大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

气候学发展历程的回顾与若干启示

杨萍 许小峰 王志强

Review and Enlightenment of the Climatology Development Process

YANG Ping XU Xiaofeng WANG Zhiqiang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20238

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

季风亚洲区域集成研究国际计划(MAIRS)10年回顾
Review of the Monsoon Asia Integrated Regional Study (MAIRS) Program over the Past 10 Years
大气科学. 2018, 42(3): 524 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17240

西北太平洋地区热带气旋闪电活动的气候学特征及其与气旋强度变化的关系
Climatological Characteristics of Lightning Activity within Tropical Cyclones and Its Relationship to Cyclone Intensity Change over the Northwest Pacific
大气科学. 2017, 41(6): 1167 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17102

东亚夏季风变化机理的模拟和未来变化的预估:成绩和问题、机遇和挑战
A Review of East Asian Summer Monsoon Simulation and Projection: Achievements and Problems, Opportunities and Challenges
大气科学. 2018, 42(4): 902 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17306

夏季青藏高原地区水汽向平流层的等熵绝热和非绝热传输的气候学特征及其与落基山地区的对比
Characteristic of Adiabatic and Diabatic Water Vapor Transport from the Troposphere to the Stratosphere over the Tibetan Plateau and its Comparison with the Rocky Mountains in the Summer
大气科学. 2019, 43(1): 183 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17255

MRI模式对华南春雨气候态及年际变率的模拟:不同模式分辨率的比较
Simulation of Climatology and Interannual Variability of Spring Persistent Rains by MRI Model: Comparison of Different Horizontal Resolutions
大气科学. 2017, 41(3): 515 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16151

大气污染资料同化与应用综述
A Review of Air Quality Data Assimilation Methods and Their Application
大气科学. 2018, 42(3): 607 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17260

关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨萍, 许小峰, 王志强. 2021. 气候学发展历程的回顾与若干启示 [J]. 大气科学, 45(6): 1249−1258. YANG Ping, XU Xiaofeng, WANG Zhiqiang. 2021. Review and Enlightenment of the Climatology Development Process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1249−1258. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20238

气候学发展历程的回顾与若干启示

杨萍 [1] 许小峰 [2] 王志强 [1]

1 中国气象局气象干部培训学院，北京 100081
2 中国气象局，北京 100081

摘 要 在人类对气候的漫长认知过程中，因涉及学科之广、贡献人物之多、关键事件之复杂导致后人试图完整准确地把握其脉络走向的努力极为困难。这就使得梳理古今中外几千年以来气候学的发展进程变得尤为重要，也成为气候学学科建设不可或缺的重要组成部分。本文试图在前人大量研究成果基础上，回顾气候学发展历程中的重要事件和关键人物，以时间脉络为主线，勾画出人类认识气候的基本轮廓，并以此为基础探讨其对当代气候学发展的启示。

关键词 气候学 发展历程 回顾 启示
文章编号 1006-9895(2021)06-1249-10 **中图分类号** P467 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20238

Review and Enlightenment of the Climatology Development Process

YANG Ping[1], XU Xiaofeng[2], and WANG Zhiqiang[1]

1 *China Meteorological Administration Training Center*, *Beijing* 100081
2 *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract The long course of human study of climate and its history has involved a great number of experts examining a wide range of subjects and a complicated set of incidents. All of them have attempted to comprehend the logical chain of climate development. The development process of climate for thousands of years has led to the construction of a climatology discipline. Based on a large number of previous studies, this paper attempts to review the significant incidents and people along the development course of climatology in the temporal context. It will finally resolve how human beings understand climate and contribute to the discussion of contemporary climatological development.

Keywords Climatology, Development process, Review, Enlightenment

1 引言

气候作为一种复杂的自然状态，影响着整个地球的生态和环境，影响着人类生产和生活。因此，人类对气候的探索与认识从未停止过。尽管从学科发展角度来看，与天文学、数学等古老的学科相比，

收稿日期 2020-11-26；**网络预出版日期** 2021-05-27
作者简介 杨萍，女，1981 年出生，研究员，主要从事城市气候学以及气象科技史等领域的研究。E-mail: zz96998@163.com
通讯作者 许小峰，E-mail: xiaofeng_x@hotmial.com
资助项目 中国气象局软科学重点项目“气象学科交叉与科技创新路径选择” 2021ZDIANXM13，国家自然科学基金项目 41775078，中国气象局气象干部培训学院重点项目“气候学的发展历史预研”
Funded by Project for Soft Sciences, China Meteorological Administration “Interdisciplinary meteorology and Scientific and technological innovation path selection” (Grant 2021ZDIANXM13), National Natural Science Foundation of China (Grant 41775078), Major Project of CMATC "Research of climatology development"

气候学非常年轻，但任何学科的发展都是人类长期的思考结果。对气候的认识可以追溯到数千年之前，早在二千多年前的中国古代，人们就已经有了气候概念，古代中国人在农业生产中总结出来的二十四节气和七十二候，就是对气候规律认识的集中表现（竺可桢, 1972）。随着人类对气候现象相关的大气过程和自然地理过程的逐渐深入了解，现在人们已经认识到，气候的形成和变化不仅仅反映了大气内部状态和过程，而且还与海洋圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈等密切相关，是非常复杂的相互作用过程（曾庆存等, 2003）。

气候学发展到今天，从古人对气候的朴素认识到现代气候系统概念的形成，人类一直在从不同角度、利用不同方法来认知气候和解释气候演变规律。这一发展历程中，既有理性思辨，又有实践积累，既有需求驱动，又有对自然变化的好奇与探究，既伴随着历史车轮向纵深延伸，其间也不乏中西方认识的差异与交融。可以说，解释气候现象、探索气候演变规律并开展不同时间尺度的科学分析与预测，是人类为了自身生存而认识规律、趋利避害的必然选择。

人类认知气候的漫长过程涉及学科之广、贡献人物之多、关键事件之复杂都超出了我们的想象，因此，对气候学发展脉络的梳理极为困难。尽管如此，仍然有很多学者围绕气候学发展展开了大量卓有成效的研究（Leighly, 1949; 竺可桢, 1972; 柳又春, 1977; 王绍武, 2000; 丁一汇和王会军, 2016）。本文试图在前人大量研究成果的基础上，通过回顾气候学发展历程中的关键事件，勾画出人类认识气候的大致轮廓，并在此基础上探讨其对当代气候学发展的启示，以供借鉴和讨论。

