

赵思雄,孙建华.陶诗言院士对暴雨科学研究与预报的若干重大贡献[J].暴雨灾害,2012,31(4):293-297

ZHAO Sixiong, SUN Jianhua. Acad./Prof. Tao Shiyan' important contribution to research and prediction of heavy rainfall [J]. Torrential Rain and Disasters, 2012, 31(4): 293-297

陶诗言院士对暴雨科学研究与预报的若干重大贡献

赵思雄,孙建华

(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

中图法分类号: P457.6 文献标志码: E doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2012.04.001

引言

中国科学院资深院士、中国科学院大气物理研究所研究员、原中国科学院大气物理研究所代所长、中国气象学会理事长、名誉理事长陶诗言先生因病医治无效,于2012年12月17日14时14分在北京逝世,享年95岁。陶诗言院士是我国现代气象预报理论和方法的开拓者和奠基人之一,是国际知名的季风领域专家。他曾长期担任国内外学术组织的重要职务,获得过多项国家重要科学奖励,培育了大批大气科学和气象领域的杰出人才,在国内外同行中享有大师美誉。作为一代宗师,他的成就是多方面的,其影响深远,涉及大气物理、天气学、气候学、卫星气象学、中尺度天气动力学、大气污染及大气环境等专业领域,成果丰硕。他的不幸逝世是我国气象事业的巨大损失。为了缅怀陶诗言院士的卓越功绩,受武汉暴雨研究所和《暴雨灾害》编辑部之托,本文着重回顾了他在暴雨科学研究与预报方面的重大贡献,期望继承先生遗愿,与广大气象界同仁共勉,将暴雨研究引向深入,同时将预报工作做得更好。

1 潜心暴雨科学研究成果丰硕

我国地处亚洲季风区,是世界上暴雨最多的国家之一。24 h和72 h(即1 d和3 d)降水量的世界极值均出现在中国,其危害十分严重。我国历史上洪水灾害频发,由于其预报难度大,暴雨洪涝至今仍然是我国面临的严峻问题之一,迫切需要解决。现代气象学有近百年发展历史,环流和天气系统的预报取得长足进步,但作为要素预报的暴雨预报相对进展缓慢,直到新的观测手段尤其是高空探测网及雷达、卫星遥感的出现,近30年来才取得较快进步。

以江淮流域梅雨研究和预报为例,自20世纪30年代以来,其间大体历经四个研究阶段:气团学说阶段,大气环流演变阶段,梅雨锋(含 α 中尺度系统)阶段及更细的 β 中尺度系统阶段。竺可桢先生与涂长望先生从气团角度作了开创性研究,陶诗言、谢义炳和黄土松等前辈将其作了进一步发展。陶先生多次跨越式地将暴雨研究和预报首先推进到环流研究阶段,后又推进到中尺度系统研究阶段。他利用当时很难获取的探空资料,从大气环流的观点出发,探讨梅雨的开始和结束时期,亚洲大气环流季节变化特征,写出第一篇系统研究我国梅雨问题的科学论文^[1];又与地球物理研究所(今中科院大气物理研究所)同仁一道率先在国际刊物Tellus上以“On the general circulation over the East Asia”为题连续发表3篇文章^[2-4],论述东亚大气环流的特征,为日后暴雨研究和预报打下坚实基础。这些论文具有高度的原创性和前瞻性,其学术价值和应用价值均很高。在20世纪50年代末,中国学者能有如此突出表现,在国外著名刊物上发表国际一流论文,使长期“沉默”于所谓“铁幕”之后的中国气象界露出“庐山真面目”,令国际学术界刮目相看。他的上述论文被誉为经典之作,当之无愧。他还与叶笃正先生一道,揭示了6月和8月亚洲大陆上空大气环流的突变^[5],对这一深层次科学问题作了研究,即从大气环流的观点研究梅雨问题,属源头创新之作,至今仍为国内外学者时常引用,更受到一线预报员的广泛应用。他在20世纪80年代针对“有关暴雨研究的一些问题”发表论文,反复提醒和指出暴雨研究中的若干科学热点问题^[6]。他多次强调,中尺度系统是暴雨的直接制造者。“75.8”河南特大暴雨过程中每天有10多个中尺度系统活动,尺度30~250 km,生命史数小时到10多个小时。他特别强调我国应深入研究 β 中尺

