

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.350>



浅谈大气科学与地质学的学科交叉

张仲石^{1,2,3}, 李双林^{1,2,4}, 王会军^{4,5,6}, 郭正堂^{7,8,9}

1. 中国地质大学环境学院大气科学系, 湖北武汉 430074
2. 中国气象局—中国地质大学极端天气气候与水文地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074
3. 南通大学地理科学学院, 江苏南通 226019
4. 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029
5. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044
6. 中国科学院大气物理研究所, 竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029
7. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
8. 中国科学院大学, 北京 100049
9. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 北京 100044

摘要: 随着新一轮的科技革命蓬勃兴起, 大气科学学科正步入地球系统科学的新时代, 学科交叉必然产生新的增长点. 大气科学的发展经历了观测—理论—模型的三个阶段, 很好地践行了“数据—模式驱动科学”的研究范式. 然而, 地质学具有更深的时空复杂性, 需要更长时间的数据积累. 目前, 地质学正面临着研究范式由观测向理论和模型的转变. 大气科学与地质学的交叉将为这一转变提供经验和启示. 同时, 大气科学与地质学的交叉, 需要研究气候系统上边界(大气顶的太阳辐射)和下边界(固体地球形态)变化导致的大气和海洋环流的响应. 研究这些问题, 将成为发展同时统辖“分钟、小时”直至“地史”的时间尺度的大气科学理论的关键, 也是未来地球系统模式发展的重要方向之一. 中国地质大学(武汉)的大气科学专业, 作为推动大气科学与地质学交叉的排头兵, 任重而道远.

关键词: 大气科学; 地质学; 学科交叉.

中图分类号: P314

文章编号: 1000-2383(2022)10-3569-11

收稿日期: 2022-07-05

Introduction of Crossing Disciplines between Geology and Atmospheric Science

Zhang Zhongshi^{1,2,3}, Li Shuanglin^{1,2,4}, Wang Huijun^{4,5,6}, Guo Zhengtang^{7,8,9}

1. Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Centre for Severe Weather and Climate and Hydro-Geological Hazards, Wuhan 430074, China
3. School of Geographic Science, Nantong University, Nantong 226019, China
4. Climate Change Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
5. Key Laboratory of Meteorological Disaster/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China
6. Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
7. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

基金项目: 科技部国家重点研发计划第二课题(No.2018YFA0605602); 国家杰出青年科学基金(No.42125502).

作者简介: 张仲石(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事气候模式开发、过去两千年气候模拟、新生代气候演变和动力学模拟研究. ORCID: 0000-0002-2354-1622. E-mail: zhongshi.zhang@cug.edu.cn

引用格式: 张仲石, 李双林, 王会军, 郭正堂, 2022. 浅谈大气科学与地质学的学科交叉. 地球科学, 47(10): 3569-3579.

Citation: Zhang Zhongshi, Li Shuanglin, Wang Huijun, Guo Zhengtang, 2022. Introduction of Crossing Disciplines between Geology and Atmospheric Science. *Earth Science*, 47(10): 3569-3579.

8. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

9. *Center for Excellence in Life and Palaeoenvironment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China*

Abstract: With the rise of a new-round scientific and technological revolution, the era of Earth System Science is coming. Crossing the disciplines between geology and atmospheric science will inevitably bring new developments in Earth science. Atmospheric science has undergone three development stages in the past four centuries, including collecting data, creating theories, and building models. However, geology requires more prolonged data accumulation due to the more profound spatio-temporal complexity. At present, geology is facing a shift in the research paradigm from collecting data to creating theories and building models. Crossing the disciplines between geology and atmospheric science will provide experiences and inspirations for this shift. Here, two scientific questions are essential in crossing the fields. First, how does the solar forcing influence atmospheric and oceanic circulation? Second, how does the solid Earth surface, including topography and bathymetry, modify the Earth climate system? Answering these two questions will help to create new theories on multi-time scales and develop Earth system models in a new generation. The department of atmospheric science at China University of Geosciences (Wuhan) has become a pioneer in promoting this disciplinary cross in China but still has a long way to go.

Key words: atmospheric science; geology; interdisciplinary.

当前,新一轮的科技革命蓬勃兴起,科学研究范式逐渐变革,各学科之间的交叉、融合日益紧密、快速.在这样的背景下,地球科学需要从单一学科的研究真正转向多学科大跨度的交叉研究,从定性研究转向定量化的过程研究,从目前相对独立的数据观测和数值模拟研究转向以新数据获取和大数据支撑的数据—模式驱使科学研究.可以说,哪些国家能真正形成“数据—模式驱使科学”的研究体系,率先构建出以新数据获取和大数据支撑的、全面耦合地球固体和流体圈层过程的先进数值模型系统,哪些国家就有望成为未来地球科学的引领者和下一个新理论的主要贡献者(郭正堂,2019).

大气科学学科正步入地球系统科学的新时代,学科交叉成为必然.大气科学是研究地球和行星大气中发生的各种现象及其变化规律,进而利用这些规律为社会服务的学科.大气科学的知识体系起始于气象学,早期以大气现象描述为主,伴随着数学、物理学、化学等基础学科(又称“母学科”) 在气象研究中的广泛应用,逐步形成了大气动力学、大气物理学和大气化学等分支学科(刘哲等,2021).大气科学不仅要和数学、物理学、化学等基础学科,以及信息、材料、航天等应用学科深度交叉,还要和地球科学的其他分支学科交叉.大气圈与地球的其他圈层,包括水圈(含冰冻圈)、岩石圈和生物圈(含智慧圈)存在强烈的物质、动量和能量的交换.深入研究这些圈层相互作用,才有助于未来提高天气预报和气候预测的准确率,实现从时间、空间和预报对象的无缝隙预报(刘哲等,2021).

