

亚历山大·巴肯的气象研究、实践和贡献分析

■ 陈倩 李蓓蓓

亚历山大·巴肯是19世纪苏格兰杰出的气象学家，在地面天气图、气旋风暴、山地气象观测等方面进行了多项探索，取得丰硕成果。他的著作《气象学手册》使人们开始重视气象与生活的关系；他出版的《气象学教科书》是近代气象学经典教科书之一，为观测员顺利开展气象观测奠定了基础；他编辑的《气象地图集》加强了公众对大气运动的认识。巴肯以卓越的气象贡献获得了英国皇家气象学会颁发的第一枚“西蒙斯奖章”。为纪念巴肯的杰出贡献，英国皇家气象学会特别设置“巴肯奖”，表彰在气象领域有重要原创贡献的研究人员。

中图分类号：P4

文献标志码：A

DOI：10.3969/j.issn.2095-1973.2024.05.011

18—19世纪，气象仪器不断被发明和改进，为开展气象量化观测提供了技术条件。人们坚信通过长期连续的观测可以揭示大气运动规律。亚历山大·巴肯（Alexander Buchan，1829—1907，图1）是19世纪著名的气象学家，他在1868—1869年率先绘制了全球1月、7月及全年等



图1 亚历山大·巴肯(1829—1907)

压线分布图，这是天气图绘制方面的巨大进步。文献中关于巴肯贡献的研究主要集中在天气图方面，而缺少对巴肯气象实践和贡献的全面梳理。本文利用历史文献资料，梳理巴肯在气象学方面的探索，厘清英国皇家气象学会特设以其名字命名奖项的原因。

1 巴肯生平概述

1829年4月，巴肯出生在苏格兰中部的金罗斯。大学毕业后，巴肯开始从事植物学研究。也许因为长途探险的经历，他开始对天气产生兴趣，进而转向气象学研究。

1861年，巴肯被任命为苏格兰气象学会秘书，负责学会刊物的编辑和撰稿。自1861年巴肯在苏格兰气象学会宣读第一篇论文开始，到1907年作为英国皇家学会的会员去世，他一直活跃在气象学研究舞台上。

2 地面天气图的创新

1816年，德国物理学家布兰德斯（H. W. Brandes，1777—1834），利用巴拉丁气象学会（Societas Meteorologic Palatina）收集的每日3次历史气象观测记录，将气压和风向填入地图，绘制了世界上第一张地面天气图，研究了云量、风和气压系统间的关系。将气象要素填入地图，使研究人员发现天气图可以揭示天气变化情况。随着等温线、等压线的发明，各种气象要素平均分布图和气候图应运而生。而随着气象观测活动的广泛开展，人们面临着将数据绘制在一张天气图上的难题。

1863年，巴肯出版了一系列的天气图。绘制天气图时，他面临将分散在欧洲135处观测点的气象记录进行时差校正的困难。这需要将气压数据减少至海平面气压，使用偏离平均值的温度等方法，来消除不同仪器导致的差异性。巴肯的天气图包含了对气压、温度和风的观测，还展示了云和降雨数据24 h的变化（图2），这为他绘制出全球等压线图奠定了基础。

1868—1869年，巴肯通过在地图上重建大西洋上空低压轨迹，首先绘制了世界1月、7月及全年等压线

收稿日期：2022年1月6日；修回日期：2024年4月17日

第一作者：陈倩（1994—），Email：60200028@sdutcm.edu.cn

通信作者：李蓓蓓（1984—），Email：libeibei@nuist.edu.cn

资助信息：国家自然科学基金专项项目（科技活动项目）（42342020）；江苏科技智库计划（青年）项目（JSKX24084）；中国科协南京信息工程大学“气象大家”科学家精神教育基地史料收集和口述访谈项目（2024pt002）

