

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2017.22.012

静态姿势图在飞行任务负荷所致的疲劳评估中的作用*

程 珊 马 进 张利利 孙继成 胡文东[△]

(第四军医大学航空航天医学院医学装备教研室 陕西 西安 710032)

摘要 目的:研究静态姿势图在飞行任务负荷所致疲劳评估中的作用。**方法:**30 名符合条件的男性大学生被要求持续进行 4 小时的模拟飞行任务负荷,其静态姿势图及任务负荷成绩将在每小时末进行重复测量。根据变化敏感的参数,静态立位平衡指数将通过主成分分析法进行计算。随后,该指数与任务负荷水平的相互关系将通过曲线拟合进行分析。**结果:**在模拟飞行任务负荷影响下,被试静态姿势控制能力明显下降。静态立位平衡指数随着任务负荷时间的持续而明显增大,并与任务负荷时间存在线性关系($R^2=0.949$);多重任务成绩与任务负荷持续时间之间存在二次曲线的关系($R^2=0.968$),与静态立位平衡指数也呈现相似的二次方曲线关系($R^2=0.976$)。**结论:**静态姿势图与飞行任务负荷水平具有线性关系,能够反映任务负荷所致疲劳水平的大小。

关键词:职业健康;飞行任务;静态姿势图;疲劳评估;主成分分析

中图分类号:R857.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2017)22-4254-05

Role of Static Posturography in Fatigue Assessment due to Flight Tasks Load*

CHENG Shan, MA Jin, ZHANG Li-li, SUN Ji-cheng, HU Wen-dong[△]

(Department of Medical Equipment, School of Aerospace Medicine, the Fourth Military Medical University, Xi'an, Shaanxi, 710032, China)

ABSTRACT Objective: To explore the role of static posturography in the assessment of fatigue due to flight tasks. **Methods:** Thirtymale college students were asked to perform simulated flight tasks consecutively for four hours. Meanwhile their static posturography and tasks performance would be repeatedly measured during the task-load at end of every hour. Based on the changed significantly parameters, the static balance index would be built by principle component analysis. Then its correlation with task-load level would be further analyzed by curve estimation. **Results:** Static postural control declined significantly under effect of simulated flight tasks. With task load sustaining, static balance index increased significantly and correlated linearly with duration of task load ($R^2=0.949$). Besides, there was quadratic relationship between the change of multi-tasks performance and duration of task load ($R^2=0.968$). And correlation of multi-tasks performance with static standing balance level also had been proved to be quadratic ($R^2=0.976$). **Conclusions:** Static posturography correlated linearly with flight task-load level, which could reflect fatigue level caused by task load.

Key words: Occupational healthcare; Flight tasks; Static posturography; Fatigue assessment; Principle component analysis

Chinese Library Classification (CLC): R857.1 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2017)22-4254-05

前言

众所周知,司机的驾驶疲劳可能引起交通事故^[1],而比驾驶活动更危险的飞行任务所致的疲劳状态同样可以造成飞行员任务能力的大幅度下降^[2-6],甚至引起航空事故。因此,快速而准确地检测飞行疲劳尤为重要。尽管常用的疲劳评估量表的信度与效度并不太低^[7,8],但因受到内外环境的影响并不准确^[9]。而有些客观工具如脑电图与心电图^[10]等对于非专业人员并不容易理解。

近年来,静态姿势图作为一种快捷而有效的方法被越来越多的研究者所关注。例如,马进等研究发现 24 小时的睡眠剥夺所致脑力疲劳对睁眼条件下的姿势控制能力影响显著^[11],并且睡眠剥夺时间越长,姿势控制能力越差^[12]。而下肢肌肉训练所

致的体力疲劳也会引起姿势控制能力变差^[13]。另外,国外学者也证实了静态姿势图的指标与睡眠剥夺下的斯坦福嗜睡量表评分^[1]及认知能力成绩^[9]具有一定的相关性。因此,我们假设静态姿势控制能力也有可能在飞行任务负荷所致的疲劳评估中起到一定的作用。

