

基于CHG指数和临床指标的军事飞行人员5年高血压发病风险预测模型

何清伟¹, 曹钰琨², 李博文³, 杨心悦³, 贺琼逸², 张海涛^{1,2*}

¹安徽医科大学空军临床学院, 安徽合肥 230032; ²空军军医大学空军特色医学中心心血管内科, 北京 100142; ³河北北方学院研究生院, 河北张家口 075000

[中图分类号] R856.5 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.1987.2026.0527

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 何清伟, 曹钰琨, 李博文等. 基于CHG指数和临床指标的军事飞行人员5年高血压发病风险预测模型[J]. 解放军医学杂志, DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.1987.2026.0527.

[收稿日期] 2025-09-22

[录用日期] 2026-03-01

[上线日期] 2026-05-27

[摘要] 目的 基于胆固醇-高密度脂蛋白-葡萄糖(CHG)指数和临床指标构建列线图模型预测军事飞行人员5年高血压发病风险, 为其早期识别与干预提供预测工具。方法 回顾性选取2016年1月—2020年6月于空军特色医学中心进行体检或疾病诊治的血压正常的1051名男性军事飞行人员, 随机分为训练集($n=736$)和验证集($n=315$), 并随访至2025年7月30日。采用Kaplan-Meier法、Cox比例风险模型分析CHG水平和其他临床指标对高血压发病的影响, 并构建包含CHG的列线图预测模型。采用受试者操作特征(ROC)曲线、校准曲线和决策曲线评估模型的区分度、校准能力和临床实用性, 并用验证集对模型预测性能进行内部验证。结果 随访69(54~71)个月后, 研究对象中共新发高血压290例(27.6%)。Kaplan-Meier生存曲线和多因素Cox分析显示, CHG指数、年龄、体重指数、舒张压、高血压家族史、吸烟、动脉粥样硬化、尿酸和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)均为新发高血压的独立预测因子; 采用上述预测因子构建的列线图模型, 预测军事飞行人员5年新发高血压的预测效能和临床获益良好。结论 CHG指数是军事飞行人员高血压发病风险的独立预测因子; 基于CHG指数和其他临床指标构建的列线图模型可用于早期识别高血压风险。

[关键词] 飞行人员; 高血压; 胆固醇-高密度脂蛋白-葡萄糖指数; 预测模型; 列线图

A risk prediction model for 5-year hypertension incidence in military pilots based on CHG index and clinical indicators

He Qing-Wei¹, Cao Yu-Kun², Li Bo-Wen³, Yang Xin-Yue³, He Qiong-Yi², Zhang Hai-Tao^{1,2*}

¹Air Force Clinical Medical School, Anhui Medical University, Hefei, Anhui 230032, China

²Department of Cardiology, Air Force Medical Center, Air Force Medical University, Beijing 100142, China

³Graduate School, Hebei North University, Zhangjiakou, Hebei 075000, China

*Corresponding author, E-mail: kjzht@sina.com

This work was supported by the Key Logistics Research Project of Air Force (BKJ23WS1J001)

[Abstract] **Objective** To develop a nomogram model based on the Cholesterol, high-density lipoprotein, and Glucose (CHG) index and clinical indicators for predicting the 5-year risk of hypertension in military pilots, and to provide a predictive tool for early identification and intervention. **Methods** A retrospective cohort of 1,051 male military pilots with normal blood pressure who underwent physical examinations or received medical care at the Air Force Medical Center between January 2016 and June 2020 was enrolled. Participants were randomly divided into a training set ($n=736$) and a validation set ($n=315$) and were followed up until July 30, 2025. Kaplan-Meier analysis and Cox proportional hazards models were used to analyze the impact of CHG levels and other clinical indicators on the incidence of hypertension. A nomogram prediction model incorporating CHG was constructed. The model's

[基金项目] 空军后勤重点科研项目(BKJ23WS1J001)

[作者简介] 何清伟, 硕士研究生, 主要从事心血管内科疾病方面的研究

[通信作者] 张海涛, E-mail: kjzht@sina.com

discriminative ability, calibration, and clinical utility were assessed using receiver operating characteristic (ROC) curves, calibration curves, and decision curve analysis (DCA). Internal validation was performed using the validation set. **Results** After a median follow-up of 69 (range 54-71) months, 290 participants (27.6%) developed new-onset hypertension. Kaplan-Meier survival curves and multivariable Cox regression analysis identified the CHG index, age, body mass index, diastolic blood pressure, family history of hypertension, smoking, atherosclerosis, uric acid, and low-density lipoprotein cholesterol as independent predictors of new-onset hypertension. The nomogram model constructed using these predictors demonstrated good predictive performance and clinical benefit for estimating the 5-year risk of new-onset hypertension in military aircrew. **Conclusions** The CHG index is an independent predictor of hypertension risk in military aircrew. The nomogram model based on the CHG index and other clinical indicators may be used for the early identification of hypertension risk.

[**Key words**] aircrew; hypertension; CHG index; prediction model; nomogram

军事飞行人员作为执行高强度飞行任务的特殊职业群体,长期暴露于高空低压低氧、高重力加速度(gravitational acceleration, G)载荷、高应激状态及昼夜节律紊乱等多种复杂环境^[1];其心血管系统面临显著挑战。高血压作为常见的心血管疾病(cardiovascular disease, CVD),可导致飞行人员认知功能下降,也是常见的停飞原因之一,严重威胁其身心健康与飞行安全^[2-4]。因此,早期识别与干预高血压高风险个体,对保障飞行安全、维持部队战斗力至关重要。

胆固醇、高密度脂蛋白和葡萄糖(cholesterol, high density lipoprotein, and glucose, CHG)指数是一种新型、客观的代谢复合指数,综合了总胆固醇(total cholesterol, TC)、空腹血糖(fasting blood glucose, FBG)和高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)三项指标。该指标已被提出作为糖尿病和肾脏疾病等代谢性疾病的潜在诊断工具^[5-7]。研究显示,CHG指数升高与CVD风险呈显著正相关,且存在线性趋势,提示其可作为评估CVD发病风险的代谢标志物^[8]。然而,军事飞行人员CHG指数与高血压发病之间的关系尚未见报道。本研究尝试构建一个结合CHG指数的列线图风险预测模型,以期更好地预测军事飞行人员5年高血压的发病风险,为其早期识别与干预提供预测工具。

