

术中血压变异性与老年高血压患者术后急性肾损伤的研究进展

赵颖¹, 苏哲¹, 孟馥芬²

1.新疆医科大学第三临床医学院, 新疆乌鲁木齐 830000; 2.新疆医科大学第三临床医学院 (附属肿瘤医院) 麻醉与围术期医学中心, 新疆乌鲁木齐 830000

【摘要】术后急性肾损伤 (postoperative acute kidney injury, PO-AKI) 是围术期最常见的严重并发症之一, 在高龄、合并高血压的患者中尤为突出。近年来, 学术界开始重视血压波动模式——血压变异性 (blood pressure variability, BPV) ——与靶器官损伤的关联。慢性高血压人群的流行病学证据表明, BPV 是独立于平均血压的心血管事件与死亡风险的强预测因子。这一发现是否适用于血流动力学波动更为剧烈的围术期场景, 已成为麻醉学研究的前沿课题。本文系统回顾 BPV 的生理学基础与量化方法, 梳理术中 BPV 与 PO-AKI 的现有证据, 探索理论争议与方法学挑战。现有证据提示, 术中收缩压变异性, 可能与老年高血压患者 PO-AKI 风险独立相关, 但研究异质性大, 尚需标准化定义及前瞻性干预试验加以验证。

【关键词】: 血压变异性; 术后急性肾损伤; 老年高血压; 术中管理; 围术期血流动力学

中图分类号: R614; R544.1; R692

1. 引言

随着全球人口老龄化趋势加剧, 老年高血压患者接受外科手术的比例逐年上升。国家统计局数据显示, 截至 2024 年末, 我国 65 岁及以上人口已超过 2.1 亿, 占总人口的 15.6%^{Error: Reference source not found}。在此背景下, 老年人群特有的生理储备减退与基础疾病共病状态, 使围术期器官损伤的防控面临严峻挑战。

高血压是老年人群最普遍的慢性疾病之一。《中国高血压防治指南 (2024 年修订版)》指出, 我国 ≥ 65 岁老年人群高血压患病率高达 55%^{Error: Reference source not found}。高血压不仅显著增加围术期心血管事件风险, 还与术后多系统并发症密切相关, 其中急性肾损伤 (acute kidney injury, AKI) 尤为突出^{Error: Reference source not found}。术后急性肾损伤与非心脏大手术中 PO-AKI 的发生率约为 6%~13%, 而在老年、高血压等高危亚组中发生率进一步攀升。一项针对 6,552 名高血压患者非心脏手术的研究中, PO-AKI 发生率达到 8.84%, 且与重症监护室入住率和全因死亡率显著升高相关。此外, 老年高血压患者常伴有动脉硬化、肾小球滤过率下降及肾脏血流自动调节能力减弱等病理生理改变, 使

其在术中面对血流动力学波动时更易发生肾灌注不足和肾实质损伤 Error: Reference source not found Error: Reference source not found。

传统围术期血压管理聚焦于避免术中低血压，但近年来证据提示，血压的过度波动——即 **BPV**——可能独立于平均血压水平损害靶器官 Error: Reference source not found Error: Reference source not found。流行病学调查显示，老年患者术中血流动力学波动相当普遍，术前血压波动幅度超过 20% 的发生率可达 42.27% Error: Reference source not found。在老年高血压这一高危人群中，即使术中平均动脉压得到严格控制，术后 **AKI** 的发生率仍可高达 10.9% Error: Reference source not found，提示当前以“平均血压达标”为导向的管理模式存在明显局限。尽管部分研究已证实术中血压变异性与术后不良结局相关，但在老年高血压这一特殊人群中，其与 **AKI** 的具体关联机制、临床预测价值及干预策略仍缺乏系统性证据。例如，一项针对非心脏手术患者的队列研究明确指出，术中血压变异性升高与非心脏手术后 **AKI** 风险增加显著相关 Error: Reference source not found。然而，也有研究在特定手术类型中未观察到平均动脉压变异性与 **AKI** 的显著关联，凸显当前证据的异质性与不确定性 Error: Reference source not found。

