本文引用：王 静，武 星，李东宝. 血压变异性指标与高血压合并糖尿病患者心率变异性及左心室肥厚的关系[J]. 中国动脉硬化杂志，2026，34(10)：1003-1010. DOI：10.20039/j.cnki.1007-3949.2026.10.010.

[文章编号] 1007-3949(2026)34-10-1003-08

·临床研究·

血压变异性指标与高血压合并糖尿病患者心率变异性及左心室肥厚的关系

王 静[1]，武 星[2]，李东宝[2]

首都医科大学附属北京友谊医院 1. 国际医学部，2. 心内科，北京市 100050

[摘 要] [目的] 探究血压变异性(BPV)指标与高血压合并糖尿病患者心率变异性(HRV)及左心室肥厚(LVH)的关系。[方法] 选取 168 例高血压合并糖尿病患者作为研究对象，根据是否伴有 LVH 分为非 LVH 组(n=71)和 LVH 组(n=97)。比较两组患者的临床资料、BPV 和 HRV 水平，采用局部加权回归(LOWESS)模型分析 BPV 与 HRV 的相关性，通过 Logistic 回归模型分析 BPV、HRV 与 LVH 的关联，探究不同 BPV 及 HRV 水平下患者 LVH 的发生差异，采用限制性立方样条(RCS)分析 BPV 与 LVH 的剂量-反应关系，并进一步分析 HRV 对 BPV 与 LVH 关联的交互作用。[结果] 与非 LVH 组相比，LVH 组的年龄更大，空腹血糖、总胆固醇(TC)、24 h 收缩压标准差(24hSBPSD)、24 h 舒张压标准差(24hDBPSD)、日间收缩压标准差(dSBPSD)、日间舒张压标准差(dDBPSD)水平均明显更高，SDNN 则明显更低(P<0.05)。LOWESS 分析结果显示，BPV 与 HRV 呈负相关关系(P<0.05)。Logistic 回归分析结果显示，逐步排除混杂因素后，BPV 和 HRV 是 LVH 的独立相关因素，趋势性检验具有统计学意义($P_{趋势}$<0.001)。RCS 分析结果显示，BPV 指标与 LVH 之间存在非线性剂量-反应关系($P_{非线性}$=0.003、$P_{非线性}$=0.006、$P_{非线性}$=0.019、$P_{非线性}$=0.012)。交互作用分析结果显示，随着 HRV 水平的降低，BPV 与 LVH 发生风险的正相关关系逐渐增强(P<0.05)。[结论] 高血压合并糖尿病患者的 BPV 指标与 HRV 呈显著负相关关系，BPV 升高和 HRV 降低是这类患者发生 LVH 的独立相关因素，临床中联合监测 BPV 与 HRV 有助于早期识别 LVH 高危人群。

[关键词] 心率变异性； 血压变异性指标； 高血压； 糖尿病； 左心室肥厚

[中图分类号] R544.1 [文献标识码] A

The relationship between blood pressure variability indices, heart rate variability and left ventricular hypertrophy in patients with hypertension combined with diabetes mellitus

Wang Jing[1], Wu Xing[2], Li Dongbao[2]

1. *Department of International Medicine*, 2. *Department of Cardiology*, *Beijing Friendship Hospital*, *Capital Medical University*, *Beijing* 100050, *China*

[**ABSTRACT**] **Aim** To explore the relationship between the blood pressure variability (BPV) indices, heart rate variability (HRV) and left ventricular hypertrophy (LVH) in patients with hypertension combined with diabetes mellitus. **Methods** A total of 168 patients with hypertension and diabetes were selected as the study subjects and divided into the non-LVH group (n=71) and the LVH group (n=97) based on the presence or absence of LVH. The clinical data, BPV and HRV levels of the two groups were compared. The locally weighted regression (LOWESS) model was used to analyze the correlation between BPV and HRV. The Logistic regression model was used to analyze the correlation between BPV, HRV and LVH. The differences in LVH occurrence among patients with different BPV and HRV levels were explored. The restricted cubic spline (RCS) was used to analyze the dose-response relationship between BPV and LVH, and the interaction effect of HRV on the association between BPV and LVH was further analyzed. **Results** Compared with the non-LVH group, the LVH group had older age, significantly higher levels of fasting blood glucose, total cholesterol (TC), 24 h systolic blood pressure standard deviation (24hSBPSD), 24 h diastolic blood pressure standard deviation (24hDBPSD), daytime sys-

[收稿日期] 2025-05-16 [修回日期] 2026-08-27

[作者简介] 王静，硕士，医师，主要从事慢病管理人群心电及血压研究，E-mail：wangjing168166@163.com。通信作者李东宝，博士，主任医师，主要从事心血管疾病研究，E-mail：leetobo@sina.com。

tolic blood pressure standard deviation (dSBPSD), and daytime diastolic blood pressure standard deviation (dDBPSD), while SDNN was significantly lower ($P<0.05$). The LOWESS analysis results showed a negative correlation between BPV and HRV ($P<0.05$). Logistic regression analysis results showed that after gradually excluding confounding factors, BPV and HRV were independent correlated factors of LVH, and the trend test had statistical significance ($P_{trend}<0.001$). The RCS analysis results showed a nonlinear dose-response relationship between BPV levels and LVH ($P_{nonlinearity}=0.003$, $P_{nonlinearity}=0.006$, $P_{nonlinearity}=0.019$, $P_{nonlinearity}=0.012$). The interaction analysis results showed that as the HRV level decreased, the positive correlation between BPV and LVH risk gradually increased ($P<0.05$). **Conclusions** The BPV indices were significantly negatively correlated with HRV in patients with hypertension combined with diabetes mellitus. The increase of BPV and the decrease of HRV are independent related factors for LVH in these patients. The combined monitoring of BPV and HRV in clinical practice is helpful for early identification of LVH high-risk populations.

