

\* 成果与应用 \*

# 气候系统模式、气候数值模拟 及气候预测理论研究\*

曾庆存等\*\*

(大气物理研究所 北京 100029)

**关键词** 气候系统模式, 数值模拟, 气候预测

气候变化或异常及其预测是当代的科学研究热点之一。然而气候状态及其演变, 乃是包括全球大气、海洋、陆面、冰雪甚至生态过程在内的气候系统的复杂表现及其演变。建立基于数学、物理规律基础上的气候系统模式并进行气候模拟, 是认识气候形成和演变规律的主要方法之一, 只有在此科学基础上才能作出比较好的对长期气候变化和短期气候异常的预测。因此, 气候系统模式的建立、气候模拟以及在此基础上的数值气候预测, 是当代大气科学研究的前沿。中国科学院大气物理研究所的有关研究人员经过多年的艰苦努力, 在这方面取得了突出的成果, 提高了我国气候科学的整体水平, 并为全球变暖、年度旱涝预测等重大应用课题的理论和方法的提高起到了开拓性作用。

## 1 具有鲜明特色的气候系统模式

本项成果的主要内容之一是在原有低分辨率大气模式基础上加以发展, 建立了我国自行设计的完整的气候系统模式, 被用于大规模气候模拟研究和气候预测试验。该先进的气候系统模式包括新设计的一个垂直 9 层的全球大气环流模式, 一个垂直 20 层的全球海洋环流模式, 一个 14 层的高分辨率太平洋环流模式, 以及一个陆面物理过程模式。这些均已参加国际模式比较计划, 经严格的比较获得公认和好评。这些模式还广泛应用于气候模拟和气候预测, 发挥了重大的作用。

这些模式具有我国独特的创见和优越的性能, 在大气和海洋模式中, 通过标准层结扣除, 大大提高了计算精度; 计算格式保持原偏微分方程组的整体性质, 内部协调和计算稳定, 且不引入虚源; 算法紧凑、省时; 在界面上计算协调。大气模式中对水汽输送的算法能克服通常计算

\* 国家攀登计划项目“气候动力学和气候预测理论研究”的部分成果

\*\* 曾庆存为中国科学院院士。本研究参加人员还有: 张学洪, 郭裕福, 袁重光, 王会军, 张荣华, 毕训强, 李旭, 林朝晖, 戴永久, 薛峰, 梁信忠, 周广庆, 杨芳林, 张邦林, 郭冬建, 李荣凤, 俞永强, 金向泽等

收稿日期: 1998年10月8日

模式中常出现的水汽分布变形或密度为负的伪现象,使降水场和东亚季风的模拟得到改善。海洋模式消除了洋面刚盖近似(这在世界上是最早的),可以直接算出海面的高度偏差和槽脊分布。耦合模式中采用预估校正技术的逐月距平耦合方案,长期积分无明显的气候漂移,且能模拟出厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)现象和年代际变化。设计的多孔介质混合扩散陆面过程模式,也是目前世界上最完整的且有比较坚实的物理基础的模式之一。

这方面具体研究成果如下:

(1)设计出9层全球格点大气环流模式。这个模式采用自行设计的有特色的先进的动力框架和部分物理过程参数化方案,还有一部分物理过程参数化方案则是择优选用和改进发展了国际上最新的研究成果。本模式各部分具有可移植性、兼容性和计算稳定性,经过30年时间长度数值积分试验,表明该模式所模拟的各月平均气候状态、季节循环、气候分类及区域气候与实测的相符,参加国际模式比较计划(AMIP),从已进行的AMIP试验、古气候模拟都证实该模式性能属于当今国际先进水平。

(2)设计出20层大洋环流模式,包括高纬度海冰的热力学模式。该模式采用对正压模态、斜压模态、温盐过程进行分解计算的时间计算方案,使得计算经济、稳定。模式1000年积分的结果表明,该模式不仅能模拟出合理的海表温度、盐度、流场、海表起伏及上翻下沉区,而且能模拟出同现有观测相一致的温盐环流。在国际上是先进水平的模式。

