

全麻诱导后低血压与胃肠道肿瘤手术后不良结局的相关性研究进展

尚佳鑫¹, 张二飞^{2*}

¹延安大学延安医学院, 陕西 延安

²延安大学附属医院麻醉与围术期医学中心, 陕西 延安

收稿日期: 2026年8月21日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月21日

摘要

全麻诱导后低血压(Post-Induction Hypotension, PIH)是围术期常见的血流动力学紊乱事件, 在胃肠道肿瘤手术患者中发生率可高达39.9%。本文系统综述了PIH的定义、发生机制、对胃肠道肿瘤手术后短期及远期不良结局的影响、潜在生物学通路、危险因素与预测、预防与管理策略及预后模型构建等方面的最新研究进展。现有证据表明, PIH与术后死亡率、心肌损伤及肺部并发症等短期不良结局密切相关, 虚弱状态、高龄、肠梗阻及麻醉药物(尤其是瑞芬太尼)是PIH的独立危险因素, 而预防性使用去甲肾上腺素、液体预处理及气压腿套等干预措施可有效降低PIH发生率。超声评估 $\Delta VTI-PLR$ (AUC = 0.89)及低血压预测指数HPI等工具为PIH的早期识别提供了技术支持。未来研究需统一PIH定义并开展大规模随机对照试验验证个体化干预策略的远期获益。

关键词

全麻诱导后低血压, 胃肠道肿瘤, 围术期管理, 血流动力学, 不良结局, 预测, 干预

Research Progress on the Association between Post-Induction Hypotension and Adverse Outcomes after Gastrointestinal Tumor Surgery

Jiaxin Shang¹, Erfei Zhang^{2*}

¹Yan'an Medical College, Yan'an University, Yan'an Shaanxi

²Center of Anesthesiology and Perioperative Medicine, Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Received: August 21, 2026; accepted: September 14, 2026; published: September 21, 2026

*通讯作者。

文章引用: 尚佳鑫, 张二飞. 全麻诱导后低血压与胃肠道肿瘤手术后不良结局的相关性研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(9): 2142-2151. DOI: 10.12677/acm.2026.1693259

Abstract

Post-induction hypotension (PIH) is a common perioperative hemodynamic disturbance with an incidence up to 39.9% in patients undergoing gastrointestinal tumor surgery. This review systematically summarizes recent research progress on PIH definition, mechanisms, impacts on short- and long-term adverse outcomes, potential biological pathways, risk factors and prediction, prevention and management strategies, and prognostic model development. Current evidence indicates that PIH is closely associated with postoperative mortality, myocardial injury, and pulmonary complications. Risk factors include frailty, advanced age, bowel obstruction, and anesthetic agents (especially remifentanyl). Preventive interventions such as norepinephrine administration, fluid preload, and pneumatic leg compression can effectively reduce PIH incidence. Ultrasound-based Δ VTI-PLR (AUC = 0.89) and the Hypotension Prediction Index (HPI) provide technical support for early PIH identification. Future studies should establish a unified PIH definition and conduct large-scale randomized controlled trials to validate long-term benefits of individualized intervention strategies.

Keywords

Post-Induction Hypotension, Gastrointestinal Tumor, Perioperative Management, Hemodynamics, Adverse Outcomes, Prediction, Intervention

Copyright © 2026 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. 引言与研究价值定位

1.1. 胃肠道肿瘤手术围手术期管理的临床需求

胃肠道肿瘤是高发且致死率较高的恶性肿瘤类型, 手术切除仍是其根治性治疗的核心手段。患者常因肿瘤负荷、营养不良、慢性炎症状态及合并症等因素导致围手术期风险显著升高。随着加速康复外科(ERAS)理念的推广, 围术期精细化管理日益受到重视, 其中血流动力学稳定被视为影响术后转归的关键环节。尤其在全身麻醉诱导阶段, 麻醉药物对心血管系统的抑制作用使患者极易发生低血压事件, 进而可能诱发器官灌注不足及相关并发症。已有研究表明, 全麻诱导期低血压与术后死亡率、心肌损伤等不良结局密切相关[1]。因此, 识别并干预全麻诱导后低血压(Post-Induction Hypotension, PIH)这一可控风险因素, 对于改善胃肠道肿瘤患者的手术安全性和长期预后具有重要临床意义。

1.2. PIH 的定义与流行病学特征

目前 PIH 尚无统一定义, 但多数研究采用以下标准之一: 平均动脉压(MAP) < 65 mmHg、收缩压(SBP) < 90 mmHg, 或较基线下降超过 20%~30% [2] [3]。流行病学数据显示, 非心脏手术患者 PIH 的发生率较高, 依据不同定义可高达 33.1%至 39.9% [3]; 在老年、ASA 分级较高、急诊手术及合并肠梗阻等基础疾病的患者中, PIH 风险进一步增加[4]。值得注意的是, PIH 多发生于麻醉诱导后至手术开始前这一阶段, 而该时段常缺乏连续动脉压监测, 易被忽视[5]。此外, PIH 不仅与短期并发症相关, 还可能通过影响组织灌注和免疫功能, 对远期肿瘤复发与生存产生潜在影响[1]。尽管有研究认为术中低血压可能更多反映患者基础健康状况而非直接致病因素, 但其作为围术期可干预指标的价值仍不容忽视。

