

# 浮空飞行器极地科学探测

蔡榕 孙建颖

(中国科学院空天信息创新研究院 100094)

## 1. 极地的主要特点

传统意义上的“极地”是指地球的两极,即南极和北极。南极地区以南极洲为中心,周围濒临太平洋、大西洋、印度洋三大洋;北极地区以北冰洋为中心,周围濒临亚洲、欧洲、北美洲三大洲。广义的极地还包括青藏高原,被认为是地球的第三极。极地地区气候严寒,是地球的冷源和全球变化的驱动器,尤其是南极,乃是地球上至今未被开发、未被污染的洁净大陆,蕴藏着无数的科学之谜和信息。

极地的主要特点包括:

(1) 极地的气候特点——严寒、高压:两极地区的太阳高度角最小,接受的太阳辐射少,因此两极地区气温低,几乎全年都被冰雪覆盖。此外,极区空气受冷收缩、积聚,地面空气密度高,质量增加,由热力原因导致的冷高压,形成了南北两个极地高压带。

(2) 极地的自然现象——极昼极夜:极昼和极夜是地球两极地区的自然现象。“极昼”,即太阳总不落下,天空总是亮的;“极夜”,与极昼相反,即太阳总不出来,天空总是黑的。每年南、北两极,“极昼”、“极夜”交替出现。

(3) 极地大气环流——极涡:南北极的对流层,冬夏两季均是气旋式环流,称为极涡。北半球因为大陆分布不均匀,极涡是经常不在北极中心。南极则因为中心是大陆,海陆分布相对比较均匀,所以极涡几乎无偏心且比较稳定。南极极涡比北极极涡更为显著,持续时间也 longer。

(4) 极地臭氧层空洞:臭氧层有保护低层大气免遭强紫外线侵入的作用,臭氧层出现空洞会对人

体健康和生态系统产生不利影响。极地臭氧层空洞与使用氟里昂致冷剂有关。此外,南极上空出现的臭氧空洞与极地平流层云的存在有关,云冰粒子的形成为耗损臭氧的反应提供了非均相表面,加速了臭氧层损耗。

(5) 太阳活动影响——极光:极光是一种绚丽多彩的等离子体现象,地球的极光是来自地球磁层粒子沉降或太阳的高能带电粒子流(太阳风)使高层大气分子或原子激发(或电离)而产生,常常出现于纬度靠近地磁极地区上空。极光产生的条件为:大气、磁场、高能带电粒子。

可见,极地地区冷源与赤道热源是地球大气基本驱动力;极地在全球变化研究,特别是在全球气候变化研究中,起着不可替代的关键作用。由于磁力线是开放的,两极是空间环境与低层大气耦合的重要窗口,极区丰富的地球物理(空间物理)现象具备特殊的科研价值。

## 2. 极地科学探测的发展现状

### 2.1 极地科学研究

极地科学是多学科高度交叉的领域,由于极地特殊的地理位置,在极区开展的各领域研究都有其独特的优势,可开展的科学实验涉及大气科学、空间物理学、地质与环境科学、天文学等。目前世界上20多个国家在两极地区建立了50多个极地常年考察站,开展地球物理、大气、冰川及空间环境的观测研究。中国也已建立多个极地科考站,包括在北极建立了黄河科考站,在南极相继建立了长城站、中山站、昆仑站、泰山站,并正在酝酿建设南极罗斯海新站。



图1 中国极地科考站

我国从事极区高空大气物理学研究的时间远滞后于美国、日本、澳大利亚等国,但自1994年中国第11次南极考察以来,我国科学家通过与日本、澳大利亚等国科研机构合作,搭建了多类地基高空大气物理观测平台,为开展极区高空大气物理学研究提供了理想的观测基地。

目前我国极地科考在国家海洋局极地考察办公室和中国极地研究中心的牵头组织下,由国家海洋局、中国科学院、国土资源部、中国气象局、农业部、教育部高校等研究机构共同开展极地科学研究。在“2019中国极地科学学术年会”上,国家海洋局极地考察办公室表示,《极地科学基础研究优先领域》规划中已确定6大优先领域,希望未来5~10年能对此6大领域的创新研究有所贡献,具体包括:极地冰盖不稳定性及海平面变化、北极海-冰-气相互作用及其气候效应、南大洋环流变化及其全球效应、南北极地质过程及资源环境效应、极地生态系统的敏感性与脆弱性、日地耦合与极区大气圈层相互作用。

