

行星环境模拟装置在天体生物学研究中的应用

康梦玲^{1,2}, 何媛媛^{3,4}, 申建勋¹, 赵宇鹄^{5,6}, 潘永信^{1,2}, 林巍^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室, 北京 100029
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
3. 索邦大学, 法国国家自然历史博物馆, 法国国家科学研究中心矿物学、材料物理与宇宙化学研究所, 法国巴黎 75005
4. 巴黎萨克雷大学中央理工高等电力学院材料和制造工程实验室, 法国巴黎 91190
5. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081
6. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

摘要 行星环境模拟装置通过模拟目标天体的特定环境条件开展科学研究, 同遥感探测和就位探测等形成重要互补, 为开展天体生物学研究提供了重要支撑。综述了国内外代表性行星环境模拟装置及其主要功能设计, 介绍了行星环境模拟装置在生命适应类火星极端环境中的策略、地外生命信号探测等天体生物学研究领域中的应用实例, 并提出了开拓未来行星环境模拟装置研发和科学研究的建议。

关键词 行星环境模拟装置; 天体生物学; 行星科学; 深空探测; 地外生命

天体生物学在宇宙演化的背景下研究宜居环境和生命的起源、演化和分布^[1]。飞掠探测、环绕探测和着陆探测是目前开展行星科学和天体生物学研究最直接和最重要的手段, 但这些探测任务通常耗时较长、成本昂贵且风险较高。在地球上天然存

在的类地外极端环境(如临近空间^[2-3]、阿塔卡马沙漠^[4-5]、柴达木盆地^[6-7]等)和实验室内的行星环境模拟装置一起为开展天体生物学研究提供了新手段和新思路。

行星环境模拟装置可以在实验室内制造出与

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41621004, 41822704); 中国科学院地质与地球物理研究所重点项目(IGGCAS-201904, IGGCAS-202102)

作者简介: 康梦玲, 硕士研究生, 研究方向为天体生物学, 电子信箱: kangmengling20@mailsucas.ac.cn; 林巍(通信作者), 研究员, 研究方向为地球生物学与天体生物学, 电子信箱: weilin@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 康梦玲, 何媛媛, 申建勋, 等. 行星环境模拟装置在天体生物学研究中的应用[J]. 科技导报, 2023, 41(8): 6-16; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.08.001

目标天体类似的极端环境条件^[8]。相较于自然界天然存在的类地外极端环境,行星环境模拟装置具有条件可控、易于实验、原位分析等优势,可以有效地模拟目标天体上的重要环境条件。行星环境模拟装置依赖于对目标天体环境参数的准确认识,火星是除地球以外研究最为深入的行星,因此目前已有装置的主要模拟对象是火星。随着技术的发展以及对地外天体环境的深入了解,行星环境装置从早期的单环境参数模拟逐渐发展到现在精密的多参数综合环境模拟。

近年来,国内外相继研发出具有不同功能且各具特色的行星环境模拟装置,并已经应用于天体

生物学研究中。本文综述代表性行星环境模拟装置的主要功能及在类火星环境生命和地外生命信号探测研究中的应用实例。

1 行星环境模拟装置

应用于天体生物学研究的行星环境模拟装置旨在模拟可能支持生命存在的地外天体,如火星、木星和土星的冰卫星等的环境条件,包括辐射、温度、气压、大气成分等^[8]。表1总结了代表性行星环境模拟装置的主要环境参数、原位分析仪器及主要研究对象(包括微生物、有机物和矿物等)。

表1 代表性行星环境模拟装置

序号	单位	装置名称	模拟天体	模拟的主要环境条件			原位分析仪器	主要研究对象	文献	
				温度/°C	气压/Pa	气体成分(体积分数)				
1	美国国家航空航天局(NASA)肯尼迪航天中心	行星大气室系统PAC	火星	-100~200	低至10	CO ₂ (95.54%), N ₂ (2.7%), Ar(1.6%), O ₂ (0.13%), H ₂ O(0.03%)	氙弧灯	残余气体分析仪	微生物	[9-10]
2	英国开放大学	火星环境模拟小型装置	火星	低至-80	低至600	CO ₂ (95%), N ₂ (5%)	氙灯	无	微生物, 有机物	[11-12]
3	德国柏林航空航天大学中心行星研究所	火星模拟装置MSF	火星	-70~130	100~1.06×10 ⁵	CO ₂ (95.55%), N ₂ (2.70%), Ar(1.60%), O ₂ (0.15%), H ₂ O(370×10 ⁻⁶)	氙灯	超便携式调制叶绿素荧光仪	微生物	[13-14]
4	法国巴黎东区大学	火星有机分子辐照与演化装置MOMIE	火星	-55±2	600±100	N ₂ 等	氙弧灯	傅里叶变换红外光谱仪	有机物	[15]
5	意大利帕多瓦大学	意大利实验室模拟环境装置LISA	火星	低至-140	低至600	CO ₂ (95%)	紫外灯	无	微生物	[16]
6	丹麦奥胡斯大学	火星环境模拟装置MESCH	火星	低至-140	低至500	CO ₂ (95%), N ₂ (3%), Ar(1.5%), O ₂ (0.1%), CO(0.01%)	汞氙灯	残余气体分析仪	微生物	[17]

表1 代表性行星环境模拟装置(续)