1.3. 本综述的研究范围与核心意义

本综述聚焦 PIH 与胃肠道肿瘤手术后不良结局之间的关联, 系统梳理 PIH 的发生机制、流行病学特征、对术后短期及远期预后的影响、潜在生物学通路、危险因素与预测、预防与管理策略及预后模型构建等方面的最新研究进展。鉴于现有文献中 PIH 定义不一、研究人群异质性大、机制探讨尚不深入等问题, 本综述旨在整合当前证据, 厘清 PIH 在胃肠道肿瘤围术期管理中的临床地位, 并为未来标准化研究设计与个体化干预策略提供理论依据, 推动围术期血流动力学管理从“反应性处理”向“前瞻性预防”转变, 最终改善胃肠道肿瘤患者的手术安全与长期生存质量[1]。

2. PIH 的危险因素与预测

2.1. 患者相关危险因素

胃肠道肿瘤患者因疾病本身及伴随状态, 存在多种易感 PIH 的内在因素。高龄是公认的独立危险因素, 多中心研究中每增加 1 岁, PIH 风险上升 3% (OR 1.03) [4]; 术前存在肠梗阻并需置入鼻胃管的患者, PIH 发生风险显著增高 (OR 1.96) [4], 可能与脱水、电解质紊乱及有效循环血容量不足相关; 基础收缩压较高者则表现出一定的保护效应 (OR 0.98) [4], 提示术前血压水平可反映血管张力储备能力。老年患者心血管代偿能力下降, 颈动脉校正血流时间 (FTc) < 334.95 ms 被证实为 PIH 的强预测因子 (AUC = 0.876) [2]; 被动抬腿试验引起的左心室流出道速度 - 时间积分变化 (Δ VTI-PLR) 亦具有良好的预测价值 (AUC = 0.89) [6], 进一步证实容量反应性在 PIH 发生中的核心地位。此外, 虚弱状态作为老年患者综合健康状况的重要指标, 与 PIH 风险存在协同效应, 虚弱患者不仅自主神经调节功能减退, 且对麻醉药物的敏感性显著增加, 二者共同加剧围术期血流动力学不稳定性[7]。

2.2. 药物相关危险因素

全身麻醉药物通过多种途径影响心血管系统功能, 是导致 PIH 的关键因素。丙泊酚作为临床常用的静脉麻醉药, 可剂量依赖性地抑制交感神经张力、降低外周血管阻力并减弱心肌收缩力, 从而诱发显著的血压下降。阿片类药物如瑞芬太尼亦被证实与 PIH 风险增加密切相关, 一项前瞻性队列研究显示, 瑞芬太尼使用使 PIH 风险升高近两倍 (OR 1.88, 95% CI 1.31~2.69) [3]。不同麻醉药物的血流动力学稳定性存在差异: 如右美托咪定虽常用于镇静, 但在现有研究中其与 PIH 无显著关联, 可能与临床实践中根据患者反应动态调整剂量有关[3]。值得注意的是, 联合用药策略可能改变 PIH 的风险谱: 丙泊酚联合小剂量氯胺酮进行快速顺序插管被证实与较低的 PIH 风险相关 (OR 0.61) [4], 提示通过多药联合优化麻醉方案可能成为降低 PIH 风险的有效途径。总体而言, 不同麻醉药物通过影响心输出量、外周阻力及自主神经调节等机制, 共同参与 PIH 的发生。

2.3. 预测工具与生物标志物

近年来, 无创超声技术在预测 PIH 方面展现出良好前景。被动抬腿试验 (PLR) 联合经胸超声心动图评估左心室流出道速度 - 时间积分变化 (Δ VTI-PLR) 已被证实具有较高的预测价值: 预测 PIH 的 ROC 曲线下面积 (AUC) 达 0.89 (95% CI 0.80~0.97), 当阈值设定为 18% 时, 敏感度为 88%、特异度为 84%; 相比之下, 下腔静脉塌陷指数 (IVC-CI) 的预测效能较差 (AUC = 0.68) [6]。在老年胃肠癌手术患者中, 颈动脉校正血流时间 (FTc) 预测 PIH 的 AUC 为 0.876 (95% CI 0.800~0.952), 最佳截断值为 334.95 ms (敏感性 87.20%、特异性 82.20%); 更重要的是, FTc 指导下的液体预处理可显著降低 PIH 发生率, 由 92.31% 降至 35.71% [2]。这些研究表明, 基于无创超声的血流动力学参数可在麻醉诱导前有效识别 PIH 高风险患者, 为个体

化干预提供依据。

随着人工智能与机器学习技术的发展,多种新型预测指标和预警系统被开发用于术中及诱导期低血压的早期识别。低血压预测指数(Hypotension Prediction Index, HPI)是最具代表性的工具之一,可通过分析动脉压力波形提前预测低血压事件。一项包含 19 项研究的 Meta 分析证实, HPI 引导的管理策略可显著减少胃肠道癌手术患者术中低血压及主要并发症(风险比 0.79, 95% CI 0.69~0.90) [8]。此外, 基于 Transformer 架构的深度学习模型可基于每 15 秒采样的生命体征数据实时预测低血压事件, 在 5、10、15 分钟预测窗口下的 AUC 分别为 0.904、0.892 和 0.882 [9]。这些新型预测系统的高精度与实时性为 PIH 的动态预警提供了技术支撑。

