

从地形罗斯贝波到非静力中尺度动力学： 重温周晓平先生经典著作

蔡鸣¹ 张大林^{2, 3} 许秦⁴

(1 美国佛罗里达州立大学地球海洋大气科学系, Tallahassee, Florida, USA;

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

3 美国马里兰大学大气和海洋科学系, College Park, Maryland, USA;

4 美国国家海洋和大气管理局强风暴实验室, Norman, Oklahoma, USA)

摘要: 为缅怀气象学家周晓平先生, 重温了周先生的几篇经典著作。这些工作为周先生从研究生、青年到中年不同时期具有先驱性的科研成果, 涉及地形对罗斯贝波的动力作用、积云动力学及其数值模拟、非静力中尺度动力学等领域。这些在当时国内外气象界均具有领先水平的研究成果, 不仅推动了理论研究, 也被广泛应用于气象业务预报, 为中国气象事业做出了杰出的贡献。

关键词: 地形罗斯贝波, 积云动力学, 非静力中尺度动力学

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.010

From Orographic Rossby Waves to Non-Hydrostatic Mesoscale Dynamics: A Tribute to Professor Xiaoping Zhou

Cai Ming¹, Zhang Dalin^{2, 3}, Xu Qin⁴

(1 Department of Earth, Ocean, and Atmospheric Science, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, Maryland, USA

4 NOAA/National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, USA)

Abstract: In honoring and celebrating the professional achievements of Professor Xiaoping Zhou, an internationally recognized prominent meteorologist, this short essay reviews some of his most influential works at different stages of his professional career. The selected seminal works of Professor Zhou cover a wide range of topics, from dynamics of topographic Rossby waves, cloud dynamics and modeling, to mesoscale dynamics and numerical simulations. Professor Zhou's pioneering work not only contributed greatly to theoretical advancements in mesoscale and cloud dynamics, but also has provided guiding principles for the development and improvement of operational numerical weather predictions in China in the past 50 years. His contributions to the science will be remembered forever.

Keywords: orographic Rossby waves, cloud dynamics, mesoscale dynamics

0 引言

著名气象学家周晓平先生于2015年1月22日仙逝, 享年82岁。周晓平先生品格高尚、治学严谨、淡泊名利, 为国家培养出一批暴雨研究和预报方面的优秀人才, 为我国中小尺度气象科研和教育事业的发展做出了卓越贡献, 楷为师表。作为他的学生, 我们在此简要回顾周晓平先生在当时国际上领先的科研成果及影响至今

的几篇经典之作, 以表缅怀之心。他的这些工作涵盖下述三大问题: 地形对罗斯贝波的动力作用, 积云动力学及其数值模拟, 以及非静力中尺度动力学。

1 地形对罗斯贝波的动力作用

国际著名气象学家罗斯贝^[1]首先从理论上建立了大气长波理论, 因而大气长波也常被称为罗斯贝波。后来叶笃正^[2]首次提出了罗斯贝波频散理论。在长期的天气实践中, 陶诗言^[3]发现, 在大高原南边的波动(如印缅槽)东移速度一般较北面的波动偏慢。周晓平在读研究生一年级时(即1957年), 就已与导师顾震潮合著一篇经典之作, 对这种现象予以清晰的理论

收稿日期: 2015年2月18日; 修回日期: 2015年3月2日

第一作者: 蔡鸣(1957—), Email: mcai@fsu.edu

资助信息: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB441402)

解释^[4]。他们首先将这种复杂的天气学现象转化为一个相对简单又符合实际的旋转流体动力学问题，即叠加在西风基本气流上的波动通过东西走向山脉时沿着山坡的传播。这样，他们将大地形对波动气流的作用清楚地表述成在波动（槽或脊）前后气流中会出现的山脉所强迫的辐散辐合运动，而地球旋转效应又将这种辐散辐合气流转换成涡旋气流。通过解这个旋转流体动力学问题，他们揭示了大地形作用和科氏参数随纬度增大（即 β 效应）对波动气流作用是异曲同工，都能引发罗斯贝波。两者区别在于，后者引发的罗斯贝波仅沿纬圈向西传播，而前者引发的罗斯贝波传播方向则与地形坡面走向有关。在北半球，东西走向的大地形所引发的罗斯贝波沿南坡向西传播，沿北坡则向东传播。这就从理论上揭示了为什么叠加在西风基本气流中的波动通过东西走向山脉时，北面的波动一定比南面的波动向东移动得快。