收稿日期:2012-12-25;定稿日期:2012-12-30

第一作者:赵思雄,主要从事灾害天气与中尺度气象学研究。E-mail: zhaosx@mail.iap.ac.cn

度系统的发生发展问题,这不但是一个中尺度动力学的关键问题,也是暴雨预报的瓶颈问题。陶先生为暴雨和中尺度天气动力学的发展指明了方向。

在多年研究工作积累的基础上,1980年陶先生完成我国第一部暴雨专著——《中国之暴雨》^[7],后又在几次国家重大科研项目中亲自主笔或任顾问指导完成多部专著^[8-13],其影响深远,使我国暴雨研究一直处于国际先进行列。他一再强调中国特色,并根据国情提出我国几类主要降水系统的概念模型,如气旋降水模型等。他指出,虽然在我国的气旋暴雨区内也存在着三支气流,但其气流来源、位置及其降水的作用,与国外的模型有很大不同。这些成果对我国降水预报的改进有重大的理论和实际意义。在他的指导下,该研究组成员还对与暴雨相关的物理图像作了深入研究,包括低空急流与暴雨的关系^[14],梅雨锋上扰动与中尺度涡旋的发生发展及能量转换^[15,16],并对这些重要系统作了数值模拟研究^[17]。

陶诗言院士生前十分关心暴雨业务预报的发展,一直致力于将相关科学成果转化为业务应用。他努力探索暴雨预报方法及思路。例如,他和同事建立了东亚季风区特大暴雨洪涝灾害的天气学概念模型^[9],并指出季风区天气尺度环流系统时-空位相锁定是江淮流域大暴雨洪涝灾害的主要原因。该模型对夏季长江、淮河流域洪涝灾害预报有重要的指导作用;还提出了“配料法”等暴雨预报方法^[18],并较好地运用于实际预报中。

陶诗言院士在海峡两岸气象界同仁中享有崇高威望,被众多台湾学者尊为“陶大师”。20世纪80年代初,《中国之暴雨》一书难求,一位台湾教授急于得到,愿以数倍于其定价的“高价”求大陆朋友转让一本(注:之所以不复印,据说复印整书违法)。由于陶先生的突出贡献,他被台湾中国文化大学授予荣誉理学博士学位。

2 倾心暴雨天气预报有功于国

陶诗言先生在国家重大建设任务和国防等重要气象保障任务中做出了具有历史意义的贡献。1950年中央军委气象局与中国科学院组建联合天气分析预报中心(简称“联心”),陶先生出任副主任(图1)。建国初期,资料奇缺,他和顾震潮先生一起埋头苦干,使“联心”为抗美援朝和国民经济建设提供了重要保障,立下不朽功勋。20世纪60年代他又多次奔赴“两弹”试验基地,出色地完成原子弹、氢弹及导弹试验的气象保障任务。陶先生先后荣立中国人民解放军一等功和二等功。

