

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
96-908-02-01 专题论文集

月动力延伸预报研究

李维京 纪立人 主编

气象出版社



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

96-908-02-01 专题论文集

月动力延伸预报研究

李维京 纪立人 主编

气象出版社

内 容 简 介

本书收集了“九五”国家重中之重攻关项目“我国短期气候预测系统的研究”第二课题“短期气候预测业务动力模式研究”中 96-908-02-01 专题“动力延伸预报方法研究”的 22 篇研究论文。主要内容包括五个方面：(1) 介绍了基于巨型 MPP 计算机建立的并行化月动力延伸集合预报系统；(2) 关于动力延伸集合预报初值形成的理论与应用研究；(3) 动力延伸集合预报理论与方法的研究，提出了最优集合的原理与方法及其应用，该方法具有自己的特色；(4) 介绍了适合区域和省级气象部门对动力产品解释应用迫切需求的月动力延伸预报产品释用方法的研究与应用；(5) 侧重介绍了对模式下垫面物理过程的改进，使之更加适合月动力延伸预报的特点；同时包括了对未来气候数值预测领域发展的展望。

本书可供气象科学研究和从事气候预测的有关部门及相关学科的科技工作者、有关院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

月动力延伸预报研究/李维京 纪立人 主编. -北京: 气象出版社, 2000.11

ISBN 7-5029-3059-0

I. 月... II. 李... III. ①计算机应用-中期天气预报-研究 ②理论气象学-研究 IV. P456.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 78233 号

月动力延伸预报研究

李维京 纪立人 主编

责任编辑: 李太宇 王祥国 终审: 纪乃晋

封面设计: 志涵 责任技编: 陈丽娟 责任校对: 张蔚材

气象出版社 出版

(北京中关村南大街 46 号 邮编: 100081)

* * *

北京市金瀑印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

* * *

开本: 787×1092 1/16 印张: 11.125 字数: 288 千字

2000 年 11 月第一版 2000 年 11 月第一次印刷

印数: 1~1000 定价: 25.00 元

ISBN 7-5029-3059-0/P.1065

前 言

“九五”国家重中之重攻关项目“我国短期气候预测系统的研究”中第二课题 96-908-02-01 专题“动力延伸预报方法的研究”于 1996~2000 年进行了为期五年的研究，专题的总体目标是在 T63L16 中期数值预报模式动力框架的基础上，从预报模式的改进、集合预报初值的形成理论和方法、最优集合方法、模式预报后处理信息的提取等方面着手进行了多方面的研究探索工作。在此基础上，建立了具有我国自己特点的月动力延伸集合预报业务系统，该系统对月预报水平和能力的提高具有重要的意义，目前已经是每月气候预测业务的主要参考方法之一。本文集共收集了 22 篇研究论文，其中第一篇是本专题五年来的主要研究成果的简要总结，其它论文的主要内容有以下五个方面。

(1) 建立了基于巨型 MPP 计算机并行化的月动力延伸集合预报系统。本专题以 T63L16 模式为基础，面向业务，边研究边应用，进行了集合预报初值的初始化、模式积分、后处理的并行化，初步建立了基于 MPP 计算机的并行初值的集合预报系统，实现了 MPP 计算机节点的指定、作业的提交、后处理等过程，便于业务应用的可视化工作平台。动力延伸预报的 500 百帕月平均高度距平预报与观测的距平相关系数达到了 0.35~0.40 左右，实现了预期目标。本文集第 2~4 篇论文重点介绍了该系统的建设概况及其性能特点。

(2) 动力延伸集合预报初值形成的研究与应用。集合预报初值的形成是月动力延伸集合预报的关键问题。文集中第 5~8 篇论文主要是介绍了经过五年来的研究与实践，在坚实的理论基础指导下，在集合预报初值形成的方面所取得的成果。专题提出利用四维变分同化来吸取 MCF 方法和 LAF 方法的优点并克服它们的缺点，直接以初值与观测值的偏差为参考，对每个 LAF 方法中的初始场予以调整，只选择那些在 MCF 意义下有明确统计意义的初值，形成集合初值成员。这种初值形成方法在国内外尚属首次提出。同时我们还建立了基于 T63L16 模式的逆切线性模式系统和奇异向量方法形成集合预报初值方法的研究和应用。

(3) 动力延伸集合预报理论与方法的研究。集合预报方法的提出及其在气候模式预测中的成功应用被认为是大气科学领域的一项重要成就之一。但是，就其理论而言，尚待完善与发展。本专题瞄准这一发展方向，进行了有益的探索与研究，从理论和实际应用两方面取得了新的进展，可以说我们提出的集合预报的思想方法与目前国外所用的方法是有所不同的，具有自己的特色。文集第 9~12 篇论文主要内容涉及了最优集合的理论与方法及其应用。

(4) 动力与统计相结合，月动力延伸预报产品释用方法的研究。如何更有效的在月气候预测中使用月动力延伸集合预报结果，是实际业务工作的需要，而且区域和省级气象部门对动力产品的解释应用也提出了迫切的要求，我们提出的利用动力学方法和统计方法相结合进行的月动力延伸预报产品释用方法，月平均环流特征量的预报方法和预报技巧之预报的研究，具有独特的见解和实用价值，现在月动力延伸预报的预报产品及其释用方法已逐步推广到全国气象部门在月预报业务中应用。文集中第 14~17 篇论文介绍了这方面的内容。

(5) 对模式物理过程的改进，使之更加适合月动力延伸预报的特点。提高动力延伸预

ADH128/15

报效果，首先要改进预报模式的模拟能力。专题在 T63L16 中期数值预报模式动力框架的基础上，针对月时间尺度预报的特点，侧重于研究下垫面物理过程等方面，以改进模式预报能力。第 18~21 篇论文研究了模式陆面物理过程的改进、预报模式的不同分辨率以及下垫面物理过程对月动力延伸预报的影响等。