因此，深入理解其围术期血压波动特征及其对肾脏功能的影响，已成为优化麻醉管理和改善术后预后的关键科学问题。

2. 血压变异性的定义、类型与评估方法

术中血压变异性（intraoperative blood pressure variability, **IBPV**）是指手术期间动脉血压在时间维度上的波动程度，反映血流动力学稳定性。目前常用评估参数包括：标准差（standard deviation, **SD**）、变异系数（coefficient of variation, **CV**）、平均真实变异性（average real variability, **ARV**）以及时间加权面积（如 **AUT-65 mmHg**） Error: Reference source not found Error: Reference source not found Error: Reference source not found。其中，**SD** 和 **CV** 反映整体离散程度，**ARV** 则更敏感地捕捉相邻血压读数间的瞬时变化，更能体现短期波动特征 Error: Reference source not found Error: Reference source not found，目前尚无研究明确哪一种 **BPV** 指标最适合术中实时预警。**SD** 和 **CV** 简便但受趋势影响，**ARV** 更敏感但依赖高频数据采集，临床需平衡预测效能与可及性。

根据时间尺度，**BPV** 可分为短时变异性（如术中分钟级波动）和长时变异性（如 24 小时动态血压监测） Error: Reference source not found Error: Reference source not found。在围术期语境下，**IBPV** 主要指前者，基于有创或无创动脉血压监测数据计算得出。按血压成分，**BPV** 分为收缩压变异性（Systolic Blood Pressure Variability, **SBPV**）、舒张压变异性（Diastolic Blood Pressure Variability, **DBPV**）和平均动脉压变异性（Mean Arterial Pressure

Variability, MAPV)。现有证据显示，收缩压变异性与 AKI 的关联更为一致。例如，在主动脉夹层手术患者中，收缩压的 SD、CV 及范围均与 AKI 风险独立相关，而舒张压变异性则无显著关联^{Error: Reference source not found}；在心脏手术老年患者中，收缩压变异性每增加 0.10 单位 CV，院内肾功能衰竭风险增加 104%^{Error: Reference source not found}。这些发现提示，收缩压波动可能在肾损伤机制中扮演更核心的角色。

3. 术后急性肾损伤的病理生理学基础与高血压易感机制

3.1 术后急性肾损伤的诊断标准

PO-AKI 的诊断广泛采用 2012 年 KDIGO 标准^{Error: Reference source not found}，满足以下任意一条即可诊断：① 48 小时内血肌酐升高 $\geq 26.5 \mu\text{mol/L}$ (0.3 mg/dL)；② 7 天内血肌酐升至基线值的 1.5 倍及以上；③ 连续 6 小时尿量 $< 0.5 \text{ mL/(kg}\cdot\text{h)}$ 。围术期研究通常将术后 7 天内发生的 AKI 定义为 PO-AKI，推荐采用 KDIGO 标准以保证结果可比性^{Error: Reference source not found}。需注意，部分研究仅依赖血肌酐而忽略尿量标准，可能低估 AKI 真实发生率。NGAL、KIM-1 等新型标志物虽具早期诊断潜力，但目前尚不推荐替代常规标准。

3.2 肾脏血流自动调节的生理机制及其在高血压与衰老中的受损

在生理状态下，当平均动脉压（Mean Arterial Pressure, MAP）在约 80 至 160 mmHg 范围内波动时，肾脏可以通过入球小动脉肌源性反应和管球反馈机制调节血管张力，调节肾血流量（Renal Blood Flow, RBF）和肾小球滤过率（Glomerular Filtration Rate, GFR）^{Error: Reference source not found}。然而，老年状态、高血压和动脉硬化等基础疾病会从不同层面损害这一调节机制。长期高血压引起肾小动脉结构和功能的重塑，表现为入球小动脉肌源性反应阈值右移和管球反馈敏感性降低^{Error: Reference source not found}。老年高血压患者自动调节曲线右移，下限可升至 90–100 mmHg 甚至更高，意味着原本安全的 MAP 80 mmHg 可能已处于缺血阈值以下。当术中血压波动加剧，收缩压或 MAP 频繁偏离基线范围时，可导致肾血流灌注不连续，进而引发肾皮质与髓质氧供需失衡。在这些背景下，原本安全的血压波动范围被急剧压缩，轻微波动就足以诱发肾小管缺血性损伤。

