

# 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

叶鑫欣<sup>1</sup> 焦艳<sup>2</sup> 傅刚<sup>3</sup>

(1 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 气候与海气实验室, 北京 100871;  
2 国家海洋局北海预报中心, 青岛 266061; 3 中国海洋大学海洋气象系, 青岛 266100)

**摘要:** 气象学的挪威学派 (Norwegian School, 又称卑尔根学派 (Bergen School of Meteorology)) 由挪威气象学家 V.皮叶克尼斯 (Vilhelm Bjerknes) 创立, 在20世纪大气科学发展中贡献卓著, 他们创立的极锋理论和锋面气旋模型对现代气象学影响深远。本文以挪威学派为线索, 系统介绍了该学派的创立始末、发展历程和主要学术成就, 分别对挪威学派三位重要气象学家 J.皮叶克尼斯 (Jacob Bjerknes)、H.索尔伯格 (Halvor Solberg) 及 T.贝吉龙 (Tor Bergeron) 的生平经历、研究工作和重要研究成果的形成过程进行了回顾, 包括锋面气旋模型和极锋理论、索尔伯格的惯性波研究、贝吉龙冷云降水过程等, 并对其贡献进行了总结。

**关键词:** 挪威学派, 天气学, 降水物理学

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.004

## On the Researches and Life Experiences of Bergen School Scientists: Jacob Bjerknes, Halvor Solberg and Tor Bergeron

Ye Xinxin<sup>1</sup>, Jiao Yan<sup>2</sup>, Fu Gang<sup>3</sup>

(1 Laboratory of Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871 2 North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061 3 Department of Marine Meteorology, Ocean University of China, Qingdao 266100)

**Abstract:** The Bergen School of meteorology, founded by the Norwegian meteorologist Vilhelm Bjerknes, has played a significant role in the development of modern atmospheric sciences. They put forward several important theories including the polar front theory and the frontal cyclone model, which influenced modern meteorology profoundly. In this paper, the foundation of the Bergen School and the chief academic achievements were reviewed. The life and research experiences of three significant members: Jacob Bjerknes, Halvor Solberg and Tor Bergeron were introduced. We focus on the development process of their theories, including the front-cyclone concept, polar front theory, Solberg's work on inertial wave and Bergeron's dedication to the development of cold-cloud precipitation theory. The contributions of these three greatest meteorologists are also discussed.

**Keywords:** Bergen School of meteorology, synoptic meteorology, precipitation physics

### 1 引言

大气科学的发展与人类社会的发展、科学技术的进步和日益增长的社会需求密不可分。自人类文明开始至16世纪, 人们通过观察和记录积累了丰富的气象经验知识。中国古代关于气象经验的记载主要包括大气光象、云雾降水、风雷温湿、物候气候和天气谚语

等, 可以追溯到中国公元前14世纪的殷代<sup>[1]</sup>。在古希腊、古埃及和古巴比伦, 对大气现象的探究同样历史悠久<sup>[2]</sup>, 例如, 古希腊阿那克西曼德 (公元前610—前546年) 在一篇关于自然哲学的文章中提出“风是空气的流动”; 亚里士多德所著的《气象》 (*De Meteorologica*, 公元前340年)<sup>[3]</sup>是最早的气象学专著, 并被认为是气象学成为一门独立科学的开端<sup>[2]</sup>。大气科学的飞跃发展, 得益于近几百年间物理、数学方法和观测手段的进步。14—17世纪航海事业的兴起、天文学和物理学的突破性进展, 以及气象要素测量仪器的陆续发明、气象观测站网的逐步建立, 成为

收稿日期: 2013年9月11日; 修回日期: 2014年4月1日  
第一作者: 叶鑫欣 (1987—), Email: xxin.ye@gmail.com  
通信作者: 傅刚, Email: fugang@ouc.edu.cn  
资助信息: 国家自然科学基金 (41275049)

人们定量描述大气现象、研究大气运动规律的基础。从19世纪20年代第一张天气图的出现，直至20世纪40年代末，大气科学的主要分支学科：天气学、动力气象学、气候学以及云和降水物理学等相继形成<sup>[1]</sup>。

诞生于1917年的挪威气象学派（或称卑尔根学派），在天气学理论及现代天气预报业务实践方面均贡献卓著。由挪威气象学家V.皮叶克尼斯（Vilhelm Bjerknes）创立并领导的这支团队，吸纳并培养了J.皮叶克尼斯（Jacob Bjerknes）、T.贝吉龙（Tor Bergeron）、H.索尔伯格（Halvor Solberg）、C.G. 罗斯贝（Carl-Gustav Rossby）等著名气象学家，他们提出的极锋理论、气团学说及锋面气旋模型成为天气分析的基础。随着挪威学派理论和方法的传播，气象学逐渐成为一门独立学科并蓬勃发展。不仅如此，V.皮叶克尼斯和他的门生们在各自的学术领域中亦有独到建树，例如1904年V.皮叶克尼斯就已提出用流体动力学和热力学方程描述大气运动的构想，成为数值天气预报的发端<sup>[4]</sup>，并提出大气环流图像<sup>[5]</sup>；罗斯贝在美国创立芝加哥学派（Chicago School），门生包括Stommel、Charney等，师徒一起为物理海洋学、现代气象学和大气动力学的发展奠定了基础。V.皮叶克尼斯环流定理、罗斯贝大气长波理论、贝吉龙的冷云降水理论、ENSO理论等都出自挪威学派气象学家。

在近现代大气科学的发展历程中，卑尔根气象学派无疑发挥了重要作用<sup>[6-8]</sup>。贾朋群<sup>[9]</sup>总结了20世纪初欧洲和美国的气象事业和教育发展，对V.皮叶克尼斯创立挪威学派的情况和团队研究成果做了简要论述；Namias<sup>[10]</sup>介绍了挪威学派对天气学在美国发展的早期影响；Friedman<sup>[11]</sup>评述了挪威学派的主要成就。挪威学派气象学家的生平历程和研究工作也引起前人的关注，例如Devik等<sup>[12]</sup>、Eliassen<sup>[13]</sup>为V.皮叶克尼斯撰写了传记，并简述了他所培养的几位学生在卑尔根时的学习和研究情况；Wurtele<sup>[14]</sup>整理出版了J.皮叶克尼斯的完整著作；Eliassen<sup>[15]</sup>介绍了J.皮叶克尼斯的研究经历；Fiolk<sup>[16]</sup>对皮叶克尼斯父子的生平经历和贡献进行了总结。Weickmann<sup>[17]</sup>、Liljequist<sup>[18]</sup>、Schultz和Friedman<sup>[19]</sup>为贝吉龙撰写了传记，Jewell<sup>[20]</sup>主要介绍了他在卑尔根时期的生活，并详细介绍了挪威学派发展初期情况；Schwerdtfeger<sup>[21]</sup>简述了贝吉龙在天气学分析方面的贡献。

本文结合前人对挪威学派气象学家所作记述和有关学术著作，总结挪威学派的发展历程，着重回顾J.皮叶克尼斯、索尔伯格和贝吉龙三位气象学家的生平经历和学术研究工作。作者希望科学先驱者们独到的学术思想和研究经历能够为大气及海洋科学的学习和研究者带来一定的启发和示范。

## 2 挪威学派简介

挪威学派创立于1917年，其创始人和领导者V.皮叶克尼斯（Vilhelm Friman Koren Bjerknes，1862年3月14日—1951年4月9日，图1）是现代天气学、大气动力学和天气预报的奠基人之一<sup>[16]</sup>。他出生于挪威克里斯蒂安尼亚（1624—1925年奥斯陆的旧称），父亲C. A. 皮叶克尼斯（Carl Anton Bjerknes，1825—1903年）



