

长期载人航天飞行航天营养与食品研究进展

董海胜, 赵 伟, 臧 鹏, 于燕波, 曹 平, 何春江, 陈 斌
(中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘 要: 长期载人航天飞行过程中, 乘组航天员处于微重力、噪声、振动及狭小密闭空间等特因环境下, 机体发生生理适应性变化。航天特因环境下航天员营养保障研究是人类探索太空面临的一项重要课题, 而且随着飞行时间的延长, 其重要性逐渐凸显。本文介绍了美俄等国家在空间站、载人登月及载人火星探测等长期载人航天飞行活动中航天营养保障领域的研究现状。相比中短期载人航天飞行任务, 长期载人航天飞行中航天员的营养保障对营养均衡、循环利用、保健功能及感官接受性等方面要求更高。

关键词: 航天营养; 航天食品; 载人航天飞行; 空间站; 载人登月; 载人火星探测

Progress in Space Nutrition and Food for Long-Term Human Space Flight

DONG Haisheng, ZHAO Wei, ZANG Peng, YU Yanbo, CAO Ping, HE Chunjiang, CHEN Bin
(Astronaut Scientific Research and Training Center of China, Beijing 100094, China)

Abstract: Physiological adaptive changes may occur in astronauts under the particular space environmental conditions such as microgravity, noise, vibration, and hermetic cabin during long-term manned space flight. Space nutrition supply is an important research issue for mankind to explore space, especially in the case of long-term manned space flight. This paper reviews recent progress in research on space nutrition in the United States, Russia and other countries for long-term manned space flight activities such as space station, manned lunar landing and manned Mars exploration. Compared with mid- and short-term manned space flight mission, space nutrition for long-term manned space flight is more focused on improving nutritional balance, resource recycling, healthcare function and sensory acceptance.

Keywords: space nutrition; space food; manned space flight; space station; manned landing on the moon; manned Mars exploration

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201809042

中图分类号: TS201.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 09-0280-06

引文格式:

董海胜, 赵伟, 臧鹏, 等. 长期载人航天飞行航天营养与食品研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 280-285. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201809042. <http://www.spkx.net.cn>

DONG Haisheng, ZHAO Wei, ZANG Peng, et al. Progress in space nutrition and food for long-term human space flight[J]. Food Science, 2018, 39(9): 280-285. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201809042. <http://www.spkx.net.cn>

航天食品及饮水是有人参与的航天活动中不可或缺的, 而且随着飞行时间的延长, 其重要性逐渐凸显^[1]。目前, 美俄正在开展多项载人太空探索计划, 其中美国航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)近期开展的夏威夷太空探索模拟与仿真任务, 目的就是验证长期生活在火星或月球期间航天员保持良好营养状态的最佳方式, 为深空载人探测任务探索新的食品形式和食品配置策略^[2]。俄罗斯MARS500模拟载人登陆火星实验更凸显了航天食品保障的重要性, 实验过程中多名受试者出现“食谱疲劳”, 甚至对平时喜爱的食品产生厌倦^[3]。因此, 系统调研国际航天营养及食品研究现状和发展趋势, 对于我国航天营养与食品研究具有重要的启示意义。本文就长期载人航天飞行任务航天营养与食品研究现状进行综述, 并分析了目前我国航天营养与食品研究面临的挑战。

1 航天营养与食品研究现状分析

1 航天营养与食品研究现状分析

1.1 航天营养

航天特因环境下(空间微重力、载人航天器噪声、

收稿日期: 2017-02-21
基金项目: 中国载人航天工程预先研究项目(FTKY201506; 2013SY54B0801)

第一作者简介: 董海胜(1982—), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为航天营养与食品工程。E-mail: dhs303@126.com

振动、狭小空间及昼夜节律变化等)载人飞行带来的生理问题是多方面的,包括体质量降低、体液转移、脱水、便秘、电解质失衡、钙丢失、钾丢失、红细胞质量减少、空间运动病及肠道微生态失调^[4]。航天营养是研究航天特因环境对机体生理和代谢的影响规律和作用机理的一门学科^[5-6]。膳食营养由2个部分组成,即必需营养素和热能形式的能量。缺乏营养的情况下存在不能健康生活和工作的危险。不适当的营养包括虽然摄入了足够的热量,但某些营养素的摄入不足或过量,这可能导致相应的营养素缺乏或过量的症状,例如坏血病、脚气病等^[7]。