1 资料与方法

1.1 研究对象 本研究为双向队列研究设计。回顾性收集2016年1月—2020年6月在空军特色医学中心进行体检或疾病诊治的血压水平正常、符合纳入和排除标准的1051名军事飞行人员为研究对象,均为男性,年龄(30.7 ± 7.3)岁,飞行时长(2614.14 ± 2302.74)h。采用随机数法按7:3比例将研究对象划分为训练集($n=736$)和验证集($n=315$)。随访研究对象的血压状况至2025年7月30日,依据高血压发病情况分为高血压组与非高血压组。

纳入标准:(1)年龄22~55岁;(2)基线血压正

常,符合中国高血压防治指南修订委员会等2024年发布《中国高血压防治指南2024年修订版》^[9]的相关指标,即:收缩压(systolic blood pressure, SBP) <140 mmHg且舒张压(diastolic blood pressure, DBP) <90 mmHg,未报告高血压病史,未服用任何降压药物;(3)临床资料完整。

排除标准:(1)患有严重贫血、严重感染、大出血、恶性肿瘤、血液病或伴有危及生命的心、肺、肾等疾病;(2)女性飞行人员;(3)重复住院;(4)失访。

本研究已获空军特色医学中心伦理审查委员会审批(2024-67-PJ 01)。由于研究的回顾性和数据的去识别性,伦理审查委员会批准免除签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 临床资料收集 由经过培训的医师从电子病历系统和数据库中收集研究对象的以下临床资料:(1)基本临床特征,包括年龄、身高、体重、体重指数(body mass index, BMI)、SBP、DBP、脉搏;(2)飞行特征,飞行时间;(3)行为特征,包括高血压家族史、吸烟、饮酒及婚姻状态;(4)既往病史,包括动脉粥样硬化、脂肪肝、高脂血症、高尿酸血症、肾脏疾病、糖耐量受损或糖尿病,其中肾脏疾病主要包括肾结石、肾囊肿、肾钙化;(5)入院24h内的实验室检查结果,包括甘油三酯(triglycerides, TG)、TC、低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、HDL-C、尿素氮(blood urea nitrogen, BUN)、肌酐(serum creatinine, SCr)、尿酸(uric acid, UA)、FPG、血清白蛋白(albumin, ALB)、血小板计数、红细胞计数、平均红细胞血红蛋白含量(mean corpuscular hemoglobin, MCH)、红细胞平均体积(mean corpuscular volume, MCV)、红细胞分布宽度变异系数(red cell distribution width-coefficient of variation, RDW-CV)、平均红细胞血红蛋白浓度(mean corpuscular hemoglobin concentration, MCHC)、血红蛋白、单核细胞计数、淋巴细胞计数、嗜中性粒细胞计数等,这些检测均在空腹过夜(>8h)外周静脉血进行;(5)特异指标,CHG指数,其计算方式:

$CHG = \ln[TC(mg/dl) \times FBG(mg/dl) / 2 \times HDL(mg/dl)]$ 。

1.2.2 随访和终点事件定义 随访时间定义为从入院时间至新发高血压事件、失访或研究截止日的时间，以月为单位计算。高血压发生情况主要通过定期健康体检、门诊复查及电话随访等方式获得。此外，终点事件定义为随访期间经确诊的新发高血压。所有研究对象从入院第一天起随访至 2025 年 7 月 30 日。

1.2.3 军事飞行人员 5 年高血压发病风险可能影响因素的筛选 (1)临床指标。在训练集中，根据随访结局将飞行人员分为非高血压组和高血压组，比较两组的临床资料，初步筛选高血压发病可能的影响因素。(2) CHG 指数。CHG 指数的计算方式： $CHG = \ln[TC(mg/dl) \times FBG(mg/dl) / 2 \times HDL(mg/dl)]$ 。根据基线 CHG 指数水平的三分位数，将研究对象分为低水平组($1.4 \leq CHG < 1.99$)、中水平组($1.99 \leq CHG < 2.56$)和高水平组($2.56 \leq CHG < 3.15$)。采用 Kaplan-Meier 生存曲线比较三组的高血压发病风险差异。

1.2.4 军事飞行人员 5 年高血压发病风险独立预测因素分析 在训练集中，采用 Kaplan-Meier 法绘制不同 CHG 水平组军事飞行人员的高血压累积发病风险曲线，采用 Log-rank 检验进行组间比较。基于 COX 比例风险模型，首先进行单因素分析初步筛选变量，随后将 $P < 0.05$ 的变量纳入多因素分析。为确保模型的稳健性，在变量纳入前进行多重共线性诊断，剔除方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF) > 10 或容忍度 < 0.1 的变量；在多因素分析中，采用条件逐步向后回归法进行变量筛选与模型构建，以确定高血压发病的独立预测因素。

1.2.5 军事飞行人员 5 年高血压发病风险的列线图模型的构建与性能评估 基于多因素 COX 比例风险模型筛选的飞行人员高血压发病风险的独立预测因素，构建预测军事飞行人员 5 年高血压发病风险的列线图模型。

采用受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线评估列线图模型的区分度，校准曲线评价预测概率与实际观察概率的一致性，采用决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)量化模型的临床净获益，Kaplan-Meier 生存曲线比较风险分层组之间的高血压发病率。最后，利用验证集对列线图的预测性能进行内部验证。

1.3 统计学处理 采用 SPSS(27.0 版)软件和 R 软件(4.4.1 版)进行统计分析。计量数据采用 Kolmogorov-Smirnov 检验进行评估，符合正态分布者以 $\bar{x} \pm s$ 表示，组间比较采用独立样本 t 检验；非正态分布者以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示，组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。计数数据以例(%)表示，采用卡方检验或 Fisher 精确检验。采用双侧检验， $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 训练集与验证集的基线特征比较 1051 名飞行人员随访时间 69 (54~71) 个月，新发高血压 290 例(27.6%)。训练集($n=736$)与验证集($n=315$)的 CHG 指数、基本特征、飞行特征、行为特征、既往病史及实验室指标等比较，差异均无统计学意义($P > 0.05$ ，附表 1)；提示两个数据集基线资料均衡，具有可比性。

