

1949—1966年中华人民共和国在大气动力学和数值天气预报方面的研究状况

- William Blumen, Warren M. Washington
- 翻译：马玲 赵宇烽（特约，外事服务中心）
- 译校：贾宁（特约，外事服务中心）
- 编辑（信息补充与加工）：张萌

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.025

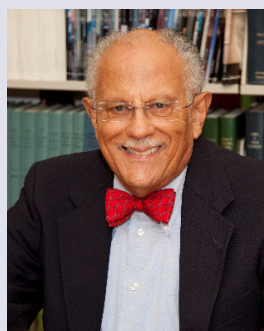
【编者语】

美国学者于1973年撰文对1949—1966年中国气象工作者开展的大气动力学和数值天气预报研究方向和成就进行了详细阐述。主要包括积云和湍流边界层动力学，以及中尺度、天气尺度和行星尺度运动的动力学。特别是与业务预报模式的发展有关的方向(图1)^①。

1 引言

本次调查旨在对中华人民共和国成立至1966年中在大气动力学和数值天气预报这一比较广泛领域所开展的研究活动进行深入了解。当时，中国科学期刊的海外发行已经停止。在这段时间里，期刊出版暂停到什么程度，以及在多大程度上进行了积极的科学研究，至今仍不清楚（如可参考Wu和Sheeks

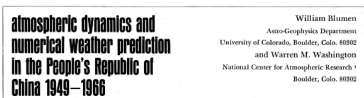
链接1 第二作者 Warren M. Washington



Warren M. Washington

Washington出生在美国俄勒冈州波特兰。他从小学开始就对科学感兴趣，后来在俄勒冈州立大学获得了物理学学士学位和气象学硕士学位，之后在宾夕法尼亚州立大学攻读气象学博士学位。1963年，他作为研究科学家加入NCAR。

作为第二个获得大气科学博士学位的非洲裔美国人，Washington为来自不同背景的几代年轻研究人员树立了榜样。他依托UCAR的SOARS项目（大气研究和科学的重大机遇）指导了数十名研究生和本科生。1994年，Washington任美国气象学会主席。1999年，获得了美国气象学会颁发的查尔斯·安德森博士奖，表彰其作为导师的开创性努力，以及对个人、教育项目和旨在培养多样化大气科学家群体的宣传活动的热情支持。”2011年被任命为国家科学院院长（National Associate of the NAS）。



Abstract
The scope of activities and accomplishments in areas of atmospheric dynamics and numerical weather prediction under investigation in the People's Republic of China during the period 1949-1966 is surveyed. The principal topics considered include cumulus and turbulent boundary layer dynamics and the dynamics of meso, synoptic, and planetary-scale motions. Attention is focused on the complementary research paths followed in theoretical and numerical dynamics, particularly in relation to the development of operational forecasting models. These latter accomplishments are traced from the late 1950s until mid-1966, at which time over-seas distribution of Chinese scientific journals was discontinued. Significant investigations of both regional and global circulation regimes have also been noted. However, a more exhaustive overview of the contributions made by Chinese meteorologists to the theory of the general circulation appears warranted.

1. Introduction
The present survey is intended to provide a perspective of research activities in a relatively broad area of atmospheric dynamics and numerical weather prediction that had been in progress in the People's Republic of China up to the middle of 1966. At that time, overseas distribution of Chinese scientific journals was discontinued. It is still not clear to what extent active scientific research was suspended and to what extent active scientific research was pursued during the intervening six and one-half years, e.g., Wu and Sheeks (1970); nor has there been any indication, to our knowledge, that scientific journal distribution will be resumed in the near future. Yet, we feel that there is much to be gained in looking at past accomplishments, particularly during the period, 1959-1966. This latter era is characterized by active and fruitful research in atmospheric dynamics, in contrast to the previous decade when the meteorological services and educational institutions were undergoing reorganization and development, e.g., Hsieh et al. (1959). However, this early period was used for a significant effort.

*The National Center for Atmospheric Research is sponsored by the National Science Foundation.

502

图1 文章首页

(1970))；据我们所知，也没有任何迹象表明科学期刊的发行将在不久的将来恢复。然而，我们认为，审视过去的成就，特别是1959—1966年的成就，大有裨益。后一个时代的特点是大气动力学研究活跃，成果丰硕，与前十年气象部门和教育机构的调整和发展时期形成鲜明对比（如可参考谢光道等（1959）^②）。然而，人们注意到在这一早期阶段，在大气环流研究的许多方面开展了大量工作，特别关注了东亚上空环流的特点（如可参考Staff Members（1957；1958a, b））。

最近对科学设施的概述是由C.H.G.Oldham（1965, 1967）所作的，他是一位会讲中文的地球物理学家，在1964年和1965年访问中国期间参观了教育和研究机构。他对中国科学院的主要研究所，即地球物理和气象研究所进行的气象研究范围作的叙述包括以下问题领域：1) 环流型的理论研究；2) 数值天气预

资助信息：中国气象局气象干部培训学院科研项目（重2021-015）

- ① 原文发表于：Blumen W, Washington W M. Atmospheric dynamics and numerical weather prediction in the People's Republic of China 1949-1966. Bulletin American Meteorological Society, 1973, 54(6): 502-518.
- ② 编者注：编者通过对文中引用的中国作者文献进行逐条核实，给出部分中国作者中文姓名（蓝色字）；并补充相关知识链接和图。

报；3) 平流层和对流层的季节性变化；4) 太阳活动对大气的影 响；5) 人工增雨的理论与实践工作；6) 大气电学和雷达气象学。

该研究所发表的出版物的数量和质量充分证明了 Oldham 提供的这些调查结果。特别是，已发表的文献表明，重点是了解积云动态中的非线性反馈机制，以及影响天气尺度和行星尺度波的适应性和演变过程。边界层动力学的研究已经非常成熟，同时也在努力改进数值模式。然而，其中一些发展受到计算机能力的影响。值得注意的是，气象学家竺可桢教授曾任中国科学院副院长，该研究院是负责协调中国教育和研究组织的机构。澳大利亚物理学家 M. Oliphant (1966) 曾报告过竺可桢教授对澳大利亚联邦科学和工业研究组织开展的人工增雨活动感兴趣。在最后一次报告 (Suttmeier, 1970) 中，竺教授仍在他担任了近 20 年的重要职位上工作。

已故的罗斯贝教授在 *Tellus* (1951, 图 2) 中预测气象学会蓬勃发展，并预测中国会做出重大贡献。在一定程度上，罗斯贝对这些发展的影响是显而易见的：他与芝加哥大学和斯德哥尔摩大学的关系为他提供了与一些气象学家的个人联系，而这些气象学家后来在科学上大力领导和指导了大气科学的发展，特别是在将动力学应用于大气环流现象方面 (见附件)。罗斯贝对中国气象学发展的兴趣，也可以从他的一篇关于阻塞波动力学的文章 (英文) 发表在《中国地球物理学会学报》(Rossby, 1950) 上看出，罗斯贝之所以关心中国，是因为他关心气象研究方面的国际合作，同时关心为各国团体之间构建信息自由流动的机制。

随着与西方联系的减少，在数值天气预报、边界

It is also fairly evident that the limited objectives of the Stockholm research team are distinctly different from those important responsibilities which the World Meteorological Organization would wish to assign to any technical bureau which might be set up under its auspices. Experience has shown that the various national weather services represented in the latter organization are likely to profit more from properly staffed and equipped independent research teams organized and operated in academic settings outside the regular government services than from any attempt to conduct the required research within the rigid framework of the official government meteorological bureaus. In a similar way one might reasonably conclude that the World Meteorological Organization is likely to profit more by fostering the organization of independent units or teams to conduct its research than by attempting to enter directly into research operations.

