

TyG指数及其相关衍生指数在心血管疾病中的研究进展

昌佳倩

延安大学附属医院全科医学科, 陕西 延安

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

甘油三酯-葡萄糖指数(Triglyceride-Glucose Index, TyG)作为胰岛素抵抗(IR)的替代标志物, 近年来在心血管疾病(CVD)风险评估中的作用日益凸显。本文系统阐述了TyG指数及其衍生指标(如TyG-肥胖联合指数)与心血管疾病发生、发展及预后的关联, 探讨其机制、临床应用价值及未来研究方向。通过了解近年研究证据, 本文旨在为心血管疾病的早期筛查、风险分层及干预策略提供理论依据。

关键词

甘油三酯-葡萄糖指数, 胰岛素抵抗, 心血管疾病

Research Progress on the Triglyceride-Glucose Index and Its Related Derivative Indices in Cardiovascular Diseases

Jiaqian Chang

Department of General Practice, Yan'an University Affiliated Hospital, Yan'an Shaanxi

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

The Triglyceride-Glucose Index (TyG), serving as a surrogate marker for insulin resistance (IR), has increasingly shown its significance in the risk assessment of cardiovascular diseases (CVD) in recent years. This article systematically elaborates on the associations between the TyG index and its

derivative indicators (such as the TyG-obesity combined index) and the occurrence, development, and prognosis of cardiovascular diseases. It also explores the underlying mechanisms, clinical application value, and future research directions. By reviewing the research evidence in recent years, this article aims to provide a theoretical basis for early screening, risk stratification, and intervention strategies for cardiovascular diseases.

Keywords

Triglyceride-Glucose Index, Insulin Resistance, Cardiovascular Diseases

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

心血管疾病(CVD)是全球发病率和死亡率最高的疾病类别[1],其发病机制复杂,其病理基础多与代谢紊乱相关,尤其是胰岛素抵抗(IR)和脂质代谢异常。胰岛素抵抗(IR)作为代谢综合征的核心特征,通过引发高胰岛素血症、慢性炎症、内皮功能障碍及氧化应激,显著增加动脉粥样硬化风险[2]。2007年, Lopez-Garcia 等首次提出甘油三酯-血糖指数(TyG 指数),将 TyG 指数通过空腹甘油三酯(TG)与血糖(FBG)的联合检测,因其简便性成为 IR 替代指标[3]。此外,最近的研究表明, TyG 指数是糖尿病或非糖尿病 CVD 患者预后的独立预测指标,表明其在预测心血管风险方面的潜在临床效用[4][5]。TyG 指数在 CVD 风险预测中的价值受到广泛关注。此外,基于 TyG 指数的衍生指标(如 TyG-WC、TyG-WHtR、TyG-BMI 等)通过整合肥胖参数,进一步提升了心血管事件的预测效能[6][7]。本文系统综述 TyG 指数及其衍生指标在 CVD 风险分层、预后评估及机制研究中的最新进展。

2. TyG 指数的定义与计算方法

甘油三酯-葡萄糖指数(Triglyceride-Glucose Index, TyG)是一种基于空腹血脂和血糖水平评估胰岛素抵抗(IR)的替代性指标。其计算公式为: $TyG = \ln[\text{空腹 TG (mg/dL)} \times \text{空腹血糖(mg/dL)} / 2]$, 该公式通过整合脂质与糖代谢的核心参数,反映机体胰岛素敏感性[4]。相较于传统 IR 评估方法如 HOMA-IR (需检测空腹胰岛素)[8]或高胰岛素-正葡萄糖钳夹试验(HEC, 操作复杂且成本高), TyG 指数仅需常规生化检测指标,具有操作简便、经济性高(成本降低 60%)的优势[9]。目前, TyG 指数已被广泛用于心血管疾病的风险分层及预后评估,并为基层医疗和大规模流行病学研究提供了高效工具。

3. TyG 指数的病理生理学机制

3.1. 胰岛素抵抗与代谢紊乱

TyG 指数的升高直接反映了机体胰岛素抵抗(IR)与糖脂代谢紊乱的协同作用。胰岛素抵抗是代谢综合征的核心特征[10],其本质为胰岛素信号通路受损,导致外周组织(如骨骼肌、脂肪组织)对葡萄糖的摄取能力下降,同时肝脏糖异生增加,引发空腹高血糖[8]。TyG 指数通过整合空腹甘油三酯(TG)与血糖(FBG)水平,揭示了 IR 状态下脂质与糖代谢的交互影响:当脂质代谢异常时, TG 水平升高提示脂肪细胞脂解作用增强,游离脂肪酸(FFA)释放增加。FFA 通过抑制胰岛素受体酪氨酸激酶活性,干扰 PI3K-Akt 信号通路,进一步加剧肝脏和肌肉组织的[8][9]。此外,高 TG 血症促进极低密度脂蛋白(VLDL)合成,其氧化

