

龙卷数值模拟研究进展

姚聃

(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 龙卷尺度小、生命期短, 对其精细化观测十分困难, 数值模拟是可行而有效的分析研究工具。龙卷的数值模拟主要分为3类: 第一类龙卷模拟针对简化的类龙卷涡旋进行模拟, 研究龙卷的计算流体力学特征, 不考虑母体风暴; 第二类龙卷模拟以水平均匀初始场触发强对流过程, 研究超级单体风暴和其中生成的龙卷的精细化结构和演变过程, 其初始环境可以基于理想化或者实测探空廓线; 第三类龙卷模拟基于再分析资料和资料同化进行模拟, 研究实际环境中超级单体风暴触发环境及龙卷的形成过程。重点回顾龙卷数值模拟方法和主要工作进展, 分析影响龙卷数值模拟效果的关键问题, 包括龙卷生成机制、湍流过程与大涡模拟、数值敏感性以及受损物残骸等因素对龙卷模拟的影响。希望通过对这些工作的回顾促进我国龙卷数值模拟研究和龙卷预报预警业务。

关键词: 龙卷, 超级单体, 生成机制, 触发环境, 高分辨率, 大涡模拟

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.003

Recent Progresses in the Numerical Simulation of Tornadoes

Yao Dan

(State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Numerical simulation is a powerful and feasible method to investigate the genesis and structures of tornadoes, due to their too small sizes and short duration to be captured by observations. This article briefly reviews the progress in simulating tornadoes. Laboratory simulators and highly theoretical tornado simulations are introduced first, followed by idealized simulations initiated with soundings and initial perturbations, as well as real-scenario simulations initiated with reanalysis data and data assimilation techniques. Key scientific issues concerning tornado simulation will be discussed, including the mechanism in tornadogenesis, turbulence and large eddy simulation, sensitivity and predictability, as well as the impact of tornado debris. It is hoped that this review may provide some useful information for performing high-resolution modeling studies of tornadoes in China.

Keywords: tornado, supercell, tornadogenesis/formation mechanism, trigger environment, high resolution, large eddy simulation (LES)

0 引言

近年来, 我国重大龙卷灾害多次发生, 造成严重的人员伤亡和经济损失, 引起了全社会的广泛关注。例如, 2015年6月1日发生在湖北监利的“东方之星”客轮倾覆事件曾经被认为是由龙卷所造成的, 其死亡人数超过400人^[1]。2016年6月23日发生在盐城阜宁的EF4级强龙卷, 死亡人数高达98人^[2]。迫切需要针对我国龙卷发生机理和结构演变的理论研究工作, 为龙卷预报预警提供科学依据。

龙卷是剧烈旋转的小尺度涡旋系统。它往往形成于超级单体风暴的对流云底部, 直径仅有几十米至几

百米, 维持时间仅有几分钟到几十分钟。即便是在龙卷灾害严重、研究较为充分的美国, 针对龙卷的有效预警时间也仅有短短的十几分钟, 并且预报准确率十分有限^[3-4]。即使采用世界上最先进的高分辨率、快速扫描的移动雷达系统进行观测, 对于龙卷精细化结构和演变的分析研究仍然十分困难^[5]。对于龙卷的完整认识, 离不开重建其近地面层次的三维风场和热力结构, 而这正是现有观测的难点所在。数值模拟成为研究龙卷的生成环境、内部结构以及发生发展过程的重要手段。

龙卷的数值模拟可以划分为理想模拟与实际模拟两大类。具体而言又可以细分为以下几种类型: 1) 高度简化、不考虑母体风暴发展的计算流体力学模拟; 2) 基于理想化或者实测探空廓线、考虑母体风暴发展的理想模拟; 3) 基于再分析资料并结合资料

收稿日期: 2017年9月13日; 修回日期: 2018年3月13日

第一作者: 姚聃(1987—), Email: yaod@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(41705028); 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2017Y018)

同化的实际模拟。几类方法各有其特色与优势,着眼于解决不同尺度的龙卷动力学问题。本文将首先回顾龙卷数值模拟的主要方法和研究进展,然后讨论当前龙卷数值模拟研究中存在的主要问题,最后是对我国龙卷数值模拟研究的展望,以期为我国亟待加强的龙卷数值模拟研究和龙卷预报预警业务提供参考。

1 龙卷数值模拟的基本方法与研究成果

1.1 龙卷的计算流体力学模拟

最初的龙卷模拟采用的是实验室转盘装置^[6],随后衍生出与此相对应的计算流体力学数值模拟方法。这类模拟高度简化了龙卷的生成环境和母体对流风暴,而仅仅关注于类龙卷涡旋(tornado-like vortices)的生成和结构。基于该方法的龙卷数值模拟为理解龙卷涡旋的动力结构提供了依据。这些实验揭示了仅包含有上升运动的单核龙卷、包含有中心下沉气流的双核龙卷以及围绕中心旋转的多涡旋龙卷的基本形态^[7]。大量理论和模拟研究表明,龙卷在近地面的旋转可以达到比中层旋转强两个数量级的程度^[8]。龙卷生成与加强的核心问题在于,中层旋转在近地面如何加强。Lewellen等^[9-10]研究发现,近地面旋转与入流之间的拐角气流(corner flow)的崩溃过程对于龙卷的加强十分关键,近地面入流的差异是结构相似的超级单体能否产生龙卷的可能影响因子。

