

# 罗斯贝与地球系统科学\*

吕建华<sup>1,2,†</sup>

(1 中山大学大气科学学院 珠海 519082)

(2 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海) 珠海 519082)

2023-03-15 收到

† email: lvjianhua@mail.sysu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230401

## Carl-Gustaf Rossby and Earth System Science

LU Jian-Hua<sup>1,2,†</sup>

(1 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

(2 Southern Marine Science and Engineering, Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

远见者头脑中的梦想比现实主义者的常识判断更接近真实。

——罗斯贝

**摘要** 罗斯贝(1898—1957)在20世纪气象学的爆发性发展中起了关键作用,但很少有人提及他对地球系统科学建立的贡献。文章用翔实的文献资料说明,通过他本人的直接倡导和对他的学生和朋友的间接影响,罗斯贝应当被认为是地球系统科学建立的重要奠基人之一。

**关键词** 罗斯贝, 地球系统科学, 气象学

**Abstract** Carl-Gustaf Rossby was a central figure in the explosive development of modern meteorology during the 20<sup>th</sup> century, but his contribution to the establishment of Earth System Science (ESS) was almost never mentioned. Here it is shown that Rossby should be considered as one of the key founders of ESS on account of his advocacy and his influence on his protégés, many of whom became key leaders of ESS during the 1980s.

**Keywords** Rossby, Earth System Science, Meteorology

## 1 背景和缘由

2021年度的诺贝尔物理学奖授予了复杂物理系统的研究,其中两位获奖者真锅淑郎和哈塞尔曼是气候学家,另一位获奖的理论物理学家帕里西也曾做过气候方面的研究<sup>[1]</sup>。虽然对很多大气和气候学家来说,这是一份迟来的荣誉(笔者于21世纪初在国外访学时就已经听过同行议论,认为真锅淑郎对全球变暖的研究有资格获得诺贝尔

物理学奖),但对国内外的物理学家们更加关注地球系统科学的发展,并引起他们的兴趣,仍是极好的事情。

地球系统科学是把地球的各个圈层当成有机联系的统一整体来研究的一门科学。这些圈层包括大气圈、陆地、海洋、冰冻圈、生物圈、固体地球,甚至包括人类活动(人类圈)在内,传统上由地球科学的各分支学科来研究。但随着这些地球科学门类的发展,也随着卫星遥感观测等高新技术的进步,更由于人类越来越意识到,人类自身活动导致的地球气候和环境变化,正在威胁到人类自身的生存和发展,因此有必要把地球当成

\* 国家自然科学基金(批准号:42042011)、国家重大科技基础设施“地球系统数值模拟装置”资助项目

一个有机整体来认识。唯有这样,才能避免过去一百多年工业化时代以来人类无序活动对地球资源和环境的肆意破坏,转而在地球系统科学认识基础上,采取有序人类活动,达到可持续发展的目标<sup>[2]</sup>。正是在这样的背景下,地球系统科学于20世纪80年代应运而生<sup>[3]</sup>。

在地球系统科学的诞生和发展历史中,现代气象学和大气科学起了独特作用。这一方面是因为催生地球系统科学的全球性气候变化和大气污染等问题首先是作为气象学和大气科学问题而受到关注的。另一方面也是因为在地球各学科门类中,气象学是最早从传统的描述性学科转向为建立在现代数学和物理学基础上的定量学科的。正如“两弹一星”元勋,同时也是我国气象学数理科学化先驱的赵九章先生(赵先生原来学习物理学,是叶企孙先生的学生)在《现代气象学问题论丛》总序中所说的那样,“从现代的科学发展看,气象学是一门边缘科学,它一方面联系着当地的具体地理条件,有它的地域特点,另一方面则遵循着物理变化法则,而与数理科学有共同性。”<sup>[4]</sup>这也就决定了现代气象学和大气科学对多学科交叉的内在要求,正如赵九章先生紧接着指出的那样:“通过各学科之间的相交渗透,近代气象学把物理、数学、力学、控制论、天文等学科的成就运用到本学科之内,使其开花结果,这不但推进了气象学的发展,反过来也推进了其他学科。”<sup>[4]</sup>气象学发展反过来推进其他学科的一个突出例子



