

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2014.32.046

精神疲劳评价方法研究进展*

程 珊 马 进 惠铎铎 代 静 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:长时间飞行活动所致的精神疲劳一直是航空航天医学中一个重要的课题。尤其随着我军航空技术的发展,精神疲劳已经成为影响飞行安全的重要原因之一。研究发现,精神疲劳发生时,机体的生理、心理、生化和工作绩效等功能会发生变化。例如,精神疲劳时,脑电图的 theta 波、delta 波和 alpha 波发生变化、瞳孔直径增大、心率变异性的低频谱功率升高和高频谱功率降低、姿势控制能力下降、反应时延长、临界融合频率降低、血浆中氨基酸等功能性分子水平改变和认知能力的下降等。精神疲劳的客观评定方法就是研究者借助于某些设备来监测到这些变化,并根据这些变化对疲劳状态进行判断。本文将从生理、心理、生化和作业绩效等方面阐述了精神疲劳客观的评定方法,并指出了这些方法的优缺点。最后,本文对精神疲劳评价方法发展趋势做出了初步的判断,即我们应对精神疲劳进行综合量化评定,这样才能更全面准确地评估精神疲劳。

关键词:精神疲劳;客观评定;脑电图;心率变异性;静态平衡

中图分类号:R853;B845.66 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2014)32-6387-04

The Research Advancement of Objective Assessment Methods for Mental Fatigue*

CHENG Shan, MA Jin, HUI Duo-duo, DAI Jing, HU Wen-dong[△]

(Department of Medical Equipment, School of Aerospace Medicine, The Fourth military medical university of PLA, Xi'an, Shaanxi, 710032, China)

ABSTRACT: Mental fatigue due to long time flight activities is a very important issue in aerospace medicine. With the aircraft technology advancing, mental fatigue has been one of major factors that may have adverse effect on flight safety. Studies have shown that physiological and psychological parameters, biochemical indicators and work performance would change when mental fatigue happened. For examples, the changing beta power density, alpha power density and theta power density of electroencephalography, the larger pupil diameter, the increasing percentage of the very low power density and decreasing percentage of high power density of heart rate variability, the damaging postural control ability, the longer reaction time, the decreasing critical flicker fusion frequency, the changing level of functional molecules such as amino acid in plasma and the decreasing task performance et al would be found when mental fatigue appeared. The objective assessment methods for mental fatigue are that the researchers try to assess those functions changing with some professional instruments, and judge the fatigue states according to those changing. In this paper, we summarize the objective assessment methods of mental fatigue from the following aspects including physiological and psychological parameters, biochemical indicators and work performance et al. At last, we form a preliminary opinion on the tendency of mental fatigue assessment. We should develop a comprehensive quantitative assessment for mental fatigue so that we could assess mental fatigue accurately and comprehensively.

Key words: Mental fatigue; Objective assessment; Electroencephalogram; Heart rate variability; Static balance

Chinese Library Classification (CLC): R853; B845.66 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2014)32-6387-04

众所周知,飞行活动是一种高负荷的认知操作任务。随着我军现代化航空武器装备的迅猛发展及作战作训模式的转变,尤其是我军战机续航时间的延长,夜航与跨昼夜飞行的增多,复杂气象条件下飞行次数的增加等,飞行人员的疲劳尤其是精神疲劳(Mental Fatigue)在军航飞行员中尤为突出。过大的脑力负荷会造成驾驶人员头脑昏沉、反应迟钝、注意力不集中、工作效率下降等^[1],从而造成判定失误,影响驾驶与飞行安全。过大

脑力负荷造成的精神疲劳被认为是安全事故包括航空事故的重要原因之一^[1-3]。因此,飞行疲劳尤其是精神疲劳的研究不仅有十分重要的理论意义,而且还有巨大的社会价值和经济价值。

精神疲劳的发生机制至今仍未研究清楚,学术界对疲劳定义仍有争议。目前认为,精神疲劳指人们长时间进行需持续精神注意力的认知活动时体验到的一种生理心理上的改变^[4]。目前,精神疲劳主要用三种方法来模拟,即工作负荷,睡眠剥夺和

* 基金项目:国家自然科学基金项目(81202178)