1 对象与方法

1.1 研究对象

从某航空院校学员中随机选取 30 名符合条件的参与者(年龄:19.280 ± 0.843 岁;身高:173.920 ± 4.786 cm;体重:64.240 ± 7.764 Kg;身高体重指数:21.213 ± 2.067 Kg/m²)。所有参与者自述在过去三个月中,自己无骨折、肌肉受伤、前庭功能异常与其他影响姿势控制的病患,并且能够做到在实验期间

* 基金项目:国家自然科学基金与民航联合基金项目(U1333101)

作者简介:程珊(1989-),博士研究生,主要研究方向:飞行员生理心理选拔与评估,电话:15991644602, E-mail: chengshan-2007@163.com

△ 通讯作者:胡文东,博士生导师,研究员,主要研究方向:飞行员生理心理选拔与评估, E-mail: doatea@fmmu.edu.cn

(收稿日期:2016-12-09 接受日期:2016-12-26)

遵守相关实验流程。根据《赫尔辛基宣言》,该研究获得了第四军医大学伦理委员会的许可,而且所有参与者在实验开始前签署了《知情同意书》。

1.2 静态姿势图检测

静态平衡测试仪(EAB-100, Japan^[11]; TETRAX, Israel^[14])可以通过压力传感器记录整个身体压力中心的变化,而后通过计算机处理程序将其转换为身体重心的变化轨迹。基于此重心轨迹,身体晃动的时域与频域指标可以被自动计算出来。这些参数包括重心总轨迹长(Whole path length of body gravity, WPL)、有效面积(Effective area, EA)、压力中心在前后与左右方向上的偏移距离(Mean displacement of COP on the X and Y axis, Mx and My)及其标准偏差(Standard deviation of COP on the X and Y axis, SDx and SDy)、足部的重力分布比例^[11]及在0.01~3.0 Hz 频谱带上身体晃动的程度。

1.3 模拟飞行任务负荷

由于很多不可控的不利因素,在实际飞行活动中研究飞行疲劳是比较困难的。相比而言,地面模拟飞行任务是进行试验的有效方式之一。众所周知,飞行员需要多种的基本操作与认知能力才能完成多样化的飞行任务,单一任务负荷所致的疲劳状态效果并不明显^[15]。因此,本实验采用了联合的模拟飞行任务,包括注意力分配多重任务、斯滕伯格双重任务、飞行耐力任务及飞行团队协作任务。该飞行任务负荷模拟方法已经被证实能够对静态姿势控制能力产生不利影响^[16]。注意力分配多重任务主要模拟飞行员同时应对多个目标的注意力转换能力。此任务要求飞行员同时完成三种主要任务(飞机持续追踪任务、仪表监视任务与突发光点计数任务)和一种辅任务(随机数反应任务)。斯滕伯格双重任务主要考察被试者的短时记忆能力与飞行方向的操控能力。而飞行团队任务则重点模拟飞行活动中飞行人员之间或飞行员与地勤人员之间的协作任务。另外,飞行耐力任务主要通过抗荷动作模拟飞行活动中的生理负荷。根据飞行员的建议,被试者在每小时的模拟飞行任务中需要依次完成三种单人操作任务(每个10分钟)与飞行协作任务(20分钟)。

1.4 实验流程

30名被试者被随机均分为10个小组,每次实验由1个小组参加。在1小时的模拟飞行任务练习后,3名被试者需要持续进行4小时的任务负荷,并记录任务成绩。同时在每小时末,3名被试者的静态平衡功能也需要进行重复测量。在静态立位平衡测试期间,被试者需要赤脚,双足脚跟靠拢、脚尖分开60°、双臂自然下垂置于身体两侧并稳定地直立于海绵垫(30 cm×10 cm×5 cm)的测试平台上^[17]。另外,在实验期间,所有的被试者不允许进行任何与实验无关的活动,例如相互谈笑、饮食等。

1.5 统计学方法

本实验中所有数据的处理都采用SPSS16.0统计软件。重复测量方差分析用来分析任务成绩及静态姿势控制能力的变化。变化显著的静态平衡参数将通过主成分分析法被构建为静态平衡指数。而后,该指数与任务负荷水平的相互关系将通过曲线拟合分析。 $P<0.05$ 作为统计学上具有显著差异的水平。

