

贾谊,郭宇,李志利,等. 持续性高+Gz 加速度生理响应的动物实验研究进展[J].中国实验动物学报, 2019,27(5):668-672.
Jia Y,Guo Y,Li ZL, et al. Progress in animal experimental research on the physiological response to persistent high + Gz acceleration [J]. Acta Lab Anim Sci Sin,2019,27(5):668-672.
Doi:10.3969/j.issn.1005-4847.2019.05.019

持续性高+Gz 加速度生理响应的动物实验研究进展

贾谊¹,郭宇¹,李志利²,刘书娟^{2*}

(1. 中北大学体育学院,太原 030051; 2. 中国航天员科研训练中心,航天医学基础与应用国家重点实验室,北京 100094)

【摘要】 本文回顾了高+Gz 暴露对动物心血管、呼吸、中枢神经、内分泌及其他组织器官的影响及生理机制,并讨论了上述研究成果和理论机制向人体推广的可行性。动物实验的结果表明,高+Gz 对机体的整体和各器官局部血液循环都会产生显著影响,从而造成心血管、肺组织、内分泌腺体及脑组织等的超微结构损伤。随着放射免疫及生物化学法、力学有限元模型、基因芯片等方法和技术的应用,将大幅度提高对高+Gz 载荷下的生理应激反应和致病机制的认知程度。

【关键词】 +Gz;高加速度;生理学;动物实验;研究进展

【中图分类号】 Q95-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1005-4847(2019) 05-0668-05

Progress in animal experimental research on the physiological response to persistent high +Gz acceleration

JIA Yi¹, GUO Yu¹, LI Zhili², LIU Shujuan^{2*}

(1.School of Physical and Education, North University of China, Taiyuan 030051, China.
2. China Astronaut Research and Training Center, State Key Laboratory of Space Medicine Fundamentals and Application, Beijing 100094)
Corresponding author: Liu Shujuan. E-mail: liusj2010@126.com

【Abstract】 This study reviewed the effects and physiological response mechanisms of high +Gz exposure on the cardiovascular, respiratory, central nervous and endocrine systems and other tissues and organs, and to discuss if these results and theoretical mechanisms could be adapted to human body. The results showed that high +Gz has a significant impact on the blood circulation in the whole body and various organs, resulting in ultrastructural alterations of the cardiovascular system, lung tissue, endocrine glands and brain tissue, etc. With the application of radioimmunoassay and biochemical method, mechanical finite element model, gene chip and other technologies, better understanding of the physiological stress response and pathogenic mechanism under high +Gz load will be achieved.

【Keywords】 +Gz; hypergravity; physiology; animal experiment; research progress

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

现代高性能战斗机具有高度的灵活性和机动性能,在飞行过程中重力作用经常会产生由头部指向足部的高正加速度(以下简称:高+Gz),并对飞行员的机体产生机械牵拉作用。通常把持续时间超

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2016YFF0203100, 2016YFF0203102)。
Funded by National Key Research and Development Project (2016YFF0203100, 2016YFF0203102).
[作者简介] 贾谊(1980—),男,副教授,博士,主要从事运动生物力学研究。Email:jiayi7534@sina.com
[通信作者] 刘书娟(1982—),女,助理研究员,博士,专业领域为失重生理学。Email:liusj2010@126.com

过 1 s 以上的正加速度称为“持续性正加速度”^[1]。现代战机产生的这种高持续性加速度的特点是增长速度快(6 G/s),作用时间长(15 ~ 45 s),且 G 值高(+9 Gz),由此带来的生理应激反应,例如:血液动力学改变,防护措施和抗加速度动作的影响,尤其是飞行员经受的重复性多次高 G 载荷作用,都会对机体产生不良影响。

为了阐明高+Gz 对机体产生的病理生理学变化以及预防由高+Gz 带来的过度生理应激反应,科研工作者们进行了大量的动物实验研究,例如,在 1920 年到 1945 年之间进行了许多动物实验,以确定高+Gz 引起意识丧失的原因,并促使了抗荷服等装备的出现^[2]。此外,随着科技的进步,用于高+Gz 暴露的实验设备推陈出新,比如通过单片机控制的动物离心机可以有效的模拟飞行过程中的过载曲线和控制载荷大小,下体负压技术能很好地模拟高+Gz 产生的生物动力学效应,且简单易行。这些都为我们进一步了解高+Gz 暴露的生理应激响应及其机制提供了条件。本文主要对高+Gz 环境下暴露的动物实验研究进行综述,阐述高+Gz 作用对动物继而推演到人类的影响及其机制,这对于保证飞行员的生命安全和减少身体伤害具有重要意义。

