我国高空气球极地科学探测的初步构想

蔡榕^{1,2*}, 孙建颖¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学航空宇航学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: cairong@aircas.ac.cn

“极地”通常指地球的南北两极。南极地区以南极洲为中心, 周围濒临太平洋、大西洋、印度洋; 北极地区以北冰洋为中心, 毗邻亚洲、欧洲、北美洲。广义的极地还包括青藏高原, 被认为是地球的第三极。

极地地区蕴藏着无数的科学之谜, 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。极地地区冷源与赤道热源是地球大气的基本驱动力; 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; 极地地区是认识地球系统和生命的独特立足点, 也是探索行星乃至宇宙的一扇窗。

高空科学气球是目前唯一成熟的临近空间浮空平台, 具备数日至数月的稳定飞行能力^[1]。利用高空气球进行极地科学探测, 已成为欧美等发达国家开展极地科学研究的重要手段, 能够弥补地基、空基、天基探测平台的不足, 可在极地临近空间区域实现原位探测、下投探测、天文观测、对地遥感观测等多种探测模式, 获得丰富的观测数据^[2]。

我国在浮空平台技术领域有着较好的技术基础和经验丰富的研究队伍, 在极地利用高空气球开展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。目前, 我国虽然已开展了一系列基于高空科学气球平台的临近空间观测工作, 但在极地开展相关科学实验仍是新挑战, 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。

1 极地科学研究的发展情况

1.1 国际北极科学研究发展情况

北极共包括 8 个环北极国家(The Surround-Arctic Nations), 分别为: 加拿大、丹麦、芬兰、冰岛、挪威、瑞典、俄罗斯、美国。1990 年, 北极圈八国代表在加拿大的瑞萨鲁特湾市签署了国际北极科学委员会(the International Arctic Science Committee, IASC)章程条款。1991 年, IASC 在挪威奥斯陆召开了第一次会议, 并接纳法国、德国、日本、荷兰、波兰、英国等 6 个国家成为其正式会员国, 至此人类在北极地区的国际科学合作终于迈出了艰难

蔡榕 中国科学院空天信息创新研究院研究员。从事航空宇航和先进炭材料领域的研究工作, 现主持中国科学院战略性先导科技专项(A 类)——临近空间科学实验系统, 以及多项浮空飞行器系统研制与应用项目。

的一步。目前, IASC 的成员包括 23 个参与北极研究的国家, 已发展成为北极的主要国际科学组织。在“和平、科学、合作”原则的基础上, IASC 积极协调并指导各国的北极考察活动; 针对一些重大科学问题组织庞大的国际合作计划。

IASC 在 2015 年发布了题为《整合北极研究——未来路线图》的出版物, 这是通过第三届北极研究计划国际会议(ICARP III)产生的, 涉及 27 个国家的 700 余名科学家参与讨论。路线图突出了 3 个关键的科学优先事项^[3]: (1) 北极在全球系统中的作用; (2) 观测和预测未来的气候动态和生态系统响应; (3) 了解北极环境和社会的脆弱性和恢复力, 支持可持续发展。

IASC 的科学工作组还列举了优先考虑的一些科研方向^[3], 包括: 北极长期气候建模; 提高北极地区日变化到季节变化可预测性的建模活动, 包括极端事件的建模; 北极在全球气候系统中的作用; 大气-冰川-海洋相互作用及其对北极冰川质量收支的影响; 极端冰冻圈事件的形成、发展、频率/强度和影响; 加强与雪有关过程的跨学科知识; 北极气候系统的地质气候记录和未来响应预测; 冰盖减少对北极碳循环的影响; 气候变化中海洋、陆地、冰、大气和空间之间热和动量交换变化的结果; 水循环的变化及其对北极系统的影响; 人类健康、福祉和生态系统变化; 极端生态环境中的物种相互作用与生态系统科学, 等。