当前的大气科学,研究对象已经从单纯的大气

圈,拓展到水圈、冰冻圈、生物圈和岩石圈的表层,已经进入气候系统阶段,正逐步进入地球系统阶段(周天军等,2020).在这一发展过程中,大气科学有望建立能同时统辖“分钟”、“小时”直至“地史”的多时间尺度的理论体系(刘哲等,2020).在这些时间尺度上,系统研究大气运动的规律和演变,既从当前的局部“以小见大”,又在历史长河中审视当前的问题,这正是大气科学基础研究的重要目标(刘哲等,2020).要实现这一目标,大气科学需要和其他学科交叉,地质学是关键学科之一.

本文尝试讨论大气科学与地质学如何实现学科交叉.首先简要回顾大气科学的发展历史,对比大气科学与地质学的学科差异,然后从大气科学的视角分析学科交叉需要关注的关键科学问题,最后阐述中国地质大学(武汉)大气科学专业在这一交叉领域可以发挥的作用.

1 大气科学的发展简史

人类自诞生之时,便在地球上经历风雨雷电、寒暑交替等天气气候变化;在经历各种天气和长期气候演化过程中扩散到了全球.在我国,有确凿考古证据的季节观测可以追溯到新石器时代.陕西榆林石峁城址外城东门的天文考古学(吕宇斐等,2019)证实,早在4300年前,我国先民就已掌握了立竿测影的系统测量方法,可确定二分(春分秋分)二至(夏至冬至)的日期,划分四时.最早的有关天气现象的文字记录是3000年前的殷墟甲骨文卜辞.在欧洲,亚里士多德所著的《气象》(De Meteorologi-

ca, 公元前 340 年)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(Frisinger, 1971; 叶鑫欣等, 2014)。然而,人类早期的大气观测,并非定量;而是一种定性甚至有点抽象的描述。例如长沙马王堆 3 号汉墓出土的《天文气象杂占》帛书中记录的云图。

现代意义定量的大气观测始于 16 世纪前后。一般认为,意大利人伽利略(Galileo Galilei)在 1597 年发明测温仪,这是一种不带刻度的温度计。随后在 1612 年,意大利人圣托里奥(Santorio Santorio)发明了第一台带有刻度的温度计,虽然其测量精度较低。1654 年,费迪南多二世(Ferdinando II de' Medici)发明了首台玻璃液体温度计。1714 年,德国人华伦海特(Gabriel Fahrenheit)发明了首台水银温度计。此时,温度测量的精度才大幅度提高。1643 年,意大利人托里拆利(Evangelista Torricelli)发明了水银气压计。这些现代意义的观测仪器,在 17 世纪中叶,随着欧洲传教士进入中国。例如 1743 年,法国天主教耶稣会的哥比利用酒精温度计记录了北京极端高温(张德二, 2004)。

随着各种气象测量仪器的陆续发明,气象观测网络也逐渐形成。最早的气象观测网出现在 1654 年。费迪南多二世(Ferdinando II de' Medici)倡导了首个观测网,该观测网由佛罗伦萨、巴黎、华沙等多地的气象站组成,这些气象站的数据都汇集到西芒托学院(Accademia del Cimento)。到 18 世纪的后半叶,气象观测网在欧洲陆续出现。其中,由德国历史上普法尔茨领地统治者卡尔·特奥多尔(Charles Theodore)倡导的,于 1780 年建立的普法尔茨气象学会,建立了欧洲和欧洲以外的气象观测网,被认为是第一个国际气象观测网和观测组织。1849 年,史密森学会开始在美国建设气象观测网(Millikan, 1997)。

不断发展的气象观测网络,产生了大量观测数据。1817 年,德国自然地理学家洪堡(Alexander von Humboldt)发表了全球平均温度地图,这是第一次全球气候分析。1820 年,德国学者布兰德斯(Heinrich Wilhelm Brandes)将过去各地的气压和风的同时间观测记录填入地图,绘制了世界上第一张天气图。1860 年,英国气象学家菲茨罗伊(Robert Fitz-Roy)发表了他用天气图做的逐日天气预报结果,也创造了“weather forecast”这个英文词组。1896 年,国际气象组织(International Meteorological Organiza-

tion, 成立于 1873 年)发表了第一个全球云图集。

随着大量数据的积累,大气科学的一些重要理论逐步产生。早期的大气科学理论相对定性,例如 1735 年英国人哈德来(George Hadley)提出的全球单圈环流理论。定量研究的大气科学理论始于近代的挪威学派。1904 年,挪威气象学派的代表人物皮耶克尼斯(Vilhelm Bjerknes)率先提出了“天气预报是描述大气运动的数学方程组的解”的理论观点,标志着人类正式将物理和数学的定量表达引入气象学研究,奠定了现代数值天气预报和大气数值模拟的理论基础。1919 年,挪威学派的气旋理论首次发表(Bjerknes, 1919)。1920 年,塞尔维亚地球物理学家米兰科维奇(Milutin Milanković)在《Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire》书中提出了古气候学的经典理论,即地球上的冰期间冰期变化由地球轨道参数变化引起的太阳辐射改变决定。1923 年,英国物理学家沃克(Sir Gilbert Thomas Walker)首次描述了热带东、西太平洋气压场存在跷跷板式的年际变化,并在 1924 年首次使用“南方涛动”(Southern Oscillation, SO)这个英文词组来描述这一现象(后来人们发现该现象与 El Nino 密不可分,故合并称为 ENSO)。1938 年,英国学者卡伦德(Guy Callendar)在前人(例如 John Tyndall 和 Svante Arrhenius)工作的基础上,用一个一维辐射转换模型显示大气 CO₂ 浓度增加可以加热大气(温室效应, Callendar, 1938)。1939 年,美国科学家罗斯贝(Carl-Gustaf Arvid Rossby)提出了大气长波理论即罗斯贝波(Rossby waves)理论(Rossby, 1939)。