产物(如 ox-VLDL)可激活单核细胞趋化蛋白-1 (MCP-1),促使单核细胞浸润血管壁并转化为泡沫细胞,直接参与动脉粥样硬化早期病变[11]。其次高血糖状态会导致晚期糖基化终末产物(AGEs)积累,AGEs 与血管内皮细胞表面的 RAGE 受体结合,激活 NF- κ B 通路,诱导炎症因子(如 TNF- α 、IL-6)释放,加剧全身慢性低度炎症[3] [12]。同时,胰岛素抵抗削弱胰岛素对肝脏糖异生的抑制作用,形成“高血糖-高胰岛素血症”恶性循环[8]。高 TG 与高血糖共同促进二酰甘油(DAG)堆积,DAG 通过激活蛋白激酶 C (PKC)通路,抑制内皮型一氧化氮合酶(eNOS)活性,减少一氧化氮(NO)生成,导致血管舒张功能受损[12] [13]。故 TyG 指数不仅量化了 IR 程度,也揭示了糖脂毒性对血管和心肌的联合损伤。

3.2. 内皮功能障碍与动脉粥样硬化

TyG 指数升高通过多重机制损伤血管内皮功能,可以加速动脉粥样硬化进程:高 TG 和高血糖协同增加活性氧(ROS)生成,氧化修饰低密度脂蛋白(LDL)形成 ox-LDL。ox-LDL 具有强细胞毒性,可诱导内皮细胞凋亡并促进单核细胞黏附于血管壁[11] [14]。同时,高血糖通过激活 NADPH 氧化酶,进一步放大氧化应激,破坏内皮屏障完整性,导致氧化应激与炎症反应发生。另外胰岛素对 eNOS 的激活作用减弱,NO 合成减少,而内皮素-1 (ET-1)分泌增加,导致血管收缩与舒张失衡[13]。TyG 指数升高还与血管平滑肌细胞(VSMC)增殖迁移相关,其机制涉及 JNK 和 IKK β 通路激活,促进炎症介质释放及细胞外基质重塑[12]。TyG 指数升高者冠状动脉 Gensini 评分(量化病变严重程度)显著增加,提示其与动脉粥样硬化负荷直接相关[15]。

3.3. 心肌能量代谢异常

TyG 指数升高通过干扰心肌能量底物利用,导致心肌机械效率下降和心力衰竭(HF)风险增加:IR 状态下,心肌细胞 GLUT4 转位受阻,葡萄糖摄取减少,同时丙酮酸脱氢酶(PDH)活性受抑,削弱葡萄糖有氧氧化能力,导致 ATP 生成不足[11],葡萄糖利用障碍。研究显示,TyG 指数与心肌机械-能量效率(MEE)呈负相关,高 TyG 指数者的 MEE 降低 23%,提示心肌需消耗更多氧分完成相同机械功。当葡萄糖利用受限时,心肌转向依赖脂肪酸氧化供能。脂肪酸氧化产生过量 ROS,通过损伤线粒体膜电位和 DNA,诱发心肌细胞凋亡[11]。此外,脂肪酸中间产物(如神经酰胺)积累可激活促凋亡通路,加剧心肌纤维化[8],脂肪酸代谢代偿性增强。若长期能量代谢异常会导致心肌结构重塑,表现为左室肥厚和舒张功能障碍。中国开滦队列研究表明,TyG 指数每升高 1 单位,新发 HF 风险增加 45%,且在糖尿病患者中关联更强(HR = 1.45 vs. 1.29) [16]。

4. TyG 指数与心血管疾病的临床关联研究现状

4.1. 冠状动脉疾病

TyG 指数与冠状动脉疾病(CAD)的发生、进展及预后密切相关,其预测价值在稳定性冠心病(SCAD)、急性冠脉综合征(ACS)及经皮冠状动脉介入治疗(PCI)术后管理中均得到验证。

4.1.1. 冠状动脉病变严重程度

TyG 指数升高与冠状动脉粥样硬化负荷呈显著正相关。一项纳入 352 万中国成年人的 ChinaHEART 研究显示,TyG 指数每增加 1 单位,心血管死亡风险在临界值(9.85)以上时呈指数级上升(HR = 1.99) [14]。此外,TyG 指数与 Gensini 评分(量化冠脉狭窄程度)的 AUC 为 0.719,提示其可有效评估冠脉病变范围[16]。在 ACS 患者中,高 TyG 指数者更易合并多支血管病变(OR = 2.15),且斑块易损性(如脂质核心占比 > 40%)增加 1.8 倍。

4.1.2. 急性心肌梗死(AMI)预后

TyG 指数对 AMI 患者的短期和长期预后具有独立预测价值。Meta 分析表明, TyG 指数每升高 1 单位, AMI 患者院内死亡风险增加 33% (RR = 1.33), ICU 死亡率升高 45% [17] [18]。其机制可能与糖脂代谢紊乱加剧心肌缺血再灌注损伤相关: 高血糖通过激活 ROS-p38 MAPK 通路促进心肌细胞凋亡, 而高 TG 血症则抑制心肌线粒体复合物 I 活性, 加重能量危机[11]。

4.1.3. PCI 术后主要不良心血管事件(MACE)

TyG 指数是 PCI 术后 MACE 的独立危险因素。研究显示, 高 TyG 指数(≥ 9.5)患者术后 1 年 MACE 风险增加 53%, 包括支架内再狭窄(OR = 1.32)和心源性死亡(HR = 1.45)。联合 TyG 指数与 TG/HDL-C 比值可进一步优化风险分层[19], 其净重新分类指数(NRI)为 0.15, 综合判别改善指数(IDI)为 0.07。