2 气候学发展历程的若干回顾

2.1 人类对气候的初步认识

有学者提出，古代科学中心有两个，一为中国，另一为地中海欧洲（王晓文和王树恩, 2007）。对于生活在东西方两个截然不同地域的人们而言，尽管他们对气候的认知不尽相同，各具特质，但认识气候的原动力却大体一致，即对所处环境的探究、适应和利用（王乃昂, 1998）。古埃及作为一个历史悠久的文明国度，拥有典型的地中海气候，几千年以前西方人对气候的认知大多来自古埃及人。公元前 3300 年左右，古埃及人利用物体影子的方向变化发明日晷用来计时；300 年之后，古埃及人又根据尼罗河泛滥的周期，制定出太阳历；公元前 1600 年左右，他们开始使用水钟，成为最早将一天划分为 24 小时的国家（赵克仁, 1999）。古埃及人对时间周期性的理解为科学划分时间做出了巨大贡献，也为古人更深入地认识气候奠定了基础。到了公元前 5～6 世纪，欧洲南部的希腊孕育出璀璨的文化，大师辈出、学派林立，如著名的米利都学派、毕达哥拉斯学派、爱菲斯学派、爱利亚学派和元素派等诸多哲学学派都大放异彩。早期哲学家们通过深入观察自然，试图回答什么才是万物的本源，并在认识自然追求万物本源的过程中，开始逐渐形成对气候的认知（陈嘉映, 2007a，2007b）。古希腊人认为，由于受到太阳光线倾斜角度的不同，地球上的气候状况出现差别，可以被分成若干个平行地带，称为“climata”，与现代气候（climate）相比，希腊人所创建的气候概念意为“倾斜角”，更多包含的是地理学和天文学的含义（王乃昂, 1998）。例如，最早提出地圆说的爱利亚学派代表巴门尼德（Parmenides of Elea），根据地球接受太阳热量的多少，首次对气候进行分类，将气候分为了无冬区、中间区和无夏区；阿那克萨戈拉（Anaksagoras）、希波克拉底（Hippocrates）等人陆续提出温和气候更适宜居住的观点（王乃昂, 1998），这些观点为后来亚里士多德全面总结气候规律奠定了重要的基础。

古代中国人对气候的认识也是从对自然现象的变化规律入手进行系统的归纳总结，如在《周易》的十二辟卦中就已总结了一些气候学理论（萧放, 2002），并通过观星和占卜等方法对可能的变化进行推测。“气候”二字整体最早出现在《礼记·月令注》中“昔周公作时制、定二十四气，分七十二候，则气候之起”。这些文字记载说明中国很早就对气候有了独特的认识。与西方气候区域分类的概念不同，古代中国人对气候的认知侧重于对气候季节特征的认识上，这一认识伴随着农牧业生产过程而不断深入。例如，中国古代最早的农业出现在山区或者高地边沿，而不是在河流平原和三角洲地带，这是因为古人还无法抗争平原地区的季节性大暴雨（即现在所说的汛期），在高处发展农业恰恰体现了古人对气候的适应；后来，农业发展到一定水平后，古人对水的知识得到提升，治水能力逐步加强，农业生产得以向平原转移（刘昭民, 1980）；随着

农业生产水平的进一步发展，农时在农业生产中发挥越来越重要的作用，古人因此开始琢磨更加先进的天文历法，如《夏小正》中将阴历一月作为岁首，商代时地球绕日一周被划分为十二个月，《吕氏春秋》十二纪进一步总结了每个月的正常天气和异常天气以及适宜从事的各项活动（张家诚, 1990, 1991）。春秋战国时期的《管子五行》把一年划分为 5 个 72 日，依次配以木、火、土、金、水五行，用来解释季节的更替（姜海如等, 2017）。中国古人对气候的季节特征的认知伴随农牧业发展而不断提升，这些认知为后来西汉时期形成了较为完备的知识体系奠定了不可或缺的基础。

2.2 人类对气候的经验积累

公元前 3 世纪，古希腊出现了一位在自然科学、哲学等诸多学科发展中都做出卓越贡献的重要人物亚里士多德（Aristotle），他在多个领域做出了影响久远的工作（刘昭民, 1981）。一方面，作为百科全书式的科学家，亚里士多德对很多学科都做出了杰出贡献，对气候学的认识和发展也极具开创性，另一方面，由于亚里士多德的权威性，其影响不同程度地制约了西方人对气候学进一步的认识，以至于在后续一千多年的中世纪缺少实质性拓展。公元前 340 年，亚里士多德首次以气象学专著（《气象通典》）的形式系统总结了古代人类对自然特别是对大气现象的观察和认识（刘昭民, 1981）。例如，他对不同气象要素的一般性规律进行了总结，根据降水量的多少对降水事件进行分类，对霜、露、风等的形成原因和易发生季节进行探讨，讨论了热带、温带、寒带等气候带的划分以及气候宜居问题等（刘昭民, 1981；杨萍, 2016）。从亚里士多德为代表的古希腊人成就中能够看到，由于古希腊处于特定的海洋开放性地理环境中，他们善于吸收外来思想，善于融合各种文明，天文学继承了巴比伦人的精髓，医学和几何学则多来自于古埃及，这种继承和融合为西方气候学在地理学方向上能够越走越远提供了必要的观测手段和数理基础（丹皮尔, 1975）。例如，埃拉托色尼（Eratosthenes）继承亚里士多德的地圆说观点，并用测量黄道倾斜的方法，求出了地球周长及黄道交角，从而把地球划分为五个气候带（热带、两个温带、两个寒带）以及相应的大致位置（中国大百科全书总编辑委员会《地理学》编辑委员会, 1990）。天文学之父希帕克斯（Hipparchus）热爱仪器发明，建立观测台，自青年时期起持续观察当地的天气规律，并基于观测事实尝试探索季节性气候和星体之间的关系（中山茂, 2017）。地心说的提出者托勒密（Claudius Ptolemaeus）在老师希帕克斯研究成果的基础上，完成了西方古典天文学百科全书《天文学大成》，该书的主要观点直到 16 世纪中期才被哥白尼（Mikołaj Kopernik）的日心说推翻。托勒密在该书中，用天文学方法进一步将地球气候分为二十四个气候带。这一时期，古代西方人对气候的认识除了在气候的地理特征上逐渐深入外，对气候变化、气候与社会、气候与健康等认识也在加深。亚里士多德的学生提奥弗拉斯特（Theophrastus）作为古希腊非常著名的植物学家，也很关心气候问题，他发现植物可以调节气候，人为因素导致的气候变化会对植物生长产生影响（劳埃德, 2004）；波塞多纽（Posidonius）、庞波尼乌斯（Pomponius Mela）、巴斯洛缪（Bartholomaeus Anglicus）等人认为气候对人类生活产生重要影响，甚至是影响民族天性的重要原因（伊迪斯·霍尔, 2019）；肯迪（al Kindi）、托马斯·阿奎那（Thomas Aquinas）等人提出极端气候或者受污染的空气无助于健康，人类的健康必然与气候有着千丝万缕的关系（克拉伦斯·格拉肯, 2017）。