罗斯贝波理论提出后,大气科学的诸多理论开始涌现。美国气象学家查尼(Jule Gregory Charney)和英国气象学家埃迪(Eric Thomas Eady)在 Rossby 波理论的基础上,提出了温带气旋发展的斜压不稳定理论(Charney, 1947; Eady, 1949)。同时,查尼等提出大气运动的尺度理论,导出了准地转大气运动方程,为后来各种滤波模式的建立,以及多种近似理论(如半地转、非线性平衡、准地转位涡理论)奠定了基础。1947 年,英国气象学家萨克利夫(Reginald Cockcroft Sutcliffe)导出了地面系统发展与高空动力过程的诊断关系(Sutcliffe, 1947),为地面环流形势分析预报奠定了基础。1963 年,英国数学和海洋学家龙格-赫金斯(Michael Selwyn Longuet-Higgins)把 Rossby 波频散理论推广到旋转球面大

气,建立了定常行星波球面传播的大圆路径理论(Longuet-Higgins, 1964).1981年,英国气象学家霍斯金斯(Brian John Hoskins)和卡罗伊(David John Karoly)分析了球面行星波对热力和地形的定常线性响应,确立了定常行星波的波源,部分解释了大气环流遥相关现象(Hoskins and Karoly, 1981).1963年,美国气象学家罗伦兹(Edward Norton Lorenz)提出了混沌理论(Lorenz, 1963),明确了短期天气预报存在可预报性上限,应使用概率观念来预报天气变化.他的“吸引子”研究在许多领域得到了广泛应用.同时,许多模式试验发现初始条件中的微小误差随时间积分不断增大且向更大尺度扩散,故罗伦兹于1969年提出了模式可预报时限与天气系统生命史相当(Lorenz, 1969).罗伦兹的理论为概率预报、数值统计预报、可预报性以及集合预报提供了重要理论基础.在热带的动力学方面,郭晓岚(Kuo, 1949)发表了解释热带天气系统发展的正压不稳定理论.1964年,查尼和挪威气象学家埃利亚森(Arnt Eliassen)提出了热带气旋发展的第二类条件不稳定理论,即CISK理论(Charney and Eliassen, 1964).Kuo(1965)提出了用大尺度环境变量刻画次网格对流活动的参数化理论.1966年,日本气象学家松野太郎(Taroh Matsuno)提出了热带波动传播理论(Matsuno, 1966).进入1970年代,人们发展了波动-CISK理论、蒸发-风反馈理论和外源强迫理论来解释热带大气低频振荡(MJO).这些理论不仅很好地解释了热带天气气候系统的形成发展,也为ENSO海气相互作用理论(Philander, 1983)提供了基础.海气相互作用理论的发展,又为陆气相互作用、生物圈-大气圈、冰冻圈-大气圈相互作用等理论的建立和完善提供了启发和借鉴.这进一步催生了物理气候系统理论及地球系统多圈层相互作用理论.从此,大气科学研究的外延变得无限广阔.

皮耶克尼斯提出控制大气运动的理论之后,大气科学进入了数值天气预报和发展数值模型的时代.1911年,英国数学家理查德森(Lewis Fry Richardson)开始用数值方法,积分他所发展的天气预报方程组,尝试进行数值天气预报.虽然这次尝试并不成功,但他1922年发表的数值天气预报论文《Weather Prediction by Numerical Process》,为1950年代早期数值天气预报在美国的成功提供了重要借鉴.1950年,美国气象学家查尼设计了准正压(一

层)滤波模式(二维模型),和冯·诺依曼(John von Neumann)合作,使用世界上第一台电子计算机(电子数字积分计算机ENIAC),首次成功地对北美地区500 hPa位势高度场的24 h变化作出了预报,成为历史上第一个1天的数值天气预报,也是第一次成功的数值天气预报.1950年代后期,美国科学家基于基本方程,开始构建三维大气环流模型(General Circulation Model, GCM).1955年,美国气象局为此成立了专门的研究机构——General Circulation Research Section,1963年它更名为地球流体动力学实验室(GFDL),1968年搬入普林斯顿大学.这一时期,GCM发展的关键人物包括菲利普斯(Norman Phillips)、真锅淑郎(Syukuro Manabe)等人.20世纪60年代,荒川昭夫(Akio Arakawa)和明茨(Yale Mintz)的工作使得GCM可以长时间稳定积分.布赖恩(Kirk Bryan)发展了第一个三维海洋环流模型.1969年,真锅淑郎和布赖恩开始考虑将大气环流模型和海洋环流模型耦合在一起.1973年,英国气象局UK Met Office的科学家发表了英国第一个GCM的模拟结果,这个模式他们自1963年开始构建.1975年,真锅淑郎和布赖恩等发表了新的海气耦合模式的模拟结果,虽然这个模式的分辨率只有500 km,但它标志着海气耦合模式技术的成熟(Bryan *et al.*, 1975; Manabe *et al.*, 1975).

自从20世纪70-80年代,地球系统模式的蓬勃发展拉开了序幕.1989年,国际大气模式对比计划(Atmospheric Model Intercomparison Project, AMIP)启动(Cess *et al.*, 1989);这些模拟结果为1990年的第一次政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告服务.1980年代末到90年代初,海气耦合模式(AOGCM)快速发展,新一代的海气耦合模式中包括了陆面和海冰过程.1995年国际耦合模式对比计划(CMIP)启动;这些模式用于IPCC第二次评估报告的气候预估试验.同年,英国科学家在《Nature》杂志上发表了考虑大气硫酸盐气溶胶的GCM模拟结果(Mitchell *et al.*, 1995);自此大气气溶胶模型开始纳入AOGCM.2000年,英国科学家在《Nature》杂志上发表耦合碳循环的气候模型(Cox *et al.*, 2000);自此许多模式开始考虑气候系统中的碳循环过程.2000年代初期,耦合模式对比计划第二阶段(CMIP2)的气候模式结果支撑IPCC第三次评估报告.2007年前后,气候模型包括了动态植被、大气化

学等过程,耦合模式对比计划第三阶段(CMIP3)的结果(Meehl *et al.*, 2007)支撑了IPCC第4次评估报告.2008年,耦合模式对比计划第五阶段(CMIP5)启动,根据CMIP5的网站,全球共有27家单位,61个模式的不同版本参加对比.这些模式的模拟结果支撑了IPCC第5次评估报告.2013年前后,气候系统模式逐步进入地球系统模式阶段.2016年,耦合模式对比计划第六阶段(CMIP6)启动(Eyring *et al.*, 2016),此时参加CMIP6的模式几乎都用地球系统模式来命名.中国的气候模式发展几乎与发达国家同步,并积极参与国际模拟对比计划(周天军等,2019).