1.2 基于理想背景的龙卷模拟

尽管龙卷的计算流体力学模拟可以给出龙卷涡旋的流场结构,但其最主要的局限在于,模拟出的龙卷过程并不是在母体风暴中孕育形成的。为解决这一问题,采用三维非对称的非静力平衡模式的数值模拟工作应运而生。模拟的方案是在水平均匀初始场上叠加反映对流触发的初始扰动。初始场可以采用理想化的探空廓线生成,或者采用实际观测探空以及多探空合成的垂直廓线。前者可以测试热力场和风场对于超级单体和龙卷生成的影响及其机理,后者则通过采用实际龙卷个例的临近探空(proximity sounding)来模拟精细化的龙卷结构和演变过程,其优势在于可以使用有限的运算资源针对龙卷进行高分辨率精细模拟。初始扰动的方案有许多,最常用的是旋转椭圆形热泡(warm bubble)。Naylor等^[11]提出了强迫抬升(updraft-nudging)方案,控制初始对流的启动在一段时间内保持恒定。Letkewicz等^[12]设计了基态探空替换(base-state substitution)方案,在保留模式积分中已形成扰动的基础上实现了对环境场的调整。

Markowski等^[13]使用冷源与热源相互分离的干过程模拟测试了冷池强度与低层垂直风切变对龙卷生

成的影响,并指出,中等强度的冷池以及较强的垂直风切变是强近地面类龙卷涡旋发生的必要条件。Nowotarski等^[14]研究了切变对流边界层中,水平对流卷(horizontal convective rolls)的存在对于超级单体低层中气旋的影响机理。与水平均匀初始场相比,当超级单体移动方向与对流卷垂直时,其低层中气旋减弱;当超级单体移动方向与对流卷平行时,其低层中气旋加强。除了针对低层旋转增强机制的研究以外,Davenport等^[15]使用基态探空替换方案研究了环境场的不均匀性对于超级单体维持和消亡的影响。

Orf等^[16]对于实际龙卷过程进行了精细化理想模拟(图1)。该工作采用CM1模式^[17]R16版本进行,水平分辨率高达30 m。模拟初始场的探空廓线来自美国快速更新循环系统(Rapid Update Cycle, RUC)的1 h预报中,2011年5月24日俄克拉荷马州中部地区的一次EF5级龙卷过程的风暴右侧区域。该环境具有很大的不稳定能量(CAPE值为4893 J·kg⁻¹)及垂直风切变(0~6 km切变为27 m·s⁻¹)。模拟所得到的超级单体生命期超过2.5 h,并表现出典型超级单体特征,与观测接近。模拟中的龙卷达到EF5级,生命期为118 min,移动轨迹长度120 km;观测中的龙卷生命期为105 min,移动轨迹长度101 km。该模拟完整展现了龙卷的生成、维持和消亡过程。前侧下沉气流的流出边界处交替形成的正负涡度对沿着该边界向后侧移动,并在前侧和后侧下沉气流出流边界的交汇点聚集,逐渐形成龙卷涡旋。

Yao等^[18]针对造成严重破坏的2016年6月23日江苏省盐城市阜宁县EF4级龙卷进行了数值模拟(图2)。模拟使用CM1模式R18版本,采用伸缩网格设计将龙卷附近最高分辨率提升至25 m。模拟结果与雷达观测特征和灾害调查数据基本相符。模拟中的龙卷伴随有清晰的漏斗云,并呈现出已有研究中未受关注的双螺旋型结构。龙卷生成过程中,最初的信号是在云底降低的扰动气压,随之形成同时向上和向下发展的强垂直速度和涡度中心。龙卷消亡过程中,涡度中心出现下沉气流并显著增强,其维持受到抑制。分析表明,造成风灾的是超级单体内部相互影响的3个强风区域,而不仅是龙卷环流本身。

1.3 基于真实背景的龙卷模拟

随着计算技术的提升,对超级单体风暴乃至龙卷过程的直接模拟逐渐成为可能。Xue等^[19]采用ARPS模式对一次超级单体龙卷过程进行了数值模拟,其最内层网格的水平分辨率为50 m。通过在模拟中引入下垫面摩擦过程,该工作表明,地面摩擦作用产生的