同一时期，位于太平洋西岸的中国仍处在农业社会早期，当时的文化中心位于黄河流域，北部是辽阔的草原和森林，西部是崇山峻岭和万里沙漠，交通不便，这种相对封闭的地理环境让古代中国人不太可能如古希腊人一般与邻近国家产生有效的文化交流（江晓原, 2018）。但是，由于中国古代文明在世界历史上处于十分先进的水平，虽然没有出现如亚里士多德这样的集大成者编写气象领域的专著，但中国古人对气候规律的认识并不亚于同期西方学者的深度。西汉初期，在对前人农时概念的基础上，汉朝刘安编撰《淮南子》，书中提出的二十四节气的所有名称与现代已无差别，并流传至今，一年的气候被准确和系统地进行划分，集中体现了中国古人对气候的高水平认知（姜海如等, 2017）。成书于公元前 100 年左右的《周髀算经》已经载有地球寒暑五代的知识（江晓原, 1997），到了南北朝时代，广泛使用的历书中，不仅有节气，还有物候，其对农事生产的指导性更强。二十四节气流传两千多年以来，对中国以及附近东南亚国家农业社会的物质文明发展做出了巨大贡献，其意义不亚于闻名于世的“四大发明”（洪世年和陈文言, 1983），

被称为中国的“第五大发明”。除了对气候周期性的认知取得重大成就外，古代中国作为一个拥有先进农业水平的国家，服务于农业的各类气候知识如季风、气候灾害、物候变化等得到了更多关注。早在公元前 2 世纪，《吕氏春秋》提出了春天更易吹暖和的东风和东南风，若季风不能按时到，则花就不能盛开；公元 3 世纪左右，《博物志》记载到风向与当地的晴雨具有很大关系，公元 5 世纪撰写的《齐民要术》更是集当时农业气象之大成，系统梳理了农事与各类气候条件的关系；公元 11 世纪的《梦溪笔谈》作为中国古代自然科学的巅峰之作，记载了中国最早的龙卷风灾害调查报告，还首次提出了气候变迁的概念等（姜海如等, 2017）。与西方侧重气候的地域特征相比，古代中国人更善于从时间维度来认知气候，发现其在不同时间尺度下的各种规律，从而有效地趋利避害，对具有鲜明农耕文化特征的古代中国来说，其实用性和针对性更强。

2.3 气候科学的萌芽与建立

进入 16 世纪后，尼古拉·哥白尼（Nikolaj Kopernik）提出日心说，打破了中世纪科学技术的沉寂，观测时代的到来让气候学进入全新的发展阶段。这一阶段，人类对气候学的认知逐渐从思辨推论走向基于观测事实。一般认为，日心说是天文学发展史上的重大突破（刘昭民, 1981），事实上，该学说对气候学发展的作用同样不可忽视。首先，日心说第一次打破亚里士多德时代对自然科学的认识体系，包括气候学在内的自然科学获得新生；其次，日心说对伽利略（Galileo Galilei）和开普勒（Johannes Kepler）后来的工作是不可缺少的序幕，伽利略制造了第一架天文望远镜，用实验证明日心说的正确，开普勒利用第谷（Tycho Brahe）积累的大量天文观测记录提出了行星三大定律，包括气候学在内的自然科学从肉眼观测进入基于仪器观测的时代。17 世纪后，随着观测仪器的大量发明，人类对气候学的认识逐渐从定性描述走向定量分析。1637 年，笛卡尔（René Descartes）出版《谈谈方法》一书，《气象学》作为该书附录之一得以出版。该书中，笛卡尔贡献了基于实际观察和定量计算的研究理论，强调用“量”的范畴来描述自然现象时，就必须使用标准的观测仪器、统一的度量单位和明确的记录格式（Leighly, 1949）。观测仪器发明的另一显著功效是带动了气象观测台站的建立，并以点带面，促成了气象观测网的形成。从 17 世纪中期第一个气象观测站建立到 18 世纪末，在全球气象观测站的陆续建立的过程中，正如笛卡尔所预计的那样，建立标准化的气象观测记录不仅急迫而且非常必须。1663 年，英国博物学家胡克（Robert Hooke）创立了标准化的气象观测记录规格格式以及气象报告程序，并进行日常观测作业，其观测结果均刊登于英国皇家学会会报上，持续半个世纪之久，该事件被认为是气象观测发展历程中的重要转折点，为开展气象科学的同步观测提供基础（刘昭民, 1981）。在气象观测网逐渐形成的同时，物候观测、水文观测等也悄然兴起。例如，1750 年，瑞典著名植物学家林奈（Carolus Linnaeus）首创物候测站网，1787 年，英国科学家道尔顿（John Dalton）在英国西北部建立雨量站网，堪称英国最早的水文气象工作者（杨萍等, 2014）。在观测站网逐渐壮大的过程中，国际合作的意识有了萌芽，对气候定量化认知的全球意识蓄势待发。