空间飞行膳食营养状态的改变可能会造成乘组航天员免疫功能降低^[8]。乘组航天员的能量及营养摄入量降低,直接的表现就是体质量降低,同时也观察到免疫功能的变化,比如:分裂素增殖反应的降低与VB₆、VB₁₂、生物素、VE、铜或硒缺乏有关;迟发型超敏反应的产生与VB₆、VB₁₂、VC或缺乏相关;蛋白质及个别氨基酸缺乏对多种免疫功能有不同程度的影响^[5,9]。因此,为航天员提供高效的营养是抵抗航天飞行期间免疫功能失调的有效措施之一。

飞行乘组执行国际空间站任务期间,与执行空间实验室及“和平”号空间站任务一样,航天员通过尿液排出的胶原蛋白交联物均有100%~150%的增加,预示着3次任务期间乘组航天员尿液中有相同的骨代谢标志物,且机体抗氧化能力有下降趋势^[10-11]。美国2009年度的人类研究计划报道,膳食摄入能够抵抗太空飞行期间骨代谢的改变,柠檬酸钾作为肾结石的非运动对抗方案,已从飞行观察阶段转入临床研究阶段。补充二磷酸盐可作为骨丢失的对抗措施^[12-13]。

因此,提供充足、均衡的营养,并使之得到有效吸收利用,是对载人航天任务乘组航天员健康的重要保障。

1.2 航天食品研究

食品是营养素的载体,航天食品是航天员在轨执行飞行任务时唯一的营养来源。与普通地面食品不同,研制航天食品时需考虑诸多的资源限制因素,如质量、体积、功耗、在轨飞行时间和餐余废弃物处理能力。目前,航天食品主要包括罐头食品、脱水食品、中水分食品、自然型食品、辐照食品、新鲜食品、冷藏食品及功能食品等^[1]。前4种类型的航天食品研制技术相对成熟,并得到了广泛应用,后4种类型的航天食品颇受乘组航天员的欢迎。

1.2.1 航天食品新类型

1.2.1.1 辐照食品

辐照杀菌对食品品质的影响非常小,可以应用于大规模生产,应用的范围比较广,并且能够应用于干性食品。目前,国际空间站辐照食品主要是肉类和面包。韩国学者将营养棒、即食面条及2种朝鲜传统食品(朝鲜

泡菜、肉桂饮料)经高剂量 γ 射线辐射处理开发为航天食品^[14-15]。通过添加乳酸钙、VC及温和加热、低温冷藏和25 kGy γ 射线辐射处理,将朝鲜泡菜加工成即食航天食品。营养棒、即食面条及肉桂饮料分别在15、10、6 kGy的剂量下进行实验,以上3种食品均经过了俄罗斯生物医学问题研究院30 d太空飞行的验证。

1.2.1.2 新鲜食品

为提高食品接受性,国际空间站为航天员提供了新鲜食品,主要是水果和蔬菜。可直接食用(如苹果)或用于制作蔬菜色拉^[16]。

1.2.1.3 冷藏食品

国际空间站配置有食品用冰箱。冷藏的作用体现在2个方面:一方面可提供新鲜食品,空间站的冷藏食品主要是乳制品和水果,包括干酪、酸奶油、苹果、葡萄柚、橙和李子;另一方面,提供开袋或开罐后的大包装食品所需的冷藏环境,延缓食品发生腐败变质的速度,保障其食用安全^[17]。

1.2.1.4 功能食品

航天功能食品是以航天飞行特因环境对人体的不利影响为出发点,通过添加确定保健功能的功能因子到航天食品中,航天员在轨长期食用以实现其功效。功能食品不同于药物,是一种温和的长期的作用过程,类似于食疗食养。空间飞行对生物体的显著危害之一是空间辐射。食品中的成分如天然抗氧化剂(如原花青素)、 Ω -3脂肪酸,甚至是植物的膳食纤维都可以预防或改善辐射造成的伤害。在前苏联航天食品中,曾应用沙棘或葡萄籽提取物开发的抗辐射功能食品^[18-19]。

