这将对热带对流的研究产生重要影响.

MJO是热带环流的一个重要天气现象, 它是热带大气在风场、气压场及积云场等存在的40~50天的周期性振荡现象, 主要是一个纬向1波的自西向东传播的热带大气环流系统, 其发生、发展和传播机制涉及热力学、海气耦合、辐射过程、对流和边界层大气动力学等. 这一天气现象是谢义炳早在1963年分析探空资料时首先发现的(谢义炳等, 1963). 谢义炳等在研究热带基本气流与台风发生频率的关系时发现, 在北半球夏季, 印度洋和热带西太平洋对流层中下层盛行西风气流, 其强度和范围具有40~50天的准周期振荡现象. 图7是谢义炳等(1963)原文的图2, 该图给出了三个观

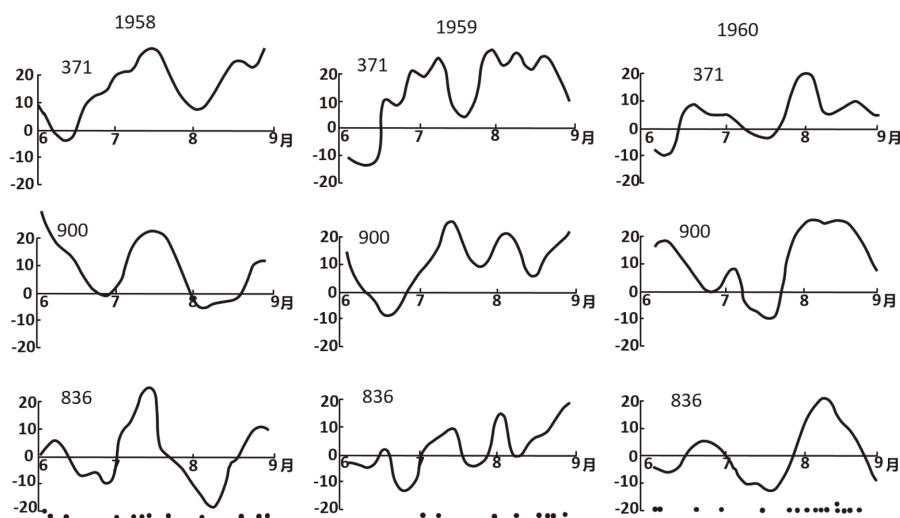


图7 371、900和836站700hPa五天平均东西向风速与台风发生日期
正值为西风, 负值为东风, 单位: m s^{-1} , 黑点为台风发生日期. 引自谢义炳等(1963)

测台站在1958、1959、1960年夏季700hPa纬向风随时间的变化,这三个观测站分别是位于印度南端的Thiruvananthapuram(编号43371)、越南南部的胡志明市(编号48900)和位于菲律宾南部的Zamboanga(编号98836).这些图清晰表明,印度洋和热带西太平洋700hPa纬向气流存在季节内准周期振荡的特征.谢义炳等(1963)指出,当赤道西风偏北、偏强、且东伸范围偏东时,台风发生次数较高,反之,台风发生次数偏少.他们进一步指出,该西风强度与范围的准周期振荡可能对台风发生频率的中期预报有帮助.1971和1972年,Madden和Julian同样通过对热带太平洋探空资料的分析,使用当时刚发展的FFT谱方法进一步分析了热带纬向风的40~50天振荡,并将其与整个热带大气环流联系在一起(Madden和Julian, 1971, 1972).这便是现在国际学术界所说的Madden-Julian振荡(MJO).长期以来,国际同行均认为热带纬向风的季节内振荡是由Madden和Julian首先发现的,直到2018年,Li T等(2018)引述了谢义炳等(1963)的论文结果,指出谢义炳等对季节内振荡现象的发现比Madden和Julian早8年.此发现是中国气象学家对现代气象学的一个重大贡献.

中国学者在MJO的形成和传播机理方面的工作从80年代中后期开始增多.李崇银(1985)首先将CISK理论引入到大气季节内振荡的研究,在理论上得到一种移动CISK波,用以解释南亚季风槽的30~50天振荡.Lau和Peng(1987)指出,对流和动力学相互作用可以产生一种“活动性”波动-CISK机制,这种机制一定程度上说明了MJO沿赤道东传的速度.随后Wang(1988)指出波动的不稳定性主要取决于水汽静态能量的垂直分布,内部波引起的潜热释放通过减少热阻尼使波动缓慢东移.李崇银(1990)提出CISK-Rossby波机制,这种波动可以向东西两侧移动,在热带大气加热情况下其相速度同热带30~50天振荡的活动相一致.Wang和Xie(1998)在模式分析基础上指出海气相互作用在维持MJO方面具有重要作用.Wang等(2012)发现副热带冷涌在MJO形成的初期可以加强和加速MJO对流的建立,促进MJO形成.Bao和Hartmann(2014)利用简单的浅水模式研究了MJO加热的复杂响应,成功再现了在太平洋高空急流出口准静止的Rossby波形,为MJO通过与太平洋高空急流相互作用影响中纬度天气的机制提供了最直接的证据.目前,MJO已成为全球热带地区预测台风、中纬度季节内天气、短期气候的先兆因

子,关于MJO的发生发展机制及其东传特征仍是热带大气动力学一个重要研究课题,对MJO的模拟也仍然是大气环流模式所面临的一个重要挑战.

4.2 台风及热带大气过程观测研究

在早期,中国台风和热带气象研究可用资料非常有限,主要是常规观测数据和一些雷达卫星资料,这一状况在20世纪90年代以后随着大型观测试验开展得以改观.90年代初,中国参加了“SPECTRUM-90”国际热带气旋观测计划,1993和1994年夏季,中国开展了中国异常台风科学试验(China abnormal typhoon experiment),2002~2004年间实施的“中国登陆台风”外场科学试验(CLATEX)是中国首次对登陆热带气旋开展的较为大型的综合观测试验,2009~2019年间,国家重点基础研究发展计划(973)“台风登陆前后异常变化及机理研究”和“登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估”项目开展了一系列外场观测试验.与此同时,雷达、风廓线仪、雨滴谱仪、铁塔等观测设备也在中国东南沿海地区逐渐增设,多颗气象卫星相继升空,这些都为我们观测和监测台风和热带大气过程提供了极大方便.

在各种观测试验开展过程中,中国学者也开始发展自己的观测技术和方法,特别是中国卫星观测技术已可针对台风进行目标观测.在2018年台风季的风云四号卫星(FY-4)实时观测试验中,中国首次启动干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)的加密观测,成功实现了15min一次对台风Maria目标区的快速观测,获得了台风中心区域三维温湿的高时空分辨率资料.在2018年Ampil台风观测中首次实现了交互式“观测-预报”模式,即数值模式确定台风敏感区、GIIRS对敏感区进行加密观测、观测资料及时回传实时进入四维变分同化预报系统、判断下一时次敏感区并指导卫星观测.

利用日渐丰富的观测数据,中国学者深入研究了台风结构和降水微物理特征.Zhao K等(2016, 2017)首次利用雷达资料揭示了台风天兔(2013)中的三眼墙结构;Tang等(2018)、Ming和Zhang(2018)发现台风登陆过程中,动量通量、湍流动能和耗散热能都随风速增加而增大;Wu D等(2018)指出暖雨和冰相过程分别是导致台风内雨带和外雨带中地面强降水的主要因子.

4.3 台风和热带大气过程数值预报技术

数值模式是台风和热带大气过程预报不可或缺的

工具,也是认识台风和热带天气系统发展演变规律的重要工具.但在很长一段时间里,中国台风和热带天气系统业务数值预报模式和产品都是以引进为主.在进入21世纪后,随着中国自主研发的新一代多尺度通用资料同化与数值预报系统GRAPES(Global and Regional Assimilation and Prediction System;薛纪善和陈德辉,2008;沈学顺和周秀骥,2013)的建立,中国台风数值预报技术开始迅速发展.目前,中国台风数值预报系统主要有中国气象局上海台风研究所基于GRAPES模式研发的GRAPES-TCM(黄伟等,2007)、国家气象中心基于GRAPES-Meso发展的区域中尺度台风数值预报系统GRAPES-TYM(麻素红和陈德辉,2018)和中国气象科学研究院的台风区域资料同化和预报系统(T-RAPS).最近的西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定显示,这三个系统对台风路径的24h、48h和72h预报误差分别小于90km、152km和265km,这些误差均远小于十年前的误差水平,但与国际先进模式结果相比,系统的预报能力还有进一步的提升空间(陈国民等,2019;表1).

尽管中国台风路径的数值预报水平有了显著提高,但数值模式对台风强度仍没有明显的业务预报能力(钱传海等,2012).为改进这一状况,雷小途等

(2019)研制建立了由GRAPES-TCM、ECOM海洋环流模式和WAVEWATCH III海浪模式构成的新一代区域中尺度台风耦合模式系统,该系统在历史典型台风个例和2016~2017年台风汛期的业务化测试中表现出了良好的预报性能,对台风突变的预报优于非耦合和海水耦合模式.

一系列外场观测试验收集的观测资料对中国台风数值预报模式的发展起了重要促进作用.首先,观测资料的深入分析揭示了台风发展演变中的关键物理过程和重要参数,可以促进模式物理参数化方案的改进,如Tang等(2018)发现,登陆台风动量垂直涡动耗散率在陆上显著大于海上,指出登陆台风的数值预报应在海上和陆上分别采用不同动量垂直涡动耗散率参数化方案;Wen等(2017)基于登陆中国大陆台风独特降水微物理特征,拟合了台风降水的Z-R关系、雨滴轴长比关系和 μ -A关系,这有助于提高雷达定量降水估计和模式微物理参数化精度.其次,加密观测资料通过为数值模式提供更好的初始场改进数值预报,观测资料进入数值模式需要进行同化,因此观测资料的丰富也促进了中国台风数值模式同化技术的发展.在这一领域,中国学者进行了很多尝试,有效实现了雷达、自动站等资料的同化.基于雷达同化的集合模拟,Zhu等

表 1 2017年客观路径预报方法平均路径误差^{a)}

方法名称		预报时效(h)									
		24		48		72		96		120	
		样本数(个)	平均误差(km)	样本数(个)	平均误差(km)	样本数(个)	平均误差(km)	样本数(个)	平均误差(km)	样本数(个)	平均误差(km)
全球模式	NCEP-GFS	194	71.9	143	122	101	194.7	74	260.5	58	347.1
	ECMWF-IFS	172	62.3	128	107	94	204.1	71	295.5	54	387.8
	英国数值	181	68.7	145	111.1	105	186.6	79	290.3	59	374.3
	日本数值	374	77.2	288	139.9	210	237.6	/	/	/	/
	T639	301	98.7	243	192.2	183	307.9	138	450.6	109	657.9
	韩国GDAPS	182	77.9	138	121.5	104	205.2	77	627	59	1050.2
区域模式	澳大利亚数值	176	85.7	128	154.6	90	285.1	/	/	/	/
	广州数值	293	68.5	211	115.6	152	220.8	/	/	/	/
	气科院 T-RAPS	170	84.7	133	129.3	96	211.6	/	/	/	/
	上海台风模式	253	89.1	198	151	146	242	/	/	/	/
	GRAPES-TYM	280	82.1	205	135.3	137	256.5	96	495.8	66	823
	GRAPES-TCM	253	89.4	187	151.2	130	263.9	/	/	/	/
其他客观方法	台风所模式集成	335	65.7	260	107.5	189	180.3	/	/	/	/
	福建优选概率权重	106	78.5	79	129.5	55	230.8	/	/	/	/
	广西遗传神经	197	81	142	156.9	101	260	/	/	/	/

a) 引自陈国民等(2019)

(2016)揭示出台风暴雨的可预报性主要依赖于初始台风强度、位置和引导气流的相互关系. 最值得一提的是在中国自主研发的GRAPES全球四维变分同化系统中实现了GIIRS资料同化, 使得数值模式更好地反映了台风暖心强度和结构、台风路径和强度变化. 基于这些同化技术以及数值预报模式和卫星观测技术, 在2018年Ampil台风观测中交互式“观测-预报”模式的成功尝试为中国台风路径、强度、结构和降水的观测预报开启了一种全新模式.

5 强对流天气研究

强对流天气是一类发展速度快、局地性强、破坏性大的高影响灾害性天气, 因其较小的时空尺度和较强的非线性特征, 一直是天气预报的瓶颈难题. 强对流天气包含伴有雷暴的超过 20mm h^{-1} 的短时强降水、2min平均风速超过 17.2m s^{-1} 或阵风超过 20m s^{-1} 的雷暴大风、冰雹和龙卷. 强对流天气往往由中尺度天气系统造成. 中尺度天气系统是指水平尺度 $2\sim 2000\text{km}$ 、时间尺度几十分钟至几天之间的天气系统. 其中水平尺度 $2\sim 20\text{km}$ 为 γ 中尺度, $20\sim 200\text{km}$ 为 β 中尺度, $200\sim 2000\text{km}$ 为 α 中尺度. 强对流天气属于 γ 中尺度和 β 中尺度范畴. γ 中尺度对应于相对孤立的强对流系统或强风暴单体, β 中尺度对应于组织化的中尺度对流系统(MCS). 强对流天气导致的灾害在中国仅次于台风和洪涝, 有些年份甚至与台风相当. 中国过去70年来对强对流天气的研究经历了由主要侧重 α 中尺度的天气背景特征分析到 γ 中尺度结构和物理机制研究的演变.

5.1 观测

中尺度天气系统由于时空尺度小, 常规的地面和探空观测网往往很难覆盖, 对其发生发展规律和机理的认识需要依赖于外场加密观测试验和中尺度观测网, 并采用各种先进的非常规观测仪器(天气雷达、气象卫星等)进行组网加密观测. 其中天气雷达因其能观测到中尺度系统内部三维精细结构, 一直是中尺度天气的主要观测工具.

中国中尺度观测试验开始于20世纪60年代中叶. 1963与1964年夏季, 中央气象科学研究所与中国科学院地球物理研究所联合在长江三角洲地区开展了中国

第一次灾害性天气中尺度观测试验(王鹏云和李泽椿, 2001), 采取的方法主要是在常规地面和探空气象站进行时间加密观测, 获得的主要是中尺度系统的天气尺度背景观测. 80年代末, 在国家“七五”科技攻关项目“灾害性天气监测与短时预报研究”的支持下, 中国气象局建设了珠江三角洲、长江三角洲、长江中游和京津冀四个中尺度灾害性天气监测和超短期预报试验基地, 突破了研制自动气象站、大气风廓线仪、多普勒天气雷达以及中尺度探测网资料的高速自动传输、采集、分析处理和显示设备的关键高新技术. 90年代在福建、北京、上海、深圳等地又建立了多个省级中尺度气象二级基地.

1998年中国在华南和江淮地区开展了“南海季风试验和华南暴雨试验”以及“淮河流域能量与水循环计划”(周秀骥等, 2003; 陶诗言等, 2003; 赵柏林和丁一汇, 1999), 开展了国家“九五”科技攀登专项“海峡两岸及邻近地区暴雨试验”(简称“华南暴雨试验”)(周秀骥, 2000), 加强了自动气象站观测、多普勒天气雷达、风廓线仪、气象卫星及GPS等其他遥感探测资料在监测分析和预报暴雨 β 中尺度结构与变化过程中的应用研究, 获得了具有较高可信度、规范化的暴雨过程加密观测数据库. 通过中尺度外场综合观测试验、天气动力学分析诊断与中尺度数值模拟相结合, 研究了华南前汛期暴雨和江淮暴雨的中尺度结构及其变化机制和规律. 其中, 在江淮梅雨带的观测中, 首次在江淮地区实施了三部X波段多普勒雷达的同步观测, 揭示了梅雨系统 γ 中尺度涡旋的结构. 1999~2008年, 中国先后组织了三个国家重大基础研究计划(973), 进一步针对引发华南和江淮梅雨锋暴雨的 α 中尺度和 β 中尺度对流系统开展加密观测, 发展了暴雨的卫星、雷达监测和预报方法, 并加深了对这两类系统形成机理的认识(倪允琪等, 2006).

2000年以来, 中国大气探测技术发展迅速, 综合气象业务观测网络, 包括气象卫星、探空、多普勒天气雷达、自动站、GPS/Met、风廓线雷达等观测系统已具规模, 在强对流观测能力、规模、密度等方面已达到世界先进水平, 已能够捕捉和探测中尺度对流的触发及组织化过程. 其中, 中国新一代多普勒业务雷达网密度平均世界最高(计划216部)(俞小鼎等, 2012), 显著提高了强对流天气的监测和预警能力. 同时, 中国新一代卫星(静止和极轨)的成功发射, 进一步加强了对

中尺度灾害性天气的监测能力。

2013年, 中国第一个以强对流天气为研究对象的国家973项目“突发性强对流天气演变机理和监测预报技术研究”启动(Xue, 2016), 该项目2014~2016年每年6~7月在江淮流域开展了针对 γ 中尺度强对流的观测试验, 获得了多个不同典型强对流过程(飑线、局地强对流、梅雨锋面对流等)的精细结构和演变特征的观测资料。在 γ 中尺度关键区首次实现了多部双偏振多普勒雷达近距离组网和超级站综合观测。其中, 双偏振雷达组网主要用于观测 γ 中尺度强对流内部的动力和云微物理精细结构, 而超级站(包括微波辐射计、移动风廓线、雨滴谱仪、垂直指向雷达和GPS探空仪等综合观测)用于大气和降水垂直结构, 以及地面降水微物理特征的观测。自2013年以来中国气象局发起并组织实施了华南季风降水试验(Luo等, 2017), 该试验是世界气象组织世界天气研究计划的研究发展项目, 每年5~6月在华南开展强降水综合观测试验, 逐步建立了云降水超级观测站和强对流超级观测站, 实现了多部不同波长垂直指向云降水雷达联合观测, 以及多部双偏振雷达和相控阵雷达组网观测, 获得了华南前汛期锋面和暖区暴雨的精细结构和演变特征的观测资料。

目前, 中国风云4号静止卫星已投入业务运行, 中国的业务天气雷达网也正在进行双偏振技术升级。几个超大城市区, 如北京、广州和上海已基本建成了X波段双偏振雷达监测网, 双偏振相控阵雷达对龙卷的探测也开始处于测试阶段。这些高时空分辨率探测手段的改进为强对流天气监测和预警能力的提高奠定了坚实基础。

5.2 发生发展特征和机理研究

中国60年代初期开始开展积云动力学研究, 对积云在不同层结风场条件下的发生发展特征做了分析。巢纪平(1980)发现重力波在水平不均匀层结条件下发展会形成强天气, 可用于解释低空急流左前方易于发生暴雨的事实。华东中小天气系统试验基地协作组(1978)基于60年代的中尺度试验观测数据揭示了中尺度系统的发生条件、活动规律及与天气的关系, 发现低层中尺度或次天气尺度辐合线和重力波是重要的触发机制, 冷锋、地形、低空急流、风速的不连续线、露点锋、海陆风、密度流等也可触发强对流, 在各种不连续线相遇的地点对流触发作用更强, 中尺度系统

的合并也可能造成对流触发(中央气象局研究所, 1977)。周秀骥等(2003)基于华南暴雨试验的数据分析了华南暴雨 β 中尺度热力与动力结构, 揭示了华南暴雨系统中尺度结构及其变化机制。80年代初, 丁一汇等(1982)对中国飑线发生的天气背景、触发条件和形成的热力和动力学条件做了系统性分析。

随着中国雷达网的建立, 对造成中国强对流天气的中小尺度系统发生发展规律的研究不断深入。Meng和Zhang(2012)系统研究了国际上还少有关关注的热带气旋前部飑线的统计特征及其与中纬度飑线的差异, 发现台前飑线多发生于台风和副热带高压的过渡地带, 台风本身通过增强水汽、不稳定性 and 低层辐合有助于飑线的形成。Meng等(2013)得到了中国独特的地形和季风气候背景下飑线的时空分布、长度、强度、生命期、移动、走向、形成方式、组织方式、形成背景、消散方式等的统计特征, 并与美国的飑线特征作了对比。发现中国飑线的高发区为安徽、河南、山东和江苏交界地带, 以7月最多, 有3个日变化峰值(图8)。中国飑线的生命期约为美国的一半, 生成环境的湿度约为美国的两倍, 不稳定程度和垂直风切变与美国的相当。Zheng等(2013)揭示了干湿环境背景下飑线的组织形式差异。He等(2017)使用倾斜 T 模态主成分分析方法把中国中东部地区发生白天和夜间中尺度对流系统的天气背景做了分型, 发现62.2%的白天中尺度对流系统和67.7%的夜晚中尺度对流系统发生在东侧为西北太平洋副热带高压西侧为低压系统的径向环流型中, 同时揭示了天气型和中尺度对流系统特征的关系。

