

• 论 著 • doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2022.10.001

网络首发 <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.R.20220322.1412.002.html>(2022-03-23)

# 听觉定位对模拟飞行任务中空间态势感知能力的影响\*

程 珊<sup>1</sup>, 杨菁华<sup>1,2</sup>, 张太辉<sup>1</sup>, 丛 林<sup>1</sup>, 龙凯文<sup>1</sup>, 胡文东<sup>1△</sup>

(1. 空军军医大学航空航天医学系航空航天医学装备教研室, 西安 710032;

2. 空军工程大学基础部, 西安 710051)

**[摘要]** 目的 探索声音线索是否有助于提高飞行人员在空中执行任务时的态势感知能力。方法 招募 16 名空军某院校的本科学员, 采用随机交叉对照的试验方式, 依次完成有声音线索和无声音线索条件下的模拟飞行空间定向任务。并利用任务负荷量表(NASA-TLX)评估两种条件下被试者的工作负荷水平。结果 与无声音组相比, 声音线索组被试在水平面内进行偏航感知和翻滚感知任务时, 反应时间明显缩短( $P < 0.05$ ), 反应时间的差异性也明显降低( $P < 0.05$ )。同时, 在任务结束后被试者的 NASA-TLX 得分并无显著差异。结论 声音线索可以明显提高水平面内偏航感知和冠状面内翻滚感知的工作效率, 且不会进一步增加空间感知任务的负荷程度。

**[关键词]** 听觉定位; 空间态势感知; 任务负荷; 模拟飞行

**[中图法分类号]** R853    **[文献标识码]** A    **[文章编号]** 1671-8348(2022)10-1621-05

## Effects of auditory localization on spatial situational awareness perception ability during simulated flight tasks<sup>\*</sup>

CHENG Shan<sup>1</sup>, YANG Jinghua<sup>1,2</sup>, ZHANG Taihui<sup>1</sup>, CONG Ling<sup>1</sup>, XIONG Kaiwen<sup>1</sup>, HU Wendong<sup>1△</sup>

(1. Department of Aerospace Medical Equipment, School of Aerospace Medicine, Air Force Medical University, Xi'an, Shaanxi 710032, China; 2. Department of Basics, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China)

**[Abstract]** **Objective** To explore whether the voice cues can improve the situational awareness perception ability of pilots during flight tasks. **Methods** Sixteen undergraduate students from a Air Force College were recruited. The random cross control experimental method was adopted, the spatial orientation task (SOT) of simulated flight with voice cues and without voice cues were fulfilled in turn. Meantime, their work-load level under the two conditions was assessed by using NASA-TLX Scale. **Results** Compared with the no sound group, the reaction time when conducting yaw and roll perception tasks within the horizontal plane in the sound cues group was significantly decreased ( $P < 0.05$ ), and the difference of reaction time was also decreased ( $P < 0.05$ ). Meanwhile the NASA-TLX scores of the subjects at the task end had no significant difference. **Conclusion** The sound cues can obviously improve the work efficiency of yaw perception in horizontal plane and roll perception in coronal plane, moreover without further increasing the load level of spatial awareness task.

**[Key words]** auditory location; spatial situational awareness perception; task load; simulated flight

人类的空间定向能力与生活息息相关, 尤其对于特殊职业如机动车驾驶、飞机操纵等具有重大的安全意义<sup>[1]</sup>。听觉定位能力主要指人耳判断一个声源在三维空间内的位置, 即方位角、仰角高度及距离等<sup>[2]</sup>, 可以作为空间定向能力的一种重要辅助线索<sup>[3]</sup>。试听者的头部、耳廓、躯干等形成了一个复杂的方向依赖的滤波器, 引起声音信号的滤波效应<sup>[4-5]</sup>, 其功能在数学上可用解剖传递函数(anatomical transfer function, ATF)表示。这种特殊的滤波效应能够将复杂的声源

信号转换为人耳可以处理的定位线索, 即两耳间的时间差、两耳间的声级差及滤波后单耳的谱信息<sup>[2]</sup>。

据报道, 盲人可以通过声音差异等线索加强自我空间感知能力, 并进行道路搜索<sup>[6]</sup>。对于飞机驾驶员而言, 飞机在空中高性能机动过程中加速度的改变并不影响声音定位的准确性, 听觉系统由此被看作飞行员感受空间信息的一种较为可靠的方式<sup>[7]</sup>。空间听觉信息也可辅助辨别飞行操作中的口头信息, 降低飞行工作负荷, 改善飞行员的操作表现<sup>[8]</sup>。而基于头部