1 高+Gz 对心血管功能的影响

1.1 高+Gz 对血液动力学的影响

高+Gz 可导致血液再分布,分布程度和由此导致的血液动力学变化由载荷的方向决定。一般情况下,+Gz 方向影响最大,而+Gx 方向影响最小。

由于主要血管沿身体纵轴的方向分布,当载荷从头到脚(+Gz)起作用时,血液质量从身体的上部转移到腹腔和下肢的血管中。这种血液的重新分配会导致局部血压发生变化。具体表现为:在位于心脏水平以下的血管中,血压增加;在位于心脏水平以上的血管中,血压减小。Laughlin 等^[3]对狒狒的实验观察到,当载荷超过+5 Gz 后,主动脉血流速度会明显降低,心脏水平动脉压降至基线值,脑血流减少;Burns 等^[4]发现,当载荷超过+7 Gz 时,猪的眼动脉压会降至-17 mmHg。

在局部血液循环方面,大部分组织、器官内部的血管网络,在各个方向上是均匀分布的。因此,无论载荷方向如何,都会在器官内部产生血液质量的重新分布,并可能导致局部循环障碍。另外,不同组织对高+Gz 加速度的耐受程度也有很大区别,

对兔子的实验表明,在高+Gz 作用下,软脑膜血液循环的适应性明显高于肠系膜,保持了相对恒定的良好灌注^[5],证明中枢神经系统在高+Gz 影响下仍能保持意识清醒的机制。目前,对实验动物血管的三维可视化建模技术已逐渐成熟^[6],使深入研究高+Gz 对动物血液动力学的影响提供了可能。

1.2 高+Gz 导致的心率变化

在高+Gz 作用下,血液重量向下半身转移,主动脉血压下降,压力感受器会反射性地引起心率增加。Burton 等^[7]发现,高+Gz 暴露下,猪的心率可以达到 200~240 次/min。

除心率增加外,高+Gz 会导致明显的期外收缩现象^[8]。这种期外收缩在房室收缩期最常见,导致来自心房的血液不会被泵入心室,而是回到静脉中,从而阻碍了静脉的排空,减小了每搏输出量和每分输出量。

1.3 高+Gz 对心血管系统超微结构的影响

大量动物实验结果表明,高+Gz 可导致心脏超微结构损伤。当载荷为+5Gz 时,会导致大鼠的心肌损伤^[9];当载荷为+10 Gz 时,大鼠心肌细胞基质出现水肿,肌原纤维离散^[10],线粒体呼吸链功能障碍,心肌收缩时的能量供应出现抑制作用^[11]。当载荷加大至+14~18 Gz 时,猪的心肌细胞线粒体出现聚集、易位和溶酶体破裂等现象^[12]。但是,也有观点认为,动物实验结果并不能直接应用于人体^[13]。主要原因是人和动物形态结构方面的差异,以及暴露实验条件有很大区别,例如:主动与被动参与,人可以随时终止超过耐受度的载荷等。另外,有部分人体实验结果并不支持+Gz 暴露会对人体心脏功能结构产生影响^[14-16]。

最新的研究表明,对大鼠施加由+1Gz 增至+10Gz 的载荷 30 s,可导致高脂血症大鼠的血管内皮功能障碍^[17],而银杏叶提取物可以减轻重复+Gz 暴露合并高脂饮食导致的主动脉炎症损伤^[18]。

2 高+Gz 对呼吸系统的影响

高+Gz 对呼吸系统的影响主要表现为呼吸生物力学的变化。除引发呼吸困难、胸痛等症状外,还会导致咯血和气胸等损伤。

高+Gz 的作用效果表现为肺尖部出现撕裂伤,而肺底部受到挤压导致气道关闭,甚至诱发肺不张。对大鼠施加+7Gz 载荷后发现,肺下叶出现毛细血管扩张,肺上页肺泡扩张,并出现组织性贫血^[19]。

高+Gz 作用还加重了正常直立肺中存在的通气和灌注不均匀现象。左丛林等^[20]将家兔施加 +5 Gz/6 min、+8 Gz/5.4 min 和 +10 Gz/4.1 min 作用后发现,肺泡毛细血管破裂,肺泡腔内有渗出液及红细胞。随着+Gz 的增长,肺上部可通气而不灌注的体积和肺底部有灌注而无通气的体积都将逐渐增大。