在极地科学探测方面,我国已开展的研究和主要学科方向包括:

### (1) 极地大气科学

南北两极是地球上的气候敏感地区,也是多个国际科学计划研究全球气候变化的关键地区。中国的极地大气科学考察与研究始于20世纪80年代,40年来我国陆续在南极长城站、南极中山站、北极黄河站、中-澳合作南极冰盖无人自动气象站等地开展了极地大气科学与全球变化研究,包括极地天气气候特征及气候变化时空多样性、极地海冰变化和南极海冰涛动、极地近地面物理特征和海-冰-气相互作用、中山站臭氧变化特征及南极臭氧洞和大气化学、气候代用资料获取和古气候环境、极地大气环境变化对东亚环流和中国天气气候影响等方面的研究等。

### (2) 极地空间物理

两极地区开放磁力线,是空间环境与低层大气耦合的重要窗口,是“天区观测的天堂”。我国在极地空间物理领域取得了一定成果:构建了极隙区空间环境南北极共轭观测体系,研制国际领先水平的钠荧光多普勒激光雷达系统;观测到极区电离层“等离子体云块”的完整演化过程;在极光亚暴发生区建立了中-冰联合极光观测台,获得日侧极光的综合观测分布特征,发现了一类新的极光形态——“喉区极光”;首次获得磁暴袭扰地球期间,极区电离层等离子体云块演化的直接观测证据。

### (3) 极地地质与环境科学

极地地质与环境科学涉猎广泛,包括冰川和冰盖研究、海洋环境研究、极地生物研究等。在极地冰川研究领域,我国建立了“普里兹湾-艾默里冰架-冰穹A(PANDA)”观测断面和冰穹A地区冰川学综合观测体系,在国际上首次揭示南极冰盖的形成和演化过程;构建南极固定翼飞机综合科考系统,伊丽莎白公主地航空调查填补国际空白区,发现了南极第二大冰下湖。在极地海洋学研究领域,通过研究环流和海洋热通量等要素变化对海冰和冰架的潜在影响,提高对极地冰-海相互作用的科学认知;我国自主研发的“海-冰-气无人冰站观测系统(UNIS)”在北冰洋实现了1年以上连续观测,将

作为我国构建极地海洋观测网核心装备,参与北极气候研究漂流观测国际计划。在极地生物学研究领域,我国构建了极地微生物菌种资源保藏与研究技术平台,发现并报道了一批微生物新物种及新型活性酶与酶基因,提出了环境污染物全球长距离传输机理与来源解析的一系列新认识。

#### (4) 天文学

天文学方面,我国开展了黑洞与星系共同演化研究,发展了一套利用氢和氦元素示踪黑洞周边气体的新方法,首次获得了物质吸入黑洞过程的直接观测证据;提出国家重大科技基础设施“中国南极昆仑站天文台”的概念方案。

虽然我国在以上极地科学方向取得了一定的进展,但相较于国外,我国开展极地科考的时间较短,各类新型探测手段起步较晚,积累的科学观测数据仍不足,尤其是在极地空间科学层面,应进一步结合高空探测手段,补充现有观测数据,提高探测能力和应用价值。

### 2.2 极地科学探测手段

极地科学探测包括地基探测(包括大气成分和空间环境观测等各类地面观测载荷)、空基探测(包括固定翼飞机、固定翼无人机、旋翼无人机等)、天基探测(主要为极轨卫星)和浮空飞行器探测等手段。各类探测手段的优缺点如下:

(1) 地基探测:可稳定、持续地对大气和空间环境进行观测,但相较于高空探测平台,其数据分辨率相对较差,且地基数据观测站无法移动,需要与其他探测方式相结合,进一步提高数据的应用价值。

(2) 空基探测:有人驾驶的固定翼飞机虽然可搭载多类机载设备开展航空探测,但由于目前进出南极的航空通道数量较少,且需要及时补充燃料,因此实验能力有限;而固定翼无人机和旋翼无人机进行航空探测,可搭载成像载荷、摄影测量载荷等设备,其缺点为只能搭载轻量化的小型载荷。

(3) 天基探测:极轨卫星是指轨道通过地球的南北极、且轨道与太阳同步的卫星,卫星运行时能到达南北极区上空,且能飞经全球范围的上空,但



(a)