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(U1933201)。 作者简介: 程珊(1989—), 助理研究员, 博士, 主要从事职业人员生理心理评估与训练工作。 △ 通信作者, E-mail: huwend@fmmu.edu.cn。

相关的传递函数,研究者通过模拟远端声音的感觉运动事件,引导头部定向于地球磁场北极。而且这种事件模拟反馈方法有巨大潜力,可以创造出感觉增强装置,获得快速、真实的感知体验<sup>[9]</sup>。

由此可见,人类的听觉系统可以根据声音传递的空间线索提高自身的空间感知能力。但该线索是否有助于提高飞行人员在空中执行任务时的定向感知能力并不清楚。因此,本研究重点探索声音线索是否能够改善三维空间内感知表现,报道如下。

## 1 对象与方法

### 1.1 研究对象

本研究招募16名空军某院校本科学员,年龄21~23岁,平均( $22.3 \pm 0.9$ )岁,身高1.68~1.85 m,平均( $1.78 \pm 0.05$ )m,体重56~92 kg,平均( $71.50 \pm 11.04$ )kg。被试者纳入标准为:近1个月内无耳鸣、听力下降或其他影响听觉功能的疾病。本研究符合人体试验伦理学标准,所有研究对象自愿签订知情同意书。

### 1.2 空间听觉任务

本研究采用的空间听觉任务系统是由空军军医大学航空航天医学系自主设计。该系统主要由空间定向任务(spatial orientation task,SOT)场景、外部控制设备与数据处理系统三部分构成。SOT场景包括训练和测试两种模式,训练模式时间为2 min,不记录成绩。而测试模式又进一步分为4种感知模块(每个模块2 min),声源模拟采用纯音的滴滴声(1 000 Hz, 500 ms),其呈现方向则根据飞行器的实时状态改变,始终引导操作者向正确的方向调整(飞行器航向正确且处于平飞状态)。飞行器状态、人的感知与声源方向关系分别为:绕X轴转动-俯仰感知-冠状面(声音线索)、绕Y轴转动-翻滚感知-矢状面(声音线索)、绕Z轴转动-偏航感知-水平面(声音线索)与三个轴-综合感知-三个平面内(声音线索)。飞行姿态调整主要依靠外置的脚舵和遥杆进行(Saitek X52 PRO,中国香港,美加狮亚洲有限公司),而立体声模拟主要依靠系统控制声源方向随着飞行姿态改变,而输出依靠7.1声道的耳机呈现(Strix7.1,台北,ASUSTek Computer Inc.)。该系统记录的指标有反应时间及定位误差。反应时间指每种测试模式下,单次任务呈现至调整完成确定时终止的反应时间(reaction time, RT)。定位误差指单次的正确位置与调整完成后的实际位置在X轴、Y轴与Z轴上的误差角度(error angle, EA)。由此,可计算被试者进行空间定向任务的平均反应时间RT<sub>mean</sub>和标准差RT<sub>sd</sub>及X轴、Y轴与Z轴上的平均误差角度(X<sub>mean</sub>, Y<sub>mean</sub>, Z<sub>mean</sub>)与标准偏差(X<sub>sd</sub>, Y<sub>sd</sub>, Z<sub>sd</sub>)。