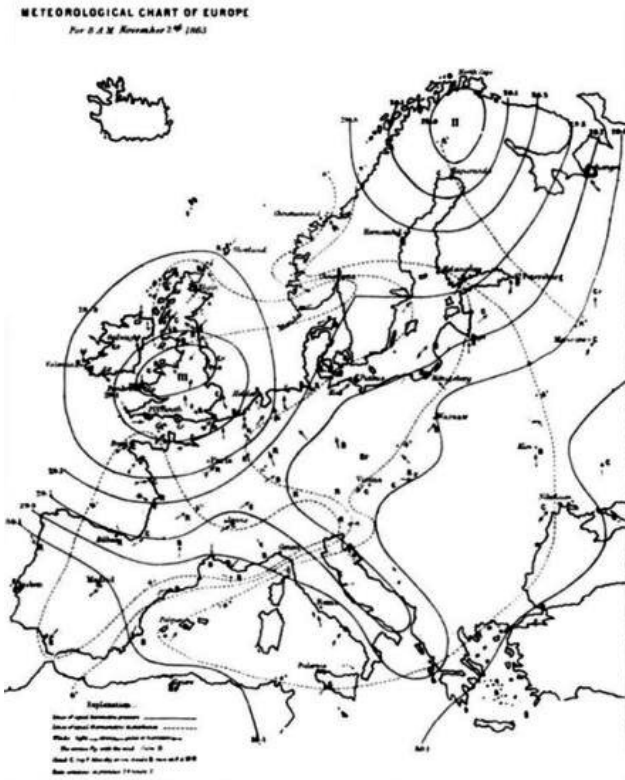


图2 巴肯1865年绘制的欧洲天气图

图，显示了不同经度和纬度的气压变化情况。该图与今天天气图风格相似（图3），因此他被称为“天气图创始人”。

巴肯绘制的首张全球等压线图源于他著名的论文“平均气压和全球盛行风”，这篇论文于1869年发表在《爱丁堡皇家学会会刊》上。他基于收集到的澳洲、非洲、南美洲、欧洲、亚洲等全球200多处观测点的历

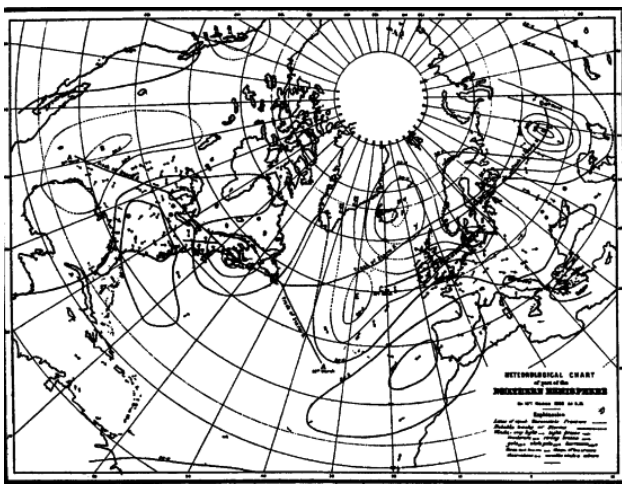


图3 1868年巴肯重建大西洋上空低压轨迹的图表之一

史气象数据，计算出平均值，讨论全球大气的平均压力，详细介绍了构建等压图的方法。巴肯完成了协调全世界可用数据的艰巨任务，他的工作使公众理解收集气象观测数据的意义和作用。这篇论文不仅展示了气象要素在天气图中的视觉效果，还揭示了气压与盛行风之间的关系。

3 对气旋风暴的关注

巴肯认为气象学最重要的问题之一就是确定风暴运行的过程和原因，进而从观察到的气象现象中开展预测。巴肯通过对包含32个低压的18张天气图的研究，揭示了气旋风暴有关的等压地与风暴风力、温度、降水模式之间的关系，得出天气图描绘的气旋风场的旋涡性质，为解释低压中心提供了线索。