(b)



(c)

图2 我国在南极中山站建设的部分数据观测平台  
(a) 1997年2月建成的极区高空大气物理观测站;(b) 2010年2月建成的空间环境观测站;(c) 2019年2月建成的激光雷达观测系统



图3 中国首架极地固定翼飞机“雪鹰601”

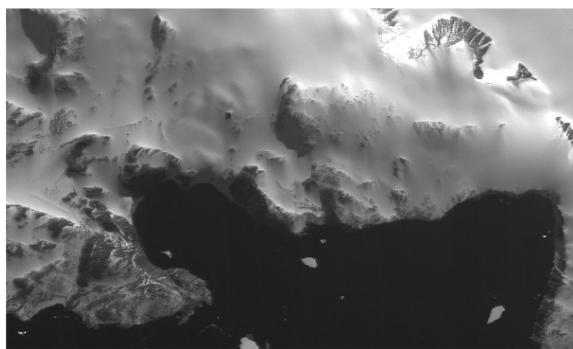


图4 中科院空天信息创新研究院研制的星载高分辨率相机于2017年2月拍摄的南极 Zucchelli 站附近全色遥感影像

不是固定在极地上空,每次过境时拍摄的数据量有限,且星载探测还具有成本较高、机动性差、分辨率不够等缺点。

(4) 浮空飞行器:以高空科学气球为主的浮空飞行器,相对于其他探测手段,浮空飞行器具备稳定飞行能力,承载能力强、响应快、覆盖区域广、实验灵活、回收周期短、成本低、高效能等优势。

高空科学气球是目前唯一能在平流层长时间可靠飞行的平台,已经成为与火箭、人造卫星等飞行器并驾齐驱的进行空间科学研究的工具,对于极地科学探测而言,以高空气球为主的浮空飞行器具备长达数十天到数月的稳定飞行能力,美国、日本、瑞典、法国等发达国家已经利用高空科学气球开展了多年的极地科学实验。

由于极地内陆的夏季有较长的极昼期,在此期间利用极区上空绕极环流的条件开展气球飞行,气球体积与浮力的变化波动较小,可使气球保持在较稳定的高度上持续飞行,飞行时间通常在一星期以



图5 美国麦克默多气球站

上。与此同时,在南极没有跨国飞行的限制,使南极成为放飞高空科学气球的理想之地。

美国于1956年在南极洲建立了麦克默多南极站,是南极洲最大的科学研究中心,也是美国极地科学气球试验基地。1995~2012年在麦克默多站进行了44次绕南极的长时间气球飞行,最长飞行持续时间55天,共飞行约60次,取得了大量科学成果。



图6 美国近年来在南极开展的部分高空科学探测实验

多年来美国在南极麦克默多气球站开展的高空科学实验和探测载荷包括宇宙微波背景辐射探测实验(BOOMERanG)、南极脉冲瞬态天线实验(ANITA)、宇宙高能辐射的跃迁辐射阵实验(TRACER)、宇宙射线能量学质量实验(CREAM)、平流层太赫兹天文台(STO)、超级虎跨铁银河元素记录仪(Super Tiger)、大孔径亚毫米望远镜(BLAST)、用于



图7 日本昭和气球站

寻找黑洞和观测中子星的偏振 X 射线望远镜(X-Calibur)等。

日本于1957年在南极洲建立昭和站,该站也是日本高空气球极地试验的主场所。日本国立宇科所(ISAS)和极地所(NIPR)于1984年启动环极地飞行计划可行性研究,1990年完成了3次试验飞行。每年飞行2~3次,最长飞行时长27天,与法国合作的超压气球飞行长达109天。

从美国、日本等国开展南极气球飞行的情况看,南极气球科学探测包含了诸多原创科学思想,以及众多新一代科学探测技术和手段,可以容纳较多的项目,激发科学家的潜能,取得重要的科学成果,同时可为前沿科学研究和先进的空间科学任务夯实基础。

### 3. 我国浮空飞行器的科学探测能力

我国在高空气球技术方面已有深厚积累,开展了领域广泛的空间科学实验和技术验证;具有研制百万立方米级气球的生产线和国内飞行试验基地,有一支高水平和经验丰富的技术队伍。

