

天气学和天气预报的研究进展^{*}

陶诗言 赵思雄 周晓平 纪立人 孙淑清 高守亭 张庆云

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 全面回顾了 75 年来中国科学院大气物理研究所科研人员在气团、锋面、梅雨、寒潮、阻高、副高、暴雨、高低空急流、亚澳季风区内涡旋和对流等现象的天气学研究进展及其在不同时期所取得的研究成果, 总结了在短中期天气预报及短期气候预测领域在模式发展和改进以及在数值模拟等方面所取得的成就和进展。同时指出模式发展和预测在中国数值天气预报及短期气候预测方面所做出的贡献。

关键词: 天气学; 天气预报; 数值模拟; 气候预测

1 20 世纪 70 年代前的天气学及天气预报研究

1928 年, 中国科学院大气物理研究所(简称大气物理所)的前身中央研究院气象研究所成立。为了开展天气分析和预报业务, 于 1930 年 1 月 1 日开始用天气图进行分析预报, 并开始了中国天气学的研究。1930 年, 吕炯^[1]发表的“极锋学说与长江流域之风录”一文是中国最早的天气学研究, 他指出的寒面(冷锋)、暖面(暖锋)与挪威学派的模型并不相同。1931 年长江流域出现严重洪涝灾害, 死亡人数达 31 万。1932 年, 沈孝凰^[2]根据挪威学派的锋面模型对这次暴雨进行天气分析。

20 世纪 30 年代, 气团学说在天气学中占有重要的地位。1936 年, 涂长望^[3]根据当时国内少量的风筝探空资料, 发表了“中国之气团”一文, 对各季各不同气团的性质作了分析。1938 年, 卢鋈^[4]总结 1930 年以来气象研究所天气分析和预报的实践, 撰写了专著《天气预告概论》, 尽管当时中国还没有探空资料, 地面观测台站也不到 40 个。

1949 年 10 月, 中华人民共和国成立。由于抗美援朝战争对天气预报的需要, 中国科学院地球物理研究所(简称地球物理所)与军委气象局在 1950~1954 年成立联合天气预报中心, 顾震潮、陶诗言、杨鉴初、朱抱真等 10 人参加这方面的任务。在实践中, 他们对东亚天气的预报积累了不少经验, 发表了大量论文。1952 年, 杨鉴初^[5]最早提出了单站长期预报方法。1954 年, 陶诗言^[6]对中国的寒潮作了较系统的研究总结, 指出我国冬季有四条主要寒潮路径, 并指出寒潮爆发是出现在亚欧上空长波调整的时段。高由禧和曾佑思^[7]根据 40 年资料, 做出西太平洋台风的路径图, 这是中国第一本比较系统性的台风路径图集。

1958 年, 陶诗言等^[8]根据中国的气候资料以及 1951~1957 年天气图资料, 对长江流域梅雨期的气候特点, 梅雨期的开始与结束与亚洲上空大气环流季节变化的关系, 梅雨期东亚的基本天气过程以及梅雨期暴雨的天气过程等问题做了分析, 这是中国第一篇有关梅雨问题系统研究的论文。叶笃正和顾震潮在 20 世纪 50 年代对青藏高原的动力作用和热力作用作了较系统的研究, 在 50 年代末, 他们与杨鉴初、陶诗言合作对青藏高原的作用以及高原上的天气特点作了全面的研究, 出版了专著《青藏高原气象学》^[9]。夏季, 长江、淮河流域持久性旱涝灾害是天气和气候预报中的重要问题。陶诗言和徐淑英^[10]根据 1954、1958、1961 年 7 月江淮流域持久性严重旱涝的天气、气候表现, 分析了副热带流型和中纬度环流异常的特点, 指出中纬度和副热带环流出现持续性异常环流时, 江淮流域出现持续性旱涝。亚洲上空阻塞高压的活动是中国中期天气预报中的难点。叶笃正等^[11]对北半球冬季阻塞形势, 特别是亚洲上空的阻塞形势的发生、发展、持续以及崩溃过程作了天气学分析及数值预报试验, 这对当时中国的中期天气预报有指导作用。

夏季, 中国副热带地区的西太平洋副热带高压、台风以及其他强对流天气的活动, 也是天气预报的中心内容之一。1965 年, 陶诗言等^[12]写出了《中国夏季副热带高压天气系统若干问题研究》, 系统概括了这些天气系统的发生、发展过程及其预报问题。20 世纪 60 年代初, 人们开始注意对流层上部平流层的天气系统分析问题。1964 年, 陶诗言和朱福康^[13]研究了亚洲南部夏季 100 hPa 流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系, 发现青藏高原上空的反气旋(对流层上部的南亚高压)是北半球势力最强的大气活动中心之一, 它绕着其平均位置作东西方向振动, 当其向东移动时, 西太平洋副高压便向西伸。该文还提出有关副热带高压东西进退的预报判据。1965 年, 陶诗言、杨鉴初对平流层大气环流的季节变化和平流层爆发性增温的天气过程作了分析, 并出版了一本专著^[14]。1966 年, 气象研究室从地球物理所脱离出来, 成立了大气物理所。1966~1976 年“文化大革命”期间, 大气物理所的天气学和天气预报研究进展受到一定影响, 但仍有不少研究成果。朱抱真等发表了一本《东南亚天气、气候的研究》专著^[15]。1975 年 8 月初 3 号台风在河南境内造成严重洪涝灾害, 大气物理所与空军气象学院以及北京大学合作进行攻关研究, 这次攻关成为大气物理所 20 世纪 70 年代中国暴雨研究的先导。

2 重大天气系统的研究

在影响中国天气变化的大尺度系统中, 没有比阻塞高压和副热带高压更为重要的了。为此, 大气物理所的科研人员在这方面付出了很大的心血, 取得了大批十分重要的成果。

2.1 阻塞形势的研究

阻塞形势是一种典型的大气环流持续性异常的表现。它的形成、维持与崩溃不仅影响本地区的天气异常, 也同时引起北半球大气环流的变化。东亚及太平洋地区阻塞形势的活动与中国冬季寒潮、夏季洪涝等天气气候有十分密切的关系。早在 20 世纪 60 年代初期, 叶笃正等^[11]就采用统计、分析和数值试验等多种方法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全面系统的研究。

近 20 年来对阻塞形势的研究有了更为深入的内容。首先, 纪立人等^[16]探讨了地形和海陆分布的热力差异对阻塞形势形成和维持的作用, 指出大地形制约天气尺度波的移动、发展, 并进而影响阻塞形势。朱正心和朱抱真^[17]也从非平衡态角度研究纬向不对称的热力强迫对阻塞形势的作用。罗德海和纪立人^[18]用非线性动力学方法把阻塞形势作为一种偶极子来进行探讨。陆日宇和黄荣辉^[19]以及高守亭等^[20]还从波与流相互作用及低频变异的角度来研究波流作用在阻高建立、维持和崩溃时的作用和表现, 并指出这种作用有明显的地域差异。刘辉等^[21]对不同地域阻塞形势研究后指出: 时间平均流对北太平洋阻高的维持有重要作用, 而对于大西洋和阿拉斯加高压, 瞬变涡动则起了至关重要的作用。以上这些对阻塞形势形成、维持和建立的研究成果, 融入了当今世界上对阻高研究的潮流, 达到了相当高的水平。

对中国冬、夏天气有极大影响的乌拉尔和东北亚阻塞形势, 近年来有了深入的工作。吴国雄等^[22]针对与 1980 年夏季中国持续的异常天气有关的东北亚高压进行了研究, 指出时变涡动对于维持平均急流强度和加强阻高的反气旋涡度起着重要的作用。陆日宇等^[19, 23, 24]则从多个侧面对东北亚阻高进行了研究, 指出: 该地区阻高活动与江淮流域降水有很大关系, 而阻高的维持日数又与西太平洋海温有关, 较冷的暖池海温有利于阻高的维持。这可能是受暖池海温异常所激发的东亚—太平洋遥相关型波列的影响。他还认为阻高上游高频波的活动和东传是东北亚阻高维持的可能机制。