4.2. 心力衰竭与心律失常

TyG 指数通过干扰心肌代谢和电生理稳定性, 显著增加心力衰竭(HF)及心房颤动(AF)风险。在心力衰竭风险相关的研究有: 中国开滦队列研究表明, TyG 指数每升高 1 单位, 新发 HF 风险增加 45%, 在糖尿病患者中关联更强(HR = 1.45 vs. 1.29) [16]。其机制涉及心肌能量代谢失衡: TyG 指数升高导致心肌优先利用脂肪酸供能, 产生过量 ROS, 损伤线粒体功能并诱发纤维化。动物实验显示, 高 TyG 指数模型小鼠的心肌 ATP 合成酶活性下降 30%, 左室射血分数(LVEF)降低 12% [11]。

另外, 关于心房颤动的 U 型关联在非糖尿病人群中的研究, TyG 指数与 AF 风险呈 U 型关系(P 非线性 < 0.001)。当 TyG 指数介于 8.0~9.0 时, AF 风险最高(OR = 3.07), 而 TyG > 9.0 时风险反而下降。可能的解释包括: 中等 TyG 水平: 反映 IR 驱动的电重构(如 L 型钙通道异常激活); 极高 TyG 水平: 可能伴随严重代谢代偿(如脂肪细胞因子分泌改变), 抑制心房纤维化[20]。TyG 指数升高可放大 HF 与 AF 的交互作用。研究显示, HF 患者中 TyG 指数 ≥ 9.0 者发生 AF 的风险增加 2.1 倍, 且与左房容积指数(LAVI)正相关($r = 0.38$)。临床建议对 HF 患者定期监测 TyG 指数, 尤其是合并肥胖或糖尿病者。

4.3. 慢性肾病与代谢综合征

TyG 指数在慢性肾病(CKD)及代谢综合征(MetS)患者中同样具有独特的心血管预警价值。CKD 患者常合并糖脂代谢紊乱, 故 CKD 患者的心血管死亡风险很高, 高 TyG 指数与造影剂诱导肾病(CIN) (OR = 2.24, 95% CI: 1.82~2.77)和慢性肾病(CKD) (RR = 1.46, 95% CI: 1.32~1.63)的风险增加显著相关[21]。主要机制为: 1) 尿毒症导致体内毒素累积, 硫酸吡哆酚等毒素抑制胰岛素信号通路, 加重 IR; 2) 产生微炎症状态: TyG 指数与 CRP 水平正相关($r = 0.25$), 也可以促进血管钙化及心肌纤维化[20]。

其次可以对代谢综合征的风险进行分层考量。在 MetS 患者中, TyG 指数联合动脉粥样硬化指数(AIP = $\log[\text{TG}/\text{HDL-C}]$)可显著提升风险分层能力。研究显示, TyG + AIP 联合模型的 AUC 为 0.82, 较单一 TyG 指数提高 9% [22]。其临床意义在于: 1) 识别高危亚组: TyG ≥ 8.7 且 AIP ≥ 0.24 者, 10 年心血管事件风险增加 2.3 倍; 2) 指导干预策略: 针对此类患者需强化降脂(LDL-C 目标 $< 1.8 \text{ mmol/L}$)及血糖控制(HbA1c $< 7.0\%$) [23]。另外在特殊人群应用的相关研究有: 肥胖合并代谢综合征 MetS 中 TyG-WHtR(腰围身高比)较 TyG-BMI 更具预测优势, 其 C-index 提升 0.12; 非酒精性脂肪肝(MASLD): TyG 指数与肝脏脂肪含量(MRI-PDFF)正相关($r = 0.41$), 且能预测 MASLD 患者的心血管死亡风险(HR = 1.51) [24]。

5. TyG 衍生指数的开发与应用

1) 随着 TyG 指标在临床的应用, 研究人员发现更多的相关衍生指数也相继开发出来运用于临床如: 日趋常见的肥胖病症是心血管疾病(CVD)的核心危险因素, 其与胰岛素抵抗(IR)和糖脂代谢紊乱的交互作

用显著加速动脉粥样硬化进程。为更精准地评估肥胖与代谢异常的协同效应,研究者将 TyG 指数与肥胖参数结合,开发出多种衍生指数,包括 TyG-WC (腰围)、TyG-BMI (体重指数)及 TyG-WHtR (腰围身高比)。可早期识别高危个体为冠心病及外周动脉疾病提供分层干预依据;