此外，周晓平和顾震潮还将此理论运用于实际，根据青藏高原南北两侧的平均坡度及纬度，定量地给出了地形（南北坡面方向及坡度）和 β 效应（高原南北两侧的纬度差异导致的 β 参数值差异）分别对南北坡面波动传播速度差异的贡献。如图1所示，取青藏高原北坡沿 40°N 平均坡度为 0.2% ，对于一个波长为 3000km 左右的波而言，其通过北坡顺西风向东传播的速度会比通过平地向东的传播速度快 3.5m/s 。相反，当同一波长的波沿高原南坡时（平均坡度还取为 0.2% ），它的传播速度会比通过平地向东的传播速度慢 3.5m/s 。这样，在高原北面和南面槽脊顺西风东移速度可差 7m/s 。图2是周晓平和顾震潮合著的这部论文中所讨论的1957年1—3月通过西藏高原的南北坡波动的移动速度实测结果。波动在南北坡向东移动均比盛行西风慢，所以， β 效应确实比山脉效应大。但理论计算的南北坡面波动传播速度差异（约 5.5m/s ）中

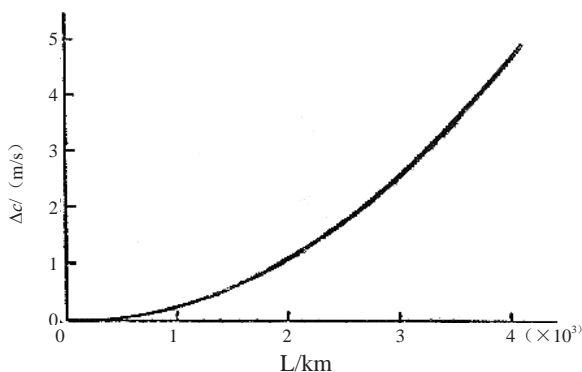


图1 地形造成的相速度 (Δc) 随波长 (L) 的变化^[4]
(参数取值: 纬度为 40°N , 坡度为 -2×10^{-3} , 大气等效厚度为 8000m , 等压面为 500hPa)

仅有一小部分（不到 1m/s ）可由因纬度差异导致的 β 参数值差来解释。其余的大部分（近 4.7m/s ）是由南北坡面方向及坡度大小差异而定。这就证实了他们所得出的理论解（仅考虑西藏高原南北两侧的坡度及 β 参数值差异）能基本解释实际观测到的西藏高原南北两侧波动东移动速度的差异（约 7.5m/s ）。

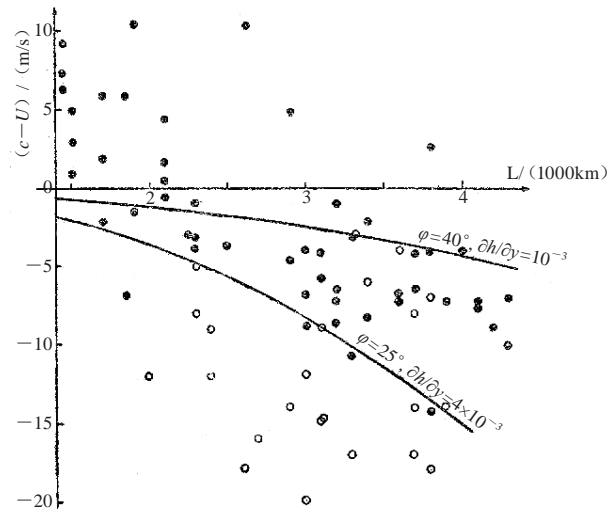


图2 西藏高原南北坡 500hPa 实测天气系统相对平均西风的移动速度 ($c-U$) 随波长 (L) 的变化^[4] (观测时间为1957年1—3月。黑点为西藏高原北坡的实测值, 圆圈为西藏高原南坡的实测值。曲线是由 β 效应和地形共同所引起的波动相对平均西风的理论移动速度。上面曲线纬度为 40°N , 坡度为 -1×10^{-3} , 下面曲线纬度为 25°N , 坡度为 4×10^{-3} 。其余参数取值: 大气等效厚度为 8000m , 等压面为 500hPa)