中国学者通过长时间的雷达观测资料, 从雷达气候学的角度系统研究了中国不同地区的对流特征。Luo等(2013)利用多年的TRMM星载测雨雷达和CloudSat/CALIPSO星载云雷达观测资料, 结合地面雨量等多种地基观测资料, 系统分析了东亚夏季风背景下华南和江淮地区的降水系统的对流特征, 发现与大气热力条件的变化相一致, 从季风爆发前到季风降水期、再到季风后这三个子阶段, 华南和江淮地区降水系统的对流强度都依次增强; 华南季风期平均降水总量比江淮梅雨期多, 但是强降水($>50\text{mm d}^{-1}$)对总降水量的贡献在江淮大于华南, 江淮地区降水系统的对流强度比华南强, 这与江淮地区季风降水系统更多地受到更强的锋面和低涡的影响有关。Chen M X等(2014)研究了不同盛行风条件下华北地区暖季对流系统的日

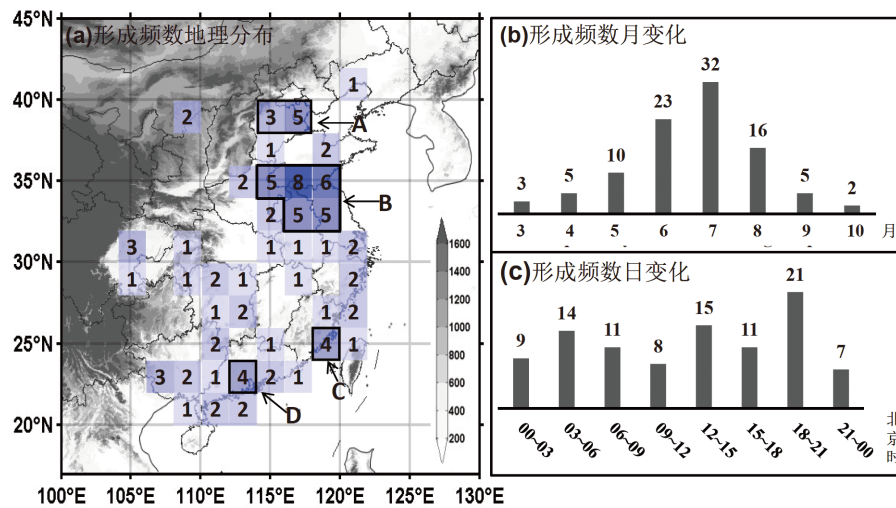


图8 飊线生成频数的地理分布(a)、月变化(b)和日变化(c)

(a)中蓝色阴影越深, 飊线发生次数越多. 图中的数字代表2008和2009年里所在 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的经纬网格内生成时刻其40dBZ回波带的中心落在该网格内的飊线个数. A~D代表四个高频中心. 灰色阴影代表地形高度. 引自Meng等(2013)

变化特征, 指出华北地形引起的热力环流是造成对流中午在山坡形成、晚上下地形传播的主要机制, 发现中层(500hPa)和低层(925hPa)的盛行风带来不同的环境气流, 对对流系统的日变化存在显著影响. Chen X C等(2014, 2015)通过分析华南沿海强降水区的对流日变化特征和机制, 揭示了华南前汛期对流和降水日变化存在夜间大值区, 是陆风环流、山谷风与盛行西南暖湿气流辐合抬升所致; 发现盛行风速和湿度是影响沿岸降水日变化的重要因子, 提出低空急流所引发的海岸区域摩擦辐合的增加是造成夏季海岸线对流高频带的主要动力机制(Chen等, 2017), 该理论有别于过去多关注急流本身或海陆热力强迫的海陆风环流影响沿岸强降水的研究.

基于观测和云分辨数值模拟对强对流系统细致结构的认识不断深入. Meng等(2012)基于真实天气背景下的对流分辨数值模拟, 证实了前人基于理想试验得到的飊线弓形回波书卷涡旋形成理论, 同时还发现书卷涡旋还可通过中层水平涡度的向下倾斜形成. Luo Y L等(2014)发现江淮梅雨锋上造成极端强降水的中尺度对流系统具有一种有别于经典的飊线组织类型(图9), 即后部增生型的西-东或西南-东北走向的对流线以及多个这样的对流线排列在一起整体向东南方向移动的中尺度对流系统, 两种尺度的移向不同的单体和雨带的列车效应叠加可导致所影响地区极端暴雨的发生. 此类中尺度对流系统组织结构在华南沿海极端

降水过程中也被观测到(Wang等, 2014; Wu和Luo, 2016). Liu X等(2018)发现中尺度对流系统内部弓状对流线的快速分裂和重建过程有助于这种组织结构的形成, 该过程的发生需要三个条件: 来自洋面的充沛的暖湿空气、一条准静止的中尺度出流边界、弓状对流线后部强的入流与出流边界相交于对流线的西南端. 近年来, 飊线的降水云微物理特征也取得了创新成果. Wen等(2017)通过对江淮强对流内部云物理结构特征的双偏振雷达观测研究发现, 飊线从初生期发展至成熟期是一个雨滴谱特征从大陆性对流到海洋性对流演变的过程(图10), 暖雨过程在飊线降水中发挥着较为重要的作用.

强对流系统特别是飊线触发机制方面的研究更加精细. Bai等(2019a)发现, 前期对流产生的扇贝状阵风锋和干线相互作用可在阵风锋的交点附近触发对流. Su和Zhai(2017)证明了 $n=1$ 重力波对触发对流的正贡献, 重力波由前期对流在对流层高层激发, 其较强的上升支在低层的辐合和地面辐合线的弱辐合叠加触发对流. Zhang M R等(2019)揭示了低空急流可通过对水汽的水平输送和垂直运动相关的绝热冷却形成MAUL而触发对流.

龙卷和相关超级单体的研究也取得了重要进展. 中国每年约有50~100个龙卷发生, 相当于美国的约1/10(Chen J Y等, 2018). 随着近年来互联网和多媒体技术特别是智能手机的广泛使用, 以及几次高影响龙卷

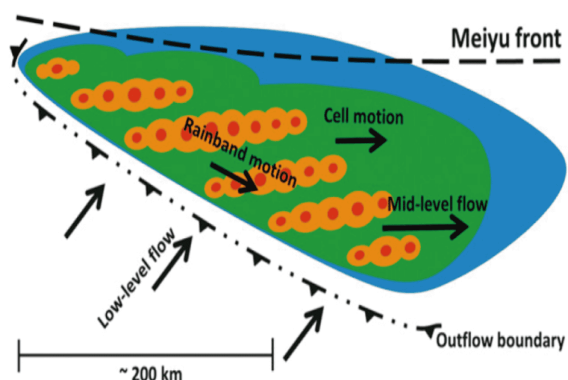


图9 包含后部增生型的对流和雨带联合列车效应的中尺度对流系统示意图

橙色、绿色和蓝色阴影分别代表50、35和20dBZ的雷达回波。引自Luo Y L等(2014)

事件的发生, 龙卷天气越来越引起气象业务和研究部门以及公众的关注. 龙卷天气由于时空尺度很小, 对其发生发展和灾害特征的研究主要基于地面灾害调查和雷达观测分析. 中国龙卷现场灾害调查由以前的个别受灾地点的灾害拍照开始走向专业化和系统化的全路径地面和无人机全方位灾害调查. 这样的灾害调查研究在北京7·21(Meng和Yao, 2014)和东方之星倾覆事件(Meng等, 2016)风灾对流系统的认定上起了关键作用. Bai等(2017)针对2015年台风“彩虹”于10月4日在佛山造成的EF3龙卷开展了国际上首次对台风龙卷详细的灾害调查和雷达特征综合分析, 得到了龙卷灾害分布和近地面风场特征, 揭示了EF风速与视频风速估计的一致性、漏斗云地面直径和EF等值线的关联、雷

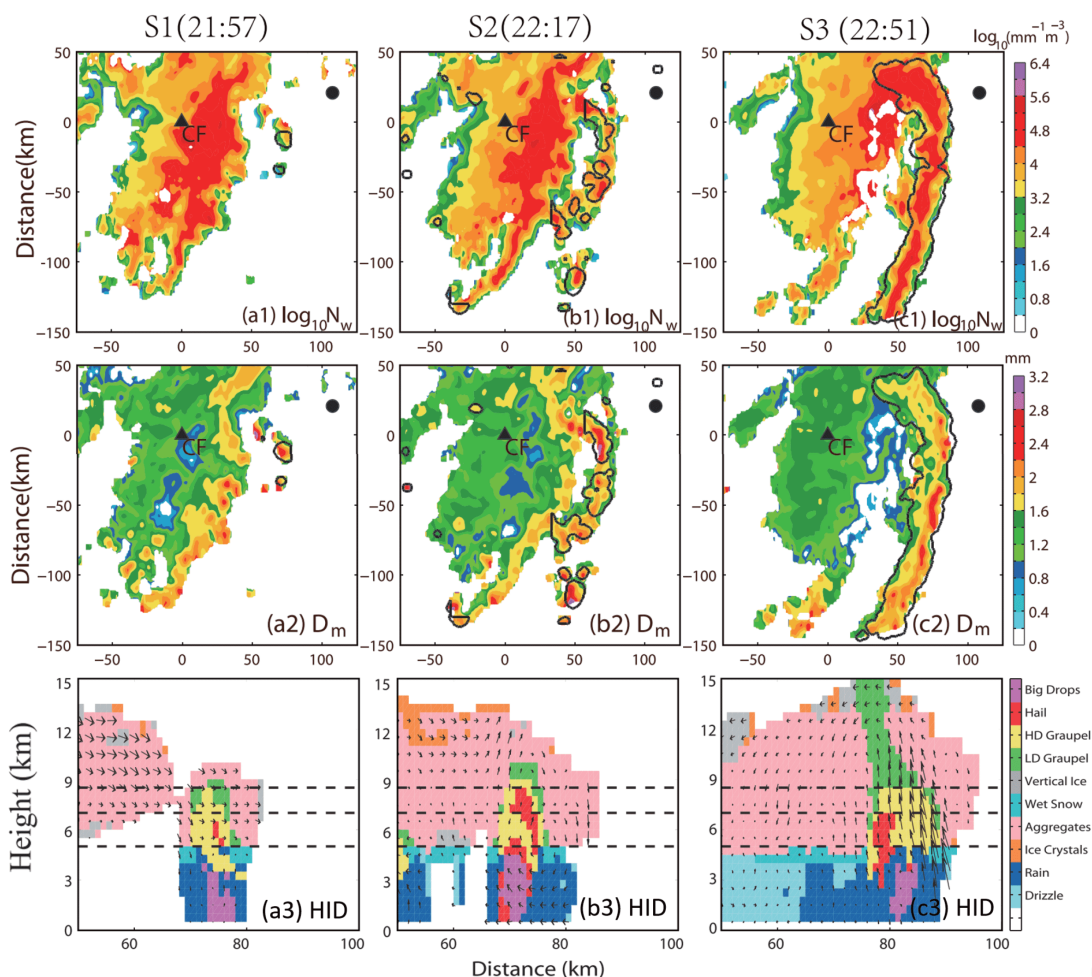


图10 飑线初生(a1~a3)、发展(b1~b3)和成熟(c1~c3)阶段反演粒子数浓度(a1、b1、c1)与粒径大小(a2、b2、c2)空间分布, 以及垂直剖面粒子相态分布特征(a3、b3、c3)

引自Wen等(2017)

达上龙卷涡旋与漏斗云地面位置的相对偏差信息, 以及雷达上龙卷涡旋强度与地面灾害强度的对应关系等(图11). Meng等(2018)对过去42年里造成死亡人数最多的江苏阜宁龙卷做了详细的灾害调查和雷达特征分析, 揭示了分钟地面观测数据在龙卷监测和预警中的重要性. Bai等(2019b)进一步统计分析了2006~2018年中国登陆热带气旋龙卷的时空分布和发生环境特征, 发现中国约有30%的登陆热带气旋会产生龙卷, 龙卷的发生频率为每年平均5个, 同时揭示了中国台风龙卷与美国相应特征的差异, 特别是揭示了2018年台风摩羯造成的中国历史上首个龙卷爆发事件的发生环境特征.

龙卷母体超级单体的发生机理方面, Zhao等(2017)通过雷达反演风场, 从观测角度首次定量分析了台风“彩虹”在佛山造成的EF3龙卷母体超级单体的发生发展机制, 提出低层水平涡度的垂直倾斜和垂直涡度随后迅速拉伸是超级单体内低层中尺度涡快速增强的主要原因. 薛明团队首次实现了中国对龙卷超级单体的高分辨率同化模拟, 得到了较为理想的低层涡旋立体结构和风压场配置, 发现地表摩擦产生的水平涡度有可能是近地面中涡旋涡度的主要来源, 这是对

国外研究认为的斜压涡度是涡度的主要来源的补充, 还发现对流尺度集合模拟的上升气流螺旋度概率对龙卷的发生具有较好的指示意义.

相对于龙卷, 雷暴大风是中国更加常见的对流性天气. Yang等(2017)统计分析了中国2010~2014年雷暴大风事件的时空分布特征, 发现雷暴大风事件主要发生在华东暖季的下午, 很少发生在西部地区, 最高频率出现在广东的春季, 在华北和长江中下游地区也存在两个次高频中心. Meng等(2016)通过中国首次使用无人机的现场灾害调查揭示2015年6月1日东方之星倾覆事件发生时曾遭遇了飚线弓形回波顶点处的下击暴流.

5.3 预报和预警

强对流天气预报一直是天气预报的瓶颈. 早在70年代, 中国多家科研业务单位联合成立了北方暴雨课题组, 在北方暴雨预报方法及理论研究的推广应用上做了很多工作(谢义炳等, 1978; 陶诗言等, 1980). 中国强对流天气的短时临近预报业务开始于2004年(郑永光等, 2010). 北京市气象局首先建设了BJ-RUC短时临

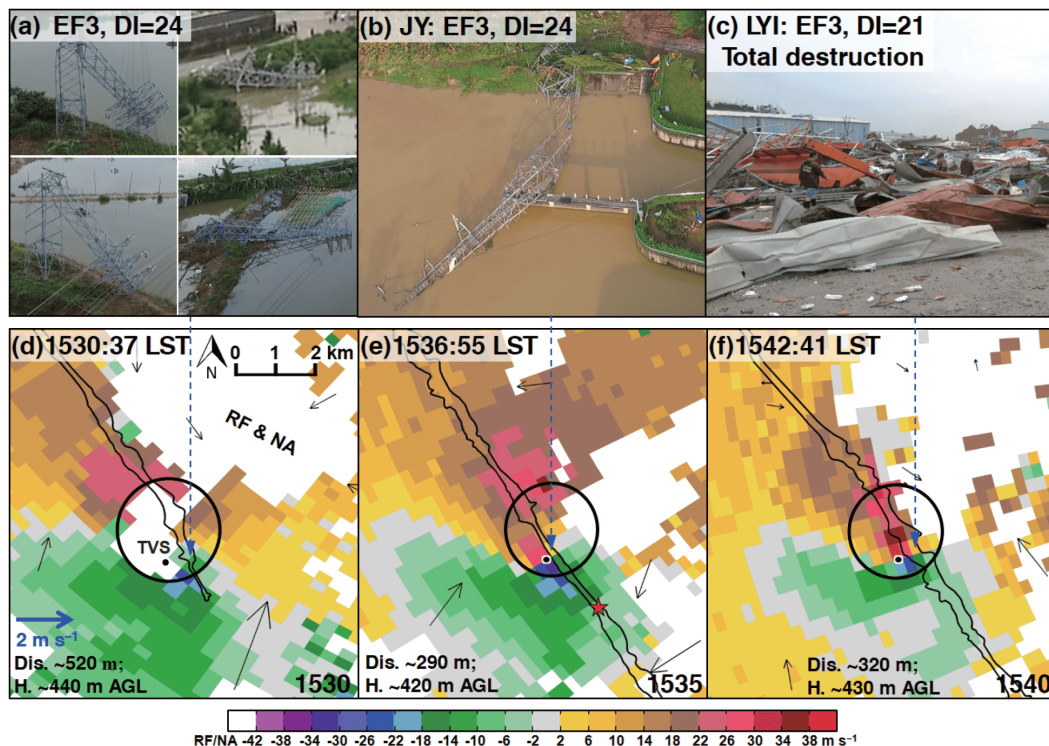


图 11 2015年10月4日佛山龙卷的漏斗云和地面灾害路径与雷达观测的中气旋与龙卷涡旋(TVS)的对应关系
黑色圆圈代表中气旋, 黑点代表雷达观测到的龙卷涡旋. (e)中的红五星代表龙卷地面位置. 引自Bai等(2017)

近预报系统(Chen M等, 2009). 中国气象局从2007年底开始发展强对流天气临近预报业务系统SWAN(韩雷等, 2007), 该系统目前能够完成灾害性天气显示和报警、二维和三维雷达拼图、雷达定量估测降水、区域追踪(TREC)及回波外推预报、降水0~1h的外推预报、每6min风暴单体识别和30、60min的外推预报(TITAN), 引入了高时空分辨率的中尺度数值模式预报数据、强对流天气分类识别和预报技术、卫星资料在强对流云团快速识别和云团对流特征参数分析中的应用技术, 以及LAPS快速融合和分析系统生成的基本要素三维分析场和云分析算法等.

2009年中国气象局组建了国家强天气预报中心(SPC), 开始开展国家级强对流天气预报业务, 建设了基于多源资料的分类强对流天气实况监测系统、中尺度天气分析规范和系统平台、分类客观预报系统等, 并发布分类强对流天气预报产品(何立富等, 2011). 监测方面, 利用常规观测资料、WS报(重要天气报告)、自动站、闪电、静止卫星红外资料和云分类资料实现了全国强对流天气的实时监测, 可以监测雷暴、冰雹、龙卷、大风、短时强降水和深对流云的最近1、3、6、12和24h的分布; 分析方面, 在天气形势分析基础上应用配料法对强对流天气的物理条件和结构特征进行分析, 包括天气尺度环境条件和中尺度机理、配置与结构分析等, 开发了数值预报客观分析诊断技术, 配置了分类强对流天气环境条件的综合分析图并成为了强对流天气短时和潜势预报的重要依据, 发展了针对重点区域、重点时段的基于快速分析预报资料和多源观测资料的中尺度滚动分析技术和业务产品; 预报方面, 0~2h临近预报多采用外推法, 2~12h的短时预报更多依赖于快速更新的数值模式系统或高时空分辨率中尺度数值模式集合预报系统. 短期预报主要从强对流天气系统的发生发展机理和所依赖的环境条件出发, 根据不同的诊断物理量对不同类型强对流天气的指示意义, 进行分类强对流天气预报, 也即配料法. 由于强对流天气的发生发展需要多方面的物理条件, 类似模糊逻辑、机器学习等方法开始用于强对流天气的预报. 基于集合数值预报的强对流短期概率预报是当前预报技术的重要发展方向. 对2010年汛期预报的评估表明6h间隔雷暴TS评分为18%, 短时强降水为2.6%, 冰雹和雷雨大风为2.1%.

近年来, 多次高影响龙卷事件的发生促使中国气

象局开始着手龙卷的监测和预警业务建设. 2013年8月, 广东省佛山市龙卷风研究中心正式成立. 2015年4月江苏省气象局发展的强天气综合报警追踪平台(SWATCH)投入业务使用(Meng等, 2018), 实现了多源资料显示应用、强对流天气客观识别和客观外推、省市县三级预警快速制作和实时联动以及业务行为记录分析等强天气综合报警追踪关键技术, 在2016年6月23日阜宁龙卷风等重大突发灾害天气的预警过程中发挥了重要作用. 2017年开始, 中国气象局在江苏、安徽、湖北、浙江和广东五省开展龙卷的监测和预警准业务试验. 到目前为止, 佛山龙卷风研究中心已成功发布3次龙卷预警, 包括2018年6月中国首个龙卷风预警以及9月17日台风“山竹”登陆期间的两次龙卷预警, 其中一次甚至提前了一个小时.

总的来说, 中国目前分类强对流天气定点、定时、定量的业务预报水平还不高, 龙卷的监测、预报、预警能力尤其不足. 解决这些问题的根本途径在于加强高时空分辨的雷达网的建设, 以及发展基于高时空分辨率观测资料同化的快速更新中尺度天气业务集合数值预报系统.

6 数值天气预报及资料同化研究

新中国数值天气预报和资料同化研究和业务应用概括起来可以分为两个阶段: 第一个是与国际数值预报发展几乎同步的早期阶段, 第二个是80年代开始的现代化业务数值预报体系的建立和自主创新发展阶段.

6.1 数值天气预报模式的研究进展

中国数值预报研究开始于1954年, 是国际上较早开展数值预报的国家之一, 并取得了在国际上有广泛影响的成果(Blumen和Washington, 1973). 20世纪50及60年代初, 叶笃正关于青藏高原动力、热力作用(叶笃正, 1952; 叶笃正等, 1957)、大气运动的适应理论和大气频散理论、风压场的平衡关系(叶笃正和李麦村, 1964)等方面的理论研究成果, 直接或间接地指导并推动了中国数值预报的发展. 1961年, 曾庆存以大气中运动的适应过程理论为基础, 提出“半隐式(或称半显式)差分格式”(Zeng, 1961), 对影响时间步长和计算稳定性的快波取隐式格式, 增加了计算稳定性且大大减少

了计算量. 数年之后, Robert(1969, 1982)进一步丰富和发展了半隐式格式, 并与半拉格朗日方法结合, 形成了半隐式半拉格朗日方法, 这是直到今天仍为世界业务数值预报模式广泛采用的计算格式.