3 高+Gz 对中枢神经系统的影响

许多动物实验一直在关注高+Gz 对中枢神经系统(CNS)的影响。早期研究已经证实,高+Gz 会增加运动的反应时间,并延长对声光信号的潜在响应期^[21]。

高+Gz 对动物脑电(EEG)活动的影响也是学者们关注的重点内容。+2~3.5Gz 载荷会导致猫和狗 EEG 快波的频率和幅度显著增加,并对慢波产生抑制作用^[22]。Lukatch 等^[23]通过对大鼠的实验观察到,当载荷 $\leq$ +10Gz 时,对 EEG 活动几乎没有影响;在+15~17.5 Gz 时,记录到 δ 波和尖波的出现,并且 EEG 振幅降低;在+20~22.5Gz 时,记录到棘波出现;当载荷到达+25Gz 时,EEG 信号被拉平,脑电活动被完全抑制。

高+Gz 对 CNS 功能的负面影响机制目前尚未明确,大多数学者认为与大脑缺血缺氧导致的乳酸堆积有关^[24]。进一步研究证实,与大脑皮层相比,海马区对缺血缺氧更为敏感^[25]。但有学者认为,造成 CNS 功能下降与脑组织在高+Gz 下的形变有关。Guillaume 等^[26]曾利用有限元方法测量了暴露过程中的脑变形后发现,高+Gz 引起的牵引力、剪切力和压缩应力增加主要发生在小脑半球的基底部分周围,并会对正常的神经细胞功能形成干扰。

4 高+Gz 对内分泌功能的影响

4.1 高+Gz 对肾上腺分泌功能的影响

有证据证明,高+Gz 暴露往往会伴随着应激反应,典型的是交感肾上腺和垂体肾上腺系统的激活^[27]。就持续时间而言,一次性急性高+Gz 会导致大鼠血液中肾上腺皮质激素(ACTH)皮质醇的合成增加^[28]。另外,对猪的研究发现,血浆中儿茶酚胺的分泌量随着+Gz 加速度的增加而增加^[29]。血浆儿茶酚胺水平增高,有助于机体对抗+Gz 对血流动力学的影响,但有可能造成心肌耗氧增加及诱发心血管损伤。目前,尚未有尿液中肾上腺素含量的变化与高+Gz 加速度之间相关性的动物实验报道。

对形态学和组织功能的研究结果表明,高+Gz 会导致大鼠肾小球毛细血管内皮细胞饮泡增多,足细胞基质、线粒体和肾小管上皮肿胀^[30]。长期和反复高+Gz 对肾上腺形态学影响的动物实验研究未见报道,但有研究指出,在+9 Gx 方向连续暴露 10 d 后,大鼠肾上腺相对重量增加 2.3 倍,肾上腺皮质的相对面积增加了 8.14%,而髓质的相对面积减少了 56.43%^[31]。

有学者认为,关于高+Gz 对肾上腺分泌功能的影响机制,在很大程度上与情绪和焦虑有关^[32]。虽然上述结论可以证明,高+Gz 会对肾上腺产生形态学方面的影响,但还缺乏对超微结构变化的研究证据。另外,肾上腺激素释放量的增加又会对皮质和髓质的形态产生影响,因此很难说清两者的先后关系。

4.2 高+Gz 对垂体及其他腺体分泌功能的影响

垂体对高+Gz 作用的反应较为复杂。Feller 等^[33]研究发现,动物在离心机旋转 1~2 h 后,血浆中的皮质类固醇含量增加 4~7 倍,认为可能是垂体分泌的促肾上腺皮质激素增加导致。虽然上述结果表明,垂体激素的分泌活动在机体对抗高+Gz 过程中具有重要作用,但 Polis 将大鼠垂体切除后发现,在高+Gz 环境中,大鼠的存活率提高了 300%,而切除肾上腺的大鼠存活率下降了 60%^[34]。对上述现象的解释认为,对垂体和甲状腺的切除抑制了动物对生长发育等所需能量的长期需求,转而将机体能量集中于对抗高+Gz 加速度环境,但目前支持这种假设的证据并不充分。

