临近空间生物研究及其天体生物学意义

林巍^{1,2}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

E-mail: weilin@mail.iggcas.ac.cn

2019-12-09 收稿, 2020-03-23 修回, 2020-03-25 接受, 2020-04-08 网络版发表

中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA17010501)资助

摘要 临近空间指海平面之上20~100 km高度的空间, 包括大部分的平流层、整个中间层和少部分热层。临近空间是生物圈-大气圈-电离层的多圈层耦合区, 是保护人类和地表生物圈免受太阳风和宇宙辐射侵蚀的重要屏障, 上接外层空间, 下临各国领空, 战略地位突出。临近空间独特的高辐射、低温、干燥、低气压等复杂极端环境条件是实验室无法模拟的, 可以类比早期地球的高辐射环境和现代火星的表面环境, 使其成为开展地球生物学和天体生物学的天然实验室。近年来研究人员相继在临近空间20~41 km高度发现许多微生物, 表明临近空间中存在着一个未知的生物圈。随着浮空器技术的进步以及实验载荷和方法的研发, 临近空间的生物学研究, 特别是在临近空间生物多样性及其环境适应机制等方面取得了一系列新进展。这为更好地认识地球生物圈上边界、生命生存极限、类火星环境生命、生命星际传输、行星保护等天体生物学问题提供了新的突破口。临近空间生物学研究与近地轨道空间中开展的生物实验具有很好的衔接和互补, 随着我国将于2022年前后完成中国空间站建造以及“登月探火”等深空探测计划的逐步实施, 临近空间生物学研究不仅可以为未来空间站的相关研究提供支撑, 而且也将进一步促进我国在天体生物学研究领域的发展。

关键词 临近空间, 天体生物学, 平流层, 极端环境, 火星

临近空间指海平面之上20~100 km高度的空间, 包括平流层的大部分区域、整个中间层以及热层底部, 上接外层空间, 下临各国领空, 战略地位突出^[1]。据估计每年至少有 10^{21} 个微生物通过季风、风暴、沙尘暴、生物质燃烧、地质活动(如火山喷发、地震等)、人类活动(如农耕和发射飞机、火箭、导弹、卫星等)等途径从地表和水体表面传输至低层大气和临近空间。其中部分生物又通过大气活动或低层大气中降雨降雪等过程再返回地面, 从而引发行星尺度上的大规模微生物“迁徙”, 进而可能影响区域和全球尺度的微生物地理分布格局^[2,3](图1)。这些微生物活动可以影响低层大气中云层的形成, 催生形成凝结核, 引发雨、雪和冰雹

等, 从而影响局部的天气和气候^[4]。有研究表明临近空间和低层大气中存在着致病微生物和病毒, 可能引起一些陆地植物和海洋生物发生病变, 部分微生物分泌的脂多糖、内毒素等还可引发人类的呼吸道疾病和过敏反应等^[5,6]。此外, 临近空间中生存的极端微生物可能具有特殊的生理过程和代谢产物, 具有潜在的开发应用前景^[7,8]。

平流层是临近空间中一个重要的大气分层, 也是物理化学性质、辐射、动力学过程等变化强烈的区域。平流层的气温随高度增加而升高, 其底部气温约为零下60°C至零下70°C, 而顶部气温可达0°C以上^[9]。可以吸收短波紫外线而保护地表生物免受其危害的臭氧层

引用格式: 林巍. 临近空间生物研究及其天体生物学意义. 科学通报, 2020, 65: 1297-1304

Lin W. Life in the near space and implications for astrobiology (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1297-1304, doi: 10.1360/TB-2019-0805

图1 临近空间生物循环示意图。临近空间包括海平面之上20~100 km高度的空间，在大气对流层(地面至约8~15 km高度范围)之上，包括平流层(对流层顶向上至约50 km高度范围)的大部分、整个中间层(约50~85 km高度范围)以及热层(约85~500 km高度范围)的底部