16 世纪初至 18 世纪末的 300 年间，中国跨越明清两朝，科学和技术发展整体处于相对停滞的阶段，气候学亦如此，但仍旧在继承和发展前人认知中有所进展。1502 年刊印的《便民图纂》反映了明朝苏南太湖地区农业生产的情况，其中第七卷“杂占类”，搜集了流行于江南地区的各类气象预测农谚；17 世纪 30 年代出版的《农政全书》作为这一时期的优秀作品，是徐光启（中国著名的徐家汇观象台正体现了对徐光启的纪念）在调查研究和亲自实践的基础上撰述而成，在“授时”、“占候”部分涉及了大量农业与气候的问题，包括各月农事及农业气象、农民测天经验等（陈国达, 1992）。这一时期，人们对气候的认知除了继承和发展古人思想外，也接受着外国传教士带来的西方的科技，其中最突出的体现是气象观测仪器的引入和气候相关知识的传入。1640 年，意大利传教士潘国光司铎（P. Franciscus Brancatin）于上海县安仁里“敬一”天主堂内筑观象台，设有日晷、旧沙漏、千里镜、自鸣钟等仪器；1743 年，法国传教士戈比（Pater Gaubil）开始在北京建立测候所，后来耶稣教士阿弥倭（Jesuit Father Amiot）在北京开展气温、气压、云量、雨量、风向等多个要素的观测；1602 年，利玛窦（Matteo Ricci）在北京刊刻《坤舆万国全图》；1674 年，南怀仁所著的《坤舆图说》阐述了风、雨等自然现象（徐宗泽, 2010）。可以看到，在世界对气候认识开始萌生全球意识的

时代，中国也开始融入到全球气象观测的队伍中，尤其是以北京为代表的观测台站建立打开了中国建立气象观测体系的天窗，气候相关知识的传入也让中国人开始看到本国以外的世界。

2.4 近代气候学的发展

随着气象观测时代的到来，19 世纪开始的气候学发展具有明显的全球特征，各种气象要素的全球分布图在这个时代接踵而至。19 世纪初至 19 世纪中下叶，全球等温线图（洪堡/Alexander von Humboldt，1817）、全球等压线图（布兰德斯/H. W. Brandis，1819）、全球雨量分布图（阿特金逊/Joseph Atkinson,1840）、全球风场分布图（毛利/Matthew Fortaine Maury，1848）、全球逐月云量分布图（戴保德/Teisserence de Bort，1886）陆续被绘制出来（刘昭民, 1981），这些分布图所体现的全球理念为气候学开展更紧密的国际合作埋下了种子。

全球特征初显的另一个表现是国际气象会议、国际气象组织、气象杂志等新生事物的出现。1873 年，在维也纳召开了第一届国际气象会议，共有来自 20 个国家的 32 位代表参加，同年，国际气象组织成立；1891 年，第一届国际气象台台长会议在慕尼黑召开；1875 年，阿布贝（Cleveland Abbe）使用国际气象组织会员国各气象观测站的观测资料，逐日发布格林威治时间正午的世界观测会报；1883 年，德奥气象学会会刊由汉恩（Julius von Hann）着手编辑，德国气象学家阿斯曼（Richard Assmann）创办气象杂志《天气》。

此外，随着人们对气候认识的逐步深入，这一阶段气候相关要素开始得到更加深入和精细的研究。1803 年，霍华德（Luke Howard）在英国的哲学杂志上发表关于云的种类（On the Modifications of Clouds）一文，将云的形态分为七类，被称为云研究的鼻祖，此外，他对城市气候的研究也颇有建树，发现城市温度高于郊区的事实（杨萍等, 2018）；1805 年，蒲福（Sir Brancis Beaufort）创设蒲福风级，原分为 13 级，后经数次订正，最终修正为 18 级，并于 1939 年为国际气象组织（IMO）接受，作为世界各国广泛使用标准（凯瑟林·库伦, 2011）；1884 年，柯本（Wladimir Peter Koppen）首创气候分类法，堪称近现代气候分类的鼻祖，对于各类要素的深入研究为 20 世纪气候理论的形成奠定了必要的基础（刘昭民, 1981）。

这一时期的中国被全世界高速发展的科技潮流所裹挟，随着外国传教士在北京的建站和观测工作的开启以及近代气象仪器在中国的大量应用，中国各地陆续建站。1873 年，法国天主教会在上海建立的徐家汇天文台是中国近代最具有代表性的功能最为齐全的观象台之一（吴增祥, 2007）。同一时期，海关气象观测台站陆续建立，中国气象发展进入了长达近一个世纪的以海关气象为烙印的时代。中国沿海沿江地区先后建立了气象观测站 70 多个，其中 40 多个气象观测站的记录在 30 年以上，如较早建站的宁波、佘山、厦门、福州等台站，其观测时间跨越半个多世纪（1880 年代至 1940 年代）。总体而言，海关气象台站的观测时间之长、覆盖站点之广、保存资料之完整，在中国近代气象观测史上是罕有的，中国气象观测网逐渐形成，这些长时间连续性的观测资料为长时间序列的气候学研究提供了非常珍贵的数据资料（吴增祥, 2007; 杨萍和王志强, 2019）。这一时期，更多与气候学相关的西方科技书籍被引入并被翻译，与气候学相关的科学理论开始得到传播，其中，以江南制造局和墨海书馆等译书机构翻译出版的系列专著最为著名（刘昭民, 1980; 杨丽娟, 2016）。

回顾近代气候学百年的发展历程不难看出，世界气象科学理论在中国的引入为中国本土气候学的创立和发展提供了思想、人才和物质基础，气象观测体系的建立特别是近代海关气象这一特定时期的特定存在，不仅为中国百年尺度的气候学研究提供了很有价值的观测数据，也为中国学者开展气候学相关领域学科发展历史的研究提供了弥为珍贵的原始素材。

2.5 现代气候学的发展

如果说气候学的发展在 19 世纪还属于全球化意识萌芽和生长阶段，那么进入 20 世纪的气候学则开启了崭新的快速发展时期。气候系统概念在 1974 年斯德哥尔摩召开的世界气象组织和国际科学理事会（WMO-ICSU）联席会上明确提出。人们认识到，气候的形成和变化不仅是大气的独立行为，而且是与大气有明显相互作用的海洋圈、冰雪圈、岩石圈以及生物圈等组成的复杂气候系统的总体行为（World Meteorological Organization, 1975），这也标志着人们对气候概念的认知进入了新阶段。