图1 卡尔-古斯塔夫·罗斯贝(1898—1957)<sup>[11]</sup>

是,气象学家爱德华·洛伦兹提出的混沌理论对物理学、生物学、经济学、社会学等领域所产生的巨大影响<sup>[5]</sup>。而数值天气预报试验的成功则在很大程度上促进了计算数

学和计算物理学的发展<sup>[6]</sup>。在促使地球系统科学的诞生和发展中的独特作用,可以视为气象学发展推进其他学科发展的另一个恰当例子。这很好地体现在这样一个基本事实:地球系统科学这一概念的提出,是建立在前期一系列国际性大气科学实验的基础之上<sup>[3]</sup>,而像地球系统的布雷瑟顿图(Bretherton Diagram)<sup>[7]</sup>,地质年代的“人类世”概念<sup>[8]</sup>,也都是由气象学家主导提出。

近年来国内外有多篇较为全面回顾地球系统科学产生、发展和演变的文章<sup>[3, 9, 10]</sup>,对人们深入认识这一学科很有益处。但所有这些文章都没有提到很早于1957年逝世的现代气象学之父罗斯贝(Carl-Gustaf Rossby,图1)在地球系统科学形成中的独特地位和作用。本文将用翔实的文献资料说明罗斯贝无论是从其本人的科学思想、对相关科学研究的倡导,还是通过对他的朋友和学生的直接和间接影响,都无可争议地可以被认为是地球系统科学的重要奠基人之一。这里仅简单地先举三个例子。在获得诺贝尔自然科学奖的气象学家中,于1995年获得诺贝尔化学奖并提出“人类世”概念的保罗·克罗岑是以罗斯贝在斯德哥尔摩大学建立的数值预报小组的程序员身份开始其研究生涯,并在罗斯贝的学生伯特·博林指导下获得大气化学方面的博士学位。而真锅淑郎也正是在罗斯贝的再传弟子诺曼·菲利普斯(查尼数值天气预报小组成员)的两层大气环流试验成功以后,由查尼数值天气预报小组的另一成员斯马戈林斯基邀请于1958年到普林斯顿开始其气候模式方面的工作的。另外提出了现代混沌理论的气象学家洛伦兹也是罗斯贝的再传弟子。

## 2 从《运动中的大气和海洋》说起

1957年7月,罗斯贝的学生和朋友们被邀请撰写论文,其目的是为庆祝罗斯贝六十寿辰出版一本体现罗斯贝科学贡献的文集。但在邀请发出仅仅一个月后,罗斯贝就因心脏病突发而去世,这本拟议中的文集于两年后出版时自然也就变成了罗斯贝的纪念文集,也就是因一本书而成立了一个出版社<sup>1)</sup>的《运动中的大气和海洋》<sup>[11]</sup>。

1) 原洛克菲勒研究所出版社,即现在的洛克菲勒大学出版社。

书<sup>2)</sup>。文集编者在前言中写道, 罗斯贝的去世对于世界科学和他的朋友来说, 是失去了一位“以他个性的魅力和影响、才智的力量、不屈不挠的精神和能量而成为过去三十年中气象学爆发性发展的中心人物(His death, at the age of 58, deprived the world of science and his many friends of a man who, by force and charm of personality, power of intellect, and indomitable spirit and energy was a central figure in the explosive development of meteorology that has taken place during the past three decades).”就罗斯贝对整个气象学发展的贡献而言, 这样的评价是恰如其分而毫无夸张的。