当然,气候模式和地球系统模式的发展与大气科学理论的进步相互促进.例如,1967年,真锅淑郎和韦瑟尔德(Richard Wetherald)首次可靠地预测了大气CO₂浓度加倍所引起变暖的大小(Manabe and Wetherald, 1967),并利用大气环流模型模拟了大气CO₂浓度加倍的全球气候效应(Manabe and Wetherald, 1975),夯实了全球变暖的理论基础.1979年,哈塞尔曼(Klaus Hasselmann)提出最优检测的思想之后(Hasselmann, 1979),随着模式的发展和模拟结果的积累,检测归因技术快速发展,人类活动导致全球变暖这一结论最终得以明确.2021年,真锅淑郎和哈塞尔曼,因“对地球气候的物理模拟、量化变率和可靠地预测全球变暖”作出的贡献而获得诺贝尔物理学奖.

2 大气科学与地质学的学科差异

在过去四百年中,大气科学的发展经历了“观测—理论—模型”三个阶段,很好地践行了“数据—模式—驱动科学”的研究范式.如果说,伽利略1597年发明温度计代表现代大气观测的开始,20世纪上半叶挪威学派和芝加哥学派的诞生代表大气科学基本理论的成熟,1950年第一次数值天气预报的成功代表模式发展的开始;大气科学的原始数据积累经历了大约300年,而理论和模型的发展非常迅速,在100年的历史里突飞猛进(图1).

很显然,地球科学各分支学科,都要经历类似的“观测—理论—模型”三阶段,地质学也不例外.然而与大气科学相比,地质学具有更深远的时空复杂性.如果把漫长的地质历史比喻成一条时间线,现代在这条线上如同一个点.大气科学侧重于关注这一个时间点上的大气空间运动规律.地质学则研

究地球形成以来(46亿年)物质组成、内部构造、外部特征、各圈层间的相互作用和演变历史.它既要研究不同时间维度的变化规律,又要研究不同空间维度的分布特征;需要的基础数据积累量远大于大气科学.同时,地质学的研究对象绝大部分深埋地下,基础数据获取有时还相当困难.因此,地质科学的数据积累阶段要比大气科学漫长.

随着科学的进步,地质学正面临着新的挑战.例如,2021年,美国佛蒙特大学(University of Vermont)地质系历经百年后解散(Bierman, 2021).这一事件说明传统的地质学发展到了一个新的阶段.即地质学需要由观测,向理论和模型转变的阶段,数据—模式驱动的研究范式变革已成为必然.这一过程中,地质学可以从大气科学的发展过程中获得启示.

大气科学学科是地球系统模型发展的先驱,然而地质学学科对固体地球模型的发展和完善,是地球系统模型发展的关键之一,也是未来地球系统科学发展的“先手棋”之一.目前的地球系统模型,虽不完善,但已经包括了地球的流体圈层(大气、海洋、地表径流等)及部分的地球化学过程,却不考虑固体地球(包括地表和深部)的变化.未来的地球系统模式发展,固然要在无缝隙天气—气候预报模式、高分辨率模拟等诸多方面(周天军等,2020)进一步改进,提高模拟的精度和性能;也需要耦合固体地球过程,为新的地球科学理论作出贡献.

3 大气科学与地质学学科交叉的关键科学问题

大气科学与地质学学科交叉可以有很多的关键科学问题,这里我们不妨从大气科学和气候系统的视角来思考这些关键科学问题.研究现代气候系统,是在既定的地形和洋盆条件下(气候系统的下边界,也是流体地球和固体地球的边界)和既定的太阳辐射条件下(气候系统的上边界)研究大气运动以及海气相互作用的规律.在这样的条件下,气候系统的研究已经可以覆盖年际到千年际时间尺度.然而,在更长的时间尺度上,地质历史时期气候系统的下边界和上边界都发生了明显的改变.

在不同时间尺度上,地球流体圈层(大气圈、水圈)和固体圈层的界面不断发生变化.这一界面其实就是固体地球的形态,它不仅包括陆地表面地形,还包括海底洋盆的结构和深度.构造时间尺度