1.2 国际南极科学研究发展情况

与北极不同, 南极洲不属于任何国家。《南极条约》规定“南极应只用于和平目的, 禁止军事性质措施”, “冻结一切对南极的领土要求, 并禁止新的领土要求”。

美国在南极地区的活动有近 200 年的历史. 第二次世界大战以后, 由于与苏联争霸和抑制其在南极地区的势力扩张, 美国加大了对南极考察的力度, 先后主导了代号为“跳高行动”“风车行动”“深冻行动 I”“深冻行动 II”的南极科学考察和探险活动, 并发起和主导了《南极条约》的谈判; 条约生效后, 美国的科考活动在“美国南极研究计划”的规划下、在美国国家科学基金会资助和管理下有计划地进行着, 其南极地区的实质性存在和科研成果一直处于世界领先地位^[4].

20 世纪 50 年代以来, 随着《南极条约》的签署, 南极的治理体系日益完善, 国际极地考察从单一探索自然的时代正式步入全面科学研究的新时代. 研究表明, 有关南极科学成果越多的国家, 对南极事务的影响力越大; 南极条约协商国的科学论著占南极科学总体论著的 70%; “科学, 只有科学才能成为未来南极权益话语权的依据”^[4,5].

南极地区独特的自然环境为科学研究提供了得天独厚的优越条件, 是地球上其他地方无可比拟的. 截至目前, 南极绝大部分地区没有人类居住, 在这里进行科学研究, 排除了人类社会对其影响. 科学研究和考察是各国在南极地区主要的活动, 也是各国在南极地区实质性存在的主要表现形式, 是各国参与南极事务的准入证^[4].

在世界范围, 美国南极科学研究始终站在科学前沿, 水平最高、规模最大. 美国南极活动实行单一行政管理体制, 美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)是美国南极计划(United States Antarctic Program, USAP)的管理者^[6], 全面负责南极科研活动的计划、预算和组织实施.

1953~2016 年, 南极科研项目资助总额达 23.6 亿美元, 占 NSF 南极总投入的 25.6%, 各学科投入分配如图 1 所示. 在 1953~2016 年的 64 年内, 总投入排名前 5 位的学科分别为南极海洋与大气科学(34%)、南极天文与地球空间科学(27%)、南极生物与生态学(13%)、南极冰川学(12%)、南极地球科学(11%)^[7].

图 1 1953~2016 年 NSF 南极科研项目学科投入

Figure 1 1953~2016 NSF Antarctic research project discipline investment

在 1953~2016 年间, NSF 投入达到 1 千万美元及以上且项目持续时间 10 年及以上的“大项目”共有 13 个, 这些项目总投入占南极科研项目投入总额的 24.8%, 其中南极天文和空间科学与南极海洋与大气科学占了 6 项^[7]. 这些大项目在全球南极科学前沿引领美国南极科研项目发展, 使美国成为全球领先的南极科考强国.

1.3 我国极地科学研究的发展现状

1980 年 1 月 12 日, 中国科学家登上澳大利亚南极凯西科考站, 第一次代表中国科学界踏上南极大陆. 时至今日, 我国开展南极科学探测及考察 40 年, 并已经在南极建设了泰山站、中山站、昆仑站和长城站(图 2(a)~(d)), 第 5 个南极科考站——罗斯海新站(图 2(e))也正在建设当中. 截至 2020 年 4 月, 我国共开展了 36 次南极科考任务.

自 1991 年开始, 中国科学院大气物理研究所与挪威北极研究所和斯瓦尔巴德大学合作, 开展了气候及大气物理研究. 此后, 中国地质科学院、国家海洋局、武汉测绘科技大学、中国科学院等多个科研机构与北极国家合作开展了科学研究. 1999 年, 中国首次组织开展了北极考察, 此后陆续开展了数次以“雪龙”号科考船为平台的北冰洋区域综合考察. 2004 年, 我国在北极建设了黄河科考站(图 2(f)).

我国极地科学研究在大气科学、空间物理、地质与环境科学等方面取得了一定成果, 主要包括:

(1) 极地大气科学. 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^[8~10], 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. 我国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^[11]; 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”^[12]; 首次获得磁暴扰动地球期间, 极区电离层等离子体云块演化的直接观测证据; 开展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.