20世纪70年代初,根据形势需要,陶诗言先生首

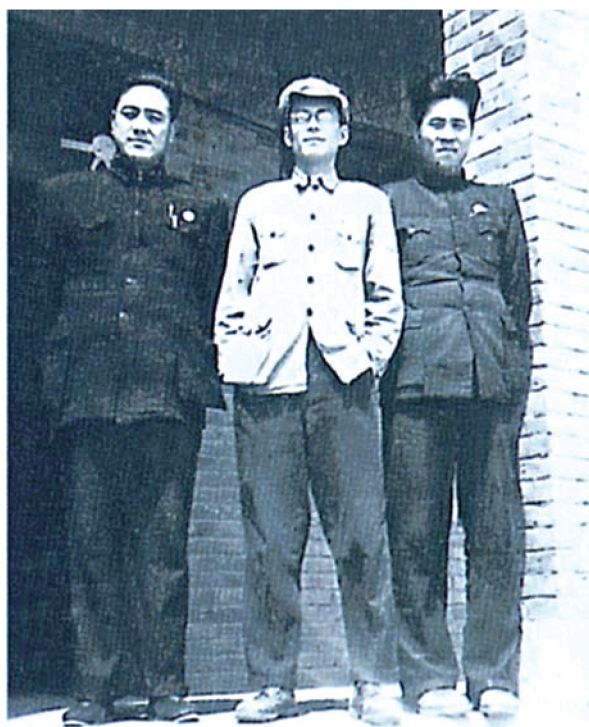


图1 1950年陶诗言先生(右一)任联合天气分析预报中心副主任时与曹恩爵副主任(左一)和顾震潮主任(中)在北京西郊

先在我国进行了卫星云图分析应用的开创性研究工作,为打破战时国外对气象资料的封锁作出贡献。在当时学术刊物停办的情况下,他推动出版了《卫星资料的分析应用论文集》(共7期),完成专著《气象卫星云图使用手册》等^[19,20]。鉴于当时的国际环境,他要求把主要精力集中于对华北暴雨、西太平洋和南海台风及高原东移系统的预报上,即使一旦有事,广大区域资料被封锁,对华北和北京,海洋及所谓第一岛链地区仍可想办法作出预报^[21]。他始终不忘暴雨灾害预报及其国防需要。著名气象学家、大气物理研究所第一任所长顾震潮先生,当年是上述7本论文集的忠实读者,他每期必读并作点评。顾先生曾说“这些文章目的明确,内容很实在,有用”。顾先生对陶先生等人工作的赞扬名副其实。由陶先生推动,并获两局(总参气象局、中央气象局)和湖北省气象局的大力支持,于1973年在武汉召开“第一次全国卫星资料接收和分析应用会议”,军地双方100多人与会,又于次年正式发行会议文集^[22]。这对日后在各部门进一步推广作了很好的铺垫。

陶先生身体力行,急国家所急。他对20世纪我国10次历史性大暴雨过程(包括“35.7”、“54.7”、“58.7”、“63.8”、“75.8”、“94.6”、“98.7”大暴雨)做了系统研究,成为我国对历史特大暴雨进行深入研究数量最多的第一人。1954年7月长江流域发生百年不遇特大洪水,汉口危在旦夕,当时陶诗言先生和他的同事作出

准确天气预报,预测暴雨即将终止,为汉口安全度汛提供了科学决策依据。1956年,他当选全国先进生产者。1963年8月上旬华北出现特大暴雨,陶诗言先生义不容辞担当起研究该暴雨过程的任务,招收研究生,收集大量资料,正要大刀阔斧开展工作时,“文化大革命”开始,该研究被迫中断。1975年8月上旬,当年3号台风在河南境内引发特大暴雨,板桥水库溃坝,损失惨重。大气物理所与空军气象学院(现为解放军理工大学)及北京大学合作进行攻关研究^[23, 24],这次攻关使中国科学院大气物理所20世纪70年代成为中国暴雨研究的先导,并促成该所暴雨研究组(后成为灾害天气和中小尺度动力学研究室)的成立。此后,丁一汇^[10]对1991年发生于江淮流域的大暴雨过程进行了较为全面的深入研究。陶诗言先生还对1994年6月发生于华南珠江流域的特大暴雨进行了研究,该次暴雨引发了1915年以来华南最严重的洪水。他指出这次洪水是1994年夏季环流异常所致^[25]。在他的推动和指导下,孙建华和赵思雄还对这次历史上破记录特大暴雨的具体影响天气系统和边界层的作用作了分析^[26, 27]。此后,陶先生及他指导的相关同仁又对著名的1998年7月下旬长江中游特大暴雨^[28-30]及新世纪大暴雨成因进行了研究^[31-36]。