序号	单位	装置名称	模拟天体	模拟的主要环境条件			原位分析仪器	主要研究对象	文献	
				温度/°C	气压/Pa	气体成分(体积分数)				
7	美国阿肯色大学	土卫六表面模拟装置 TSSC	土卫六	-184	1.5×10^5	N ₂ 等	—	傅里叶变换红外光谱仪, 气相色谱仪等	有机物	[18]
8	西班牙天体生物学中心	行星大气和表面模拟装置 PASC	火星、木卫二和海卫一	-260~50	$5 \times 10^{-7} \sim 700$	火星: CO ₂ (95%), N ₂ (2.7%), Ar(1.6%), H ₂ O(0.6%)	氙灯等	拉曼光谱仪, 红外光谱仪, 残余气体分析仪等	有机物, 矿物	[19-20]
9	荷兰乌得勒支大学	行星光照、大气、表面模拟装置 PALLAS	水星、火星、地球和月球	-90~100	低至 10^{-6}	—	氙弧灯, 氙灯	质谱仪	有机物, 矿物	[21]
10	英国爱丁堡大学	行星液态环境模拟装置 PELS	火星和冰卫星	低至-51	$100 \sim 10^5$	火星: 包括 CO ₂ , N ₂ , Ar, O ₂	氙灯	残余气体分析仪	微生物	[22]
11	中国山东大学	火星环境模拟装置 MEC	火星	-150~200	0.1~1000	包括 CO ₂ , N ₂ , Ar, O ₂	氙灯	拉曼光谱仪, 激光诱导击穿光谱仪等	岩石矿物	[23]
12	中国科学院地球化学研究所	火星表面过程模拟装置蒸发氧化模拟实验舱	火星	25	低至 10^{-4}	CO ₂ (95.35%), N ₂ (2.83%), Ar(1.1%), O ₂ (0.2%)	紫外灯	无	盐类	[24]
13	中国科学院大学杭州高等研究院	火星大气环境模拟装置	火星	-190~180	低至 10^{-5}	CO ₂ (96.00%), N ₂ (2.55%), Ar(1.45%)	—	短波红外光谱仪、激光诱导击穿光谱仪等	岩石矿物	[25]

1.1 火星环境模拟装置

火星是深空探测和天体生物学研究的热点,也是除地球之外人类研究最为深入的行星^[1]。与地球相比,火星南北半球差异较大,南半球是比较古老且遍布撞击坑的高地,而北半球则是较年轻的平原^[26]。火星有较强的岩石圈磁场,其分布也具有显著的南北半球差异,剩磁主要集中在南半球的高地^[27]。由于火星大气层稀薄且缺少全球性磁场的屏蔽,因此其地表昼夜温差较大并且暴露在高强度

的宇宙辐射和太阳辐射中^[28]。2021年,中国“天问一号”任务中的“祝融号”火星车和美国航空航天局(NASA)的“毅力号”火星车分别成功降落到火星北半球低纬度地区的乌托邦平原南部和耶泽罗撞击坑,这2辆火星车已经开始对火星形貌、表面环境和物质组成、物理场和内部结构、空间环境等开展系统研究^[29-30]。总体而言,现代火星表面呈现出低温、低压、干燥和高辐射的极端环境,主要环境参数见表2。

表2 现代火星表面的主要环境参数

环境条件	参数
轨道周期	687.0地球日(或669.6火星日)
自转周期/h	24.6
重力加速度/($m \cdot s^{-2}$)	3.71
太阳辐射/($W \cdot m^{-2}$)	586.2
表面气压/mb	4.0~8.7, 平均6.36
温度/K	平均温度约为210
大气成分(体积分数)	主要成分: CO_2 (95.1%), N_2 (2.59%), Ar (1.94%), O_2 (0.16%), CO (0.06%) 其他成分: H_2O (210×10^{-6}), NO (100×10^{-6}), Ne (2.5×10^{-6}), HDO (hydrogen-deuterium-oxygen, 0.85×10^{-6}), Kr (0.3×10^{-6}), Xe (0.08×10^{-6})

注:轨道周期、自转周期数据来源: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/mars/in-depth>; 其他参数数据来源: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>。

基于对火星环境的深入认识,研究人员相继研制了不同类型的火星环境模拟装置。NASA肯尼迪航天中心的火星环境模拟装置(现更名为行星大气室系统,PAC)可模拟火星的紫外辐射、低温、低气压和大气成分^[9-10]。该装置主要用于研究在模拟火星环境下枯草芽孢杆菌等微生物的抗性^[10,31]和有机物的变化^[32-33],发现枯草芽孢杆菌的芽孢能够在一定的时间内存活于模拟火星环境中,火星上含有 $Fe_2(SO_4)_3$ 的盐水有可能为微生物提供遮蔽紫外线的保护。

英国开放大学研制了2类火星环境模拟装置^[34]。其中较大的装置(长为1.8 m,直径为0.9 m)可模拟火星表面的气压和温度,主要进行表土模拟实验(如火星环境下的泥流悬浮现象^[35])。较小的装置(长为1 m,直径为0.7 m)具有自动调整环境条件参数(如温度、辐射、气压等)的能力,从而模拟火星上的热循环过程。利用该装置研究火星模拟环境下矿物对氨基酸保存的影响^[11],发现富含黏土矿物(蒙脱石、铝皂石和绿脱石等)或硫酸盐矿物(石膏和黄钾铁矾)的岩石对氨基酸的保存能力较高,是未来在火星上寻找氨基酸生物标志物的潜在目标。除此之外还开展了微生物在层状硅酸盐中存活的可能性^[36]、太阳辐射对微生物荧光信号的降解^[12]等天体生物学研究。