李双林等^[25]从瞬变涡动和行星尺度基本流相互作用的角度对乌拉尔阻塞形势形成和维持的物理机制进行了研究, 指出热带海洋加热的异常将会引起乌拉尔地区高度场的响应, 使欧亚地区行星波的分布发生改变, 有利于乌拉尔地区上游瞬变波的加强和活跃, 导致乌拉尔地区高度场发生异常。这种相互作用将促使该地区阻高的形成。

2.2 副热带高压的研究

副热带高压是大尺度天气气候系统的重要成员, 而西太平洋副热带高压对于中国天气气候的影响有着十分突出的作用, 是中国气象学家十分关注的课题。早在 20 世纪 50、60 年代, 叶笃正等^[26, 27]和陶诗言等^[28]就西太平洋副热带高压及青藏高原对我国天气的影响做过广泛的研究, 他们的成果已经成为天气和短期气候预报的理论指南。

20 世纪 70 年代以后, 对副热带高压的研究有了更为全面和深刻的内容。首先, 人们注意到青藏高原对副热带高压活动的影响。叶笃正等^[29]的研究表明, 夏季青藏高原由于加热作用是一个暖性的反气旋。纪立人等^[30]的数值试验表明, 这种加热作用对于高空反气旋环流的出现是十分必要的。骆美霞等^[31]的数值试验则表明大地形的动力作用可以使北半球副热带高压带断裂成多个单体。

特别值得指出的是, 一大批工作集中在海温对副热带高压的影响上。研究^[32~34]指出, 赤道东太平洋海温极大地影响了副热带高压的强度, 并联系到 ENSO 事件与副热带高压活动的关系, 且给出了这种影响过程的可能物理机制。黄荣辉等^[35, 36]研究了西太平洋暖池区海温对副热带高压的影响, 指出暖池区海温异常导致其上对流活动的变化, 从而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—太平洋遥相关型。关于印度洋海温的影响, 金祖辉等^[37]和罗绍华等^[38]的研究表

明,北印度洋及南海海温对夏季副热带高压强度和位置都有明显的影响。吴国雄等^[39]的工作也指出印度洋海温与西太平洋海温的密切关系。

近年来,人们还注意到季风加热对副热带高压的作用。李双林等^[40]认为南亚季风区的加热对西太平洋副高的南北活动有影响,而副热带高压南侧热带辐合带(ITCZ)的加热则影响副热带高压的东西移动。庄世宇等^[41]从分析和数值试验两个角度探讨了亚洲季风区加热对副热带高压强度和活动的影响。近年来,陆日宇^[42]重新探讨和定义了副热带高压活动的指数,并研究了它的年际变化及活动规律。

从1996年至今,吴国雄等开展了全面系统的副热带高压形成、变异的动力学研究,发表了一大批高质量的论文,完成了一部全面阐述副热带高压动力学的新专著^[43],给出了大量有价值的观测事实和理论观点,包括:副热带高压的分类、水平流型和垂直结构、季节变化及与季风的关系、年际变化与旱涝天气的联系、副热带高压对各种外强迫(如海温)的响应等。更重要的是,提出了若干创新性的动力学理论,如热力适应理论、大气中的过流、全型垂直涡度方程、涡度变化的内部强迫(倾斜涡度发展)、涡度变化的外部强迫(非均匀空间加热效应),以及东西风界面的时间变化方程及该界面在保持气候系统角动量守恒中的重要性等。这些新理论在解释副热带高压形成、变异的机制,阐述夏季陆面加热和季风降水对副热带高压形成的重要作用等方面都将会产生深远的影响。

3 暴雨等灾害天气系统研究

建国以来,特别是1975年8月河南省特大暴雨发生以来,大气物理所对暴雨等灾害天气的基础和应用研究给予了高度的重视,积极投身于国民经济的主战场,承担了“七五”国家科技攻关“中尺度灾害天气系统与临近预报”及“八五”国家科技攻关“台风、暴雨监测与预报研究”等研究课题。近年来,大气物理所又承担了“我国重大灾害天气机理和预测理论研究”的课题,集中对暴雨系统发生发展的机理进行了研究,并提出了暴雨等中尺度系统的物理模型,取得了一批很有意义的成果。

首先,陶诗言等完成了我国第一本暴雨专著《中国之暴雨》^[44],对20世纪的多次大暴雨进行了专门的研究。在这些工作的基础上,一系列研究工作得以深入开展。

3.1 高低空急流的研究

东亚高空急流是影响东亚及中国天气的重要系统,东亚大气环流的季风转换,中国大部分地区雨季的开始和结束都与西风急流位置的南北移动以及强度变化有紧密的联系。叶笃正等^[26]指出了亚洲季风转变是与6月及10月大气环流的突变相联系的,而这种突变的重要表现之一就是亚洲西风急流的北跃与南移过程。陶诗言等^[8]则指出东亚梅雨的开始和结束与6月及7月份亚洲上空南支西风急流的二次北跳过程密切相关。高守亭等^[45~47]首先指出波与纬向流的相互作用,主要是波与高空急流的相互作用,波的动量通量和热量通量在急流区辐合,促使高空急流加速。这一理论比Pfeffer^[48]再次提出高空波作用引起高空急流加速的论点早了2~3年。研究表明,西风急流活动对中国降水有重要影响,在6~7月份当西风急流的位置偏南时,长江流域上空的西风偏强,江淮地区的梅雨就多,当西风急流的位置偏北时,长江流域上空西风弱,长江流

域的梅雨就少^[49]。

低空西南风急流是引起中国暴雨的主要天气系统之一。陶诗言等^[12]早在讨论长江流域的暴雨时就提到这支急流的作用。后来从统计关系得知，暴雨同低空急流的相关率达 70% 以上。陶诗言等^[44]研究了低空急流与暴雨的关系，指出暴雨发生在急流的左前端，距急流 2~3 纬度。高守亭等^[50]研究次天气尺度低空急流的形成时指出，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。

3.2 锋生过程的研究

锋面的研究近年来重新成为大气科学研究的热点。曾庆存^[51]最早注意到在高空波动活跃期的寒潮爆发过程中，组成高空槽的冷空气通过界面对暖空气作功，暖区动能增加，造成围绕冷槽的高空急流增强，进而加强高空急流所造成的适应过程，引起对流层中层的锋生。高守亭等^[52]从波与流相互作用的角度具体研究了高空急流加速同低层锋生的关系，从理论上证实了曾庆存提出的论点。对五种不同类型的急流加速分布产生的锋生过程的模拟表明，适应锋生在高空锋生中的作用可能比在低空锋生中更显著^[53]。以 Hoskins 为代表的低层锋生理论，强调发展着的斜压波一方面从基本流中取得发展的能量，另一方面诱使低层锋生，而曾庆存的观点是，充分发展了的斜压槽将其本身的热量和动量首先输送给高空急流区，然后由适应过程中的调整质量环流引起下层锋生。可见，这两种物理过程是很不相同的，他们分别描述了两种不同的锋生现象。李振军和赵思雄^[54, 55]利用中国首次获得的华东中尺度试验资料，对春季东亚强冷锋的结构和动力学过程进行了讨论。赵思雄^[56]还用数值模拟手段对高原东侧的锋生过程进行了研究。此外，高守亭等^[57]在研究梅雨锋暴雨时，利用 NCEP 实时分析资料诊断出在强梅雨年时，在副热带高压的边缘会出现一条与梅雨锋对峙的新的露点锋，这条锋同梅雨锋构成强梅雨年的梅雨锋系，提出了梅雨锋系的概念，并研究了它们的结构特征。另外，赵思雄^[58]在梅雨锋能量方面也开展了不少研究工作。

