

中高层大气密度研究态势及热点分析

闫亚飞¹, 李永平^{2*}

1. 中国科学院文献情报中心, 北京 100190

2. 中国科学院国家空间科学中心天基空间环境探测北京市重点实验室, 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190

摘要 中高层大气在日地空间环境中起着承上启下的作用, 同时也是热层、电离层和磁层耦合研究的重要领域, 而中高层大气密度是大气环境的重要参数, 是当前空间科学研究的热点, 因此国内外学者开展了大量的研究工作。基于文献计量学的视角, 分析了中高层大气密度研究的发展历程、主要研究国家、重点机构、资助基金和研究热点。通过分析可以看到, 中高层大气密度研究领域年度发文呈现波动上升趋势, 全球整体发文趋势受美国、德国、中国、法国和英国5个主要国家的影响较大。美国在该领域的研发机构数量非常多, 尤其是美国科罗拉多大学和美国国家航空航天局科研实力雄厚, 且相互之间科研合作非常密切。中国进入该领域较晚, 但发展迅速, 研究队伍、研究成果和基金数量进步明显, 已经开展了神舟飞船、APOD(Atmospheric density and Precise Orbit Determination)卫星、天宫实验室、气象卫星等重大项目的大气密度探测, 获取了大量高精度实测数据。目前该领域的研究热点主要集中在中高层大气密度多手段探测、高精度大气模型建立及大气密度预报等方面。

关键词 中高层大气; 大气密度; 日地空间环境

地球大气是地球近地空间环境的重要组成部分, 也是影响日地空间灾害环境和空间天气变化的一个关键环节。中高层大气密度是地球磁层、电离层和热层之间质量、动量和能量耦合研究的重要参数, 是太阳、地磁活动、行星际扰动的响应、传输和

耦合过程研究的基本要素, 是进行空间天气预报研究、空间物理和数值预报模型研究的关键参量, 中高层大气密度在日地系统的能量和动量传输过程中起着承上启下的作用。

中高层大气主要成分为 N_2 、 O_2 、 O 、 He 、 H 等, 大

收稿日期: 2019-06-30; 修回日期: 2020-04-06

基金项目: 中国科学院文献情报中心研究所科研知识服务网络建设项目(Y9291105)

作者简介: 闫亚飞, 硕士, 研究方向为情报分析, 电子信箱: yanyf@mail.las.ac.cn; 李永平(通信作者), 研究员, 研究方向为中高层大气环境探测技术、质谱分析技术, 电子信箱: lyp@nssc.ac.cn

引用格式: 闫亚飞, 李永平. 中高层大气密度研究态势及热点分析[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 141-151; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.11.016

气密度随着高度上升而急剧下降,主要影响因素包括太阳活动、地磁扰动、地方时、经度、纬度、高度、季节等,变化剧烈。近几十年来,世界各国学者采用各种手段对中高层大气密度进行探测,并建立相应模型,对其变化机理和耦合机制进行了研究^[1]。

1 中高层大气密度探测方式

目前中高层大气密度探测的主要方式包括天基探测和空基探测。

1) 天基探测可以分为加速度计法、压力计法、质谱计法和临边探测法。

加速度计法通过加速度计感受大气阻力来反演大气密度。1974年发射的S3-1卫星的加速度计,获得了约7个月135~485 km的近地点密度数据^[2]。其他卫星包括Atmosphere Explorer C(AE-C)、Atmosphere Explorer D(AE-D)、Atmosphere Explorer E(AE-E)、San Marco-D/L等均配置了加速度计。近年来随着科学技术的进步,带动了加速度计测量精度的提高,在21世纪初发射的Challenging Minisatellite Payload(CHAMP)和Gravity Recovery And Climate Experiment(GRACE)卫星上,获得了300~400 km高度附近较好的大气密度数据^[3-6]。

压力计法通过测量卫星飞行状态下的气体动压获得自由大气的密度。例如,1968年发射的Orbiting Vehicle 1-15(OV1-15)航天器上配置了金属薄膜式压力计,1975年发射的S3-2卫星上同时配置了冷阴极电离计和热阴极电离计,21世纪美国也发射了数颗压力计探测卫星进行大气探测^[7-8]。中国的神舟飞船、APOD(Atmospheric density and Precise Orbit Determination)大气探测卫星也采用热阴极电离计进行大气密度探测^[9-12]。

质谱计法通过质谱分析方法获得空间各气体组分的质谱信息。1972年发射的Aeros-A配置了质谱仪,用于监测高层大气成分和密度。1981年发射的Dynamics Explorer 2(DE-2)卫星配置了质谱计,该仪器同时具有测量大气密度、成分的功能^[13]。中国天宫实验室配置了轨道大气环境探测器,成功获取了该轨道的长期大气密度和大气成分