2.2 高血压组与非高血压组的基线特征比较 在训练集中，新发高血压 212 例(28.8%)。根据随访结局将飞行人员分为非高血压组($n=524$)和高血压组($n=212$)。与非高血压组相比，高血压组的动脉粥样硬化、脂肪肝、高脂血症、高尿酸血症、糖耐量受损或糖尿病的患病率均较高($P < 0.05$)，LDL-C、TG、TC、UA、FBG、血小板计数、嗜中性粒细胞计数及 CHG 值明显升高($P < 0.05$)，而 HDL-C 和 ALB 水平则明显降低($P < 0.05$)。两组其他变量比较，差异均无统计学意义($P > 0.05$ ，表 1)。

表 1 训练集的高血压组与非高血压组军事飞行人员基线数据比较

Tab.1 Comparison of baseline data between the hypertensive and non-hypertensive groups in the training set of military pilots					
指标	训练集($n=736$)	非高血压组($n=524$)	高血压组($n=212$)	$t/Z/\chi^2$	P
基本特征					
年龄(岁, $\bar{x} \pm s$)	30.7 $\pm$ 7.2	28.7 $\pm$ 5.6	35.8 $\pm$ 8.2	11.571	<0.001
身高[cm, $M(Q_1, Q_3)$]	173.00(171.00, 176.00)	173.00(171.00, 176.00)	174.00(171.00, 177.00)	-2.315	0.033
体重[kg, $M(Q_1, Q_3)$]	72.00(67.00, 75.00)	70.00(65.00, 74.00)	75.00(71.00, 80.00)	-8.459	<0.001
BMI [kg/m^2 , $M(Q_1, Q_3)$]	23.60(22.32, 24.91)	23.12(22.13, 24.22)	24.68(23.62, 25.90)	-9.018	<0.001
SBP[mmHg, $M(Q_1, Q_3)$]	121.00(112.00, 129.00)	118.00(111.00, 127.27)	125.00(119.00, 132.00)	-6.445	<0.001
DBP[mmHg, $M(Q_1, Q_3)$]	73.42(68.00, 79.00)	72.00(67.00, 77.00)	80.00(74.00, 83.00)	-11.169	<0.001
脉搏[次/min, $M(Q_1, Q_3)$]	71.44(68.44, 73.85)	71.78(68.45, 73.92)	69.41(68.23, 73.85)	-1.886	0.059

(续 表)

指标	训练集(n=736)	非高血压组(n=524)	高血压组(n=212)	t/Z/ χ^2	P
飞行特征					
飞行时间[h, M(Q _p , Q ₃)]	2100(1400, 3000)	2100(1500, 2800)	2292(1325, 3500)	-1.838	0.066
行为特征					
高血压家族史[例(%)]	49(6.70)	20(3.80)	29(13.70)	23.624	<0.001
已婚[例(%)]	672(91.30)	484(92.40)	188(88.70)	2.585	0.108
吸烟[例(%)]	314(42.70)	200(38.20)	114(53.80)	15.027	<0.001
累计吸烟年数[年, M(Q _p , Q ₃)]	0.00(0.00,10.00)	0.00(0.00,10.00)	3.00(0.00,15.00)	-4.341	0.001
吸烟量[支/天, M(Q _p , Q ₃)]	0.00(0.00,10.00)	0.00(0.00,5.75)	3.00(0.00,10.00)	-4.693	<0.001
饮酒[例(%)]	622(84.70)	456(87.00)	166(79.00)	7.374	0.007
既往病史[例(%)]					
动脉粥样硬化[例(%)]	32(4.30)	5(1.00)	27(12.70)	50.377	<0.001
脂肪肝[例(%)]	49(6.70)	18(3.40)	31(14.60)	30.399	<0.001
高脂血症[例(%)]	66(9.00)	23(4.40)	43(20.30)	46.706	<0.001
高尿酸血症[例(%)]	55(7.50)	22(4.20)	33(15.60)	28.208	<0.001
肾脏疾病[例(%)]	195(26.50)	129(24.60)	66(31.10)	3.288	0.070
糖耐量受损(糖尿病)[例(%)]	33(4.50)	14(2.70)	19(9.00)	13.946	<0.001
实验室指标					
LDL-C(mmol/L, $\bar{x}\pm s$)	2.60±0.64	2.49±0.58	2.86±0.70	6.809	<0.001
HDL-C(mmol/L, $\bar{x}\pm s$)	1.25±0.27	1.27±0.26	1.20±0.27	-3.209	0.001
TG[mmol/L, M(Q _p , Q ₃)]	1.05(0.78,1.47)	0.98(0.73,1.34)	1.34(0.91,1.98)	-7.019	<0.001
TC(mmol/L, $\bar{x}\pm s$)	4.37±0.80	4.25±0.73	4.69±0.88	6.942	<0.001
BUN[mmol/L, M(Q _p , Q ₃)]	5.50(4.80,6.30)	5.50(4.70,6.30)	5.40(4.80,6.10)	-0.390	0.697
肌酐(umol/L, $\bar{x}\pm s$)	80.16±11.85	80.05±11.98	80.44±11.53	0.406	0.685
UA(umol/L, $\bar{x}\pm s$)	358.80±75.48	344.44±69.92	394.22±77.17	8.482	<0.001
FBG[mmol/L, M(Q _p , Q ₃)]	4.80(4.50,5.20)	4.70(4.50,5.10)	5.10(4.80,5.60)	-8.393	<0.001
ALB (g/L, $\bar{x}\pm s$)	45.47±2.80	45.79±2.72	44.68±2.84	-4.948	<0.001
血小板计数[×10 ⁹ /L, M(Q _p , Q ₃)]	191.00(165.00,221.00)	183.50(162.00,214.00)	209.00(178.00,232.00)	-5.609	<0.001
红细胞计数(×10 ¹² /L, $\bar{x}\pm s$)	4.86±0.41	4.86±0.41	4.86±0.42	-0.156	0.876
MCH(pg, $\bar{x}\pm s$)	30.54±1.47	30.53±1.47	30.56±1.46	0.243	0.808
MCV(fL, $\bar{x}\pm s$)	90.47±3.57	90.33±3.51	90.80±3.70	1.654	0.099
RDW-CV[% ,M(Q _p , Q ₃)]	12.70(12.30,13.20)	12.70(12.40,13.20)	12.65(12.20,13.18)	-2.123	0.034
MCHC[g/L, M(Q _p , Q ₃)]	337.00(330.00,344.00)	337.00(329.00,345.75)	337.00(330.25,341.00)	-1.006	0.314
血红蛋白[g/L, M(Q _p , Q ₃)]	148.00(141.00,156.00)	149.00(141.00,156.00)	142.00(142.00,155.00)	-0.105	0.917
单核细胞计数[×10 ⁹ /L, M(Q _p , Q ₃)]	0.40(0.33,0.50)	0.40(0.30,0.50)	0.41(0.37,0.51)	-1.974	0.048
淋巴细胞计数[×10 ⁹ /L, M(Q _p , Q ₃)]	2.10(1.80,2.40)	2.10(1.80,2.40)	2.10(1.80,2.40)	-0.858	0.391
嗜中性粒细胞计数[×10 ⁹ /L, M(Q _p , Q ₃)]	3.10(2.58,3.70)	3.00(2.50,3.60)	3.20(2.63,4.00)	-2.935	0.003
特征指标					
CHG 指数($\bar{x}\pm s$)	5.03±0.30	4.96±0.26	5.21±0.30	10.519	<0.001