[**KEY WORDS**] heart rate variability; blood pressure variability indices; hypertension; diabetes mellitus; left ventricular hypertrophy

高血压是糖尿病患者的常见合并疾病之一[1]。血压变异性(blood pressure variability,BPV)可反映特定时段内血压的波动幅度[2-3],其水平受多重因素调节:生理性因素包括外界环境变化、内源性激素分泌及遗传背景等;病理性因素则包括高血压、糖尿病这类慢性疾病。具体来说,高血压可通过损伤血管内皮、激活交感神经系统使 BPV 升高[4-5],糖尿病则会因自主神经功能失调引起 BPV 增大[6]。BPV 升高会加速心、脑、肾等重要器官的损害进程,增加冠心病、心力衰竭、心律失常及左心室肥厚(left ventricular hypertrophy,LVH)等不良事件的发生风险。其中,LVH 是高血压的典型并发症,会随着疾病进展逐步发展为肥厚心肌失代偿,最终进展为心功能不全,对患者生命健康构成严重威胁[7-8]。心率变异性(heart rate variability,HRV)指窦性心律在一定时间内发生周期性波动的特征,是评估交感神经张力与自主神经平衡状态的核心参数[9-10],也是临床检测心脏自主神经功能的常用指标,近年来已被证实是心血管疾病死亡的独立预测因子。目前,针对 BPV 指标与高血压合并糖尿病患者 HRV 及 LVH 三者间关联的研究仍不充分,本研究旨在探讨 BPV 与该类患者 HRV 及 LVH 的内在联系,以期为 LVH 的早期预防与临床干预提供理论参考。

1 资料和方法

1.1 研究对象

本研究为横断面观察性研究,选取 2022 年 7 月至 2024 年 7 月于首都医科大学附属北京友谊医院就诊的 168 例高血压合并糖尿病患者作为研究对象,其中男性 98 例,女性 70 例,年龄 50~75 岁,平均年龄(64.63±6.66)岁,根据是否合并 LVH 将患者分为非 LVH 组($n=71$)与 LVH 组($n=97$)。

LVH 诊断标准[11]:(1)心电图检测标准:①Sokolow-Lyon 电压指数,即 $S_{v1}+R_{v5}>3.5$ mV;②$R_{avL}\geq 1.1$ mV;③Cornell 电压-时间乘积>244 mV·ms;④Cornell 电压指数,即 $S_{v3}+R_{avL}$,男性>2.8 mV,女性>2.0 mV。上述 4 项指标中任意一项结果为阳性,即可初步诊断为 LVH。(2)超声心动图检测标准:室间隔厚度(interventricular septal thickness,IVST)或左心室后壁厚度(left ventricular posterior wall thickness,LVPWT)增加,其中男性>11 mm,女性>10.5 mm 即可判定为 LVH。

纳入标准:(1)符合原发性高血压[12]与糖尿病的诊断标准[13];(2)临床资料完整。排除标准:(1)合并恶性肿瘤者;(2)合并血液系统疾病、自身免疫性疾病或严重感染性疾病者;(3)合并心、肝、肾等重要脏器功能障碍者;(4)存在精神障碍,无法正常交流沟通者。本研究已通过首都医科大学附属北京友谊医院伦理委员会审批(审查编号:2025-P2-327-01),可豁免书面知情同意。

1.2 观察指标

收集患者的基线资料,包括性别、年龄、体重指数(body mass index,BMI)、病程、吸烟史、饮酒史、心率。本研究中将病历明确记录患者当前或既往有吸烟、饮酒行为的情况定义为“有吸烟史”“有饮酒史”,无相关记录者定义为“无吸烟史”“无饮酒史”。

患者入院时采集 5 mL 空腹静脉血,以 3 000 r/min(离心半径为 15 cm)离心 10 min,分离血清后,采用葡萄糖氧化酶法检测空腹血糖水平;采用日本 OLYMPUS AU5400 全自动生化分析仪检测血清肌酐(serum creatinine,SCr)、总胆固醇(total cholesterol,TC)、甘油三酯(triglyceride,TG)、高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol,HDLC)、低

密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol,LDLC)水平。

采用美国 DMS(迪姆)生产的无创便携式动态血压监测仪监测 BPV 指标,将监测袖带固定于患者左肘关节上方 3～5 cm 处。监测方案:日间 6:00～22:00 每 30 min 测量 1 次,夜间 22:00～次日 6:00 每 60 min 测量 1 次,仅纳入有效记录占比>80% 的患者,统计指标包括 24 h 收缩压标准差(24 h systolic blood pressure standard deviation,24hSBPSD)、24 h 舒张压标准差(24 h diastolic blood pressure standard deviation,24hDBPSD)、日间收缩压标准差(daytime systolic blood pressure standard deviation,dSBPSD)、日间舒张压标准差(daytime diastolic blood pressure standard deviation,dDBPSD)、夜间收缩压标准差(nighttime systolic blood pressure standard deviation,nSBPSD)、夜间舒张压标准差(nighttime diastolic blood pressure standard deviation,nDBPSD)、NN 间期标准差(standard deviation of NN intervals,SDNN),采用深圳博英医疗仪器科技有限公司生产的 BI6812 型 24 h 动态心电图仪检测。