文集的最后一篇论文“抓住机遇 迎接挑战”是丑纪范院士专门为本文集撰写的，文中精辟的论述既是本论文集的结语，又是对未来发展的展望，同时也是对我们从事该领域研究的年轻一代寄予的厚望。文章高度概括了目前气候数值预测方面存在的缺陷，提出需要解决的四个具有挑战性的问题，认为在气候数值预测领域应结合我国学者自己已有的科研成果和经验，走一条不同于国外的、具有我国自己特色的创新之路，而这可能是解决气候数值预测缺陷的一条行之有效的途径。在新的世纪中，特别需要针对我国的地区特色和国家迫切需要解决的重要问题，以分析批判的态度对待国外的发展途径，突破旧的观念和思维定式的束缚，在我国自己的工作基础上提出新概念、新理论和新方法。我们应以此为鉴，努力进取，抓住机遇 迎接挑战，为提高我国短期气候预测水平做出我们应有的贡献。

参加本专题研究工作的既有知识渊博、经验丰富的著名科学家，也有充满活力、踏实能干的年轻一代。五年来，丑纪范院士、纪立人研究员始终对专题的研究工作给予悉心的指导，并准确的把握研究的方向，为我们提出了许多具有创新性的思想和富有挑战性的科学问题；张道民研究员、苏炳凯教授和刘金达研究员以他们丰富的研究经验圆满完成了各自负责的子专题的研究工作；特别是龚建东博士、张培群博士、陈丽娟硕士刻苦努力、积极肯干，他们承担了专题大量的研究，为动力延伸集合预报业务系统的建设付出了艰辛的努力；同时陈伯民博士、杨辉副研究员、骆美霞研究员、刘海波硕士、张永山硕士、任军芳硕士、和渊硕士、应祝明硕士，王向东博士也参加了本专题的部分研究工作，在五年来的共同研究中，相互协作，艰苦攀登，圆满完成了专题预定的目标，取得了许多具有创新的研究成果，在此一并对他们和所有为本专题的研究工作做出贡献的同仁表示衷心感谢。

在本文集出版之际，在此特别对“我国短期气候预测系统的研究”项目首席科学家丁一汇教授自始至终给予本专题研究的关心和指导表示谢意。

陈丽娟同志为论文的收集与排版做了大量的工作，气象出版社的李太宇先生对本文集编辑出版给予了大力支持，在此深表感谢。

该文集是专题集体成果的汇编，李维京负责文集的审校工作，由于时间仓促，该文集并未完全包括本专题的所有研究成果，不足之处，在所难免，敬请赐教。

李维京

2000 年 10 月 10 日于北京

目 录

前言

月尺度动力延伸预报研究进展	李维京 (1)
月动力延伸集合预报业务系统的建立与发展	龚建东 李维京 张培群 陈丽娟 (10)
集合并行计算技术在动力延伸集合预报系统中的应用	龚建东 张培群 李维京 (17)
T63 业务预报谱模式四维变分同化系统	龚建东 (25)
集合预报最优初值形成的四维变分同化方法	龚建东 李维京 丑纪范 (34)
最优初值集合对月动力延伸预报效果的改进	龚建东 李维京 丑纪范 (39)
奇异向量法集合预报	刘金达 (48)
利用 Lorenz 系统探讨四维变分同化方法形成集合预报初值的特点	龚建东 李维京 丑纪范 (54)
气候吸引子与最优集合方法	张培群 李维京 (60)
最优集合方法在'98 汛期动力延伸预报中的实验	张培群 李维京 祝昌汉 (63)
集合方法在月动力延伸预报信息提取中的应用	杨辉 张道民 纪立人 (69)
模糊优选法及其在月集合预报中的应用	张永山 李维京 丁一汇 丁裕国 (78)
动力延伸预报中的信息提取和减小误差试验	张道民 纪立人 (87)
动力延伸预报产品释用方法的研究	李维京 陈丽娟 (97)
利用两层斜压模型进行集合预报产品释用方法的研究	金荣花 李维京 (106)
月动力延伸集合预报产品的全面分析和解释应用	陈丽娟 李维京 (113)
月动力延伸预报技巧之预报	张永山 李维京 (121)
区域气候模式对标量粗糙度的敏感性试验	和渊 苏炳凯 赵鸣 (128)
陆面过程对月动力延伸预报模式的影响	和渊 任军芳 苏炳凯 赵鸣 李维京 (146)
模式不同分辨率对月动力延伸预报结果的影响	刘金达 应祝明 (153)
实时海温对月动力延伸预报影响的数值实验研究	骆美霞 张道民 (161)
抓住机遇, 迎接挑战	丑纪范 (168)

月尺度动力延伸预报研究进展

李维京

(国家气候中心, 北京 100081)

摘 要

96-908-02-01 专题主要承担了月尺度动力延伸预报方法的理论研究、预报系统的建立与完善以及业务应用等方面的任务。本文简要介绍了本专题五年来的主要研究成果, 主要包括: 基于巨型 MPP 计算机建立的并行化月动力延伸集合预报系统的介绍; 关于动力延伸集合预报初值形成的理论与应用研究; 提出了最优集合的原理与方法及其应用; 介绍了月动力延伸预报产品释用方法的研究与应用; 关于纬向平均场对月预报影响的诊断分析和数值试验研究; 侧重介绍了对模式下垫面物理过程的改进等方面, 同时包括对未来气候数值预测领域发展的展望。

关键词: 月动力延伸集合预报, 并行业务系统, 集合预报初值形成, 集合预报信息提取

1 前 言

“动力延伸预报方法研究”专题的总体研究目标是, 在 T63L16 中期数值预报模式动力框架的基础上, 从预报模式的改进、集合初值的形成、最优集合方法的研究、模式预报后处理信息的提取等方面着手, 提高动力延伸预报的预报能力。业务系统建设的目标是在能满足业务时效性和准确性需求的同时, 又能将已有的最新科研成果在业务系统中得以实现。专题在以往工作的基础上, 通过五年多的不懈努力, 一方面继续对理论和方法进行了更加深入的研究, 取得了可喜成果, 另一方面积极完成已有成果向业务应用的转化和推广工作, 现已建立了一套具有我国自己特点的、可以投入业务应用的月动力延伸预报业务系统, 部分月预测产品和解释应用方法已经在有关的区域和省级气象部门应用, 该系统对我国月气候预测水平和能力的提高具有重要的意义, 目前已经是每月气候预测业务的主要参考方法之一。主要研究成果简要概括为以下六个方面。

