DOI:10.16016/j.2097-0927.202307098

陆军直升机飞行人员寒区飞行错觉发生现状调查及影响因素分析

刘 媛[1],余 静[1],严 军[1],李 森[1],夏 雨[1],朱 莹[1],龙在云[1],王海燕[1],周阿香[1],李 玲[2],杨 策[1]
400042 重庆,陆军军医大学(第三军医大学)大坪医院特殊环境战伤防治研究室,创伤与化学中毒全国重点实验室[1];
550004 贵阳,中国人民解放军联勤保障部队第925医院神经内科[2]

[**摘要**] **目的** 了解陆军直升机飞行人员在寒区飞行错觉的发生情况并探讨其影响因素与应对措施。**方法** 运用"飞行错觉综合量表(Comprehensive flight illusion scales)"调查74名寒区陆军直升机飞行人员在2022年12月至2023年2月飞行错觉的发生情况、相关影响因素及应对飞行错觉的措施。通过SPSS 22.0软件统计分析各变量之间的差异和飞行错觉发生的影响因素。**结果** 本次调查共发出问卷74份,收回74份,有效回收率100%。其中飞行错觉的发生率为32.43%。飞行时间与飞行错觉的发生差异具有统计学意义($P<0.05$)。在寒区发生率较高的3种飞行错觉分别为距离错觉(20.27%)、倾斜错觉(18.92%)和相对位置错觉(16.22%);发生率较低的3种飞行错觉分别为:脱离现象(4.05%)、旋转错觉(4.05%)和倒飞错觉(2.70%)。飞行错觉发生后66.67%的人员出现紧张、感觉杆"搬不动"、头痛、头昏以及飞行后失眠等多种反应。陆军直升机飞行人员几乎都知晓并认同积极应对飞行错觉的处理方式,却有50%的人员认为可采用消极等待的方式。通过对影响飞行错觉发生的相关因素统计分析提示:除了飞行科目以外,与飞行员身心状态、外界环境和飞行活动相关的多种因素均影响飞行错觉的发生,且具有统计学差异($P<0.05$)。**结论** 在寒区作业的陆军直升机飞行人员在冬季短时期内飞行错觉发生后会出现明显的心理和生理反应,他们的疲劳焦虑状态、气候、地形环境以及驾驶机型的座舱界面飞行参数与飞行错觉的发生相关。

[**关键词**] 寒区;陆军飞行人员;直升机;飞行错觉;影响因素
[**中图法分类号**] R339.55; R821.21; R852.32 [**文献标志码**] A

Investigation of occurrence and influencing factors of flight illusions among army helicopter pilots in cold regions

LIU Yuan[1], YU Jing[1], YAN Jun[1], LI Sen[1], XIA Yu[1], ZHU Ying[1], LONG Zaiyun[1], WANG Haiyan[1], ZHOU Axiang[1], LI Ling[2], YANG Ce[1] [1]State Key Laboratory of Trauma and Chemical Poisoning, Department of Special War Wound, Daping Hospital, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400042; [2]Department of Neurology, No. 925 Hospital of Joint Logistic Support Force of PLA, Guiyang, Guizhou Province, 550004, China

[**Abstract**] **Objective** To investigate the occurrence of flight illusions and explore its influencing factors and countermeasures in army aviators in cold regions. **Methods** Comprehensive Flight Illusion Scale was applied to investigate flight illusions, related influencing factors and countermeasures among 74 army aviators in cold regions from December 2022 to February 2023. SPSS 22.0 statistics was used for statistical analysis to compare the differences among variables and identify the influencing factors of flight illusions. **Results** For the 74 issued questionnaires, all of them were retrieved validly, with a rate of 100%. The incidence rate of flight illusions was 32.43%. There was a statistical difference between flight time and the occurrence of flight illusions ($P<0.05$). There were 3 types of flight illusions with higher incidences in cold regions, that is distance illusion (20.27%), tilt illusion (18.92%) and relative position illusion (16.22%).