1.3　统计学分析

数据分析采用 SPSS 27.0 软件完成。计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示,组间比较采用独立样本 t 检验;计数资料以例(%)表示,组间比较采用 χ^2 检验;采用局部加权回归(locally weighted regression,LOWESS)模型分析 BPV 指标与 HRV 指标的相关性;采用 Logistic 回归模型分析 BPV 指标、HRV 与 LVH 的关联;采用限制性立方样条(restricted cubic spline,RCS)法,选取 BPV 指标的 P_5、P_{25}、P_{75}、P_{95} 共 4 个百分位数作为节点,以 P_5 为参考值绘制 BPV 指标与 LVH 的 RCS 曲线,探究二者的剂量-反应关系;采用 R 包 Interplot 绘制交互作用图,分析 HRV 对 BPV 指标与 LVH 关系的交互作用。双侧 P<0.05 为差异具有统计学意义。

2　结　果

2.1　临床资料比较

两组患者在性别、BMI、病程、吸烟史、饮酒史、心率、SCr、TG、HDLC、LDLC 方面均无明显差异(P>0.05);与非 LVH 组相比,LVH 组年龄更大,空腹血糖、TC 水平更高,差异具有统计学意义(P<0.05;表 1)。

2.2　BPV 指标和 HRV 指标比较

两组患者在 nSBPSD、nDBPSD 方面均无明显差异(P>0.05);LVH 组的 24hSBPSD、24hDBPSD、dSBPSD 及 dDBPSD 均高于非 LVH 组,SDNN 低于非 LVH 组,差异具有统计学意义(P<0.05;表 2)。

表 1. 两组患者临床资料比较

Table 1. Comparison of clinical data between the two groups of patients

指标	非 LVH 组(n=71)	LVH 组(n=97)	t/χ^2 值	P
性别/[例(%)]			0.034	0.853
男性	42(59.15)	56(57.73)		
女性	29(40.85)	41(42.27)		
年龄/岁	63.01±6.07	66.24±7.25	3.051	0.003
BMI/(kg/m^2)	22.09±3.76	22.47±3.58	0.665	0.507
病程/年	8.66±0.59	8.97±1.31	1.860	0.065
吸烟史/[例(%)]			0.558	0.455
有	50(70.42)	63(64.95)		
无	21(29.58)	34(35.05)		
饮酒史/[例(%)]			0.138	0.710
有	58(81.69)	77(79.38)		
无	13(18.31)	20(20.62)		
心率/(次/分)	75.09±9.66	74.58±10.35	0.324	0.746
空腹血糖/(mmol/L)	8.73±1.34	9.46±1.87	2.804	0.006
SCr/(μmol/L)	75.97±14.24	76.32±14.23	0.157	0.875
TC/(mmol/L)	3.71±0.82	4.23±1.06	3.446	0.001
TG/(mmol/L)	2.55±0.64	2.71±0.59	1.675	0.096
HDLC/(mmol/L)	1.28±0.37	1.30±0.41	0.325	0.745
LDLC/(mmol/L)	2.63±0.76	2.74±0.68	0.985	0.326

表 2. 两组患者 BPV 指标和 HRV 指标比较

Table 2. Comparison of BPV indices and HRV parameters between the two groups of patients

指标	非 LVH 组(n=71)	LVH 组(n=97)	t 值	P
24hSBPSD/mmHg	13.76±5.03	15.28±3.79	2.234	0.027
24hDBPSD/mmHg	11.59±4.21	13.71±4.67	3.029	0.003
dSBPSD/mmHg	14.47±4.02	15.90±3.65	2.403	0.017
dDBPSD/mmHg	11.73±3.59	13.46±2.85	3.480	0.001
nSBPSD/mmHg	10.51±2.74	11.73±3.46	1.948	0.053
nDBPSD/mmHg	10.42±4.33	11.27±3.08	1.487	0.139
SDNN/ms	86.44±9.36	77.35±10.22	5.899	<0.001

2.3　BPV 指标与 HRV 指标的相关性分析

LOWESS 分析结果显示,SDNN 与 24hSBPSD、24hDBPSD、dSBPSD、dDBPSD 均呈负相关关系(P<0.05;图 1)。

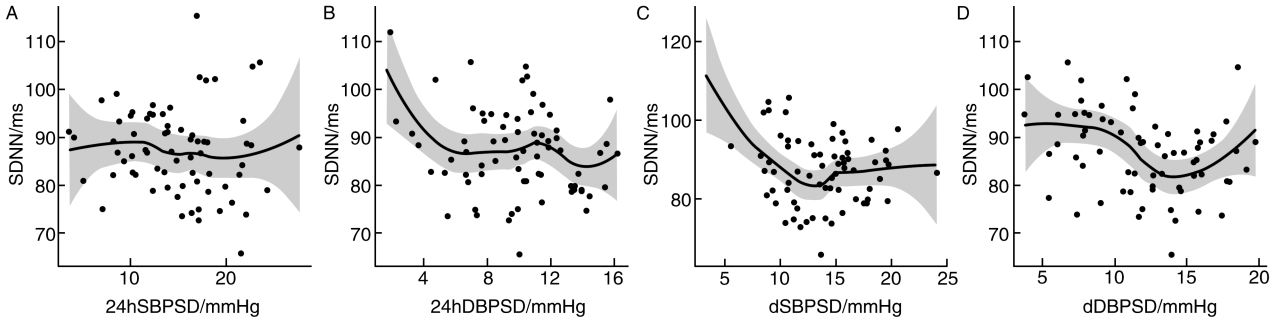


图 1. LOWESS 分析 BPV 指标与 HRV 指标的相关性

A 为 SDNN 与 24hSBPSD 的相关性，B 为 SDNN 与 24hDBPSD 的相关性，C 为 SDNN 与 dSBPSD 的相关性，D 为 SDNN 与 dDBPSD 的相关性。

