中华高血压杂志（中英文）
CHINESE JOURNAL OF HYPERTENSION
ISSN 1673-7245
CN 11-5540/R
主管：国家疾病预防控制局
主办：中华预防医学会
福建医科大学

膳食和生活方式氧化平衡评分与血浆致动脉粥样硬化指数的关联

黄婧如，陈丹静，饶志翔，林黛茜，蔡晓琪，龚 瑾，黄邦邦，许昌声，陈纯娴，谢良地，韩 英

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16439/j.issn.1673-7245.2025-0441

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

血浆致动脉硬化指数与中青年人群新发高血压发生风险的关系

中华高血压杂志. 2025, 33(9): 856-863 https://doi.org/10.16439/j.issn.1673-7245.2024-0410

淮安市成人健康生活方式指数与血压水平及高血压患病风险的相关性

中华高血压杂志. 2025, 33(10): 958-965 https://doi.org/10.16439/j.issn.1673-7245.2025-0049

甘油三酯与高密度脂蛋白胆固醇比值累积暴露对动脉粥样硬化性心血管疾病的影响

中华高血压杂志. 2025, 33(5): 456-464 https://doi.org/10.16439/j.issn.1673-7245.2024-0383

心脏磁共振评估肾素-血管紧张素-醛固酮系统的心血管相互作用：动脉粥样硬化的多种族研究

中华高血压杂志. 2024, 32(6): 600-600 https://doi.org/${suggestArticle.doi}

血管内皮细胞功能障碍与动脉粥样硬化研究进展

中华高血压杂志. 2023, 31(12): 1179-1183 https://doi.org/10.16439/j.issn.1673-7245.2023.12.008

细胞焦亡在动脉粥样硬化发生中的作用

中华高血压杂志. 2023, 31(12): 1203-1210 https://doi.org/10.16439/j.issn.1673-7245.2023.12.012

关注微信公众号，获得更多资讯信息

·论 著·

膳食和生活方式氧化平衡评分与血浆致动脉粥样硬化指数的关联

黄婧如[1]，陈丹静[2]，饶志翔[1]，林黛茜[3,4,5,6,7]，蔡晓琪[3,4,5,6,7]，龚瑾[3,4,5,6,7]，黄邦邦[3,4,5,6,7]，许昌声[4]，陈纯娴[3,5,6,7]，谢良地[3,4,5,6,7]，韩英[3,4,5,6,7]

1. 福建中医药大学中西结合学院，福建 福州 350122；2. 福建医科大学公共卫生学院；3. 福建医科大学附属第一医院综合病房；4. 福建省高血压研究所；5. 福建医科大学附属第一医院滨海院区国家区域医疗中心老年科；6. 福建省老年高血压疾病临床研究中心；7. 国家老年疾病临床医学研究中心福建分中心

摘要：目的 探讨氧化平衡评分(OBS)与血浆致动脉粥样硬化指数(AIP)的关联，为动脉粥样硬化(AS)的早期识别和预防提供科学依据。**方法** 基于 2020 年 8 月至 2021 年 4 月福建省心血管病及其危险因素监测数据，纳入 8 851 名合格研究对象。通过 4 种膳食营养素和 6 种生活方式因素计算 OBS，根据 AIP 评估 AS 风险，将研究对象分为低 AIP 组(AIP＜0.24)和高 AIP 组(AIP ≥ 0.24)。采用非条件 logistic 回归分析 OBS 与 AIP 的关联，运用限制性立方样条(RCS)曲线分析剂量-反应关系，通过亚组分析及相乘交互作用检验探究在不同人群中 OBS 与 AIP 的关联，并通过中介效应分析评估尿酸、白细胞和中性粒细胞(NE)潜在的中介作用。**结果** 多因素 logistic 回归结果显示，OBS 与高 AIP 水平呈负相关(*OR* = 0.89, 95%*CI*: 0.87～0.91, *P*＜0.001)。与 OBS 最低四分位数(Q1)相比，最高四分位数(Q4)人群高 AIP 的风险降低 40%(*OR* = 0.60, 95%*CI*: 0.49～0.72, *P*＜0.001)。亚组分析显示，OBS 与年龄($P_{交互}$ = 0.012)和血脂异常($P_{交互}$ = 0.010)存在相乘交互作用。此外，OBS 与 AIP 之间存在非线性剂量反应关系($P_{非线性}$＜0.001)。中介效应结果显示，尿酸、白细胞及 NE 在 OBS 与 AIP 的关联中发挥部分中介作用。**结论** OBS 与 AIP 呈负相关，且年龄和血脂异常与 OBS 存在相乘交互作用。

关键词： 氧化平衡评分； 氧化应激； 血浆致动脉粥样硬化指数； 动脉粥样硬化； 食物； 生活方式

Association between dietary and lifestyle oxidative balance score and atherogenic index of plasma

HUANG Jingru[1], CHEN Danjing[2], RAO Zhixiang[1], LIN Daixi[3,4,5,6,7], CAI xiaoqi[3,4,5,6,7], GONG Jin[3,4,5,6,7], HUANG Bangbang[3,4,5,6,7], XU Changsheng[4], CHEN Chunxian[3,5,6,7], XIE Liangdi[3,4,5,6,7], HAN Ying[3,4,5,6,7]

1. College of Integrative Medicine, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou, Fujian 350122; 2. School of Public Health, Fujian Medical University; 3. General Ward, The First Affiliated Hospital of Fujian Medical University; 4. Fujian Hypertension Research Institute; 5. Department of Geriatrics, National Regional Medical Center (Binhai Campus), The First Affiliated Hospital of Fujian Medical University; 6. Fujian Clinical Research Center for Geriatric Hypertensive Diseases; 7. Fujian Branch of National Clinical Research Center for Geriatric Diseases

Abstract: Objective To investigate the association between the oxidative balance score (OBS) and atherogenic index of plasma (AIP), providing scientific evidence for the early identification and prevention of atherosclerosis (AS). **Methods** A total of 8 851 eligible participants from the surveillance data of cardiovascular diseases and related risk factors in Fujian Province from August 2020 to April 2021 were included. The OBS was calculated using four dietary nutrient factors and six lifestyle-related factors. AIP was used as a surrogate marker of AS risk, and participants were categorized into a low-AIP group (AIP ＜ 0.24) and a high-AIP group (AIP ≥ 0.24). Unconditional logistic regression was used to examine the association between OBS and AIP. Restricted cubic spline (RCS) analysis was conducted to evaluate the dose–response relationship. Subgroup analyses and multiplicative interaction tests were performed to explore the associations in different populations. Mediation analysis was used to assess the potential mediating effects of uric acid (UA), white blood cells (WBC), and neutrophil (NE). **Results** Multivariable logistic regression analysis showed a negative association between

doi: 10.16439/j.issn.1673-7245.2025-0441

基金项目(Fund programs)： 国家卫生健康委员会项目(NHC2020-609)，福建省财政补助卫生专项(BPB-2025HY)，福建省卫健委青年科研课题(2023QNA025)