图1 V.皮叶克尼斯（1862—1951年）<sup>①</sup>

是克里斯蒂安尼亚大学数学系教授。1888年，V.皮叶克尼斯在获得硕士学位后留学德国波恩大学，担任物理学家赫兹（Heinrich Hertz）的助手；1892年他获得波恩大学博士学位，并被聘任为斯德哥尔摩大学力学和数学物理学教授，之后在奥斯陆大学（1907—1912年）、莱比锡大学（1912—1917年）工作。

一战爆发后，战争局势使德国的科研环境大不如前。V.皮叶克尼斯于1917年回到挪威，应海洋学家Hansen<sup>②</sup>的邀请到卑尔根大学（当时称为卑尔根博物馆）地球物理研究所主持气象学科，这就是挪威学派的雏形。当时跟随他的只有他的儿子J.皮叶克尼斯（Jacob Bjerknes，1897—1975年）和学生H.索尔伯格（1895—1974年）。基于军事气象和农业生产需要，他们将研究重点放在天气预报上，顺利获得政府资助，从而在挪威境内布设了完善的观测站网。1918年11月，J.皮叶克尼斯和索尔伯格在搜集观测数据的过程中结识了四名瑞典学生<sup>③</sup>，其中包括T.贝吉龙（1891—1977年）和C. G. 罗斯贝（1898—1957年），他们随即投入V.皮叶克尼斯门下，挪威学派初见雏形。V.皮叶克尼斯曾在给友人的信中写到：

① 参见[http://www.history.noaa.gov/stories\\_tales/bjerknes.html](http://www.history.noaa.gov/stories_tales/bjerknes.html)。

② Bjorn Helland-Hansen（1877—1957年），挪威近代海洋学家，他对海洋的物理结构和动力学特性进行了研究，是将海洋学从以描述性为主的科学转变为以物理化学原理为基础的科学先驱。

③ 当时挪威科研人员薪酬较高，由于气象学作为一门科学尚未被广泛接受，很少人会选择从事该领域，但在瑞典的情况恰恰相反，故他们选择到瑞典招募有气象方面兴趣的青年才俊。

*“To work on the material which Jack and Solberg have collected from the three Scandinavian countries five young men will now gather here during the coming year. I have every reason to believe that several of them are talented - one of them, Bergeron, you know already. So we shall have a living scientific milieu here too.”*

除了上述几位主要科学家，V.皮叶克尼斯在卑尔根期间也培养了众多气象人才。多年之后（1926年）他回到母校奥斯陆大学担任应用力学和数学物理学教授，继续从事教学工作。1946年卑尔根博物馆更名为卑尔根大学（The University of Bergen），如今已成为挪威第二大综合性大学。由卑尔根大学和南森海洋研究所等机构联合成立的皮叶克尼斯气候研究所（The Bjerknes Centre for Climate Research, BCCR）是北欧最大的气候研究中心和欧洲大气科学研究的核心机构之一<sup>①</sup>。

在挪威学派的主要科学家中，V.皮叶克尼斯和索尔伯格较为侧重理论研究，J.皮叶克尼斯和贝吉龙则侧重于天气学分析（图2）。他们建立的锋面气旋模型<sup>[22-23]</sup>是中纬度天气尺度气旋发展和演变的重要概念模型，索尔伯格提出极锋、气旋族的概念，以及极锋波动发展为气旋的过程，完善了整个理论；贝吉龙提出气旋锢囚理论，使锋面气旋的生命史更加完整<sup>[13]</sup>。20世纪20年代，气团、极锋学说、锋面气旋模型被称为“极锋气象学”。锋面气旋和极锋学说是卑尔根大学气象系得名“学派”的主要原因之一。与此同时他们的学术著作极大促进了气象学的发展<sup>[24-25]</sup>，其中以*Physikalische Hydrodynamik*（《物理和流体力学》）<sup>[26]</sup>一书最为突出。

### 3 J.皮叶克尼斯的生平和研究工作

J.皮叶克尼斯（Jacob Aall Bonnevie Bjerknes，1897年11月2日—1975年7月7日，图3）是挪威学派的



图2 挪威学派工作和生活地点卑尔根市大街33号冬景<sup>[20]</sup>

的学术繁荣时期的代表人物，在锋面气旋模型的建立方面有重要贡献。J.皮叶克尼斯出生于瑞典斯德哥尔摩，1907年跟随父亲V.皮叶克尼斯前往挪威，并在克里斯蒂安尼亚大学和奥斯陆大学学习，在此期间对流体学理论应用于大气运动和天气预报问题产生兴趣。1914—1917年他曾专心帮助父亲在莱比锡和卑尔根的研究工作<sup>[15]</sup>，协助了气象观测站网建设，这也是挪威学派创立过程中的重要一环。J.皮叶克尼斯在1918年夏季加入了由V.皮叶克尼斯和T.海塞尔伯格（T. Hesselberg）主持实施的挪威天气预报项目，保障了各地农业生产。当时，J.皮叶克尼斯和索尔伯格分别负责卑尔根、克里斯蒂安尼亚两座城市的天气预报工作。

1924年J.皮叶克尼斯获得奥斯陆大学博士学位。1931年他受聘于卑尔根博物馆的气象系，在锋面气旋方面的研究得到了国际气象界的广泛关注<sup>[13]</sup>。1939年7月，他携家人在美国进行为期八个月的学术交流，其中包括加利福尼亚大学洛杉矶分校（The University of California, Los Angeles, 简称UCLA）物理系的气象学和天气预报研究室。1939年9月第二次世界大战爆发后挪威遭受德国入侵，鉴于战事，J.皮叶克尼斯在罗斯贝的推荐下到UCLA工作，并定居美国。1940年，J.皮叶克尼斯成为UCLA的气象学教授并主管气象学事务，UCLA气象系在他的推动下于1945年正式成立<sup>②</sup>。1946年J.皮叶克尼斯加入美国国籍。

二战结束后，J.皮叶克尼斯着重对平均大气环流进行了研究。20世纪50年代末，他投入到大西洋和热带太平洋海气相互作用领域，这方面内容在文献[27]中已有总结。J.皮叶克尼斯活跃在大气科学领域长达55年之久，曾先后获得美国地球物理联合会（AGU）威廉鲍伊奖，美国气象学会罗斯贝奖（1960）、国家科学奖（1966）等。在挪威学派发展期间，J.皮叶克尼

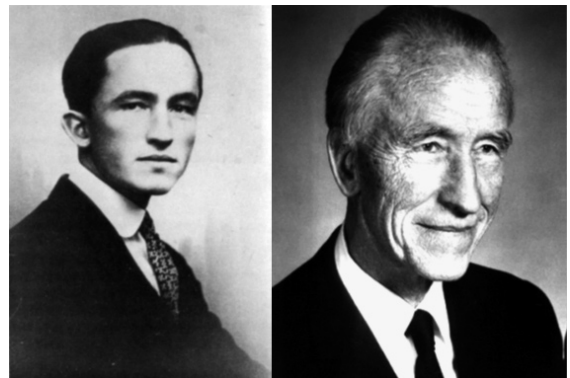


图3 J.皮叶克尼斯（1897—1975年）<sup>[16, 20]</sup>

① 参见<http://www.uib.no/bjerknes/en>和<http://www.bjerknes.uib.no/>。

② 美国第四个开设的大学气象系，前三个为罗斯贝最早创建的麻省理工学院（MIT）气象系、加州理工学院和纽约大学气象系。

斯的主要学术贡献包括锋面气旋模型、锋面气旋结构分析等，后期延伸到大气波动等问题，下面将分别介绍。

### 3.1 锋面气旋模型

在卑尔根工作期间，J.皮叶克尼斯主要关注大气运动的理论研究。在1918年2月刚刚开始天气预报工作时，V.皮叶克尼斯就希望从天气图资料的分析中得出理论解释，从而提高预报水平。丰富的数据和持续的日常分析，为锋面气旋模型的提出和修正奠定了基础。尽管当时信息共享程度不高，法国、英国及大西洋洋面上的观测数据无法利用，J.皮叶克尼斯仍观察到他曾在莱比锡研究过的辐合线<sup>[13]</sup>，定义出大气波动发展过程中的两类主要结构，并将其称为“转向线”（steering-line）和“飑线”（squall-line），指出它们可能与高低压系统形成，以及极地和热带的空气交换有关<sup>[22]</sup>，也就是后来的“暖锋”和“冷锋”<sup>[28]</sup>。