Figure 1. Correlation analysis of the BPV indices and HRV indicators using the LOWESS method

2.4 BPV 指标、HRV 指标与 LVH 的关联分析

将表 2 中 $P<0.05$ 的变量纳入 Logistic 回归模型，逐步调整混杂因素后（模型 2）结果显示，24hSBPSD（$OR=1.507$，95% CI：1.434 ~ 1.666，$P=0.013$）、24hDBPSD（$OR=1.281$，95% CI：1.036 ~ 1.291，$P=0.030$）、dSBPSD（$OR=1.163$，95% CI：1.115 ~ 1.267，$P=0.034$）、dDBPSD（$OR=1.231$，95% CI：1.057 ~ 1.399，$P=0.031$）、SDNN（$OR=1.625$，95% CI：1.412 ~ 1.913，$P=0.028$）是 LVH 的独立相关因素。与 24hSBPSD、24hDBPSD、dSBPSD、dDBPSD 水平最低的四分位数组（Q1）相比，随着上述指标水平从 Q2 到 Q4 逐渐升高，效应值也逐步升高，趋势性检验具有统计学意义（$P_{趋势}<0.001$）；与 SDNN 水平最高的四分位数组（Q1）相比，随着 SDNN 水平从 Q2 到 Q4 逐渐降低，效应值同样逐步升高，趋势性检验具有统计学意义（$P_{趋势}<0.001$；表 3）。

表 3. BPV 指标、HRV 指标与 LVH 的关联分析

Table 3. Correlation analysis of BPV indices, HRV indicators and LVH

指标	连续变量	四分位数组				$P_{趋势}$
		Q1	Q2	Q3	Q4	
24hSBPSD						
未校准模型	1.030（0.896 ~ 1.236）	1	1.014（0.732 ~ 1.452）	1.336（1.007 ~ 1.602）	1.506（1.115 ~ 2.132）	<0.001
模型 1	1.145（1.002 ~ 1.274）	1	1.019（0.885 ~ 1.263）	1.240（1.034 ~ 1.421）	1.511（1.312 ~ 1.720）	<0.001
模型 2	1.507（1.434 ~ 1.666）	1	1.022（0.931 ~ 1.308）	1.286（1.180 ~ 1.483）	1.676（1.305 ~ 1.776）	<0.001
24hDBPSD						
未校准模型	1.081（0.921 ~ 1.138）	1	1.055（0.854 ~ 1.252）	1.233（1.130 ~ 1.312）	1.291（1.177 ~ 1.389）	<0.001
模型 1	1.111（0.967 ~ 1.196）	1	1.174（1.015 ~ 1.271）	1.242（1.137 ~ 1.321）	1.301（1.210 ~ 1.420）	<0.001
模型 2	1.281（1.036 ~ 1.291）	1	1.203（1.098 ~ 1.308）	1.277（1.176 ~ 1.390）	1.356（1.285 ~ 1.456）	<0.001
dSBPSD						
未校准模型	1.075（0.938 ~ 1.194）	1	1.062（0.928 ~ 1.240）	1.116（1.010 ~ 1.295）	1.182（1.061 ~ 1.221）	<0.001
模型 1	1.117（1.032 ~ 1.196）	1	1.180（1.066 ~ 1.272）	1.192（1.107 ~ 1.324）	1.246（1.109 ~ 1.442）	<0.001
模型 2	1.163（1.115 ~ 1.267）	1	1.193（1.088 ~ 1.343）	1.227（1.136 ~ 1.291）	1.297（1.111 ~ 1.378）	<0.001
dDBPSD						
未校准模型	1.001（0.866 ~ 1.206）	1	1.255（1.058 ~ 1.352）	1.264（1.111 ~ 1.376）	1.293（1.170 ~ 1.381）	<0.001
模型 1	1.185（1.012 ~ 1.296）	1	1.274（1.085 ~ 1.363）	1.282（1.195 ~ 1.361）	1.305（1.240 ~ 1.417）	<0.001
模型 2	1.231（1.057 ~ 1.399）	1	1.303（1.198 ~ 1.417）	1.327（1.289 ~ 1.483）	1.344（1.285 ~ 1.461）	<0.001
SDNN						
未校准模型	1.671（1.587 ~ 1.835）	1	1.755（1.554 ~ 1.852）	1.614（1.529 ~ 1.702）	1.583（1.470 ~ 1.681）	<0.001
模型 1	1.714（1.494 ~ 1.880）	1	1.674（1.585 ~ 1.763）	1.642（1.437 ~ 1.721）	1.511（1.412 ~ 1.620）	<0.001
模型 2	1.625（1.412 ~ 1.913）	1	1.603（1.518 ~ 1.783）	1.587（1.489 ~ 1.683）	1.484（1.405 ~ 1.576）	<0.001