德国柏林航空航天中心行星研究所的火星模拟装置(MSF)可以模拟火星的气压、温度、大气成分、紫外辐射和相对湿度等。MSF内部安装了LED

(light emitting diode)灯以产生光合有效辐射,并配备了超便携式调制叶绿素荧光仪(Mini-PAM)^[13]。MSF被用于开展地衣在模拟火星环境条件下的存活状况等研究^[14,37],揭示出地衣暴露在火星环境30 d后仍能够存活,但失去光合活性的能力。此外,该中心辐射生物学系的天体生物学小组在科隆有7个模块化的行星和空间环境模拟设施(<http://www.dlr.de/spacesim>)。

法国巴黎东区大学的火星模拟装置(MOMIE)由反应器、气体循环系统、恒温器、氙弧灯、傅里叶变换红外光谱仪和容纳整个装置的手套箱等部分组成,其中傅里叶红外光谱仪可用于监测样品的化学变化^[15]。MOMIE已被用于研究有机分子的光化学反应及其与矿物的相互作用^[38-40],发现尿嘧啶暴露于火星模拟环境中会迅速被光降解,新产生的二聚体比单体更稳定,因此这些二聚体可能成为火星生命探测任务的潜在探测目标。

意大利帕多瓦大学的火星环境模拟装置(LISA)可模拟火星的综合环境条件,包括季节性和昼夜的热循环。该装置由一个包含6个胶囊的环境舱组成,每个胶囊都通过一个生物过滤器和一个阀门与主控室相连,主要用于研究微生物在地外极端环境中的生存及适应策略^[16,41],揭示了火星环境条件中紫外辐射具有最强的杀菌作用。

丹麦奥胡斯大学的火星环境模拟装置(MESCH)可模拟现代火星表面的温度、相对湿度、气压、大气成分和紫外辐射。此外,MESCH还可以

通过制造真空、增加紫外辐射和电离辐射来模拟地球的轨道环境,并利用旋转转盘将样品依次暴露于受控的光/热条件下以模拟昼夜循环^[17]。MESCH曾用于研究长时间暴露在火星环境中对冻土中的生物分子浓度以及细菌群落结构的影响^[42],发现紫外辐射和活性氧是导致表面生物分子浓度显著降低的主要原因,而冻融循环可能引发深层土壤中微生物数量的减少,因此未来探测生物分子或生物体时应选择在不受上述条件影响的土壤深度。

随着中国探月工程和深空探测的迅速发展,国内多个高校和科研院所已开始行星环境模拟装置的开发与研究。山东大学、中国科学院地球化学研究所、中国科学院大学杭州高等研究院等相继研制了火星环境模拟装置。其中,山东大学的火星环境模拟装置(MEC)可以控制舱内的气体成分、气体压力、样品温度/湿度等,并配备多种光谱仪器,如光纤拉曼光谱仪、激光诱导击穿光谱系统^[23]。利用该装置已开展了火星模拟环境中不同矿物的光谱分析^[43]、火星沙尘暴活动对氯化物的影响^[44-45]等研究。

中国科学院地球化学研究所的火星表面过程模拟装置包含1个火星大气模拟实验舱和1个蒸发氧化模拟实验舱,火星大气模拟实验舱可用于开展火星模拟大气下的风化实验^[46],而蒸发氧化模拟实验舱主要用于开展蒸发和光化学实验^[47-48]。此外,该研究所还拥有月球(行星)表面尘埃环境模拟装置,主要模拟月表和无大气天体表面太阳辐照条件下产生的动态尘埃环境^[49-50]。

中国科学院大学杭州高等研究院的火星大气环境模拟装置主要包含5个模块,分别为真空室(包括仪器舱、样品舱、样品导入室、三维真空台)、真空泵系统、温度控制系统、大气模拟系统和测控系统。该装置已经用于模拟研究“祝融号”火星车上的激光诱导击穿光谱仪(LIBS)的探测^[25]。

北京卫星环境工程研究所设计研制了火星环境模拟系统,可模拟火星表面的低温、低气压等环境条件,曾用于火星探测器型号部件产品的地面模拟试验^[51]。

正在建设中的哈尔滨工业大学的“空间环境地面模拟装置”包括空间综合环境模拟与研究系统、

空间磁环境模拟与研究系统、空间等离子体环境模拟与研究系统等。

1.2 其他天体环境模拟装置

太阳系中的一些冰卫星(如木卫二、土卫二、土卫六等)表面被冰覆盖,可能存在冰下海洋,被认为可能具有支持生命存在的环境。其中土卫六是太阳系中唯一拥有大气层的卫星,而且还具有动态云、含甲烷和乙烷的极地湖泊、潮湿的风化层、河流侵蚀等环境特征^[52]。为满足研究不同天体的实验需求,多国研究机构研发出可模拟不同地外天体环境的模拟装置。

美国阿肯色大学研究人员在原先火星模拟装置基础上,研发了土卫六环境模拟装置(TSSC)^[53]。该装置可用于模拟土卫六表面或次表层环境,并配备有相机、傅里叶变换红外光谱仪等仪器,已被用于开展土卫六表面有机挥发物的稳定性等研究^[18,54],证实了在土卫六的环境条件下乙炔-苯共晶的形成。

