

中国科学院高空科学气球研究进展

蔡榕^{1,2}, 杨燕初^{1,2}, 姜鲁华¹, 张泰华¹, 徐国宁^{1,2}, 张向强¹,
周江华^{1,2}, 苗景刚^{1,2}, 宫泽奇¹, 王生^{1,2}, 李兆杰^{1,2}, 马玲灵¹,
祝榕辰¹, 张航悦¹, 冯慧^{1,2}, 何泽青¹, 王谦¹, 张冬辉¹,
刘强¹, 闫峰¹, 何小辉¹, 王宁¹, 黄宛宁¹, 徐文宽¹,
聂莹^{1,2}, 王保成¹, 张衍垒¹, 朱殷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

摘要: 高空科学气球作为一种成熟的临近空间飞行器, 能够为各类科学探测和研究提供良好的平台。本文主要针对中国科学院战略性先导专项“临近空间科学实验系统”(简称“鸿鹄专项”)在近些年所开展的科学气球飞行进行介绍, 重点关注高空科学气球平台发展、所取得的科学成果以及工程技术运用。科学气球平台发展以大载重、高升限为趋势。在临近空间球载科学研究方面, 通过搭载科学实验载荷, 在临近空间开展包括临近空间大气原位探测、临近空间与高层大气耦合、地球与行星空间物质和能量输运特征、微生物耐受临近空间极端环境机制研究等实验。作为临近空间球载工程试验方面, 以临空投放与发射技术、太阳能电池标定及对地遥感观测为典型运用进行介绍。经过近些年的发展, 中国科学院建立起更加完整的高空科学气球系统, 能够为未来更复杂、更高需求的科学实验提供良好保障。

关键词: 临近空间, 高空科学气球, 鸿鹄专项, 科学研究, 工程试验

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 蔡榕, 杨燕初, 姜鲁华, 张泰华, 徐国宁, 张向强, 周江华, 苗景刚, 宫泽奇, 王生, 李兆杰, 马玲灵, 祝榕辰, 张航悦, 冯慧, 何泽青, 王谦, 张冬辉, 刘强, 闫峰, 何小辉, 王宁, 黄宛宁, 徐文宽, 聂莹, 王保成, 张衍垒, 朱殷. 2025. 中国科学院高空科学气球研究进展. 遥感学报, 29(6): 1502–1514

Cai R, Yang Y C, Jiang L H, Zhang T H, Xu G N, Zhang X Q, Zhou J H, Miao J G, Gong Z Q, Wang S, Li Z J, Ma L L, Zhu R C, Zhang H Y, Feng H, He Z Q, Wang Q, Zhang D H, Liu Q, Yan F, He X H, Wang N, Huang W N, Xu W K, Nie Y, Wang B C, Zhang Y L and Zhu Y. 2025. Research progress of High-altitude Scientific Balloons in Chinese Academy of Sciences. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 1502–1514 [DOI: 10.11834/jrs.20255099]

1 引言

临近空间是指 20—100 km 的空间区域, 高度包含大气层中平流层上层、中间层、热层下层的部分, 介于人类航空活动上限和航天活动下限之间。临近空间不仅是高度上的“过渡”, 也是气象气候与空间天气的过渡、大气与等离子体的过渡、生机盎然与无生命迹象的过渡(黄宛宁等, 2019)。相较于相邻大气空间, 临近空间的物质构成、能量输运以及相互作用较为复杂。在临近空间开展

科学研究则可分为本域发生或客观存在的规律和现象的研究, 如能量交换、物质交换、生物群落探测等, 以及依托临近空间环境特征开展的探测, 如天体观测、宇宙线与粒子探测等。

高空科学气球(简称“高空气球”或“科学气球”, 本文简称为“科学气球”)是开展临近空间研究的重要平台。其依靠密度小于空气的气体产生的浮力升空, 飞行高度高、速度低、载重能力强, 同时具有发放简单、发放地点不受限制、载荷可重复回收使用、飞行时间可以根据需要灵

收稿日期: 2025-03-25; 预印本: 2025-05-07

基金项目: 临空飞行平台设计及航迹规划与控制研究项目

第一作者简介: 蔡榕, 研究方向为浮空器系统总体设计与仿真。E-mail: cairong@aircas.ac.cn

通信作者简介: 杨燕初, 研究方向为浮空器系统总体设计与仿真。E-mail: yangyanchu@aircas.ac.cn

活控制等优点 (Morris, 1975)。采用聚乙烯类材料制作的科学气球诞生于二战后, 半个多世纪的气球飞行证明, 即使在航天技术高度发展的今天, 科学气球仍然是一种强大而有效的科学实验平台 (Abe 等, 2009)。利用科学气球作为科学实验平台可以开展“世界级”的科学研究。科学气球以较低的成本极大地支持了临近空间科学研究和空间技术应用。世界主要航空航天国家均设有专门的气球研究机构, 如美国的 CSBF、法国 CNES、印度 TATA、日本 ISAS 等, 都建立了符合自身特色的科学气球系统, 并长期持续开展气球飞行试验。

本文所述科学气球在结构上采用零压式自然型外形, 也可称零压气球。零压气球底部有排气管与大气连通, 内部只受氦气压力梯度的影响, 不能承受较大内外压差, 采用无周向应力的自然型外形, 可以最大限度的利用材料强度, 减轻重量 (杨燕初 等, 2019)。图 1 为科学气球系统的组成。充满浮升气体的球体提供浮力, 下部由降落伞和缆绳组成结绳, 悬挂吊舱及有效载荷。图 2 为科学气球飞行过程示意图。气球在地面发放后, 首先经历升空阶段, 待爬升至驻空高度后进入平

飞, 并在平飞阶段开展各类科学实验及技术验证。在完成飞行试验后, 由地面控制中心发出切割指令, 断开气球与降落伞之间的结构连接, 吊舱在降落伞缓降作用下实现安全回收。目前国外零压气球最大体积可达到 170 m^3 , 载荷最大 3.6 T , 飞行高度涵盖 $20\text{—}50 \text{ km}$ 范围。中国零压气球最大体积达到 100 m^3 。

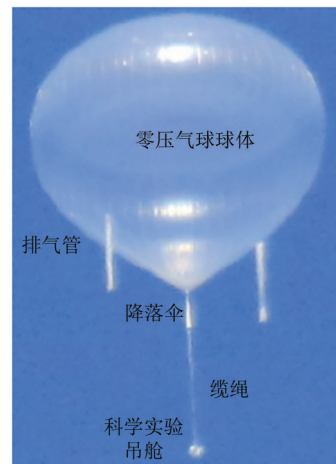


图1 科学气球系统

Fig.1 High-altitude balloon system

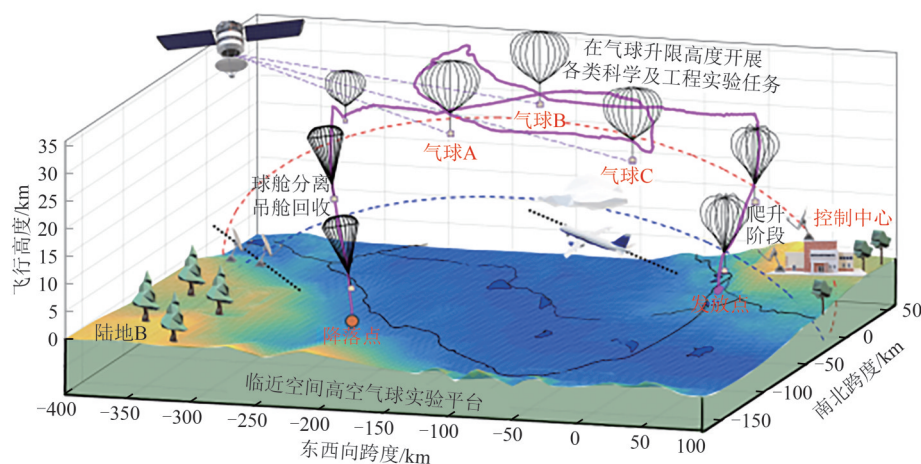


图2 科学气球飞行过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high-altitude balloon flight process

