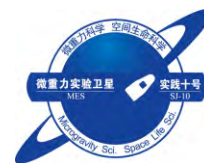


微重力下的细胞生长与物质运输¹⁾

孙树津 陈 勤 王成之 李 宁 吕东媛 龙 勉²⁾

(中国科学院力学研究所, 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190)



摘要 空间微重力条件可引起显著的人体生理变化, 细胞水平的研究是认识其机制的重要环节. 微重力对生命活动的影响主要是由于重力变化后生物体内外的力学环境变化引起的, 失重本身可能引起细胞组织结构的应力状态变化, 失重后流体行为的改变也可能造成物质交换条件的变化进而影响生物体的新陈代谢和生长. 从微重力下细胞生长与物质运输条件依赖性的规律出发, 以生物力学的视角探索上述问题, 有助于理解重力对于生命活动的意义.

关键词 微重力, 细胞, 生长, 物质运输

中图分类号: Q274 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-16-071

引 言

地球生命的整个演化历史中, 重力基本上是一个常量. 因此, 生命体的所有结构、功能均已适应了这一物理条件. 空间探索活动把人类以及其他地球生物带到了微重力环境下, 重力成为变量. 目前已发现, 开展空间活动的宇航员有骨质流失、肌肉萎缩、免疫功能下降和心血管系统异常等一系列生理改变, 足以影响宇航员的生活质量和工作能力 (尤其是长期飞行, 甚至可能引起不可逆的变化). 重力变化对生命活动的影响主要是由于失重后生命体内外的力学环境变化引起的, 从机理上则需要探求细胞、组织层次的力学 - 生物学和力学 - 化学耦合机制^[1-4].

一方面, 失重本身可能引起细胞 - 组织结构的应力状态变化, 可称之为重力变化的直接作用; 另一方面, 失重后对流、沉降等行为的显著改变可能造成物质交换的变化进而影响生命体的新陈代谢, 可称之为重力变化的间接作用. 尽管空间细胞生物学实验已有一些先例, 但在科学问题上, 亟需探索上述两种作用的区分与联系, 阐明微重力影响细胞生命活动的规律. 而在技术层面上, 微重力环境的特殊力学

状态使得常规的生物学研究手段往往难以应用; 开发先进和经济的空间实验技术, 分离实验技术本身和重力条件变化的影响, 摒除伪实验数据从而合理解释物质运输对细胞生物学响应的影响, 则是空间细胞生物实验研究面临的技术难题^[5-9]. 因此, 本项目聚焦于微重力下细胞生长的物质运输规律研究, 力图从生物力学的角度认识和解决上述问题.

1 空间实验的研究内容

本实验的研究内容:

(1) 微重力下内皮细胞培养的物质运输条件依赖研究. 在微重力环境下, 利用输送培养液的泵阀系统和培养器腔室结构设定和调控流动条件与物质交换条件, 记录细胞显微观察图像, 并通过收集细胞培养液上清, 细胞在线分步化学固定以进行回地分析等手段, 获得不同物质运输条件下的内皮细胞形态图像数据、细胞葡萄糖及氧代谢数据、细胞骨架荧光染色数据、基质分泌数据以及增殖动力学数据. 拟解决的关键科学问题为: 空间微重力环境下内皮细胞生长、代谢、结构重组及功能分泌等生物学过程对物质运输条件依赖规律的认识.

本文于 2016-03-11 收到.

1) 中国科学院“空间科技”先导专项课题资助项目 (XDA04020219, XDA04078900, XDA04073800).