5 高+Gz 对其他组织器官功能的影响

最新的研究表明,高+Gz 作用会导致大鼠胃液量减少,主要与肾上腺素调节有关,但对胃泌素的分泌没有影响^[35]。高+Gz 作用还会导致狒狒肝血流量明显减少^[3],对大鼠肝组织造成结构损伤^[36],增加肝组织内一氧化氮合酶(eNOS)活性,触发肝的自我保护机制启动^[37]。另外,高+Gz 暴露还会增加大鼠肠道黏膜通透性,破坏大鼠肠道屏障^[38]。由高+Gz 作用导致的口腔疾病也是目前学者们关注的重点,朱晓茹等^[39]对兔进行+4~9Gz 持续 10 s 的作用后发现,术后早期进入高+Gz 环境对种植体术后骨结合有不利影响。陈新等^[40]对大鼠进行+5Gz 和+10Gz 的作用后发现,高+Gz 环境与颞颌关节疼痛的外周及中枢传导作用机制相关。最近,我国学者吴

峰等^[41]利用基因芯片技术研究了高+Gz 加速度应激致大鼠脑组织损伤的机制,研究结果对高应激致脑损伤的分子机制的认识具有重要参考价值。

6 结语

综上所述,动物实验的研究结果表明,由高+Gz 产生的血液动力学变化对整体和各器官局部血液循环都会产生显著影响,并且为造成心血管、肺组织、内分泌腺体及脑组织的超微结构损伤提供了直接的证据。但不可否认,某些动物,例如:鼠、兔等的身体结构和脏器位置决定了其在承受高+Gz 环境的各向异性与人类有很大区别,不同研究对高+Gz 载荷动物耐力终点的判断标准也有所不同,对实验结果的可信度会产生一定的影响。解决这些问题,将可以为高+Gz 载荷疾病的治疗与提前预防提供重要的依据。

参 考 文 献(References)

- [1] 耿喜臣, 颜桂定, 金朝. 航空加速度生理学的研究与应用 [J]. 航空军医, 2004, (5): 189-196.
Geng XC, Yan GD, Jin Z. Research and application of aviation acceleration physiology [J]. Flight Surgeon, 2004, 32(5): 189-196.
- [2] Nishida Y, Maruyama S, Shouji I, et al. Effects and biological limitations of +Gz acceleration on the autonomic functions-related circulation in rats [J]. J Physiol Sci, 2016, 66(6): 447-462.
- [3] Laughlin MH, Burns JW, Parnell MJ. Regional distribution of cardiac output in unanesthetized baboons during +Gz stress with and without an anti-G suit [J]. Aviat Space Environ Med, 1982, 53(2): 133-141.
- [4] Burns JW PM, Burton RR. Hemodynamics of miniature swine during +Gz stress with and without anti-G support [J]. J Appl Physiol, 1986, 60(5): 1628-1637.
- [5] 刘尊尧, 黄玉玺, 刘军鹰. 正加速度(+Gz)对兔眼球结膜、肠系膜、皮肤与软脑膜微循环影响及其意义[J]. 航天医学与医学工程, 1990, 3(3): 184-186.
Liu ZY, Huang YX, Liu JY. Effect of positive acceleration (+Gz) on rabbit conjunctiva, mesentery, skin and pia mater microcirculation and its significance [J]. Space Med Med Eng, 1990, 3(3): 184-186.
- [6] 邓健全, 黄海龙. 小型猪肾脏血管的三维可视化建模及意义 [J]. 中国比较医学杂志, 2018, 28(12): 27-31.
Deng JQ, Huang HL. To establish a three dimensional visualization model of miniature pig renal vasculature and its significance [J]. Chin J Comp Med, 2018, 28(12): 27-31.
- [7] Burton RR, Mackenzie WF. Cardiac pathology associated with high sustained +Gz: I. Subendocardial hemorrhage [J]. Aviat Space Environ Med, 1976, 47(7): 711-717.
- [8] Calvin M, Gazenko OG. Ecological and physiological bases of space biology and medicine [M]. Washinton, D. C.: National Aeronautics and Space Administration; 1975.