中国于1979年正式启动了科学气球工程。20世纪实际飞行的气球最大体积 40 m^3 气球, 制作过的气球最大体积 60 m^3 , 开展了天文物理、大气遥感、工程技术等多种试验 (顾逸东, 2023; Gu, 1998)。近些年, 在“鸿鹄专项”的支持下, 中国科学院空天信息创新研究院 (以下简称“空天院”) 联合院内多家科研机构 and 高校于2018—2022年开

展了多次科学气球飞行试验, 取得了较好的成果。鸿鹄专项于2018年3月启动, 旨在突破一系列关键技术, 研制包括重载高空科学气球在内的临近空间飞行实验平台, 建成中国首个临近空间科学实验系统; 同时聚焦临近空间环境和生态系统, 在多个典型区域开展迄今为止覆盖参量最全、高度范围最完整的临近空间综合科学探测。

科学气球一直是基础科学研究和技术开发不可或缺的工具，涵盖了从天体物理学（52%）、地球科学（29%）、行星科学（11%）到太阳物理学（8%）等多个领域。自从科学气球技术诞生以来，就一直在支持着前沿科学的探索。《科学新闻》曾发布过衡量对世界科学发现和技术成就的贡献报告。该指标涵盖从1973年—2001年的28年间的所有科学领域，仅仅高空科学气球这一平台在对人类世界重大科学发现及科技成就的贡献中就占到9%。在鸿鹄专项期间，与科学观测和实验有关的科学气球飞行统计如表1所示。

表1 科学研究类科学气球飞行

Table 1 High-altitude balloon flights for scientific research

科学实验	年份	气球体积/m ³
气辉、空间电磁	2018年	4000
	2019年	10000
	2019年	10000
	2020年	10000
大气环境探测	2021年	50000
	2019年	50000
	2019年	50000
	2020年	20000
生物暴露与采样	2021年	80000
	2019年	20000
	2019年	5000
	2019年	5000
临近空间环境 综合探测	2019年	5000
	2019年	5000
	2019年	20000
	2020年	50000
陨石抛投	2019年	700
大气波动、电离层垂直耦合探测	2020年	50000
气辉、空间电磁	2022年	50000
日冕观测	2022年	50000

此外，科学气球项目还充当了一个技术试验场，用于测试那些展现出应用潜力的新仪器和航天器技术。在鸿鹄专项支持下，科学气球以较低的成本促进了技术进步，并通过PI制和实际机会培养了众多青年航天人才。表2列出了近年与工程技术试验相关的飞行。

本文对近些年中国科学院科学气球平台研制、以及基于该临近空间平台所开展的部分科学研究及工程技术试验进行介绍。科学气球平台发展以更大载重、更长航时及更高飞行高度为发展目标，为载荷任务提供更安全、可靠且性能优异的平台。在临近空间开展科学研究起到对地基观测及天基探测的补充，能够以较低成本实现更高指标的观

测要求。同时，科学气球为新兴技术的试验与验证提供了一个理想的平台，借助高升限及大载重的优势，在技术转化及商业方面发挥出独特的作用，助力临近空间领域的科技创新与产业升级。

表2 工程试验类的科学气球飞行

Table 2 High-altitude balloon flights for engineering experiments

工程试验	年份	气球体积/m ³
太阳能无人机投放	2019年	700
	2019年	7000
太阳能电池标定	2018年	50000
	2021年	30000
	2022年	30000
对地遥感观测	2020年	10000
	2021年	20000

2 科学气球平台研制进展

科学气球是开展各类临近空间科学试验的有效平台。在鸿鹄专项的支持下，空天院陆续开展了重载、高空及大体积方面的研究，形成了成熟的系列化气球平台。在鸿鹄专项中，空天院发展出体积涵盖7百、5千、1万、2万、3万、5万、8万、18万、100万 m³的9型重载浮空器型谱，其中100万 m³科学气球是国内最大的重载浮空器（图3）。并且同步升级了加工设备、研制了新型检漏装置，具备了带载3.6 T或飞行高度40 km的能力。

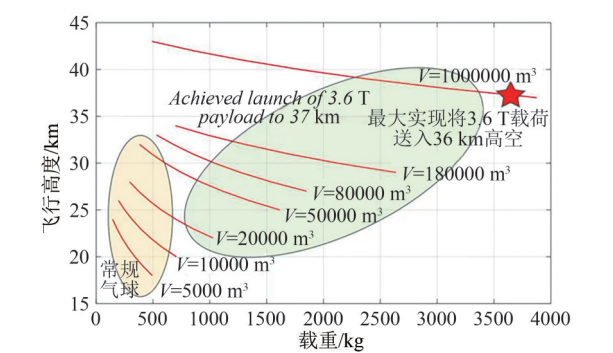


图3 目前中国科学院科学气球飞行能力

Fig. 3 Current high-altitude balloon flight capability of the Chinese academy of sciences

2.1 重载及大型气球研制

作为一种可用于“临—空—地”往返的开展临近空间科学探测的优质平台，吨级重载科学气球平台的成功研制，使其能够为更多尺寸大、重量重的载荷提供搭载进入临近空间开展科学实验，

也为一些大尺寸无人飞行器等的空基投放提供了一种理想的运载平台。2022年9月30日,空天院在青海完成载重能力1.2 T、飞行高度30 km的重载科学气球飞行演示验证试验。此次试验是中国近年来搭载重量最重、吨级载重飞行高度最高的科学气球飞行试验,标志着中国重载科学气球平台研制取得阶段性成功。

本次试验采用18万 m^3 重载型科学气球平台,球体未充气长度达到100余m。图4为气球地面充气状态。由于挂载重量重、气球结构尺寸巨大,对科学气球球体的设计、充气及发放均提出了较高要求。9月30日早上7时29分科学气球平台搭载起飞,于9时22分到达30 km高度,并于9时25分到达32.16 km后进入平飞阶段。气球于9时35分实施切割,吊舱于10时05分落地,吊舱落地状态良好,整舱实现完整回收。



图4 空天院18万 m^3 气球发放
Fig. 4 Launching of a 180000 m^3 balloon by Aerospace Information Research Institute