(3) 极地地质与环境科学. 在极地冰川研究领域^[13,14], 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; 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^[15,16], 通过研究环流和海洋热通量等要素变化对海冰和

图2 中国极地科考站

Figure 2 China polar scientific research station

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.在极地生物学研究领域,我国展开了对南极企鹅等生物的观测^[17];构建了极地微生物菌种资源保藏与研究技术平台,发现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.

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,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 极地科学探测手段的发展现状

2.1 极地地基探测平台

我国从事极区高空大气物理学研究的时间远落后于

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.例如,我国在南极中山站分别于 1997 年 2 月建成的极区高空大气物理观测栋、2010 年 2 月建成的空间环境观测栋、2019 年 2 月建成的激光雷达观测系统等.

地基探测平台可稳定、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,且地基观测栋无法移动,需要与其他探测方式相结合,进一步提高数据的应用价值.

2.2 极地航空探测平台

由于极地的地质条件特殊,开展航空探测有一定困难.根据 2017 年的统计,共有 27 座南极科考站拥有直升机停机坪,15 座拥有固定翼飞机跑道.目前允许飞抵南极的航空机型有限,主要用途为航空遥感和运输人员及物资设备,

而固定翼飞机成为南极航空遥感的主力军。美国、俄国、英国、德国等均拥有南极专用的固定翼飞机,在南极地区同时在役的这类飞机达五六架。“雪鹰 601”是中国首架极地固定翼飞机,其原型机为美国巴斯勒 BT-67 运输机(Basler BT-67),可搭载多种科学观测设备,是高效的科研平台,集快速运输、应急救援和航空科学调查于一体。

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。

除固定翼飞机外,南极科考还可利用旋翼无人机和固定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。

2.3 极地天基探测平台

极地天基探测平台主要是指极轨卫星,即轨道通过地球的南北极、且轨道与太阳同步的卫星。极轨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。

1999 年 2 月,美国成功发射了地球观测系统(EOS)的第一颗先进的极地轨道环境遥感卫星 Terra。它的主要目标是对太阳辐射、大气、海洋和陆地进行综合观测,获取有关海洋、陆地、冰雪圈和太阳动力系统等信息。NOAA 是美国国家海洋大气局的第三代实用气象观测卫星,AVHRR 是 NOAA 系列卫星的主要探测仪器,它具有 5 个通道的多光谱成像仪器,可获得极光能量数据^[18]。目前,美国、中国、印度和俄罗斯均拥有极轨卫星,极轨卫星的成像分辨率通常较低。美国国防气象卫星 DMSP 也是著名的极轨综合探测卫星,星上搭载了线性扫描(可见光-红外)成像仪、微波辐射计、粒子探测仪、 γ 和 X 射线探测仪、磁力计等各类成像和非成像探测载荷。

我国的“风云”气象卫星中的“风云一号”和“风云三号”属于极轨卫星。其中,“风云三号”(FY-3)气象卫星为我国第二代极轨气象卫星,搭载了臭氧和地球辐射收支探测器、可见光红外扫描辐射计、红外分光计和微波辐射计、中分辨率光谱成像仪等遥感载荷^[19]。此外,2017 年 11 月发射的第四颗“风云三号”卫星(FY-3D)还首次搭载了红外高光谱大气探测仪、近红外高光谱温室气体监测仪、广角极光成像仪、电离层光度计等全新载荷。特别是首次亮相的广角极光成像仪,用于开展远紫外极光成像,是同轨道同类仪器中分辨率最高、视场角最大的^[20]。

2019 年 9 月,我国首颗专门用于极地遥感成像的微小卫星——冰路卫星成功发射,也是我国“三极遥感星座观测系统”的首颗试验卫星。该卫星每天对地球南北两极地区进行全覆盖观测,数据将服务于全球气候与环境变化研究和北极航道开发。冰路卫星采用了“鸽群”模式,在载荷配置上其中宽幅相机分辨率设定为 80 m,幅宽达 800 km,有望提升对冰山漂移、冰架崩解等现象的监测能力,组成星座后则能实现对上述快速变化过程的小时级观测。

