

血压变异性与肾脏疾病风险的研究与临床干预

李佳芸, 廖晓辉*

重庆医科大学附属第二医院肾内科, 重庆

收稿日期: 2025年12月29日; 录用日期: 2026年1月23日; 发布日期: 2026年2月2日

摘要

慢性肾脏病(Chronic Kidney Disease, CKD)和急性肾损伤(Acute Kidney Injury, AKI)是全球健康挑战。传统血压管理侧重于平均血压, 但近年研究表明, 血压变异性(blood pressure variability, BPV)本身即是心、肾等靶器官损害的独立危险因素。这篇综述系统梳理了BPV与CKD进展、AKI发生之间的研究证据, 探讨其潜在的发病机制, 总结了不同人群中的特点, 并评述当前BPV的评估方法和临床干预策略。现有证据支持将BPV纳入肾脏疾病的综合风险评估体系中。未来还需要统一BPV的测量和管理标准, 从而实现更全面的血压管理与肾脏保护。

关键词

血压变异性, 慢性肾脏病, 急性肾损伤, 风险评估, 血压管理

Research Advances and Clinical Intervention on Blood Pressure Variability and Kidney Disease Risk

Jiayun Li, Xiaohui Liao*

Department of Nephrology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: December 29, 2025; accepted: January 23, 2026; published: February 2, 2026

Abstract

Chronic kidney disease (CKD) and acute kidney injury (AKI) represent significant global health challenges. While conventional blood pressure management has focused primarily on average blood pressure levels, emerging evidence indicates that blood pressure variability (BPV) itself serves as an

*通讯作者。

文章引用: 李佳芸, 廖晓辉. 血压变异性与肾脏疾病风险的研究与临床干预[J]. 临床医学进展, 2026, 16(2): 532-537.
DOI: 10.12677/acm.2026.162422

independent risk factor for damage to target organs such as the heart and kidneys. This review systematically examines the evidence linking BPV to CKD progression and AKI onset, explores potential underlying pathophysiological mechanisms, summarizes population-specific characteristics, and evaluates current methods for assessing BPV along with relevant clinical intervention strategies. Available data support the integration of BPV into comprehensive risk assessment frameworks for kidney disease. Moving forward, standardized approaches for measuring and managing BPV are needed to advance more holistic blood pressure control and renal protection.

Keywords

Blood Pressure Variability, Chronic Kidney Disease, Acute Kidney Injury, Risk Assessment, Blood Pressure Management

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

CKD 已成为全球第九大死亡原因, 患病数量在全世界范围内不断增长。2023 年全球约 7.88 亿成年人患 CKD, 平均每 100 人中就有超过 14 人患病[1]。AKI 是一组以肾小球滤过率急剧下降为特征的综合征, 与高发病率、死亡率和医疗成本相关, 且是 CKD 和终末期肾病(End-Stage Renal Disease, ESRD)的重要危险因素, 给医疗卫生系统带来了沉重负担, 显著增加住院费用和资源消耗, 防治工作刻不容缓[2]。目前, KDIGO (Kidney Disease: Improving Global Outcomes, 改善全球肾脏病预后组织)等权威指南强调, 控制血压是延缓 CKD 进展的核心策略, 通常建议将血压控制在 130/80 mmHg 以下[3]。但临床上有些患者即使平均血压已经达标, 但仍会出现肾功能下降, 甚至其他系统的并发症。这些现象说明, 只关注平均血压, 可能无法全面反映血压波动对患者造成的潜在危害。

BPV 反映血压在一定时间内的波动幅度, 根据每搏间、24 小时、数周至数年的时间尺度, 可以分为极短期、短期和长期的波动[4][5]。其常用量化指标包括标准差(Standard Deviation, SD)、变异系数(Coefficient of Variation, CV)、平均真实变异性(Average Real Variability, ARV)等。近年来, 大量研究证实, 无论平均血压高低, BPV 增高都会增加未来发生心脑血管疾病、痴呆以及肾脏损伤的风险[6][7]。这提示我们需充分关注血压波动带来的危害。这篇综述旨在系统整理 BPV 与 CKD、AKI 的关联, 揭示其可能的发病机制, 总结在不同人群中的特点, 并讨论当前临床对 BPV 的干预措施, 以期肾脏疾病的精准防治提供新的思路。