2) E-mail: mlong@imech.ac.cn

引用格式: 孙树津, 陈勤, 王成之等. 微重力下的细胞生长与物质运输. 力学与实践, 2016, 38(2): 221-224

Sun Shujin, Chen Qin, Wang Chengzhi, et al. Cell growth and mass transportation under microgravity. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 221-224

(2) 微重力下骨髓间充质干细胞分化的物质运输条件依赖研究. 在微重力环境下, 利用输送培养液的泵阀系统和培养器腔室结构设定和调控流动条件与物质交换条件, 记录细胞显微观察图像, 并通过收集细胞培养液上清, 细胞在线分步化学固定以进行回地分析等手段, 获得不同物质运输条件下的骨髓间充质干细胞形态图像数据、细胞葡萄糖及氧代谢数据、细胞骨架荧光染色数据、肝向分化数据. 拟解决的关键科学问题为: 空间微重力环境下骨髓间充

质干细胞代谢、结构重组、定向分化等生物学过程对物质运输条件依赖规律的认识.

(3) 发展可用于上述科学问题的新型空间有效载荷. 实验装置的核心是自行设计、研制的新型物质运输可控的微流控空间细胞培养系统, 主要利用泵阀系统控制的流体网络为细胞培养器提供设定的物质交换条件(图1), 以溶液供应、气体交换和温度/湿度控制等手段, 构建可与地面常重力条件定量对比的细胞培养环境, 达到分析微重力下细胞生物学过

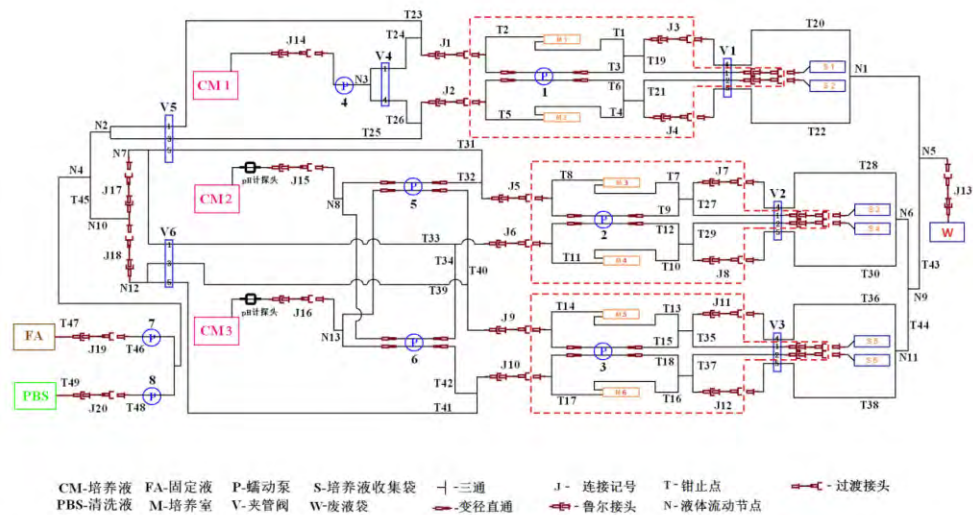


图1 实验装置的细胞培养器及泵阀系统流体控制网络设计图

程对物质运输条件依赖规律的目的. 另外, 使用同样的实验装置进行地面对比实验, 以分离、分析重力条件的差别产生的影响.

2 地面对比试验

已进行的地面对比试验结果包括:

目前利用空间实验装置(图2和图3)已进行了若干次地面对比试验, 分别检测了细胞骨架结构



图3 实验装置内部



图2 空间实验装置外观

(图4)、细胞代谢与分化(图5)等生物学指标, 并测试了实验装置的工程控制参数(图6). 细胞本身作为生命系统的基本层次, 其结构和功能也是十分复杂的, 在同样控制条件下空间实验可能会与地面实验产生差别, 如细胞的形态结构、代谢程度、增殖速率、分化功能等变化, 需要经过多重对照实验综合分析来判断其意义.