(3)完成8层和14层高水平分辨率( $1^{\circ} \times 2^{\circ}$ )的自由表面热带太平洋模式的设计和定型。该模式模拟得到的海表起伏相当逼真,能给出从赤道到中高纬的所有海面槽脊分布和1986—1988年的厄尔尼诺-拉尼娜(El Nino-La Nino)全过程。这项工作已被许多国际刊物所引用。

(4)设计出多孔介质混合扩散陆面过程模式。该模式比国际通用的模式更为合理且允许土壤中水分各相共存,能够更客观地反映土壤、植被层和雪盖内部多相水分的垂直交换。该陆面过程模式已与全球大气环流模式成功耦合,作了100年积分,对东亚季风区降雨的模拟有很大改进。该陆面模式已参加国际“陆面过程模式比较计划”(PILPS),其模拟效果与其它国际陆面过程模式相比也是先进的,现已被采用为全美公用陆面过程模式的蓝本。

(5)设计出几种海气耦合方案,都能有效地克服气候漂移,并且模拟出的大气和海洋气候状况和实况比较吻合。

## 2 气候变动的数值模拟研究

本项目“八五”阶段用我国自行设计的模式进行了大量的气候数值模拟,既检验了模式性能,又揭示了全球的和东亚的若干重大气候异常类型的形成和演变机理。主要进展如下:

(1)用我国的2层和9层大气环流模式模拟亚洲季风活动及其季节突变特征,在参加大气环流模式比较计划(AMIP)对亚洲季风环流的模拟效能检验的所有模式中,我国的模式是3个最优秀的模式之一。

(2)用大气环流模式分别和混合层海洋模式及全球海洋环流模式的耦合模式作了 $\text{CO}_2$ 加倍的平衡和迁延响应试验,得出全球平均增温分别为 $1.75^{\circ}\text{C}$ 和 $2.5^{\circ}\text{C}$ ,先后被收入IPCC(政府间气候变化专门委员会)1992和1995年科学评估报告。

(3)用大气环流模式对末冰期和增暖期古代气候及相应时期季风系统的变化进行了模拟

研究,探讨了古季风演变的规律,结果既符合古气候变化的 Milankovitch 理论,也符合已有的古气候记录。

(4)对影响我国夏季旱涝及季风异常的机制进行了模拟研究,阐明海平面温度异常(SS-TA)、高原雪盖变化、极冰异常、地表反照率异常、热带对流异常的作用及其产生异常大气环流的机理。

(5)利用气候模式开展的气候可预测性研究也取得了重要的成果,通过系统的数值试验研究,证实我国东亚季风控制区气候可预测性较好,其它区域较差。该研究成果还第一次回答了我国短期气候可预测性的问题。

(6)用海气耦合模式长期积分研究年际变率的特征,结果表明耦合模式能相当好地模拟出厄尔尼诺-南方涛动这一最重要的年际气候变化现象,而且海洋中年际变化最大区域在斜温层,与实况相符,并且指出海气相互作用主要增大了热带地区的年际变率和增加年平均值变化的方差贡献。

### 3 短期气候预测研究

跨季度气候预测的难点在于所预报的几个月后气候状态,同时取决于初始气象场及相当长时段大气的能量和水分收支。本项成果在世界上第一个建立并不断完善用大气环流模式(GCM)作跨季度气候距平预测系统(PSSCA),该系统包括建立有效的海洋资料四维同化方案和有效的海气界面耦合方案,发展集合预测方法和模式输出订正方法,以及算出各地预测的可信度和提出检验评分方法等。从1991年开始,连续7年对我国夏季旱涝形势作出了基本正确的跨季度实际预测,还进行了跨年度预测试验。其中1991年夏季江淮大洪涝和1994年华北大干旱的预测为有关部门防灾决策提供了重要依据。而这种用气候模式作出的实时有效的跨季度气候预测,为我国建立短期气候预测业务系统打下了基础。模式得到国际上高度评价,两次在国际气候预测和其它有关的学术会议上作大会邀请报告,并被国际“气候变动和气候可预报性研究计划”所引用(CLIVAR是世界气候研究计划WCRP的核心计划),CLIVAR把提高短期气候预测水平定为未来10—15年的一个重要研究内容。