

斜压不稳定理论的发展历程分析^{*}

张萌^{1,2} 杨萍¹ 许小峰³ 王式功^{2,4}

ZHANG Meng^{1,2} YANG Ping¹ XU Xiaofeng³ WANG Shigong^{2,4}

1. 中国气象局气象干部培训学院,北京,100081

2. 兰州大学大气科学学院,兰州,730000

3. 中国气象局,北京,100081

4. 成都信息工程大学大气科学学院,成都,610225

1. *China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China*

2. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

3. *China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

4. *School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*

2017-05-02 收稿,2017-09-16 改回.

张萌, 杨萍, 许小峰, 王式功. 2018. 斜压不稳定理论的发展历程分析. 气象学报, 76(2):315-321

Zhang Meng, Yang Ping, Xu Xiaofeng, Wang Shigong. 2018. An analysis of the development of baroclinic instability theory. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(2):315-321

Abstract Baroclinic instability theory reveals a fundamental instability mechanism for large scale atmospheric perturbations, especially over the middle and high latitudes. It is also an important progress in the dynamic meteorology after the establishment of long wave theory, and still important for modern weather forecast. This paper focuses on the evolution of baroclinic instability theory and reviews the contributions by Charney, Eady and Jaw. Jaw's research is one of the earliest studies in view of baroclinic instability. A critical wavelength of the instability was proposed, and the energy conversion and its possible influence on atmospheric circulation were also analyzed. His research was undisputably progressive at that time. In 1947, by the wave filtering and scale analysis, Charney simplified the equation of atmospheric disturbance to make it able to be solved. He deduced the criterion for the stability, and established the baroclinic instability theory. As its by-product, the quasi-geostrophic theory made the numerical weather forecast to be successful for the first time. In 1949, based on the work of Charney, Eady obtained a more simplified model. By comparing their research ideas, this paper summarizes the reasons why Jaw could not build the theory one year ahead: the vertical movement and the essence of the genesis and development of weather system were not considered in his study, which led to the final failure. And because of this reason, some of the highlights in his paper were neglected.

Key words Baroclinic instability theory, Jeou-jang Jaw, Charney, Eady

摘要 斜压不稳定理论是中高纬度地区天气尺度扰动生成和发展的机制,是继长波理论之后大气动力学上的又一重大进展,对现代天气预报具有重要的指导意义。按照斜压不稳定理论发展的时间脉络,阐述了赵九章、查尼和伊迪在斜压不稳定方面开展的研究工作,分析了3位科学家各自的研究特点及历史贡献。赵九章1946年发表在《Journal of Meteorology》上的论文,最早提出了“斜压不稳定”这一概念,给出了不稳定的临界波长,并阐述了在不稳定扰动情况下能量的转换,以及不稳定波对大气环流带来的可能影响,尽管得出的不稳定临界波长与观测差别较大,但其对波-流相互作用的讨论在当时是超前的。查尼于1947年采用滤波和尺度分析等方法,将大气扰动方程简化为一个可以求解的系统,推导出大气稳定状态的判据,建立

^{*} 资助课题:中国气象局气象科技史研究项目。

作者简介:张萌,主要从事温带气旋及相关气象科技史方面的研究。E-mail: zhangme@cma.gov.cn

通讯作者:杨萍,主要从事城市气候及相关气象科技史方面的研究。E-mail: zz96998@163.com

了斜压不稳定理论,其结果与实况比较接近;并据此把准地转模式成功应用于数值天气预报实践中,促使数值天气预报获得首次成功。1949年,伊迪在查尼研究工作的基础上通过合理的简化方法,得到了更为简洁的模型。最后,通过对比他们的研究思路,重点分析了赵九章未能使得斜压不稳定理论提前一年建立的原因:由于其研究思路始终局限在大气水平运动上,忽略了斜压系统发展中散度项的贡献,因而未能抓住天气系统发生、发展的本质,致使其最终与斜压不稳定理论的成功建立失之交臂,其论文本身存在的一些亮点也因此被后人忽视。

关键词 斜压不稳定,赵九章,查尼,伊迪

中图法分类号 P433+.2

1 引言

斜压不稳定理论是中高纬度大尺度大气运动发生和发展的机制之一,它是继长波理论之后大气动力学上的又一重大科学进展。它从理论上证明了最常见的天气尺度扰动是由于斜压不稳定引起的,同时定量给出了斜压不稳定的波长(数千千米量级),以及波的结构特征(即温度波的位相落后于流场的波),从而解决了波的发展机理问题。相比之下,罗斯贝的长波理论仅仅解决了波的移动问题,而对于天气预报而言,发展问题显然更为重要。