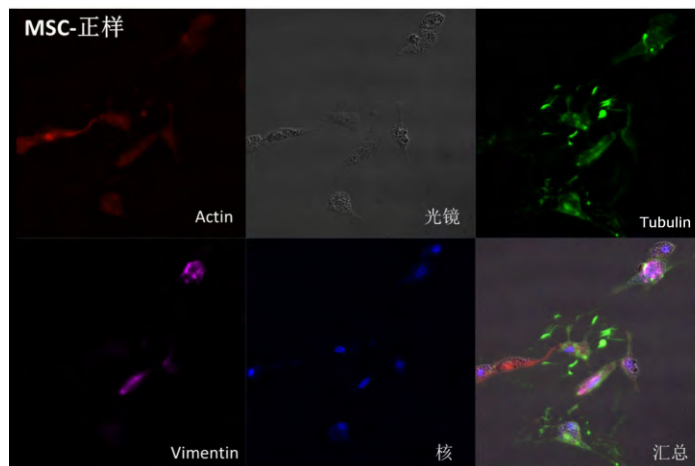


图 4 利用空间实验装置正样进行地面对比试验获得的骨髓间充质干细胞 (mesenchymal stem cell, MSC) 样品在激光共聚焦显微镜下的细胞骨架微丝蛋白 (actin); 细胞骨架微管蛋白 (tubulin); 细胞骨架中间丝蛋白 (vimentin) 图像

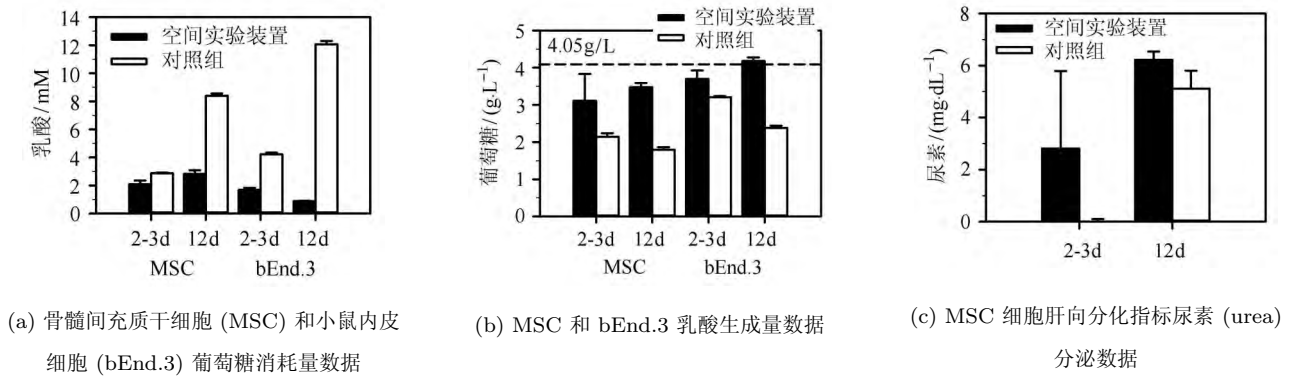


图 5 利用空间实验装置进行地面对比试验所获得的细胞培养上清的代谢情况测试数据

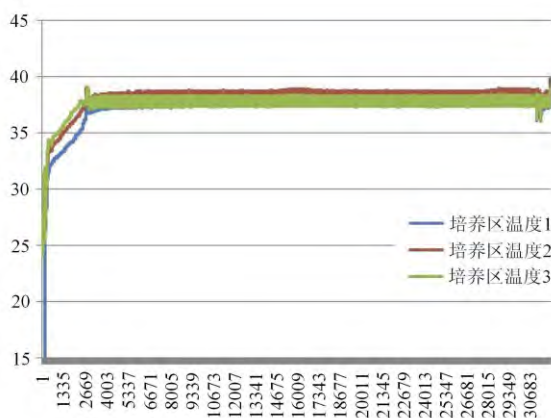


图 6 空间实验装置细胞培养室的温控性能分析结果

3 展望

本次空间科学实验期待验证所研制的新型空间细胞培养系统在空间生物力学研究方面的能力, 获得微重力下细胞生长、分化等生物学过程物质运输

条件依赖性的空间实验数据, 认识微重力下细胞物质代谢、结构重组以及增殖与定向分化对物质传输条件依赖的规律, 分析重力变化的直接作用与间接作用.