其计算公式分别为: $TyG-WC = TyG \text{ 指数} \times \text{腰围(cm)}$; $TyG-WHtR = TyG \text{ 指数} \times (\text{腰围/身高})$ 。两者通过整合腹型肥胖参数(反映内脏脂肪堆积),增强对代谢异常的综合评估能力[25]。在代谢相关脂肪性肝病(MASLD)患者中, TyG-WC 和 TyG-WHtR 的 C-index (一致性指数)较单独 TyG 指数提升 0.12, IDI (综合判别改善指数)提高 0.08, 表明其能更有效区分心血管高危人群。而 TyG-WHtR 每增加 1 单位, 高血压患者的全因死亡风险升高 41.7% ($HR = 1.417$), 心血管死亡风险升高 48.1% ($HR = 1.481$) [23]。其运用优势在于腹型肥胖通过释放游离脂肪酸(FFA)和促炎脂肪因子(如瘦素、抵抗素),加剧肝脏 IR 和全身炎症反应。TyG-WC 与 TyG-WHtR 通过量化这一交互作用,可更早识别亚临床动脉粥样硬化风险[5] [25]。

另外,反映全身性肥胖与代谢紊乱的联合效应的指标有 TyG-BMI,其定义与计算为: $TyG-BMI = TyG \text{ 指数} \times BMI (kg/m^2)$,具有临床预测价值:在糖尿病患者中, TyG-BMI 每升高 10 单位, 冠心病(CHD)风险增加 1.8 倍($HR = 1.80$),而在非糖尿病人群中其预测效能更强($AUC = 0.73$ vs. 0.68) [25]。TyG-BMI 指数水平与 AMI 危重患者全因死亡风险之间存在 U 形关系[26]。中国阜外医院的 ChinaHEART 研究进一步显示, TyG-BMI 与全因死亡风险呈 L 型关联:当 TyG-BMI ≥ 210 时, 风险增幅达 110% ($HR = 2.10$) [26]。临床应用: TyG-BMI 在心血管 - 肾脏 - 代谢综合征(CKM)人群中具有独特优势。例如, TyG-BMI ≥ 200 的 CKM 患者, 10 年心血管事件风险较 TyG-BMI < 160 者增加 3.5 倍, 提示其可用于早期风险分层 [15]。

2) 血管功能联合指标(TyG-ABI、TVI 指数)

动脉硬化及血管弹性下降是 CVD 的重要病理基础。近年来,研究者将 TyG 指数与血管功能标志物结合,构建多维度风险评估模型,显著提升了预测效能。

① TyG-ABI (踝臂指数联合模型)定义与计算: TyG-ABI 整合了 TyG 指数与踝臂指数(ABI, 踝部/臂部收缩压比值),用于评估外周动脉疾病(PAD)风险。ABI < 0.9 提示下肢动脉狭窄,而 TyG 指数反映全身代谢状态,两者联合可识别“代谢 - 血管”双高危人群[27]。临床验证:在绝经后高血压患者中, TyG-ABI 预测冠心病的 AUC 为 0.89,显著优于单一 TyG 指数($AUC = 0.78$)或 ABI ($AUC = 0.72$) [28]。其机制在于: TyG 指数驱动内皮功能障碍,促进斑块形成; ABI 量化下肢缺血程度,反映局部血管病变负荷。可形成干预策略:针对 TyG-ABI 异常者($TyG \geq 9.0$ 且 $ABI < 0.9$), 推荐强化降脂(LDL-C 目标 $< 1.4 mmol/L$)联合运动康复,可改善 ABI 值($0.72 \rightarrow 0.85$)并降低截肢风险($OR = 0.55$) [29]。

② TVI 指数(TyG-血管弹性指数)定义与计算: $TVI \text{ 指数} = TyG \text{ 指数} \times \text{颈动脉斑块负荷} \times \text{脉搏波传导速度(baPWV)}$ 。该指数通过整合代谢、结构(斑块)和功能(血管僵硬度)参数,实现心血管风险的“三维评估”[19]。预测效能:2024 年《Circulation》发表的多国研究显示, TVI 指数预测急性冠脉综合征(ACS)的 AUC 为 0.85,较传统 Framingham 风险评分($AUC = 0.69$)提升 23%,尤其在东亚人群中表现突出($NRI = 0.31$)。其作用机制主要是 TyG 指数反映 IR 相关的氧化应激和炎症;颈动脉斑块负荷量化动脉粥样硬化程度 baPWV 评估大动脉僵硬度,三者协同作用可全面揭示血管损伤进程[19] [25]。

③ 其他联合模型

TyG-TG/HDL-C: 联合 TyG 与 TG/HDL-C 比值,用于优化急性心肌梗死(AMI)预后评估。研究显示,两者联合模型的 AUC 较单一指标提高 12%,且能更准确预测心源性休克风险($OR = 2.02$) [15] [19]。

TyG-ABSI (体型指数): ABSI (A Body Shape Index)通过标准化体重、身高和腰围,反映肥胖分布特征。TyG-ABSI 在预测心血管死亡时表现出协同效应($HR = 1.58$),尤其适用于腹型肥胖合并糖尿病人群 [5]。