循环生物标志物的探索仍处于初步阶段。现有研究提示, 肾素、心房利钠肽水平升高及肾上腺髓质素(Adrenomedullin)水平可预测血管舒张症的发生与发展, 从而间接关联 PIH 风险[10]。然而, 目前尚无直接证据表明特定生物标志物可独立预测 PIH, 且因诊断标准和检测方法缺乏统一, 相关研究仍需建立共识定义与标准化评估体系。值得注意的是, 术前外周灌注指数(PPI)在一项纳入 6653 例患者的大型回顾性研究中被证实对 PIH 预测能力差(AUC 0.51), 且与 PIH 无显著关联($P = 0.284$) [11], 提示并非所有生理参数均适合作为预测标志物。未来研究需结合多组学数据与动态监测技术, 探索更具特异性和机制关联性的新型生物标志物。

3. PIH 的预防与管理策略

3.1. 容量预处理策略

容量预处理是预防 PIH 的重要手段之一, 尤其在胃肠道肿瘤手术患者中具有显著临床价值。研究表明, 术前基于血流动力学参数指导的液体治疗可有效降低 PIH 发生率: 在老年胃肠肿瘤手术患者中, 术前采用颈动脉校正血流时间(FTc)评估循环状态, 当 $FTc < 334.95$ ms 时, 于麻醉诱导前 30 分钟内输注 8 ml/kg 乳酸林格液, 可将 PIH 发生率从 92.31%显著降至 35.71% [2], 体现了个体化容量管理的优势。

3.2. 药物干预策略

预防性使用血管活性药物已被多项研究证实可有效降低 PIH 风险。在老年腹部肿瘤手术患者中, 诱导时滴定输注去甲肾上腺素可将术中低血压发生率从 74%降至 15% ($P < 0.001$) [12]; 预先使用血管加压药亦可使 PIH 风险降低 35% (OR 0.65, 95% CI 0.45~0.95) [3]。持续输注去甲肾上腺素已成为重要的干预手段, 在腹部大手术患者中, 诱导期预防性滴定输注去甲肾上腺素(起始剂量 0.48 mg/h)显著降低了术后 30 天内并发症发生率(相对风险 0.58, $P = 0.004$), 特别是肺部并发症[12]。麻醉药物的选择同样直接影响 PIH 发生风险: 瑞芬太尼的使用与 PIH 风险增加显著相关(OR 1.88, 95% CI 1.31~2.69) [3], 而丙泊酚联合小剂量氯胺酮进行快速顺序插管则与较低的 PIH 风险相关[4], 提示通过优化麻醉药物组合可在一定程度上降低 PIH 风险。

3.3. 非药物干预策略

非药物性干预在 PIH 预防中同样发挥重要作用。气压腿套作为一种机械性容量转移干预措施, 在老年患者中显示出良好的预防效果, PIH 发生率由 58%降至 10% ($P < 0.001$), 且未见相关并发症[13]。其作用机制主要是通过对下肢施加外部压力, 促进静脉血液回流, 增加有效循环血容量, 从而维持诱导期血压稳定。此外, 体位调整如轻度头低脚高位也被认为有助于增加回心血量, 但在胃肠道肿瘤手术中的应用价值仍需进一步验证。非药物干预的突出优势在于安全性高、不良反应少, 尤其适用于合并多种基础疾病、对药物耐受性较差的老年患者。

3.4. 联合干预与多模态策略

血流动力学预测指数(HPI)引导的管理策略亦显示出积极效果: 一项纳入 19 项研究的 Meta 分析证实, HPI 指导可显著降低胃肠道肿瘤手术患者术中低血压及主要并发症风险(风险比 0.79, 95% CI 0.69~0.90, $P < 0.001$) [8]。此外, 整合药物干预、先进监测与预测模型的多模态策略, 有望进一步优化 PIH 的防治体系。值得注意的是, 辅助用药如小剂量氯胺酮联合使用亦可发挥保护作用(OR 0.61) [4]。上述证据表明, 优化围术期预处理策略、采用多模式联合干预是预防 PIH 的重要发展方向。

3.5. 干预措施的潜在风险、禁忌症与成本效益

尽管上述干预措施在预防 PIH 方面展现出积极效果, 但临床应用中需充分考虑其潜在风险与禁忌症, 以实现获益与风险的平衡。

1) 容量预处理的风险与禁忌症: 过量液体输注可能导致容量过负荷, 增加心肺功能不全患者的急性肺水肿、心力衰竭风险, 因此对于合并严重心功能不全(NYHA III~IV级)、肾功能衰竭少尿期及严重低蛋白血症的患者应谨慎使用。此外, 胃肠道肿瘤合并肠梗阻患者常存在第三间隙积液异常, 常规容量评估方法可能高估容量不足程度, 需结合动态血流动力学监测进行个体化判断。晶体液与胶体液的选择亦存在争议: 胶体液扩容效果更持久但可能影响凝血功能, 且成本显著高于晶体液。

