

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230471

• 短篇论著 •

满月光环境下夜视镜对视觉绩效的影响

陈剑政^{1,2}, 陈涛^{1,3}, 曹瑞丹¹, 张建英², 许丽芬², 张作明¹, 苏玉婷^{1*}

1. 空军军医大学航空航天医学系航空临床医学中心, 教育部航空航天医学重点实验室, 西安 710032

2. 海军青岛特勤疗养中心感官生理训练科, 青岛 266071

3. 空军军医大学第一附属医院空勤科, 西安 710032

[摘要] **目的** 研究夜视镜(NVG)对视觉绩效的影响, 为开展NVG地面模拟训练提供试验依据。**方法** 招募20名视力正常的志愿者, 佩戴NVG在满月光环境(0.1 lx)下检测静态远视力、深径觉误差、动态视力(DVA, 3.0、4.5、6.0、7.5 km/h运动速度)、视觉认知时间、视觉搜索时间5项视觉绩效指标, 通过与裸眼在曙暮光环境(15 lx)下测得的相同指标的比较评估满月光环境下NVG对视觉绩效的影响。对比佩戴NVG和裸眼在标准暗室中对红、蓝光源(2 cd/m²)位置关系的判断能力。**结果** 与裸眼在曙暮光环境下相比, 佩戴NVG在满月光环境下的4种运动速度(3.0、4.5、6.0、7.5 km/h)的DVA均降低(均 $P<0.001$), 深径觉误差和视觉搜索时间增加(均 $P<0.05$), 而两组间静态远视力和视觉认知时间差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。佩戴NVG正确判断红、蓝光源远近位置关系的得分低于裸眼($P=0.001$), 佩戴NVG更容易误判红色光源距离自己较近($P=0.001$)。**结论** DVA、深径觉和视觉搜索能力是NVG提升视觉绩效的薄弱点, NVG地面模拟训练应重视动态目标的搜索、识别及深径觉训练。佩戴NVG飞行时不能把颜色光源作为距离判断的线索, 应注重NVG和裸眼的交替使用, 增强获取系统信息和建立周围情景意识的能力。

[关键词] 夜视镜; 视觉绩效; 夜视训练; 飞行人员; 满月光环境

[引用本文] 陈剑政, 陈涛, 曹瑞丹, 等. 满月光环境下夜视镜对视觉绩效的影响[J]. 海军军医大学学报, 2024, 45(7): 905-910. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230471.

Effect of night vision goggle on visual performance in full moonlight environment

CHEN Jianzheng^{1,2}, CHEN Tao^{1,3}, CAO Ruidan¹, ZHANG Jianying², XU Lifen², ZHANG Zuoming¹, SU Yuting^{1*}

1. Ministry-of-Education Key Laboratory of Aerospace Medicine, Center of Clinical Aerospace Medicine, School of Aerospace Medicine, Air Force Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi, China

2. Department of Sensory Physiological Training, Qingdao Special Servicemen Recuperation Center of PLA Navy, Qingdao 266071, Shandong, China

3. Department of Aviation Medicine, The First Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi, China

[Abstract] **Objective** To study the effect of night vision goggle (NVG) on visual performance, so as to provide an experimental basis for NVG ground simulation training. **Methods** Twenty volunteers with normal vision were recruited. The static distanced visual acuity, depth perceptual error, dynamic visual acuity (DVA; 3.0, 4.5, 6.0, and 7.5 km/h), visual cognition time, and visual search time were measured with NVG in the full moonlight environment (0.1 lx). The effect of NVG on visual performance in the full moonlight environment was assessed by comparing with the same indicators measured with the naked eye in the twilight light environment (15 lx). Also, the ability to judge the positions of red and blue light (2 cd/m²) in a dark room was compared between wearing NVG and the naked eye. **Results** Compared with the naked eye in the twilight environment, DVA for all 4 speeds (3.0, 4.5, 6.0, and 7.5 km/h) was decreased (all $P<0.001$), depth perceptual error and visual search time were increased (both $P<0.05$) in the full moonlight environment with the NVG, whereas there were no significant differences in static distanced visual acuity or visual cognitive time (both $P>0.05$). The scores of wearing NVG for correctly

[收稿日期] 2023-08-18 **[接受日期]** 2024-03-23

[基金项目] 空军军医大学航空医学提升项目(2020ZTB01, 2019ZTB01, 2020ZTF02), 空军军医大学军事医学提升计划(2021HKYX18). Supported by Aerospace Medicine Promotion Project of Air Force Medical University (2020ZTB01, 2019ZTB01, 2020ZTF02) and Military Medicine Promotion Program of Air Force Medical University (2021HKYX18).