Stockholm in July 1951

C.-G. Rossby

图 2 罗斯贝发表在 *Tellus* 的文章节选

层动力学和云物理方面的研究反映了苏联和中国科学院之间日益广泛的科学合作，例如，Chao (1959)；Petrushevski (1959)。例如，1958 年，苏联气象学家 E. M. Dobrischman 协助 (北京) 中央气象局启动了中长期数值预报。在此期间，中国学生在苏联的研究所接受了气象学的研究生培训。这些学生后来发表的有关云物理学和大气动力学方面的研究质量似乎都达到了很高的水准。虽然气象教育和研究的一些模式是仿照苏联的模式进行的，但已发表的科学文献提供了有力的证据，说明中国气象学家甚至在发展的早期阶段就可经常背离既定的准则。然而，牛津大学物理学家 K. Mendelssohn (1967 年) 最后一次访问中国是在 1966 年底，他报告说，中国科学家充分肯定了多年前就离华的苏联专家提供的帮助。

根据多年积累的证 据，气象学领域似乎在 1966 年之前已经成为一项成熟的、不断发展的科学活动。同样明显的是，如果这几年的研究活动能跟上早先的既定趋势，那么在许多领域的贡献是可以预期的，甚至是可以期待的。

除了直接的研究成就外，Rigby (1961) 对中国气象学、水文学和海洋学的调查成为关于主要教育机构、研究中心、气象部门、现有期刊 (至 1960 年) 的最佳单一信息来源，还附有一份关于 1949—1960 年发表的出版物的长长书目。Wu 和 Sheeks (1970) 讨论了中国科学历史背景的某些方面，包括直到 1965 年气象学在科学组织结构和科学发展中的作用。另一个重要的历史和科学资料来源是中国科学院 (1954) 用英文出版的气象文集，收录了以前出现在各种刊物上的气象文章，包括 (美国气象学会的) 《气象学报》。

本调查完全以文章和摘要的英文译文为基础，包括一些原来发表在俄文期刊上的文章和摘要。然而，由于现有译文的质量不统一，加上我们无法获得所有已发表的文献，可能会出现无意的内容失真。本文引用的许多文章发表在季刊 (中国的) 《气象学报》(英文版) 上。该刊于 1930 年，即中国气象学会成立 6 年后开始出版，一直持续到 1966 年，期间未间断。该刊文章的科学性较高，范围较广，从旱涝灾害、农业气象、日地关系的研究到各种环流和预报研究，都有涉及。伊曼纽尔学院研究语言中心 (1967) 为这些文章编写了一份宝贵的参考资料。其他相关文章，以及一些最初发表在 (中国的) 《气象学报》(英文版) 上的文章，也出现在北京出版的英文期刊《中国科学》和《科学记录》上。有关原始资料的其他信息和译文的购买信息，请参见第 4 节。

2 大气动力学

徐尔灏 (1959) 回顾了1949—1959年中华人民共和国大气动力学领域的发展情况。在引用的30篇参考文献中, 只有约20篇直接与大气动力学的分析有关。对三个主要领域进行了阐述: (1) 环流系统的动力学, 包括能量的产生和传递、流体动力不稳定性以及大尺度地形特征和地表加热所产生的影响; (2) 湍流边界层动力学; (3) 动力模式的分析, 在开发业务数值预报系统中的应用。这十年间开展的许多工作是开发性和探索性的, 无需详细讨论。例如, 第(3)项下的所有出版物都是对Kibel在开发苏联使用的短期预报模式方面工作的批判性审查。然而, 本节将讨论早期对大尺度和边界层动力学的研究与后来这些领域的发展之间的关系。

尽管人们经常注意到, 开展理论研究的目的是为了应用于国家的经济发展, 但20世纪60年代初的研究活动范围与所有具有活跃研究中心的国家所开展的类似活动相比, 还是比较难以区分的。下文概述了所开展的主要课题: a. 积云动力学, 包括微物理过程; b. 中尺度动力学: 1) 山地效应, 2) 边界层湍流, 3) 台风; c. 地转适应; d. 天气尺度和行星尺度的动力学。

数值模拟将在第3节中单独讨论。这里将不对大气环流研究的广泛方面进行讨论, 尽管这项工作肯定值得认真研究。目前的目的是追踪理论动力学的发展路径, 因为它是针对环流研究提出的基本问题以及通常与业务预报模式相关的更多实际问题而发展起来的。

a. 积云动力学

巢纪平和周晓平 (1964) 编写了一本关于积云动力学的综合专著, 是现代气象学问题系列专著的一部分。从历史上看, 这项工作在Squires (1962) 对前十年云动力学的回顾与Ogura (1972) 最近的工作之间架起了一座桥梁, 后者强调了从20世纪60年代中期到现在的研究成果。

这本专著结构合理, 以世界范围内该领域的研究进展为背景介绍了中国开展的活动。全书共引用了82篇参考文献, 其中中国科学家的文献为14篇 (占总数的17%)。此外, 还发现另外5篇研究论文以及巢纪平 (1963) 的一份简短进展报告, 但该专著没有引用。

似开展了大量针对云中微观物理和电气化过程的研究, 例如, 顾震潮等 (1963)。然而, 除了在考虑微观结构和宏观云动力学之间的相互作用之外, 这里将不讨论这项工作的细节。

该专著分为五大专题: 积云的观测特征、积云动

力学基本方程、物理特征和特征参数、大气热对流、积云的发展和结构。中国气象工作者在所有这些研究领域都做出了贡献。

观测。陈瑞荣 (1963) 用摄影和探空测量的方法, 在华南地区上空观测到了厚度从几百米到几千米的积云细胞的发展情况。文中介绍了与积云相关的细胞或气泡的快速发展和消散 (5~20 min) 的观测结果以及对环境温度和湿度分布的测量结果。黄美媛 (1963) 使用机载采样器测定了在苏联观测到的积云的液滴光谱和含水量; 他的观测结果表明, 有4~5个含水量最大的中心, 显然与构成云的单个细胞有关。然而, 在云上部发现的数量最大, 这与Ackerman (1959) 的观点一致, 而他例如研究了同等深度的信风积云。

方程。众所周知, 从流体力学方程中过滤声波的原因是为了消除物理上不重要的运动, 并能够增加大气对流数值模式的时间步长, 这为巢纪平 (1962e) 开发一组非弹性方程提供了背景。他对这个问题的处理方法以及他所获得的结果与Ogura和Charney (1962) 以及Ogura和Phillips (1962) 所使用的方法是相似的, 所获得的结果是相同的。