作者简介:程珊(1989-),男,硕士研究生,研究方向:疲劳生理监测,电话:15991644602, E-mail:chengshan-2007@163.com

△ 通讯作者:胡文东,研究员,博士研究生导师, E-mail: huwend@fmmu.edu.cn

(收稿日期:2014-01-28 接受日期:2014-02-23)

低压氧舱。精神疲劳会造成认知功能的变化例如睡眠减少的条件下,反应时(reaction time, CR)会延长^[45],视觉融合频率(critical flicker fusion frequency, CFF)降低^[6];精神疲劳也会造成生理功能发生改变,如表现大脑活动的脑电图(Electroencephalogram, EEG)波形发生了变化^[37]。大量研究发现,心率(heart rate, HR)和心率变异性(heart rate variability, HRV)可以区分出精神疲劳不同的状态^[8]。van Dieën, J. H.等研究发现,疲劳对运动员躯干稳定性有不良影响^[9]。国内学者也观察到了24 h睡眠剥夺前后健康人立位平衡能力的变化^[10];另外,研究者还发现,睡眠减少还会影响机体代谢功能^[11]、血糖水平^[12]等。疲劳客观的评定方法就是研究者们根据精神疲劳时机体发生的这些变化来对疲劳进行评定的。实际应用过程中,精神疲劳的客观评定方法可以分为以下几类:

1 生理学指标

精神疲劳发生时,很直观、重要的表现就是脑电活动变化和眼部活动的变化,例如眼睛闭合时间百分比(percentage of time that the eyes were closed, PERCLOS),眨眼次数等。另外一个主要的生理学的表现主要集中在平衡功能和自主神经功能紊乱上,例如HRV,血压,体温,皮肤传导性等。

1.1 眼动测量

PERCLOS法^[13]常用于驾驶疲劳的检测中,并已经被证实和睡眠减少时模拟驾驶注意力降低有关。PERCLOS法常用于驾驶疲劳中实时检测视网膜大小反映出的眼睛闭合时间占某一特定时间的百分率。通过安装在驾驶员前方仪表板上的摄像头,获得驾驶员眨眼频率与眼部闭合上时间的数据,作为判断驾驶员警觉程度的依据。在实际运用中,评定方法采用PERCLOS的P80标准(眼睛闭合程度超过80%的时间占某一特定时间的百分比)。但是此种方法有时很难获得质量较好的视网膜反射光线,并且白天阳光照进车里时检测效果不太好。

研究还发现睡眠剥夺条件下瞳孔直径,眼球扫描速度^[14]能够预测心理运动警觉任务的表现,并且在警觉任务上表现能力下降比其他认知任务预测效果好^[15]。另外,精神疲劳与眼动图^[16],眨眼频率增加^[7]等也有相关报道。

1.2 脑电图(EEG)

Borghini, G.等在通过回顾有关精神疲劳神经生理学测量方面的文献总结了精神疲劳发生时飞行人员或驾驶人员相关的EEG波形的变化^[7]。他们发现,脑电图等神经心理学指标在正常驾驶、高精神负荷与精神疲劳及困倦状态时发现了相关的变化。驾驶人员高精神负荷时,脑电图theta波增加和alpha波减少。精神负荷状态向精神疲劳状态转换时,theta波、delta波和alpha波增加,并且离线状态下检测这些精神疲劳状态的准确率在90%左右。国内学者Zhao, C.等通过90分钟持续模拟驾驶的方法发现EEG波形alpha波和beta波发生相应的变化^[3],另外还发现事件相关电位(Event-related potential, ERP)P300波幅度在模拟驾驶前后发生明显变化。Shighihara, Y等采用一种新的方法磁脑电图(Magneto encephalography, MEG)研究了精神疲劳状态下,不同大脑部位的脑电波变化^[17]。

另外,国内学者黄猛等基于PSOC3的脑电信号采集与无线传输系统,并通过疲劳试验实现数据的采集,接着利用希尔伯特-黄变换(HHT)方法对四导脑电信号(O1、O2、Fp2、Cz)的熵特征进行分析,提出基于脑电信号精神疲劳特征分类,并对比讨