回顾现代气候学的发展，无论从研究方法还是研究角度上都发生了根本性的变化。20 世纪 30 年

代，沃克（Sir Gilbert Walker）发现了大气活动中心的变化，定义出三大涛动（NAO/NPO/SO），揭示了大气环流变率的空间分布类型，为后来研究者们理解全球尺度的气候现象提供了一个新的方向，他所提出的南方涛动被埋没了 50 多年之后，被皮耶克尼斯（Jacob Aall Bonnevie Bjerknes）发现，揭示出厄尔尼诺与南方涛动之间的关系，为此后持续几十年的 ENSO 研究建立了里程碑。为了纪念沃克的重大贡献，穿过热带的海气之间大尺度环流被皮耶克尼斯定义为沃克环流（Cox, 2002）。除了 ENSO 这个气候学领域经久不衰的热点科学问题外，认识并定量预测未来气候一直是 20 世纪气候学研究的重要方向之一。20 世纪 50 年代，菲利普斯（Norman Alton Phillips）开展著名的大气环流试验，开创了气候模拟这一方向。随着全球气候观测系统的建设和更大型电子计算机的发展，气候系统模式已经初具规模，月、季平均环流预报都成为中长期数值预报的热点，全球范围内依托世界气候计划，相继提出和实施了多个国际计划。自 1980 年 WMO-ICSU 联合设立世界气候研究计划（WCRP）以来，经过几十年的发展，围绕 WCRP 的两个重要研究目标（气候的可预测性和人类活动对气候的影响）形成了若干核心计划，如热带海洋和全球大气研究计划（TOGA）、世界大洋环流试验（WOCE）、全球能量与水循环试验（GEWEX）、平流层过程及其在气候中的作用（SPARC）、北极气候系统研究（ACSYS）等（周天军等, 2019; 许小峰, 2020）。由于气候系统是极其复杂的强迫耗散非线性系统，最好的预报模式也只能逼近真实大气，模式精度必然造成预测结果的不确定性，因此，气候可预报性的理论研究至今仍旧是科学家们感兴趣的重点（周秀骥, 2005）。全球气候变化作为气候学的重要方向，在 20 世纪 80 年代之前，并没有得到足够的关注，直至人们发现全球气候变暖造成了严重的气候灾害后，世界各国政府才开始高度重视。回顾气候学发展历史，早在 18 世纪末富兰克林（Benjamin Franklin）就曾经思考过气候具有明显的增暖特征，而增暖的主要原因很可能是砍伐森林，但气候变化研究被正式提上日程则是在将近 200 年之后。20 世纪 70 年代，第七次世界气象大会首次通过了气候变化决议，气候变化的气象和非气象证据要求被审议，人类活动可能导致的气候变化被纳入了气候学研究的范畴。1979 年，首届世界气候大会的主题便确定为“气候与人类”，中心议题即为人类活动使温室效应加剧、全球气候变化的问题；80 年代末，联合国环境规划署及世界气象组织共同组建政府间气候变化专业委员会（IPCC），以期为政府决策者提供气候变化的科学基础，让决策者认识人类对气候系统造成的危害并采取对策（李克让, 1996）。1990 年 IPCC 发布第 1 次评估报告以后，IPCC 每 5～6 年发布一次评估报告。全球气候变化不仅仅是国际上重要的科学问题，也是各国政府为促进本国社会和经济可持续发展所必须考虑的一个重要政治问题、环境问题和政策问题。但是，由于气候系统不同子系统在不同时间尺度上复杂且非线性的相互作用，人类活动对气候变化究竟具有何种影响以及制约程度多大，一直是长期争论的话题。 IPCC 第五次评估报告基于诸多科学研究结果指出，“极有可能的是，观测到的 1951～2010 年全球平均地表温度升高的一半以上是由温室气体浓度的人为增加和其他人为强迫共同导致的，人类活动引起的变暖最佳估计值与这个时期观测到的变暖相似”。

回顾 20 世纪以来气候学在中国的发展历程，经历了从零起步、从无到有、逐步成型的建制化过程。从气候学研究进展来看，有两个重要的时间节点，一个是 1928 年由竺可桢牵头，在南京成立了中央研究院气象研究所，气候学研究正式开启，第二个节点是 1952 年南京大学气象系设立了中国第一个气候学本科专业（么枕生, 1990）；此外，从联合天气预报中心和联合气候资料中心的组建（1953 年）到国家气候中心（1995 年）的正式成立，标志着气候学科和气候工作的建制化在中国得以完成，在某种意义上也可以说气候学研究有了更佳的业务转化和应用平台。因此，不难看出，这是适应了气候学全球化发展的潮流。这一发展过程中，以竺可桢为代表的中国科学家在气候形成、气候变化、气候预报、区域气候、应用气候等方面做出了不懈探索和持续努力，在一般规律的总结上深入研究，在有明显地域特点的领域里潜心钻研，推动了气候学在中国的发展，并让中国的气候学走向世界舞台（徐淑英和郑斯中, 1979; 么枕生, 1990）。

3 气候学发展历程的启示

3.1 气候学需要与时代发展共生共长

科学活动本质上是一种社会活动，对科学理解

至少可以包括两种维度，一种从知识和学术层面来探讨的科学，即内部维度，一种是从社会、文化、思想等层面来探讨的科学，即外部维度（孙俊等, 2011）。科学活动的双重维度很好地诠释了气候学发展的古往今来。在古代，西方人对气候的认识更侧重于在观察基础上从思辨的角度认识气候，如欧多克斯（Eudoxus of Cnidus）在《恶劣天气之预测》中提出天气现象具有周期性，亚里士多德提出气候宜居带的设想等，而古代中国人对气候的认识则主要是源于农业、军事等现实生活的需求，中西方认识的差异很大程度上来源于社会及文化的差异。西方古代哲学家与科学家是一体的，科学思想多数来源于哲学家，而中国作为农耕文化的代表，实用性需求让古代人更热衷于探索对农耕有效的气候规律以实现趋利避害，如成型于汉代的二十四节气；到了近代，随着中世纪的逐渐衰落、科学革命的兴起，西方人对气候学的认识从思辨转向基于事实的认识阶段，气候学逐渐开始发展成为一门独立的学科，而此时中国深陷封建王朝的统治，拒斥外来文明，社会发展缓慢而又不得不面对西学东渐和近代科技的一次次冲击，不得不应对三千年未有之变局；现当代，气候学向着“全球化”方向演进，气候学的发展已经离不开各个学科的相互交叉和各种社会力量的共同推动，可以说，气候学的发展在某种程度上也是时代的产物。