Figure 1 Schematic representation of the cycle of microorganisms in the lower atmosphere and the near space. Near space is a region between 20 and 100 km above sea level. It lies above the troposphere (from ground level to about 8–15 km), and includes the major region of the stratosphere (from the tropopause to about 50 km above sea level), the entire mesosphere (from about 50 to 85 km above sea level) and the lower thermosphere (from about 85 to 500 km above sea level)

就位于平流层中，使得平流层顶部和底部的紫外辐射差异显著。平流层臭氧层之上的高辐射区可以在一定程度上类比早期地球(臭氧层出现之前)的高辐射环境，而平流层中30~40 km区域的温度、气压、湿度、辐射等综合环境条件可以类比现代火星的表面环境^[7]。美国国家航空航天局(NASA)已经开始利用临近空间来研究地球微生物是否可能附着在探测器上到达并“污染”火星表面^[10]。

临近空间环境是地表环境与近地轨道空间和深空环境的过渡区，其中生存的生物能够耐受苛刻的极端环境，对其多样性、适应机理和维持机制的研究为天体生物学研究提供了新的突破口。开展临近空间生物学研究对全球环境变化、生态系统可持续发展、生物新资源获取和开发利用、人类健康、国家安全等都具有重要意义。本文简要概述临近空间的生物多样性和环境适应性研究进展，介绍临近空间研究中涉及天体生物学的主要科学问题，以期促进我国临近空间生物

学研究的发展。

1 临近空间生物多样性研究——“采下来”

随着高度的升高，临近空间中生物丰度显著降低，采样难度增加，因此生物样品的原位采样是临近空间生物学研究的一项重要内容。临近空间原位收集装置在升空前需在地面进行组装，在预定高度采集生物样品后也需要返回实验室进行生物学研究，如何有效规避地面和低层大气的生物污染是临近空间生物采样需要解决的关键技术问题。同时，由于临近空间生物丰度较低，采集到的生物样品量通常较少，分离培养一直是临近空间生物学研究的主要手段，该方法可以获得纯培养菌株以进行更为深入的分析。近年来，随着对临近空间生物学研究的日益关注，一些新开发的方法和新研制的收集载荷为临近空间生物多样性研究提供了技术支撑^[11~13]。

利用高空飞机进行生物样品收集是开展临近空间

生物学研究的方法之一。美国学者利用高空飞机ER-2(其巡航高度是普通商用飞机的2倍)搭载冲击式采样器,采样器装备在飞机翼尖,在临近空间底界20 km高空开展2.5 h巡航采样,随后在实验室分离培养了4株真菌和多株产孢子的细菌^[14]。后续研究又分离得到不产生孢子的细菌,这些细菌与在火山灰中发现的微生物类似,表明这些微生物可能通过地面火山喷发传输至临近空间^[15]。研究人员随后对冲击式采样器进行改造,在表面喷砂以增加表面积从而更好地吸附生物样品。他们利用改进后的装置对太平洋上空约20 km处的生物进行收集和培养,获得的菌株与在亚洲发现的微生物最为类似,推测来自亚洲的沙尘可能携带微生物穿过太平洋将其运输至北美洲^[16]。

探空火箭相较于其他飞行器在理论上可以到达临近空间的任何高度,在其上升或下降过程中可以采集空气中的生物样品。苏联科研人员曾开展过利用探空气象火箭收集临近空间生物的研究,他们在海拔48~77 km的高空发现了微生物,这是文献报道临近空间存在生物的最高纪录^[17]。但是该结论目前还未得到学术界的普遍认可,一些学者认为该研究发现的生物可能来自低层大气或地面的污染^[7]。探空火箭成本高、驻空时间短、收集生物样品的时间非常有限且易于受污染,导致该方法没有普遍用于临近空间生物学研究。