2 结果

2.1 模拟飞行任务对静态姿势控制的不利影响

与基础数据相比,多重任务成绩($F_1, 24 = 5.205, P = 0.032$)与双重任务成绩($F_1, 24 = 17.652, P<0.001$)在4小时任务负荷后明显下降。虽然单任务成绩并没有明显下降($F_1, 24 = 0.096, P = 0.759$),但该结果仍可表明被试在该模拟飞行任务负荷水平下无法继续保持其工作能力。由表1可知,随着任务负荷的持续,重心晃动的有效面积(EA)与总轨迹长度(WPL)的明显增大可能与身体晃动程度在前后方向上明显增大(SDy)有关。同时,左脚跟部与右脚跟部重力分布比例明显降低,而左脚跟部的重力分布比例明显增大,同样验证了身体重心主要在前后方向上晃动。另外,模拟飞行任务负荷所致的疲劳状态对不同频谱上的身体晃动程度也产生了一定的影响。

2.2 静态立位平衡指数的数学模型

为了简化静态平衡功能与任务负荷水平相互关系的分析流程,变化显著的平衡参数需要被构建为综合指数。根据表1所示,最迟至第三小时末出现显著变化的7个参数则通过主成分分析法提取了4个主成分,其累积贡献率达到了92.710%,见表2。根据四个主成分的方差贡献率,我们进一步将其整合为一个综合指数,即静态立位平衡指数(Static upright balance index, SUBI)。根据主成分分析法,静态立位平衡指数的数学表达式(百分制)为: $SUBI=3.065F_1+5.346F_3+13.161F_4+21.954F_6+37.446WDLT+115.454EA+114.183SDy+23.746$ (式中, $F_1, F_3, F_4, F_6, WDLT, EA$ 与 SDy 皆为相应敏感参数的原始值;SUBI值越大,静态平衡功能越差)。

2.3 静态平衡功能与任务负荷水平的相互关系

2.3.1 静态平衡功能与任务负荷水平的直接关系 随着任务负荷持续时间的增加,静态平衡指数持续显著增大($F_{4,24}=8.258, P<0.001$),并且在第二小时末已经在统计学上明显增大($F_{1,24}=8.658, P=0.007$)。这种情况可以增加任务负荷水平预测的灵敏度。曲线拟合结果显示,静态立位平衡指数与任务负荷持续时间之间可能为线性关系($R^2=0.949, F_{1,3}=56.387, P=0.005$),见图1。

2.3.2 静态平衡功能与任务负荷水平的间接关系 直接相关分析提示静态平衡功能与任务负荷水平之间为线性关系,那么任务成绩与这两者的关系应该是一致的。曲线拟合结果提示,多重任务成绩与任务负荷水平之间可能存在二次曲线的关系($R^2=0.968, F_{2,2}=30.552, P=0.032$),然而双重任务成绩与任务负荷水平之间并不存在明显的二次曲线关系($R^2=0.934, F_{2,2}=14.112, P=0.066$)或线性关系($R^2=0.181, F_{1,3}=0.664, P=0.475$)。此外,多重任务成绩与静态立位平衡指数之间也有可能存在二次曲线关系($R^2=0.976, F_{2,2}=41.437, P=0.024$)。而双重任务成绩与静态立位平衡指数之间同样不存在明显的二次曲线关系($R^2=0.763, F_{2,2}=3.226, P=0.237$),见图2。

3 讨论

正常的姿势控制主要由视觉线索、前庭功能及下肢本体感觉进行维持的^[3,18,19]。任何一个姿势维持系统异常,人体正常的姿势控制能力都可能受到不利影响。例如24小时或更长时间

表 1 任务负荷影响下,静态立位平衡参数的变化(Mean± SD)

Table 1 Change of parameters of static postural control under the effect of task-load(Mean± SD)