顾震潮 (1964) 检查了对大气自由对流的相似性分析, 但这项工作的细节不详。

影响发展的物理特征。在云层与其环境之间的相互作用所带来的各种影响中, 盛行的垂直风切变和环境分层的影响最受关注。巢纪平 (1962a, b, d) 以及巢纪平和陈历舒 (1966) 的理论研究是关于这两个特征的相互影响。虽然尝试了各种简化的数学方法, 但主要结果基本上是对Miles-Howard定理的解读: 较大的风切变和较低的静态稳定性为不稳定的发生提供了有利条件。

巢纪平 (1962d) 和周晓平 (1963) 也曾试图评估不断增长的干扰对环境的非线性影响。他们的基本方法包括评估

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \overline{w'T'}, \quad (1)$$

其中: T 表示温度, w 为垂直 z 方向的速度, t 为时间, 素数表示与水平平均值的偏差, 用条形图表示。正如预期的那样, 为了更容易地解决问题, 对问题进行了较大程度的简化。然而, 人们认识到这种方法的固有局限性。然而, 正如巢纪平和周晓平 (1964) 所述, 开展这种初步研究的动机与当时关于不同尺度系统之间相互作用这一课题的主流思想是一致的: “虽然积云的发展受到中小尺度系统的影响, 但它也可能反过

来对广大地区的环境产生干扰影响，从而对这些系统的活动形成制约。”

热对流。巢纪平（1962c）和周晓平（1962，1964）展示了数值模式，用来说明潮湿大气中轴对称对流单体的发展。在前一种情况下，在底部边界规定了随时间变化的加热，而在后一种研究中，通过将初始扰动引入位于下边界上方的静态不稳定的湿润层来启动对流。这些研究与Malkus和Witt（1959）和Ogura（1962）的研究之间的比较后来出现在上述专著中。

另一方面，胡广兴（1962）采用轴对称模式研究了一个发展良好的要素的耗散情况，该要素可快速过渡到分布广泛的下降气流，其当表面加热停止时就会出现下降气流。

积云动力学。从现有的文献中可以清楚地看出，尽管所采用的模式相对不成熟，但研究的方向是认识积云的微观物理学和宏观动力学之间的相互反馈效应。然而，这一缺点是普遍存在的，因为对这一难题的协同攻关几乎还没有开始。

顾震潮和胡广兴（1962）的线性理论分析表明，“凝结反馈对云团的垂直发展有很强的控制作用。”顾震潮（1962）再次强调了微观物理学和云动力学之间的关系。然而，细节不详。陈瑞荣（1963）扩展了Priestly（1953）的模式，该模式在简单的气块理论中考虑了热量和动量的混合，加入了环境空气夹带引起的蒸发影响和水滴产生的阻力。这种简单的线性理论的结果对夹带参数化和初始条件相当敏感。在这种情况下，作者的结论是，目前的方法不足以处理当前的基本问题。

李兴生等（1964）和周晓平等（1964）提出了积云发展的数值模式，包括释放潜热但不包括蒸发。此外，还利用非线性模式对水滴的阻力效应进行了补充研究（陈瑞荣，1962；巢纪平和胡广兴，1963）。最后，陈瑞荣（1964）研究了降水对云层运动的影响。

由于这些研究以及其他方面的研究，巢纪平和周晓平认为现有的积云发展分析不够全面，无法处理云的生命周期的所有方面。后来没有出版关于积云动力学的出版物（1965—1966年）。然而，在后一阶段，继续出版了一些涉及对流云实地观测结果以及电化过程和云微观物理学研究进展的出版物。

b 中尺度动力学

对中尺度现象的研究似乎是探索性的，并非是以即时需求为牵引，这与在积云模拟方面和在大尺度动力学的某些方面所制定的相对有条理的研究路线形成

了鲜明的对比。原因似乎有两个方面。最有资格的动力学家们开展的工作非常分散，几乎没有时间研究与中尺度动力学有关的难题。此外，目前关于重力波、锋面动力和晴空湍流对动量和能量通量作用的思考，与大气环流动力的关系，在10~12年前还没有很好的阐述。

然而，已经开展了一些关于山地背风坡运动、大气边界层和台风形成方面的工作。此外，在第2a节中讨论的巢纪平所作的关于分层切变流中扰动的发展研究，适用于稳定和不稳定的温度分层。文献中还出现了一些单独研究低层切变线形成（纪立人，1965）和锋面降水（仇永炎，1960）的工作、对晴空湍流的观测（严开伟等，1965）和对中尺度系统的天气学分析等。最后，曾庆存（1963）为研究中尺度系统，开展了尺度分析并开发了一套有限差分方程，这可能表明这些现象最终将引起更多的关注，就像过去几年在其他领域的情况那样。

1) 山地效应。只有两篇论文涉及小尺度地形气流。第一篇是叶笃正（1956）对背风波理论的回顾，重点是围绕着上边界条件的选择而产生的争议，这个问题在该文写作期间在英文文献中算是热点。摘要表明没有开展任何新的工作，也没有表明该文将对Alaka（1960）编辑的WMO专著或Crappier（1959）关于适当上边界条件的确定性研究作出实质性补充。

第二篇论文是巢纪平等（1966）的研究，涉及山地背风坡压力突变的形成，这篇论文是这一研究领域比较著名的参考文献。虽然在《中国气象学报》（英文版）上发表的其他论文在英文文献中很少被引用，但这篇论文用英文找得到无疑是有帮助的。作者首先研究了非线性、一维稳态问题，Schweitzer（1953）和Long（1954）以前研究过这一问题，最近Long（1972）也对这一问题进行了再研。然后，针对几个不同的初始条件，用特征法扩展对非稳态问题进行了研究。因此，他们的结果不如Houghton和Kasahara（1968）后来进行的数值计算那么广泛，这是可以理解的。

2) 边界层湍流^①。研究了1956—1963年有关低层大气湍流的少量（11篇）从中文翻译的论文和摘要，我们发现，与这一时期的西方文献一样，研究最多的是表层，即最低10~50 m。

苏从先（1958）发现，Monin和Obukhov（1954）提出的无量纲平均风切变和 z/L 之间的线性关系（其中 z 是高度， L 是以他们命名的长度）不适

^① 这一部分由James W. Deardorff主笔。

用于明显的不稳定分层。中国以外的其他国家（如Panofsky等，1960）也很快得出了同样的结论。仅仅一年后，苏从先（1959）就提出了风廓线方程，该方程被后来称为KEYPS公式（Panofsky,1963）。虽然这个缩写中的S并不代表“苏”，但也可以认为是代表“苏”！

这项工作和Liu（1960）的一篇理论与应用相结合的论文都使用了湍流能量方程，该方程几乎一直是后来所有理论的重要组成部分。在后一篇论文中，Liu呈现了一些图形，从中可以很容易地从速度和温度梯度的测量中获得摩擦速度、热通量和 L 值。