3.2 气候学需要与多学科交叉融合

气候系统的概念代替传统气候概念是不争的事实，这种变化意味着人类对气候的认识已经跨越单一学科的局限，而是向多学科交叉融合。在气候系统概念提出以前，近代以来的气候学一直与其他学科相互影响。十七、十八世纪，自然科学伴随着工业革命的热潮大幅度进步，人类在自然科学上的建树达到了前所未有的高度。在这个背景下，气候学由于其他学科的促进得到了快速的发展，如流体力学方程成为气候动力学的发展基础，概率论的发展为气候统计预报的发展奠定了发展基础，偏微分理论为解释大气运动和变化背后的微观过程提供可能。气候学发展除了依赖数学、物理学这些基础学科的成果外，还离不开地理学、植物学、物候学等应用类学科的高速发展，洪堡（刘昭民，1981）在开展地形地貌的考察中绘制出了全球等温线图，气候学研究的全球化趋势由此萌芽，林奈（Carl von Linné）在研究植物标本的过程中，发现了植物与气候存着千丝万缕的联系，并创建了物候观测网；此外，雷达、卫星和计算机技术的迅猛发展，给气候学研究提供了大量的实况数据，极大促进了气候学的发展。另一方面，从 1979 年召开第一次世界气候大会，到 IPCC 先后发表的 5 次评估报告，现代气候学对气候的认识已不再是不变的、地面的、局地的现象。对气候的多维认识不断为其他学科开辟着新的方向和新的领域，如海气相互作用的研究极大促进了海洋学的进步，气候对健康的重要影响拓展了医学的研究方向，气候与地理之间的紧密联系衍生了地理气候学学科，应用气候学的发展大大推动了农学的进步，全球变暖、气候变化、雾霾等热点问题促进了社会学、环境科学的发展。气候学与相关学科密不可分的交叉让我们看到，只有更加注重学科之间的交叉融合，才能更好地推动各个独立学科的发展，共同揭示复杂的气候现象和气候变化事实。

3.3 气候学需要关键人物的催化加速

回顾气候学的发展历程可以看到，作为大气科学的一个重要分支，气候学的发展充满了未知，在探索未知的过程中，需要有一批又一批的学者不断积累和创新（许小峰和张萌, 2014）。在气候学发展的纵向维度和时代背景这一横向维度的交汇之处，往往会出现影响气候学发展的关键人物，这些关键人物的共同特点是具有非凡的集大成之能力，正如牛顿（Isaac Newton）的名言，他们都站在了巨人的肩膀上。以亚里士多德为例，作为第一个完成气象学领域专著的集大成者，其《气象通典》充分吸收了先前自然哲学家们对自然现象的各种见解，并对前人的观点进行更加深入的讨论、反驳或者推论。亚里士多德继承了柏拉图“地球是圆形”这一论点，并寻找各种证据来证明这一结论的正确性。他在巴比伦人和希伯来人对风进行分类的基础上，借助天文学方位特点，更详细地区分了风向，这种在继承基础上发展的方法使其成为了气象学发展历程中非常重要的关键人物，促进了古代西方气象学整体水平的提升。再如笛卡尔（René Descartes），在科学革命的时代背景下，基于实验科学的诸多成果，第一次打破了《气象通典》长达两千年的束缚；又如皮耶克尼斯在沃克定义南方涛动的基础上，提出了 ENSO 的正反馈机制，引领了气候研究的新方向。在中国，在气候变化领域蜚声国际科学界的科学家竺可桢非常重视对前人工作的总结和归纳，发表过《十年来气象学之进步》、《中国过去在气象

学上的成就》、《中国气候之要素》、《中国近五千年来气候变迁的初步研究》、《历史时代世界气候的波动》和《为什么中国古代没有产生自然科学》等一系列学术论文。此外，他还非常重视对气候相关领域的人物研究，如《纪念德国地理学家和博物学家亚历山大洪堡逝世 100 周年》、《波兰伟大科学家哥白尼的贡献》等，这些工作都从侧面展现竺可桢重视对前人工作继承和发扬的特质。再如赵九章、叶笃正等气象先辈，为新中国气象事业发展和气象人才的培养发挥了不可磨灭的重要作用。正是古今中外不断涌现出来的关键人物，加速推动了人们对气候的认知经过几千年的发展后实现跨越式提升。

3.4 气候学需要国际合作的助力推动

大气无国界这一特性使得包括气候学在内的气象相关学科发展必然伴随着紧密和持续的国际合作。伴随着气象观测仪器的发明和应用，气象观测数据的获取为更加客观地认识气候规律提供了可能，不同地区气象数据获取的迫切需求加速了国际合作的进程。19 世纪中期，来自欧美 10 个国家参与的布鲁塞尔会议上，达成了在各国船只上装气象观测仪器的共识，从而可以获得来自不同国家的气象数据，这也可以看作是国际气象合作的序章。此外，共同话语体系的建立对国际气象合作起到了推波助澜之效。19 世纪的科学家们在探索标准和规范的进程中，建立了一套相对客观、理性的语言和符号系统，如蒲福对风力进行定级、霍华德对云进行分类、菲茨罗伊开展异地同步观测时对气象数据记录、气象仪器校准进行规范，前人的诸多努力让全球气象学者更加无障碍地进行沟通和对话，为国际气象合作提供了更坚实的基础。19 世纪后半叶（1873 年），国际气象组织（非政府间机构）创建，这标志着国际气象合作的开始，这也推动了气候学发展的迈入新的阶段。随着全球经济的快速发展，气候异常、全球气候变暖等问题加速了不同国家、不同地区之间更加紧密的合作。1935 年国际气象组织酝酿改组为政府间组织，1950 年世界气象组织（WMO）正式诞生。WMO 作为联合国的专门机构，在实现气候学领域的国际合作发挥了不可替代的巨大作用。20 世纪 70 年代气候系统概念提出，气候领域的国际合作越来越多。《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》勾勒了全球不同国家在全球气候问题上“共同但有区别的责任”，世界气候计划（WCRP）旨在回答气候变化能否被预测等、人类活动是否负有一定程度的责任等关键科学问题，IPCC 的评估为各级政府制定与气候相关的政策提供了科学依据。可以看到，在地球科学各个分支的发展历史进程中，很难再找到气候学这样的学科得到了如此广泛的国际合作力量的推动。

4 结语

回顾人类对气候的认识可以看到，人类最初为适应所处环境从而初步认知气候，以亚里士多德为代表的西方科学家和古代中国人通过观察和认识地域特征、时间维度逐步积累气候知识，伴随着近现代科学技术的发展，人类对气候学的认知逐渐从思辨推论走向基于观测事实，进而绘制出各种气象要素的全球分布图，并依托国际气象会议、国际气象组织开始显现气候学发展的全球特征。在气候学整个发展历程中，随着科技发展的冲击和社会文化的差异，气候学多学科、多种社会力量融入发展的本质得到凸显，需要一批又一批学者不断集思广益，继承和创新，最终才能推动气候学发展到一个新的高度。