分布变化^[14-18]。

临边探测法采用临边扫描的方式获得大气信息。高层大气研究卫星(UARS)和热层-电离层-中间层能量和动力学卫星(TIMED)分别于1991和2001年发射升空,获取了相应区域的大气环境信息^[19]。中国的天宫二号装载了紫外临边成像光谱仪,观测大气痕量气体含量、分布及其变化^[20]。

2) 空基探测主要方式是探空火箭和气球探测^[21]。探空火箭可用于对大气成分、密度等要素进行原位探测,是30~200 km高空的有效探测工具。世界第1枚探空火箭是1945年美国发射的高空探测火箭,飞行高度70 km,有效载荷重量11 kg^[22]。2007年NASA发射的Black Brant、Terrier-Black Brant、Terrier Orion火箭获得了更多关于96.6~193 km稀薄大气加热的信息,成功地在亚暴事件期间对高纬度地区焦耳加热进行了多尺度研究^[23]。中国在探空火箭方面也有相关研究,从20世纪80年代开始,中国研制并发射了多种气象火箭,在20世纪发射的约260枚探空火箭中有1/2以上用于中层大气(海拔20~80 km)的大气密度、温度、压力等要素探测,取得了丰硕成果^[23]。

2 中高层大气密度建模

在大气建模方面,早在20世纪60年代Jacchia等开发了地球大气模型,先后形成了Jacchia 1971和1977热层大气经验模型。随后各国学者们开发了更为完善的Drag Temperature Model(DTM)、US Naval Research Laboratory Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar Extended(NRLMSIS)系列模型^[24]。

DTM系列模型采用扩散平衡方程的解析解形式,采用卫星阻力、大气成分和温度数据计算模型系数。Barlier等利用从卫星曳力数据反演的热层大气温度和密度数据首次开发了DTM78模型。通过扩充建模数据以及改进算法,提高了DTM94的大气密度精度^[25]。2003年,Bruinsma等通过对DTM94模型增加新的探测数据和改进算法,进一步提高在低太阳活动状态下的密度预报能力,并与

NRLMSIS86进行了比较。

NRLMSIS 系列模型是基于卫星质谱仪资料和非相干散射雷达测量温度结果进行建模。1983 年, Hedin 在模型中增加了高太阳活动时的观测数据以及利用地磁 A_p 指数描述大气参数在磁暴后的变化, 形成了 NRLMSIS83 模型。NRLMSISE90 模型将下边界下降到地球表面, 主要描述从地面到热层高度的地球中性大气的温度、密度和各气体成分的数密度。NRLMSISE00 模型则是美国海军实验室 (Navy Research Laboratory, NRL) 以 NRLMSISE90 和 Jacchia70 为基础开发改进而来, 该模型可以反映热层大气密度的基本变化特征。NRLMSISE00 是目前国际上最为先进而完善的大气经验模型之

3 中高层大气密度领域论文研究趋势

以大气密度、中层大气密度、中高层大气密度、热层大气密度等为关键词构建检索策略, 利用 Web of Science 核心合集数据库, 进行相关文献检索。经过专业判读, 数据集保留了研究主题为大气密度探测方法、探测数据分析、探测数据建模、探测数据同化等相关文献 530 篇。利用 Derwent Data Analyzer (DDA) 软件和 VOSviewer 软件对论文数据进行可视化分析。

3.1 中高层大气密度领域论文年度趋势

全球中高层大气密度研究领域年度发文呈现出波动上升趋势, 并且受美国、德国、中国、法国和英国 5 个主要国家的发文量影响较大。整体上可以将该领域的发文趋势分为 3 个阶段(图 1)。