[**基金项目**] 创伤、烧伤与复合伤国家重点实验室开放课题(SKLKF202112);院士牵头科技创新引导专项(2022YSZX-JCX0015CSTB)
[**通信作者**] 杨 策,E-mail:sepsismd@126.com

2097-0927/Copyright © 2024, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

The 3 flight illusions with relatively lower incidences were detachment phenomenon (4.05%), rotational illusion (4.05%), and inverted flight illusion (2.70%). After occurrence of illusions, 66.67% of the aviators experienced symptoms such as tension, "hard-to-move lever" headache, dizziness and post-flight insomnia. Almost all of the aviators were of fully awareness and acceptance of the active approaches to dealing with flight illusions, but still 50% of them believed that passive waiting intervention measures could be used. The results of statistical analysis on related influencing factors indicated that statistical differences were observed in all the listed items except flight subject with the occurrence of flight illusions ($P<0.05$). **Conclusion** During short period flight in cold regions in winter, army aviators experience obvious psychological and physiological reactions after occurrence of flight illusions, and their anxiety and fatigue state, external climate and landform environment, and cabin interface and flight parameters are all related to the occurrence.

[**Key words**] cold regions; army aviators; helicopter; flight illusions; influencing factors

Supported by the Open Project of State Key Laboratory of Trauma and Chemical Poisoning (SKLKF202112) and the Special Project Academician-Leaded Scientific and Technological Innovation Guidance Program (2022YSZX-JCX0015CSTB). Corresponding author: YANG Ce, E-mail: sepsismd@126.com

飞行错觉(也叫空间定向障碍,Spatial disorientation, SD)是指飞行人员在三维空间飞行过程中失去了对飞机和自身飞行状态、所处位置和运动状况的正确认知而产生的错误知觉[1]。国内外研究报道几乎100%的飞行人员在其职业生涯中均出现过飞行错觉;尤其在夜间、复杂天气(雷雨、雪雾等)和海上飞行时更易发生[1-2]。

气象学上将最冷月平均温度为-10~0 ℃的区域称为寒区。寒区雨雪、多雾天气频发,飞行人员在飞越雪域时可能混淆天空/地面的边界,而多雾天气由于外界能见度降低会影响判断进近时所需的最低作业高度,由此产生飞行错觉,甚至导致严重飞行事故发生[2-3]。

众多研究表明:飞行错觉是导致飞行事故最重要的人为因素。尽管我国对驾驶不同机型飞行人员飞行错觉的发生情况进行了相关调研,并提出了应对飞行错觉的干预措施[4-5],但是迄今为止尚无针对寒冷地区陆军直升机飞行人员飞行错觉发生及影响因素的相关研究。在特殊自然环境下,陆军直升机飞行人员作业过程中产生飞行错觉,不但影响作战与训练任务的完成,而且严重飞行错觉是威胁飞行安全的重要因素[5-6]。因此,本研究通过问卷调查对寒区陆军直升机飞行人员冬季飞行训练时飞行错觉的发生情况及影响因素进行分析,为开展特殊环境下陆军直升机飞行人员的科学训练、飞行错觉应对以及心理卫生保健提供理论依据。

1 对象与方法

1.1 调研对象与抽样方法

采取整群抽样方法,随机抽取寒区陆军某部队直升机飞行人员,按照样本量估算公式:$n=(5\sim10)\times$量表条目数。本研究所用"飞行错觉综合量表"共计11个条目,故建议样本量为55~110,最终纳入74例样本。本研究获中国人民解放军陆军特色医学中心伦理委员会批准[批准号:医研伦审(2019)第146号]。

1.2 纳入、排除标准

以寒区陆军直升机飞行人员作为研究对象,对其冬季3个月的飞行作业情况进行调研。纳入标准:①符合执飞条件;②2022年12月至2023年2月期间进行执飞任务;③自愿接受本次调研。排除标准:①未按要求填写人员基本信息;②飞行错觉量表数据不全。

1.3 方法

1.3.1 自行设计的一般资料调查问卷 包括性别、年龄、飞行年限、飞行时间、驾驶机型、飞行级别以及高血压病史等基本信息。

1.3.2 飞行错觉量表 利用陆军特色医学中心特殊环境战伤防治研究室设计的"飞行错觉综合量表",对寒区陆军直升机飞行人员常见飞行错觉的发生、影响因素及处理措施进行问卷调查。该量表参照空军航空医学研究所于立身研究员设计的"飞行错觉水平量表"制定[2,6]。要求驻训的寒区陆军直升机飞行人员根据个人飞行活动中飞行错觉的发生情况,从"无"(没有发生)、"偶尔"(发生频率<20%)、"有时"(发行频率在20%~<50%之间)、"经常"(发生频率50%~80%)、"总是"(发生频率>80%)等5个选项中进行选择。在飞行过程中出现飞行错觉的陆军直升机飞行人员继续填写飞行错觉发生后机体反应条目,其中紧张、恶心、感觉杆"搬不动"为飞行错觉发生后人员的即刻反应。头昏、头痛、飞行后失眠为发生错觉后24 h内出现的机体反应。