后来,陶先生即便年事已高,仍十分关注21世纪以来的大暴雨和洪涝天气事件。如2010年情况较特别,主要雨带又回到长江和江南一带,春季以来降水明显偏多,5月就发生6次强降水,6、7月更是多次出现连续性强降水。原因何在?需要探索。2010年5月24日上午,92岁高龄的陶先生亲临大气物理研究所参加会商并进行分析、讲评(图2)。就在陶先生病逝前大约4个月即2012年7月21—22日,北京发生特大暴雨,百年不遇,死亡79人,损失惨重。他立即提出建议,敦促相关专家认真分析、开展研究。他未来得及听到对“7.21”暴雨研究成果的正式汇报就不幸逝世,所幸论文即将发表^[37],可借以告慰先生在天之灵。

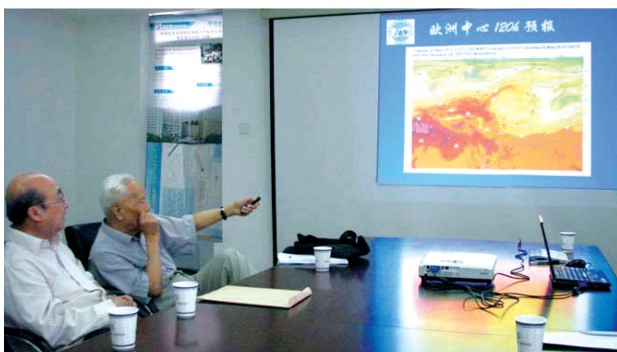


图2 2010年5月24日陶诗言院士(左二)参加大气物理所汛期会商并讲评

陶先生从“联心”以来,直至以90岁高龄之身仍每年多次应邀到中国气象局、国家海洋局等业务部门参加重大天气事件发生发展会商会,并给予指导,提出重要建议(图3)。他还指导并督促2008年夏季尤其是北京奥运会和残奥会期间的天气预测,这是国家下达给中国科学院的任务。为此,共写出9份快报,对总共4次开幕式和闭幕式的天气作了成功预测,经他拍板后,及时送出,向中科院、中央办公厅、国务院办公厅“专报”提供了有关信息。陶先生还亲自参加了关键时刻的多次会商,为奥运会气象保障作出重要贡献。



图3 1980年陶诗言先生在中央气象台参加天气会商

陶先生数十年来坚持大气物理研究所理论联系实际的优良传统,推动并参加该所每年汛期的天气会商和暴雨预报。他特别关注华南暴雨的开始和入梅、出梅以及华北“七下八上”暴雨等。他每天坚持看天气图,搜集最新信息,乐此不疲,直至生命最后时刻。每当重大暴雨事件发生,陶先生都要作“点评”。他要求不断从会商中凝练出科学问题,在预报中检验相关科学成果,每年要提交总结并正式发表^[38, 39]。

3 专心科学前沿勇于创新

陶诗言先生工作目的很明确,就是要为人民福祉无私奉献。由于暴雨等灾害天气有很强的地域性,以及我国地处世界最大的亚洲季风区,西靠世界最高的青藏高原,东邻世界最广阔的太平洋,地形、海陆分布使我国的暴雨及其它灾害天气系统十分复杂,国外已有的研究成果难于完全直接借鉴。因此,对于这些天气系统的成因及其预报的研究,必须首先和主要依靠我国的气象工作者完成,弄清其本质所在。陶先生不辞劳苦,做了大量深入细致的工作。他高度重视资料分析,以事实为依据,以科学为准绳,资料分析结果面前人人平等,该下什么结论就下什么结论。他多次强调,研究工作的结论要经得起历史和时间的检验。他是这样做的,也要求后人这样做。他不追赶潮流,多次主动将自己撰写的论文投给国内发行量较大的中文气象刊物,以便能让更多读者看到,获得更大实效,