极地卫星的轨道每天都会经过南北两极,但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、分辨率不高等缺点。

2.4 极地探空气球平台

近年来,在世界气象组织“极地预报计划”核心行动的组织协调下,世界各国在南极地区释放了近 2000 个探空气球,以促进南极地区大气探空观测工作的长期持续性。2019 年 3 月,我国完成了第 35 次南极科考任务,与国际同步开展“极地预报年”南极特别观测期探空观测,在中山站释放探空气球 55 个,在昆仑站区布放探空气球 22 个,数据实现全球实时共享,提高对极地大气的认知水平和极地天气预报能力。2020 年 1 月 11 日,中国第 36 次南极考察队在首航南极的“雪龙 2”号极地科考破冰船上释放了第一个探空气球,在穿越西风带期间保持每天释放 4 个、每次间隔 6 h,持续 6 d 释放探空气球,以探测不同高度的气温、风速、风向、气压和湿度等气象要素,可获得地面以上 32 km 高度以内的大气探空数据。

探空气球用于搭载探空仪器,主要进行温度、大气压力、湿度、风速风向等气象要素测量,虽然成本低、机动性好,但载重低、控制性差、载荷类型少。

2.5 极地高空气球平台

高空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具备长达数日至数月的稳定飞行能力,美国、日本、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^[1]。

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,飞行时间通常在一周以上。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,也是美国极地高空科学气球试验基地。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 d,共飞行约 60 次,取得了大量科学成果。近年来美国在南极开展了多项科学探测飞行实验(图 3),主要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/STO-2,后续为 GUSTO)、超级虎跨铁银河元素记录仪(Super Tiger)、大孔径亚毫米望远镜(BLAST)、用于寻找黑洞和观测中子星的偏振 X 射线望远镜(X-Calibur)、系外行星观测项目(PICTURE-C)等^[21,22]。

图3 美国在南极开展的部分高空气球科学探测实验

Figure 3 Examples of the USA scientific experiments loaded by high-altitude balloon in Antarctica

日本国立宇科所(ISAS)和极地所(NIPR)最早于 1984 年启动长时间环绕南极飞行计划(PPB)可行性研究,并于 1990 年完成了 3 次试验飞行. 1993 年后,日本在南极洲昭和(Syowa)基地建立了气球站,开展了长时间环绕南极飞行计划,并每年在南极洲开展 2~3 次飞行,最长飞行时长 27 d,与法国合作的超压气球飞行长达 109 d. 日本在南极开展了高层大气物理和大气化学探测、温室气体研究、高能宇宙线实验、极区球载超导谱仪实验(与美国合作)等,在相关领域取得很好的科学成果.

瑞典是北极区域气球活动的中心,1974 年瑞典空间中心(SSC)在 Esrange 基地开展高空气球试验,实现了环绕北极的飞行,最大气球体积 110 万 m^3 ,共飞行 600 余次. 瑞典与俄罗斯签订协议,气球吊舱可在俄境内降落,飞行时间 3 d 到 1 周. 许多国家前往瑞典开展极区空间物理、大气科学等研究.

计划中的欧洲平流层气球观测台(ESBO)项目旨在针对广泛的天文应用而建设量身定制的基础设施,将在未来几年在极区开展行星光学遥感研究. 该概念侧重于可重复使用的平台,具有可更换的仪器和执行常规飞行任务的望远镜. 在欧盟的 Horizon 2020 计划资助下,正在构建一个带有 0.5 m 望远镜的原型平台,可进行紫外和可见光波长

范围观测^[23].

从美国、日本、欧洲等国开展极地高空气球飞行的情况看,极地高空科学气球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.

