· 论著 ·

危重症患者心率变异性特征及影响因素的临床研究

黄冬雪[1]　张岚[1]　黄雯生[2]　刘海迎[1]　王丹华[1]　沈悦好[1]　申岱[2]　谢克亮[1]

[1]天津医科大学总医院重症医学科，天津 300052；[2]天津医科大学口腔医院麻醉科，天津 300070

通信作者：谢克亮，Email：mzk2011@126.com

【摘要】 目的 评估危重症患者心率变异性（HRV）的特征，探讨其相关影响因素。**方法** 采用横断面调查研究方法，选择 2025 年 3 月至 4 月天津医科大学总医院重症监护病房（ICU）收治的危重症患者作为研究对象。收集患者一般资料，包括人口学特征、疾病因素、药物因素等；采用心电检测设备，分别于日间（08：01 至 20：00）与夜间（20：01 至次日 08：00）采集静息态心电信号，提取并计算 HRV 的时域指标〔正常窦性 R-R 间期标准差（SDNN）、全程相邻 R-R 间期差值均方根（RMSSD）〕、频域指标〔低频带（LF）、高频带（HF）、LF/HF 比值〕及心率减速力（DC）。比较 HRV 的昼夜变化特征；采用多元线性回归法分析 HRV 变化的影响因素。**结果** 最终纳入 210 例危重症患者，年龄偏大〔（62.28±17.11）岁〕，以男性为主〔125 例（59.5%）〕，合并慢性病比例较高〔161 例（76.7%）〕；54.3%（114/210）的患者接受过手术，以术后≤24 h 患者居多〔69 例（32.9%）〕；接受机械通气、携带管路、使用镇静镇痛及血管活性药物比例相对较低〔分别为 39.0%（82/210）、48.1%（101/210）、31.0%（65/210）、32.9%（69/210）、48.6%（102/210）〕。210 例危重症患者 HRV 各项指标均处于较低水平，SDNN 为 14.57（8.91，24.30）ms，RMSDD 为 8.75（6.09，14.94）ms，LF 为 18.47（6.04，68.63）ms^2，HF 为 11.12（4.91，42.55）ms^2，LH/HF 比值为 1.67（0.78，3.59），DC 为 2.80（1.90，4.59）ms，提示危重症患者自主神经功能抑制，且 HRV 各项指标昼夜差异无统计学意义（均 $P>0.05$）。多元回归分析显示，女性〔优势比（*OR*）=−0.162，95% 置信区间（95%*CI*）为 −4.263～−0.358，$P=0.021$〕、存在器官功能衰竭（*OR*=−0.229，95%*CI* 为 −5.520～−1.173，$P=0.003$）、合并 1 种慢性病（*OR*=−0.237，95%*CI* 为 −5.822～−0.877，$P=0.008$）及术后 25～72 h（*OR*=−0.227，95%*CI* 为 −8.254～−1.745，$P=0.003$）是 RMSSD 降低的独立危险因素；存在器官功能衰竭（*OR*=−0.199，95%*CI* 为 −0.494～−0.068，$P=0.010$）及术后 25～72 h（*OR*=−0.011，95%*CI* 为 −0.871～0.233，$P<0.001$）是 logLF 降低的独立危险因素；存在器官功能衰竭（*OR*=−0.192，95%*CI* 为 −0.430～−0.054，$P=0.012$）、合并 1 种慢性病（*OR*=−0.247，95%*CI* 为 −0.515～−0.086，$P=0.006$）及术后 25～72 h（*OR*=−0.219，95%*CI* 为 −0.697～−0.133，$P=0.004$）是 logHF 降低的独立危险因素。**结论** 危重症患者自主神经功能呈广泛抑制，昼夜节律消失；性别、器官功能衰竭状态、合并慢性病数量及手术状态是 HRV 的独立影响因素。

【关键词】 心率变异性；重症监护病房；自主神经系统；昼夜节律

基金项目：天津市医学重点学科建设项目（TJYXZDXK-3-006C）；天津市科技计划项目（25YFKFYS00890）

DOI：10.3760/cma.j.cn121430-20260724-00352

Clinical study on heart rate variability characteristics and associated factors in critically ill patients

Huang Dongxue[1], Zhang Lan[1], Huang Wensheng[2], Liu Haiying[1], Wang Danhua[1], Shen Yuehao[1], Shen Dai[2], Xie Keliang[1]

[1]Department of Critical Care Medicine, Tianjin Medical University General Hospital, Tianjin 300052, China; [2]Department of Anesthesiology, Tianjin Medical University Stomatology Hospital, Tianjin 300070, China

Corresponding author: Xie Keliang, Email: mzk2011@126.com

【Abstract】 Objective To evaluate the characteristics of heart rate variability (HRV) in critically ill patients and to explore its related influencing factors. **Methods** A cross-sectional survey study was conducted. Critically ill patients admitted to the intensive care unit (ICU) of Tianjin Medical University General Hospital between March and April 2025 were enrolled. General information of the patients including demographic characteristics, disease factors, drug factors, etc. was collected. Resting electrocardiographic signals were acquired using electrocardiographic monitoring devices during daytime (08:01–20:00) and nighttime (20:01–08:00 the next day). Time-domain indices of HRV, including standard deviation of all normal sinus R-R intervals (SDNN) and root mean square of successive differences in adjacent R-R intervals (RMSSD), frequency-domain indices, including low frequency (LF), high frequency (HF), and LF/HF ratio, as well as deceleration capacity of heart rate (DC), were extracted and computed. The diurnal variation characteristics of HRV were compared, and multiple linear regression analysis was used to identify influencing factors of HRV changes. **Results** A total of 210 critically ill patients were finally included, predominantly male [125 cases (59.5%)], with a relatively advanced age [(62.28±17.11) years] and a high proportion of comorbidities [161 cases (76.7%)]; 54.3% (114/210) had undergone surgery, with the highest proportion being within 24 hours postoperatively [69 cases (32.9%)]; the proportions of patients receiving mechanical ventilation, having indwelling catheters, or receiving sedatives/analgesics or vasoactive agents were relatively low [they were 39.0% (82/210), 48.1% (101/210), 31.0% (65/210), 32.9% (69/210),