3.3 低涡及梅雨锋上中尺度低压的研究

夏季，低涡是造成局部暴雨的主要天气系统之一。高守亭^[59]的研究指出，在边界层内的摩擦作用下，较弱的低涡就可以导致明显的径向流动，产生从四周向低涡中心的辐合，使中心附近垂直运动达到中尺度垂直运动的量级。高守亭^[60]还研究了流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用，指出低层的浅薄暖湿西风有利于西南低涡的形成。

20 世纪 80 年代就有研究指出：梅雨锋上存在着两类不同的中尺度低压（扰动），一类水平尺度为百公里至五百公里，生命史为 1 天左右；另一类，开始时为一中尺度系统，在有利条件下，可发展为上千公里的系统，并可维持数日^[61]。这一提法已受到国外的关注和引述^[62]。周晓平等^[63]对梅雨锋上中尺度低压过程进行了数值模拟，发现这种中尺度系统的形成至少应划分为发生和发展两个阶段。就发生阶段来讲，风场的动力作用是不容忽视的，而在维持和发展阶段中，水汽潜热的影响较为明显。施曙等^[64]对梅雨锋上引发强暴雨的中低压的结构及三维流场进行了分析。近年来，赵思雄^[65]、董佩明等^[66]和张凤等^[67]的研究进一步揭示了梅雨锋上这种不同类型低压（扰动）的存在，并分别提出了它们的可能物理模型。从动力热力结构特征、温度收支、

动能收支等方面揭示了它们的特征。

3.4 亚澳季风区涡旋和对流系统的研究

暴雨等强烈天气的发生常常与快速发展的涡旋及对流系统有密切的关系,它们是强烈天气的直接制造者。除了温带气旋以外,海上爆发性气旋、热带低压和台风与暴雨关系也十分密切。孙淑清等^[68]研究了东亚寒潮活动对下游爆发性气旋的影响,指出绝大多数爆发性气旋发生在超长波槽前,强高空急流出口区的向极侧。吕筱英等^[69]研究了气旋爆发性发展过程的动力特征及能量学。崔晓鹏等^[70]对西大西洋锋面气旋过程进行了数值模拟和等熵分析,指出气旋中心总是位于等熵面或等相当位温面近于垂直的对流中性地区。贾逸勤等^[71]对海上爆发性气旋的发展进行了研究。赵琳娜^[72]对冷季陆上的快速发展气旋的机理进行了探讨,主要强调斜压性的强迫、凝结潜热释放不起主要作用。齐琳琳等¹⁾用上海特殊的观测资料,分析了2001年8月5日上海破纪录的特大暴雨是由4个中尺度对流动云团所引发,在一定时期内,低压和对流云存在明显的相互支持的关系。孙建华等^[73]对1994年7月引发华北和东北暴雨的台风作了分析与模拟,提出了东亚和西太平洋中低纬度系统间相互作用与北美不同,不是由热带系统转变为温带系统,而是在原有减弱热带系统中的新生。赵思雄等^[74]还对亚澳季风区的系统进行了对比研究,发现在南半球相应经度的副热带地区,不存在北半球东亚区域那样的稳定持续的梅雨锋降水,同处季风区,其降水主要由一些涡旋造成,并对该区的季风低压进行了诊断和数值模拟研究,揭示了其中中尺度系统的发生过程。祁立新等^[75]还对稳定少动的澳大利亚切断低压进行了研究。平凡等^[76]研究了亚洲季风区内与夏季强降水有关的两种积云对流参数化方法,并提出了修正的质量通量积云参数化方案。曾庆存等^[77]从季风区的特征出发对东亚夏季的降水过程进行了研究。赵思雄等^[78]指出亚澳季风区是一个整体,既互相联系,同时由于地形、海陆分布等地区差异,涡旋和对流系统形成的特点又存在着很大差别。

3.5 强烈暴雨过程及其机理研究

继“75.8”特大暴雨之后,丁一汇^[79]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。此外,还对1994年6月发生于华南尤其是珠江流域的大暴雨进行了研究,这次暴雨引发了1915年以来华南最严重的洪水。陶诗言^[80]指出,这次特大暴雨是由于1994年夏季环流异常所致。而对于具体的天气系统,孙建华等^[81, 82]的研究强调了边界层风场对暴雨的发生有重要的作用,而喇叭口地形区使暴雨更加增强。赵思雄等^[83]对1998年6月珠江三角洲的大暴雨进行了分析,这是一次同时影响海峡两岸的大暴雨,低层风场的扰动引发香港日降雨量400 mm以上。陈红等^{[84], 2)}对1998年6月华南暴雨过程及其环流特征作了分析,并与1979年第一次全球大气研究计划试验的结果作了比较,发现存在着明显的差异。近年来,一些学者^[85~88]对1998年7月长江流域的“二度梅”暴雨的机理和预报进行了较深入的研究,提出了梅雨锋上一类突发

1) Qi Linlin, Study on heavy rainfall caused by tropical cyclone in Shanghai on 5 August, 2001, 中日暴雨国际会议文集.

2) 陈红、赵思雄, 海峡两岸及其邻近地区暴雨试验 (HUAMEX) 期间暴雨过程及环流特征研究计划, 大气科学, 2003 (待发表).

性暴雨的物理模型。董佩明^[89]对 1999 年长江流域的连续低涡暴雨进行了研究,提出了梅雨锋上另一类暴雨的物理模型,强调除了重视低层系统外,高空系统尤其是高空急流的作用不可忽视。

针对暴雨系统内由于强降水造成的质量亏空破坏了系统内的质量守恒,顾弘道等^[90]、高守亭等^[91]和崔晓鹏等^[92]在国际上最早提出了质量强迫概念;同时提出了由于质量强迫造成的湿位涡异常,并利用湿位涡的不可渗透性原理,把湿位涡异常作为一个动力示踪物来进行暴雨落区预报^[93]。

4 暴雨等灾害天气的数值预测研究

20 世纪 80 年代以来,大气物理所先后建立和运行了 σ 坐标有限区域模式和适用于陡峭地形的 η 坐标等有限区域模式^[94, 95]。这些模式通过试验和检验,技术评分达到国际先进水平。宇如聪^[95]发展的 η 坐标区域模式及周晓平和王东海^[96, 97]发展的新一代的非静力三维数值预报模式,曾多年在湖南、湖北两省运行,完成了一批基础试验及实例试验,并进行实时暴雨预测,取得了良好的效果。

为了比较和试验国内外的多种模式的结果,大气物理所自 1990 年以来坚持在每年夏季开展汛期天气预测,包括短期气候预测,汛期跨季度预测以及暴雨短期预测等,并且将预测结果提交相关部门^[98]。其间,按照“长江三峡工程大江截流期气象保障服务系统的开发应用”课题的要求,大气物理所研制的 η 坐标模式在 1997 年 9 月 25 日~10 月 4 日投入准业务运行,在 10 月 5 日~11 月 8 日投入正式业务运行。在大江截流的 44 天服务期间,每日下午 3 时半前将数值预报的 24 小时降水量等雨量图及库区西部(重庆一万县)、库区东部(万县—宜昌)平均面雨量传真至武汉区域中心,供大江截流预报会商和综合决策集成预报应用,取得良好的预报效果,为长江三峡大江截流汛期气象保障服务工作作出了贡献^[99]。

在数值天气预报的改进方面,不少研究者强调了初值的重要性。曾庆存^[100]注意到了实测风在数值天气预报应用中的重要性和可能性。赵思雄等^[101]强调了风场扰动,尤其是低层风场扰动在中尺度低压发生发展中有很重要的作用。赵思雄和周晓平^[102]对 1975 年 8 月特大暴雨的数值实验表明,初始风场对于暴雨的发生有相当大的影响,要想得到较好的预报结果应设法使用实测风为初始资料。贝耐芳等^[103, 104]在对 1998 年 7 月“二度梅”特大暴雨的数值模拟中,充分认识到了初值的重要性。如果尽量利用有可能收集到的资料,包括特性层的资料,则对“98.7”突发强暴雨的预报会有显著的改善。