2. BPV 与 CKD 的发生和发展

对于高血压人群而言, 短期内的血压波动是 CKD 发生和发展的独立危险因素。一项针对 1173 名高血压患者的前瞻性研究发现, ARV 处于最高三分位组的患者, 发生肾功能下降 30%、新出现肾功能不全或大量蛋白尿的肾脏复合终点事件风险, 分别比最低组增加了 64%和 60% [8]。在糖尿病患者这类高危人群中, BPV 的预测价值更加突出。一项全国性队列研究显示, 在 2 型糖尿病(Type 2 Diabetes Mellitus, T2DM)患者中, BPV 高的人群进展至 ESRD 的风险显著增高, 而且这种关联在年轻患者、无其他合并症患者中也同样有统计学意义[9]。大型临床试验 ASCOT (盎格鲁 - 斯堪的纳维亚心脏终点试验)也支持这一结论, 糖尿病患者每次就诊时收缩压的波动情况, 是预测其发生心血管事件、肾功能损害和死亡风险

的强力指标[10]。目前, 证据等级最高的系统评价研究明确指出: BPV 增加会使 CKD 进展的总体风险升高 21% (风险比 $HR = 1.21$), 使 ESRD 的风险升高 18% ($HR = 1.18$) [11]。在全病因 CKD 的人群中, BPV 的危害普遍存在。例如, 在 IgA 肾病患者中, 每次复诊时收缩压波动大的患者, 其肾脏病情进展的风险是波动小患者的 2.12 倍, 而且在蛋白尿水平不高的患者中, 这种关联更强[12]。

3. BPV 与 AKI 的发生和发展

在住院成人中, 发生 AKI 的比例约为 1/5, 这一比例在重症监护室中更高, 且与死亡率显著升高相关[2]。在住院和接受手术的患者中, BPV 对预测 AKI 的发生有重要作用。对成人主动脉夹层手术患者, 术前收缩压波动大是术后发生 AKI 的独立危险因素[13]。除了成人患者, 住院和手术的患儿血压稳定管理也需要得到重视[14] [15]。儿童在接受心脏手术后, 发生 AKI 的比例可高达 15%到 64%, 远高于成人[14]。儿童心肺旁路手术(Cardiac Surgery with Cardiopulmonary Bypass, CPB)期间平均动脉压如果偏离基础值 $\pm 30\%$ 以上, 术后 AKI 的风险也会明显升高, 这一点在 3~7 岁的儿童中尤为明显[14]。Nugent 等人发现了类似的结果, 一项涵盖五千多名住院患儿的研究显示, 收缩压和平均动脉压的波动越大, 发生 AKI 的风险就越高[15]。因此, 将 BPV 纳入 AKI 的风险评估和管理体系很有价值。识别出 BPV 高的患者, 有助于早期发现 AKI 高危人群, 能指导临床医生更合理地管理容量、避免使用肾毒性药物或调整降压方案, 从而实现预防性的干预。

4. BPV 损伤肾脏的机制

目前研究认为 BPV 损伤肾脏的可能机制如下: 从血流动力学角度看, 血压剧烈波动会导致肾小球毛细血管内的压力不稳定, 这种反复的异常压力会对血管内皮细胞和足细胞产生剪切应激, 直接损伤肾脏的微细血管结构[16]。从神经内分泌和血管功能来看, BPV 与交感神经过度兴奋、RAAS 功能紊乱密切相关。这种由 RAAS 和交感神经系统持续激活所引发的内环境失衡, 是促使肾脏氧化应激水平升高的重要驱动力。其中, 烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸氧化酶(NADPH Oxidase, NOX)作为产生超氧化物的关键来源, 其活性上调在高血压相关的肾小球及血管损伤中扮演了核心角色[17]。在肥胖人群中, 可以观察到血管收缩物质(如血管紧张素 II、内皮素-1)水平升高, 而血管舒张物质(如脑钠肽 BNP)水平降低, 这种失衡使血压难以控制, 血压波动也更容易出现[18]。血压波动可能引起炎症反应, 并促使肾脏组织走向纤维化。而肾脏纤维化是几乎所有 CKD 发展到晚期的共同病理改变, 这个过程涉及到受损的肾脏细胞、免疫细胞和成纤维细胞之间复杂的相互作用[19]。鉴于 BPV 已被证实会加重血管内皮功能障碍[16], 而内皮损伤与缺血再灌注又是驱动纤维化的重要环节, 因此 BPV 可能成为加速肾脏纤维化进程的促进因素。