48.6% (102/210), respectively]. All HRV parameters in critically ill patients were at low levels: SDNN was 14.57 (8.91, 24.30) ms, RMSSD was 8.75 (6.09, 14.94) ms, LF was 18.47 (6.04, 68.63) ms^2, HF was 11.12 (4.91, 42.55) ms^2, the LF/HF ratio was 1.67 (0.78, 3.59), and DC was 2.80 (1.90, 4.59) ms, indicating suppressed autonomic nervous function in critically ill patients, without statistically significant circadian differences in any HRV index (all P>0.05). Multiple linear regression analysis revealed that female [odds ratio (*OR*)=−0.162, 95% confidence interval (95%*CI*) was −4.263 to −0.358, P=0.021], suffering from organ failure (*OR*=−0.229, 95%*CI* was −5.520 to −1.173, P=0.003), presence of one comorbidity (*OR*=−0.237, 95%*CI* was −5.822 to −0.877, P=0.008), and postoperative 25−72 hours (*OR*=−0.227, 95%*CI* was −8.254 to −1.745, P=0.003) were independent risk factors for decreased RMSSD. Suffering from organ failure (*OR*=−0.199, 95%*CI* was −0.494 to −0.068, P=0.010) and postoperative 25−72 hours (*OR*=−0.011, 95%*CI* was −0.871 to −0.233, P<0.001) were independent risk factors for decreased logLF. Suffering from organ failure (*OR*=−0.192, 95%*CI* was −0.430 to −0.054, P=0.012), presence of one comorbidity (*OR*=−0.247, 95%*CI* was −0.515 to −0.086, P=0.006), and postoperative 25−72 hours (*OR*=−0.219, 95%*CI* was −0.697 to −0.133, P=0.004) were independent risk factors for decreased logHF. **Conclusions**　Autonomic nervous function in critically ill patients is extensively suppressed, with loss of circadian rhythm. Gender, organ failure status, number of comorbid chronic diseases, and surgical status are independent factors influencing HRV.

【Key words】 Heart rate variability; Intensive care unit; Autonomic nervous system; Circadian rhythm

Fund program: Tianjin Key Medical Discipline Construction Fund (TJYXZDXK-3-006C); Tianjin Science and Technology Plan Project (25YFKFYS00890)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20260724-00352

自主神经系统（autonomic nervous system，ANS）由交感神经与以迷走神经为核心的副交感神经共同构成，是维持人体内环境稳定、调控全身器官功能及昼夜生理节律的关键系统[1]。生理状态下，健康人群存在规律的昼夜节律：日间交感神经活性适应性增强，以满足机体活动、外界应激等生理需求；夜间睡眠时，迷走神经活性增加，交感神经张力回落，有助于放松和身体恢复。二者动态平衡，从而保障机体正常运转[2]。

心率变异性（heart rate variability，HRV）是指连续心搏之间时间间隔的变化，分析方法主要包括时域、频域、非线性指标等。作为评估心脏自主神经功能的非侵入性指标，HRV 可定量反映交感与迷走神经活性及其平衡协调状况[3-4]，被广泛应用于心血管系统[5-6]、围手术期[7]、健康管理[8]等多个领域。已有研究证实，持续应激、睡眠剥夺、昼夜环境紊乱等因素可破坏交感-迷走神经昼夜波动规律，造成自主神经节律消失[9]。

重症监护病房（intensive care unit，ICU）具有 24 h 持续光照、仪器报警不断、诊疗操作不分昼夜等特点[10]，危重症患者同时合并创伤、感染、疼痛等多重应激刺激，正常睡眠周期被严重破坏，极易出现自主神经功能及昼夜节律异常。研究证实，危重症患者存在睡眠周期紊乱[11]，但自主神经昼夜节律是否同步改变尚不清楚。本研究假设危重症患者自主神经昼夜节律消失，且这一改变与疾病严重程度及治疗因素相关，拟评估危重症患者 HRV 各项指标，旨在明确危重症患者自主神经功能特征并识别影响因素，以期通过 HRV 动态监测指导个体化治疗与照护。

1　资料与方法

1.1　研究对象：采用横断面调查研究方法，选择 2025 年 3 月至 4 月天津医科大学总医院 ICU 收治的危重症患者作为研究对象。

1.1.1　纳入标准：① 年龄≥18 周岁；② 窦性心律，无持续性心律失常；③ ICU 住院时间≥24 h，可完成不同时段的 HRV 监测；④ 患者及家属知情同意，自愿参与本研究。

1.1.2　排除标准：① 植入心脏起搏器、埋藏式心律转复除颤器；② 既往有明确精神疾病、器质性脑部病变病史；③ 入院前长期服用 β 受体阻滞剂、抗精神病、镇静催眠等影响自主神经及中枢神经功能的药物；④ 监测期间病情急剧恶化、转出 ICU、死亡或无法配合完成监测。

1.2　研究内容：① HRV 昼夜节律特征比较，采用配对 t 检验进行样本量估算，运用 G*Power 软件，并设 α=0.05，Power=0.80，中等效应量 dz=0.5，计算得出最小样本量为 34 例，最终 55 例患者完成昼夜 HRV 配对监测；② 危重症患者 HRV 影响因素分析，依据 Kendall 原则，多元线性回归样本量取自变量数目的 10～20 倍，本研究共纳入 10 个自变量，并考虑 10% 的无效数据，估算所需样本量为 112～223 例，最终纳入 210 例受试者。

1.3　伦理学：本研究符合医学伦理学标准，并通过天津医科大学总医院医学伦理委员会批准（审批号：IRB2025-YX-059-02），所有受试者或其法定代理人均已签署书面知情同意书。

1.4　观察指标及方法

1.4.1　HRV：采用 Prince 180D 心电监测设备（深圳市科瑞康实业有限公司）采集静息态心电信号，提取并计算 HRV。目前针对非线性指标的生理意义尚存争议[12]，本研究选取经典 HRV 时域指标，包括正常窦性 R-R 间期标准差（standard deviation of all normal sinus R-R intervals，SDNN）、全程相邻 R-R 间期差值均方根（root mean square of successive differences in adjacent R-R intervals，RMSSD）；频域指标，包括低频带（low frequency，LF）、高频带（high frequency，HF）及 LF/HF 比值，LF 和 HF 以归一化单位表示，即 LFn 和 HFn；心率减速力（deceleration capacity of rate，DC）。其中，SDNN 用于反映 HRV 的总体变化及 ANS 的整体活动性；RMSSD、HF、HFn、DC 用于反映迷走神经活性；LF、LFn 用于反映交感神经活性；LF/HF 比值用于评价交感-迷走神经平衡状态。