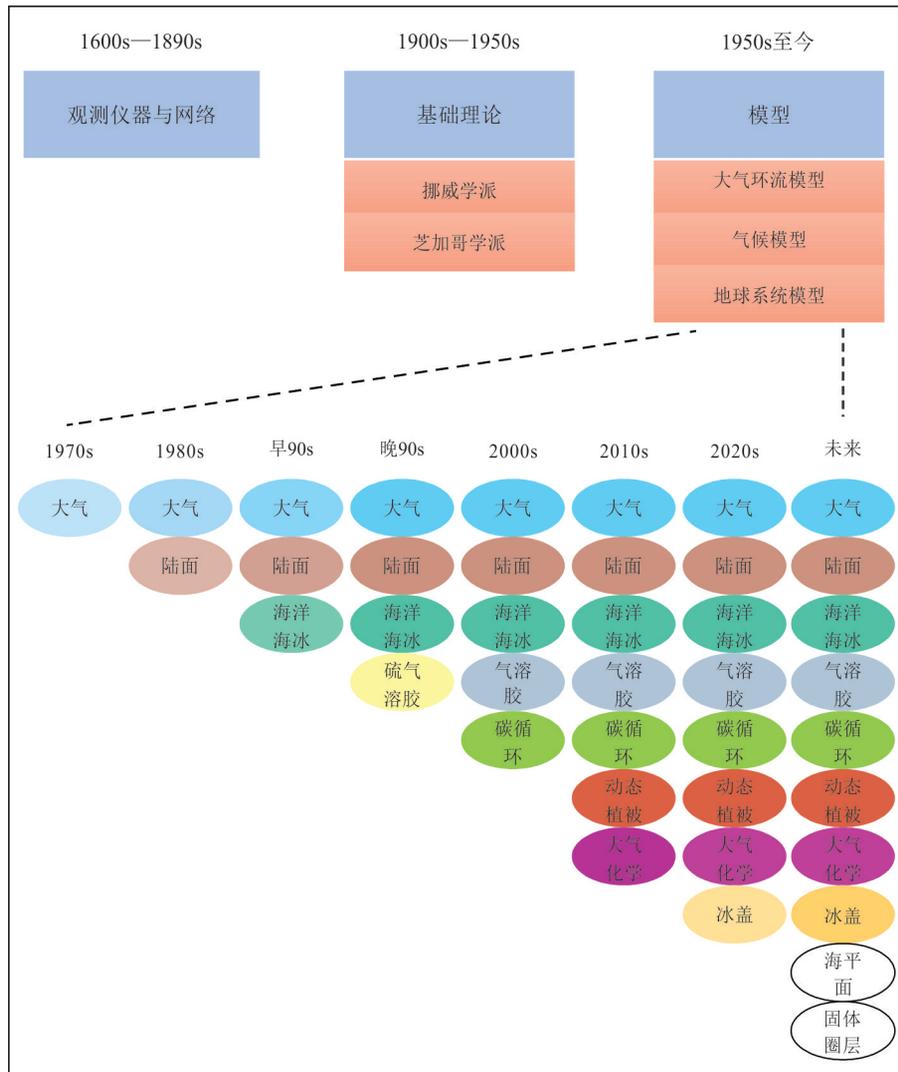


图1 大气科学与地球系统模式的发展历史

Fig.1 History of atmosphere science and Earth system models

(超轨道时间尺度)上,地幔过程和板块运动改变着固体地球的形态,塑造了海陆分布、高山深谷、沧海桑田.轨道时间尺度上,气候系统内部的冰盖消长,海平面波动,也周期性改变着固体地球的形态.千年一年代际时间尺度上,火山喷发、地震、滑坡、泥石流等都会改变地形,导致气候的波动,甚至是不可逆的气候变化.而现代气候学对这一固体下界面变化的关注非常少,毕竟这一界面通常是地质学的研究对象.

地质历史时期地球接受到的太阳辐射不断发生改变.这种变化在轨道时间尺度上尤为明显,会出现周期性波动.虽然,我们已经比较清楚太阳入射能量如何在大气顶端(气候系统的上界面)重新分配,但对这些能量变化如何在气候系统各要素之间再分配、气候系统内反馈过程如何改变等知之甚

少.然而,工业革命以来太阳辐射的变化非常小;因此,现代气候学对上界面变化的关注也非常少.

如果我们要发展同时统辖“分钟、小时”直至“地史”的时间尺度的大气科学理论体系(刘哲等, 2020),就需要关注气候系统上下边界的变化.以下两个科学问题(固体地球的形态如何影响气候?气候系统响应太阳辐射的差异性?)就显得尤其关键.第一个问题重点关注构造时间尺度(百万年以上时间尺度)驱动气候演化的关键因子.第二个问题则重点关注轨道时间尺度(万年到几时万年时间尺度)驱动气候演化的关键因子.

3.1 固体地球的形态如何影响气候?

固体地球形态是驱动地质历史时期气候演化的关键因素.每一次固体地球演化,都会改变地表地形、洋盆结构和深度,从而重组大气和海洋环流、

影响气候,并对固体圈层和流体圈层之间的反馈过程(例如,碳循环反馈、气候—风化—地形反馈)产生影响.一个非常明显的例子,气候系统的南北半球不对称性.今天,南极有很大的冰盖发育;那里的冰盖如果全部融化,全球的平均海平面会上升大约 60 m;而北半球的冰盖却很小,只分布于格陵兰岛,如果全部融化,全球的平均海平面会上升大约 7 m.可是在地质历史时期,例如中生代,这种地球气候的南北半球的不对称性并不显著.目前,有关现代气候南北半球不对称性的解释(Toggweiler and Bjornsson, 2000; Ruddiman, 2001),最终都要归因于固体地球的变化.同时,固体地球演化本身就可以改变表层碳源碳汇(Guo *et al.*, 2021),从而对碳循环产生直接影响.

回答“固体地球的形态如何影响气候”这一问题,必须要实现大气科学和地质学的交叉.因为,固体地球形态的变化,属于地质学的研究范畴;而气候系统的响应,属于大气科学和海洋科学的研究范畴.进一步研究固体地球形态对气候系统的影响仍然面临着一系列挑战.未来的研究需要发展更可靠的壳幔模型和古高度估计方法(例如热年代学、团簇同位素)等新技术,减小估算地表变化(隆升、下沉、侵蚀、沉积)速率的不确定性,重建更可靠的、分辨率更高的古地形和古海深数据;利用数据挖掘和人工智能等新方法,集成和再分析各种地质学、地球化学、沉积学和古生物学记录(例如, Song *et al.*, 2019);利用气候模型或地球系统模型深入研究地形变化对大气和海洋环流的作用及对陆地和海洋碳循环的影响,与地质记录进行对比,并进一步基于地表岩石物理化学风化特征估算这些大气和海洋环流改变对碳循环过程的反馈作用.

3.2 气候系统响应太阳辐射的差异性?

气候系统的源动力主要来自太阳辐射.基于现代气象观测,气候学已基本揭示现代气候中太阳辐射在各系统中如何分配.但许多地质记录显示,气候系统对太阳辐射改变的响应并非线性的,存在着显著差异.比如,与深海氧同位素 13 阶段(MIS13)相比,深海氧同位素 5 阶段(MIS5)北半球高纬夏季太阳辐射的振幅更大(Berger and Loutre, 1991).如果气候系统线性响应太阳辐射的改变,与 MIS13 相比, MIS5 北半球应当更温暖.但事实却非如此,北半球地质记录却显示 MIS13 相对更暖,东亚夏季风异常强盛(Guo *et al.*, 2009).