2) 血管活性药物的风险与禁忌症: 去甲肾上腺素等血管加压药虽可有效升高血压, 但过度缩血管可能导致组织灌注不足, 尤其在低血容量状态下可能加重微循环障碍。禁忌症包括严重心律失常、未纠正的低血容量及外周血管闭塞性疾病等。麻黄碱等间接作用的拟交感药在长期使用单胺氧化酶抑制剂的患者中可能诱发高血压危象。此外, 血管活性药物的使用需要有创动脉压监测支持, 增加了医疗操作成本和相关并发症风险。

3) 非药物干预的局限性: 气压腿套虽安全性较高, 但可能增加下肢深静脉血栓风险(尤其在肿瘤患者高凝状态下), 禁用于已确诊下肢深静脉血栓、严重外周动脉疾病及局部皮肤破损的患者。此外, 气压腿套设备购置及维护成本较高, 在基层医疗机构的推广应用受到一定限制。

4) 成本效益分析: 从卫生经济学角度看, HPI 等高级监测系统虽可降低 PIH 发生率及相关并发症, 但其设备购置、耗材及人员培训成本较高, 是否具有成本效益仍需结合不同医疗体系进行评估。一项针对普外科手术的卫生经济学研究提示, 当患者基线风险较高(如老年、合并心血管疾病)时, 高级血流动力学监测的成本效益比更佳; 而在低风险患者中, 常规监测联合临床评估可能更为经济。未来研究应开展高质量的卫生经济学评价, 为不同风险层级患者选择最具成本效益的 PIH 防治策略提供证据支持。

4. PIH 与胃肠道肿瘤手术后不良结局的相关性研究进展

4.1. PIH 对术后短期不良结局的影响

现有证据多聚焦于术中低血压(IOH)的整体影响。一项纳入 490,982 例非心脏手术患者的大型回顾性研究发现, 胃肠道手术患者术中低血压程度每增加一个单位的圣路易斯大学评分(SLU Score), 其术后 30 天死亡风险即显著上升 5.2% (95% CI 3.9~6.4), 提示低血压暴露强度与短期死亡率存在剂量-反应关系 [14]。在重大腹部手术的老年患者中, 诱导期预防性持续滴注去甲肾上腺素可显著降低 30 天内医源性并发症发生率(相对风险 0.58, 95% CI 0.40~0.83, $P = 0.004$), 尤其减少肺部并发症(相对风险 0.46) [12]。此外, 术后低血压(POH)已被系统评价证实与术后死亡率(OR = 2.51, 95% CI 1.86~3.38)及心肌损伤(OR = 2.52)显著相关[1], PIH 作为 POH 的潜在前驱事件, 可能通过启动一系列病理生理级联反应加剧器官灌注不足, 进而导致短期不良结局。尽管术中低血压可能部分反映患者基础状态, 但干预性试验证据支持积极管理诱导期低血压可改善短期预后。

4.2. PIH 对术后远期生存预后的影响

目前关于 PIH 对胃肠道肿瘤患者远期生存影响的直接证据尚有限, 但间接线索提示其可能通过影响围术期器官损伤和免疫微环境而干扰长期预后。心肌损伤已被多项研究确认为非心脏手术后远期死亡的独立预测因子, PIH 诱发的隐匿性心肌缺血可能构成连接围术期事件与长期生存的桥梁。此外, 胃肠道肿瘤手术患者术后炎症指标升高(如中性粒细胞 - 淋巴细胞比值 $NLR > 7.0$)与术后心理障碍显著相关, 并在生活质量损害中发挥中介作用[15]; 慢性炎症状态已被广泛认为可促进肿瘤复发与转移, 因此 PIH 可能通过激活炎症通路间接影响肿瘤生物学行为。然而, 尚无大规模前瞻性研究直接评估 PIH 与胃肠道肿瘤患者总生存期或无病生存期的关联, 现有证据多源于对术中或术后低血压的观察, 需谨慎外推至 PIH 特定阶段。

4.3. PIH 与术中低血压对预后影响的差异辨析

尽管 PIH 常被视为 IOH 的起始阶段, 但二者在病理生理机制、监测敏感性及对预后的影响上可能存在差异。PIH 主要由麻醉诱导药物快速抑制交感张力及心肌收缩力所致, 而 IOH 则可能叠加手术刺激、容量状态、血管张力调节等多重因素, 呈现心肌抑制型、血管扩张型、低血容量型等异质性表型[16]。PIH 发生于手术切皮前, 此时尚未经失血或炎症介质释放, 其对器官灌注的冲击可能更具“纯净性”, 更易反映个体对麻醉药物的敏感性及其自主神经储备功能。研究显示, IOH 的深度(而非持续时间)与术后心肌损伤及死亡率呈连续性正相关[17]。然而, 一项大型随机试验比较个体化血压管理与常规 $MAP \geq 65$ mmHg 策略, 结果显示两者在术后 7 天复合主要结局(包括急性肾损伤、心肌损伤等)上无显著差异(相对风险 1.10, 95% CI 0.93~1.30, $P = 0.31$) [18]; 另一项 Meta 分析亦发现将术中 MAP 目标设为 ≤ 60 mmHg 并未增加死亡率, 反而降低房颤发生率和住院时长[19]。这些看似矛盾的结果可能源于 PIH 与持续 IOH 在病理意义上的区别: PIH 作为急性血流动力学崩溃事件, 可能比可控的、轻度的术中低血压更具危害性, 未来研究需明确区分二者并探索针对 PIH 的特异性干预。