[作者简介] 陈剑政, 硕士. E-mail: jianzhengpla@163.com

*通信作者(Corresponding author). Tel: 029-84774817, E-mail: sssusy@163.com

judging the relationship between red and blue light were significantly lower than those of the naked eye ($P=0.001$). Wearing NVG was more likely to misjudge the red light closer to them ($P=0.001$). **Conclusion** DVA, depth perception and visual search capability are the weak points for NVG to improve the visual performance. NVG ground simulation training should emphasize the search of dynamic targets, recognition, and training of depth perception. Flying with NVG should not use the color light as a cue for distance judgments, and should focus on alternating between NVG and the naked eye to enhance the ability to acquire systematic information and build situational awareness.

[**Key words**] night vision goggle; visual performance; night vision training; flight personnel; full moonlight environment

[**Citation**] CHEN J, CHEN T, CAO R, et al. Effect of night vision goggle on visual performance in full moonlight environment[J]. Acad J Naval Med Univ, 2024, 45(7): 905-910. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230471.

随着科学技术的高速发展及其在军事航空上的应用,现代空战已逐步转向夜间发动,只有掌握夜战制胜权才能赢得未来战争的主动权。夜间空中突袭已成为现代战争制胜的主要手段,但夜间飞行迥异于昼间飞行,飞行员的视觉功能在夜间环境显著减退,存在视力下降、夜间近视、夜视盲点、色觉减弱或丧失等特点,导致飞行员难以发现目标、识别地标、判断距离和空间定位,从而影响飞行安全和飞行部队战斗力。夜视镜(night vision goggle, NVG)极大地提升了人类在暗环境下的操作能力,已被广泛应用于军事飞行领域^[1]。佩戴NVG飞行是北约部队夜航飞行的常态,其夜战能力也因此得到显著提升。然而,NVG也存在局限性,如单色视觉、立体-深度觉减弱、分辨率低、管状视野等,并由此带来安全隐患甚至导致飞行事故^[2-4]。美国陆军安全中心对旋翼飞行器夜间行动事故率的统计结果显示,夜视设备辅助下的夜间飞行事故率(15.8/10 000 h)远高于裸眼夜间飞行(9.31/10 000 h)和昼间飞行(7.69/10 000 h)^[5]。因此,为了减少夜间飞行事故,保证夜间飞行安全,对飞行人员开展NVG地面模拟训练非常重要^[6-8]。

NVG能够提高周围环境的可视性,但不能将暗视觉环境变成明视觉环境。NVG的实际亮度属于中间视觉亮度水平^[9],而曙暮光环境亦属于中间视觉环境。本研究通过对比佩戴NVG在满月光环境下和裸眼在曙暮光环境下的视觉绩效,评估NVG对不同视觉指标的影响,为开展NVG地面模拟训练提供试验依据。

1 对象和方法

1.1 研究对象 从空军军医大学招募20名志愿者,均为男性,年龄20~34岁,平均年龄

(25.0 ± 3.6)岁。纳入标准:单眼最佳裸眼远视力 ≥ 1.0 (小数视力);等效球镜度数 $-0.5\sim 0.5$ D;暗适应功能正常。排除标准:有屈光不正手术史;色盲或色弱;患有中枢神经系统疾病;患有青光眼或糖尿病视网膜病变等眼部器质性疾病。本研究经空军军医大学医学伦理委员会批准,所有受试者在试验前均知悉所有试验步骤并签署知情同意书。试验在空军军医大学航空航天医学系航空临床医学中心航空视觉功能训练室进行。