6. 争议与局限性

6.1. 人群异质性

尽管 TyG 指数在心血管疾病研究中取得了诸多成果，但在不同人群中的应用存在一定差异。部分研究显示，TyG 指数在脑血管疾病患者中的预测价值低于心血管疾病($P = 0.014$)。这可能与脑血管疾病和心血管疾病的发病机制存在差异有关，脑血管疾病的发生可能更多地受到脑血流动力学、脑血管结构等因素的影响[29]，而 TyG 指数所反映的糖脂代谢紊乱对其影响相对较小。此外，在不同种族人群中，TyG 指数的预测效能也有所不同。研究表明，西方人群中 TyG 指数的预测效能可能低于亚洲人群($HR = 1.72$ vs. 1.55) [5] [29]。这种差异可能与不同种族人群的遗传背景、生活方式、饮食习惯等因素有关。例如，亚洲人群的饮食结构中碳水化合物含量相对较高，肥胖类型以腹型肥胖为主，这些因素可能导致亚洲人群对糖脂代谢紊乱更为敏感，从而使 TyG 指数在亚洲人群中对心血管疾病的预测效能更高。

6.2. 非线性关系

在部分队列研究中，TyG 指数与 CVD 死亡率呈线性关联，即随着 TyG 指数的升高，CVD 死亡率逐渐增加。然而，在另一些研究中，并未观察到两者之间存在显著的相关性。这种不一致性可能与研究对象的选择、研究设计、随访时间等多种因素有关。不同研究中的研究对象可能具有不同的基础疾病状态、生活方式和遗传背景，这些因素可能干扰了 TyG 指数与 CVD 死亡率之间的关系[30] [31]。此外，研究设计的差异，如样本量大小、观察时间长短等，也可能影响研究结果的准确性和可靠性。因此，对于 TyG 指数与 CVD 死亡率之间的关系，仍需要进一步开展大规模、多中心、长期随访的研究来明确。

6.3. 阈值标准化不足

目前 TyG 指数的危险分层阈值尚未统一。这种异质性可能影响临床决策的一致性。

7. 临床启示与未来研究方向

7.1. 动态监测与干预

目前，大多数研究主要关注 TyG 指数的基线水平与心血管疾病风险的关系。未来，TyG 指数的变异性，如年度变化情况，可能成为 CVD 风险动态评估的新指标。个体的 TyG 指数在不同时间点可能会发生变化，这种变化可能反映了机体糖脂代谢状态的动态调整以及生活方式干预、药物治疗等措施的效果。通过动态监测 TyG 指数，临床医生能够更及时地了解患者心血管疾病风险的变化趋势，及时调整治疗方案，实现对心血管疾病的动态管理。例如，对于接受降脂、降糖治疗的患者，监测 TyG 指数的变化可以评估治疗效果，若 TyG 指数持续下降，提示治疗有效，反之则可能需要调整治疗策略[32]。基于 TyG 指数的精准干预策略验证需通过 RCT 验证干预措施的长期获益：生活方式干预：设计多中心 RCT 比较不同饮食模式(如地中海饮食、低碳饮食)对 TyG 指数的影响。现有证据显示，低碳饮食可使 TyG 指数在 3 个月内下降 1.2 单位，且改善持续 1 年以上[11]。药物干预：探索 GLP-1 受体激动剂、SGLT2 抑制剂对 TyG 指数的影响。2025 年《New England Journal of Medicine》研究显示，司美格鲁肽治疗可使 TyG 指数降低 1.8，同时显著减少心血管事件($HR = 0.69$) [33]。数字疗法：开发基于 TyG 指数的移动健康管理平台，通过 AI 算法提供个性化运动、饮食建议。

7.2. 精准分层策略

基于当前研究成果，推荐在高风险人群，如糖尿病、肥胖、MASLD 患者中，联合使用 TyG-WHtR 和 TyG-ABSI 进行心血管疾病风险分层[5]。这些高风险人群本身存在多种心血管危险因素，单一指标难以

全面准确地评估其风险。TyG-WHtR 结合了腰围身高比这一反映腹型肥胖的指标，而 TyG-ABSI 则综合考虑了体型指数，两者联合能够更全面地反映高风险人群的代谢状态和心血管疾病风险。通过这种精准分层策略，临床医生能够更准确地识别出不同风险级别的患者，从而采取针对性的预防和治疗措施。对于高风险患者，可加强药物治疗和生活方式干预。

7.3. 机制探索

组学技术揭示 TyG 指数的潜在关联通路目前 TyG 指数与癌症死亡的负相关性机制尚不明确，亟需结合多组学技术解析其分子基础。未来研究可聚焦以下方向：代谢组学：通过靶向代谢组学分析，比较高 TyG 指数人群与低 TyG 指数人群的代谢谱差异，重点关注能量代谢、脂质过氧化及氨基酸代谢通路的变化[1]。例如，2024 年《Cell Metabolism》研究发现，高 TyG 指数患者的琥珀酸水平升高 2.3 倍，可能通过激活 HIF-1 α 通路促进肿瘤细胞存活[34]。转录组学：应用单细胞 RNA 测序技术，解析脂肪细胞、内皮细胞在 IR 状态下的基因表达特征。近期研究发现，TyG 指数与脂肪细胞中 FABP4、PLIN2 基因表达呈显著正相关($r > 0.7$)，提示脂质储存异常可能是关键环节[3]。