20 世纪是气候学快速发展的百年，气候理论的突破、全球气候资料的获取、计算技术的提升对气候学的发展起到了极为关键的作用。但是，与天气学相比，气候学涉及领域多，影响要素复杂，人类对气候系统的认识还处于起步阶段，气候系统各个要素的演变规律以及相互之间的影响究竟如何，不同圈层如何进行相互作用，尚没有系统和清晰的认识，急需克服的难点问题依旧不少，气候预测在机理性问题上的理论研究尚需要依靠基础科学的支撑取得突破性进展，人类活动对气候变化的影响研究和认识尚需要物理过程和机制的进一步揭示，以及更加定量化的刻画。本文仅仅回顾了人类认识气候漫长历程中的冰山一角，期待通过粗线条轮廓的勾画能够对未来气候学的发展有所启示。

致谢 感谢两位审稿专家提出的建设性意见，感谢青年学者邓京勉、李攀、王婷波、李焕连、吴蓉、卢冰、张朴为本研究提供的基础素材。

参考文献（References）

陈国达. 1992. 中国地学大事典 [M]. 济南: 山东科学技术出版社.
Chen G D. 1992. The Significance of Geoscience in China[M]. Ji’nan: Shandong Science and Technology Press.

陈嘉映. 2007a. 从希腊天学到哥白尼革命 (上篇) [J]. 云南大学学报 (社会科学版), 6(1): 3−16. Chen J Y. 2007a. From Greek cosmology to Copernican revolution[J]. Journal of Yunnan University (Social Sciences Edition), 6(1): 3−16. doi:10.3969/j.issn.1671-7511.2007.01.001

陈嘉映. 2007b. 从希腊天学到哥白尼革命 (下篇) [J]. 云南大学学报 (社会科学版), 6(2): 3−14. Chen J Y. 2007b. From Greek cosmology to Copernican revolution (II) [J]. Journal of Yunnan University (Social Sciences Edition), 6(2): 3−14. doi:10.3969/j.issn.1671-7511.2007.01.001

Cox J D. 2002. Storm Watchers: The Turbulent History of Weather Prediction from Franklin’s Kite to El Niño [M]. New Jersey: John Wiley.

丹皮尔 W C. 1975. 科学史及其与哲学和宗教的关系 [M]. 李珩, 译. 北京: 商务印书馆. Dampier W C. 1975. A History of Science and Its Relations with Philosophy and Religion (in Chinese) [M]. Li H, trans. Beijing: The Commercial Press.

丁一汇, 王会军. 2016. 近百年中国气候变化科学问题的新认识 [J]. 科学通报, 61(10): 1029−1041. Ding Y H, Wang H J. 2016. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China [J]. Chinese Science Bulletin, 61(10): 1029−1041. doi:10.1360/N972015-00638

洪世年, 陈文言. 1983. 中国气象史 [M]. 北京: 农业出版社. Hong S N, Chen W Y. 1983. Chinese Meteorological History (in Chinese) [M]. Beijing: Agriculture Press.

姜海如, 赵同进, 彭莹辉. 2017. 中国古代气象 [M]. 北京: 气象出版社. Jiang H R, Zhao T J, Peng Y H. 2017. Meteorology in Ancient China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

江晓原. 1997. 《周髀算经》与古代域外天学 [J]. 自然科学史研究, 16(3): 207–212. Jiang X Y. 1997. The Influence of foreign astronomy on Zhou Bi Suan Jing [J]. Studies in the History of Natural Sciences (in Chinese), 16(3): 207–212. 江晓原. 2018. 天学真原 [M]. 上海: 上海交通大学出版社. Jiang X Y. 2018. The Truth of Chinese Ancient Astronomy (in Chinese) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press.

凯瑟林·库伦. 2011. 科学先锋——气象学 [M]. 刘彭, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社. Cullen K. 2011. Pioneers in Science (in Chinese) [M]. Liu P, trans. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press.

克拉伦斯·格拉肯. 2017. 罗得岛海岸的痕迹——从古代到十八世纪末西方思想中的自然与文化 [M]. 梅小侃, 译. 北京: 商务印书馆. Glacken C J. 2017. Traces on the Rhodian Shore (in Chinese) [M]. Mei X K, trans. Beijing: The Commercial Press.

劳埃德 G E R. 2004. 早期希腊科学: 从泰勒斯到亚里士多德 [M]. 孙小淳, 译. 上海: 上海科技教育出版社. Lloyd G E R. 2004. Early Greek Science (in Chinese) [M]. Sun X C, trans. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press.

Leighly J. 1949. Climatology since the year 1800 [J]. Eos(5): 658−672. doi:10.1029/TR030I005P00658

李克让. 1996. 全球气候变化及其影响研究进展和未来展望 [J]. 地理学报, 51(S1): 1−14. Li K R. 1996. Research progress of global climate change and its impact and future prospect [J]. Acta Geographica Sinica, 51(S1): 1−14.

柳又春. 1977. 日本气候学百年发展史 [J]. 气象科技 (6): 38−30.

刘昭民. 1980. 中华气象学史 [M]. 台北: 台湾商务印书馆. Liu Z M. 1981. Meteorological History of China (in Chinese) [M]. Taipei: Taiwan Commercial Press.

刘昭民. 1981. 西洋气象学史 [M]. 台北: 中国文化大学出版部. Liu Z M. 1981. Western Meteorological History (in Chinese) [M]. Taipei: Chinese Culture University Press.

么枕生. 1990. 我国气候科学四十年来的蓬勃发展 [J]. 地理研究, 9(1): 59−77. Yao Z S. 1990. Vigorous development of the science of climatology in China during the last forty years [J]. Geographical Research, 9(1): 59−77. doi:10.11821/yj1990010009

孙俊, 潘玉君, 贾星客, 等. 2011. 科学活动中心形成的历史地理基础 [J]. 科学学与科学技术管理, 32(11): 14−20. Sun J, Pan Y J, Jia X K, et al. 2011. The foundation of historical and geographical for the formation of scientific activities center [J]. Science of Science and Management of S. & T., 32(11): 14−20.

王乃昂. 1998. 中西古代气候学的概念模式及其比较 [J]. 自然科学史研究, 17(1): 1−8. Wang N A. 1998. The conceptual models of ancient Chinese and western climatology and their comparison [J]. Studies in the History of Natural Sciences, 17(1): 1−8.