SBP.收缩压; DBP.舒张压; BMI.体重指数; LDL-C.低密度脂蛋白胆固醇; HDL-C.高密度脂蛋白胆固醇; TG.甘油三酯; TC.总胆固醇; BUN.尿素氮; UA.尿酸; FBG.空腹血糖; ALB.白蛋白; MCH.平均红细胞血红蛋白含量; MCV.红细胞平均体积; RDW-CV.红细胞分布宽度变异系数; MCHC.平均红细胞血红蛋白浓度; CHG 指数.胆固醇、高密度脂蛋白和葡萄糖指数

2.3 CHG 指数与军事飞行人员高血压发病风险的关系 在中位随访 69 (54~71) 个月内, Kaplan-Meier 曲线分析显示, 三组飞行人员高血压累积发病率存在显著差异(Log-rank $\chi^2=90.594$, $P<0.001$)。高 CHG 水平组的高血压发病风险明显高于低、中水平组($P<$

0.001, 图 1)。
2.4 军事飞行人员高血压发病风险的单因素和多因素 COX 比例风险模型 采用单因素及多因素 COX 回归分析对训练集中飞行人员的特征变量进行筛选。在单因素分析中, 纳入表 2 中具有统计学意义或临

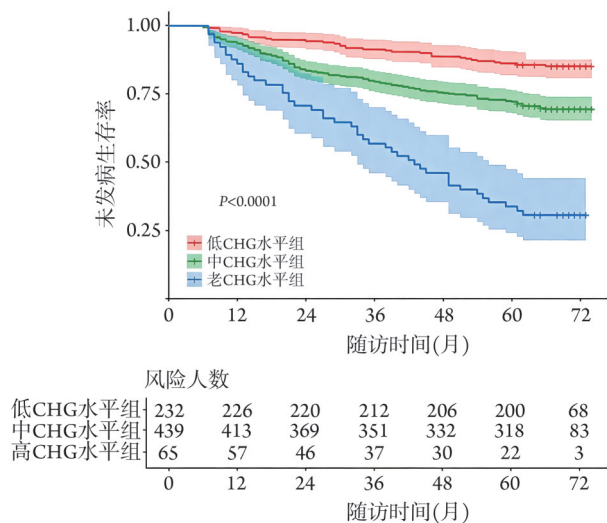


图1 基于CHG指数水平分组的军事飞行人员高血压发病风险的Kaplan-Meier生存曲线

Fig. 1 Kaplan-Meier survival curve for hypertension risk in military pilots stratified by CHG levels

累积发病率=1-未发病生存率。CHG指数,胆固醇、高密度脂蛋白和葡萄糖指数

床意义的变量进行分析(表2);结果显示,多个变量与新发高血压风险明显相关($P<0.05$),包括年龄、身高、体重、BMI、SBP、DBP、高血压家族史、吸烟相关指标(吸烟状态、累计吸烟年数、吸烟量)、饮酒状态、LDL-C、HDL-C、TG、TC、尿酸、血糖、RDW-CV、单核细胞计数、嗜中性粒细胞计数,以及疾病史(包含动脉粥样硬化、脂肪肝、高脂血症、高尿酸血症、糖耐量受损或糖尿病)和CHG。将上述变量纳入多重共线性分析,结果显示,变量之间

未出现多重共线性,可纳入多因素COX回归模型(附表2)。

在调整混杂因素后,多因素COX回归分析显示,CHG($HR=1.377$, 95% CI 1.201~1.579, $P<0.001$)与军事飞行人员高血压发病风险独立相关;年龄、BMI、DBP、高血压家族史、吸烟、动脉粥样硬化、UA和LDL-C均为飞行人员高血压的独立危险因素(表3)。

2.5 军事飞行人员5年高血压发病风险的列线图构建 采用逐步向后回归的COX比例风险模型筛选,最终确定CHG指数、年龄、BMI、DBP、UA、LDL-C、高血压家族史、吸烟及动脉粥样硬化共9项独立预测因子。基于上述因子,构建预测飞行人员5年新发高血压风险的列线图模型(图2)。通过整合各因子的回归系数,该模型可实现个体化风险定量评估。

2.6 军事飞行人员5年高血压发病风险的列线图预测模型性能评估与内部验证 训练集与验证集中,列线图预测模型的5年AUC值分别为0.872和0.849(图3A),提示模型具有良好的区分效能。

训练集与验证集中,军事飞行人员5年新发高血压风险预测列线图的校准曲线显示,两条曲线均与45°参考线高度吻合(图3B);提示该模型在训练集和验证集中均具有良好的校准能力,预测风险与实际观察风险的一致性较高。