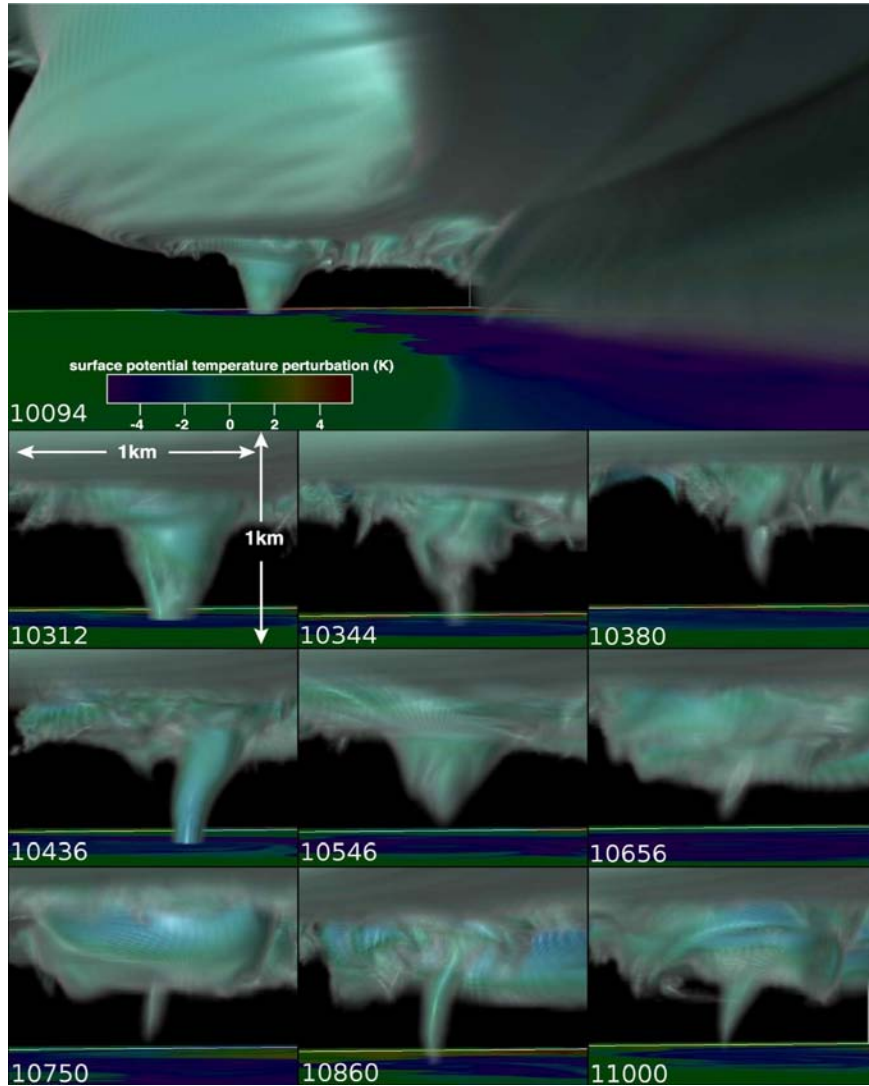


图1 美国俄克拉荷马州“5.24”龙卷数值模拟结果示例^[16]
Fig. 1 Simulated structure of the tornado on 24 May 2011 in El Reno, Oklahoma, U.S.^[16]

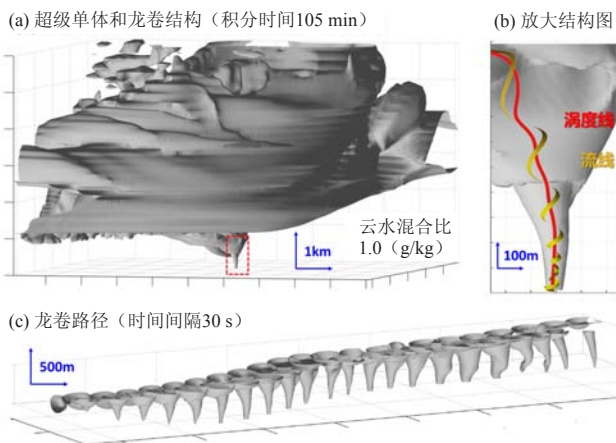


图2 江苏盐城“6.23”龙卷数值模拟结果示例^[17]
Fig. 2 Simulated structure of the tornado on 23 June 2016 in Funing County, Yancheng, Jiangsu Province^[17]

水平涡度是龙卷低层涡度的重要来源。在对于龙卷的实际模拟中，多普勒天气雷达资料的有效同化是改进模拟效果的重要保障。Mashiko^[20-21]使用日本气象厅研发的非静力平衡模式对2012年5月6日发生在筑波市（Tsukuba）的EF3级龙卷进行了数值模拟。该模拟采用的地形分辨率高达50 m，采用三重单向嵌套网格，最内层水平分辨率为50 m，近地面垂直分辨率为20 m。模式的初始场和边界条件采用了四维变分同化。对龙卷生成过程的环流分析表明，低层中气旋的增强来源于超级单体前侧阵风锋所造成的斜压性涡度，以及地表摩擦贡献^[20]；而龙卷形成的触发因子则是后侧下沉气流流出与抬升气流的交汇对后侧阵风锋斜压性涡度的抽吸作用^[21]。

在上述工作中，资料同化对于模拟效果起到了

重要的作用。为测试资料同化对于龙卷实际模拟和预报的效果, Supinie等^[22]采用VORTEX2外场观测试验中得到的多种资料进行对比测试。结果表明, 绝大多数移动雷达观测资料和加密观测的临近探空对于2009年6月5日Goshen龙卷过程的模拟都有正效果。具体而言, 上游入流区域的探空会造成入流速度的减弱, 从而造成风暴抬升强度的降低。抬升的增强和由此导致的低层涡旋拉伸作用的增大导致了预报后期抬升螺旋度(updraft helicity, UH)的增强。

需要指出的是, 资料同化对于龙卷实际模拟而言并非必不可少。Hanley等^[23]采用英国气象局一体化模式MetUM, 在不应用资料同化的条件下使用100 m分辨率模拟对2013年5月20日美国Moore龙卷进行模拟, 成功再现了超级单体结构、龙卷漏斗云以及近地面强风。尽管模拟结果存在位置和时间上的偏差, 其结果表明, 在缺少雷达资料进行边界强迫的条件下, 对龙卷性超级单体的高分辨率实际模拟是可能的, 这对于龙卷模式预报技术研究有重要意义。

除上述工作外, 由于计算资源的限制, 大多数实际模拟很难精细到龙卷的尺度。在这种情况下, 超级单体中所包含的抬升螺旋度及低层中气旋往往被用来作为识别龙卷的指标, 以研究龙卷形成的环境以及对龙卷的预报。Yokota等^[24]使用350 m分辨率数值模拟对发生在日本的一次龙卷过程的研究表明, 低层中气旋的模拟强度对于风暴前侧的低层辐合以及风暴后侧的低层相对湿度具有较强的敏感性, 近地面观测资料的有效同化对于龙卷的模式预报具有十分关键的影响。

此外, 也有一些工作采用水平非均匀场的模拟研究地形在龙卷生成过程中的作用机制。比如, 在同时受到山地和海气作用影响的地中海沿岸地区, 地形影响下的龙卷生成机制与美国大平原地区相比更加复杂。在降低山体高度以后, 山后形成的龙卷超级单体逐渐减弱; 当山体高度降低至20%以下, 背风坡涡旋显著减弱并不再形成超级单体^[25]。而针对墨西哥一次罕见夜间龙卷过程的数值模拟研究则表明, 适当降低山体高度会使得对流增强, 但山体高度继续降低后对流不再生成^[26]。