浮空器(特别是高空气球)是目前开展临近空间生物学研究最常用的飞行器。早在19世纪末和20世纪初,欧洲学者就开始利用气球研究大气中的生物组成,发现了一些真菌和产孢子的细菌,但这些样品主要来自对流层。随着浮空器技术的进步和生物学方法的发展,美国、英国、印度、日本等国相继在21~41 km高度发现并分离培养到微生物,表明临近空间平流层中存在着一个有待深入研究和认识的生物圈^[18-27]。目前对临近空间微生物群落组成的研究主要来自分离培养方法。迄今已分离到的微生物全部属于细菌和真菌,其中分离的细菌类群大多能产生孢子,孢子对极端环境条件具有很强的抵抗力,这可能是这些生物能够耐受临近空间极端环境的重要原因之一。值得注意的是,自然界绝大多数微生物目前尚无法在实验室成功培养,因此传统培养方法获得的多样性信息不能准确反映临近空间生物群落的组成。基于16S rRNA基因的分子生态学方法已经应用于临近空间生物学研究,未来基于组学(如宏基因组、单细胞基因组等)的研究将进一步加深

我们对临近空间生物多样性的认识。

2 临近空间生物适应性研究——“带上去”

临近空间具有较复杂的极端环境条件,其高紫外辐射可以引起生物DNA损伤,低压和干燥环境会导致DNA双链结构断裂,而低温则可能会延迟生物的生长和新陈代谢活动。生物如何适应临近空间的极端环境(如地面生命能否在临近空间中存活以及如何存活、临空环境对生物的生理代谢和遗传发育等有何种影响等)是临近空间生物学研究的重要内容。当前该领域的主要研究方法是利用高空气球将代表性的模式生物类群带到临近空间进行暴露,然后返回实验室对暴露后生物样品的各种变化开展研究,进而探讨生命适应临近空间极端环境的可能机制。

美国NASA的学者开展了较系统的临近空间平流层微生物暴露实验。他们利用自主研制的平流层微生物暴露载荷将短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus* SAFR-032)的孢子带到20 km高度以上进行短时暴露,发现该过程对孢子的存活率没有明显影响^[11]。随后,该团队对飞行实验方案进行了改进,将*B. pumilus* SAFR-032的孢子带到31 km高度暴露8 h左右,发现暴露2~4 h后孢子活性降低了2~4个数量级,暴露8 h后仅有不到0.001%的孢子能够存活,表明临近空间长时间暴露会显著影响*B. pumilus* SAFR-032孢子的活性^[10]。

紫外辐射是导致微生物在临近空间中生存能力显著降低的重要环境因素,研究发现大气中的粉尘颗粒可以在一定程度上屏蔽对生物的有害辐射,提高其存活率^[10,28]。比较基因组学分析发现有5个基因可能参与*B. pumilus* SAFR-032耐受高紫外辐射过程,但是这些基因的功能与作用机制还有待进一步证实^[29]。除了细菌和真菌外,有研究表明一些古菌也可以耐受临近空间平流层的极端环境,转录组分析显示经过平流层暴露的古菌*Halobacterium* sp. NRC-1和*Halorubrum lacusprofundi* ATCC 49239的基因表达调控水平发生了变化,但具体机制还有待深入研究^[30]。

总之,生物可以通过不同的策略以适应临近空间的极端环境。真菌和革兰氏阳性菌可能通过形成孢子,在平流层存活,而一些不能产生孢子的细菌和古菌的基因组GC含量通常较高,可以在一定程度上耐受紫外辐射对细胞DNA的损伤。此外,一些生物可能通过附着在粉尘颗粒上或形成聚集体/生物被膜等来阻挡辐射对内部细胞的伤害,而一些微生物自身特殊的DNA修

复系统、光保护色素、冷激蛋白等也有助于提高它们在临近空间中的生存能力^[3,28]。

3 临近空间研究与天体生物学相关的主要科学问题

天体生物学研究宇宙演化背景下生命的起源、演化、分布和未来,其中的一项重要研究内容是对地球上类似其他天体的极端环境开展类比研究^[31]。地球临近空间的高辐射、低温、干燥、低气压等独特环境条件使其成为开展地外生命探查、生命生存极限、生命星际传输、行星保护等天体生物学研究的重要实验区域。