1.2 检测方法

1.2.1 暗室的建立及光环境模拟 实验室为暗室,墙壁、天花板及地面均为不反光材料,所有光源关闭后环境亮度低于 1×10^{-5} cd/m²。采用微光积分球光源(西安东科光电技术有限公司)模拟满月光环境(0.1 lx),积分球内壁为硫酸钡涂层,光源为白炽灯,严格控制色温[($2\ 856\pm 50$) K]和光谱范围(0.4~1.0 μm)。采用稳压电源控制电压和电流的变化,通过改变光圈的大小调节出光量。微光积分球光源距离照射目标160 cm,偏离10°,保证光照覆盖整个目标。通过标准化灯光照明系统[明目科技(北京)有限责任公司]模拟曙暮光环境(15 lx、3 000 K)。

1.2.2 试验仪器 采用OHSP-350F光谱闪烁照度计(杭州虹谱光色科技有限公司)测量环境的照度和色温,采用KR-8100PA全自动验光仪(日本拓普康公司)验光;采用微光分辨率靶板(深圳亮睛医疗设备有限公司)和无背光标准对数远视力表(人民卫生出版社)分别检测佩戴NVG(北方光电集团有限公司)和裸眼的静态远视力;采用深径觉计(西安太世德航空电器有限公司)检测深径觉误差;采用动态视力(dynamic visual acuity, DVA)检测仪(西安太世德航空电器有限公司)检

查DVA^[10]；采用视觉测试软件（空军军医大学航空航天医学系航空临床医学中心）检测视觉认知时间和视觉搜索时间；采用墨水屏显示器（北京大上科技有限公司）显示视觉认知和视觉搜索的视标；采用浦肯野位移演示仪（西安太世德航空电器有限公司）评估佩戴NVG对红色和蓝色光源位置关系的判断能力。

1.2.3 试验步骤 受试者通过电脑验光及视力检查符合纳入标准后，首先进行NVG的调校及使用培训。在熟练掌握NVG的操作后，受试者佩戴NVG在满月光环境和裸眼在曙暮光环境下检测静态远视力、深径觉误差、DVA、视觉认知时间、视觉搜索时间5项视觉绩效指标，最后评估佩戴NVG对颜色光源的距离判断能力。试验前受试者暗适应20 min，光环境转换间歇时受试者休息5 min以缓解视疲劳。所有试验均由同一主试者完成，正式试验开始前受试者进行充分的练习，以消除学习效应。

1.3 检测指标

1.3.1 静态远视力 采用微光分辨率靶板（图1）检测佩戴NVG的静态远视力^[11]。靶板对比度为85%~90%，采用三横或三竖（仿E形）的图形，分为6组，每组编号为-2、-1、0、1、2、3；每组由6个单元组成，单元号为1、2、3、4、5、6，每个单元有横、竖2个图形。受试者坐于距分辨率靶板5 m处，佩戴好NVG后在满月光环境下检查双眼的静态远视力。受试者能看清3个独立线条的最小图形单元所对应的视力，即为该亮度环境下的NVG视力（如0组6号对应于小数视力0.63）^[12]。此外，采用无背光标准对数远视力表检测受试者裸眼在曙暮光环境下的双眼静态远视力。

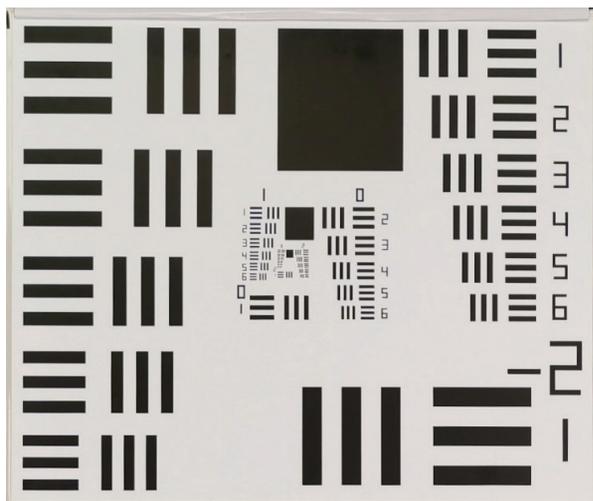


图1 微光分辨率靶板

1.3.2 深径觉误差 受试者坐于距深径觉计5 m处，深度觉计上的2根滑杆初始水平位置相同，主试者根据随机数表控制1号杆随机纵向移动一定距离，要求受试者移动2号杆到同一水平位置，两杆间的纵向距离差即为深径觉误差，误差越小深径觉能力越强。每种光环境下各测量3次，取平均值。