此外,DCA提示列线图在训练集与验证集中均表现出良好的临床适用性。训练集中,模型在0.05~0.85的阈值概率范围内具有净临床获益;而在验证

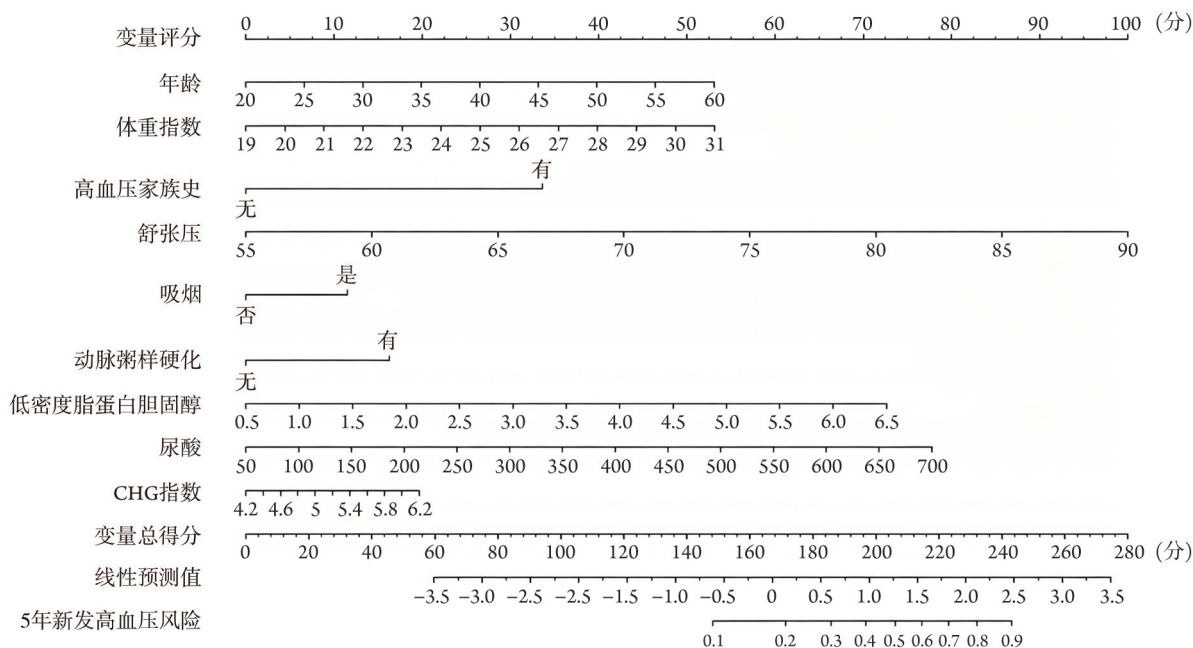


图2 军事飞行人员5年新发高血压风险预测列线图

Fig.2 Nomogram for predicting 5-year incident hypertension risk in military pilots

表2 军事飞行人员高血压发病风险的单因素 COX 回归分析

Tab.2 Univariate COX regression analysis of hypertension risk in military pilots

变量	单因素分析	
	HR(95%CI)	P
年龄	1.096(1.080~1.112)	<0.001
身高	1.045(1.012~1.080)	0.008
体重	1.078(1.062~1.094)	<0.001
BMI	1.350(1.268~1.437)	<0.001
飞行时间	1.000(1.000~1.000)	0.248
SBP	1.053(1.037~1.069)	<0.001
DBP	1.139(1.115~1.163)	<0.001
高血压家族史	2.711(1.831~4.013)	<0.001
吸烟	1.670(1.275~2.188)	<0.001
累计吸烟年数	1.036(1.020~1.052)	<0.001
吸烟量	1.047(1.027~1.066)	<0.001
饮酒	0.608(0.436~0.848)	0.003
动脉粥样硬化	5.853(3.885~8.818)	<0.001
脂肪肝	3.683(2.512~5.398)	<0.001
高脂血症	3.365(2.405~4.708)	<0.001
高尿酸血症	3.179(2.191~4.612)	<0.001
糖耐量受损(糖尿病)	2.503(1.562~4.011)	<0.001
LDL-C	1.954(1.645~2.322)	<0.001
HDL-C	0.430(0.254~0.729)	0.002
TG	1.210(1.134~1.292)	<0.001
TC	1.721(1.486~1.993)	<0.001
UA	1.008(1.006~1.009)	<0.001
FBG	1.940(1.706~2.205)	<0.001
白蛋白	0.882(0.839~0.927)	<0.001
血小板计数	1.000(1.000~1.000)	0.207
RDW-CV	1.001(1.001~1.002)	0.002
单核细胞计数	3.294(1.373~7.905)	0.008
嗜中性粒细胞计数	1.176(1.084~1.276)	<0.001
CHG	9.228(6.087~13.991)	<0.001

SBP. 收缩压; DBP. 舒张压; BMI. 体重指数; LDL-C. 低密度脂蛋白胆固醇; HDL-C. 高密度脂蛋白胆固醇; TG. 甘油三酯; TC. 总胆固醇; UA. 尿酸; FBG. 空腹血糖; ALB. 白蛋白; RDW-CV. 红细胞分布宽度变异系数; CHG 指数. 胆固醇、高密度脂蛋白和葡萄糖指数

集中, 其净获益区间扩展至 0.05~1.00 的更广阈值范围(图 3C)。因而, 基于该列线图进行临床决策可在多数阈值概率下提供优于“全部干预”或“不干预”策略的净获益, 具备较好的临床应用潜力。

最后, 基于多因素 Cox 模型计算训练集与验证集个体的风险评分。依据最佳截断值, 将军事飞行人员划分为低风险组 (0.054~1.249)、中风险组 (1.250~5.669) 和高风险组 (5.700~96.582)。Kaplan-

表3 军事飞行人员高血压发病风险的多因素 COX 模型

Tab.3 Multivariate COX model for hypertension risk in military pilots

变量	多因素 COX 回归分析结果	
	HR(95%CI)	P
年龄	1.044(1.025~1.063)	<0.001
BMI	1.155(1.078~1.238)	<0.001
DBP	1.098(1.074~1.122)	<0.001
高血压家族史	2.982(1.981~4.489)	<0.001
吸烟	1.452(1.101~1.915)	0.008
动脉粥样硬化	1.698(1.070~2.695)	0.025
UA	1.004(1.002~1.006)	<0.001
LDL-C	1.483(1.186~1.855)	<0.001
CHG	1.377(1.201~1.579)	<0.001

DBP. 舒张压; BMI. 体重指数; LDL-C. 低密度脂蛋白胆固醇; UA. 尿酸; CHG 指数. 胆固醇、高密度脂蛋白和葡萄糖指数

Meier 生存分析显示, 在训练集与验证集中, 三组高血压累积发病率存在明显差异 ($P<0.05$), 且高风险组与中风险组的发病风险均显著高于低风险组(图 3D); 提示该列线图模型对高血压高危个体的识别能力较强。

3 讨论

本研究基于 CHG 指数构建了军事飞行人员高血压发病风险的预测模型。Kaplan-Meier 分析显示, 较高 CHG 水平的飞行人员高血压累积发病率显著升高。多因素 COX 回归在调整混杂因素后的结果显示, CHG 指数是军事飞行人员发生高血压的独立危险因素 ($HR=1.377$, $95\%CI$ 1.201~1.579, $P<0.001$)。此外, 本研究还进一步构建了包含 CHG 指数的列线图预测模型。该模型在训练集和验证集中均表现出较高的区分度 (5 年 AUC 分别为 0.872 和 0.849) 和良好的校准能力, 且在较宽的阈值概率范围内具有显著的临床净获益, 表明其可用于辅助军事飞行人员高血压风险的早期识别与临床决策。

