

大气科学教育讲座 第二讲

二十世纪初以来气象研究和教育 在欧洲和美国的发展*

贾朋群

(中国气象局培训中心, 北京 100081)

1 引 言

地球大气是人类第一个科学实验室,它孕育了最早的光学、声学、化学和电学等现象的研究和探索。以地球大气层本身为研究对象的气象科学更是早在大约公元前 350 年,由希腊哲学大师亚历士多德创立。16-17 世纪,温度计和气压表的发明,使气象科学走向定量研究的时代,而 19 世纪中叶电报的发明,让不同地点的观测结果快速集中成为可能,从而使采用科学的方法进行的天气预报粉墨登场。至此,必要的定量仪器、观测和近代物理学的发展,都在 20 世纪前为气象科学的飞跃积蓄了力量。

现代气象科学诞生于 20 世纪初,在第二次世界大战后逐步走向成熟。其中在 20 世纪前半叶,是传统气象学的经验学派、理论学派和气象预报实践学派之间相互融合、借鉴的初级阶段。随着观测资料和分析的积累和呼唤,气象科学首先发展成为大气科学,站在了更高的高度,具有了更广的视角。同时,气象学家具有的敏锐洞察力,让他们在 20 世纪中期,抓住了以电子计算机诞生为标志的计算技术革命,成功地找到了解决大气科学这一复杂系统问题的可行之路,并最终以数值天气预报成功为标志,从而构建了地球科学中的重要学科——气象科学。

这一经历了半个世纪的科学演化过程,开始于世纪初的 1903 年,挪威物理学家 V 皮叶克尼斯(Vilhelm Bjerknes)提出天气预报问题不过是一组控制大气运动的动力和热力物理方程的初值问题,天气预报就是这一数学方程组的解的观点。这一革命性的认识,其定性应用

* 收稿日期 2005-10-30

国家自然科学基金委员会委托项目“大气科学现状调研”(D0324009)和中国气象局气象软科学项目支持

促成了经典天气学中气旋-锋理论在 20 世纪前 20 年诞生。当这套理论在 1950 年指导由冯·诺依曼(von Neumann)和切尼(Charney)等在人类第一台电子计算机上成功进行了数值天气预报后,气象科学开始羽翼丰满,学科结构和基本认知基本形成。这其中皮叶克尼斯及其创建的挪威卑尔根(Bergen)气象学校以及冯·诺依曼和切尼主持的美国普林斯顿大学高级研究院气象项目,也成为 20 世纪气象科学二大科学突破的载体。

这两次突破,如果说第一次突破创造了气象科学这门在真正意义上属于“衍生”的学科(即其主要的原理来自物理学等其他经典学科)的话,第二次突破则彻底地改变了气象科学的面貌,使其独立成为一门重要的、目的在于认识地球大气层中发生的复杂过程的自然科学学科。而气象科学的独立和成熟,也让和大众生活密切相关的气象预报,从艺术真正转变为一门严肃的基于物理和数学理论的科学。

与上述两次突破相适应,气象科学研究和发展的中心,也从世纪初的欧洲(先是德国的莱比锡,在一次大战中被迫转移到西北欧洲),在二次大战后又迅速转移到了美国。包括普林斯顿大学在内的美国多所新兴的大学提供的良好的研究创新氛围,尤其是对外来学者博大的开放情怀,让多名有志的欧洲以及后来亚洲等地的学者,找到了促进和发展气象科学的最佳土壤。尤其是气象科学

在这些美国综合性大学里,在 20 世纪中期的几十年关键发展期中,有条件在气象中快速溶入新的包括计算机和探测等最新科学技术成果。而气象科学在美国的健康和顺利发展,其渊源和人才动力都与来自早期欧洲气象科学的先进概念和预报思想的引入,尤其是大量欧洲优秀气象学家加入美国大学的阵营,从事气象科学研究和教育活动,起到了至关重要的作用。

2 现代气象科学在 20 世纪初诞生于欧洲

1) 第一次世界大战期间气象在欧洲的扩张

1916 年,一次世界大战进入僵持的时候,在欧洲战场的的一个战地医院,英国气象学家里查逊利用战火间难得的空闲,推导他的天气预报方程。而在德国莱比锡,已经轰轰烈烈在进行气象科学研究的挪威人皮叶克尼斯,却因为其助手和研究生纷纷从军,不得不考虑返回家乡。

与此同时,战争已经悄悄改变着气象只是和百叶箱联系在一起的被动观测的状态。在第一次世界大战之前,气象还很少介入战争和大众生活,只是文人谈论的话题。但是,一次大战中的泥浆、毒气和飞机改变着一切,气象信息逐渐成为战争中具有极高价值的信息。这是因为军队,尤其是配备了笨重机械的队伍,需要较以往更为灵活地转移,但这只有在道路和天气允许的条件下才能

实现。而毒气的使用效果更是完全依赖于天气。军队中越来越多的飞机的加入，呼吁着气象服务的一个新领域——对高层大气风场的认识。此外，现代军队有效性的最重要因素之一就是炮兵，而炮兵作战完全依赖于风的订正，这时候战场上时常会看到训练有素的科学家在火炮旁体现其不可替代的价值。

在新世纪开始的时候英明地将气象学问题归结为大气气团的物理学问题的皮叶克尼斯，在第一次世界大战的爆发后并没有太多地领会战争，仍然执著于自己的研究。但随着研究所里他的德国助手们一批又一批应征入伍，开赴前线，他不得不停止了在德国莱比锡的研究。当时全欧洲被战争隔绝的斯堪的纳维亚半岛，他的故乡挪威也成了他暂时避开战争，不中断研究的最好去处。