经过数月对欧洲区域天气图的分析，J.皮叶克尼斯在《移动性气旋的结构》<sup>[22]</sup>一文中提出了对锋面气旋结构的革命性认识。文章分析了气旋模型的典型流场和“转向线”、“飑线”空间界面（图4），包含气旋区云系和降水区分布特征（图5）。暖空气沿倾斜的锋面抬升并产生云带和降水区、冷空气下沉并沿地面扩散，位能由于垂直运动而减小，这不仅可以解释气旋形成时的动能来源（与Margules 1903年发表的理论具有一致性），还能够说明气旋为什么总生成于大气不连续面附近及其移动路径规律。文中还提到，气旋中的冷锋可以作为新气旋的暖锋进而形成“气旋串”，成为近极地和热带空气的交换媒介。概念模型中最重要的要素“转向线”和“飑线”在1919年末被更名为“暖锋”和“冷锋”，因为相抗衡的两个气团与一战两军交锋的情形十分相似。Gold<sup>[29]</sup>称该文章为“天气学文献中最引人注目的作品”（the most remarkable eight pages in the literature of synoptic

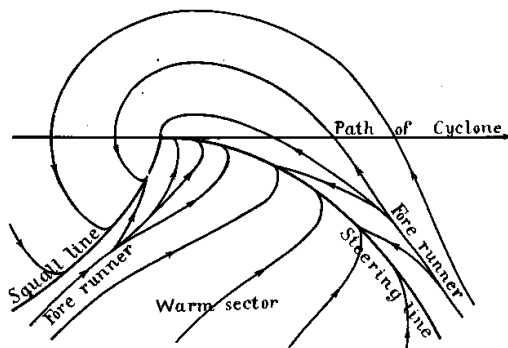


图4 移动性气旋的流线分布<sup>[22]</sup>

① 引自贝吉龙1919年7月20日寄给Gunnar Rising的信。

meteorology)，贝吉龙也曾在给瑞典友人的信中曾称赞道：

“The facts of the matter are that last autumn (in 1918) the institute here took up the problem of local showers with the result that it has been possible to penetrate some of their secrets, something which previously had defied the wits of meteorologists. It turns out that when one properly divides up the problem also these occurrences follow the laws of nature. The honor for this belongs to the young Bjerknes<sup>①</sup>.”

1919—1922年，J.皮叶克尼斯、索尔伯格及贝吉龙逐渐掌握了更多观测事实，并针对锋面气旋模型及其垂直结构进行了专门研究，进一步揭示了对流层低层大气不连续面（锋面）结构和气旋形成过程。J.皮叶克尼斯和索尔伯格<sup>[28]</sup>论述了降水形成条件，根据斯堪的纳维亚半岛的降水资料指出空气上升冷却凝结是形成降水的关键因素，而能够成雨的上升区多出现在地面气流辐合带、切变线附近且通常出现在冷暖空气交汇处，“冷锋”和“暖锋”的定义首次明确出现。文中共讨论了四类降水及成因，包括与气旋有关

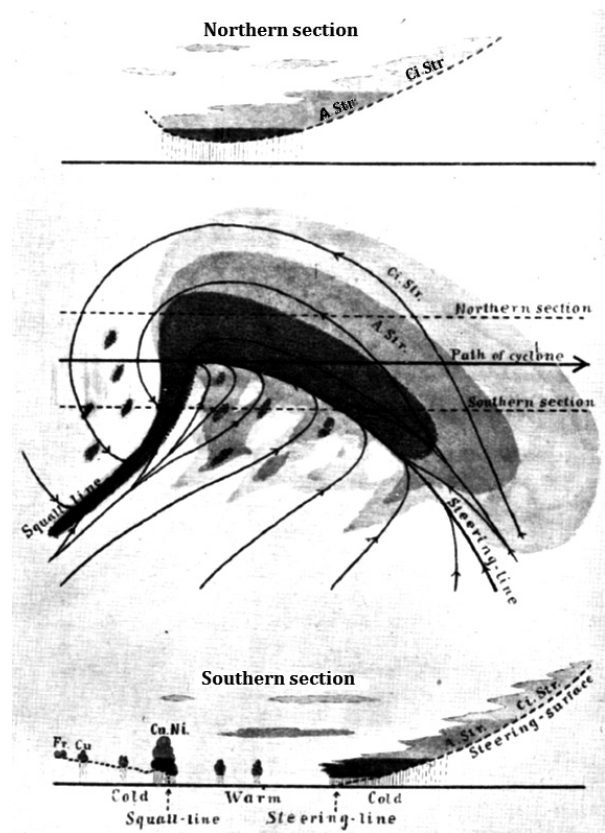


图5 J.皮叶克尼斯的首个气旋模型，包括流线、云系、降水和垂直剖面<sup>[22]</sup>

的锋面降水、地面辐射增温造成的不稳定降水、低层空气接触冷的下垫面降温导致的“雾状雨”或“毛毛雨”，以及山地上升气流导致的地形降水，并结合锋面气旋云系和降水特征建立了理想气旋模型（图6）。

根据天气图分析，索尔伯格确定了“极锋”和锋上波动结构的存在并观察到“气旋族”的踪迹，贝吉龙则发现了气旋发展的另一过程，即由他命名的“锢囚”过程，这部分会在后文详细涉及。尽管如此，气旋发展各阶段的主要特征在J.皮叶克尼斯1919年的文章<sup>[22]</sup>中都已提到。至此，挪威学派完整提出了四维锋面气旋模型<sup>[23]</sup>，即以温带移动性气旋理想模型（图6）为基础，包含初生、发展、锢囚各阶段生命周期（图7）。他们认为，气旋形成的关键是冷暖气团同时存在并维持性质差异，暖空气被冷空气抬升并在地转作用下导致气旋形成，冷空气逐渐占据涡旋系统，当其变为冷性涡旋时能量迅速消耗，气旋填塞消亡。由于欧洲大陆所见的气旋大多处于北大西洋气旋的锢囚阶段，故从统计上看，气旋通常具有冷中心且结构较为对称，但考察气旋的发展阶段不难发现其不对称性。他们提到极地气团和热带气团的概念<sup>[23]</sup>，指出极地空气与热带空气之间存在“极锋”。近极地气流左侧和邻近的热带气流之间存在“气旋族”（图8），即以气旋路径和发展周期划分的“气旋族”。统计得出的欧洲气旋族周期大约为5.5天，与Defant<sup>[30]</sup>得到的降水周期相似。整个中纬度绕极波状环流圈上通常存在约4个气旋族以及中间4个反气旋

（图9），说明地球自转在环流圈形成中起作用，而Defant认为绕极环流是中纬度海陆热力性质不同造成的。事实上两方面因素都存在作用。不足的是，J.皮叶克尼斯和索尔伯格这些细致的概念图大部分仅基于对观测数据的概念化，缺乏具有一定说服力的实际天气个例，气旋的垂直结构是从理论推测所得。同时，该文章在撰写时忽视了对前人工作的探讨，特别是奥地利维也纳学派气象学家的工作<sup>[21]</sup>。尽管如此，锋面气旋和极锋学说仍成为他们的经典理论，挪威学派在天气学方面研究成果的开创性价值及其对天气预报业务的指导作用十分深远。