2 建立基于巨型 MPP 计算机并行化的月动力延伸集合预报系统

1996 年, 专题首先在 Cray EL98 矢量并行计算机上初步建立了以 T63L16 模式为基础的准业务运行系统, 面向业务, 边研究边应用, 促使已有成果向业务转化。当时建立的月动力延伸集合预报运行系统, 初始场的选取采用时间滞后方法 (LAF), 集合成员数为 8 个, 分别选各旬的最后两天的 00、06、12、18GMT 的初始化资料作为初始场, 积分 30 天进行集合预报, 每月制作 3 次预报。该系统在许多方面 (如提交作业、监控作业执行等) 实现了自动化, 特别是建立了方便的可视化平台, 提高了可视化程度。此外, 增加了对预报结果的检验与评估系统, 在实况资料完整的情况下, 可定时对预报技巧进行评估; 加强了模式初值场、预报产品的存档管理, 保证了历史资料的积累; 增加了预报释用产品。月动力延伸预报准业务系统在 1996 年初步建立后, 随着科研成果的不断积累, 该业务系统也进行了不断完善与

改进。

然而, Cray 机上运行的矢量并行程序极大地妨碍了新的科研成果向业务上的转化。为了适应月气候预测业务的时效性需求, 并且充分利用中国气象局最先进的大规模并行巨型计算机资源, 专题研究组对建立在 Cray 机上的整个业务系统进行移植和扩充, 在“神威”并行计算机上重新建立了基于标量并行程序的并行月动力延伸集合预报系统^[1], 同时在“银河 III”上建立了备份业务系统, 以保证实际预测业务需求。建立并行业务系统的主要原因是由于利用 T63 谱模式制作动力延伸集合预报时, 由于模式非常复杂, 模式的计算量大、积分时间长, 同时又需要对多个初值的积分结果进行集合, 而业务预测又有时效性要求, 因而对快速获得动力延伸预报结果这一方面提出较为苛刻的要求。据估算, 在 2 亿次/秒运算速度的巨型机上做月尺度的动力延伸预报需要 10 多个小时, 此外还需 1 小时进行后处理, 当延伸时间更长时, 所需要的计算时间更长, 这就使得动力延伸预报方法在业务中的应用受到限制。现在, 单纯靠提高单机计算速度来缩短计算时间的方法并不现实, 一种可行的方法是利用并行计算机, 将计算方法进行分解, 利用多个计算机或多个计算处理单元来进行并行计算, 以达到提高计算速度、节省计算墙钟时间的目的。业务预测的需要和并行技术的发展, 使得对 T63 谱模式进行并行处理既非常必要, 又有实现的可能^[1, 2]。

对月动力延伸集合预报系统的并行化的基本出发点是, 一方面实现以初值个数为基准的并行, 另一方面, 对每个初值的延伸预报, 采用计算方法的并行, 利用并行方法加快计算速度, 同时, 实现后处理与模式积分的并行。这三个层次的并行化其实质是充分利用 MPP 具有多个计算处理单元的优点, 节省计算机磁盘资源, 同时提高计算效率, 满足业务时效性要求。

首先是对集合预报不同初值的并行运算, 利用 MPP 计算机具有多个节点, 并且每个节点都可以用于独立计算这一优点, 非常便于进行集合预报。通过控制 MPP 计算机的节点, 使得每个节点完成一个初值的动力延伸预报, 是一个非常有效且可行的方法。

另外, 为了进一步提高 T63 模式的并行化程度, 专题组利用 MPI 信息传递方式将原来串行运算的模式重新改写为标量并行运算模式, 实现了对模式计算方法的并行。对数据结构并行化的方式是采用每个处理单元处理同一个数据结构不同部分, 信息传递是自动实现的, 不需要用户干预。在将 T63 谱模式并行化时, 一方面需要考虑并行计算机的结构, 另一方面需要从模式本身的设计结构出发, 在尽可能简单的情况下, 实现并行, 提高计算效率。专题组根据 T63 谱模式在富氏空间和格点空间时需要完成富氏变化、物理参数化、统计等计算量最大, 需要计算时间最多的特点, 以及富氏空间中不同纬圈的结构完全相同, 相互之间没有顺序关系的特点, 提出按富氏空间纬圈进行计算的并行化分解方案, 实现了对预报模式本身的并行。这样就可以利用更多的计算机节点进行一个初值的运算, 运算的结果也表明, 获得集合预报结果的时间为单节点的 $1/4 \sim 1/5$ ^[2]。而且, 动力延伸时间也从原先一个月延长至 45 天。

最后, 实现模式运算与后处理并行, 模式运算得到的临时计算结果被后处理程序直接处理, 而不是保存在磁盘上, 这不仅节省了用于后处理的时间, 而且节省了计算机资源。

在实现 T63 谱模式并行化时, 按模式的特点, 同时进行了模式初值之间、模式物理过程、模式积分与后处理的并行化。更进一步, 专题组针对集合预报初值形成时运算量大的缺陷, 实现了对集合预报初值形成方法的并行化处理, 如下文提到的四维变分同化方法、奇异向量生成方法等, 使得整个业务系统不仅在模式运行时计算墙钟时间大幅度缩短, 而且在集