通信作者(Corresponding authors)： 谢良地(XIE Liangdi)；韩英(HAN Ying)(黄婧如，陈丹静并列第一作者)

OBS and high AIP levels (*OR* = 0.89, 95%*CI*: 0.87 to 0.91, *P*＜0.001). Compared with participants in the lowest quartile (Q1) of OBS, those in the highest quartile (Q4) had 40% lower risk of high AIP (*OR* = 0.60, 95%*CI*: 0.49 to 0.72, *P*＜0.001). Subgroup analyses revealed significant multiplicative interactions between OBS and age (*P* for interaction = 0.012) as well as dyslipidemia (*P* for interaction = 0.010). In addition, a non-linear dose-response relationship was observed between OBS and AIP (*P* for nonlinear ＜ 0.001). Mediation analysis indicated that UA, WBC, and NE partially mediated the association between OBS and AIP. **Conclusions** OBS is inversely associated with AIP, and there are significant multiplicative interactions between OBS and age and dyslipidemia.

Keywords: oxidative balance score; oxidative stress; atherogenic index of plasma; atherosclerosis; diet; lifestyle

心血管疾病(cardiovascular diseases, CVD)已成为我国城乡居民首位死因。《中国心血管健康与疾病报告 2024》指出，2021 年因 CVD 死亡的人数分别占农村、城市死因的 48.98% 和 47.35%[1]。动脉粥样硬化(atherosclerosis, AS)是一种多因素引起动脉壁内脂肪和/或纤维物质积累的慢性炎症性病变，是导致 CVD 发生的重要原因[2]。AS 作为动脉粥样硬化性心血管疾病(atherosclerotic cardiovascular disease, ASCVD)的重要病理特征，其常用的诊断方法有磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)、CT 血管成像(CT angiography, CTA)及颈部血管超声(cervical vascular ultrasound, CVUS)[3]。此外，传统的脂质生物标志物、炎症指标也可以辅助判断病变的进展。2000 年由 Dobiásová等[4] 首次提出血浆致动脉粥样硬化指数(atherogenic index of plasma, AIP)，该指数由总胆固醇和高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)水平计算得出，并被应用于血管硬化程度的评估。相对于传统单一预测指标，AIP 作为一种血脂谱衍生出的复合指标，表现出了更强的预测 AS 和心血管事件的能力[5]。

AS 的发生涉及一系列复杂的作用机制，其中氧化应激起着关键作用。氧化应激是指机体内产生的氧化物质超过了抗氧化系统的清除能力，导致细胞内氧化物质积累，从而损害细胞的结构与功能[6]，已被证实为 AS 形成的关键因素[7]。Farias 等[8] 的研究发现，高胆固醇血症通过诱导氧化应激损害内皮功能从而促进 AS 的发生发展；Terman 等[9] 发现超氧化物生成增加是高血压诱导血管内皮功能障碍及血流调节损伤的关键环节；Kračun 等[10] 的研究指出烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADPH)氧化酶-1 可介导血管平滑肌细胞中超氧化物的产生并进一步增加氧化应激水平。因此，全面评估氧化应激状态对 AS 的影响具有重要的临床价值。

尽管体内、体外实验已证实氧化应激在 AS 发生发展中的重要作用，但尚缺乏有关氧化应激生物标志物与 AS 风险关联的大规模人群研究。氧化平衡评分(oxidative balance score, OBS)是一种综合指标，通过整合饮食因素和生活方式中的抗氧化因子和促氧化因子，用于评估个体的氧化应激状态，其数值越高表明氧化应激水平越低[11]。该指标与多种慢性疾病的死亡风险存在关联，然而目前 OBS 与 AS 风险的关系尚不清楚。本研究旨在探讨 OBS 与中国人群 AIP 的关联，为 AS 的早期风险识别和预防提供科学依据。

1　对象与方法

1.1　对象　本研究的参与者来自“中国居民心血管病及其危险因素监测项目(2020)”中的福建省常住人口[12]。本研究采用分层多阶段随机抽样。按城乡分层，在各分层内，先按容量大小比例概率抽取区/县，再在入选区/县、街道/乡镇及居(村)委会中逐级采用简单随机抽样，最终抽取各年龄段和性别的调查对象。在 9 790 名年满 18 周岁且常住福建省的参与者中，排除存在数据缺失者(n = 850)、处于妊娠或哺乳期者(n = 58)和饮食摄入极端者(n = 31)后，共纳入 8 851 名参与者进行最终分析。所有纳入研究的参与者均签署了书面知情同意书，若参与者无法书写，则采用指纹确认方式。本研究严格遵循《赫尔辛基宣言》伦理准则《国际协调良好临床实践会议》规范开展。本研究获得国家心血管病中心-北京阜外心血管病医院医学研究伦理委员会批准(2020-1360)。

1.2　资料的收集　采用标准化问卷，由经统一培训并考核上岗的调查员进行面对面调查。调查内容涵盖社会人口学特征(性别、年龄、职业、教育程度、婚姻状况、居住地、经济状况、医疗保险)、饮食因素(膳食种类、频率、摄入量)、行为因素(吸烟、饮酒、运动量)以及个人史(高血压、糖尿病、血脂异常、高尿酸血症)。通过体格检查测量身高、体重、腰围和血压。使用体重(kg)/身高^2(m^2) 计算体重指数(body mass index, BMI)。此外，通过实验室检查测量空腹血糖、总胆固醇、甘油三酯、HDL-C、低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、尿酸、白细胞计数(white blood cell, WBC)及中性粒细胞数(neutrophils, NE)等。具体检测标准及实验仪器见文献[13-14]。

1.3　氧化平衡评分的计算　基于文献报道影响氧化过程的 4 种膳食成分(蔬菜、水果、鱼类及其他水产

品、肉类及肉制品等)和 6 种生活方式(饮茶情况、身体活动、吸烟状况、饮酒状况、超重/肥胖、腹部肥胖)计算 OBS[11]。将各膳食成分按摄入量的三分位数进行分组,抗氧化剂暴露越高则赋分越高,促氧化剂暴露则相反。其中,除腹部肥胖定义为 0 或 1 分外,其余各因素得分均定义为 0、1 或 2 分。OBS 赋分标准如表 1 所示,OBS 总体得分越高,表明个体从膳食和体力活动中获取的抗氧化能力越高。