在气象海洋科学界，周晓平和顾震潮合著的这篇论文首次证明地形同等于 β 效应，都能引发罗斯贝波。该论文是一篇开拓性著作，延续和发展了罗斯贝波理论，并领先国外同类工作一年以上^[5-8]。次年，该工作在《西藏高原气象学》一书中得到高度肯定和重点介绍，并被用于进一步解释为什么当大槽通过青藏高原时，其南部往往被阻于高原西侧，仅其北部变成浅槽在北侧东传通过高原这一经典现象^[9]。这为其后我国东部降水、寒潮爆发过程的机制和数值预报研究奠定了坚实的理论基础。

2 积云动力学及其数值模拟

1959年，周晓平去苏联进修，师从国际数值天气预报的奠基人之一基别尔。他在那时便开始积云动力学的数值研究，回国后成为我国开展积云动力学及数值模拟研究的先驱者之一。20世纪50年代末正是国际上积云模式和其他气象模式研究的起步阶段^[10-11]，同时流体力学数值模式的差分算法也正处于开发阶段^[12]，可用于模式物理过程验证的云内参数观测甚少。尽管各种云内微物理过程都需要仔细考虑，但局

限于当时的计算条件,只能做粗略的参数化^[10]。周晓平在前苏联进修期间就发展了轴对称对流模式^[13]。他在该模式中改进了前人的计算方法和边界条件,研究了热泡在底层大气中产生浅对流的过程。其结果延伸了美国著名云动力学家Malkus和Witt合作的热对流研究工作^[14],为理解不同下垫面的加热和环境层结对对流单体发展的影响提供了重要依据。

1962年回国后,周晓平先生开始着手研究深对流积云单体的数值模拟。为此,他发展了由凝结潜热释放驱动的轴对称对流模式^[15],使用单点探空资料,假设较高湿度的边界层,成功模拟了一个云宽2~3km、云顶高达6km的对流系统。云中上升速度在4~5km高度达最大,约为20m/s,在2~3km高度存在上升速度的第二个高值区。该模拟云体,其成熟阶段的内部流场结构及其周围下沉气流的演变都与有关观测较为一致。虽然这些结果在今天看似较为简单易懂,但在当时简陋的计算条件下(特别是我国科学家到20世纪70年代初还在使用手摇计算器)可谓是一项了不起的工作。这些结果可媲美甚至优于当时国外同行的研究^[10]。

在开展上述研究工作的同时,周晓平还与巢纪平合著完成了《积云动力学》一书^[16]。其中非静力弹性方程组的研究与国外同行几乎同时进行^[10, 17]。在书中讨论了制约积云发展的一些主要因子和过程,其中包括静力稳定度、湍流扩散的影响、云外下沉气流的影响、挟卷过程的影响、环境风切变的影响以及与对流活动间的相互制约。书中也介绍了周晓平所做的大气热对流数值试验结果^[13]。相比于国际上发表的其他数值试验结果^[14],周晓平的数值试验积分时间较长,因此能更好地反映层流流体中对流活动的主要特点。书中又进一步介绍了当时周晓平的积云数值模拟的最新成果^[15]。这些数值试验成功地模拟了云底高度稳定的积云发展,相对其他国际上发表的结果^[18],这一结果更接近观测。该书不但总结了当时国内外对积云动力学和数值模拟的最新成果,而且还颇具前瞻性地指出了未来研究方向和重要科学问题。如在该书的结束语中提到:“积云是在一定的背景条件下发展起来的。背景条件的特征是和天气系统的活动分不开的,是天气形势的一种反映。背景条件如何,对积云的发生、发展有重要的影响”,预示通过进一步研究积云与环境场的相互作用将有助于改进强风暴数值天气预报。该书的结束语中也同时指出积云研究对于研究云中起电机的重要性:“强烈的积云总是伴随着闪电和雷击,因此积云形成的研究,对于研究云中起电机