3.3 术中血压波动的“动态冲击”特性

术中血压的反复攀升与跌落对肾血管内皮细胞造成累积性的剪切应力波动。每一次血压骤降后肾组织的低灌注，都会触发内皮细胞释放炎症因子和黏附分子；紧随其后的血压回升又带来再灌注阶段活性氧簇的爆发式产生。当反复发生此种大幅度波动时，肾脏储备的修复能力被消耗殆尽，最终发展为无法逆转的结构损伤。

3.4 降压药物对肾灌注调节能力的影响

术前长期服用血管紧张素转换酶抑制剂 (Angiotensin-Converting Enzyme Inhibitors, ACEI) 及血管紧张素 II 受体拮抗剂 (Angiotensin II Receptor Blockers, ARB) 等类药物可解除肾小球出球小动脉张力，削弱自动调节代偿。术中低血压时，肾小球滤过压骤降，且代偿收缩被抑制，使肾脏失去最后保护屏障。这提示，评估老年高血压患者术中 BPV 与 PO-AKI 风险时，须将术前药物暴露作为重要修饰因子纳入考量。

4. 血压变异性的预后价值

在高血压治疗领域，BPV 的预后价值已经获得广泛认可。ASCOT-BPLA 研究随访结果表明，BPV 与终末器官损伤的相关性较血压测量本身更强^{Error: Reference source not found}。一项 2025 年、的大型队列研究证实，诊室及动态 BPV 均显著增加心血管事件和全因死亡风险^{Error: Reference source not found}。更为关键的是，即使患者的平均收缩压得到良好控制，BPV 增高仍会增加心血管事件的风险^{Error: Reference source not found}。据此，2024 年《中国高血压防治指南》及《高血压患者高质量血压管理中国专家建议》均将 BPV 纳入长期血压管理的关键评估指标中^{Error: Reference source not found}。

5. 术中血压变异性与 PO-AKI 的研究现状

5.1 关联性的初步确立

大量回顾性研究初步构建了术中 BPV 与 PO-AKI 之间的关联证据链。Xu 等人纳入 437 例肝移植受者的研究显示，ARV 和 VIM 均是术后 AKI 的独立危险因素^{Error: Reference source not found}。在国内腹腔镜下结直肠癌手术人群中，术中收缩压的 SD 增高同样被证实与 PO-AKI 风险增加显著相关^{Error: Reference source not found}。

5.2 独立于低血压的核心验证

上述发现面临一个关键质疑：BPV 的损伤是否独立于术中低血压 (intraoperative hypotension, IOH)。近年来，多项研究通过严谨的多变量校正模型，着力分离二者的效应。韩国一项纳入 82,659 例非心脏手术队列研究显示，在调整 IOH 及平均动脉压后，MAP 的 ARV 每增加 1 个标准差，PO-AKI 风险仍增加 13%^{Error: Reference source not found}。类似地，在主动脉夹层手术患者中，收缩压的 SD、CV 及范围在校正混杂后，仍与 AKI 显著相关^{Error: Reference source not found}；在体外循环心脏手术的老年患者中，收缩压 CV 每增加 0.10 单位，院内肾功能衰竭风险增加 104%，该关联在校正模型中同样保持稳健^{Error: Reference source not found}。此外，

针对急诊自发性颅内出血患者的研究亦显示，收缩压变异性每增加 1 mmHg，AKI 风险增加 2%，该效应独立于平均血压水平^{Error: Reference source not found}。上述证据一致表明，BPV 的“动态冲击”是独立于“静态低灌注”的风险维度。