1867年，巴肯将研究结论整理出版了《气象学手册》（*Handy Book of Meteorology*），强调低压中心是通过风暴中心和上层外流的强大上升气流来抵抗新汇聚气流的持续流入。他开始意识到对流发展对于气旋的形成和维持是必不可少的。该书还包含了巴肯对气象学历史和范围的界定、全球气压分布情况、观测和计算温度等实用的气象前沿内容。19世纪中叶，气象学还没有被视为独立学科，巴肯在著作中开始将气象学作为单独的学科，摆放在众人面前，使公众开始重视气象与生活的关系。

1868年，《气象学手册》第二版推出，巴肯在书中对长期天气情况做出了预测，他成为将预测结果刊登在印刷出版物的第一人。正如巴肯在第二版前言中提到：气象学作为一门年轻的科学正在快速发展，风暴规律不仅仅是理论，而是观测到的事实。此前世界各地涌现出许多志愿观测员，由于气象学基本原理还没有得到普遍传播，这些志愿观测员的努力往往白费。为此，巴肯描述了各种气象仪器使用过程中最佳观测位置和方向，并详细解释了减少观测误差值的方法，以便观测员得出相对准确的观测记录。他指出最理想方案是统一观测方法，这可能需要第二次“布鲁塞尔会议^①”的召开。这为巴肯作为英国代表参加1873年在维也纳召开的第一届国际气象会议，并在会议中支持“国际同步观测计划”埋下了伏笔。

1869年，巴肯根据苏格兰1857—1866年的气象观测数据，得出“巴肯周期”（Buchan Spells）理论。该理论可以预测温度突然变化的周期，即发生在季节交替时期，巴肯得出英国一年内出现6次寒冷期和3次温暖期的推论。

① 布鲁塞尔会议指美国海洋气象学家马修·方丹·莫里(Matthew Fontaine Maury, 1806—1873)在比利时的布鲁塞尔召开的国际海洋气象会议。会议是一次构建国际秩序的尝试，参会代表就在船上收集气象和水文观测数据的系统达成一致。

4 《气象学教科书》的出版

随着世界主要国家的政府气象部门机构建立，出现了气象学家和气象观测员紧缺的情况。1871年，巴肯出版了《气象学教科书》(*Introductory Text-book of Meteorology*)，作为英国近代气象学的经典教科书，该书成为气象观测人员的必读物之一。

英国皇家气象学会下辖有气象观测站，巴肯的《气象学教科书》和罗密士的《气象学专著》是学会秘书推荐给气象观测员的必读书目。其中巴肯的著作适合气象专业人士，罗密士的著作则可读性较强，适合对气象学感兴趣的普通读者。

随着巴肯的声望越来越高，他开始作为代表出席国际气象会议。1872年，他代表苏格兰气象学会出席莱比锡会议。次年，巴肯和斯科特^①(Robert Henry Scott, 1833—1916)作为英国政府代表参加了在维也纳召开的第一届国际气象会议。维也纳会议通过了美国陆军通信部首席信号官梅尔提出的国际同步观测计划，这与巴肯积极倡导构建统一观测方法的想法一致。会议期间，巴肯与梅尔就苏格兰气象学会协助美国政府执行计划达成了协议。国际同步观测计划吸引了大量气象观测员加入，该计划的成功实施推进了世界范围内的气象研究。

巴肯的《气象学教科书》不仅在英国产生深远影响，还影响了中国清朝海关总税务司英国人罗伯特·赫德(Robert Hart, 1835—1911)。1869年赫德提出在中国海关建设气象观测站，在推进气象工作进程中，他于1873年强调每处站点都应配备巴肯的《气象学教科书》，供负责气象仪器的海关职员使用。这不仅有利于海关气象工作的开展，还可以让海关职员理解气象观测和气象记录。

5 《气象地图集》的出版

巴肯推动了《气象地图集》的出版，这是他在气象方面又一重要贡献。约翰·乔治·巴塞洛缪(John George Bartholomew, 1860—1920)是英国制图学家和地图出版家，他率先运用分层设色法表示地形，提高了英国地图学的水平。19世纪末，巴塞洛缪计划出版五卷本《巴塞洛缪自然地图集》(*Bartholomew's Physical Atlas*)。这是一套大型多卷的自然地图集，其中第三卷为《气象地图集》(*Atlas of Meteorology*)。地图集在1899年出版，由巴塞洛缪和赫伯森^②(A. J. Herbertson, 1865—1915)担任主编，编辑工作由巴肯负责。《气象地图集》中包含了世界各地的气象、气候、天气