在航天器密闭的居住环境内,一些相对普通的感染(如流行性脑脊髓膜炎、青霉素抵抗葡萄球菌属等)也可能会危及生命,并对航天员执行任务构成威胁。通常乘组航天员罹患各种感染性疾病也有可能是由真菌超敏性或保护肠道菌群的退化引起的^[4,20]。意大利空间局学者将普通酸奶及添加蓝莓的酸乳经冻干处理,开发成了风味独特、富含钙且含有益生菌的航天食品,食用这种类型的食品可以对抗微重力导致的肠道菌群退化^[21]。

1.2.2 航天食品加工及营养素保持技术研究

造成营养摄入不足的原因是多方面的,包括食品在加工和贮藏过程中营养素的损失及航天食品系统的可接受性差等因素。食品在加工和贮藏过程中损失营养素,航天员将无法摄入充足的营养。贮藏温度和时间对食品维生素含量具有显著影响,2年贮藏实验结果表明:几种水果和蔬菜贮藏温度为27℃时,VC、VB₁和VB₂损失率高达58%;贮藏温度为10℃时,维生素最大损失率为38%^[5,22-23]。

热稳定食品因其保质期长,是长期载人飞行航天食品的主要类型,目前已有热稳定食品商业化加工装置,

如图1所示。热稳定食品经过了破坏性的热处理加工过程,造成营养损失、风味劣变及其他食品品质的改变,这些改变取决于食品成分本身,且与贮藏条件有关。长期飞行任务需要食品保质期延至3~5年^[24],因此,2008年美国开展了一项食品货架期加速实验研究,实验产品包括一种富含淀粉的土豆制品及一种水果制品。在淀粉食品中,叶酸、泛酸随着时间的延长呈显著降低趋势;此外,风味亦随时间改变,主要是出现酸败味、芳香降低及风味的整体降低。水果制品中VC及叶酸含量随时间延长显著降低,水果颜色逐渐变深^[1,5,24]。

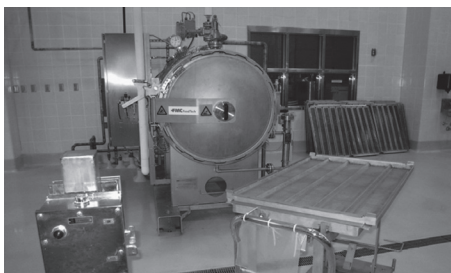


图1 热稳定食品加工装置

Fig. 1 Thermally stable food processing apparatus

飞行乘组航天员依赖航天食品来满足其营养需求,由于航天食品在加工过程中经历热杀菌处理,储运期间经历振动冲击,太空长期贮存期间受到辐射累积效应,航天员在轨食用时,其质构和营养已经有不同程度的损失。为了评价长期航天飞行任务过程中食品的营养素变化,NASA正在开展长期贮藏食品的微量营养素变化研究。目前,已有15个食品样品(热稳定或辐照杀菌)被用来进行研究。结果表明加工后VC含量均降低约47%,VB₁及VA含量有不同程度降低,分别是38%及17%^[25-28]。

航天食品作为营养素的载体,采用适宜的加工和包装技术是保证其营养素化学性质稳定的前提。航天食品工艺改进最有应用潜力的2类技术包括超高压处理和微波灭菌,应用这些技术有助于维持食品的天然新鲜度及营养品质,延长保质期^[29-30]。

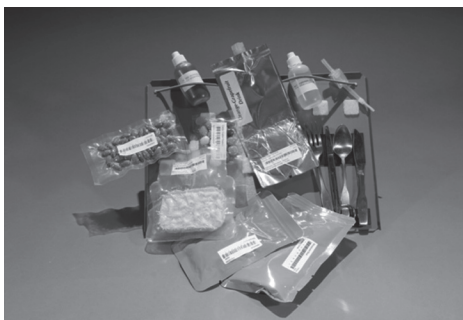


图2 部分航天食品包装^[31]

Fig. 2 Space food package samples^[31]

同时,航天食品包装对食品营养特性的保持至关重要,针对不同类型航天食品已经开发出形式多样的包装,见图2。食品包装新技术的发展为航天食品的研制提供了新的思路。食品抗菌包装可以有效抑制被包装食品中微生物的生长,延长食品的货架期,而应用安全性的天然抗菌剂制备的抗菌包装膜和抗菌纸具有很大的应用前景。将先进的智能化标签技术应用于食品包装,能主动地表征食品的品质,具有科学、客观及直观等优势,有助于提升航天食品的全程安全监控。此外,可降解材料、可食性材料对于减轻空间站餐余垃圾处理负担具有显著的优势,这2种材料的阻隔性及稳定性是重点攻关方向,欧盟Banus项目的目标就是开发新型阻隔性食品包装,并确保其功能性阻隔层的安全性^[32]。