5.3 阈值效应的线索

在关联强度的量级层面，部分研究提示 BPV 与 PO-AKI 之间可能存在阈值效应。一项针对危重症患者的研究显示，当 24 小时收缩压 ARV ≤ 6 mmHg 时，AKI 发生率为 14.0%；而 ARV >14 mmHg 时，AKI 发生率急剧攀升至 73.9%（ $P=0.006$ ）^{Error: Reference source not found}，提示 BPV 的致肾损伤作用可能在超过临界值后呈指数级放大。

6.当前证据的方法学缺陷与未来方向

部分研究（如 Kim 等针对机器人辅助前列腺手术的队列）并未发现 BPV 参数对 AKI 的独立预测价值（AUC 仅 0.5-0.6）^{Error: Reference source not found}，这提示 BPV 与 AKI 之间可能存在非线性关系或受手术类型等效应修饰因子的显著调节，也折射出当前研究方法学上的深层困境。

6.1 因果推断的根本困境

阳性结果均源于回顾性队列研究，固有混杂难以完全校正。术中 BPV 升高常伴随更复杂的手术与更不稳定的病情，残余混杂可能充当替代解释。此外，反向因果亦不可忽视：术前已存在亚临床肾功能储备下降者，其血管反应性更差，更易出现血压波动，此时 BPV 与 AKI 的关联可能部分源于“脆弱肾脏”本身。多数研究未获取术前肾小管损伤生物标志物，因果方向难以明确判定。

6.2 关键信息的系统缺失与校正悖论

术前 ACEI/ARB 药物可削弱肾血流自动调节储备，但研究极少分层分析药物暴露，可能遮蔽真实交互效应。同时，术中血管活性药物用量与 BPV 存在双向耦合——校正可致“过度校正”而出现假阴性，不校正则面临混杂，此悖论在回顾性设计中难以解决。

6.3 从“静态数值”到“动态模式”的信息损耗

传统参数（SD、CV、ARV）将血压时间序列压缩为单一数值，丢失波动的时间结构与尖峰形态。相同 ARV 可对应缓慢趋势性波动或突发骤升骤降，对肾灌注冲击迥异。非线性指标（如样本熵）虽可部分捕捉复杂性，但其临床可操作性与预测增益尚待验证。

6.4 可干预因素的临床转化价值

在影响术中 BPV 的易患因素中，年龄和基础肾功能属于不可更改的基线特征；而术前降压药物调整、术中监测手段的优化、血管活性药物的精准使用及

麻醉方式的选择，则属于可干预环节，具有直接的临床转化价值。

术前长期服用 ACEI/ARB 类药物可削弱肾血流自动调节储备，停药时机与替代方案尚缺乏高质量证据指导。术中监测方面，传统间断无创血压监测难以捕捉 BPV 的瞬时变化，而连续有创监测可提供更高的时间分辨率，为实时计算 ARV 等指标提供数据基础，但何种指标最适合术中预警尚无定论。个体化血压管理策略（依据术前基线设定个体化目标）已显示降低肾损伤生物标志物的趋势，但未显著降低肌酐定义的 AKI 发生率 Error: Reference source not found。

此外，麻醉方式的选择同样是围术期可调控的关键环节。全身麻醉诱导与苏醒期可引发剧烈血流动力学波动，区域麻醉通过交感神经阻滞同样可能诱发低血压 Error: Reference source not found。现有证据关于全麻与区域麻醉对老年患者术中 BPV 影响的优劣尚存争议 Error: Reference source not foundError: Reference source not found，但目前尚无研究系统评估麻醉方式是否改变 BPV 与 PO-AKI 之间的效应关系。未来研究应将麻醉方式作为重要的分层变量纳入分析。

综上，优化老年高血压患者术中血流动力学管理应着眼于多环节协同：术前合理调整降压药物、术中采用连续监测技术、依据个体化目标精准使用血管活性药物，并结合麻醉方式制定综合管理方案，以期降低 PO-AKI 风险提供切实可行的路径。

7.总结与核心结论

综合现有临床证据，术中 BPV 在老年高血压患者围术期管理中具有重要的病理生理意义和临床预测价值。大量回顾性队列研究一致表明，术中收缩压或 MAP 变异性升高与术后 AKI 风险显著相关，且在一定程度上独立于术中低血压。在高基线风险的老年高血压患者中，即使轻度低血压也与 AKI 显著相关，凸显该人群对血压波动的高度敏感性。