2023年,空天院开展了100万 m^3 气球的研制工作。该气球能够将3.6 T载荷运送至36 km高空。图5为100万 m^3 气球尺寸对比。完全膨胀后球体直径135 m,系统总高度达到200 m。国际上,NASA常使用代号为“Work Horse”的体积为114万 m^3 气球开展南极飞行试验。100万 m^3 气球的研制弥补了中国在大型气球方面的能力欠缺。目前该型气球是目前中国飞行高度最高、载重量最大的临近空间浮空平台,可支持建立临近空间浮空飞行体系,进一步释放临空前沿科学探索与应用能力。

2.2 科学气球发放技术

科学气球尺寸庞大,易受到环境风场影响,在地面采用非成形发放方式。对于发放技术的研

究有利于安全发放更重载荷,更大体积的气球,提高气球对各类发放环境的适应能力。空天院针对科学气球系统结构特点、根据不同载荷重量尺寸、发放保障条件及应用需求,逐步建立了动态发放、半动态发放及立式发放等多种发放方法。

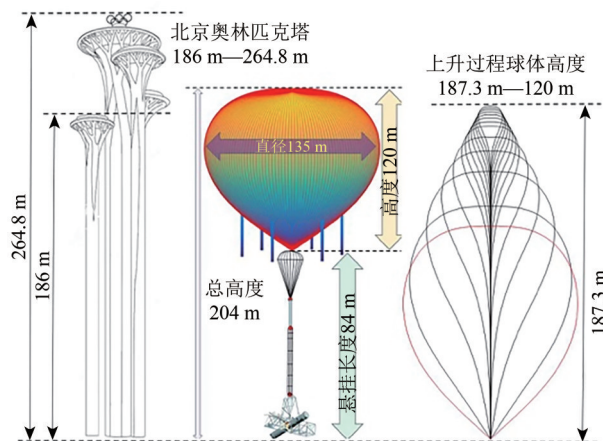


图5 100万 m^3 气球尺寸
Fig. 5 Size of a 1000000 m^3 balloon

(1) 动态发放。针对中大型科学气球采用动态发放方法,该发放方法成熟、可靠性高。发放过程如图6所示,充气前,发放滚筒对气球气泡部分进行约束,连接吊舱与气球之间的降落伞和结绳,将球体铺开,在充气部分安装防风扎口;将吊舱吊起到发放高度,并调整吊车位置;打开阀门,开始充气。充气过程中,核算、确认充气量。完成后封闭充气管。之后进入发放倒计时,打开滚筒,发放车根据风向进行调整,适时打开发放头,完成发放。



图6 动态发放现场记录合成图
Fig. 6 Composite image of dynamic launch site record

(2) 立式发放。立式发放为空天院自创的发放方法,具有需要场地小、可灵活、快速实施的优点。球体充气前,将释放器安装在球体发放线位置,将降落伞、缆绳和吊舱与气球依次连接;

球体充气阶段,通过释放器约束球体气泡,释放器通过缆绳连接到可移动绞盘上;充气完毕后,操作绞盘放出绳索使气球在浮力作用下上升,根据风向、风速对绞盘位置进行调整。通过绞盘控制气球上升至吊舱距地面0.5—1 m,打开释放器,使释放器与气球脱离,释放器在与其连接的缓降球的作用下缓慢下落,气球带吊舱上升,完成发放操作。

(3) 半动态发放。此外,空天院提出半动态发放方法用于搭载大尺寸载荷气球发放,具有发放过载小的优点。半动态发放保留发放车可根据风场进行调整的功能,但使用立式发放缓慢立起地面充气气泡。其具体操作步骤为:发放设备到位,发放车位于下风向,发放绞盘位于上风向;铺设球体,连接降落伞、结缆;发放车将吊舱和载荷吊起到合适高度;气球充气;充气完毕,安装切割器,连接辅助气球;缓慢释放绞盘,直至绞盘绳索上力完全转移到气球结缆上;地面切割器切割,将绞盘适当远离;根据风向调整吊车吊臂方向;寻找合适位置,发放车释放装置打开,完成发放。如风向发放变化,切割器切割后,根据需要转动发放车吊臂,使气球系统安全脱离发放车。

2.3 吊舱及辅助设备

吊舱悬挂在气球下方,用于安装各种测控、飞控仪器设备、电池、载荷等(王梓皓等,2023)。吊舱可以为特定的载荷量身定制,或者设计成能够适应多种不同的仪器。飞控系统负责感知吊舱GPS位置和姿态,控制气球平台飞行过程中阀门、切割器等开关操作并反馈各设备的工作状态,采集各传感器数据,与球载测控终端进行通信,实现测控功能;同时负责对试验载荷的监控和控制。另外,飞控系统设有地检接口,地面测试时与PC连接。飞控系统包括飞控计算机、压舱阀、定时钟、切割器、测温装置和线缆等。重载吊舱方位控制技术可以使吨级重量的吊舱以极高精度保持在特定的方向,形成单轴稳定平台(张大伟等,2016)。在测控方面,建立了视距通信和卫星通信相互补充的测控方案和数据传输体制,开展了数据在线存储与分时传输技术研究,降低因载荷无法回收导致试验失败的风险,具备开展飞行所具备的测控手段和数据传输能力。

空天院为高空科学气球项目提供全面的维护、操作和后勤支持服务,开发了一套先进的地面和飞行系统,用于支持气球的发放、控制、数据收集、指挥和回收任务。配备了以下设施和设备:

(1) 科学气球操作控制中心,用于监控和指挥整个发放过程。

(2) 有效载荷集成吊架,用于在发放前将科学仪器安全地安装到吊舱上。

(3) 环模试验箱,用于测试仪器在模拟高空环境中的性能。

(4) 高精度跟踪雷达,确保对气球位置的实时监控。

(5) 专用发放设备,包括发放滚筒和测试设备,以确保发放过程的顺利进行。

(6) 辅助车辆,如氦气运输车、发放车等,为气球发放提供必要的物流支持。

3 临近空间球载科学研究

在鸿鹄专项期间,空天院利用科学气球平台在临近空间进行了一系列飞行实验,包括大气探索、天文观测、太阳物理学、环境科学、微重力实验和空间育种等。获得了大量的科学数据。本文选取较为突出的天文科学、空间生物及大气科学三类实验进行介绍。

3.1 天文物理

气球在空间物理方面运用由来已久。科学气球给天文观测提供了一个低成本、可重复使用、可迭代的观测平台,可以有效推进有效载荷设计、开发和升级,实现更低成本和更快回报,推进科学研究(李一健等,2024a)。同时,可以作为航天器技术储备平台,促进新一代尖端科学探测技术的发展,成为航天器的重要技术储备源头,为前沿科学和新一代先进的空间科学任务夯实基础(魏勇,2020)。

鸿鹄专项的科学目标之一是突破临近空间浮空器平台关键技术,开展球载行星光学遥感研究。行星空间环境中的关键成分,比如金星的SO和SO₂、火星的CO₂等,其主要的特征辐射均在近紫外波段(200—400 nm)。由于大气的剧烈吸收与抖动,这些波长在地面均无法开展观测。而科学气球可以升高到35 km以上,避开99.9%的大气,避开臭氧层峰值吸收(机载平台由于高度一般低