### 3.2 锋面气旋结构及其动力学成因

1922年J.皮叶克尼斯作为瑞士气象学会特邀顾问来到苏黎世。在瑞士同行的帮助下，他在阿尔卑斯山居住一年并获得了山顶观测数据，从而在垂直达到3000m高度的空间内验证了锋区倾斜面的存在。结合这些数据，J.皮叶克尼斯<sup>[31]</sup>详细分析了一次暖锋过程的锋面结构和附近运动场，证实锋面是半球比例的热力不连续面；尝试根据诊断结果和物理方程推断气团运动，从动力学角度讨论了气旋的形成和锋面移动，并通过该研究成果获得奥斯陆大学博士学位。

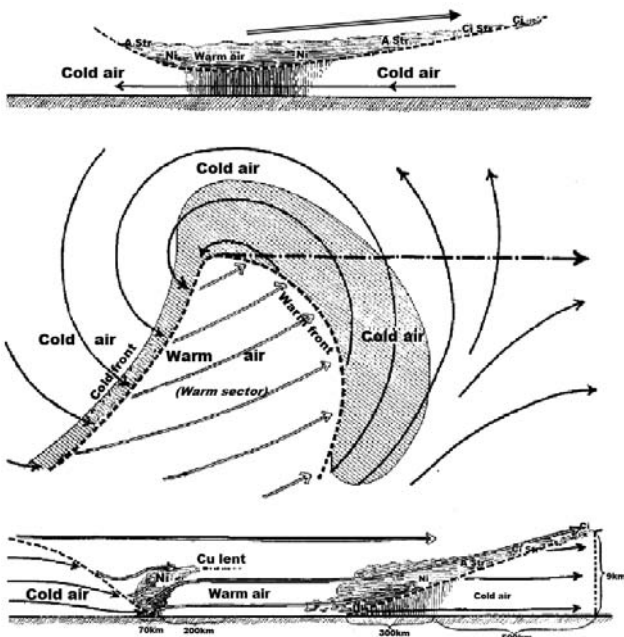


图6 温带气旋理想模型示意图<sup>[28]</sup>

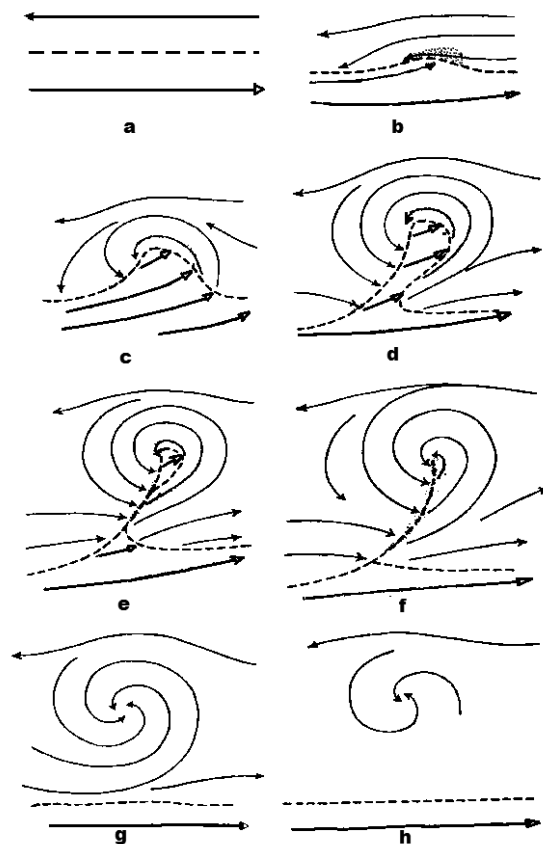


图7 温带气旋生命周期示意图<sup>[23]</sup>

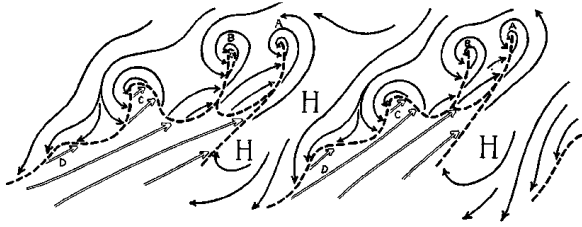


图8 气旋族示意图<sup>[23]</sup>

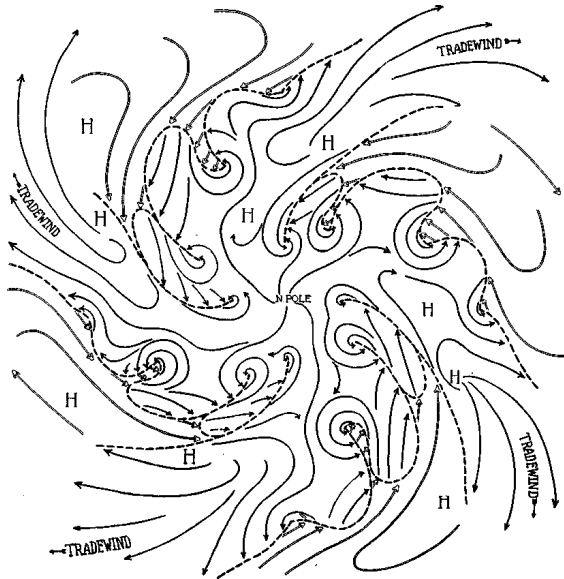


图9 平均温带大气环流<sup>[23]</sup>

J.皮叶克尼斯与芬兰地球物理学家Erik Palmén<sup>①</sup>合作,分析了多个欧洲大陆气旋过程<sup>②</sup>。利用在比利时于克勒(Uccle)施放31个气球探空数据, J.皮叶克尼斯在对1928年12月一次气旋过程的研究中发现<sup>[32]</sup>,高空槽常位于地面冷锋上空,槽涡度的形成是由于暖空气沿冷空气倾斜界面向下流动时产生的垂直拉伸。文中描述了与低空气旋有关的对流层高空西风气流波动,是利用动力学观点解释高空大气波动的首次尝试<sup>[13]</sup>。此外, J.皮叶克尼斯和Palmén<sup>[33]</sup>通过对气旋形成过程的分析描绘出锋区上部的折叠,建立了地面锋区到对流层顶的垂直剖面。

### 3.3 大气波动和平均大气环流

J.皮叶克尼斯曾着重讨论气旋发展过程中的气压变化问题<sup>[34]</sup>,结合对流层高层、叠加在纬向气流上的扰动进行了初步分析,发现中纬度高空波动因大气斜压性而发生相对水平移动,导致地面气旋增强或减弱<sup>[13]</sup>。他将气旋生消的原因由锋面波动延伸为对流层

大气波动,并进行了一系列关于高空波的理论研究。他指出,科氏力随纬度的变化是高空大气波动形成的重要动力学因素,该结论启发罗斯贝从理论和观测方面研究了控制天气和大气环流变化的大气长波,从二维无辐散涡度方程出发,求出长波公式并得到符合实际的长波移速和发展率。之后罗斯贝的学生及合作者对大气长波的产生机制进行了深入研究,相继提出斜压不稳定理论<sup>[35-36]</sup>、正压不稳定理论<sup>[37]</sup>及大气长波的频散理论<sup>[38]</sup>,这些成果有助于人们认识大气环流演变过程,为天气预报提供了依据,并成为其后数值天气预报和大气环流数值试验的基础,开辟了现代大气动力学与大气环流研究的新局面。大气波动力学的理论体系被认为是20世纪大气科学理论最重要的研究成果。