论了该方法的有效性^[18]。也有学者选用LabVIEW软件来实现脑电信号基于网络端口的实时数据传输,并将传输来的脑电信号作分析处理,从而评估出受试者当前的精神疲劳程度^[1]。沈学丽等首先针对基于脑电的疲劳状态识别和预警问题,设计了促疲劳实验以及疲劳评价量表,采集了非疲劳、一般疲劳以及严重疲劳状态的头皮脑电信号,采用希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)时频分析方法得到其边际谱能量,给出了疲劳指数的定义和实现^[19]。

1.3 心率变异性(HRV)

很多研究都发现,HRV受交感副交感神经的调节^[20-22],并且HRV是精神疲劳发生时的一个重要的变化^[23-26]。

最近研究发现,完全睡眠剥夺条件下HRV变异性与EEG一样,表现出与困倦相关的PVT表现能力的下降很好的相关性^[13]。该研究根据受试者操作曲线(Receiver operating characteristic curves, ROC)发现,心电图(EEG),RR间隔0.02-0.08 Hz功率频谱的变化与脑电图(EEG)困倦相关的PVT失误率增加表现出变化相似,同时与PERCLOS也相似。对HRV的时域分析(time-frequency analysis, TFA)发现,HRV可以区分出正常状态与精神疲劳状态^[8]。该研究发现精神压力下高频谱带(0.15-0.4 Hz)减少并向更高频谱带转移。Taelman, J.等也通过TFA方法证实了HRV对精神疲劳很敏感^[27]。很多学者也证实了心率变异性(总功率,极低功率,高功率)在清醒状态和精神疲劳状态具有显著性差异^[3,13,28]。同时Suzuki, S.等学者发明了一种用红外雷达远程测量HRV的方法^[29]。

1.4 立位平衡功能

健康人的姿势控制由视觉,本体感觉和前庭器官反馈的信息来维持的^[30]。很多研究表明,机体在睡眠剥夺所造成的精神疲劳状态下,平衡功能会受到损害^[31,32]。国内学者马如梦等探索了静态姿势图在24h睡眠剥夺后的变化趋势,结果发现,静态平衡的各项参数在精神疲劳前后发生了变化^[10]。Parel, M.等研究了24小时和36小时睡眠剥夺对姿势稳定性的影响,结果发现24小时睡眠剥夺条件下,在前后和左右方向上的姿势控制影响明显,36小时的睡眠剥夺对姿势控制的影响更严重^[31]。Ma, J.等也发现了24小时睡眠剥夺后,静态姿势图的某些指标外周面积(Circumference area, CA);矩形面积(Rectangle area, RA)发生了显著变化^[33]。但从他们的研究也可以看出,并不是所有的平衡参数都发生了变化。另外也有研究还发现精神疲劳条件下人体体温^[22,34],皮肤传导性^[28],脉搏信号^[35]发生了变化。

2 心理学指标

2.1 反应时(RT)

受试者对呈现的声、光刺激的反应时间称为反应时。反应时又可分为简单反应时、选择反应时和运动反应时等。在运用过程中,研究者可根据具体情况选择不同的反应时测量。研究发现睡眠剥夺会影响机体的认知能力^[36],认知的速度和准确度都会下降^[37]。精神疲劳发生时,机体对视觉刺激和听觉刺激反应时间延长,同时反应失误率也增加^[38]。

2.2 临界闪光融合频率(CFF)

临界闪光融合频率是受试者把逐渐增加或逐渐减小的闪光频率看成连续光亮的最低频率。有研究表明,当从事精神高度集中、视力紧张和单调乏味工作的人员临界融合频率明显降低,工作前后相差很大。同样,有研究者发现,放射科医生在进

行4h阅片工作后,临界闪光融合频率降低^[6]。我国民航飞行人员的研究也证实了,临界闪光融合频率在国际航班飞行任务所造成的疲劳监测的一项敏感指标。但是,该法易受被试者主观因素的影响。另外,也有研究表明,睡眠不足等情况会影响机体的学习记忆能力^[39,40]。