表 1 OBS 指标的定义

Table 1 Components and definitions of the OBS

OBS组成成分 OBS components	赋值方案 Scoring criteria
膳食成分 Dietary components	
蔬菜摄入(A) Vegetable intake (A)	0 = 低, 1 = 中等, 2 = 高 0 = low, 1 = moderate, 2 = high
水果摄入(A) Fruit intake (A)	0 = 低, 1 = 中等, 2 = 高 0 = low, 1 = moderate, 2 = high
鱼类及其他水产品摄入(A) Fish and other aquatic product intake (A)	0 = 低, 1 = 中等, 2 = 高 0 = low, 1 = moderate, 2 = high
肉类及肉制品摄入(P) Meat and processed meat intake (P)	0 = 高, 1 = 中等, 2 = 低 0 = high, 1 = moderate, 2 = low
生活方式成分 Lifestyle components	
饮茶情况(A) Tea consumption (A)	0 = 从不, 1 = 偶尔(＜1 天/周), 2 = 经常(≥ 1天/周) 0 = never, 1 = occasionally (＜1 day/week), 2 = frequently (≥ 1 day/week)
身体活动(A) Physical activity (A)	0 = 低(每周中等或剧烈活动少于 1 次), 1 = 中等(每周剧烈活动 1 次且中等活动 1 次, 或每周中等活动 2～4 次), 2 = 高(每周剧烈活动≥ 2 次或每周中等活动超过4次) 0 = low (＜1 time/week of moderate or vigorous activity); 1 = moderate (1 time/week vigorous and 1 time/week moderate, or 2–4 times/week moderate); 2 = high (≥ 2 times/week vigorous or ＞4 times/week moderate)
吸烟情况(P) Smoking status (P)	0 = 经常(≥ 1 天/周), 1 = 偶尔(＜1 天/周), 2 = 从不 0 = frequent (≥ 1 day/week), 1 = occasional (＜1 day/week), 2 = never
饮酒情况(P) Alcohol consumption (P)	0 = 频繁(≥ 1 天/周), 1 = 偶尔(＜1 天/周), 2 = 从不 0 = frequent (≥ 1 day/week), 1 = occasional (＜1 day/week), 2 = never
超重/肥胖(P) Overweight/obesity (P)	0 = 肥胖, 1 = 超重, 2 = 正常体重 0 = obese, 1 = overweight, 2 = normal weight
腹型肥胖(P) Abdominal obesity (P)	0 = 腹型肥胖, 1 = 正常 0 = yes, 1 = no

注:OBS为氧化平衡评分;低、中、高三类对应基线中调查参与者的三分位数值。P为促氧化剂;A为抗氧化剂。

Abbreviations: OBS, oxidative balance score; low, moderate, and high categories were defined according to tertiles of the baseline distribution among study participants; P, pro-oxidant; A, antioxidant.

1.4 动脉粥样硬化风险的评估 采用 AIP 指数评估 AS 风险,该指数由血液中的甘油三酯和 HDL-C 的水平计算,计算公式为:

$$\mathrm{AIP}=\log_{10}\frac{\text{甘油三酯（mmol/L）}}{\text{HDL－C（mmol/L）}}$$

根据 AIP 得分,将 AIP＜0.24 者定义为低 AIP 组,AIP≥0.24 定义为高 AIP 组[15]。

1.5 协变量 协变量包括年龄、性别、教育程度、家庭收入、高血压、糖尿病、血脂异常、总胆固醇、LDL-C、尿酸、WBC 及 NE。其中,教育程度分为高中以下、高中、高中以上;家庭收入分为＜2 万元/年、(2～5)万元/年及＞5 万元/年;高血压定义为在未使用降压药的情况下,诊室收缩压 ≥ 140 mmHg(1 mmHg = 0.133 kPa)和/或舒张压 ≥ 90 mmHg,或正在服用降压药[16];糖尿病定义为空腹血糖 ≥ 7.0 mmol/L 或餐后 2 h 血糖 ≥ 11.1 mmol/L,或自我报告的曾被医生诊断为糖尿病或正在服用治疗糖尿病药物[17];具有以下一项或多项指标异常的受试者被诊断为血脂异常:总胆固醇 ≥ 6.2 mmol/L,甘油三酯 ≥2.3 mmol/L,LDL-C≥4.1 mmol/L 或 HDL-C＜1.0 mmol/L[18]。

1.6 统计学方法 正态分布的定量资料采用均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,两组间比较采用独立样本 t 检验;非正态分布的定量资料采用中位数(P_{25}, P_{75})表示,组间比较采用 Mann-Whitney U 检验;分类变量采用频数(%)表示,组间比较采用 χ^2 检验。采用非条件 logistic 回归模型计算比值比(odds ratio, *OR*)和 95% 置

信区间(confidence interval, *CI*)，评估 OBS 与 AIP 之间的关联。共建立 3 个模型，并逐步加入协变量：模型 1 未对协变量进行调整；模型 2 调整年龄、性别、教育程度和家庭收入；模型 3 进一步调整高血压、糖尿病、血脂异常、总胆固醇和 LDL-C。同时，按年龄、性别、教育程度、高血压、糖尿病、血脂异常等因素进行分层分析，进一步探讨不同人群中 OBS 与 AIP 的关联，同时分析各亚组变量与 OBS 间是否存在相乘交互作用。绘制限制性立方样条(restricted cubic spline, RCS)曲线，OBS 以连续型变量形式纳入模型，评估 OBS 与 AIP 之间的剂量-反应关系。同时，构建中介效应模型，将 OBS 及炎症和氧化应激指标均以连续型变量形式纳入模型，探索炎症及氧化应激指标表达水平在 OBS 对 AIP 影响中的中介作用。采用 Bootstrap 检验法检验中介效应，设置重抽样次数为 1 000 次，估计模型的间接效应、直接效应、中介效应比例及其 95%*CI*。使用 R(V.4.4.3, R Foundation)软件进行统计分析，使用“rms”包进行 RCS 分析，使用“mediation”包进行中介分析，“ggplot2”包用于绘图。统计检验为双侧检验，以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2　结　果

2.1　研究对象的一般情况　本研究共纳入 8 851 名研究对象，男性 4 462 名(50.41%)，中位年龄 43 岁，其中高 AIP 组 1 467 人(16.57%)。均衡性检验结果显示，与低 AIP 组相比，高 AIP 组人群年龄较大，男性占比较高，教育程度较低，经济状况较好，高血压、糖尿病、血脂异常者占比较高(均 $P<0.001$)。此外，高 AIP 组总胆固醇、LDL-C、尿酸、WBC 及 NE 中位水平均高于低 AIP 组($P<0.05$)。然而，高 AIP 组 OBS 中位得分低于低 AIP 组($P<0.001$)。见表 2。