1.3.3 应对飞行错觉的措施及影响因素调查 要求所有参加问卷调查的陆军直升机飞行人员在飞行错觉应对措施选项中,如果认同该措施选择"是";不认同选择"否";既不认同也不否定则选择"不置可否"。

而关于影响飞行错觉发生的因素则从密切相关、部分相关以及无关3个选项中进行选择。

1.4 统计学分析

用SPSS 22.0对数据进行处理和分析。计数资料采用频率分析。采用χ^2检验分析比较飞行错觉的发生与影响因素、飞行时间、飞行年限、驾驶机型、飞行等级、年龄其它变量间的统计学差异。以$\alpha=0.05$(双侧)为界定值,$P<0.05$表示结果有统计学意义。

2 结果

2.1 调研对象一般情况

本次调研发出并收回74份量表,有效回收率100%。调查对象均为男性。其中飞行员71人、领航员2人、空中机械师1人。1人有高血压,但血压控制正常,其余人员均无高血压病史,符合执飞标准。纳入分析的人员均飞行合格。受调查人员的相关情况如表1所示。除飞行时间,其余变量与飞行错觉的发生均无统计学差异。

表1 陆军直升机飞行人员与飞行错觉发生相关的各项变量比较[例(%)]

项目	n	飞行错觉发生	χ^2	P
人数/例	74	24(34.43)		
年龄/岁			3.679	0.298
<20	1	0		
20~<30	52	15(28.85)		
30~<40	19	9(47.37)		
40~<50	2	0		
飞行年限/年			2.975	0.226
<10	47	13(27.66)		
10~<20	25	11(44.00)		
≥20	2	0		
飞行时间/h			6.816	0.033
<500	47	13(27.66)		
500~<1 000	15	9(60.00)		
≥2 000	12	2(16.67)		
飞行员级别			1.281	0.734
三级	52	16(30.77)		
二级	16	6(37.50)		
一级	4	2(50.00)		
特级	1	0		
无等级	1	0		
驾驶机型			0.639	0.887
攻击直升机	42	13(30.95)		
运输直升机	18	6(33.33)		
攻击及运输直升机	4	2(50.00)		
其他机型	10	3(30.00)		

2.2 陆军直升机飞行人员寒区飞行错觉的发生情况

在74份有效问卷中,出现飞行错觉的陆军直升机飞行人员共24人,其中飞行员23名,领航员1名,飞行错觉发生率为32.43%。发生飞行错觉的24名人员均无视觉、听觉以及中枢神经系统相关基础疾病。寒区陆军直升机飞行人员发生错觉的类型覆盖了调查量表中的所有条目。其中发生率位于前三位的飞行错觉为:距离错觉(20.27%)、倾斜错觉(18.92%)、相对位置错觉(16.22%)。位于后三位的飞行错觉为:脱离现象(4.05%)、旋转错觉(4.05%)和倒飞错觉(2.70%),具体结果见表2。

表2 问卷调查74名陆军直升机飞行人员寒区飞行错觉的发生情况[$n=74$,例(%)]

错觉类型	偶尔	有时	经常	合计
距离错觉	14(18.92)	1(1.35)	0	15(20.27)
倾斜错觉	13(17.57)	1(1.35)	0	14(18.92)
相对位置错觉	11(14.86)	1(1.35)	0	12(16.22)
速度错觉	8(10.81)	1(1.35)	0	9(12.16)
俯仰错觉	8(10.81)	1(1.35)	0	9(12.16)
时间错觉	5(6.75)	0	0	5(6.75)
方向错觉	4(5.41)	0	0	4(5.41)
脱离现象	3(4.05)	0	0	3(4.05)
旋转错觉	3(4.05)	0	0	3(4.05)
倒飞错觉	2(2.70)	0	0	2(2.70)