为发展温带气旋理论、进一步探讨其形成机制, J.皮叶克尼斯在UCLA期间利用气压倾向方程<sup>[39]</sup>分析了西风波动上的气压变化,指出在一般的西风强度下水平散度分布将使波峰和波谷向东移动。通过推导,他得到正压和斜压大气中的波动移动规律,并讨论了高低空气压系统的综合配置。该文章启发UCLA气象系首位博士生J. Charney<sup>[35]</sup>得出第一个斜压流体波动解。

20世纪50年代,大气科学进入到计算机应用和高空大气探测阶段, J.皮叶克尼斯倡导利用火箭、卫星图像进行高空大气研究。二战末期,美国飞行员在日本上空的对流层顶附近向西飞行注意到一股高速气流,气象学家研究确定为高空西风急流。后来得到的大气风场观测结果显示,高空西风急流比预想的还要强。英国数学家、地球物理学家Harold Jeffreys曾在1933年提出设想:大气波动和涡旋扰动可以把角动量从低纬度输送到中纬度地区。以此为基础, J.皮叶克



图10 1953年J.皮叶克尼斯(近者)和D.富兹在芝加哥大学流体力学实验室

① Erik Palmén (1898—1985年), 芬兰气象学家,在气象学、地球物理学、海洋学方面都有涉猎。曾协助J.皮叶克尼斯从事气旋和锋面的研究;后前往芝加哥大学成为C.G.罗斯贝创立的芝加哥气象学派一员,在高空急流动力学研究中有突出贡献。  
② 气旋个例分析系列包括四篇文章:个例一(1928年3月28—30日)发表于1933年;个例二(1928年12月26—28日)发表于1932年;个例三(1930年12月30—31日)发表于1934年;个例四(1935年2月15—17日)发表于1937年。

尼斯和Yale Mintz<sup>①</sup>邀请多位国外科学家开展了大气平均环流的计算研究项目，收集整个北半球数据，并对角动量和热收支方程各项的时间、空间平均量进行了计算<sup>[40]</sup>，验证了Jeffreys的理论，并与当时MIT的Victor Starr<sup>②</sup>研究组的结果一致，加深了人们对平均大气环流的认识。

#### 4 H.索尔伯格的生平和研究工作

挪威气象学家H.索尔伯格(Halvor Skappel Solberg, 1895年2月5日—1974年1月31日)出生在挪威海德马克市林萨克区(Ringsaker Hedmark), 1912—1916年在克里斯蒂安尼亚大学学习天文学、化学、力学等课程，并获得天文学学士学位<sup>③</sup>，期间曾连续三年作为Lars Vegard和Carl Størmer教授的助手参与极光研究。毕业后索尔伯格前往莱比锡学习并师从V.皮叶克尼斯，成为挪威学派的最初成员之一。当时他致力于理论气象学研究，主要关注气流摩擦。



图11 H.索尔伯格(1895—1974年)<sup>[13]</sup>

1917年秋，索尔伯格跟随V.皮叶克尼斯来到新创立的卑尔根大学气象系，接触到天气预报问题，通过观测分析完善了J.皮叶克尼斯(1919)提出的锋面气旋模型，构建了“极锋气象学”体系。1921—1927年，他前往德国格丁根(Göttingen)和法国巴黎学习流体力学，之后到挪威奥斯陆继续协助V.皮叶克尼斯，进行气旋发展机制的理论研究。1930—1964年他在奥斯陆大学担任教授。从事教学工作同时，索尔伯格继续从数学角度研究流体惯性波动，在描述大气扰动和波的移动方面有所进展，同时对流体稳定性条件做了研究。索尔伯格十分注重培养学生的大气动力学基础，而这样的大气科学教学理念直到二战之后才被世界各国广泛认同。此外，索尔伯格还积极促进计算机的应用，担任数学计算委员会主席多年。

尽管与挪威学派其他几位主要成员相比，索尔伯格的学术成就并不十分突出，但他推动了锋面气旋模型的建立特别是“气旋族”的发现，并在气旋形成机

制的理论研究方面作出了有益的尝试。

#### 4.1 极锋理论和气旋族

在卑尔根工作期间，索尔伯格通过分析船舶观测资料，对北大西洋区域历史天气图进行了重新研究，证实了大气不连续面的存在。通过描绘多个气旋的冷暖锋结构(图12)，他得到一条基本连续的冷暖空气分界线即“极锋”，并认为极锋以弯曲的波状形式存在，索尔伯格认为，这种不同性质空气的分界线与降水形成关系密切，冷暖空气相互作用使其具有弯曲的走向，极锋上的波动可能发展为气旋，进而提出“气旋族”概念。结合这一概念，挪威学派关于温带气旋特征的研究更加完整。

#### 4.2 流体波动与气旋形成机制

索尔伯格用数学物理方法研究流体波动的初衷是揭示气旋的形成和发展过程。除了人们熟知的声波和重力内波，索尔伯格在博士论文<sup>[41]</sup>中通过方程式在旋转流体中确定了细胞状内波(cellular internal waves)的存在，但由于解的形式十分复杂，并且未得到气旋波性质的波动，此项工作并未产生很大反响。之后，V.皮叶克尼斯和索尔伯格<sup>[42]</sup>共同研究了细胞状内波的

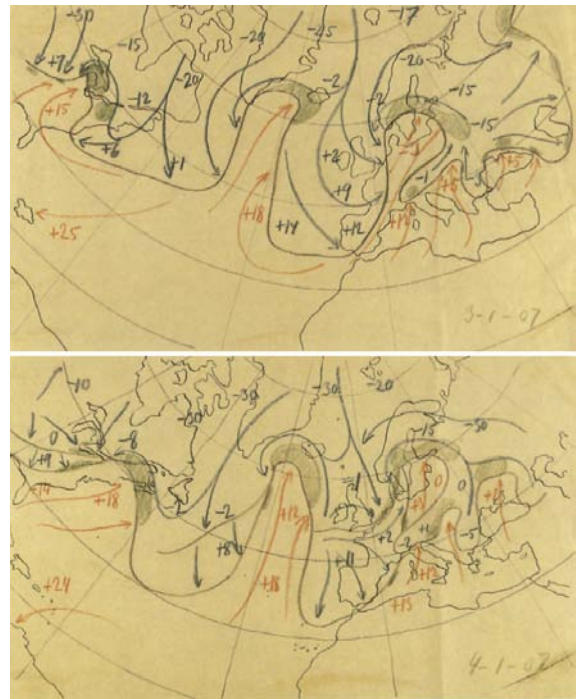


图12 索尔伯格描绘的1907年1月3日和4日(绕极)极锋(绘制于1920年2—3月)

① Yale Mintz是J.皮叶克尼斯的研究生，1949年获得博士学位后留在UCLA工作，20世纪50年代末开始主要从事平均大气环流模式的设计。他所招收的东京大学气象学家Akio Arakawa具有杰出的数学天赋，以研究积云对流参数化闻名。

② Victor Starr是芝加哥大学气象系培养的第二位博士(毕业于1946年夏，第一位是1945年秋毕业的Morris Neiberger)，1947年起在MIT任教。

③ 参见[http://www.snl.no/nbl\\_biografi/Halvor\\_Solberg/utdypning](http://www.snl.no/nbl_biografi/Halvor_Solberg/utdypning)。

物理性质。

索尔伯格是流体内部惯性波研究的先驱者之一。结合基本的数学物理方程，索尔伯格<sup>[43]</sup>讨论了可压大气中两等温面的平行运动，成功得到所有可能的波动类型，其中包括存在于两界面之间、与初生气旋波在波长和传播速度方面相似的不稳定波，即不稳定惯性长波。虽然索尔伯格对锋面波动发展过程的理论研究指出了研究惯性长波不稳定的必要性<sup>[41, 43]</sup>，但是动力解释存在缺陷，数学推导过程非常复杂，且无法解释大气长波的不稳定性形成原因。尽管如此，该研究仍被认为是揭示气旋形成机制的重要一步，从最初认为的重力波不稳定或大气不连续面不稳定，过渡到惯性长波不稳定，为大气长波的研究打下了基础。