5. 特殊人群中 BPV 的特点

血液透析患者是研究 BPV 的特殊群体, 其血压极易受到体内血容量波动和透析过程本身的影响。研究发现, 透析前长期收缩压波动大会增加死亡和发生严重心血管事件的风险[20], 并且透析过程中的血压波动比两次透析之间的血压波动能更好地预测心血管问题[21]。此外, 长期血压不稳定还会让透析患者的动静脉内瘘或血管移植术更容易形成血栓, 风险最高可达稳定者的 2.45 倍[22]。肥胖和患有代谢综合征患者的 BPV 也有特殊性。肥胖既是 CKD 也是高血压的常见诱因, 它会激活 RAAS、兴奋交感神经等引起神经内分泌紊乱和慢性炎症, 导致血压升高, 破坏身体的血压调节机制, 使得血压波动变大[18] [23]。因此, 减肥可能通过改善代谢, 间接起到稳定血压、保护肾脏的作用。对于患有阻塞性睡眠呼吸暂停 (Obstructive Sleep Apnea, OSA) 的人来说, 夜间反复的呼吸暂停和缺氧会引发“交感风暴”, 导致夜间和清晨血压急剧飙升, 血压变得非常不稳定[24]。所以, 对于同时患有顽固性高血压或 BPV 很高的 CKD 患

者, 筛查并治疗 OSA 是管理中非常重要的一环。

6. BPV 的临床干预

BPV 目前还缺乏统一的测量方法及衡量指标。诊室血压测量次数有限, 很难准确反映波动情况; 24 小时动态血压监测能完整记录昼夜变化和短期波动, 被认为是评估 BPV 的金标准; 家庭自测血压方便长期追踪趋势, 但需要患者规范操作[5]。如今, 智能血压计、远程监测平台等数字健康技术, 为更方便地监测 BPV 提供了新的可能[25], 但需要更多的后续研究。在衡量指标的选择上, 有系统评价指出, CV、SD、ARV 和独立于均值的变异性(Variability Independent of the Mean, VIM)这几个指标在预测 CKD 进展方面效果比较好[11]。但目前缺乏一个公认的最佳指标, 这阻碍了 BPV 在临床的广泛应用[26]。

现有的干预研究中, 不同降压药物对 BPV 的影响差别很大。钙通道阻滞剂(Calcium Channel Blockers, CCB), 如氨氯地平, 被多项研究证实能有效降低 BPV。有机制研究表明, 氨氯地平改善血管内皮功能的作用, 与其稳定血压波动的能力直接相关[16]。还有长期观察发现, 服用 CCB 可能减轻高 BPV 带来的痴呆风险[6]。ASCOT 分析也显示, 以氨氯地平为基础的治疗方案, 比以 β 受体阻滞剂(Beta-adrenergic receptor Blockers, BBs)为基础的治疗方案能带来更多的心血管获益, 部分原因就在于前者能更好地稳定血压[10]。因此, Kulkarni 等人建议, 对于 BPV 高的患者, 可以优先考虑使用长效的二氢吡啶类 CCB [7]。肾素-血管紧张素系统抑制剂(Renin-Angiotensin System Inhibitor, RASI)是治疗 CKD 的首选药物[3], 其主要优势在于降低蛋白尿, 但它们对稳定 BPV 的效果, 研究结论并不一致, 有些研究认为其效果可能不如 CCB。BBs 在稳定血压变异性方面的作用有限, 甚至可能不利[6] [27]。利尿剂则可能通过减少身体里的水分, 来帮助稳定血压。近年来, 备受关注的 SGLT2 抑制剂(sodium-glucose cotransporter 2 inhibitor)和 GLP-1 受体激动剂(glucagon-like peptide-1 receptor agonist), 虽然明确了心肾保护作用, 但它们对 BPV 的具体影响, 还需要更多的研究来证实[24] [28]。最新的综述指出, SGLT2 抑制剂与盐皮质激素受体拮抗剂(Mineralocorticoid Receptor Antagonists, MRA)等药物, 其核心优势在于能直接作用于肾脏的损伤机制(如显著减轻氧化应激、炎症与纤维化), 这为管理 BPV 相关的肾脏损伤提供了超越单纯降压的新的治疗方向[17]。

非药物的综合管理也同样重要。在生活方式上, 减重、限制食盐摄入、坚持规律运动、管理焦虑情绪等, 可能有助于降低 BPV [3] [29]。血压管理的个体化需要得到足够重视, 尤其是对于透析、肥胖、OSA 等特殊人群。

7. 结论与展望

大量研究证实, BPV 与肾脏疾病风险(CKD 和 AKI)的发生发展密切相关。高 BPV 的危害广泛存在于不同人群之中, 在糖尿病患者和透析患者中尤其突出。其损害肾脏的潜在机制可能涉及血流动力学直接冲击、神经内分泌系统失调以及炎症反应激活等多重途径。目前, 学界尚需进一步研究以确立评估 BPV 的最佳标准, 从而推动临床实践从单纯关注平均血压, 转向将 BPV 纳入肾脏疾病的综合风险管理体系。未来研究应致力于发展 BPV 的个体化管理策略, 结合患者具体特征与药物作用机制, 并借助数字健康技术实现长期动态监测与治疗方案的实时调整。这有望为肾脏保护提供更为精准有效的新途径。