3 生化指标

精神疲劳状态下,机体某些生化指标的变化还是比较明显的,如 Franken hauser 曾证明肾上腺激素与逃入注意资源多少相关。虽然目前生化指标的测量主要涉及侵入性技术而在实时检测应用受到限制,但是传感技术,放射免疫分析法等可以实现无创检测某些生化指标,如放射免疫分析法可以测量应激条件下皮质醇激素水平^[21]。Silverman, M 等也指出中枢疲劳与神经内分泌和免疫功能有关^[41]。也有学者研究发现,睡眠减少可能导致某些细胞因子如肿瘤坏死因子(Tumor necrosis factor α , TNF)和白介素(Interleukin-1 β , IL1)等异常^[42]。很多研究发现,精神疲劳会造成某些功能分子分泌异常如5-羟色胺^[43]、多巴胺^[44]、缬氨酸^[45]、胰岛素^[46]等,甚至有学者指出精神疲劳程度取决于五羟色胺系统^[47]。但是与疲劳直接相关的化学物质是否存在仍需进一步研究。

另外,国外有人用功能磁共振 fMRI 的方法发现睡眠剥夺后造成的反应能力受损和前额顶部,丘脑以及纹状体海马皮层有联系,反应失败与编码期神经元混乱又关^[48]。

4 作业绩效测量

疲劳发生时,飞行人员一个重要的反应就是工作能力和作业绩效的下降。因此,作业绩效水平的测量就成为飞行疲劳评价的一个重要方法之一。研究者常使用主辅任务结合的方法进行评价。对于飞行活动来讲,常用的方法地面模拟飞行活动如计算机化神经行为测试评价系统、飞行模拟器等。但是作业绩效的评价方法并没有形成一个统一的评价指标,人们常用的做法是将作业成绩与初始的作业水平进行比较,将工作过程中作业绩效下降水平作为衡量疲劳程度的指标。而飞行模拟器(Flight Simulator)是实验室中常用的客观评价飞行人员飞行绩效的设备方法。目前,国内外根据不同机型都研制了不同功能特点的飞行模拟器。它最大的优势是模拟飞行环境较逼真,不仅可以用于飞行人员生理心理系统的选拔、训练,而且可以用来评价飞行工作负荷和疲劳^[49],但是它维护成本高,操作难度大。

如上所述,飞行疲劳对机体的影响是多方面的,是一个多维的概念,而不同的生理信号有各自的优缺点^[50],不可能用一种指标就能准确反应脑力负荷的大小。另外,评价指标较多时,单一指标对疲劳的评价指标可能出现相互矛盾的情况,因此我们应该从飞行疲劳的多方面表现入手进行多元综合的评定。因此,针对以上问题,我们应根据飞行员的工作特点和工作性质,①模拟并建立长时间持续飞行诱发疲劳的实验模型;②筛选反应飞行疲劳敏感性的生理指标;③研制出新型疲劳相关生理指标检测系统并对其可靠性进行验证;④根据新型疲劳相关生理指标检测设备,构建出综合量化的疲劳风险评价模型,开发出智能化疲劳预警系统,实现对飞行人员及机组成员的疲劳状态检测和预警。通过实施上述项目,保障飞行员及机组成员工作的安全性和有效性,预防飞行事故,推动我国航空事业的发展。

参考文献(References)