上述实验数据的成功获得, 将为认识物质运输调控动物细胞响应真实空间微重力环境的生物学响应提供科学依据, 促进解决现有国内外同类实验数据不一致、难以相互比较的状况, 推动动物细胞重力响应规律认识的实质进展和相关实验技术的进步, 为了解宇航员空间生理变化的机理和研究应对措施提供科学与技术支撑.

致谢 感谢课题组陈娟、高宇欣、张潇、周吕文、陈深宝, 以及张帆、杨浩、张晨对项目的贡献.

参考文献

1 Hu WR, Zhao JF, Long M, et al. Space program SJ-10 of

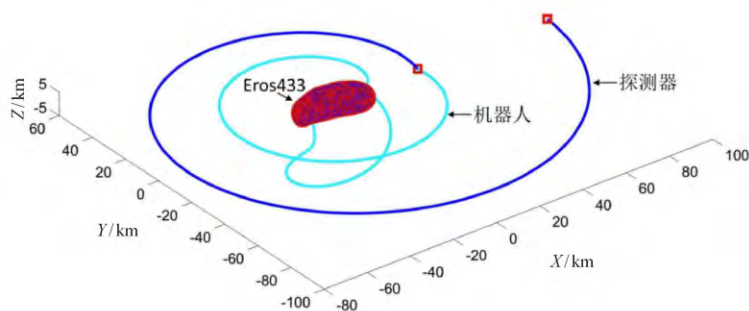
- microgravity research. *Microgravity Sci Technol*, 2014, 26: 159-169
- 2 龙勉. 如何在地球表面模拟空间微重力环境或效应? —— 从空间细胞生长对微重力响应谈起. *科学通报*, 2014, 59(20): 2004-2015
 - 3 上官冰, 孙树津, 高宇欣等. 空间细胞生物反应器技术研究进展. *医用生物力学*, 2014, 29(6): 582-588
 - 4 张晨, 吕东媛, 孙树津等. 地基微重力效应模拟影响骨髓间充质干细胞生物学行为及其调控机理. *医用生物力学*, 2014, 29(3): 285-291
 - 5 Long M, Wang YR, Zheng HQ, et al. Mechano-biological coupling of cellular responses to microgravity. *Microgravity Sci Technol*, 2015, 27: 505-514
 - 6 Wang CZ, Li N, Zhang C, et al. Effects of simulated microgravity on functions of neutrophil-like HL-60 cells. *Microgravity Sci Technol*, 2015, 27: 515-527
 - 7 Sun SJ, Gao YX, Shu NJ, et al. A novel counter sheet-flow sandwich cell culture system to unravel cellular responses in space. *Microgravity Sci Tech*, 2008, 20(2): 115-120
 - 8 Long M, Sun SJ, Huo B, et al. Biomechanics on cell responses to microgravity. In: Hu WR, ed. *Advances in Microgravity Sciences*. Kerala: Transworld Research Network Press, 2009
 - 9 龙勉, 孙树津, 霍波. 第8章: 空间生物技术. 见: 胡文瑞主编. *微重力科学导论*, 北京: 科学出版社, 2010

(责任编辑: 刘希国)

第7届全国空间轨道设计竞赛题目

甲组题目:

背景设定为不规则形状小行星 (Eros 433) 表面巡游探测以及小行星重力场精密探测任务 (如下图). 该任务由 1 颗探测器和 3 颗完全相同的机器人在 30 天内协同完成. 期望通过合理设计探测器和 3 颗机器人的飞行轨道, 从而使得机器人所能探测的小行星表面区域最大化, 并设法让探测器与 3 颗机器人的总燃料消耗质量最小化.



乙组题目:

背景设定为近地轨道卫星编队的构型重构任务. 假定一颗主星携带 5 颗完全相同的从星运行在高度 400km 的近地圆轨道上, 利用这 5 颗从星需要依次构建的目标构型有 (4 种): 同轨道跟飞/领飞构型、平面椭圆构型、当地水平面投影圆构型和三维空间圆构型.