合预报初值形成时的计算时间相应缩短。在这些并程序的基础上,现在初步建立了基于 MPP 计算机的并行初值的集合预报系统,实现了 MPP 计算机节点的指定、作业的提交、延伸预报产品信息提取等过程。现有动力延伸系统已经可以方便、准确的运行。专题组还建立了一套操作方便的、便于业务应用的可视化工作平台,使得 T63 动力延伸预报业务系统的运行逐步实现正规化,相应业务流程已经建立起来,并可以方便的实现菜单操作,对作业提交、运行监控、结果处理、可视化输出等整个过程都可以方便地监控和操作^[1]。经过课题组的努力,现在月动力延伸预报的预报产品已逐步推广到全国气象部门在月预报业务中应用,该方法已成为月预报主要参考依据之一。动力延伸预报产品主要包括常规的 500hPa 月平均环流及其距平场的预报和月降水距平预报等,其中 500hPa 月平均高度距平预报与观测的距平相关系数达到了 0.35~0.40^[16,24],实现了预期目标,而且对西太平洋副高强度等各种环流特征量的预报技巧更高,为月预报提供更为有用的量化预报依据。

3 动力延伸集合预报初值形成的研究与应用

如何恰当地形成初值是月动力延伸集合预报的关键问题。经过五年来的研究与实践,专题组在坚实的理论基础指导下取得了重要进展,提高了月动力延伸预报的技巧。我们在集合预报初值形成方面所取得的成果主要有三个方面:

3.1 四维变分同化方法的研究和应用^[3~8]

四维变分同化方法综合了动力延伸预报所用蒙特卡罗法(MCF)和滞后平均预报法(LAF)的优点而避免了其缺点。获取的各个初值不仅应用了多个时刻资料并与动力模式相协调,而且彼此是靠得比较近的,不像滞后平均预报在起始时刻诸个初值的差异远远超出了观测误差的不足,或者蒙特卡罗法的初值只应用了一个时刻的信息且与动力模式不相协调的缺陷。有关这一理论的深入研究为集合预报初值的形成奠定了坚实的基础,现在,已经开始从胞映射的角度进行研究,对这一方法的本质予以揭示,为初值集合的形成提出了更为合理的理论基础。

3.1.1 初值形成的技术路线

初值的形成是月动力延伸集合预报的难点,当前常用的蒙特卡罗方法(MCF)和滞后平均方法(LAF)形成的预报初值都各有缺点。表现在 MCF 方法生成的初值虽然有明确的统计意义,但是它的初值成员是在观测值上叠加随机扰动的方法产生,只含有一个时次的信息,且与动力模式不相协调。虽然在选取时与实际大气靠的比较近,但由于模式的自身调整,使得它的演变迅速偏离实际大气。LAF 方法利用前后多个时次的初始场,在 MCF 意义下,每个初值成员都由当前时刻以前的初始场积分而来,含有多时刻信息并与动力模式协调,这就部分克服了 MCF 方法在动力学上的不足。但初值成员与观测值之间的偏差也超出了观测误差,LAF 方法就不具备 MCF 方法的统计意义。为此,专题组提出利用四维变分同化来吸取 MCF 方法和 LAF 方法的优点并克服它们的缺点,来研究一种更好的初值形成方法。这种方法的思路是,直接以初值与观测值的偏差为参考,对每个 LAF 方法中的初始场予以调整,只选择那些在 MCF 意义下有明确统计意义的初值。最后的初值成员,一方面具有 LAF 方法含有多时刻信息、与动力模式协调的长处,同时又具有 MCF 方法的统计意义^[4]。这种初值形成方法在国内外尚属首次提出。

3.1.2 初值形成的效果检验

基于上述思路,课题组首先集中力量发展和完善了 T63 谱模式的四维变分同化系统,并将该同化系统用于新的初值形成。这一部分工作量非常大,编写程序数万行。通过努力,课题组建立了一套完整的初值形成系统,并进行了数值检验^[3]。集合预报的效果表明,通过共轭模式反演获得初始场,利用了多个时刻信息,确实改进了预报,证实了理论结果。将这一成果应用在 T63L16 模式上,来改善一个月时间尺度的预报,不但在计算机资源上提出高的要求,另一方面,对这一方法的简化处理也显得尤为重要。专题组根据四维变分同化系统的特点,实现了对不同初值之间、模式物理过程等两个方面的并行化程序设计,建立了基于标量并行计算机的 T52L16 四维变分同化系统,加快了计算速度,使得该方法可以在业务中使用。从所完成的试验结果来看,该方法对旬尺度的延伸预报有很好的改进作用,距平相关系数提高 0.1 左右^[4,5],对月动力延伸预报也有较好的改进作用,距平相关系数提高 0.05 左右^[5],提高了预报准确率,改善了预报结果,达到了专题合同对初值形成的要求。

3.2 逆切线性方法的研究和应用

利用四维变分同化方法来形成初值集合,对计算机资源提出了较为苛刻的要求,特别是同化方法本身所要求的迭代过程,更是需要大量的计算机时,这为该方法在业务上的应用产生障碍。直接利用切线性模式,在误差允许的前提下,将它反向积分一次来获得初始扰动值,而不用多次迭代,无疑会极大地减少计算量。为此建立了基于 T63L16 模式的逆切线性预报模式系统,并经过了检验^[6]。对照数值实验表明,直接利用逆切线性方法,能对旬尺度的预报有所改善。

3.3 奇异向量方法的研究和应用

利用奇异向量法来寻求初值扰动中的最大扰动方向,为初值集合提供最大的不确定性,是与四维变分同化方法思路相反的一种初值集合形成方法,也是目前国际上较为广泛应用的一种方法。这种方法是利用切线性模式及其伴随模式来求解扰动的最大特征值和特征向量^[7]。同样对计算机资源提出了较高的要求,为了便于这一方法的应用,对切线性模式及其伴随模式进行降阶、简化处理,从 T63L16 降阶到 T21L16。试验表明,该系统可以较好地得到最大扰动方向,将这一成果应用在初值集合形成上,可以对预报结果有所改善。1998 年初步建立该系统后,1999 年已经进行了大量的业务化试验。这里要特别指出的是我们研究的该方法在 1999 年建成的中期集合预报系统的初值形成中得到了应用,是中期集合预报系统的关键技术之一。现在已经将这种方法实现了初值之间、模式物理过程算法两个方面的并行化处理,并在业务系统中实现了 T42L16 的奇异向量生成的并行化初值系统。