- [1] 王鹏.基于脑机接口的精神疲劳评估方法研究[D].重庆:重庆大学, 2011:1-14
Wang Peng. Study on Assessment Method of Mental Fatigue Based on Brain-Computer Interface [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011:1-14
- [2] 郝兵.飞行疲劳的成因及应对措施[J].中国民用航空,2011(11): 44-46
Hao Bing. The cause of flight fatigue and the countermeasures (J). Chinese Civil Aviation, 2011(11):44-46
- [3] Zhao C, Zhao M, Liu J, et al. Electroencephalogram and electrocardiogram assessment of mental fatigue in a driving simulator [J]. Accid Anal Prev, 2012, 45: 83-90
- [4] Cain S W, Silva E J, Chang A M, et al. One night of sleep deprivation affects reaction time, but not interference or facilitation in a Stroop task[J]. Brain Cogn, 2011, 76(1): 37-42
- [5] Hoedlmoser K, Griessenberger H, Fellinger R, et al. Event-related activity and phase locking during a psychomotor vigilance task over the course of sleep deprivation[J]. J Sleep Res, 2011, 20(3): 377-385
- [6] Maeda E, Yoshikawa T, Hayashi N, et al. Radiology reading-caused fatigue and measurement of eye strain with critical flicker fusion frequency[J]. Jpn J Radiol, 2011, 29(7): 483-487
- [7] Borghini G, Astolfi L, Vecchiato G, et al. Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2014,44C:58-75
- [8] Taelman J, Vandeput S, Vlemincx E, et al. Instantaneous changes in heart rate regulation due to mental load in simulated office work[J]. Eur J Appl Physiol, 2011, 111(7): 1497-1505
- [9] van Dieen J H, Luger T, van der Eb J. Effects of fatigue on trunk stability in elite gymnasts [J]. Eur J Appl Physiol, 2012, 112 (4): 1307-1313
- [10] 马如梦,马进,李津强.24 h 睡眠剥夺前后平衡能力变化的初探[J]. 医学研究杂志,2010, 39(10): 26-27
Ma Ru-meng, Ma Jin, Li Jin-qiang. Research of Changes in Balance Capability after 24 Sleep Deprivation [J]. J Med Res, 2010,39(10): 26-27
- [11] Kobayashi T, Suzuki E, Takao S, et al. Long working hours and metabolic syndrome among Japanese men: a cross-sectional study[J]. BMC Public Health, 2012, 12: 395
- [12] Nedeltcheva A V, Imperial J G, Penev P D. Effects of sleep restriction on glucose control and insulin secretion during diet-induced weight loss[J]. Obesity (Silver Spring), 2012, 20(7): 1379-1386
- [13] Chua E C, Tan W Q, Yeo S C, et al. Heart rate variability can be used to estimate sleepiness-related decrements in psychomotor vigilance during total sleep deprivation[J]. Sleep, 2012, 35(3): 325-334
- [14] Di Stasi L L, Antolf A, Cañas J J. Evaluating mental workload while interacting with computer-generated artificial environments[J]. Entertainment Computing, 2013, 4(1): 63-69
- [15] McClelland L E, Pilcher J J, Moore D D. Oculomotor measures as predictors of performance during sleep deprivation [J]. Aviat Space Environ Med, 2010, 81(9): 833-842
- [16] Haavisto M L, Porkka-Heiskanen T, Hublin C, et al. Sleep restriction for the duration of a work week impairs multitasking performance[J]. J Sleep Res, 2010, 19(3): 444-454
- [17] Shighihara Y, Tanaka M, Ishii A, et al. Two types of mental fatigue affect spontaneous oscillatory brain activities in different ways [J].