CHG 指数作为一种新型代谢复合指标, 由 TC、FBG 和 HDL-C 三项常规血液检测指标综合计算得出, 具有计算简便、数据易获取、成本低廉等优势。该指标能够全面反映机体的糖脂代谢状态, 并与胰岛素抵抗 (insulin resistance, IR)、血管内皮功能障碍等致高血压的病理生理机制密切相关^[10-14]。与其他常用代谢指数相比, CHG 指数展现出独特的综合评估价值。甘油三酯-葡萄糖指数 (triglyceride-glucose index, TyG) 主要反映 IR, 在预测糖代谢紊乱相关冠心病、高血压的发病风险中应用广泛^[15-16]; 动脉粥样硬化指数 (atherogenic index of plasma, AIP) 则侧重于评估致动脉粥样硬化的脂质负荷, 在高血压患者

中具有预后价值^[17]。而CHG指数不仅包含TC、FBG致动脉粥样硬化成分，还整合了具有血管保护作用的HDL-C，因而能够更全面地评估代谢紊乱状态，尤其适用于像军事飞行人员这样长期面临多重代谢应激的特殊人群。

CHG指数的应用价值已获得多项研究的支持。基于伊朗MASHAD队列的研究显示，CHG指数对2型糖尿病具有良好诊断效能(AUC=0.864)^[8]；同样，来自中国CHARLS的一个队列研究显示，CHG指数与心肾代谢综合征患者快速肾功能下降显著相关(OR=2.25, 95%CI 1.57~3.23, $P<0.001$)^[18]；此外，心血管领域的一项研究显示，CHG指数是CVD发病的独立预测因素(HR=1.35, 95%CI 1.21~1.51, $P<0.001$)^[8]，突显该指标在心血管代谢风险评估中的广泛潜力。与既往侧重于糖尿病或肾病等的研究不同，本研究强调了CHG指数在军事飞行人员高血压远期发病预测中具有标志物价值。

CHG指数通过整合脂质代谢和糖代谢信息，能够同时捕捉多重代谢缺陷：高TC水平可促进动脉粥样硬化进程^[19-20]，低HDL-C水平可削弱其抗氧化、抗炎及逆向转运胆固醇等血管保护功能^[21-22]，而FBG异常则通过促进晚期糖基化终产物生成、激活多元醇通路和诱发氧化应激等机制损伤血管内皮功能^[23-28]。

军事飞行人员长期暴露于高空缺氧、高G载荷等特殊环境^[29-30]，血管内皮持续承受异常血流剪切力^[31]，这可能加速脂质在血管壁的沉积和动脉粥样硬化进程^[13, 32]。本研究的多因素COX分析显示，动脉粥样硬化是军事飞行人员高血压发病风险的独立危险因素(HR=1.698, 95%CI 1.070~2.695, $P=0.025$)；这与既往研究认为脂代谢紊乱通过促进动脉粥样硬化从而诱发高血压的观点相符^[33-34]。另外，军事飞行人员常面临的任务繁重、精神紧张和昼夜节律紊乱等因素可促进皮质醇分泌^[35-36]，降低胰岛素敏感性，从而加重糖代谢异常和IR^[37]。IR可进一步通过激活交感神经系统和肾素-血管紧张素-醛固酮系统、促进肾脏钠重吸收等机制促进高血压发生^[11, 38-40]，形成恶性循环。此外，脂质和糖代谢异常可共同激活炎症反应^[11, 40-41]；这一过程在军事飞行人员特殊环境应激下可能进一步加剧^[42]，从而与CHG指数所代表的代谢异常协同作用，共同促进高血压的发生与发展。然而，CHG指数预测高血压风险的具体作用机制尚未完全明确，尚待进一步研究探讨。

综上所述，CHG指数通过整合TC、FBG和HDL-C三项常规血液生化参数，以简便的计算方式综合反映糖脂代谢交互作用，在预测军事飞行人员高血压发病风险方面展现出重要价值，有助于实现

高危人群的早期筛查。此外，本研究基于CHG指数所构建的列线图预测模型，整合了年龄、BMI、DBP、UA、LDL-C、高血压家族史、吸烟及动脉粥样硬化等多个独立危险因素，可实现更为精准的个体化风险评估。该模型具有良好的预测效能和临床实用性，可为临床医师制定军事飞行人员高血压的预防和干预策略提供辅助工具。例如，针对CHG指数升高且合并多种危险因素的高危个体，可制定分层干预策略，如强化血脂与血糖管理、优化膳食结构、增加体育锻炼及进行心理疏导等，以降低高血压的发病风险，减少停飞事件的发生。

本研究仍存在一定局限性。首先，本研究对象为男性军事飞行人员，结论外推至女性飞行人员时则需谨慎。其次，尽管已调整多种混杂因素，但仍可能存在未测量的混杂因素。最后，CHG指数与IR、动脉粥样硬化以及炎症反应之间的直接分子证据尚不充分，未来需要进一步探讨其内在机制及在特殊环境应激下的代谢调控途径。