皮叶克尼斯带领他的家人和少数助手回到家乡时，他非常幸运地看到，在卑尔根，他的同乡，挪威近代海洋学先驱海兰得-汉森（Bjorn Helland-Hansen）正在筹建卑尔根博物馆下属的地球物理研究所。海兰得-汉森当时对海洋的物理结构和动态特性的研究，是将海洋学从主要是描述性的科学转变为以物理和化学原理为基础的科学的前奏。知道皮叶克尼斯回到了家乡，又通晓他在德国开展的针对大气层的类似研究取得的令人信服的进展，海兰得-汉森于是通过卑尔根博物馆理事会，在1917年3月17日向皮叶克尼

斯发出了邀请他加盟地球物理研究所的信函。皮叶克尼斯认为这里的条件完全可以继续他在莱比锡开创的工作，于是他愉快地接受了邀请。随着研究的不断深入，一个专注于气象科学研究和天气预报实践的机构-卑尔根气象学校呼之欲出。

2) 挪威卑尔根气象学校——需求带动研究和发展

从卑尔根气象学校成立开始，科学探讨和争论就没有停止过。首先，皮叶克尼斯在研究中一直强调的是大气问题的理论解，然而，面对复杂的大气系统是不是在理论解没有得到之前，在天气预报中我们就无能为力而袖手旁观呢？和皮叶克尼斯相比，他从莱比锡带来的合作者和后来加入其中的研究者中，大部分是风华正茂的年轻人的思想更为务实一些。包括皮叶克尼斯的儿子J皮叶克尼斯（Jack Bjerknnes）在内的青年气象学者，在沿着老皮叶克尼斯的思路，继续研究气旋结构理论的同时，他们已经在试图将这套还没有数学解的理论应用到实际的天气预报中。这些年轻学者的努力，虽然偏离了皮叶克尼斯一开始设计的方向，但却成为卑尔根气象学校的最重要的研究特点和理念。

卑尔根气象学校侧重于天气预报实践，一个更为直接的原因是来自社会环境的巨大需求。1917年挪威粮食歉收导致粮食短缺，尤其是在大城市更为严重。战争中处于被封锁状态下的挪威，粮食供给又显然不能

依靠其他国家。挪威政府从 1917 年秋季开始，大力鼓励一切可以为农业增产做出贡献的努力。这也使得皮叶克尼斯研究组不得不从理论研究转移到应用实践中去。这时一件看似是巧合，又大大推动了气象学校的研究和预报工作的事件发生了。1918 年 2 月 13 日，挪威的一家地方报纸刊发了一条消息，报道了瑞典开始提供天气预报服务的情况，农民可以通过电话得到天气预报。和这条消息一起刊发的一篇以“为了提高农业产量，在挪威也能得到类似的服务吗？”为标题的对话中，当时的挪威气象局局长赫塞尔伯格的回答是：“在挪威开展这样的服务面临太多的困难，我们无能为力”。看到这样的新闻，皮叶克尼斯无法表达他的震惊。他立即在 2 月 18 日致信赫塞尔伯格：“现在的情况是，为了国家的利益，气象有责任倾其全力而为之，尽管我们无法从英国得到气象电报。现在这种全民对气象寄予如此热切期望的情况永远不会再出现”。这一事件激发了皮叶克尼斯和他的同事为国家尽力的责任感。皮叶克尼斯在和挪威总理居纳尔·克努森短暂会谈后，政府同意资助目的在于使农业受益的天气预报研究计划。这一经历让皮叶克尼斯观念的改变也是明显的，他在这一年 6 月 4 日写给友人的信函中，不无感慨地描述到：“这真是命中注定，现在我突然变成了一个‘应用’气象学家。我们将尽全力为农民提供天气预报。在这之前，只是在挪

威东部进行过这样的尝试。可现在在我的建议下，挪威议会同意拿出 10 万克朗建立整个挪威西部的预报服务系统”。随后，皮叶克尼斯责成其子全权负责挪威西部沿海的天气预报服务。在粮食紧缺的时期，挪威沿海的渔业生产就更显重要。渔民出海，每天的天气预报也是少不了的支撑。1919 年挪威建立以卑尔根气象学校为基地的西部沿海气象预报服务和全国气象观测网络时，他便被委以重任，全权负责挪威西部的气象观测和预报。

1919 年，皮叶克尼斯完成了在现代气象学发展史上具有里程碑意义的经典论文“论运动中的气旋结构”。这时瑞典气象学家罗斯贝和伯杰龙等人纷纷加入了卑尔根气象学校，在那里形成了继德国莱比锡以后欧洲新的天气分析研究的创新团队。他们利用不多的气球探空数据，研究天气系统的三维结构。1922 年，皮叶克尼斯与伯杰龙联名发表了“气旋的生命循环和大气环流的极地锋理论”这篇重要论文，至此，影响中纬度广大地区最重要的气旋系统，系统内冷、暖锋结构及其对应的天气现象等一整套理论和在预报实践中的应用基本大功告成，并在之后的 20 多年里被包括中国科学家在内的全球气象界逐渐认可，成为经典的天气学分析和预报的标准。基于皮叶克尼斯的出色工作，1924 年奥斯陆大学授予他博士学位。1931 年，皮叶克尼斯离开挪威气象局，成为卑尔