回顾斜压不稳定理论的萌芽及发展过程,人们首先会想到美国气象学家查尼(J. G. Charney, 1917—1981年)开创性地推导出斜压不稳定波的特征,以及英国气象学家伊迪(Eric Eady, 1915—1966年)以更加简便的方法对查尼工作进行改进,但很少有人知道中国气象学家赵九章(1907—1968年)先于查尼发表了讨论斜压不稳定问题的论文。实际上,赵九章先生在1946年发表的《半永久性活动中心的形式与水平力管场的关系》(The formation of semipermanent centers of action in relation to the horizontal solenoidal field)一文,比查尼早1 a提出了“斜压不稳定理论”的概念(叶笃正等,1997;钱伟长,2011;钟琦等,2013;许小峰等,2014)。

文中拟以时间为主线来梳理斜压不稳定理论的发展历程,对赵九章、查尼和伊迪有关斜压不稳定问题的研究思路进行分析,并试图总结和分析其研究工作中的诸多亮点以及赵九章未能使斜压不稳定理论提前一年建立的原因。旨在为本学科未来的发展思路、方向、进程和方法提供一定的启示,以期客观正视中国科学家对斜压不稳定理论发展的历史贡献提供科学依据。

2 斜压不稳定理论的发展历程

1920年前后,皮叶克尼斯等在挪威沿海地区建

立了较为稠密的地面气象观测站,得益于这些站点的观测资料,其从绘制的天气图中总结了大量的天气现象,由此给出了锋面和温带气旋模型(Bjerknes, 1919; Bjerknes, et al, 1922),并指出冷、暖气团同时存在并维持性质差异是气旋形成的关键,暖空气被冷空气抬升并由于地转运动的作用最终导致气旋的形成(叶鑫欣等,2014)。1939年,罗斯贝提出大气长波理论,指出天气尺度系统相对于基本纬向气流是向西传播的(陈国森等,2012)。尽管挪威学派锋面模型和罗斯贝长波理论已经给出了气旋发展过程和移动的描述,对于其机理和三维结构问题并没有理解透彻。对于天气预报而言,发生和发展机制显然更加重要,长波理论的提出也使得一批气象学家更加关注天气系统发生和发展的问题。斜压不稳定理论就是这一时期的重要成果,它将挪威学派的气旋理论与芝加哥学派的长波理论很好地联系起来。

2.1 斜压不稳定概念的提出

许多文献(叶笃正等,1997;钱伟长,2011;钟琦等,2013;许小峰等,2014)指出,赵九章首次提出斜压不稳定的概念,其研究论文比美国气象学家查尼的工作早发表1 a。《中国大百科全书》(大气科学卷)记载:“公元1946年,中国赵九章提出行星波不稳定概念”。

赵九章有关斜压不稳定问题的研究成果于1946年发表于《Journal of Meteorology》(后更名为《Journal of the Atmospheric Sciences》)第3卷。该论文(Jaw, 1946)首次提出了长波斜压不稳定的概念,并指出由于实际大气是斜压的,长波在斜压状态下可以是不稳定的,即振幅将随时间延长而形成天气图上气压场的槽、脊分布和发展。1946年赵九章访问芝加哥大学做的相关学术报告,引起了国际气象学家的关注(吴阶平等,2005)。虽然该研究结果具有一定的局限性,但不可否认,斜压不稳定的概念

是赵九章首次提出的,同时,其关于扰动对基本场作用的认识在当时也是相当超前的。

该论文使用了假设水平、无辐散、等温等处理方法,研究了中纬度斜压大气中大气环流的扰动情况,提出了斜压大气中存在一个临界波长,当波长超过该临界值时,扰动将变得不稳定。赵九章指出,尽管罗斯贝解释了波向西传播的特征,并求出了传播速度,但并未能解释波动是如何维持的。同时,他提出因为海-陆分布不均,气压场和温度场分布不重合,这种不一致会形成力管场,而力管场是维持扰动涡度变化的原因。因此,他尝试发展一套不稳定性的理论,来解释大气波动,特别是定常波(永久性槽、脊)分布的原理。