为了发展适用于东亚季风区的数值模式的物理过程,赵思雄等^[105]利用时空加密观测资料对温差型积云参数化方案进行了改进试验,而马群飞等^[106]对能量型积云对流参数化方案进行了试验研究。平凡^[107]在 Gregory 质量通量积云参数化方案的基础上进行了改进,并置入国家气候中心用于气候预测的 T63 数值模式,来进行短期实时气候预测。此外,何溪澄等^[108]还对 Betts-Miller 型对流调整方案在热带天气预报中的应用作了试验。周晓平等^[109]还发展了用于暴雨模式的一维积云模式。与此同时,边界层参数

化的问题也得到了足够的重视,董佩明^[110]对“98.7”大暴雨的过程进行了分析,Ts评分表明,有边界层方案的试验比无边界层方案的实验,其模拟的评分要高得多。模拟结果还表明,在中国西部地区,地形的处理方案对预测结果有重要影响,适用于陡峭地形的 η 坐标模式,可正确反映“雅安天漏”现象^[111],而在中国东部地区尤其是长江中下游地区的暴雨过程中,局地地形处理上的差别并未对暴雨的预测结果造成重大影响^[112]。为了避免由于非线性计算的不稳定所造成的问题,赵力等^[113]采用准拉格朗日方案的数值模式对暴雨过程进行了模拟。

暴雨预测实践证明,卫星探空资料的使用和同化对于澳大利亚强暴雨的模拟结果有很大改善^[114];而水汽通量散度这一物理量的成功描写,是1998年7月韩国大暴雨被成功模拟的关键所在^[115]。

5 短中期数值预报研究

在短期数值天气预报取得成功之后,国际上早在20世纪60年代中就开始了中期数值天气预报的可行性研究,而其真正的业务实现则是20世纪70年代末。在此期间,中国的数值预报工作者虽然没有条件进行系统、连贯的研究,但仍在有关的科学领域做了大量的工作,为后来的发展做了科学储备。到20世纪80年代,大气物理所发展了3层半球格点能量守恒模式,并在此基础上同中国气象局一起把3层模式改成5层模式,在国家气象中心对全国短期天气进行了实时预测近10之久。这是中国第一代用于实时业务预报的数值模式,即业务人员熟知的B模式。直到中国气象局引进欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的T106模式,才取代了B模式的业务预报,可见B模式的作用在当时是功不可灭的。关于数值模式中“完全能量守恒差分法”的研究^[116~118],从瞬时能量守恒差分格式、隐式完全能量守恒格式、显式完全能量守恒格式,到高时间精度和各种经济算法的发展,以及向半隐式斜压谱模式的推广^[119],此项研究历时20多年,可以说使计算地球流体力学上了一个新台阶,推动了中期数值预报的发展。王宗皓^[120]提出的新型自稳定浮动分裂算法,其计算量与一般显式格式相当,而稳定性与隐式格式一样,因而特别适用于长时间积分全球高分辨率模式,直至现在仍具有生命力。陈雄山^[121]关于混淆现象(aliasing)的研究,对非线性稳定性产生的原因及其谱模式的经典算法提出质疑。朱抱真等^[122]在一个3层原始方程模式基础上,引入地形、辐射、边界层传输、降水等非绝热过程,并给出计算实例。尽管物理模式比较简单,却是向具有实际意义的中期数值预报迈出了一步。

1986年,国家科委将中期数值天气预报研究列入“七五”国家科技攻关计划,并正式下达攻关任务。由中国气象局主持,中国科学院和国家教委参加主持。这是中国科学院与中国气象局的一次大协作。作为中国科学院的主力,大气物理所参加了该课题22个专题中的11个,涉及模式的动力学框架及其协调性,模式地形及非绝热物理过程,预报结果的检验及物理诊断,多元最优插值方案,气象专用程序库、数据库及图形处理等诸多方面^[123]。攻关课题的完成为中期数值预报业务系统的建立打下基础,从而使中国进入当时世界上少数能制作中期数值天气预报国家的行列。

“七五”期间取得的成果,随后又进一步发展,并在科研和业务中广泛应用。例

如,标准层结扣除法^[124]在谱模式中的应用研究^[125],被推广到多个大气环流模式和气候模式,特别是被引入到 ECMWF 的业务系统^[126];根据 Betts 对流调整的思想,并吸收郭晓岚方案的优点而提出的新型对流调整方案^[127]同广东省气象局合作,在业务模式中试验应用;集中动力框架、物理过程的研究成果而建立的 IAP-T42L9 谱模式^[128]在 20 世纪 90 年代连续多年夏季用以制作实际中期天气预报,作为大气物理所参加中国气象局重大天气会商的一个重要依据。它还曾直接为水利部水库调度重大决策提供参考,又与解放军理工大学合作建立“微机航空中期数值天气预报系统”,多次在军事气象保障中发挥作用。

“八五”开始,我们又着手月尺度的数值预报研究(或称“动力延伸预报”),先后参加了中国科学院“八五”重大应用项目“灾害性气候的预测及其对农业年景和水资源调配的影响”^[129]和国家“九五”重中之重科技项目“我国短期气候预测系统的研究”^[130]。月预报是一个困难的问题,国际上当时的水平,就距平相关系数(ACC)而言,仅为 0.35 左右。我们从三个途径试图提高预报准确率。杨燕等^[131]应用数字滤波方法滤去预报过程中已失去可预报性的高频扰动,而保留对月尺度预报有意义的低频波,改进了预报效果。张道民等^[132]考虑预报误差随时间的增长,提出用加权平均的方法提取有用信息。36 个实例预报表明,可使北半球的 ACC 平均由 0.37 提高到 0.51。杨辉等^[133]进一步将此思路与集合预报结合起来,采用集合成员间的离散度作为权重,使信息提取方法更具有物理意义和灵活性。针对预报模式常见的纬向平均流的系统性误差,陈伯民等^[134]尝试了一个新的途径,采用基于相空间重构理论的非线性时空序列的预报方法,同数值模式预报相结合,不仅改进了纬圈平均流,也提高了行星尺度波的预报。纪立人等^[135]还研究了实际可预报性(预报技巧)的时空依赖性及其预报方法。

6 短期气候预测研究

气候变化牵涉到整个大气、海洋、大陆、冰雪和生物圈在内的庞大气候系统。随着和社会和经济发展,气候变化的预测特别是短期气候变化的预测越来越受到关注。短期气候变化是指时间尺度从 2 周以上到季度以及年际的大气环流的变化。一般而言,大气运动的时间尺度越长,它的空间尺度也越大。对于长期天气过程和短期气候而言,不仅大气内部动力、热力过程是重要的,大气外部强迫因子如海洋和陆面热状况也是十分重要的。中国地处季风区,气候变化受季风环流影响,由于东亚大气环流和季风的活动年年有较大差异,造成中国气候年际变化很大,增加了短期气候预测的难度。

著名气象学家杨鉴初先生是中国长期天气预报的先驱者。建国初期,百废待兴,国家急需发展长期天气预报的研究和业务工作,杨先生的论文“运用气象要素历史演变的规律性做一年以上的长期预告”^[5],在解放初期天气图资料十分匮乏的情况下,为中国的长期天气预报开辟了一条新路,他提出的历史演变法,至今仍被气象台站应用,这一方法被称为杨鉴初方法。杨先生在这篇论文中揭示了气象要素时间序列的五个特性,即持续性、相似性、周期性、最大最小可能性和转折点。持续性、相似性、周期性反映了长期天气演变过程中历史特点的某种重现;最大最小可能性给出了要素历史资料的概率特征;转折点使我们认识到长期天气过程不仅有量的变化,而且还会出现