参考文献

- [1] Mark, P.B., Stafford, L.K., Grams, M.E., Aalruz, H., Abd ElHafeez, S., Abdelgalil, A.A., *et al.* (2025) Global, Regional, and National Burden of Chronic Kidney Disease in Adults, 1990-2023, and Its Attributable Risk Factors: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2023. *The Lancet*, **406**, 2461-2482. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(25\)01853-7](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(25)01853-7)
- [2] Hoste, E.A.J., Kellum, J.A., Selby, N.M., Zarbock, A., Palevsky, P.M., Bagshaw, S.M., *et al.* (2018) Global Epidemiology and Outcomes of Acute Kidney Injury. *Nature Reviews Nephrology*, **14**, 607-625.

- <https://doi.org/10.1038/s41581-018-0052-0>
- [3] Stevens, P.E., Ahmed, S.B., Carrero, J.J., Foster, B., Francis, A., Hall, R.K., *et al.* (2024) KDIGO 2024 Clinical Practice Guideline for the Evaluation and Management of Chronic Kidney Disease. *Kidney International*, **105**, S117-S314. <https://doi.org/10.1016/j.kint.2023.10.018>
- [4] Parati, G., Ochoa, J.E., Lombardi, C. and Bilo, G. (2013) Assessment and Management of Blood-Pressure Variability. *Nature Reviews Cardiology*, **10**, 143-155. <https://doi.org/10.1038/nrcardio.2013.1>
- [5] Narita, K., Hoshida, S. and Kario, K. (2023) Short- To Long-Term Blood Pressure Variability: Current Evidence and New Evaluations. *Hypertension Research*, **46**, 950-958. <https://doi.org/10.1038/s41440-023-01199-w>
- [6] Mahinrad, S., Bennett, D.A., Sorond, F.A. and Gorelick, P.B. (2023) Blood Pressure Variability, Dementia, and Role of Antihypertensive Medications in Older Adults. *Alzheimer's & Dementia*, **19**, 2966-2974. <https://doi.org/10.1002/alz.12935>
- [7] Kulkarni, S., Parati, G., Bangalore, S., Bilo, G., Kim, B.J., Kario, K., *et al.* (2025) Blood Pressure Variability: A Review. *Journal of Hypertension*, **43**, 929-938. <https://doi.org/10.1097/hjh.0000000000003994>
- [8] Jhee, J.H., Oh, D., Seo, J., Lee, C.J., Chung, M., Park, J.T., *et al.* (2023) Short-term Blood Pressure Variability and Incident CKD in Patients with Hypertension: Findings from the Cardiovascular and Metabolic Disease Etiology Research Center-High Risk (CMERC-HI) Study. *American Journal of Kidney Diseases*, **81**, 384-393.e1. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2022.08.017>
- [9] Huh, Y., Kim, H. and Park, H.S. (2025) Blood Pressure Variability and End-Stage Kidney Disease among Individuals with Type 2 Diabetes: A Nationwide Cohort Study. *Journal of Diabetes*, **17**, e70160. <https://doi.org/10.1111/1753-0407.70160>
- [10] Rostamian, S., Kaura, A., Ariti, C., Gupta, A., Whitely, W., Poulter, N.R., *et al.* (2025) The Impact of Blood Pressure Variability on Cardiovascular and Renal Outcomes in Patients with and without Diabetes: Insights from the Anglo-Scandinavian Cardiac Outcomes Trial. *Journal of Hypertension*, **43**, 2033-2041. <https://doi.org/10.1097/hjh.0000000000004153>
- [11] Yang, L., Li, J., Wei, W., Pu, Y., Zhang, L., Cui, T., *et al.* (2023) Blood Pressure Variability and the Progression of Chronic Kidney Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of General Internal Medicine*, **38**, 1272-1281. <https://doi.org/10.1007/s11606-022-08001-6>
- [12] Tang, C., Zhang, X., Lv, J., Shi, S., Zhou, X., Liu, L., *et al.* (2022) Visit-to-Visit Variability in Blood Pressure and Kidney Disease Progression in IgA Nephropathy. *Clinical Kidney Journal*, **15**, 2331-2339. <https://doi.org/10.1093/ckj/sfac200>
- [13] Li, Y., Zheng, T., Zhu, J., Chen, Y., Chen, Y. and Sun, S. (2023) Variability of Blood Pressure and Risk of Postoperative Acute Kidney Injury in Patients Undergoing Surgery for Acute Aortic Dissection: A 11-Year Single-Center Study. *The Journal of Clinical Hypertension*, **25**, 463-469. <https://doi.org/10.1111/jch.14654>
- [14] Xiao, R., Luo, M., Yu, H., Zhang, Y., Long, F., Li, W., *et al.* (2025) Relationship between Intraoperative Blood Pressure Variability and Postoperative Acute Kidney Injury in Pediatric Cardiac Surgery. *Pediatric Nephrology*, **40**, 2071-2081. <https://doi.org/10.1007/s00467-025-06659-8>
- [15] Nugent, J.T., Ghazi, L., Yamamoto, Y., Bakhoun, C., Wilson, F.P. and Greenberg, J.H. (2023) Hypertension, Blood Pressure Variability, and Acute Kidney Injury in Hospitalized Children. *Journal of the American Heart Association*, **12**, e029059. <https://doi.org/10.1161/jaha.122.029059>
- [16] Honda, A., Tahara, N., Tahara, A., Bekki, M., Maeda-Ogata, S., Sugiyama, Y., *et al.* (2023) Effects of Olmesartan and Amlodipine on Blood Pressure, Endothelial Function, and Vascular Inflammation. *Journal of Nuclear Cardiology*, **30**, 1613-1626. <https://doi.org/10.1007/s12350-023-03200-y>
- [17] Arendshorst, W.J., Vendrov, A.E., Kumar, N., Ganesh, S.K. and Madamanchi, N.R. (2024) Oxidative Stress in Kidney Injury and Hypertension. *Antioxidants*, **13**, Article 1454. <https://doi.org/10.3390/antiox13121454>
- [18] Ghanim, H., Thethi, T.K., Abuaysheh, S., Fonseca, V. and Dandona, P. (2023) Vasoactive Mediators of Hypertension in Obesity. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, **325**, E406-E411. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00209.2022>
- [19] Yamashita, N. and Kramann, R. (2024) Mechanisms of Kidney Fibrosis and Routes Towards Therapy. *Trends in Endocrinology & Metabolism*, **35**, 31-48. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2023.09.001>
- [20] Yang, J., Huang, J., Yu, B., Zhang, Q., Zhang, S., Wu, L., *et al.* (2022) Long-Term Predialysis Blood Pressure Variability and Outcomes in Hemodialysis Patients. *The Journal of Clinical Hypertension*, **24**, 148-155. <https://doi.org/10.1111/jch.14398>
- [21] Liu, Q., Wang, W., Wu, X., Lv, J., Cai, S. and Li, Y. (2023) Intra-Dialytic Blood Pressure Variability Is a Greater Predictor of Cardiovascular Events in Hemodialysis Patients. *BMC Nephrology*, **24**, Article No. 113. <https://doi.org/10.1186/s12882-023-03162-w>