赵九章首先对动力学方程组的扰动进行线性化并假设运动的扰动场水平无辐散,之后基于一般涡度方程推导出频散方程和临界波长。并且用Haurwitz独立研究的最小临界波长的数值计算结果(图1)证实了自己的结果:假设温度梯度(γ_y)为 $4^\circ\text{C}/(1000\text{ km})$,西风风速为 4 m/s ,纬度为 45° 时,最小临界波长为 1800 km 。并且从临界波长方程可以看出,相同的条件下,在更高的纬度,最小临界波长将变大。此外,在同一纬度上某一点,临界波长分别随着经向温度梯度和风速的增大而增加。

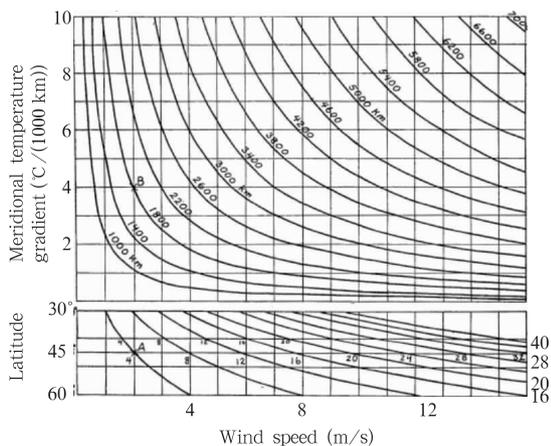


图1 Haurwitz提供的最小临界波长的数值计算结果(Jaw,1946)

Fig.1 The minimum value of the critical wave length proposed by Haurwitz (Jaw,1946)

之后,为了克服水平无辐散假设的主观局限性,赵九章又利用连续方程中的密度变化引入辐合、辐散项,得出该假设条件下的波速和临界波长。并指

出,加入辐合、辐散项后所计算出的移动速度和临界波长相对于假设无辐散的状况下仅减小 10% 左右,故辐合、辐散对扰动发展的影响不大。因此,后面的推演均忽略了与散度项有关的项,以致推导出的部分结果与实况不符。

在论文的最后,赵九章重点讨论了能量转换的问题。首先考虑了热量和质量的输送与能量转换的联系,并指出,在不稳定扰动的情况下,即暖空气北上、冷空气南下发生大尺度混合时,南北向气流的动能增加。水平力管场的作用是通过改变涡度或产生风切变来引起系统的不稳定。如果将大气看作不可压缩流体,那么温度的经向分布相当于在北边有一个高密度系统、南边有一个低密度系统。当密度通过混合变得相等时,系统的势能不再能通过混合过程发生改变,这时南北向气流的能量不能从水平力管场获得。之后,又考虑了动量输送对西风环流的影响:在大尺度混合过程期间,西风动能减小,经向环流的动能通过纬向环流能量的消耗获得。此外,赵九章还指出当南北向的相互交换较大时,西风气流的速度将减小,而当相互交换较小时,西风气流的速度将增大。这一思想在当时是完全超前的。

2.2 斜压不稳定理论的建立和发展

2.2.1 查尼建立斜压不稳定理论

被国际大气科学界认可的斜压不稳定理论的建立者是美国气象学家查尼。查尼在1940年之前一直在学习数学和物理,1941年成为美国加州大学洛杉矶分校教授Holmboe的助手后,才真正开始接触和学习气象学(贾朋群,2002)。查尼对斜压不稳定理论的研究始于他的博士论文《斜压西风气流的长波动力学》(The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current)(Charney,1947),在这篇文章中,他将自己的数学天赋与对大气科学的深入理解进行了很好地结合。这篇文章发表于《Journal of Meteorology》1947年第4卷第5期,首次对中纬度气旋的发展给出了令人信服的物理解释。这项工作弥补了长波扰动研究中对于纬向气流垂直切变和地球角速度垂直分量考虑不足的问题,给出了一个更加接近实际大气状况的解决方案。在研究过程中,查尼将大气扰动方程简化为一个可以求解的系统,推导出大气稳定状态的判据,并发现中纬度西风带会发生连续的动力不稳定。在此基础上,查尼进一步研究了不稳定波的特性,发现不稳定波在很多

