

# 大气Rossby长波理论的建立和发展

陈国森 王林 陈文

(中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190)

**摘要:** 大气Rossby波的发现和大气长波理论的建立在大气科学发展过程中起着非常重要的作用, 它不但对大气动力学和气候动力学研究具有里程碑式的意义, 而且奠定了数值天气预报的理论基础, 在某种程度上使气象学成为一门真正意义的科学。简要回顾并讨论了罗斯贝本人是如何发现Rossby波及推导出大气长波相速度公式的过程, 着重分析了大气长波理论在20世纪四五十年代的主要发展过程, 力图展现罗斯贝在提出大气长波理论中所表现出的高度物理直觉和对现实的抽象、建模能力。希望对当今的大气科学研究有所借鉴, 对气象科研工作者有所启发。

**关键词:** 罗斯贝, 长波理论

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.06.007

## On the Establishment and Development of the Atmospheric Rossby Wave Theory

Chen Guosen, Wang Lin, Chen Wen

(Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract:** The discovery of the atmospheric long wave (Rossby wave) together with the establishment of the related theory is an important milestone in the history of meteorology. The ideas beneath atmospheric long wave dynamics are deeply and widely permeated in modern dynamical meteorology and climate dynamics. It serves as a theoretical basis for the numerical weather prediction and in a sense, turns meteorology into a science in name and in fact. This paper briefly reviews how Carl-Gustaf Arvid Rossby discovered the atmospheric long wave and derived its phase speed from his theory. The emphasis is mainly on the process and the scientific methods during the development of the atmospheric long wave theory in 1940s and 1950s, so that readers can realize the physical intuition from a higher plane and the excellent mathematical treatment of Rossby. By this means, it is hoped that both meteorologists and young students could be motivated.

**Keywords:** Rossby, long wave theory

### 1 引言

从每日或者月平均的高空天气图上, 可以发现的一个最显著特征就是在中高纬度盛行的西风带上存在许多扰动, 这些扰动按照一定的规律移动和发展, 对其移动路径上各地区的天气造成显著影响。那么是什么控制这些扰动的移动和发展呢? 为了解释这些现象, 20世纪最杰出的气象学家之一——罗斯贝 (Carl-Gustaf Rossby)<sup>[1]</sup>研究了大尺度大气运动的规律, 并于1939年发表了经典的关于大气长波理论的文章, 文章中给出了著名的大气长波相速度公式 $c = U - \frac{\beta L^2}{4\pi^2}$ , 并且合理解释了西风带上扰动的形成和移动。这篇文章以及另外两篇分别发表于1940和1945年的文章<sup>[2, 3]</sup>, 不但在大气动力学和气候动力学研究中具有里程碑式的意义, 而且在某种程度上使气象学成为一门真正意

义的科学<sup>[4]</sup>, 并奠定了数值天气预报的理论基础。

作为20世纪大气科学最重要的理论成果, Rossby大气长波理论的建立开启了现代动力气象学研究的大门。在今天大气科学研究越来越复杂, 地球系统数值模拟方兴未艾之际<sup>[5]</sup>, 回顾大气Rossby波的发现并了解大气长波理论的建立背景和过程, 对今天的大气科学研究具有重要的借鉴意义。

### 2 背景

罗斯贝于1898年生于瑞典, 1918年他获得了斯德哥尔摩大学的学士学位, 主攻数学、力学和天文学<sup>[6]</sup>。随后, 出于兴趣, 罗斯贝于1919年到了挪威的贝尔根, 师从气象鼻祖V. Bjerknes学习气象学和海洋学。1921年, 罗斯贝回到了瑞典从事气象工作, 期间他还到斯德哥尔摩大学攻读数学物理, 并于1925年获得数学物理的硕士学位。这些学习经历造就了罗斯贝深厚的数学物理功底, 为他日后在动力气象理论上取得辉煌成就奠定了基础。值得注意的是, 罗斯贝于1923年和1924年分别有两次出海实验的经历, 这些气

收稿日期: 2012年1月11日; 修回日期: 2012年5月15日  
第一作者: 陈国森 (1985—), Email: cgsusher@126.com  
资助信息: 科技部创新方法工作专项项目 (2008IM020500)