Godske<sup>[44]</sup>总结了索尔伯格关于波动类别及稳定性的主要结论，指出大气中存在的三种相互独立并对波动产生具有关键作用的动力因素。第一种为重力，当空气运动速度具有垂直分量时重力起作用，由于在惯性系统中轻的空气在重的空气之上，故重力是稳定因素；第二种为界面处的速度切变，这是形成不稳定波的常见动力因素，在小尺度运动中表现为层流转化为湍流，大尺度气流切变也有不稳定波形成；第三种为地球旋转，实质为角动量守恒，是稳定波的形成因素之一。图13为上述因素的综合效应示意图，频率的平方（表征稳定度，负值为不稳定）是不连续面上波动波长的函数，当波长约在2km以下时，不稳定性主要决定于锋面切变，当上下两层流体密度不同，并且有不同的切向速度时出现这种不稳定性，在大气中常表现为波状云；当波长超过2km时重力成为主要因素，波动就变为稳定波；地球旋转对短波影响很小，而对波长在几千千米量级的长波，由于空气运动速度的水平分量与垂直分量相比很小，稳定作用主要来自

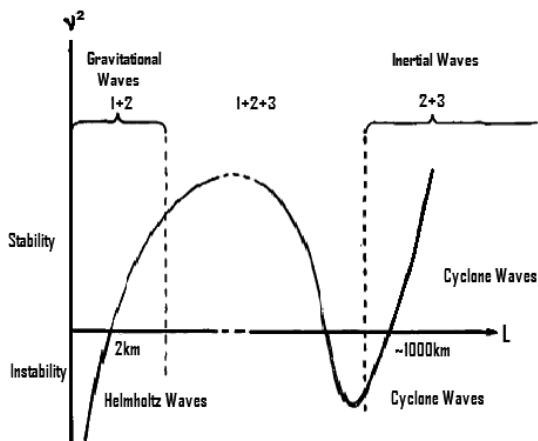


图 13 Godske关于大气波动稳定性和不稳定性的示意图<sup>[44]</sup>（1为重力稳定，2为切变不稳定，3为旋转惯性稳定）

地球旋转，Godske<sup>[44]</sup>称这种波为惯性波，当受到速度切变因素影响时形成不稳定惯性长波。他认为大气中存在两种不稳定波动：（1）短重力波，在大气中表现为波状云，与开尔文—亥姆霍兹不稳定（Kelvin-Helmholtz Instability）有关。（2）不稳定惯性长波，由索尔伯格发现，并认为其实质是气旋波。

## 5 T.贝吉龙的生平和研究工作

瑞典气象学家T.贝吉龙（Tor Harold Percival Bergeron，1891年8月15日—1977年7月13日，图14）是挪威学派的重要成员之一，在大气科学的诸多分支领域均有开创性贡献，包括锋生问题、气团分类、降水机制等。



图14 T.贝吉龙（1891—1977年）（左：摄于卑尔根工作时期<sup>[20]</sup>，右：摄于20世纪30年代初<sup>[16]</sup>）

贝吉龙出生在英国萨里城郊的戈德斯通，父亲Armand经营邮票生意，母亲Hilda Stawe是歌手及声乐教师。1910—1916年，贝吉龙在斯德哥尔摩大学学习数学和物理，期间经常到气象学会学习分析天气图，毕业后他在瑞典气象学会工作。贝吉龙非常注重观测数据的分析，少年时代就热衷于天气现象和云的观测，经常记天气日志，曾经观测到当时教科书中鲜有记录的山脉背风波云系（lee-wave clouds）。他曾在给朋友的信中附加空白表格，用于记录航海过程中的大气能见度、天气现象等，并建议把表格分发给航海人员和山区徒步的人。这些观测数据在新理论验证方面发挥了补充作用，例如，贝吉龙利用大量观测数据发现两个气团之间往往存在明显的边界，从而提出“气团”的设想<sup>[45]</sup>。

1918年秋，贝吉龙在J.皮叶克尼斯和索尔伯格的邀请下，来到卑尔根大学气象系学习。1919年末，他前往位于斯德哥尔摩的瑞典气象水文学会任初级气象学家。1922年5月至1929年，贝吉龙回到卑尔根，在挪威气象学会天气预报部门工作，并开办了天气图分析课程，这一举措成为系统化气象教学的开端<sup>[45]</sup>。与此同时，他先后到德国莱比锡大学（1923—1925年）和奥斯陆大学（1925—1928年）学习，1928年获得奥斯陆大学博士学位。1936—1947年，贝吉龙在位于瑞典首都斯德哥尔摩的瑞典气象水文研究所（SMHI）工作，通过讲座和天气图分析课程，在短时间内实现

了瑞典气象事业的现代化<sup>[46]</sup>。他亲自准备课程计划，安排野外气象学实践课程。在此期间，他还担任了世界气象组织（WMO）天气学委员会委员。1945年随着第二次世界大战的结束，瑞典军事和航空领域缺乏大量的气象人才，气象学逐渐得到国家的重视。贝吉龙也于1947年被聘为乌普萨拉大学天气学系教授及系主任，进行热带气象学<sup>[47-48]</sup>、假冷锋、极地气象学等研究。1953年，贝吉龙组织开展了Pluvius降水研究计划，主持这项工作直到晚年。

贝吉龙曾到多国讲学（马耳他、前苏联等），致力于传播挪威学派理念和方法，他掌握的七种语言为学术交流带来了促进作用。1930年9—12月和1931年12—1932年10月，他两次前往莫斯科开办讲座，讲稿由俄国天气学家S. P. Chromow整理，编写成为*Einführung in die synoptische flüently* (Introduction to the Synoptic Flüently) 一书，该书被贝吉龙的密友G. Swoboda翻译为德语版本（1940年），同年还出版了N. Koncek翻译的荷兰语版本。此外，贝吉龙还承担了一些国际援助工作，如国际教科文组织技术援助计划（The UNESCO Technical Aid Program），曾在摩洛哥和南斯拉夫进行天气学教学（1953年9—10月）。

从乌普萨拉大学退休后（1961年），年近七旬的贝吉龙仍在气象学院继续研究工作和国际交流（图15）。1976年秋，贝吉龙不幸罹患胰腺癌，于1977年6月13日在瑞典乌普萨拉逝世，享年85岁。贝吉龙是最后一位辞世的挪威学派代表人物<sup>[45]</sup>。第十一届国际气象组织颁奖仪式上贝吉龙的颁奖词，可以说是对其在气象学领域贡献的全面评价：

*“In recognition of his Outstanding Contributions to Air Mass Analysis, Physics of Precipitation and Theory of Fronts, his furtherance of International co-operation in the Science of the Atmosphere; and his stimulation of the development of the Science of Meteorology by his lectures and writings.”*



图15 贝吉龙和夫人Vera (摄于1969年)<sup>[18]</sup>

贝吉龙在卑尔根期间的主要贡献是发现了“锢囚”现象和“锢囚锋”，从理论方面帮助完善了锋面气旋理论，并从观测事实角度验证了有关理想模型的合理性，还构思出冷暖锋的标记方法。之后他通过观测事实提出了冷云降水机制<sup>[49-51]</sup>，即后来所说的魏格纳—贝吉龙—芬代森降水过程（Wegener-Bergeron-Findeisen process）。同时，他在天气学分析和高空气象学方面也有重要贡献<sup>[45]</sup>。以下将重点介绍贝吉龙在锋面气旋模型和降水机制方面的研究。