我们先来看文集的作者组成。除了罗斯贝本人(他生前用瑞典语写的“气象学的当前问题”一文被翻译成英文放在卷首)以外, 全书45位作者都是当时和以后几十年中国际大气和海洋科学界的领袖级人物。这其中包括了气象学家小贝叶克尼斯(J. Bjerknes)、霍尔维兹(B. Haurwitz)、查尼(J. Charney)、海洋学家斯托梅尔(H. Stommel)、蒙克(W. Munk)等人, 也包括了当时正领导新中国气象学发展的主将叶笃正、顾震潮、陶诗言等(其中叶和顾分别是罗斯贝在芝加哥大学和斯德哥尔摩大学的学生)。再来看文集收录的论文构成。除了上述罗斯贝的文章以及罗斯贝好友贝吉隆和早期学生拜尔斯介绍罗斯贝生平的两篇介绍之外, 全书共分成“运动中的海洋”、“海洋和大气中的物质分布”、“大气环流”、“大气运动的特征”、“天气预报”五个部分38篇文章, 科学内容非常丰富。

书中后面三个部分所反映的正是罗斯贝从1930年代开始对大气动力学做出革命性贡献的几个方面。当时以罗斯贝为领袖的芝加哥学派在大气环流、不同尺度大气运动特性和天气预报尤其是数值天气预报的成就对气象学爆发性发展的贡献已经为世界所公认, 而且这些领域正处在一个蓬勃发展的阶段, 在以后的几十年中一直是、至今还是非常活跃的研究领域。这里也包括了中国科学家的重要原创贡献, 比如书中由叶笃正、陶

诗言和李麦村所提出的“北半球大气环流在六月和十月的季节突变”和顾震潮所提出的“天气预报作为初值问题和演变问题的等价性”都是领先时代的重要科学思想<sup>[12, 13]</sup>。简单地说, 这三个部分很好地反映了由罗斯贝所引领的气象学数理科学化方面的成就。

书中前两部分则反映了罗斯贝从1950年代开始关注和倡导的研究领域。比如书中第一部分“运动中的海洋”收录的是小贝叶克尼斯的“北大西洋最近的增暖”一文(文献[11], 第65—73页)和小阿伦尼乌斯(1903年诺贝尔化学奖获得者阿伦尼乌斯的孙子)关于“海底的气候记录”一文(文献[11], 第121—129页), 反映了当时罗斯贝对气候变化问题的关注和倡导。而第二部分“海洋和大气中的物质分布”则反映了罗斯贝指导其学生在大气化学问题、由于化石燃料燃烧引起的大气和海洋二氧化碳的变化问题、痕量物质在海洋和大气中的循环等问题的最早探索。这些在书中还只是刚刚起步的领域恰恰是1980年代全球变化研究和地球系统科学的核心研究内容, 而且书中的作者如查尼、博林和叶笃正等人后来也成为引领了从1960年代开始的“全球大气试验项目(GARP)”、“世界气候研究计划(WCRP)”和“国际地圈—生物圈计划(IGBP)”等一系列标志地球系统科学成立的大科学研究计划的领导人物。

值得注意的是, 上面提到的两个方面并不是相互独立的。在本文的后面部分将表明, 一方面, 对气候问题、大气化学和生物地球化学问题等有关于地球系统科学的研究建立在大气动力学和数值天气预报的定量化研究的成就基础上; 另一方面, 这样的发展并不能简单地被认为是对后者的一种自然延伸。除了学科发展的内在逻辑和来自现实的需求, 罗斯贝和冯·诺依曼等大科学家的远见卓识和大力推动也是至为关键的。

如果说《运动中的大气和海洋》一书所收集的这五个部分的论文和这些作者以后在地球系统科学形成中的地位和作用, 还只能算是罗斯贝对地球系统科学的间接影响的话, 书中开首所收录的罗斯贝生前写的“气象学的当前问题”<sup>[14]</sup>则全面直接地反映了罗斯贝对后来成为地球系统科学