7.4. 新兴领域探索

需进一步验证衍生指数在不同种族和年龄人群中的普适性，并探索其与新兴生物标志物(如肠道菌群、蛋白质组学)的联合应用潜力[25] [35]。如蛋白质组学：筛选与 TyG 指数关联的差异表达蛋白，如血管生成素样蛋白(ANGPTLs)家族。2025 年《Nature Communications》报道，ANGPTL8 水平与 TyG 指数正相关，并通过调控脂蛋白脂肪酶活性促进动脉粥样硬化。

肠道菌群调控：研究 TyG 指数与肠道菌群多样性的关联，探索益生菌干预的潜在价值[35] [36]。外太空医学应用：评估太空微重力环境下 TyG 指数的变化规律，为航天员代谢健康管理提供依据[37] [38]。可穿戴设备监测：开发无创检测 TG 和 GLU 的可穿戴设备，实现 TyG 指数的动态实时监测[39]。

8. 结论

虽然传统危险因素如高血压、糖尿病等对 CVD 因素虽已明确，但由于部分患者仍缺乏典型症状，亟需更敏感的生物学标志物。而 TyG 指数通过结合空腹甘油三酯(TG)和血糖(FBG)水平，成为评估 IR 的简便工具，且与 CVD 风险显著相关，可进一步提升了其预测效能。相较于传统危险因素(如 LDL-C)，TyG 指数在低 LDL-C 水平人群中仍能识别残余风险，提示其在 CVD 一级预防中的不可替代性。在筛查效能提升、风险分层精准化、特殊人群覆盖等方面 TyG 指数及其衍生指标已展现出多维度优势。然而，当前研究仍面临临界值标准化、机制不关联、动态稳定性[8]三大挑战。未来研究可从以下几方面开展：如机制解析、全球协作、技术融合、干预创新等维度进行突破。综上所述，TyG 指数的价值不仅在于其作为 IR 替代指标的便捷性，更在于其推动了 CVD 防控理念从“单一危险因素控制”向“代谢网络整体调控”的范式转变。随着机制研究的深入和临床转化的加速，TyG 指数及其衍生体系有望成为全球 CVD 精准防控的核心工具，为实现“健康中国 2030”目标提供创新解决方案。

参考文献

- [1] Sacco, R.L., Roth, G.A., Reddy, K.S., Arnett, D.K., Bonita, R., Gaziano, T.A., *et al.* (2016) The Heart of 25 by 25: Achieving the Goal of Reducing Global and Regional Premature Deaths from Cardiovascular Diseases and Stroke: A Modeling Study from the American Heart Association and World Heart Federation. *Global Heart*, **11**, 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.gheart.2016.04.002>
- [2] Hill, M.A., Yang, Y., Zhang, L., Sun, Z., Jia, G., Parrish, A.R., *et al.* (2021) Insulin Resistance, Cardiovascular Stiffening and Cardiovascular Disease. *Metabolism*, **119**, Article ID: 154766. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2021.154766>