现代火星是否可能支持生命存在是当前天体生物学研究的热点。向火星发射探测器进行原位或近距离探测无疑是最直接的研究手段,此外还可以在地球上类火星环境中开展系统的类比研究。临近空间约35 km高度范围(温度零下36°C左右、大气压约为1 kPa、相对湿度<1%、紫外辐射约为100 W/m²、宇宙辐射约为0.1 mGy/d)被认为是地球上与现代火星表面综合环境最为可比的区域^[32],为开展火星是否可能存在生命以及地球生命能否污染火星等研究提供了可能^[33],这也是当前美国NASA临近空间平流层微生物研究中重点关注的科学问题^[10,11]。

生命的生存极限也是天体生物学领域的重要科学问题,相关研究不仅有助于判断地外天体的可能宜居性,也将更好地认识地球生命的起源和早期演化。目前学界公认的地球生命存在的最高高度是41 km,生命是否可能存活在更高的空间还存在争议^[7],亟需深入开展相关的临近空间研究,为准确界定地球生物圈上边界提供新的实验和理论依据。随着高空气球技术的发展、高效原位收集载荷的研制以及生物学研究方法的进步(如单细胞分析、组学研究等),未来对地球生物圈上边界的研究将获得新突破。

地球临近空间中生命的存在将其他天体上可能宜居环境从其表层或深部拓展到了临近空间,而地球临近空间研究中研发的相关载荷和探测技术也可用于太阳系内其他天体临近空间的研究和探查。20世纪80年代苏联探测金星的“维加计划”(VEGA)就利用浮空气球携带探测仪器在金星大气约54 km的高度进行了原位环境参数测量^[34]。现代金星的表层环境非常极端,平均温度在400°C以上,大气压力是地球的近百倍,不具有宜居性。但是金星大气47~75 km高度环境较温和,温

度介于-60~60°C,气压为0.01~1个标准大气压,可能存在硫、磷、铁等元素,具有一定的宜居性,地球上的一些嗜酸/耐酸微生物(如细菌*Acidithiobacillus ferrooxidans*和古菌*Stygiolobus*属等)可能在这种环境下生存^[35]。此外,已发现的系外行星大多具有大气,这些大气环境也可能类比地球的临近空间环境,具有一定的宜居性。因此,对于地球临近空间生物多样性、适应机理以及维持机制的研究可以为评判金星、系外行星等其他天体的大气环境是否支持生命提供新的依据。

临近空间也为“胚种论”(Panspermia)假说的研究提供了条件。“胚种论”认为地球生命可能起源于地外,通过陨石、彗星、星际尘埃等到达地球^[36]。如果该假说成立,那么现今的地球依然可能接收来自地外的生命“种子”。每年大约有4×10⁴ t地外物质到达地球^[37],其中可能携带生命“种子”的微陨石或星际尘埃可以漂浮在临近空间。反之,地球生命也可能通过低层大气和临近空间逃逸到外层空间甚至其他天体上。有学者认为由于微生物表面带有电荷,地球磁场可以作用于高层大气中的微生物,该作用力可能抵消地球重力导致一些微生物进入近地空间^[38]。因此临近空间生物学研究也可能为地球生命起源和生命星际传输提供新认识。