图共400余幅，这些地图色彩艳丽、质量上乘。

《气象地图集》主要分为气候和天气两个部分。巴肯对其寄予厚望，他认为气象学积累的大量数据在地理方面的呈现，与地质学、生物学等学科比较，效果是极佳的，因为这些学科不具备气象地图的效果，而气象地图可以展示世界范围内各地精确结果，说明各地温度、压力、湿度、云、降雨和大气运动的分布情况和关系。此外，地图集举例展示天气预报的基本原理，附录了气象术语表、参考书目等内容，完善的细节使这卷《气象地图集》成为19世纪地图学最精美的作品之一。

6 山地气象观测的建立

巴肯是英国第一位强调高空观测对正确理解大气环流和天气预报重要性的气象学家。本尼维斯山(Ben Nevis)的气象观测研究在巴肯科学工作中占据了重要地位。1877年，时任苏格兰气象学会主席指出本尼维斯山作为英国最高峰，在气象观测方面有地理优势。本尼维斯山位于大西洋大气压低压的外围，冬季来临时，会对欧洲西北部的天气产生影响。

1883年，巴肯通过宣传提高了公众对山地气象学的兴趣，获得了必要的启动资金建设本尼维斯山观测站，他在观测员配备和观测例行程序组织方面倾注了许多心血。气象学家们在本尼维斯山顶峰海拔1345 m处开展气象观测，详细记录白天和夜晚每小时的气象数据，包括气压、温度、降雨量、风力、风向、日照、云量。

7 最高荣誉及奖项纪念

英国降雨组织的创始人、气象学家乔治·詹姆斯·西蒙斯(George James Symons, 1838—1900)曾赞誉：巴肯先生是苏格兰气象学会最有能力的观测员之一。英国皇家气象学会为表彰杰出贡献的气象学家，设置了诸多奖项，其中最高荣誉是“西蒙斯奖章”(Symons Gold Medal)，该奖项始于1901年，每两年颁发一次。1902年，第一枚“西蒙斯奖章”颁发给了巴肯，这是对巴肯气象学贡献的最直接肯定。

为了纪念巴肯对苏格兰气象学会和气象学方面的杰出贡献，1921年苏格兰气象学会并入英国皇家气象学会后，有人建议将苏格兰气象学会的部分资金拿出设置“巴肯奖”(Buchan Prize)，以纪念这位苏格兰著名的气象学家。该提议被采纳，奖项每两年颁发一次，一般设置在颁发“西蒙斯奖章”的年

① 斯科特，英国气象学家，1865年英国气象部门改组为气象局，任英国气象局首任局长。

② 英国地理学家，1905年首次提出世界大自然区的划分。

份。“巴肯奖”由15几尼^①和一张羊皮纸证书组成，只有研究人员才有资格获得该奖。1925年1月21日，“巴肯奖”首次颁发，获奖者为英国的达因（W. H. Dines, 1855—1927），以表彰他发明达因风速仪和斜斗式虹吸雨量计。

时至今日，“巴肯奖”更名为“巴肯科学进步奖”（Buchan Award for Scientific Advances），它是英国皇家气象学会在气象研究领域颁发十余项奖项中第三重要的奖项，也是除了终身成就奖之外，最重要的气象研究奖。该奖每年颁发一次，如出现未提名的情况，则会停发。奖项授予颁奖年的前五年在《英国皇家气象学会季刊》或《国际气候学杂志》上发表论文，并被判定是气象学中最重要原创贡献的作者，以表彰他们在气象研究中做出的开拓性贡献。随着气象研究团队协作重要性的增加，“巴肯科学进步奖”还可提名团队，每位气象研究人员或团队只能获奖一次。