4 动力延伸集合预报理论与方法的研究

集合预报方法的提出及其在气候模式预测中的成功应用被认为是大气科学领域的一项重要成就之一。但是,就其理论而言,尚待完善与发展。本专题瞄准这一发展方向,进行了有益的探索与研究,从理论和实际应用两方面取得了新的进展。

4.1 集合预报理论与方法研究

由于动力气候模式是一个高度非线性系统,所以对初值误差极为敏感,使得确定论的

唯一解很有可能具有不确定性或者是具有随机性,为找出所有可能的解,就要估算初值中误差分布的可能范围,根据这一范围,可给出一个初值的集合,此集合中,每一初值场都有同样的可能性代表实际大气的真实状态。国外目前集合预报的思想主要是取初始时刻在一定范围内的一切可能的初值,从大量的初值出发,就可相应得到大气未来一切可能演变的预报,也就是尽可能将未来大气演变的可能状态都包含在该集合中,对这些不同预报状态的集合平均就是所谓的集合预报。这需要尽可能多的初值,国外的集合预报的成员大多在 30 多个,有的多达 50~60 个,甚至估计未来将要多达上百个到数百个集合成员。但是由于模式是一个非线性系统,不同的初值其终态可能属于不同的吸引子,而真实大气未来演变又是唯一的,而且是确定的,可见对于大量的属于不同的吸引子的预报结果进行集合平均显然是不合适的。为了改进集合预报的效果,我们希望将属于同一吸引子的成员进行集合平均,同时减少集合成员的个数,减少计算量。为达到此目的,我们提出利用四维变分同化方法来解决这个问题^[4, 5]。该方法利用多个时刻的历史资料,经由四维变分同化调整来减小初值与实际观测的偏差,最后形成一组最优初值,一方面使得它们与实际大气的偏差足够小,不超过初始误差,使预报所得的各个成员尽可能属于同一吸引子的吸引域,各个成员的离散度也相对较小,具有明确的统计意义,即描述了初值和初始误差的演变,同时它们包含了多个时刻的历史演变信息,且对动力模式而言是协调的。这一集合预报的思想方法与目前国外所用的方法是不同的。我们用大家熟知的 Lorenz 系统利用数值试验证实了这一集合预报理论与方法的正确性和有效性^[8]。

4.2 最优集合预报方法的研究

(1) 提高短期气候预测水平,必须首先揭示短期气候的演变特征,特别是要刻画短期气候的吸引子特征结构。利用历史资料建立描述吸引子结构的状态空间,改进集合预报的方法,提高集合预报效果,是一个重要的研究方向。专题组利用历史资料所确定的吸引子支撑空间,提出最优集合的形成方法^[9]。这种方法利用 NCEP 的 1979~1995 年 17 年再分析资料,利用 EOF 方法来形成支撑吸引子的基底,对在该基底上有较大投影的集合成员给予较大的权重,而与气候态差异较大,在该基底上投影较小的集合成员的权重相应较小。对 1998 年夏季 6~8 月的预报表明,该方法所得到的集合结果的预报技巧有明显提高^[10]。

(2) 给出集合预报中不同成员的最佳权重。在一个集合预报中,不同成员的预报结果不相同,在将各个成员取相同权重时,集合预报结果不是所有成员中最好的。如何最大限度地利用集合预报中技巧较高的成员信息,提高集合预报效果,是改进集合预报的重要问题。专题组不仅利用集合成员的预报结果在吸引子空间投影的大小来决定权重系数,同时给出以每个成员的逐日预报的离散度为权重的方法,对离散度大的,给予较小的权重,而对离散度较小,预报相对一致的给予较大的权重。实验表明,这种方法对 15 个例子的平均距平相关系数由 0.275 提高到 0.397,提高了 44%,同时 RMS 由 60.6 减少到 57.6,集合预报的能力相应提高^[11,12]。

(3) 根据预报结果中有效信息随时间的变化规律,进行集合预报的改进。随预报时间不同,预报结果中所含有的信息也不相同,给出该信息的最佳分布特点,最大可能地提取预报信息。对所提出的随时间等权重、随时间线性递减、随时间按二次抛物线递减三种方法,在预报中进行进一步的预报实验,结果表明抛物线权重方法明显优于其它两种方法,这种方法已经投入业务,结果较为稳定。利用模糊优选方法,给出一个新的 500hPa 月预报场的集

合方案,该方案中的权重系数比较客观地反映了预报水平的时空变化,预报技巧有明显提高。根据春季 500hPa 高度场误差的时空分布特征,利用所得权重系数对预报场进行误差订正,效果更为显著^[13]。

5 纬向平均场对改善月尺度动力延伸预报的研究

深入了解波流相互作用,揭示超长波在动力延伸预报中的作用。已有的工作集中在纬向平均场与超长波在月尺度动力延伸预报中的相互作用,超长波与天气尺度波间的相互影响。通过对大量的月尺度动力延伸预报结果的分析研究发现,现有动力延伸预报中对纬向平均场与超长波的预报都有较大误差,提高它们的预报效果无疑对月预报效果提高有较大的影响。已有的数值实验表明,当纬向平均场与超长波的预报提高时,总体预报效果有较大的提高。图 1 给出 500hPa 高度场的距平相关系数与超长波的关系,当超长波自身的预报效果好,则整个预报相应也好。所以如何改进纬向平均场的预报,进而提高月动力延伸预报效果是本专题的又一重点研究的内容之一。