1.4.2　一般资料：基于文献回顾与 ICU 临床实践，自行设计调查表，收集可能影响 HRV 的变量。调查内容：① 人口学特征，包括年龄、性别；② 疾病因素，包括器官功能衰竭状态、合并慢性病数量、手术状态、呼吸方式、是否携带管路；③ 药物因素，包括是否使用镇静药物、镇痛药物及血管活性药物。所有资料通过查阅电子病历及护理记录获取。

1.5　HRV 指标的监测方法

采用快速心电监测设备（Prince 180D）采集患者心电信号并储存下载，HRV 分析信号的处理包括 RR 间期的提取、截取和分析。在 MATLAB R2018b 软件中将原始心电信号转化为 RR 间期提取，剔除异搏，去除干扰信号。对提取完成的 RR 期间进行截取时，各时段的信号截取 5 min RR 间期并保存，且日间与夜间数据分别保存。随后将得到的各个 5 min RR 间期放在 MATLAB R2018b 软件中进行计算和分析，得到各个时段的所有 HRV 分析指标，最后进行统计分析。在数据采集前 10 min 及采集期间暂停吸痰、翻身、穿刺等非紧急诊疗操作，保持病房环境安静，减少声光干扰，确保患者处于静息状态。

所有患者截取信号质量良好、连续 5 min 的平稳心电信号进行 HRV 参数分析。参照既往 ICU 昼夜节律相关临床研究[13]及临床工作常规，以 08：01 至 20：00 作为日间时段，以 20：01 至次日 08：00 作为夜间时段。选取 55 例具备同日昼夜两段有效信号患者的数据，用于昼夜节律特征分析。

1.6　统计学方法

全部数据均使用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析。对各组数据进行正态性检验及方差齐性检验，符合正态分布的计量资料以均数 ± 标准差（$\bar{x}\pm s$）表示，配对数据比较采用配对样本 t 检验；若不符合正态分布，则以中位数（四分位数）〔$M(Q_1, Q_3)$〕表示，采用 Wilcoxon 符号秩检验进行昼夜差异比较。HRV 频域指标数据较离散，故对其进行常规的对数变换，将 HF、LF 分别转化为 LogHF、LogLF。单因素分析中，连续变量与 HRV 各项指标的相关性采用 Spearman 相关性分析，分类变量采用非参数检验。将单因素分析中有统计学意义的变量及既往文献证实与 HRV 相关的变量共同作为自变量，采用多元线性回归模型探讨 HRV 的独立影响因素。所有结果均采用双侧检验，检验水准 α 值取 0.05。

2　结　果

2.1　一般资料（表 1）：最终共纳入 210 例危重症患者，年龄偏大，以男性为主，合并慢性病比例较高；54.3%（114/210）的患者接受过手术，以术后≤24 h 患者居多；接受机械通气、携带管路、使用镇静镇痛及血管活性药物比例相对较低。

表 1　210 例危重症患者一般资料

指标	数值	指标	数值	指标	数值
年龄（岁，$\bar{x}\pm s$）	62.28±17.11	手术状态〔例（%）〕		使用镇静药物〔例（%）〕	
性别〔例（%）〕		未手术	96（45.7）	是	65（31.0）
男性	125（59.5）	术后≤24 h	69（32.9）	否	145（69.0）
女性	85（40.5）	术后 25～72 h	24（11.4）	使用镇痛药物〔例（%）〕	
器官功能衰竭状态〔例（%）〕		术后＞72 h	21（10.0）	是	69（32.9）
有	75（35.7）	呼吸方式〔例（%）〕		否	141（67.1）
无	135（64.3）	自主呼吸	128（61.0）	使用血管活性药物〔例（%）〕	
合并慢性病数量〔例（%）〕		机械通气	82（39.0）	是	102（48.6）
0 种	49（23.3）	携带管路〔例（%）〕		否	108（51.4）
1 种	91（43.3）	是	101（48.1）		
2 种	62（29.6）	否	109（51.9）		
3 种	8（3.8）				

2.2　危重症患者 HRV 特征

2.2.1　危重症患者 HRV 的一般特征：纳入的 210 例危重症患者 HRV 各项指标整体均呈现低水平状态。SDNN 为 14.57（8.91，24.30）ms，RMSDD 为 8.75（6.09，14.94）ms，LF 为 18.47（6.04，68.63）ms^2，HF 为 11.12（4.91，42.55）ms^2，LH/HF 比值为 1.67（0.78，3.59），DC 为 2.80（1.90，4.59）ms，提示危重症患者自主神经功能抑制。

2.2.2　危重症患者 HRV 的昼夜节律变化特征：选择同一天内同时完成日间与夜间两段 HRV 测量的危重症患者 55 例，分析患者 HRV 昼夜节律变化。这部分患者的一般资料与其他患者差异无统计学意义（均 $P>0.05$；表 2），提示组间基线特征一致。对 55 例患者日间与夜间 HRV 各指标进行组间比较，结果显示，SDNN、RMSSD、logLF、logHF、logTP、LF/HF 比值、LFn、HFn、DC 在日间与夜间的差异均无统计学意义（均 $P>0.05$；表 3）。

2.3　危重症患者 HRV 影响因素的单因素分析和多元线性回归分析

2.3.1　单因素分析（表 4～5）：在连续变量中，危重症患者年龄对 RMSSD 具有显著影响（$P<0.05$）；在分类变量中，危重症患者器官功能衰竭状态对 RMSSD 具有显著影响，合并慢性病数量对 RMSSD、logHF、DC 具有显著影响，手术状态对 SDNN、RMSSD、logLF、logHF、DC 具有显著影响（均 $P<0.05$）。