王绍武. 2000. 20 世纪气候学理论研究的十项成就 [J]. 地球科学进展, 15(3): 277−282. Wang S W. 2000. Ten items of the most important achievements in theoretical studies of climatology during 20th century [J]. Advances in Earth Science, 15(3): 277−282. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2000.03.007

王晓文, 王树恩. 2007. “三大中心”转移与“汤浅现象”的终结 [J]. 科学管理研究, 25(4): 36−38. Wang X W, Wang S E. 2007. Shift of “Three Centers” and termination of Yuasa phenomenon [J]. Scientific Management Research, 25(4): 36−38. doi:10.3969/j.issn.1004-115X.2007.04.010

World Meteorological Organization. 1975. The Physical Basis of Climate and Climate Modeling [M]. Geneva: GARP Publications.

吴增祥. 2007. 中国近代气象台站 [M]. 北京: 气象出版社. Wu Z X. 2007. Characteristics of Meteorological Observation in the Modern Times in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

萧放. 2002. 中国上古岁时观念论考 [J]. 西北民族研究 (2): 85−96. Xiao F. 2002. The textual research on the concepts of “Year and Time” in ancient China [J]. Northwest Minorities Research(2): 85−96. doi:10.3969/j.issn.1001-5558.2002.02.018

徐宗泽. 2010. 明清间耶稣会士译著提要 [M]. 上海: 上海书店出版社. Xu Z Z. 2010. Introduction to the Translated Masterpieces of Christianity Preachers in Ming and Qing Dynasties in China (in Chinese) [M]. Shanghai: Shanghai Bookstore Publishing House.

许小峰. 2020. 气候系统研究与 HUBEX [J]. 气象科技进展, 10(5): 2−6. Xu X F. 2020. Research of climatic system and HUBEX [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 10(5): 2−6. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.001

徐淑英, 郑斯中. 1979. 三十年来我国的气候学研究工作 [J]. 地理学报, 34(4): 293−304. Xu S Y, Zheng S Z. 1979. Thirty years of climatology in China [J]. Acta Geographica Sinica, 34(4): 293−304.

doi:10.11821/xb197904002

许小峰, 张萌. 2014. 气象科技发展历程的若干回顾及启示 [J]. 气象科技进展, 4(6): 6−12. Xu X F, Zhang M. 2014. Some reviews and inspirations on the development of meteorological science and technology [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 4(6): 6−12. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.001

杨丽娟. 2016. 慕维廉《地理全志》与西方地质学在中国的早期传播 [J]. 自然科学史研究, 35(1): 48−60. Yang L J. 2016. William Muirhead' s Dili Quanzhi and the early transmission of western geology in China [J]. Studies in the History of Natural Sciences, 35(1): 48−60.

杨萍. 2016. 亚里士多德与《天象论》 [J]. 气象科技进展, 6(3): 160−163. Yang P. 2016. Aristotle and his meteorologica [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 6(3): 160−163. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.022

杨萍, 王志强. 2019. 近代海关气象发展及其历史启示 [J]. 阅江学刊, 6: 24−32. Yang P, Wang Z Q. 2019. Research on development of Chinese modern customs meteorology and its enlightenment [J]. Yue Jiang Academic Journal, 6: 24−32.

杨萍, 叶梦姝, 陈正洪. 2014. 气象科技的古往今来 [M]. 北京: 气象出版社. Yang P, Ye M S, Chen Z H. 2014. The Past and Future of Meteorological Science and Technology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

杨萍, 邓京勉, 张萌. 2018. 霍华德——为云而生的英国气象学之父 [J]. 气象科技进展, 8(2): 70−74. Yang P, Deng J M, Zhang M. 2018. Howard——Father of British meteorology who' s born for cloud [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 8(2): 70−74. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.013

伊迪斯·霍尔. 2019. 古希腊人: 从青铜时代的航海者到西方文明的领航员 [M]. 李崇华, 译. 上海: 上海社会科学院出版社. Hall E. 2019. Introducing the Ancient Greeks: From Bronze Age Seafarers to Navigators of the Western Mind (in Chinese) [M]. Li C H, trans. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press.

曾庆存, 王会军, 林朝晖, 等. 2003. 气候动力学与气候预测理论的研究 [J]. 大气科学, 27(4): 468−483. Zeng Q C, Wang H J, Lin Z H, et al. 2003. A study of the climate dynamics and climate prediction theory [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 27(4): 468−483. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.04

张家诚. 1990. 《吕氏春秋》中有关气候论述的科学意义 [J]. 自然科学史研究, 9(4): 378−385. Zhang J C. 1990. The scientific significance of the climatological knowledge in Lü-Shi Chun-Qiu [J]. Studies in the History of Natural Sciences, 9(4): 378−385.

张家诚. 1991. 中国气候总论 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang J C. 1991. A Series of Climate for China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

赵克仁. 1999. 浅谈古埃及的天文学 [J]. 阿拉伯世界 (3): 58−59.同意.

中国大百科全书总编辑委员会《地理学》编辑委员会. 1990. 中国大百科全书 地理学 [M]. 北京: 中国大百科全书出版社. Editorial Committee for Geography under Encyclopedia of China General Editorial Committee. 1990. Encyclopedia of China Geography (in Chinese) [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House.

中山茂. 2017. "天"的科学史 [M]. 汪丽影, 谢云, 译. 南京: 南京大学出版社. Shigeru N. 2017. The Science History of Celestial (in Chinese) [M]. Wang L Y, Xie Y, trans. Nanjing: Nanjing University Press.

周秀骥. 2005. 大气随机动力学与可预报性 [J]. 气象学报, 63(5): 806−811. Zhou X J. 2005. Atmospheric stochastic dynamics and predictability [J]. Acta Meteorologica Sinica, 63(5): 806−811. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.05.024

周天军, 陈晓龙, 吴波. 2019. 支撑"未来地球"计划的气候变化科学前沿问题 [J]. 科学通报, 64(19): 1967−1974. Zhou T J, Chen X L, Wu B. 2019. Frontier issues on climate change science for supporting Future Earth [J]. Chinese Science Bulletin, 64(19): 1967−1974. doi:10.1360/N972018-00818

竺可桢. 1972. 中国近五千年来气候变迁的初步研究 [J]. 考古学报 (1): 15−38.同意.