2.6 极地科学探测载荷

除了以上 5 类极地科学探测平台外,极地科学探测载荷也不可或缺、至关重要. 探测载荷分为成像类和非成像类载荷. 非成像类载荷种类众多,包括但不限于温度计、湿度计、测风仪、臭氧探测仪、导航系统等;而成像类载荷主要包括光学遥感载荷、合成孔径雷达(SAR)等. 其中,光学遥感载荷是应用最广泛的成像载荷之一,可开展天文观测、对地遥感观测等. 在极地科学探测中,光学遥感是探测行星空间环境和观测地面环境的重要手段. 从探测波长范围上划分,光学遥感成像系统包含可见光光学系统、近红外光学系统、中波红外光学系统、热红外光学系统、紫外光学系统等;按照分光情况或光谱分辨率划分,可分为全色系统、多光谱系统、高光谱系统、超光谱系统等. 针对不同科学需求,光学遥感载荷可配合高空气球等平台进

行多类科学实验。

3 我国高空气球的科学探测能力

我国在高空科学气球技术领域已有深厚积累,广泛开展了各类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,并拥有一支高水平和经验丰富的技术队伍。

3.1 我国各类高空科学气球的性能

高空科学气球(也称高空气球)的比重轻于空气,是依靠大气浮力升空的飞行器,属于浮空器的一种。高空科学气球主要包括零压气球和超压气球。我国各类高空科学气球的主要性能参数和飞行能力如下:(1) 高空零压气球。最大载荷重量:1900 kg(@31 km);体积:700 m³~40 万 m³系列,最大制造能力 60 万 m³;最大飞行高度:45 km;最长飞行时间:72 h;最远飞行距离:5000 km。(2) 高空超压气球。飞行高度:18~22 km;最大飞行时间:52 h;有效载荷>15 kg;高度调节能力:2 km。

3.2 我国利用高空气球开展科学探测实验的情况

自 1978 年开始,中国科学院高能物理研究所、中国科学院紫金山天文台、中国科学院大气物理研究所、中国科学院国家空间科学中心联合在香河站利用高空气球开展了多次空间科学探测:(1) 1978~1984 年间,共发放了 44 个大型气球,开展了对大气环境、高能粒子辐射(如 γ 爆)的探测和星体观测等研究;(2) 1984~1988 年间,利用高空气球开展了多项微重力实验;(3) 1993 年 9 月,在香河气球

站发放 60 万 m³ 高空气球,搭载了 HAPI-4 硬 X 射线望远镜,对天鹅座 X 射线源进行了扫描成像观测。

中国科学院空天信息创新研究院等单位利用高空气球平台和系留气球平台,在临近空间科学实验系统先导专项(“鸿鹄专项”)、第二次青藏高原综合科学考察、三江源科学考察等任务的支持下,在第三极地区(青藏高原)开展了多类科学探测,仅在 2019 年间就部署了共计 16 次的高空气球飞行试验^[2,24],图 4 为鸿鹄专项在青藏高原地区的浮空器飞行试验场地。

我国在青藏高原地区开展的空间科学实验主要包括:

(1) 青藏高原多地联合大气观测实验(图 5(a)). 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 km)的大气综合观测。该实验突破了 24 h 昼夜飞行及观测技术;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;通过长管采样获得青藏高原上空主要温室气体(CO₂, CH₄, N₂O)垂直分布数据;首次获取了南亚高压活动期间青藏高原临近空间大气热力湍流强度和湍流谱的原位探测数据。

(2) 临近空间生物暴露实验(图 5(b)). 首次开展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 km 以上高度环境(紫外辐射等)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。

图 4 中国科学院“鸿鹄专项”利用高空气球开展的临近空间科学实验

Figure 4 Chinese Academy of Sciences' Project HONGHU tests near-space scientific experiments using high-altitude balloons

图 5 中国科学院空天信息创新研究院在青藏高原地区使用浮空飞行器开展各类科学探测实验

Figure 5 Various scientific experiments have been tested in Qinghai-Tibet Plateau utilizing lighter-than-air vehicles by Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences

(3) 临近空间地磁暴环境综合探测实验(图 5(c)). 首次开展临近空间地磁暴环境综合探测, 研发了基于高空气球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 km 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) 三江源可可西里野生动物观测实验(图 5(d)). 2017 年中国科学院光电研究院利用浮空飞行器在三江源区域

的可可西里地区开展了动物观测实验, 该实验是我国首次海拔 4750 m 高的可可西里地区开展的野生动物观测实验. 通过系留气球平台将红外相机升空到 100 m, 进行方圆 3 km 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)地区利用以高空气球为主的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.