象实验的经历可能对罗斯贝研究大尺度大气运动有积极影响<sup>[7]</sup>。

1925年,在“瑞典—美国”基金的资助下,罗斯贝来到美国研究“极地锋面理论在美国天气中的应用”<sup>[7]</sup>。1928年,罗斯贝成为了麻省理工学院(MIT)航空系的副教授,在那里创立了美国第一个气象系,并一直工作到1939年。正是在MIT期间,罗斯贝完成了他本人对气象学的两项最重要的贡献:一是关于大气长波理论的推导,二是关于位涡守恒的推导<sup>[8]</sup>。这两项工作的成果分别发表于1939年和1940年,可以看做是罗斯贝当时对大尺度大气运动理解的一个完整浓缩<sup>[8]</sup>。

### 3 Rossby长波理论的提出

1935年,MIT与美国天气局启动了一个长期预报的项目,在这个项目的执行过程中,许多大尺度大气运动现象陆续被发现,罗斯贝的大气长波理论正是出于解释这些观测现象而提出的<sup>[1]</sup>。总结起来,这些现象就是在西风带上存在小扰动,这些扰动保持准静止或向西移动。当时,还没有任何理论解释这些扰动的形成和移动。

对于这些现象,罗斯贝<sup>[1]</sup>首先从Bjerknes的环流理论出发进行思考。根据Bjerknes的环流理论,如果等压线存在正弦型的纬向距平扰动,那么在仅考虑等压线曲率效应而不考虑气压随纬度的变化时,从流场的水平输送作用可以得出气柱的辐合(辐散)会导致扰动向东移动,且同振幅的短波比长波移动得快。反之,若仅考虑气压随纬度的变化而不考虑等压线曲率的效应时,则由于纬度偏南的流场输送强于纬度偏北的流场输送,可以得出扰动向西移动的结论,且扰动的移速不依赖于波长,而与扰动的振幅成正比。

Bjerknes的理论是从质量守恒的角度出发来进行解释的,在这一理论中,质量守恒所约束的辐合辐散的作用是主要的,由此引起的质点水平运动是引起扰动移动的原因。然而罗斯贝认为,在研究大气扰动的移动时,不仅应当考虑连续方程(即质量守恒)的约束作用,同时也应当考虑运动方程(即涡度守恒)对扰动移动的约束作用。正是出于这种考虑,罗斯贝从简化了的大气运动方程出发,考察了涡度守恒对大气扰动移动的作用。他是这样做的:考虑均质无摩擦正压大气,并且忽略散度的影响,从运动方程出发可以得到绝对涡度守恒方程:

$$\frac{d}{dt}(f + \zeta) = 0 \quad (1)$$

即  $f + \zeta = \text{const}$ 。

式(1)是罗斯贝推导长波理论的关键,因而

了解式(1)的由来是理解Rossby大气长波本质的关键。式(1)是从正压无辐散模型推导得出的,这是极为简化的一个大气模型。我们知道,大气和海洋运动是由复杂的方程组支配的。V. Bjerknes于1898年,将William Thomson Kelvin和Hermann Helmholtz的环流理论首次应用在地球流体动力学上<sup>[8]</sup>。Bjerknes结合考虑了流体力学和热动力学,推导了大气海洋运动的原始方程组,并预见其在数值天气预报的前景<sup>[9, 10]</sup>。但是,原始方程组是复杂的,难以直接求解,因而在研究具体问题时有必要简化方程组,这样一方面可以使问题得以求解,另一方面可以抓住问题的本质。实际上,当不考虑热力因素时,流体可以看成是正压的,在这种情形下浅水波方程组在一定程度上刻画了大尺度流体的运动规律。在1936年的工作中<sup>[11]</sup>,罗斯贝考虑浅水波方程组,由运动方程推导出正压涡度公式  $\frac{d(\zeta + f)}{dt} = -(\zeta + f)(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})$ , 又根据质量守恒方程  $\frac{1}{H} \frac{dH}{dt} = -(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})$ , 积分得到恒等式  $\zeta + f = cH$ 。这其实就是位涡守恒  $\frac{d}{dt}(\frac{\zeta + f}{H}) = 0$  的另一种表达,而涡度这个词的正式使用则始于罗斯贝1945年发表的文章<sup>[3]</sup>。从位涡守恒的表达式可以看到,如果认为  $H$  为常数,也就是考虑无辐散,那么位涡守恒就会退化为绝对涡度守恒,即为式(1)。