表 2　研究人群一般人口学特征

Table 2　Baseline characteristics of the study population

组别 Group	例数 *n*	AIP	年龄(岁) Age (years)	男性 [*n* (%)] Male	教育程度 [*n* (%)] Education level		
					高中以下 Below high school	高中 High school	高中以上 Above high school
低AIP Low AIP	7 384	–0.15 (–0.31, 0.02)	43 (30, 58)	3 423 (46.36)	3 971 (53.78)	1 355 (18.35)	2 058 (27.87)
高AIP High AIP	1 467	0.39 (0.31, 0.52)	46 (35, 58)	1 039 (70.82)	851 (58.01)	281 (19.15)	335 (22.84)
总体 Total	8 851	–0.09 (–0.28, 0.13)	43 (31, 58)	4 462 (50.41)	4 822 (54.48)	1 636 (18.48)	2 393 (27.04)
χ^2/Z值		–60.590	–6.025	293.096		15.927	
*P*值		<0.001	<0.001	<0.001		<0.001	

组别 Group	家庭收入 [*n* (%)] Household income			高血压 [*n* (%)] Hypertension	糖尿病 [*n* (%)] Diabetes	血脂异常 [*n* (%)] Dyslipidemia
	<2万元/年 <20,000 CNY/year	2～5万元/年 20,000–50,000 CNY/year	>5万元/年 >50,000 CNY/year			
低AIP Low AIP	2 579 (34.93)	3 064 (41.50)	1 741 (23.58)	980 (13.27)	240 (3.25)	188 (2.55)
高AIP High AIP	435 (29.65)	658 (44.85)	374 (25.49)	289 (19.70)	99 (6.75)	89 (6.07)
总体 Total	3 014 (34.05)	3 722 (42.05)	2 115 (23.90)	1 269 (14.34)	339 (3.83)	277 (3.13)
χ^2/Z值		15.162		41.175	40.656	50.041
*P*值		<0.001		<0.001	<0.001	<0.001

组别 Group	总胆固醇(mmol/L) Total cholesterol	LDL-C (mmol/L)	尿酸(μmol/L) Uric acid	WBC (10^9/L)	NE (10^9/L)	OBS
低AIP Low AIP	4.80 (4.22, 5.50)	3.02 (2.50, 3.62)	337 (281, 401)	6.30 (5.34, 7.42)	3.55 (2.84, 4.39)	12.00 (10.00, 13.00)
高AIP High AIP	5.23 (4.57, 5.90)	3.09 (2.56, 3.71)	399 (339, 465)	7.20 (6.05, 8.36)	4.00 (3.25, 4.85)	10.00 (9.00, 12.00)
总体 Total	4.86 (4.26, 5.59)	3.03 (2.51, 3.64)	346 (287, 414)	6.42 (5.45, 7.59)	3.63 (2.90, 4.49)	11.00 (10.00, 13.00)
χ^2/Z值	–13.779	–2.868	–22.136	–16.771	–12.549	–14.509
*P*值	<0.001	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注：非正态分布的定量资料采用中位数(P_{25}, P_{75})表示。低AIP组：AIP<0.24；高AIP组：AIP ≥ 0.24；AIP为血浆动脉粥样硬化指数；LDL-C为低密度脂蛋白胆固醇；WBC为白细胞计数；NE为中性粒细胞计数；OBS为氧化平衡评分；CNY为人民币。

Non-normally distributed continuous variables are presented as median (P_{25}, P_{75}). Low AIP group: AIP < 0.24; high AIP group: AIP ≥ 0.24. Abbreviations: AIP, atherogenic index of plasma; LDL-C, low-density lipoprotein cholesterol; WBC, white blood cell count; NE, neutrophil count; OBS, oxidative balance score; CNY, Chinese Yuan.

2.2 OBS 与 AS 患病风险的关联 Logistic 回归分析结果显示，OBS 与 AIP 呈负相关(表 3)。在调整年龄、性别、教育程度、家庭收入、高血压、糖尿病、血脂异常、总胆固醇及 LDL-C 等因素后(模型 3)，OBS 每增加 1 分，高 AIP 的风险降低 11%(*OR* = 0.89, 95%*CI*: 0.87～0.91)。与 OBS 的最低四分位数(Q1)相比，OBS 的最高四分位数(Q4)同样也与高 AIP 的风险降低有关(*OR* = 0.60, 95% *CI*: 0.49～0.72)。

表 3 OBS 与 AIP 关联的 logistic 回归分析(n = 8 851)