2) 可在 <https://books.rupress.org/catalog/book/atmosphere-and-sea-motion> 免费下载。

核心研究内容的若干问题的看法，可以说是罗斯贝对地球系统科学形成的开创性贡献的直接证明。

下面将就上面三个方面稍加展开，予以更详细的说明。

### 3 罗斯贝和气象学的数理科学化

尽管气象学传统上被认为是描述性地理学的一个分支，但随着牛顿力学、热力学和分析力学等经典物理学的建立，已经在18世纪末出现了乔治·哈德莱对大气环流的定性理论分析和推断，19世纪末德国物理学家亥姆霍兹对大气运动的研究，以及马古勒斯(M. Margules)和霍夫(S. Hough)对球面上拉普拉斯潮汐方程的数学求解。曾为物理学家赫兹学生和助手的威廉·贝叶克尼斯(小贝叶克尼斯的父亲)从电磁学转向气象学和流体力学研究，于1904年提出可以根据物理学原理，将天气预报问题变成一个力学和物理问题来处理<sup>[15]</sup>。但以贝叶克尼斯父子为主的挪威卑尔根学派的主要成就在于提出极锋学说和温带气旋的现象学模型，而不是基于物理规律的定量天气预报。后者是由英国科学家理查逊于1920年代首次做了一次不成功的尝试。其失败原因在于对大气运动在不同时空尺度上的高度复杂性缺乏认识，作为积分初值的观测资料中的细微误差就足以让基于流体运动方程的计算谬之千里而归于失败<sup>[16]</sup>。另一方面，尽管马古勒斯和霍夫已经从数学上得到大气中存在第一类和第二类自由波动的认识，但这些数学解是在无基本运动条件下的线性化小扰动解，和实际相差甚远，同时对数学解也还缺乏深刻的物理认识。

The stream line pattern to which the above analysis by Bjerknes applies must satisfy not only the equation of continuity but also the equations of motion. If one considers the very simplest case of an ideal (non-friction) homogeneous, incompressible atmosphere in purely horizontal motion, the two equations of motion may, through the elimination of pressure, be compressed into a single equation expressing the conservation of absolute vorticity. Thus, if  $f$  represents the Coriolis' parameter ( $f = 2\Omega \sin \varphi$ ) and consequently also the vertical component of the vorticity due to the rotation of the earth, and if  $\zeta$  is the vertical component of the vorticity of the motion of the air relative to the earth's surface, then each individual vertical column must satisfy the condition

$$(1) \quad f + \zeta = \text{constant.}$$

In this equation

$$(2) \quad \zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}.$$

图2 1939年罗斯贝提出罗斯贝波公式的经典论文图片<sup>[17]</sup>

在这方面的突破性认识是由罗斯贝做出的。罗斯贝在大学期间师从数学家弗雷德霍姆(E. Fredholm)学习数学物理，期间受到老贝叶克尼斯的影响而成为卑尔根学派的学徒，并于1925年完成数学物理的学习获得博士学位。我们现在已经知道建立在能量和质量守恒定律、牛顿第二定律和热力学诸定律基础上的大气运动方程组是高度非线性的偏微分方程组，大气运动无论在时空尺度还是在运动性质上具有高度复杂性。但罗斯贝具有非凡的物理直觉和简化问题的能力。在他1939年的那篇经典论文里，他几乎是以单刀直入的方式(图2)，直接提出用最简单的理想均一的大气无辐散水平运动来描述大气的槽脊运动<sup>[17]</sup>。而单想一下空气的可压缩性，大多数熟悉流体运动方程组的人都会觉得这样的简化几乎是匪夷所思的。罗斯贝从这一最简单正压大气水平无粘性运动所具有的绝对涡度守恒出发，再考虑行星涡度随纬度的变化，就导出了著名的罗斯贝波公式：

$$C = U - \frac{\beta L^2}{4\pi^2},$$

其中， $C$ 是罗斯贝波的相速度， $U$ 是中纬度对流层中层平均风速， $L$ 是罗斯贝波波长(数千公里)， $\beta = \frac{d(2\Omega \sin \varphi)}{ad\varphi}$ 是地球自转引起的垂直方向行星涡度随纬度的变化(式中 $\Omega$ 为地球自转角速度， $\varphi$ 为纬度， $a$ 为地球半径)。