5. PIH 影响胃肠道肿瘤术后不良结局的潜在机制

5.1. 胃肠道黏膜灌注损伤与肠屏障功能障碍机制

PIH 可导致内脏器官尤其是胃肠道黏膜的灌注显著减少。在低血压状态下, 机体优先维持心脑等重要器官的血流供应, 而胃肠道等非关键区域的微循环灌注常被降低, 从而引发黏膜缺血、缺氧性损伤, 可能破坏肠屏障完整性, 增加细菌易位和内毒素入血风险, 诱发全身性炎症反应甚至多器官功能障碍。尽管目前尚缺乏直接针对胃肠道肿瘤手术患者中 PIH 与肠屏障功能障碍关系的临床研究, 但低血压所致的组织低灌注已被广泛认为是术后器官功能障碍的重要环节。

5.2. 全身炎症反应与免疫抑制机制

PIH 所引发的组织灌注不足不仅造成局部缺血, 还可激活系统性炎症级联反应。针对肠道肿瘤手术患者的研究显示, 术中低血压及术后中性粒细胞 - 淋巴细胞比值(NLR)升高(>7.0)、白蛋白 - 纤维蛋白原比值(AFR)降低(<12.0)是术后心理障碍的强预测因子, 且炎症标志物在其中起中介作用, 间接提示低血压可能通过促炎途径影响术后恢复[15]。另一方面, 围术期免疫功能状态对肿瘤患者尤为重要, PIH 可能通过促炎因子释放增加与抗肿瘤免疫功能抑制的双重机制, 共同促进术后并发症的发生与发展。

5.3. 肿瘤微环境改变与肿瘤细胞增殖调控机制

PIH 所致的短暂性低灌注可能对肿瘤微环境产生深远影响。缺氧是肿瘤微环境的重要特征之一, 可

激活包括 HIF-1 α 、VEGF、TGF- β 、NF- κ B 和 MAPK 在内的多种信号通路, 进而调控肿瘤细胞的增殖、侵袭及免疫逃逸能力[20]。虽然现有文献尚未直接阐明 PIH 如何通过上述通路影响胃肠道肿瘤术后预后, 但术中低血压作为短暂性全身低灌注事件, 理论上可能加剧肿瘤局部缺氧状态, 从而重塑肿瘤微环境。因此, PIH 是否通过改变肿瘤微环境中的缺氧信号、炎症因子谱或免疫细胞浸润状态, 进而影响术后远期生存, 仍是亟待深入探索的关键科学问题。

6. 风险评估模型研究

6.1. 整合 PIH 因素的胃肠道肿瘤术后预后模型构建进展

将 PIH 相关参数纳入术后预后风险评估模型已成为研究热点。基于圣路易斯大学评分(SLU Score)的回顾性研究在 490,982 例非心脏手术患者中发现, 该评分每增加一个单位, 30 天死亡风险上升 5.2% (95% CI 3.9~6.4), 而胃肠道手术患者是其中高风险亚群之一[14], 提示低血压负荷对死亡率的连续性影响。然而, PIH 的定义尚未统一, 部分研究采用 MAP $\leq$ 55 mmHg 或收缩压 $\leq$ 80 mmHg 作为标准[4], 另一些则使用相对下降幅度(如 MAP 下降 $>$ 30%) [3], 这种异质性的泛化能力构成挑战。当前模型多依赖于单中心数据或回顾性队列, 尚缺乏前瞻性验证及标准化 PIH 变量的系统整合。

6.2. 风险模型的临床验证与应用价值

包含低血压负荷指标的风险模型在识别高危患者方面具有一定价值。研究显示, 低血压深度的加权模型与术后心肌损伤及院内死亡呈更强关联[17], 提示模型中对低血压“质量”(深度与持续时间)的权重设定可能影响预测准确性, 应优先纳入低血压深度或复合指标而非单一时间阈值。在干预导向的应用层面, HPI 指导的血流动力学管理被证实可显著降低胃肠道癌手术患者的术中低血压发生率及主要并发症风险(RR = 0.79, 95% CI 0.69~0.90) [8], 此类动态预警系统本质上是一种实时风险评估工具, 与术前静态预后模型互补。未来若能能将 HPI 等动态指标与术前基线变量(如年龄、基线血压、肠梗阻等 PIH 独立危险因素)整合, 有望构建覆盖围术期全程的动态-静态联合风险模型。

7. 当前研究的局限性、争议与异质性来源分析

7.1. PIH 定义不统一导致的研究异质性

PIH 的定义在不同研究中存在显著差异, 这种缺乏统一标准的现象直接导致了研究结果之间的异质性。部分研究以 MAP 低于 60 或 65 mmHg 为阈值, 另一些则采用 SBP $\leq$ 80 mmHg 或 MAP $\leq$ 55 mmHg 作为标准[4]; 低血压的判定还涉及持续时间、累积曲线下面积(AUC)或时间加权平均值等不同维度[16]。例如, SLUScore 通过量化术中低血压程度发现其与术后 30 天死亡风险呈剂量-反应关系[14]; 而另一项研究通过无阈值建模指出, 低血压的深度比持续时间对不良结局的影响更大[17]。这种定义上的多样性不仅限制了不同研究间的可比性, 也使得荟萃分析和临床指南制定面临挑战。