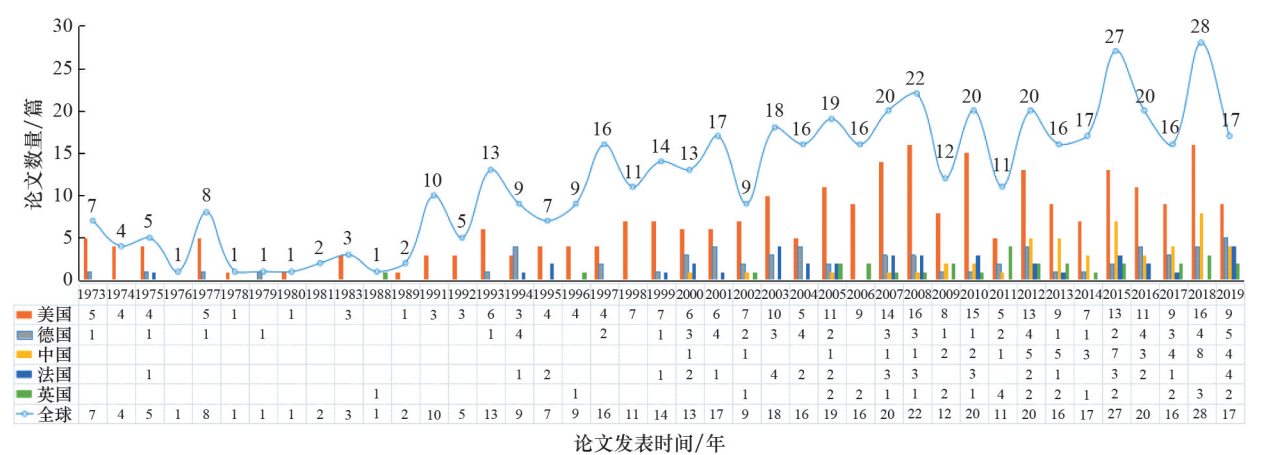


图1 中高层大气密度研究领域年度发文趋势

- 1) 第1阶段(1973—1989年)。这期间内全球发表论文数量较少, 美国是主要的发文国家, 其次是德国, 英国和法国偶尔也有论文发表。主要研究内容集中在使用 SME 扫描仪, Gamma、Herzberg-I 火箭, Sputnik-III、San-Marco 卫星, Esro-4 气体分析仪, AE-C 加速度计、Shuttle 高分辨率加速度计, 分子束、电子束等对中高层大气密度、氮氧密度、臭氧密度等进行测量, 同时也对季节、潮汐、太阳辐射等环境变化大气密度的影响进行了研究。
- 2) 第2阶段(1990—2006年)。该期间全球论文发表数量较前一阶段有所上升, 年度平均论文数量超过 10 篇。除美国外, 德国和法国在该领域科

研活动更加频繁,中国开始在该领域发表相关研究论文。这段时期的主要研究方向集中在利用CHAMP、STAR 加速度计(Spatial Triaxial Accelerometer for Research)、SNOE 卫星(Student Nitric Oxide Explorer)、CRISTA (The Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere)、夜光云 93 火箭等对大气密度、NO 密度、测量大气密度、氮氧化物密度进行测量。同时也研究了地磁暴、太阳耀斑、太阳周期、高空风、太阳射线等环境变化对大气密度的影响并构建了氧氮模型。

3) 第 3 阶段(2007—至今),这期间全球年度平均发文数量保持在 20 篇以上,中国在该领域的发文数量增长迅速,逐步超过德国和法国。这段时间内的主要研究方向有利用 CHAMP、TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics)、STPSat-1 卫星(Space Test Program Satellite-1)测量大气密度,研究了太阳极紫外线辐

照度、太阳日冕洞、太阳风高速流、太阳活动周期、地磁、极光、湍流等对大气密度的影响,并建立了相应模型。

3.2 中高层大气密度领域主要发文国家

全球已有多个国家在中高层大气密度研究领域进行相关研究,其中发文量较多的 10 个国家分别是美国、德国、中国、法国、英国、俄罗斯、挪威、日本、奥地利和瑞典(表 1)。其中美国在该领域发文数量最多(282 篇),超过其他 9 个国家的发文量总和。美国和德国在该领域的研究持续时间最长,均超过 45 年;紧随其后的是法国、挪威和瑞典,这些国家在 20 世纪 70 年代也有相关论文发表。

从国家之间的科研合作来看,美国基于其强劲的研究实力,与其他 9 个国家建立了密切合作关系。德国与英国、俄罗斯、挪威、日本、奥地利和瑞典建立了密切合作关系。中国与美国、瑞典和澳大利亚有着密切合作关系。