根大学地球物理研究所的气象教授,1933年他又发现了高层大气波动,并指出它与地面气旋有紧密的联系。

3) 研究与教育并举和基础与应用结合造就了一代气象大师

20世纪初期,皮叶克尼斯率领他的年轻助手们在卑尔根气象学校取得的成功,一个显著的特点就是研究与教育的紧密结合。在卑尔根气象学校这样的教育机构,实际上是具有创新才能的大师,在率领一个团队进行科学攻关,它的成功不仅在气象界具有划时代意义,也引起整个科学界的思考,成功背后的启示也是深刻的。

首先,科学家在科学探索中的意识和勤奋应该是他们取得成功的最主要因素。美国气象史研究者 Haurwitz 回忆起令他非常难忘的与皮叶克尼斯第一次见面的情景。那是1927年战后的莱比锡,挪威学派的研究人员又开始经常往来这里,吸取最新的科技成果。在这里刚刚获得博士学位的 Haurwitz,在图书馆里认出了刚从卑尔根来到这里的皮叶克尼斯。当这位名字已经如雷贯耳的大学者似乎要请教他一个问题时,诚惶诚恐的 Haurwitz 来到他面前,却只是被问到废纸篓在哪里。后来在交谈中,皮叶克尼斯说的“废纸篓和橡皮是理论物理学家的两件最重要的工具”。这句话让人总是无法忘怀。不断地尝试和否定自己,再进行新的尝试,这一共性的执著精神以不同的方式表现在这些

载入史册的科学家们的身上。

另外,上个世纪初期的一些偶然因素,实际上是代表了西方来自社会(甚至是国际社会)的科学氛围也起到了不可替代的作用。特别是当1904年皮叶克尼斯对外宣布了他的关于天气预报的大胆计划后,立即引起了强烈的反响。美国著名的钢铁大王,后来成为慈善家和科学研究赞助人的卡内基,从1906年开始资助皮叶克尼斯的研究工作,这种资助延续了30多年一直到1941年,在战争期间也没有终断过。卡内基的无偿资助,使得皮叶克尼斯以及后来他的继任者们能够吸引一流的科学家加入他们的研究队伍,在几次最困难的时候,能够把研究工作持续下去而不是半途而废。

除了私人无功利的资助,挪威政府在战争期间的政策支持和基本建设上的投入,使得挪威地面观测站的数量,短时间内从9个,猛增到90个,保证了气旋理论建立在详实的科学观测基础之上。

最后,挪威气旋理论创建过程中的科学团队精神和作用,特别令人感动。从皮叶克尼斯1897年提出环流理论为以后的研究有了一个很好的铺垫,到1918年11月J皮叶克尼斯完成他的8页论述气旋结构的划时代论文,皮氏父子在整个过程中无疑是领军人物。在理论还是实践谁更重要的问题上,J皮叶克尼斯没有完全按照父亲的思想走下去,而是率领年轻一代科学家从一开始就紧

紧围绕天气预报问题研究气旋理论，他为后来的成功无疑起到了至关重要的作用。而皮叶克尼斯表现出的大科学家风范，先是默许和宽容，后来在面对战争和国家需求时，很快抛弃旧思想，积极支持和投身于应用研究之中，同样令人尊重。这一过程特别反映了教育和被教育者的互动在科技创新实践中不可替代的重要性，也在根本上实现了教育的初衷。

除了皮氏父子以外，卑尔根气象学校中其他优秀的年轻研究人员，象托尔·伯杰龙（Tor Bergeron）、哈尔沃·瑟尔贝格（Halvor Solberg）、卡尔-古斯塔夫·罗斯贝（Carl-Gustaf Rossby）和斯韦勒·皮特森（Sverre Pettersen）等人，都为这套理论的提出和完善做出了贡献。例如，正是伯杰龙提出的“锢囚”概念，使气旋理论最终能够自圆其说，全面描述了气旋的发生、发展和消亡的整个生命期。这些科学家中，一些人到美国继续大气科学的研究，事实上成为了大气科学研究和教育的中心到 20 世纪下半叶转移到美国的决定因素。

3 美国现代气象教育的发端

1) MIT 气象课程——罗斯贝开创美国气象高等教育

20 世纪 20 年代开始，在陆续从欧洲来到美国的气象学者中，最早成行和最为关键

的人物，是瑞典籍气象学家卡尔-古斯塔夫·阿尔维德·罗斯贝（Car-Gustaf Arvid Rossby, 1898-1957 年）。

罗斯贝 1898 年 12 月 28 日出生于瑞典斯德哥尔摩的一个中产家庭。当他在家乡的斯德哥尔摩大学进行数学和物理专业的学习时，参加了由当时刚刚获得气象预报理论突破的皮叶克尼斯主讲的一次关于大气运动非连续性问题讲座，由此他就被气象学问题深深吸引。1919-1920 年他进入著名的卑尔根气象学校，在那里学习时他就曾首先建议了暖锋和冷锋在天气图上分别用红色和蓝色代表，而不是当时使用的相反方案。1921 年他又回到斯德哥尔摩大学，更加深入地学习数学和物理课程并在 1925 年取得学位。从 1922 年开始，他还作为瑞典气象和水文研究所的雇员，在那里他参与高空气球观测网的建立，与另外 4 名预报员一起每天 3 次进行天气图分析并作出全国天气预报。其中有两年的夏天，他还随船出海提供天气预报。