问题是,罗斯贝做出这个假设的根据是什么?要回答这个问题,就不得不提到罗斯贝的另一个经典理论,那就是地转适应理论。在1938年的文章中<sup>[12]</sup>,罗斯贝考虑了在风应力作用下洋流和压力的相互适应过程,指出在浅水波假设下,洋流与海表面高度满足地转平衡关系,并且这种平衡的建立是通过快速的惯性重力外波实现的。大气和海洋运动可以分成旋转部分和辐散部分,而地转风属于旋转运动,是无辐散的。地转适应理论表明,大尺度大气海洋运动趋于地转平衡,并且适应过程很快,这样气压场与风场可以近似认为是在地转平衡条件下演变的,因而无辐散假设近似成立,这样位涡守恒可以近似为绝对涡度守恒,即式(1)。由此可见,Rossby长波理论是建立在地转适应理论基础上的。假如罗斯贝没有地转适应理论的研究,他不可能用绝对涡度守恒来研究大气长波,因而也不可能抓住大气长波的本质。

根据式(1),大气在运动的过程中将保持绝对涡度守恒。在这样一个约束下,当一个空气柱向北移动时,由于行星涡度  $f$  随纬度增加,相对涡度就会减小。即如果初始时刻空气柱具有气旋性涡度,则随着空气柱向北移动,气旋性会减弱,反气旋性加强;反

之，当空气柱向南移动时，则气旋性加强，反气旋性减弱。这实际上就是Rossby波形成的最根本原因，即，绝对涡度守恒以及行星涡度随纬度变化是Rossby波的本质。需要指出的是，Ekman在研究大洋环流理论时曾经提出，涡度变化在控制海洋环流的变化中起到了核心作用<sup>[13, 14]</sup>，而罗斯贝认为大尺度大气运动近似满足绝对涡度守恒这一观点极可能受到了Ekman的影响。这一点在Platzman关于Rossby波的综述性文章<sup>[8]</sup>中也有提到：“Ekman对罗斯贝的位涡理论确实有相当大的影响。当然，任何这方面的正确的历史观点必须包括Bjerknes环流理论的影响。”

如果说罗斯贝关于涡度守恒控制大尺度大气运动的观点受到了Ekman影响的话，那么简洁地利用 $\beta$ 平面近似揭示Rossby波形成机理的工作便是罗斯贝最精彩的原创性工作。下面来看看罗斯贝是怎样推导出他那著名的大气长波相速公式的。罗斯贝在推导过程中做了两个重要假设。一个是认为行星涡度对纬度的梯度为常数，即 $\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$ 为常数，并通过常数 $\beta$ 与经向坐标 $y$ 的乘积来反映科氏参数 $f$ 随纬度的变化。正是这个假设使得方程获得了极大的简化，并清楚地揭示出Rossby波形成的机理，而这一假设也被后人称为 $\beta$ 平面近似，广泛用于此后的动力气象学研究。另一个假设是小扰动假设，即将流场分解为基本态和叠加在基本态上的小扰动。这样可以使得方程能够线性化，以便于求出解析解，并且抓住了问题的物理本质。这种方法也被广泛应用于地球流体动力学的研究中。这两个假设在Rossby大气长波理论的推导中起着关键的作用，因为它既使得方程得以简化，更抓住了运动的主要特征，使得解具有清晰的物理意义。