2.3 陆军直升机飞行人员寒区飞行发生飞行错觉后的生理、心理反应

在24名发生飞行错觉的陆军直升机飞行人员中,16名(66.67%)人员在飞行错觉发生后即刻出现紧张、感觉杆“搬不动”。在飞行错觉发生24 h内出现头昏、头痛和飞行后失眠等不良心理、生理反应,且上述16名人员均为飞行员。在出现不良反应的飞行人员中,87.50%(14名)的人员感到紧张,6.25%(1名)的人员出现头痛,6.25%(1名)的人员出现头昏,12.50%的人员(2名)感觉“杆搬不动”,6.25%(1名)飞行后失眠,但无人出现恶心的症状。其它8名(33.33%,含7名飞行员和1名领航员)发生飞行错觉的陆航直升机飞行人员未出现上述不良的生理和心理反应。

2.4 寒区陆军直升机飞行人员应对飞行错觉的措施

寒区陆军直升机飞行人员在发生飞行错觉后,几乎都知晓通过观察仪表、选择参照物以及求助同机人员等有效消除飞行错觉的正确、积极的处理方式,以避免由飞行错觉导致的飞行事故发生。但是仍有50.00%的飞行人员在思想上认可“等待自行消退”这种相对消极的处理措施(表3)。

表 3 问卷调查寒区陆军直升机飞行人员应对飞行错觉的措施结果分析[n=74,例(%)]

采取措施	是	否	不置可否
坚信仪表进行修正	73(98.65)	0	1(1.35)
寻找可靠参照物	69(93.24)	3(4.05)	2(2.70)
同机人员提醒	72(97.30)	1(1.35)	1(1.35)
移交飞行操纵权	73(98.65)	0	1(1.35)
等待自行消退	37(50.00)	32(43.24)	5(6.76)

2.5 寒区陆军直升机飞行人员飞行错觉发生的影响因素

受调查人员基本认可所列出的条目与飞行错觉的发生具有相关性。进一步通过统计分析发现,除了飞行科目以外,与飞行员身心状态、外界环境以及飞行活动相关的其它因素均影响直升机飞行人员飞行错觉的发生,并且在统计学上具有显著性差异(表 4)。

表 4 问卷调查寒区陆军直升机飞行人员飞行错觉发生的影响因素相关性分析[n=74,例(%)]

影响因素	密切相关	部分相关	无关	χ^2	P
飞行科目	13(17.57)	35(47.30)	26(35.13)	5.480	0.065
飞行参数	7(9.46)	32(43.24)	35(47.30)	11.560	0.003
座舱界面	8(10.81)	33(44.59)	33(44.59)	14.815	0.001
飞行疲劳	15(20.27)	38(51.35)	21(28.38)	7.660	0.022
睡眠情况	13(17.57)	36(48.65)	25(33.78)	8.373	0.015
焦虑情绪	16(21.62)	31(41.89)	27(36.49)	6.390	0.041
飞行地形	11(14.86)	30(40.54)	33(44.59)	12.271	0.002
飞行天气	28(37.84)	28(37.84)	18(24.32)	12.721	0.002
夜间飞行	18(24.32)	33(44.59)	23(31.08)	8.810	0.012

3 讨论

3.1 飞行错觉发生现状

飞行空间定向是飞行员对地空目标、飞行状态、所处位置以及自身与飞行环境之间的空间关系进行识别和判断的一种认知过程。空间定向是飞行能力结构中最核心的要素,它可以通过飞行员的决策判断影响飞行安全。飞行错觉从本质上讲是由于飞行员在三维空间进行飞行活动时,心理、生理上的适应不良所致。由于在飞行中仪表视觉失去主导作用,经各种感觉通道传入的错误空间信息或中枢神经系统对空间信息处理整合错误,从而导致错误信息主导空间知觉的形成,是飞行空间定向障碍发生的基本机制。迄今,严重的飞行错觉仍然是导致飞行事故的首要因素[1-2]。研究发现飞行错觉所造成的飞行事故占 14%[7]。GIBB 等[8]对美国陆军航空部队在 1987—1995 年发生的直升机飞行事故统计分析中发现 291 起飞行事故中有 87 起归因于飞行错觉导致,其中 A~C 级飞行事故约占总事故的 30%。在死亡事故中,由于飞行错觉导致飞行人员对飞机操控失误的比例高达 15%~26%[5]。由此可见,飞行错觉对航空飞行安全的危害不容忽视。