1.3.3 DVA DVA检测仪为一个可逆时针旋转的圆盘（直径1 m），内置可显示视标“E”的墨水屏（75 mm×75 mm），通过计算机程序控制圆盘旋转速度和视标大小，并确保视标在圆盘旋转状态下不改变方向。受试者通过键盘输入视标方向，计算机程序自动判定结果。视标“E”由大到小对应小数视力0.1~2.0。圆盘转动的线速度有4档，分别是3.0、4.5、6.0、7.5 km/h。受试者坐于距DVA检测仪5 m处，双眼视线与转盘圆心在同一水平高度。受试者连续2次判断正确则提高难度，连续2次判断错误则测试中止，连续2次判断正确的最小视标对应该受试者的DVA。

1.3.4 视觉认知时间 受试者坐于距墨水屏显示器1 m处，在311 mm×553 mm的屏幕中心辨别“E”视标（29.09 mm×29.09 mm）并迅速做出反应。视标在屏幕中心出现10次，每2次出现的间隔时间随机。记录受试者判断视标的反应时间，用于衡量视觉认知能力，时间越短视觉认知能力越强。

1.3.5 视觉搜索时间 视标“E”在墨水屏显示器屏幕任意位置出现12次，每2次出现的间隔时间随机。受试者坐于距屏幕2 m处，在311 mm×553 mm的屏幕上寻找视标“E”（11.63 mm×11.63 mm），同时辨别视标的开口方向。记录受试者做出判断的平均反应时间及正确率，平均反应时间除以正确率即得到受试者的视觉搜索时间，用于衡量视觉搜索能力，时间越短视觉搜索能力越强。

1.3.6 判断颜色光源的远近位置关系 在标准暗室中，将2个浦肯野位移演示仪分别设置为红灯和蓝灯，光源亮度均为2 cd/m²。试验时，浦肯野位移演示仪存在3种位置关系：两灯平行、红灯近蓝灯远或红灯远蓝灯近（前后距离50 cm）。受试者在距浦肯野位移演示仪5 m处，分别在佩戴NVG和裸眼情况下判断光源的远近位置关系各3次。光源的位置关系顺序随机生成且不重复。为避免受试者猜测，正式试验前增加1次随机位置的判断（不计入最后成绩）。判断正确计1分，

判断错误不计分,通过NVG和裸眼的得分情况评估对颜色光源位置关系的判断能力。此外,当红光远误判为红光近或两灯平行,或将两灯平行误判为红光近时计-1分,比较NVG和裸眼的扣分情况以评估对红光的误判水平。

1.4 统计学处理 将测得的视力值均转化为最小分辨角的对数(logarithm of the minimum angle of resolution, logMAR)视力,以便于统计学处理。应用SPSS 21.0软件进行统计学分析。采用Shapiro-Wilk法对计量资料进行正态性检验,符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用配对 t 检验;呈偏态分布的计量资料以中位数(下四分位数,上四分位数)表示,采用Wilcoxon符号秩检验。采用Levene法对各组数据进行方差齐性检验。检验水准(α)为0.05。

2 结果

2.1 静态远视力、深径觉误差和视觉认知时间检测结果 佩戴NVG在满月光环境下的静态远视力 $[(0.15 \pm 0.08) \log\text{MAR}]$ 与裸眼在曙暮光环境下 $[(0.10 \pm 0.06) \log\text{MAR}]$ 比较,差异无统计学意义($t = -2.079, P > 0.05$);与裸眼在曙暮光环境下的深径觉误差 $[(13.47 \pm 8.16) \text{mm}]$ 比较,佩戴NVG在满月光环境下的深径觉误差 $[(24.35 \pm 13.03) \text{mm}]$ 显著增加,差异有统计学意义($t = -2.739, P = 0.012$);佩戴NVG在满月光环境下的视觉认知时间 $[(1\ 026.44 \pm 181.16) \text{ms}]$ 与裸眼在曙暮光环境下的视觉认知时间 $[(976.38 \pm 139.99) \text{ms}]$ 比较,差异无统计学意义($t = -1.881, P > 0.05$)。