### 1.3 任务负荷的测量

#### 1.3.1 斯坦福嗜睡量表(Stanford sleepiness scale, SSS)

在本试验中,采用SSS评估被试者的嗜睡程度,该量表将被试者的睡眠质量从完全清醒状态至入睡状态分为7个等级,主要评估被试者在测量时段内的

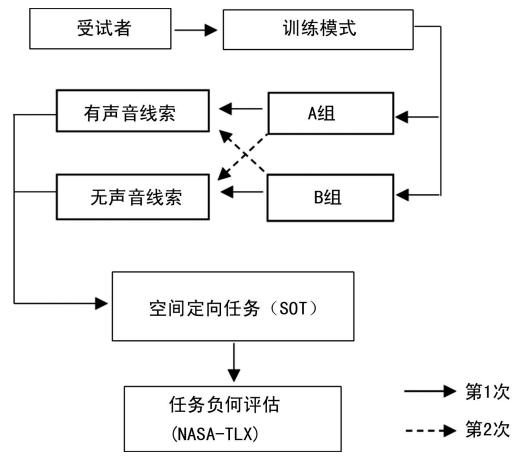
主观警觉水平。完全清醒记1分,处于昏昏欲睡状态记7分。

### 1.3.2 NASA-TLX量表

NASA-TLX量表是美国航天局开发的多维任务负荷评价表,由心理需求(mental demand)、体力需求(physical demand)、时间需求(time demand)、作业绩效(performance)、努力程度(effort level)和挫折程度(frustration level)6个维度负荷因素组成<sup>[10]</sup>。被试者在每一个负荷因素(分值范围为1~21分)上进行自我评分,分值越大代表该维度负荷程度越大。同时,被试者还需要对各个负荷因素的重要程度进行排序,赋予不同权重,依次为:1/21、2/21、3/21、4/21、5/21、6/21。该量表的总分则为维度分与相应权重乘积的总和,总分越大表示负荷水平越高。研究已证实,该量表在负荷评估中具有良好的信度和效度。

### 1.4 实施流程

本研究采取交叉对照的试验范式。按试验次序随机分为A组与B组。正式开始前,所有被试者进行统一的训练模式下的空间听觉任务(2 min)。然后,A组、B组被试者分别进行2次正式测试,第1次A组在有声音线索提示(+sound cues)的条件下完成相应的SOT任务,而B组完成无声音线索(-sound cues)下的SOT任务。第2次两组试验条件交叉,A组、B组分别在无声音线索与有声音线索条件完成SOT任务。两次测试间隔1 h,每次任务结束后,被试者的任务负荷程度立即通过NASA-TLX量表进行评估,见图1。

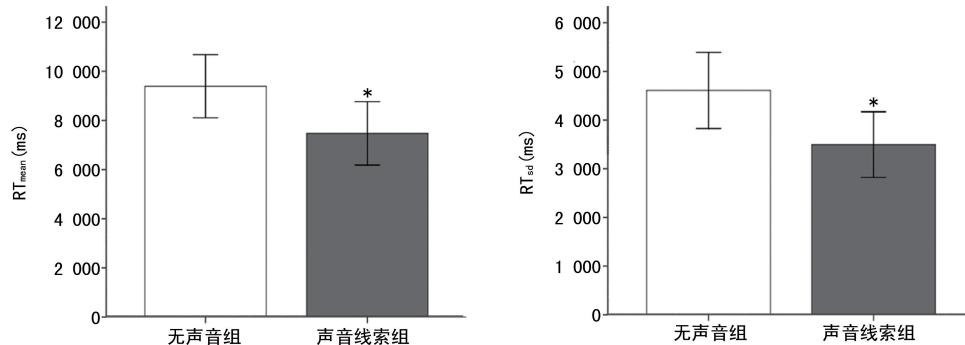


索组的被试者反应时间( $t=2.076, P=0.047$ )和反应时间的差异也明显缩小( $t=2.224, P=0.034$ ),见表2和图3。而声音提示条件下,矢状面内俯仰感知和综合三维感知任务的成绩则没有明显改变,见表3和表4。

## 2.2 声音线索对空间感知负荷的影响

表1 声音线索组与无声音组偏航感知任务成绩比较( $n=16, \bar{x} \pm s$ )

项目	无声音组	声音线索组	$t$	$df$	P
$RT_{mean}$ (ms)	$9391.68 \pm 2413.82$	$7473.15 \pm 2419.77$	2.245	30	0.032
$RT_{sd}$ (ms)	$4609.49 \pm 1466.42$	$3496.55 \pm 1264.15$	2.299	30	0.029
$Z_{mean}$ ( $^{\circ}$ )	$7.01 \pm 7.17$	$5.64 \pm 6.64$	0.563	30	0.577
$Z_{sd}$ ( $^{\circ}$ )	$17.13 \pm 19.03$	$14.32 \pm 18.37$	0.426	30	0.673