【附加材料】

附表1—2见<https://dx.doi.org/10.11855/j.issn.0577-7402.1987.2026.0527FJ>。

请扫描右方二维码获取。



【参考文献】

- [1] 郑德莎, 刘峰舟, 薛军辉, 等. 飞行人员高血压病影响因素的研究进展[J]. 华南国防医学杂志, 2020, 34(3): 218-221.
- [2] 郑龙龙, 滕跃, 伍俊, 等. 2012—2021年疗养飞行人员暂时飞行不合格疾病谱分析[J]. 空军航空医学, 2023, 40(5): 411-415.
- [3] 夏泉, 缪冬梅, 华翠娥, 等. 军事飞行人员高血压病带药飞行的探讨[J]. 解放军医学院学报, 2021, 42(7): 750-754.
- [4] 王军, 黄炜, 姜卫. 军事飞行人员新发原发性高血压病临床特点和航空医学鉴定[J]. 空军航空医学, 2022, 39(3): 49-51.
- [5] Mansoori A, Nosrati M, Dorchin M, et al. A novel index for diagnosis of type 2 diabetes mellitus: cholesterol, high density lipoprotein, and glucose (CHG) index[J]. J Diabetes Investig, 2025, 16(2): 309-314.
- [6] Zhang Z, Chen M, Cai D, et al. Association between the cholesterol, high-density lipoprotein, and glucose index and type 2 diabetes mellitus prevalence in US adults: a cross-sectional study based on National Health and Nutrition Examination Survey 2009-2018[J]. J Int Med Res, 2025, 53(9): 3000605251375557.
- [7] Çatak M, Konuk ŞG, Hepsen S. The cholesterol-HDL-glucose (CHG) index and traditional adiposity markers in predicting diabetic retinopathy and nephropathy[J]. J Diabetes Investig, 2025, 16(8): 1487-1494.
- [8] Mo D, Zhang P, Zhang M, et al. Cholesterol, high-density lipoprotein, and glucose index versus triglyceride-glucose index in predicting cardiovascular disease risk: a cohort study[J]. Cardiovasc Diabetol, 2025, 24(1): 116.
- [9] 中国高血压防治指南修订委员会, 高血压联盟, 中国医疗保健国际交流促进会高血压病学分会, 等. 中国高血压防治指

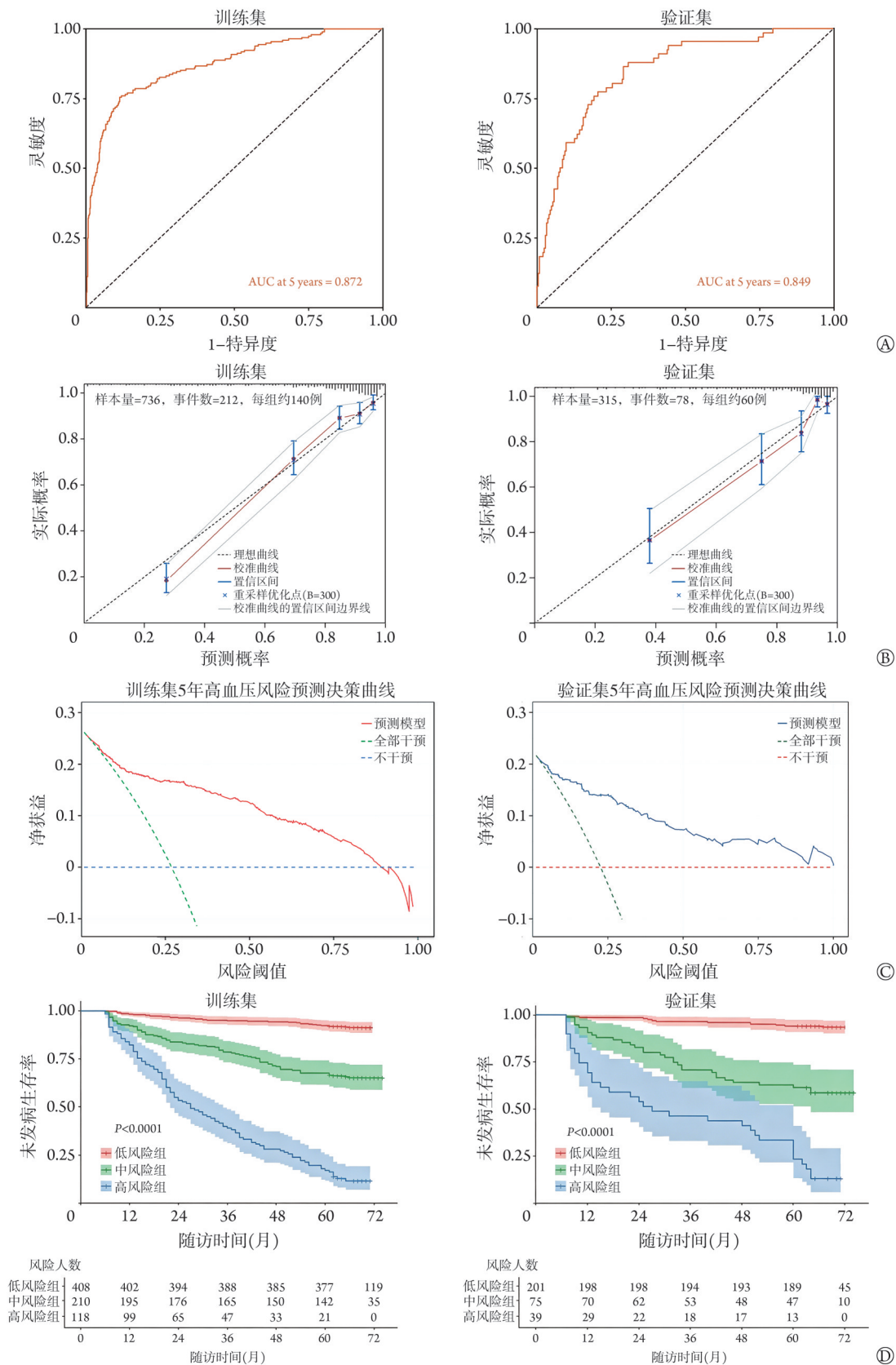


图3 军事飞行人员5年高血压发病风险的列线图模型预测效能和临床获益评估

Fig.3 Evaluation of predictive efficacy and clinical benefit of the nomogram for predicting 5-year incident hypertension risk in military pilots