1.2.3 航天食品对航天员的心理支持作用

长期航天飞行带来的心理问题原因主要包括2个方面:1)随着时间的延长带来的逐渐持续的心理问题,某些压力因素是环境固有的,如长期禁闭,与地球、国家、文化、家乡、家庭及传统的感情支持因素的分离;2)在轨发生的及地面发生的不良事件,如家庭事故、乘员间的摩擦、持久的睡眠不足、黑暗的/拥挤的空间站、繁重的工作、延期返回、舱器故障、语言障碍、习俗误解及持续的系统错误等^[4,18]。在上述诸多不良生理及心理问题下,航天食品的作用得到了拓展。根据航天员反映^[22],航天食品是少数乐趣来源之一:他们很清楚还剩下哪些食物、谁吃哪种食物、何时吃;他们制做和食用食物过程中的乐趣不断增加;食物是乘组航天员增加亲和力的重要因素,用餐时可以增进交流。因此,完美的航天食品系统被赋予并满足营养、心理、可接受性及多样性的需求。

1.3 登月及火星探测任务航天食品

1.3.1 登月任务航天食品

阿波罗计划给航天员提供了不同种类的脱水食品、牙膏管状食品及一口大小食品。然而,航天员并不经常在进餐上耗费太多的时间,而且对其中的一些食品类型并不是特别喜欢^[1]。

重返月球项目计划在月面建立生活居住基地,如图3所示。一个居住基地可以将食品的供应种类扩展到包含一些生长较快的绿色蔬菜,能够培养、种植大量不同种类的食物,比如大豆、小麦、花生、稻子等农作物。美国学者研究表明尼罗河罗非鱼是一种营养价值很高的食品原料,无论将其应用于食品再生系统还是开发为航天食品都有很大潜力,可以减轻废物处理负担^[25,35-36]。

月球表面大气中二氧化碳所占的比例高于地球,压强约为55~70 kPa,而不是地球的标准大气压101 kPa。高含量的二氧化碳可以提高许多植物光合作用的速率并增加植物性食物产量。在月球上作为食品来源的植物很

可能是生长在密闭受控空间中的, 氧气、二氧化碳、湿度、温度需要严格控制。同时, 植物在只有地球1/6重力的环境中生长, 低重力环境对月球上农作物的可持续利用程度将是一个挑战^[37]。



图3 月球生活居住基地示意图^[33-34]
Fig. 3 Schematic diagram of life in lunar base^[33-34]

由于农作物的加工与食品的处理技术都被限定在月球进行, 食品的加热和处理迫使食品加工机械低功耗且便于操作。因为受到运载质量和体积的限制, 所有的食品加工机械都必须是多功能的^[31]。

1.3.2 载人火星探测任务航天食品

美俄在火星探测领域走在世界前列, 近年来俄罗斯开展了MARS500载人火星模拟实验, 美国火星探索车成功登陆火星, 航天活动逐渐进入火星时代^[38]。

火星表面温差较大, 大气稀薄, 主要成分为二氧化碳, 还有少量的氮气、氩气和微量水蒸气, 没有氧气, 表面压强约0.6 kPa, 大约相当于地球的1/180。载人火星探测乘组航天员从地球出发到达火星表面需经过6~8个月的飞行, 这期间主要靠预包装食品系统的支持, 乘组航天员到达火星表面后, 驻留在火星表面生活18个月再返回, 期间主要依赖受控生态系统提供食材并加工成可食用的食品, 预包装食品系统作为补充^[3]。因此生命保障系统的研制将以年计(表1)。空气、水、食品及垃圾的设计特性与空间站或月球基地相比, 更加突出循环特征(表2)。

表1 长期空间驻留期间每年每人的消耗品总质量^[18,37]
Table 1 Total mass of consumables during long-term space resident for one-year period^[18,37]

消耗项目	质量/(kg/年)	比例/%
水	10 423	86.1
氧气	305	2.5
食品(干基)	265	2.2
航天员供给	253	2.1
气体	257	2.1
系统维持	606	5.0
合计	12 109	100.0