深入阅读

- 李海晨, 1984. 专题地图与地图集编制[J]. 北京: 高等教育出版社, 205.
- 林之光, 2000. 少年气象学[M]. 北京: 科学普及出版社.
- 刘昭民, 1981. 西洋气象学史[M]. 台北: 中国文化大学出版社.
- 吕中华, 1981. 气象世家——约·索·达因斯的一家[J]. 气象科技(4): 50.
- 西蒙·内勒, 贾宁, 马玲, 等, 2021. 19世纪苏格兰山地气象学的发展历程[J]. 气象史研究(1): 174-197, 269.
- 许文心, 2022. 赫德海关气象网络的构建与转移(1869—1882)[J]. 海关与经贸研究, 43(2): 67-82.
- 杨展览, 李希圣, 黄伟雄, 1992. 地理学大辞典[M]. 合肥: 安徽人民出版社.
- 中国大百科全书出版社不列颠百科全书编辑部, 1999. 不列颠百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社.
- (美)凯文·海尔, 2016. 我们能掌握天气吗: 1000个天气知识[M]. 赵巍, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社.
- (英)查尔斯·辛格, E. J. 霍姆亚德, A. R. 霍尔, 等, 2021. 技术史 第4卷 工业革命[M]. 辛元欧, 刘兵, 译. 北京: 中国工人出版社.
- Adams C C, 1913. Review: Bartholomew's atlas of zoogeography[J]. Bulletin of the American Geographical Society, 45(1): 43-45.
- Brunt D, 1950. Centenary of the Royal Meteorological Society[J]. Nature, 165(4195): 463-466.
- Buchan A, 1868. Handy Book of Meteorology, 2nd ed.[M]. Edinburgh & London: W. Blackwood and Sons.
- Buchan A, 1869. The mean pressure of the atmosphere, and the prevailing winds for the months and for the year. Part II[J]. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, 6: 523-524.
- Buchan A, 1871. Introductory Text-Book of Meteorology[M]. Edinburgh & London: W. Blackwood and Sons.
- Buchan A, 1874. Simultaneous meteorological observations[J]. Nature, 9(227): 343.
- Buchan A, 1890. The meteorology of ben Nevis[J]. Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh, 34: xvii-lxi.
- Buchan A, 1905. The inter-relations of barometric pressure, temperature, humidity, rainfall, cloud, sunshine, and wind,

8 结语

巴肯气象学实践反映了维多利亚时代气象学家的艰难摸索。他绘制的全球天气图，解释了气压与盛行风之间的关系，也为解释风暴的形成提供了线索。巴肯在本尼维斯山观测站的建设和资料整理方面，注入了极大的热情，为今天英国气象局保存了珍贵的山地气象记录。作为苏格兰气象学会的秘书，巴肯致力于气象观测规范的统一，在国际气象合作舞台中，其著作更是成为各地观测员的必备书目，为国际标准气象观测贡献了力量。巴肯编辑的《气象地图集》是他科学成果的汇编，也成为19世纪地图学重要作品。他本人作为19世纪杰出的气象学家，获得了英国皇家气象学会第一枚最高荣誉奖章“西蒙斯奖章”。为了铭记巴肯杰出的贡献，英国皇家气象学会特设“巴肯奖”，奖励在气象学研究领域的原创学者。直至今日，“巴肯科学进步奖”仍然是气象研究领域最重要的奖项之一。