注：模型 1 调整了年龄、空腹血糖；模型 2 在模型 1 的基础上进一步调整了 TC。

2.5　不同 BPV 指标与 HRV 指标下高血压合并糖尿病患者的 LVH 差异

以 BPV 指标和 HRV 指标的三分位数作为分割点，将所有研究对象分为三组，分析不同分组下高血压合并糖尿病患者的 LVH 差异。结果显示，随着 SDNN 水平降低，以及 24hSBPSD、24hDBPSD、dSBPSD、dDBPSD 水平升高，高血压合并糖尿病患者的 LVH 发生率逐渐升高，但差异均无统计学意义（P>0.05；表 4）。

表 4. 不同 BPV 指标与 HRV 指标下高血压合并糖尿病患者的 LVH 差异

Table 4. Differences in LVH among patients with hypertension combined with diabetes mellitus stratified by different BPV indices and HRV indicators

指标	SDNN> 86.00 ms	74.55 ms< SDNN≤ 86.00 ms	SDNN≤ 74.55 ms
24hSBPSD/[例(%)]			
<11.50 mmHg	2(2.06)	4(4.12)	7(7.22)
11.50～14.78 mmHg	5(5.15)	9(9.28)	17(17.53)
>14.78 mmHg	12(12.37)	18(18.56)	23(23.71)
P		0.856	
24hDBPSD/[例(%)]			
<10.05 mmHg	3(3.09)	4(4.12)	8(8.25)
10.05～12.33 mmHg	7(7.22)	11(11.34)	16(16.49)
>12.33 mmHg	13(13.40)	13(13.40)	22(22.68)
P		0.936	
dSBPSD/[例(%)]			
<12.26 mmHg	2(2.06)	6(6.19)	8(8.25)
12.26～14.71 mmHg	9(9.25)	12(12.37)	16(16.49)
>14.71 mmHg	14(14.43)	14(14.43)	16(16.69)
P		0.653	
dDBPSD/[例(%)]			
<9.55 mmHg	0(0.00)	5(5.15)	7(7.22)
9.55～12.27 mmHg	8(8.25)	10(10.31)	13(13.40)
>12.27 mmHg	11(11.34)	16(16.49)	27(27.84)
P		0.411	

2.6　RCS 分析 BPV 指标与 LVH 的剂量-反应关系

采用 RCS 法绘制 BPV 指标与 LVH 的剂量-反应曲线。以 24hSBPSD 的 P_5（14.36 mmHg）作为参考值，24hSBPSD 在 P_{25}（15.86 mmHg）、P_{75}（20.64 mmHg）、P_{95}（31.11 mmHg）处对应的 *OR* 值（95% *CI*）分别为 1.159（1.082～1.218）、1.492（1.206～1.763）、2.439（1.782～2.757）；当 24hSBPSD≤14.36 mmHg 时，LVH 风险维持低位平稳，当 24hSBPSD>14.36 mmHg 时，风险急剧升高，提示该点为 LVH 的高风险阈值。以 24hDBPSD 的 P_5（11.62 mmHg）作为参考值，24hDBPSD 在 P_{25}（12.83 mmHg）、P_{75}（16.70 mmHg）、P_{95}（25.18 mmHg）处对应的 *OR* 值（95% *CI*）分别为 1.126（1.045～1.207）、1.395（1.241～1.409）、2.356（1.972～2.485）；当 24hDBPSD≤11.62 mmHg 时，LVH 风险维持低位平稳，当 24hDBPSD>11.62 mmHg 时，风险急剧升高，提示该点为 LVH 的高风险阈值。以 dSBPSD 的 P_5（14.50 mmHg）作为参考值，dSBPSD 在 P_{25}（16.01 mmHg）、P_{75}（20.84 mmHg）、P_{95}（31.42 mmHg）处对应的 *OR* 值（95% *CI*）分别为 1.306（1.085～1.974）、1.482（1.258～1.763）、2.215（1.506～2.633）；当 dSBPSD≤14.50 mmHg 时，LVH 风险维持低位平稳，当 dSBPSD>14.50 mmHg 时，风险急剧升高，提示该点为 LVH 的高风险阈值。以 dDBPSD 的 P_5（11.14 mmHg）作为参考值，dDBPSD 在 P_{25}（12.30 mmHg）、P_{75}（16.01 mmHg）、P_{95}（24.14 mmHg）处对应的 *OR* 值（95% *CI*）分别为 1.212（1.106～1.433）、1.375（1.304～1.475）、1.756（1.536～2.108）；当 dDBPSD≤11.14 mmHg 时，LVH 风险维持低位平稳，当 dDBPSD>11.14 mmHg 时，风险急剧升高，提示该点为 LVH 的高风险阈值。以上结果提示，24hSBPSD、24hDBPSD、dSBPSD、dDBPSD 水平与 LVH 之间均存在非线性剂量-反应关系（$P_{非线性}$ 分别为 0.003、0.006、0.019、0.012；图 2）。