表 1 中高层大气密度研究领域排名前 10 发文国家

排名	国家	论文研究年限	论文总量/篇	篇均被引	主要机构	主要合作国家
1	美国	1973—2019	282	22.21	科罗拉多大学(60)	德国(16)
					美国国家航空航天局(41)	法国(16)
					美国国家大气研究中心(30)	中国(14)
2	德国	1973—2019	67	21.21	德国莱布尼茨大气物理研究所(18)	美国(16)
					德国波恩大学(10)	挪威(11)
					德国马克斯·普朗克学会(5)	英国(7)
3	中国	2000—2019	49	7.45	中国科学院(26)	美国(14)
					中国科学技术大学(10)	瑞典(3)
					北京航空航天大学(4)	澳大利亚(3)
4	法国	1975—2019	38	26.76	法国国家科研中心(7)	美国(16)
					法国国家空间研究中心(6)	荷兰(5)
					Ctr Natl EtudSpatiales(6)	英国(5)
5	英国	1988—2019	27	12.52	英国兰卡斯特大学(5)	美国(13)
					英国利兹大学(4)	德国(7)
					英国南安普敦大学(3)	挪威(6)
6	俄罗斯	1994—2016	24	12.71	俄罗斯科学院(9)	德国(4)
					俄罗斯极地地球物理研究所(3)	美国(3)
						瑞典(3)
7	挪威	1979—2017	22	13.82	挪威国防部(6)	德国(11)
					挪威特罗姆瑟大学(5)	美国(9)
						英国(6)

表1 中高层大气密度研究领域排名前10发文国家(续)

排名	国家	论文研究年限	论文总量/篇	篇均被引	主要机构	主要合作国家
8	日本	1991—2017	19	18.63	日本京都大学(5) 日本东京大学(5)	美国(11) 德国(9) 英国(3)
9	瑞典	1977—2019	18	17.11	瑞典空间物理研究所(6) 瑞典斯德哥尔摩大学(5)	德国(6) 美国(5)
10	奥地利	1997—2018	16	20.88	奥地利科学院(7) 奥地利格拉茨大学(5) 奥地利格拉茨技术大学(5)	美国(6) 德国(6)

中国虽然在该领域的发文时间较晚,但是研究发展迅速,平均年度发文量为2.45篇,仅次于美国。中国科学院、中国科学技术大学和北京航空航天大学在该领域的发文数量排在前3位。从高质量论文数量来看,中国发表论文的篇均被引量比其他国家要低,表明中国在大气密度研究领域的科技影响力仍有待加强。目前中国在该领域的主要研究包括高层大气热力结构,太阳活动、地磁活动、纬向风对热层大气密度的影响,自适应预报模型,CHAMP、GRACE数据研究等领域。

3.3 中高层大气密度领域主要发文机构

全球在中高层大气密度研究领域发文最多的30个机构中,60%的机构来自美国,其他机构则分别来自德国、中国、奥地利、俄罗斯、法国和芬兰(表2)。发文数量排在前4位的机构分别是美国科罗拉多大学、美国国家航空航天局、中国科学院和美国国家大气研究中心,发表论文数量均超过30篇。从持续发文时间来看,德国波恩大学、美国犹他州立大学、美国麻省理工学院、德国马克斯·普朗克学会、德国亥姆霍兹联合会是该领域持续发文时间最长的机构,均超过40年。从论文篇均被引量来看,美国亚利桑那大学的论文质量非常高,篇均被引超过了60次,其次是美国国家大气研究中心、美国科罗拉多大学和美国加州理工学院,论文篇均被引也都超过30次,中国机构的篇均被引频次相对较低。

美国科罗拉多大学是全球在该领域贡献论文最多的机构,其发文量和被引量均居全球第一。其主要研究内容包括太阳活动对热层大气密度影响,

热层中性密度数据获取,热层大气NO密度、氧氮密度、氧氮比,热层密度对磁暴的响应,臭氧密度、中层粒子、电磁干扰等方面。

美国国家航空航天局的主要研究内容集中在人类活动对于热层大气密度的影响,高速流和同向相互作用区域对热层大气模型影响,模拟地磁响应的热层大气模型,夜光云93火箭探测大气中氧密度,赤道热层大气动力特性,利用Arecibo Radio Telescope(Arecibo)探测随时间变化的赤道热层大气密度等方面。

中国科学院的主要研究内容集中在太阳活动、地磁暴对大气密度的影响,氧氮比,中层密度变化,数据标校方法等方面。

3.4 中高层大气密度领域发文机构之间合作

中高层大气密度研究领域排名前50发文机构之间科研合作十分频繁,尤其是国内机构之间的合作更为密切(图2)。美国国内机构之间以科罗拉多大学、国家航空航天局和美国科学系统与应用公司为主要节点,与多个机构之间展开科研合作。欧洲以挪威国防部和奥地利格拉茨科技大学为主要节点,与多个机构之间开展科研合作。美国科罗拉多大学和许多机构建立了科研合作关系,其中合作论文最多的机构分别是美国国家航空航天局、美国国家大气研究中心和中国科学院。科罗拉多大学和中国科学院的合作论文主要研究内容包括地磁活动、太阳周期、太阳风等对热层密度的影响,分析CHAMP、TIMED、GUVI(Global Ultraviolet Imager)等氮氧密度数据等方面。