进一步，罗斯贝利用行波法假设解有如下形式： $e^{ik(x-ct)}$ ，则方程可以转化为含特征值的常系数常微分方程，易求得特征值为：

$$c = U - \frac{\beta L^2}{4\pi^2} \quad (2)$$

这就是罗斯贝著名的大气长波相速度公式，它揭示出科氏参数 $f$ 随纬度的变化（即 $\beta$ ）是Rossby波形成的根本机制。尽管从相速度公式（2）中可以看到Rossby波相对于基本纬向风是向西传播的，但这种西移机制与Bjerknes环流理论所给出的解释完全不同。它不依赖于辐合辐散，而是受到涡度守恒的控制。实际上，罗斯贝认为涡度的分布是决定系统静止或移动的主要因素，而气压场的变化则是次要因素；因而大尺度大气运动所受到的约束应该是绝对涡度守恒，或者是位涡守恒，而辐合辐散的作用不是主要的<sup>[3]</sup>，这一点也被后人用尺度分析理论和摄动理论所证实<sup>[4]</sup>。

再进一步，由式（2）可见扰动波长越长，Rossby波相对于基本纬向风向西传播越快。由于有基本纬向气流的作用，当波长小于一定阈值的时候，Rossby波是相对地面向东传播的，而大于这个阈值时Rossby波相对地面向西移动。这个阈值就是定常大气长波的波长： $L_s = 2\pi \sqrt{\frac{U}{\beta}}$ 。

罗斯贝计算了不同纬度，不同基本纬向气流下的定常波波长，以及不同波数下满足定常波公式的基本气流。通过比较实际大气纬向风，指出在60°N的定常波波数为2~3波，而在30°N则大概是4波，这些结果与实际观测的半永久性的活动中心的尺度基本相当，从而在理论上合理解释了大气中半永久活动中心的形成与移动。

至此，阐述了罗斯贝对于大气长波的原始推导过程以及思路。从中可以发现，这一理论之所以能够获得成功，在很大程度上取决于罗斯贝对前人（包括Bjerknes和Ekman）理论的深入思考以及对所研究问题的合理、大胆的简化。正是通过抓住核心特征建立数学模型，然后根据物理现象对模型进行简化和求解，罗斯贝才清楚地揭示了科氏参数随纬度变化在Rossby波形成中的重要作用。从罗斯贝的推导过程还可以发现，从物理的角度解题与从数学的角度解题有着明显的差别。物理的角度解题要求解有物理意义，包括参数的选取也要有物理意义，解求出来之后还要经受观测的检验；而数学的角度解题则是在所有参数域下求出通解，然后根据参数的选取对解分类。在这里，罗斯贝显然是从物理学角度出发来对方程进行简化和求解的。

事实上，罗斯贝的结果只是拉普拉斯潮汐方程组一类解的极限形式<sup>[8]</sup>。Margules最早在1893年便发现拉普拉斯潮汐方程组有两类解：一类与重力作用有关，一类是与地球的旋转有关<sup>[15]</sup>，Hough<sup>[16]</sup>在5年后也独立发现了这个结果。然而这些结果在Rossby长波理论发表前并没有应用到气象学的研究上，直到1939年罗斯贝的理论发表后，Haurwitz<sup>[17]</sup>发现Rossby长波理论与拉普拉斯潮汐方程第二类解的联系后，这些理论才开始被广泛关注。与拉普拉斯潮汐方程组复杂的求解过程相比，罗斯贝从来就没有把方程写成球坐标形式，“他总是从最基本的物理概念出发，将问题表达在最简单的坐标形式下”<sup>[7]</sup>。科学界最精彩的结果往往以最简单最优美的形式表达出来，这也许是罗斯贝为什么如此成功的原因。

#### 4 Rossby长波理论的应用和发展

罗斯贝关于大气长波相速度公式的文章发表后，

他的理论立刻被应用到实际的预报业务中。Namias等<sup>[18]</sup>研究了1万英尺(3048m)高度的候平均天气图,发现西风带上的扰动在定性和定量上与罗斯贝的长波理论相一致。他们同时发现有新的槽脊在原有扰动下游发展的现象。为了解释这一现象,罗斯贝进一步研究了波动频率和能量的传播,并将成果于1945年发表<sup>[3]</sup>,而这一工作则是他本人对行星波动理论的最后的贡献。关于大气长波频散理论,我国学者叶笃正先生做出了重要的贡献,并对动力气象的发展产生了重要影响。叶笃正(Yeh)<sup>[19]</sup>研究四种大气模型下的能量频散关系,指出每种模型都存在一定波长范围,在这个范围内,群速度大于相速度,因此新的波动可以在初始波动下游产生,这就是所谓的“上游效应”。他同时指出当考虑大气辐合、辐散时,群速度在波长大于一定值的时候会变成负值,但是群速度仍然大于相速度,只有当考虑水平密度梯度时,相速度才可能大于群速度,出现“下游效应”。Rossby长波频散理论,尤其是“上游效应”原理对于天气预报具有重要的意义,已被广泛应用于实际天气预报业务中。