4 展望

临近空间是地表和外层空间的过渡区,也是生物圈-大气圈-电离层的多圈层耦合区,其复杂的环境条件是实验室无法模拟的,具有重要的科学研究意义。生物学研究是临近空间科学研究的一项重要内容,其核心是揭示临近空间生物的多样性及其环境适应机制。目前已经从临近空间中分离培养得到了许多微生物,拓展了对临近空间生物多样性的认识。然而,受到飞行条件、相关载荷和研究方法的限制,尚缺乏对临近空间生物群落的整体刻画,对不同地点、不同高度、不同时间临近空间生物群落的分布、动态变化和维持机制等研究还非常欠缺。生物在临近空间中如何生存(休眠状态、正常的营养繁殖状态抑或二者皆有)、它们通过哪些策略来适应临空极端环境(如基因突变、形成休眠体、群体聚集、附着在颗粒上等)等科学问题也有待系统深入的研究。载荷是开展临近空间生物学研究的前提,应重视并加强临近空间生物载荷的研发工作,为相关研究提供硬件和技术储备。对临近空间的理化性质、大气环境、辐射环境和电磁环境等缺乏原位实时观测和测量,也直接制约了对临近空间生物的适

应机制认识和环境功能评价等。

2018年,中国科学院启动了“临近空间科学实验系统”A类战略性先导科技专项(简称“鸿鹄专项”)。“鸿鹄专项”把临近空间生物学研究作为其基础科学探索研究方面的内容之一。自主研制临近空间生物实验载荷,建立相关的生物学研究方法;在典型区域(如青藏高原)、不同高度(如臭氧层上下部)开展生物暴露实验和原位收集实验,结合对临近空间大气环境、辐射环境和电磁环境等综合原位探测数据,探究临近空间的生物多样性及其可能的适应机制。目前已成功研制出临近空间生物暴露载荷,并于2019年完成了2次飞行实验,平飞暴露时间超过2.5 h,平飞高度大于30 km(图2)。未来还计划研制临近空间生物原位收集载荷,通过“采下来”与“带上去”相结合,以期更好地认识临近空间的生物群落组成及其适应机制。

临近空间在地球生物圈演化中可能发挥了重要作用。进入临近空间的生物在极端环境条件下易于发生突变,随着它们返回地表,这些具有突变性状的生物可能会对地表生物圈产生影响。例如,研究发现原本对NaCl和NaNO₂敏感的*Lactobacillus gasseri*经过实验室紫外诱导后,产生的突变菌株可在高NaCl和NaNO₂环境中存活^[39]。据此推测一些生物经过临近空间的突变,可能拓展它们在地面的生存环境,进而对当地生态系统的种群结构和功能等产生一定影响。此外,细菌、古菌及真核生物之间存在着较频繁的水平基因转移^[40],临空突变的基因可能通过水平转移而影响其他生物、甚至整个生物圈的演化。然而,关于这方面的研究几乎

是空白。因此,临近空间对生物圈演化有何种影响是未来可开展的一项重要研究内容,可以通过对模式生物特定蛋白质或性状在临空极端环境下的演化速度和演化路径的变化开展研究,以探讨临近空间对地球生物圈演化具有何种作用。

临近空间飞行实验在很大程度上受到国界和空域的限制,为了能够开展长航时飞行,美国、日本、法国等国家已经在南极开展高空气球飞行。以美国为例,1991~2017年NASA和美国国家科学基金会共同资助了40余次南极高空气球飞行实验,平均驻空时间约18 d^[32]。开展长航时临近空间驻空不仅可以收集到更多的原位样品用于研究临空的生物多样性和环境适应性,而且有助于开展长期生物暴露实验以深入认识生命的生存极限。可以预见,南极浮空器平台将为临近空间生物学研究的发展提供新契机。

临近空间生物研究与基于近地轨道(如在轨卫星、空间站等)开展的生物学研究形成了良好的衔接和互补。近地轨道高度在临近空间之上,不仅辐射强度高且种类复杂,还具有微重力和低磁场等特殊环境条件^[41]。因此,临近空间的生物暴露实验可以与近地轨道空间的生物实验进行对比研究,以进一步促进对复杂极端环境如何影响生物的深入认识。临近空间生物学实验与近地轨道实验相比,具有成本低、载荷重量大、实验周期短、机会较多、发放和回收灵活性高等特点,可以作为高投入和机会稀少的近地轨道空间生物学研究的重要补充。随着我国将在2022年前后完成中国载人空间站建造以及“登月探火”等深空探测计划