制是不可缺少的一环。”当今对闪电的研究也证实其起电和放电机制与积云对流中强烈上升气流、下击暴流和水平风切变等为特征的流体力学过程以及与各类云粒子相变、增长、碰并等为特征的云物理过程密切相关^[19]。这本书是1978—1982年中科院大气物理研究所中小尺度流体力学研究生入学考试的指定参考书籍。作为恢复高考后首几届的研究生,其内容至今对于我们的科学研究和教学仍有指导意义。此外,该书中的成果被应用于实际中,为后来我国暴雨流体力学和数值天气预报研究打下了坚实基础。特别是在周晓平的带领下,我国在20世纪70年代初发展了一个东亚季风的暴雨数值预报模式。而与此同时美国宾夕法尼亚州立大学中尺度模式专家Anthes也还正在经历从MM1到MM2再到MM3的发展过程。更为重要的是,周晓平使用此模式与中国气象局武汉暴雨研究所合作开展了夏季暴雨业务数值预报试验,大大推动了国内科研向业务方向的应用。

3 非静力中尺度流体力学

20世纪70年代中末期,国外中尺度流体力学理论开始将行星尺度的惯性对称不稳定机制^[20-22]运用到中尺度^[23-24]。在行星尺度问题中,所考虑的基本气流是绕地轴旋转对称的纬向风及沿径向倾斜的等熵面。当纬向风垂直切变强到一定程度,切变可造成惯性不稳定,从而激发与等熵面近似平行的经向垂直环流。由于这种经向环流也是轴对称于地轴,其所属的惯性不稳定在历史上被称为对称不稳定。在中尺度问题中,对应的基本气流是有垂直切变的局地水平风(而不同于旋转对称的纬向气流)。所激发的惯性不稳定扰动是在基本气流的横截面中的倾斜垂直环流,其动力机制仍属惯性不稳定^[25]。但由于历史的原因,它仍常被称作对称不稳定。当尺度减小到中小尺度时,非静力的作用往往不可忽略,但这在当时的中尺度对称不稳定性的理论研究^[23]及数值模式的发展中(例如从MM3到MM4)尚未得到重视。

周晓平在进行中小尺度天气流体力学和数值模拟的研究过程中,早已注意到非静力对准确模拟和预报产生强暴雨的中尺度系统的重要性,尤其对 β 中尺度系统(水平尺度20~200km)而言。在进一步发展非静力模式并用于积云流体力学数值模拟研究的同时,他和他的课题组对非静力模式与静力平衡模式做了细致的比较。这些研究揭示了静力模式将产生虚假的高频重力波,夸大能量的传播速度,并部分歪曲低频惯性波的结构,同时还证实这些虚假的特征对中尺度数值模拟及预报以及对细网格的天气尺度系统预报都是不

利的^[26]。他还指导改革开放后首届研究生攻关“非静力大气中的惯性不稳定”这一课题。这一研究课题关注的是强水平风垂直切变所激发的中尺度扰动以及它们与暴雨形成和发展的关系（例如锋面雨带、飑线等）。通过使用非静力模式，并与静力平衡模式比较，上述研究课题^[27]不但从理论上研究了具有切变和层结的平行基本气流的斜压惯性不稳定，而且用理论结果讨论了一类中尺度强对流及暴雨的触发和维持问题。例如观测表明有一类中尺度对流有图3的基本形态，并且常常处于斜压惯性不稳定背景场中。可以认为这种中尺度对流也有类似条件不稳定的特点，即上升气流区域的层结稳定度小于下沉气流区域的层结稳定度，而基本风场的切变在两个区域都一样。上升气流区域中有强的湿斜压不稳定，因此上升气流不是垂直的而是以明显的角度（45°左右）向等熵面一侧倾斜。倾斜的上升气流有利于将降水质点从上升气流中分离出去，从而防止降水质点在上升气流中造成冷却效应，使上升气流易于维持。下沉气流散布在较大范围的弱或接近斜压不稳定的区域。若取对流层厚度为10km，则可估计图3环流型的水平尺度为100km。这与观测的量级一致。沿着三角形底边的补偿气流可以把较大范围（百千米宽）边界层中的水汽汇聚起来，使这种中尺度强对流得以维持和发展。

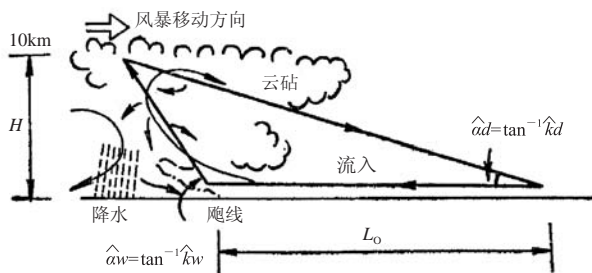


图3 一类中尺度强对流型的结构^[27]（环境场的基本气流方向是垂直于并指向图面内，且风速随高度增大）

4 结语

周晓平先生是我国大气对流和中尺度天气动力学以及天气数值模拟研究的先驱者和奠基人之一，也是暴雨和强风暴数值模式与预报研究的开拓者。周晓平先生虽已驾鹤西归，但他对气象事业做出的卓越贡献将永远造福世人，他严谨求实的治学精神将为一代代气象人铭记传承。我们深切缅怀周晓平先生！