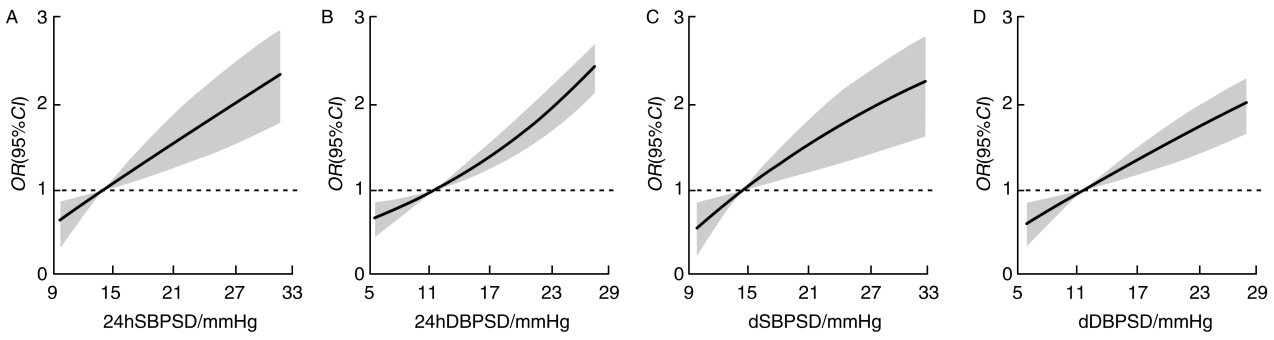


图 2. RCS 分析 BPV 指标与 LVH 的剂量-反应关系

A 为 24hSBPSD 与 LVH 的剂量-反应关系，B 为 24hDBPSD 与 LVH 的剂量-反应关系，C 为 dSBPSD 与 LVH 的剂量-反应关系，D 为 dDBPSD 与 LVH 的剂量-反应关系。

Figure 2. Analysis of the dose-response relationship between BPV index and LVH using RCS

2.7 HRV 指标对 BPV 指标和 LVH 的交互作用

交互作用分析结果显示，在调整年龄、空腹血糖、TC 后，随着 SDNN 降低，24hSBPSD、24hDBPSD、dSBPSD 及 dDBPSD 与 LVH 发生风险的正相关关系逐渐增强，差异具有统计学意义（$P=0.002$、$P=0.015$、$P=0.007$、$P=0.003$；图 3）。

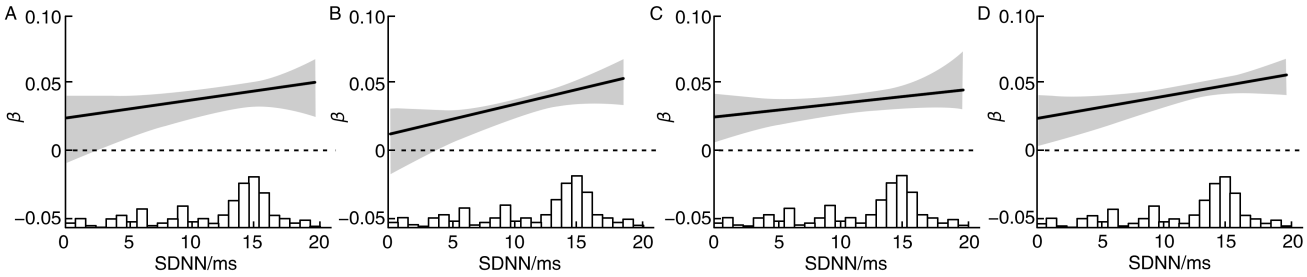


图 3. HRV 指标对 BPV 指标和 LVH 的交互作用

A 为 SDNN 对 24hSBPSD 和 LVH 的交互作用，B 为 SDNN 对 24hDBPSD 和 LVH 的交互作用，C 为 SDNN 对 dSBPSD 和 LVH 的交互作用，D 为 SDNN 对 dDBPSD 和 LVH 的交互作用。

Figure 3. Interaction effect of HRV indicators on the association between BPV indices and LVH

3 讨 论

糖尿病与高血压是两种常见的慢性疾病，二者常合并存在，且相互影响[14]。糖尿病患者血糖水平升高不仅会升高血液黏稠度，还会导致血管弹性减退，进而降低机体调节血压的能力，最终诱发高血压[15]。这种共病状态会显著增加患者面临的健康风险，其严重程度高于单独患有其中任意一种疾病[16]。LVH 是心血管疾病重要的独立危险因素，提示患者发生心血管事件的风险更高。LVH 会改变心脏的结构与功能，引发心肌细胞肥大、间质纤维化，进而导致心脏顺应性下降，随病情进展最终可能发展为心力衰竭。

BPV 指标（包括 dDBPSD、dSBPSD、24hSBPSD 及 24hDBPSD）可反映血压波动程度，长期血压波动会使心室壁反复承受异常压力负荷，进而刺激心肌细胞肥大与间质纤维化。本研究发现，与非 LVH 组相比，LVH 组的 24hSBPSD、24hDBPSD、dSBPSD 及 dDBPSD 水平均显著更高；RCS 分析显示，24hSBPSD、24hDBPSD、dSBPSD 及 dDBPSD 水平与 LVH 之间均存在非线性剂量-反应关系。高血压本身会升高心脏后负荷，心脏需要更大的力量完成泵血，长期高血压会使左心室压力负荷过重，进而引发心肌细胞代偿性肥大[17]。在高血压合并糖尿病患者中，BPV 升高会进一步加重血流动力学紊乱。血压频繁波动会使心脏在短时间内承受不同程度的压力变化，心肌需氧量随之增加；为维持正常心输出量，心肌细胞会通过增加体积与数量增强收缩力，最终导致 LVH 发生。既往研究指出，BPV 可用于预测不良心血管事件的发生[18]，本研究结论与之相符。研究表明，血糖异常升高会造成糖基化产物大量蓄积，诱发氧化应激反应，损伤血管内皮细胞，进而启动炎症级联反应，推动动脉粥样硬化病变进展；此外，血糖升高还会干扰自主神经调节功能，破坏血压稳态，增大血压波动幅度，最终导致 BPV 升高[19]。