3.2 飞行错觉发生原因及机制

飞行错觉按照人体感觉通道不同,主要分为前庭性、视觉性和中枢性三大类[9]。飞行错觉的发生与座舱仪表、外界环境(能见度、目视参照物等)均具有密切的关系。在飞机水平直线加速和离地爬升过程中,如果飞行员感受不到天地线、建筑物等视觉定向信息条件下,就会产生身体上仰的错误知觉。在视觉信息缺失的条件下,飞行员将加速度惯性力与重力的合力误认为重力作用方向就会产生俯仰与倾斜错觉[9-10]。其次,飞行错觉与仪表判读及注意力分配之间具有一定的关系。当前“一平三下”的飞行仪表布局:飞行员通过平视平晶显示器获得搜索目标、跟踪/计算目标参数、锁定目标、继续跟踪和攻击目标等战斗实时数据;而“三下”显示的飞机自身状态、武器系统、地图导航等数据则需要低头才能看到。因此,在飞行过程中飞行员须不断地分配注意力来观察飞行仪表,将信息整合成飞机姿态和飞行轨迹的心理“图像”,并对飞行仪表的显示做出相应的反应。地平仪注视次数对总飞行错觉水平起决定性的影响。而飞行员对于仪表的注视次数越多,其搜索的效率越低,导致机体对信息进一步识别、整合的高级认知效能下降,从而产生错误的仪表视觉定向方式,导致飞行错觉发生[11]。

3.3 寒区环境对陆军直升机飞行人员飞行错觉发生的影响

寒区冬季气温低、日照短、积雪厚、寒潮频。寒区冰雪频发的自然与气候环境,会对陆军直升机飞行人员的生理和心理认知均产生重要影响。飞行员的知觉、记忆、注意、思维和想象等认知能力是完成飞行活动最重要的心理、生理因素。在寒区的自然环境下,冬季的积雪天气不仅会导致焦虑情绪的发生,而且飞行员获取外界视觉信息受到干扰,对飞行参照物识别难度增加,通过视觉飞行对周围环境及地面观察而得到的空间信息具有潜在不可靠性。尤其是跑道周围被白雪覆盖,使得飞行员在进近过程中无参照物可循,导致难以发现跑道或出现主观感觉进场偏高的错觉。而当地面冰雪面亮度比天空更高时则会产生倒飞错觉[12]。

与此同时,在低温环境下机体散热增加,机体需要通过自主与非自主产热的方式维持核心体温,导致飞行人员的能量消耗增加、作业过程中更易出现疲劳感从而影响陆军直升机飞行人员的作业效能[13-14]。RAY 等[15]指出:在 2~3 ℃环境下,短暂冷暴露可以提高大脑警觉度,但会降低短时工作记忆能力。在-20~-10 ℃环境下,大脑的工作记忆、警觉度、注意力等都有所减弱。因此,寒冷条件下机体对突发事件的反应时间延长、高级认知功能减退,也可能是导致寒区飞行更容易出现飞行错觉的重要原因之一。而且,在飞行过程中即使陆航飞行员意识到错觉的发生,但是由于寒冷环境对其判断、决策能力和感知能力的不良影响,也可能出现空中适应能力降低,操作准确性下降、人因失误发生率增高,同样会对飞行安全造成严重的威胁[16]。