于20 km, 无法避开臭氧吸收峰), 实现200—400 nm波段的观测。由于近紫外波段Rayleigh散射不复存在, 大气视宁度大大改善, 可以实现衍射极限成像, 提高分辨率。在地球日侧, 基于科学气球平台避开Rayleigh散射的区域开展观测也意味着可以在任何太阳地方时获取数据, 也可以对内行星(水星和金星)开展观测, 波段也可扩展至近紫外。此外, 气球平台发放灵活、载荷可安全回收, 降低了观测成本, 提高了观测的效费比(何飞, 2020)。中国科学院国家空间科学中心通过球载飞行试验首次给出了临近空间瞬时风场变化特征、中子辐射效应、太阳耀斑对临近空间紫外辐射的影响及地磁异常等结果(胡雄等, 2022; 王馨悦等, 2022)。

日冕仪临近空间搭载实验是在鸿鹄专项牵引下, 由中国科学院云南天文台研制中国首台具有自主知识产权的球载日冕仪。该日冕仪为50 mm口径的折射式日冕仪, 工作波长为5500Å, 滤光片透过带宽度为50Å—100Å。

2022年10月, 搭载有该日冕仪的科学气球成

功发放, 飞行高度30 km。球载日冕仪对日冕进行了5 h的连续观测, 获得了近两万幅日冕白光照片, 获取了日冕磁场结构、等离子体分布信息和K-冕辐射偏振信息, 观测到太阳爆发在近日区域的传播特性。这次实验起到了探索为中国开发研制类似设备的技术路线、积累相应的科研和技术人才的作用, 也为中国太阳物理界开辟了再临近空间观测日冕的通道(林隽等, 2023)。

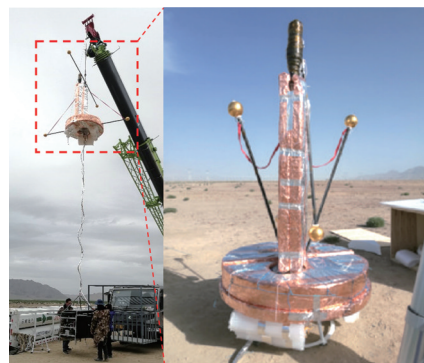


图7 临近空间环境综合探测实验及搭载的电磁场探测仪

Fig. 7 Near space environment observation and the electromagnetic field detector



图8 气球载日冕仪观测任务

Fig. 8 Balloon-borne coronagraph observation mission

3.2 生物暴露

地球临近空间具有高辐射、低温、干燥及低气压的特点, 可类比火星表面环境。在鸿鹄专项支持下, 中国科学院地质与地球物理研究所联合空天院等单位, 成功研制出中国首个基于科学气球的临近空间天体生物学综合飞行实验平台。

自2019年起先后实施了4次临近空间飞行实验, 搭建了临近空间天体生物学实验平台CAS-BAP,

在国际上率先实现了在临近空间同时开展生物暴露研究、原位生物收集和原位环境因子观测, 为临近空间天体生物学研究提供了平台和技术支撑。在成果方面, 揭示了趋磁细菌耐受类火星高辐射环境的机制。细胞内生物矿化产生的纳米级铁磁性颗粒是微生物适应类火星高辐射环境的重要生理机制之一。微生物矿物可以作为地外生命探测的信号指标(林巍, 2020)。

表3 临近空间的生物学实验研究

Table 3 Biological experiment research in near space

年度	2019年	2019年	2020年	2021年
样品类型	微生物、动物、植物	微生物、植物	微生物、动物、植物	微生物、植物、土壤
最高高度	~32 km	~32 km	~23 km	~35 km
平飞时间	3 h 22 min	2 h 32 min	7 h 16 min	4 h 11 min
UV 辐射	未测量	测量	测量	未测量

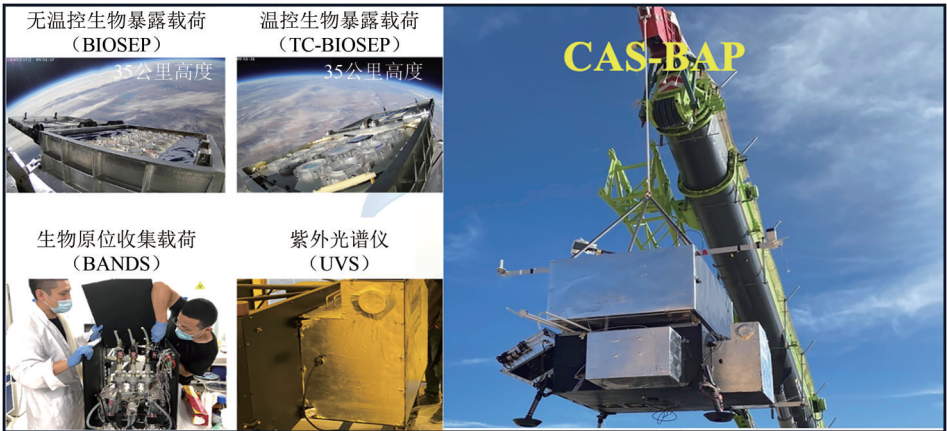


图9 临近空间生物暴露实验(CAS-BAP)

Fig. 9 Near-space biological exposure experiment (CAS-BAP)

3.3 大气科学

鸿鹄专项开展科学气球平台临近空间大气环境、电磁环境、辐射环境等3类原位探测能力攻关，突破了一系列临近空间环境参量探测技术，基本形成了参量齐全的临近空间环境要素探测能力，提升了临近空间环境认知水平。在鸿鹄专项的支持下，中国科学院大气物理研究所系统研究

了青藏高原上空的平流层对流层物质交换过程，系统阐明了青藏高原与全球大气化学气候耦合过程。通过31 h长时飞行原位观测+长管采样 AirCore 揭示对流层顶污染精细结构，系统研究和阐明了青藏高原上空的平流层对流层物质交换过程，青藏高原与全球大气化学气候耦合过程（Li等，2022；Zhang等，2019）。