2.2 DVA检测结果 对于3.0、4.5、6.0、7.5 km/h运动速度的视标,佩戴NVG在满月光环境下的DVA $[(0.18 \pm 0.10)$ 、 (0.29 ± 0.14) 、 (0.36 ± 0.11) 、 $(0.48 \pm 0.17) \log\text{MAR}]$ 均低于裸眼在曙暮光环境下的DVA $[(-0.04 \pm 0.11)$ 、 (0.09 ± 0.09) 、 (0.12 ± 0.10) 、 $(0.24 \pm 0.11) \log\text{MAR}]$,差异有统计学意义($t = -5.939$ 、 -5.301 、 -6.358 、 -4.939 ,均 $P < 0.001$)。

2.3 视觉搜索时间检测结果 佩戴NVG在满月光环境下的视觉搜索时间 $[2\ 366(1\ 383, 2\ 725) \text{ms}]$ 长于裸眼在曙暮光环境下的视觉搜索时间 $[1\ 372(1\ 258, 1\ 491) \text{ms}]$,差异有统计学意义($Z = -3.547, P < 0.001$)。

2.4 红、蓝光源远近位置关系判断得分 佩戴

NVG判断红、蓝光源远近位置关系的得分 $[1.00(0, 1.00) \text{分}]$ 低于裸眼 $[2.00(2.00, 3.00) \text{分}]$,差异有统计学意义($Z = -3.208, P = 0.001$)。佩戴NVG误判红光近的扣分 $[-2.00(-2.75, -2.00) \text{分}]$ 高于裸眼 $[0(-1.00, 0) \text{分}]$,差异有统计学意义($Z = -3.208, P = 0.001$)。

3 讨论

NVG通过像增强技术提高夜间环境的可视亮度,大大扩展了飞行人员的作战时空。但由于夜间暗环境的影响和NVG内部特殊构造的限制,决定了NVG较低的光学分辨力和中间视觉亮度水平,并且它的使用也具有一定的局限性^[2,4,13]。NVG对视觉绩效的提升取决于外界的微光环境、NVG光电元件及显示屏的亮度、对比度和分辨率等^[14]。当环境亮度降低到较低水平时,增益限制将导致NVG成像质量严重下降,很难准确评估点光源(如飞机外部灯光、地面车辆、环境灯光等)之间的距离^[15]。NVG的成像质量直接影响NVG视力,在满月光条件下美军的二代NVG能达到20/47 Snellen视力(相当于小数视力0.42),三代NVG在理想条件下能达到20/25 Snellen视力(相当于小数视力0.80)^[16-17]。本研究结果显示受试者佩戴NVG在满月光条件下的平均视力可达到0.15 logMAR(相当于小数视力0.71),略低于裸眼在曙暮光环境下的平均视力水平0.10 logMAR(相当于小数视力0.80),但两者之间差异无统计学意义,表明NVG视力在满月光环境下可以达到较好的夜视效果。

深径觉对起飞着陆、编队飞行和空中加油等操作至关重要。本试验结果显示佩戴NVG在满月光环境下的深径觉误差高于裸眼在曙暮光环境下。NVG成像缺乏层次感,对飞行人员在高度和距离的判断上造成极大挑战^[18]。飞行员佩戴NVG常出现对地面高度和接近速率的误判,以及与其他飞行器和障碍物的距离估计、安全空间的误判^[19],估计的物我距离要比实际距离近,且实际距离越小对距离的低估越大^[20]。此外,NVG会降低空间感知能力^[21]。有研究表明距离估计可以通过训练提高,有助于飞行员判断飞行高度和降低碰撞风险^[22]。夜视飞行需要利用飞机仪表信息和其他可用的感知线索进行补偿^[23]。掌握NVG对深径觉的影响并

多加训练有益于飞行员在实战环境中更好地应用 NVG。视觉认知时间反映了对近处目标的识别能力。本试验结果显示佩戴 NVG 在满月光环境下与裸眼在曙暮光环境下的视觉认知时间差异无统计学意义。但这是在高对比度目标的情况下,低对比度目标的识别情况还需进一步研究,因为目标对比度对 NVG 的影响可能比环境亮度更大^[15]。