本次被试的寒区陆军直升机飞行人员在冬季 3 个月内可认知飞行错觉(Ⅱ型错觉)的发生率为 32.43%。前三位飞行错觉为距离错觉(20.27%)、倾斜错觉(18.92%)、相对位置错觉(16.22%)。而且,飞行错觉的发生与飞行时间具有一定的相关性,说明丰富的飞行经验及良好的飞行能力可减少飞行错觉的发生。24 名发生飞行错觉的人员中有 16 人(66.67%)具有明显的心理和生理反应,而另外 8 人(33.33%)尽管意识到飞行错觉的发生,但机体没有出现任何不良的生理、心理反应。对飞行错觉发生反应的人员中,87.50%人员感到紧张,显著高于其它不良反应类型。飞行错觉发生后过度的心理、生理反应以及无反应都会对飞行安全造成不良影响[17-18]。本次调研结果表明:陆军直升机飞行人员寒区飞行错觉发生率低于国内早期文献报道的 80%~90%,其原因在于我们只是针对冬季 3 个月内飞行人员出现飞行错觉的情况进行统计,而早期文献报道的是飞行人员在整个飞行时限内飞行错觉的发生情况。同时,我们在前期调研非寒区陆军飞行人员在短时期内(近 3 个月)飞行错觉的发生率则仅为 17.5%。在本研究中寒冷环境下飞行错觉发生后的不良心理、生理反应发生率为 66.67%,较既往报道的平原地区陆航直升机飞行人员错觉发生后机体的生理、心理反应率 28.6%显著增高,且精神心理反应更为复杂。上述结果提示:寒冷的自然环境对陆军直升机飞行人员飞行错觉的发生以及发生错觉后机体的生理和心理反应影响更加严重[6,11,19-20]。因此,加强陆军直升机飞行人员在寒冷环境下的飞行错觉模拟训练,对减少飞行错觉的发生、保障飞行安全具有重要的作用。

3.4 寒区陆军直升机飞行员应对飞行错觉发生的措施及错觉发生的相关影响因素

飞行错觉发生以后,尽管 90%以上的陆军直升机飞行人员都知晓并赞同采取积极有效的措施以应对飞行错觉,但是仍有 50%的人员认可采取“等待自行消退”的消极处理方式。因此,加强寒区陆军直升机飞行人员对飞行错觉危害性的认知教育,使飞行人员从思想上对飞行错觉给予足够的重视并采取积极正确的处理方式来消除飞行错觉,仍然值得重视[21]。

通过对飞行错觉发生的影响因素调查显示:寒区陆军直升机飞行员飞行错觉的发生与外界自然、气候环境,飞行员的生理、心理状态以及飞机座舱界面和飞行参数等多种因素有关。寒区冬季的雪域环境,容易使飞行人员产生焦虑、抑郁等情绪障碍,降低飞行作业能力;视觉参照物的缺失,使飞行人员对座舱界面的搜索次数增加、搜索效率下降,容易产生错误的仪表定向方式,从而导致飞行错觉的发生。因此,预防飞行错觉的发生除了积极研制先进飞行姿态控制系统和显示装置,弥补人类能力的缺陷,帮助飞行员避免或克服飞行错觉的发生外[22-24],通过物理和化学的干预手段释放减轻心理压力、缓解焦虑情绪对提高陆军直升机飞行人员的作业效能、飞行安全以及保障陆航部队的战斗力具有重要意义[25-26]。

本研究的不足之处在于:首先,被试的样本量有限导致试验结果可能存在偏倚。本研究为横断面研究,因此不能提供引起飞行错觉因果关系的研究结果。其次,本次调查的是陆军直升机飞行人员在寒区飞行作业过程中飞行错觉的发生情况,缺乏非寒区作业的基线数据。第三,我们未对不同类型飞行错觉的发生频率以及昼夜飞行时飞行错觉发生类型的差异进一步分类细化。在今后的研究中,需增加不同机型陆军直升机飞行人员的样本量以及新的调查条目,使量表更加适用于多种飞行环境下陆军直升机飞行人员空间定向能力的评估,并建立陆军直升机飞行人员飞行错觉发生的数据模型。

参考文献:

[1] 刘珺, 邓略, 张向阳, 等. 2020 年美国航空航天医学会(AsMA)学术年会论文集有关文献分析[J]. 空军医学杂志, 2021, 37(3): 254-257. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2021.03.019.

LIU J, DENG L, ZHANG X Y, *et al*. A review of relevant

literature in the Proceedings for the 2020 Annual Scientific Meeting of the Aerospace Medical Association[J]. Med J Air Force, 2021, 37(3): 254-257. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2021.03.019.

[2] 张琳, 姚钦, 刘娟, 等. 空间定向障碍对航空领域的影响及降低事故率训练研究[J]. 空军医学杂志, 2021, 37(1): 71-74. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2021.01.020.
ZHANG L, YAO Q, LIU J, *et al*. Influence of spatial disorientation on aviation and the training of reducing accident rate[J]. Med J Air Force,2021, 37(1): 71-74. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2021.01.020.