这个公式真正抓住了大气中移动槽脊和半永久性大气活动中心的本质。后来提出斜压不稳定理论、并领导了第一次成功数值天气预报和全球大气试验的查尼说过，虽然当时他并不是罗斯贝的研究生，但通过阅读罗斯贝的论文，他认为罗斯贝才是他学识方面真正的导师<sup>[18]</sup>。罗斯贝后来首先引入了波的群速度概念，并由他的中国学生叶笃正系统研究了大气中的能量频散<sup>[19]</sup>。图3是1948年10月29日罗斯贝就叶笃正投给气象学杂志的“关于大气中能量频散”一文写给他的另一位学生，时任气象学杂志编辑的乔治·普莱兹曼(G. W. Platzman)的信。信的内容翻译如下：

“有没有谁已经把叶的数学解析解部分通读了一遍？我更倾向于他的文章应尽可能多地专注于基本问题，而相对少注意细节的数学计算。孤立

脊的崩溃和频散很重要。海岸效应不应该被包括。请让叶理解为了他自己,要避免在文章中放入太多内容。这样只会导致没有人读这篇文章。必须认识到,叶的论文所处理的正是普林斯顿项目的核心问题,必须写出来以推广这一进展。最美好的祝愿, C. G. R.”

信里面提到的孤立脊(solitary ridge)即阻塞,是一种重要的大气环流现象,其建立、维持和崩溃往往和极端天气相联系。在信中罗斯贝强调叶笃正的这篇论文所解决的正是由查尼和冯·诺依曼领导的首次数值天气预报实验(即信中提到的普林斯顿项目)的核心问题。事实上这次数值天气预报实验所采用的也正是罗斯贝正压无辐散大气的绝对涡度守恒方程。由此可见罗斯贝及其学派对现代气象学发展的巨大影响力。

在这次数值天气预报实验成功的基础上,罗斯贝的再传弟子诺曼·菲利普斯于1955—1956年间成功地用两层准地转模式实现了长时间(1个月)积分的大气环流实验<sup>[20]</sup>。罗斯贝、冯·诺依曼等马上敏锐地认识到菲利普斯实验对气候预测和研究的意义。冯·诺依曼于1955年10月26—28日组织了一个研讨会,明确提出了用数值方法预测气候振荡的问题<sup>[21]</sup>,而罗斯贝则在他生前的最后一篇文章“气象学的当前问题”中用很长篇幅讨论了和气候变化相关的问题<sup>[14]</sup>。

后面几十年中导致地球系统科学诞生的多个大型国际研究计划中,有很多是由罗斯贝的学生和朋友们在上面提到的这些成就基础上发展起来的。下面就先举例介绍罗斯贝对他们开创地球系统科学的影响,然后再从“气象学的当前问题”看罗斯贝本人的论述。

#### 4 罗斯贝对朋友和学生的影响

地球系统科学强调地球不同圈层之间的相互作用。小贝叶克尼斯曾是挪威卑尔根学派的领袖人物,是天气学的大家。1950年代开始研究气候问题,后来对热带和中纬度海气相互作用做出了开创性贡献,比如提出了关于厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)的贝叶克尼斯反馈机制。在罗斯贝纪念