表2 不同任务阶段空气、水、食品及垃圾设计特性^[18,37]
Table 2 Design features of air, water, foods and garbage for different tasks^[18,37]

项目	空间站	月球基地	火星基地
空气	再补给	再生	再生
水	再补给/循环	循环	循环
食品	储存	大多数储存/一些种植	储存及种植
垃圾	储存	储存	循环

火星表面再生生命支持系统(受控生态生命支持系统)将再生生物与物理化学过程结合起来, 可以通过利用高等植物光合作用生产食品、饮用水及新鲜空气。受控生态生命支持系统生产的高等植物将是航天员的主要食材^[39], 包括小麦、土豆、甜土豆、大豆、花生、大米及干豆; 凉拌菜食材包括西红柿、胡萝卜、甜菜、菠菜、卷心菜、洋葱、生菜及小萝卜。食品加工设备要采用多种用途设计, 可自动化或人工控制, 需要考虑的因素主要包括安全、功率、体积、用水量、空气污染、废物产生量、清洁及噪音等。NASA正在研制一种多功能果蔬处理系统^[40-41], 功能主要包括切削、加热、分离及浓缩。以西红柿为例, 可以加工成西红柿片、西红柿汁、西红柿酱、西红柿汤等; 同时也可加工胡萝卜、甜菜等其他蔬菜。

2 长期飞行航天营养与食品研究面临的技术挑战

2.1 登月与长期驻月

现阶段的短期和中长期载人航天活动中, 航天食品是从地面携带或定期运送, 以目前的技术和经济是可行的。月球往返和短期驻留可沿用这种方式, 但对未来建立月球基地等长期载人航天任务, 现有的供给方式将不再适用, 食品系统必然从现有的供给方式向依靠生物再生食品系统过渡, 以保障长期飞行任务的需要。新型高效登月食品及饮水保障技术、月球基地生物再生食品加工装备、月面餐(厨)余垃圾处理技术等研究是面临的主要课题。其中高效登月食品及饮水保障技术需要进行新型登月食品、饮水及其伺服装置攻关, 以满足地月往返、月面活动期间饮食供给任务的需求。此外, 针对地月往返长期飞行及月面活动面临的多种空间特因环境, 需要开发配套的功能食品, 如抗疲劳、抗辐射、抗月尘危害、维护肠道菌群平衡等。月球基地生物再生食品加工装备则需满足密闭、便于操作维护、低能耗、多功能及卫生等基本性能要求。

2.2 载人火星探测

火星是人类载人航天活动的下一站, 这一准备期至少需要10~15年, 在此期间现有的食品及饮水加工技术将取得重大的进步: 如先进的生物再生技术将为乘组航天员提供新鲜蔬菜, 保证天然维生素的供给量; 先进的

生物再生生保系统将集成生态学、微生物学、毒理学、卫生学和营养学等,积极发挥人、动物、植物及微生物的能动性,使闭路循环更加完善,能够提供让航天员满意的食物和饮水,并能够有效清除垃圾,保证微生物安全。随着新辅料和新技术的不断开发,营养素透皮吸收的应用将有着广阔的前景,出舱活动、执行繁重的星面任务或者消化系统疾患等导致饮食障碍时,透皮吸收可以作为饮食保障技术的有效补充。

3 结 语

空间站、载人登月及载人火星探测等长期载人航天飞行环境下,机体营养代谢发生了明显的变化,需要立足于这些变化开展航天营养代谢研究。为乘组航天员提供营养均衡、保质期长、感官接受性好、利用度高的航天食品是保障其健康和高效工作的重要前提。月球基地或火星基地航天员食物保障模式需要从地面携带方式向就地取材加工转变,如何实现月面或火星表面的食物种植及食材综合加工利用技术是未来航天食品保障技术研究的重要课题。

参考文献:

- [1] SUN G S, TOU J C, YU D, et al. The past, present, and future of National Aeronautics and Space Administration spaceflight diet in support of microgravity rodent experiments[J]. *Nutrition*, 2014, 30(2): 125-130. DOI:10.1016/j.nut.2013.04.005.
- [2] ANDERSON A P, FELLOWS A M, BINSTED K A, et al. Autonomous, computer-based behavioral health countermeasure evaluation at HI-SEAS Mars analog[J]. *Aerospace Medicine & Human Performance*, 2016, 87(11): 912. DOI:10.3357/AMHP.4676.2016.
- [3] ŠIKL R, ŠIMEČEK M. Confinement has no effect on visual space perception: the results of the Mars-500 experiment[J]. *Attention, Perception & Psychophysics*, 2013, 76(2): 438-451. DOI:10.3758/s13414-013-0594-y.
- [4] MUNEVAR G. Space exploration and human survival[J]. *Space Policy*, 2014, 30(4): 197-201. DOI:10.1016/j.spacepol.2014.10.002.
- [5] SMITH S M, RICE B L, DLOUHY H, et al. Assessment of nutritional intake during space flight and space flight analogs[J]. *Procedia Food Science*, 2013, 2: 27-34. DOI:10.1016/j.profoo.2013.04.006.
- [6] BERGOUIGNAN A, STEIN T P, HABOLD C, et al. Towards human exploration of space: the THESEUS review series on nutrition and metabolism research priorities[J]. *npj Microgravity*, 2016, 2: 1-8. DOI:10.1038/npjmgrav.2016.29.
- [7] EIRMAN L. Nutritional assessment[J]. *Veterinary Clinics of North America Small Animal Practice*, 2016, 46(5): 855-867. DOI:10.1016/j.cvsm.2016.04.012.
- [8] CRUCIAN B, STOWE R P, MEHTA S, et al. Alterations in adaptive immunity persist during long-duration spaceflight[J]. *npj Microgravity*, 2015, 1: 1-10. DOI:10.1038/npjmgrav.2015.13.
- [9] CERVANTES J L, HONG B Y. Dysbiosis and immune dysregulation in outer space[J]. *International Reviews of Immunology*, 2015, 35(1): 339-342. DOI:10.3109/08830185.2015.1027821.
- [10] LANG T, LEBLANC A, EVANS H, et al. Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight[J]. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2004, 19(6): 1006-1012. DOI:10.1359/JBMR.040307.
- [11] JONES H W, KLISS M H. Exploration life support technology challenges for the crew exploration vehicle and future human missions[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 45(7): 917-928. DOI:10.1016/j.asr.2009.10.018.
- [12] HORNECK G, FACIUS R, REICHERT M, et al. HUMEX, a study on the survivability and adaptation of humans to long-duration exploratory missions, part I: lunar missions[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(11): 2389-2401. DOI:10.1016/S0273-1177(03)00568-4.
- [13] HART S G, STAVELAND L E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research[J]. *Advances in Psychology*, 1988, 52: 139-183. DOI:10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [14] SONG B S, PARK J G, PARK J N, et al. High-dose processing and application to Korean space foods[J]. *Radiation Physics & Chemistry*, 2009, 78(7/8): 671-674. DOI:10.1016/j.radphyschem.2009.03.073.
- [15] SONG B S, PARK J G, PARK J N, et al. Korean space food development: ready-to-eat *Kimchi*, a traditional Korean fermented vegetable, sterilized with high-dose gamma irradiation[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 44(2): 162-169. DOI:10.1016/j.asr.2009.03.032.
- [16] GOMAR-SERRANO J A, CASTILLO S D, BILBAO-CERC S F L. Food in manned spaceflight: from Gemini Program to the ISS/Shuttle programs[J]. *Revista Espanola de Nutricion Humana Y Dietetica*, 2015, 19(2): 116-123. DOI:10.14306/renhyd.0.0.116.
- [17] SPRADLEY J, RODE C, BLUNK B, et al. Cellular therapeutics freezer storage space limited by documentation issues[J]. *Biology of Blood and Marrow Transplantation*, 2014, 20(2): S120. DOI:10.1016/j.bbmt.2013.12.178.
- [18] SMITH C M. An adaptive paradigm for human space settlement[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 119: 207-217. DOI:10.1016/j.actaastro.2015.11.017.
- [19] BUCKLEY N D, CHAMPAGNE C P, MASOTTI A I, et al. Harnessing functional food strategies for the health challenges of space travel: fermented soy for astronaut nutrition[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(7/8): 731-738. DOI:10.1016/j.actaastro.2010.08.023.
- [20] CUCINOTTA F A, TO K, CACAO E. Predictions of space radiation fatality risk for exploration missions[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2017, 13: 1-11. DOI:10.1016/j.lssr.2017.01.005.
- [21] VENIR E, DEL TORRE M, STECCHINI M L, et al. Preparation of freeze-dried yoghurt as a space food[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(2): 402-407. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2006.02.030.
- [22] KERWIN J, SEDDON R. Eating in space: from an astronaut's perspective[J]. *Nutrition*, 2002, 18(10): 921. DOI:10.1016/S0899-9007(02)00935-8.
- [23] ZWART S R, KLOERIS V L, PERCHONOK M H, et al. Assessment of nutrient stability in foods from the space food system after long-duration spaceflight on the ISS[J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(7): 209-217. DOI:10.1111/j.1750-3841.2009.01265.x.
- [24] CATAURO P M, PERCHONOK M H. Assessment of the long-term stability of retort pouch foods to support extended duration spaceflight[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(1): 29-39. DOI:10.1111/j.1750-3841.2011.02445.x.
- [25] PERCHONOK M H, COOPER M R, CATAURO P M. Mission to Mars: food production and processing for the final frontier[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2012, 3(1): 311-330. DOI:10.1146/annurev-food-022811-101222.