图2 2019年9月“鸿鹄专项”自主研制的临近空间生物暴露载荷在青海开展飞行实验(飞行高度约32 km)

Figure 2 The balloon-based biology exposure payload developed under the Scientific Experiment System in Near Space (SENSE) Program in the near space environment over Qinghai Province, China (~32 km above sea level)

的逐步实施^[42,43],我国必将会加大空间科学和行星科学的研究工作,临近空间生物学研究不仅可以为我国未来空间站的相关研究提供重要支撑,而且也将进一步促进我国在天体生物学领域的发展。

致谢 感谢中国科学院水生生物研究所王高鸿研究员和中国科学院地质与地球物理研究所田兰香副研究员对文章初稿提出的意见;感谢中国科学院地质与地球物理研究所潘永信院士在研究过程中给予的建议和指导;感谢“鸿鹄专项”HH-19-2和HH-19-9飞行实验全体参研人员。

参考文献

- 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]
- Griffin D W, Gonzalez-Martin C, Hoose C, et al. Global-scale atmospheric dispersion of microorganisms. In: Delort A M, Amato P, eds. *Microbiology of Aerosols*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. 155–194
- DasSarma P, DasSarma S. Survival of microbes in Earth's stratosphere. *Curr Opin Microbiol*, 2018, 43: 24–30
- Joly M, Attard E, Sancelme M, et al. Ice nucleation activity of bacteria isolated from cloud water. *Atmos Environ*, 2013, 70: 392–400
- Polymenakou P N. Atmosphere: A source of pathogenic or beneficial microbes? *Atmosphere*, 2012, 3: 87–102
- Griffin D W. Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health. *Clin Microbiol Rev*, 2007, 20: 459–477
- Smith D J. Microbes in the upper atmosphere and unique opportunities for astrobiology research. *Astrobiology*, 2013, 13: 981–990
- Tiquia S M, Mormile M R. Extremophiles—A source of innovation for industrial and environmental applications. *Environ Technol*, 2010, 31: 823
- Meriwether J W. Mesosphere inversion layers and stratosphere temperature enhancements. *Rev Geophys*, 2004, 42: RG3003
- Khodadad C L, Wong G M, James L M, et al. Stratosphere conditions inactivate bacterial endospores from a Mars spacecraft assembly facility. *Astrobiology*, 2017, 17: 337–350
- Smith D J, Thakrar P J, Bharrat A E, et al. A balloon-based payload for Exposing Microorganisms in the Stratosphere (E-MIST). *Gravit Space Res*, 2014, 2: 70–80
- Bryan N C, Stewart M, Granger D, et al. A method for sampling microbial aerosols using high altitude balloons. *J Microbiol Methods*, 2014, 107: 161–168
- Della Corte V, Rietmeijer F J M, Rotundi A, et al. Introducing a new stratospheric dust-collecting system with potential use for upper atmospheric microbiology investigations. *Astrobiology*, 2014, 14: 694–705
- Griffin D W. Terrestrial microorganisms at an altitude of 20000 m in Earth's atmosphere. *Aerobiologia*, 2004, 20: 135–140
- Griffin D W. Non-spore forming eubacteria isolated at an altitude of 20000 m in Earth's atmosphere: Extended incubation periods needed for culture-based assays. *Aerobiologia*, 2008, 24: 19–25
- Smith D J, Griffin D W, Schuerger A C. Stratospheric microbiology at 20 km over the Pacific Ocean. *Aerobiologia*, 2010, 26: 35–46
- Imshenetsky A A, Lysenko S V, Kazakov G A. Upper boundary of the biosphere. *Appl Environ Microbiol*, 1978, 35: 1–5
- Greene V W. Microbiological exploration of stratosphere: Results of six experimental flights. In: *Proceedings of the Atmospheric Biology Conference*. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1965. 199–211
- Soffen G A. Atmospheric collection at 130000 feet. In: *Proceedings of the Atmospheric Biology Conference*. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1965. 213–219
- Narlikar J V, Lloyd D, Wickramasinghe N C, et al. A balloon experiment to detect microorganisms in the outer space. *Astrophys Space Sci*, 2003, 285: 555–562
- Wainwright M, Wickramasinghe N C, Narlikar J V, et al. Microorganisms cultured from stratospheric air samples obtained at 41 km. *FEMS Microbiol Lett*, 2003, 218: 161–165
- Rauf K, Hann A, Wallis M, et al. Study of putative microfossils in space dust from the stratosphere. *Int J Astrobiol*, 2010, 9: 183–189
- Shivaji S, Chaturvedi P, Suresh K, et al. *Bacillus aerius* sp. nov., *Bacillus aerophilus* sp. nov., *Bacillus stratosphericus* sp. nov. and *Bacillus altitudinis* sp. nov., isolated from cryogenic tubes used for collecting air samples from high altitudes. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2006, 56: 1465–1473
- Shivaji S, Chaturvedi P, Begum Z, et al. *Janibacter hoylei* sp. nov., *Bacillus isronensis* sp. nov. and *Bacillus aryabhatai* sp. nov., isolated from cryotubes used for collecting air from the upper atmosphere. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2009, 59: 2977–2986
- Narlikar J V, Ramadurai S, Bhargava P, et al. Search for living cells in stratospheric samples. In: Hoover R B, ed. *Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology*. Washington DC: International Society for Optics and Photonics, 1998, 3441. 301–305