西班牙天体生物学中心的行星环境模拟装置(PASC)可以模拟火星、木卫二和海卫一的环境,被用于开展无机分子(如 N_2 等)或有机分子(如氨基酸、小肽和核酸碱基等)与矿物的相互作用等研究^[55-56],发现黄铁矿具有紫外光催化活性,甚至其表面存在氧化物而缺乏紫外光的情况下也具有催化活性。荷兰乌得勒支大学的行星环境模拟装置(PALLAS)可模拟水星、火星等太阳系类地行星的地表和地下环境,进行生物标志物与矿物之间相互作用的模拟研究^[57],主要发现拉长石和钠沸石具有显著的催化能力,赤铁矿和镁橄榄石具有中等降解作用,而磷灰石、利蛇纹石和叶蛇纹石对核苷酸没有显著降解作用。英国爱丁堡大学的行星液态环境模拟装置(PELS)可以模拟火星和冰卫星可能存在的液态环境,开展了高氯酸盐和紫外辐射对微生物影响等研究^[58],揭示了火星上的高氯酸盐会进一步增强紫外线的灭菌效果。

1.3 行星环境模拟装置的功能设计概述

行星环境模拟装置的功能模块可以概括为环境模拟、样品控制和原位样品分析。

环境条件模拟模块主要包括对模拟装置内温

度、气压、气体成分、辐射等条件的控制及监测。多数行星环境模拟装置选择通过液氮来降低温度。考虑到样品的均匀受热以及能源的消耗等问题,较小的模拟装置通常选择冷却整个实验舱,而较大的模拟装置更倾向于通过在样品下方放置冷却板来降低样品温度。另外,火星环境模拟实验中通常会考虑通过计算机控制温度的升降模拟火星的昼夜温差变化。在气压模拟方面,不同模拟装置通常通过组合不同的真空泵、阀门和压力计来实现对舱内气压的控制与监测。在气体成分模拟方面,一些模拟装置选择直接输入定制好的商用校准气体混合物,另一部分模拟装置则通过增加气体混合模块来混合实验所需的不同的气体成分。另外,水对生命活动有着不可忽视的影响,因此在天体生物学实验中还需考虑模拟环境中的相对湿度。在辐射模拟方面,由于氙灯或氙弧灯能较好地模拟火星表面的紫外辐射波长和强度,因此被大多数火星环境模拟装置选择作为紫外辐射源。另外,氙灯也能提供可见光辐射和近红外光辐射,可根据实验要求过滤掉不需要的辐射波段。少数行星环境模拟装置还会配备其他辐射,如离子辐射等。

样品控制模块包括样品的输入、输出和样品架等。大多模拟装置需要手动放入和取出样品,而PELS设计有自动化的样品采集功能模块,能在不破坏模拟装置内部环境条件下从舱内输出样品,这种设计可用于长时间模拟实验中样品的阶段性连续分析。样品架的数量、大小等主要根据实验对象及目的定制。对于实验对象主要为微生物的天体生物学实验,模拟装置需要同时承载多个实验样品,例如MESCH、MSF、LISA可分别放置10、8、6个样品。样品架的设计可考虑与空间站实验舱中的样品架相匹配,为未来合作实验做准备。此外,一些模拟装置将样品架固定在一个由计算机控制的转盘上,不仅可使样品依次暴露在辐射源下以模拟昼夜的光照变化,还可通过旋转样品使之处于原位分析仪器的探头下从而进行样品的原位分析。

原位分析仪器能够在模拟的行星环境条件下对样品进行初步分析。由于模拟装置实验舱内的极端环境可能会对原位分析仪器造成一定影响,多

数模拟装置选择将分析仪器安装在实验舱外通过特制窗口分析样品或者使用光纤式仪器。在模拟装置中应用比较广泛的原位分析仪器主要为红外光谱仪和拉曼光谱仪,如MOMIE、TSSC、PASC、MEC都配备了红外光谱仪,其中PASC、MEC还安装有拉曼光谱仪。除此之外,根据不同科学研究的实验需求,MSF配备有超便携式调制叶绿素荧光仪,TSSC配备有火焰离子化检测器的气相色谱仪,MEC配备有定制的激光诱导击穿光谱仪等。

迄今为止,大多数行星环境模拟装置主要模拟目标天体的温度、气压、大气成分和紫外辐射,而对其他一些环境参数(如磁场、微重力、电离辐射等)的模拟还考虑较少。这些环境条件对生命及其产物也有重要的影响,如高电离辐射就不利于细胞和孢子的存活以及分子生物标志物的保存^[28]。因此,未来应根据实验目的和研究对象,通过研发新型行星环境模拟装置将更多有重要影响的环境因素耦合起来开展综合研究。

2 行星环境模拟装置应用实例

在天体生物学研究的框架下,行星环境模拟装置主要用于开展2类研究:一是地外宜居环境与生命生存策略,主要研究适宜生命生存演化的环境条件以及生命适应这些环境的主要机制;二是生命信号探测,主要研究指示生命存在的各种信号的检测与识别。火星是当前天体生物学研究的重要天体,本节将着重介绍行星环境模拟装置在火星天体生物学研究中的应用实例。

2.1 生命在类火星极端环境中的生存策略

大量研究表明,火星在约37亿年以前可能具有温暖或寒冷但湿润的环境,可能可以支持微生物等生命的存在^[59]。虽然现代火星表面环境十分恶劣,不适宜绝大部分生命的生存,但有学者认为现今火星的局部区域(如火星表面以下或极区冰下湖等)有可能支持生命存在。