在Charney应用正压涡度方程数值求解首次取得数值预报成功之后不到十年, 人们认识到斜压原始方程而不是简化的准地转方程对于预报真实天气过程的重要性. Zeng(1961)首次用原始方程组做出了实际天气预报, 并在莫斯科世界气象中心实现了业务应用, 比美国1966年开始用原始方程做预报早了5年. 针对数值模式中地形带来的计算复杂性问题, 曾庆存(1963d)提出了静力扣除(或标准层结扣除)方法, 使得在气压梯度力计算中不再出现基本量的计算误差, 避免了大量小差的问题. 这种静力扣除方法后来在谱模式以及半拉格朗日平流计算减缓地形影响中起了重要作用(Simmons和Chen, 1991; Temperton等, 2001). 随后, 曾庆存针对数值天气预报模式发展中的数学物理基础问题开展了系列研究, 将重点关注的大气流体力学的计算问题进一步升华为科学理论, 形成了数值天气预报的数学物理基础(曾庆存, 1979b). 综上所述, 中国科学家在数值预报的早期研究和发展中做出了重要贡献.

进入80年代, 中国数值预报研究迎来了新的契机. 这个阶段以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的成立为标志, 以西方发达国家为主体, 数值预报的研究和业务应用开始了大发展时期. 有关计算格式的研究是这期间中国数值预报研究中较集中的一个领域. 曾庆存和季仲贞(1981)提出了总能量守恒隐式平流项的差分格式, 在时间离散和任意初值情况下均计算稳定, 具有能量守恒、广义能量守恒和平均尺度守恒的特点. 尽管隐式完全能量守恒格式是计算稳定的, 但实际求解困难, 需费巨大的工作量. 显式完全平方守恒格式(王斌和季仲贞, 1990)克服了困难, 是守恒差分格式构造上的一大突破. 钟青(1997)构造并证明了一般二次和三次物理守恒律时间差分保真格式两个构造定理, 以往一些主要时间离散守恒格式构造方案可作为两个定理特例给出, 为解决更加广泛类别的时空离散意义下保真格式构造基本问题提供了适用的数学基础, 利用该新构造定理, 构造并且实现了斜压原始方程全球谱-垂直有限差分模式半隐式高阶全能量守恒方案, 有效地改进了传统预报方案中关于能量质量守恒性质的系统性偏差. 王斌和季仲贞(2006)将辛几何算法引

入到大气海洋数值模拟中, 针对大气动力学方程线性和非线性情形分别作了讨论.

20世纪80年代也是中国研制数值模式的热点时期(曾庆存等, 1985; 郑庆林, 1980). 郑庆林(1980)研制的7层半球谱模式、最早面向业务的三层原始方程绝热模式(A模式)、包含简单物理过程的北半球5层格点模式(B模式)、水平分辨率 $5^\circ \times 4^\circ$ 垂直方向两层的大气环流模式(IAP AGCM-I; 曾庆存等, 1985)、HLAFS有限区分析和预报模式(the High-resolution Limited Area Analysis and Forecasting System)、考虑陡峭地形的暴雨预报模式AREM(the Advanced Regional Eta-coordinate Model, 宇如聪等, 2004)、中国科学院大气物理研究所发展的格点GAMIL(the Grid-point Atmospheric Model of the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP))和谱SAMIL模式等(Wang等, 2004; Wu等, 1996), 是这期间中国数值模式研制的重要成果. 21世纪初, 中国气象局发展的新一代非静力数值预报模式GRAPES(薛纪善和陈德辉, 2008; 沈学顺和周秀骥, 2013), 则是中国面向天气预报业务应用的重要自主创新研究成果. GRAPES的研发成功及业务应用标志着中国建立了全面的自主业务数值预报体系, 而且大幅度推动了雷达、卫星等遥感资料在数值预报中的同化应用.

近年来, 随着计算机的发展, 在众核高性能计算机上的模式可扩展性和计算效率问题已经成为各数值预报业务中心(包括气候模式界)发展下一代高精度预报模式考虑的重要课题. 研究具有高扩展性、高精度、多尺度适用的模式数值算法是当前国际数值预报的研究热点. 沈学顺及其研究团队研究并发展了基于多矩约束的有限体积离散化算法求解全可压大气方程组的新方法(Chen C G等, 2014, 2015), 该方法严格保证数值守恒, 与传统的有限体积法相比具有局地自由度高、各类网格适应性好、无全局通信、算法局地性强等特点, 具有高可扩展性, 该新方法得到了国际发展同类下一代模式同行专家的认可.

除了数值天气预报模式的发展, 中国在大气可预报性研究方面也做出了有国际影响的研究成果. Mu等(2003)提出了条件非线性最优扰动(CNOP)方法. 穆穆等将CNOP方法应用于研究有关天气事件如阻塞高压(Mu和Jiang, 2011)、北大西洋涛动(Dai等, 2016)、MJO

爆发(Wei等, 2019)等的前期征兆问题。令人感兴趣的是, 他们还发现这些事件爆发的最优前期征兆与预报时增长最快的初始误差在空间结构上具有局地性和相似性。这些特性为提高这些事件预报技巧而开展目标观测奠定了基础并提供了思路。在此基础上, 他们也开始尝试将CNOP方法应用于产生集合预报的初始扰动(Jiang和Mu, 2009; Duan和Huo, 2016)。Wu D C等(2013)通过在集合中使用多物理参数化方案的组合, 有效考虑了模式物理过程的不确定性, 把能够模拟出爬线的集合样本比例提高了10%, 爬线的模拟效果随着初始场质量的线性改善得到线性提高, 这与美国爬线模拟对初始场质量的线性改善得到非线性提高的特征有所不同。同时还发现爬线的模拟对初始水汽场最为敏感。

6.2 业务数值天气预报的发展和應用

中国1954年开始研制准地转模式, 1960年在中央气象局气象台开始应用数值预报图(沈如桂和牟惟丰, 1965)。1978年之后, 国家气象局和中国科学院大气物理研究所合作, 于1980年7月建立了面向业务的亚欧区域数值天气预报模式(当时称为A模式), 该模式为三层原始方程绝热模式, 预报时效48h。“六五”期间(1981~1985), 由国家气象局、中国科学院大气物理研究所和北京大学组成的联合数值预报中心合作建立了B模式, 包括一个五层有限区模式和一个水平格距为381km的北半球五层模式, 含较简单的物理过程, 并配有资料处理和客观分析, 该预报系统持续运行了九年。这个短期数值预报业务系统自动化程度高, 推动了当时天气预报业务建设, 为以后数值预报业务的发展起了示范作用(图12)。

中国全球中期数值预报系统的研发始于80年代中期。鉴于当时中国数值预报系统的研发能力和数值预报的支撑条件与先进国家存在很大差距, 确定了预报模式从先进国家整体引进的技术路线。“七五”期间(1986~1990), 李泽椿主持了17个单位参加的近300人的跨部门联合攻关小组, 以从ECMWF引进的全球谱模式为核心, 在国产银河大型机上建立了T63L16全球预报系统, 并于90年代初投入业务运行, 在20世纪90年代与21世纪初几经升级(T106、T213、T639), 在全国的气象预报业务与服务中发挥了重要作用, 为之后全面开展数值模式自主研发工作奠定了重要基础(图12)。

随着全球中期预报系统的发展, 在“台风、暴雨灾

害性天气监测、预报研究”的“八五”国家科技重点攻关项目支持下, 中国科学家自己发展了与之嵌套的有限区细网格资料同化与预报系统LAFS, 于1991年投入业务运行(郭肖容等, 1995), 取代了“B模式”。1996年, LAFS升级为高分辨率的区域同化预报系统HLAFS, 1997年正式取代LAFS, 成为较长时间内国家气象中心的主要业务系统。此外, 在全球与区域模式基础上还发展了热带气旋数值预报模式, 为热带气旋业务预报提供指导产品。

21世纪初, 中国气象局建立了气象数值预报创新基地, 并做出了未来数值预报业务系统由国外引进转为自主开发的重大决策。2001年开始, 在科技部“十五”国家重点科技攻关项目“中国气象数值预报系统创新研究”支持下, 中国气象局联合中国多家单位, 自主研发建立了新一代多尺度通用资料同化与数值预报系统GRAPES。之后经过十多年的努力, 在中国首次以自主技术实现了从区域3~10km到全球25~50km分辨率的确定性与集合预报的完整数值预报体系, 并建立了从观测资料前处理、质控、同化、预报等到数值预报产品后处理全链条的研发和业务应用队伍。通过GRAPES的研发, 中国在非静力全可压格点动力框架、四维变分同化、云降水物理、高精度大气模式数值算法、全套卫星资料同化技术和有约束卫星资料偏差订正技术等方面均取得了创新性成果, 奠定了今后中国自主数值预报大发展的重要科研和业务应用基础(图13)。

6.3 资料同化方法的研究

在数值天气预报技术刚刚萌芽的20世纪50年代, 随着Charney等(1950)使用电子计算机进行了第一次成功的数值天气预报, 中国的气象学家即已开始对数值天气预报初值问题进行研究。顾震潮(1958a, 1958b)从理论角度将天气形势预报的初值问题等价于使用天气历史演变进行外推预报, 并认为在数值预报中使用过去一段时间内的观测资料是可行的。这种使用某些气象量在一段时间内的演变分布对这些量在未来的变化进行预报的想法, 实际上是对四维变分同化方法最早的理论探索。50年代末60年代初, 丑纪范(1974)对顾震潮的理论进行了进一步的研究和推导, 将用于近似描述大气过程的微分方程求解问题等价地转换为泛函极值问题, 并证明在正压情况下这一泛函极值问题可

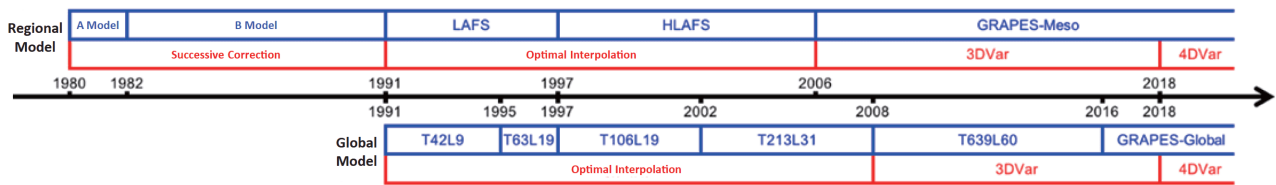


图 12 1980年至今中国气象局业务运行的区域和全球数值预报系统及其资料同化方法

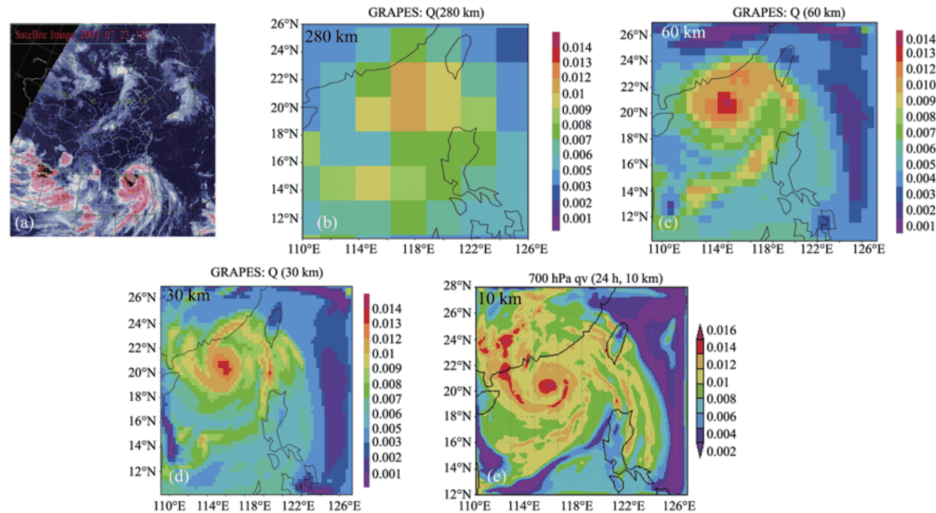


图 13 2003年7月22日1200UTC的(a)卫星云图和GRAPES在280km(b)、60km(c)、30km(d)、10km(e)水平格距下模拟的600hPa比湿(单位: kg kg^{-1})

引自Chen等(2008)

能的解与微分方程的解都接近大气的实况,而在斜压情况下泛函极值问题的解更接近大气的实况.这一数学推演工作具有理论完整性和可实践性;以此为基础,60年代早期,顾震潮、丑纪范等即已开始对现代变分资料同化方法的雏形进行数值试验(郇吉东, 2013),比起Charney等(1969)在美国进行的相似研究提早近10年.

伴随着数值天气预报模式的不断发展,中国科学家也在不断地对资料同化的方法和理论进行更深入的研究.丑纪范(2007)认为数值天气预报不仅仅是一个初值问题,也是一个反问题.与这一思路相同,数学工作者将资料同化方法与数学物理反问题的正则化理论,特别是吉洪诺夫(Tikhonov)正则化紧密联系起来,把处理数学物理反问题的方法和变分资料同化结合起来,对模式初始条件、边界条件和模式参数等进行最优估计和确定.为了克服不适定性带来的困难,例如对于依赖于时间和空间的模式参数的估计,黄思训等

(2003)引进了反问题中的正则化思想,在目标泛函中增加了稳定泛函,克服了不适定性和计算不稳定性.同时,韩威(2003)基于微分方程最优控制理论和非线性泛函分析,建立了变分资料同化统一的理论框架.这一理论框架简便易行,适用于连续模式和离散模式,适用于对初值、边值和模式参数的伴随估计,适用于各种形式的目标泛函,并提出了对观测数据一阶信息同化的思想和方法,把变分资料同化从 L^2 空间中的逼近改造到 H^1 空间中的逼近.

资料同化的数学理论研究中往往假设观测资料带有随机噪音的扰动,这就需要从贝叶斯理论入手,系统研究由分析步所产生后验分布的渐近性,也即高阶矩信息. Ding等(2018)通过引入后验收缩率函数的概念,并利用偏差-方差分解的研究手段,证明了稳态方程在线性观测下,可以通过调整初始背景场使得4D-Var的二阶矩(即方差)随着时间窗口的扩大退散到零,从而保证了资料同化方法在一些特殊情形下的渐近性.

为应对4D-Var在实际应用过程中极为复杂的程序编写及模式要求, Qiu和Chou(2006)以及Wang和Li(2009)提出了一种基于奇异值分解(SVD)的4D-Var方法, 使得4D-Var资料同简化成一个线性反演问题. 基于该方法和集合同化方法, 还发展了混合同化方法SVD-En4DVar(Qiu等, 2007)和SVD-En3DVar(徐道生等, 2011a, 2011b), 有效改善了短时强降水的预报. 针对热带气旋初始化方法(变分和集合同化)中海洋观测资料稀疏的缺陷, 万齐林和何金海(2012)提出了一套多尺度/分块逐批变分资料同化技术, 能够合理高效地利用海洋气象观测资料, 较好地满足热带气旋资料同化对流依赖背景误差协方差同化技术的要求, 是形成高质量热带气旋初值环流的一种有效途径.

目前的资料同化系统已经能较好地吸收常规地面和探空观测数据, 而对遥感观测数据(如雷达和卫星观测数据)的同化仍然有着较多的挑战. 由于中国雷达观测网建立相对比较晚, 在雷达资料同化方面起步也较晚. 早期的研究工作多集中于研究使用简单伴随函数方法(Qiu和Xu, 1992)、VAP方法(陶祖钰, 1992)、IVAP方法(Liang, 2007)等算法对多普勒雷达观测的大气风场进行反演, 或者借助物理初始化方法结合反演资料为中尺度预报提供初始场(邱崇践和余金香, 2000).

随着计算资源的提高和资料同化技术的进步, 近年来的研究多集中于使用不同的研究方法直接同化多普勒雷达的观测数据, 在如何提高雷达径向风同化效果方面做了大量研究. 高郁东等(2011)通过考虑雨滴末速度对径向速度的贡献, 改善了变分方法同化雷达径向速度观测的分析结果. 罗义等(2014)在变分同化雷达径向速度的方程中增加了径向风的空间变化信息, 更充分地利用了雷达的高分辨率观测数据. Zhao等(2012)基于3DVar方法展示了中国大陆及台湾地基雷达观测的同化对台风“莫兰蒂”(2010)路径、强度和降水预报的改善效果, 指出径向风的同化效果优于反射率的同化效果, 多部雷达的同化效果优于单步雷达的同化效果, 如果单步雷达对台风内核覆盖度较好时, 通过较多的同化循环有可能达到多部雷达的同化效果. Zhu等(2016)首次基于EnKF同化方法展示了广州雷达径向风同化对台风强度和降水预报的显著改善. 类似于Zhao等(2012)、Yue等(2017)使用EnKF方法进一步揭示了雷达径向风观测对台风内核的覆盖程度对

资料同化和台风路径、降水预报结果的影响, 发现同化对台风内核覆盖度较好的雷达径向风效果较好, 而同化单部距离台风中心较远的雷达径向风有可能会使误差变大, 同时提出使用多部雷达用于检验雷达径向风同化效果的重要性.

多普勒雷达是中小尺度资料同化系统中最重要观测数据来源. 徐道生等(2011a, 2011b)使用了SVD-En3DVar方法展示了雷达径向风同化对强对流天气的重要作用. 兰伟仁等(2010a, 2010b)开展了风暴尺度的EnKF雷达资料同化试验, 结果表明, 在考虑微物理过程参数化带来的模式误差情形下, 利用微物理过程参数化集合的方法对速度场、位温场以及比湿场有较明显的正作用, 但对于微物理量场分析效果较差, 而包含控制试验的微物理过程参数化方案的EnKF对所有变量都有正效果, 只考虑冰相过程的微物理过程参数化方案的集合, 分析效果有进一步提高. 随着中国的组网雷达逐步升级为双偏振多普勒雷达, 中小尺度资料同化研究的观测变量也已经开始从径向速度和反射率因子向双偏振参量(如差分反射率因子ZDR)发展(张云济和张福青, 2018).

除了雷达资料同化, 卫星观测的同化是遥感观测数据同化的另一个前沿. Han和McNally(2010)在卫星资料同化中引进数学物理反问题的正则化思想, 实现了卫星高光谱红外资料臭氧通道直接同化的业务化, 解决了在冬半年臭氧观测资料缺失问题, 并于2011年成功应用于ECMWF的业务预报系统中. Han和Bormann(2016)发展了“有约束卫星资料偏差订正方案CBC”原创性技术, 大大改进了在模式存在系统性偏差情况下卫星资料的同化效果; 此技术被ECMWF引进到其四维变分同化系统, 改进了平流层卫星资料同化, 在2018年实现了业务应用.

为了充分发挥卫星同平台多载荷的综合优势, 弥补单一仪器通道信息不足, 中国气象工作者发展了综合云和降水检测算法, 实现了风云三号卫星微波温度计MWTS、湿度计MWHs、成像仪MWRI和掩星观测GNOS在GRAPES业务系统中的同化应用(Li和Liu, 2016; Wang等, 2019, 私人通讯). 2016年发射成功的中国新一代静止气象卫星FY-4A, 搭载了地球静止轨道干涉式探测仪GIIRS, 在国际上首次实现了静止轨道高光谱探测. 中国气象局的数值预报应用攻关团队自主发展了观测算子(Di等, 2018), 基于观测区域背景误

差协方差的通道选择技术(尹若莹等, 2019), 实现了适合大阵型探测器的偏差在线估计和订正算法等关键技术(Yin等, 2019, 私人通讯), 2018年12月实现了辐射率资料在GRAPES全球4D-Var中的业务同化.

6.4 业务数值预报模式资料同化系统的发展

国家气象中心自1978年成立以来, 在业务数值预报模式和相配套的资料同化系统的研发方面做了大量工作(闫之辉等, 2010). 80年代初, “A模式”和“B模式”的资料同化系统源于日本气象厅(JMA), 使用了逐步订正(successive correction)的客观分析方案(章基嘉等, 1985; 廖洞贤, 1990). 90年代以后, 中国的全球中期数值预报业务系统T42L9、T63L19、T106L19、T213L31、T639L60模式在早期所配套使用的资料同化系统来自于欧洲中期数值预报中心(闫之辉等, 2010), 使用最优插值(optimum interpolation)方案; T639L60模式所配套使用的资料同化系统升级为3D-Var方案. 国家气象中心研发的一系列有限区域数值预报模式LAFS系统和HLAFS系统的资料同化部分均使用的是最优插值方案(郭肖容等, 1995; 闫之辉等, 1997).