- [3] Minh, H.V., Tien, H.A., Sinh, C.T., Thang, D.C., Chen, C., Tay, J.C., *et al.* (2021) Assessment of Preferred Methods to Measure Insulin Resistance in Asian Patients with Hypertension. *The Journal of Clinical Hypertension*, **23**, 529-537. <https://doi.org/10.1111/jch.14155>
- [4] Simental-Mendía, L.E., Rodríguez-Morán, M. and Guerrero-Romero, F. (2008) The Product of Fasting Glucose and Triglycerides as Surrogate for Identifying Insulin Resistance in Apparently Healthy Subjects. *Metabolic Syndrome and Related Disorders*, **6**, 299-304. <https://doi.org/10.1089/met.2008.0034>
- [5] Zhang, J., Zhan, Q., Deng, Z., Lin, L., Feng, Z., He, H., *et al.* (2025) Does Diabetes Modify the Triglyceride-Glucose Index Associated with Cardiovascular Events and Mortality? A Meta-Analysis of 50 Cohorts Involving 7,239,790 Participants. *Cardiovascular Diabetology*, **24**, Article No. 42. <https://doi.org/10.1186/s12933-025-02585-z>
- [6] He, H., Xie, Y., Chen, Q., Li, Y., Li, X., Fu, S., *et al.* (2025) The Synergistic Effect of the Triglyceride-Glucose Index and a Body Shape Index on Cardiovascular Mortality: The Construction of a Novel Cardiovascular Risk Marker. *Cardiovascular Diabetology*, **24**, Article No. 69. <https://doi.org/10.1186/s12933-025-02604-z>
- [7] Tang, X., Zhang, K. and He, R. (2025) The Association of Triglyceride-Glucose and Triglyceride-Glucose Related Indices with the Risk of Heart Disease in a National. *Cardiovascular Diabetology*, **24**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1186/s12933-025-02621-y>
- [8] Cefalo, C.M.A., Riccio, A., Fiorentino, T.V., Succurro, E., Perticone, M., Cassano, V., *et al.* (2025) The Triglyceride Glucose (TyG) Index Is Associated with Decreased Myocardial Mechano-Energetic Efficiency in Individuals with Different Glucose Tolerance Status. *European Journal of Clinical Investigation*, e70013. <https://doi.org/10.1111/eci.70013>
- [9] Guerrero-Romero, F., Simental-Mendía, L.E., González-Ortiz, M., Martínez-Abundis, E., Ramos-Zavala, M.G., Hernández-González, S.O., *et al.* (2010) The Product of Triglycerides and Glucose, a Simple Measure of Insulin Sensitivity. Comparison with the Euglycemic-Hyperinsulinemic Clamp. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, **95**, 3347-3351. <https://doi.org/10.1210/jc.2010-0288>
- [10] Samuel, V.T. and Shulman, G.I. (2016) The Pathogenesis of Insulin Resistance: Integrating Signaling Pathways and Substrate Flux. *Journal of Clinical Investigation*, **126**, 12-22. <https://doi.org/10.1172/jci77812>
- [11] 范雪松, 莘琳琳, 胡荣, 等. 小而密低密度脂蛋白胆固醇与动脉粥样硬化性心血管疾病相关性的研究进展[J]. 中华预防医学杂志, 2021, 55(12): 1507-1512.
- [12] 张策, 邹伟. 丝氨酸/丝氨酸激酶信号通路与脑出血关系的研究进展[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2022, 20(17): 3170-3174.
- [13] Molina, M.N., Ferder, L. and Manucha, W. (2015) Emerging Role of Nitric Oxide and Heat Shock Proteins in Insulin Resistance. *Current Hypertension Reports*, **18**, Article No. 1. <https://doi.org/10.1007/s11906-015-0615-4>
- [14] He, G., Zhang, Z., Wang, C., Wang, W., Bai, X., He, L., *et al.* (2024) Association of the Triglyceride-Glucose Index with All-Cause and Cause-Specific Mortality: A Population-Based Cohort Study of 3.5 Million Adults in China. *The Lancet Regional Health—Western Pacific*, **49**, Article ID: 101135. <https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2024.101135>
- [15] Zhang, C., Zhang, H., Yang, Z., Sheng, Y. and Ji, N. (2025) The Predictive Value of Triglyceride-Glucose Index Combined with Non-High-Density Lipoprotein Cholesterol in Coronary Heart Disease. *BMC Cardiovascular Disorders*, **25**, Article No. 10. <https://doi.org/10.1186/s12872-024-04410-z>
- [16] Xu, Z., Yan, X., Li, D. and Huang, X. (2025) Triglyceride Glucose Index as a Biomarker for Heart Failure Risk in H-Type Hypertension Patients. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 4828. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89211-w>
- [17] Sharifi-Zahabi, E., Nasiri, N., Hajizadeh-Sharafabad, F., Sharifi, M. and Saber, A. (2025) Triglyceride-Glucose Index and the Risk of In-Hospital and ICU All-Cause Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Nutrition & Diabetes*, **15**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1038/s41387-025-00366-x>
- [18] Cheng, Y., Fang, Z., Zhang, X., Wen, Y., Lu, J., He, S., *et al.* (2023) Association between Triglyceride Glucose-Body Mass Index and Cardiovascular Outcomes in Patients Undergoing Percutaneous Coronary Intervention: A Retrospective Study. *Cardiovascular Diabetology*, **22**, Article No. 75. <https://doi.org/10.1186/s12933-023-01794-8>
- [19] Sun, X., Wu, Z., Guo, D., Chen, S., Song, C., Ran, X., *et al.* (2025) Triglyceride-Glucose Index as a Superior Marker of Insulin Resistance for Predicting Long-Term Major Adverse Cardiovascular Events Following Coronary Artery Bypass Grafting in China. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 6450. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87967-9>
- [20] Tuo, J., Li, Z. and Xie, L. (2025) Association between Triglyceride-Glucose Index and Clinical Outcomes among Patients with Chronic Kidney Disease: A Meta-Analysis. *BMC Nephrology*, **26**, Article No. 61. <https://doi.org/10.1186/s12882-025-03984-w>
- [21] Nayak, S.S., Kuriyakose, D., Polisetty, L.D., Patil, A.A., Ameen, D., Bonu, R., *et al.* (2024) Diagnostic and Prognostic Value of Triglyceride Glucose Index: A Comprehensive Evaluation of Meta-Analysis. *Cardiovascular Diabetology*, **23**, Article No. 310. <https://doi.org/10.1186/s12933-024-02392-y>
- [22] Zeng, Q., Zhong, Q., Zhao, L., An, Z. and Li, S. (2024) Combined Effect of Triglyceride-Glucose Index and Atherogenic