质的飞跃。50 多年前杨先生强调的气候要素历史演变过程中“转折点”的提法是非常有创见的,它启示我们把大气过程中历史规律的重现用于预报的同时,要随时提防转折点出现的可能性,减少预测的失误。自杨先生的这一著名论文发表以后,我国长期天气预报的研究和业务工作有了长足的进展,从理论到方法都发生了深刻的变化。

如果说 20 世纪 50 年代杨鉴初先生利用历史资料的演变规律开创了大气物理所短期气候预测的业务工作,那么 20 世纪 60 年代陶诗言先生、高由禧先生等人的工作则为东亚地区短期气候的预测提供了天气气候学基础。陶诗言等^[136]分析了夏季江淮流域持久性旱涝时期高空环流的特征,指出旱涝持续起间,中纬度和副热带地区 500 hPa 高度场环流型式均表现出异常型及稳定性;高由禧等^[137]研究了东亚季风进退活动同大气环流季节变化及中国大陆上雨带移动的关系,指出季风的强弱和来去时间的正常与否,直接决定中国不同地区降水的正常与否。他们指出的某种异常环流的稳定性,对于研究旱涝过程的本质及长期天气过程的异常演变有重要意义。

20 世纪 70 年代,大气环流、海洋和陆地等下垫面的热状况在长期天气过程及短期气候变化中的重要性受到进一步重视,同时,统计相关分析、天气气候学分析^[138]和物理量诊断等都有了较大发展。随着海洋资料不断增加,大气物理所长期天气预报组^[139]在对西北太平洋与中国东部地区降水关系的研究中发现,前期冬季黑潮海区的海温与长江中下游及华北平原汛期降水存在明显的相关性,为预测长江流域旱涝事件提供了前期海温异常的强信号。

到了 20 世纪 80 年代,大气物理所关于短期气候预测的研究比以往任何时候都多。统计相关法有了进一步应用^[140]。此外,除了大气内部动力过程,如行星波^[141]、遥相关、平流层准二年周期^[142, 143]及低频振荡^[144, 145]的研究外,还有大量关于大气外部过程与气候异常关系的研究,如:黄荣辉等^[146]研究了 ENSO 事件不同阶段对中国夏季江淮流域、黄河流域、华北地区降水的影响,罗绍华等^[147]研究了印度洋和南海地区海温异常与季风环流及长江流域梅雨期旱涝的关系,陈烈庭等^[148]研究了青藏高原中部冬春季积雪与中国南方 6 月降水的关系,周玉淑等^[149, 150]研究了前期青藏高原下垫面热力结构异常对后期长江中下游地区降水的影响等等。这一系列代表性的工作为短期气候预测提供了重要的物理机制。自 1985 年曾庆存等^[151, 152]研制的二层模式在计算机上实现后,大气物理所大气环流模式(简称 IAP GCM)已发展成九层模式并在大气物理所每年的跨季度预测中发挥重要作用。

进入 20 世纪 90 年代,大气物理所在短期气候预测领域又步入一个新台阶,用于预测短期气候的方法更趋完善。除了传统的数理统计方法外,前期大气环流的诊断与分析^[153]、大气外部强迫因子的前期强信号海温^[154]和积雪^[155]等的综合运用^[156, 157],使预测工作建立在一定的物理基础上。此外,ECMWF 数值预报产品的释用及大气物理所九层模式预测集合预报方法的试验和应用^[158~160]。通过对上述一系列工作的综合诊断分析,采用人机结合的办法,大气物理所短期气候的预测能力有了进一步提高。

目前,大气物理所每年都为国家有关部委提送跨年度和跨季度的短期气候变化趋势预测以及 ENSO 事件^[161]和大范围沙尘暴事件的预测意见。为了进一步提高夏季中国东部短期气候变化的预测能力,科研工作者对中国东部夏季灾害性天气气候的演变作了较系统性的综合研究分析,建立了一套有一定物理基础的综合预测方法,指出:夏

季中国东部区域性的灾害性天气气候的发生受东亚夏季风环流气候背景的影响，夏季登陆中国台风频数偏多与东亚夏季风环流偏强的气候背景有关^[162]；而长江流域夏季特大暴雨洪涝灾害都发生东亚夏季风环流偏弱的气候背景下^[163]；中国北方地区持续性干旱的发生与欧亚大陆中纬度正距平带上叠加 EU 遥相关波列¹⁾以及年代际和年际变化^[164]有关，而中国东北地区暴雨洪涝与东亚东部中高纬阻塞高压南侧切断低压或移动性的高空短波槽缓慢地绕着长波脊或阻塞高压移动有关²⁾。

随着各种资料的不断增加以及对气候变化规律成因的进一步认识，大气物理所的短期气候预测能力得到不断提升。

7 小结

自 1928 年以来，大气物理所在天气、气候预报和天气学研究方面作出了重大贡献，然而迄今为止，还有许多天气气候变化规律尚未完全为人们所掌握，还有许多问题有待深入研究。因此，一方面急需揭示大量的观测事实，充分利用卫星、雷达等遥感资料，对它们的物理过程进行深入的分析研究；另一方面要开发、建立、改进中尺度、大气环流及短期天气气候预测模式的资料同化及物理过程，以提高短期、中期及月、季和年度气候预测的能力。

回顾大气物理所 75 年的风雨历程，特别是近几十年的发展，展望未来，可以相信，随着科学技术的发展和几代人的共同努力，会更明了、更清楚地揭示出重要天气灾害系统的形成机理和演变过程，在此基础上，一套具有物理基础的、能客观定量地预测天气气候变化的短期气候预测动力模式也必将会替代目前人机综合的预测方法，然而实现这个目标还需要经过漫长的道路。

参 考 文 献

1 吕 炯，极锋学说与长江流域之风暴，中央研究院气象研究所集刊，1930，No. 2.
2 沈孝凰，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，1932，No. 3.
3 涂长望，中国之气团，气象杂志，1937.
4 卢鋈，天气预报概论，气象研究所出版，1938.
5 杨鉴初，运用气象要素历史演变的规律性作一年以上的长期预告，气象学报，1953，**24**，100～177.
6 陶诗言，中国之寒潮，中央气象台出版，1954.
7 高由禧、曾佑思，台风路径图集，北京：科学出版社，1952.
8 陶诗言、赵煜佳、陈晓敏，中国之梅雨，中央气象局气象局文集，第 4 号，1958.
9 杨鉴初、陶诗言、叶笃正、顾震潮，青藏高原气象学，北京：科学出版社，1959.
10 陶诗言、徐淑英，夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征，气象学报，1961，**32**，1～20.
11 叶笃正等，北半球冬季阻塞形式的研究，北京：科学出版社，1962.
12 陶诗言等，中国夏季副热带天气系统若干问题研究，北京：科学出版社，1965.
13 陶诗言、朱福康，夏季亚洲南部 100 hPa 流型的变化及其与西太平洋副热带高压进展关系，气象学报，1964，

1) 张庆云、陶诗言、张顺利，夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件，大气科学，2003（待发表）.
2) 张庆云，陶诗言、卫捷，华北干旱的年际和年代际变化特征及成因，气候与环境研究，2003（待发表）.