Parameters	0h	1h	2h	3h	4h
F ₁ (0.01~0.1Hz)	0.753± 0.292	0.980± 0.515 ^a	1.053± 0.547 ^b	1.100± 0.417 ^b	1.104± 0.512 ^b
F ₂ (0.1~0.25Hz)	0.410± 0.193	0.400± 0.159	0.408± 0.194	0.434± 0.140	0.497± 0.311
F ₃ (0.25~0.35Hz)	0.278± 0.120	0.326± 0.136	0.318± 0.153	0.334± 0.124 ^a	0.377± 0.240 ^a
F ₄ (0.35~0.5Hz)	0.183± 0.045	0.227± 0.084 ^b	0.234± 0.141	0.248± 0.091 ^b	0.274± 0.138 ^b
F ₅ (0.5~0.75Hz)	0.147± 0.070	0.139± 0.054	0.143± 0.074	0.148± 0.066	0.160± 0.139
F ₆ (0.75~1.0Hz)	0.086± 0.026	0.095± 0.029	0.092± 0.034	0.111± 0.049 ^a	0.125± 0.046 ^b
F ₇ (1.0~3.0Hz)	0.037± 0.011	0.040± 0.013	0.042± 0.017	0.043± 0.015	0.048± 0.021 ^a
F ₈ (3.0Hz)	0.019± 0.006	0.022± 0.008	0.021± 0.010	0.022± 0.008	0.023± 0.010 ^a
WDLH (%)	0.235± 0.068	0.249± 0.064	0.246± 0.075	0.218± 0.081	0.209± 0.078 ^a
WDLT (%)	0.257± 0.063	0.257± 0.056	0.258± 0.064	0.286± 0.072 ^a	0.297± 0.070 ^b
WDRH (%)	0.232± 0.070	0.218± 0.059	0.215± 0.065	0.206± 0.068	0.204± 0.061 ^a
WDRT (%)	0.276± 0.065	0.278± 0.065	0.280± 0.063	0.282± 0.072	0.288± 0.074
EA(10 ⁻³ cm ²)	22.240± 5.592	29.240± 15.001 ^a	27.640± 10.464 ^a	30.440± 12.104 ^b	30.240± 13.627 ^b
WPL(cm)	1.976± 0.407	1.914± 0.339	1.909± 0.315	2.047± 0.531	2.090± 0.553
Mx(cm)	0.508± 0.052	0.493± 0.038	0.494± 0.046	0.493± 0.049	0.497± 0.041
My(cm)	0.536± 0.119	0.536± 0.107	0.540± 0.115	0.570± 0.125	0.585± 0.129 ^a
SDx(cm)	0.011± 0.004	0.011± 0.007	0.014± 0.007 ^a	0.011± 0.008	0.012± 0.010
SDy(cm)	0.019± 0.007	0.028± 0.019 ^a	0.024± 0.013	0.028± 0.012 ^b	0.027± 0.012 ^b

Note: Frequency domain parameters (F₁~F₈) in this table respectively showed the intensity of body sway at corresponding frequency band. The distribution ratio of whole body weight on the left heel, left toes, right heels and right toes were represented respectively with WDLH, WDLT, WDRH and WDRT. Meanwhile, the symbols “a” and “b” were considered as “P<0.05” and “P<0.01” when the parameters at different times (1, 2, 3 and 4h) were compared with basic data (0h).

表 2 主成分分析结果 - 全部方差解释

Table 2 Principle component analysis-total variance explained

Component	Initial Eigen values			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
Z1	3.855	55.065	55.065	3.855	55.065	55.065
Z2	1.294	18.482	73.547	1.294	18.482	73.547
Z3	0.873	12.466	86.013	0.873	12.466	86.013
Z4	0.469	6.697	92.710	0.469	6.697	92.710
Z5	0.275	3.925	96.635			
Z6	0.180	2.568	99.203			
Z7	0.056	0.797	100.000			

Note: The related information about extracted seven components was represented in the left part of Table 2, such as the eigen value (Total), contribution rate of variance (% of Variance) and rate of cumulative contribution (Cumulative%); While the eligible four principle components were showed in the right part, which could explain 92.710% of all components.