苏从先（1963）进一步探讨了（KEYPS）风廓线公式，独立地找到了与Panofsky等（1960）在向上定向热通量研究中所建议的经验常数（18）相同的值；对于稳定的分层，苏从先建议使用较小的常数。目前的理论对这个问题的处理是类似的，对正热通量和负热通量的情况有两种不同的公式（例如，Businger等，1970）。相反，濮培民（1964）假定无量纲梯度对Richardson数有平稳和连续的依赖性。即使在今天，这个问题似乎也没有得到解决，但现在的趋势似乎是忽略理论上的差异，因为与缺乏水平均匀性或仪器不准确所造成的不确定性相比，这些差异很小。

只有一篇论文（罗秀卿，1963^①）是关于点源下风向的湍流扩散问题的，但值得注意的是，它强调应包括落尘和表面吸收的影响。

关于整个行星边界层，20世纪50年代出现的几篇论文使用了与高度有关的涡度系数，并加以明确说明。这种方法与当时强调特定情况下涡度系数的绝对值是一致的（例如，Lettau，1950；Staley，1956）。事实上，赵柏林（1956）从理论上研究了非稳态性对涡度系数的影响。相比之下，在今天类似的参与程度下，理论研究更多的是关注热分层和水平不均匀性的影响，通常认为涡度系数会针对平均风和温度结构的任何变化很快进行调整。

杨大升（1957）以及杨大升和郑光（1958）在边界层中测试的涡流系数公式为 $K = (a - bz)^2$ ，其中 a 和 b 是（量纲）常数。虽然获得了有利的结果，但目前更常见的做法是以某种方式指定一个混合长度（Zilitinkevich，1970），并利用它和湍流能量方程来获得涡流系数。

在20世纪60年代，人们发现了西方对边界层湍流能量耗散率所作的大部分测量（例如，MacCready，1962a，b）。这些测量利用了Kolmogorov（1941）

提出的惯性子范围的概念，通常应用于飞机对风速变化的测量。陈家宜等（1963）进行了这样的分析，但他们使用的是1956年由设在莫斯科附近的苏联中央航空天文台通过装有文丘里管的系留气球收集的数据。这几位作者可能是最早一批注意到这一现象的学者，即结构函数与 $r^{2/3}$ 成正比的范围，其中 r 相当于两个测点之间的下游格距，往往可延伸到比高度大几倍的距离。对于风速波动是否可以代替结构函数中速度分量的波动，以及Taylor（1938）的冰冻场假说是否典型有效等问题，陈家宜（1963）进行了认真的研究，并给予了肯定的回答。

在行星边界层的相似性理论逐渐普及之前，科学出版物的发行就已经停止了（例如，Csanady，1967；Blackadar和Tennekes，1968）。如果可能的话，不妨了解一下中国科学家在多大程度上利用了这一理论，以及他们如何看待分层的影响。如果能知道他们在过去六年中是否对行星边界层在观测上做过任何攻关，从而对当前的问题有所了解，那将是特别有价值的。其中包括：1）如何处理在高度上深入行星边界层的粗糙度要素或障碍物；2）边界层高度的确定和预测，特别是当地表比空气温度低时；3）从不稳定的行星边界层到稳定的边界层的空间和/或时间转换，反之亦然；4）边界层与“自由”大气层通过对流云量、内部重力波、降水和蒸发下流等机制的相互作用。

3）台风。台风的发展和随后的移动不仅给理论家们提出了一个耐人寻味的挑战，而且作为一个实际的预报问题，中国受到在南海形成和/或从南海侵入大陆的台风的影响，例如，刘匡南和董克勤（1958）；韦有暹等（1965）。因此，对这个问题的研究活动是可以预期的。然而，尽管已经报告了一些对台风的天气学分析和统计分析，以及建议的预测台风移动的转向高度概念，但似乎并没有开展协调一致的工作来发展台风本身的理论和数值模式，也没有建立数值预测台风移动的技术。不过，这方面的业务数值预报方法有可能正在开发中，但文献中还没有报道。

谢义炳和陈秋士（1956）提出了涡旋运动的流体力学分析，并应用于中纬度系统和台风的运动。一个较短的版本也出现在中央气象局的《气象月刊》上（谢义炳和陈秋士，1957），这可能表明将这些结果用作业务工具的可能性。只有关于这项工作的摘要，后来的参考文献也没有出现，所以无法提供更全面的评价。

① 编者注：原文中此文参考文献来源页码有误，应为1963,33(3):375-381。

仅有三项关于台风形成的理论研究。与李宪之（1956，图3）提出的理论相关的摘要没有提供多少信息，尽管作者声称他的研究结果与目前已知的导致台风发生的条件之间有令人满意的一致。谢义炳和黄寅亮（1964）考虑了沿热带辐合区的正压不稳定性模式，并得出结论，这种类型的不稳定作为台风发展的能量来源是不应该被忽视的。陈秋士（1964）的最后一篇文章代表了他以前的两层模式（陈秋士，1963）

的应用，即将在斜压大气中调整过程的该模式应用于对流不稳定的情况。鉴于其中涉及的内容过度简单化，惯性波的对流不稳定是台风形成的重要机制这一结论必须看成是一种建议，而不是一个成熟的理论推论。然而，作者后来分析了台风随后形成的地区的天气模式（陈秋士和桑建国，1965），并声称观测结果和他的理论方面有很好的 consistency。

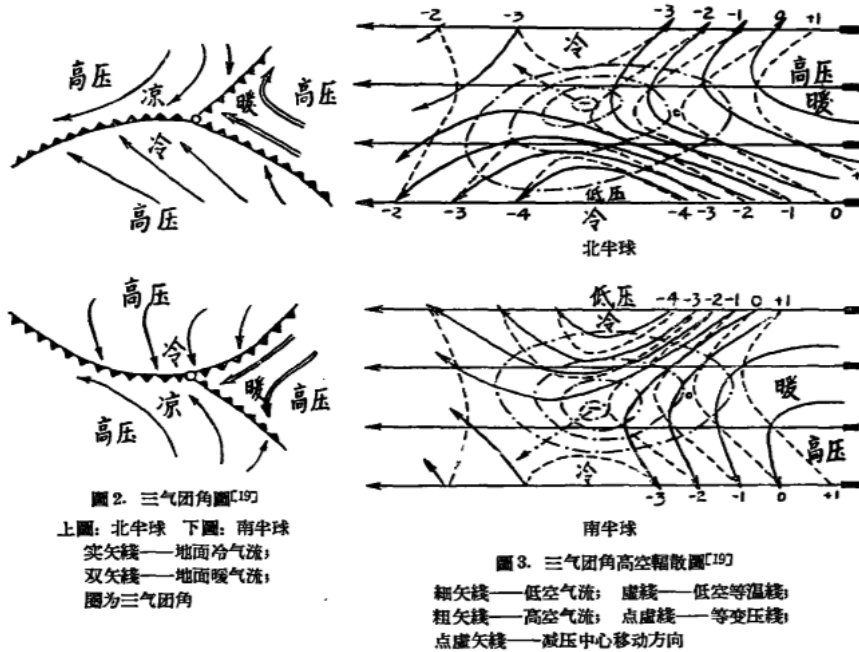


图3 李宪之台风论文中关于“三气团角学说”的配图

c 地转适应

Blumen（1972）曾对中国气象学家在地转适应领域的主要成就进行了回顾。虽然已经发现了还有一篇文章（曾庆存，1963a）和一本专著的目录（叶笃正和励名德，1965b），但这些论文主要是回顾以前已知的结果。