1926 年是罗斯贝学术生涯的一个重要转折点。这一年他获得了一个基金会的资助，前往美国天气局进行访问研究。而此时大西洋彼岸的美国，气象预报仍然是世袭 19 世纪简单的外推方法，新的理论和方法几乎无人知晓，美国较为发达的地面和高空观测网资料的真正价值没有在预报服务中体现出来。罗斯贝尽管受到同事的怀疑，仍然立

志要赴美传播和发展新的天气预报理论和实践。然而，来自美方的阻力在他动身前就已经感觉到了。他赴美的项目申请虽然是 90 个预选项目中被批准的 6 项之一，但项目的名称却由原来的“气旋锋分析在美国的应用研究”被模糊成了“动力气象研究”。罗斯贝来到美国气象局之后，果然感到了身怀绝技却几乎没有在天气预报第一线施展的可能。幸运的是，他在气象局他遇见了当时负责美国海军气象服务的赖克尔德弗 (Reichelderfer)。这位后来在 1938 年出任美国天气局局长并任职长达 25 年，比罗斯贝大 3 岁的学者，是美国极少数从一开始就关注挪威气团分析理论发展的气象学家之一。两位一见如故的年轻人除了开始频繁地讨论有关的理论问题，还达成了共识，即要使新的理论在美国气象部门成为主流，还要从大学气象基础教育开始。于是在赖克尔德弗通过安排海军预报员在对天气预报很感兴趣的麻省理工学院 (MIT) 航空系培训，帮助罗斯贝在 1928 年在 MIT 创办了美国第一个大学气象系 (最开始属于航空系，之后独立成为气象系)，罗斯贝也成为第一位气象专业的大学副教授和教授。

2) 现代天气预报理念从 MIT 气象系向全美国传播

罗斯贝 1928 年在 MIT 主持的美国第一个大学水平的气象项目，同时创立了美国第一个现代气象学意义上的大学气象系。事实

证明，这一当时并不显赫的事件，正是由于涉及了教育和人才培养，所以它既是美国大学气象教育的开端，又是美国气象科学研究的转折点，对美国和世界气象界来讲，都具有不可替代的重要意义。与天气局不同，在 MIT 的教学活动中，明确地将气旋理论的研究和拓展作为气象专业的主要内容。大学里良好的学术氛围，加上罗斯贝力邀的几位观点一致的美国同事的共同努力，使 MIT 气象系很快人才辈出。

在 20 世纪 20-30 年代，在美国推广原创于西北欧州的气旋理论并应用于天气预报实践，是需要参与者坚定的信念的。早期进入 MIT 与罗斯贝合作的威利特 (H C Willett) 和拜尔斯 (H R Byers) 的经历就很有代表性。威利特是罗斯贝刚到美国天气局时认识的一个很不起眼的年轻人，罗斯贝认为他很有发展潜力就鼓励他到普林斯顿大学学习物理和数学，并着眼于预报问题的研究。他还安排威利特到 Bergen 学校进修，系统学习新的天气预报理论。当罗斯贝在 MIT 邀请威利特加盟时，后者遭到了对气旋理论不屑一顾，当时任天气局局长的 Marvin 的坚决反对，并威胁道一旦离开就没有可能再回来。威利特怀着对罗斯贝个人的信任和对新预报理论的追求，毅然离开天气局，降薪到 MIT 做助理教授 (后来成为 MIT 的名誉教授)。拜尔斯在西海岸的航空气象部门工作，他是在做研究生论文时应邀来到 MIT 和罗

斯贝合作，拜尔斯也因此先于天气局在美国航空气象部门的天气预报中引入了锋和气团分析方法。拜尔斯毕业后来到天气局当预报员，由于新的天气分析方法受到排挤，他带领的分析预报小组只能远离主流预报人员，躲在预报中心大楼的角落里开展工作。虽然拜尔斯后来没有再和罗斯贝共同在 MIT 工作过，但当罗斯贝在 MIT 工作 11 年后再一次在芝加哥大学创建又一个气象系时，拜尔斯成为罗斯贝最得力的助手和合作者。

威利特和拜尔斯的故事，已经不属于一般教育的内容，但却是最成功的教育典范。事情本身也说明了应用科学的教育，除了知识和方法之外，理念的培养和坚定信念作研究和应用，具有更重要的意义。

罗斯贝在 MIT 工作了 11 年，他在传播气团理论等现代天气预报方法和手段的同时，还在 MIT 带领同事们开展了气团热力学研究，首先发现大气热力学中一些物理量具有守恒性质，并最早提出利用位势温度和比湿等物理量定义气团，追踪气团的运动，进而对锋面和气旋等天气现象进行更为量化的诊断和描述。这些大气中具有守恒性质的准物质面还被作为空间坐标的代替量应用于数值预报模式。此外，罗斯贝还在 MIT 开展了大气和海洋中的湍流研究，第一次在气象学中引入了混合长、粗糙度参数、卡曼常数等概念，并将这些概念扩展到海洋。罗斯贝在开展教学的同时，进行的高水平前沿性

研究，大大丰富了当时还很单薄的大气科学理论，也是气象教学活动具有更大的吸引力。罗斯贝和他的很多学生和同事在 MIT 被学生公认为是高效率的教师，其研究和教学团队受到了普遍的欢迎。从 1934 年开始到二战前的 1939 年离开任天气局主任助理，罗斯贝一共培养了 6 位博士研究生，使他们成为美国最初的高级气象人才。