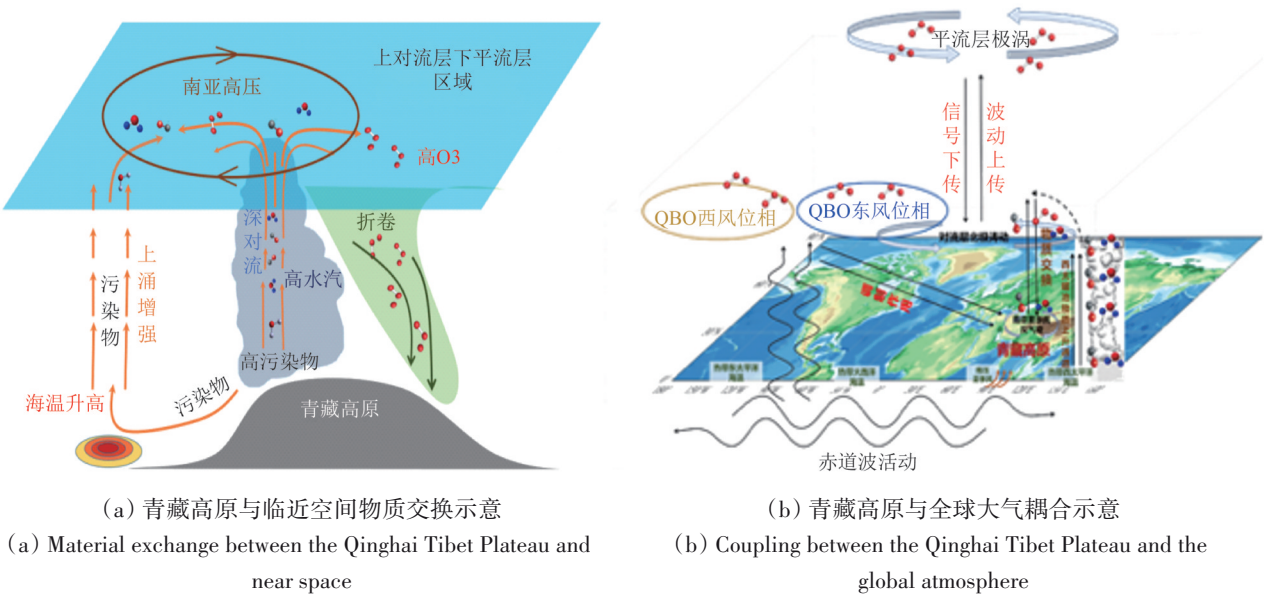


图10 临近空间物质交换现象

Fig. 10 Near-space material exchange phenomena

此外,开展了临近空间大气紫外背景与波动观测验证实验。成功获取了25—30 km高度,不同太阳天顶角、不同方位角、不同俯仰角的大气紫外光谱特征、太阳高能电磁辐射特征。通过紫外光

谱仪成功获得了20—31 km区间对应时段、天顶角、经纬度信息的紫外大气散射背景数据(张轩谊, 2022)。多波段气辉成像实验以及示踪物释放实验反演得到的粒子动力学特征(Wang等, 2021)。

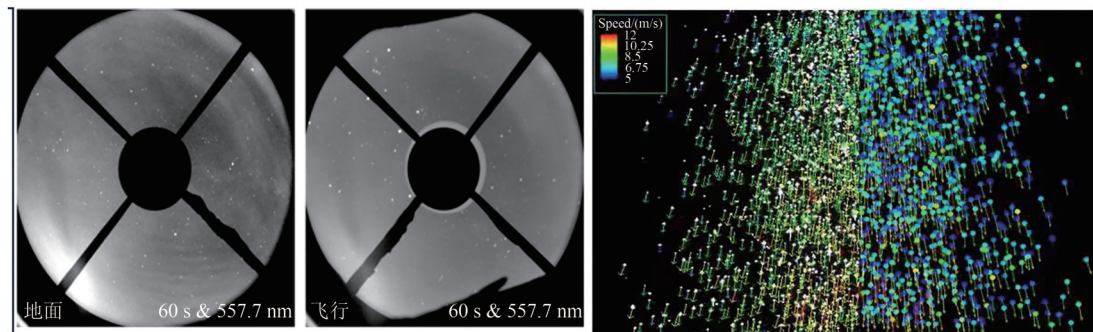


图11 大气紫外线背景和波动

Fig. 11 Atmospheric ultraviolet background and fluctuations

4 临近空间球载工程试验

历史上,科学气球被大量用于航空航天技术发展前期阶段的实验中。在航空航天领域,包括NASA等机构,普遍接受的观点是在载荷系统正式进入航天器开展工作之前,可以使用科学气球进行实际测试,以验证载荷功能与获得实际测试结果,帮助优化载荷设计、提升载荷在正式任务中的性能(von Ehrenfried, 2021)。因此,基于科学气球建立临近空间工程实验平台,是开发利用临近空间资源的有效手段,可充分发挥科学气球的优点,建立可靠的航空航天应用系统,为航天运用及相关技术提供平台保障等,具有实用价值及运用前景。近些年,中国科学院基于科学气球平台,发展了临近空间投放飞行器、太阳能电池标定,以及对地遥感等相关技术。

4.1 临近空间投放飞行器技术

借助科学气球开展临空投放与发射技术是近年来随着科学气球技术深度应用而产生的新技术,为临近空间飞行器的工作模式提供了一种全新的选择。在鸿鹄专项支持下,空天院实现了中国球载投放技术从无到有、从有到强,在临近空间完成了多类型科学验证飞行器投放试验,突破了大载重、大体积载荷搭载、高可靠同步分离、多点约束同步解锁、气球/飞行器组合体姿态控制等多项球载投放关键技术,研制了以大翼展太阳能无人机为运用对象的投放系统。

针对传统模式下临近空间太阳能无人机的使用

工况制约,提出了球载升空、可控投放的技术路线。利用科学气球平台搭载临近空间太阳能无人机升空,以较高的爬升率穿越对流层升至临近空间,实施受控投放,随后无人机进入自主飞行。球载投放应用模式不仅能够确保太阳能无人机在升空过程中的结构安全、减少能源消耗,并且还能够大幅度降低对地面配套保障设施的要求。图12为太阳能无人机地面吊挂发放状态(户艳鹏等, 2024)。



图12 太阳能无人机投放试验

Fig.12 Solar-powered drone deployment experiment

4.2 太阳电池标定

目前, 空间太阳电池标定法包括地面模拟光源标定法和高空原位标定法, 其中高空原位标定法包括科学气球原位标定法和卫星高空原位标定法等。地面模拟光源标定方法在光谱方面与真实的空间光谱存在无法弥补的差异, 采用该方法标定的结果不能满足对空间太阳电池高精度测量的要求。卫星高空原位标定法存在一次成本高、周期长和难以回收等缺点。因此科学气球高空原位标定法被认为是空间太阳电池最合适的标定方法之一 (Xu等, 2023)。

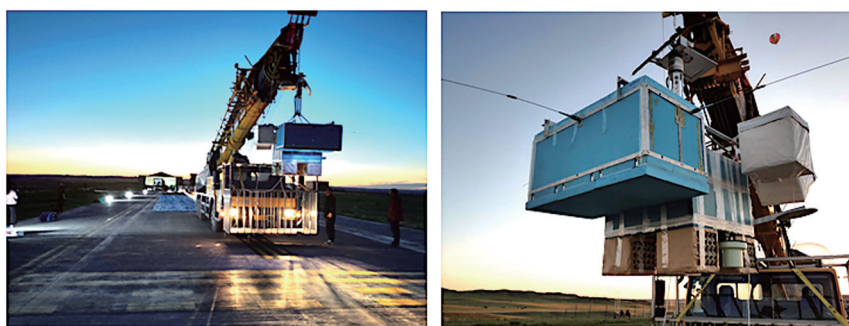


图13 太阳电池标定试验

Fig. 13 Solar cell calibration experiment

自2017年以来, 研究团队每年均开展临近空间太阳电池高空标定飞行试验, 相关成果已经服务国内多家空间太阳电池研发单位, 经过标定的太阳电池已成功应用于卫星、临近空间飞行器等空天飞行器。该系统常态化运营也使得中国科学院成为继美国NASA、法国CNES之后国际上第三个可独立开展35 km高度科学气球太阳电池常态化标定的研究机构 (徐国宁等, 2021; 张益清等, 2024)。