现有的所有参考文献都是在1963—1965年发表的：但是，巢纪平（1963b）的论文是以1960年在苏联科学研究所I.A. Kibel教授的指导下完成的一篇文章为基础。Kibel的影响在巢纪平的工作中非常明显，他的工作是按照Kibel（1957）早期提出的程序来解释正压流体的非线性调整问题。

陈秋士（1963）和陈秋士和励名德（1964）利用两层和四层模式，研究了斜压介质中调整的性质。叶笃正和励名德（1964，1965a）的最后一组文章涉及正压流体中的非线性运动，与Tepper（1955）和Houghton（1969）的工作密切相关。

叶笃正和励名德二人的专著没有被翻译，这确

实令人遗憾。从目录中可以看出，该书对中国和其他地方的研究进行了井然有序的全面总结。主题范围涉及从适应性和演化性大气过程和能量扩散的一般特性（注：叶笃正，1949，图4）到与准地转理论相关的固有问题。

VOL. 6, NO. 1 JOURNAL OF METEOROLOGY FEBRUARY 1949

ON ENERGY DISPERSION IN THE ATMOSPHERE

By Tu-cheng Yeh

University of Chicago

(Manuscript received 27 April 1948)

ABSTRACT

In this paper the energy propagation through dispersive waves in four atmospheric models is investigated. These waves are characterized by an approximate geostrophic balance. Diagrams showing the relation between group velocity, wave velocity, and wave length in the four types of atmosphere are given. It is found that:

1. In each of the four models there is always a range of wave length for which group velocity is larger than wave velocity, so that new waves can be formed ahead of initial waves.

2. Both divergence or convergence and horizontal solenoids give rise to waves with negative group velocity. But only in the presence of solenoids is there a range of wave length for which the speed of propagation of energy upstream is greater than the wave speed in the same direction. This means that only the horizontal solenoids make possible the formation of new waves upstream.

A graphical method is used to construct the distribution of phase resulting from an instantaneous point-source disturbance. The phase curves are constructed for each of the four atmospheric models.

Two applications of the theory are made. The formation of a new trough over North America following an intense cyclogenesis in the Gulf of Alaska is interpreted as a result of dispersion from a continuous point source of cyclonic relative vorticity into a previously straight westerly current. Computations show a pressure rise next to the region of cyclogenesis downstream and a trough farther to the east.

The blocking action observed in the west-wind belt is explained by the dispersion of an initial solitary wave. Calculations indicate that the life time of a "blocking action" is longer in high latitudes than in low latitudes; this is in agreement with observation.

图4 叶笃正1949年发表在Journal of Meteorology上的文章

鉴于这一时期攻关的种类繁多，20世纪60年代

初对大气调整问题的联合攻关并不罕见。然而，有迹象表明，人们对非地转运动和适应过程的兴趣是由于需要了解与发展原始方程数值预报模式有关的问题。此外，值得注意的是，两位主要研究者曾庆存和叶笃正，在事业早期就受到调整理论先驱的影响。上文中提到曾庆存在苏联的研究生工作，而叶笃正正在40年代末就读于芝加哥大学，在那里他与罗斯贝有联系，而罗斯贝在这一领域的经典著作是众所周知的。

d 天气和行星尺度动力学

20世纪50年代这十年主要是研究东亚环流系统的大气环流及特定方面。英文出版物和易得的英文译本中已对这一时期取得的大部分进展进行了广泛评述，例如Staff Members (1957, 1958a, b); 叶笃正等 (1959); 叶笃正和谢光道 (1959); Chao (1959); 赵九章和傅承义 (1959)。这一早期工作仍在继续深化进行。后期的出版物中有：天气研究（例如，郑成均，1963；谢义炳等，1965；仇永炎和陈国范，1965）、谱分析（例如，陈受钧，1962，1963；朱福康，1964）以及能量转换和转移研究（叶笃正等，1960，1961，1962），涉及到大气环流现象学的各个方面。实际上，1949—1966年在中华人民共和国开展的大气环流研究的广度和发展程度与同期其他地方开展的类似研究不相上下。

由于需要了解青藏高原对东亚环流状况和天气的作用，因而明显推动了包括地形学和非绝热加热在内的动力学模式的开发（例如，Staff Members, 1958b）。巢纪平 (1956, 1957)、朱抱真 (1957a, b, c) 进行的早期调研基本上涉及建立稳态流型式，以响应下垫面加热和大尺度地形。这些调查所确立的先例仍在继续，并考虑了更复杂的模式及更广泛的问题。

朱福康 (1964) 的计算是基于一个线性模式，它考虑到了地形和热力强迫以及静稳定性的垂直变化。其结果表明，与对流层中部和平流层下部超长波有关的平均运动场与该模式所含的物理特征密切相关。陈受钧 (1965) 仅利用地形控制了超长波，他还将在平流层响应视为季节的函数。另一方面，谢义炳和陈受钧 (1964) 仅考虑了在两层模式中热源和水平涡动输送对建立平均纬向风和平均经向环流合成分布所产生的影响。杨金锡 (1965) 进一步评估了非绝热加热对热力驱动环流发展的重要性，其中包括感热的湍流传输、辐射传输和潜热释放。他通过两层模式确立的结果表明，湍流传输对环流系统的影响远大于与其余两个特征有关的影响。然而，由于仅提供了摘要，无法

对后三项调查进行充分评估。

周晓平和顾震潮 (1958) 调查了向北和向南倾斜的极长山脊对正压扰动传播的影响。此项工作的启动是为响应观测，即波扰动沿高原北脊传播速度快于沿南缘的传播速度。伍荣生 (1964a, b) 后来将郭晓岚 (1949) 的正压稳定性分析扩大到包括地形学，继续对这一问题进行了研究。尤其是，他发现，北坡 ($dh/dy < 0$ ，式中 $h(y)$ 表示山脊高度) 和科里奥利参数的纬度变化 (“ β 效应”) 的综合作用将使不稳定的波扰动传播速度大于基本气流的极大值， $\bar{u}_{\max}(y)$ 。或者，南坡的相速 ($dy/dy > 0$) 是上有界，上界为 $\bar{u}_{\max}(y)$ 。另一项研究 (罗四维, 1957) 也考虑了青藏高原的气流稳定性，但具体情况不详。

运用图形技术开始积极开发区域和行星尺度数值预报模式 (顾震潮, 1956; 廖洞贤, 1957)。然而，重点很快转移到研究面向计算机的模式。顾震潮 (1958, 1959) 的早期论文发表在中文和英文出版物上，例证了对理论概念实际应用的早期和持续关注。