#### 3.1 我国各类浮空飞行器的性能

浮空飞行器一般是指比重轻于空气的、依靠大气浮力升空的飞行器,也称浮空器。我国各类主要浮空飞行器的性能参数和飞行能力如下:

高空零压气球:

- 最大载荷重量:1900 kg(@31 km);



图8 中科院鸿鹄专项利用高空气球开展的临近空间科学实验

• 体积:700立方米至40万立方米系列,最大制造能力60万立方米;

- 最大飞行高度:45 km;
- 最长飞行时间:72小时;
- 最远飞行距离:5000 km。

高空超压气球:

- 飞行高度:18~22 km
- 最大飞行时间:52小时
- 有效载荷:>15 kg
- 高度调节能力:2 km

系留气球:

- 体积:5~10 000 m<sup>3</sup>
- 最大有效载荷:300 kg
- 驻空高度:7003米(系留气球驻空世界纪录)。

浮空飞行器具备长达数十天到数月的稳定飞行能力,具有承载能力强、响应快、覆盖区域广、实验灵活、准备周期短、成本低、高效能等优势,在极地利用浮空飞行器进行科学探测将是我国在极地科学领域实现快速追赶的重要手段。

#### 3.2 我国利用浮空飞行器开展科学探测实验的情况

自1978年开始,中科院高能物理所、大气物理所、空间中心、上海天文台、广州电子所、紫金山天文台等联合在香河站发展科学气球技术,建立了科学气球系统,并开展了多学科的科学探测,到1990年代末,共发放了200余个科学气球,开展了大气科学、宇宙线和高能天体物理、红外天文、宇宙化学、微重力科学、生命科学等实验和空间遥感仪器试验,获得了一批重要的科学成果。

中国科学院空天信息创新研究院等单位利用浮空飞行器在临近空间科学实验系统先导专项(“鸿鹄专项”)、第二次青藏科考、三江源科考等任务的支持下,在第三极地区(青藏高原)开展了多类科学探测,仅在2019年间就实施了16次的高空气球飞行试验。

我国在青藏高原地区开展的空间科学实验主要包括:



图9 青藏高原多地联合大气观测实验

(1) 青藏高原多地联合大气观测实验

在青藏高原核心区域开展了多地(柴旦、拉萨、羊八井)、多观测要素(综合气象参数、闪电、臭氧、水汽、气溶胶、湍流、辐射等)、多探索手段(原位、下投、地基雷达配套观测、特殊探空等)、全高度(地面至110千米)的大气综合观测。该实验突破了24小时



图10 青藏高原柴旦地区开展的临近空间生物暴露实验



图11 临近空间生物暴露实验装置

昼夜飞行及观测技术,并首次观测到辐射在对流层和下平流层区域的垂直分布的昼夜变化特征。

(2) 临近空间生物暴露实验

2019年在青海地区首次开展了临近空间生物暴露实验,研发了临近空间生物暴露装置、气体分析与采样装置,紫外光谱仪,开展临近空间30千米以上高度紫外辐射等特殊环境对代表性模式生物(藻类、酵母菌、杆菌等)影响的研究。该实验有助于探查地球生命生存的极限,提升对地球生物圈“上边界”的认识,进而追溯地球生命的起源。

(3) 临近空间地磁暴环境综合探测实验

首次开展临近空间地磁暴环境综合探测,研发了基于浮空平台的临近空间大气环境、电磁环境、中子辐射环境原位探测载荷,完成20千米高度的临近空间综合观测试验,开展冕洞高速流引起的地磁暴对临近空间环境影响的研究,并开展平静期对照实验。