21世纪初, 借鉴国际上数值天气预报资料同化发展的经验, 中国气象局开始发展从区域模式到全球模式一体化的多尺度资料同化与数值预报系统GRAPES(陈德辉和沈学顺, 2006). 早期的GRAPES系统的资料同化部分使用了3D-Var方法, 并引入快速辐射传输模式RTTOV作为卫星辐射率资料观测算子, 实现了对卫星辐射率资料的直接同化(薛纪善, 2006). GRAPES的资料同化系统在与全球模式同步的发展和改进中, 相继解决了在线模式偏差订正、卫星辐射率资料偏差订正、观测误差自适应估计(Han和Xue, 2007)、风云静止卫星云导风高度订正及同化(Han等, 2006)等多项关键技术难题, 于2007年建立了GRAPES全球3D-Var同化系统.

GRAPES全球预报系统在完成了三轮一年的同化循环和预报试验之后, 于2009年3月通过了准业务化验收, 首次实现了中国自主研发的全球同化预报系统实时稳定运行, 开始准业务运转. 之后GRAPES 3D-Var资料同化系统的多项关键技术依旧在不断进行改进和优化, 如从等压面分析到模式面模式变量非静力分析(马旭林等, 2009), 实现了背景误差协方差的合理统计

和模型改进(王金成等, 2014; 王瑞春等, 2015), 发展了卫星资料有约束偏差订正技术(Han, 2014), 改进了卫星辐射率资料背景场检查质量控制方案(Wang和Zhao, 2005)等, 并对每一类观测资料开展了细致诊断和研究(郝民等, 2013; Liu和Xue, 2014; 庄照荣等, 2014; 王金成等, 2016). 2015年年初, GRAPES系统首次在回报试验中预报评分超过当时业务运行的T639系统. 2015年年底, GRAPES系统通过业务化评审, 于2016年6月正式实现业务化(沈学顺等, 2015; 王金成等, 2017).

在投入业务运行以后, GRAPES系统的资料同化部分开始从3D-Var方法向更先进的4D-Var方法发展. GRAPES 4D-Var资料同化系统的发展采取了国际上多数业务中心的4D-Var方法的增量同化策略, 也即计算量最大的最优化过程是在较低的分辨率上进行、但非线性预报模式的积分与非线性观测的计算都在完全分辨率下进行, 既保证了预报轨迹与观测更新向量(innovation vectors)计算的精度, 又节省了计算量. 但是, 与多数业务中心不同的是, GRAPES 4D-Var系统的切线性模式也采用了非静力预报模式(刘永柱等, 2017), 并与之配套地建立了较完备的切线性物理过程(刘永柱等, 2019), 实现了共轭梯度的极小化算法, 显著减小了内循环迭代次数(Liu Y Z等, 2018). 2018年7月, GRAPES 4D-Var资料同化系统实现业务运行(Zhang L等, 2019), 通过发展完善卫星辐射率资料同化, GRAPES全球同化预报业务系统中, 实现了6h时间窗内覆盖全球的观测同化(如图14, 该时间窗所同化资料包括: 卫星微波温度计(NOAA15_AMSUA通道9、NOAA18_AMSUA、NOAA19_AMSUA、METOP-A_AMSUA、METOP-B_AMSUA); NPP卫星微波垂直探测仪(ATMS, 通道10); FY3C微波湿度计资料(MWHS-II, 通道6); METOP-B高光谱红外探测仪(IASI, 通道6); 大气红外探测仪(AIRS, 通道6); 风云四号卫星干涉式大气垂直探测仪(GIIRS, 通道6); 探空资料(TEMP)、云导风资料(SATOB)、船舶资料(SHIPS)、洋面风资料(SCATWIND)、地基大气可降水量资料(GPSPW)、和掩星折射率资料(GNSSRO)), 改进了常规观测稀缺区域的初值分析.

7 天气与气候、大气物理及环境交叉研究

气候暖化可以改变全球及区域温度分布, 使大尺

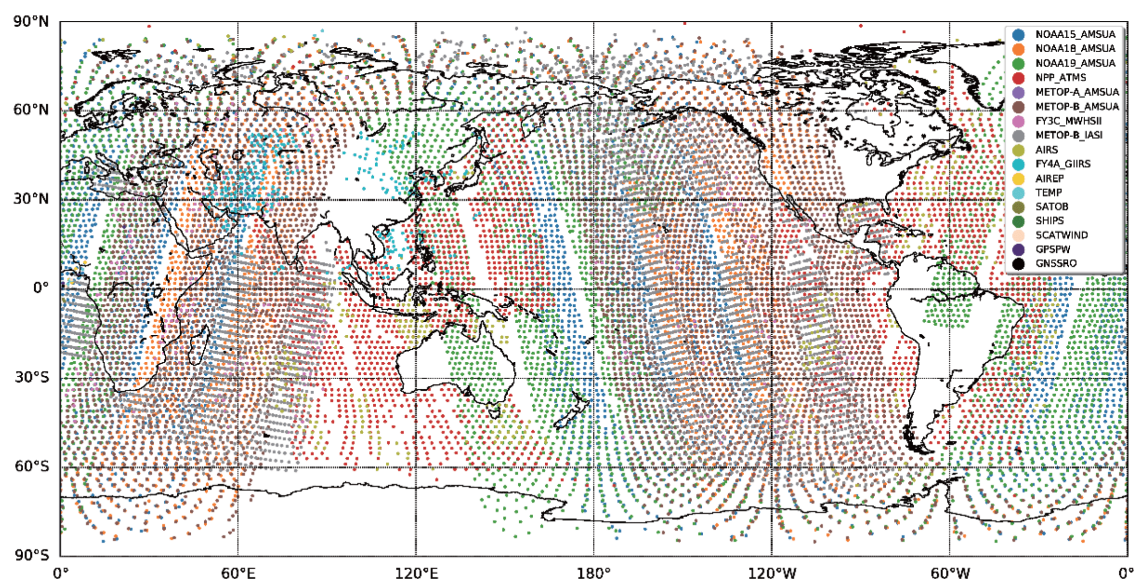


图 14 GRAPES 4D-Var系统在2019年7月5日0300UTC至0900UTC的时间窗内同化的不同种类观测的空间分布情况

度环流结构、全球及区域水循环发生变化, 从而进一步改变天气系统、降水和强对流的时空分布和强度。大气环境的变化会通过温室效应及气溶胶-辐射-云-降水相互作用对天气和气候变化产生重要影响。天气与气候、大气物理及环境等的交叉研究已成为大气学科目前的热点和前沿领域。

20世纪80年代以前, 受学科发展制约, 在进行天气预报和气候预测时, 往往把天气和气候系统的演变仅仅看成是气象要素自身变化的结果。70年代末到80年代初, 国际科学界开始认识到气候系统是由五大圈层及五大圈层之间紧密的相互作用构成, 有关五大圈层相互作用的四大科学计划——世界气候研究计划、国际地圈生物圈计划、国际生物多样性计划和国际全球环境变化人文因素计划相继于1980、1986、1991和1996年发展起来。尽管中国研究者也参与了四大科学计划, 但初期在开展多学科交叉研究上仍然存在很大差距。

进入21世纪以来, 中国科学院地学部、国际大地测量和地球物理学联合会中国委员会(CNC-IUGG)为推动多学科交叉研究开展了大量工作。2014年起开始组织“中国大地测量和地球物理学学术大会”, 极大地促进了CNC-IUGG的发展并结合“全球可持续发展科学技术联盟”发起的“未来地球”计划, 促进了四大科学计划中国委员会科学家的参与, 为中国地球科学工作

者提供了一个与国际相关领域顶尖科研人员交流合作的平台。从20世纪末开始, 中国在天气与气候、大气物理及环境等交叉研究领域做出了一系列创新性成果。

7.1 气候变化背景下的天气长期演变特征

天气系统的发生发展离不开一定的气候背景。20世纪以来, 随着气候变暖, 北半球的中高纬度地区极端降水的频率和强度都在显著增加(Alexander等, 2006)。中国气象学者基于中国近50年来的极端降水事件的观测分析表明, 在全球变暖背景下, 极端降水事件的频率和强度均有升高趋势, 但存在明显的地区差异: 长江中下游、东南地区和西北的部分地区极端降水有增加趋势, 而华北、东北和西南的部分地区有减少趋势, 极端降水的变化趋势与总降水的变化趋势类似(Zhai等, 1999; You等, 2011)。从季节变化来看, 中国大部分地区秋季极端降水减少、冬季增加明显, 夏季南部和西部增加显著而北部减少(Wang等, 2010)。多年逐小时降水观测资料分析表明, 上海和珠三角城市地区极端小时降水在城市化迅速发展的近30年间具有区别于周围地区的显著增长趋势(Liang和Ding, 2017; Wu等, 2019)。

在冰雹频率和强度的气候分布和长期变化趋势方面, 中国学者基于数十年冰雹频率和强度的系统性观测资料集, 发现中国的冰雹空间上主要分布在高原和

北部平原, 最高发生频率出现在青藏高原中部, 时间上主要发生早春到初秋, 多出现在下午3点到晚上8点(Li X F等, 2018). 1980年之后中国各地区的冰雹大小有显著的减小趋势(Ni等, 2017). 此外, 中国学者从大尺度环流场和大气气溶胶等角度探讨了影响冰雹频率和强度变化的可能物理机制(Li M X等, 2016; Li X F等, 2017). Zou等(2018)发现, 青藏高原在全球变暖的气候背景下雷暴和冰雹日数减少, 其主要原因可能是对流层中层变干、零度层高度升高、垂直风切变变小.

7.2 极端降水对未来气候暖化的响应研究

人类活动造成的温室气体排放是当前气候暖化的主要驱动因素. 为减缓人类活动造成的气候变化, 国际社会2016年达成了《巴黎协定》, 力求至21世纪末全球地表平均温度的增加保持在相比工业革命前的2°C甚至1.5°C以内. Wang等(2017)使用全球集合模拟指出, 地表平均温度从增加1.5°C到增加2°C可导致全球大部分地区极端降水的显著增加. 极端降水的增加高度依赖于温室气体的排放情景、温室气体/气溶胶强迫比例和温室气体浓度, 而且不同重污染地区具有不同的响应特点. 研究结果还表明, 评估全球变暖的影响, 除了考虑辐射强迫总量和导致的全球变暖级别, 还需要考虑排放情景的化学组分. Lin等(2018)进一步使用耦合地球系统模拟, 考察了2016年《巴黎协定》的暖化标准在21世纪后期中国季节气候极端事件的可能响应. 结果表明, 如果21世纪末全球平均温度较工业革命前增加1.5°C和2°C, 将使类似于2010年夏季中国东南部地区的极端洪涝相比于1976~2005分别增加2倍和3倍(图15). 这个结果预示, 通过减排温室气体把全球变暖幅度控制在1.5°C以内, 对减少中国未来极端天气气候事件的高发十分重要. 很多气候模拟研究显示出气候暖化对中国极端降水事件的加剧作用. 例如, Zhang等(2006)使用区域气候模式PRECIS(Providing Regional Climates for Impacts Studies)的模拟结果表明, 中国大多数区域极端降水事件有整体上升趋势, 特别是东南沿海地区、长江中下游和中国北方未来将会有更多的极端降水事件发生; Chen等(2012)使用IPCC AR4(the 4th Assessment Report of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change)中耦合的大气环流模式数据、Chen(2013)利用耦合模式CMIP5(the Coupled Model Intercomparison Project, phase 5)对

RCP4.5(Representative Concentration Pathway)和RCP8.5情景的模拟结果也得到了类似的结论.

气候暖化造成极端降水加剧的主要原因之一是大气水汽的增加. 根据克劳修斯-克拉伯龙方程, 地面温度每升高1K, 大气的水汽增加约7%. 尽管极端降水的增长率与水汽的增加密切相关, 但并不简单等同于水汽的增长率, 降水造成的潜热释放会通过改变雷暴环流进一步影响极端降水的强度; 这种与雷暴动力学相关的因素有可能会加强或减弱水汽驱动的降水增加. Nie等(2018)使用一个理想模式框架, 通过模拟当今气候态和暖化气候态背景下一次实际极端降水过程, 考察了水汽驱动和潜热相关风暴动力学两种因子的耦合作用, 定量揭示了由于全球变暖导致大气中水汽增加, 极端降雨中的潜热反馈增强, 造成大尺度抬升加强, 最终导致气候暖化背景下水汽驱动响应加倍(图16).

7.3 降水和雷暴的长期变化特征对空气污染的响应研究

天气系统与空气污染的关系十分复杂. 大气气溶胶通过辐射、云降水物理和水循环过程对天气系统产生重要影响. 大气气溶胶由于其复杂的化学组分、光学特性和其在云形成中的角色, 成为预测未来气候变化的最大不确定性来源.

气溶胶可能显著改变降水的效率和强度. 中国科学家考察了全国(Jiang等, 2016)、关中平原(Yang等, 2013)、华北平原(Guo X L等, 2014)、长三角(Yang和Li, 2014)、珠三角(Guo等, 2016)地区不同气溶胶特性对降雨和对流的影响, 揭示了人类活动气溶胶对降雨和雷暴日变化(Guo等, 2016; Lee等, 2016)、周变化(Yang等, 2016)和长期(Yang等, 2013)变化的贡献, Zhao等(2006)针对华北气溶胶增加导致降水减少的趋势提出了一种反馈机制, 即华北气溶胶排放导致大气稳定度增加, 抑制上升运动和降水, 导致污染进一步加重. 他们发现华北不稳定日的比例从20世纪80年代后期的约34%减少到21世纪初的约17%. Yang等(2013)发现关中平原空气污染减少了弱的山地降水和雷暴的频率. Guo J P等(2014)进一步指出气溶胶的间接效应使得华东山区弱降水的频率和雨量减少, 但平原的弱降水有所增强. Fu和Li(2014)发现气溶胶的增加使得华南的强降水增强, 弱降水减弱. Yang和Li(2014)进一步发现, 1990~2012年, 伴随着能见度的降低, 中国东南

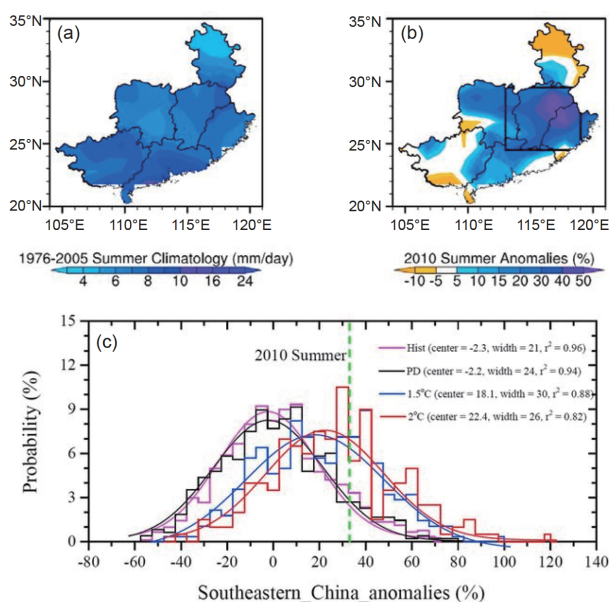


图 15 (a)1976~2005年夏季气候态降水量和(b)2010年夏季观测的洪水异常以及(c)历史(hist)、现在(PD)、1.5°C和2°C时期模拟得到的夏季中国东南部((b)中的方框)平均降水异常的概率密度函数和直方图

所有模拟异常均是相对于1976~2005年夏季气候态。(c)中垂直虚线为2010年夏季洪水的观测异常。拟合正态分布曲线的宽度在未来变暖的情况下会增加,这预示未来更大的年际变化。引自Lin等(2018)

部地区平原站的雷暴和闪电活动显著增加,而高山站没有类似的变化趋势。这种平原和高山站的显著差异可能是源于气溶胶浓度的显著差异。Guo等(2018)比较

了珠三角地区污染和无污染条件下的雷达反射率的垂直结构,发现污染情况下对流降水区域具有更强更深厚的回波,而层云和浅对流降水区的回波更浅更弱。这些研究一定程度上解释了华东弱降水频率和量级减少、东南部地区强降水频率和量级增加的观测事实。

人为活动气溶胶对季风雨带的移动有重要影响。中国学者对中国(吴国雄等, 2015)和整个亚洲地区(Li Z等, 2016)气溶胶和季风系统的相互影响开展了系统研究。对于中国过去几十年里夏季南涝北旱的降水分布变化,气溶胶可能通过改变海陆热力差异、减弱东亚夏季风环流有所贡献。Yang等(2015)发现全球变暖引起了东亚季风雨带从末次盛冰期到全新世中期在中国向西北移动了300km,他们预示中国过去几十年夏季季风雨带的南移将随着全球变暖转而向北移动。然而,Yu等(2016)认为Yang等(2015)忽略了人为活动气溶胶的影响,提出显著减少人为活动气溶胶才有可能出现雨带北移。此外,季风对不同种类气溶胶的响应有一定差异。Liu Y等(2009)考察了中国黑碳和硫酸盐气溶胶对东亚季风的影响,这两类气溶胶的直接效应差异在于黑碳的吸收性和硫酸盐的散射性。结果表明,黑碳气溶胶强迫作用较弱,而混合气溶胶的作用不是简单的效果线性叠加,黑碳和硫酸盐混合气溶胶的效应更加类似于硫酸盐的散射特性。Song和Zhou(2014)考察了自然强迫和人类活动强迫对东亚夏季风的影响,发现相对于自然强迫,气溶胶强迫通过降低陆地温度

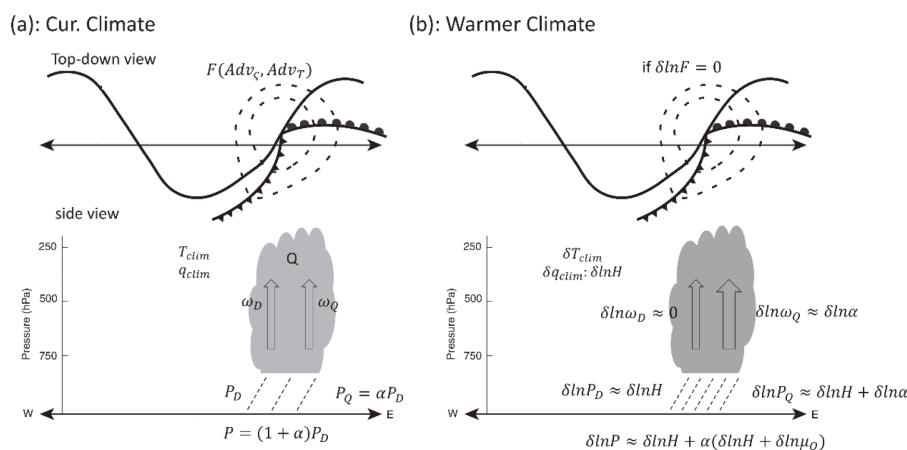


图 16 一个准地转柱模式(CQG)系统中极端降水量随地面温度变化的示意图

(a)是在当前气候条件下。上图为高层大气的天气波动、低层锋面和低压中心。下图是低压中心上方对流和降水区的剖面图。(b)是在较暖气候条件下,当大尺度绝热准地转强迫 F (和水汽平流)不变时,垂直运动和降水的相对变化。云图中较暗的颜色表示在较暖的气候中对流系统更强。引自Nie等(2018)

减小了海陆温差,并在华北造成较高的海平面气压,从而对东亚夏季风低层环流的减弱起主要作用,而在高层,两种强迫均可通过改变经向温度梯度对东亚副热带急流的南移产生影响. Chen G X等(2018)指出人为活动气溶胶的增加还会改变东亚夏季降水的季节内变率,月降水空间分布的变化与气溶胶增加造成的西太平洋副热带高压的西伸和加强有关,西太平洋副热带高压的西伸和加强造成东南部地区地面辐散以及副高北侧和西侧辐合加强,从而造成东南部地区降水减少以及副高北侧和西侧降水增多. Lin等(2016)使用地球系统集合模拟,考察了21世纪人为排放温室气体和气溶胶造成的极端降水的增加率. 结果表明,人为排放气溶胶造成的极端降水增加率远大于人为排放温室气体造成的极端降水增加率.