2 龙卷数值模拟的关键问题和研究趋势

2.1 龙卷的生成机制

目前比较成熟的理论认为, 典型的超级单体性龙卷的形成过程通常包含3个关键步骤: 1) 中层旋转形成中层中气旋, 2) 低层旋转形成低层中气旋, 3) 近地面旋转加强生成龙卷^[27]。由于中层中气旋的形成理论已然成熟, 研究的焦点在于近地面旋转的来

源和增强机制^[28]。有一些观测和模拟结果发现了超级单体冷池所产生的斜压区域对龙卷生成过程的重要影响^[14,29-30]。斜压理论强调了下沉气流的动力作用^[31-32]。在该理论中, 一个核心问题是, 相对于环境低层风切变而言, 冷池的强度必须适中: 过弱的冷池不足以形成足够的近地面涡旋, 而过强的冷池则不利于近地面涡旋维持在中气旋抽吸作用的范围内^[13,33]。

也有观点认为, 经典斜压理论夸大了斜压涡度生成机制的作用。在形成龙卷级别强涡旋的过程中, 下垫面的拖曳作用可能起到决定性的影响^[34]。对于涡度来源的诊断分析表明, 摩擦力的引入会增强低层垂直风切变产生近地面涡度, 并进一步增强低层中气旋的辐合, 显著提升数值模拟中龙卷的强度^[35]。除超级单体性龙卷以外, 对于同样可能产生龙卷以及近地面大风的弓形回波系统(bow echo)的中涡旋结构(mesovortex)的模拟研究也得到了相似的结果^[36-37]。同时, 在下垫面光滑的条件下, 垂直涡度在收缩和增强的过程中会在达到旋衡风平衡之后不再增长, 而摩擦力的存在则会破坏旋衡风平衡, 从而使龙卷涡旋继续收缩, 垂直涡度显著加强^[27]。这两种理论的正确性和适用条件仍在争议之中, 目前尚无定论^[38-39]。涡度来源和增长机制的模拟分析仍然是龙卷前沿研究中的焦点。

2.2 湍流过程与大涡模拟

越来越多的工作表明, 大涡模式的引入对于龙卷的数值模拟具有重要的促进作用。Rotunno等^[40]研究证实, 龙卷模拟中的不稳定性 and 湍流过程需要真实解析, 仅仅采用大涡模拟和参数化方案会带来较大差异。然而, 现有的龙卷大涡模拟工作中存在的一个主要问题在于, 所模拟的流场中(特别是产生关键影响的龙卷低层入流)是否真实包含了“大涡”过程^[38]。事实上, 在大多数工作中, 这一问题的答案是否定的, 即模拟中并未真正包含边界层湍流性涡旋^[8]。Bryan等^[41]采用将湍流场独立模拟并“注入”内层网格的方案以保证大涡模式对涡旋的真实解析。采用该方案模拟得到的龙卷在结构上与传统大涡模拟存在显著不同。该方案的验证、完善和推广有助于促进对于龙卷精细化结构的认知。

基于上述方案, Nolan等^[42]采用高度理想化的模拟方案首次研究了在完全解析湍流过程条件下龙卷涡旋的结构, 从而分析环境强迫机制、下垫面摩擦与龙卷涡度的结构、强度和风场的关系。分析表明, 龙卷内部的大涡结构会降低最大风速位置的实际风速, 对龙卷结构和演变过程的精细化数值模拟结果造成影响。

2.3 数值敏感性与可预报性

龙卷的数值模拟对于初始条件和物理参数化方案有着显著的敏感性。比如,大量研究表明,龙卷近地面涡度的增强对云物理参数化方案的选取十分敏感^[43-45]。云物理参数化方案会对数值模拟中风暴的结构和演变过程产生显著影响^[46]。三阶矩(3-moment, 又称三参数)微物理参数化方案的引入可以使得超级单体在回波结构、冷池强度以及偏振参数方面与观测更为接近^[45,47]。Dawson等^[43-44]研究证实,三阶矩方案可以有效改进对水汽相变潜热释放的模拟,进而显著调整龙卷低层入流的热力性质并最终影响龙卷垂直动量收支及其对近地面涡旋的拉伸作用。

对于实际模式的龙卷数值模拟和预报而言,目前最根本的制约还在于超级单体系统的可预报性局限。Markowski等^[48]指出,在简化的理想环境下,超级单体和龙卷的模拟对于冷池强度和位置的差别都有着很强的敏感性。在实际模拟中该敏感性将很有可能更大,从而制约其可预报性。Zhang等^[49]研究表明,模拟时间和地形设置等模式参数的微小改变在几小时的积分过程中足以产生误差,导致龙卷性超级单体模拟结果的显著差异。超级单体乃至龙卷的数值模拟存在着难以克服的可预报性问题^[50]。因此,在实际的业务中,单一确定性预报可能是行不通的,而需要集合模式^[51]来预报龙卷。

2.4 受损物残骸与龙卷强度

在现有的模式构架中,大气中的尘埃和受损物残骸并未予以考虑。然而,对于实际龙卷过程而言,其高度集中的残骸含量会对流场产生影响。Lewellen等^[52]采用相互耦合的双流体系统对气流和残骸分别进行模拟,发现龙卷环流中残骸与气流之间的相互作用十分复杂,会造成多普勒天气雷达对于龙卷结构观测的偏差。Bodine等^[53]使用大量的拉格朗日粒子表征残骸并进行模拟和追踪。研究表明,大量残骸的存在对龙卷最大风速的降低作用可以高达50%。也就是说,现有的不包含受损物残骸的模拟结果对龙卷风场存在不可忽视的高估。

需要指出的是,实际龙卷灾害中,受损物残骸的形状、材质和质量等是复杂多样的,难以通过统一的粒子模型进行描述。同时,即使实际风速下降,残骸的存在可能会带来相同甚至更大的冲量以及破坏力。更为重要的是,现有的龙卷强度和风速估计主要以灾害指示物的受损情况与EF等级标准所提供的风速查算表为依据,而其中并未考虑(也难以考虑)残骸存在对风速和实际破坏力的影响,因此灾害调查中对于龙