罗斯贝的长波理论发表后,一个自然的问题是,天气图上的那些瞬变的扰动是怎么产生的,尤其是如何解释锋面气旋的生成。1947年Charney考虑了在 $\beta$ 平面下,有着基本纬向风垂直切变情况下大气长波的不稳定性,指出当存在基本纬向风的垂直切变时,也就是存在南北向的温度梯度时,扰动在一定条件下可以从基本气流获得有效位能,这就是斜压不稳定过程<sup>[20]</sup>。斜压不稳定在一定程度上解释了天气图中瞬变Rossby波的产生,使大尺度大气动力学发展到的一个新的高度。随后,郭晓岚考虑基本纬向气流的水平切变,又发展了正压不稳定理论,指出在一定条件下扰动也可以从基本纬向风获得动能<sup>[21]</sup>。不稳定理论以及与之相关的波流相互作用和能量循环现在已经成为了大气环流理论的核心内容。事实上,罗斯贝在他1939年的文章中,便讨论了纬向平均环流与大气长波的关系<sup>[1]</sup>;在罗斯贝的许多文章中,波流相互作用都是其中的核心问题,“这是罗斯贝为我们留下的宝贵科学遗产”<sup>[22]</sup>。

第二次世界大战后,在von Neumann的领导下,普林斯顿大学研制了第一台计算机并用于数值天气预报,从此气象学进入了数值模拟时代。Phillips在1956年用两层模式第一次模拟了大气环流<sup>[23]</sup>。数值试验结果不仅验证了Charney的斜压不稳定理论,揭示了锋面生成和大气行星波动的联系,并且揭示了大气长波在动量和能量循环中的作用。根据Lewis<sup>[24]</sup>的考证,罗斯贝在得知Phillips的结果后,高度评价了他的结

果。可以说,Phillips的数值试验从某种程度上证明了Rossby长波动力学在大气环流中的重要作用。

罗斯贝曾指出热源和地形的影响对于大气长波有着重要的作用<sup>[1]</sup>。Charney等<sup>[25]</sup>利用 $\beta$ 平面上的线性正压方程,定量模拟了行星尺度的定常波。他们的模型中考虑纬向基本气流为常数,并且考虑了地形的作用。模拟结果与冬季45°N 500hPa上的高度场较为符合。他们的结果表明了地形对于定常大气长波有重要的影响。Bolin<sup>[26]</sup>则在理论上扩展了地形对西风带的影响,Smagorinsky<sup>[27]</sup>从理论上研究了热源对于定常波的影响。时至今日,地形和热源被认为是激发和维持准定常行星波的最主要原因<sup>[28]</sup>。半个多世纪以来,关于Rossby波的研究不断得到丰富,包括波动的二维和三维传播、非线性孤立波、非线性波一流以及波一波相互作用,等等。这些研究完善了Rossby大气长波理论,并且推动了整个大气和海洋科学的发展。

## 5 结语

本文简要回顾了大气Rossby波发现的背景和大气长波理论建立的过程,这个过程可以归结为:观察现象—现象抽象化—建立简单模型—合理简化和求解模型—解释现象。这实际上也是所有科学研究的基本步骤。在这其中最重要的是如何建立模型和对模型进行简化求解。所建立的模型要最大限度地反映现象,又要简单到能够求解;在求解过程中,更多地要从物理角度出发来对模型进行简化,而不是深陷繁复的数学泥潭。像罗斯贝那样对气象学做出突破性的贡献,可能需要有智慧(不只是聪明)的科学巨人来实现<sup>[29]</sup>,但通过回顾和体会罗斯贝提出大气长波理论的过程和方法,对每个大气科学工作者都有重要的借鉴和启发。特别在今天大气科学研究内容越来越广泛、研究方法也越来越复杂,学习罗斯贝建立长波理论时的思路和研究手段就显得更加重要和有意义。