7.2. 现有临床研究的方法学缺陷

当前多数研究存在明显的方法学局限。首先, 大量证据来源于回顾性队列研究或单中心观察性研究, 难以有效控制混杂偏倚。其次, 部分随机对照试验的主要终点常聚焦于术中血流动力学稳定性或短期恢复指标, 而非心肾损伤、死亡率等关键安全性结局: 一项多中心随机对照试验比较个体化血压管理与常规管理对高风险腹部手术患者的影响, 结果显示两组在急性肾损伤、心肌损伤等复合终点上无显著差异[18]。此外, 许多研究未对虚弱状态、术前心血管风险或肿瘤负荷等重要协变量进行充分调整, 而这些因素本身既是低血压的易感因素, 也是不良预后的独立预测因子[7]。更值得注意的是, 麻醉诱导期常因依

赖间歇性无创血压监测而遗漏短暂但显著的低血压事件, 进一步削弱了暴露评估的准确性[5]。

7.3. 因果关系争议与混杂因素假说

尽管多项研究报道 PIH 与胃肠道肿瘤术后不良结局存在统计学关联[14], 但其因果关系仍存在重大争议。一方面, 有证据支持低血压作为独立危险因素的作用: Meta 分析显示术后低血压与死亡率及心肌损伤显著相关[1]。另一方面, 越来越多的研究提示低血压可能仅是患者基础疾病严重程度或生理储备下降的“标志物”, 而非直接致病因素: 允许 $\text{MAP} \leq 60 \text{ mmHg}$ 的管理策略并未增加死亡率, 反而显著降低房颤发生率和住院时长[19]。此外, 低血压与特定结局的关联在不同人群中表现不一[15]。这些矛盾结果反映出低血压对预后的影响可能高度依赖于患者特征、手术类型及低血压的病理生理亚型, 亟需通过机制明确、设计严谨的前瞻性研究加以厘清。

混杂因素假说的研究证据: 支持“混杂因素”假说的研究主要从以下几个角度提供了证据: 第一, 大量观察性研究在调整了基线健康状况(如 ASA 分级、心功能、合并症指数)后, 低血压与不良结局的关联强度显著减弱甚至消失, 提示二者可能均由患者基础疾病严重程度这一混杂因素所驱动。第二, 随机对照试验的证据方向不一致: 尽管观察性研究一致显示低血压与不良预后相关, 但旨在提升血压目标的干预性试验并未一致证实临床获益, 如 IMPROVE-multi 试验发现个体化血压管理与常规管理在主要复合结局上无显著差异[18], 这一“观察-干预悖论”间接支持了混杂因素的存在。第三, 虚弱状态作为重要的混杂变量, 既与 PIH 易感性显著相关[7], 又是术后不良结局的独立预测因子, 若未充分调整, 可能产生虚假的因果关联。第四, 反向因果关系亦可能存在: 术前已存在的亚临床器官功能不全既降低了心血管储备(使患者更易发生 PIH), 又直接增加了术后并发症风险, 导致 PIH 与不良结局之间呈现统计学关联。

未来研究设计方向: 为更好地区分因果与相关, 未来研究应采用以下方法学策略: 第一, **孟德尔随机化(Mendelian Randomization, MR)研究:** 利用与血压调节或麻醉药物代谢相关的遗传变异作为工具变量, 由于基因型在减数分裂时随机分配, 不受混杂因素影响, 可有效克服观察性研究的混杂偏倚, 为 PIH 与不良结局的因果关系提供更强的证据等级。例如, 可选择与交感神经张力、血管反应性或药物代谢酶活性相关的单核苷酸多态性(SNP)作为工具变量, 通过两样本 MR 设计评估 PIH 与术后心肌损伤、肿瘤复发等结局的因果效应。第二, **目标试验模拟(Target Trial Emulation):** 在大型电子健康记录数据库中, 严格按照随机对照试验的纳入排除标准和干预方案设计观察性研究, 以减少混杂偏倚。第三, **阴性对照设计(Negative Control Design):** 选用理论上不应与结局存在因果关系的暴露作为阴性对照, 以检测未测量混杂因素的存在。第四, **充分调整的多变量模型与倾向性评分匹配:** 纳入尽可能全面的基线协变量, 包括虚弱评分、综合并发症指数、肿瘤分期及术前功能状态等, 以最大限度减少混杂偏倚。通过上述多方法学交叉验证, 有望更准确地界定 PIH 在胃肠道肿瘤术后不良结局中的真实因果作用。