[3] SÁNCHEZ-TENA Á, ALVAREZ-PEREGRINA M, VALBUENA-IGLESIAS C C, *et al*. Optical illusions and spatial disorientation in aviation pilots[J]. J Med Syst, 2018, 42(5): 79. DOI: 10.1007/s10916-018-0935-4.

[4] 郝晨汝, 池子强, 赵瑞斌, 等. 空间定向障碍评价方法研究[J]. 河北工业科技, 2018, 35(1):43-48. DOI: 10.7535/hbgykj.2018yx01008.
HAO C R, CHI Z Q, ZHAO R B, *et al*. Research of spatial disorientation evaluation method[J]. Hebei J Ind Sci Technol, 2018, 35(1): 43-48. DOI: 10.7535/hbgykj.2018yx01008.

[5] 徐先荣, 张扬, 赵霆, 等. 飞行员严重飞行错觉的临床研究[J]. 临床耳鼻咽喉科杂志, 2006, 20(16): 746-749. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1781.2006.16.010.
XU X R, ZHANG Y, ZHAO T, *et al*. The study of fatal flight illusion in pilots[J]. J Clin Otorhinolaryngol,2006, 20(16): 746-749. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1781.2006.16.010.

[6] 黄炜, 吕汽兵, 季思菊, 等. 空军飞行员飞行错觉后反应分析[J]. 中华航空航天医学杂志, 2010, 21(3): 176-179. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2010.03.003.
HUANG W, LYU Q B, JI S J, *et al*. Analysis on the Air Force pilots' response when flight illusion occurred[J]. Chin J Aerosp Med,2010, 21(3): 176-179. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2010.03.003.

[7] HEPPNER F H, GABEL J E, MARCH K. Avian flight without visual reference: preflight spinning produces spatial disorientation[J]. Aviat Space Environ Med, 2007, 78(1): 43-47.

[8] GIBB R, ERCOLINE B, SCHARFF L. Spatial disorientation: decades of pilot fatalities[J]. Aviat Space Environ Med, 2011, 82(7): 717-724. DOI: 10.3357/asem.3048.2011.

[9] 于立身. 前庭功能检查技术[M]. 西安: 第四军医大学出版社, 2013.
YU L S. Vestibular function examination techniques[M]. Xi'an: Fourth Military Medical University Press, 2013.

[10] 王聪, 郭大龙, 赵显亮, 等. 基于空间定向感知模型的飞行错觉模拟效果评价[J]. 航天医学与医学工程, 2020, 33(6): 471-476. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2020.06.001.
WANG C, GUO D L, ZHAO X L, *et al*. Evaluation of simulation effect of flight illusion based on space orientation perception model[J]. Space Med Med Eng, 2020, 33(6): 471-476. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2020.06.001.

[11] 李靖, 张佳丽, 刘浩, 等. 仪表飞行条件下飞行错觉与仪表注视的相关分析[J]. 转化医学杂志, 2019, 8(2): 115-118. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3097.2019.02.013.
LI J, ZHANG J L, LIU H, *et al*. The relationship between flight illusion and instrument fixation under instrument flying condition[J]. Transl Med J, 2019, 8(2):115-118. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3097.2019.02.013.

[12] 景晓旭, 秦文洋. 低能见度条件的形成原因以及目视转场飞行时飞行员的应对手段[J]. 科技与创新, 2022,14: 44-46, 53. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2022.14.015.
JING X X, QIN W Y. Causes of low visibility conditions and pilots' countermeasures in visual transition flight[J]. Sci Technol Innov, 2022,14: 44-46, 53. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2022.14.015.

[13] BAŁAJ B, LEWKOWICZ R, FRANCUZ P, *et al*. Spatial disorientation cue effects on gaze behaviour in pilots and non-pilots[J]. Cogn Technol Work, 2019, 21(3): 473-486. DOI: 10.1007/s10111-018-0534-7.

[14] HAMAN F, SOUZA S C S, CASTELLANI J W, *et al*. Human vulnerability and variability in the cold: establishing individual risks for cold weather injuries[J]. Temperature, 2022, 9(2): 158-195. DOI: 10.1080/23328940.2022.2044740.

[15] RAY M, KING M, CARNAHAN H. A review of cold exposure and manual performance: implications for safety, training and performance[J]. Saf Sci, 2019, 115: 1-11. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.01.014.