A. ROC 曲线; B. 校准曲线; C. 决策曲线; D. 风险评分的Kaplan-Meier生存曲线。累积发病率=1-未发病生存率

- 南(2024年修订版)[J]. 中华高血压杂志(中英文), 2024, 32(7): 603-700.
- [10] Petrie JR, Guzik TJ, Touyz RM. Diabetes, hypertension, and cardiovascular disease: clinical insights and vascular mechanisms[J]. *Can J Cardiol*, 2018, 34(5): 575-584.
- [11] Kosmas CE, Bousvarou MD, Kostara CE, *et al.* Insulin resistance and cardiovascular disease[J]. *J Int Med Res*, 2023, 51(3): 3000605231164548.
- [12] Sasaki N, Maeda R, Ozono R, *et al.* Adipose tissue insulin resistance predicts the incidence of hypertension: the Hiroshima Study on Glucose Metabolism and Cardiovascular Diseases[J]. *Hypertens Res*, 2022, 45(11): 1763-1771.
- [13] Xu S, Ilyas I, Little PJ, *et al.* Endothelial dysfunction in atherosclerotic cardiovascular diseases and beyond: from mechanism to pharmacotherapies[J]. *Pharmacol Rev*, 2021, 73(3): 924-967.
- [14] Heo KS, Phan LP, Le NTT, *et al.* Mechanistic insights and emerging therapeutic strategies targeting endothelial dysfunction in cardiovascular diseases[J]. *Arch Pharm Res*, 2025, 48(4): 305-332.
- [15] Hou XZ, Lv YF, Li YS, *et al.* Association between different insulin resistance surrogates and all-cause mortality in patients with coronary heart disease and hypertension: NHANES longitudinal cohort study[J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2024, 23(1): 86.
- [16] Tao S, Yu L, Li J, *et al.* Multiple triglyceride-derived metabolic indices and incident cardiovascular outcomes in patients with type 2 diabetes and coronary heart disease[J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2024, 23(1): 359.
- [17] Yin B, Wu Z, Xia Y, *et al.* Non-linear association of atherogenic index of plasma with insulin resistance and type 2 diabetes: a cross-sectional study[J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2023, 22(1): 157.
- [18] Dong M, Chen X, Liu J, *et al.* Non-conventional lipid parameters predict the risk of rapid kidney function decline in patients with cardiovascular-kidney-metabolic syndrome: The first cohort study evidence from CHARLS[J]. *Exp Gerontol*, 2025, 210: 112892.
- [19] Yun YM. Apolipoprotein B, non-HDL cholesterol, and LDL cholesterol as markers for atherosclerotic cardiovascular disease risk assessment[J]. *Ann Lab Med*, 2023, 43(3): 221-222.
- [20] Yun SY, Rim JH, Kang H, *et al.* Associations of LDL cholesterol, non-HDL cholesterol, and apolipoprotein B with cardiovascular disease occurrence in adults: Korean Genome and Epidemiology Study[J]. *Ann Lab Med*, 2023, 43(3): 237-243.
- [21] Liyo B, Webb RJ, Amirabdollahian F. The association between the atherogenic index of plasma and cardiometabolic risk factors: a review[J]. *Healthcare (Basel)*, 2023, 11(7): 996.
- [22] Franczyk B, Młynarska E, Rysz-Górczyńska M, *et al.* High-density lipoproteins, Part 1. Epidemiology, antiatherogenic effects, and therapies designed to increase their serum levels[J]. *Am J Prev Cardiol*, 2025, 23: 101068.
- [23] Khalid M, Petroianu G, Adem A. Advanced glycation end products and diabetes mellitus: mechanisms and perspectives[J]. *Biomolecules*, 2022, 12(4): 542.
- [24] Lee J, Yun JS, Ko SH. Advanced glycation end products and their effect on vascular complications in type 2 diabetes mellitus[J]. *Nutrients*, 2022, 14(15): 3086.
- [25] Jing C, Zhang G, Liu Z, *et al.* Peroxidasin promotes diabetic vascular endothelial dysfunction induced by advanced glycation end products via NOX2/HOCl/Akt/eNOS pathway[J]. *Redox Biol*, 2021, 45: 102031.
- [26] Singh S, Siva BV, Ravichandiran V. Advanced glycation end products: key player of the pathogenesis of atherosclerosis[J]. *Glycoconj J*, 2022, 39(4): 547-563.
- [27] Nuñez-Selles AJ, Nuñez-Musa RA, Guillen-Marmolejos RA. Linking oxidative stress biomarkers to disease progression and antioxidant therapy in hypertension and diabetes mellitus[J]. *Front Mol Biosci*, 2025, 12: 1611842.
- [28] Kuzan A. Toxicity of advanced glycation end products (Review) [J]. *Biomed Rep*, 2021, 14(5): 46.
- [29] 刘振颖, 范雪, 匡宇, 岳洪梅. 飞行人员急性缺氧耐力影响因素分析[J]. *空军航空医学*, 2023, 40(3): 200-203.
- [30] 常巍. 高过载失能生理监测和充液式抗荷装置防护效果的研究[D]. 上海: 海军军医大学, 2022.
- [31] 朱曦, 朱文卓, 朱俐俐, 等. 高+G暴露对飞行员肾组织和功能的影响[J]. *湖南师范大学学报(医学版)*, 2021, 18(6): 93-95.
- [32] 赵聪, 张光运, 杨芬, 等. 飞行人员颈动脉粥样硬化危险因素的回溯性分析[J]. *解放军医学杂志*, 2021, 46(5): 481-485.
- [33] Cattazzo F, Lombardi R, Mantovani A, *et al.* Subclinical and clinical atherosclerosis in non-alcoholic fatty liver disease is associated with the presence of hypertension[J]. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*, 2022, 32(12): 2839-2847.
- [34] He D, Fan F, Jia J, *et al.* Lipid profiles and the risk of new-onset hypertension in a Chinese community-based cohort[J]. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*, 2021, 31(3): 911-920.
- [35] 臧克海, 程子怡, 谢京辉, 等. 军队飞行人员昼夜节律类型量表的修订及信效度检验[J]. *空军军医大学学报*, 2024, 45(2): 158-162.
- [36] Matsangas P, Shattuck NL. Circadian rhythmicity and 24/7 operations[J]. *Curr Sleep Med Rep*, 2025, 11(1): 14.
- [37] Sharma VK, Singh TG. Chronic stress and diabetes mellitus: interwoven pathologies[J]. *Curr Diabetes Rev*, 2020, 16(6): 546-556.
- [38] Guo Z, Guo X, Xu H, *et al.* Association between metabolic score for insulin resistance (METS-IR) and hypertension: a cross-sectional study based on NHANES 2007-2018[J]. *Lipids Health Dis*, 2025, 24(1): 64.
- [39] Nikbakht HR, Najafi F, Shakiba E, *et al.* Triglyceride glucose-body mass index and hypertension risk in iranian adults: a population-based study[J]. *BMC Endocr Disord*, 2023, 23(1): 156.
- [40] Zhao X, An X, Yang C, *et al.* The crucial role and mechanism of insulin resistance in metabolic disease[J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2023, 14: 1149239.
- [41] Libby P, Buring JE, Badimon L, *et al.* Atherosclerosis[J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2019, 5(1): 56.
- [42] 王永堂, 杨策. 陆军飞行人员心理应激障碍的影响因素及应对措施概述[J]. *陆军军医大学学报*, 2024, 46(1): 27-32.

(责任编辑: 蒋铭敏, 张小利)