## 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] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1940, 66: 68-87.
- [3] Rossby C G. On the propagation of frequencies and energy in certain types of oceanic and atmospheric waves. *J Atmos Sci*, 1945, 2: 187-204.
- [4] Dickinson R E. Rossby waves: long-period oscillations of oceans and atmospheres. *Ann Rev Fluid Mech*, 1978, 10: 159-195.
- [5] 黄荣辉. 大气科学发展的回顾与展望. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 643-657.
- [6] Byers H R. Carl-Gustaf Arvid Rossby// *Biographical Memoirs* 34. Washington D C: National Academy of Sciences, 1960.
- [7] Phillips N A. Carl-Gustaf Rossby: His times, personality, and actions. *Bull Am Meteorol Soc*, 1998, 79: 1097-1112.
- [8] Platzman G W. The Rossby wave. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1968, 94: 225-248.

- [9] Bjerknes V. Ueber die bildung cirkulationsebewegungen und wirbeln in rebungslosen flüssigkeiten. Videnskabselskabet Skrifter, 1898, 1:5.
- [10] Bjerknes V. Problem der wettvorhersage, betrachtet vom standpunkte der mechanik und der physik. Meteor Zeitschr, 1904, 21: 1-7.
- [11] Rossby C G. Dynamics of steady ocean currents in the light of experimental fluid dynamics. Phys Oceanog Meteor, 1936, 5: 1-43.
- [12] Rossby C G. On the mutual adjustment of pressure and velocity distributions in certain simple current systems, II. J Mar Res, 1938, 5: 239-263.
- [13] Ekman V W. Uber horizontalzirkulation bei winderzeugten meerestromungen. archiv für matefnatik. Astronomii och Fysik, 1923, 17: 1-74.
- [14] Ekman V W. Studien zur dynamik der meereströmungen. Gerl Beit Zur Geophys, 1932, 36: 385-438.
- [15] Magules M. Luftbewegunge in einer rotierenden Spharoidschale (II. Theil). Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Wien, IIA, 1893, 102: 11-56.
- [16] Hough S S. On the application of harmonic analysis to the dynamical theory of the tides. Part II: On the general integration of Laplace's dynamical equations. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1898, 191: 139-185.
- [17] Haurwitz B. The motion of atmospheric disturbances on the spherical earth. J Mar Res, 1940, 3: 254-267.
- [18] Namias J, Clapp P F. Studies of the motion and development of long waves in the westerlies. J Meteorol, 1944, 1: 57-77.
- [19] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. J Meteorol, 1949, 6: 1-16.
- [20] Charney J G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. J Meteorol, 1947, 4: 136-162.
- [21] Kuo H L. Dynamic instability of two-dimensional nondivergent flow in a barotropic atmosphere. J Meteorol, 1949, 6: 105-122.
- [22] Palmer T N. Nonlinear dynamics and climate change: Rossby's legacy. Bull Am Meteorol Soc, 1998, 79: 1411-1423.
- [23] Phillips N A. The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment. Quart J Roy Meteor Soc, 1956, 82: 123-164.
- [24] Lewis J M. Clarifying the dynamics of the general circulation: Phillips's 1956 experiment. Bull Am Meteorol Soc, 1998, 79: 39-60.
- [25] Charney J G, Eliassen A. A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitude westerlies. Tellus, 1949, 1: 38-54.
- [26] Bolin B. On the influence of the earth's orography on the general character of the westerlies. Tellus, 1950, 2: 184-195.
- [27] Smagorinsky J. The dynamical influence of large-scale heat sources and sinks on the quasi-stationary mean motions of the atmosphere. Quart J Roy Meteor Soc, 1953, 79: 342-366.
- [28] Held I M, Ting M F, Wang H L. Northern winter stationary waves: Theory and modeling. J Climate, 2002, 15: 2125-2144.
- [29] 胡永云. 我所知道的芝加哥学派. 2007. <http://www.atmos.pku.edu.cn/yhu/chicago.pdf>