表 4　危重症患者年龄与 HRV 各项指标的相关性

相关性	SDNN	RMSSD	logLF	logHF
r 值	−0.060	−0137	−0.092	−0.120
P 值	0.391	0.048	0.185	0.083
相关性	LF/HF 比值	LFn	HFn	DC
r 值	−0.007	−0.007	−0.007	−0.082
P 值	0.923	0.923	0.923	0.238

注：HRV 为心率变异性，SDNN 为正常窦性 R-R 间期标准差，RMSSD 为全程相邻 R-R 间期差值均方根，LF 为低频带，HF 为高频带，LFn 为归一化低频带，HFn 为归一化高频带，DC 为心率减速力

表 2　是否同一天内同时完成日间与夜间两段 HRV 测量的危重症患者一般资料比较

指标	完成组（55 例）	未完成组（155 例）	统计量值	P 值	指标	完成组（55 例）	未完成组（155 例）	统计量值	P 值
年龄〔岁，$M(Q_1, Q_3)$〕	68.00（50.00，74.00）	67.50（52.00，74.00）	$Z=-0.885$	0.376	呼吸方式〔例（%）〕			$\chi^2=3.158$	0.076
性别〔例（%）〕			$\chi^2=1.429$	0.232	自主呼吸	28（50.9）	100（64.5）		
男性	29（52.7）	96（61.9）			机械通气	27（49.1）	55（35.5）		
女性	26（47.3）	59（38.1）			携带管路〔例（%）〕			$\chi^2=2.041$	0.161
器官功能衰竭状态〔例（%）〕			$\chi^2=0.596$	0.440	是	31（56.4）	70（45.2）		
有	22（40.0）	53（34.2）			否	24（43.6）	85（54.8）		
无	33（60.0）	102（65.8）			使用镇静药物〔例（%）〕			$\chi^2=0.110$	0.740
合并慢性病数量〔例（%）〕			$\chi^2=-1.430$	0.153	是	18（32.7）	47（30.3）		
0 种	6（10.9）	43（27.7）			否	37（67.3）	108（69.7）		
1 种	31（56.4）	60（38.7）			使用镇痛药物〔例（%）〕			$\chi^2=0.415$	0.519
2 种	14（25.4）	48（31.0）			是	20（36.4）	49（31.6）		
3 种	4（7.3）	4（2.6）			否	35（63.6）	106（68.4）		
手术状态〔例（%）〕			$\chi^2=-0.566$	0.571	使用血管活性药物〔例（%）〕			$\chi^2=0.290$	0.590
未手术	26（47.3）	70（45.2）			是	25（45.5）	77（49.7）		
术后≤24 h	13（23.6）	56（36.1）			否	30（54.5）	78（50.3）		
术后 25～72 h	7（12.7）	17（11.0）							
术后＞72 h	9（16.4）	12（7.7）							

注：HRV 为心率变异性

表 3　55 例同一天内同时完成日间与夜间两段 HRV 测量的危重症患者昼夜 HRV 指标比较

时间	SDNN（ms，$\bar{x}\pm s$）	RMSSD（ms，$\bar{x}\pm s$）	logLF（$\bar{x}\pm s$）	logHF（$\bar{x}\pm s$）	LF/HF 比值〔$M(Q_1, Q_3)$〕	LFn（ms^2，$\bar{x}\pm s$）	HFn（ms^2，$\bar{x}\pm s$）	DC（ms，$\bar{x}\pm s$）
日间	17.13±12.75	10.12±6.24	1.24±0.63	1.05±0.60	1.89（0.63，3.64）	58.60±23.82	41.40±23.82	3.27±2.12
夜间	20.27±14.35	12.94±8.59	1.20±0.64	1.23±0.62	1.89（0.66，3.48）	61.99±19.30	38.01±19.30	3.85±2.53
统计量值	$t=-1.136$	$t=-1.891$	$t=-1.597$	$t=-1.152$	$Z=0.176$	$t=-0.793$	$t=0.793$	$t=-1.190$
P 值	0.261	0.064	0.116	0.254	0.860	0.431	0.431	0.239

注：HRV 为心率变异性，SDNN 为正常窦性 R-R 间期标准差，RMSSD 为全程相邻 R-R 间期差值均方根，LF 为低频带，HF 为高频带，LFn 为归一化低频带，HFn 为归一化高频带，DC 为心率减速力

