

临床研究

DOI: 10.16305/j.1007-1334.2026.z20250703004

青少年脉音-脉压联合特征分析及年龄相关性研究

哈凯婷¹, 李致远², 董致臻², 张敬浩¹, 胡晓娟¹, 许家佗¹, 崔 骥^{1,3}

1. 上海中医药大学(上海 201203); 2. 上海市闵行中学(上海 200240); 3. 上海市嘉定区南翔医院(上海 201802)

【摘要】 目的 探讨青少年健康人群脉音-脉压联合特征及常见脉象特点,为青少年体质健康的评估与疾病早期预防提供中医数据化辅助诊断依据。**方法** 将纳入的 213 例样本根据年龄分为青少年组 103 例、青年组 110 例;运用课题组自主研发的 MYI-1 型脉搏音智能听诊仪采集并分析不同脉象与不同年龄段下脉搏压力波与脉音特征信息及差异,探讨脉搏压力波时域与脉音频域数据的相关性。**结果** ①与青年组比较,青少年组压力波时域指标 h_5 、 t_1/t 、 t_4/t_5 增大($P<0.05$), h_3 、 h_4 、 h_3/h_1 、 h_4/h_1 、 t_4/t_5 减小($P<0.05$);压力波频域指标近似熵(ApEn)、均方频率(MSF)、均方根频率(RMSF)、频率方差(FV)、频率标准差(FSD)、第一个波峰的频率(PF1)增大($P<0.05$);脉音频域指标信号总能量(E)、MSF、RMSF、FV、FSD 增大($P<0.05$)。女性亚组结果趋势与总体一致。②与青年组比较,青少年组压力波时域指标 t_4 在平、滑、弦脉中均减小($P<0.05$),在滑脉中 h_4 、 t_5 、 h_3/h_1 、 h_4/h_1 减小($P<0.05$)及 h_5 、 t_1/t 增大($P<0.05$),在弦脉中 t_1/t_5 减小($P<0.05$)及 t_1/t 、 t_4/t_5 增大($P<0.05$);压力波频域指标 MSF、RMSF、FV、FSD 在平、滑、弦脉中皆增大($P<0.05$),在滑脉中 ApEn、PF1、第二个波峰的幅度(PA2)、第三个波峰的幅度(PA3)增大($P<0.05$),在弦脉中 ApEn、PF1、第二个波峰的频率(PF2)增大($P<0.05$)及第三个波峰的频率(PF3)、PA3 减小($P<0.05$);脉音频域指标 MSF、RMSF、FV、FSD 在平、滑脉中皆增大($P<0.05$),在滑脉中 E 增大($P<0.05$)。女性亚组结果趋势与总体一致。③与平脉比较,滑脉压力波时域指标 h_5 、 t_1 、 t_1/t 增大($P<0.05$)及 h_4 、 t_4 、 t_5 、 h_3/h_1 、 h_4/h_1 减小($P<0.05$),弦脉 h_4/h_1 、 t_1/t 、 w/t 增大($P<0.05$);与滑脉比较,弦脉 h_4 、 h_3/h_1 、 h_4/h_1 、 w/t 增大($P<0.05$)及 h_5 减小($P<0.05$)。与平脉比较,滑脉压力波频域指标 ApEn、MSF、RMSF、FV、FSD、PF1、PA2、PA3 增大($P<0.05$);与滑脉比较,弦脉 PF3 增大($P<0.05$)及 PA2、PA3 减小($P<0.05$)。脉音频域分析结果显示,平、弦脉与滑脉在 E 指标差异皆有统计学意义($P<0.05$)。④在总体人群和青少年中,压力波时域和频域指标相关性最为显著($P<0.05$)。**结论** 青少年脉象呈现“高能量、快传导”的年龄特异性特征,提示青少年心血管系统存在代谢旺盛现象。脉音-脉压联合特征分析为青少年亚健康状态的早期筛查提供了可量化的中医诊断新方法。

【关键词】 脉诊;脉音;声波信号;青少年;中医诊断;中医现代化

Pulse sound-pulse pressure combined characteristic analysis and age-correlation study in adolescent population