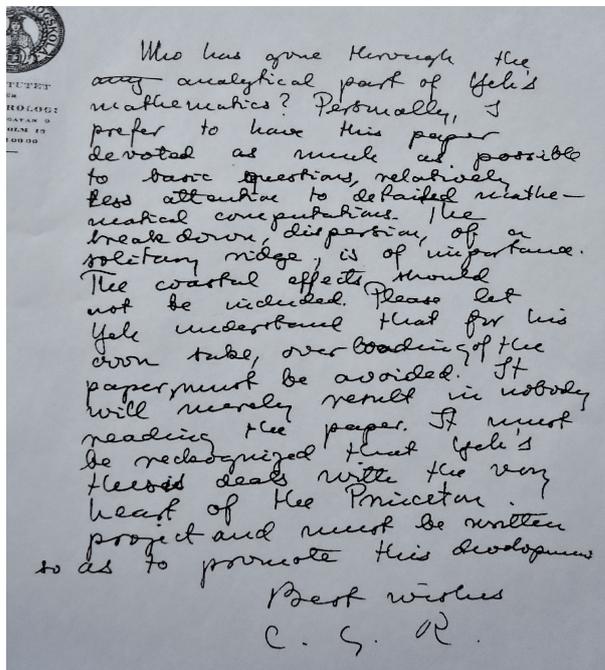


图3 罗斯贝就叶笃正“大气中能量频散”论文给普莱兹曼的信(感谢瑞典气象学家 A. Persson 提供照片)

文集的“北大西洋的近期增暖”一文里他专门加了一段历史注记(见文献[11],第65页),提到罗斯贝曾反复提及一个联合的海洋学—气象学项目的可能性,为以后建立一个具有普遍性的、关于气候变化的地球—太阳物理学理论搭建宽广的基础。罗斯贝并于1957年春天向小贝叶克尼斯建议这个联合海洋学—气象学项目的中心可以放在挪威卑尔根。正是在罗斯贝的鼓动下,小贝叶克尼斯答应支持这个项目,并开始搜集数据,从事这方面的研究工作。

查尼是罗斯贝之后对国际气象学发展产生巨大影响的另一位著名科学家。虽然并非罗斯贝的学生,但查尼把罗斯贝当成自己真正意义上的导师。两人在学术观点和志趣上心心相印,并成为终生的朋友。正是罗斯贝向冯·诺依曼力荐查尼领导在普林斯顿高等研究院的数值天气预报项目,并从精神和人员上给予查尼大力支持<sup>[22]</sup>。后来查尼除了在大气动力学理论做出多方面影响深远的原创贡献以外,还组织领导了第一次“全球大气研究实验”<sup>[18]</sup>。作为一位杰出的理论家,查尼于1975年首次提出了植被通过反照率影响非洲萨赫勒地区的干旱和沙漠化的动力学理论模型<sup>[23]</sup>。

1979年由查尼领衔的关于二氧化碳和气候的“查尼报告”开启了国际气候变化评估的先河<sup>[24]</sup>。

伯特·博林是罗斯贝在斯德哥尔摩大学培养的研究生。博林刚开始从事数值天气预报和大气动力学研究，是罗斯贝在瑞典开展数值天气预报研究和业务化的主要助手。罗斯贝在博林以数值天气预报的研究完成博士论文以后，就建议他转向从事大气化学的研究，具体是指确定大气中不同化学成分的滞留时间<sup>[25]</sup>。博林在罗斯贝的建议下转向大气化学和生物地球化学循环的研究。后来他是领导国际上标志地球系统科学成立的重大科学研究计划如“世界气候研究计划(WCRP)”、“国际地圈—生物圈计划(IGBP)”的重要科学家，并担任首任政府间气候变化专门委员会主席约10年，为气候变化研究和地球系统科学做出了重要贡献。

叶笃正是罗斯贝在芝加哥大学培养的研究生。他和罗斯贝在斯德哥尔摩大学的学生顾震潮(顾在西南联大从赵九章读研究生，和杨振宁、黄昆为同学)同于1950年回国，两人在赵九章先生领导下，引领了新中国在大气动力学、数值天气预报和云雾降水物理等方面研究的辉煌成就。1980年代，叶笃正和博林、克鲁岑等一起成为筹划“国际地圈—生物圈计划(IGBP)”的特别委员会成员，是国际上倡导全球变化研究的先驱者之一，开创并领导了中国的全球变化研究，提出了气候变化的敏感带、有序人类活动等重要概念，为中国的地球系统科学在国际上占有一席之地和21世纪以来我国在这方面研究的长足进步做出了重要贡献<sup>[26]</sup>。