- [26] ŠOLCOVÁ I P, ŠOLCOVÁ I, STUHLÍKOVÁ I, et al. The story of 520 days on a simulated flight to Mars[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 126: 178-189. DOI:10.1016/j.actaastro.2016.04.026.
- [27] COOPER M, DOUGLAS G, PERCHONOK M. Developing the NASA food system for long-duration missions[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(2): 40-48. DOI:10.1111/j.1750-3841.2010.01982.x.
- [28] GOYAL S, GOYAL G K. Development of intelligent computing expert system models for shelf life prediction of soft mouth melting milk cakes[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2011, 25(9): 41-44. DOI:10.5120/3058-4170.
- [29] SASTRY S K, JUN S, SOMAVAT R, et al. Heating and sterilization technology for long-duration space missions[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1161(1): 562-569. DOI:10.1111/j.1749-6632.2009.04088.x.
- [30] LI X, FARID M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 182: 33-45. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.02.026.
- [31] TEIXEIRA A A, WELT B A, SINGH R P. ALS-integrated food/fiber production and packaging system for long-term space mission to Mars[J]. *International Conference on Environmental Systems*, 2004, 2: 2522-2530. DOI:10.4271/2004-01-2522.
- [32] OTONI C G, ESPITIA P J P, AVENA-BUSTILLOS R J, et al. Trends in antimicrobial food packaging systems: emitting sachets and absorbent pads[J]. *Food Research International*, 2016, 83: 60-73. DOI:10.1016/j.foodres.2016.02.018.
- [33] HASHIMOTO T, HOSHINO T, TANAKA S, et al. Introduction to Japanese exploration study to the moon[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 104(2): 545-551. DOI:10.1016/j.actaastro.2014.06.031.
- [34] SPUDIS P D. The moon as an enabling asset for spaceflight[J]. *Space Policy*, 2015, 32: 9-10. DOI:10.1016/j.spacepol.2014.09.002.
- [35] KITAYA Y, HIRAI H, WEI X, et al. Growth of sweetpotato cultured in the newly designed hydroponic system for space farming[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(5): 730-735. DOI:10.1016/j.asr.2007.09.005.
- [36] HE J I E. Farming of vegetables in space-limited environments[J]. *Cosmos*, 2015, 11(1): 21-36. DOI:10.1142/S0219607715500020.
- [37] WAMELINK G W W, FRISSEL J Y, KRIJNEN W H J, et al. Can plants grow on Mars and the moon: a growth experiment on Mars and moon soil simulants[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(8): e103138. DOI:10.1371/journal.pone.0103138.
- [38] SALOTTI J M, HEIDMANN R. Roadmap to a human Mars mission[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 104(2): 558-564. DOI:10.1016/j.actaastro.2014.06.038.
- [39] ORWIG J. Cultivating salt-loving microbes on Mars[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2014, 95(45): 416-417. DOI:10.1002/2014EO450014.
- [40] VOIT D C, SANTOS M R, SINGH R P. Development of a multipurpose fruit and vegetable processor for a manned mission to Mars[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(2): 230-238. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.06.035.
- [41] RALPHS M, FRANZ B, BAKER T, et al. Water extraction on Mars for an expanding human colony[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2015, 7: 57-60. DOI:10.1016/j.lssr.2015.10.001.