3) 美国二战前在 5 所高校成立了完整的气象系

1939 年 9 月，挪威学派的代表人物 J·皮叶克尼斯来到美国参加会议并应邀到一些大学进行学术交流，由于这时德国接管了挪威，滞留在美国的皮叶克尼斯在罗斯贝的积极推荐下，进入加州大学洛杉矶分校 (UCLA)，并以他为主建立了美国第 4 个大学气象系(当时除罗斯贝最早创建的 MIT 气象系外，分别在加州理工大学和纽约大学设有气象系)。和当初在 MIT 的情形类似，UCLA 气象系最早挂靠在物理系，这让我们感到幸运的是，物理系研究生查尼在 1941 年成为 UCLA 助教和气象项目博士生，协助 J·皮叶克尼斯在 UCLA 开展气象教学。

查尼作为助教，开始讲授太阳辐射、流体动力学和天气气象学，后一门课程就是根据地面气压、温度、风和天气现象观测值绘制天气图。满脑子全是数学公式和物理定律的查尼非常不喜欢这门课，可不知为什么，这一在上个世纪四十年代唯一能够使学生熟知大气运动及其行为规律的课程，查尼讲

的惟妙惟肖，获得了师生的一致好评，查尼还因此获得了民间节日“肥美的星期二”之王的称号。这是查尼一生获得的众多奖励的开始，也是唯一不是学术机构而是师生随意评选给予的奖赏，但这个奖励却代表了查尼的人格魅力，也让这位学数学和理论物理出身的学者真正成为了一名具有坚实数理基础的气象大师。1946年，查尼获得了博士学位。随着研究的深入，具有很好的数学和物理理论背景的查尼，他非常推崇罗斯贝的工作，和他建立了频繁的学术交流。

罗斯贝离开 MIT 来到美国天气局工作不久就发现，已有的大学气象系都集中在较为发达的美国东西海岸，而广大的中西部则是一片空白。然而罗斯贝最关心的许多大尺度风暴正是在经过这片土地时发展壮大的。在中西部适当的地方应该再办一个大学气象系为气象部门培养人才的想法很快在罗斯贝的脑子里形成。为了实现这个想法，罗斯贝认为在美国当时的 5 个区域预报中心华盛顿、芝加哥、新奥尔良、丹佛和旧金山中，芝加哥是最佳的选择。于是在 1939 年底天气局扩大在职培训时，罗斯贝先将位于芝加哥的区域预报中心也作为一个培训地，拜尔斯欣然前往担任培训中心的助理。这一举措不仅方便了非沿海地区预报员的培训，更大大增强了芝加哥城市的气象氛围。

随后在芝加哥创建第 5 个大学气象系提上了罗斯贝的工作日程，他看中了芝加哥大

学。为了和芝加哥大学取得联系，罗斯贝致信 MIT 校长提出建议，后经多方努力使开始挂靠在芝加哥大学物理系的气象研究所在 1940 年 10 月 1 日正式成立。罗斯贝出任研究所所长，后来在 1943 年转为独立的气象系的主任。罗斯贝再次网罗了一批思想先进又很有功力的气象研究人员加盟。

新成立的芝加哥大学气象系的 3 个目标是：1) 促进对地球大气的了解；2) 讲授气象原理；3) 气象职业培训。而新的气象系的起步是从第 3 个目标开始的。气象系成立当年就有 15 位来自天气局和民航的 15 位学员入学，他们每人每年 350 美元的培训费也是气象系的第一笔收入。学员的数量在转年的 1941 年就增加到 36 人，生源单位也扩大到了包括海军和空军的气象部门。罗斯贝是在美国天气局任局长助理时着手创建芝加哥大学气象系的，这也使该系从一开始就和美国的气象业务有着最紧密的联系。而当时其他大学则不然，如 MIT 气象系的学生有 90% 以上进入军方，而加州理工大学气象系与美国工业界联系更多。芝加哥大学气象系的这一独特优势，以及罗斯贝的个人贡献使得战后该中心成为世界上最闻名的气象研究中心，一些人还称之为芝加哥学派。

罗斯贝也成为现代气象教育教师中的典范，他在引领他的 20 多位博士研究生和一部分同事开展气象科学研究时，强调独立性与他的课堂教学风格如出一辙，并且因为

研究生学习应具有更多的创新性而有过之。这至少在当时对罗斯贝担任博士生导师的方法出现毁誉参半的评价。罗斯贝作博士生导师遵循的原则中，引来最多非议的是他鼓励学生结合自己的优势作论文选题，罗斯贝作为导师从不建议，更不会代为确定研究题目。这种做法，当时在美国大学里还是很另类的，至少在芝加哥大学只有气象系的罗斯贝如此。虽然罗斯贝的这种做法即使在今天也是一个见仁见智的问题，但能在罗斯贝名下完成博士学业的学生肯定在以后的研究中具有更强的自信心和独立开展工作的优势。这些学生，包括曾经抱怨过罗斯贝这一做法的学生都承认，虽然在他们博士研究后期导师给予的帮助较少，甚至很难见到每天繁忙无比的先生，但在开始着手论文准备时，罗斯贝对他们全方位气象学理论和实际研究能力的培养是最成功和投入了最多的时间和精力。尤其是他们从导师身上感觉到的对气象研究的热情，具有无限的感召力。

“空谈不如实验”这句常挂在嘴边的口头禅也是罗斯贝作为导师的行为准则之一。罗斯贝在学生们完成了基础课学习后，很少在办公室里单独辅导他们开始论文的准备，而是和他们一起在每天的天气图前展开讨论。这种讨论每天下午4时准时开始，有时会一直持续到很晚。天气图前的讨论是热烈的，有时会让人无法分清谁是教师谁是学生。平等的气氛，学生们会很快切身感觉到的实际天