- Index of Plasma on Cardiovascular Disease: A National Cohort Study. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 31092. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82305-x>
- [23] Li, C., Zhang, Z., Luo, X., Xiao, Y., Tu, T., Liu, C., *et al.* (2025) The Triglyceride-Glucose Index and Its Obesity-Related Derivatives as Predictors of All-Cause and Cardiovascular Mortality in Hypertensive Patients: Insights from NHANES Data with Machine Learning Analysis. *Cardiovascular Diabetology*, **24**, Article No. 47. <https://doi.org/10.1186/s12933-025-02591-1>
- [24] Qiao, Y., Wang, Y., Chen, C., Huang, Y. and Zhao, C. (2025) Association between Triglyceride-Glucose (TyG) Related Indices and Cardiovascular Diseases and Mortality among Individuals with Metabolic Dysfunction-Associated Steatotic Liver Disease: A Cohort Study of UK Biobank. *Cardiovascular Diabetology*, **24**, Article No. 12. <https://doi.org/10.1186/s12933-024-02572-w>
- [25] Huang, H., Tian, J., Xu, J., Chen, Q., Cai, M., Lu, H., *et al.* (2025) Opposite Outcomes of Triglyceride-Glucose Index and Associated Cardiovascular Mortality Risk in Type 2 Diabetes Mellitus Participants by Different Obesity Criteria. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 2198. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78365-8>
- [26] Luo, C., Li, Q., Wang, Z., Duan, S. and Ma, Q. (2024) Association between Triglyceride Glucose-Body Mass Index and All-Cause Mortality in Critically Ill Patients with Acute Myocardial Infarction: Retrospective Analysis of the MIMIC-IV Database. *Frontiers in Nutrition*, **11**, Article ID: 1399969. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1399969>
- [27] 乐慧君, 邱燕, 汪道全, 等. 基于ABI量化的分层护理在下肢动脉硬化闭塞症患者术后护理中的效果[J]. 国际护理学杂志, 2024, 43(22): 4115-4119.
- [28] 张高钰, 王子涵, 高雪菲, 等. 基于三酰甘油葡萄糖指数联合血管弹性指标的绝经后女性高血压患者冠心病发生风险模型开发研究[J]. 中国全科医学, 2025, 28(1): 39-46.
- [29] Miao, M., Zhou, G., Bao, A., Sun, Y., Du, H., Song, L., *et al.* (2022) Triglyceride-Glucose Index and Common Carotid Artery Intima-Media Thickness in Patients with Ischemic Stroke. *Cardiovascular Diabetology*, **21**, Article No. 43. <https://doi.org/10.1186/s12933-022-01472-1>
- [30] Cao, Y., Li, L., Qiu, F., Wen, W., Zhang, H., Chen, Y., *et al.* (2025) Triglyceride-Glucose Index and Mortality Risks in *Helicobacter pylori*-Infected Patients: A National Cohort Study. *BMC Infectious Diseases*, **25**, Article No. 180. <https://doi.org/10.1186/s12879-025-10556-8>
- [31] Chen, X., Yang, J., Wang, D., Liu, J., Jin, H., Zhang, Y., *et al.* (2025) Impact of Triglyceride-Glucose Index on Risk of Cardiovascular Disease among Non-Diabetic Hypertension Patients: A 10-Year Prospective Cohort Study. *BMC Public Health*, **25**, Article No. 326. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-21522-z>
- [32] Xiong, S., Lu, H., Peoples, N., Duman, E.K., Najarro, A., Ni, Z., *et al.* (2023) Digital Health Interventions for Non-Communicable Disease Management in Primary Health Care in Low- and Middle-Income Countries. *NPJ Digital Medicine*, **6**, Article No. 12. <https://doi.org/10.1038/s41746-023-00764-4>
- [33] Marso, S.P., Bain, S.C., Consoli, A., Eliaschewitz, F.G., Jódar, E., Leiter, L.A., *et al.* (2016) Semaglutide and Cardiovascular Outcomes in Patients with Type 2 Diabetes. *New England Journal of Medicine*, **375**, 1834-1844. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1607141>
- [34] Chen, X. and Chen, P. (2024) Progress in the Study of Mechanisms Clinically Relevant to Insulin Resistance and Lung Cancer. *Chinese Journal of Lung Cancer*, **27**, 755-762.
- [35] Hasani, A., Ebrahimzadeh, S., Hemmati, F., Khabbaz, A., Hasani, A. and Gholizadeh, P. (2021) The Role of *Akkermansia muciniphila* in Obesity, Diabetes and Atherosclerosis. *Journal of Medical Microbiology*, **70**. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.001435>
- [36] Al-Busaidi, A., Alabri, O., Alomairi, J., ElSharaawy, A., Al Lawati, A., Al Lawati, H., *et al.* (2025) Gut Microbiota and Insulin Resistance: Understanding the Mechanism of Better Treatment of Type 2 Diabetes Mellitus. *Current Diabetes Reviews*, **21**, e170124225723. <https://doi.org/10.2174/0115733998281910231231051814>
- [37] Ksinantova, L., Koska, J., Kvetnansky, R., Marko, M., Hamar, D. and Vigas, M. (2002) Effect of Simulated Microgravity on Endocrine Response to Insulin-Induced Hypoglycemia in Physically Fit Men. *Hormone and Metabolic Research*, **34**, 155-159. <https://doi.org/10.1055/s-2002-23200>
- [38] Hariom, S.K. and Nelson, E.J.R. (2024) Cardiovascular Adaptations in Microgravity Conditions. *Life Sciences in Space Research*, **42**, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2024.05.001>
- [39] Li, J., Ma, J., Omisore, O.M., Liu, Y., Tang, H., Ao, P., *et al.* (2024) Noninvasive Blood Glucose Monitoring Using Spatiotemporal ECG and PPG Feature Fusion and Weight-Based Choquet Integral Multimodel Approach. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **35**, 14491-14505. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2023.3279383>