4 我国高空气球极地科学探测的初步构想

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(http://www.xinhuanet.com/tech/2019-10/08/c_1125080240.htm),具体包括:极地冰盖不稳定性、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。

未来,我国将对标世界一流极地科研大国,保障后续极地科学探测任务顺利开展,同时弥补现有极地探测手段的不足,将利用高空气球进行综合性极地科学探测,以实现在极地探测领域的快速追赶。

此外,利用高空气球开展极地科学探测还具有得天独厚的优势:(1) 相对于其他探测手段,高空气球具备稳定的飞行能力,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,使极地成为开展高空气球长时科学探测的绝佳区域。

综合这些特点,我国可在相关优势学科领域开展基于高空气球平台的极地科学探测,具有多手段(原位探测、下投观测、天文观测、对地遥感观测等)、多学科(如环境科学、大气科学、空间天气、行星观测、太阳物理、生物研究等)的特点。基于目前我国现有极地科学探测能力,以先对地后对天、逐步实现“临空-天-地”一体化的步骤开展相关工作,具体的研究方向和实现方式包括:

(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。利用高空气球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,利用高空气球开展科学实验,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) 极地生物栖息地监测。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。利用高空气球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) 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。利用高空气球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,利用高空气球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、大气科学的认知能力,并转化到实际应用中。

(5) 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。

(6) 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。而在南极利于高空气球的长航时飞行,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。

(7) 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,而基于高空气球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。光学遥感是探测行星空间环境的重要手段,由高空气球搭载光学成像设备在临近空间的高度,可有效减少大气对光学仪器的影响,有利于行星观测。

(8) 天文观测。高空气球实验相对于卫星耗资低,且极地满足长时观测的条件,所以高空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

截至 2020 年,我国已经开展极地科考 40 年,取得了一定的科研成果。但是与欧美等国家相比,我国在极地科学探测领域起步较晚、观测数据不充足、探测平台多样性差。高空科学气球平台是帮助我国实现在极地探测领域快速赶超的重要手段。未来将发挥其在原位探测、下投探测、天文观测和对地遥感观测中的重要优势,丰富我国在极地的科学活动,增强我国对极地的利用能力,提高我国对极地和平利用与开发的话语权,提升我国在国际极地事务中的作用。