的睡眠剥夺所致疲劳条件对姿势控制产生不利影响^[11]。而模拟飞行任务负荷同样对静态立位平衡功能产生了不利影响。身体重心向前移动导致了身体晃动在前后方向上明显增大,并最终引起姿势晃动范围的增大。与身体前倾条件相比,身体向后倾斜的条件下,被试在应对踝关节外部震动时重力的分布具有更

大的变异性^[20,21]。这可能是一种被试应对外部平衡干扰的一种保护反应。这种作用也可能与踝关节前宽后窄的特殊结构有关。这些结果也提示重力分布比例的变异在姿势控制相关研究中可能更有价值^[22]。

在本实验中,主成分分析法被用来构建静态立位平衡指数

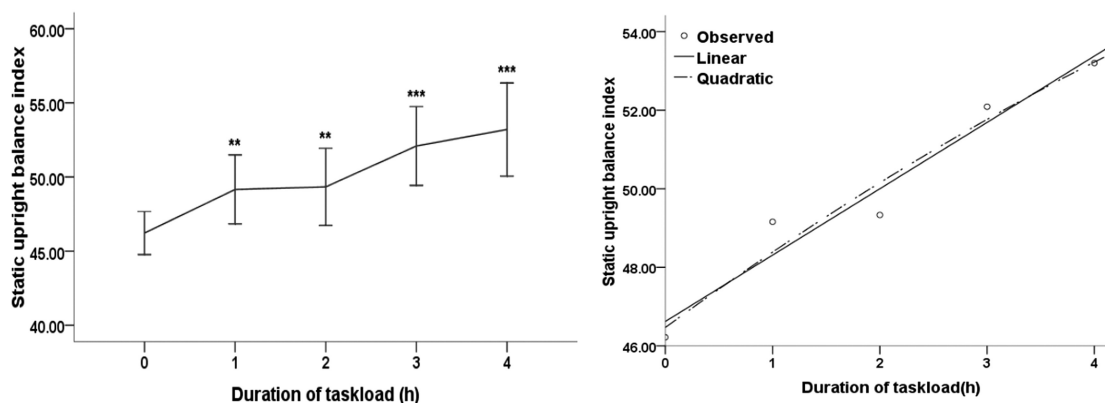


图1 模拟飞行任务负荷影响下,静态平衡指数线性变化趋势

Fig.1 Linear change of static upright balance index under effect of simulated flight task-load

Note: Compared with basic data, "**P<0.01" and "***P<0.001". Zoom: 60%.

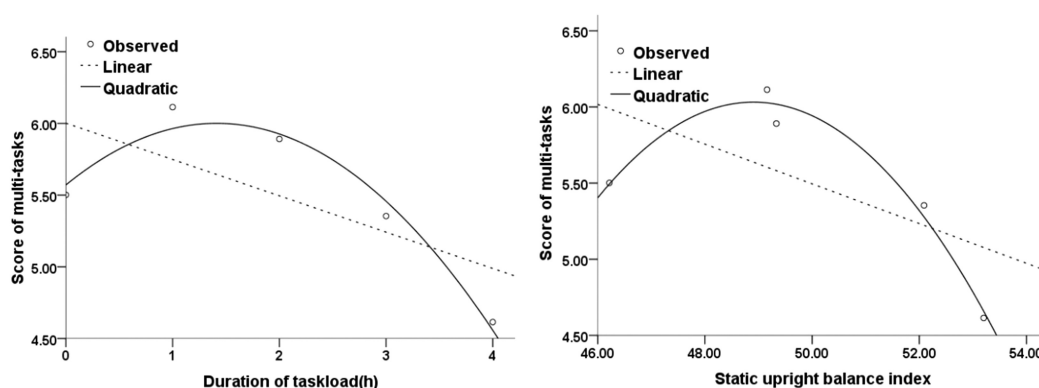


图2 多重任务成绩与任务负荷水平和静态平衡指数的曲线拟合图

Fig.2 Curve estimation between tasks performance and static balance level

Note: Independent variables were duration of taskload and static upright balance index. Zoom: 60%.