使用全球气候模式评估极端降水对未来气溶胶变化的响应,要求数值模式对气溶胶-云相互作用描述要足够准确. Lin等(2018)使用CMIP5多模式集合的对比试验结果显示,只有部分模式能够同时捕捉到1979~2015年印度和华中地区的极端降水减少以及华南海南极端降水增多的特征,这些模式的共同点是对云-气溶胶相互作用考虑得比较全面,既包含了气溶胶的直接效应,也包含了间接效应(包括气溶胶对云光学厚度和云生命期的影响),而只考虑直接效应的模式模拟效果较差. 该成果预示,使用没有考虑复杂的气溶胶-云相互作用的模式有可能低估气溶胶减少造成的区域极端降水的增强. 事实上,全球气候模式估算气溶胶间接效应的系统误差相当于现今的气溶胶间接效应估算值的50%,这在2003年就被发现但至今一直没有解决. Fan等(2013)撰写综述总结气溶胶影响深对流系统发展的理论,即气溶胶对深对流云发展的影响不仅来自气溶胶作为云凝结核的影响,也来自间接效应对大气水汽潜热释放的影响. Yan等(2014)指出,第二种影响机制可极大地扩展深对流云高卷云云砧的范围,对地球能量平衡可产生 0.5 W m^{-2} 的影响,该影响在现有的全球气候模式里都没有考虑,影响的量值与目前全球气候模式评估全球气溶胶间接效应的系统偏差相当,局地影响可能更大(Peng等, 2016).

7.4 降水和雷暴的短时变化对空气污染的响应研究

相比于长期降水趋势,气溶胶对某一具体天气过

程的影响更加复杂. Ding等(2013)通过对南京一次重霾过程的深入研究,发现生物质燃烧和化石燃料燃烧伴随显著的二次气溶胶形成的混合污染可使太阳辐射减少超过70%,感热减少超过85%,温度下降几乎10K,从而导致白天和夜间的降水均有所减少. 该研究首次提供了混合大气污染如何改变天气的直接观测证据,定量揭示了空气污染如何通过污染-边界层动力学-气溶胶辐射云反馈来影响天气(图17). Huang等(2016)对这次过程的进一步研究发现,生物质燃烧区的近地面层冷却使得城市附近的雷暴在白天被抑制,而气溶胶层的加热会加强其上空的对流活动,导致下游地区的夜间雷暴加强. Guo X L等(2014)和Zhong S等(2015)分别在天津和北京附近也发现了类似的现象,这种效应可使下游降水增强17%. 上游降水的减少可能是由于较小的云滴造成的蒸发冷却和对流的减弱,而下游降水的增多可能是由于更多的云滴冻结的缘故. 这些研究强调了多学科交叉研究在生物质和化石燃料燃烧的混合污染对环境、天气和气候影响领域的重要性. Guo等(2016)发现,珠三角地区污染条件下强降水和闪电活动的发生时间会被推迟.

中国学者在气溶胶直接辐射效应如何影响对流系统方面也开展了研究. Fu等(2017)通过敏感性试验考察了黑碳气溶胶的辐射效应对华北一次飑线过程的影响,发现黑碳气溶胶会通过减少地面的蒸发减少飑线初始阶段的水汽,但后期会通过加热效应加强大尺度辐合又使水汽有少量增加. 总体而言,黑碳气溶胶的辐射效应对飑线冷池的强度、低层风切变的影响不显著,因而飑线对流的发展组织和降水率都没有显著的变化. Liu Z等(2018)在珠三角地区气溶胶对深对流的影响研究中发现,气溶胶的直接辐射效应对对流层中高层的影响不能忽视,由于近地面水汽蒸发的减少和上升运动的减弱,导致对流层中上层相对湿度减小,会减少云和深对流的形成,这种现象可抵消气溶胶直接辐射效应的20%.

除了气候和环境变化对天气的影响,天气对气溶胶分布的影响一直是大气环境领域的重要科学问题. 气溶胶的分布会受到气象条件如风场、稳定性和水汽的重要影响. 研究表明气溶胶的垂直分布会受到山谷风、海陆风等局地环流的影响(Chen Y等, 2009; 刘树华等, 2009; Miao等, 2015),山谷风可以通过动力平流和热力变化改变山地和平原的边界层结构,谷风以及

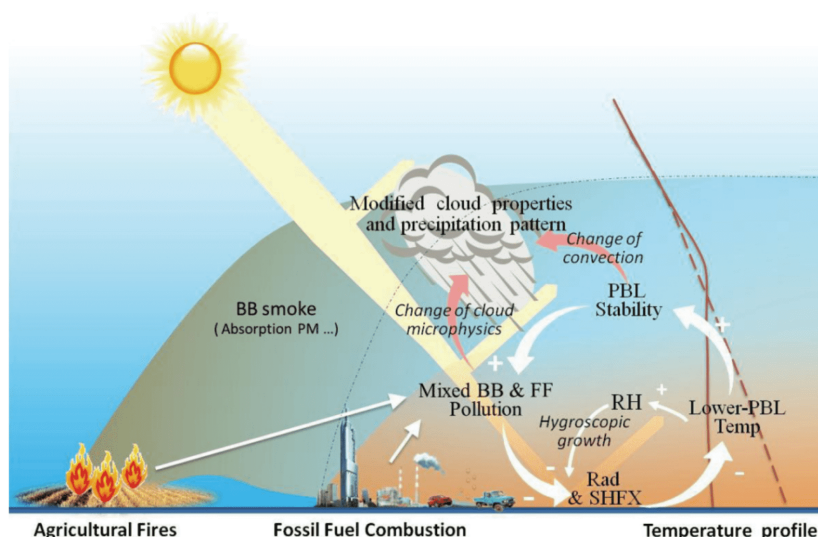


图 17 在混合农业燃烧烟羽和化石燃料燃烧污染物条件下空气污染-大气边界层动力学和气溶胶-辐射-云相互作用示意图 黄色的带状区域表示太阳辐射的辐射传输. 棕色实线和虚线分别表示污染事件和无污染事件的气温廓线. 黑色细虚线表示无污染情况下化石燃料燃烧烟羽的顶部. 加号(+)和减号(-)分别表示目标过程的加强和减少. 引自Ding等(2013)

与海风锋相伴的抬升可以把气溶胶带到边界层顶形成一个抬高的污染层.

8 结语

经过七十载的砥砺前行, 随着观测手段和计算机能力的不断改善和机理研究的不断深入, 中国气象学者在天气领域取得了众多有特色、创新性显著的研究成果. 建立了较完备和先进的地基、空基和天基的气象观测网, 天气学研究从天气尺度系统的定性分析, 发展到针对中尺度系统, 甚至小尺度对流系统的定量观测和研究(图18), 为国家业务预报系统的建立和预报水平的提高做出了重要贡献. 尽管中国科学家在天气领域取得了一系列创新成果, 但中国目前的研究和业务水平在很多方面与国际领先水平还有很大差距. 本节简要总结中国在天气学领域所取得的主要学术成果和未来的发展前景.

大气动力学方面, 提出了地转适应过程的尺度理论和行星波不稳定概念, 得到了大气长波的正压不稳定判据, 非定常流、地形扰动流和非地转流的不稳定性判据, 以及准地转流的非线性稳定性判据. 提出了长波的能量频散理论, 从理论、观测事实和数值模拟多个层面深入研究了准定常行星波在北半球冬夏季的

三维传播特征, 解释了阻塞的形成及衰退机制, 证明了阻塞是一个非线性初值问题. 最近30年随着北极进一步变暖, 中纬度位涡经向梯度的减弱, 中纬度大尺度环流非线性行为的复杂性将进一步加剧, 未来需要深入开展非线性大气动力学研究, 这将对了解中纬度灾害天气的发生机理具有重要科学意义.

天气尺度天气特征方面, 首次提出了Ekman动量近似理论并用于中尺度锋生动力学研究, 建立了一套适用于讨论边界层与锋生相互作用的完整方程组和守恒定律, 揭示了地形和边界层对锋面结构和环流动力学影响问题. 揭示了不同于北美地区的东亚多层锋区和双急流结构, 提出了以相当位温密集带为显著特征的梅雨锋概念, 得到了梅雨锋南倾等复杂的时空结构及其与高低空急流的关系, 深入探讨了低空急流的时空分布特征及其与环境天气系统和暴雨的发生发展关系, 建立了急流的理论模型, 成功解释了中国东部的低空急流活动, 研究了不同尺度系统相互作用造成台风极端暴雨的物理机制. 国际上首次发现了MJO, 系统阐述了热带地区对流活动影响MJO、热带波动的机制以及MJO和热带波动与台风及中纬度天气过程的相互作用. 在理论研究和外场观测试验的基础上, 揭示了西北太平洋地区台风形成、路径、结构和强度的演变规律及关键影响因子和影响机制, 自主研发了台风数值预

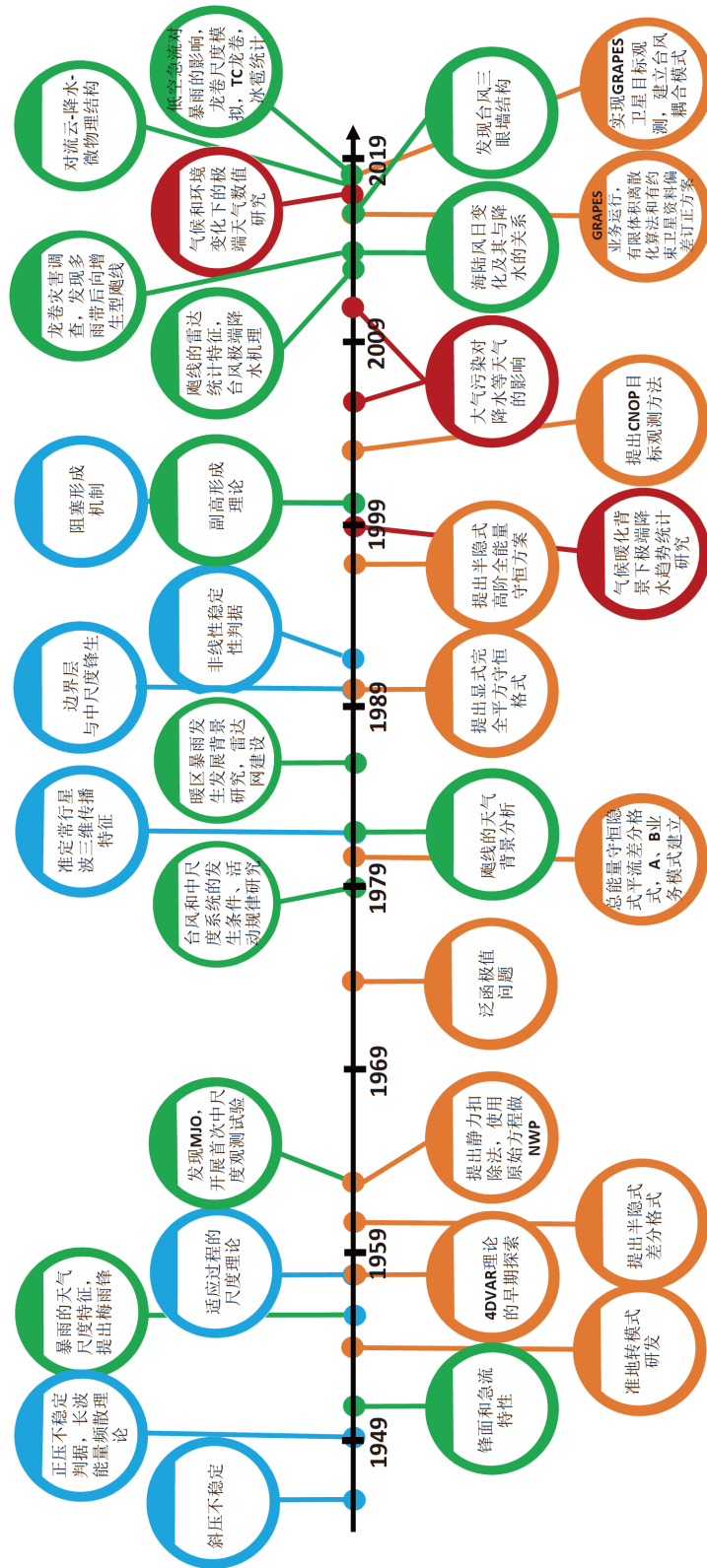


图 18 中国过去70年天气学发展历程图
蓝色代表大气动力学方向, 绿色代表数值天气预报和资料同化方向, 褐色代表天气和气候以及环境交叉方向

报/同化系统, 极大提高了中国对台风的客观预报水平。

强对流天气特征方面, 随着雷达、卫星和地面加密观测手段的改进, 通过中尺度外场综合观测试验、天气动力学分析诊断与中尺度数值模拟相结合的手段, 对强对流天气发展演变和机理的认识逐渐从 α 中尺度深入到 β 和 γ 中尺度热动力结构及其变化机制。系统研究了中国飑线特别是国际上还少有关的热带气旋前部飑线的统计特征及其与中纬度飑线的差异, 揭示了华北和华南两地对流日变化成因, 拓展了飑线弓形回波书卷涡旋形成理论, 发现了一种有别于经典的对流的列车效应的飑线组织类型, 揭示了飑线发展过程中雨滴谱特征的演变, 揭示了重力波和阵风锋与干线相互作用以及MAUL造成的对流触发机制。开展了一系列专业化和系统化的全路径地面和无人机全方位龙卷现场灾害调查研究, 首次揭示了台风龙卷地面灾害特征和雷达观测特征的对应关系, 首次基于雷达反演风场定量分析了台风龙卷母体超级单体的发生发展机制。

与国际先进水平相比, 中国在天气系统的观测方面, 特别是在雷达和卫星等高时空分辨率观测仪器的观测精度和提供的观测变量等方面还存在差距, 对观测资料的处理和应用也存在不足。中小尺度天气系统的动力学问题和预报方法研究方面也存在显著差距。为了提高中国灾害性天气的研究和预报水平, 需要提升基础理论研究水平, 特别是引领新方向和新热点的能力。需要深入了解中小尺度动力学的非线性问题、不同尺度系统的相互作用, 以及造成灾害的中小尺度系统的结构和演变机理。此外, 中国目前尚未系统开展热带地区的外场观测试验, 对台风的观测也仅限于登陆前后, 同时, 各种观测资料的处理、融合技术以及资料的即时性和权威性需要进一步提升。

数值天气预报和资料同化方面, 早期发展阶段就数值方法、同化理论等课题做出了许多突破性的研究, 提出了一系列原创性的数值算法和资料同化技术, 例如“半隐式(或称半显式)差分格式、静力扣除(或标准层结扣除)方法、总能量守恒隐式平流项的差分格式、显式完全平方守恒格式、一般二次和三次物理守恒律时间差分保真格式, 以及斜压原始方程全球谱-垂直有限差分模式半隐式高阶全能量守恒方案等。首次用原始方程组做实际天气预报; 提出了泛函极值问题和条件非线性最优扰动(CNOP)方法, 基于微分方程最优控制理论和非线性泛函分析, 建立了变分资料同化

统一的理论框架, 提出了一种基于奇异值分解的4D-Var方法, 发展了“有约束卫星资料偏差订正方案CBC”原创性技术。通过引进、学习、吸收国外的先进系统和技术, 并根据中国的气候特征和天气系统, 自主研发了多个全球和区域尺度的数值天气预报和资料同化系统, 特别是自主研发建立了新一代多尺度通用资料同化与数值预报系统GRAPES。

综观目前世界上各个主要的业务预报中心, 在数值模式方面, 全球模式的分辨率越来越高, 逐渐逼近区域模式的精细分辨率, 模式中的物理过程参数化方案、大气模式与海洋模式、陆面模式、海冰模式等的耦合越来越复杂, 集合预报也受到了更多的关注和发展。资料同化方面, 欧洲中期数值预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)等业务预报部门均已在业务全球资料同化系统中使用变分同化方法(三维变分、四维变分)与集合资料同化方法(集合卡尔曼滤波)的耦合方法, 将变分方法固定的背景误差协方差矩阵与集合方法随流场变化的背景误差协方差矩阵相结合, 减小资料同化系统的分析误差; 同时, 除了已经延续多年的对卫星全天空微波辐射观测的同化研究以外, 随着新一代地球静止气象卫星如日本的向日葵8号和9号、美国的GOES-16和GOES-17以及中国的风云4A相继发射和投入业务运行, 对静止卫星全天空红外辐射观测的同化也是近年来科学研究和业务测试的热门课题。中国需要继续大力推进具有自主技术特色的数值预报模式、精细化预报技术、集合预报产品的应用技术, 以及耦合资料同化技术, 从而降低国外预报产品对我们预报结果的影响。

天气与气候和环境的交叉领域方面, 揭示了在全球变暖背景下, 中国极端降水事件的频率和强度的升高趋势; 揭示了中国冰雹的时空分布特征和气候演变, 以及冰雹频率和强度变化的可能物理机制。考察了极端降水对未来气候暖化和气溶胶浓度变化的响应特征和机理, 指出全球暖化背景下, 全球大部分地区极端降水会显著增加且高度依赖于温室气体的排放情景、温室气体/气溶胶强迫比例和温室气体浓度, 降水造成的潜热释放会通过改变雷暴环流进一步影响极端降水的强度。发现气溶胶-辐射-云相互作用可以解释华东弱降水频率和量级减少、东南部地区强降水频率和量级增加的观测事实, 人为活动气溶胶对季风雨带的移动特别是夏季南涝北旱的降水分布变化有重要影响; 揭

示了数值模式准确模拟气溶胶的直接和间接效应对极端降水模拟准确率的重要性;首次提供了混合大气污染如何改变天气的直接观测证据,揭示了生物质燃烧使得城市雷暴在白天被抑制,但下游地区的夜间雷暴会加强的机制。尽管中国在天气、气候和环境交叉领域已开展了很多研究,但是仍存在很多科学问题没有解决,需要深入开展多学科联合组织的野外观测试验,获得天气、云降水物理和气溶胶的多维高时空分辨观测数据,建立地球观测系统,发展多源数据同化技术和全球多尺度通用数值预报系统,从基础研究层面揭示中国不同地区不同季节大气环流对污染的影响以及污染对大气环流和天气、气候的反馈,从而构建大气环流与大气污染相互作用机理的理论框架,并在业务上建立基于中国自主知识产权的大气化学耦合模式,为深入认识气候和环境变化背景下天气系统的演变机理以及国家防灾减灾、大气污染的治理决策、国际气候谈判和相关的经济发展战略的实施提供科学支撑。

总而言之,我们需要在过去70年来所取得的重要学术成果基础上,把握国际天气领域的发展趋势,加大对天气学这一薄弱学科的研究力度,尤其是在中小尺度强对流天气、台风等高影响天气的观测和数值预报技术方面,提高模式分辨率、发展更精确的物理参数化方案、开发基于国际上最先进的集合变分耦合资料同化技术,探索红外和微波波段全天空卫星辐射等多种非传统观测资料的同化,研制具有云分辨能力的多尺度无缝隙集合预报系统,进一步完善高影响灾害性天气的监测、预报、预警能力,助力提高国家防灾减灾以及气候和环境变化应对的能力。

致谢 感谢南方科技大学傅宗玖教授对天气与气候和环境的交叉领域部分的宝贵建议。

参考文献

- 巢纪平. 1980. 非均匀层结大气中的重力惯性波及其在暴雨预报中的初步应用. 大气科学, 4: 230–235
- 陈德辉, 沈学顺. 2006. 新一代数值预报系统GRAPES研究进展. 应用气象学报, 17: 774–777
- 陈国民, 张喜平, 白莉娜, 万日金. 2019. 2017年西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定. 气象, 45: 577–586
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社. 105
- 陈秋士. 1963. 简单斜压大气中热成风的建立和破坏. 气象学报, 33: 153–161

- 陈文, 黄荣辉. 2005. 北半球冬季准定常行星波的三维传播及其年际变化. 大气科学, 29: 137–146
- 丑纪范. 1974. 天气数值预报中使用过去资料的问题. 中国科学, 17: 635–644
- 丑纪范. 2007. 数值天气预报的创新之路-从初值问题到反问题. 气象学报, 65: 673–682
- 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 李英. 2012. 热带气旋远距离暴雨的研究. 气象学报, 70: 717–727
- 丁一汇. 1993. 1991年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社. 225
- 丁一汇. 2015. 论河南“75.8”特大暴雨的研究: 回顾与评述. 气象学报, 73: 411–424
- 丁一汇, 蔡则怡, 李吉顺. 1978. 1975年8月上旬河南大暴雨的研究. 大气科学, 2: 276–289
- 丁一汇, 李鸿州, 章名立, 李吉顺, 蔡则怡. 1982. 我国飊线发生条件的研究. 大气科学, 6: 18–27
- 高守亭. 1987. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用. 大气科学, 11: 263–271
- 高守亭, 孙淑清. 1984. 次天气尺度低空急流的形成. 大气科学, 8: 179–188
- 高郁东, 万齐林, 何金海. 2011. 三维变分同化雷达视风速的改进方案及其数值试验. 气象学报, 69: 631–643
- 郜吉东. 2013. 丑纪范先生关于资料同化的学术思想探讨和回忆. 气象科技进展, 3: 76–79
- 顾震潮. 1949. 中国西南低气压形成时期之分析举例. 气象学报, 20: 61–63
- 顾震潮. 1958a. 作为初值问题的天气形势数值预报与由地面天气历史演变做预报的等值性. 气象学报, 29: 93–98
- 顾震潮. 1958b. 天气数值预报中过去资料的使用问题. 气象学报, 29: 176–183
- 郭肖容, 张玉玲, 阎之辉, 郑国安, 朱琪. 1995. 有限区分析预报系统及其业务应用. 气象学报, 53: 306–317
- 韩雷, 王洪庆, 谭晓光, 林隐静. 2007. 基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警的研究进展. 气象, 33: 3–10
- 韩威. 2003. 变分资料同化的理论和应用研究. 博士学位论文. 南京: 解放军理工大学
- 郝民, 张华, 陶士伟, 龚建东. 2013. 变分质量控制区域GRAPES-3DVAR中的应用研究. 高原气象, 32: 122–132
- 何金海, 吴志伟, 江志红, 苗春生, 韩桂荣. 2006. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响. 科学通报, 51: 2803–2809
- 何立富, 周庆亮, 湛芸, 唐文苑, 张涛, 蓝渝. 2011. 国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估. 气象, 37: 777–784
- 胡伯威. 1997. 与低层“湿度锋”耦合的带状CISK和暖切变型梅雨锋的产生. 大气科学, 21: 679–686
- 华东中小天气系统试验基地协作组. 1978. 中小尺度天气系统分析文集. 湖南省湘中地区天气预报科研协作组

- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制. 大气科学, 12(s1): 107–116
- 黄士松. 1986. 华南前汛期暴雨. 广州: 广东科技出版社. 244
- 黄思训, 韩威, 伍荣生. 2003. 结合反问题技巧对一维海温模式变分资料同化的理论分析及数值试验. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 903–911
- 黄伟, 端义宏, 薛纪善, 陈德辉. 2007. 热带气旋路径数值模式业务试验性能分析. 气象学报, 65: 578–587
- 纪立人, 沈如金, 陈于湘. 1984. 夏季青藏高原动力影响的数值试验. 青藏高原气象科学试验文集(二). 北京: 科学出版社. 236–244
- 蒋璐君, 李国平, 母灵, 孔亮. 2014. 基于TRMM资料的西南涡强降水结构分析. 高原气象, 33: 1457–1467
- 兰伟仁, 朱江, Xue M, Gao J D, 雷霆. 2010a. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验I. 不考虑模式误差的情形. 大气科学, 34: 640–652
- 兰伟仁, 朱江, Xue M, 雷霆, Gao J D. 2010b. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验II. 考虑模式误差的情形. 大气科学, 34: 737–753
- 雷小途, 李永平, 于润玲, 李泓, 汤杰, 段自强, 郑运霞, 方平治, 赵兵科, 曾智华, 黄伟, 鲍旭炜, 喻自凤, 陈国民, 马雷鸣, 骆婧瑶, 张帅, 林立曼. 2019. 新一代区域海-气-浪耦合台风预报系统. 海洋学报, 41: 123–134
- 李崇银. 1985. 南亚夏季风槽脊和热带气旋活动与移动性CISK波. 中国科学, 28: 668–675
- 李崇银. 1990. 赤道以外热带大气中30~50天振荡的一个动力学研究. 大气科学, 14: 84–92
- 李崇银, 顾薇. 2010. 2008年1月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究. 大气科学, 34: 865–874
- 李麦村. 1979. 大尺度大气运动的阶段性. 中国科学, 22: 509–607
- 李麦村. 1982. 斜压大气中的涡适应过程. 中国科学, 25: 473–481
- 李双林, 纪立人, 倪允琪. 2001. 夏季乌拉尔地区大气环流持续异常. 科学通报, 46: 753–757
- 李宪之. 1935. 东亚寒潮侵袭的研究. 中国近代科学论丛——气象学(1919–1949). 北京: 科学出版社, 1955. 35–173
- 李振军, 赵思雄. 1996. 东亚春季强冷锋结构及其动力学诊断研究, I 东亚春季强冷锋结构. 大气科学, 20: 662–672
- 李振军, 赵思雄. 1997. 东亚春季强冷锋结构及其动力学诊断研究, II 动力学诊断研究. 大气科学, 21: 91–98
- 廖洞贤. 1990. 近10年我国数值天气预报的进展. 气象学报, 48: 17–25
- 林元弼, 等. 1988. 天气学. 南京: 南京大学出版社. 375
- 刘树华, 刘振鑫, 李炬, 王迎春, 马雁军, 刘和平, 盛黎, 梁福明, 辛国君, 王建华. 2009. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 88–98
- 刘屹岷, 刘辉, 刘平. 1999a. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响II. 路面感热与东太平洋副高. 气象学报, 57: 385–396
- 刘屹岷, 吴国雄, 刘辉, 刘平. 1999b. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响III. 凝结加热与南亚高压及西太平洋副高. 气象学报, 57: 525–538
- 刘屹岷, 吴国雄, 字如聪, 刘平. 2001. 热力适应、过流、频散和副高II. 水平非均匀加热与能量频散. 大气科学, 25: 317–328
- 刘永柱, 龚建东, 张林, 陈起英. 2019. 线性化物理过程对GRAPES 4DVAR同化的影响. 气象学报, 77: 196–209
- 刘永柱, 张林, 金之雁. 2017. GRAPES全球切线性和伴随模式的调优. 应用气象学报, 28: 62–71
- 陆日宇, 黄荣辉. 1996. 变形的经向环流变化方程及其在诊断阻塞高压形成中的应用. 大气科学, 20: 138–148
- 罗德海, 纪立人. 1989. 大气阻塞形成的一个理论. 中国科学, 32: 103–112
- 罗义, 梁旭东, 陈明轩. 2014. 单多普勒雷达径向风同化的改进. 气象科学, 34: 620–628
- 麻素红, 陈德辉. 2018. 国家气象中心区域台风模式预报性能分析. 热带气象学报, 34: 451–459
- 马旭林, 庄照荣, 薛纪善, 陆维松. 2009. GRAPES非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发展. 气象学报, 67: 50–60
- 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 1998. 台湾岛地形诱生次级环流系统对热带气旋异常运动的影响机制. 大气科学, 2: 156–168
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 池艳珍. 2006. 近50年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关系分析. 大气科学, 30: 1249–1256
- 倪允琪, 周秀骥, 张人禾, 王鹏云, 仪清菊. 2006. 我国南方暴雨的试验与研究. 应用气象学报, 17: 690–704
- 钱传海, 端义宏, 麻素红, 许映龙. 2012. 我国台风业务现状及其关键技术. 气象科技进展, 2: 36–43
- 邱炳焕, 丁一汇. 1979. 1973年我国梅雨时期的环流结构. 北京: 科学出版社. 56–83
- 邱崇践, 余金香. 2000. 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进. 气象学报, 58: 245–248
- 仇永炎. 1956. 冬季东经140°剖面上的温度场与风场. 北京大学学报(自然科学版), 2: 63–70
- 沈如桂, 牟惟丰. 1965. 中央气象局气象台48小时500毫巴数值预报图应用的初步经验. 气象学报, 35: 383–398
- 沈孝凰. 1932. 1931年6~7月长江流域的风暴研究. 中央研究院气象研究所集刊, 3
- 沈学顺, 龚建东, 王建捷, 等. 2015. GRAPES_GFS技术报告. 中国气象局数值预报中心. 235
- 沈学顺, 周秀骥. 2013. GRAPES暴雨数值预报系统. 北京: 气象出版社. 186
- 石顺吉, 余锦华, 张大林. 2009. 热带风暴Bilis (2006)登陆期间一波非对称降水分布成因的探讨. 热带海洋学报, 28: 34–42
- 孙建华, 赵思雄. 2002a. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究, I. 引发暴雨的中尺度对流系统的数值模拟研究. 大气科学, 26: 541–557

- 孙建华, 赵思雄. 2002b. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究, II. 物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用. 大气科学, 26: 633–646
- 孙力, 安刚, 高枏亭, 唐晓玲, 丁立, 沈柏竹. 2002. 1998年夏季嫩江和松花江流域东北冷涡暴雨的成因分析. 应用气象学报, 13: 156–162
- 谈哲敏, 伍荣生. 1990. Ekman动量流的动力特征与锋生. 中国科学: B辑, 12: 1322–1332
- 谈哲敏, 伍荣生. 1991. 边界层动力学中的Ekman动量近似. 气象学报, 4: 421–429
- 谈哲敏, 伍荣生. 2000a. 地形上空边界层流中低层锋面结构的理论研究I: 冷锋、均匀地转流. 气象学报, 58: 137–150
- 谈哲敏, 伍荣生. 2000b. 地形上空边界层流中低层锋面结构的理论研究II: 暖锋、均匀地转流. 气象学报, 58: 165–277
- 谈哲敏, 赵思雄. 2010. 我国南方 β 中尺度强对流系统结构与机理研究. 北京: 气象出版社. 327
- 陶诗言. 1959. 十年来我国对东亚寒潮的研究. 气象学报, 30: 226–230
- 陶诗言. 1963. 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究. 北京: 科学出版社. 146
- 陶诗言. 1996. 1994年东亚夏季风活动的异常与华南的特大洪涝灾害. 1994年华南特大暴雨洪涝学术研讨会论文集. 北京: 气象出版社. 1–5
- 陶诗言, 等. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社. 225
- 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 陈受钧, 王建捷, 等. 2001. 1998夏季中国暴雨形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社. 184
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析. 气候与环境研究, 13: 337–350
- 陶诗言, 赵思雄, 周晓平, 纪立人, 孙淑清, 高守亭, 张庆云. 2003. 天气学和天气预报的研究进展. 大气科学, 27: 451–467
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958a. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系. 气象学报, 29: 119–134
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958b. 中国的梅雨. 中央气象局气象论文集, 4: 36–40
- 陶祖钰. 1992. 从单Doppler速度场反演风矢量的VAP方法. 气象学报, 50: 81–90
- 涂长望. 1938. 中国之气团. 气象学报, 5: 175–218
- 万齐林, 何金海. 2012. 海洋气象观测系统在热带气旋资料同化中的应用. 中国工程科学, 14: 33–42
- 王斌, 季仲贞. 1990. 显式完全平方守恒差分格式的构造及其初步检验. 科学通报, 35: 766–768
- 王斌, 季仲贞. 2006. 大气科学中的数值新方法及其应用. 北京: 科学出版社. 216
- 王德翰, 韦统建. 1982. 伴有特大暴雨的梅雨锋结构特征. 北京: 气象出版社. 176–181
- 王金成, 龚建东, 王瑞春. 2016. GRAPES全球三维变分同化中卫星微波温度计亮温的背景误差及在质量控制中的应用. 气象学报, 74: 397–409
- 王金成, 陆慧娟, 韩威, 刘艳, 王瑞春, 张华, 黄静, 刘永柱, 郝民, 李娟, 田伟红. 2017. GRAPES全球三维变分同化业务系统性能. 应用气象学报, 28: 11–24
- 王金成, 庄照荣, 韩威, 陆慧娟. 2014. GRAPES全球变分同化背景误差协方差的改进及对分析预报的影响: 背景误差协方差三维结构的估计. 气象学报, 72: 62–78
- 王鹏云, 李泽椿. 2001. 灾害天气和中尺度气象学研究. 气象科技, 27: 10–14
- 王瑞春, 龚建东, 张林, 陆慧娟. 2015. 热带风压场平衡特征及其对GRAPES系统中同化预报的影响研究II: 动力与统计混合平衡约束方案的应用. 大气科学, 39: 1225–1236
- 王作述. 1963. 一次江淮流域切变线过程的环流结构. 气象学报, 33: 189–204
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 何金海, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题. 北京: 科学出版社. 314
- 吴国雄, 李占清, 符淙斌, 张小曳, Zhang R Y, 张人禾, 周天军, 李建平, 李剑东, 周德刚, 武亮, 周连童, 何编, 黄荣辉. 2015. 气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展. 中国科学: 地球科学, 45: 1609–1627
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响I. 尺度分析. 气象学报, 57: 257–263
- 吴国雄, 刘屹岷. 2000. 热力适应、过流、频散和副高I. 热力适应和过流. 大气科学, 24: 433–446
- 伍荣生, 巢纪平. 1978. 旋转大气中运动的多时态特征和时间边界层. 大气科学, 2: 267–275
- 伍荣生, 高守亭, 谈哲敏. 2004. 锋面过程与中尺度扰动. 北京: 气象出版社. 168
- 谢义炳. 1956. 中国夏半年几种降水天气系统的分析研究. 气象学报, 27: 1–23
- 谢义炳. 1959. 十年来我国降水问题的研究工作. 气象学报, 30: 223–225
- 谢义炳, 陈受钧, 张一良, 黄寅亮. 1963. 东南压基本气流与台风发生的一些事实的统计与分析. 气象学报, 33: 206–217
- 谢义炳, 陈玉樵. 1951. 冬季西太平洋及东亚大陆北部上空的温度场及流场. 气象学报, 22: 52–53
- 谢义炳, 谢安, 张镔, 杨大升, 蒋尚城. 1978. 动力分析及其在天气预报中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 24: 1–9
- 徐道生, 邵爱梅, 邱崇践. 2011a. SVD-En3DVar方法同化多普勒雷达速度观测资料I. 模拟资料试验. 大气科学, 35: 753–766
- 徐道生, 邵爱梅, 邱崇践. 2011b. SVD-En3DVar方法同化多普勒雷达速度观测资料II. 实际资料试验. 大气科学, 35: 818–832
- 许梓秀. 1977. 夏季冷低阻高型京津冀地区中尺度天气过程的分析研究(二). 中央气象局研究所, 雷达气象文集. 17–39
- 许梓秀. 1977. 夏季冷低阻高型京津冀地区中尺度天气过程的分析研究(一). 中央气象局研究所, 雷达气象文集. 1–16

- 薛纪善, 陈德辉. 2008. 数值预报系统GRAPES的科学设计与应用. 北京: 科学出版社. 383
- 薛纪善. 2006. 新世纪初我国数值天气预报的科技创新研究. 应用气象学报, 17: 602–610
- 闫之辉, 王雨, 朱国富. 2010. 国家气象中心业务数值预报发展的回顾与展望. 气象, 36: 26–32
- 闫之辉, 赵俊英, 朱琪, 郭肖容, 张玉玲. 1997. 高分辨率有限区业务数值预报模式及降水预报试验. 应用气象学报, 8: 393–400
- 叶笃正. 1952. 西藏高原对于大气环流影响的季节变化. 气象学报, 23: 33–47
- 叶笃正. 1962. 北半球冬季阻塞形势的研究. 北京: 科学出版社. 135
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社. 278
- 叶笃正, 顾震潮. 1955. 西藏高原对于东亚大气环流及中国天气的影响. 科学通报, 6: 30–33
- 叶笃正, 李麦村. 1964. 中小尺度运动中风场和气压场的适应. 气象学报, 34: 409–423
- 叶笃正, 李麦村. 1979. 大气各类运动的多时间尺度特性. 第二次全国数值天气预报文集. 北京: 科学出版社. 181–192
- 叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡. 气象学报, 28: 108–121
- 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象. 气象学报, 29: 249–263
- 叶笃正, 朱抱真. 1958. 大气环流的若干基本问题. 北京: 科学出版社. 159
- 尹若莹, 韩威, 高志球, 王根. 2019. 基于风云四号A星探测区域模式背景误差和观测误差估计的长波红外通道选择研究. 气象学报 77, doi: 10.11676/qxxb2019.051
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 70: 311–337
- 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平, 等. 2004. AREMS中尺度暴雨数值预报模式系统. 北京: 气象出版社. 233
- 曾庆存. 1963a. 扰动特性对大气适应过程的影响和测风资料的使用问题. 气象学报, 33: 37–50
- 曾庆存. 1963b. 大气中的适应过程和发展过程(一)物理分析和线性理论. 气象学报, 35: 163–174
- 曾庆存. 1963c. 大气中的适应过程和发展过程(二)非线性问题. 气象学报, 35: 281–289
- 曾庆存. 1963d. 大气运动的特征参数和动力学方程. 气象学报, 33: 472–483
- 曾庆存. 1979a. 旋转大气中运动的非线性相互作用和旋转适应过程. 中国科学, 22: 986–995
- 曾庆存. 1979b. 数值天气预报的数学物理基础. 第一卷. 北京: 科学出版社. 543
- 曾庆存, 季仲贞. 1981. 发展方程的计算稳定性问题. 计算数学, 1: 79–86
- 曾庆存, 叶笃正. 1980. 旋转大气中运动的适应过程. 力学学报, 13: 1
- 11
- 曾庆存, 叶笃正. 1981. 旋转大气中运动适应过程问题的研究(一). 大气科学, 4: 379–393
- 曾庆存, 叶笃正. 1982. 旋转大气中运动适应过程问题的研究(二). 大气科学, 5: 101–112
- 曾庆存, 袁重光, 张学洪, 包宁. 1985. 一个大气环流模式差分格式的检验. 气象学报, 43: 441–449
- 张丙辰, 章震越. 1990. 长江中下游梅雨锋暴雨研究. 北京: 气象出版社. 269
- 张庆红. 1999. 台湾海峡上空中尺度对流系统的数值研究. 博士学位论文. 北京: 北京大学. 148
- 张人禾, 刘屹岷. 2013. 中国南方夏季强降水的大尺度过程. 北京: 气象出版社. 312
- 张婉佩. 1978. 西北太平洋、南海热带扰动发展与不发展的对比分析. 台风会议文集. 上海: 上海科学技术出版社. 240
- 张文龙, 张大林, 王昂生, 崔晓鹏. 2009. 台风榴莲(2001)在季风槽中生成的机制探讨. 气象学报, 67: 811–827
- 张小玲, 陶诗言, 孙建华. 2010. 基于“配料”的暴雨预报. 大气科学, 34: 754–766
- 张云济, 张福青. 2018. 集合资料同化方法在强雷暴天气预报中的应用. 气象科技进展, 8: 38–52
- 章基嘉, 廖洞贤, 陈授钧, 等. 1985. 关于两年来我国数值预报业务的初步报告. 北京气象中心论文集, 198–210
- 赵柏林, 丁一汇. 1999. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京: 气象出版社. 273
- 赵国藏, 李明熙, 牟惟丰. 1953. 关于我国夏季高空流型和华中华南夏季降水. 天气月刊, 7月
- 赵思雄. 1988. 梅雨锋上扰动发生发展的能量分析. 大气科学, 12(s1): 191–201
- 赵思雄, 曾庆存. 2005. 东亚强寒潮——冷涌越过赤道并引发南半球热带气旋和强降水的个例研究. 气候与环境研究, 10: 507–525
- 赵思雄, 刘苏红, 刘名扬. 1980. 夏季北京冷涡强对流天气的中尺度分析. 中国科学院大气物理所集刊, 第9号. 北京: 科学出版社. 151–160
- 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 北京: 气象出版社. 282
- 郑庆林. 1980. 北半球七层初始方程波谱模式. 第二次全国数值天气预报会议论文集. 北京: 科学出版社. 13–24
- 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 端义宏, 谌芸, 何立富. 2010. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战. 气象, 36: 33–42
- 钟青. 1997. 物理守恒律保真格式构造与数值预报斜压原始方程传统谱模式改进研究. 气象学报, 55: 641–661
- 周秀骥. 2000. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究. 北京: 气象出版社. 370
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 2003. “98”华南暴雨科学试验研究. 北京: 气象出版社. 220