- 31, 385~395.
- 14 陶诗言、杨鉴初, 平流层大气环流的研究, 北京: 科学出版社, 1965.
- 15 朱抱真等, 东南亚天气、气候的研究, 北京: 科学出版社, 1965.
- 16 Ji Liren, and S. Tibaldi, Numerical simulation of a case of blocking: the effect of orography and land-sea contrast, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**, 2068~2086.
- 17 朱正心、朱抱真, 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 (B), 1982, **4**, 361~371.
- 18 罗德海、纪立人, 地形对正压大气中 Modon 形成的影响和大气阻塞, 大气科学文集, 北京: 科学出版社, 1990, 122~129.
- 19 陆日宇、黄荣辉, 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, 1996, **20** (2), 138~148.
- 20 高守亭、朱文妹、董敏, 大气低频变异中的波流相互作用 (阻塞形势), 气象学报, 1998, **56**, 665~679.
- 21 刘辉、吴国雄、曾庆存, 北半球阻塞高压的维持 I: 准地转和 Fertil 位涡的分析, 气象学报, 1995, **53** (2), 177~185.
- 22 吴国雄、刘辉、陈飞等, 时变涡动输送和阻高形成——1980 年夏中国的持续异常天气, 气象学报, 1994, **52**, 308~320.
- 23 陆日宇、黄荣辉, 关于阻塞形势演变过程中波数域能量的诊断分析, 大气科学, 1996, **20** (3), 270~278.
- 24 陆日宇、黄荣辉, 东亚—太平洋遥相关型波列对夏季东北亚阻塞高压年际变化的影响, 大气科学, 1998, **22** (5), 727~735.
- 25 李双林、纪立人、倪允琪, 夏季乌拉尔地区大气环流持续异常, 科学通报, 2001, **46** (2), 753~757.
- 26 叶笃正、陶诗言、李麦村, 六月和十月大气环流的突变现象, 气象学报, 1958, **29**, 249~263.
- 27 叶笃正、朱抱真, 大气环流的若干基本问题, 北京: 科学出版社, 1958.
- 28 陶诗言等, 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, 1963.
- 29 叶笃正、高由禧, 青藏高原气象学, 北京: 科学出版社, 1979.
- 30 纪立人、沈如金、陈于湘, 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, 1984, 236~244.
- 31 骆美霞、朱抱真、沈如金, 大地形对夏季北半球副热带高压形成作用的数值试验, 大气科学, 1986, **10**, 258~264.
- 32 符淙斌、滕星林, 我国夏季气候异常与厄尔尼诺/南方涛动的关系, 大气科学, 1988, 特刊, 133~141.
- 33 Sun Shuqing, and Ying Ming, Subtropical high anomalies over the west Pacific and its relations to the Asian monsoon and SST anomaly, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (4), 559~568.
- 34 应明、孙淑清, 西太平洋副热带高压对热带海温异常响应的研究, 大气科学, 2000, **24** (2), 193~206.
- 35 黄荣辉、李维京, 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, 1988, 特刊, 107~116.
- 36 黄荣辉、孙凤英, 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季异常的影响, 大气科学, 1994, **18** (2), 141~151.
- 37 金祖辉、沈如桂, 长江中下游旱梅和涝梅年海温场及大气环流的特征, 气象科学技术集刊 (季风论文专集), 国家气象局气象科学研究院, 1987, **10**, 41~50.
- 38 罗绍华、金祖辉, 北印度洋和南海海温异常与季风环流及长江中下游梅雨期旱涝关系的探讨, 气象科学技术集刊 (季风论文专集), 国家气象局气象科学研究院, 1987, 10.
- 39 Wu Guoxiong, and Liu Huanzhu, Atmospheric precipitation on response to equatorial and tropical sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**, 2236~2255.
- 40 李双林、纪立人、张道民, 南亚季风区加热影响副高的数值试验, 热带气象学报, 1999, **15** (2), 106~119.
- 41 Zhuang Shiyu, and Ji Liren, Persistent anomalous flows over the subtropical western Pacific in summer, *Chinese Science Bulletin*, 1998, **43** (8), 672~675.
- 42 Lu Riyu, Interannual variability of the summertime north Pacific subtropical high and its relation to atmospheric

convection over the warm pool, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79**, 771~783.

- 43 吴国雄、丑纪范、刘屹岷等, 副热带高压形成和变异的动力学问题, 北京: 科学出版社, 2001.
- 44 陶诗言等, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 1980, 225pp.
- 45 高守亭、陶诗言、丁一汇, 表征波与流相互作用的广义 E-P 通量, 中国科学 (B 辑), 1989, 774~784.
- 46 Gao Shouting, Tao Shiyang, and Ding Yihui, The Generalized E-P Flux of Wave-Meanflow Interactions, *Science in China (Series B)*, 1990, **33**, 704~715.
- 47 高守亭、陶诗言、丁一汇, 寒潮期间高空波动与东亚急流的相互作用, 大气科学, 1992, **16**, 718~724.
- 48 Pfeffer, R. L., A study of eddy-induced fluctuations of the zonal-mean wind using conventional and transformed Eulerian diagnostics, *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**, 1036~1050.
- 49 董敏、余建锐、高守亭, 东亚西风急流变化与热带对流加热关系的研究, 大气科学, 1999, **23** (1), 62~70.
- 50 高守亭、孙淑清, 次天气尺度低空急流的形成, 大气科学, 1984, **8**, 178~188.
- 51 曾庆存, 数值天气预报的数学物理基础, 北京: 科学出版社, 1979, 237~314.
- 52 高守亭、陶诗言, 高空急流加速与低层锋生, 大气科学, 1991, **15**, 11~21.
- 53 李勇红、张可苏, 急流加速产生的高空锋生和低空锋生, 大气科学, 1992, **16** (4), 452~463.
- 54 李振军、赵思雄, 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, 1996, **20** (6), 662~672.
- 55 李振军、赵思雄, 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, 1997, **21** (1), 91~98.
- 56 赵思雄, 用 10 层准拉格朗日有限区域模式对高原东侧锋生过程的数值模拟, 大气科学, 1991, **15** (5), 40~49.
- 57 Gao Shouting, Zhou Yushu, and Lei Ting, Structural Features of the MEIYU Front System, *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16** (2), 195~204.
- 58 赵思雄, 梅雨锋上扰动发生发展的能量分析, 大气科学, 1988, 特刊, 191~201.
- 59 高守亭, 行星边界层内低涡的环流结构, 气象学报, 1983, **41**, 285~295.
- 60 高守亭, 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用, 大气科学, 1987, **11**, 263~271.
- 61 Bei Naifang, Zhao Sixiong, and Gao Shouting, Numerical simulation of a heavy rainfall event in China during July 1998, *Meteor. Atmos. Phys.*, 2002, **80**, 153~164.
- 62 Holopainen, E. O., 1989, Palmen memorial symposium on extratropical cyclones, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **70** (6), 632~641.
- 63 周晓平、赵思雄、张宝严, 梅雨锋上中尺度低压发生的数值模拟实验, 大气科学, 1984, **8** (4), 353~361.
- 64 施曙、赵思雄, 梅雨锋上与强暴雨有关的中低压及其三维环境流场的诊断研究, 大气科学, 1994, **18** (4), 476~484.
- 65 Zhao Sixiong, Energetics of cyclogenesis on Meiyu (Baiu) front, Proceedings of Palmen Memorial Symposium on Extratropical Cyclones, Helsinki, Finland, American Meteorological Society, 1998, 205~209.
- 66 Dong Peiming, and Zhao Sixiong, Diagnosis and numerical study of characteristics of low vortex (intermediate disturbance) and its heavy rainfall on Meiyu front, Proceedings of International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/Snowfall in East Asia, Tokyo, Japan, 2002, 40~45.
- 67 Zhang Feng, and Zhao Sixiong, Study on kind of cyclone on Meiyu (Baiu) front, Proceedings of International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/Snowfall in East Asia, Tokyo, Japan, 2002, 117~123.
- 68 孙淑清、高守亭, 东亚寒潮活动对下游爆发性气旋生成的影响, 气象学报, 1993, **51**, 304~314.
- 69 吕筱英、孙淑清, 气旋爆发性发展过程的动力特征及能量学研究, 大气科学, 1996, **20** (1), 90~100.
- 70 崔晓鹏、吴国雄、高守亭, 西大西洋锋面气旋过程的数值模拟和等熵分析, 气象学报, 2002, **60** (1), 385~399.
- 71 Jia Yiqin, and Zhao Sixiong, A diagnostic study of explosive development of extratropical cyclone over East Asia and West Pacific Ocean, *Adv. Atmos. Sci.*, 1994, **11** (3), 251~270.