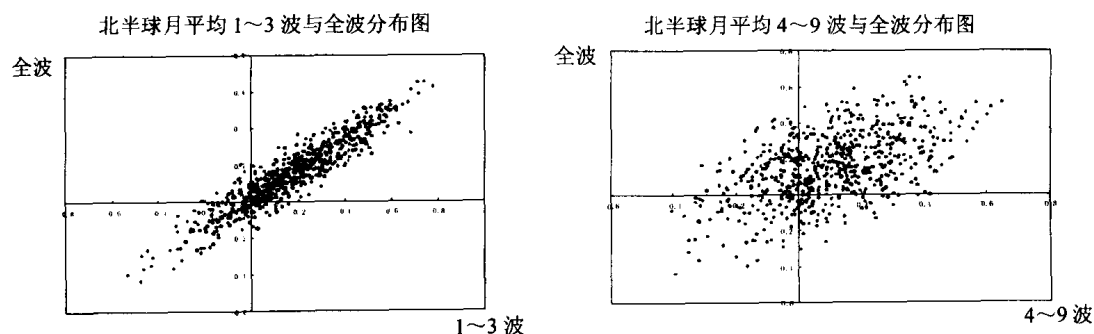


图 1 500hPa 全波预报和实况的距平相关系数与超长波和超长波实况(左)、天气尺度波与相应实况(右)距平相关系数间的分布关系。左图明显表示出超长波与全波存在相当好的线性关系,超长波的预报基本上决定了整个预报的效果。数据源于国家气候中心 5 年月动力延伸预报结果。

5.1 加强纬向平均场对改善月尺度动力延伸预报的研究

我们用观测的纬向平均场代替 T63L16 模式中预报的纬向平均场,进行数值试验研究表明,对月预报效果具有明显的改进。说明模式纬向平均场预报优劣对月预报的预报效果影响很大,而现有 T63L16 对纬向平均场的预报并不能令人满意,存在很大误差,也就是说模式对月尺度纬向平均场这一最基本的统计特征量预报的不好。因此,对月尺度纬向平均场这一特征量的预报是提高月预报的关键之一,也是提高月预报技巧的重要途径之一^[6,14,15]。研究表明,模式对纬向平均场预报误差已经超出了气候自身的变率,所以分别用气候月平均纬向场和预报前期的第一旬的纬向平均代替模式预报的纬向平均,改进了月预报技巧,尤其对极涡的预报有较大的改进^[6]。

5.2 利用相空间重构理论建立纬向平均场的预测模型

利用 NCEP1960~1995 年 36 年的高度场资料建立纬向平均高度场距平的相空间,给出描写纬向平均高度场距平的非线性区域预测方法,对非线性区域预测方法研究表明该方法预

报的纬向平均高度距平 ACC 总体优于持续性预报、气候预报和模式动力预报。用非线性区域预测方法预报的纬向平均高度距平替代 T63 预报模式中误差较大的纬向平均高度场的预报,实验结果表明,预报效果有较大的改善^[15]。

6 动力与统计相结合,月动力延伸预报产品释用方法的研究

6.1 根据月动力延伸集合预报的环流场预测月降水预报方法的研究

过去在中短期数值预报产品的释用研究中主要是使用完全预报法(PPM)和模式输出统计方法(MOS),这两种方法都是以统计学方法为基础,所建立的要素预报和环流形势之间的预报方程只有统计学的意义而缺乏明确的物理意义。我们探讨了一种克服 PPM 和 MOS 缺陷的方法。该方法从大尺度大气动力学方程组出发,考虑了月时间尺度大气环流的特点,基于正压一层模式推导出月降水距平和 500hPa 月平均高度距平场的关系^[17],表明预报对象和预报因子之间具有明确的物理意义。然后利用动力延伸预报的 500hPa 月平均高度距平资料和站点的实际降水资料,使用统计学中的反演方法确定出预报方程中的系数,得到所预报站点的月降水预报方程,将该方程应用于实际预报试验中去,并经过独立样本检验,结果表明在形势场和要素场之间有内在的物理机制,动力与统计相结合的方法对月动力延伸集合预报产品的释用具有明显的效果。随着动力延伸预报资料的积累增多,我们对该方法进行了不断地改进和修正,基于两层斜压模式研究了月平均环流与月降水异常的关系^[18],使之可在实际应用中得以完善。

6.2 平均环流特征量的预报方法研究与应用

预报要素的准确率密切依赖于环流形势预报的水平以及形势与要素之间的统计关系,但是由于模式对月平均环流距平场的预测技巧有限,所以月降水距平等要素的预报技巧还不能满足业务需要。对模式预报的 500hPa 环流特征量进行分析发现,部分环流特征量的预报技巧高于整个形势场的预报水平。据已有的研究和经验,这些环流特征量和降水、温度等要素有很好的相关,可以建立环流特征量和要素之间的统计关系,利用模式预报技巧较高的部分环流特征量,直接用于要素预报的业务试验,这是我们进行动力延伸预报产品解释应用技术的又一尝试。动力延伸集合预报对副高面积与强度、极涡面积与强度、高原高度场以及经纬向环流指数等环流特征量预报效果较好,表明对反映大气中慢变成分的环流特征量具有较好的预报能力,如副热带高压、极涡、青藏高原高度场都是大气环流中稳定持久、尺度巨大的成员,模式基本能刻画出这些大气活动中心的特征,对这些特征量指数的预测具有较高的技巧,对实际业务预报具有重要的实用价值^[16]。

6.3 预报技巧之预报的初步研究

对月平均环流形势预报已有一定的预报技巧,但预报技巧依赖于初值,预报效果还不稳定,如何事先给出对预报技巧的判断信息,使之应用于实际业务预报,我们进行了预报技巧之预报的探讨^[19]。

对 1951~1995 年共 45 年四个季节的季平均 500hPa 高度场进行 EOF 分解,取第一和第二特征向量作为基准向量。然后将 1996 年 1 月至 1997 年 9 月 61 个 T63 月预报个例,共 460

多个成员按初始场对应季节,用基准向量进行分解,求得对应的时间系数。以前两个特征向量的时间系数所构成的二维相空间,绘出各成员第一天对应的演变特征,用这种方法分别得到欧亚地区、北半球地区春、夏、秋、冬四季时间系数分布图。可以看到,对于不同季节,预报好、较好、较差、差的个例分别集中在不同的区域,这表明对于不同的初始状态,其预报技巧不同。根据以上分析,制作集合预报时,可以先将初始场用基向量分解,求得时间系数后,绘制在时间系数分布图上,按照其落点的区域,可以初步判断预报效果技巧的水平。