卷风速的估计也可能存在系统性偏差。合理引入受损指示物残骸的龙卷数值模拟对于科学认识龙卷和龙卷等级评定而言有着重要意义。

3 结论与展望

随着多普勒天气雷达站网的建立,我国龙卷研究逐渐增多,探索龙卷时空分布特征和发生规律^[54-55]。近年来,随着重大龙卷过程的发生,精细化龙卷灾害调查工作开始出现,我国龙卷灾情信息的完整性和科学性不断提升^[1,56-60]。有不少工作针对中气旋和龙卷式涡旋特征(tornadic vortex signature, TVS)进行分析^[61-62],并结合对天气形势和探空环境的诊断分析,研究了我国不同区域龙卷个例的特征^[63]、发生机制^[64-74]以及基于雷达产品的龙卷监测和预警方法^[75-79]。还有一些工作基于常规观测和再分析资料研究我国龙卷的生成环境以及有利于龙卷形成的探空指标^[80-83]。然而,已有研究工作大多停留于天气尺度的大气环流形势分析,受到观测资料的限制只能达到钩状回波(hook echo)、中气旋和TVS的尺度,难以深入到接近龙卷尺度的特征^[84-86]。对龙卷本体结构和演变的直接观测仍然十分困难。以现有技术而言,基于观测分析研究龙卷存在短期内难以逾越的技术瓶颈。

在数值模拟方面,国内有部分研究工作尝试针对龙卷事件的天气背景和环流形势进行模拟^[87-92]。近年来已有研究团队开始引入资料同化和集合预报思想开展更为精细的数值模拟,可以成功捕捉超级单体的生成和演变,并且以抬升螺旋度为标准考察中气旋和近地面涡旋中心的生长^[49-50,93]。然而,受到模拟技术和计算资源的限制,针对龙卷本体和漏斗云结构的数值模拟研究依然十分缺少^[18]。可分辨龙卷尺度的数值模拟目前仍然是我国龙卷研究领域的关键技术难题。

当前,龙卷的研究主要存在以下3方面的问题。第一,现有的模拟工作往往难以深入到龙卷尺度,部分研究过度理想化。第二,国际上对于龙卷发生发展机理的现有认知主要以美国龙卷个例为基础,其规律是否适用于我国天气气候背景下的龙卷目前还没有答案。同时,针对龙卷涡度来源的研究仍没有定论,而对于龙卷维持和消亡的研究则更为不足。第三,我国的龙卷研究受到观测资料和模拟手段的限制,难以深入到龙卷本体的精细化结构。值得注意的是,我国龙卷的形成环境与美国大平原地区不同,切变和不稳定能量往往较弱,而水汽条件则更为充足,并常伴随有大范围强降水发生。也就是说,我国龙卷的冷池特征与美国经典模型可能不同,其形成机制也很有可能存在差异。因此,对于我国龙卷的研究工作

将很有可能对现有龙卷理论进行补充和完善。

在当前条件下,通过理想模拟与实际模拟相结合的研究手段,开展针对我国龙卷个例的数值模拟研究具有较大可行性,可以深入了解我国典型龙卷的发生机理和结构演变,并与美国龙卷过程进行对比,得到我国典型气候环境下的龙卷发生发展概念模型。这一方面可以增进了解我国特殊的地理和天气背景下龙卷的发生发展机制,还将有可能完善国际上关于龙卷形成机制的现有理论体系,具有重要的科学意义和实际应用价值。

致谢:作者感谢美国马里兰大学张大林教授、美国国家环境预报中心杜钧教授以及两位匿名审稿人对本文的帮助和指导。感谢北京大学孟智勇教授、美国俄克拉荷马大学薛明教授、美国宾夕法尼亚州立大学张福青教授和Paul Markowski教授的讨论和指导。