全球尺度预测问题的初步理论工作，部分是俄罗斯在这一领域努力的结果。尤其是，Blinova (1956) 和Blinova以及Kibel (1957) 所考虑的全球模式是朱永禔 (1959) 及曾庆存和朱永禔 (1961) 在苏联科学院地球物理研究所完成的工作重点。在这两个案例中，在球坐标下导出了与准地转、斜压模式有关的格林函数解析表达式，并对其进行了评估和讨论。此项工作本质上旨在建立一些最终用于开发长期预报模式的模式特征。

对有组织的大气动力学研究工作的重要新动力首先是地球物理和气象研究所数值天气预报组 (顾震潮等人, 1961) 根据1958—1959年的研究编写发表在1961年专著中的一系列论文。其中有些工作与长期数值天气预报有关，但有三篇文章涉及到本论述：顾震潮 (1962, 图5) 的首篇论文令人振奋地阐述了对典型大气模式对外部能量输入的线性和非线性响应之间加以区分的重要性。显而易见，这一原则似乎指导了后续大气动力学调查的开展。

陈雄山 (1962a) 的相关论文进一步阐明了两层模式对日射影响的响应，顾震潮之前曾考虑过该问题。在这两个案例中，对该模式的传递函数进行了分析，这是分析自动控制系统的典型程序。控制理论中也广泛使用李雅普诺夫方法，在一系列论文的第三篇文章中，巢纪平 (1961) 将该方法用于斜压稳定性问题。尽管其他研究者以前已建立了导出的稳定性条件，但巢纪平指出，李雅普诺夫理论可用于小尺度

CYBERNETIC ASPECTS OF ATMOSPHERIC PROCESSES*

KOO CHEN-CHAO (顾震潮)

(Institute of Geophysics and Meteorology, Academia Sinica)

ABSTRACT

With the view that the atmosphere could be regarded as a self-regulating system with the solar radiation as the input, the author develops a technique for treating the atmospheric processes from the cybernetic point of view. From this, the linear and nonlinear feedbacks as well as response of the atmospheric processes to solar radiation are examined. It is demonstrated that in regard to the mean annual variation of zonal distribution of 500 mb height and temperature, and even that of surface temperature, as the output, the atmosphere behaves like a quasi-linear system, while the medium-range variation is an asynchronous excitation, and hence a nonlinear response to the solar radiation. This gives a support to the linearized models for certain long-range atmospheric processes.

With the technique used in cybernetics, the basic properties of a linearized model of the atmospheric processes are obtained easily from the transfer function. The design of the model is thus reduced to the design of the transfer function in servomechanism. In this way, the work for the design of atmospheric model is much simplified and becomes more accurate.

图5 顾震潮1962年发表在《中国科学》上的文章

及非线性大气稳定性问题。Dikii (1965) 和 Blumen (1968, 1971) 已利用 Arnold (1965) 的相关方法将其扩展至各类问题, 不过这些作者并不了解巢纪平的工作。

后续研究工作的很大部分旨在建立各类模式的稳定特性, 包括研究有限振幅斜压波与纬向流的非线性相互作用, 以及可补充数值预报模式持续开发的其他动力响应特征。例如, 廖洞贤等 (1961) 认为, 分效效应被纳入线性斜压预报模式中, 以克服在地形强迫出现扰动所产生的共振问题。Charney 和 Eliassen (1949) 根据相当正压模式早得多已得出了类似结论。

考虑到明显是要应用于数值模拟, 其他理论型研究包括陈雄山 (1962b) 对五层模式的详细分析, 以评估某一层原位能源对其他层的影响。基于这个准地转模式的主要结论不包括 β 项和垂直风结构, 但却表明对流层事件几乎未受到平流层源的影响。当能源处于低层时, 高空的影响程度取决于平流层静稳定性程度。这些结果与 Charney 和 Drazin (1961) 得出的结果相一致。后来, 廖洞贤 (1963) 和黄士松 (1965) 着重关注西风气流天气尺度波运动的热结构和运动, 而叶笃正和陈雄山 (1963a) 则侧重于行星尺度波的特点。尽管这些模式似乎包涵发生斜压或正压不稳定性的成分, 但这些现象并未在前两篇摘要中讨论, 仅在第三篇摘要中作了简述。

然而, 如上所述, 流体动力稳定性问题确实引起了关注。其中的一项早期研究 (陈隆勋, 1959) 涉及到表现出垂直和水平切变的纬向气流不稳定性的必要条件。摘要中并未明确阐明在这一重要问题上所取得的进展, 后来 Pedlosky (1964a, b) 对此进行了

十分广泛的研究。根据前文提及的巢纪平 (1961) 的工作以及陈受钧 (1963) 对斜压不稳定性机制的判读分析, 文献中刊载了稳定性概念应用于一系列物理问题。

除了评估地形特征对正压稳定性特点的影响之外, 伍荣生 (1964a) 扩展了其模式, 涵盖了基本气流的垂直切变—混合正压—斜压稳定性问题。他的主要贡献是通过正交模方法导出不稳定性的必要条件, 基本上相当于 Pedlosky (1964a, Eq. 3.1.4b) 同时得出的结果。巢纪平和吴钦岳 (1964) 研究了另一个重要的稳定性问题, 他们考虑了线性两层模式中地转流对内部重力惯性波的稳定性。现有的摘要相对简单, 但该问题与 Rao 和 Simons (1970) 的相关研究相似。此外, Blumen (1973) 最近对一个两层非地转模式的分析表明, 导出结果是在地转速度的振幅超过重力惯性波的相速度时将产生不稳定性。

以不稳定性机制作为热带扰动产生方法的两项调查是引人关注的主题。谢义炳和黄寅亮 (1964) 调查了热带辐合带附近出现的正压不稳定性, 而且之前提及了台风的发展。作者指出, 他们的模式中忽视的特征 (例如, 潜热释放) 还会促进不稳定性。然而, 通过正压不稳定性机制引发热带波扰动后来得到了例如 Nitta 和 Yanai (1969) 及 Holton (1972, p. 292) 的支持。另一方面, 杨大升 (1965) 认为东风波扰动的产生是斜压不稳定性问题。然而, 他确实将基本流的纬向变化纳入了其简易的两层准地转模式, 但指出在 10° — 35° N 纬度带并未满足正压不稳定性的条件。在经过大量简化后, 对不稳定扰动的最大增长率的确定可归结为代数特征值问题。结果表明, 在 500 hPa 以下发生最不稳定扰动, 其波长为 2400 km, 并以每秒约 5.4 m 的速率向西传播。尽管可例举出与西太平洋 ($\sim 15^{\circ}$ N) 低空东风波观测证据一致性, 但 Holton (1971) 近期的工作表明, 这些波是被迫响应云团降水所释放潜热能的大尺度型式, 虽然 Holton 模式中的波结构显现出对纬向平均风的垂直切变极为敏感。

由于提出了一系列竞争性理论, 尤其是最近提出的理论, 似乎上述调查是对热带动力学持续发展的重要早期贡献。

最后的系列论文表明主要是叶笃正和陈雄山在持续努力阐明非线性反馈机制, 可以以不稳定斜压波与纬向气流相互作用的过程为证。例如, 先前关于这一主题的西方文献在应用于大气方面与 Phillips (1954) 和 Charney (1959) 有关。另一方面, Stuart (1960) 和 Watson (1960) 建立了一种数学方法来描述均质切变