方面与观测到的大气扰动非常相似:一般向东传播,并和纬向气流的速度相近,这些波动体现出热力的不对称性,波型随高度向西倾斜等。

查尼从原始方程组出发,提出可以将实际气流看作是基本气流 $\bar{u} = \bar{u}(z)$ 加上一个微小扰动,并指出计算时滤除不重要的波非常有意义,这样就能获得可以求解的方程组。他运用尺度分析的思想,通过近似分离出重力波和声波,仅留下长波分量,最终得到一组准地转方程。他指出,准地转假设和滤波假设是等价的,可以从大气运动问题中滤去“气象噪声”,从而使问题得到极大简化。

查尼还求出了纬向风切变的临界值,指出当风切变超过该临界值时,波动将变得不稳定,且不稳定性随着切变的增强越发显著,而波的稳定性与地面纬向风速没有关系;此外,查尼还对斜压波的垂直结构进行了分析,得出了较为接近实况的结论。

通过查尼的研究工作可以看出,他之所以能成功得到斜压不稳定判据的主要原因之一是因为其抓住了垂直切变这一关键因素。赵九章在提出斜压不稳定的概念时也提到了温度梯度释放能量,从而造成了斜压不稳定,尽管概念是正确的,但是他忽略了温度梯度与风垂直切变的关系。事实上,温度梯度的改变是由平流项产生的,锋面上的纬向南北温度梯度产生热成风,于是有风的垂直切变,从而造成了不稳定。因此,斜压不稳定的本质是垂直切变中产生的不稳定。查尼正是从垂直切变的角度入手,在准地转理论的基础上推导出热成风公式,发现对于给定的波长,当纬向风的垂直切变位于某一临界值之下时,波是稳定的,超过这个临界值之后,波动将变得不稳定。将这一稳定性判据的标准应用到纬向风的季节平均中去能够发现,中纬度西风带会发生连续的动力学不稳定。

Phillips(1995)曾在查尼传记中这样评价 1947 年的这篇论文:这篇文章第一次建立了一个可信的大气大尺度扰动的发展和运动机制。可以看到,查尼关于斜压不稳定理论的推导意义非常重大。正是基于良好的数学功底,查尼不仅通过严密的、能够求解的公式表达出了一个现代气象学的重要概念——斜压不稳定理论,而且他设计的重要数学近似使描述大气运动的数学模型能够应用到数值计算中,进而使得数值天气预报获得成功。

1922 年,理查森发表的专著《用数值预报方法

做天气预报》构建了大气运动偏微分方程组(即后来的模式),向人们展示了天气预报是可以通过模式计算出来的。然而,由于计算中缺少当今模式中常用的“初始化”部分,且当时计算机技术尚未得到发展,他所做的预报尝试以失败告终。查尼在推导斜压不稳定的理论过程中,基于大气运动的原始方程组,利用流体力学的尺度分析方法,按照大气运动的时间尺度和空间尺度,进行了重要的数学近似和简化处理,将决定天气变化的“长波”和高频的重力波、声波区别开来,建立了适合刻画天气演变的准地转方程组,使得对长波的计算不受这些“气象噪音”的干扰。在后来的数值预报计算过程中,正是因为滤去了高频波,使计算得以采用较长的时间步长;因为使用了准地转近似,方程中风速的两个分量得以用气压来替代;同时,在建立正压波的模式中,查尼以实际大气无辐散层为依据,提出以一层大气代表整层大气的构思。这些重要的近似,大大减小了计算量,使数学模式能够顺利地应用到当时的电子计算机中,保证预报的按时完成。事实表明,即便拥有现在的计算条件和观测资料,没有合理和巧妙的简化,完成突破仍旧是不可能的,而这些合理的简化,则来自于对大气本质的深刻认识。

2.2.2 伊迪对斜压不稳定理论的改进

在查尼提出斜压不稳定理论之后的两年,伊迪发表了《长波和气旋波》(Long waves and cyclone wave)一文,用更加简便的方法推导出了斜压不稳定。该文发表在《Tellus》1949 年第 3 期,文章(Eady, 1949)通过对大气运动基本方程组进行合理的简化,发展了关于长波和气旋波初始发展阶段的定量化理论。