- illustrated by the observations made at the two ben Nevis observatories (First Paper)[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 43: 504-527.
- Burt S, Hawkins E, 2019. Near-zero humidities on Ben Nevis, Scotland, revealed by pioneering 19th-century observers and modern volunteers[J]. International Journal of Climatology, 39(11): 4451-4466.
- Davis J L, 1984. Weather forecasting and the development of meteorological theory at the Paris Observatory, 1853-1878[J]. Annals of Science, 41(4): 359-382.
- Eden P, 2009. Traditional weather observing in the UK: an historical overview[J]. Weather, 64(9): 239-245.
- Field R, Symons G J, 1870. On the determination of the real amount of evaporation from the surface of water[J]. Symons British Rainfall 1869: 152-168.
- Gillette H P, 1954. Evidence of a precipitation and sunspot cycle of one month[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 35(8): 374-376.
- Grahame M N, 2000. The development of meteorology over the last 150 years as illustrated by historical weather charts[J]. Weather, 55(4): 108-117.
- Hawkins E, Burt S, Brohan P, et al, 2019. Hourly weather observations from the Scottish Highlands (1883—1904) rescued by volunteer citizen scientists[J]. Geoscience Data Journal, 6(2): 160-173.
- Kutzbach G, 1979. The Thermal Theory of Cyclones: A history of Meteorological Thought in the Nineteenth Century[M]. Boston: Springer.
- Livingston B E, 1925. Grants of the American association for the advancement of science in aid of research[J]. Science, 61(1573): 202.
- McIntosh D H, 1953. Annual recurrences in Edinburgh temperature[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 79(340): 262-271.
- Mill H R, 1907. Obituary: Dr. Alexander Buchan[J]. Scottish Geographical Magazine, 23(8): 427-431.

① 英国旧金币，1几尼=1.05英镑。

- Mill H R, 1941. Meteorological memories[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 67(292): 315-326.
- Naylor S, 2019. Thermometer screens and the geographies of uniformity in nineteenth-century meteorology[J]. Notes and Records the Royal Society Journal of the History of Science, 73(2): 203-221.
- Newton H A, 1891. A Memoir of Elias Loomis[M]. Washington: Government Printing Office.
- Part 1 Summary, 1874. Report of the Meteorological Committee of the Royal Society, for the year ending 31st December 1873[R]. London: George E. Eyre and William Spottiswoode.
- Paul G J, 1900. Bartholomew's physical atlas: an atlas of meteorology. Vol. III J. G. Bartholomew, A. J. Herbertson[J]. The Journal of Geology, 8(6): 573-577.
- Rothenberg M, 2009. Cooperation at the Poles? Placing the first international polar year in the context of nineteenth-century scientific exploration and collaboration[M]//Krupnik I, Lang M A, Miller S E. Smithsonian at the Poles: Contributions to International Polar Year Science. Washington: Smithsonian Institution Scholarly Press.
- W E P, 1899. Atlas of meteorology[J]. Nature, 61(1573): 171-173.
- Wedderburn S E, 1948. The Scottish Meteorological Society[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 74(321/322): 233-242.

(作者单位: 陈倩, 山东中医药大学中医文献与文化研究院; 李蓓蓓, 南京信息工程大学科技史与气象文明研究院)

(编辑: 卢冰)

(上接52页)