气流中不稳定波的增长和随后的平衡。这些论文中制定的指导原则基本上是叶笃正和陈雄山的研究重点。

叶笃正和陈雄山(1963b)考虑了不稳定斜压波与最初只是高度 Z 的函数的纬向气流的非线性相互作用(u 的纬向 y -变化最初被纳入了该方程中,但随后被略去)。两层准地转、 β -平面模式被用于简化问题的分析方面。计算的动量非零涡流通量,显然有助于纬向动量的二级(振幅)变化,与Phillips等人所获得的结果不同。目前很难解决这一差异,因为叶笃正和陈雄山提供的简要计算细节没有证据证实其结果。还应注意,用于计算纬向气流初始趋势的直接振幅膨胀还被用于确定通过波的发展获得的最大振幅。这一程序值最近受到Pedlosky(1970, 1971)的质疑,他为研究有限振幅斜压波发展奠定了更坚实的数学基础。

翌年,叶笃正(1964)和陈雄山(1964)发表了随着纬向变化的基本气流行星波发展的衔接研究。叶笃正考虑了在一个波形西风流中不同波的相互作用以及单一波扰动的发展。然而,并没有提供所用模式的详情以及从中导出的结果。陈雄山以有限差分形式表示纬向 y 导数,从而重建了之前与叶笃正合作研究的原来的两层模式。他针对应变量而制定的一组时变振幅方程类似于Lorenz(1960, 1963)之前的工作。随后,由数值积分决定的基本流的时间演化表明取决于初始扰动的形式。

最终,除了基本气流结构之外,叶笃正和王晓林(1965)还着眼于与静稳定性的垂直分布相关的超长波不稳定性特点和发展。平流层被列为四层模式的上层。该研究的基本线性方面是对Wiin-Nielsen(1961)研究的延伸。然后,不稳定波与相关基本气流的相互作用沿着叶笃正和陈雄山制定的思路继续研究。这一发展中隐含的近似值并未予以充分阐明,尽管结果显示垂直切变幅度的预期降低,且波扰动的后续呈现有界增长。

3 数值天气预报

a 准地转模式

中国在1954年开始开发数值天气预报(NWP)。中国科学院地球物理研究所工作人员发表了至1959年的NWP进展摘要(1959)。最初的重点是简易模式的图解积分,以制作短期预报。首批NWP实验利用了Fjortoft(1952)和Sawyer及Bushby(1953)早前使用的图解法。廖洞贤(1957, 1958)报告了两层模式的斜压发展过程的结果。陈雄山等(1957)还根据两层准地转模式,使用了图解法制作12小时预报,其中用位温 θ 替代 z 来表示垂直坐标方向。Charney和Phillips

(1953)先前报告过类似模式的数值积分结果。

1960年2月,中央气象局与中国科学院地球物理实验室及计算技术研究所合作,开始利用简易的正压地转模式进行数值积分(见中央气象局数值预报组,1965年)。直到1960年7月,该模式一直用于欧亚有限地区的24~48 h预报,效果中等。然而,超长行星波向西传播对预报产生了不利影响。刘瑞芝和赵明哲(1962)表明,将速度辐散效应列入正压模式公式中可控制这种反向运动。这项工作的详情并未提供,不过Cressman(1958)以前曾以类似于Wolff(1958)的方式考虑过这个问题。此外,对一些微小的变化进行了检测。例如,使用了通过简易形式的平衡方程计算得出的流函数取代正压预报方程中的高度场。然而,这些细化并未显著改进当时所用简易模式做出的预报。在1964—1965年,中央气象局发布的48小时正压预报分析是由沈如桂和牟惟丰(1965)所做。尽管实际上这些模式无法预报斜压的发展,但预报统计表明,正压预报要好于之前以主观做出的预报。

含斜压过程的模式已得到开发,但并未用于业务预报。例如,朱永禔(1961)在球面坐标中开发了三层(1000、500和300 hPa)非线性模式。该模式类似于苏联E. N. Blinova早前开发的模式。实际上,在苏联科学院的BESM-I计算机上进行了一系列实验。朱永禔在苏联期刊上发表了其他文章,并于1959—1960年在苏联科学院应用地球物理研究所做访问学者,并与Blinova进行了合作。朱永禔的研究重点是研究地形对24小时预报的影响。泊松方程和亥姆霍兹方程源于准地转模式方程组的积分,通过影响函数或戈林函数完成了方程的求解。使用这种方法,而不是松弛法或迭代法,反映出了苏联对这一问题的解决方法。

后来秦曾灏(1963)开发出另一种斜压模式,它与Thompson和Gates(1956)所用的模式类似。这种双参数模式旨在研究地形、表面摩擦和非绝热加热的影响。然而,作者并没有说明用该模式所做的任何具体预报。

b 原始方程数值预报模式

我们对文献的调研表明,仅有一篇论文涉及到使用原始方程模式。刘瑞芝和张济朋(1965)描述的这种正压模式是海外期刊停止发行之前的最后一个重要的数值模拟出版物。用于该模式的方程组是以守恒形式编写的。空间导数是以中心有限差分近似值来表示,而且采用了Lilly(1961)提出的网格系统。采用了向前差分的第一个时间步长,后续的时间步长是中心差分。刘瑞芝使用了通过测得的位势场计算的地转

初始条件。利用这一新模式并对比地转预报，针对夏季和冬季条件做出了一些实验性半球24小时预报。结果表明，原始方程模式至少与地转正压模式同样表现良好或更好，即使采用了600-gm格距。刘瑞芝和张济朋建议，未来应测试更精细的分辨率网格。他们还注意到，在24小时后，有限差分解法出现了“寄生波”。尽管并未明确阐明，但似乎非线性计算的不稳定性将预报期限限制在了24小时。

c 大气环流：计算机和实验室实验

朱抱真（1958）、朱永祺等（1961）和陈雄山（1962、1964、1965）所开展的一系列数值研究主要是采用两层准地转模式，类似于Phillips（1956）所开发的模式，用以研究地球大气环流的各个方面。特别是，陈雄山将运动细分为平均分量和涡动分量。涡动运动扩展为双傅里叶级数。谱分辨率在x方向为6个众数，在y方向为3个众数。所包含的物理过程数量相当大。例如，陈雄山的模式包括了针对长波和短波辐射的云量计算、地形、陆地和海洋分布、凝结加热、水平扩散以及用于计算地面温度的地面加热平衡方程。地面温度和风系统发现比太阳加热滞后约一个月，而计算的分布与测得的分布发现有良好的一致性。

叶笃正和谢光道（1959）在其综述1949—1959年大气环流研究过程中注意到实验室或转盘实验的价值。尽管这些实验据说是在北京大学地球物理系进行的，但并没有找到涉及此项工作的任何中文文献。