-
- [22] Hsieh, M., Cheng, C., Chen, C., Liao, M., Lin, C., Yang, T., *et al.* (2022) The Association of Long-Term Blood Pressure Variability with Hemodialysis Access Thrombosis. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **9**, Article 881454. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.881454>
- [23] Kovesdy, C.P. (2025) Obesity and Metabolic Health in CKD. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, **20**, 742-754.
- [24] Shiina, K. (2024) Obstructive Sleep Apnea -Related Hypertension: A Review of the Literature and Clinical Management Strategy. *Hypertension Research*, **47**, 3085-3098. <https://doi.org/10.1038/s41440-024-01852-y>
- [25] Deng, T., Xue, Y. and Methakanjanasak, N. (2026) Digital Health Integration in Chronic Kidney Disease. *Clinica Chimica Acta*, **582**, Article ID: 120749. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2025.120749>
- [26] Hernandez, M.F. and Chang, T.I. (2023) The Need to Reduce Variability in the Study of Blood Pressure Variability. *American Journal of Kidney Diseases*, **81**, 379-381. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2022.10.008>
- [27] 黄胜楠, 方超, 吴剑南, 等. 不同降压药物治疗原发性高血压患者血压变异的研究进展[J]. 心脏杂志, 2024, 36(4): 442-445, 451.
- [28] Beimler, J. (2022) Neue Aspekte der medikamentösen Nephroprotektion. *Die Innere Medizin*, **63**, 1200-1207. <https://doi.org/10.1007/s00108-022-01297-w>
- [29] 余谦, 蔡炜, 李勇, 等. 焦虑、抑郁对女性高血压病人血压变异性的影响[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2024, 22(24): 4563-4566.