- 朱正心, 朱抱真. 1982. 纬向不对称热力强迫下超长波的非线性平衡态与阻塞形势. *中国科学*, 25: 361–371
- 竺可桢. 1925. 中国历史上气候之变迁. *东方杂志*, 22: 22–28
- 庄照荣, 薛纪善, 韩威, 刘艳. 2014. 探空观测黑名单检查在变分同化系统中的应用. *应用气象学报*, 25: 274–283
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, Caesar J, Gleason B, Klein Tank A M G, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson D B, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre J L. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res*, 111: D05109
- Arnold V I. 1965. Conditions for nonlinear stability of stationary plane curvilinear flows of an ideal fluid. *Dokl Akad Nauk Sssr*, 162: 975–978
- Bai L Q, Meng Z Y, Huang L, Yan L, Li Z, Mai X, Huang Y, Yao D, Wang X. 2017. An integrated damage, visual, and radar analysis of the 2015 Foshan, Guangdong EF3 tornado in China produced by the landfalling Typhoon Mujigae (2015). *Bull Amer Meteorol Soc*, 98: 2619–2640
- Bai L Q, Meng Z Y, Huang Y P, Zhang Y J, Niu S Z, Su T. 2019a. Convection initiation resulting from the interaction between a quasi-stationary dryline and intersecting gust fronts: A case study. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 2379–2396
- Bai L Q, Meng Z Y, Sueki K, Chen G, Zhou R. 2019b. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018. *Sci China Earth Sci*, 62: doi: 10.1007/s11430-019-9391-1
- Bao M, Hartmann D L. 2014. The response to MJO-like forcing in a nonlinear shallow-water model. *Geophys Res Lett*, 41: 1322–1328
- Berggren R, Bolin B, Rossby C G. 1949. An aerological study of zonal motion, its perturbations and break-down. *Tellus*, 1: 14–37
- Blumen W, Washington W M. 1973. Atmospheric dynamics and numerical weather prediction in the People's Republic of China 1949–1966. *Bull Amer Meteorol Soc*, 54: 502–518
- Chan J, Liang X. 2003. Convective asymmetries associated with tropical cyclone landfall. Part I: f -plane simulations. *J Atmos Sci*, 60: 1560–1576
- Charney J G, Drazin P G. 1961. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J Geophys Res*, 66: 83–109
- Charney J G, Fjörtoft R, Neumann J V. 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2: 237–254
- Charney J, Halem M, Jastrow R. 1969. Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere. *J Atmos Sci*, 26: 1160–1163
- Charney J G. 1947. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J Meteorol*, 4: 136–162
- Chen C G, Li X L, Shen X S, Xiao F. 2014. Global shallow water models based on multi-moment constrained finite volume method and three quasi-uniform spherical grids. *J Comput Phys*, 271: 191–223
- Chen C G, Li X L, Shen X S, Xiao F. 2015. A high-order conservative collocation scheme and its application to global shallow-water equations. *Geosci Model Dev*, 8: 221–233
- Chen D H, Xue J S, Yang X S, Zhang H L, Shen X S, Hu J L, Wang Y, Ji L R, Chen J B. 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): General scientific design. *Chin Sci Bull*, 53: 3433–3445
- Chen G H, Chou C. 2014. Joint contribution of multiple equatorial waves to tropical cyclogenesis over the western North Pacific. *Mon Weather Rev*, 142: 79–93
- Chen G X, Yang J, Bao Q, Wang W C. 2018. Intraseasonal responses of the East Asia summer rainfall to anthropogenic aerosol climate forcing. *Clim Dyn*, 51: 3985–3998
- Chen H P. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models. *Chin Sci Bull*, 58: 743–752
- Chen H P, Sun J Q, Chen X L, Zhou W. 2012. CGCM projections of heavy rainfall events in China. *Int J Climatol*, 32: 441–450
- Chen J Y, Cai X H, Wang H Y, Kang L, Zhang H S, Song Y, Zhu H, Zheng W, Li F J. 2018. Tornado climatology of China. *Int J Climatol*, 38: 2478–2489
- Chen M X, Wang Y C, Gao F, Xiao X. 2014. Diurnal evolution and distribution of warm-season convective storms in different prevailing wind regimes over contiguous North China. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 2742–2763
- Chen M, Gao F, Kong R, Wang Y, Wang J, Tan X, Xiao X, Zhang W, Wang L, Ding Q. 2009. A system for nowcasting convective storm in support of 2008 Olympics. World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting. Whistler, Canada
- Chen T J. 1983. Observational aspects of the Mei-yu phenomenon in subtropical China. *J Meteorol Soc Jpn*, 61: 306–312
- Chen T J, Chang C P. 1980. The structure and vorticity budget of an early summer monsoon trough (Mei-yu) over southeastern China and Japan. *Mon Weather Rev*, 108: 942–953
- Chen W, Graf H F, Takahashi M. 2002. Observed interannual oscillations of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter. *Geophys Res Lett*, 29: 30-1–34-4
- Chen W, Takahashi M, Graf H F. 2003. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST. *J Geophys Res*, 108: 4797

- Chen X C, Zhang F Q, Zhao K. 2016. Diurnal variations of the land-sea breeze and its related precipitation over South China. *J Atmos Sci*, 73: 4793–4815
- Chen X C, Zhang F Q, Zhao K. 2017. Influence of monsoonal wind speed and moisture content on intensity and diurnal variations of the Mei-Yu season coastal rainfall over South China. *J Atmos Sci*, 74: 2835–2856
- Chen X C, Zhao K, Xue M, Zhou B, Huang X, Xu W. 2015. Radar-observed diurnal cycle and propagation of convection over the Pearl River Delta during Mei-Yu season. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 12557–12575
- Chen X C, Zhao K, Xue M. 2014. Spatial and temporal characteristics of warm season convection over Pearl River Delta region, China, based on 3 years of operational radar data. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 12, 447–12, 465
- Chen Y, Zhao C S, Zhang Q, Deng Z Z, Huang M Y, Ma X C. 2009. Aircraft study of mountain chimney effect of Beijing, China. *J Geophys Res*, 114: D08306
- Dai G K, Mu M, Jiang Z N. 2016. Relationships between optimal precursors triggering NAO onset and optimally growing initial errors during NAO prediction. *J Atmos Sci*, 73: 293–317
- Di D, Li J, Han W, Bai W, Wu C, Menzel W P. 2018. Enhancing the fast radiative transfer model for FengYun-4 GIRS by using local training profiles. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 12
- Ding A J, Fu C B, Yang X Q, Sun J N, Petäjä T, Kerminen V M, Wang T, Xie Y, Herrmann E, Zheng L F, Nie W, Liu Q, Wei X L, Kulmala M. 2013. Intense atmospheric pollution modifies weather: A case of mixed biomass burning with fossil fuel combustion pollution in eastern China. *Atmos Chem Phys*, 13: 10545–10554
- Ding L T, Lu S, Cheng J. 2018. Weak-norm posterior contraction rate of the 4DVAR method for linear severely ill-posed problems. *J Complexity*, 46: 1–18
- Du Y, Chen G X. 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: Ensemble-based analysis. *Mon Weather Rev*, 146: 3827–3844
- Du Y, Chen G X. 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part II: Convection initiation. *Mon Weather Rev*, 147: 543–565
- Du Y, Chen Y L, Zhang Q H. 2015a. Numerical simulations of the boundary layer jet off the southeastern coast of China. *Mon Weather Rev*, 143: 1212–1231
- Du Y, Rotunno R, Zhang Q H. 2015b. Analysis of WRF-simulated diurnal boundary layer winds in Eastern China using a simple 1D model. *J Atmos Sci*, 72: 714–727
- Du Y, Rotunno R. 2014. A simple analytical model of the nocturnal low-level jet over the Great Plains of the United States. *J Atmos Sci*, 71: 3674–3683
- Du Y, Zhang Q H, Chen Y, Zhao Y, Wang X. 2014. Numerical simulations of spatial distributions and diurnal variations of low-level jets in China during early summer. *J Clim*, 27: 5747–5767
- Du Y, Zhang Q H, Yue Y, Yang Y. 2012. Characteristics of low-level jets in Shanghai during the 2008–2009 warm seasons as inferred from wind profiler radar data. *J Meteorol Soc Jpn*, 90: 891–903
- Duan W S, Huo Z H. 2016. An approach to generating mutually independent initial perturbations for ensemble forecasts: Orthogonal conditional nonlinear optimal perturbations. *J Atmos Sci*, 73: 997–1014
- Eady E T. 1949. Long waves and cyclone waves. *Tellus*, 1: 33–52
- Emanuel K A, David Neelin J, Bretherton C S. 1994. On large-scale circulations in convecting atmospheres. *Q J R Met Soc*, 120: 1111–1143
- Fan J W, Leung L R, Rosenfeld D, Chen Q, Li Z Q, Zhang J Q, Yan H R. 2013. Microphysical effects determine macrophysical response for aerosol impacts on deep convective clouds. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: E4581–E4590
- Fang J, Zhang F Q. 2010. Initial development and genesis of Hurricane Dolly (2008). *J Atmos Sci*, 67: 655–672
- Fang J, Zhang F Q. 2011. Evolution of multiscale vortices in the development of Hurricane Dolly (2008). *J Atmos Sci*, 68: 103–122
- Fang J, Zhang F Q. 2016. Contribution of tropical waves to the formation of supertyphoon Megi (2010). *J Atmos Sci*, 73: 4387–4405
- Fu C, Li D. 2014. Trends in the different grades of precipitation over South China during 1960–2010 and the possible link with anthropogenic aerosols. *Adv Atmos Sci*, 31: 480–491
- Fu S Z, Deng X, Li Z, Xue H W. 2017. Radiative effect of black carbon aerosol on a squall line case in North China. *Atmos Res*, 197: 407–414
- Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, Bosart L F. 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with severe tropical storm Bilis (2006) after its landfall. *Mon Weather Rev*, 137: 1881–1897
- Gong Y T, Li Y, Zhang D L. 2018. A statistical study of unusual tracks of tropical cyclones near Taiwan Island. *J Appl Meteorol Climatol*, 57: 193–206
- Gray W M. 1998. The formation of tropical cyclones. *Meteorol Atmos Phys*, 67: 37–69
- Gu J F, Tan Z M, Qiu X. 2015. Effects of vertical wind shear on inner-core thermodynamics of an idealized simulated tropical cyclone. *J Atmos Sci*, 72: 511–530
- Gu J F, Tan Z M, Qiu X. 2016. Quadrant-dependent evolution of low-level tangential wind of a tropical cyclone in the shear flow. *J Atmos*

- Sci, 73: 1159–1177
- Gu J F, Tan Z M, Qiu X. 2018. The evolution of vortex tilt and vertical motion of tropical cyclones in directional shear flows. *J Atmos Sci*, 75: 3565–3578
- Gu J F, Tan Z M, Qiu X. 2019. Intensification variability of tropical cyclones in directional shear flows: Vortex tilt-convection coupling. *J Atmos Sci*, 76: 1827–1844
- Gu W, Wang L, Hu Z Z, Hu K M, Li Y. 2018. Interannual variations of the first rainy season precipitation over south China. *J Clim*, 31: 623–640
- Guo J P, Deng M J, Fan J W, Li Z Q, Chen Q, Zhai P M, Dai Z J, Li X W. 2014. Precipitation and air pollution at mountain and plain stations in northern China: Insights gained from observations and modeling. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 4793–4807
- Guo J P, Deng M J, Lee S S, Wang F, Li Z Q, Zhai P M, Liu H, Lv W T, Yao W, Li X W. 2016. Delaying precipitation and lightning by air pollution over the Pearl River Delta. Part I: Observational analyses. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 6472–6488
- Guo J P, Liu H, Li Z Q, Rosenfeld D, Jiang M J, Xu W X, Jiang J H, He J, Chen D D, Min M, Zhai P M. 2018. Aerosol-induced changes in the vertical structure of precipitation: A perspective of TRMM precipitation radar. *Atmos Chem Phys*, 18: 13329–13343
- Guo X L, Fu D H, Guo X, Zhang C M. 2014. A case study of aerosol impacts on summer convective clouds and precipitation over northern China. *Atmos Res*, 142: 142–157
- Guo X, Tan Z M. 2017. Tropical cyclone fullness: A new concept for interpreting storm intensity. *Geophys Res Lett*, 44: 4324–4331
- Guo Y P, Tan Z M. 2018. Westward migration of tropical cyclone rapid-intensification over the northwestern Pacific during short duration El Nino. *Nature Commun*, 9: 1570
- Han W. 2014. Constrained variational bias correction for satellite radiance assimilation. In: 19th Int TOVS Study Conf
- Han W, Bormann N. 2016. Constrained adaptive bias correction for satellite radiances assimilation in the ECMWF 4D-Var system. In: ECMWF Technical Memorandum 783
- Han W, McNally A P. 2010. The 4D-Var assimilation of ozone-sensitive infrared radiances measured by IASI. *Q J R Meteorol Soc*, 136: 2025–2037
- Han W, Xue J S, Xu J M, Zhang Q S. 2006. Assimilation of FY2C AMV in GRAPES. Eighth International Winds Workshop, 24–28 April, Beijing, China
- Han W, Xue J. 2007. Adaptive tuning of background error and satellite radiance observation error for operational variational assimilation. *Proc of SPIE*, 6790: 679044-1–679044-9
- Han Y, Khouider B. 2010. Convectively coupled waves in a sheared environment. *J Atmos Sci*, 67: 2913–2942
- He M Y, Liu H B, Wang B, Zhang D L. 2016. A modeling study of a low-level jet along the Yun-Gui plateau in South China. *J Appl Meteorol Climatol*, 55: 41–60
- He Z W, Zhang Q H, Bai L Q, Meng Z Y. 2017. Characteristics of mesoscale convective systems in central East China and their reliance on atmospheric circulation patterns. *Int J Climatol*, 37: 3276–3290
- Hsieh Y P. 1949. An investigation of a selected cold vortex over North America. *J Meteorol*, 6: 401–410
- Huang L, Luo Y L, Zhang D L. 2018. The relationship between anomalous presummer extreme rainfall over the South China and synoptic disturbances. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 3395–3413
- Huang R, Gambo K. 1982a. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources: (I) Forcing by topography. *J Meteorol Soc Jpn*, 60: 78–92
- Huang R, Gambo K. 1982b. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. *J Meteorol Soc Jpn*, 60: 93–108
- Huang R, Gambo K. 1984. On other wave guide in stationary planetary wave propagations in winter Northern Hemisphere. *Sci China Chem*, 27: 610–624
- Huang X, Ding A, Liu L, Liu Q, Ding K, Niu X, Nie W, Xu Z, Chi X, Wang M, Sun J, Guo W, Fu C. 2016. Effects of aerosol-radiation interaction on precipitation during biomass-burning season in East China. *Atmos Chem Phys*, 16: 10063–10082
- Jaw J J. 1937. Zur Thermodynamik der Paeat, Gerundstromung, Abgedruckt aus Veroffentlichungen des Meteorologischen, Institutes der Universitat Berlin, Bd, II, Ht. 5
- Jaw J. 1946. The formation of the semi-permanent center of action in relation to the horizontal solenoidal field. *J Meteorol*, 3: 103–114
- Ji L, Tibaldi S. 1983. Numerical simulation of a case of blocking: The effect of orography and land-sea contrast. *Mon Weather Rev*, 111: 2068–2086
- Jiang M J, Li Z Q, Wan B C, Cribb M. 2016. Impact of aerosols on precipitation from deep convective clouds in Eastern China. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 9607–9620
- Jiang Z N, Mu M. 2009. A comparison study of the methods of conditional nonlinear optimal perturbations and singular vectors in ensemble prediction. *Adv Atmos Sci*, 26: 465–470
- Kuo H L. 1949. Dynamic instability of two-dimensional nondivergent flow in a barotropic atmosphere. *J Meteorol*, 6: 105–122
- Lau K M, Peng L. 1987. Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part I: Basic theory. *J Atmos Sci*, 44: 950–972
- Lee S S, Guo J P, Li Z Q. 2016. Delaying precipitation by air pollution over the Pearl River Delta: 2. Model simulations. *J Geophys Res-*

- Atmos*, 121: 11739–11760
- Li J, Liu G Q. 2016. Direct assimilation of Chinese FY-3C microwave temperature sounder-2 radiances in the global GRAPES system. *Atmos Meas Tech*, 9: 3095–3113
- Li L, Zhang Y C. 2014. Effects of different configurations of the East Asian subtropical and polar front jets on precipitation during the Mei-Yu season. *J Clim*, 27: 6660–6672
- Li M X, Zhang Q H, Zhang F Q. 2016. Hail day frequency trends and associated atmospheric circulation patterns over China during 1960–2012. *J Clim*, 29: 7027–7044
- Li T, Wang L, Peng M, Wang B, Zhang C, Lau W, Kuo H C. 2018. A Paper on the tropical intraseasonal oscillation published in 1963 in a Chinese Journal. *Bull Amer Meteorol Soc*, 99: 1765–1779
- Li X F, Zhang Q H, Xue H W. 2017. The role of initial cloud condensation nuclei concentration in hail using the WRF NSSL 2-moment microphysics scheme. *Adv Atmos Sci*, 34: 1106–1120
- Li X F, Zhang Q H, Zou T, Lin J P, Kong H, Ren Z H. 2018. Climatology of hail frequency and size in China, 1980–2015. *J Appl Meteorol Climatol*, 57: 875–887
- Li X S, Luo Y L, Guan Z Y. 2014. The persistent heavy rainfall over southern China in June 2010: Evolution of synoptic systems and the effects of the Tibetan Plateau heating. *J Meteorol Res*, 28: 540–560
- Li Z, Lau W K M, Ramanathan V, Wu G, Ding Y, Manoj M G, Liu J, Qian Y, Li J, Zhou T, Fan J, Rosenfeld D, Ming Y, Wang Y, Huang J, Wang B, Xu X, Lee S S, Cribb M, Zhang F, Yang X, Zhao C, Takemura T, Wang K, Xia X, Yin Y, Zhang H, Guo J, Zhai P M, Sugimoto N, Babu S S, Brasseur G P. 2016. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Rev Geophys*, 54: 866–929
- Liang J, Wu L G, Zong H J. 2014. Idealized numerical simulations of tropical cyclone formation associated with monsoon gyres. *Adv Atmos Sci*, 31: 305–315
- Liang J, Wu L G. 2015. Sudden track changes of tropical cyclones in monsoon gyres: Full-physics, idealized numerical experiments. *J Atmos Sci*, 72: 1307–1322
- Liang P, Ding Y H. 2017. The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916–2014. *Adv Atmos Sci*, 34: 321–334
- Liang X. 2007. An integrating velocity-azimuth process single-Doppler radar wind retrieval method. *J Atmos Ocean Technol*, 24: 658–665
- Lin L, Wang Z L, Xu Y Y, Fu Q. 2016. Sensitivity of precipitation extremes to radiative forcing of greenhouse gases and aerosols. *Geophys Res Lett*, 43: 9860–9868
- Lin L, Xu Y Y, Wang Z L, Diao C R, Dong W J, Xie S P. 2018. Changes in extreme rainfall over India and China attributed to regional aerosol-cloud interaction during the late 20th century rapid industrialization. *Geophys Res Lett*, 45: 7857–7865
- Liu H B, Li L J, Wang B. 2012. Low-level jets over southeast China: Warm season climatology for the summer of 2003. *Atmos Ocean Sci Lett*, 5: 394–400
- Liu X, Luo Y L, Guan Z Y, Zhang D L. 2018. An extreme rainfall event in coastal South China during SCMRX-2014: Formation and roles of rainband and echo trainings. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 9256–9278
- Liu Y Z, Zhang L, Lian Z H. 2018. Conjugate gradient algorithm in the four-dimensional variational data assimilation system in GRAPES. *J Meteorol Res*, 32: 974–984
- Liu Y, Mu M. 1996. Nonlinear stability theorem for Eady's Model of quasigeostrophic baroclinic flow. *J Atmos Sci*, 53: 1459–1463
- Liu Y, Sun J, Yang B. 2009. The effects of black carbon and sulphate aerosols in China regions on East Asia monsoons. *Tellus B-Chem Phys Meteorol*, 61: 642–656
- Liu Y, Tan Z M, Wu Z. 2019. Non-instantaneous save-CISK for the interaction between convective heating and low-level moisture convergence in the tropics. *J Atmos Sci*, 76: 2083–2101
- Liu Y, Xue J. 2014. Assimilation of global navigation satellite radio occultation observations in GRAPES: Operational implementation. *J Meteorol Res*, 28: 1061–1074
- Liu Z, Yim S H L, Wang C, Lau N C. 2018. The impact of the aerosol direct radiative forcing on deep convection and air quality in the Pearl River Delta region. *Geophys Res Lett*, 45: 4410–4418
- Luo D. 2000. Planetary-scale baroclinic envelope Rossby solitons in a two-layer model and their interaction with synoptic-scale eddies. *Dyn Atmos Oceans*, 32: 27–74
- Luo D. 2005. A barotropic envelope Rossby soliton model for block-eddy interaction. Part I: Effect of topography. *J Atmos Sci*, 62: 5–21
- Luo D, Cha J, Zhong L, Dai A. 2014. A nonlinear multiscale interaction model for atmospheric blocking: The eddy-blocking matching mechanism. *Q J R Meteorol Soc*, 140: 1785–1808
- Luo D, Lupo A R, Wan H. 2007. Dynamics of eddy-driven low-frequency dipole modes. Part I: A simple model of North Atlantic Oscillations. *J Atmos Sci*, 64: 3–28
- Luo Y L, Chen Y R X. 2015. Investigation of the predictability and physical mechanisms of an extreme-rainfall-producing mesoscale convective system along the Meiyu front in East China: An ensemble approach. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 10593–10618
- Luo Y L, Gong Y, Zhang D L. 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-Yu front in East China. *Mon Weather Rev*, 142: 203–221
- Luo Y L, Wang H, Zhang R H, Qian W M, Luo Z Z. 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over South China and the Yangtze and Huai