表 5　危重症患者 HRV 影响因素的单因素分析〔$M(Q_1, Q_3)$〕

性别	SDNN（ms）	RMSSD（ms）	LogLF	LogHF	LF/HF 比值	LFn（ms^2）	HFn（ms^2）	DC（ms）
男性	15.64（8.95，24.42）	8.92（5.92，16.88）	1.26（0.85，1.84）	1.03（0.73，1.69）	1.55（0.74，3.12）	60.76（42.66，75.72）	39.24（24.28，57.34）	2.85（1.92，5.34）
女性	12.85（8.66，23.23）	8.54（6.63，12.37）	1.27（0.75，1.84）	1.05（0.66，1.49）	1.84（0.82，3.87）	64.80（44.95，79.48）	35.20（20.52，55.05）	2.72（1.80，4.35）
Z 值	−0.334	−0.839	−0.416	−0.693	−0.836	−0.836	−0.836	−0.633
P 值	0.738	0.402	0.677	0.488	0.403	0.403	0.403	0.527
器官功能衰竭	SDNN（ms）	RMSSD（ms）	LogLF	LogHF	LF/HF 比值	LFn（ms^2）	HFn（ms^2）	DC（ms）
有	11.65（8.29，18.87）	7.56（4.88，12.91）	1.17（0.75，1.72）	0.93（0.77，1.34）	1.60（0.60，4.35）	61.47（37.57，81.32）	38.53（18.68，62.43）	2.40（1.80，4.33）
无	16.29（9.50，25.60）	9.05（6.53，16.39）	1.38（0.86，1.95）	1.16（0.72，1.70）	1.76（0.85，3.25）	63.79（45.83，76.49）	36.21（23.51，54.17）	3.01（1.95，5.12）
Z 值	−1.774	−2.364	−1.964	−1.939	−0.141	−0.141	−0.141	−1.431
P 值	0.076	0.018	0.050	0.053	0.888	0.888	0.888	0.152
合并慢性病数量	SDNN（ms）	RMSSD（ms）	LogLF	LogHF	LF/HF 比值	LFn（ms^2）	HFn（ms^2）	DC（ms）
0 种	18.78（9.90，30.11）	9.81（7.36，19.52）	1.48（0.82，2.15）	1.36（0.93，1.93）	1.55（0.72，3.25）	60.76（41.92，76.46）	39.24（23.54，58.08）	3.80（2.34，7.33）
1 种	12.04（8.47，24.07）	8.05（5.46，12.03）	1.22（0.78，1.82）	0.94（0.64，1.49）	1.83（0.80，3.28）	64.66（44.29，76.62）	35.34（23.38，55.71）	2.47（1.74，4.35）
2 种	15.58（8.76，22.51）	8.35（6.77，12.48）	1.23（0.80，1.78）	1.00（0.75，1.37）	1.60（0.71，3.46）	61.49（41.42，77.55）	38.51（22.45，58.58）	2.70（1.90，4.11）
3 种	11.40（7.36，22.95）	8.07（4.66，10.65）	1.14（0.67，1.44）	0.81（0.23，1.28）	3.79（0.58，4.97）	79.08（29.18，83.12）	20.92（16.88，70.82）	2.18（1.24，4.01）
H 值	5.951	8.370	5.524	11.278	0.948	0.948	0.948	9.626
P 值	0.114	0.039	0.137	0.010	0.814	0.814	0.814	0.022
手术状态	SDNN（ms）	RMSSD（ms）	LogLF	LogHF	LF/HF 比值	LFn（ms^2）	HFn（ms^2）	DC（ms）
未手术	14.73（8.49，24.53）	9.24（6.77，19.17）	1.35（0.78，1.90）	1.18（0.76，1.73）	1.57（0.68，3.19）	61.11（40.46，76.14）	38.89（23.86，59.54）	3.24（1.98，5.43）
术后≤24 h	16.23（9.83，26.47）	8.92（6.33，15.76）	1.38（0.97，1.89）	1.12（0.76，1.64）	1.94（0.87，3.64）	65.94（46.45，78.39）	34.06（21.61，53.55）	2.86（2.13，5.20）
术后 25～72 h	9.99（5.98，14.41）	6.71（4.42，9.83）	0.80（0.52，1.32）	0.73（0.47，1.25）	1.11（0.56，1.82）	52.54（35.31，64.69）	47.46（35.46，64.69）	1.77（1.41，3.39）
术后＞72 h	12.85（9.13，19.17）	8.23（5.59，13.41）	1.18（0.93，1.79）	0.85（0.48，1.33）	2.79（1.21，4.73）	73.64（53.58，82.50）	26.36（17.50，46.42）	2.01（1.66，3.60）
H 值	10.235	8.208	9.749	9.465	7.444	7.444	7.444	11.998
P 值	0.017	0.042	0.021	0.024	0.059	0.059	0.059	0.007

注：HRV 为心率变异性，SDNN 为正常窦性 R-R 间期标准差，RMSSD 为全程相邻 R-R 间期差值均方根，LF 为低频带，HF 为高频带，LFn 为归一化低频带，HFn 为归一化高频带，DC 为心率减速力

单因素分析显示，年龄仅对 RMSSD 具有显著影响；性别对 HRV 各项指标的影响未呈现统计学意义。然而既往研究提示，年龄和性别均为 HRV 的重要影响因素[14-15]。因此，综合单因素分析结果与文献证据，最终将年龄、性别、器官功能衰竭状态、合并慢性病数量及手术状态作为自变量，纳入多元线性回归模型。

针对自变量中的分类变量进行赋值。性别："男性"为 0，"女性"为 1；手术状态："无手术"为 0，"术后≤24 h"为 1，"术后 25～72 h"为 2，"术后＞72 h"为 3；合并慢性病数量："0 种"为 0，"1 种"为 1，"2 种"为 2，"3 种"为 3；器官功能衰竭状态："无"为 0，"有"为 1。各回归模型自变量的方差膨胀因子为 1.105～1.929，提示不存在多重共线性。

多元回归分析显示（表 6），女性、存在器官功能衰竭、合并 1 种慢性病及术后 25～72 h 是 RMSSD 降低的独立危险因素（RMSSD 模型：R^2=0.129，F=3.302，P<0.001）；存在器官功能衰竭及术后 25～72 h 是 logLF 降低的独立危险因素（logLF 模型：R^2=0.104，F=2.579，P=0.008）；存在器官功能衰竭、合并 1 种慢性病及术后 25～72 h 是 logHF 降低的独立危险因素（logHF 模型：R^2=0.120，F=3.036，P=0.002）。SDNN 和 DC 的回归模型拟合优度过低，且无统计学意义。

表 6　危重症患者 HRV 影响因素的多元线性回归分析

因变量	自变量	*B* 值（95%*CI*）	*t* 值	*P* 值	因变量	自变量	*B* 值（95%*CI*）	*t* 值	*P* 值
RMSSD	常数项	16.621（12.901～20.342）	8.810	＜0.001		手术状态			
	高龄	0.001（−0.063～0.063）	−0.007	0.994		未手术	参照		
	女性	−2.311（−4.263～−0.358）	−2.333	0.021		术后＜24 h	−0.061（−0.283～0.162）	−0.537	0.592
	器官功能衰竭	−3.346（−5.520～−1.173）	−3.036	0.003		术后 25～72 h	−0.552（−0.871～−0.233）	−3.414	＜0.001
	合并慢性病数量					术后＞72 h	−0.025（−0.345～0.295）	−0.156	0.876
	0 种	参照			logHF	常数项	1.537（1.124～1.859）	9.400	＜0.001
	1 种	−3.350（−5.822～−0.877）	−2.671	0.008		高龄	0.001（−0.005～0.006）	0.242	0.809
	2 种	−1.201（−3.977～1.574）	−0.854	0.394		女性	−0.120（−0.290～0.049）	−1.403	0.162
	3 种	−3.525（−8.860～1.810）	−1.303	0.194		器官功能衰竭	−0.242（−0.430～−0.054）	−2.535	0.012
	手术状态					合并慢性病数量			
	未手术	参照				0 种	参照		
	术后＜24 h	−1.953（−4.227～0.321）	−1.649	0.092		1 种	−0.301（−0.515～−0.086）	−2.767	0.006
	术后 25～72 h	−5.000（−8.254～−1.745）	−3.029	0.003		2 种	−0.195（−0.435～0.046）	−1.598	0.112
	术后＞72 h	−1.959（−5.222～1.304）	−1.184	0.238		3 种	−0.459（−0.922～0.003）	−1.959	0.051
logLF	常数项	1.690（1.325～2.054）	9.139	＜0.001		手术状态			
	高龄	0.001（−0.006～0.007）	0.113	0.910		未手术	参照		
	女性	−0.075（−0.266～0.116）	−0.772	0.441		术后＜24 h	−0.125（−0.322～0.072）	−1.248	0.214
	器官功能衰竭	−0.281（−0.494～−0.068）	−2.600	0.010		术后 25～72 h	−0.415（−0.697～−0.133）	−2.902	0.004
	合并慢性病数量					术后＞72 h	−0.241（−0.523～0.042）	−1.679	0.095
	0 种	参照							
	1 种	−0.240（−0.483～0.002）	−1.956	0.052					
	2 种	−0.155（−0.427～0.117）	−1.123	0.263					
	3 种	−0.295（−0.818～0.228）	−1.113	0.267					