(4) 三江源野生动物观测实验

2017年中科院空天信息创新研究院利用系留

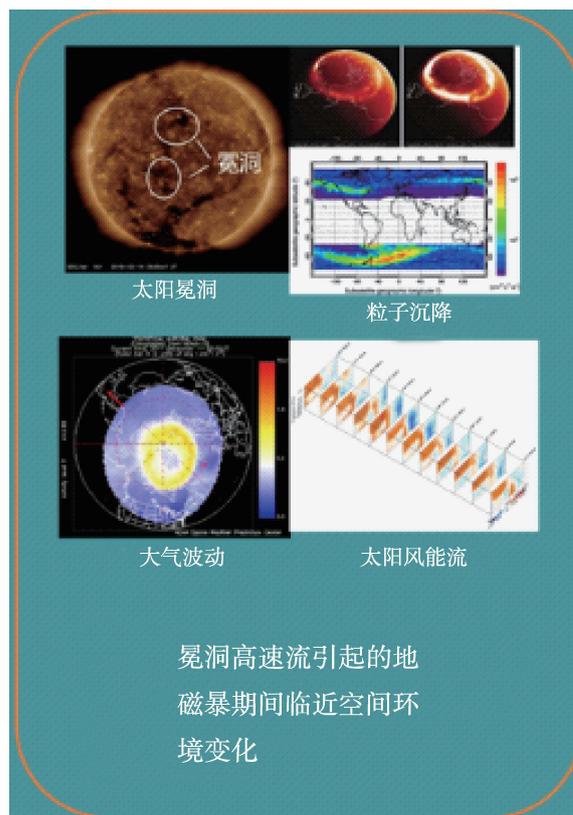


图12 临近空间地磁暴环境综合探测实验

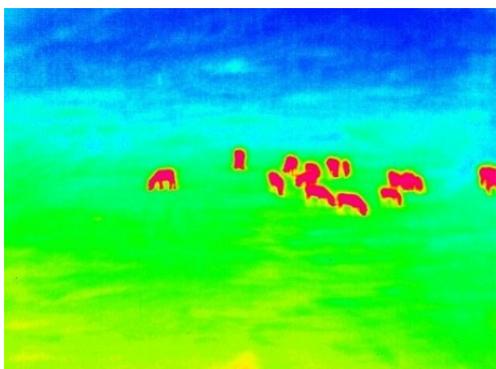


图13 可可西里野生动物观测实验

气球平台在三江源区域的可可西里地区开展了动物观测实验,该实验是我国首次在海拔4750米高的可可西里地区开展的野生动物观测实验。利用浮空飞行器将红外相机升空到100米,进行方圆3千米范围内的野生动物白天和夜间的活动与生活习性监测,观测到的藏羚羊夜间生活习性颠覆了我们以往认知。

虽然我国在第三极(青藏高原)地区利用浮空飞行平台开展了临近空间的科学观测实验,但在南北两极开展相关实验对我们来说却是崭新的挑战。国外已利用浮空飞行器开展极地科学探测多年,取得了一系列的科研成果,具有巨大的发展空间。而我国在浮空飞行器高空科学探测方面具有不逊于国外的技术基础和实验能力。因此,在极地利用浮空飞行器开展科学实验将是我国在极地科学领域实现快速追赶的重要手段,迫切需要梳理在极地科学探测中的重大科学问题,及时开展相关研究,以期服务于国家相关战略。

#### 4. 我国浮空飞行器极地科学探测的初步构想

利用浮空飞行器开展极地科学探测具有得天独厚的优势:1)相对于其他探测手段,浮空飞行器具备稳定飞行能力,且具有承载能力强、响应快、覆盖区域广、实验灵活、准备周期短、成本低、高效能等优势;2)相对于其他地区,由于极地涡旋(大气环流)和持续太阳辐射(夏季极昼)的存在,尤其在南极

无空域限制,使极地成为了全球开展长时浮空飞行器科学探测的绝佳区域。

我国可利用这些优势,在环境科学、大气科学、空间天气、行星观测、太阳物理、生物研究等诸多方面开展浮空飞行器极地科学实验。研究方向包括以下几个方面:

##### 4.1 极地遥感探测

###### (1) 极地冰盖变化和冰原研究

揭示导致极地冰盖未来变化预测不确定性的物理过程与动力机制,进而提高全球海平面变化评估的准确性,是预测全球海平面上升的关键。利用浮空飞行器对极地冰盖关键过程开展天-空-地多时空尺度协同观测和探测,极有可能推动冰盖物质平衡过程、冰盖-冰架系统与海洋相互作用的研究,揭示冰下过程对冰盖稳定性的影响。

###### (2) 极地地质环境研究

南极大陆地质存在一个演化过程,利用浮空飞行器开展科学实验,将助力南极地质研究的深入,有望进一步揭开影响西南极和南极半岛构造岩浆演化的凤凰板块最后的俯冲和西南极冰下火山区的科学奥秘。