主要有以下原因:第一,多维度的原始平衡参数应该进行标准化,从而才有可能进行数据的整合。第二,根据此算法的原理,敏感参数主要根据方差贡献率进行整合,变化越显著参数的权重就会越大。第三,这种算法已经在以往的研究中被证实可以提高预测的效度^[23-25]。例如,Forsman P.等利用主成分分析法成功地将不同的静态平衡参数整合为总分,并发现此总分与其他参数相比,对睡眠剥夺更加敏感^[26]。因此,为了发挥静态立位平衡功能的早期预警性,我们筛选了变化显著的平衡参数,并利用主成分分析法将这些敏感参数进一步整合为综合指数。

为了证实静态立位平衡功能可以反映任务负荷所致疲劳状态的假设,我们从直接与间接两方面来探索这两者的相互关系。一方面,静态平衡指数与任务负荷水平呈现明显的线性关系。另一方面,多重任务成绩与任务负荷水平之间为抛物线关系,而它与静态平衡之间的关系也呈现抛物线的关系。它们之间相似的曲线关系间接地证实了静态平衡功能与任务负荷水平之间的线性关系。

本研究尚存在以下不足:首先,静态立位平衡指数的构建与平衡指数和任务负荷水平相互关系的分析都是建立在模拟飞行任务负荷上,而不是真正的飞行活动。然而,真实的飞行活动研究存在很多不确定的危险因素,地面模拟飞行任务就成为此问题合适的解决方案之一。其次,尽管所有的被试者在实验

开始前进行了一定的练习,但任务成绩的重复测量还会使被试变得越来越熟练,从而会提高任务成绩。另外,任务负荷时间持续的越长,静态平衡指数与任务负荷水平的相互关系可能会越明确。但受到伦理限制,该实验的持续时间需要控制在合理的范围内。

总之,本实验结果初步证实了静态立位平衡功能可以在任务负荷所致的疲劳评估中发挥一定的作用。

参考文献(References)

- [1] Morad Y, Azaria B, Avni I, et al. Posturography as an indicator of fatigue due to sleep deprivation [J]. *Aviat Space Environ Med*, 2007, 78(9): 859-863
- [2] Rowland L M, Thomas M L, Thorne D R, et al. Oculomotor responses during partial and total sleep deprivation [J]. *Aviat Space Environ Med*, 2005, 76(7 Suppl): C104-C113
- [3] Aguiar S A, Barela J A. Adaptation of sensorimotor coupling in postural control is impaired by sleep deprivation[J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e122340
- [4] Rakitin B C, Tucker A M, Basner R C, et al. The effects of stimulus degradation after 48 hours of total sleep deprivation [J]. *Sleep*, 2012, 35(1): 113-121
- [5] Yamada S, Miyake S. Effects of long term mental arithmetic on physiological parameters, subjective indices and task performances[J].