8. 未来研究方向与临床路径

8.1. 统一 PIH 定义与标准化临床研究设计

目前 PIH 研究在定义上存在显著异质性, 部分研究以 $\text{MAP} < 65 \text{ mmHg}$ 为阈值或 MAP 下降超过基线 30%, 另一些则采用 $\text{SBP} \leq 80 \text{ mmHg}$ 等标准[3] [4], 发生时间窗亦缺乏统一界定。未来亟需通过专家共识或大型多中心研究确立 PIH 的操作性定义, 包括明确血压阈值、持续时间及是否结合个体基线血压进行动态评估。同时, 应推动标准化的临床研究设计: 统一纳入高风险人群(如老年、虚弱或合并心血管疾病的胃肠道肿瘤患者)、规范麻醉诱导方案、采用连续动脉血压监测以减少测量偏倚, 并设定一致的术后不良结局指标(如心肌损伤、急性肾损伤、住院时间延长及死亡率等), 从而提升研究的可比性与外部效度。

[5]。此外, 研究设计应引入因果推断方法, 如孟德尔随机化和目标试验模拟, 以更准确地揭示 PIH 与不良结局间的因果关系。

8.2. 深入明确 PIH 影响预后的机制研究

尽管已有证据表明 PIH 与胃肠道肿瘤术后不良结局相关[1], 但其潜在生物学机制尚未完全阐明。未来研究应深入探索 PIH 如何通过诱发炎症反应影响术后转归[15], 并进一步解析其对免疫微环境和肿瘤细胞生物学行为的潜在调控作用。值得注意的是, 虚弱状态与低血压具有协同效应, 可能共同加剧器官灌注不足与组织缺氧[7], 提示机制研究需纳入患者基线状态作为协变量。此外, PIH 是否通过激活交感-肾上腺系统、诱发内皮功能障碍或促进凝血异常等途径影响远期肿瘤复发与生存, 仍有待前瞻性队列与基础实验相结合加以验证, 特别需要区分 PIH 与其他时段低血压(如术中持续低血压或术后低血压)在机制路径上的异同, 以明确 PIH 是否具有独立致病作用。

8.3. 优化 PIH 管理策略的临床转化研究

当前针对 PIH 的干预策略仍处于探索阶段: 部分研究显示预防性使用血管加压药可显著降低 PIH 发生率[3]; 去甲肾上腺素持续输注较麻黄碱推注更能减少术后早期低血压及相关并发症[12]; 非药物干预如气压腿套在老年患者中显示出良好的预防效果(PIH 发生率由 58%降至 10%, $P < 0.001$) [13]。然而, 这些干预措施在胃肠道肿瘤手术人群中的有效性与安全性尚缺乏大规模随机对照试验证据。未来应开展以硬终点(如术后 30 天死亡率、主要并发症发生率或长期无病生存期)为导向的临床转化研究, 评估不同预防策略对改善预后的实际价值。同时, 应结合新型预测工具(如 ΔVTI -PLR 预测 PIH 的 AUC 达 0.89) [6] 和实时预警系统(如 HPI) [8], 构建“预测-预警-干预”一体化的临床路径, 实现 PIH 的早期识别与精准防治, 最终提升胃肠道肿瘤患者的围手术期安全与远期生存质量。此外, 未来研究还应关注干预措施的成本效益比与安全性边界, 为不同风险层级患者制定个体化、性价比最优的 PIH 管理方案。

参考文献

- [1] Han, S., Zeng, T., Xie, Y., Liu, C., Yang, L. and Yang, M. (2025) The Effect of Postoperative Hypotension on Surgical Patients' Adverse Clinical Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Anesthesia*, **107**, Article ID: 111987. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2025.111987>
- [2] Huang, S., Liao, Z., Chen, A., Wang, J., Xu, X. and Zhang, L. (2024) Effect of Carotid Corrected Flow Time Combined with Perioperative Fluid Therapy on Preventing Hypotension after General Anesthesia Induction in Elderly Patients: A Prospective Cohort Study. *International Journal of Surgery*, **110**, 799-809. <https://doi.org/10.1097/js9.0000000000000863>
- [3] Terwindt, L.E., Tol, J.T.M., van der Ven, W.H., Kurucz, V.C., Noteboom, S.H., Breel, J.S., *et al.* (2024) The Influence of Anesthetic Drug Strategy on the Incidence of Post-Induction Hypotension in Elective, Non-Cardiac Surgery—A Prospective Observational Cohort Study. *Journal of Clinical Anesthesia*, **99**, Article ID: 111671. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2024.111671>
- [4] Grillot, N., Gonzalez, V., Deransy, R., Rouhani, A., Cintrat, G., Rooze, P., *et al.* (2025) Post-Induction Hypotension during Rapid Sequence Intubation in the Operating Room: A Post Hoc Analysis of the Randomized Controlled REMI-CRUSH Trial. *Anaesthesia Critical Care & Pain Medicine*, **44**, Article ID: 101502. <https://doi.org/10.1016/j.accpm.2025.101502>
- [5] van Lier, F., Bouwman, R.A. and Scheeren, T.W.L. (2022) "If You Don't Take a Temperature, You Can't Find a Fever": Relevance to Continuous Arterial Pressure Monitoring. *British Journal of Anaesthesia*, **129**, 464-468. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2022.07.018>
- [6] Aissaoui, Y., Jozwiak, M., Bahi, M., Belhadji, A., Alaoui, H., Qamous, Y., *et al.* (2022) Prediction of Post-Induction Hypotension by Point-of-Care Echocardiography: A Prospective Observational Study. *Anaesthesia Critical Care & Pain Medicine*, **41**, Article ID: 101090. <https://doi.org/10.1016/j.accpm.2022.101090>
- [7] Schnetz, M., Zakaria, L., Ahuja, S. and Khanna, A.K. (2025) Frailty and Intraoperative Hypotension: Is the Risk Significant and Modifiable? *British Journal of Anaesthesia*, **135**, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2025.05.002>