后来，参加1964年北京研讨会的两名日本科学家报告了中国科学院地球物理实验室作了此项实验室实验（Kodaira和Masuda，1965）。这些研究试图阐明青藏高原对大气环流特征的动力影响和热力影响。

d 计算机

鉴于数值预报需要使用计算机，因此，应提及用于业务预报的电子计算机103机的一些特性（见计算机技术研究所，1965）。它显然类似于早期苏联模式，但根据Kodaira和Masuda（1965）所述，该计算机完全是中国制造，且使用了真空管。该计算机的主磁芯为16 K，磁鼓上的辅助存储器为16 K，外加四个磁带机。存储器速度为20 μ s。该计算机的设施由中科院计算机技术研究所负责运行。似乎并没有做斜压业务预报，因为103机及或许其他可用的计算机无法满足此类模式的计算要求。根据Oldham（1969）所述，中国报纸报道了建造“通用数字计算机”，最近，Lubkin（1972）报道已建造了第二代计算机，且目前已投入使用。二代机的存取时间为2 μ s，主存储器为32000字；机器的磁鼓存储器容量为64000字，计算机

为纸带输入。鉴于二代计算机的上述特征，我们认为很难说它是否足以开展美国所作的此类业务多级斜压预报（国家气象中心）。为回答这一问题，我们必须更多了解计算机的安装、可用时间、垂直和水平预报域的规模以及网格分辨率。

附件

中国气象学家的英文文章

在中国气象出版物中发表过论文的人员中，有些人除了在《中国科学》和《科学记录》，也在英文刊物上发表过文章。对一些主要气象期刊进行的文献检索发现了下列参考书目中列出的文章。通过对参考文献的交叉核对，包括中文和俄文文章的译文参考文献，表明这份清单很全面，尽管可能并不详尽。

参考书目的第一部分包括四位气象学家撰写的文章，这几位气象学家在建立大气环流现象学的研究路径以及发展中华人民共和国的理论和数值动力学方面发挥了重要作用。赵九章在1946年应美国国务院的邀请访问了美国。他的行程包括芝加哥大学和麻省理工学院。不久后，谢义炳和叶笃正进入芝加哥大学气象系攻读博士。同一时期，顾震潮在斯德哥尔摩大学气象系作研究生。尽管这些年来与许多杰出气象学家进行了个人接触，但与罗斯贝的联系反映在下列引述的诸多工作中。

谢义炳（Hsieh Yi-ping）

1949: An investigation of a selected cold vortex over North America. *J. Meteor.* 6, 401-410.

1950: The mean wind and temperature distribution through a fat upper ridge in winter. *Tellus*, 2, 130-133.

1950: On the formation of shear lines in the upper atmosphere. *J. Meteor.* 7, 382-387.

1951: Reply to G. J. Haltiner. *J. Meteor.* 8, 203-204.

1951: Reply to additional comments by G. J. Haltiner. *J. Meteor.* 8, 205.

（促使谢义炳做出初步答复的信件是：Haltiner, J. G, 1951: Upper-level vortices and the turbulent transfer of momentum. *Meteor.* 8, 202-203.）

赵九章（Jaw Jeou-jang）

1946: The formation of the semipermanent centers of action in relation to the horizontal solenoidal field. *J. Meteor.* 3, 103-114.

顾震潮 (Koo Chen-chao)

1950: An iterative relation of the influence function in numerical forecasting. *J. Meteor.*, 7, 163-164.

(在下面的文章中感谢了顾震潮在天气图分析方面的帮助: Rossby, C.G., 1949: On a mechanism for the release of potential energy in the atmosphere. *J. Meteor.*, 6, 163-180. 这种合作显然是在1947—1948年, 当时罗斯贝教授在斯德哥尔摩大学休假。)

叶笃正 (Yeh Tu-cheng)

芝加哥大学气象系员工 (叶笃正参与), 1947: On the general circulation of the atmosphere in middle latitudes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 28, 255-280.

1949: On energy dispersion in the atmosphere. *J. Meteor.*, 6, 1-16.

1950: The motion of tropical storms under the influence of a super-imposed southerly current. *J. Meteor.*, 7, 108-113.

Riehl, H. and T. C. Yeh, 1950: The intensity of the net meridional circulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 76, 182-188.

—, —, and N. E. La Seur, 1950: A study of variations of the general circulation. *J. Meteor.*, 7, 181-194.

1950: The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945-46. *Tellus*, 2, 173-183.

1951: On the maintenance of zonal circulation in the atmosphere. *J. Meteor.*, 8, 146-150.

Riehl, H., J. S. Malkus, T. C. Yeh, and N. E. La Seur, 1951: The north-east trade of the Pacific Ocean. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 77, 598-626.

涂长望 (Tu Chang-wang)、黄士松 (Hwang Sze-sung) 和卢鋈 (Lu A) 在论文发表时都在中国气象部门工作。张宝堃 (Chang Pao-kun) 在 Charles F. Brooks 教授和 Victor Conrad 博士的指导下, 在哈佛大学开展了气候学研究并撰写了他的论文。除了黄士松之外, 其他上述作者后来都在引言中提及的文章集的编辑委员会中任职。最后, 徐尔灏 (Hsu Erh-hao) 感谢 D. Brunt 和 P. A. Sheppard 教授的有益批评指正。二位教授在徐尔灏完成研究时是在伦敦大学工作。徐尔灏后来推动了动力气象学的研究工作, 并撰写了第2节中提

到的动力学调查。

Tu, C. W. and S. S. Hwang, 1945: The advance and retreat of the summer monsoon in China. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 26, 9-22.

Lu A., 1945: The winter frontology of China. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 26, 307-314.

Chang, P. K., 1949: Methods of evaluating and comparing cold waves, with special reference to New York City. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 30, 107-109.

Hsu, E. H., 1951: A general equation of horizontal mass divergence in the atmosphere. *J. Meteor.*, 8, 395-397.

最终的文章列表提供了1949—1959年开展的天气和动力气象学研究的相当有代表性的观点。1958年《气象学报》上还发表了叶笃正和顾震潮在《运动中的大气和海洋》中的文章, 这些文章可能代表着在中华人民共和国以外以英文发表的最后一批论文。

Yeh, T. C., 1957: The maintenance of the zonal circulation of the atmosphere. *Acta Geophys. Pol. (Warsaw)*, 5, 65-73 (in English).

—, —, 1957: On the formation of quasi-geostrophic motion in the atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 75, 130-134.

北京中科院地球物理和气象研究所天气和动力气象学部职工, 1957: On the general circulation over Eastern Asia I. *Tellus*, 9, 432-446.

—, —, 1958: On the general circulation over Eastern Asia II. *Tellus*, 10, 58-75.

—, —, 1958: On the general circulation over Eastern Asia III. *Tellus*, 10, 299-312.

Yeh, T. C., 1958: On the mechanism of maintenance of zonal circulation. *Geophys.* 6, 607-620.

—, S. Y. Dao, and M. T. Li, 1959: The abrupt change of circulation over the northern hemisphere during June and October. *The Atmosphere and the Sea in Motion*, Rockefeller Inst. Press and Oxford Univ. Press, 249-267.

Koo, C. C., 1959: On the equivalency of formulations of weather forecasting as an initial value problem and as an “evolution” problem. *The atmosphere and the Sea in Motion*, Rockefeller Inst. Press and Oxford Univ. Press, 505-509.