HA Kaiting¹, LI Zhiyuan², DONG Zhizhen², ZHANG Jinghao¹, HU Xiaojuan¹, XU Jiatuo¹, CUI Ji^{1,3}

[基金项目] 国家中医药管理局高水平中医药重点学科建设项目(ZYYZDXK-2023069);上海市科委科技计划项目(22S31901100);上海市中医药管理局中医药(临床类)重点学科建设项目(shzyzdxk-2024207);上海中医药大学科技发展基金项目(23KFL028)

[作者简介] 哈凯婷,女,硕士研究生,主要从事中医脉诊信息化研究工作

[通信作者] 崔骥,教授,硕士研究生导师;E-mail:maatcui@163.com

1. Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China; 2. Shanghai Minhang High School, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Nanxiang Hospital of Jiading District, Shanghai 201802, China

Abstract: Objective To explore the combined characteristics of pulse sound and pulse pressure and the features of common pulse conditions in healthy adolescents, and to provide a traditional Chinese medicine (TCM) data-based auxiliary

diagnostic basis for the assessment of adolescent physical health and early prevention of diseases. **Methods** A total of 213 enrolled subjects were divided into an adolescent group ($n=103$) and a young adult group ($n=110$) by age. The self-developed MYY-1 Pulse and Pulse Sound Intelligent Auscultator by the research team was used to collect and analyze the characteristic information and differences of pressure pulse waves and pulse sounds under different pulse conditions and age groups, and to explore the correlation between the time-frequency data of pressure pulse waves and the frequency-domain data of pulse sounds. **Results** ① Compared with the young adult group, the adolescent group had significantly higher h_5 , t_1/t , and t_4/t_5 among the time-domain indices of pressure pulse waves ($P<0.05$), significantly lower h_3 , h_4 , h_3/h_1 , h_4/h_1 , t , t_4 , and t_5 of the same indices ($P<0.05$), significantly higher frequency-domain indices of pressure pulse waves including ApEn, MSF, RMSF, FV, FSD and PF1 ($P<0.05$), and significantly higher frequency-domain indices of pulse sounds such as E, MSF, RMSF, FV and FSD ($P<0.05$). The trend of results in the female subgroup was consistent with the general trend. ② Compared with the young adult group, the adolescent group had a lower pressure pulse wave time-domain index t_4 across the slippery and wiry pulses ($P<0.05$); in the slippery pulse, the adolescent group had lower h_4 , t , t_5 , h_3/h_1 , h_4/h_1 ($P<0.05$) but higher h_5 and t_1/t ($P<0.05$); in the wiry pulse, this group had lower t and t_5 ($P<0.05$) but higher t_1/t and t_4/t_5 ($P<0.05$). The adolescent group also had higher pressure wave frequency-domain indices including MSF, RMSF, FV and FSD across the normal, slippery and wiry pulses ($P<0.05$); in the slippery pulse, ApEn, PF1, PA2 and PA3 were higher ($P<0.05$); in the wiry pulse, ApEn, PF1 and PF2 were higher ($P<0.05$), while PF3 and PA3 were lower ($P<0.05$). Additionally, the adolescent group exhibited higher pulse sound frequency-domain indices including MSF, RMSF, FV and FSD in the normal and slippery pulses ($P<0.05$), with a higher E index in the slippery pulse alone ($P<0.05$). The results in the female subgroup were consistent with the over all trends. ③ Compared with normal pulse, slippery pulse showed higher pressure pulse wave time-domain indices including h_5 , t_1 , t_1/t ($P<0.05$) but lower h_4 , t , t_4 , t_5 , h_3/h_1 , h_4/h_1 ($P<0.05$), while wiry pulse had higher h_4/h_1 , t_1/t , w/t ($P<0.05$). Compared with slippery pulse, wiry pulse showed higher pressure pulse wave time-domain indices including h_4 , h_3/h_1 , h_4/h_1 , w/t ($P<0.05$) but lower h_5 ($P<0.05$). Compared with normal pulse, slippery pulse showed higher pressure pulse wave frequency-domain indices including ApEn, MSF, RMSF, FV, FSD, PF1, PA2 and PA3 ($P<0.05$). Compared with slippery pulse, wiry pulse showed a higher pressure pulse wave frequency-domain index PF3 ($P<0.05$) but lower PA2 and PA3 ($P<0.05$). Pulse sound frequency-domain analysis revealed statistically significant differences in the E index among normal, wiry and slippery pulses ($P<0.05$). ④ The correlation between the time-domain and frequency-domain indices of pressure pulse waves was most significant in the total population and the adolescent population ($P<0.05$). **Conclusions** The pulse conditions of adolescents present age-specific characteristics of "high energy and rapid conduction", suggesting a vigorous metabolic state of the cardiovascular system in adolescents. The combined characteristic analysis of pulse sound and pulse pressure provides a new quantifiable TCM diagnostic method for the early screening of sub-health status in adolescents.