而放弃了在国外SCI刊物发表的机会。他对自己的成果从不急于发表,有时甚至显出几分“倔强”,他时常要求后辈“多思考,慎发表”。一部《中国之暴雨》,先以油印本形式出现,后在全国暴雨培训班上讲授,最后才正式成书出版(1980年),此后又被他搁置了12年,1992年才在同仁们的反复劝说下同意报奖,并获中国科学院自然科学奖一等奖。陶先生这种淡薄名利、严谨求实的科研作风,对当今科学研究和科技人员依然具有感召力。

陶先生不唯书、不唯“洋”,只唯实。他绝不保守,精通英日德俄四种文字,一直密切关注和虚心学习国外先进成果,但绝不妄自菲薄、随意盲从。这才使得他在中国暴雨和东亚季风研究上都能独树一帜(图4)。早在20世纪70年代,他和他的同事就指出,东亚与北美的天气存在重要差异,前者多暴雨,而后者多龙卷,其根本原因在于两者环境条件差异很大,不可以简单地套用国外已有结果^[40]。为此,大气物理所同仁,在他的领导下还专门开展了“暴雨和其它强对流天气的研究”^[41]。上述对比研究结果使人们对暴雨物理图像有了更清晰的认识。此外,他和他的同事在对亚洲季风的创造性研究中,推翻并纠正了国外的一些错误和片面的看法。长期以来,西方学者一直误认为亚洲季风即印度季风。陶诗言和陈隆勋^[42]指出亚洲季风有印度季风和东亚季风两个分支,它们相互间既有联系又有区别,在不同时段和不同地域其相对重要性和相互作用等关系较为复杂,应根据具体情况作具体分析。这一研究成果不但澄清了国际上的某些偏见,而且为我国暴雨预报的改进提供了重要依据和正确思路。



图4 1975年中国气象学会代表团访美期间,陶诗言先生在美国国家飓风中心讲学

4 关心未来暴雨预报直至谢世

暴雨预报涉及到多种尺度天气系统和它们之间的相互作用,其难度很大。尽管如此,陶诗言先生仍

对未来暴雨预报的新进展充满信心,并为暴雨研究和预报的改进指明了努力的方向。他认为,除了要重视中尺度系统外,还要关注另一些重要内容,如中低纬系统的相互作用、南北半球系统的相互作用,以及季风的年际和年代际变化、ENSO、低频振荡及罗斯贝波列的影响,科研业务人员应视野开阔。例如,他强调,如果沿急流传播的罗斯贝波能量在110°E附近形成深厚的低压系统或使原有西风槽发展加深,天气尺度强迫产生强上升运动则非常有利于中国东部出现暴雨过程^[43]。他还指出,在引发致洪暴雨的环流系统中,季风涌的作用非常重要;来自赤道印度洋的MJO引起南海地区西风加强,从而触发华南出现季风涌,一旦与北方冷空气交绥可引发致洪暴雨^[44]。他关注中期、延伸期预报的进展,以解决持续性暴雨等面临的问题。他非常重视广大预报员从实践中得到的行之有效的经验,他支持精细数值预报模式的发展,认为人机互动是必由之路,且是今后相当长时期内需要不懈努力的方向。

陶先生和他的同事(2003年)曾对20世纪以来我国“天气学和天气预报的研究进展”进行过全面总结和论述^[45],他和老一辈科学家们卓有成效的工作为我国暴雨研究与预报打下坚实基础,值得后人倍加珍惜。继此之后,笔者最近有幸被邀请撰写一篇有关灾害天气研究的评论,曾得到陶先生的指点和教诲,在借鉴和学习他上述论文(2003年)的基础上,完成了《近年来灾害天气机理和预测研究的进展》一文^[46]。在该文付印过程中,陶先生与世长辞,从此永失聆听先生教诲之机缘,深为遗憾。