Table 3 Logistic regression analysis of the association between OBS and AIP

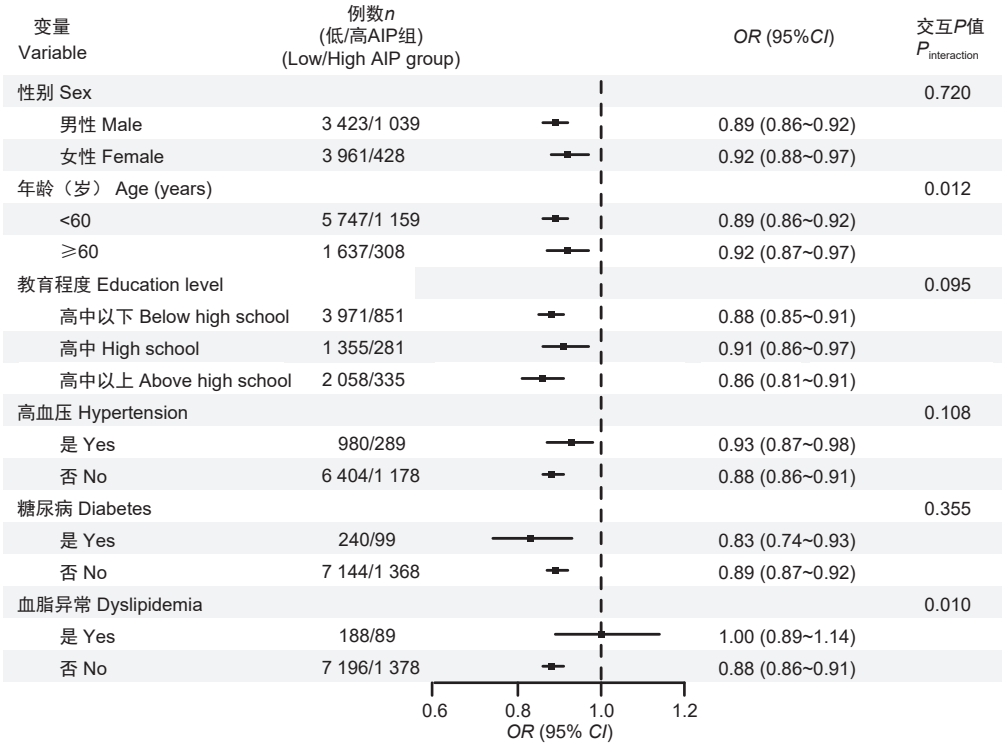
模型 Model	OBS	β	*SE*	Waldχ^2值	*OR* (95%*CI*)	*P*值	趋势*P*值 *P* for trend
1	OBS(连续型) OBS (continuous)	–0.173	0.011	232.893	0.84 (0.82～0.86)	＜0.001	
	OBS(四分位数) OBS (quartiles)						
	Q1				1.00		
	Q2	–0.526	0.088	35.898	0.59 (0.50～0.70)	＜0.001	
	Q3	–0.783	0.074	113.480	0.46 (0.40～0.53)	＜0.001	
	Q4	–0.839	0.084	99.362	0.43 (0.37～0.51)	＜0.001	＜0.001
2	OBS(连续型) OBS (continuous)	–0.125	0.012	107.176	0.88 (0.86～0.90)	＜0.001	
	OBS(四分位数) OBS (quartiles)						
	Q1				1.00		
	Q2	–3.393	0.090	19.223	0.67 (0.57～0.80)	＜0.001	
	Q3	–0.563	0.076	54.440	0.57 (0.49～0.66)	＜0.001	
	Q4	–0.532	0.089	35.563	0.59 (0.49～0.70)	＜0.001	＜0.001
3	OBS(连续型) OBS (continuous)	–0.118	0.013	82.955	0.89 (0.87～0.91)	＜0.001	
	OBS(四分位数) OBS (quartiles)						
	Q1				1.00		
	Q2	–0.387	0.097	15.968	0.68 (0.56～0.82)	＜0.001	
	Q3	–0.555	0.082	46.079	0.57 (0.49～0.67)	＜0.001	
	Q4	–0.517	0.095	29.590	0.60 (0.49～0.72)	＜0.001	＜0.001

注：OBS为氧化平衡评分；AIP为血浆致动脉粥样硬化指数。模型1未调整协变量；模型2调整年龄、性别、教育程度及家庭收入；模型3进一步调整高血压、糖尿病、血脂异常、总胆固醇及低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)。

Abbreviations: OBS, oxidative balance score; AIP, atherogenic index of plasma. Model 1 was unadjusted; Model 2 was adjusted for age, sex, education level, and household income; Model 3 was further adjusted for hypertension, diabetes, dyslipidemia, total cholesterol, and low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C).

2.3 亚组分析及 RCS 分析 根据年龄、性别、教育程度、高血压、糖尿病、血脂异常进行亚组分析及相乘交互作用检验(图 1)。结果显示，在任意亚组人群中 OBS 与 AIP 的负向关联与总体人群基本一致。此外，相乘交互作用分析表明，年龄($P_{交互}$ = 0.012)及血脂异常($P_{交互}$ = 0.010)与 OBS 对 AIP 的影响具有相乘交互作用。在年龄＜60 岁(*OR* = 0.89, 95%*CI*: 0.86～0.92)、无血脂异常(*OR* = 0.88, 95%*CI*: 0.86～0.91)的参与者中 OBS 对 AIP 的负向关联更为显著。

通过 RCS 曲线进一步评估 OBS 与 AIP 的剂量-反应关系。如图 2A 所示，在调整年龄、性别、教育程度、家庭收入、高血压、糖尿病、血脂异常、总胆固醇及 LDL-C 后，OBS 与 AIP 的关联在总体人群中呈先下降后趋于平缓的 L 型非线性剂量-反应关系($P_{非线性}$＜0.001)。进一步按年龄进行分层分析，结果表明在不同年龄人群中，OBS 与 AIP 均呈负相关。如图 2B 所示，在年龄＜60 岁者中，OBS 与 AIP 呈非线性剂量-反应关系($P_{非线性}$＜ 0.001)，而在年龄 ≥ 60 岁者中则未观察到非线性剂量-反应关系($P_{非线性}$ = 0.447)。

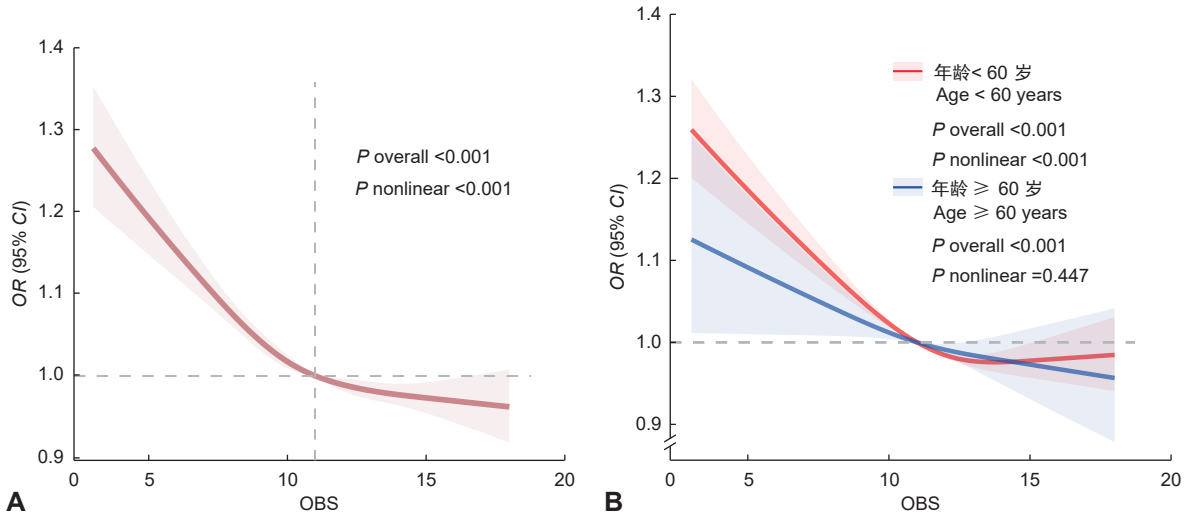


注：OBS 为氧化平衡评分；AIP 为血浆致动脉粥样硬化指数。

Abbreviations: OBS, oxidative balance score; AIP, atherogenic index of plasma.