###### (3) 极地动物栖息地监测

南极企鹅是南大洋环境变化的“生物指示剂”,由于南极恶劣的自然地理环境,对南极企鹅的监测一直是研究的重点和难点。利用浮空飞行器通过搭载高分辨率相机,可实现对路径下方企鹅聚居地高分辨率、大范围的遥感观测。

##### 4.2 极地大气与空间观测

###### (1) 极地空间环境监测

极区对空间天气事件的响应最直接、最剧烈、最灵敏、最快速,是地球空间天气理想的监测平台,也是对空间天气监测应用需求最迫切的区域。利用浮空飞行平台可在不同海拔高度观测极区中高层大气对太阳/地磁活动的响应,以及开展极光研究。极区是太阳风-磁层-电离层-热层-中高层-低层大气耦合的关键区域,利用浮空飞行器对极区空

间与大气环境开展科学探测将有助于提升我国对日-地耦合、空间天气、大气科学的科学认知能力,并转化到实际应用中。

### (2) 极地大气探测

由于南极极涡强、变化大,所以南极臭氧层的时空变化很大。在南极不同季节开展长航时的臭氧、平流层重力波在内的南极上空大气高精度原位和下投探测,可以帮助我们了解南极大气的精细结构,深入研究臭氧层的变化规律及其气候和环境效应,获取南极极涡物理化学特征。

### (3) 极地临近空间生物研究

临近空间独特的低温、高辐射、干燥、低气压等极端环境,是开展地球生物圈上边界和地球生命生存极限等重要基础科学研究的天然实验室。而在南极利于浮空飞行器的长航时飞行,将为天体生物学研究提供突破口,有助于追溯地球生命的起源。

### (4) 行星科学

平流层中大气氧和硫同位素异常是行星宜居性的一个重要指标,但是对其产生的机制仍存在很多争议,而基于浮空平台的光化学反应以及对平流层大气各组分的同位素精准分析有望对这些科学问题进行有效的解决。

### (5) 天文观测

科学气球实验相对于卫星耗资低,且极地满足长时观测的条件,所以南极科学气球成为天文观测的一个重要手段。在南极可开展宇宙射线观测、日冕观测、太赫兹望远镜天文观测等实验,利用极涡进行长航时飞行,可以采集到长观测周期的信息,有望取得重大科学研究成果。

## 5. 总结

中国南极考察36年,披荆斩棘,发展成就举世瞩目。习总书记批示:“认识南极、保护南极、利用南极”,“可进一步推进和规划南极战略发展”,“把深海、极地、外空、互联网等领域打造成各方合作的新疆域。”



图14 浮空飞行器高空飞行

在国际上,对极地(尤其是对南极)的发言权和利用能力是衡量一个国家是否是极地强国的重要因素。在极地地区利用现有基础开展浮空飞行器科学探测,进而发展并建立极地科学气球站,可丰富我国在极地的科学活动,增强我国对极地的利用能力,提高我国极地的显示度,增强我国对极地平利用与开发的话语权,促进我国极地考察国际合作,提升在国际极地事务中的作用,符合我国持续推动极地科研由单一学科向跨学科综合研究发展的战略。

### 参考文献

- ① 孙立广等, 国家极地科技发展战略报告, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017.99
- ② 国家海洋局极地考察办公室等, 极地科学基础研究优先领域规划, 国家海洋局, 2019.
- ③ 陆龙骅, 卞林根等, 极地大气科学与全球变化研究进展, Vol. 17, No. 6, pp. 743-754, 2006.
- ④ Zhang Qinghe, Zhang Beichen, et al., Direct Observations of the Evolution of Polar Cap Ionization Patches, Science, Vol. 339, Issue 6127, pp. 1597-1600, 2013.
- ⑤ Han Desheng, Xu Tong, et al., Observational evidence for throat aurora being associated with magnetopause reconnection, Geophysical Research Letters, Vol. 46, Issue13, pp. 7113-7120, 2019.
- ⑥ 黄宛宁, 蔡榕等, 临近空间科学技术的发展现状及应用前景, 科技导报, Vol. 21, 2019.
- ⑦ NASA Long Duration Balloon (LDB) site at LDB Camp, McMurdo Station, 2019- 2020 Antarctica Operations, <https://www.csbf.nasa.gov/antarctica/payloads.htm>, 2019.
- ⑧ 习近平慰问中澳南极科考人员并考察中国“雪龙”号科考船, 新华网, 2014.