中国科学院和中国科学技术大学之间有着密

表2 中高层大气密度研究领域发文排名前30机构

排名	机构名称		论文 总量	总被 引量	篇均 被引	研究时间
1	Univ Colorado	美国科罗拉多大学	61	2161	35.00	1992—2019
2	NASA	美国国家航空航天局	60	1320	22.00	1980—2019
3	Chinese Acad Sci	中国科学院	33	262	7.94	2000—2019
4	Natl Ctr Atmospher Res	美国国家大气研究中心	31	1011	32.61	1992—2019
5	USN	美国海军	22	377	17.14	1993—2018
6	Leibniz Inst Atmospher Phys	德国莱布尼茨大气物理研究所	21	502	23.90	2001—2019
7	USAF	美国空军	21	378	18.00	1974—2017
8	Helmholtz Association	德国亥姆霍兹联合会	18	230	12.78	1977—2019
9	Univ Bonn	德国波恩大学	17	404	23.76	1973—2019
10	Univ Michigan	美国密歇根大学	15	219	14.60	1991—2018
11	Johns Hopkins Univ	美国约翰霍普金斯大学	14	182	13.00	1996—2019
12	Russian Acad Sci	俄罗斯科学院	14	246	17.57	1997—2016
13	CNRS	法国国家科研中心	13	214	16.46	1995—2101
14	Boston Univ	美国波士顿大学	12	167	13.92	1991—2018
15	Univ Illinois	美国伊利诺伊大学	12	210	17.75	1992—2018
16	Univ Calif Berkeley	美国加州大学伯克利分校	11	131	11.91	2002—2018
17	Aerospace Corporation	美国航空航天公司	10	134	13.40	1974—2015
18	Univ Sci & Technol China	中国科学技术大学	10	105	10.50	2012—2018
19	Max Planck Inst Solar Syst Res	德国马克斯·普朗克学会	10	200	20.00	1977—2020
20	Univ Alabama	美国阿拉巴马大学	9	174	19.33	1991—2015
21	MIT	美国麻省理工学院	9	85	9.44	1975—2019
22	Univ Alaska	美国阿拉斯加大学	9	27	25.22	1996—2015
23	Univ Arizona	美国亚利桑那大学	8	510	63.75	1980—2018
24	Caltech	美国加州理工学院	8	253	31.63	1998—2018
25	Utah State Univ	美国犹他州立大学	8	112	14.00	1974—2019
26	Finnish Meteorol Inst	芬兰气象研究所	8	136	17.00	2003—2019
27	Helmholtz—Center Potsdam GFZ Ger- man Research Center for Geosciences	德国地球科学研究中心	8	140	20.00	2005—2018
28	Graz Univ Technol	奥地利格拉茨技术大学	8	80	10.00	1997—2018
29	Penn State Univ	美国宾夕法尼亚州立大学	8	97	12.13	1975—2009
30	Austrian Acad Sci	奥地利科学院	7	200	28.57	1998—2018

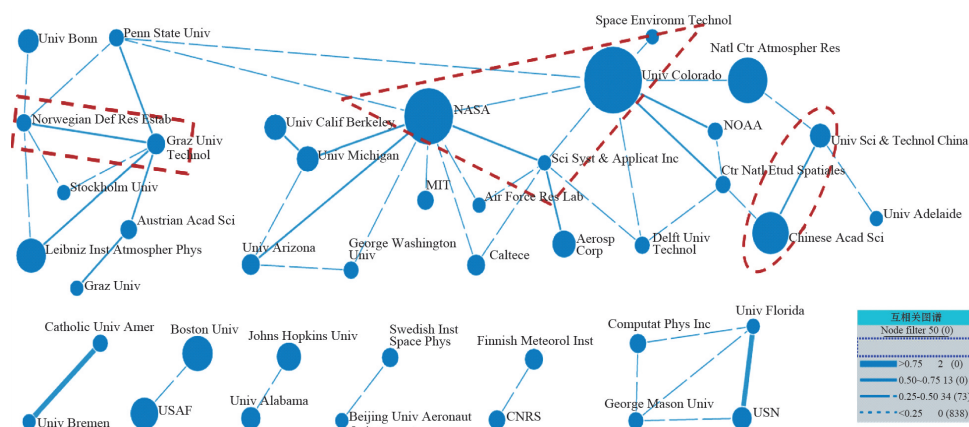


图2 中高层大气密度研究领域排名前50发文机构合作关系

切的科研合作,主要合作研究内容包括利用CHAMP大气密度数据进行密度建立模型;利用雷达和 Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry (SABER)测量中层大气的密度、压力和温度;研究氦、地磁、太阳活动周期与大气密度的关系。