图 1　OBS 与 AIP 关联的亚组分析

Figure 1　Subgroup analysis of the association between OBS and AIP



注：OBS 为氧化平衡评分；AIP 为血浆致动脉粥样硬化指数；*P* overall 为总体 *P* 值；*P* nonlinear 为非线性 *P* 值；LDL-C 为低密度脂蛋白胆固醇。A 为总人群中 OBS 与 AIP 的剂量-反应关系，模型调整年龄、性别、教育程度、家庭收入、高血压、糖尿病、血脂异常、总胆固醇及 LDL-C；B 为不同年龄人群中 OBS 与 AIP 的剂量-反应关系，模型调整性别、教育程度、家庭收入、高血压、糖尿病、血脂异常、总胆固醇及 LDL-C。

Abbreviations: OBS, oxidative balance score; AIP, atherogenic index of plasma; LDL-C, low-density lipoprotein cholesterol. A, Dose–response relationship between OBS and AIP in the overall population. The model was adjusted for age, sex, education level, household income, hypertension, diabetes, dyslipidemia, total cholesterol, and LDL-C. B, Dose–response relationship between OBS and AIP across different age groups. The model was adjusted for sex, education level, household income, hypertension, diabetes, dyslipidemia, total cholesterol, and LDL-C.

图 2　OBS 与 AIP 关联的限制性立方样条(RCS)曲线

Figure 2　Restricted cubic spline (RCS) curve for the association between OBS and AIP

2.4　氧化应激及炎症标志物指标中介作用分析　中介作用分析结果显示(图 3)，以尿酸为中介变量，OBS 与 AIP 关联的总效应(95%*CI*)为–0.023(–0.029～–0.016)，直接效应(95%*CI*)为–0.020(–0.027～–0.014)，

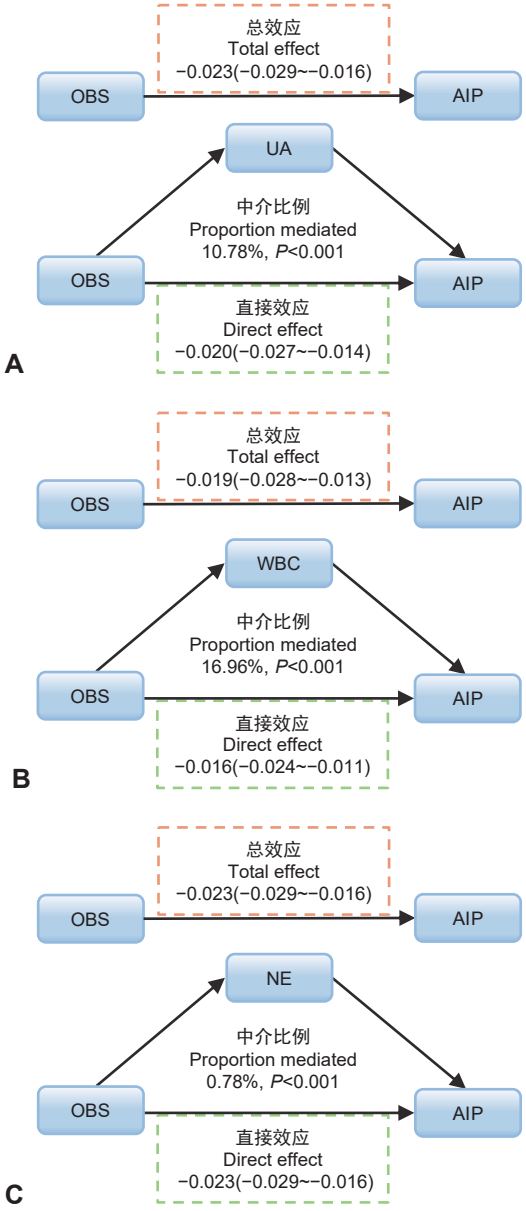
中介比例为 10.78%, $P = 0.004$(图 3 A)。以 WBC 为中介变量, OBS 与 AIP 关联的总效应(95%*CI*)为–0.019(–0.028～ –0.013), 直接效应(95%*CI*)为 –0.016(–0.024～ –0.011), 中介比例为 16.96%, $P = 0.004$(图 3 B)。以 NE 为中介变量, OBS 与 AIP 关联的总效应(95%*CI*)为 –0.023(–0.029～ –0.016), 直接效应(95%*CI*)为 –0.023(–0.029～ –0.016), 中介比例为 0.78%, $P = 0.004$(图 3 C)。

3 讨 论

本研究采用人群为基础的横断面调查, 探讨 OBS 与 AIP 的关联, 并评估炎症、氧化应激指标的中介作用。多因素 logistic 回归结果显示, OBS 与 AIP 间存在负相关, 并发现 OBS 和 AIP 间存在非线性 L 型相关性。亚组分析结果显示 OBS 与 AIP 的负关联在年龄< 60 岁、血脂正常人群中更显著。中介效应结果显示, 尿酸、WBC 及 NE 部分介导 OBS 对 AIP 的影响。

目前, 关于 OBS 与 AS 风险关联的流行病学证据有限。然而, 与 OBS 评估相关的因素, 如吸烟、饮酒、超重/肥胖、缺乏运动等都会导致 OS 的产生, 且上述因素也已被证实与 AS 风险有关[19]。其潜在机制可能是, 较高水平的 OS 水平不仅与内皮损伤、血管纤维化及血管钙化密切相关[20-22], 还可激活炎症反应, 而持续的炎症激活会导致血管损伤和器官功能恶化[23-24]。此外, OS 可能通过增加 ROS 生成成分破坏血管内皮稳态, 加剧动脉僵硬度, 进一步促进 AS 的发生[25-26]。

亚组分析结果提示 OBS 与年龄、血脂异常存在交互作用, 在年龄<60 岁或血脂正常人群中, OBS 与 AIP 的关联更显著, 而在患高血脂的人群中 OBS 与 AIP 间不存在统计学关联。年龄、血脂异常是心血管疾病的危险因素。研究表明, 随着年龄增长, 血管内皮细胞功能逐渐衰退, 对氧化应激的耐受性降低。此时, 即使轻度氧化应激也可能引发显著的血管损伤[27]。研究表明, 老年个体中, ROS 诱导的内皮细胞功能障碍更为明显, 表现为血管舒张功能下降、血小板黏附增加等, 这些变化进一步促进 AS 进展。此外, O'Callaghan 等[28] 发现, 内膜下氧化低密度脂蛋白沉积促进巨噬细胞转化为泡沫细胞, 并鉴定出髓系细胞表达的触发受体 2 高表达泡沫样巨噬细胞为斑块中响应高血脂炎症微环境的关键脂质代谢亚群。Takaoka 等[29] 的研究发现早期间歇性高脂血症会改变动脉常驻巨噬细胞的保护作用, 从而加速 AS。上述结果提示年龄和高血脂在 AS 风险中发挥重要作用, 可能会降低 OBS 高水平对 AS 风险的影响, 未来研究需进一步明确两者交互作用的具体分子机制, 为精准防治 AS 提供依据。