## 5.1 锋面气旋的锢囚过程

如前所述，J.皮叶克尼斯在1919年发表的文章中提出了理想的热带外移动性气旋结构概念模型。贝吉龙曾经注意到冷锋追上暖锋的迹象，并称其为“Sammenklapping”（即“会聚”或“闭合”），但当时他并不确定这究竟是热带外气旋结构的新形式，还是简单的局地现象<sup>[52]</sup>。随着观测数据时空密度的逐渐增加，贝吉龙在1919年11月18日的天气图上发现了“锢囚”现象，并描绘出“锢囚锋”（图16）（大致分布在挪威海岸），冷锋向南延伸至瑞典并使夹在中间的暖空气被抬升，气旋趋于消亡。锢囚概念在J.皮叶克尼斯和索尔伯格1922年的文章<sup>[23]</sup>中首次正式出现。

## 5.2 关于冷暖锋标记

冷暖锋可以说是挪威学派提出的标志性概念，其表示方法也经历过一系列演变。最初的冷、暖锋颜色分别是红、蓝色，与现在通常使用的配色相反。罗斯贝在1919年夏季提出颜色互换的意见。为了在黑白打印稿上标注锋面，贝吉龙构思出圆弧和三角符号，建



图16 首张描绘锢囚现象的天气图：1919年11月18日18 GMT<sup>[20]</sup>

议J.皮叶克尼斯在挪威学派发表的文章中使用，这个细节在1924年1月8日贝吉龙寄给J.皮叶克尼斯的明信片上可以看到（图17）。

### 5.3 冷云降水机制

冰核降水理论的提出，是贝吉龙对于观测现象的又一提炼。1911年，A. Wegener就已经提出在冰、水粒子同时存在的云中可能发生冷水在冰晶上迅速凝结的现象。贝吉龙在Voksenkollen山区（海拔约470m，挪威奥斯陆以北）疗养地观测过程中（1922年2月）观测到了该现象。他发现，气温在 $-5^{\circ}\text{C}$ 至 $-10^{\circ}\text{C}$ 时，雾中的过冷水滴会蒸发，水汽在林木树叶上凝结成霜，从而使山区部分区域的雾滴消散；气温高于 $0^{\circ}\text{C}$ 则没有这种现象（图18）。贝吉龙思考冰晶对成云致雨的作用，认为与上述现象相似的凝结过程也存在于高空。在一定温度条件下，由于冰面饱和水汽压低于水面饱和水汽压，空气中的水汽将凝结在冰核上，使空气的饱和度降低；过冷水滴逐渐蒸发，水汽继续凝结，从而使冰粒子迅速增大，下落形成降水。贝吉龙继续观测，希望找到可能支持该假设的现象。1933年，他在里斯本的地测学和地球物理学会议报告中提到冰核降水理论，引起一定关注，相关文章中也着重阐述了该问题<sup>[49]</sup>。1938年，Findeisen从实验角度论证了贝吉龙的降水理论，从而形成贝吉龙—芬代森降水过程（Bergeron-Findeisen process）理论，或称魏格纳—贝吉龙—芬代森降水过程（Wegener-Bergeron-Findeisen process）理论。贝吉龙还论述了

强烈凝结在降水过程中的重要性<sup>[47]</sup>，提出此类过程中同时存在的两种云系，其一充当凝结核（seeder cloud），通常是冰晶，其二是水汽源（feeder cloud）。欧洲的降水过程时常与暖锋相联系，卷层云、高层云中产生的冰晶会吸收雨层云中的水滴。如果是对流性降水过程，则冰晶大多生成在上升气流中，并在下降时使云水减少。他认为对于云顶温度在 $-12^{\circ}\text{C}$ 到 $-20^{\circ}\text{C}$ 的浅薄降水系统，冰粒子的形成具有不确定性，存在人工降雨的可能性。贝吉龙过程已成为人工降雨的重要理论依据之一。

### 6 总结

本文介绍了以挪威气象学派创立背景和发展历程，并对该学派中三位重要成员J.皮叶克尼斯、H.索尔伯格及T.贝吉龙的生平经历和研究工作进行了回顾。挪威学派对20世纪大气科学发展的贡献主要体现在早期工作，即气团概念、锋面气旋模型、极锋学说及天气学分析方法等，该理论体系是现代天气学的基本原理和重要内容之一。其突破性意义在于将天气预报建立在清晰的物理概念和原理的基础上，与过去的经验预报方法相比，更容易应用和推广，从而带来了天气预报业务革命性的转变，也为大气环流与大尺度动力学研究提供了思路。同时，该理论体系也促进了中长期天气预报和数值天气预报的实现。在锋面气旋动力学研究的基础上，大气斜压不稳定等理论相继被提出，成为数值天气预报和大气环流模式的理论依据之一。此外，J.皮叶克尼斯在对北大西洋和赤道太

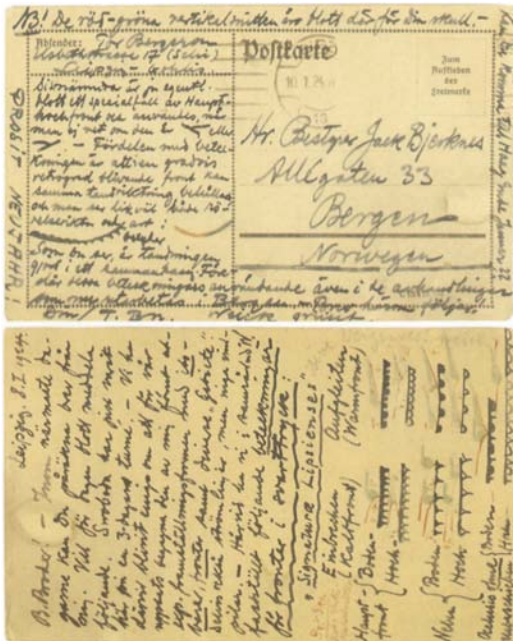


图17 1924年1月8日贝吉龙从莱比锡寄给J.皮叶克尼斯的明信片<sup>[20]</sup>

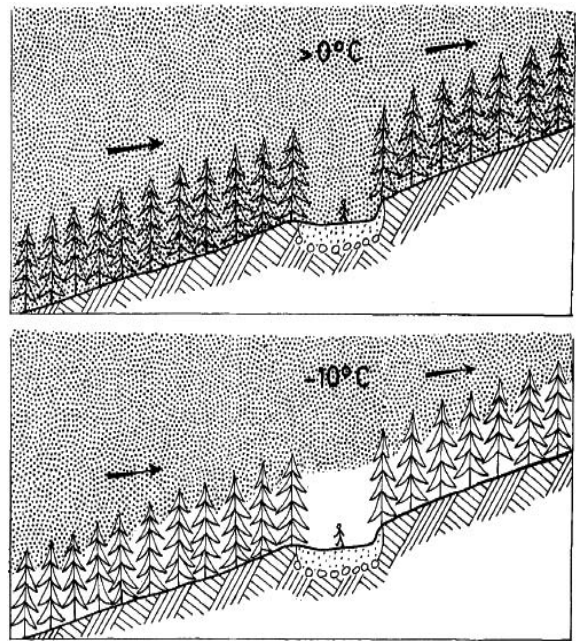


图18 贝吉龙1922年2月在奥斯陆附近的Voksenkollen观测期间绘制的示意图<sup>[50]</sup>

平洋海气相互作用的研究,特别是对El Niño现象的研究中也贡献突出,他提出的沃克环流、ENSO概念和Bjerknes正反馈机制影响深远。贝吉龙为天气学分析预报理论的完善和挪威学派理念的传播做出了重要贡献。挪威学派取得卓越成就的原因是多方面的,与新观测技术的推动,社会环境需求以及V.皮叶克尼斯的引导作用密不可分。如今距离挪威学派经典理论的提出已经过去近百年,天气学分析仍是重要的、不可忽视的预报手段,并已成为气象学科的必修课。