- Behav Brain Funct, 2013, 9(1): 2
- [18] 黄猛. 基于 HHT 和核方法的精神疲劳分类研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012: 1-15
- Huang Meng. Research of the Mental Fatigue Classification Based on HHT and Kernel Method [D]. Shanghai: East China University of Science and technology, 2012: 1-15
- [19] 沈学丽. 基于时频分析的头皮脑电特征提取及其模式识别应用研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012: 1-10
- Shen Xue-li. Study on EEG Feature Exaction and Pattern Recognition Based on Time-Frequency Methods[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2012: 1-10
- [20] Malmberg B, Persson R, Flisberg P, et al. Heart rate variability changes in physicians working on night call [J]. Int Arch Occup Environ Health, 2011, 84(3): 293-301
- [21] Pagani M, Pizzinelli P, Traon A P, et al. Hemodynamic, autonomic and baroreflex changes after one night sleep deprivation in healthy volunteers[J]. Auton Neurosci, 2009, 145(1-2): 76-80
- [22] Vaara J, Kyrolainen H, Koivu M, et al. The effect of 60-h sleep deprivation on cardiovascular regulation and body temperature [J]. Eur J Appl Physiol, 2009, 105(3): 439-444
- [23] Bonnet M H. Heart rate variability measures add a new dimension to the understanding of sleepiness[J]. Sleep, 2012, 35(3): 307-308
- [24] Wehrens S M, Hampton S M, Skene D J. Heart rate variability and endothelial function after sleep deprivation and recovery sleep among male shift and non-shift workers [J]. Scand J Work Environ Health, 2012, 38(2): 171-181
- [25] Myllymaki T, Rusko H, Syvaaja H, et al. Effects of exercise intensity and duration on nocturnal heart rate variability and sleep quality[J]. Eur J Appl Physiol, 2012, 112(3): 801-809
- [26] Citi L, Bianchi M T, Klerman E B, et al. Instantaneous monitoring of sleep fragmentation by point process heart rate variability and respiratory dynamics [J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2011, 2011: 7735-7738
- [27] Taelman J, Vandeput S, Gligorijevic I, et al. Time-frequency heart rate variability characteristics of young adults during physical, mental and combined stress in laboratory environment [J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2011, 2011: 1973-1976
- [28] Xia L, Wang J, Liang F, et al. Mental fatigue assessment based on physiological signals [J]. Journal of Southern Medical University, 2012, 32(6): 870-873
- [29] Suzuki S, Matsui T, Sugawara K, et al. An approach to remote monitoring of heart rate variability (HRV) using microwave radar during a calculation task [J]. J Physiol Anthropol, 2011, 30 (6): 241-249
- [30] Chow D H, Leung D S, Holmes A D. The effects of load carriage and bracing on the balance of schoolgirls with adolescent idiopathic scoliosis[J]. Eur Spine J, 2007, 16(9): 1351-1358
- [31] 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
- [32] Quarck G, Ventre J, Etard O, et al. Total sleep deprivation can increase vestibulo-ocular responses [J]. J Sleep Res, 2006, 15 (4): 369-375
- [33] 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
- [34] Zhang A, Yang H, Kong L. Study on visual display terminal mental fatigue status based on physiological information [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2011, 28(5): 1025-1029, 1034
- [35] 杨华. 基于心电脉搏信号的 VDT 精神疲劳识别方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011: 1-15
- Yang Hua. The Research of VDT Mental Fatigue Estimated Method Based on ECG and Pulse Signal[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011: 1-15
- [36] 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
- [37] Lim J, Dinges D F. A meta-analysis of the impact of short-term sleep deprivation on cognitive variables [J]. Psychol Bull, 2010, 136(3): 375-389
- [38] Jung C M, Ronda J M, Czeisler C A, et al. Comparison of sustained attention assessed by auditory and visual psychomotor vigilance tasks prior to and during sleep deprivation [J]. J Sleep Res, 2011, 20(2): 348-355
- [39] Carskadon M A. Sleep's effects on cognition and learning in adolescence[J]. Prog Brain Res, 2011, 190: 137-143
- [40] Drummond S P, Anderson D E, Straus L D, et al. The effects of two types of sleep deprivation on visual working memory capacity and filtering efficiency[J]. PLoS One, 2012, 7(4): e35653
- [41] Silverman M N, Heim C M, Nater U M, et al. Neuroendocrine and immune contributors to fatigue[J]. PM R, 2010, 2(5): 338-346
- [42] Clinton J M, Davis C J, Zielinski M R, et al. Biochemical regulation of sleep and sleep biomarkers[J]. J Clin Sleep Med, 2011, 7(5 Suppl): S38-S42
- [43] Dong Q T, Zhou F, Yu Z, et al. Association of the changes of central serotonin and peripheral blood free amino acids with postoperative fatigue after abdominal surgery[J]. Chinese Journal of Gastrointestinal Surgery, 2011, 14(12): 968-972
- [44] Prof. Meeusen R, Watson P, Hasegawa H, et al. Central Fatigue?[J]. Sports Medicine, 2006, 36(10): 881-909
- [45] Nozaki S, Tanaka M, Mizuno K, et al. Mental and physical fatigue-related biochemical alterations [J]. Nutrition, 2009, 25 (1): 51-57
- [46] Koren D, Levitt K L, Brar P C, et al. Sleep architecture and glucose and insulin homeostasis in obese adolescents[J]. Diabetes Care, 2011, 34(11): 2442-2447
- [47] Maluchenko N V, Schegolkova J V, Kulikova M A, et al. Gender Effects on Association of Serotonin Transporter Gene Polymorphism with Symptoms of Central Fatigue? [J]. Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 2009, 147(4): 462-465
- [48] Tucker A M, Rakitin B C, Basner R C, et al. fMRI activation during failures to respond key to understanding performance changes with sleep deprivation[J]. Behav Brain Res, 2011, 218(1): 73-79
- [49] 詹皓, 陈勇胜. 飞行疲劳研究 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 46-50
- Zhan Hao, Cheng Yong-sheng. the Research on Flight Fatigue(M). Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 46-50
- [50] Balkin T J. Behavioral biomarkers of sleepiness[J]. J Clin Sleep Med, 2011, 7(5 Suppl): S12-S15