气演变结果，很多都包含在导师看似不经意的一句提醒中，而这几句精辟的话往往反映了大气运动最基本规律的真知灼见，会让所有的同学思路大开。这个时候往往博士论文的选题已经不再是负担，满腔热情和全身心地投入下一步的研究中去，已经成为他们自然而然的选择。另外，在讨论中学生们看似幼稚的问题也帮助罗斯贝完成了一篇又一篇重要的研究论文。罗斯贝作为一位令人仰慕的学者，他的迷人之处就在于能让每一个和他有过接触的人都受到深刻和持久的激励。二战期间罗斯贝在芝加哥大学培训的学员中在战后有更高比例的人继续从事气象工作就是这种激励的结果。没有按照正规的程序当过他的学生却被认为是罗斯贝最著名学生的查尼，在1957年罗斯贝不幸去世时说道：“没有了罗斯贝，我的世界也暗淡了”，这句话代表了一代气象工作者的心声。

4 二次大战促进了美国气象教育和研究

1) 美国参与二战，气象培训促进气象教育大发展

在美国即将卷入二次世界大战，总统罗斯福对外号称建立拥有5万架战斗机的强大空军的政治背景下，当时美国气象教育当然的领袖罗斯贝出任大学气象委员会的主席，统管当时设在5所大学里的气象系的气象培

训任务，目标是培养军方需要的气象人员。从 1941 年到 1945 年战争结束，4 年里 5 所大学以每年 2000 人的速度，向战场输送必须的气象人员总计达 8000 人。

这些经过培训的学员在战场上发挥了应有的作用，但战后有 80% 气象专业人员离开了气象领域。但仍然在全美聚集了全球最

多的气象研究和业务专业人才。特别是战后大学气象系迅速发展，到 1958 年已经有 22 所大学成立了气象或大气科学系，其中有 7 所大学能够授予博士学位，另有 4 所大学能够可以选择气象方面的博士学位（表 1）。

表 1 1958 年美国可以授予气象科学学位的大学

学 位	大学名称
气象系可授予博士学位 8 所	
1	加利福尼亚大学洛杉矶分校
2	芝加哥大学
3	佛罗里达州立大学
4	麻省理工学院
5	纽约大学
6	宾夕法尼亚州立大学
7	华盛顿大学
8	威斯康星大学
非气象系可选择授予气象博士学位 4 所	
1	德克萨斯 A & M 学院
2	约翰霍普金斯大学
3	俄勒冈州立大学
4	圣路易斯大学
气象系可授予学士或硕士学位 10 所	
1	亚利桑那大学
2	爱荷华州立大学
3	迈阿密大学
4	密歇根大学
5	明尼苏达大学
6	新墨西哥大学
7	俄克拉荷马 A & M 大学
8	Rutgers 大学
9	德克萨斯大学
10	犹他大学

这时，美国的气象学家得益于气象教育和培训，已经达到了 5000 多人，其中政府机构有约 2500 人，军队中有 2300 多人，另外在企业 and 大学里分别有 350 和 135 人左右。在校气象专业的大学生有 400 多人，空军和海军军校气象专业学生分别有 200 多和近 100 人。此外，军队后备役中，空军和海军分别有大约 1300 和 650 名气象专业人员。这样，在 20 世纪 60 年代，在美国就形成了最为强大的气象科研和业务力量，气象教育和研究的经费，相当大的部分来自军方，因此也较为充足和稳定，60 年代初美国科学基金委员会的成立，更是大大促进了大气基础研究。至此，全球气象研究的中心已经非美国莫属。

2) 普林斯顿大学数值天气预报项目——将美国高校推向气象科技发展最前沿

1946 年 8 月 29 - 30 日，当罗斯贝协助美籍匈牙利数学和气象学家冯·诺依曼在普林斯顿大学高级研究院召开具有历史意义的讨论数值天气预报的“气象会议”时，特意安排了查尼一同前往。这次被认为是世界上第一次数值天气预报学术会议能够在普林斯顿大学，完全因为在那里正在研制世界上第一台电子计算机。而促成二者相结合的是冯·诺依曼博士。

1933 年，33 岁的冯·诺依曼博士成为普林斯顿大学高级研究院聘任的 6 位教授中最年轻的一位。1937 年，他加入了美国国籍，

同时因为在数理逻辑和量子力学方面突出的研究工作，他成为美国科学院院士。从 1933 年开始，他将自己的研究领域逐渐从纯数学向应用数学转变，开始在脑子里酝酿研制计算机计划。1937 年，他开始与美国海军弹道研究实验室合作，针对弹道的研究面临很多计算问题，他要通过计算机代替人类完成科学计算的任务。而当时，更多的数学家沉溺于数学方程完整解的研究，对数学计算很是轻视，认为计算机不过是更大更快的计算器而已。冯·诺依曼却越来越清晰地认识到，计算机高速和准确的计算能力不但会给数学家，还会给自然科学各学科带来意想不到的结果和突破。

1944 年，冯·诺依曼正式成为美国第一台通用电子计算机 ENIAC(电子数字积分器和计算器)研制项目的顾问。1945 年末，他成功地说服了高级研究院主任和理事会，在名义上和财政上(拨款 10 万美元，而当时的美国无线电公司也仅值 10 万美元)支持 ENIAC 项目。他很早就认为数值天气预报是计算机在数学应用领域面临的最重要的挑战之一。1946 年 5 月，他向美国海军建议在项目内成立气象组，同样期待着更为准确的天气预报的美国海军非常明智和快速地支持了他的建议，从 1946 年 7 月开始支持和 ENIAC 项目捆绑的数值天气预报计划。于是，他就与包括罗斯贝、查尼等一批美国当时最有思想的气象学家走到了一起，并且取