[16] BERNHARDT K A, KELLEY A M, FELTMAN K A, *et al*. Rest and activity patterns of army aviators in routine and operational training environments[J]. Aerosp Med Hum Perform, 2019, 90(1): 48-52. DOI: 10.3357/amhp.5193.2019.

[17] 于宝成, 何建政, 董魁星. 陆航直升机飞行环境对飞行人员睡眠质量的影响[J]. 航空航天医学杂志,2015,

(8): 948-949. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1434.2015.08.017.
YU B C, HE J Z, DONG K X. Influence of flight environment of Luhang helicopter on sleep quality of pilots[J]. J Aerosp Med, 2015(8): 948-949. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1434.2015.08.017.

[18] 宗玉国,吴岩印,陈孔彬,等.飞行定向的空间认知特征研究[J].中华航空航天医学杂志,2003,14(2):87-90. DOI:10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2003.02.011.
ZONG Y G, WU Y Y, CHEN K B, *et al*. Examination of visuospatial cognitive characteristics of orientation in flight[J]. Chin J Aerosp Med,2003, 14(2): 87-90. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2003.02.011.

[19] 侯刚, 王延明. 直-11飞行员的错觉调查[J]. 中华航空航天医学杂志, 2003,14(2):119-121. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2003.02.021.
HOU G, WANG Y M. Investigation on the Illusion of Z-11 helicopter pilots[J]. Chin J Aerosp Med, 2003, 14(2): 119-121. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2003.02.021.

[20] 黄炜, 吕汽兵, 季思菊. 空军飞行员飞行错觉性质分类调查[J]. 中国疗养医学, 2011, 20(2): 180-181. DOI: 10.13517/j.cnki.ccm.2011.02.062.
HUANG W, LYU Q B, JI S J. Classification survey of flight illusion properties of the pilots in the air force[J]. Chin J Conval Med,2011, 20(2): 180-181. DOI:10.13517/j.cnki.ccm.2011.02.062.

[21] 晏碧华, 游旭群, 杨仕云. 飞行员优势空间能力研究现状及展望[J]. 航天医学与医学工程, 2012, 25(2):152-156. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2012.02.018.
YAN B H, YOU X Q, YANG S Y. Achievements and prospect of researches on spatial ability processing advantage in pilots[J]. Space Med Med Eng, 2012, 25(2)152-156. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2012.02.018.

[22] 陈珊,姚钦,刘娟,等. 第91届美国航空航天医学会学术年会有关文献分析[J].空军航空医学,2022,39(4):328-331,352. DOI:10.3969/j.issn.2097-1753.2022.04.014.
CHEN S, YAO Q, LIU J, *et al*. A review of relevant literature in the Proceedings for the 91th Annual Scientific Meeting of the Aerospace Medical Association[J]. Aviat Med Air Force, 2022, 39(4): 328-331, 352. DOI:10.3969/j.issn.2097-1753.2022.04.014.

[23] WINGELAAR-JAGT Y Q, WINGELAAR T T, RIEDEL W J, *et al*. Fatigue in aviation: safety risks, preventive strategies and pharmacological interventions[J]. Front Physiol, 2021, 12: 712628. DOI: 10.3389/fphys.2021.712628.

[24] TAHERIGORJI H, WILSON N, VANBREE J, *et al*. Using machine learning methods and EEG to discriminate aircraft pilot cognitive workload during flight[J]. Sci Rep, 2023, 13: 2507. DOI: 10.1038/s41598-023-29647-0.

[25] CHAUDHARY N S, TAYLOR B V, GRANDNER M A, *et al*. The effects of caffeinated products on sleep and functioning in the military population: a focused review[J]. Pharmacol Biochem Behav, 2021, 206: 173206. DOI: 10.1016/j.pbb.2021.173206.

[26] DEOLINDO C S, RIBEIRO M W, DE ARATANHA M A A, *et al*. Microstates in complex and dynamical environments: Unraveling situational awareness in critical helicopter landing maneuvers[J]. Hum Brain Mapp, 2021, 42(10): 3168-3181. DOI: 10.1002/hbm.25426.

(**收稿**:2023-07-19;**修回**:2023-08-24)
(编辑 栾 嘉)