- [14] 童靖宇, 向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1-4.
- [15] ONERA. About ONERA: Identity[EB/OL]. [2024-02-25]. <https://www.onera.fr/en/identity>.
- [16] 中国科学院. 环境模拟实验室[EB/OL]. [2024-02-25]. <http://www.nssc.cas.cn/cd/zcbm-1/hms/>.
- [17] 毛红梅, 周晓峰, 毛云岭. 维也纳RTA气候实验室考察报告[J]. 国外铁道车辆, 2009, 46(5): 1-4.
- [18] Ali A H H. Performance assessment and gained operational experiences of a residential scale solar thermal driven adsorption cooling system installed in hot arid area[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 271-279.
- [19] Bishara N, Schulz T, Gecks J, et al. Thermal optimization and performance analysis of an innovative wooden radiant heating system made for room temperature control - Laboratory and numerical investigation of prototypes[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 569-578.
- [20] 徐科峰. 建筑环境学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [21] Georgescu M R, Meslem A, Nastase I, et al. Numerical and experimental study of the international space station crew quarters ventilation[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 41: 102714.
- [22] Lamnatou C, Baig H, Chemisana D, et al. Dielectric-based 3D building-integrated concentrating photovoltaic modules: an environmental life-cycle assessment[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 514-525.
- [23] 谭宏新. 地空导弹装备环境适应性探究[J]. 军民两用技术与产品, 2017(2): 206.
- [24] 秦晓洲, 常文君. 自然环境试验与武器装备发展[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 7-10.
- [25] 尹德利. 威尔逊云室的发明及对物理学的贡献[J]. 物理通报, 2014(10): 115-117.
- [26] 张纪淮. 中型云室技术特点概要[J]. 应用气象学报, 1986, 1(2): 221-224.
- [27] 郭双生, 孙金鏢. 美国生物圈2号及其研究[J]. 中国航天, 1996(4): 29-32, 35.
- [28] Perko H. Effects of surface cleanliness on lunar regolith mechanics[C]//34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1996.
- [29] Gan H, Wang S J, Li X Y. Electrostatic transportation of lunar dust: a review[J]. Chinese Journal of Space Science, 2013, 33(2): 135-142.
- [30] Castillo-Rogez J C, Durham W B, Heggy E, et al. Laboratory studies in support of planetary geophysics[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2012: 79-24.
- [31] Prasad K D, Murty S V S. Development of a chamber to simulate lunar surface environment[J]. Planetary and Space Science, 2020, 191: 105038.
- [32] 赵晨雨. 大型环境实验室结构设计关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [33] 石晓波, 李运泽, 黄勇, 等. 月球表面环境综合模拟系统的设想[J]. 中国工程科学, 2006, 8(11): 48-52.
- [34] 顾苗. 火星表面环境模拟技术[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 35-42.
- [35] 苏正军, 郭学良, 诸葛杰, 等. 云雾物理膨胀云室研制及参数测试[J]. 应用气象学报, 2019, 30(6): 722-730.
- [36] Fisher T C, Mamer W J. The use of environmental test facilities for purposes beyond their original design[C]//21th Space Simulation Conference. Maryland, USA: Jet Propulsion Laboratory, 2000.
- [37] 王铁进, 朱孝业. “大型风洞研制及其关键技术研究”专刊简介[J]. 实验流体力学, 2022, 36(1): 1-2.
- [38] 陈振华, 刘宗政, 陈吉明, 等. 大型连续式跨声速风洞总体方案与关键技术研究[J]. 实验流体力学, 2022, 36(1): 62-68.
- [39] 中国人民解放军总装备部. 低速风洞和高速风洞流场品质要求 (GJB 1179A—2012)[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2012.
- [40] 安徽工业经济职业技术学院. 一种实验用降水模拟装置: 208366997U[P]. 2019-01-11.
- [41] 魏秀东, 李柏霖, 赵宇航, 等. 基于自由曲面的聚焦型太阳模拟器设计[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(6): 1356-1364.
- [42] 张鑫. 整车全负荷复合环境模拟超大型试验舱体关键技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [43] Durga Prasad K. Thermophysical Behavior of the Lunar Surface[M]//Cudnik B. Encyclopedia of Lunar Science. Cham: Springer, 2020.
- [44] Grün E, Kochan H, Seidensticker K J. Laboratory simulation, a tool for comet research[J]. Geophysical Research Letters, 1991, 18(2): 245-248.
- [45] 蒋建军, 项湜伍. 智能控制的模拟自然环境研究[J]. 微计算机信息, 2006, 22(25): 135-137.
- [46] 朱旭东, 李卓群, 薛文初. 基于数字孪生的新能源智能温室控制系统设计[J]. 电子制作, 2023, 31(22): 55-59.
- [47] Owens A C, De Weck O L. How much testing is needed to manage supportability risks for beyond-LEO missions?[C]//49th International Conference on Environmental Systems (ICES 2019). Boston: International Conference on Environmental Systems (ICES), 2019.
- [48] Broyan Jr J L, Shaw L, McKinley M, et al. NASA environmental control and life support technology development for exploration: 2020 to 2021 overview[EB/OL]. (2021-07-15) [2024-02-25]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210010866>.
- [49] 孙威, 张磊, 肖京华, 等. 空间环境模拟设备标准体系建设研究[J]. 航天标准化, 2013(4): 10-13.

(编辑: 卢冰)