得了具有划时代意义的成果。

在 1946 年 8 月的那次会议之后的几年里，他的周围总是聚集着许多最优秀的气象学家和电子工程师，他们的目标只有一个：用刚刚诞生的数字电子计算机做出准确的天气预报。这个目标终于在 1950 年 4 月初实现。在以 1949 年 1 月 31 日观测纪录为初值，进行欧洲地区 24 小时数值预报的试验中，数值预报首获成功。计算机输出的结果将位于欧洲西部的风向转换和反映大气斜压特征的低槽延伸现象都正确地进行了预报。

为首次数值天气预报作出巨大贡献的还有在 1946 年 8 月那次会议时刚刚获的学位的查尼，他与出席会议的资深学者相比很不显眼，但后来发生的情况表明，罗斯贝邀请这样一位年轻学者参加会议，是有战略意义的。1947 年查尼用一年多的时间赴当时气象研究最先进的斯堪的纳维亚国家访问工作，进一步吸收欧洲学者的最新气象学理论和实践方法之后回到美国后，1948 年初，冯·诺依曼邀请查尼负责美国第一台电子计算机 ENIAC 项目中的气象小组的工作。查尼到任后，及时邀请了来自挪威的 Eliassen 和 Fjørtoft 等既有很好的数理基础，又熟知大气运动规律的一流气象学家加入气象小组的工作，替换了小组中原来仅仅在理论上造诣较高的研究人员。由于 ENIAC 项目是美国军方工程，警戒工作严格，三年里查尼

和他的同伴吃住在办公室和机房里，艰苦攻关，终于在 1950 年 4 月在世界上第一台电子计算机 ENIAC 上输出了第一次成功的数值天气预报的结果。查尼在这次有历史意义的科技创新活动中，没有走他的前辈理查逊的老路，用大气运动的原始方程进行天气预报，而是抓住大尺度大气运动的关键，根据他自己创建的准地转理论，建立了准地转预报方程，特别是用准地转涡度方程演绎大气大尺度运动过程，进而进行 24 小时预报。查尼很好地解决了有限的计算能力和 24 小时预报需要考虑的区域范围的矛盾。查尼领导的气象小组在成功地进行了准地转预报数值试验后，又开始进行非线性预报试验。由于 ENIAC 计算机不稳定，小组成员不得不整天守候在计算机旁，应付随时可能出现的计算机故障。试验又取得了预期的结果。查尼总结几次数值试验，写出了一系列最早的数值天气预报研究论文，很快在罗斯贝创刊并主编的 *Tellus* 等杂志上发表，赢得了全世界气象和相关领域科学家的尊敬，带动了数值天气预报研究在世界各地开展。查尼曾选择了 5 篇有代表性的论文，寄送给远在美国的理查逊，这位年事已高，曾在 25 年前完全靠手工计算尝试进行同样的工作的学者在回函中，热切肯定了查尼的工作，他认为，（气象小组的）一系列工作尽管还有一些局限，但较自己 1922 年的结果已经有了巨大的科学进步。

查尼和普林斯顿大学高级研究院在上个世纪中期,通过气象小组展开的工作,以数值天气预报为契机,创造了气象科学史上少有的辉煌,也是气象与计算机技术突破相融合取得重要科学进展的范例,为以后的交叉研究提供了样例。另外,查尼的气象小组最鼎盛时,也仅仅有5个固定气象学者和若干程序员,但小组始终保持一支稳定的来自美国国内和全球各地的短期访问者队伍。这些访问者,大多是根据研究的进程需要应查尼的邀请参加部分或阶段性工作,还有一些是慕名前来。小组通过这样的方式,使得科技创新工作在全方位得交流中始终充满活力。

3) 计算模拟带动气象探测

ENIAC项目结束后,查尼认识到,随着计算机技术的不断发展,气象科学的进一步突破必须借助于大规模的大气科学实验。1956年在完成与普林斯顿大学高级研究院5年的工作合同后,查尼来到MIT,主持该系的数值天气预报研究。在MIT,查尼发起隔星期五下午进行非正式的地球物理流体动力学学术讨论会,这项坚持了长达22年的学术活动,营造了平等、宽松的学术氛围,唤起了难以计数的参加者的学术创造力。参加讨论会的人员开始限于气象系内部,也逐渐从扩大到MIT相关系的师生以及周边大学和科研机构感兴趣的研究人员。会议不少持续讨论的主题,也转化为美国气象学会定

期专门学术会议,大大促进了美国气象科学研究。

1957年11月,身为美国科学院气象委员会顾问的查尼在一篇报告中指出,必须认真对待的卫星、机载观测和雷达三个要素将给气象发展带来的新变化,以及必须用计算机来消化越来越多的气象观测数据。查尼的报告为后来GARP(全球大气研究计划)的实施进行了很好的科学和舆论铺垫。查尼在1966-71年出任GARP的负责人,他还在50年代末积极促成了UCAR(美国大学大气研究协会)的成立。70年代,查尼对大尺度准地转运动谱,阻塞动力学等多个天气、气候领域开展研究。由于查尼一直在大学里工作,他从来没有长时间离开过教学,被大气科学专业内和许多其他专业的学生视为难得的良师。也许是自身的经历使然,查尼在教学中特别注意吸引其他学科背景的学生参与气象研究,同时也对气象科学与其他学科的融合给予关注。他来到MIT后,感到气象系的图书馆仅有大气科学类书刊无法适应学科的发展。他自己出资建立了“查尼阅读室”,准备了大量气象相关学科的资料,有效地拓展了系内师生的眼界。