5 结束语

陶诗言院士离开了他眷恋的土地和熟悉的同事,却将一生奉献给了我国的气象事业。他的逝世是我国气象界的巨大损失。他对现代天气预报理论和方法的研究尤其是暴雨研究与预报做出的巨大贡献,让后人铭记和受益。他勤勤恳恳、兢兢业业、鞠躬尽瘁、死而后已的思想境界,虚怀若谷、光明磊落、淡泊名利、只求奉献的高尚情操,严谨求实、勇于创新、学而不厌、诲人不倦的治学精神,永远值得后人学习和敬仰。

参考文献

- [1] 陶诗言,赵煜佳,陈晓敏.中国之梅雨[G].中央气象局文集:第4号,1958
- [2] Tao Shiyuan, Staff Members of Academia Sinica. On the general circulation over the East Asia: I [J]. Tellus, 1958, 9: 432-446
- [3] Tao Shiyuan, Staff Members of Academia Sinica. On the general circulation over the East Asia: II [J]. Tellus, 1959, 10: 58-75

- [4] Tao Shiyun, Staff Members of Academia Sinica. On the general circulation over the East Asia: III [J]. *Tellus*, 1959, 10: 299–312
- [5] 叶笃正,陶诗言,李麦村.六月和十月大气环流的突变现象[J].*气象学报*,1958,29: 249–263
- [6] 陶诗言.有关暴雨研究的一些问题[J].*大气科学*,1977,1(1):64–72
- [7] 陶诗言,等.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980:1–225
- [8] 陶诗言,倪允琪,赵思雄,等.夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M].北京:气象出版社,2001:1–184
- [9] 陶诗言,张小玲,张顺利.长江流域梅雨锋暴雨灾害研究[M].北京:气象出版社,2004:1–192
- [10] 丁一汇.1991年江淮流域持续性特大暴雨研究[M].北京:气象出版社,1993:1–255
- [11] 赵思雄,陶祖钰,孙建华,等.长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M].北京:气象出版社,2004:1–281
- [12] 谈哲敏,赵思雄.我国南方 β 中尺度强对流系统结构与机理研究[M].北京:气象出版社,2010:1–327
- [13] 张庆云,王会军,林朝晖,等.中国天气气候的成因研究——2003年[M].北京:气象出版社,2004:1–170
- [14] 孙淑清,赵思雄.盛夏低空急流和北暴雨关系的研究[G]//中国科学院大气物理所集刊:第9号.北京:科学出版社,1980:117–124
- [15] 赵思雄.梅雨锋上扰动发生发展的能量分析[J].*大气科学(特刊)*,1988:503–510
- [16] Zhang Feng, Zhao Sixiong. A Study of formation and development of one kind of cyclone on the Mei-yu (Baiu) front [J].*Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21 (5): 741–754
- [17] 周晓平,赵思雄,张宝严.梅雨锋上中尺度低压发生发展的数值模拟实验[J].*大气科学*,1984,8(4):353–361
- [18] 张小玲,陶诗言,孙建华.基于“配料”的暴雨预报[J].*大气科学*,2010,34(4):754–766
- [19] 中国科学院大气物理研究所.气象卫星云图手册[G].北京:农业出版社,1973:1–120
- [20] 陶诗言,方宗义,李玉兰,等.气象卫星资料在我国天气分析和预报上的应用[J].*大气科学*,1979,3(3):239–246
- [21] 赵思雄.夏季华北低涡暴雨期间卫星云图特征分析[C]//中央气象局,中国科学院大气物理研究所,北大地球系卫星资料联合分析应用组论文集.1973(第5期):26–38
- [22] 赵思雄.由卷云罩估计台风高低空流场及强度的变化[C]//第一次全国卫星资料接收与分析应用会议文集.北京:科学出版社,1974:82–93
- [23] 丁一汇,蔡则怡,李吉顺.1975年8月上旬河南大暴雨的研究[J].*大气科学*,1978,2(4): 276–289