参考文献

- [1] Meng Z, Yao D, Bai L, et al. Wind estimation around the shipwreck of oriental star based on field damage surveys and radar observations. *Science Bulletin*, 2016, 61(4): 330-337, doi:10.1007/s11434-016-1005-2.
- [2] Xue M, Zhao K, Wang M, et al. Recent significant tornadoes in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(11): 1209-1217, doi:10.1007/s00376-016-6005-2.
- [3] Wurman J, Dowell D, Richardson Y, et al. The second verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX2. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(8): 1147-1170, doi:10.1175/BAMS-D-11-00010.1.
- [4] Anderson-Frey A K, Richardson Y P, Dean A R, et al. Investigation of near-storm environments for tornado events and warnings. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(6): 1771-1790, doi:10.1175/waf-d-16-0046.1.
- [5] Wurman J, Kosiba K, Robinson P. In Situ, Doppler radar, and video observations of the interior structure of a tornado and the wind-damage relationship. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(6): 835-846, doi:10.1175/BAMS-D-12-00114.1.
- [6] Church C R, Snow J T, Agee E M. Tornado vortex simulation at Purdue university. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1977, 58(9): 900-908, doi:10.1175/1520-0477(1977)058<0900:tvapu>2.0.co;2.
- [7] Rotunno R. The fluid dynamics of tornadoes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2013, 45(1): 59-84, doi:10.1146/annurev-fluid-011212-140639.
- [8] Lewellen D C, Lewellen W S, Xia J. The influence of a local swirl ratio on tornado intensification near the surface. *Journal Of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(4): 527-544, doi:10.1175/1520-0469(2000)057<0527:tioals>2.0.co;2.
- [9] Lewellen D C, Lewellen W S. Near-surface vortex intensification through corner flow collapse. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(7): 2195-2209, doi:10.1175/jas3966.1.
- [10] Lewellen D C, Lewellen W S. Near-surface intensification of tornado vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(7): 2176-2194, doi:10.1175/jas3965.1.
- [11] Naylor J, Gilmore M S. Convective initiation in an idealized cloud model using an updraft nudging technique. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(11): 3699-3705, doi:10.1175/mwr-d-12-00163.1.
- [12] Letkewicz C E, French A J, Parker M D. Base-state substitution: an idealized modeling technique for approximating environmental variability. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(9): 3062-3086, doi:10.1175/mwr-d-12-00200.1.
- [13] Markowski P M, Richardson Y P. The influence of environmental low-level shear and cold pools on tornadogenesis: insights from idealized simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 71(1): 243-275, doi:10.1175/jas-d-13-0159.1.
- [14] Nowotarski C J, Markowski P M, Richardson Y P, et al. Supercell low-level mesocyclones in simulations with a sheared convective boundary layer. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(1): 272-297, doi:10.1175/mwr-d-14-00151.1.
- [15] Davenport C E, Parker M D. Impact of environmental heterogeneity on the dynamics of a dissipating supercell thunderstorm. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(10): 4244-4277, doi:10.1175/mwr-d-15-0072.1.
- [16] Orf L, Wilhelmson R, Lee B, et al. Evolution of a long-track violent tornado within a simulated supercell. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(1): 45-+, doi:10.1175/bams-d-15-00073.1.
- [17] Bryan G H, Fritsch J M. A benchmark simulation for moist nonhydrostatic numerical models. *Monthly Weather Review*, 130(12): 2917-2928, doi:10.1175/1520-0493(2002)130<2917:ABSFMN>2.0.CO;2.
- [18] Yao D, Xue H, Yin J, et al. Investigation into the formation, structure and evolution of an EF4 tornado in east china using a high-resolution numerical simulation. *Journal of Meteorological Research*, 2018, 32(2): 157-171, doi:10.1007/s13351-018-7083-0.
- [19] Xue M, Hu M, Schenkman A D. Numerical prediction of the 8 May 2003 Oklahoma city tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the assimilation of WSR-88D data. *Weather and Forecasting*, 2014, 29(1): 39-62, doi:10.1175/waf-d-13-00029.1.
- [20] Mashiko W. A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba city supercell tornado. Part I: vorticity sources of low-level and midlevel mesocyclones. *Monthly Weather Review*, 2015, 144(3): 1069-1092, doi:10.1175/mwr-d-15-0123.1.
- [21] Mashiko W. A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba city supercell tornado. Part II: mechanisms of tornadogenesis. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(9): 3077-3098, doi:10.1175/mwr-d-15-0122.1.
- [22] Supinie T A, Jung Y, Xue M, et al. Impact of VORTEX2 observations on analyses and forecasts of the 5 June 2009 Goshen county, Wyoming, supercell. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(1): 429-449, doi:10.1175/mwr-d-15-0171.1.
- [23] Hanley K E, Barrett A I, Lean H W. Simulating the 20 May 2013 Moore, Oklahoma tornado with a 100-metre grid-length NWP model. *Atmospheric Science Letters*, 2016, 17(8): 453-461, doi:10.1002/asl.678.
- [24] Yokota S, Seko H, Kunii M, et al. The tornadic supercell on the Kanto plain on 6 May 2012: polarimetric radar and surface data assimilation with EnKF and ensemble-based sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 2015, 144(9): 3133-3157, doi:10.1175/mwr-d-15-0365.1.
- [25] Miglietta M M, Mazon J, Rotunno R. Numerical simulations of a tornadic supercell over the Mediterranean. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(3): 1209-1226, doi:10.1175/waf-d-16-0223.1.
- [26] Barrett B S, Farfan L M, Raga G B, et al. The unusual early morning tornado in Ciudad Acuna, Coahuila, Mexico, on 25 May 2015. *Monthly Weather Review*, 2017, 145: 2049-2069, doi:10.1175/mwr-d-16-0252.1.
- [27] Davies-Jones R. A review of supercell and tornado dynamics. *Atmospheric Research*, 2014: 158, 274-291, doi:10.1016/j.atmosres.2014.04.007.
- [28] Markowski P, Richardson Y. What we know and don't know about tornado formation. *Physics Today*, 2014, 67(9): 26-31, doi:10.1063/pt.3.2514.
- [29] Bluestein H B, Weiss C C, French M M, et al. The structure of tornadoes near Attica, Kansas, on 12 May 2004: high-resolution, mobile, Doppler radar observations. *Monthly Weather Review*, 135(2): 475-506, doi:10.1175/mwr3295.1.