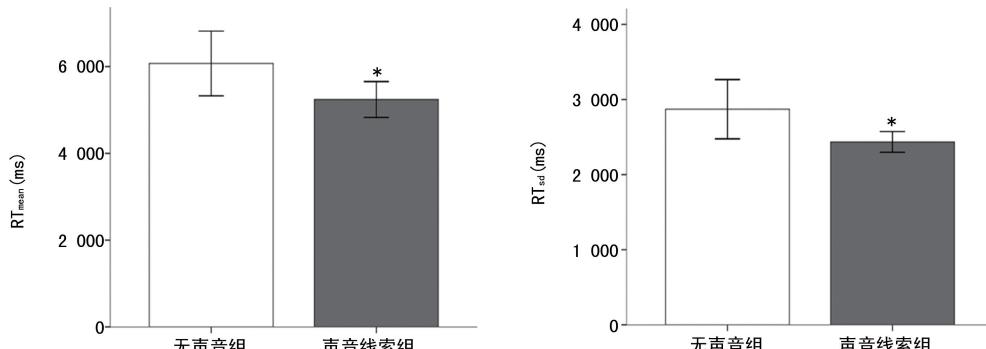


\*:  $P < 0.05$ , 与无声音组比较。

图2 声音线索对偏航感知任务反应时间的影响

表2 声音线索组与无声音组翻滚感知任务成绩比较( $n=16, \bar{x} \pm s$ )

项目	无声音组	声音线索组	$t$	$df$	P
$RT_{mean}$ (ms)	$6071.98 \pm 1400.48$	$5241.27 \pm 774.64$	2.076	30	0.047
$RT_{sd}$ (ms)	$2871.20 \pm 740.96$	$2434.77 \pm 259.41$	2.224	30	0.034
$Y_{mean}$ ( $^{\circ}$ )	$7.23 \pm 4.57$	$5.91 \pm 4.02$	0.864	30	0.394
$Y_{sd}$ ( $^{\circ}$ )	$20.90 \pm 14.37$	$15.79 \pm 13.34$	1.043	30	0.305



\*:  $P < 0.05$ , 与无声音组比较。

图3 声音线索对翻滚感知任务反应时间的影响

表3 声音线索组与无声音组俯仰感知任务成绩比较( $n=16, \bar{x} \pm s$ )

项目	无声音组	声音线索组	$t$	$df$	P
$RT_{mean}$ (ms)	$8017.91 \pm 2792.23$	$7731.22 \pm 2069.77$	0.330	30	0.744
$RT_{sd}$ (ms)	$4307.46 \pm 2486.09$	$3793.96 \pm 1315.50$	0.730	30	0.471
$X_{mean}$ ( $^{\circ}$ )	$3.84 \pm 2.43$	$4.28 \pm 3.57$	-0.402	30	0.690
$X_{sd}$ ( $^{\circ}$ )	$6.88 \pm 7.20$	$8.05 \pm 8.45$	-0.423	30	0.675

在正常状态下,两组被试的进行空间定向任务操作前的嗜睡程度是一致的( $t=0.257, P=0.799$ )。在任务结束后,声音线索组被试者的心理需求、体力需求、努力程度、挫折程度要比无声音组高,而在时间需求、自我绩效方面得分较低,但差异均无统计学意义,见表5。

表4 声音线索组与无声音组综合三维感知任务成绩比较( $n=16, \bar{x} \pm s$ )

3D	无声音组	声音线索组	t	df	P
RT <sub>mean</sub> (ms)	18 143.70±4 565.06	17 585.11±3 951.12	0.370	30	0.714
RT <sub>sd</sub> (ms)	6 108.59±4 243.42	5 589.49±1 839.14	0.449	30	0.657
X <sub>mean</sub> (°)	3.72±5.11	5.05±9.33	-0.500	30	0.621
X <sub>sd</sub> (°)	3.76±8.66	6.11±10.88	-0.678	30	0.503
Y <sub>mean</sub> (°)	3.16±5.69	4.31±6.22	-0.547	30	0.588
Y <sub>sd</sub> (°)	3.66±8.53	6.64±12.87	-0.772	30	0.446
Z <sub>mean</sub> (°)	7.01±12.81	8.47±11.96	-0.334	30	0.741
Z <sub>sd</sub> (°)	10.36±20.72	14.80±20.62	-0.607	30	0.548

表5 声音线索组与无声音组任务负荷水平比较( $n=16, \bar{x} \pm s$ )

项目	无声音组	声音线索组	t	df	P
心理需求	10.25±6.43	12.00±6.37	-0.773	30	0.445
体力需求	7.19±4.64	7.44±5.88	-0.134	30	0.895
时间需求	11.31±5.84	10.75±5.47	0.281	30	0.780
自我绩效	15.38±4.26	12.75±4.14	1.769	30	0.087
努力程度	13.94±6.05	14.06±5.51	-0.061	30	0.952
挫折程度	8.44±6.53	10.63±6.13	-0.977	30	0.336
总分	12.21±2.86	12.02±3.27	0.173	30	0.864