- 72 赵琳娜, 沙尘(暴)发生发展的机理及起沙机制的数值模拟, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2002, 170pp.
- 73 孙建华、赵思雄, 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究, 大气科学, 2000, **24** (2), 223~237.
- 74 Zhao Sixiong, and G. A. Mills, A study of a monsoon depression bringing record rainfall over Australia. Part II: Synoptic-diagnostic description, *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**, 2074~2094.
- 75 Qi Lilin, L. M. Leslie, and Zhao Sixiong, Cut-off low pressure systems over southern Australia: Climatology and case study, *International Journal of Climatology*, 1999, **19**, 1633~1649.
- 76 Ping Fan, Gao Shouting, and Wang Huijun, A comparative study of the numerical simulation of the 1998 summer flood in China by two kinds of cumulus convective parameterized methods, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**, 149~157.
- 77 Zeng Qingcun, Zhang Banglin, Liang Youlin et al., East Asia summer monsoon-a case study, *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.*, 1994, **60** (A. No.100), 81~96.
- 78 赵思雄、贝耐芳、孙建华等, 亚澳中低纬度区域暴雨天气系统研究, 气候与环境研究, 2002, **7** (4), 377~385.
- 79 丁一汇, 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究, 北京: 气象出版社, 1993, 255pp.
- 80 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 I. 大气环流的异常, 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.
- 81 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, 大气科学, 2002, **26** (4), 541~557.
- 82 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, 大气科学, 2002, **26** (5), 633~646.
- 83 赵思雄、贝耐芳、孙建华, 华南暴雨试验期间 (HUAMEX) 强对流系统的研究, 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究, 北京: 气象出版社, 2000, 256~260.
- 84 陈红、赵思雄, 第一次全球大气研究试验计划期间华南前汛期暴雨过程及其环流特征的诊断研究, 大气科学, 2000, **24** (2), 238~252.
- 85 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, 气候与环境研究, 1998, **3** (4), 368~381.
- 86 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, 北京: 气象出版社, 2001, 1~184.
- 87 贝耐芳、赵思雄, 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析, 大气科学, 2002, **26** (4), 526~540.
- 88 张小玲、陶诗言、张庆云, 1998 年 7 月 20~21 日武汉地区梅雨锋上突发性中- β 系统的发生发展分析, 应用气象学报, 2002, **13** (4), 386~397.
- 89 董佩梅, 梅雨锋上中尺度低压(扰动)的诊断与模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2003, 229pp.
- 90 顾弘道、钱正安, 数值模式的质量守恒方程中水汽源汇项作用的讨论, 科学通报, 1990, **22**, 1721~1724.
- 91 Gao Shouting, Lei Ting, and Zhou Yushu, Moist potential vorticity anomaly with heat and mass forcings in torrential rain systems, *Chin Phys. Lett.*, 2002, **19** (6), 878~880.
- 92 Cui Xiaopeng, Gao Shouting, and Wu Guoxiong, Moist potential vorticity and up-sliding slantwise vorticity development, *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20** (1), 167~169.
- 93 高守亭、雷霆、周玉淑, 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析, 应用气象学报, 2002, **13** (6), 662~270.
- 94 周晓平、赵思雄、张可苏等, 一个东亚季风区的暴雨数值预报模式, 大气科学, 1988, 特刊, 60~78.
- 95 宇如聪, 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对 1993 年中国汛期降水的实时预报实验, 大气科学, 1994, **18** (3), 284~292.
- 96 周晓平、王东海, 短时风暴数值预报模式研究 I. 模式的理论框架, 大气科学, 1996, **20** (1), 1~11.
- 97 王东海、周晓平, 短时风暴数值预报模式研究 II. 模式的基础试验结果, 大气科学, 1996, **20** (3), 237~289.

- 98 陈红、孙建华、贝耐芳等, 1998 年 IAP 汛期暴雨短期数值预测, 气候与环境研究, 1998, **3** (4), 382~389.
- 99 赵思雄、张宝严、孙建华等, 长江三峡工程大江截流时期降水短期数值预报的应用研究, 东亚季风和中国暴雨, ——庆贺陶诗言院士 80 华诞, 北京: 气象出版社, 1998, 439~447.
- 100 曾庆存, 实测风场在数值天气预报中的应用, 大气科学, 1977, **1** (3), 165~173.
- 101 赵思雄、周晓平、张可苏等, 中尺度低压系统形成和维持的数值实验, 大气科学, 1982, **6** (2), 109~117.
- 102 赵思雄、周晓平, 风场在预报暴雨发生中的作用, 大气科学, 1984, **8** (1), 1~6.
- 103 贝耐芳、赵思雄, 初值及物理过程对“75.8”暴雨结果的影响, 气候与环境研究, 2002, **7** (4), 386~396.
- 104 贝耐芳、赵思雄、高守亭, 1998 年“二度梅”期间武汉—黄石突发性暴雨的模拟研究, 大气科学, 2003, **27** (3), 399~418.
- 105 赵思雄、张宝严、杜长萱等, 根据时空加密观测资料对 KUO 型方案的改进试验, 台风、暴雨数值预报新技术的研究, 北京: 气象出版社, 1996, 1~9.
- 106 马群飞、贾逸勤、孙建华等, 能量型云模式积云参数化方案的改进试验, 台风、暴雨数值预报新技术的研究, 北京: 气象出版社, 1996, 32~37.
- 107 平凡, 积云参数化方案的改进及其在短期气候预测模式中的应用研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2001, 1~59.
- 108 何溪澄、沈如金、王康玲, Betts-Miller 型对流调整方案在热带数值天气预报中的初步试验, 台风暴雨数值预报新技术的研究, 北京: 气象出版社, 1996, 38~44.
- 109 周晓平、曾朝霞, 暴雨预报模式中的一维积云模式, 台风、暴雨数值预报新技术的研究, 北京: 气象出版社, 1996, 149~157.
- 110 董佩明、赵思雄, 边界层过程对“98.7”长江流域暴雨预报的数值试验研究, 气候与环境研究, 2003, **8** (2), 230~240.
- 111 宇如聪、曾庆存、彭贵康等, “雅安天漏”研究 II. 数值预报试验, 大气科学, 1994, **18** (5), 535~551.
- 112 董佩明, 梅雨锋中尺度低涡(扰动)特征及其暴雨的分析研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2003, 230pp.
- 113 Zhao Li, and Zhao Sixiong, Numerical experiments of Meiyu (Baiu) rainfall by quasi-Lagrangian limited area model with terrain, *Adv. Atmos. Sci.*, 1995, **12** (1), 57~66.
- 114 Mills, G. A., and Zhao Sixiong, 1991, A study of a monsoon depression bring record rainfall over Australia, Part I: Numerical predictability experiments, *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2053~2073.
- 115 Zhao, Sixiong, and Zhang Feng, Diagnosis and simulation of heavy rain in Korean Peninsula during July 1998, Proceedings of International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rain in East Asia, Seoul, Korea, 2000, 183~188.
- 116 曾庆存, 计算稳定性的若干问题, 大气科学, 1978, **2** (3), 181~191.
- 117 季仲贞、曾庆存, 发展方程差分格式的构造和应用, 大气科学, 1982, **4** (1), 88~94.
- 118 季仲贞、王斌、曾庆存, 完全能量守恒差分方法及其应用, 数值天气预报中的若干新技术, 廖洞贤、柳崇健主编, 北京: 气象出版社, 1995, 26~45.
- 119 Zhong Qing, The formulation of fidelity schemes of physical conservation laws and improvements on a traditional spectral model of baroclinic primitive equations for numerical predictions, *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, **13**, 224~248.
- 120 王宗皓, 天气预报方程自稳定浮动分裂显式算法, 中期数值天气预报文集, 北京: 气象出版社, 1982, 57~76.
- 121 陈雄山, 非线性 KdV 方程的高精度数值解法, 第二次全国数值天气预报会议文集, 北京: 科学出版社, 1980, 283~291.
- 122 朱抱真、陈嘉滨、张学洪等, 一个包括地形和非绝热作用的原始方程数值模式, 北京: 气象出版社, 1980, 130~141.
- 123 中期数值天气预报研究成果汇编<一>—<五>, 北京: 气象出版社, 1991.
- 124 Цэн Цин-цунь, 1961, Применение полной системы уравнений термогидродинамики к краткосрочному прогнозу