- 26 Yang Y, Yokobori S, Kawaguchi J, et al. Investigation of cultivable microorganisms in the stratosphere collected by using a balloon in 2005. In: JAXA Research and Development Report: Research Reports on High Altitude Balloons, JAXA-RR-08-001. Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency, 2008. 35–42
- 27 Yang Y, Itoh T, Yokobori S I, et al. *Deinococcus aetherius* sp. nov., isolated from the stratosphere. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2010, 60: 776–779
- 28 Smith D J, Griffin D W, McPeters R D, et al. Microbial survival in the stratosphere and implications for global dispersal. *Aerobiologia*, 2011, 27: 319–332
- 29 Tirumalai M R, Rastogi R, Zamani N, et al. Candidate genes that may be responsible for the unusual resistances exhibited by *Bacillus pumilus* SAFR-032 spores. *PLoS One*, 2013, 8: e66012
- 30 DasSarma P, Laye V J, Harvey J, et al. Survival of halophilic Archaea in Earth's cold stratosphere. *Int J Astrobiol*, 2017, 16: 321–327
- 31 Lin W, Li Y L, Wang G H, et al. Overview and perspectives of Astrobiology (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 380–391 [林巍, 李一良, 王高鸿, 等. 天体生物学研究进展和发展趋势. 科学通报, 2020, 65: 380–391]
- 32 Smith D J, Sowa M B. Ballooning for biologists: Mission essentials for flying life science experiments to near space on NASA large scientific balloons. *Gravit Space Res*, 2017, 5: 52–73
- 33 Sokol J. UV light could easily kill microbial stowaways to Mars. *Science*, 2017, doi: 10.1126/science.aal0975
- 34 Sagdeev R Z, Linkin V M, Blamont J E, et al. The VEGA Venus balloon experiment. *Science*, 1986, 231: 1407–1408
- 35 Limaye S S, Mogul R, Smith D J, et al. Venus' spectral signatures and the potential for life in the clouds. *Astrobiology*, 2018, 18: 1181–1198
- 36 Wesson P S. Panspermia, past and present: Astrophysical and biophysical conditions for the dissemination of life in space. *Space Sci Rev*, 2010, 156: 239–252
- 37 Brownlee D E. The origin and properties of dust impacting the Earth. In: *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*. Boston: Springer, 2001. 1–12
- 38 Yang Y, Yokobori S, Yamagishi A. Assessing panspermia hypothesis by microorganisms collected from the high altitude atmosphere. *Biol Sci Space*, 2009, 23: 151–163
- 39 Arihara K, Itoh M. UV-induced *Lactobacillus gasseri* mutants resisting sodium chloride and sodium nitrite for meat fermentation. *Int J Food Microbiol*, 2000, 56: 227–230
- 40 Boto L. Horizontal gene transfer in evolution: Facts and challenges. *Proc R Soc B*, 2010, 277: 819–827
- 41 Horneck G, Klaus D M, Mancinelli R L. Space microbiology. *Microbiol Mol Biol Rev*, 2010, 74: 121–156
- 42 Zhou J P. Chinese space station project overall vision (in Chinese). *Manned Spacefl*, 2013, 19: 1–10 [周建平. 我国空间站工程总体构想. 载人航天, 2013, 19: 1–10]
- 43 Ye P J, Zou L Y, Wang D Y, et al. Development and prospect of Chinese deep space exploration (in Chinese). *Space Int*, 2018, 10: 4–10 [叶培建, 邹乐洋, 王大珩, 等. 中国深空探测领域的发展及展望. 国际太空, 2018, 10: 4–10]