### 3 讨 论

声音线索能够显著提高水平面内偏航感知和冠状面内翻滚感知空间定位任务的工作效率。据报道,听觉系统的声源定位主要依靠声音与头部交互作用形成的单耳和耳间属性改变的信息<sup>[10]</sup>。一方面,水平面上的定位主要线索为耳间时间差(interaural time difference, ITD)与耳间声级差(interaural level difference, ILD)。有研究指出,采用携带不同变异的耳间时间差及耳间一致性信息的宽带噪声进行定位实验,验证了听觉系统以一定权重整合频率间的ITD信息去定位声源<sup>[11]</sup>。由此可见,ITD与ILD是双耳听觉的重要线索,可以进行声音定位、改善在噪声和回声等环境中的语音理解、整合多个声源信息<sup>[12]</sup>。另一方面,听觉定位还要靠头相关传递函数(head-related transfer functions, HRTFs)形成的单耳谱信息<sup>[13]</sup>。当被试者在进行偏航感知任务和翻滚感知任务时,声音线索主要在水平面内和冠状面内移动,可以引起耳间时间差和声级差的改变,同时形成的谱信息也会在双耳间出现显著差异。因此,声音线索可显著提高偏航感知和翻滚感知的定位效率。

而声音线索对矢状面内的俯仰感知定位的效果并不好。有文献指出,试听者剖结构如头部、耳廓、躯干等形成了一个复杂的方向依赖的滤波器,可以引起声音信号的滤波效应,被试者进行俯仰感知任务过程中,声音线索则是在矢状面内进行移动,耳间时间差及声级差基本不受影响,因此听觉定位在此种任务模式下主要受到声音信号经过滤波效应后提供的位置线索影响。然而头部的前部、顶部、后部等近似为球形,其滤波后的声音线索携带的位置信息基本相似,故而可能造成声音信号前后定位困难。另外,由于耳

廓等结构是滤波效应的重要组成部分,能够有效地为声音信号增加方向依赖的频谱波谷与波峰,且这些特征声音定位的确能够发挥一定的作用<sup>[14]</sup>。而解剖结构的异常就会改变了HRTFs形成的谱线索,影响声音定位的准确性。如果对耳廓进行处理,那么中平面内的方向听觉就会受到干扰<sup>[15-16]</sup>。当头戴耳机及头盔的情况下,HRTFs同样会受到影响。输入信号会失去耳廓滤波作用的有效处理,显著降低声音定位的准确率,角度误差及前后颠倒也明显增多<sup>[17-18]</sup>。无论何种类型的头盔都会引起方位角、仰角定位估计的失误增大<sup>[19]</sup>。

此外,本研究还发现声音线索的增加并未显著提高被试者空间定向操作的任务负荷程度。此结果对于听觉定位辅助飞行员的空间定向则十分有利。本研究中,使用的声音刺激为间断的滴滴声,被试者并不需要刻意花费注意力去辨别。有研究指出,一般实验室研究多采用模拟的声刺激,如滴答声、纯音等,而复杂声音的空间定位不仅受声音属性的影响,也受声音类别、行为关联的影响<sup>[20]</sup>。当声音线索与行为关联的水平高时,听觉对复杂声音的定位敏感性高,则会花费更多的精力去解读。由此可见,本实验采用的纯音信号既有好处,但也从另一方面解释了矢状面内听觉定位效果欠佳的问题。

由于以往可供参考的相关研究较少,故不可避免地遇到一些难题,影响了研究的实施。首先,本研究的方案在试验过程经过了修订,为了保证试验流程的同质性,导致最终有效的样本量并不多。虽然本试验提供一些有价值的结果,但仍需增加样本量进一步提高结果的可信度。其次,本研究主要考虑飞行人员的空间定位感知能力提升的问题,采用外置立体的声源

呈现方式在实际飞行过程中并不可行。因此,通过耳机呈现虚拟立体声的方式有助于后期的应用,但在矢状面内感知效果并不理想。也有报道指出,当声音线索与行为关联的水平高时,听觉对复杂声音的定位敏感性高<sup>[20]</sup>。因此,后续研究拟采用具有语音意义的声音线索替代纯音滴答声作为声音刺激,希望能够进一步提升空间听觉在定位感知中的作用。