## 会议信息

- ◆ AMS大气光达短期课程: 原理和应用 (AMS Short Course on Atmospheric Lidar: Principles and Applications), 2013年1月6日, 美国, 奥斯汀 (<http://www.ams.org>)
- ◆ 北极前沿2013 (Arctic Frontiers 2013: Geopolitics and Marine Production in a Changing Arctic), 2013年1月20—25日, 挪威, Tromsø (<http://www.arcticfrontiers.com/>)
- ◆ 墨西哥湾石油泄漏和生态科学会议 (Gulf of Mexico Oil Spill & Ecosystem Science Conference), 2013年1月21—23日, 美国, 路易斯安那州, 新奥尔良 (<http://www.gulfresearchinitiative.org/news-and-events/gulf-of-mexico-oil-spill-ecosystem-science-conference/>)
- ◆ ACVE-大气成分验证和演化 (ACVE-Atmospheric Composition Validation and Evolution), 2013年3月13—15日, 意大利, Frascati (<http://congrexprojects.com/acve2013/introduction>)
- ◆ 长期预报问题: 神话、科学和进展 (The Long-Range Forecasting Problem: Mythology, Science and Progress), 2013年3月16日, 英国, 伦敦 (<http://www.rmets.org/events/long-range-forecasting-problem-mythology-science-and-progress>)
- ◆ NOAA 2013年GOES/POES和GOES-R/JPSS卫星数据用户直接读取会议 (NOAA 2013 Satellite Conference for Direct Readout, GOES/POES, and GOES-R/JPSS Users), 2013年4月8—12日, 美国, College Park, MD (<http://satelliteconferences.noaa.gov/2013/index.htm>)
- ◆ 海平面上升和变化的气候背景下沿海过程和环境: 科学告知的管理 (Coastal Processes and Environments Under Sea-Level Rise and Changing Climate: Science to Inform Management), 2013年4月14—19日, 美国, Galveston, TX (<http://www.geosociety.org/penrose/13Texas.htm>)
- ◆ 第四届WGNE天气和气候模式系统误差学术讨论会 (4th WGNE Workshop on Systematic Errors in Weather and Climate Models), 2013年4月15—19日, 英国, 埃克塞特 (<http://www.metoffice.gov.uk/conference/wgne2013>)
- ◆ GODAE OceanView-GSOP-CLIVAR观测系统评估和耦合数据同化学术会 (GODAE OceanView-GSOP-CLIVAR Workshop on Observing System Evaluation and Coupled Data Assimilation), 2013年4月15—19日, 澳大利亚, 霍巴特 (<https://www.godae-oceanview.org/calendar/q/date/2013/04/15/godae-oceanview-gsop-clivar-workshop-2013/>)
- ◆ 欧洲2013年气候变化适应会议 (The European Climate Change Adaptation Conference 2013), 2013年4月18—20日, 德国, 汉堡 (<http://eccacnf.eu/>)
- ◆ 海洋通道的过去和未来: 对海洋环流和气候的重要性 (Ocean Gateways Past and Present: Significance for Ocean Circulation and Climate), 2013年5月5—7日, 以色列, 耶路撒冷 (<http://gatewaypresentpast.net/>)
- ◆ 第12届国际统计气候学会议 (12th International Meeting on Statistical Climatology), 2013年6月24—28日, 韩国, 济州岛 (<http://www.imsc2013.org/main/main.asp>)
- ◆ 第二届能源和气象国际会议 (2nd International Conference-Energy & Meteorology), 2013年6月25—28日, 法国, 图卢兹 (<http://www.icem2013.org/>)
- ◆ NCCR 2013年9月气候夏季学校 (NCCR Climate Summer School, Sep 2013), 2013年9月1—6日, 瑞士, 伯尔尼 ([http://www.nccr-climate.unibe.ch/summer\\_school/2013/](http://www.nccr-climate.unibe.ch/summer_school/2013/))
- ◆ 模拟大气和海洋流动: 来自实验室试验和数值模拟的灵感 (Modelling Atmospheric and Oceanic Flows: Insights from Laboratory Experiments and Numerical Simulations), 2013年9月24—26日, 德国, 柏林 (<http://euromech52.mi.fu-berlin.de/>)