注：HRV 为心率变异性，RMSSD 为全程相邻 R-R 间期差值均方根，LF 为低频带，HF 为高频带，95%*CI* 为 95% 置信区间；*B* 值为未标准化回归系数，负值表示自变量与相应因变量降低相关，正值表示自变量与相应因变量升高相关

3　讨　论

健康人群 SDNN、RMSSD、LF、HF、LF/HF 比值分别为（67.3±25.7）ms、（46.8±29.4）ms、（1 107.7±835.1）ms^2、（484.7±466.9）ms^2、3.6±3.1[16]，且迷走神经张力于夜间占优，表现为 RMSSD、HF 等指标夜间升高[17]。然而，本研究中危重症患者 HRV 各项指标均低于上述水平，提示其自主神经功能存在广泛抑制；同时，患者 HRV 指标昼夜差异无统计学意义，表明其自主神经生理性节律已发生紊乱。分析原因：在危重症状态下，全身炎症反应释放大量促炎细胞因子，氧化应激增强，神经内分泌系统紊乱，共同作用于心脏自主神经调节中枢与外周通路，导致交感神经过度激活而迷走神经活性受抑[18]，进而 HRV 各项指标全面降低；同时 ICU 持续光照[19]、夜间护理操作和仪器噪声[20]等环境因素抑制了迷走神经的张力，打破了睡眠连续性，从而破坏了昼夜节律平衡。因此，临床实践中可实施循环光照、降低夜间噪音、集中护理操作、优化镇静镇痛管理等多维协同干预措施，以期改善患者预后。

已经有研究证实，年龄和性别是 HRV 的影响因素[15]。随着年龄增长，自主神经活性与调节能力均随之减弱。女性静息心率高于男性，较短的 RR 间期使得同等比例的心率变异绝对差值自然缩小，导致其基线水平低于男性[21]；同时，女性体内雌激素对自主神经受体敏感性及胆碱能传导通路的调节也与男性存在差异[22]。但本研究中多元线性回归分析显示，女性是 RMSSD 降低的独立危险因素，而年龄并未进入回归方程。分析原因：可能是与健康人群相比，危重症患者病情危重，急性疾病及器官功能衰竭对 ANS 的影响远大于增龄所致的生理性衰退。因此，医护人员在监测危重症患者 HRV 时，应重点关注高龄和女性患者，同时要认识到性别对 HRV 指标的生理性影响，提升评估的可靠性。

本研究结果显示，合并 1 种慢性病对 HRV 存在显著影响，而合并 2 种及 3 种慢性病患者 HRV 各项指标呈波动性下降趋势，但差异未达到统计学意义，与 Kwon 等[23]研究结果一致。危重症患者合并的慢性病主要是高血压、糖尿病、冠心病等。高血压作为最常见的慢性共病，可通过动脉内皮功能障碍加速动脉粥样硬化，进而损害自主神经中枢与外周反射调节通路[24]。随着糖尿病的病程延长，长期高血糖、氧化应激及神经缺血直接损伤迷走神经髓鞘和窦房结功能，从而降低 HRV 相关指标[25]。冠心病导致的心肌缺血及冠状动脉粥样硬化，可导致心脏传入传

出神经纤维受损，干扰交感-迷走平衡，进一步降低 HRV 相关指标。上述疾病均足以对自主神经功能产生显著的负向影响。分析合并 2 种及 3 种慢性病在多元线性回归分析中尚未达到统计学意义的原因：一方面，多种共病患者往往病程更长、疾病更重，从而部分抵消了疾病叠加的负向影响。危重症患者大多存在慢性病，加之脓毒症、机械通气、使用镇静药物等因素，使自主神经功能失衡更为严重。另一方面，亚组样本量较少（合并 3 种慢性病者仅 8 例）可能降低了统计检验效能。临床工作中，医护人员应持续监测合并多种慢性病患者 HRV 的动态变化，优化镇静镇痛策略、维持血流动力学稳定，以减缓多病共存所致的自主神经功能进行性恶化。

本研究多元线性回归分析显示，在校正了年龄、性别、合并慢性病数量、手术状态等混杂因素后，器官功能衰竭仍是 RMSSD、logLF、logHF 的独立负向影响因素，表明器官功能衰竭可显著抑制自主神经调节功能。既往研究亦显示，HRV 相关指标与序贯器官衰竭评分（Sequential Organ Failure Assessment，SOFA）呈负相关，并与不良预后相关[26-27]。分析原因：器官功能衰竭常继发于严重感染或休克，大量促炎因子释放激活交感-肾上腺髓质系统，并抑制迷走传出活性；同时，呼吸、循环或肾功能衰竭直接破坏机体内环境稳态，酸碱失衡及电解质紊乱可改变心肌细胞膜的离子通道特性，从而进一步抑制自主神经功能。临床工作中，对于器官功能衰竭患者应加强 HRV 动态监测，若 RMSSD 及 HF 进行性下降，则需警惕自主神经功能失代偿，及时协同调整循环支持与抗感染策略。