4.3 对地遥感观测技术

空天院根据临近空间辐射基准传递定标演示系统任务要求, 研制了1万 m^3 和2万 m^3 高空科学气球系统, 设计和实施了高空科学气球临近空间搭

载飞行试验。科学气球平台搭载成像式的可见—短波红外高光谱设备和非成像式的中远红外高光谱仪器, 形成空间辐射基准传递定标演示系统, 分别于2020年9月14日 (10000 m^3 气球, 飞行高度24—25 km, 飞行时长11 h) 和2021年9月20日 (20000 m^3 气球, 飞行高度25—32 km, 飞行时长11 h) 开展了两次平流层高度飞行试验, 在临近空间采集了辐射基准传递数据。中国首次在临近空间实施空间辐射基准传递定标试验, 为中国天—地一体化空间辐射基准传递技术体系建立和空间辐射基准传递定标外场综合测试及中国多系列卫星应用示范, 奠定了技术基础 (王宁等, 2023)。



图14 2020年和2021年开展的两次对地观测试验

Fig. 14 Two Earth observation experiments conducted in 2020 and 2021

5 结 语

科学气球为促进科学技术发展起到重要且独特的作用。本文对近些年空天院在鸿鹄专项支持下的气球平台发展及科学与工程试验方面进行介绍。为了使科学和工程单位能够开展新的前沿探索实验,中国科学院已经建立了包括工程和测试能力在内的基础设施,并建设了相关发放设施。在气球平台发展、飞行保障以及载荷标准化方面,空天院取得以下成果:

(1) 开发了多种类型的科学气球,并发展提升了科学气球技术水平,如重载科学气球的构型设计优化,百万级大型气球设计及加工工艺。测试和评估了各种类型的气球薄膜,解决了由于极低温度和发放技术及程序导致的早期故障问题。

(2) 在青藏高原建立了半永久性发放基地,并为其他发放场地提供支持。构建了地面支持设备,并实现在站点安全发放气球。同时完善了安全发放重载及大型气球的程序和方法,设计并实际验证了立式发放以及半动态发放方法。

(3) 开发了用于收集科学数据的有效载荷结构和仪器(Wang等,2020)。开发、测试和认证了吊舱的弧秒方位控制系统以及有效载荷支持仪器。

空天院全面继承并提升了国内科学气球技术,进一步夯实了我院在该领域的优势地位。发放回收技术、设备和队伍的全面建设与提升,为推动临近空间科学装置建设打下了基础。实现了轻型、中型、重载发放与回收设备及软件的系列化升级;建立了动态、半动态、立式发放与高效回收方法。具备多地多点多纬度同时开展科学气球试验以及多个科学气球的连续发放能力;实现了72 min内完成3个科学气球的快速发放;在青海柴旦、昆仑大峡谷等地建立了发放场,积累了科学气球发放与降落场选址经验,为未来科学气球飞行的不同场景应用发展夯实了基础。

在科学研究方面,鸿鹄专项突破了一系列临近空间环境参量探测技术,成功研制了一批适用于临近空间飞行的包括大气环境参数探测、电磁环境参数探测、辐射环境参数探测和临近空间生物群落探索装备4大类原位与遥感探测设备,基本形成了覆盖参量齐全的临近空间环境要素探测能

力。统筹在青藏高原、中纬度地区和低纬度地区实施了青藏高原对流层—平流层交换观测、临近空间对太阳风暴响应观测验证、临近空间生物群落探查验证和临近空间大气紫外背景与波动观测验证等实验,获取了大量原位探测数据,取得了系列原创性科学发现与成果。

在基于科学气球平台的工程运用方面,建立了国内唯一的临近空间太阳电池标定系统,具备新型太阳电池高精度标定应用服务能力;实现了国内大型重载浮空器临近空间跨平台投放与发射技术的试验验证,为传统无人机发放提供了一种可供选择的、新的技术手段,成为现有技术手段的有效补充,进一步推动了临近空间新技术应用和革新。同时,科学气球作为临近空间科学观测平台和新型空间技术验证平台,具备成本低廉、研制周期短、飞行试验场地要求低、对载荷设计尺寸限制少等优点。通过搭载各类载荷开展高精度对地观测、生态环境监测、组网通信、高空遥感(彭桂林和万志强,2019)等技术应用,为生态民生应用提供了高效经济的新手段(朱家佳等,2021)。

经过近些年的发展,中国科学院科学气球系统在技术、应用和基础设施等方面取得了显著进展。科学气球系统将继续朝着飞行时间更长、挂载重量更大、飞行高度更高、载荷指向精度更准、飞行航向可控等方向发展。未来,科学气球有望在南极(蔡榕和孙建颖,2020)等特殊区域开展更多科学实验,在宇宙线观测、暗物质寻找等人类前沿科学问题方面开展国际合作,进一步发挥科学气球作为临近空间科学平台的优势,提升中国在临近空间科学领域的国际影响力。

参考文献(References)

- Abe T, Imamura T, Izutsu N and Yajima N. 2009. Scientific Ballooning: Technology and Applications of Exploration Balloons Floating in the Stratosphere and the Atmospheres of Other Planets. New York: Springer: 17-18 [DOI: 10.1007/978-0-387-09727-5]
- Cai R and Sun J Y. 2020. Advances in Chinese polar scientific exploration using high-altitude balloons. Chinese Science Bulletin, 65(32): 3510-3519 (蔡榕, 孙建颖. 2020. 中国高空气球极地科学探测的初步构想. 科学通报, 65(32): 3510-3519) [DOI: 10.1360/TB-2020-0072]
- GU Y D. 1998. A new starting point—The renewal project of Chinese