3.5 中高层大气密度领域发文主要资助基金

中高层大气密度领域发文机构也获得了全球

多个机构的基金资助,资助产出论文最多的10个基金机构中,美国和中国分别有3个机构,德国有2个机构,其余是英国科学与技术设施理事会和欧洲航天局。近10年来,美国国家航空航天局和美国国家科学基金资助的领域持续产出科研论文。中国国家自然科学基金和德国航空航天中心除2011年外也均有科研论文产出(图3)。

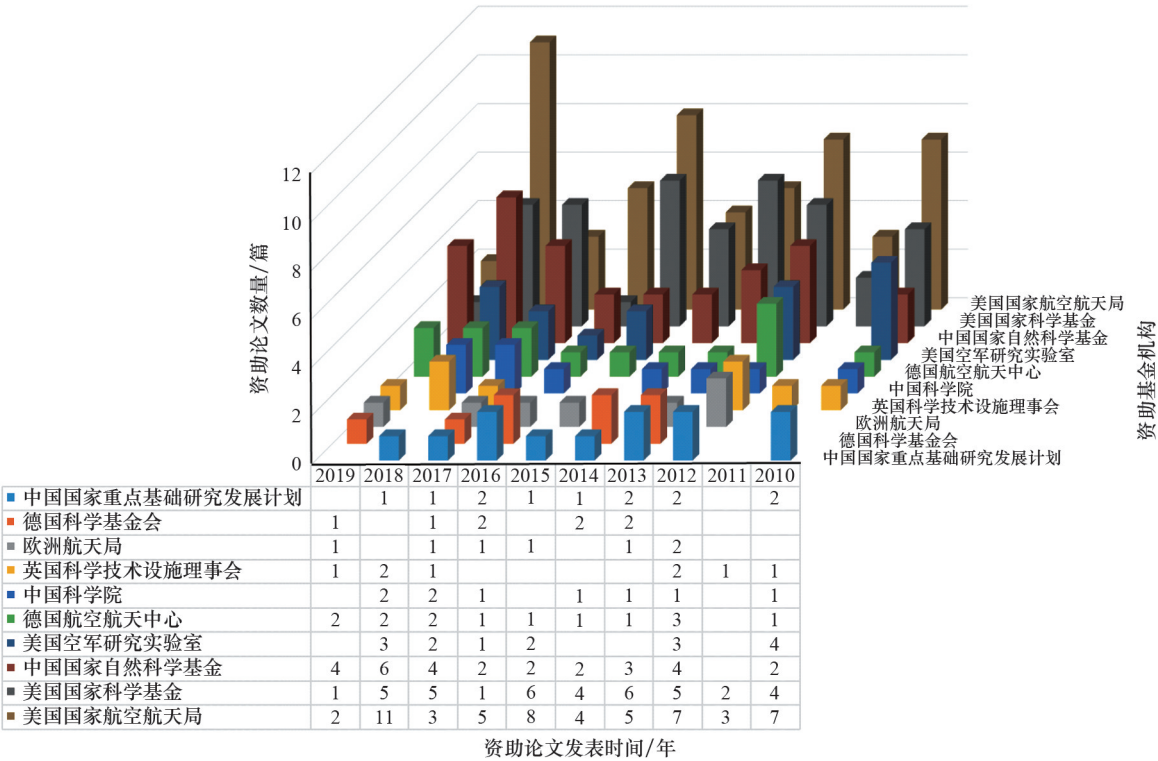


图3 中高层大气密度研究领域重点资助基金机构

美国国家航空航天局基金和美国国家科学基金主要资助机构有美国国家航空航天局、国家大气研究中心、科罗拉多大学等,主要资助领域包括天文、大气、地质和地球方面,主要资助论文研究内容包括太阳辐照及低年期间对热层密度的影响,预测极光对于热层密度温度影响,研究在高速流和同向相互作用区域热层-电离层的影响模型,模拟地磁影响下的热层动态模型以及气候模型等。

中国国家自然科学基金主要资助机构有中国科学院、中国科学技术大学和北京航空航天大学,主要资助领域包括天文、大气和航空航天工程,主

要资助论文研究主题包括热层大气密度对地磁活动的响应,利用CHAMP、ISUAL(Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning)、SABER、TIMED和GUVI的大气原子氧密度和氧氮密度,研究地磁暴、太阳活动对于热层大气密度的影响,利用TIEGCM (Thermosphere Ionosphere Electrodynamic General Circulation Model)构建大气密度和温度模型等。