DVA 和视觉搜索能力符合飞行人员观察、搜寻不同速度动态目标或静止物体的特点。值得注意的是,本试验结果表明,在满月光环境下佩戴 NVG 的 DVA 和视觉搜索能力均低于裸眼在曙暮光环境下,可能是因为通过 NVG 观察的视野比较狭小(一般只有 40°),且 NVG 显示管屏幕较为明亮,使得飞行人员注意力过多集中在中心视野,加重了周边视觉丧失的程度^[15],从而影响了飞行人员对目标的搜索和识别。可见 DVA 和视觉搜索能力是 NVG 提升视觉能力的薄弱点,组织飞行员进行 NVG 地面模拟训练时,可以针对性地加强 DVA 和视觉搜索方面的训练,同时注重 NVG 扫视方法的掌握,通过转动头部扫视四周环境,尽可能多地获得飞行所需的视觉信号,提高获取信息的质量^[15,24]。本试验结果还表明佩戴 NVG 对红、蓝光源远近关系的判断能力低于裸眼,更容易误判红色光源距离自己较近。NVG 对光的敏感波长为 625~900 nm,主要是近红外光,而裸眼对光的敏感波长为 380~780 nm,主要是可见光^[25]。即使红、蓝光源的亮度一样,NVG 对波长较长的红光会更敏感,受试者观察到的红光也会更加明亮,根据“亮近暗远”的认知习惯容易产生错误的感知,甚至产生错觉^[26]。因此,佩戴 NVG 飞行时不能把颜色光源作为距离判断的线索,应注意裸眼与 NVG 的交替使用,增强周围情景意识的建立和系统信息的获取能力。

综上所述,相比于裸眼在曙暮光环境下,佩戴 NVG 在满月光环境下的静态远视力、视觉认知时间无显著差异,而深径觉、DVA 和视觉搜索能力下降明显。此外,佩戴 NVG 对颜色光源位置关系的判断能力降低。因此,开展 NVG 地面模拟训练可以针对性地加强深径觉训练、动态目标的搜索训练及裸眼与 NVG 的交替使用训练。

本研究存在一些局限性。首先,本研究的受试者为青年男性,未纳入女性受试者,忽略了男女性别可能存在身体机能上的差异;其次,视觉器官的

机能会随着年龄的增长而减弱,这一生理现象对视觉绩效的影响在本研究中未予讨论;第三,虽然试验期间给予受试者充分休息,但未纳入视觉疲劳^[24]和颈部负荷^[27]等影响因素。下一步我们将扩大受试人群包括不同年龄段的男性和女性,并分析视觉疲劳、颈部负荷对佩戴 NVG 视觉绩效的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 张勇,马飒飒,李志伟. 美军微光夜视头戴系统技术进展[J]. 红外,2022,43(6):12-19. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.06.002.
- [2] 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/asm.3048.2011.
- [3] 于飞,姚钦,陈珊,等. 飞行员佩戴微光夜视镜后远视力检测时的光照条件研究[J]. 中华航空航天医学杂志,2021,7(2):76-80. DOI: 10.3760/cma.j.cn113854-20201025-00158.
- [4] 王聪,于飞,杨明浩,等. 一种微光夜视成像系统设计[J]. 空军医学杂志,2021,37(1):5-8. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2021.01.002.
- [5] JOHNSON C A; International Federation for Information Processing (IFIP). The role of night vision equipment in military incidents and accidents[C]// IFIP World Computer Congress; Working Conference on Human Error, Safety and Systems Development. Department of Computing Science, University of Glasgow, Glasgow, G12 9QQ, Scotland, 2004. DOI: 10.1007/1-4020-8153-7_1.
- [6] SABATINI R, RICHARDSON M A, CANTIELLO M, et al. A novel approach to night vision imaging systems development, integration and verification in military aircraft[J]. Aerosp Sci Technol, 2013, 31(1): 10-23. DOI: 10.1016/j.ast.2013.08.021.
- [7] 袁有志,宋建华,董保根,等. 飞行员夜视镜的人机工效分析及效能提升方法[J]. 红外技术,2022,44(12): 1287-1292.
- [8] 刘晓莉. 奥地利 AMST 公司飞行员弹射和夜视训练装备研究[J]. 中国个体防护装备,2023(5):16-19.
- [9] MACUDA T, ALLISON R S, THOMAS P, et al. Comparison of three night vision intensification tube technologies on resolution acuity: results from grating and Hoffman ANV-126 tasks[C]. Bellingham WA: SPIE, 2005. DOI: 10.1117/12.602598.
- [10] 陈剑政,陈涛,苏玉婷,等. 模拟光环境对动态视力的影响[J]. 军事医学,2023,47(5):359-363. DOI: 10.7644/j.issn.1674-9960.2023.05.007.
- [11] PINKUS A, TASK H L. Measuring observers' visual