### 参考文献

- [1] 中国大百科全书. 大气科学卷. 北京: 中国大百科全书出版社, 1998.
- [2] Frisinger H. Meteorology before Aristotle. Bulletin of the American Meteorological Society, 1971, 52(11): 1078-1080.
- [3] Aristotle. Meteorologica. Trans, Lee H D P. Cambridge: Harvard University Press, 1952.
- [4] Bjerknes V. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. Meteorologische Zeitschrift, 1904, 1: 1-7.
- [5] Bjerknes V. The meteorology of the temperature zone and the general atmospheric circulation. Monthly Weather Review, 1921, 49(1): 1-3.
- [6] 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.
- [7] 黄荣辉. 现代大气科学前沿与展望. 北京: 科学出版社, 1995.
- [8] 黄荣辉, 章国材, 陆则慰. 21世纪初大气科学回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2000.
- [9] 贾朋群. 二十世纪以来气象研究和教育在欧洲和美国的发展. 气象软科学, 2005, 4: 68-83.
- [10] Namias J. The early influence of the Bergen School on synoptic meteorology in the United States. Pure and Applied Geophysics. 1980, 119(3): 491-500.
- [11] Friedman R M. Appropriating the Weather: Vilhelm Bjerknes and Construction of a Modern Meteorology. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1989.
- [12] Devik D, Bergeron T, Godske C L, et al. March 14, 1862-April 9, 1951. Geofysiske Publikasjoner, 1962, 24: 7-25.
- [13] Eliassen A. Vilhelm Bjerknes and his students. Annual Review of Fluid Mechanics, 1982, 14: 1-11.
- [14] Wurtele M G. Selected Papers of Jacob Aall Bonnevie Bjerknes. North Hollywood, California: Western Periodicals Co, 1975.
- [15] Eliassen A. Jacob Aall Bonnevie Bjerknes, November 2, 1887-July 7, 1975, Biographical Memorials of the National Academy of Sciences. Washington D C: National Academy of Sciences, 1995.
- [16] Firolek A. Pioneers in modern meteorology and climatology: Vilhelm and Jacob Bjerknes- A selected bibliography. NOAA Central Library, 2004(1): 1-20.
- [17] Weickmann H K. Tor Harold Percival Bergeron. Bulletin American Meteorological Society, 1979, 60(5): 406-414.
- [18] Liljequist G H. Tor Bergeron: A biography. Pure and Applied Geophysics, 1981, 119: 409-442.
- [19] Schultz D M, Friedman R M. Tor Harold Percival Bergeron. New Dictionary Scientific Biography. New York: Charles Scribner's Sons, 2007.
- [20] Jewell R. Tor Bergeron's first year in the Bergen School: Towards an historical appreciation. Pure and Applied Geophysics, 1981, 119: 474-494.
- [21] Schwerdtfeger W. Comments on Tor Bergeron's contributions to synoptic meteorology. Pure and Applied Geophysics, 1981, 119: 501-509.
- [22] Bjerknes J. On the structure of moving cyclones. Geofysiske Publikasjoner, 1919, 1(2): 1-8.
- [23] Bjerknes J, Solberg H. Life cycles of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. Geofysiske Publikasjoner, 1922, 3(1): 3-18.
- [24] Bjerknes V, Sandström J W. Dynamic Meteorology and Hydrography. Part I. Statics. Washington, D.C.: Carnegie Institution of Washington, 1910.
- [25] Bjerknes V, Hesselberg T, Devik O. Dynamic Meteorology and Hydrography. Part II. Kinematics. German edition. Braunschweig: Springer, 1912.
- [26] Bjerknes V, Bjerknes J, Solberg H, et al. Dynamic Meteorology and Hydrography. Part III. Physikalische Hydrodynamik. Mit Anwendung auf die Dynamische Meteorologie. Berlin: Springer, 1933.
- [27] 叶鑫欣, 焦艳, 傅刚. J.皮叶克尼斯及其海气相互作用研究. 气象科技进展, 2014, 4(5): 78-79.
- [28] Bjerknes J, Solberg H. Meteorological conditions for the formation of rain. Geofysiske Publikasjoner, 1921, 2(3): 4-61.
- [29] Gold E. Fronts and occlusions. Quart J Roy Meteor Soc, 1935, 61: 107-157.
- [30] Defant A. Die Veränderungen der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre in den gemässigten Breiten der Erde. Wiener Sitzungsberichte, 1912, 121: 379.
- [31] Bjerknes J. Diagnostic and prognostic application of mountain observations. Geofysiske Publikasjoner, 1924, 3(6): 4-39.
- [32] Bjerknes J. Exploration de quelques perturbations atmosphériques à l'aide de sondages rapprochés dans le temps. Geofysiske Publikasjoner, 1932, 9(9): 3-54.
- [33] Bjerknes J, Palmén E. Investigation of selected European cyclones by means of serial ascents. Geofysiske Publikasjoner, 1937, 12(2): 5-62.
- [34] Bjerknes J. Theorie der aussertropischen Zyklonenbildung. Meteorologische Zeitschrift, 1937, 54: 460-466.
- [35] Charney J G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. J Meteor, 1947, 4: 135-162.
- [36] Eady E. Long waves and cyclone waves. Tellus, 1949, 1: 33-52.
- [37] Kuo H L. Dynamic instability of two-dimensional non-divergent flow in a barotropic atmosphere. J Meteor, 1949, 6: 105-22.
- [38] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. J Meteor, 1949, 6: 1-16.
- [39] Margules M. Über die Energie der Stürme. Jahrb Zentralanst Meteor Wien, 1903: 1-26.
- [40] Bjerknes J. The transfer of angular momentum in the atmosphere. Scientific Proceedings of the International Association of Meteorology, 1955, 407-408.
- [41] Solberg H. Integrationen der atmosphärischen Störungsgleichungen 1: Wellenbewegungen in rotierenden, inkompressiblen Flüssigkeitsschichten. Geofysiske Publikasjoner, 1928, 5(9): 3-120.
- [42] Bjerknes V, Solberg H. Zellulare Trägheitswellen und Turbulenz. Videnskabsakademiets Avhandlingar, 1929, 1(7): 1-16.
- [43] Solberg H. Das Zyklonenproblem. Proc 3rd int Congr Appl Mech Stockholm: 1931. 121-131.
- [44] Godske C L. Zur Theorie der Bildung aussertropischer Zyklonen. Meteorologische Zeitschrift, 1936, 12: 445-449.
- [45] 叶鑫欣, 焦艳, 傅刚. 伯杰龙及其在天气学分析和高空气象学的贡献. 气象科技进展, 2014, 4(2): 74-75.
- [46] Bergeron T. A New Era in teaching synoptic meteorology. Geografiska Annaler, 1941, 23: 251-275.
- [47] Bergeron T. De tropiska orkanernas problem. Installationsföreläsning i Uppsala den 10 april 1948. [The Problem of the Tropical Hurricanes. Installation Lecture at Uppsala University, April 10, 1948.] Kosmos, 1949, 27: 122-160.
- [48] Bergeron T. The problem of tropical hurricanes. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1954, 80: 131-164.
- [49] Bergeron T. On the physics of clouds and precipitation. Proc Fifth Assembly of IUGG, Vol 2, Lisbon, Portugal: Int Union Geod Geophys, 1935: 156-178.
- [50] Bergeron T. Some autobiographic notes in connection with the ice-nucleus theory of precipitation. Bulletin of the American Meteorological Society, 1978, 59: 390-392.
- [51] Bergeron T. Cloud-Physics research and the future fresh-water supply of the world. Proceedings of the International Conference on Cloud Physics, August 26-30, 1968, Toronto, Canada. Toronto: 1970.
- [52] Schultz D M, Friedman R M. Tor Harold Percival Bergeron. New Dictionary Scientific Biography. New York: Charles Scribner's Sons, 2007.