而罗斯贝之所以能通过他的朋友和学生们的地球系统科学的成立和发展产生如此影响，除了他的个性魅力，很大程度上也和他本人的观点有直接关系。

## 5 罗斯贝在“气象学的当前问题”中的论述

“气象学的当前问题”<sup>[14]</sup>原文用瑞典语发表于1956年，是罗斯贝写给瑞典自然科学理事会的报告，全面反映了罗斯贝对气象学未来发展的看法。

这篇文章被翻译成英文，放在《运动中的大气和海洋》一书卷首。文章由五个部分组成，分别为：(1)行星尺度的平衡和环流问题；(2)大气环流；(3)天气预报；(4)大气中物质的分布；(5)控制大气过程的尝试。其中大气环流部分提出了对阻塞和大气指数循环(指大气环流形态的准周期循环)等现象的动力学解释问题，而天气预报部分则着重在刚刚开始不久的数值天气预报方面的进展。这也是众所周知的罗斯贝对此做出革命性贡献的两个领域，在前面的部分已经做了介绍，就不再赘述。

这里要强调的是罗斯贝文中的第(1)、(3)、(5)部分，因为这几个部分的主题恰恰就是30年后地球系统科学所关注的主要问题。事实上，罗斯贝在文章一开始就开门见山指出，尽管当时气象学家们对于大气在化学物质的循环中、在某些地质过程中，以及在地球表面生物过程中作用的研究，还只有附带的、边缘的兴趣，但是未来对这些化学物质扩散和循环的了解和预测将变得更为重要。

在文章的第(1)部分里，罗斯贝首先深入讨论了行星地球的辐射平衡和海洋的热储存问题。他正确地指出，即使在几十年的时间尺度上，简单地认为行星地球和外太空之间处于完全辐射平衡的假设也是值得商榷的，因为热量可以储存在海洋里，后者可能在几十年甚至几百年后再影响对大气的热量和水汽交换。他接着以此强调联合的海洋—大气观测和研究的重要性。紧接着，罗斯贝讨论了二氧化碳及其循环的问题。尽管当时大气中二氧化碳浓度(约320 ppm)相对于工业革命前(约290 ppm)，仅仅增加了10%，罗斯贝引用当时普拉斯(G. N. Plass)的研究认为，大气二氧化碳浓度的倍增可能导致3.6℃的增温，但指出这有很大的不确定性，因为大气中水汽和云的变化都会形成对实际增暖的反馈。我们现在已经知道普拉斯对增暖幅度的计算实际上是错误的，在物理上合理的估计要到1967年才由真锅淑郎和他的合作者做出<sup>[1]</sup>。在此基础上，罗斯贝强调了在全球不同地方对大气二氧化碳浓度观测的重要性和存在的困难。在这一部分，罗斯贝还讨论了用氘研究水循环变化的问题。

在第(3)部分，罗斯贝讨论了和大气中海盐气

溶胶、硫化物、氮化物,甚至放射性物质分布相关的大气输运和湍流扩散等问题,以及海洋和大气间包括钠离子、氯化物、硫化物等物质交换的问题。而在第(5)部分,除了讨论当时开展的人工影响天气研究以外,罗斯贝提到了在平流层中播撒气溶胶的可能性,但他同时提出,对这样做的后果了解需要做深入研究。

上述罗斯贝所提到的,在大气动力学和天气预报领域以外的涉及气候变化、化学物质循环、水循环,甚至人工影响气候的地球工程研究,大多成为了1980年代以来至今活跃的地球系统科学研究的重要内容,包含在世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈—生物圈计划(IGBP),到现在的未来地球(Future Earth)等一系列国际大科学计划中。从中我们不难体会到罗斯贝对科学发展的卓越远见。