本研究多元线性回归分析显示，以未手术者为参照，仅术后 25～72 h 是 RMSSD、logLF、logHF 下降的独立危险因素。Cheng 等[28]研究显示，患者术后第 1 天 HRV 指标较术前显著下降，但第 2～3 天即恢复至基线水平。分析原因：可能是患者术后 24 h 内仍受麻醉、镇痛镇静药物影响，此类药物可提升迷走神经张力，改善自主神经活动性的均衡性[29-30]，具有一定的保护作用；术后 25～72 h，随着药物作用逐渐减退，手术创伤引发的组织损伤、炎症介质大量释放及疼痛刺激，可以抑制自主神经活性[28]；术后＞72 h 患者 HRV 各项指标虽低于未手术组，但差异并无统计学意义，提示自主神经功能逐步恢复。本研究中危重症患者基础疾病较严重，整体恢复缓慢，自主神经功能可能尚未完全恢复至术前水平。因此，医护人员在临床实践中应充分重视术后不同时间窗对自主神经功能的动态影响，实施基于时间节点的分层评估与个体化监测，加强对该阶段自主神经功能异常的早期识别，及时预警并防范相关并发症的发生。

本研究存在以下局限性：第一，本研究为单中心横断面设计，且未设立健康对照组，因此无法量化 ICU 中机械通气患者 HRV 与健康人群的差异，也难以推断 HRV 与不良预后的因果关系；第二，昼夜节律分析中仅 55 例患者具备完整的同日昼夜 HRV 信号，该亚组样本量偏少，可能降低了统计效能，尽管亚组基线资料与其他患者具有可比性，但亚组本质上仅代表能获取平稳信号的相对稳定患者，结论外推性需谨慎对待；第三，本研究为单中心研究，回归模型决定系数偏低，可能存在其他未测量的混杂因素，影响 HRV 的评估结果。未来可开展多中心前瞻性队列研究，纳入健康对照人群，系统评价 ICU 中机械通气患者 HRV 与健康人群的差异，并通过连续多日动态 HRV 监测追踪其演变轨迹与预后的关联，进一步明确因果关系。已有研究显示，五行音乐[31]、针刺经穴[32]等疗法可有效调节自主神经张力，辅助节律恢复，未来可进一步开展与中医疗法相关的随机对照试验，探索其对 ICU 中机械通气患者 HRV 水平及昼夜节律恢复的作用，以形成中医视角的自主神经功能管理策略。

4　结　论

综上所述，危重症患者 HRV 呈广泛抑制状态，且昼夜节律消失，迷走神经张力持续低水平，机体呈交感相对主导的 ANS 失衡；女性、存在器官功能衰竭、合并 1 种慢性病及术后 25～72 h 是 RMSSD、logLF、logHF 的独立负向影响因素。针对 ICU 中的危重症患者，临床上应重点监测 HRV 的动态变化，对高危人群加强评估，提供炎症控制、优化镇静镇痛、循环光照等针对性干预措施，以期恢复昼夜生理节律，改善预后。

利益冲突　所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明　黄冬雪：酝酿和设计实验、实施研究、采集数据、分析/解释数据、起草文章、对文章的知识性内容作批评性审阅；张岚：采集数据、分析/解释数据、起草文章、对文章的知识性内容作批评性审阅、统计分析；黄雯生：酝酿和设计实验、采集数据、分析/解释数据、对文章的知识性内容作批评性审阅；刘海迎：对文章的知识性内容作批评性审阅，获取研究经费，行政、技术或材料支持，指导，支持性贡献；王丹华：采集数据、统计分析、支持性贡献；沈悦好：对文章的知识性内容作批评性审阅，行政、技术或材料支持，指导，支持性贡献；申岱：酝酿和设计实验、对文章的知识性内

容作批评性审阅、指导、支持性贡献；谢克亮：酝酿和设计实验，对文章的知识性内容作批评性审阅，获取研究经费，行政、技术或材料支持，指导，支持性贡献

参考文献

[1] Wang TT, Tufenkjian A, Ajijola OA, et al. Molecular and functional diversity of the autonomic nervous system[J]. Nat Rev Neurosci, 2025, 26(10): 607-622. DOI: 10.1038/s41583-025-00941-2.

[2] Begemann K, Neumann AM, Oster H. Regulation and function of extra-SCN circadian oscillators in the brain[J]. Acta Physiol (Oxf), 2020, 229(1): e13446. DOI: 10.1111/apha.13446.

[3] Sundas A, Contreras I, Navarro-Otano J, et al. Heart rate variability over the decades: a scoping review[J]. PeerJ, 2025, 13: e19347. DOI: 10.7717/peerj.19347.

[4] Parikh A, Lewis G, GholamHosseini H, et al. Evaluation of in-ear and fingertip-based photoplethysmography sensors for measuring cardiac vagal tone relevant heart rate variability parameters[J]. Sensors (Basel), 2025, 25(5): 1485. DOI: 10.3390/s25051485.

[5] Khan MS, Javaid SS, Mentz RJ, et al. Heart rate variability in patients with cardiovascular diseases[J]. Prog Cardiovasc Dis, 2025, 91: 67-79. DOI: 10.1016/j.pcad.2025.06.003.

[6] Yu Y, Guo WF, Shen ZW, et al. Heart rate variability, unstable coronary plaques, and cardiovascular outcomes[J]. Eur Heart J, 2026: ehag071. DOI: 10.1093/eurheartj/ehag071.

[7] Roche F, Charier D, Pichot V. Heart rate deceleration capacity as a marker of perioperative risk: identifying relevant patient phenotypes and surgical procedures[J]. Br J Anaesth, 2024, 133(4): 734-737. DOI: 10.1016/j.bja.2024.07.013.

[8] Olivieri F, Biscetti L, Pimpini L, et al. Heart rate variability and autonomic nervous system imbalance: potential biomarkers and detectable hallmarks of aging and inflammaging[J]. Ageing Res Rev, 2024, 101: 102521. DOI: 10.1016/j.arr.2024.102521.

[9] Wang YQ, Ma WX, Kong LX, et al. Ambient chemical and physical approaches for the modulation of sleep and wakefulness[J]. Sleep Med Rev, 2025, 79: 102015. DOI: 10.1016/j.smrv.2024.102015.