- J UOEH, 2007, 29(1): 27-38
- [6] Yurko Y Y, Scerbo M W, Prabhu A S, et al. Higher mental workload is associated with poorer laparoscopic performance as measured by the NASA-TLX tool[J]. *Simul Healthc*, 2010, 5(5): 267-271
- [7] Mazur L M, Mosaly P R, Jackson M, et al. Quantitative assessment of workload and stressors in clinical radiation oncology [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 83(5): e571-e576
- [8] Dey A, Mann D D. Sensitivity and diagnosticity of NASA-TLX and simplified SWAT to assess the mental workload associated with operating an agricultural sprayer[J]. *Ergonomics*, 2010, 53(7): 848-857
- [9] Avni N, Avni I, Barenboim E, et al. Brief posturographic test as an indicator of fatigue[J]. *Psychiatry Clin Neurosci*, 2006, 60(3): 340-346
- [10] Widyanti A, de Waard D, Johnson A, et al. National culture moderates the influence of mental effort on subjective and cardiovascular measures[J]. *Ergonomics*, 2013, 56(2): 182-194
- [11] Ma J, Yao Y J, Ma R M, et al. Effects of sleep deprivation on human postural control, subjective fatigue assessment and psychomotor performance[J]. *J Int Med Res*, 2009, 37(5): 1311-1320
- [12] Patel M, Gomez S, Berg S, et al. Effects of 24-h and 36-h sleep deprivation on human postural control and adaptation [J]. *Exp Brain Res*, 2008, 185(2): 165-173
- [13] Nam H S, Park D S, Kim D H, et al. The relationship between muscle fatigue and balance in the elderly [J]. *Ann Rehabil Med*, 2013, 37(3): 389-395
- [14] Akkaya N, Akkaya S, Atalay N S, et al. Assessment of the relationship between postural stability and sleep quality in patients with fibromyalgia[J]. *Clin Rheumatol*, 2013, 32(3): 325-331
- [15] 王斌, 马进, 张利利, 等. 持续工作负荷所致脑力疲劳对静态平衡能力变化的影响[J]. *航天医学与医学工程*, 2012, 25(04): 251-255
Wang Bin, Ma Jin, Zhang Li-li, et al. Effects of mental fatigue induced by continuous workload on posturographic changes[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2012, 25(4): 251-255
- [16] 程珊, 马进, 孙继成, 等. 模拟飞行任务负荷对人体姿势控制的影响[J]. *现代生物医学进展*, 2015, 15(09): 1735-1739
- Cheng Shan, Ma Jin, Sun Ji-cheng, et al. The effect of simulated flight tasks on postural control [J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2015, 15(9): 1735-1739
- [17] Barozzi S, Soi D, Gagliardi C, et al. Balance function in patients with Williams syndrome[J]. *Gait Posture*, 2013, 38(2): 221-225
- [18] Hill M W, Oxford S W, Duncan M J, et al. The effects of arm crank ergometry, cycle ergometry and treadmill walking on postural sway in healthy older females[J]. *Gait Posture*, 2015, 41(1): 252-257
- [19] Ceyte H, Lion A, Caudron S, et al. Does calculating impair postural stabilization allowed by visual cues?[J]. *Exp Brain Res*, 2014, 232(7): 2221-2228
- [20] Kanakis I, Hatzitaki V, Patikas D, et al. Postural leaning direction challenges the manifestation of tendon vibration responses at the ankle joint[J]. *Hum Mov Sci*, 2014, 33: 251-262
- [21] Janssens L, Brumagne S, McConnell A K, et al. Proprioceptive changes impair balance control in individuals with chronic obstructive pulmonary disease[J]. *PLoS One*, 2013, 8(3): e57949
- [22] Wiggermann N, Keyserling W M. Effects of anti-fatigue mats on perceived discomfort and weight-shifting during prolonged standing [J]. *Hum Factors*, 2013, 55(4): 764-775
- [23] Putilov A A, Donskaya O G, Verevkin E G. Quantification of sleepiness through principal component analysis of the electroencephalographic spectrum[J]. *Chronobiol Int*, 2012, 29(4): 509-522
- [24] Putilov A A. Principal components of electroencephalographic spectrum as markers of opponent processes underlying ultradian sleep cycles[J]. *Chronobiol Int*, 2011, 28(4): 287-299
- [25] Krisciukaitis A, Simoliuniene R, Tamosiunas M, et al. Efficiency evaluation of autonomic heart control by using the principal component analysis of ECG P-wave [J]. *Methods Inf Med*, 2010, 49(2): 161-167
- [26] Forsman P, Haeggstrom E, Wallin A E, et al. Principal component analysis detects sleepiness-related changes in balance control[J]. *Gait Posture*, 2010, 32(3): 419-421

(上接第 4206 页)

- [27] Berry D, Kuzyk O, Rauch I, et al. Intestinal Microbiota Signatures Associated with Inflammation History in Mice Experiencing Recurring Colitis[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6
- [28] Rooks M G, Veiga P, Wardwell-Scott L H, et al. Gut microbiome composition and function in experimental colitis during active disease and treatment-induced remission [J]. *The ISME journal*, 2014, 8(7): 1403-1417
- [29] El Aidy S, Derrien M, Aardema R, et al. Transient inflammatory-like state and microbial dysbiosis are pivotal in establishment of mucosal homeostasis during colonisation of germ-free mice [J]. *Beneficial Microbes*, 2014, 5(1): 67-77
- [30] Berry D, Schwab C, Milinovich G, et al. Phylotype-level 16S rRNA analysis reveals new bacterial indicators of health state in acute murine colitis[J]. *The ISME journal*, 2012, 6(11): 2091-2106
- [31] Zackular J P, Rogers M A M, Ruffin M T, et al. The human gut microbiome as a screening tool for colorectal cancer [J]. *Cancer Prevention Research (Philadelphia, Pa.)*, 2014, 7(11): 1112-1121
- [32] Zhang C, Zhao L. Strain-level dissection of the contribution of the gut microbiome to human metabolic disease[J]. *Genome Medicine*, 2016, 8(1): 41