- [9] Manabe T, Maruyama S, Takahata T, et al. High +Gz force causes cardiac microinjuries in rats without anti-G protection [J]. J Natl Def Med Coll, 2010, 35(2): 88-97.
- [10] 陆江阳, 詹皓, 辛益妹, 等. 重复高+GZ 应激对大鼠心肌超微结构的损伤效应 [J]. 中华航空航天医学杂志, 2001, 12(3): 137-139.
Lu JY, Zhan H, Xin YM, et al. Ultrastructural change of rat heart following repeated high +Gz stress [J]. Chin J Aerospace Med, 2001, 12(3): 137-139.
- [11] Chen LE, Wu F, Xin YM et al. Effect of high sustained plus Gz stress on myocardial mitochondrial ultrastructure, respiratory function, and antioxidant capacity in rats [J]. J Physiol Sci, 2013, 63(6): 457-464.
- [12] Burns JW, Kruyer WB, Celio PV, et al. Cardiac ischemia model for +G(Z) using miniature swine and baboons [J]. Aviat Space Environ Md, 2008, 79(4): 374-383.
- [13] 金朝, 耿喜臣. 持续性+Gz 暴露对心脏结构和功能的影响 [J]. 中华航空航天医学杂志, 2005, 16(2): 152-156.
Jin Z, Geng XC. The effect of sustained +Gz exposure on cardiac structure and function [J]. Chin J Aerospace Med, 2005, 16(2): 152-156.
- [14] Gray GW. Echocardiographic findings in NATO pilots: Do acceleration (+Gz) stresses damage the heart? [J]. Aviat Space Environ Med, 1997, 68(7): 596-600.
- [15] 郑军, 肖晓光, 姚克纯, 等. 不同水平+Gz 暴露后飞行员心脏功能的变化 [J]. 中华航空航天医学杂志, 2004, 15(2): 65-69.
Zheng J, Xiao XG, Yao KC, et al. Changes of cardiac function after different levels of +Gz exposure in pilots [J]. Chin J Aerospace Med, 2004, 15(2): 65-69.
- [16] Iyer EM, Malig H, Dikshit MB. Serum creatine phosphokinase isoenzyme changes in pilots during plus GZ training in human centrifuge [J]. Indian J Aerospace Med, 2000, 44(1): 12-16.
- [17] Yang Z, Ge H, Wang C, et al. Repeated positive acceleration exposure exacerbates endothelial dysfunction in high-fat-diet-induced hyperlipidemic rats [J]. Arch Med Sci, 2017, 13(4): 937-946.
- [18] 杨志晖, 袁海龙, 葛华, 等. 银杏叶提取物对重复+Gz 暴露高脂血症大鼠主动脉 LOX-1 及 NF- κ B 表达的影响 [J]. 空军医学杂志, 2017, 33(6): 361-365.
Yang ZH, Yuan HL, Ge H, et al. Effect of GBE on expressions of LOX-1 and NF- κ B in aortas of hyperlipidemic rats exposed to repeated positive acceleration [J]. Med J Air Force, 2017, 33(6): 361-365.
- [19] 马利铭, 施华强. 加速度对大鼠肺病理形态学影响的研究 [J]. 空军医学杂志, 1991, 7(1): 15-16.
Ma LM, Shi HQ. Effect of acceleration on pathological morphology of rat lung [J]. Med J Air Force, 1991, 7(1): 15-16.
- [20] 左从林, 徐燕红. +Gz 对家兔多器官组织微血管结构及通透