综上所述,本研究证实了声音线索对提高水平面内偏航感知和冠状面内翻滚感知有一定的效果,可显著提高工作效率。同时,声音线索又不会进一步提升空间感知任务的负荷。本研究可以为机动车驾驶员、甚至飞行员提供一种提升空间感知能力的方法和思路,为预防空间定向障碍发挥一定的作用。

## 参考文献

- [1] YOUNG K L, STEPHENS A N, LOGAN D B, et al. Investigating the impact of static roadside advertising on drivers' situation awareness[J]. Appl Ergon, 2017, 60: 136-145.
- [2] RISOUD M, HANSON J N, GAUVRIT F, et al. Sound source localization[J]. Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis, 2018, 135(4): 259-264.
- [3] 程珊,马进,张太辉,等.听觉定位能力的理论研究现状及其在空间态势感知中的作用[J].职业与健康,2020,36(24):3447-3450.
- [4] MAJDAK P, WALDER T, LABACK B. Effect of long-term training on sound localization performance with spectrally warped and band-limited head-related transfer functions[J]. J Acoust Soc Am, 2013, 134(3): 2148-2159.
- [5] TOLLIN D J, RUHLAND J L, YIN T C. The role of spectral composition of sounds on the localization of sound sources by cats[J]. J Neurophysiol, 2013, 109(6): 1658-1668.
- [6] SECCHI S, LAURIA A, CELLA G. Acoustic wayfinding: a method to measure the acoustic contrast of different paving materials for blind people[J]. Appl Ergon, 2017, 58: 435-445.
- [7] SANDOR P M, MCANALLY K I, PELLIEUX L, et al. Localization of virtual sound at 4 Gz[J]. Aviat Space Environ Med, 2005, 76(2): 103-107.
- [8] KIM S, MILLER M E, RUSNOCK C F, et al. Spatialized audio improves call sign recognition during multi-aircraft control[J]. Appl Ergon, 2018, 70: 51-58.
- [9] SCHUMANN F, O'REGAN J K. Sensory augmentation: integration of an auditory compass signal in to human perception of space[J]. Sci Rep, 2017, 7: 42197.
- [10] SUN J, CHENG S, MA J, et al. Assessment of the static upright balance index and brain blood oxygen levels as parameters to evaluate pilot workload[J]. PLoS One, 2019, 14(3): e214277.
- [11] BUCHHOLZ J M, LE GOFF N, DAU T. Localization of broadband sounds carrying interaural time differences: effects of frequency, reference location, and interaural coherence[J]. J Acoust Soc Am, 2018, 144(4): 2225.
- [12] ROSS B. Auditory cortex responses to interaural time differences in the envelope of low-frequency sound, recorded with MEG in young and older listeners[J]. Hear Res, 2018, 370: 22-39.
- [13] MIDDLEBROOKS J C. Sound localization[J]. Handb Clin Neurol, 2015, 129: 99-116.
- [14] HOFMAN P M, VAN OPSTAL A J. Bayesian reconstruction of sound localization cues from responses to random spectra[J]. Biol Cybern, 2002, 86(4): 305-316.
- [15] HOFMAN M, VAN OPSTAL J. Binaural weighting of pinna cues in human sound localization[J]. Exp Brain Res, 2003, 148(4): 458-470.
- [16] GARDNER M B, GARDNER R S. Problem of localization in the median plane: effect of pinnae cavity occlusion[J]. J Acoust Soc Am, 1973, 53(2): 400-408.
- [17] AHRENS A, LUND K D, MARSCHALL M, et al. Sound source localization with varying amount of visual information in virtual reality [J]. PLoS One, 2019, 14(3): e214603.
- [18] RUEDL G, POCECCO E, KOPP M, et al. Impact of listening to music while wearing a ski helmet on sound source localization[J]. J Sci Med Sport, 2018, 22: 7-11.
- [19] SCHARINE A A, BINSEEL M S, MERMAGEN T, et al. Sound localisation ability of soldiers wearing infantry ACH and PASGT helmets[J]. Ergonomics, 2014, 57(8): 1222-1243.
- [20] DEREY K, RAUSCHECKER J P, FORMISANO E, et al. Localization of complex sounds is modulated by behavioral relevance and sound category[J]. J Acoust Soc Am, 2017, 142(4): 1757.