HRV 的 SDNN 降低提示自主神经功能失衡，与高血压、心肌肥厚密切相关[20]。HRV 降低提示交感神经活性相对增强，副交感神经活性减弱。交感神经兴奋后可释放去甲肾上腺素等神经递质，作用于心肌细胞，促进心肌细胞蛋白合成与细胞肥大，最终引发 LVH。长期交感神经占优的状态会使心脏持续承受高动力负荷，进而加快 LVH 的发展进程。糖代谢稳态失衡会引发机体血管相关自主神经功能紊乱，加重高血压诱导的心脏结构重构与功能异常。具体作用机制可分为两方面：一方面，高糖环境可提升肾小管对钠离子的重吸收效率，升高血液渗透压，增加循环血容量；另一方面，高糖会诱导细胞外基质过度合成、血管平滑肌细胞异常增殖，使血管收缩能力增强，进而促进动脉粥样硬化的发生发展。血管内皮功能障碍会导致 BPV 升高，同时也会影响心脏自主神经的调节功能，造成 HRV 降低。本研究发现，与非 LVH 组相比，LVH 组的 SDNN 水平显著更低；经 Logistic 回归模型分析，逐步排除混杂因素后可见，SDNN 是 LVH 的独立相关因素，且趋势性检验具有统计学意义。现有针对 HRV 与心血管疾病的相关研究表明，HRV 可为临床鉴别高血压所致 LVH 提供参考[21]。本研究结果显示，随着 SDNN 水平降低以及 24hSBPSD、24hDBPSD、

dSBPSD、dDBPSD 水平升高，高血压合并糖尿病患者的 LVH 发生率逐渐升高，但组间差异均无统计学意义。该结果可能与本研究样本量有限有关：按三分位数分组后各亚组病例数较少，统计检验效能不足，导致难以检出组间差异。而 Logistic 回归模型与 RCS 剂量-反应分析基于连续变量建模，可充分利用现有数据信息，能够更准确地揭示 BPV 指标与 LVH 之间的关联及非线性趋势。因此，分组分析未显示出显著差异并不否定整体研究结论，仅提示该结果仍需更大样本量的研究进一步验证。

鉴于已证实 BPV 指标和 HRV 均与高血压合并糖尿病患者的 LVH 发生相关，本研究进一步探究了 BPV 指标与 HRV 的关联。交互作用分析结果显示，随着 SDNN 水平逐渐降低，24hSBPSD、24hDBPSD、dSBPSD、dDBPSD 与 LVH 的正相关关系逐渐增强。分析其原因在于，HRV 降低所反映的自主神经功能失衡，会影响心血管系统对血压波动的调节能力[22]：交感神经兴奋时，不仅会直接促进心肌肥厚，还会引发血管收缩，导致血压升高且波动加剧；而血压波动增大又会进一步损伤心脏自主神经，使 HRV 进一步降低，最终形成恶性循环。基于本研究结果，临床上联合监测 BPV 指标与 HRV，有助于在疾病早期识别高血压合并糖尿病患者中更易发生 LVH 的高危人群。叶维聪等[23]的研究指出，相较于非 LVH 组，合并高血压糖尿病的 LVH 组患者，其日间收缩压变异系数（daytime systolic blood pressure coefficient of variation，dSBPCV）、日间舒张压变异系数（daytime diastolic blood pressure coefficient of variation，dDBPCV）、24 h 收缩压变异系数（24 h systolic blood pressure coefficient of variation，24hSBPCV）、24 h 舒张压变异系数（24 h diastolic blood pressure coefficient of variation，24hDBPCV）水平均显著上升。Logistic 回归分析结果显示，dSBPCV、dDBPCV、24hDBPCV、24hSBPCV 水平升高是高血压合并糖尿病患者发生 LVH 的相关危险因素。本研究结果与该结论一致，证实 BPV 升高与高血压合并糖尿病患者 LVH 的发生密切相关，进一步验证了 BPV 作为靶器官损伤评价因子的临床价值。

本研究存在一定局限性：首先，本研究为单中心横断面研究，整体样本量有限，且分层后部分亚组样本量偏小，可能导致统计效能不足；其次，横断面研究设计无法确立 BPV、HRV 与 LVH 之间的因果关系，相关结论仍有待前瞻性研究进一步验证；此外，本研究仅选用 SDNN 作为 HRV 观测指标，未能全面反映自主神经的功能状态，同时也未对患者降压、降糖药物的使用情况进行分层分析，药物使用差异可能对研究结果产生混杂影响。未来仍需扩大样本量，开展多中心前瞻性研究，并结合更为全面的指标对结论做进一步验证。

综上所述，高血压合并糖尿病患者的 BPV 指标与 HRV 呈显著负相关，BPV 升高和 HRV 降低是高血压合并糖尿病患者发生 LVH 的独立相关因素，临床中联合监测 BPV 与 HRV 有助于早期识别 LVH 高危人群。

[参考文献]

[1] 中华医学会内分泌学分会，中国内分泌代谢病专科联盟. 糖尿病合并高血压患者管理指南[J]. 中华内分泌代谢杂志，2025，41(3)：179-185.
Chinese Endocrine Society，Chinese Endocrine and Metabolic Diseases Specialist Alliance. Hypertension management in patients with diabetes[J]. Chin J Endocrinol Metab，2025，41(3)：179-185.

[2] Narita K，Hoshide S，Kario K. Short- to long-term blood pressure variability：current evidence and new evaluations[J]. Hypertens Res，2023，46(4)：950-958.