3.6 中高层大气密度领域发文热点方向及主题

根据Web of Science数据库的学科方向分类,中高层大气密度研究领域论文的主要研究集中在

间的由远及近,黄色为近5年的研究热点。

将每个聚类中的关键词归纳为研究主题,可以发现该领域研究主要研究方向包括:(1) 通过CHAMP、Cubesatellite等卫星/仪器,或使用立方星星座发射大气探测载荷,获取中高层大气探测数据,构建大气相关模型,进行数据同化,提高大气模型的精度,用于大气密度预报以及轨道确定,此项是近期的研究热点;(2) 通过探空火箭探测中层大气、低热层大气中的中性粒子和原子氧,研究其分布情况和尺度信息;(3) 研究大气密度变化与太阳活动、地磁扰动等相关关系,通过中高层大气密度数据分析,对气候学、大气密度区域小尺度变化特性和不规则尺度特点进行研究;(4) 研究大气密度、大气成分和温度的相关性;(5) 结合电离层和磁层的环境数据,开展中高层大气密度与电离层、磁层耦合研究。

4 结论

中高层大气作为地球空间环境的重要部分,是空间科学研究热点。随着世界航天活动的日益频繁,对中高层大气密度的研究工作提出了更高要求,需要进一步提高大气模型精度,精细研究中高层大气与太阳活动、地磁活动、电离层、磁层等的耦合机制。

美国 and 欧洲通过早期发射AE-C、AE-D、AE-E、S3-2、San Marco-D/L、UARS、TIMED等卫星,近期发射CHAMP、GRACE等卫星,获取了大量大气实测数据,建立了诸如Jacchia、DTM、MSIS等系列经典大气模型,科研成果丰硕,科技实力雄厚,尤其美国在发文数量和持续产出方面都远远超过其他国家。

中高层大气密度研究领域年度发文呈现出波动上升趋势,全球整体发文趋势受美国、德国、中国、法国和英国这5个主要国家的发文量影响较大。美国在该领域的研发机构数量也非常多,且相互之间的科研合作非常密切。世界各相关研究机构的合作程度更加紧密,数据共享大力协同,实现更大科研成果产出已成为当前国际合作的趋势。

中高层大气密度领域研究热点包括持续进行天基星载探测、天基临边探测及探空火箭探测,进行全方位精细大气探测;持续改进、提高相关模型精度,为大气密度预报及轨道确定服务,研究大气密度与地磁暴、太阳耀斑、太阳周期、等离子体、高能粒子、重力波等相关要素变化特性。

中国进入该领域较晚,但发展迅速,研究队伍、研究成果和基金数量进步明显。已经开展了神舟飞船、APOD卫星、天宫实验室、气象卫星等重大项目的大气探测,获取了大量高精度实测数据,进行了中高层大气变化规律研究、响应机制特性分析、模型研究开发改进等全方位研究,产出许多重要成果,随着中国科研人员的持续努力和不断付出,将为该领域的发展做出重要贡献并产生深远影响。

参考文献(References)

- [1] Emmert J T. Thermospheric mass density: A review[J]. *Advances in Space Research*, 2015(56): 773-824.
- [2] Barlier F, Berger C, Faling J L, et al. Thermospheric model based on satellite drag data[J]. *Annicae geophysales*, 1978, 34(1): 9-24.
- [3] Liu H, Lühr H, Henize V, et al. Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110(4), <https://doi.org/10.1029/2004JA010741>.
- [4] Xu J Y, Wang W B, Lei J H, et al. The effect of periodic variations of thermospheric density on CHAMP and GRACE orbits[J/OL]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2011, 116(2), <https://doi.org/10.1029/2010JA015995>.
- [5] Bruinsma S, Tamagnan D. Atmospheric densities derived from CHAMP/STAR accelerometer observations[J]. *Planetary and Space Science*, 2004(52): 297-312.
- [6] 陈光明, 符养, 薛震刚, 等. 利用星载加速度计数据反演高层大气密度的方法[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 11(3): 371-376.
- [7] Osborne J J, Harris I L, Roberts G T, et al. Satellite and rocket-borne atomic oxygen sensor techniques[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(11): 4025-4041.
- [8] Clemmons J H, Hecht J H, Salem D R, et al. Thermospheric density in the Earth's magnetic cusp as observed by the Streak mission[J]. *Geophysical Research Letters*,