Summary for “临近空间生物研究及其天体生物学意义”

Life in the near space and implications for astrobiology

Wei Lin^{1,2}¹ Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;² Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, ChinaE-mail: weilin@mail.iggcas.ac.cn

Near space is a region that lies between 20 and 100 km above sea level, which includes the major region of the stratosphere, the mesosphere and the lower thermosphere. Near space comprises a harsher physical environment which contains high ultraviolet light levels, subzero temperatures, desiccation and low atmospheric pressure, in comparison to the low-altitude atmosphere. This provides a unique analogue environment that resembles the surface conditions of Mars, the high-altitude atmospheric environments of Venus and the high radiation environments of early Earth. Microorganisms can enter the lower atmosphere and the near space through weather systems like wind, geological activities like earthquake and volcanic eruption and human activities like air transportation. In recent years, methodological and technological advances have deepened our understanding of the diversity and survival strategies of organisms in near space. Payload systems and methods for exposing organisms and for *in situ* collecting microbial samples in near space have been designed and developed. Consequently, a growing number of studies investigate the microbial survival strategies in near space by exposing model microorganisms (e.g., bacteria, archaea and yeasts) to near space extreme environments through flight exposures. A diverse group of microorganisms have been isolated, identified and characterized from near space, suggesting that it may potentially contain a vast unknown microbial biosphere. The dispersal of life in near space may play an essential role in shaping global patterns of microbial biodiversity and biogeography. The ability of these microbes to survive under near space extreme environments has prompted researchers from different disciplines to study them to better understand their diversity, distribution and survival strategies. Near space not only provides great opportunities to investigate some basic biological questions such as the biological effects of radiations, but it also has a wide application potential since microorganisms in near space, as extremophiles, are a valuable source of a variety of new genes and enzymes. Astrobiology is the study of the origin, evolution, habitability and future of life on Earth and beyond in the context of cosmic evolution. One promising research field in astrobiology is planetary analogue research which conducts experiments and tests in specific environments on Earth that have physical/chemical similarities to the extraterrestrial environments. Analogue research has offered new insights into the planetary habitability and the search for extraterrestrial life. Near space as a natural laboratory can provide hard evidence for important astrobiology topics including the limits to life on Earth, the upper boundary of Earth's biosphere, the possibility of interplanetary transport of life, the assessment of panspermia hypothesis and the planetary protection. With the recent development of the Chinese Space Station and deep-space exploration, the study of near space biology will provide support for future space station related research and will further promote the development of astrobiology in China. Here I review the major advances in biodiversity in near space and their survival strategies, with emphases on key astrobiology questions associated with the research of near space. I also highlight major challenges that will be necessary to address in future research and discuss possible perspectives in the study of near space biology.

near space, astrobiology, stratosphere, extreme environment, Marsdoi: [10.1360/TB-2019-0805](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0805)