地衣广泛分布在地球的沙漠、高山和极地等环境中,对极端环境条件具有较高的耐受性^[60-61]。dela Torre Noetzel等^[37]利用MSF装置将地衣*Circinaria*

gyrosa 暴露在模拟火星环境 30 d 后,发现 *Circinaria gyrosa* 仍然能够存活,但是地衣的共生藻暴露于类火星表面环境下时无法进行光合作用。另外,火星上的卤水可能可以支撑生命的存在^[62]。Godin 等^[10]以枯草芽孢杆菌和粪肠球菌为实验对象,利用 PAC 装置研究了由 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 MnSO_4 、 MgSO_4 这 3 种盐制成的类火星卤水通过衰减紫外辐射在火星上提供宜居生态位的可能性,表明 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 卤水即使在浓度低至 0.5% 的情况下仍然可以较好地屏蔽有害的紫外辐射,而由 MnSO_4 、 MgSO_4 制成的卤水不能提供显著的紫外线防护。然而,由于 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 卤水具有较强的酸性,虽然对枯草芽孢杆菌没有显著影响,但对粪肠球菌却有致命影响。火星大气中含有低浓度的甲烷并且显示出强烈的季节性变化^[63],但是强紫外辐射和火星表面的氧化性化合物都会使甲烷降解,一般认为非生物过程产生的甲烷在大气中不太可能长期稳定存在^[64],因此有研究者推测现在火星大气中存在的甲烷可能是微生物成因。Maus 等^[65]将产甲烷古菌接种在不同的火星模拟土壤后暴露在潮解驱动的火星模拟环境中,并通过气相色谱仪测量甲烷的产量,实验结果表明 2 种产甲烷古菌 (*Methanosarcina soligelidi* 和 *Methanosarcina barkeri*) 可以在模拟的火星环境下生存,并且通过潮解作用提供水后而具有代谢活性,该研究表明火星表层和次表层的富盐环境具有成为耐盐产甲烷古菌生存微环境的潜力,并有可能成为火星大气中甲烷的生物来源。

2.2 地外生命信号探测

生命信号包括活体生命、化石、生命过程产生的各种物质和化学信号等^[1]。目前,人们已经研制出各种生命探测仪器和设备实施就位探测,例如,NASA 的“海盗号”火星探测器采用热裂解-气相色谱-质谱联用的技术来寻找火星的可能生命信号^[66]。该技术还可通过使用化学衍生剂(如 MTBSTFA、DMF-DMA、TMAH)和高分辨率质谱仪(如 TOF-MS)提高生命信号的检测范围和灵敏度^[67-68]。探测行星表面或地下的一些代表性生物标志物,如氨基酸、尿嘧啶、单磷酸腺苷等,也是寻找地外生命痕迹的重要方法^[69-70]。近期分子生物学进步带动

的一些新的分析技术(如 MinION 测序技术^[71]和抗体芯片^[72])也有望用于未来地外生命探测任务中。

行星环境模拟实验主要用于研究模拟火星环境下生物标志物的降解与保存,目前已经取得了一系列进展。有研究在 Murchison、Orgueil、Murray 等碳质球粒陨石中曾发现尿嘧啶^[73-74],推测其可能在星际和彗星环境中形成并持续存在^[75]。Rouquette 等^[40]将尿嘧啶以有机薄膜的形式沉淀后暴露在 MOMIE 装置模拟的火星环境下,利用傅里叶变换红外光谱仪、超高效液相色谱和高分辨率质谱等方法对其进行分析,发现尿嘧啶直接暴露在火星模拟环境后会快速发生光降解和转化,产生至少 4 种不同类型的二聚体,这些二聚体在实验进行 40 d 后仍然存在。值得注意的是,火星表面的强紫外辐射会通过光化学过程生成各种自由基(如超氧阴离子自由基、羟自由基等)进而降解可能存在的生物标志物^[76]。Fornaro 等^[57]通过利用 PASC 装置将含少量核苷酸的不同类型的模拟火星土壤暴露在类火星环境下,并利用飞行时间二次离子质谱、漫反射傅里叶变换红外光谱、共聚焦拉曼光谱成像等技术进行分析,发现拉长石和钠沸石促进了核苷酸的光降解,而磷灰石、利蛇纹石和叶蛇纹石对核苷酸的降解没有明显的催化作用,因此推测拉长石和钠沸石的存在不利于火星上生物标志物的保存。

3 结论

行星环境模拟装置是开展天体生物学和行星科学研究的利器。面向深空探测和行星科学发展需求,研究人员针对不同的目标天体和科学问题相继研发出了火星、冰卫星等行星环境模拟装置,并开展了生命适应极端环境机制和生命信号探测等研究,取得了一系列新认识。火星是行星环境模拟装置的重要目标天体,也是天体生物学的重要研究对象。现代火星表面的恶劣环境可能不适合生命的生存,但一些特定的区域(如近火表周期性受潮的富盐环境、洞穴、表面之下等)可能具有支持生命生存的潜力^[77]。此外,火星表面诸如磷灰石、利蛇纹石和叶蛇纹石等矿物则有可能保存火星早期的

一些生命信号。国内的行星环境模拟装置当前主要应用于行星地质、行星化学和载荷测试等研究,在天体生物学方面的研究亟待加强。未来,研发天体生物学研究的行星环境模拟装置时,除了具有样品自动化输出和温度、气体成分、气压、紫外辐射等多参数综合调控等特点之外,还可根据科学目标与实验需求增加磁场、微重力、电离辐射等环境因素的模拟功能,同时配备可检测各类生命信号的原位分析仪器。可以预见,行星环境模拟装置将在生命适应极端环境机制、生命信号的识别与表征、宜居环境理化边界的界定等天体生物学研究中发挥重要作用。

致谢:中国科学院深海科学与工程研究所研究员屈原皋在本文撰写过程中提出宝贵建议。

参考文献(References)