- Balloon Facility. 21(7): 949-957.
- Gu Y D, Wu J, Chen H, Fan B, Jiao W X, Liu J B, Meng X, Xiao G Q, Yuan H, Yuan L, Zhang X M, Zhang X X, Zhao G H, Zhou X B, Zhu Z C. 2021. Review of the 40-year development of China's space exploration. *Chinese Journal of Space Science*, 41(1): 10-21 (顾逸东, 吴季, 陈虎, 范斌, 焦维新, 刘建波, 孟新, 肖国青, 袁洪, 袁利, 张晓敏, 张效信, 赵光恒, 周徐斌, 朱振才. 2021. 中国空间探测领域40年发展. *空间科学学报*, 41(1): 10-21)
- He F. 2020. Remote sensing of planetary space environment. *Chinese Science Bulletin*, 65(14): 1305-1319 (何飞. 2020. 行星空间环境光学遥感. *科学通报*, 65(14): 1305-1319)
- Huang W N, Zhang X J, Li Z B, Wang S, Huang M and Cai R. 2019. Development status and application prospect of near space science and technology. *Science and Technology Review*, 37(21): 46-62 (黄宛宁, 张晓军, 李智斌, 王生, 黄旻, 蔡榕. 2019. 临近空间科学技术的发展现状及应用前景. *科技导报*, 37(21): 46-62)
- Hu X, Wei F, Li L, Chen T, Zhou B, Song L, Wei F, Wang X Y, Zhu X, Tao M Z. 2022. In-situ environmental detecting payloads onboard the floating platform in near-space. *Aerospace Technology*, 44(3): 95-104 (胡雄, 韦峰, 李磊, 陈涛, 周斌, 宋亮, 韦飞, 王馨悦, 朱翔, 陶孟泽. 2022. 浮空平台临近空间环境探测载荷技术研究. *空天技术*, 44(3): 95-104)
- Hu Y P, Guo J, Jia R L, Feng H, Meng W Y, Liu P. 2024. Review on the control technologies of balloon-borne unmanned aerial vehicle in near space. *Control Theory & Applications*, 41(2): 210—220 (卢艳鹏, 郭金, 贾瑞龙, 冯慧, 蒙文跃, 刘萍. 2024. 临近空间球载飞行器投放控制关键技术综述. *控制理论与应用*, 41(2): 210-220)
- Li L, Su J F, Chen T, Ti S, Wu H, Luo J, Li W and Li R K. 2022. Measurement of atmospheric conductivity on the Qinghai-Tibet Plateau in China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(2): 40 [DOI: 10.1007/s00703-022-00870-0]
- Li Y J, Huang W N, Zhou J H, Zhang X J and Zhang H Y. 2024a. Development status and prospects of near space observatories. *Chinese Journal of Space Science*, 44(6): 1068-1085 (李一健, 黄宛宁, 周江华, 张晓军, 张航悦. 2024a. 临近空间天文台发展现状与展望. *空间科学学报*, 44(6): 1068-1085) [DOI: 10.11728/cjss2024.06.2023-0145]
- Lin J, Song T F, Sun M Z, Zhang T, Xu F Y, Wang J X, Fu Y, Li Y, Kang K F, Huang M, Liu Y, Zhou J H, Zhang X J, Xia L D, Zhang H X, Liu D Y, Song H Q, Tian H, Pi X Y, Fu H L, Zhang X F, Zhao M Y, Liu Y, Li Y Q, Jin Z Y and Song H J. 2023. A 50-mm balloon-borne white-light coronagraph: I. Basic structure and experiments on the ground. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica and Astronomica)*, 53(5): 259611 (林隽, 宋腾飞, 孙明哲, 张涛, 许方宇, 王晶星, 付玉, 李燕, 康凯锋, 黄旻, 刘洋, 周江华, 张晓军, 夏利东, 张红鑫, 刘大洋, 宋红强, 田晖, 皮晓宇, 伏红林, 张雪飞, 赵明宇, 刘煜, 李语强, 金振宇, 宋海军. 2023. 50 mm白光球载日冕仪: I. 基本结构与地面观测实验. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 53(5): 259611) [DOI: 10.1360/SSPMA-2022-0363]
- Lin W. 2020. Life in the near space and implications for astrobiology. *Chinese Science Bulletin*, 65(14): 1295-1304 (林巍. 2020. 临近空间生物研究及其天体生物学意义. *科学通报*, 65(14): 1295-1304) [DOI: 10.1360/TB-2019-0805]
- Morris A L. 1975. *Scientific Ballooning Handbook*. TN/IA-99. NCAR
- Peng G L and Wan Z Q. 2019. The present situation and prospect of aerostat applied to remote sensing and remote survey in China. *Journal of Geo-Information Science*, 21(4): 504-511 (彭桂林, 万志强. 2019. 中国浮空器遥感遥测应用现状与展望. *地球信息科学学报*, 21(4): 504-511) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180390]
- von Ehrenfried M D. 2021. *Stratospheric Balloons: Science and Commerce at the Edge of Space*. Cham: Springer: 10-25 [DOI: 10.1007/978-3-030-68130-2]
- Wang N, Ma L L, Liu Q, Zhao Y G, Teng G E, Liu Y K, Gao C X, Liu E C, Zhang D H, Li J M, Wang R F, Zhang B B, Gao H L, Wu H, Han Q J, Zhang T H, Yang Y C, Niu Y F, Zheng Q C and Ouyang G Z. 2023. The near-space altitude experiment for satellite radiometric calibration and the first results. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1177-1193 (王宁, 马玲玲, 刘强, 赵永光, 腾格尔, 刘耀开, 高彩霞, 刘恩超, 张东辉, 黎荆梅, 王任飞, 张贝贝, 高海亮, 吴骅, 韩启金, 张泰华, 杨燕初, 牛沂芳, 郑青川, 欧阳光洲. 2023. 临近空间高度卫星光学载荷辐射定标试验与初步结果. *遥感学报*, 27(5): 1177-1193) [DOI: 10.11834/jrs.20222070]
- Wang X, Du D, Yan Z A, Zhang A B and Hu X. 2022. In situ observation of atmospheric NO_x over Qinghai-Tibet Plateau by scientific experiment system in near space program. *Chinese Science Bulletin*, 67(27): 3348-3356 (王馨悦, 杜丹, 闫召爱, 张爱兵, 胡雄. 2022. 临近空间飞行平台青藏高原大气NO_x原位观测实验. *科学通报*, 67(27): 3348-3356) [DOI: 10.1360/TB-2021-1279]
- Wang Z C, Huang M, Qian L L, Zhao B W and Wang G M. 2020. High-Altitude Balloon-Based sensor system design and implementation. *Sensors*, 20(7): 2080 [DOI: 10.3390/s20072080]
- Wang Z C, Huang M, Sun Y, Tao T, Qian L L, Zhang G F, Zhao B W, Han W, Wang G M, Zhao Y X. 2021. Near-Earth space balloon-based multi-band airglow imager optic design. *Applied Optics*, 60(26): 8057-8068
- Wang Z H, Jiang Y, Huang W N, Jia J and Miao J G. 2023. Research on in-situ detection technology of near space environment. *Aerospace Technology*, (4): 70-79 (王梓皓, 姜毅, 黄宛宁, 贾建, 苗景刚. 2023. 基于气球平台的临近空间环境原位探测技术研究. *空天技术*, (4): 70-79) [DOI: 10.16338/j.issn.2097-0714.20230003]
- Wei Y. 2020. Construction of Planetary Science as a first-level scientific discipline: exploration and practice of Scientific Experiment System in Near Space (SENSE) Program. *Chinese Science Bulletin*, 65(14): 1295-1296 (魏勇. 2020. 行星科学一级学科建设: “鸿鹄专项”的探索与实践. *科学通报*, 65(14): 1295-1296) [DOI: 10.1360/TB-2019-0808]
- Xu G N, Tang Y, Li Z J, Cai R, Jiang L H and Miao Y. 2021. Research on key technologies for high-altitude balloon calibration of solar cells. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 42(10): 94-104 (徐国宁, 唐宇, 李兆杰, 蔡榕, 姜鲁华, 苗颖. 2021. 太阳能电池高空气球标定关键技术研究. *太阳能学报*, 42(10): 94-104) [DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0726]