伊迪指出,通过观测可以发现,与“天气”相联系的所有波的波速均小于声速,所以,可以把大气作为不可压缩流体来处理。于是首先假设了三维无辐散,从而滤掉声波。然后考虑了稳定的斜压气流,即运动在各个高度上是一致的;并且为了简便,假设热成风和静力稳定度为常数,并忽略了地转参数的变化,得到了简单的基本气流。之后又通过低频近似的方法(即只考虑低频波)滤掉重力波,得出了波动方程的解,并指出滤波与准地转是等价的。

总体来说,伊迪的工作与查尼类似。尽管他们的推导方式有很大不同,但思想是一致的,均是通过滤波的方式求解出准地转位涡方程。只是伊迪是通

过考虑三维无辐散和低频近似来滤除声波和重力波的。与查尼相比,伊迪的贡献在于他通过合理的简化方法,得到更为简单的模型:第一,他假设了更简单的基本气流。伊迪假设基本气流的垂直切变是常数,即 $\partial U/\partial z$ 为常数;并且不考虑地转参数的变化性,即不考虑 β ,使得求解方便。第二,他所设定的边界条件更为简单,只考虑地面和对流层顶。以上这些使得其解析地得到了一个更清楚的斜压不稳定的垂直结构和临界条件,从而得到了比查尼更加简化、更加符合实际的模型。

3 赵九章对斜压不稳定理论的贡献与不足

3.1 赵九章的贡献

3.1.1 提出了斜压不稳定的概念并给出了判定条件

赵九章关于斜压不稳定的理论研究尽管存在一定的局限性,但长波不稳定的概念是由赵九章首次提出的。尽管赵九章对斜压不稳定的求解过程存在理论上的缺陷,但是,其在研究工作中的许多思路 and 理念值得后人肯定和学习。比如,他善于思考前人经典研究工作中的不足之处,指出“解决长波是怎么维持的”这个问题十分重要,而罗斯贝的工作不能解释长波的维持机理;此外,他指出等压面上温度场的分布(即斜压性)是维持波动的一个重要原因;同时,他提出了水平温度梯度可以释放能量,从而产生斜压不稳定,并给出了接近正确的千米量级的临界波长。这在当时已属不易。从这一点看,他所提出的斜压不稳定概念并非空穴来风,而是基于他对大气运动较为深刻的认识。

3.1.2 理论推导中展现了能量转换等气象学思想

对于大尺度大气运动的动力学研究,能量转换是科学家们重点关注的问题。赵九章的这篇论文多处展现了能量转换的思想。赵九章认为,要从动力学上理解大气扰动的机理,必须要考虑大尺度混合期间扰动的能量转换。他首先考虑了热量输送和能量转换的关系,进而考虑质量输送和能量输送的联系,但是由于方程局限于水平交换,因此得出的结论并不正确,即能量不能被交换,但在 20 世纪 40 年代,能够在研究中考虑能量交换问题已属超前。之后,在讨论动量输送对西风环流的影响时,赵九章指出,在大尺度混合过程期间,经向环流的动能通过纬向环流能量的消耗获得,即当南北向的相互交换较大时,西风气流的速度将减小,而当相互交换较小

时,西风气流的速度将增大。这一概念不仅在当时是超前的,直至今天仍然被证明是正确的。遗憾的是,由于文章的理论研究本身存在一些缺陷,这篇文章并没有被后人重视和深入挖掘,导致这些成果也被忽视。

3.1.3 尝试利用数学近似的办法求解大气运动方程的解

数学近似是大气科学研究中经常用到的方法。从赵九章的论文中可以看到,其在进行方程推导时思路清晰、逻辑性强,每一步的推导过程都体现了扎实的数学功底。在推导斜压大气扰动方程时,首先考虑了非扰动的气流系统,得到稳定状态下的地转方程和流体静力学方程;在扰动方程的推导过程中,从大气基本方程组开始着手,并做了一系列的假设和简化;通过对扰动方程的积分,计算出扰动波长的临界值,并指出当扰动波长小于临界波长时,扰动将变得不稳定。在此基础上,赵九章进一步解释了斜压大气中存在的扰动临界波长,并研究了扰动场的天气学和动力学特征。从层层递进的推导中可以看到,赵九章每一步都尝试利用数学近似的方法对大气基本运动方程组进行一系列的简化以便于求解,只是在简化过程中,他保留了在中尺度系统发展中起重要作用的力管项,而忽略了对大尺度系统发展有重要贡献的散度项,导致其与正确的结果失之交臂。