- [24] 赵思雄,周晓平.风场在预报暴雨发生中的作用——1975年8月上旬特大暴雨的数值实验[J].*大气科学*,1984,8(1):1–6
- [25] 陶诗言.1994年东亚夏季风活动的异常与华南的特大洪涝灾害 1:大气环流的异常[C]//1994年华南特大洪涝学术研讨会论文集.北京:气象出版社,1996:1–5
- [26] 孙建华,赵思雄.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 β 中尺度对流系统的数值模拟研究[J].*大气科学*,2002,26: 541–557
- [27] 孙建华,赵思雄.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[J].*大气科学*,2002,26(5):633–646
- [28] 陶诗言,张庆云,张顺利.1998年长江流域洪涝灾害的背景和大尺度环流条件[J].*气候与环境研究*,1998,3(4):290–299
- [29] 赵思雄,孙建华,陈红,等.1998年7月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究[J].*气候与环境研究*,1998,3(4):368–381
- [30] Bei Naifang, Zhao Sixiong, Gao Shouting. Numerical Simulation of a Heavy Rainfall Event in China during July 1998 [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2002, 80: 153–164
- [31] 孙建华,周海光,赵思雄.2003年7月3—5日淮河流域大暴雨中尺度对流系统的观测分析[J].*大气科学*,2006,30(6):1103–1118
- [32] 周玉淑,高守亭,邓国.江淮流域2003年强梅雨期的水汽输送特征分析[J].*大气科学*,2005,29(2):195–204
- [33] 夏茹娣,赵思雄.2005年6月广东锋前暖区暴雨 β 中尺度系统特征的诊断与模拟研究[J].*大气科学*,2007,33(3):468–488
- [34] 赵思雄,张立生,孙建华.2007年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析[J].*气候与环境研究*,2007,12(6):713–727
- [35] 赵琳娜,杨晓丹,齐丹,等.2007年淮河流域致洪暴雨的雨情和水情特征的分析[J].*气候与环境研究*,2007,12(6):728–737
- [36] 傅慎明,于翥,王东海,等.2010年梅雨期两类中尺度涡旋的对比研究[J].*中国科学*,2012,42(8):1282–1300.
- [37] 孙建华,赵思雄,傅慎明,等.2012年7月21日北京特大暴雨的多尺度特征[J].*大气科学*,2013,待刊
- [38] 孙建华,卫捷,赵思雄,等.2009年夏季异常天气及其环流分析[J].*气候与环境研究*,2011,16(2):209–220
- [39] 赵思雄.近年来江淮流域致洪暴雨特征分析[J].*气象与减灾研究*,2011,34(1):1–5
- [40] 陶诗言,丁一汇,周晓平.暴雨和强对流天气的研究[J].*大气科学*,1979,3(3):227–238
- [41] 暴雨及强对流天气的研究[M]//中国科学院大气物理研究所集刊:第9号.北京:科学出版社,1980:1–183
- [42] Tao Shiyun, Chen Longxun. A review of recent research on the East Asian Summer monsoon in China [M] // *Monsoon Meteorology*. Oxford University Press, 1988: 60–92
- [43] 陶诗言,卫捷,梁丰,等. Rossby波的上游效应引发我国高影响天气的分析[J].*气象*,2010,36(7):81–93
- [44] 陶诗言,卫捷.夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系[J].*气象*,2007,33(3):10–18
- [45] 陶诗言,赵思雄,周晓平,等.天气学和天气预报的研究进展[J].*大气科学*,2003,27(4):451–467
- [46] 赵思雄,孙建华.近年来灾害天气机理和预测研究的进展[J].*大气科学*,2013,37(2),待刊

注:文中所有照片的刊发,均征得陶诗言院士家属的同意。