7 对模式物理过程的改进,使之更加适合月动力延伸预报的特点

提高动力延伸预报效果,首先要改进预报模式的模拟能力。专题组在 T63L16 中期数值预报模式动力框架的基础上,针对月时间尺度预报的特点,侧重于研究下垫面物理过程等方面,以改进模式预报能力。

7.1 模式陆面物理过程的改进

T63L16 模式中对陆面过程的描述比较简单,几乎没有考虑植被的物理过程,没有考虑土壤特性的不同等,这种处理显然无法真实地反映大气的某些演变规律。为了克服这个缺陷,我们首先将反映地表粘性作用的标量粗糙度引入生物-大气传输方案(BATS)中,对其加以改进,并把改进后的 BATS 与 T63L16 模式耦合。这两个过程都作了相应的数值试验。改进后的 BATS 独立试验表明:对地表温度、地表潜热通量、地表感热通量等的模拟有明显改善。耦合 BATS 后的 T63 模式进行了三组试验,结果表明对 500hPa 环流的预报效果有明显改善,尤其是改进了第二、三旬的预报技巧^[20, 21]。

7.2 T63L16 预报模式的模式分辨率对月预报的影响

加倍现有的谱模式的水平分辨率,截断波长从 63 波增加为 106 波,从 T63 变为 T106,探讨模式分辨率的增加对月预报的作用。所进行的多个实验个例均表明,增加模式分辨率后,对候、旬和月 T106 与 T63 的预报结果各有优劣,相差不多,这就表明,对月预报而言,单纯提高模式的分辨率,还不足以提高短期气候预测的预报能力,必须加强对短期气候预测的物理本质的认识^[22]。

7.3 下垫面物理过程对月动力延伸预报的影响

考虑到赤道太平洋海温场对月尺度大气环流场影响较大,而原中期模式所使用的是气候平均海温,没有考虑海温场的变化对月气候异常的影响。利用实况海温替换气候海温,在环流模式中更为实际的描写海温场对大气环流的影响,有助于改进预报效果。所进行的多组实验表明,利用实况海温改进了模式的预报效果。对时间尺度长达一个月的动力延伸预报,下垫面的影响非常重要,特别是影响空间尺度大、时间尺度长的海温作用,是影响气候的最主要因子,而这一因子在短期天气预报中并不被重视。原有 T63 谱模式的下垫面采用气候海温,不能描述异常海温的影响,为此,课题组通过改造描述海温的文件,及时吸收最新海温信息的方案,形成新的描述下垫面状况的初值场,来克服原有方案的不足^[23]。

96-908-02-01 专题组经过五年多的努力,对月尺度动力延伸方面做了一些工作,但是目前月动力延伸预报水平仍然维持在 0.4 左右,还达不到完全业务使用的要求,这对我们以

后的工作提出更大的要求^[25]。回顾五年的工作,展望未来,专题组期望我国同行能够抓住国家对短期气候预测业务的迫切需要和动力延伸预报理论发展的机遇,使动力模式在月季气候预测中发挥重要的作用。

参考文献

- [1] 龚建东,李维京,张培群,陈丽娟.月尺度动力延伸业务系统发展现状.见本文集
- [2] 龚建东,张培群,李维京.集合并行计算技术在短期气候预测中的应用.见本文集
- [3] 龚建东.T63业务预报谱模式四维变分同化系统.见本文集
- [4] 龚建东,李维京,丑纪范.集合预报最优初值形成的四维变分同化方法.科学通报,1999,Vol.44,(No.10).
- [5] 龚建东,李维京,丑纪范.最优初值集合对月动力延伸预报效果的改进.见本文集
- [6] 龚建东.统计与动力相结合改进月动力延伸预报的研究.1999,兰州大学博士论文
- [7] 刘金达.奇异向量法集合预报.见本文集
- [8] 龚建东,李维京,丑纪范.利用 Lorenz 系统探讨四维变分同化方法.见本文集
- [9] 张培群,李维京.气候吸引子与最优集合方法.见本文集
- [10] 张培群,李维京,祝昌汉.最优集合方法在 1998 汛期动力延伸预报中的实验.见本文集
- [11] 杨辉,张道民,纪立人.集合方法在月动力延伸预报信息提取中的应用.见本文集
- [12] 张道民,纪立人.提高月预报效果的数值试验.见本文集
- [13] 张永山,李维京,丁一汇.模糊优选法及其在月集合预报中的应用.见本文集
- [14] 张道民,纪立人.动力延伸预报中的信息提取和减少误差试验.见本文集
- [15] 陈伯民.改进动力延伸月预报的一种新方法,2000,中国科学院大气物理研究所博士论文
- [16] 陈丽娟,李维京.月动力延伸预报产品的评估和解释应用,应用气象学报,1999,10(4)
- [17] 李维京,陈丽娟.动力延伸预报产品释用方法的研究,气象学报,1999,.57(3)
- [18] 金荣花,李维京.利用斜压模型进行集合预报动力产品释用方法的研究.见本文集
- [19] 张永山,李维京.月动力延伸预报技巧之预报.见本文集
- [20] 和渊,苏炳凯等.区域气候模式对标量粗糙度的敏感试验.见本文集
- [21] 和渊,任军芳等.陆西过程对月动力延伸预报模式的影响.见本文集
- [22] 刘金达,应祝明.不同分辨率对月动力延伸预报结果的影响.见本文集
- [23] 骆美霞,张道民.实时海温对月动力延伸预报影响的数值实验研究.见本文集
- [24] 王向东,李维京等.月平均环流的动力集合预报研究.应用气象学报,1997年增刊,134~144
- [25] 丑纪范.抓住机遇.继往开来.见本文集

月动力延伸集合预报业务系统的建立与发展

龚建东 李维京 张培群 陈丽娟

(国家气候中心气候预测室, 北京 100081)