- River basin. *J Clim*, 26: 110–132
- Luo Y L, Wang Y J, Wang H Y, Zheng Y, Morrison H. 2010. Modeling convective-stratiform precipitation processes on a Mei-Yu front with the Weather Research and Forecasting model: Comparison with observations and sensitivity to cloud microphysics parameterizations. *J Geophys Res*, 115: D18117
- Luo Y L, Xia R, Chan J C L. 2019. Characteristics, physical mechanisms, and prediction of pre-summer rainfall over South China: Research progress during 2008–2009. *J Meteorol Soc Jpn*, doi: 10.2151/jmsj.2020-002
- Luo Y L, Zhang R, Wan Q, Wang B, Wong W K, Hu Z, Jou B J D, Lin Y, Johnson R J, Chang C P, Zhu Y J, Zhang X, Wang H, Xia R, Ma J, Zhang D L, Gao M, Zhang Y J, Liu X, Chen Y R X, Huang H, Bao X H, Ruan Z, Cui Z H, Meng Z Y, Sun J X, Wu M W, Wang H Y, Peng X D, Qian W M, Zhao K, Xiao Y J. 2017. The Southern China Monsoon Rainfall Experiment (SCMREX). *Bull Amer Meteorol Soc*, 98: 999–1013
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the Tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 28: 702–708
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. *J Atmos Sci*, 29: 1109–1123
- Matsuno T. 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J Meteorol Soc Jpn*, 44: 25–43
- Meng Z Y, Bai L Q, Zhang M R, Wu Z F, Li Z H, Pu M J, Zheng Y G, Wang X H, Yao D, Xue M, Zhao K, Li Z M, Peng S Q, Li L Y. 2018. The deadliest tornado (EF4) in the past 40 years in China. *Weather Forecast*, 33: 693–713
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. 2013. General features of squall lines in East China. *Mon Weather Rev*, 141: 1629–1647
- Meng Z Y, Yao D, Bai L Q, Zheng Y G, Xue M, Zhang X L, Zhao K, Tian F Y, Wang M J. 2016. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations. *Chin Sci Bull*, 61: 330–337
- Meng Z Y, Yao D. 2014. Damage survey, radar and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. *Weather Forecast*, 29: 702–724
- Meng Z Y, Zhang F, Markowski P, Wu D C, Zhao K. 2012. A modeling study on the development of a bowing structure and associated rear inflow within a squall line over South China. *J Atmos Sci*, 69: 1182–1207
- Meng Z Y, Zhang Y J. 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China. *Mon Weather Rev*, 140: 445–470
- Miao Y C, Hu F, Liu S H, Qian T T, Xue M, Zheng Y J, Wang S. 2015. Seasonal variation of local atmospheric circulations and boundary layer structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region and implications for air quality. *J Adv Model Earth Syst*, 7: 1602–1626
- Ming J, Zhang J A. 2018. Direct measurements of momentum flux and dissipative heating in the surface layer of tropical cyclones during landfalls. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 4926–4938
- Mu M. 1992. Nonlinear stability of two-dimensional quasigeostrophic motions. *Geophys Astrophys Fluid Dyn*, 65: 57–76
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 10: 493–501
- Mu M, Jiang Z N. 2008. A method to find perturbations that trigger blocking onset: Conditional nonlinear optimal perturbations. *J Atmos Sci*, 65: 3935–3946
- Mu M, Jiang Z N. 2011. Similarities between optimal precursors that trigger the onset of blocking events and optimally growing initial errors in onset prediction. *J Atmos Sci*, 68: 2860–2877
- Mu M, Shepherd T G, Swanson K. 1996. On nonlinear symmetric stability and the nonlinear saturation of symmetric instability. *J Atmos Sci*, 53: 2918–2923
- Mu M, Zeng Q C, Theodore G S, Liu Y M. 1994. Nonlinear stability of multilayer quasi-geostrophic flow. *J Fluid Mech*, 264: 165–184
- Ni X, Zhang Q H, Liu C T, Li X F, Zou T, Lin J P, Kong H, Ren Z H. 2017. Decreased hail size in China since 1980. *Sci Rep*, 7: 10913
- Nie J, Sobel A H, Shaevitz D A, Wang S G. 2018. Dynamic amplification of extreme precipitation sensitivity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 9467–9472
- Peng J, Li Z Q, Zhang H, Liu J J, Maureen C. 2016. Systematic changes in cloud radiative forcing with aerosol loading for deep clouds from multi-year global A-Train satellite datasets. *J Atmos Sci*, 73: 231–249
- Qiu C J, Chou J. 2006. Four-dimensional data assimilation method based on SVD: Theoretical aspect. *Theor Appl Climatol*, 83: 51–57
- Qiu C J, Shao A, Xu Q, Wei L. 2007. Fitting model fields to observations by using singular value decomposition: An ensemble-based 4DVar approach. *J Geophys Res*, 112: D11105
- Qiu C J, Xu Q. 1992. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data. *J Atmos Ocean Technol*, 9: 588–598
- Qiu X, Tan Z M. 2013. The roles of asymmetric inflow forcing induced by outer rainbands in tropical cyclone secondary eyewall formation. *J Atmos Sci*, 70: 953–974
- Qiu X, Tan Z M, Xiao Q. 2010. The roles of vortex Rossby waves in hurricane secondary eyewall formation. *Mon Weather Rev*, 138: 2092–2109
- Rex D F. 1950. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. *Tellus*, 2: 196–211
- Robert A. 1969. The integration of a spectral model of the atmosphere by the implicit method. *Proc WMO/IUGG Symposium on WNP*.

- Tokyo, Japan Met Soc. 19–24
- Robert A. 1982. A semi-Lagrangian and semi-implicit numerical integration scheme for the primitive meteorological equations. *J Meteorol Soc Jpn*, 60: 319–325
- Rossby C G. 1938. On the mutual adjustment of pressure and velocity distribution in certain simple current systems, II. *J Mar Res*, 1: 239–263
- Rossby C G. 1939. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J Mar Res*, 2: 38–55
- Simmons A J, Chen J B. 1991. The calculation of geopotential and the pressure gradient in the ECMWF atmospheric model: Influence on the simulation of the polar atmosphere and on temperature analyses. *Q J R Met Soc*, 117: 29–58
- Song F F, Zhou T J. 2014. The climatology and interannual variability of East Asian summer monsoon in CMIP5 coupled models: Does air-sea coupling improve the simulations? *J Clim*, 27: 8761–8777
- Staff Members of Academia Sinica. 1958. On the general circulation over the East Asia (I). *Tellus*, 9: 432–446
- Staff Members of Academia Sinica. 1959a. On the general circulation over the East Asia (II). *Tellus*, 10: 58–75
- Staff Members of Academia Sinica. 1959b. On the general circulation over the East Asia (III). *Tellus*, 10: 299–312
- Su T, Zhai G Q. 2017. The role of convectively generated gravity waves on convective initiation: A case study. *Mon Weather Rev*, 145: 335–359
- Sun J H, Zhao S X. 2010. The impacts of multiscale weather systems on freezing rain and snowstorms over southern China. *Weather Forecast*, 25: 388–407
- Tang J, Zhang J A, Kieu C, Marks F D. 2018. Sensitivity of hurricane intensity and structure to two types of planetary boundary layer parameterization schemes in idealized HWRF simulations. *Tropical Cyclone Res Rev*, 7: 201–211
- Temperton C, Hortal M, Simmons A. 2001. A two-time-level semi-Lagrangian global spectral model. *Q J R Met Soc*, 127: 111–127
- Wan B C, Gao Z Q, Chen F, Lu C G. 2017. Impact of Tibetan Plateau surface heating on persistent extreme precipitation events in southeastern China. *Mon Weather Rev*, 145: 3485–3505
- Wang B. 1988. Dynamics of tropical low-frequency waves: An analysis of the moist Kelvin wave. *J Atmos Sci*, 45: 2051–2065
- Wang B, Wan H, Ji Z Z, Zhang X, Yu R C, Yu Y Q, Liu H T. 2004. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods. *Sci China Ser A*, 47: 4–21
- Wang B, Xie X S. 1998. Coupled modes in the warm pool climate system, Part I: The role of air-sea interaction in maintaining Madden-Julian oscillation. *J Clim*, 11: 2116–2135
- Wang B, Zhao Y. 2005. A new data assimilation approach. *Acta Meteorol Sin*, 63: 694–701
- Wang H, Luo Y L, Jou B J D. 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMREX: Observational analysis. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 13206–13232
- Wang J C, Li J P. 2009. A four-dimensional scheme based on singular value decomposition (4DSVD) for chaotic-attractor-theory-oriented data assimilation. *J Geophys Res*, 114: D02114
- Wang L, Kodera K, Chen W. 2012. Observed triggering of tropical convection by a cold surge: Implications for MJO initiation. *Q J R Meteorol Soc*, 138: 1740–1750
- Wang Y Q, Wang Y Q, Fudeyasu H. 2009. The role of typhoon Songda (2004) in producing distantly located heavy rainfall in Japan. *Mon Weather Rev*, 137: 3699–3716
- Wang Y, Yan Z W, Chandler R E. 2010. An analysis of mid-summer rainfall occurrence in eastern China and its relationship with large-scale warming using generalized linear models. *Int J Climatol*, 30: 1826–1834
- Wang Z L, Lin L, Zhang X Y, Zhang H, Liu L K, Xu Y Y. 2017. Scenario dependence of future changes in climate extremes under 1.5°C and 2°C global warming. *Sci Rep*, 7: 46432
- Wei Y T, Mu M, Ren H L, Fu J X. 2019. Conditional nonlinear optimal perturbations of moisture triggering primary MJO initiation. *Geophys Res Lett*, 46: 3492–3501
- Wen J, Zhao K, Huang H, Zhou B W, Yang Z L, Chen G, Wang M J, Wen L, Dai H N, Xu L L, Liu S, Zhang G F, Lee W C. 2017. Evolution of microphysical structure of a subtropical squall line observed by a polarimetric radar and a disdrometer during OPACC in Eastern China. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 8033–8050
- Wen Y R, Xue L, Li Y, Wei N, Lü A M. 2015. Interaction between Typhoon Vicente (1208) and the western Pacific subtropical high during the Beijing extreme rainfall of 21 July 2012. *J Meteorol Res*, 29: 293–304
- Wheeler M, Kiladis G N. 1999. Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber-frequency domain. *J Atmos Sci*, 56: 374–399
- Wu C C. 2013. Typhoon Morakot: Key findings from the journal TAO for improving prediction of extreme rains at landfall. *Bull Amer Meteorol Soc*, 94: 155–160
- Wu D C, Meng Z Y, Yan D C. 2013. The predictability of a squall line in South China on 23 April 2007. *Adv Atmos Sci*, 30: 485–502
- Wu D, Zhao K, Kumjian M R, Chen X M, Huang H, Wang M J, Jr A C D, Duan Y H, Zhang F Q. 2018. Kinematics and microphysics of convection in the outer rainband of Typhoon Nida (2016) revealed

- by polarimetric radar. *Mon Weather Rev*, 146: 2147–2159
- Wu G X. 1984. The nonlinear response of the atmosphere to large-scale mechanical and thermal forcing. *J Atmos Sci*, 41: 2456–2476
- Wu G X, Chen B. 1989. Non-acceleration theorem in a primitive equation system: I. Acceleration of zonal mean flow. *Adv Atmos Sci*, 6: 1–20
- Wu G X, Liu H, Zhao Y C, Li W P. 1996. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. *Adv Atmos Sci*, 13: 1–18
- Wu G, Liu Y M. 2003. Summertime quadruplet heating pattern in the subtropics and the associated atmospheric circulation. *Geophys Res Lett*, 30: 1201
- Wu L G, Liang J, Wu C C. 2011a. Monsoonal influence on Typhoon Morakot (2009). Part I: Observational analysis. *J Atmos Sci*, 68: 2208–2221
- Wu L G, Liu Q Y, Li Y B. 2018. Prevalence of tornado-scale vortices in the tropical cyclone eyewall. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 8307–8310
- Wu L G, Zong H J, Liang J. 2011b. Observational analysis of sudden tropical cyclone track changes in the vicinity of the East China Sea. *J Atmos Sci*, 68: 3012–3031
- Wu L G, Zong H J, Liang J. 2013. Observational analysis of tropical cyclone formation associated with monsoon gyres. *J Atmos Sci*, 70: 1023–1034
- Wu M W, Luo Y L, Chen F, Wong W K. 2019. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China. *J Appl Meteorol Climatol*, 58: 1799–1819
- Wu M W, Luo Y L. 2016. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector convective system producing the maximal daily precipitation in China mainland during pre-summer rainy season of 2015. *J Meteorol Res*, 30: 719–736
- Xu J, Wang Y Q, Tan Z M. 2016. The relationship between sea surface temperature and maximum potential intensification rate of tropical cyclones over the North Atlantic. *J Atmos Sci*, 73: 4979–4988
- Xu J, Wang Y Q. 2010. Sensitivity of tropical cyclone inner core size and intensity to the radial distribution of surface entropy flux. *J Atmos Sci*, 67: 1831–1852
- Xu J, Wang Y Q. 2015. A statistical analysis on the dependence of tropical cyclone intensification rate on the storm intensity and size in the North Atlantic. *Weather Forecast*, 30: 692–701
- Xue M. 2016. Preface to the Special Issue on the “Observation, Prediction and Analysis of severe Convection of China” (OPACC) National “973” Projec. *Adv Atmos Sci*, 33: 1099–1101
- Yan H R, Li Z Q, Huang J P, Maureen C, Liu J J. 2014. Long-term aerosol-mediated changes in cloud radiative forcing of deep clouds at the top and bottom of the atmosphere over the Southern Great Plains. *Chem Phys*, 14: 7113–7124
- Yang S L, Ding Z L, Li Y Y, Wang X, Jiang W Y, Huang X F. 2015. Warming-induced northwestward migration of the East Asian monsoon rain belt from the Last Glacial Maximum to the mid-Holocene. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: 13178–13183
- Yang X L, Sun J H, Zheng Y G. 2017. A 5-yr climatology of severe convective wind events over China. *Weather Forecast*, 32: 1289–1299
- Yang X, Ferrat M, Li Z Q. 2013. New evidence of orographic precipitation suppression by aerosols in central China. *Meteorol Atmos Phys*, 119: 17–29
- Yang X, Li Z Q. 2014. Increases in thunderstorm activity and relationships with air pollution in southeast China. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 1835–1844
- Yang Y, Fan J W, Leung L R, Zhao C, Li Z Q, Rosenfeld D. 2016. Mechanisms contributing to suppressed precipitation in Mt. Hua of Central China. Part I: Mountain valley circulation. *J Atmos Sci*, 73: 1351–1366
- Yeh T C. 1949. On energy dispersion in the atmosphere. *J Meteorol*, 6: 1–16
- Yeh T C. 1957. On the formation of quasi-geostrophic motion in the atmosphere. *J Meteorol Soc Jpn*, 35A: 130–134
- Yeh T C, Li M T. 1982. On the characteristics of the scales of the atmospheric motions. *J Meteorol Soc Jpn*, 60: 16–23
- Yi B Q, Zhang Q H. 2010. Near-equatorial typhoon development: Climatology and numerical simulations. *Adv Atmos Sci*, 27: 1014–1024
- You Q L, Kang S, Aguilar E, Pepin N, Flügel W A, Yan Y, Xu Y, Zhang Y, Huang J. 2011. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961–2003. *Clim Dyn*, 36: 2399–2417
- Yu S C, Li P F, Wang L Q, Wang P, Wang S, Chang S C, Liu W P, Alapaty K. 2016. Anthropogenic aerosols are a potential cause for migration of the summer monsoon rain belt in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113: E2209–E2210
- Yuan C X, Liu J Q, Luo J J, Guan Z Y. 2019. Influences of tropical Indian and Pacific oceans on the interannual variations of precipitation in the early and late rainy seasons in South China. *J Clim*, 32: 3681–3694
- Yue J, Meng Z Y, Yu C K, Cheng L W. 2017. Impact of coastal radar observability on the forecast of the track and rainfall of Typhoon Morakot (2009) using WRF-based ensemble Kalman filter data assimilation. *Adv Atmos Sci*, 34: 66–78
- Zeng Q T. 1961. The application of a complete system of thermohydrodynamic equations to short-term weather forecast in a two-level model. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 137: 76–78

- Zeng Q T. 1982. On the evolution and interaction of disturbances and zonal flow in rotating barotropic atmosphere. *J Meteorol Soc Jpn*, 60: 24–31
- Zeng Q T. 1983. The evolution of Rossby-wave packet in a three-dimensional baroclinic atmosphere. *J Atmos Sci*, 40: 73–84
- Zeng Q T. 1989. Variational principle of instability of atmospheric motions. *Adv Atmos Sci*, 6: 137–172
- Zhai P, Sun A, Ren F, Liu X, Gao B, Zhang Q. 1999. Changes of climate extremes in China. *Climatic Change*, 42: 203–218
- Zhang D L, Lin Y H, Zhao P, Yu X D, Wang S Q, Kang H W, Ding Y H. 2013. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: “Right results” but for wrong reasons. *Geophys Res Lett*, 40: 1426–1431
- Zhang L, Liu Y Z, Liu Y, Gong J D, Lu H J, Jin Z Y, Tian W H, Liu G Q, Zhou B, Zhao B. 2019. The operational global four-dimensional variational data assimilation system at the China Meteorological Administration. *Q J R Meteorol Soc*, 145: 1882–1896
- Zhang M R, Meng Z Y. 2018. Impact of synoptic-scale factors on rainfall forecast in different stages of a persistent heavy rainfall event in South China. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 3574–3593
- Zhang M R, Meng Z Y. 2019. Warm-sector heavy rainfall in Southern China and its WRF simulation evaluation: A low-level-jet perspective. *Mon Weather Rev*, 147: 4461–4480
- Zhang M R, Meng Z Y, Huang Y P, Wang D Y. 2019. The mechanism and predictability of an elevated convection initiation event in a weak-lifting environment in Central-Eastern China. *Mon Weather Rev*, 147: 1823–1841
- Zhang M, Zhang D L, Wang A S. 2009. Numerical simulation of torrential rainfall and vortical hot towers in a midlatitude mesoscale convective system. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2: 189–193
- Zhang M, Zhang D L. 2012. Subkilometer simulation of a torrential-rain-producing mesoscale convective system in East China. Part I: Model verification and convective organization. *Mon Weather Rev*, 140: 184–201
- Zhang Q H, Chen S J, Kuo Y H, Lau K H, Anthes R A. 2005a. Numerical study of a typhoon with a large eye: Model simulation and verification. *Mon Weather Rev*, 133: 725–742
- Zhang Q H, Kuo Y H, Chen S J. 2005b. Interaction between concentric eye-walls in super typhoon Winnie (1997). *Q J R Meteorol Soc*, 131: 3183–3204
- Zhang X R, Li Y, Zhang D L, Chen L S. 2018. A 65-yr climatology of unusual tracks of tropical cyclones in the vicinity of China’s coastal waters during 1949–2013. *J Appl Meteorol Climatol*, 57: 155–170
- Zhang Y, Xu Y L, Dong W J, Cao L J, Sparrow M. 2006. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model. *Geophys Res Lett*, 33: L24702
- Zhao C S, Tie X X, Lin Y P. 2006. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China. *Geophys Res Lett*, 33: L11814
- Zhao K, Li X F, Xue M, Jou B J D, Lee W C. 2012. Short-term forecasting through intermittent assimilation of data from Taiwan and mainland China coastal radars for Typhoon Meranti (2010) at landfall. *J Geophys Res*, 117: D06108
- Zhao K, Lin Q, Lee W C, Sun Y Q, Zhang F Q. 2016. Doppler radar analysis of triple eyewalls in Typhoon Usagi (2013). *Bull Amer Meteorol Soc*, 97: 25–30
- Zhao K, Wang M J, Xue M, Fu P L, Yang Z L, Chen X M, Zhang Y, Lee W C, Zhang F Q, Lin Q, Li Z H. 2017. Doppler radar analysis of a tornadic miniature supercell during the landfall of Typhoon Mujigae (2015) in South China. *Bull Amer Meteorol Soc*, 98: 1821–1831
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, Liu C H. 2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China. *Weather Forecast*, 28: 1081–1098
- Zhong L Z, Mu R, Zhang D L, Zhao P. 2015. An observational analysis of warm-sector rainfall characteristics associated with the 21 July 2012 Beijing extreme rainfall event. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 3274–3291
- Zhong S, Qian Y, Zhao C, Leung L R, Yang X Q. 2015. A case study of urbanization impact on summer precipitation in the Greater Beijing Metropolitan Area: Urban heat island versus aerosol effects. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 10903–10914
- Zhong W, Zhang D L, Lu H C. 2009. A theory for mixed vortex Rossby-gravity waves in tropical cyclones. *J Atmos Sci*, 66: 3366–3381
- Zhong W, Zhang D L. 2014. An eigenmode analysis of mixed Rossby-gravity waves on barotropic vortices. *J Atmos Sci*, 71: 2186–2203
- Zhou L, Kang I S. 2013. Influence of convective momentum transport on Mixed Rossby-Gravity Waves: A Contribution to tropical 2-Day waves. *J Atmos Sci*, 70: 2467–2475
- Zhu L, Wan Q L, Shen X Y, Meng Z Y, Zhang F Q, Weng Y H, Sippel J, Gao Y D, Zhang Y J, Yue J. 2016. Prediction and predictability of high-impact western Pacific landfalling tropical cyclone Vicente (2012) through convection-permitting ensemble assimilation of Doppler radar velocity. *Mon Weather Rev*, 144: 21–43
- Zou T, Zhang Q H, Li W H, Li J H. 2018. Responses of hail and storm days to climate change in the Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 45: 4485–4493

(责任编辑: 穆穆)