- 2008(35): 24103.
- [9] 秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 等. 神舟2号大气密度探测器的探测结果(I)日照和阴影区域热层大气密度变化[J]. 空间科学学报, 2002, 22(2): 136-141.
- [10] 秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 等. “神舟3号”运行高度上大气密度的变化[J]. 空间科学学报, 2004(4): 269-74.
- [11] 李颢, 徐寄遥, 唐歌实, 等. APOD卫星大气密度数据处理与标校[J]. 地球物理学报, 2018, 61(9): 3567-3576.
- [12] Tang G S, Li X, Cao J F, et al. APOD mission status and preliminary results[J]. Science China Earth Sciences, 2020, 63(2): 257-266.
- [13] Offermann D. Composition variations in the lower thermosphere[J]. Journal of Geophysical Research, 1974, 79(28): 4281-4293.
- [14] 陈华姣, 秦国泰, 李永平, 等. 天宫一号大气密度探测数据与模式的比较分析[J]. 载人航天, 2013(6): 38-42.
- [15] 李永平, 朱光武, 秦国泰, 等. 不同高度和不同地磁扰动期间热层大气密度模式值与探测值的显著差异[J]. 地球物理学报, 2014, 57(11): 3703-3714.
- [16] 李永平, 朱光武, 秦国泰, 等. 地磁扰动期间热层大气 N_2 数密度异常增变[J]. 中国科学(技术科学), 2014, 44(8): 883-889.
- [17] Guotai Q. Disturbance of the upper atmospheric density during August 24, 2005 severe geomagnetic storm event [J]. Chinese Journal of Space Science, 2008, 28(2): 137-141
- [18] 李永平, 孙越强, 王馨悦, 等. 两分两至点热层大气密度变化[J]. 科技导报, 2019, 37(6): 104-113.
- [19] Fleming E L, Chandra S, Burrage M D, et al. Climatological mean wind observations from the UARS high-resolution doppler imager and wind imaging interferometer: Comparison with current reference models[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres. 1996, 101(6): 10455-10473.
- [20] 任海根, 李盛阳. 天宫二号对地观测应用研究进展[J]. 载人航天, 2019, 25(6): 825-833.
- [21] 陈凤贵, 陈光明, 刘克华. 临近空间环境及其影响分析[J]. 装备环境工程, 2013(4): 71-75.
- [22] 李大耀. 火箭探空活动的领域和价值[J]. 中国航天, 1992(12): 12-13.
- [23] 姜秀杰, 刘波, 于世强, 等. 探空火箭的发展现状及趋势[J]. 科技导报, 2009, 27(23): 101-110.
- [24] Bowman B R, Tobiska W K, Marcos F A, et al. The JB2006 empirical thermospheric density model[J]. Journal of Atmospheric & Solar Terrestrial Physics, 2008, 70(5): 774-793.
- [25] Berger C, Biancale R, Ill M, et al. Improvement of the empirical thermospheric model DTM: DTM94-A comparative review of various temporal variations and prospects in space geodesy applications[J]. Journal of Geodesy, 1998, 72(3): 161-178.
- [26] Hedin A E. A Revised thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data: MSIS-83 [J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88(12): 10170.
- [27] Hedin A E. MSIS-86 Thermospheric model[J]. Journal of Geophysical Research Space Physics, 1987, 92(5): 4649-4662.
- [28] Hedin A E. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1991, 96(2): 1159-1172.
- [29] Picone J M. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(12): 1468.

Development trend and hotspot analysis of middle and upper atmospheric density researches

YAN Yafei¹, LI Yongping^{2*}

1. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The middle and upper atmosphere plays an important role in the solar-terrestrial space environment. It is also an important field for the study of the coupling of the thermosphere, the ionosphere and the magnetosphere. A great amount of research work in this respect was carried out both at home and abroad. With the bibliometric analysis method, this paper analyzes the development process, the main countries concerned, the key institutions, the funding and the research hotspots related with the middle and upper atmospheric density. Through the publication data analysis, it can be concluded that the annual publication in this field shows a rising trend of fluctuation. The overall global publication trend is greatly affected by the United States, Germany, China, France and the United Kingdom. The United States shares a large number of R & D institutions in this field. The University of Colorado and the National Aeronautics and Space Administration have a great scientific research capability. They have a very close scientific research cooperation with each other. Chinese institutions started related scientific researches later, but with a very rapid development. The numbers of research teams, the research achievements, and the funds have increased significantly. Important projects have been implemented, such as Shenzhou spacecraft, AP0D (Atmospheric density and Precise Orbit Determination) satellites, Tiangong laboratory, and meteorological satellites for the density detection, have obtained a large amount of high-precision measured data. The density detection by multiple methods, the establishment of high-precision atmospheric models and the prediction of atmospheric density are the current research hotspots of middle and upper atmosphere researches.

Keywords middle and upper atmosphere; atmospheric density; solar-terrestrial space environment ●



(责任编辑 王志敏)