致谢 感谢中国科学院战略性先导科技专项(XDA17000000)资助。感谢第 666 次香山科学会议工作组,感谢顾逸东、卫星院士对本文的帮助和支持。

推荐阅读文献

- Huang W N, Zhang X J, Li Z B, et al. Development status and application prospect of near space science and technology (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2019, 37: 46–62 [黄宛宁, 张晓军, 李智斌, 等. 临近空间科学技术的发展现状及应用前景. *科技导报*, 2019, 37: 46–62]
- Huang W N, Li Z B, Zhang Z, et al. Summary of hot spots of near space vehicles in 2019 (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2020, 38: 38–46 [黄宛宁, 李智斌, 张钊, 等. 2019 年临近空间科学技术热点回眸. *科技导报*, 2020, 38: 38–46]
- The International Arctic Science Committee. The need for an internationally coordinated Arctic research planning effort. In: *The 3rd International Conference on Arctic Research Planning*, Toyama, 2015
- Pan M. On the Antarctic strategy and policy orientation of the US (in Chinese). *Frontiers*, 2017, 131: 62–71 [潘敏. 论美国的南极战略与政策取向. *人民论坛·学术前沿*, 2017, 131: 62–71]
- National Science Foundation. Antarctic Program External Panel. The United States in Antarctica. Washington DC: National Science Foundation, 1997
- The White House. Memorandum 6646: President's Memorandum Regarding Antarctica. Washington DC: National Science Foundation, 1982
- Liu H, Zhang X. Statistical analysis of the United States' Antarctic scientific research investment and its benefits to China (in Chinese). *Chin J Polar Res*, 2017, 29: 245–255 [刘涵, 张侠. 美国南极科研投入的统计分析及其对我国的启示. *极地研究*, 2017, 29: 245–255]
- Bian L G, Lin Z, Zhang D Q, et al. The vertical structure and seasonal changes of atmosphere ozone and temperature at Zhongshan station over east Antarctica (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2011, 41: 1762–1770 [卞林根, 林忠, 张东启, 等. 南极大气臭氧和温度垂直结构及其季节变化的研究. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 1762–1770]
- Zhang L, Zheng X D, Bian L G. Comparison of long-term total ozone observations from space- and ground-based methods at Zhongshan Station, Antarctica (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2017, 47: 1371–1382 [张雷, 郑向东, 卞林根. 南极中山站卫星臭氧总量与地基长期测值的对比分析. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47: 1371–1382]
- Gao H, Liu Y Y, Wang Y G, et al. Precursory influence of the Antarctic Oscillation on the onset of Asian summer monsoon (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 3516–3521 [高辉, 刘芸芸, 王永光, 等. 亚洲夏季风爆发早晚的新前兆信号: 冬季南极涛动. *科学通报*, 2012, 57: 3516–3521]
- Zhang Q H, Zhang B C, Michael L, et al. Direct observations of the evolution of polar cap ionization patches. *Science*, 2013, 339: 1597–1600
- Han D S, Xu T, Jin Y Q, et al. Observational evidence for throat aurora being associated with magnetopause reconnection. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 7113–7120
- Ma Y F, Bian L G, Xiao C D, et al. Near surface climate of the traverse route from Zhongshan station to Dome A, East Antarctica. *Antarct Sci*, 2010, 22: 443–459
- Xie A H, Allison I, Xiao C D, et al. Assessment of air temperatures from different meteorological reanalyses for the East Antarctic region between Zhongshan and Dome A (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2014, 44: 156–168 [谢爱红, Allison I, 效存德, 等. 不同再分析气温在东南极中山站-Dome A 断面的适用性评价. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 156–168]
- Wang Y T, Hou S G. Spatial distribution of 10 m firn temperature in the Antarctic Ice Sheet (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2010, 40: 1489–1503 [王叶堂, 侯书贵. 南极冰盖 10 m 深度处粒雪温度空间分布. *中国科学: 地球科学*, 2020, 40: 1489–1503]
- Hou S G, Wang Y T, Pang H X. Climatology of stable isotopes in Antarctic snow and ice: Current status and prospects (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 28–40 [侯书贵, 王叶堂, 庞洪喜. 南极冰盖雪冰氢、氧稳定同位素气候学: 现状与展望. *科学通报*, 2013, 58: 28–40]
- Zhang H S, Lu D D, Yu P S, et al. Biomarker records in penguin droppings and observed changes in penguin communities and their response to the ENSO in the Western Antarctic (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2013, 43: 232–242 [张海生, 陆斗定, 于培松, 等. 西南极企鹅栖息地粪土层生物标志物记录和实测群落结构变化与 ENSO 的响应. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43: 232–242]
- Zheng L, Fu S Y, Zong Q G, et al. Solar cycle dependence of the seasonal variation of auroral hemispheric power (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 525–530 [郑玲, 傅绥燕, 宗秋刚, 等. 极光半球能量季节变化与太阳活动周期的关联. *科学通报*, 2013, 58: 525–530]
- Wang W H, Zhang X Y, An X Q, et al. Analysis for retrieval and validation results of FY-3 Total Ozone Unit (TOU) (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1726–1733 [王维和, 张兴赢, 安兴琴, 等. 风云三号气象卫星全球臭氧总量反演和真实性检验结果分析. *科学通报*, 2010, 55: 1726–1733]
- Zhang X X, Zhang H J, Wang H F, et al. Wide-field auroral imager onboard the Fengyun satellite. *Light Sci Appl*, 2019, 8: 47
- NASA long duration balloon (LDB) site at LDB Camp, McMurdo Station, 2019–2020 Antarctica Operations. <https://www.csbfs.nasa.gov/antarctica/payloads.htm>, 2019
- Mendillo C B, Howe G A, Hewawasam K, et al. Polarization aberration analysis for the PICTURE-C exoplanetary coronagraph. *J Astron Telesc Instrum Syst*, 2019, 5: 025003
- Philipp M, Jürgen W, Thomas K, et al. Towards a European Stratospheric Balloon Observatory: The ESBO design study. In: *Proceeding of SPIE: SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*, Austin, Texas, United States, 2018. 107004M
- Wang M, Xu B Q, Yang S, et al. Black carbon profiles from tethered balloon flights over the southeastern Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2949–2958 [王茉, 徐柏青, 杨松, 等. 基于系留气球的藏东南大气黑碳垂直分布. *科学通报*, 2019, 64: 2949–2958]