气候系统是一个复杂系统,包含了多种反馈过程,在不同的太阳辐射条件下,这些反馈过程的作用不一定是线性变化的.例如,最简单的例子是行星反照率反馈.冰期地表冰盖面积增大时,行星反照率增加,地表温度进一步降低.温度垂直递减率的反馈效应要复杂一些.在温暖的条件下,我们常采用的现代环境温度递减率大约是 0.65 度/百米;但在寒冷的条件下,由于空气的含水量减少、温度降低,温度垂直递减率必然发生变化(增加或减少取决于含水量和温度的相对变化).这又会进一步影响能量在大气垂直方向上的分配.

回答“气候系统响应太阳辐射的差异性”的问题,仍然离不开大气科学和地质学的交叉.因为,利用各种沉积学、地球化学或古生物等指标揭示气候变化的现象,属于地质学的研究范畴;而利用地球系统模式模拟不同太阳辐射条件下气候系统的响应,属于大气科学和海洋科学的研究范畴.未来的研究需要挖掘不同时期古气候代用指标之间反映的空间差异和梯度,利用代用资料和数值模拟理解不同地区对太阳辐射强迫的敏感性差异,探索太阳辐射变化对陆地和海洋碳循环的影响机制和幅度,深入分析气候各反馈过程的敏感区、稳定性和差异性,检验气候系统中的各种遥相关的稳定性和非稳定性.

4 中国地质大学(武汉)大气科学专业在学科交叉中可以发挥的作用

设立大气科学专业是中国地质大学(武汉)完善地球系统科学学科结构、建设地球科学领域国际知名研究型大学、实现地球科学领域世界一流大学的长远办学目标的重要举措.大气科学系的成立,使学校学科结构涵盖岩石圈、生物圈、水圈(海洋)、大气圈等完整地球圈层,因而学科结构更为合理和完善.植根于以地质学为优势的高校,中国地质大学(武汉)大气科学系必然成为推动大气科学与地质学交叉的排头兵.

4.1 深化水文过程、地质灾害形成机理的认识

水文地质学、地质灾害学是地质学的重要学科方向,而地下水动力学是学校水文地质学的特色方向.地下水的运移转化与地表水存在紧密的联系,大气降水是地表水的主要来源,同时地表水也是大气降水的水汽来源之一,于是存在“地下水—地表水—大气降水”三者之间的耦合相互作用.这意味

着大气学科可为认识地下水的运移转化规律提供新的认知。

滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害的发生不仅与降水总量有关,而且与短历时降水强度、是否前期发生持续降水(连阴雨)及降水持续时间长度有关。滑坡的发生可能也受到雨滴大小及风的方向的影响。要认识地质灾害的发生和演变规律,了解未来的可能变化,需要多种高时空分辨率的气象数据。中国地质大学(武汉)大气科学系将为深入认识地质灾害规律提供新的数据源。

4.2 地球系统模拟提升对古气候、古环境的认识

认识不同地质时期古气候、古环境的演变,是地质学的重要研究内容之一。而传统的古气候、古环境研究主要基于黄土、孢粉、石笋、冰芯等代用指标。有时,这些代用指标揭示的古气候、古环境现象难以解释,甚至互相矛盾。现代大气科学的分支学科——气候动力学和地球系统模拟,因其内在的物理联系机制,为解释古气候代用指标的矛盾、理解过去地球气候系统的演化提供了新的方法和思路。

4.3 加深环境污染成因的认识

地下水污染、土壤污染由于其隐蔽性,已成为继大气污染之后,我国所面临的重大环境污染问题。一方面地下水污染物、土壤污染物的运移转化会受到大气降水的影响,另一方面大气污染物随大气运动迁移,发生沉降之后,将参与到地表水、土壤污染过程中,使地下水污染、土壤污染问题变得复杂。大气科学为深入认识地下水污染、土壤污染等问题提供了新的出发点。

中国地质大学(武汉)大气科学专业于2015年成立以来,逐步形成以“辨古识今,推演未来;立足东亚,放眼全球”为内核的发展理念。中国地质大学(武汉)地质学研究的传统优势在于“辨古”,会涉及地球系统演化的诸多慢过程,例如海陆更替、冰盖消长、全球平均海平面波动等等。大气科学研究的根本目的在于“识今”,理解当今大气、海洋运动的基本特征和规律,尤其是其中的快过程,例如温室效应。两者有机的结合,才能拓展研究的时间维度,为“推演未来”提供新的视角。“立足东亚,放眼全球”,需要地大大气拓展研究的空间维度,逐步提高自身的国内、国际影响力,争取早日建成世界一流的大气科学学科。

经过七年的发展,地大大气初步构建了学科交叉体系,形成3个学科交叉点(图2)。第一交叉点,基

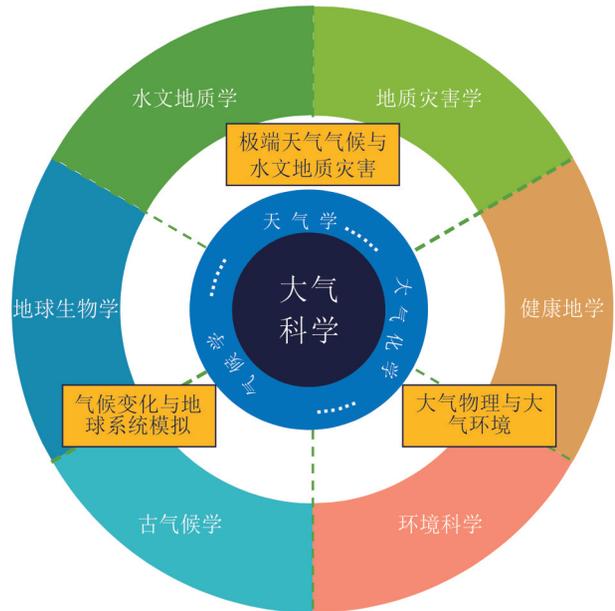


图2 中国地质大学(武汉)大气科学的学科交叉体系
Fig.2 Disciplinary cross of atmosphere science in China University of Geosciences (Wuhan)