[3] Guldan M，Rustamov A，Al-Shiab R，et al. Blood pressure variability and frailty：mechanisms，evidence，and clinical implications[J]. Int Urol Nephrol，2026，58(9)：3705-3723.

[4] Zheng G，Zhou B，Fang Z，et al. Long-term visit-to-visit blood pressure variability and cognitive decline among patients with hypertension：a pooled analysis of 3 national prospective cohorts[J]. J Am Heart Assoc，2024，13(13)：e035504.

[5] Qiao Y，Sun Z，Harshfield E L，et al. Blood pressure variability and outcomes across antihypertensive regimens[J]. Hypertension，2026，83(9)：e27140.

[6] Silva A F R D，Cruz R C，Albuquerque N L S，et al. Blood pressure variability in individuals with diabetes mellitus：a scoping review[J]. Rev Bras Enferm，2022，75(6)：e20210804.

[7] Liu R，Weng Y，Zeng C，et al. Correlation of homocysteine and blood pressure variability with left ventricular hypertrophy in patients with hypertension and carotid atherosclerosis[J]. Altern Ther Health Med，2025，31(1)：396-400.

[8] Gherbesi E，Faggiano A，Sala C，et al. Left ventricular hypertrophy in hypertension：a systematic review and meta-analysis of echocardiographic studies published from 2011 to 2025[J]. J Hypertens，2026，44(10)：1853-1866.

[9] Wareing L，Readman M R，Longo M R，et al. The utility of heartrate and heartrate variability biofeedback for the improvement of interoception across behavioural，physiological and neural outcome measures：a systematic review[J]. Brain Sci，2024，14(6)：579.

[10] 张泽丹, 包维为, 刘东林. 心力衰竭合并心房颤动患者心率变异性与右心功能障碍的相关性[J]. 中国动脉硬化杂志, 2025, 33(10): 885-891.
Zhang Z D, Bao W W, Liu D L. Correlation between heart rate variability and right ventricular dysfunction in patients with heart failure and atrial fibrillation[J]. Chin J Arterioscler, 2025, 33(10): 885-891.

[11] 孙宁玲, 施仲伟, 霍 勇, 等. 高血压合并左心室肥厚诊治专家共识[J]. 中华心血管病杂志(网络版), 2019, 2(1): 1-5.
Sun N L, Shi Z W, Huo Y, et al. Expert consensus on diagnosis and treatment of hypertension complicated with left ventricular hypertrophy[J]. Chin J Cardiol (online), 2019, 2(1): 1-5.

[12] 中国高血压防治指南(2018 年修订版)[J]. 中国心血管杂志, 2019, 24(1): 24-56.
2018 Chinese guidelines for the management of hypertension [J]. Chin J Cardiovasc Med, 2019, 24(1): 24-56.

[13] 蔡璟浩, 周 健.《2021 年美国糖尿病学会糖尿病医学诊疗标准》解读[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2021, 13(2): 13-23.
Cai J H, Zhou J. Interpretation of standards of medical care in diabetes-2021[J]. Chin J Front Med Sci, 2021, 13(2): 13-23.

[14] Balgobin S, Basak S, Teoh C W, et al. Hypertension in diabetes[J]. Pediatr Nephrol, 2024, 39(6): 1739-1758.

[15] 王 乐, 张耀夫, 赵进喜, 等. 基于"三位一体"诊疗模式论治糖尿病合并高血压病经验[J]. 中华中医药杂志, 2024, 39(8): 4156-4159.
Wang L, Zhang Y F, Zhao J X, et al. Experience on the treatment of diabete mellitus with hypertension based on 'trinity' mode of diagnosis and treatment[J]. Chin J Tradt Chin Med Pharm, 2024, 39(8): 4156-4159.

[16] Xu L, Wen X, Yang Y, et al. Trends and comparisons of blood pressure and fasting plasma glucose in patients with hypertension, diabetes, and comorbidity: 4-year follow-up data[J]. Risk Manag Healthc Policy, 2022, 15(1): 2221-2232.

[17] Dordević D B, Koračević G P, Dordević A D, et al. Hypertension and left ventricular hypertrophy[J]. J Hypertens, 2024, 42(9): 1505-1515.

[18] 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.

[19] Vakali E, Rigopoulos D, Dinas P C, et al. Relationship between short- and mid-term glucose variability and blood pressure profile parameters: a scoping review[J]. J Clin Med, 2023, 12(6):2362.

[20] Julario R, Mulia E P B, Rachmi D A, et al. Evaluation of heart rate variability using 24-hour holter electrocardiography in hypertensive patients[J]. J Arrhythm, 2020, 37(1): 157-164.

[21] Yang Z, Liu P, Luo F, et al. Risk factors and heart rate variability associated with left ventricular enlargement in patients with frequent premature ventricular contractions [J]. Cardiology, 2022, 147(4): 421-435.

[22] Grégoire J M, Gilon C, Carlier S, et al. Autonomic nervous system assessment using heart rate variability[J]. Acta Cardiol, 2023, 78(6): 648-662.

[23] 叶维聪, 李周安, 胡荣权, 等. 高血压合并糖尿病患者左心室肥大与血压变异性指标的相关性分析[J]. 中国动脉硬化杂志, 2022, 30(3): 232-236.
Ye W C, Li Z A, Hu R Q, et al. Analysis of the correlation between left ventricular hypertrophy and blood pressure variability index in patients with hypertension complicated with diabetes[J]. Chin J Arterioscler, 2022, 30(3): 232-236.

(此文编辑 文玉珊)