- 性的影响 [J]. 中华航空航天医学杂志, 1994, 5(1): 37-40.
- Zuo CL, Xu YH. Effects of +Gz on microvascular structure and permeability in different tissues of rabbits [J]. Chin J Aerospace Med, 1994, 5(1): 37-40.
- [21] Comery AL, Canfield AA, Wilson RC. The effect of increased positive radial acceleration upon perceptual speed ability [J]. J Aviat Med, 1951, 22(1): 60-64.
- [22] Adey WR, French JD, Kado RT, et al. EEG records from cortical and deep brain structures during centrifugal and vibrational accelerations in cats and monkeys [J]. Ire Trans Biomed Electron, 1961, 8(3): 182-188.
- [23] Lukatch HS, Echon RM, Maciver MB, et al. G-force induced alterations in rat EEG activity: a quantitative analysis [J]. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1997, 103(5): 563-573.
- [24] Maruyama S, Kato K, Sato T, et al. Brain cortical and hippocampal tissue-oxygen concentrations during +Gz stress in anesthetized rats [J]. Aviat Space Environ Med, 2008, 79(1): 236.
- [25] Yang Y, Li Q, Miyashita H, et al. Different dynamic patterns of extracellular glutamate release in rat hippocampus after permanent or 30-min transient cerebral ischemia and histological correlation [J]. Neuropathology, 2001, 21(3): 181-187.
- [26] Guillaume AI, Daniel O, Daniel G, et al. Physiological implications of mechanical effects of +Gz accelerations on brain structures [J]. Aviat Space Environ Med, 2002, 73(3): 171-178.
- [27] Macho L, Kvetnansky R, Fickova M, et al. Effects of exposure to space flight on endocrine regulations in experimental animals [J]. Endocr Regul, 2001, 35(2): 101-114.
- [28] Horii A, Mitani K, Masumura C, et al. Hippocampal gene expression, serum cortisol level, and spatial memory in rats exposed to hypergravity [J]. J Vestib Res, 2017, 27(4): 209-215.
- [29] 张颖, 罗惠兰, 刘兴德, 等. 正加速度暴露对不同程度冠状动脉狭窄小型猪血浆儿茶酚胺和交感神经系统活性的影响 [J]. 中国临床保健杂志, 2016, 19(4): 404-408.
- Zhang Y, Luo HL, Liu XD, et al. Effects of positive acceleration on sympathetic nervous activity and plasma catecholamine in miniature pig model with different coronary artery stenosis [J]. Chin J Clin Health, 2016, 19(4): 404-408.
- [30] 戴雨, 纪桂英, 王喆, 等. 正加速度对大鼠肾功能和组织结构的影响 [J]. 中华航空航天医学杂志, 1997, 8(1): 35-37.
- Dai Y, Ji GY, Wang Z, et al. Effect of +Gz on renal function and structure in rats [J]. Chin J Aerospace Med, 1997, 8(1): 35-37.
- [31] Moroz GA, Kriventsov MA, Kutia SA. Morphofunctional changes in the adrenal glands of juvenile rats systematically exposed to hypergravity [J]. Rus Open Med J, 2018, 7(4): 1-8.
- [32] Goodall M. Sympathoadrenal response to gravitational stress [J]. J Clin Invest, 1962, 41: 197-202.
- [33] Feller DD, Neville ED. Blood glucose and corticosterone changes accompanying altered lipid metabolism induced by exposure to acceleration stress [J]. Proc Soc Exp Biol Med, 1966, 121(1): 223-227.
- [34] Polis BD. Hormonal determinants of mammalian tolerance to acceleration stress [J]. J Appl Physiol, 1961, 16: 211-214.
- [35] Yoon G, Kim HS. Gastric acid response to acute exposure to hypergravity [J]. Oncotarget, 2017, 8(1): 64-69.
- [36] 胡深. 不同+Gz 重复持续暴露对大鼠肝脏组织超微结构损伤及 GRP78 的表达影响 [D]. 合肥: 安徽医科大学; 2015.
- Hu S. The injury of ultrastructure of liver cells and expression of GRP78 in rats liver tissue after different repeated and sustained +Gz exposure [D]. Hefei: Anhui Medical University; 2015.
- [37] Yoon G, Oh CS, Kim HS. Distinctive expression patterns of hypoxia-inducible factor-1 α and endothelial nitric oxide synthase following hypergravity exposure [J]. Oncotarget, 2016, 7(23): 33675-33688.
- [38] 邱杰, 陈英, 唐合兰, 等. 谷氨酰胺对正加速度暴露后大鼠肠道屏障损伤的修复作用 [J]. 航天医学与医学工程, 2016, 29(6): 413-417.
- Qiu J, Chen Y, Tang HL, et al. Effects of glutamine on intestinal barrier damage by +Gz exposure [J]. Space Med Med Engineering, 2016, 29(6): 413-417.
- [39] 朱晓茹, 邓天政, 逢键梁, 等. 高正加速度对口腔种植体骨结合影响的动物实验研究 [J]. 实用口腔医学杂志, 2018, 34(4): 486-490.
- Zhu XR, Deng TZ, Pang JL, et al. An animal study of the influence of high +Gz environment on the osseointegration of dental implants [J]. J Pract Stomatol, 2018, 34(4): 486-490.
- [40] 陈新, 冯岩, 尹音, 等. 重复高+Gz 暴露后大鼠三叉神经脊束核尾侧亚核与三叉神经节内神经活性物质基因表达 [J]. 中华航空航天医学杂志, 2016, 27(1): 55-59.
- Chen X, Feng Y, Yi Y, et al. Repetitive high+Gz exposure of rat trigeminal nucleus nucleus caudal subnucleus and trigeminal ganglion neuroactive substance gene expression [J]. Chin J Aerospace Med, 2016, 27(1): 55-59.
- [41] 吴峰, 陈良恩, 赵安东, 等. 高+Gz 应激致脑损伤的分子机制与低+Gz 预适应的保护作用 [J]. 空军医学杂志, 2014, 30(4): 185-188.
- Wu F, Chen LE, Zhao AD, et al. Study on the molecular mechanism of high +Gz induced brain injury and the protection of low +Gz preconditioning [J]. Med J Air Force, 2014, 30(4): 185-188.