3.2 赵九章的理论缺陷

3.2.1 忽略了水平辐散

赵九章在求解临界波长时,首先假设大气运动的扰动场是无辐散的,即假设大气没有垂直运动,这意味着无法得到正确的斜压不稳定的结论。可以看到,赵九章对方程进行求解后,得到的不稳定临界波长为 1800 km,这与后来被气象界认可的 4000—5000 km 的最不稳定波长(吕美仲等,2004)相比差距较大。尽管赵九章意识到该假设具有一定的局限性,并利用连续方程中的密度变化重新引入辐合、辐散,求得了符合这一条件的临界波长,但这一做法实际上是考虑了空气的可压缩性,即保留了一些不重要的波动,那些波正是查尼和伊迪在推演过程中首先滤除的。由此可以看出,赵九章始终未能考虑大气垂直运动,其保留的力管项仅在急流或锋区贡献较大,以至于忽略了斜压不稳定中最基础、最核心的过程。

3.2.2 没有进行尺度分析

大气运动的涡度方程包括了散度项、涡管扭曲项和力管项,力管项在中尺度条件下为主要贡献项,但对于大尺度而言,力管项则比散度项小一个量级。在当时的年代,人们对散度项和力管项的量级特征并不清楚。赵九章已经意识到等压面上有温度梯度,即斜压性,但他研究的局限性在于没有意识到等压面上有温度分布不等于就是力管场。所以在引入斜压不稳定的时候,尽管考虑了温度平流项,但他没有考虑使用散度项这一大项来产生涡度,而是通过力管项这一小项来引入涡度。由于没有做尺度分析,从而对这一关键问题的把握有误,使其得到的方程与位势涡度方程矛盾(在位势涡度方程中并不会出现力管项),从而无法推导出正确的结果。

3.2.3 对于能量释放和交换的原则理解不正确

挪威学派提出的锋生理论指出,暖空气向北、向上爬,冷空气向南、向下走,已经蕴含了重心下沉、位能释放的理念,体现出了能量从位能转化为动能的思想。在斜压不稳定的概念中,南北温度不一样,冷空气向南、暖空气向北的运动过程中,有效位能借着温度梯度有能量释放。尽管赵九章提出水平温度梯度可以释放能量从而产生斜压不稳定的概念是正确的,但描述这一概念的数学表达式存在偏差,原因在于温度梯度的变化是由温度平流产生的,而力管项不能解决这一问题;此外,他仅考虑了冷空气向南、暖空气向北,没有考虑能量是通过暖空气上升、冷空气下沉释放的,这与挪威学派的气旋模型不符;同时,南北运动不能产生能量交换,要通过上升、下沉运动才能产生能量交换。由于赵九章对于能量释放和交换的原则理解有误,在推演过程中始终忽略垂直运动,也导致了最终的结论存在缺陷,并未能被国际学术界广泛接受。

4 总结和讨论

以查尼和伊迪为代表的经典斜压不稳定理论的研究思路主要是基于大气运动的原始方程组,利用流体力学的尺度分析方法,按照大气运动的时间尺度和空间尺度,依靠数学近似和简化处理,将决定天气变化的“长波”和高频的重力波、声波区别开来,建立适合刻画天气演变的准地转方程组。

查尼从垂直切变的角度入手,在准地转理论的基础上得到斜压不稳定的判据,并得到中纬度西风

带会发生连续的动力学不稳定的结论。而伊迪的贡献则在于在当时计算条件不发达的情况下,他考虑了更简单的基本气流和边界条件,得到了一个更清楚的斜压不稳定的垂直结构和稳定性判据。可以说查尼在此项工作中取得了关键性的突破,而伊迪的工作可以算是对查尼工作的一个改进。

赵九章和他们的不同之处在于,他没有从原始方程出发考虑滤波,而是直接考虑罗斯贝波,首先假设水平无辐散,通过力管项引入斜压性,从而忽略了斜压能量转换的本质。虽然他用到了涡度方程,并且一些推导步骤也考虑了准地转假设,但在考虑散度项时通过空气的可压缩性保留了重力波和声波,这些正好是查尼和伊迪所滤除的。而他在文章最后一节有关质量输送、能量输送和波流相互作用的讨论,在当时则是非常超前的。