- погоды в двухуровневой модели, ДАН СССР, 137, вып. 1.
- 125 Chen Jiabin, Ji Liren, and Wu Wanli, The design and test of an improved scheme for a global spectral model with a reduced truncation error, Short and Medium Range Numerical Weather Prediction, Collection, WMO/IUGG NWP. Symposium, Tokyo, 4–8 August, 1986, 431~440.
- 126 Simmons, A. J., and Chen Jiabin, Calculation of geopotential and pressure gradient in ECMWF atmospheric model, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **117**, 29~58.
- 127 沈如金、纪立人、张道民, 一个修改的 Betts 对流调整方案和它的初步试验, 大气科学研究文集——庆贺黄士松教授执教四十周年和七十寿辰专辑, 南京: 南京大学出版社, 1993, 188~201.
- 128 Ji Liren, Chen Jiabin, Zhang Daomin et al., A spectral model for medium range weather forecast and its performance, *East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate*, Eds: P. Sham, and C. P. Chang, World Scientific, 1989, 474~483.
- 129 黄荣辉、纪立人、钱正安编, 灾害性气候的模拟和预测, 北京: 气象出版社, 1995.
- 130 李维吉、纪立人, 月动力延伸预报研究, 北京: 气象出版社, 2000.
- 131 杨燕、纪立人, 数学滤波方法在月尺度数值预报中的应用 II. 保留不同低频过程的效果比较, 大气科学, 1997, **21**, 533~544.
- 132 张道民、纪立人、李金龙, 月数值天气预报的试验研究, 大气科学, 1996, **20**, 429~438.
- 133 Yang Hui, Zhang Daomin, and Ji Liren, An approach to extract effective information of monthly dynamical prediction—the use of ensemble method, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 283~293.
- 134 Chen Bomin, Ji Liren, Yang Peicai et al., Systematic errors of zonal-mean flow in dynamical monthly prediction and its improvement, *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (1), 17~27.
- 135 纪立人、李志锦, 大气可预报性研究的新进展——对数值预报效果的预测, 数值天气预报中的若干新技术, 廖洞贤、柳崇健主编, 北京: 气象出版社, 1995, 365~391.
- 136 陶诗言、徐淑英, 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征, 气象学报, 1962, **32** (1), 1~10.
- 137 高由禧、徐淑英, 东亚季风的若干基本问题, 北京: 科学出版社, 1962.
- 138 李鸿洲、梁佩典、梁幼林, 长江中下游汛期长期旱涝预报与 500 毫巴环流型及其变化, 大气科学, 1977, **1** (3), 180~187.
- 139 中国科学院大气物理研究所长期天气预报组, 冬季太平洋海水温度异常对我国汛期降水的影响, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第 6 号, 北京: 科学出版社, 1978, 1~12.
- 140 周家斌, 一种新的时间序列预报方法, 科学通报, 1983, **20**, 1250~1252.
- 141 黄荣辉、岸保勘三朗, 关于冬季北半球定常行星波传播另一波导的研究, 中国科学 (B 辑), 1983, **10**, 940~950.
- 142 Huang Ronghui, The physical mechanism of the three-dimensional teleconnection in the summer circulation and application in the long-range weather forecasting, First WMO Conference on Long-Range Forecasting, Sofia.
- 143 Huang Ronghui, and K. Gambo, The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources in summer, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1983, **61**, 495~509.
- 144 李崇银, 南亚季风槽脊和热带气旋活动与移动性 CISK 波, 中国科学 (B 辑), 1985, **28** (6), 668~675.
- 145 李崇银, 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, 1990, **14** (1), 83~92.
- 146 Huang Ronghui, and Wu Yifang, The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanisms, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**, 202~214.
- 147 罗绍华、金祖辉、陈烈庭, 印度洋和南海海温与长江中下游降水的相关分析, 大气科学, 1985, **9** (3), 314~320.
- 148 陈烈庭、阎志新, 青藏高原冬春季积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响, 中长期水文气象预报文集 I, 北京: 水利电力出版社, 1978, 185~194.
- 149 Zhou Yushu, Deng Guo, Gao Shouting et al., The study on the influence Characteristic of teleconnection caused by the underlying surface of the Tibetan Plateau I: data analysis, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (4), 583~593.

150 周玉淑、高守亭、邓国等，青藏高原冬春季地温异常对长江中下游夏季旱涝影响的研究，*南京气象学院学报*，2002，**25**（5），611~619.

151 曾庆存、梁信忠、张明华，季风和大气环流季节突变的数值模拟，*大气科学*，1988，特刊，22~42.

152 Zeng Qingcun, Zhang Xuehong, and Liang Xinzhong, Documentation of IAP two-level atmospheric general circulation model, 1989, TRO44, DOE/ER/60314-HI.

153 孙淑清、孙伯民，东亚冬季风环流异常与中国夏季旱涝天气的关系，*气象学报*，1995，**53**，438~450.

154 金祖辉、陶诗言，ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究，*大气科学*，1999，**23**（6），663~672.

155 陈烈庭，青藏高原冬春季异常雪盖与江南方前汛期降水关系的检验和应用，*应用气象学报*，1998，**9**（增刊），1~7.

156 曾庆存、袁重光等，跨季度气候距平数值预测试验，*大气科学*，1990，**14**（1），10~25.

157 黄荣辉、杨广基、吴仪芳等，综合长期预报方法及对旱涝季度与超季度预报试验，*大气科学*，1990，**14**（1），26~31.

158 Zeng Qingcun, Yuan Chongguang et al., Seasonal and extraseasonal predictions of summer monsoon precipitation by GCMs, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**, 163~176.

159 Wang Huijun, Zhou Guangqing, and Zhao Yan, An effective method for correcting the seasonal-interannual prediction of summer climate anomaly, *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17**, 234~240.

160 林朝晖、赵彦、周广庆等，1999 年中国夏季气候的预测和检验，*气候与环境研究*，2000，**5**，97~106.

161 周广庆、曾庆存，IAP ENSO 预测系统预报技巧的时间依赖性及对 1999 年 La Niña 事件的预测，*气候与环境研究*，2000，**5**，109~117.

162 张庆云、陶诗言、张顺利，1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的环流条件，*大气科学*，2001，**25**（4），567~576.

163 张庆云、彭京备，夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响，*大气科学*，2003，**27**（1），97~106.

164 陆日宇，华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离，*大气科学*，2002，**25**（5），611~624.

The Research Progress of the Synoptic Meteorology and Synoptic Forecast

Tao Shiyan, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, Ji Liren,
Sun Shuqing, Gao Shouting, and Zhang Qingyun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The 75 year's synoptic research achievements and different periods research progresses of air mass, front, Meiyu, cold wave, blocking high, subtropic high, torrential rain, lower and upper jet streams, cyclone in Asia-Australia summer monsoon region and convective systems and so on studied by some scientists in the Institute of Atmospheric Physics (IAP) are entirely reviewed in this paper. Meanwhile, a achievements and progresses of the short-range and medium-range synoptic forecast, climate prognosis, development and modification of GCM (general circulation model) and RCM (regional climate model) and numerical simulations done by some scientists in IAP are also totally reviewed. The contribution of model and synoptic and climatic prognoses to short synoptic and climate predictions is remarked.

Key words: synoptic meteorology; synoptic forecast; model development and modification; short-term and mid-term synoptic and climatic prediction