Summary for “我国高空气球极地科学探测的初步构想”

Advances in Chinese polar scientific exploration using high-altitude balloons

Rong Cai^{1,2*} & Jianying Sun¹

¹ Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

² School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: cairong@aircas.ac.cn

Polar Regions, which generally refer to Antarctica and the Arctic, play a key role in global change and are optimal locations for space observation. The expansion of polar exploration and research regarding global climate issues and development of future environmental policies has become important and debated worldwide. China has been conducting research in Polar Regions since 1980 and has accomplished a series of scientific achievements. However, China's polar investigations began somewhat later than those of Europe and the United States, with insufficient observational data and limited diversity of detection platforms. To solve the problem, high-altitude scientific balloons have been used as an important means to help China rapidly to advance exploration in Polar Regions.

High-altitude balloons offer many advantages, such as stable flight for several months, strong carrying capacity, flexibility with experiments, low cost, and fast recovery. For many years, the United States, Japan, Europe, and other developed countries have used high-altitude scientific balloons to conduct polar scientific experiments. Polar Regions are ideal for long-term scientific exploration using high-altitude balloons due to polar vortices (atmospheric circulation), continuous solar radiation (summer polar days), and especially because there are no airspace restrictions in Antarctica.

The Chinese Academy of Sciences has carried out multiple space exploration projects using high-altitude balloons at Xianghe Station since 1978 and has conducted a series of experiments using high-altitude balloons at the ice-laden “Third Pole” in the Qinghai-Tibet Plateau in collaboration with the Aerospace Information Research Institute. Sixteen high-altitude balloon flight tests were successfully deployed in 2019.

Within the field of high-altitude balloons for near-space exploration, China has an excellent scientific research team and technical foundation that is at par with those of other countries. However, scientific exploration based on high-altitude balloon platforms in Polar Regions remains challenging. To serve the relevant national strategies, it is needed to define major scientific questions in polar exploration and conduct research in a timely manner.

Owing to the unique advantages of polar regions, China can carry out polar exploration using high-altitude balloon platforms for a variety of tasks (e.g., *in-situ* measurement, dropsonde sounding, astronomical observation, and remote sensing) from different scientific disciplines, such as environmental science, atmospheric science, space weather, planetary observation, solar physics, and biological research). Based on China's current balloon exploration capabilities, relevant work will be carried out step by step from earth observation, sky monitoring to near-space detection, aiming at an integrated capability. The specific research subjects include: (1) Polar ice sheet change; (2) polar geological environment studies; (3) polar habitat monitoring; (4) polar space environment monitoring; (5) polar atmosphere detection; (6) polar near-space biological research; (7) planetary science; and (8) astronomical observation.

High-altitude balloons will also play an important role in future studies involving *in-situ* measurement and dropsonde sounding, astronomical observation, and remote sensing, which will further enhance China's scientific research in the Polar Regions. This will enhance China's status and legitimacy in the peaceful use and development of Polar Regions and would give China more clout internationally in polar affairs.

polar science, polar exploration, lighter-than-air vehicles, high-altitude balloons

doi: 10.1360/TB-2020-0072