于天气学研究,通过极端天气气候过程研究与水文、地质灾害的交叉,推动大气科学向下游应用的延伸,服务于国家防灾减灾的实际需求;第二交叉点,基于气候学研究,通过时间尺度的延伸和地球化学、沉积学、地球生物学和古气候学等交叉,瞄准前沿领域的基础研究,研究地质历史时期气候演化和生命过程,服务于科技强国的国家战略;第三交叉点,基于大气化学研究,通过大气科学与环境科学、公共健康的交叉,服务于美丽中国的建设。上述3个交叉点,分别对应中国地质大学(武汉)大气科学系的3个研究方向,包括“极端天气气候与水文地质灾害”、“气候变化与地球系统模拟”和“大气物理与大气环境”。其中,第一和第三属于基础应用研究范畴,第二属于基础研究范畴。

上述3个交叉点的发展,仍然遵循“数据—模式驱动”的研究范式。第1个交叉点,需要监测和模拟中小尺度天气过程,驱动基于观测的水文模型、地质灾害模式,研究降雨诱发极端水文事件和地质灾害的发展机制,构建区域水文、地质灾害的气象风险预警模型。第2个交叉点,需要再分析和挖掘海量地质数据,发展地史时期全球地球系统模拟的新方法和技术,构建各类地质数据同化方案和同化系统。第3个交叉点,需要监测大气环境、气象参数,开展实验室机理研究,耦合全球或区域大气化学模型与公共健康和流行病模型,建立环境健康的预测系统。

作为大气科学与地质学交叉的排头兵,中国地质大学(武汉)大气科学专业任重而道远.大气科学专业的快速发展,无疑会加速学校“数据一模式驱使”的研究范式的变革,助力学校早日成为地球科学领域世界一流大学.

致谢:中国地质大学(武汉)大气科学系的邓琪敏老师、巫明娜老师和第一作者的学生们戴高文、王锡津、董曹沂和徐天澳阅读了本文的初稿,并提出许多宝贵修改意见,准备了图件,在此向他们表示感谢.

References

- Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation Values for the Climate of the Last 10 Million Years. *Quaternary Science Reviews*, 10(4): 297–317. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(91\)90033-q](https://doi.org/10.1016/0277-3791(91)90033-q)
- Bierman, P., 2021. A Department Terminated. *Science*, 371(6527): 434. <https://doi.org/10.1126/science.371.6527.434>
- Bjerknes, J., 1919. On the Structure of Moving Cyclones. *Geofysiske Publikasjoner*, 1(2): 1–8. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1919\)47%3C95:otsome%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1919)47%3C95:otsome%3E2.0.co;2)
- Bryan, K., Manabe, S., Pacanowski, R. C., 1975. A Global Ocean-Atmosphere Climate Model. Part II. The Oceanic Circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 5(1): 30–46. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1975\)005%3C0003:agoacm%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1975)005%3C0003:agoacm%3E2.0.co;2)
- Callendar, G.S., 1938. The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 64(275): 223–240. <https://doi.org/10.1002/qj.49706427503>
- Cess, R.D., Potter, G.L., Blanchet, J.P., et al., 1989. Interpretation of Cloud-Climate Feedback as Produced by 14 Atmospheric General Circulation Models. *Science*, 245(4917): 513–516. <https://doi.org/10.1126/science.245.4917.513>
- Charney, J., Eliassen, A., 1964. On the Growth of the Hurricane Depression. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 21(1): 68–75. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021%3C0068:OTGOTH%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021%3C0068:OTGOTH%3E2.0.CO;2)
- Charney, J.G., 1947. The Dynamics of Long Waves in a Baroclinic Westerly Current. *Journal of Meteorology*, 4(5): 136–162. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1947\)004%3C0136:tdolwi%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1947)004%3C0136:tdolwi%3E2.0.co;2)
- Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., et al., 2000. Acceleration of Global Warming Due to Carbon-Cycle Feedbacks in a Coupled Climate Model. *Nature*, 408(6809): 184–187. <https://doi.org/10.1038/35041539>
- Eady, E.T., 1949. Long Waves and Cyclone Waves. *Tellus*, 1(3): 33–52. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1949.tb01265.x>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., et al., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5): 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Frisinger, H., 1971. Meteorology before Aristotle. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 52(11): 1078–1080. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1971\)052%3C1078:mba%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1971)052%3C1078:mba%3E2.0.co;2)
- Guo, Z. F., Wilson, M., Dingwell, D. B., et al., 2021. India-Asia Collision as a Driver of Atmospheric CO₂ in the Cenozoic. *Nature Communications*, 12: 3891. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23772-y>
- Guo, Z. T., Berger, A., Yin, Q. Z., et al., 2009. Strong Asymmetry of Hemispheric Climates during MIS-13 Inferred from Correlating China Loess and Antarctica Ice Records. *Climate of the Past*, 5(1): 21–31. <https://doi.org/10.5194/cp-5-21-2009>
- Guo, Z. T., 2019. Earth System and Evolution: A Future Frame of Earth Sciences. *Chinese Science Bulletin*, 64(9): 883–884(in Chinese).
- Hasselmann, K., 1979. On the Signal-to-Noise Problem in Atmospheric Response Studies. In: Shaw, B. D., ed., *Meteorology over the Tropical Oceans*. Royal Meteorological Society Publication, Bracknell, 251–259.
- Hoskins, B. J., Karoly, D. J., 1981. The Steady Linear Response of a Spherical Atmosphere to Thermal and Orographic Forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38(6): 1179–1196. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038%3C1179:TSLROA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038%3C1179:TSLROA%3E2.0.CO;2)
- Kuo, H.L., 1949. Dynamic Instability of Two-Dimensional Non-Divergent Flow in a Barotropic Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 6(2): 105–122. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1949\)006%3C105:DIOTDN%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006%3C105:DIOTDN%3E2.0.CO;2)
- Kuo, H.L., 1965. On Formation and Intensification of Tropical Cyclones through Latent Heat Release by Cumulus Convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 22(1):