- [1] 林巍, 李一良, 王高鸿, 等. 天体生物学研究进展和发展趋势[J]. 科学通报, 2020, 65(5): 380-391.
- [2] Liu J, Zhang W S, He K, et al. Survival of the magnetotactic bacterium *Magnetospirillum gryphiswaldense* exposed to Earth's lower near space[J]. Science Bulletin, 2022, doi: 10.1016/j.scib.2022.03.005.
- [3] 林巍. 临近空间生物研究及其天体生物学意义[J]. 科学通报, 2020, 65(14): 1297-1304.
- [4] Shen J X, Wyness A J, Claire M W, et al. Spatial variability of microbial communities and salt distributions across a latitudinal aridity gradient in the Atacama Desert[J]. Microbial Ecology, 2021, 82(2): 442-458.
- [5] Navarro-Gonzalez R, Rainey F A, Molina P, et al. Mars-like soils in the Atacama Desert, Chile, and the dry limit of microbial life[J]. Science, 2003, 302(5647): 1018-1021.
- [6] Anglés A, Li Y L. The western Qaidam Basin as a potential Martian environmental analogue: An overview[J]. Journal of Geophysical Research-Planets, 2017, 122(5): 856-888.
- [7] Xiao L, Wang J, Dang Y N, et al. A new terrestrial analogue site for Mars research: The Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China) [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 164: 84-101.
- [8] Martins Z, Cottin H, Kotler J M, et al. Earth as a tool for astrobiology—A European perspective[J]. Space Science Reviews, 2017, 209(1): 43-81.
- [9] Schuerger A C, Fajardo-Cavazos P, Clausen C A, et al. Slow degradation of ATP in simulated martian environments suggests long residence times for the biosignature molecule on spacecraft surfaces on Mars[J]. Icarus, 2008, 194(1): 86-100.
- [10] Godin P J, Schuerger A C, Moores J E. Salt tolerance and UV protection of *Bacillus subtilis* and *Enterococcus faecalis* under simulated martian conditions[J]. Astrobiology, 2021, 21(4): 394-404.
- [11] dos Santos R, Patel M, Cuadros J, et al. Influence of mineralogy on the preservation of amino acids under simulated Mars conditions[J]. Icarus, 2016, 277: 342-353.
- [12] Dartnell L R, Patel M R. Degradation of microbial fluorescence biosignatures by solar ultraviolet radiation on Mars[J]. International Journal of Astrobiology, 2014, 13(2): 112-123.
- [13] Lorek A, Koncz A. Simulation and measurement of extra-terrestrial conditions for experiments on habitability with respect to Mars[M]//de Vera J P, Seckbach J Habitability of other planets and satellites. New York: Springer, 2013: 145-162.
- [14] Lopez-Ramirez M R, Sancho L G, de Vera J P, et al. Detection of new biohints on lichens with Raman spectroscopy after space- and Mars like conditions exposure: Mission Ground Reference(MGR) samples[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2021, 261: 120046.
- [15] Poch O, Noblet A, Stalport F, et al. Chemical evolution of organic molecules under Mars-like UV radiation conditions simulated in the laboratory with the "Mars organic molecule irradiation and evolution" (MOMIE) setup [J]. Planetary and Space Science, 2013, 85: 188-197.
- [16] Galletta G, D'Alessandro M, Bertoloni G, et al. Surviving on Mars: Test with LISA simulator[J]. Proceedings of the International Astronomical Union, 2009, 5(H15): 686-687.
- [17] Jensen L L, Merrison J, Hansen A A, et al. A facility for long-term Mars simulation experiments: The Mars Environmental Simulation Chamber (MESCH)[J]. Astrobiology, 2008, 8(3): 537-548.
- [18] Czaplinski E C, Gilbertson W A, Farnsworth K K, et al. Experimental study of ethylene evaporites under Titan conditions[J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2019, 3(10): 2353-2362.