- [30] Markowski P, Richardson Y, Marquis J, et al. The pretornadic phase of the Goshen County, Wyoming, Supercell of 5 June 2009 intercepted by VORTEX2. Part II: intensification of low-level rotation. *Monthly Weather Review*, 2011, 140(9): 2916-2938, doi:10.1175/mwr-d-11-00337.1.
- [31] Davies-Jones R, Markowski P. Lifting of ambient air by density currents in sheared environments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(4): 1204-1215, doi:10.1175/jas-d-12-0149.1.
- [32] Davies-Jones R. Can a descending rain curtain in a supercell instigate tornadogenesis barotropically? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65(8): 2469-2497, doi:10.1175/2007jas2516.1.
- [33] Schultz D M, Richardson Y P, Markowski P M, et al. Tornadoes in the central United States and the "Clash of Air Masses". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 95(11): 1704-1712, doi:10.1175/bams-d-13-00252.1.
- [34] Schenkman A D, Xue M, Hu M. Tornadogenesis in a high-resolution simulation of the 8 May 2003 Oklahoma city supercell. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(1): 130-154, doi:10.1175/jas-d-13-073.1.
- [35] Roberts B, Xue M, Schenkman A D, et al. The role of surface drag in tornadogenesis within an idealized supercell simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(9): 3371-3395, doi:10.1175/jas-d-15-0332.1.
- [36] Cao S, Wang J, Cao J, et al. Experimental study of wind pressures acting on a cooling tower exposed to stationary tornado-like vortices. *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 145: 75-86, doi:10.1016/j.jweia.2015.06.004.
- [37] Schenkman A D, Xue M. Bow-echo mesovortices: a review. *Atmospheric Research*, 2016, 170: 1-13, doi:10.1016/j.atmosres.2015.11.003.
- [38] Markowski P M, Bryan G H. LEs of laminar flow in the PBL: a potential problem for convective storm simulations. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(5): 1841-1850, doi:10.1175/mwr-d-15-0439.1.
- [39] Markowski P M. An idealized numerical simulation investigation of the effects of surface drag on the development of near-surface vertical vorticity in supercell thunderstorms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(11): 4349-4385, doi:10.1175/jas-d-16-0150.1.
- [40] Rotunno R, Bryan G H, Nolan D S, et al. Axisymmetric tornado simulations at high Reynolds number. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(10): 3843-3854, doi:10.1175/jas-d-16-0038.1.
- [41] Bryan G H, Dahl N A, Nolan D S, et al. An eddy injection method for large-eddy simulations of tornado-like vortices. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(5): 1937-1961, doi:10.1175/mwr-d-16-0339.1.
- [42] Nolan D S, Dahl N A, Bryan G H, et al. Tornado vortex structure, intensity, and surface wind gusts in large-eddy simulations with fully developed turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74(5): 1573-1597, doi:10.1175/jas-d-16-0258.1.
- [43] Daniel T, Dawson I, Xue M, et al. Sensitivity of real-data simulations of the 3 May 1999 Oklahoma city tornadic supercell and associated tornadoes to multimoment microphysics. Part II: analysis of buoyancy and dynamic pressure forces in simulated tornado-like vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73: 1039-1061, doi:10.1175/jas-d-15-0114.1.
- [44] Dawson D T, Xue M, Milbrandt J A, et al. Sensitivity of real-data simulations of the 3 May 1999 Oklahoma city tornadic supercell and associated tornadoes to multimoment microphysics. Part I: storm- and tornado-scale numerical forecasts. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(6): 2241-2265, doi:10.1175/mwr-d-14-00279.1.
- [45] Dawson D T, Xue M, Milbrandt J A, et al. Comparison of evaporation and cold pool development between single-moment and multimoment bulk microphysics schemes in idealized simulations of tornadic thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 2010, 138: 1152-1171, doi:10.1175/2009mwr2956.1.
- [46] Dawson D T, Wicker L J, Mansell E R, et al. Impact of the environmental low-level wind profile on ensemble forecasts of the 4 May 2007 Greensburg, Kansas, tornadic storm and associated mesocyclones. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(2): 696-716, doi:10.1175/mwr-d-11-00008.1.
- [47] Dawson D T, Mansell E, Jung L, et al. Low-level Z(DR) signatures in supercell forward flanks: the role of size sorting and melting of hail. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(1): 276-299, doi:10.1175/jas-d-13-0118.1.
- [48] Markowski P M, Richardson Y P. Large sensitivity of near-surface vertical vorticity development to heat sink location in idealized simulations of supercell-like storms. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 74: 1095-1104, doi:10.1175/jas-d-16-0372.1.
- [49] Zhang Y J, Zhang F Q, Stensrud D J, et al. Practical predictability of the 20 May 2013 tornadic thunderstorm event in Oklahoma: sensitivity to synoptic timing and topographical influence. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(8): 2973-2997, doi:10.1175/mwr-d-14-00394.1.
- [50] Zhang Y, Zhang F, Stensrud D J, et al. Intrinsic predictability of the 20 May 2013 tornadic thunderstorm event in Oklahoma at storm scales. *Monthly Weather Review*, 2016, 144: 1273-1298.
- [51] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. *气象科技进展*, 2014(5): 6-20.
- [52] Lewellen D C, Gong B, Lewellen W S. Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 65(10): 3247-3262, doi:10.1175/2008jas2686.1.
- [53] Bodine D J, Maruyama T, Palmer R D, et al. Sensitivity of tornado dynamics to soil debris loading. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(7): 2783-2801, doi:10.1175/jas-d-15-0188.1.
- [54] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. *气象*, 2015, 41(7): 793-805.
- [55] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. *气象学报*, 2015, 73(3): 425-441.
- [56] Meng Z Y, Yao D. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. *Weather and Forecasting*, 2014, 29(3): 702-724, doi:10.1175/waf-d-13-00052.1.
- [57] 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等. "东方之星"客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析. *气象*, 2016, 42(1): 1-13.
- [58] Zhao K, Wang M, Xue M, et al. Doppler radar analysis of a tornadic miniature supercell during the landfall of typhoon mujigae (2015) in South China. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(9): 1821-1831.
- [59] 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计. *气象*, 2016, 42(11): 1289-1303.
- [60] 李兆慧, 王东海, 麦雪湖, 等. 2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析. *气象学报*, 2017, doi:10.11676/qxxb2017.013.
- [61] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒雷达分析. *高原气象*, 2006, 25(5): 914-924.
- [62] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 2003年7月8日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析. *气象*, 2004, 30(1): 38-40.
- [63] 刘勇, 王川. 陕西龙卷的统计和中尺度特征. *陕西气象*, 1998, 6-9.
- [64] 周后福, 施丹平, 刁秀广, 等. 2013年7月7日苏皖龙卷环境场与雷达特征分析. *干旱气象*, 2014, 32(3): 415-423.
- [65] 徐学义, 赵振东, 梁红新. 三次非超级单体龙卷风暴多普勒雷达特征对比分析. *高原气象*, 2014, 33(4): 1164-1172.
- [66] 李云艳, 郑艳, 杨仁勇. 一次龙卷天气过程中小尺度特征分析. *农业灾害研究*, 2014, 4(5): 34-37.
- [67] 李改琴, 许庆娥, 吴丽敏, 等. 一次龙卷风天气的特征分析. *气象*, 2014, 40(5): 628-636.
- [68] 张一平, 俞小鼎, 吴蓁, 等. 区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析. *气象学报*, 2012, 70(5): 961-973.
- [69] 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气. *气象*, 2012, 38(11): 1330-1338.
- [70] 周后福, 郭品文, 张建军, 等. 一次苏皖龙卷的多普勒雷达分析及其成因探讨. *科技导报*, 2009, 27(7), 80-84, doi:10.3321/j.issn:1000-7857.2009.07.018.
- [71] 吴海英, 沈树勤, 蒋义芳, 等. 龙卷诱发原因的实例分析. *气象科学*, 2009, 19(3): 335-341.
- [72] 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌, 等. 070703天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征. *气象*, 2009, 32(10): 32-39.
- [73] 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单