- 40–63.
- Liu, Z., Ding, A.J., Zhang, R.H., 2020. Adjusting Application Codes and Optimizing Funding Layout for the Discipline of Atmospheric Sciences in the National Natural Science Foundation of China. *Chinese Science Bulletin*, 65(12): 1068–1075(in Chinese).
- Liu, Z., He, J.J., Guo, Y.C., 2021. Category-Specific Evaluation Reform by the National Natural Science Foundation of China Benefits the Basic Research of Atmospheric Sciences: A Policy Interpretation. *Chinese Science Bulletin*, 66(2): 187–192(in Chinese).
- Longuet-Higgins, H.C., 1964. Planetary Waves on a Rotating Sphere. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 279(1379): 446–473. <https://doi.org/10.1098/rspa.1964.0116>
- Lorenz, E.N., 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 20(2): 130–141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020%3C0130:dnf%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020%3C0130:dnf%3E2.0.co;2)
- Lorenz, E.N., 1969. Atmospheric Predictability as Revealed by Naturally Occurring Analogues. *Journal of Atmospheric Sciences*, 26(4): 636–646. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1969\)26%3C636:aparbn%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)26%3C636:aparbn%3E2.0.co;2)
- Lü, Y.F., Sun, Z.Y., Shao, J., 2019. The Archaeoastronomical Study of the East Gate of the Outer Wall of Shimao Site. *Archaeology and Cultural Relics*, (1): 46–55(in Chinese with English abstract).
- Manabe, S., Wetherald, R.T., 1967. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24(3): 241–259. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024%3C0241:teotaw%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024%3C0241:teotaw%3E2.0.co;2)
- Manabe, S., Wetherald, R.T., 1975. The Effects of Doubling the CO₂ Concentration on the Climate of a General Circulation Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32: 3–15. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.67.6_1057
- Matsuno, T., 1966. Quasi-Geostrophic Motions in the Equatorial Area. *Journal of the Meteorological Society of Japan (Ser II)*, 44(1): 25–43. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.44.1_25
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., et al., 2007. The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9): 1383–1394. <https://doi.org/10.1175/bams-88-9-1383>
- Millikan, F., 1997. Joseph Henry's Grand Meteorological Crusade. *Weatherwise*, 50(5): 14–18. <https://doi.org/10.1080/00431672.1997.9926074>
- Mitchell, J.F.B., Johns, T.C., Gregory, J.M., et al., 1995. Climate Response to Increasing Levels of Greenhouse Gases and Sulphate Aerosols. *Nature*, 376(6540): 501–504. <https://doi.org/10.1038/376501a0>
- Philander, S.G.H., 1983. El Niño Southern Oscillation Phenomena. *Nature*, 302(5906): 295–301. <https://doi.org/10.1038/302295a0>
- Rossby, C.G., 1939. Relation between Variations in the Intensity of the Zonal Circulation of the Atmosphere and the Displacements of the Semi-Permanent Centers of Action. *Journal of Marine Research*, 2(1): 38–55. <https://doi.org/10.1357/002224039806649023>
- Ruddiman, W.F., 2001. Earth's Climate, Past and Future. W. H. Freeman and Company, New York.
- Song, H.J., Wignall, P.B., Song, H.Y., et al., 2019. Seawater Temperature and Dissolved Oxygen over the Past 500 Million Years. *Journal of Earth Science*, 30(2): 236–243. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-1002-2>
- Sutcliffe, R.C., 1947. A Contribution to the Problem of Development. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73(317–318): 370–383. <https://doi.org/10.1002/qj.49707432007>
- Toggweiler, J.R., Bjornsson, H., 2000. Drake Passage and Paleoclimate. *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association*, 15(4): 319–328. [https://doi.org/10.1002/1099-1417\(200005\)15:4%3C319::aid-jqs545%3E3.0.co;2-c](https://doi.org/10.1002/1099-1417(200005)15:4%3C319::aid-jqs545%3E3.0.co;2-c)
- 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. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 4(6): 35–45 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D.E., Demaree, G., 2004. Extreme High Temperature in Summer in North China in 1743: A Study of Historical Hot Summer Events in the Background of Relatively Warm Climate. *Chinese Science Bulletin*, 49(21): 2204–2210(in Chinese).
- Zhou, T.J., Chen, Z.M., Zou, L.W., et al., 2020. Development of Climate and Earth System Models in China: Past

Achievements and New CMIP6 Results. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(3): 332–350(in Chinese with English abstract).

Zhou, T. J., Zou, L. W., Chen, X. L., 2019. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). *Climate Change Research*, 15(5): 445–456(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

郭正堂, 2019. 《地球系统与演变》: 未来地球科学的脉络. 科学通报, 64(9): 883–884.

刘哲, 丁爱军, 张人禾, 2020. 调整国家自然科学基金申请代码, 优化大气学科资助布局. 科学通报, 65(12): 1068–1075.

刘哲, 何建军, 郭郁葱, 2021. 基于大气科学学科发展特点,

解读项目分类评审改革新举措. 科学通报, 66(2): 187–192.

吕宇斐, 孙周勇, 邵晶, 2019. 石峁城址外城东门的天文考古学研究. 考古与文物, (1): 46–55.

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.

张德二, Demaree, G., 2004. 1743 年华北夏季极端高温: 相对温暖气候背景下的历史炎夏事件研究. 科学通报, 49(21): 2204–2210.

周天军, 陈梓明, 邹立维, 等, 2020. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估. 气象学报, 78(3): 332–350.

周天军, 邹立维, 陈晓龙, 2019. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述. 气候变化研究进展, 15(5): 445–456.