- [19] Mateo-Marti E, Prieto-Ballesteros O, Muñoz Caro G, et al. Characterizing interstellar medium, Planetary surface and deep environments by spectroscopic techniques using unique simulation Chambers at centro de astrobiología (CAB)[J]. *Life-Basel*, 2019, 9(3): 72.
- [20] Mateo-Marti E, Prieto-Ballesteros O, Sobrado J M, et al. A chamber for studying planetary environments and its applications to astrobiology[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(8): 2274–2280.
- [21] Ten Kate I L, Reuver M. PALLAS: Planetary analogues laboratory for light, atmosphere, and surface simulations [J]. *Netherlands Journal of Geosciences-Geologie En Mijnbouw*, 2016, 95(2): 183–189.
- [22] Martin D, Cockell C S. PELS (Planetary Environmental Liquid Simulator): A new type of simulation facility to study extraterrestrial aqueous environments[J]. *Astrobiology*, 2015, 15(2): 111–118.
- [23] Wu Z C, Ling Z C, Zhang J, et al. A Mars environment chamber coupled with multiple in situ spectral sensors for Mars exploration[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2519.
- [24] Zhao Y Y S, McLennan S M, Jackson W A, et al. Photochemical controls on chlorine and bromine geochemistry at the Martian surface[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 497: 102–112.
- [25] Cui Z C, Jia L C, Li L N, et al. A laser-induced breakdown spectroscopy experiment platform for high-degree simulation of MarSCoDe in situ detection on Mars[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(9): 1954.
- [26] Barlow N. *Mars: An introduction to its interior, surface and atmosphere*[M]. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [27] Morschhauser A, Lesur V, Grott M. A spherical harmonic model of the lithospheric magnetic field of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2014, 119(6): 1162–1188.
- [28] Dartnell L R, Desorgher L, Ward J M, et al. Martian sub-surface ionising radiation: Biosignatures and geology [J]. *Biogeosciences*, 2007, 4(4): 545–558.
- [29] Voosen P. NASA's Perseverance rover aims to find out whether ancient Mars was warm and wet or cold and dry [J]. *Science*, 2020, 368(6498): 1416–1421.
- [30] Liu J J, Li C L, Zhang R Q, et al. Geomorphic contexts and science focus of the Zhurong landing site on Mars [J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6(1): 65–71.
- [31] Cortesão M, Fuchs F M, Commichau F M, et al. *Bacillus subtilis* spore resistance to simulated Mars surface conditions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 333.
- [32] Schuerger A C, Clausen C, Britt D. Methane evolution from UV-irradiated spacecraft materials under simulated martian conditions: Implications for the Mars Science Laboratory (MSL) mission[J]. *Icarus*, 2011, 213(1): 393–403.
- [33] Hintze P E, Buhler C R, Schuerger A C, et al. Alteration of five organic compounds by glow discharge plasma and UV light under simulated Mars conditions[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 749–757.
- [34] Patel M R, Miljkovic K, Ringrose T J, et al. The hypervelocity impact facility and environmental simulation at the Open University[C]//European Planetary Science Congress. Rome: EPSC, 2010: 655.
- [35] Brož P, Kryza O, Conway S J, et al. Mud flow levitation on Mars: Insights from laboratory simulations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 545: 116406.
- [36] Kapitulčinová D, Cockell C S, Patel M, et al. The interlayer regions of sheet silicates as a favorable habitat for endolithic microorganisms[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2015, 32(6): 530–537.
- [37] de la Torre Noetzel R, Miller A Z, de la Rosa J M, et al. Cellular responses of the lichen *Circinaria gyrosa* in Mars-like conditions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 308.
- [38] Poch O, Jaber M, Stalport F, et al. Effect of nontronite smectite clay on the chemical evolution of several organic molecules under simulated martian surface ultraviolet radiation conditions[J]. *Astrobiology*, 2015, 15(3): 221–237.
- [39] Stalport F, Rouquette L, Poch O, et al. The photochemistry on space station (PSS) experiment: Organic matter under Mars-like surface UV radiation conditions in low Earth orbit[J]. *Astrobiology*, 2019, 19(8): 1037–1052.
- [40] Rouquette L, Stalport F, Cottin H, et al. Dimerization of uracil in a simulated Mars-like UV radiation environment[J]. *Astrobiology*, 2020, 20(11): 1363–1376.
- [41] Galletta G, Ferri F, Fanti G, et al. S.A.M., the Italian martian simulation chamber[J]. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 2006, 36(5): 625–627.
- [42] Hansen A A, Jensen L L, Kristoffersen T, et al. Effects of long-term simulated martian conditions on a freeze-dried and homogenized bacterial permafrost community [J]. *Astrobiology*, 2009, 9(2): 229–240.
- [43] Wu Z C, Wang A L, Ling Z C. Spectroscopic study of perchlorates and other oxygen chlorides in a Martian environmental chamber[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 452: 123–132.

- [44] Wang A, Yan Y C, Jolliff B L, et al. Chlorine release from common chlorides by Martian dust activity[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2020, 125(6): e2019JE006283.
- [45] Mao W S, Fu X H, Wu Z C, et al. The color centers in halite induced by Martian dust activities[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 578: 117302.
- [46] Zhou D S, Zhao Y Y S, Qi C, et al. Experimental constraints on iron-rich olivine weathering under Mars atmosphere[J]. *LPI Contributions*, 2022, 2678: 1908.
- [47] Wang X Y, Zhou D S, Zhao Y Y S, et al. Evaporation of Fe (II)-and Fe (III)-sulfate brines under CO₂ and ultraviolet light: Implications for Fe redox and Fe mineral assemblages on Mars[C]//50th Annual Lunar and Planetary Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 2019: 3275.
- [48] Qu S Y, Zhao Y Y S, Cui H, et al. Preferential formation of chlorate over perchlorate on Mars controlled by iron mineralogy[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6(4): 436-441.
- [49] Gan H, Li X Y, Wei G F, et al. Work function measurements of olivine: Implication to photoemission charging properties in planetary environments[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(11): 2432-2438.
- [50] Zhao Y Y S, Li X Y, Tang H, et al. Experimental simulations to understand the lunar and martian surficial processes[C]//AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco: American Geophysical Union, 2016: P23A-2164.
- [51] 陈安然, 张立海, 臧建伯, 等. 稳压CO₂气体氛围火星环境模拟试验系统设计[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(4): 398-402.
- [52] Preston L J, Dartnell L R. Planetary habitability: Lessons learned from terrestrial analogues[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2014, 13(1): 81-98.
- [53] Wasiak F C, Luspay-Kuti A, Welivitiya W, et al. A facility for simulating Titan's environment[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(7): 1213-1220.
- [54] Czaplinski E, Yu X, Dzurilla K, et al. Experimental investigation of the acetylene-benzene cocrystal on Titan[J]. *The Planetary Science Journal*, 2020, 1(3): 76.
- [55] Mateo-Marti E, Galvez-Martinez S, Gil-Lozano C, et al. Pyrite-induced UV-photocatalytic abiotic nitrogen fixation: Implications for early atmospheres and life[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 15311.
- [56] Sanchez-Arenillas M, Galvez-Martinez S, Mateo-Marti E. Sulfur amino acids and alanine on pyrite (100) by X-ray photoemission spectroscopy: Surface or molecular role[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 414: 303-312.
- [57] Fornaro T, Boosman A, Brucato J R, et al. UV irradiation of biomarkers adsorbed on minerals under Martian-like conditions: Hints for life detection on Mars[J]. *Icarus*, 2018, 313: 38-60.
- [58] Wadsworth J, Cockell C S. Perchlorates on Mars enhance the bacteriocidal effects of UV light[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4662.
- [59] 林杨挺. 探索火星环境和生命[J]. *自然*, 2016, 38(1): 1-7.
- [60] Green T G A, Sancho L G, Turk R, et al. High diversity of lichens at 84 degrees S, Queen Maud Mountains, suggests preglacial survival of species in the Ross Sea region, Antarctica[J]. *Polar Biology*, 2011, 34(8): 1211-1220.
- [61] Nguyen K H, Chollet-Krugler M, Gouault N, et al. UV-protectant metabolites from lichens and their symbiotic partners[J]. *Natural Product Reports*, 2013, 30(12): 1490-1508.
- [62] Stamenković V, Ward L M, Mischna M, et al. O₂ solubility in Martian near-surface environments and implications for aerobic life[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(12): 905-909.
- [63] Webster C R, Mahaffy P R, Atreya S K, et al. Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1093-1096.
- [64] Krasnopolsky V A, Maillard J P, Owen T C. Detection of methane in the martian atmosphere: Evidence for life[J]. *Icarus*, 2004, 172(2): 537-547.
- [65] Maus D, Heinz J, Schirmack J, et al. Methanogenic archaea can produce methane in deliquescence-driven Mars analog environments[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 6.
- [66] Anderson D M, Biemann K, Orgel L E, et al. Mass spectrometric analysis of organic compounds, water and volatile constituents in the atmosphere and surface of Mars: The Viking Mars lander[J]. *Icarus*, 1972, 16(1): 111-138.
- [67] He Y Y, Buch A, Szopa C, et al. The search for organic compounds with TMAH thermochemolysis: From Earth analyses to space exploration experiments[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 127: 115896.
- [68] Goesmann F, Brinckerhoff W B, Raulin F, et al. The Mars organic molecule analyzer(MOMA) instrument:

- Characterization of organic material in martian sediments [J]. *Astrobiology*, 2017, 17(6-7): 655-685.
- [69] Poch O, Kaci S, Stalport F, et al. Laboratory insights into the chemical and kinetic evolution of several organic molecules under simulated Mars surface UV radiation conditions[J]. *Icarus*, 2014, 242: 50-63.
- [70] Noblet A, Stalport F, Guan Y Y, et al. The PROCESS experiment: Amino and carboxylic acids under Mars-like surface UV radiation conditions in low-earth orbit [J]. *Astrobiology*, 2012, 12(5): 436-444.
- [71] Maggiori C, Stromberg J, Blanco Y, et al. The limits, capabilities, and potential for life detection with MinION sequencing in a paleochannel Mars analog[J]. *Astrobiology*, 2020, 20(3): 375-393.
- [72] Garcia-Descalzo L, Parro V, Garcia-Villadangos M, et al. Microbial markers profile in anaerobic Mars analogue environments using the LDChip (Life Detector Chip) antibody microarray core of the SOLID (Signs of Life Detector) Platform[J]. *Microorganisms*, 2019, 7(9): 365.
- [73] Stoks P G, Schwartz A W. Uracil in carbonaceous meteorites[J]. *Nature*, 1979, 282(5740): 709-710.
- [74] Martins Z, Botta O, Fogel M L, et al. Extraterrestrial nucleobases in the Murchison meteorite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 270(1-2): 130-136.
- [75] Nuevo M, Chen Y J, Hu W J, et al. Irradiation of pyrimidine in pure H₂O ice with high-energy ultraviolet photons[J]. *Astrobiology*, 2014, 14(2): 119-131.
- [76] Georgiou C D, Sun H J, McKay C P, et al. Evidence for photochemical production of reactive oxygen species in desert soils[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 7100.
- [77] Carrier B L, Beaty D W, Meyer M A, et al. Mars extant life: What's next[J]. *Astrobiology*, 2020, 20(6): 785-814.

Applications of planetary environment simulation facilities in astrobiology

KANG Mengling^{1,2}, HE Yuanyuan^{3,4}, SHEN Jianxun¹, ZHAO Yuyan^{5,6}, PAN Yongxin^{1,2}, LIN Wei^{1*}

1. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Institute of Mineralogy, Physics of Materials and Cosmochemistry, National Museum of Natural History & Sorbonne University; French National Centre for Scientific Research, Paris 75005, France
4. Process Engineering and Materials Laboratory, Centralesupelec, Paris-saclay University, Gif-Sur-Yvette, Paris 91190, France
5. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
6. Center for Excellence in Comparative Planetology, University of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China

Abstract With the rapid development of planetary science and deep space exploration, astrobiology has been turned into a crucial frontier discipline. Artificial space analogs manipulated by simulation facilities are powerful tools for astrobiological research. Laboratory-based planetary environment simulation serves as an important complement to remote sensing and in-situ detection, providing indispensable support for planetary science research. This paper reviews several representative planetary environment simulation facilities, including their functional designs and astrobiological experiments. They have been proven to be promising and useful for studies of extraterrestrial life signal detection and life adaptation strategies under Mars-like extreme conditions. Last but not least, a practical outlook on the future development and scientific research of planetary environment simulation devices are further discussed.

Keywords planetary environment simulation facilities; astrobiology; planetary science; deep space exploration; extraterrestrial life ●



(责任编辑 刘志远)