虽然赵九章先生未能正确地建立起斜压不稳定理论,但他通过思考前人工作中的不足,首次提出了长波斜压不稳定概念的事实是无可置疑的,他对于斜压不稳定问题的理解,以及对大气动力学的认识也有其过人之处,其在大气动力学领域的学术地位值得后人重新认识和定位,这是尊重历史事实的科学态度。期待通过本文的回顾与分析使更多人了解赵九章先生早年在大气动力学方面做出的不可磨灭的重要贡献,以及斜压不稳定理论诞生和发展的艰辛历程。

致谢:感谢夏威夷大学金飞飞教授、北京大学陶祖钰教授、中国气象局气象干部培训学院贾朋群副研究员、中国科学院大气物理研究所肖子牛研究员阅读本文初稿,并提出修改建议;感谢巢纪平院士提供赵九章先生 1946 年文章发表的出处。

参考文献

- 陈国森, 王林, 陈文. 2012. 大气 Rossby 长波理论的建立和发展. 气象科技进展, 2(6): 50-54. Chen G S, Wang L, Chen W. 2012. On the establishment and development of the atmospheric Rossby wave theory. Adv Meteor Sci Technol, 2(6): 50-54 (in Chinese)
- 贾朋群. 2002. 气象大师的典范——记美国气象学家查尼. 中国气象报, 2002-12-19. Jia P Q. 2002. A paragon of the weather master. China Meteorological News, 2002-12-19 (in Chinese)
- 吕美仲, 侯志明, 周毅. 2004. 动力气象学. 北京: 气象出版社. Lü M Z, Hou Z M, Zhou Y. 2004. Dynamic Meteorology. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 钱伟长. 2011. 20 世纪中国知名科学家学术成就概览·地学卷·大

- 气科学和海洋科学分册. 北京: 科学出版社. Qian W C. 2011. An Overview of the Academic Achievements of Famous Chinese Scientists in Twentieth Century: Geoscience. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 吴阶平, 钱伟长, 朱光亚等. 2005. 中国当代著名科学家丛书: 赵九章. 贵阳: 贵州人民出版社. Wu J P, Qian W C, Zhu G Y, et al. 2005. Chinese Contemporary Famous Scientists Series: Zhao Jiuzhang. Guiyang: Guizhou People's Press (in Chinese)
- 许小峰, 张萌. 2014. 气象科技发展历程的若干回顾及启示. 气象科技进展, 4(6): 6-12. Xu X F, Zhang M. 2014. Some reviews and inspirations on the development of meteorological science and technology. Adv Meteor Sci Technol, 4(6): 6-12 (in Chinese)
- 叶笃正, 巢纪平. 1997. 深切怀念赵九章先生, 学习他的创新精神 // 叶笃正. 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社. Ye D Z, Chao J P. 1997. Deeply miss Mr. Zhao Jiuzhang, learning his innovative spirit // Ye D Z. Selected Papers in Memory of Zhao Jiuzhang. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 叶鑫欣, 焦艳, 傅刚. 2014. 挪威学派气象学家的研究工作和生平: J. 皮叶克尼斯、H. 索尔伯格和 T. 贝吉龙. 气象科技进展, 4(6): 35-45. Ye X X, Jiao Y, Fu G. 2014. On the researches and life experiences of Bergen school scientists: Jacob Bjerknes, Halvor Solberg and Tor Bergeron. Adv Meteor Sci Technol, 4(6): 35-45 (in Chinese)
- 钟琦, 张萌. 2013. 极锋理论-长波理论-数值预报的发展和内在联系. 气象科技进展, 3(1): 68-69. Zhong Q, Zhang M. 2013. On the development and their internal relations between the polar front theory, long-wave theory and NWP. Adv Meteor Sci Technol, 3(1): 68-69 (in Chinese)
- Bjerknes J. 1919. On the structures of moving cyclones. Geophys Publ, 1(2): 1-8
- Bjerknes J, Solberg H. 1922. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. Geophys Publ, 3(1): 3-18
- Charney J G. 1947. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. J Atmos Sci, 4(5): 136-162
- Eady E T. 1949. Long waves and cyclone waves. Tellus, 1(3): 33-52
- Jaw J J. 1946. The formation of the semipermanent centers of action in relation to the horizontal solenoidal field. J Atmos Sci, 3(3): 103-114
- Phillips N A. 1995. Jule Gregory Charney 1917 - 1981 // National Academy of Sciences of the United States of America. Biographical Memoirs Volume 66. Washington D C: National Academy Press