注: A 为 UA 在 OBS 与 AIP 关联中的中介作用; B 为 WBC 在 OBS 与 AIP 关联中的中介作用; C 为 NE 在 OBS 与 AIP 关联中的中介作用。OBS 为氧化平衡评分; AIP 为血浆致动脉粥样硬化指数; UA 为尿酸; WBC 为白细胞计数; NE 为中性粒细胞。模型根据年龄、性别、教育程度、家庭收入、高血压、糖尿病、血脂异常、总胆固醇及低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)等因素进行调整。

A, the mediating effect of UA on the association between OBS and AIP; B, the mediating effect of WBC on the association between OBS and AIP; C, the mediating effect of NE on the association between OBS and AIP. Abbreviations: OBS, oxidative balance score; AIP, atherogenic index of plasma; UA, uric acid; WBC, white blood cell count; NE, neutrophil count. The model was adjusted for age, sex, education level, household income, hypertension, diabetes, dyslipidemia, total cholesterol, and low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C).

图 3 氧化应激和炎症生物标志物在 OBS 与 AIP 关联中的中介效应图

Figure 3 Mediation analysis of oxidative stress and inflammatory biomarkers in the association between OBS and AIP

中介分析结果表明，氧化应激指标与炎症指标介导了 OBS 与 AIP 关联存在介导作用。He 等[30] 研究发现，OBS 和血浆 UA 之间呈负相关。此外，Liu 等[31] 的研究表明，尿酸盐通过加剧炎症反应、促进氧化应激并导致内皮功能障碍，是驱动 AS 斑块形成的关键机制。Lee 等[32] 研究表明，OBS 水平升高与炎症标志物水平(包括 C 反应蛋白和白细胞)降低有关。白细胞计数是临床上常用的炎症指标[33]，而单核细胞迁入动脉内膜后会分化为巨噬细胞，并通过清道夫受体吞噬氧化低密度脂蛋白(oxidized low-density lipoprotein，ox-LDL)形成泡沫细胞，进而推动脂质条纹向纤维斑块进展[34-35]。

本研究采用分层多阶段随机抽样的方法，质量控制措施严格，样本量较大，数据代表性较好。但本研究仍存在一定的局限性。首先，本研究仅使用 AIP 指标评估 AS 风险，可能无法完全反映真实 AS 状况，且横断面调查设计难以确定 OBS 与 AS 风险的因果关系。其次，OBS 的计算依赖于饮食和生活方式数据，可能存在信息偏倚和测量误差。第三，尽管调整了多种潜在混杂因素，但残留混杂因素对结果的影响仍无法完全避免。第四，尽管本研究在亚组分析中发现血脂异常与 OBS 存在交互作用，但由于研究人群中血脂异常者仅占 3.13%，相关结果仍需谨慎解读。第五，尽管本研究探讨并发现了炎症指标(WBC、NE)及氧化应激指标(尿酸)在 OBS 与 AS 关联中的潜在中介作用，但受数据限制未能纳入更具代表性的指标，未来仍需更全面的研究加以验证。第六，样本来自福建省人群，结果外推可能受限。因此，未来仍有待于大样本前瞻性研究进行内部和外部验证。

本研究发现，OBS 与 AIP 之间存在负相关以及非线性剂量-反应关系，同时，OBS 与年龄、血脂异常对 AIP 影响存在相乘交互作用。此外，尿酸、WBC 及 NE 在 OBS 与 AIP 的关联中发挥中介作用。这提示，与抗氧化相关的饮食结构和生活方式因素可能通过影响氧化应激及炎症状态，与较低的 AIP 水平相关。此外，未来仍需通过大规模、多样化的前瞻性设计验证本次发现，并深入探索 OS 与 AS 病理生理机制，为制定更精准的个体化干预策略提供科学依据。

利益冲突声明　所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明　黄婧如、陈丹静负责研究构思并完成统计分析并撰写论文初稿；饶志翔、林黛茜、蔡晓琪负责数据收集与整理；龚瑾、黄邦邦负责对分析结果进行整理并绘制图表；许昌声、陈纯娴负责数据质量控制与审查；韩英、谢良地负责研究的总体设计、结果解释及论文的审查与修订

本主题国内外已有的结论

• 体内、体外实验发现氧化应激与 AS 密切相关，国外人群研究结果发现 OBS 与美国成人 AS 风险存在负相关，并与动脉僵硬度之间存在非线性 L 型相关性。

本文特色与见解

• AIP 为评估 AS 风险的新型生物标志物，本研究首次以 AIP 为结局变量，评估 OBS 对中国成年人 AIP 水平的影响，发现 OBS 与 AIP 之间存在负相关，OBS 水平较高人群的高 AIP 水平发生率相对较低，并发现 OBS 和 AIP 的关联之间存在非线性的 L 型相关性。

• OBS 与年龄、血脂异常存在交互作用，在年龄＜60 岁或血脂正常人群中，OBS 与 AIP 的关联更为显著，而在患有高血脂的人群中 OBS 与 AIP 不存在统计学关联。