- acuity through night vision goggles[R]. PHOENIX, AZ: Air Force Research Laboratory Wright Patterson AFB, OH 45433, 1998.
- [12] CUQLOCK-KNOPP V G, BENDER E, MERRITT J, et al. Visual acuity for high-contrast tri-bar targets illuminated with spectra simulating night vision goggle (NVG) displays and the no-moon night sky[R]. 2010.
- [13] 王聪,李玉亮,师国伟,等. 微光夜视成像系统开发与视觉效果评价[J]. 空军航空医学, 2023, 40(2):97-101.
- [14] RABIN J. Image contrast and visual acuity through night vision goggles[R]. U.S. Army Aeromedical Research Laboratory, 1996.
- [15] SALAZAR G, TEMME L, ANTONIO J C. Civilian use of night vision goggles[J]. Aviat Space Environ Med, 2003, 74(1): 79-84.
- [16] KOTULAK J C, RASH C E. Visual acuity with second and third generation night vision goggles obtained from a new method of night sky simulation across a wide range of target contrast[R]. 1992.
- [17] HATLEY M S C. NVGs: don't fly at night without them[J]. Flying Safety, 2001, 57(9): 4-9.
- [18] 苏芳,刘琳,于飞,等. 基于德尔菲法飞行员夜视镜人机工效评价指标体系构建[J]. 人类工效学, 2023, 29(3):60-65. DOI: 10.13837/j.issn.1006-8309.2023.03.0009.
- [19] RENSHAW P F, WIGGINS M W. A self-report critical incident assessment tool for army night vision goggle helicopter operations[J]. Hum Factors, 2007, 49(2): 200-213. DOI: 10.1518/001872007x312441.
- [20] DELUCIA P R, TASK H L. Depth and collision judgment using night vision goggles[J]. Int J Aviat Psychol, 1995, 5(4): 371-386. DOI: 10.1207/s15327108ijap0504_3.
- [21] 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.
- [22] NIALL K K, REISING J D, MARTIN E L. Distance estimation with night vision goggles: a little feedback goes a long way[J]. Hum Factors, 1999, 41(3): 495-506, 507-510. DOI: 10.1518/001872099779611012.
- [23] WILEY R W. Visual acuity and stereopsis with night vision goggles[R]. 1989.
- [24] STASIAK K, ZYSKOWSKA M, GŁOWINKOWSKA I, et al. Influence of night vision goggles with white and green phosphor screens on selected parameters of the eye and fatigue[J]. Ergonomics, 2022, 65(7): 999-1014. DOI: 10.1080/00140139.2021.2008019.
- [25] TASK H L, PINKUS A R, BARBATO M H, et al. Night vision imaging system lighting evaluation methodology[C]. Bellingham WA: SPIE, 2005.
- [26] HOGERVORST M A, KOOI F L, HUCKRIDGE D A, et al. NVG-the-day: towards realistic night-vision training[C]. SPIE, 2014. DOI: 10.1117/12.2066700.
- [27] HARRISON M F, COFFEY B, ALBERT W J, et al. Night vision goggle-induced neck pain in military helicopter aircrew: a literature review[J]. Aerosp Med Hum Perform, 2015, 86(1): 46-55. DOI: 10.3357/AMHP.4027.2015.

[本文编辑] 尹 茶