5 结 语

在整个20世纪,气象科学不仅获得了突飞猛进的大发展,而且孕育了在国际科技

界都令人敬仰的气象大师，这是尤其让气象学者感到骄傲和自豪的。应该说，学科的发展离不开大师的出现，而大师之所以能够成为大师，必须借助于学科的进步才能被认可，二者是相互依存的关系。在 20 世纪国际气象界的大师主要出现在欧美国家，这和欧美国家 20 世纪科技发展的背景有紧密联系，是全球现代科技大发展的组成部分。

然而，从 20 世纪气象科学发展的中心从欧洲向美国的转移以及气象科学与传感器探测、通信技术，尤其是计算机技术的快速融合来看，以美国的大学为代表的现代高等教育机构，能够提供特别适宜气象科学发展的环境，一些专注于需求、同时能够捕捉到最新科技发展动向的气象学家，通过教育组成团队为气象科学的进步作出的实际的贡献。因此，教育和学科进步的紧密联系，对 20 世纪的气象科学表现得特别突出。

欧美国家 20 世纪气象科学教育实际上是国际化的，这不仅表现在气象大师频繁的跨大陆的流动和交流，也表现在教育的对象和受益的国家上。例如，罗斯贝在为美国气象教育作出巨大贡献的过程中，还有一段中国情结。他的两位来自中国的博士生叶笃正（1948 年）和谢义炳（1949 年）成为了中国现代气象事业的开创者。他们的博士研究论文的题目分别是“论大气中的能量耗散”和“美国冷涡旋个例研究”，均为当时最前沿的研究课题。早就成为了中国气象科学领

头人的叶笃正和谢义炳，对成就了他们的事业的美国气象教育和他们的导师罗斯贝，始终怀有无限的感怀之情。1991 年，谢义炳先生在写给友人的信中谈到罗斯贝对他一生事业的影响：“1940 年我在 MIT 读大学的最后一年阅读了罗斯贝的系列论文。虽然还不能完全明白，但知道能到他手下工作仍然感到很兴奋。1946 年 9 月，我来到芝加哥大学做罗斯贝的博士生，他给我的印象是，罗斯贝不仅是一位科学家，还是一位伟大的教师和哲学家。我们经常一起到密歇根湖游泳，在沿路的小饭店里用餐。这让我有机会和他深谈，理解他的哲学并落实到我的研究中。离开罗斯贝后的 40 年教学和科学研究中，我主要是按照罗斯贝和帕尔门既定的路线走的”。

深入阅读

- Allen, Douglass R(2001): The genesis of meteorology at the university of Chicago, Bulletin of American Meteorological Society, 82(9):1905-1909
- Bates C C(1989): The formative Rossby-Reichelderfer Period in American Meteorology, 1926-40, Weather and Forecasting, 4, 593-603
- Bolin, B.(1999): Carl-Gustaf Rossby: The Stockholm period 1947-1957, Tellus, 51A-B(1),4-12

- Byers H R(1976): The founding of the Institute of Meteorology at the University of Chicago, Bulletin of American Meteorological Society, 57,1343-1345
- Byers,H.R.(1958): Bulletin of American Meteorological Society, 1958; 39(2):98-100
- Dalmedico, A. D.(2001): Arch Hist Exact Sci, 2001; 55(3):395-422
- Gall,R(2000): The influence of Carl-Gustaf Rossby on mesoscale weather prediction and an outlook for the future, Bulletin of American Meteorological Society, 81(7): 1507-1523
- Lewis,J.M.(1992): Carl-Gustaf Rossby:A Study in Mentorship, Bulletin of American Meteorological Society, 73(9):1425-1438
- Lewis J M(1996): C.-G. Rossby: Geostrophic Adjustment as an Outgrowth of Modeling the Gulf Stream, Bulletin of American Meteorological Society, 77,2711-2728
- Marvin,C.F.(2001): C.-G. Rossby's Experience and Interest in Weather Forecasting, Bulletin of American Meteorological Society, 2001, 82:2021-2026
- Mazuzan G T(1988): Up, Up, and Away: The reinvigoration of meteorology in the United States: 1958 to 1962, Bulletin of American Meteorological Society, 69:1152-1163
- Nebeker,F (1995): Calculating the Weather, Meteorology in the 20th Century, Academy Press,1995,1-255
- National Research Council(1958): Resaerch and Education in Meteorology: An Interim Report of the Committee on Meteorology to the National Academy of Sciences, Bulletin of American Meteorological Society, 39(6):293-315
- Palmer T N(1998): Nonlinear Dynamics and Climate Change: Rossby's Legacy, Bulletin of American Meteorological Society, 79:1411-1423
- Phillips,N.A.(1998): Carl-Gustaf Rossby: His times, Personality, and Actions, Bulletin of American Meteorological Society, 79(6):1097-1112
- Rossby,C-G.(1926): On the solution of problems of atmospheric motion by means of model experiments, Monthly Weather Review, 54(6):237-240
- Rossby,C -G.(1927): The theory of atmosphere turbulence-An historical resume and an outlook, Monthly Weather Review, 55(1):1-5
- Thompson P(1987): The maturing of the science, Bull Ame Met Soc, 68(6):631-637.