• 氧化应激标志物尿酸与炎症标志物 WBC、NE 在 OBS 与 AIP 的关联中发挥中介作用，提示 OBS 可以通过直接/间接作用影响 AIP 水平。

参考文献

[1] 中国心血管健康与疾病报告 2024 概要 [J]. 中国循环杂志, 2025, 40(6): 521-559.
[2] Björkegren J, Lusis AJ. Atherosclerosis: recent developments[J]. Cell, 2022, 185(10): 1630-1645.
[3] Saba L. Progress in the identification of unstable carotid artery plaque[J]. Curr Opin Neurol, 2026, 39(1): 1-6.
[4] Dobiásová M, Frohlich J. The plasma parameter log (TG/HDL-C) as an atherogenic index: correlation with lipoprotein particle size and esterification rate in apoB-lipoprotein-depleted plasma (FER(HDL)) [J]. Clin Biochem, 2001, 34(7): 583-588.
[5] Ulloque-Badaracco JR, Hernandez-Bustamante EA, Alarcon-Braga EA, et al. Atherogenic index of plasma and coronary artery disease: a systematic review[J]. Open Med (Wars), 2022, 17(1): 1915-1926.
[6] Liu S, Liu J, Wang Y, et al. Oxidative stress: signaling pathways, biological functions, and disease [J]. MedComm (2020), 2025, 6(7): e70268.
[7] Mury P, Chirico EN, Mura M, et al. Oxidative stress and inflammation, key targets of atherosclerotic plaque progression and vulnerability: potential impact of physical activity[J]. Sports Med, 2018, 48(12): 2725-2741.
[8] Farias HR, Costa-Beber LC, Costa Rodrigues Guma FT, et al. Hypercholesterolemia, oxidative stress, and low-grade inflammation: a potentially dangerous scenario to blood-brain barrier[J]. Metab Brain Dis, 2025, 40(5): 205.
[9] Terman D, Hannawi Y. Modeling the effects of superoxide production on the cerebral blood flow[J]. J Theor Biol, 2025, 611: 112195.
[10] Kračun D, Lopes LR, Cifuentes-Pagano E, et al. NADPH oxidases: redox regulation of cell homeostasis and disease[J]. Physiol Rev,

2025, 105(3): 1291-1428.

[11] Hernández-Ruiz Á, García-Villanova B, Guerra-Hernández EJ, et al. Oxidative balance scores (OBSs) integrating nutrient, food and lifestyle dimensions: development of the NutrientL-OBS and FoodL-OBS[J]. Antioxidants (Basel), 2022, 11(2): 300.

[12] Wang Z, Zhang L, Chen Z, et al. Survey on prevalence of hypertension in China: background, aim, method and design[J]. Int J Cardiol, 2014, 174(3): 721-723.

[13] Qiu W, Han Y, Huang J, et al. Higher food and lifestyle oxidative balance scores decreases the risk of hypertension in Chinese adults: a population-based cross-sectional study[J]. J Clin Hypertens (Greenwich), 2025, 27(4): e70042.

[14] Han Y, Chang H, Huang J, et al. Association of 24 conventional and unconventional anthropometric indicators with pre-hypertension or hypertension: a population-based cross-sectional study in Chinese population[J]. Vasc Health Risk Manag, 2025, 21: 859-877.

[15] Dobiásová M. AIP--atherogenic index of plasma as a significant predictor of cardiovascular risk: from research to practice[J]. Vnitr Lek, 2006, 52(1): 64-71.

[16] 中国老年医学学会高血压分会, 北京高血压防治协会, 国家老年疾病临床医学研究中心. 中国老年高血压管理指南 2023[J]. 中华高血压杂志, 2023, 31(6): 508-538.

[17] 中国糖尿病学会. 中国 2 型糖尿病防治指南 (2020 年版)(上)[J]. 中国实用内科杂志, 2021, 41(8): 668-695.

[18] 王增武, 刘静, 李建军, 等. 中国血脂管理指南 (2023 年)[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(3): 237-271.

[19] Förstermann U, Xia N, Li H. Roles of vascular oxidative stress and nitric oxide in the pathogenesis of atherosclerosis[J]. Circ Res, 2017, 120(4): 713-735.

[20] Guzik TJ, Touyz RM. Oxidative stress, inflammation, and vascular aging in hypertension[J]. Hypertension, 2017, 70(4): 660-667.

[21] Franco C, Sciatti E, Favero G, et al. Essential hypertension and oxidative stress: novel future perspectives[J]. Int J Mol Sci, 2022, 23(22): 14489.

[22] Yan R, Zhang X, Xu W, et al. ROS-induced endothelial dysfunction in the pathogenesis of atherosclerosis[J]. Aging Dis, 2024, 16(1): 250-268.

[23] Camargo LL, Rios FJ, Montezano AC, et al. Reactive oxygen species in hypertension[J]. Nat Rev Cardiol, 2025, 22(1): 20-37.

[24] Liu D, Qin H, Gao Y, et al. Cardiovascular disease: mitochondrial dynamics and mitophagy crosstalk mechanisms with novel programmed cell death and macrophage polarisation[J]. Pharmacol Res, 2024, 206: 107258.

[25] Ning R, Li Y, Du Z, et al. The mitochondria-targeted antioxidant MitoQ attenuated PM2.5-induced vascular fibrosis via regulating mitophagy[J]. Redox Biol, 2021, 46: 102113.

[26] Adeshara K, Di Marco E, Bordino M, et al. Altered oxidant and antioxidant levels are associated with vascular stiffness and diabetic kidney disease in type 1 diabetes after exposure to acute and chronic hyperglycemia[J]. Cardiovasc Diabetol, 2024, 23(1): 350.

[27] Ardahanlı İ, Aslan R, Arıkan E, et al. Redox imbalance and oxidative stress in cardiovascular diseases: mechanisms, biomarkers, and therapeutic targets[J]. Arch Med Sci Atheroscler Dis, 2025, 10: e220-e227.

[28] O'Callaghan CA, Jiang J. Genetic influences on macrophage function and lipid uptake in atherosclerosis[J]. Curr Opin Lipidol, 2025, 36(4): 185-190.

[29] Takaoka M, Zhao X, Lim HY, et al. Early intermittent hyperlipidaemia alters tissue macrophages to fuel atherosclerosis[J]. Nature, 2024, 634(8033): 457-465.

[30] He Y, Chen X, Ma Z, et al. Association of oxidative balance score with hyperuricemia and gout: NHANES 2009–2018[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2024, 15: 1402369.

[31] Liu Y, Li Z, Xu Y, et al. Uric acid and atherosclerosis in patients with chronic kidney disease: recent progress, mechanisms, and prospect[J]. Kidney Dis (Basel), 2025, 11(1): 112-127.

[32] Lee Y, Kim KH, Lee BH, et al. Plasma level of brain-derived neurotrophic factor (BDNF) in patients with postpartum depression[J]. Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry, 2021, 109: 110245.

[33] Shimabukuro M. Leucocyte count: inflammatory and ROS biomarkers of ASCVD[J]. J Atheroscler Thromb, 2024, 31(6): 861-863.

[34] Jiao X, Guo D, Li W, et al. Foam cells: tracing the diverse cellular origins and their linked signaling pathways[J]. J Transl Med, 2025, 23(1): 1382.

[35] Ijaz A, Yarlagadda B, Orecchioni M. Foamy macrophages in atherosclerosis: unraveling the balance between pro- and anti-inflammatory roles in disease progression[J]. Front Cardiovasc Med, 2025, 12: 1589629.

收稿日期: 2025-12-18 **修回日期**: 2026-02-25
录用日期: 2026-03-16 **责任编辑**: 刘莉