- 体风暴研究. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [74] 姚叶青, 俞小鼎, 郝莹, 等. 两次强龙卷过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析. 热带气象学报, 2007, 23(5): 483-490.
- [75] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [76] 刁秀广, 万明波, 高留喜, 等. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警. 气象, 2014, 40(6): 668-677.
- [77] 姚叶青, 郝莹, 张义军, 等. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警. 高原气象, 2012, 31(6): 1721-1730.
- [78] 李延江, 孙丽华, 杨梅. 一次山区龙卷的双部雷达回波监测分析. 高原气象, 2011, 30(6): 1701-1708.
- [79] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.
- [80] 王霁吟, 陈宝君, 宋金杰, 等. 基于再分析资料的我国龙卷发生环境和通用龙卷指标. 气候与环境研究, 2015, 20(4): 411-420.
- [81] 周后福, 刁秀广, 夏文梅, 等. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析. 气象学报, 2014, 72(2): 306-317.
- [82] 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征. 气象学报, 2013, 71(2): 209-227.
- [83] 王毅, 郑媛媛, 张晓美, 等. 夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究. 气象, 2012, 38(12): 1473-1481.
- [84] 朱江山, 刘娟, 边智, 等. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究. 气象, 2015, 41(2): 182-191.
- [85] 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. 气象, 2015(8): 942-952.
- [86] 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析. 气象, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [87] 刘宁微, 马雁军, 刘晓梅, 等. 辽宁省“05-6”龙卷风过程的诊断与数值模拟. 自然灾害学报, 2007, 16(5): 84-90.
- [88] 吕丽, 肖辉, 吕博. 一次龙卷过程的WRF模拟及多普勒雷达反演风场研究. 安徽农业科学, 2014(17): 5598-5603, 5659, doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2014.17.094.
- [89] 张玲, 张艳玲, 陆汉城, 等. 不稳定能量参数在一次强对流天气数值模拟中的应用. 南京气象学院学报, 2008, 31(2): 192-199.
- [90] 周后福, 郭品文, 翟菁. 两类强对流天气过程的模式模拟及其比较. 热带气象学报, 2010, 26(3): 379-384.
- [91] 赵海军, 刁秀广, 王庆华, 等. 非超级单体龙卷风暴低层流场特征及模拟分析. 山东气象, 2016, 36(2): 1-9, doi:10.3969/j.issn.1005-0582.2016.02.001.
- [92] 曾明剑, 吴海英, 王晓峰, 等. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析. 气象, 2016, 42(3): 280-293.
- [93] Xue M. Preface to the special issue on the “observation, prediction and analysis of severe convection of China” (OPACC) national “973” project. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(10): 1099-1101, doi:10.1007/s00376-016-0002-3.

(上接27页)

际上在该方面也没有成功的探究, 也没有固定方法可循。这里只是起了一个抛砖引玉的作用, 希望读者对该方面有兴趣共同探究。最后, 如果龙卷是从云中掉下来的, 甚至不到地面, 那还要与水物质相态转换及潜热释放有关, 这里不再阐述。

参考文献

- [1] Xue M, Zhao K, Wang M, et al. Recent significant tornadoes in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(11): 1209-1217.
- [2] Agee E M, Snow J T, Clare P R. Multiple vortex features in the tornado cyclone and the occurrence of tornado families. *Monthly Weather Review*, 1976, 104: 552-563.
- [3] Alexander C R, Wurman J. The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part I: the structural evolution and environment of the tornadoes. *Monthly Weather Review*, 2005, 133: 72-97.
- [4] Bluestein H B. A tornadic supercell over elevated, complex terrain: the divide, colorado, storm of 12 July 1996. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(3): 795-809.
- [5] Bluestein H B. A review of ground-based, mobile, W-band Doppler-radar observations of tornadoes and dust devils. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2005, 40(3): 163-188.
- [6] Brown R A, Wood V T. The tornadic vortex signature: an update. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(2): 525-530.
- [7] Davies-Jones R P. Tornadogenesis in supercell storms: What we know and what we don't know. Extended abstracts, 23rd Conference on Severe Local Storms, November 6-10, St. Louis, MO, American Meteorological Society, Boston, 2006. https://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/meeting_Annual2006.htm
- [8] Davies-Jones P R. Can a descending rain curtain in a supercell instigate tornadogenesis barotropically? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65(8): 2469-2497.
- [9] Meng Z, Yao D. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. *Weather and Forecasting*, 2014, 29(3): 702-724.
- [10] Yang S, Zuo Q J, Gao S T. Image of local energy anomaly during a heavy rainfall event. *Chinese Physics B*, 2017, 26(11): 119201. doi: 10.1088/1674-1056/26/11/119201.
- [11] Aris R. Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics. Prentice-Hall, 1962: 268.