## 6 总结与展望

罗斯贝是引领20世纪现代气象学数理科学化

和爆发性发展的中心人物,他的理论研究对气象学、海洋学、天体物理学都产生了深远影响。通过介绍他本人的论述和他的多位学生和学生对地球系统科学形成的作用和影响,从罗斯贝的直接倡导和间接影响两个角度,说明罗斯贝无可置疑地应被认为是促使地球系统科学形成的重要奠基人之一。

罗斯贝具有把关注现实和应用问题与从事理论研究结合起来的高超能力,同时他的理论研究具有强调物理直觉,善于简化问题的特点。在“气象学的当前问题”一文中,他明确提出对于气候系统内与热储存和二氧化碳的生物地球化学循环等相关的研究将成为崭新类型的理论问题。最近几十年来,对地球系统的观测数据积累愈来愈丰富,相关的耦合模拟也愈来愈多,但相关的理论研究整体上还很缺乏。在这样的时刻,在继续强调地球系统科学对支撑可持续发展作用的同时,回顾罗斯贝在气象学发展历程中理论工作的独特风格,对于如何建立关于复杂地球系统的基本理论,应该是很有借鉴意义的。

### 参考文献

- [1] The Nobel Committee for Physics. 2021, [https://www.nobelprize.org/uploads/2021/10/sciback\\_fy\\_en\\_21.pdf](https://www.nobelprize.org/uploads/2021/10/sciback_fy_en_21.pdf)
- [2] 叶笃正,符淙斌,季劲钧等.地球科学进展,2001,16(4):453
- [3] Steffen W, Richardson K, Rockström J *et al.* Nature Rev. Earth Environ., 2020, 1: 54
- [4] 赵九章.《现代气象学问题论丛》序.见:叶笃正,李麦村著.大气运动中的适应问题.北京:科学出版社,1964
- [5] Motter A E, Campbell D K. Physics Today, 2013, 66(5): 27
- [6] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. Nature, 2015, 525: 47
- [7] National Research Council. Earth System Science: Overview: A Program for Global Change. Washington DC: The National Academies Press, 1986
- [8] Crutzen P J, Stoermer E F. Global Change Newsletter, 2000, 41: 17
- [9] Seitzinger S P, Gaffney O, Brasseur G *et al.* Anthropocene, 2015, 12: 3
- [10] 汪品先.地球科学进展,2014,29(11):1277
- [11] Bolin B (ed). The Atmosphere and the Sea in Motion: Scientific Contributions to the Rossby Memorial Volume. The Rockefeller Institute Press, 1959
- [12] Lu J, Schneider T. Adv. Atmos. Sci., 2017, 34(10): 1185
- [13] Lu J. Adv. Atmos. Sci., 2021, 38(5): 707
- [14] Rossby C G. Current Problems of Meteorology. pp. 9—50. In: [11]
- [15] Bjerknes V. Meteorol. Z., 1904, 21: 1
- [16] 曾庆存.物理,2013,42(5):300
- [17] Rossby C G. J. Mar. Res., 1939, 2: 38
- [18] Lindzen R S, Lorenz E N, Platzman G W (ed). The Atmosphere—A Challenge: The Science of July Gregory Charney. Boston: American Meteorological Society, 1990
- [19] Yeh T C. J. Meteor., 1949, 6(1): 1
- [20] Phillips N. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1956, 82: 123
- [21] von Neumann J. Some Remarks on the Problem of Forecasting Climate Fluctuations. In: Pfeffer R (ed). Dynamics of Climate. Pergamon Press, 1955. pp. 9—11
- [22] Harper K C. Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology. Cambridge: MIT Press, 2008
- [23] Charney J. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1975, 101: 193
- [24] Charney J, Arakawa A, Baker D J *et al.* Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. Washington DC: The National Academy Press, 1979
- [25] Bolin B. Tellus, 1999, 51A-B: 4
- [26] Fu C B. Adv. Atmos. Sci., 2017, 34(10): 1159