- Xu Z H, Xu G N, Luo Q, Han Y F, Tang Y, Miao Y, Li Y X, Qin J, Guo J B, Zha W S, Gong C, Lu K, Zhang J Q, Wei Z X, Cai R, Yang Y C, Li Z J and Ma C Q. 2023. *In situ* performance and stability tests of large-area flexible polymer solar cells in the 35-km stratospheric environment. *National Science Review*, 10(4): nwac285 [DOI: 10.1093/nsr/nwac285]
- Yang Y C, Zhang H Y and Zhao R. 2019. Shape design of zero pressure high altitude balloon and sensitivity analysis of key parameters. *Journal of National University of Defense Technology*, 41(1): 58-64 (杨燕初, 张航悦, 赵荣. 2019. 零压式高空气球球形设计与参数敏感性分析. *国防科技大学学报*, 41(1): 58-64) [DOI: 10.11887/j.cn.201901009]
- Zhang D W, Zhou J H, Huang W N. 2016. A Simplified Design of Decoupling Control System in Balloon Gondola. *Aerospace Control*. 34(4):76-82 (张大伟, 周江华, 黄宛宁. 2016. 高空气球吊篮姿态控制用精简反捻控制系统设计. *航天控制*, 34(4):76-82)
- Zhang J Q, Wu X, Liu S, Bai Z X, Xia X G, Chen B, Zong X M and Bian J C. 2019. *In situ* measurements and backward-trajectory analysis of high-concentration, fine-mode aerosols in the UTLS over the Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 14(12): 124068 [DOI: 10.1088/1748-9326/ab5a9f]
- Zhang X Y. 2022. Simulation of solar ultraviolet radiation environment in near space and analysis of topographic difference. *Chinese Journal of Space Science*, 42(6): 1129-1136 (张轩谊. 2022. 临近空间太阳紫外辐射环境模拟与地区差异. *空间科学学报*, 42(6): 1129-1136) [DOI: 10.11728/cjss2022.06.211208128]
- Zhang Y Q, Huang T S, Li Y X, Yang Y C and Xu G N. 2024. Analysis impact of spherical reflection on solar cell calibration. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics* (张益清, 黄庭双, 李永祥, 杨燕初, 徐国宁. 2024. 高空气球太阳电池标定球体反光影响分析及防护. *北京航空航天大学学报*) [DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0772]
- Zhu J J, Mi L, Li X H, Zhang J, Dou S, Li Z Y, Yuan X F and Li C R. 2021. Near space scientific exploratory data sharing research and practice. *Chinese Journal of Space Science*, 41(5): 828-835 (朱家佳, 米琳, 李晓辉, 张静, 窦帅, 李子扬, 苑馨方, 李传荣. 2021. 临近空间科学探测数据的共享与实践. *空间科学学报*, 41(5): 828-835) [DOI: 10.11728/cjss2021.05.828]

Research progress of high-altitude scientific balloons in Chinese Academy of Sciences

CAI Rong^{1,2}, YANG Yanchu^{1,2}, JIANG Luhua¹, ZHANG Taihua¹, XU Guoning^{1,2}, ZHANG Xiangqiang¹, ZHOU Jianghua^{1,2}, MIAO Jinggang^{1,2}, GONG Zeqi¹, WANG Sheng^{1,2}, LI Zhaojie^{1,2}, MA Lingling¹, ZHU Rongchen¹, ZHANG Hangyue¹, FENG Hui^{1,2}, HE Zeqing¹, WANG Qian¹, ZHANG Donghui¹, LIU Qiang¹, YAN Feng¹, HE Xiaohui¹, WANG Ning¹, HUANG Wanning¹, XU Wenkuan¹, NIE Ying^{1,2}, WANG Baocheng¹, ZHANG Yanlei¹, ZHU Yin¹

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

Abstract: High-altitude scientific balloons, as mature near-space vehicles, offer excellent platforms for diverse scientific research. This paper focuses on the scientific balloon flights conducted under the Chinese Academy of Sciences' Strategic Pioneer Program on the "Near-Space Scientific Experiment System" in recent years. It delves into the development of high-altitude scientific balloon platforms, their scientific achievements, and engineering applications.

The development of scientific balloon platforms is trending toward heavier payloads and higher altitude ceilings. In near-space research, these balloons carry scientific payloads to conduct experiments such as in situ probing of the near-space atmosphere, studying the coupling between near-space and the upper atmosphere, analyzing material and energy transport characteristics between Earth and planetary spaces, and investigating microbial tolerance to extreme near-space environments.

In terms of engineering applications, the paper introduces typical uses like air-launching technologies, solar cell calibration, and remote sensing observations. Over recent years, the Chinese Academy of Sciences has established a more comprehensive high-altitude scientific balloon system, providing robust support for future and complex high-demand scientific experiments.

During the Honghu Special Project, the following achievements were made:

(1) Various types of scientific balloons were developed, and the technology was advanced. This included optimizing the configuration design of heavy-load scientific balloons and designing and manufacturing large balloons with a capacity of one million cubic meters. Different balloon films were tested and evaluated, and early failure issues caused by extremely low temperatures, as well as Launching technologies and procedures, were resolved.

(2) A semi-permanent launching base was established on the Qinghai-Tibet Plateau, and support was provided to other launching sites. Ground support equipment was constructed, enabling safe balloon launches at stations. Procedures and methods for safely launching heavy

and large balloons were refined, and vertical and semi-dynamic launch methods were designed and validated.

(3) Payload structures and instruments for collecting scientific data were developed. The arc-second azimuth control system for the gondola and the payload support instruments were developed, tested, and certified.

Chinese Academy of Sciences has comprehensively inherited and advanced domestic scientific balloon technologies, further solidifying its leading position in this field. The all-round development and enhancement of launching and recovery technologies, equipment, and teams have laid the groundwork for promoting the construction of near-space scientific facilities. A series of upgrades have been achieved for light, medium, and heavy load launching and recovery equipment and software; dynamic, semi-dynamic, and vertical launching methods, as well as efficient recovery methods, have been established. The capability to conduct scientific balloon experiments simultaneously at multiple locations and latitudes, as well as the ability to launch multiple scientific balloons consecutively, has been achieved. Three scientific balloons can be rapidly launched within 72 minutes. Launching sites have been established in places like Chaidan, Qinghai, and the Kunlun Grand Canyon, accumulating experience in site selection for balloon launching and landing fields, and providing a solid foundation for the development of scientific balloon flights in various future scenarios.

Over the years, the Chinese Academy of Sciences' scientific balloon system has made significant progress in technology, applications, and infrastructure. In the future, scientific balloon systems will continue to evolve toward longer flight durations, heavier payloads, higher flight altitudes, more precise payload pointing, and controllable flight directions. It is that expected scientific balloons will conduct more scientific experiments in special regions like the Antarctic and engage in international cooperation on cutting-edge scientific issues such as cosmic ray observation and dark matter search. This will further leverage the advantages of scientific balloons as near-space scientific platforms and enhance China's international contributions in near-space science.

Key words: near-space, high-altitude scientific balloons, Honghu Special Project, scientific research, engineering experiments

Supported by Research Project on the Design of Near-space Flight Platforms and Trajectory Planning and Control