然而，当前证据仍存在明显异质性，部分研究未能证实其预测价值。这些不一致性源于研究人群、手术类型等差异，提示目前尚缺乏统一的评估框架。

机制层面，老年高血压患者本身存在肾血流自动调节能力下降及内皮功能障碍等基础改变 Error: Reference source not foundError: Reference source not foundError: Reference source not found，使其肾脏对灌注压波动更为脆弱。血流动力学不稳可引发缺血-再灌注损伤、氧化应激及炎症反应，进而诱发急性肾小管损伤 Error: Reference source not found。此外，术中频繁使用血管活性药物也可能通过直接肾毒性或间接血流动力学扰动加剧肾损伤风险 Error: Reference source not found。

尽管个体化血压管理策略在一项随机对照试验中显示出降低 AKI 发生率的趋势（从 16% 降至 11%），但差异未达统计学显著性 Error: Reference source not foundError: Reference source not found，提示未来需更大样本量和更精准的目标设定来验证其临床效益。

综上，现有证据支持术中血压变异性是老年高血压患者术后 AKI 的重要危险因素。未来亟需通过标准化变异性定义、开展大样本前瞻性研究，并结合连续无创监测技术，推动精准化血压管理策略的临床转化，以切实降低老年高血压患者术后 AKI 的发生风险。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2025[M]. 北京: 中国统计出版社, 2025.
- [2] 中国高血压联盟. 中国高血压防治指南(2024 年修订版)[J]. 中华高血压杂志, 2024, 32(7): 603-700.
- [3] Kendale S M, Lapis P N, Melhem S M, et al. The association between pre-operative variables, including blood pressure, and postoperative kidney function[J]. *Anaesthesia*, 2016, 71(12): 1417-1423.
- [4] Li J, Ma Y, Li Y, et al. Intraoperative hypotension associated with postoperative acute kidney injury in hypertension patients undergoing non-cardiac surgery: a retrospective cohort study[J]. *Burns Trauma*, 2024, 12: tkae029.
- [5] Ariyaratna D, Bhonsle A, Nim J, et al. Intraoperative vasopressor use and early postoperative acute kidney injury in elderly patients undergoing elective noncardiac surgery[J]. *Ren Fail*, 2022, 44(1): 13.
- [6] Wang D W M, Rodrigues B C D, Canziani M E, et al. Blood pressure variability in older patients with chronic kidney disease[J]. *Cardiorenal Med*, 2025, 15(1).
- [7] Park S, Lee H C, Jung C W, et al. Intraoperative arterial pressure variability and postoperative acute kidney injury[J]. *Clin J Am Soc Nephrol*, 2020, 15(1): 35.
- [8] Han J, Kim H R. Blood pressure variability and acute kidney injury in traumatic intracranial hemorrhage: a retrospective cohort study using the MIMIC-IV database[J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2026, 69(2): 256-264.
- [9] 汪文娟, 吴向荣. 老年高血压前期患者围手术期血流动力学波动的现状调查及相关因素分析[J]. *医学信息*, 2024, 37(24): 89-93.
- [10] Pang Z, Liang S, Zhou N, et al. Individualized blood pressure regulation and acute kidney injury in older patients having major abdominal surgery: a pilot randomized trial[J]. *Int J Surg*, 2025, 111(4): 2894-2902.
- [11] Kim T L, Kim N, Shin H J, et al. Intraoperative mean arterial pressure and acute kidney injury after robot-assisted laparoscopic prostatectomy: a retrospective study[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 3318.