- [8] Liu, Y., Liu, B., Xiong, W., Wang, C., Yang, K., Ma, W., *et al.* (2026) Hypotension Prediction Index in the Prediction of Better Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Korean Journal of Anesthesiology*, **79**, 169-181. <https://doi.org/10.4097/kja.25249>
- [9] Zhu, S., Shi, W., Qian, H., Tong, X., Hu, R., Bo, J., *et al.* (2026) Transformer-Based Deep Learning Model for Real-Time Prediction of Intraoperative Hypotension Using Dynamic Time-Series Vital Signs: A Retrospective Study. *PLOS Medicine*, **23**, e1005024. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1005024>
- [10] Boyer, N., Upadhyay, P., Hicks, M.H., Zarbock, A., Khanna, A.K., Forni, L.G., *et al.* (2025) Circulating Biomarkers of Vasoplegia: A Systematic Review. *Annals of Intensive Care*, **15**, Article No. 150. <https://doi.org/10.1186/s13613-025-01564-7>
- [11] Azem, K., Aranbitski, R., Peres, A., Iluz-Freundlich, D., Gliesche, V., Ciobanu-Caraus, O., *et al.* (2025) Challenging Current Evidence: Peripheral Perfusion Index Fails as a Predictor of Postinduction Hypotension—Findings from a Large Diverse Surgical Population. *Journal of Clinical Anesthesia*, **106**, Article ID: 111969. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2025.111969>
- [12] Trocheris-Fumery, O., Flet, T., Scetbon, C., Tarpin, P., Meynier, J., Badaoui, R., *et al.* (2025) Early Use of Norepinephrine in High-Risk Patients Undergoing Major Abdominal Surgery: A Randomized Controlled Trial. *Anesthesiology*, **143**, 1160-1170. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000005704>
- [13] Park, J.Y., Yu, J., Kim, C.S., *et al.* (2023) Effect of Pneumatic Leg Compression on Post-Induction Hypotension in Elderly Patients Undergoing Robot-Assisted Laparoscopic Prostatectomy: A Double-Blind Randomised Controlled Trial. *Anaesthesia*, **78**, 730-738. <https://doi.org/10.1111/anae.15994>
- [14] Barboi, C. and Stapelfeldt, W.H. (2024) Mortality Following Noncardiac Surgery Assessed by the Saint Louis University Score (SLUScore) for Hypotension: A Retrospective Observational Cohort Study. *British Journal of Anaesthesia*, **133**, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2024.03.039>
- [15] Wei, Z.J., Liang, P.P. and Xu, A.M. (2025) Postoperative Depression and Anxiety in Patients Undergoing Intestinal Tumor Surgery: Incidence, Predictors, and Impact on Quality of Life. *World Journal of Gastroenterology*, **31**, Article ID: 111599. <https://doi.org/10.3748/wjg.v31.i47.111599>
- [16] Kouz, K., Brockmann, L., Timmermann, L.M., Bergholz, A., Flick, M., Maheshwari, K., *et al.* (2023) Endotypes of Intraoperative Hypotension during Major Abdominal Surgery: A Retrospective Machine Learning Analysis of an Observational Cohort Study. *British Journal of Anaesthesia*, **130**, 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2022.07.056>
- [17] Wesselink, E.M., Wagemakers, S.H., van Waes, J.A.R., Wanderer, J.P., van Klei, W.A. and Kappen, T.H. (2022) Associations between Intraoperative Hypotension, Duration of Surgery and Postoperative Myocardial Injury after Noncardiac Surgery: A Retrospective Single-Centre Cohort Study: A Retrospective Single-Centre Cohort Study. *British Journal of Anaesthesia*, **129**, 487-496. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2022.06.034>
- [18] Saugel, B., Meidert, A.S., Brunkhorst, F.M., Bischoff, R., Esser, J., Mattis, M., *et al.* (2025) Individualized Perioperative Blood Pressure Management in Patients Undergoing Major Abdominal Surgery: The IMPROVE-Multi Randomized Clinical Trial. *JAMA*, **334**, 1893-1904. <https://doi.org/10.1001/jama.2025.17235>
- [19] D'Amico, F., Fominskiy, E.V., Turi, S., Pruna, A., Fresilli, S., Triulzi, M., *et al.* (2023) Intraoperative Hypotension and Postoperative Outcomes: A Meta-Analysis of Randomised Trials. *British Journal of Anaesthesia*, **131**, 823-831. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2023.08.026>
- [20] Arslan, I. (2026) Natural Products Targeting Angiogenesis and Tumor Microenvironment in Gastrointestinal Malignancies. *Cells*, **15**, Article No. 623. <https://doi.org/10.3390/cells15070623>