[10] Jonescu EE, Litton E, Farrell B. Investigating the interplay of thermal, lighting, and acoustics in intensive care for enhanced patient well-being and clinical outcomes[J]. HERD, 2025, 18(2): 362-377. DOI: 10.1177/19375867251317235.

[11] Pisani MA. Sleep and circadian-related outcomes after critical illness[J]. Semin Respir Crit Care Med, 2025, 46(2): 179-188. DOI: 10.1055/a-2531-1137.

[12] Deka B, Deka D. Nonlinear analysis of heart rate variability signals in meditative state: a review and perspective[J]. Biomed Eng Online, 2023, 22(1): 35. DOI: 10.1186/s12938-023-01100-3.

[13] Ganglberger W, Krishnamurthy PV, Quadri SA, et al. Sleep staging in the ICU with heart rate variability and breathing signals. An exploratory cross-sectional study using deep neural networks[J]. Front Netw Physiol, 2023, 3: 1120390. DOI: 10.3389/fnetp.2023.1120390.

[14] Brinth LS, Jørgensen T, Mehlsen J, et al. Normative values of short-term heart rate variability in a cross-sectional study of a Danish population. The DanFunD study[J]. Scand J Public Health, 2024, 52(1): 48-57. DOI: 10.1177/14034948221124020.

[15] 郭宇航，孙浩冉，王琢，等. 长春市某老年群体心率变异性及影响因素 [J]. 中国老年学杂志，2024, 44(23): 5867-5871. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9202.2024.23.052.

[16] 刘雅倩，张文楼，刘琪，等. 地铁车厢内挥发性有机物污染水平及对健康人群心电指标的影响 [J]. 首都公共卫生，2020, 14(1): 13-15. DOI: 10.16760/j.cnki.sdggws.2020.01.005.

[17] Li B, Guo S, Liu L, et al. Can circadian rhythms of heart rate variability identify major depressive disorder?: A study based on support vector machine analysis[J]. Asian J Psychiatr, 2025, 110: 104609. DOI: 10.1016/j.ajp.2025.104609.

[18] Jiménez-Pastor JM, Rodríguez-Cortés F, López-Soto P, et al. Cardiorespiratory and circadian clock markers in intensive care unit patients[J]. Dent Med Probl, 2024, 61(5): 797-801. DOI: 10.17219/dmp/191537.

[19] Korompeli A, Kavrochorianou N, Molcan L, et al. Light affects heart rate's 24-h rhythmicity in intensive care unit patients: an observational study[J]. Nurs Crit Care, 2019, 24(5): 320-325. DOI: 10.1111/nicc.12433.

[20] Henríquez-Beltrán M, Vaca R, Benítez ID, et al. Sleep and circadian health of critical survivors: a 12-month follow-up study[J]. Crit Care Med, 2024, 52(8): 1206-1217. DOI: 10.1097/CCM.0000000000006298.

[21] Williams DP, Joseph N, Gerardo GM, et al. Gender differences in cardiac chronotropic control: implications for heart rate variability research[J]. Appl Psychophysiol Biofeedback, 2022, 47(1): 65-75. DOI: 10.1007/s10484-021-09528-w.

[22] Kim S, Barad Z, Cheong RY, et al. Sex differences in rapid nonclassical action of 17β-oestradiol on intracellular signalling and oestrogen receptor α expression in basal forebrain cholinergic neurones in mouse[J]. J Neuroendocrinol, 2020, 32(1): e12830. DOI: 10.1111/jne.12830.

[23] Kwon PM, Lawrence S, Mueller BR, et al. Interpreting resting heart rate variability in complex populations: the role of autonomic reflexes and comorbidities[J]. Clin Auton Res, 2022, 32(3): 175-184. DOI: 10.1007/s10286-022-00865-2.

[24] He B, Ji DP, Zhang B. Hypertension and its correlation with autonomic nervous system dysfunction, heart rate variability and chronic inflammation[J]. Blood Press, 2024, 33(1): 2405156. DOI: 10.1080/08037051.2024.2405156.

[25] Sorski L, Gidron Y. The vagal nerve, inflammation, and diabetes: a holy triangle[J]. Cells, 2023, 12(12): 1632. DOI: 10.3390/cells12121632.

[26] Wojtanowski A, Hureau M, Jeanne M, et al. Heart rate variability as a marker of multiple organ dysfunction syndromes: a systematic review[J]. J Clin Monit Comput, 2025, 39(4): 717-729. DOI: 10.1007/s10877-025-01296-w.

[27] Adam J, Rupprecht S, Künstler ECS, et al. Heart rate variability as a marker and predictor of inflammation, nosocomial infection, and sepsis: a systematic review[J]. Auton Neurosci, 2023, 249: 103116. DOI: 10.1016/j.autneu.2023.103116.

[28] Cheng W, Liu J, Zhi MW, et al. Stress and autonomic nerve dysfunction monitoring in perioperative gastric cancer patients using a smart device[J]. Ann Noninvasive Electrocardiol, 2022, 27(1): e12903. DOI: 10.1111/anec.12903.

[29] 李萌，房怿，刘洪霞，等. 心率变异性分析对右美托咪定术前抗焦虑作用评价 [J]. 天津医科大学学报，2022, 28(1): 77-80.

[30] 房怿，刘洪霞，黄钰涵，等. 心率变异性分析对老年患者术前鼻喷小剂量右美托咪啶的临床评价 [J]. 实用口腔医学杂志，2024, 40(1): 87-90. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3733.2024.01.015.

[31] 魏珂，张文稳，冯光，等. 五行音乐干预对重症监护病房撤机困难患者焦虑抑郁障碍和撤机成功率的影响 [J]. 中华危重病急救医学，2024, 36(10): 1044-1048. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20240617-00512.

[32] 刘洁希，李静，魏心昶，等. 针刺不同经穴对心率变异性的影响及自主神经调节机制研究进展 [J]. 国际中医中药杂志，2023, 45(4): 511-516. DOI: 10.3760/cma.j.cn115398-20220425-00384.

（收稿日期：2026-07-24）
（本文编辑：孙茜）