摘 要

针对月动力延伸预报业务系统必须满足时效性和准确性的要求这一特点, 建立月动力延伸集合预报业务系统的紧迫性格外突出。本文简要介绍了该系统的历史及发展现状, 指出现有业务系统在吸取原有业务系统特点的基础上, 又有了长足的进步, 在新的并行计算条件下, 建成了并行化的集合预报业务系统, 保证了业务系统的时效性和模式运行的准确性, 特别是发展了对模式有用信息提取的方法, 方便了延伸预报的业务监控, 满足了业务需求。

关键词: 月动力集合预报 并行业务系统 可视化

1 引 言

月尺度动力延伸集合预报业务系统一方面作为“九五”重中之重 96-908-02-01 专题的工作平台, 实现科研成果的转化, 同时该系统又和月尺度短期气候预测紧密地联系在一起, 提供不同于统计方法的、物理内涵比较清晰的数值预报结果。因此, 对该业务系统的建设提出了两方面的要求, 一方面要求该系统能够体现“九五”科技成果, 将已有的科技成果转化为业务能力; 另一方面要求该系统能够满足业务使用的要求——时效性、准确性与易操作性。特别是对时效性要求是业务系统能够投入使用的关键所在, 原业务系统计算效率缓慢, 远不能满足实际业务预报的要求, 特别是原业务系统基于矢量计算机平台, 现有科研成果难于在该系统中转化。有鉴于此, 在吸取原有业务系统特点的基础上, 发展了现在的基于标量并行机的业务系统, 本文将对该系统进行简要的介绍。

2 基于串行模式的原业务系统回顾

月尺度动力延伸集合预报系统最初由李维京等发展形成, 该业务系统建立在矢量并行计算机 Cray-el98 上, 模式积分可利用全部四个计算处理单元完成计算, 据测算, 每完成一个初值的 30 天模式积分需要 5.5 小时, 后处理一个小时, 逐次完成 8 个初值的集合预报需要至少 50h。集合预报初值可使用邻近两天 8 个时次的客观分析场, 同时该系统可以提供 500hPa 形势预报和降水预报。图 1 给出该业务系统的业务流程。由图可见, 该业务系统的流程清晰, 使用较为方便, 概括了动力延伸预报从初值获得、模式积分、产品形成与保存、预报结果发布等方面的特点。然而, 该业务系统同时限制了对该系统的进一步扩充与发展, 这表现在以下几个方面:

(1) 集合预报初值的形成方法经过“九五”课题的努力, 已经从原来单一的滞后平均预报方法发展为滞后平均法、奇异向量法、四维变分资料同化方法在内的多种方法, 下垫面海温也已经从原来的单一气候值发展为包含实况海温和气候场的方法, 这就摆脱了过去

单一利用客观分析场的方法，业务流程也因此而相对复杂化。

(2) 模式本身已经从原来的矢量并行法发展为标量并行法，同时模式物理参数化过程也有所不同，对模式本身的并行相应提出，计算过程较以往单一串行模式有所不同。

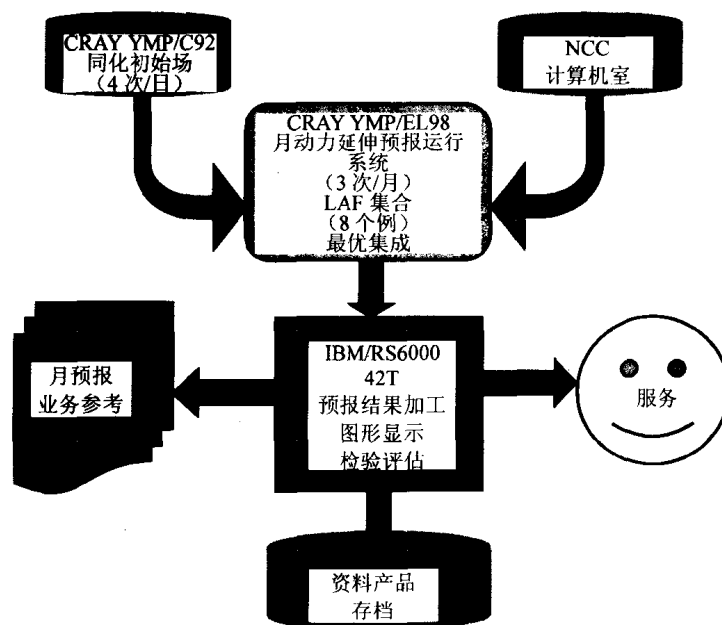


图1 原有业务系统流程图

(3) 对不同的初值成员，以往业务系统因为受到计算平台的限制，对不同初值只能依次串行积分，不能保证业务的时效性。经过发展后的业务系统应当具有同时处理多个初值成员的能力，这同时也决定了业务流程相应复杂化。

(4) 原业务系统的产品相对单一，经过“九五”课题后，预报产品相应扩充，新业务系统已经体现了产品多样化的特点。

(5) 新业务系统的检控方式也相应的有所改变。

由此可见，原有业务系统需要进行改进与完善，使之适应新的业务发展需求。

3 月动力延伸集合预报并行新业务系统的建立与发展

动力延伸集合预报业务系统的实用性在于它能满足业务预报的时效性。特别是当动力延伸预报作为一种预报方法为预报员提供有用信息时，获得愈早其实用价值就愈大。在这一点上，统计预报方法相对而言在时效性方面较动力方法好一些。月动力延伸预报的预报结果一方面和下垫面强迫有关，同时又和初值有关，这意味着能利用最近时次的初值时其预报结果要好一些，其参考价值就愈大。就要求动力延伸方法在利用最近初值的同时能尽快得到数值预报结果。但是，基于 Cray-el98 矢量并行计算机的原有业务系统难以保证这一点，过长的计算时间使得预报员在最终决策的时刻不能得到延伸预报的所有预报结果，所以，对原有业务系统的升级势在必行。

原业务系统的计算平台计算处理单元个数太少，速度较慢，这是限制业务系统使用的最关键的因素。在新的标量并行计算机平台上，处理单元的个数增多，速度增快，将会加快获得集合预报结果的时间。在标量机上实现动力延伸预报模式积分的方法有这几种：