参考文献

- [1] Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J Mar Res*, 1939, 2: 38-55.
- [2] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. *J Meteor*, 1949, 6: 1-16.
- [3] 陶诗言. 冬季由印缅来的低槽对华南天气的影响. *气象学报*, 1953, 28: 172-192.
- [4] 周晓平, 顾震潮. 大地形对高空行星波传播的影响. *气象学报*, 1958, 29: 99-103.
- [5] Robinson A R, Stommel H. Amplification of transient response of ocean to storms by the effect of bottom topography. *Deep-Sea Res*, 1959, 5: 312-314.
- [6] Phillips N. Elementary Rossby waves. *Tellus*, 1965, 17: 295-301.
- [7] Rhines P B. Slow oscillations in an ocean of varying depth. I. Abrupt topography. *J Fluid Mech*, 1969, 37: 161-189.
- [8] Rhines P. Edge-, bottom-, and Rossby waves in a rotating stratified fluid. *Geophys Fluid Dyn*, 1970, 1: 273-302.
- [9] 杨鉴初, 陶诗言, 叶笃正, 等. 西藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1959: 1-275.
- [10] Cotton W R. Theoretical cumulus dynamics. *Rev Geophys*, 1975, 13(2): 419-448.
- [11] 张大林. 大气科学的世纪进展与未来展望. *气象学报*, 2005, 63(5): 812-824.
- [12] Arakawa A. Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion: Two-dimensional incompressible flow. Part I. *J Comput Phys*, 1966, 135: 103-114.
- [13] 周晓平. *Изв. АН СССР, Сер. Геофиз*, 1962: 542-557.
- [14] Malkus J S, Witt G. *The atmosphere and the sea in motion*. New York: Rockefeller Institute Press, 1959: 425-439.
- [15] 周晓平, 李兴生, 张耀科, 等. 积云发展的数值试验. *气象学报*, 1964, 34(4): 475-485.
- [16] 巢纪平, 周晓平. *积云动力学*. 北京: 科学出版社, 1964.
- [17] Ogura Y, Charney J. A Numerical Model of Thermal Convection in the atmosphere. *Proc Internat Symp Numer Wea Pred*, Nov. Meteor Sinica, 1962, 34: 475-484.
- [18] Asai Y. Numerical experiment of convection in the model atmosphere. *Proc Internat Symp Numer Wea Pred*. Tokyo: Meteor Soc Japan, 1960: 469-476.
- [19] 郝秀书, 张其林, 袁铁, 等. *雷电物理学*. 北京: 科学出版社, 2013.
- [20] Fjortoft R. On the frontogenesis and cyclogenesis in the atmosphere. Part I. On the stability of the stationary circular vortex. *Geophys Publ*, 1944, 16(5): 28.
- [21] Kuo H L. Symmetrical disturbances in a thin layer of fluid subject to horizontal temperature gradient and rotation. *J Meteor*, 1954, 11: 399-411.
- [22] Ooyama K. On the stability of the baroclinic circular vortex: A sufficient criterion for instability. *J Atmos Sci*, 1966, 23: 43-53.
- [23] Hoskins B J. The role of potential vorticity in symmetric stability and instability. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1974, 100: 480-482.
- [24] Emanuel K. Inertial instability and mesoscale convective systems. Part I: Linear theory of inertial instability in rotating viscous fluids. *J Atmos Sci*, 1979, 36: 2425-2449.
- [25] Xu Q, Clark J H E. The nature of symmetric instability and its similarity to convective and inertial instability. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 2880-2883.
- [26] 周晓平, 张可苏. 非静力平衡模式中重力惯性波的频谱结构和传播特征. 第二次全国数值预报会议文集. 北京: 科学出版社, 1980.
- [27] 许素, 周晓平. 非静力平衡大气中的斜压惯性不稳定. *大气科学*, 1982, 6: 355-367.