- [12] Li Y, Zheng T, Zhu J, et al. Variability of blood pressure and risk of postoperative acute kidney injury in patients undergoing surgery for acute aortic dissection: an 11-year single-center study[J]. *J Clin Hypertens*, 2023, 25(5): 463-469.
- [13] Xie Z, Liao X, Yin W, et al. Relationship between short-term blood pressure variability and incidence of acute kidney injury in critically ill patients[J]. *Kidney Blood Press Res*, 2018, 42(6): 1238-1246.
- [14] Wan E, Yu E, Chin W, et al. Association of visit-to-visit variability of systolic blood pressure with cardiovascular disease, chronic kidney disease and mortality in patients with hypertension[J]. *J Hypertens*, 2020, 38(5): 1.
- [15] Jinadasa S P, Mueller A, Prasad V, et al. Blood pressure coefficient of variation and its association with cardiac surgical outcomes[J]. *Anesth Analg*, 2018.
- [16] Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) Acute Kidney Injury Work Group. KDIGO clinical practice guideline for acute kidney injury[J]. *Kidney Int Suppl*, 2012, 2(1): 1-138.
- [17] 中华医学会急诊医学分会. 围术期与ICU内急性肾损伤管理指南[J]. *中华急诊医学杂志*, 2016, 25(7): 862-863.
- [18] Panwar R, McNicholas B, Teixeira J P, et al. Renal perfusion pressure: role and implications in critical illness[J]. *Ann Intensive Care*, 2025, 15(1): 115.
- [19] Mancusi C, Trimarco V, Losi M A, et al. Impact of visit-to-visit blood pressure variability on hypertensive-mediated target organ damage and future cardiovascular events: the Campania salute network[J]. *J Hypertens*, 2021, 39(9): 1852-1858.
- [20] Li H L, Lin H J, Muo C H, et al. Blood pressure variability and risk of cardiovascular events and mortality in real-world clinical settings[J]. *J Am Heart Assoc*, 2025, 14(11): e037658.
- [21] Herrett E, Strongman H, Gadd S, et al. The importance of blood pressure thresholds versus predicted cardiovascular risk on subsequent rates of cardiovascular disease: a cohort study in English primary care[J]. *Lancet Healthy Longev*, 2022, 3(1): e22-e30.
- [22] 中国高血压联盟《高血压患者高质量血压管理中国专家建议》委员会, 陈歆, 王继光. 高血压患者高质量血压管理中国专家建议[J]. *中华高血压杂志*, 2024, 32(2): 104-111.
- [23] Xu L, Zhang T, Cao L, et al. Effect of perioperative blood pressure variability on post-liver transplant acute kidney injury[J]. *J Hepatopancreatobiliary Surg*, 2024, 36(3): 129-135.

- [24] 庞兆华, 邹望远. 老年患者非心脏手术围手术期急性肾损伤的研究进展[J]. 中南大学学报(医学版), 2024.
- [25] Wang P, Zhang Y, You Q, et al. Association between postoperative hypotension and mortality and complications in patients undergoing craniotomy for brain tumor[J]. *Neurosurgery*, 2022.
- [26] 王林刚, 张惠, 潘峰, 等. 老年高血压患者全麻气管拔管时血压升高的影响因素[J]. 中华高血压杂志, 2023, 31(6): 589-593.
- [27] 葛雅和, 王熹, 王娇, 等. 不同麻醉方式对老年髋部骨折病人预后影响的回顾性分析[J]. 浙江创伤外科, 2018, 23(3): 456-458.
- [28] 王晓伟, 孙天胜, 刘智, 等. 不同麻醉方式对老年髋部骨折预后影响的研究进展[J]. 中华创伤杂志, 2016, 32(10): 873-876.
- [29] Okabayashi Y, Tsuboi N, Kanzaki G, et al. Aging vs. hypertension: an autopsy study of sclerotic renal histopathological lesions in adults with normal renal function[J]. *Am J Hypertens*, 2019, 32(7).
- [30] Xue X, Wang Y X, Fan Q N, et al. Perioperative blood pressure and anesthesia management: impact on outcomes[J]. *Crit Care Nurs*, 2026, 49(2): 174-185.
- [31] Saugel B, Sander M, Katzer C, et al. Association of intraoperative hypotension and cumulative norepinephrine dose with postoperative acute kidney injury in patients having noncardiac surgery: a retrospective cohort analysis[J]. *Br J Anaesth*, 2025, 134(1): 54-62.