Keywords: pulse diagnosis; pulse sound; acoustic signal; teenager; traditional Chinese medicine diagnosis; traditional Chinese medicine modernization

随着健康中国战略的深入推进,构建多维度健康评估体系已成为现代医学研究的重要命题^[1]。脉诊作为中医特色的诊法,三指感知的寸口搏动不仅反映压力信号,还有通过血管壁振动产生的另外一种声频信号——即“脉音”。传统诊脉虽可以获得“位、数、形、势”等四要素特征,但对脉音特征的解析受限于人耳听阈与触觉灵敏度阈值^[2-3]。近年来生物医学工程领域的突破性进展为解决中医诊断仪器工程化难题提供了新思路。当前研究正从单一压力传感向多物理场融合检测的多模态发展,为中医诊断提供了可量化的现代科学阐释依据^[4-5]。

青少年时期是一个生理快速成长和身体素质形成的关键时期,即“稚阴稚阳”之体向成熟转化的关键阶段。在此阶段,青少年的脏腑机能尚未稳固,气血运行波动明显,易受外邪或情志影响形成偏颇体质,其健康状况直接关联其学习效率、心理

健康及未来生活的品质提升^[6]。近年来,学生体质健康问题日益突出,社会各界对此给予了广泛的关注^[7-8]。中医脉象声波信号的研究与应用,为青少年健康管理提供了一种无创、简便的检测方法。通过规律的脉象监测,能够及时预警青少年的健康隐患,进而提供必要的干预措施,为他们的健康成长保驾护航^[9-11]。这不仅有助于提高青少年的整体健康水平,也为中医学的现代化与科学化进程提供了新的思考方向和实践路径。

本研究采用最新研制的 MYY-1 型脉搏脉音智能听诊仪,外接 PDA-1 型脉诊仪与脉音传感器,对青少年的脉音-脉压信号进行联合特征分析,从脉象双重维度,深入探讨青少年常见脉象的脉音-脉压联合特征,旨在为青少年体质健康的评估与疾病早期预防提供科学依据,进一步丰富中医脉诊在现代医学研究中的应用价值,同时为中医脉诊技术的标准

化和客观化提供新思路和数据支持。

1 资料与方法

1.1 样本选择

1.1.1 纳入标准 ①无任何急、慢性疾病,且近3个月内未接受任何治疗;②年龄15~24岁,性别不限;③脉象类别为平、滑、弦三者之一;④自愿签订知情同意书。

1.1.2 排除标准 ①患有急、慢性感染及重大疾病者;②脉搏压力波波形、脉音波形受到干扰且无法分析者;③血压、体重指数(BMI)超出正常参考范围者^[12];④由于主客观原因不能配合研究工作者。

1.2 一般资料 所有样本均来自上海市闵行中学、上海中医药大学在读学生,收集时间为2024年4月

至6月。基于研究目的及人群特征,本研究将15~19岁划分为青少年组,20~24岁划分为青年组。该分类参考世界卫生组织(WHO)和联合国(UN)对青少年(10~19岁)及青年(15~24岁)的研究报告^[13],并结合教育阶段特征,使青少年组更聚焦于高中在校学生群体。

1.3 数据采集与分析

1.3.1 脉象采集设备 本课题组自主研发的MYY-1型脉搏脉音智能听诊仪(压力脉搏传感器技术参数为电源电压:5~6 VDC,压力量程:-50~+300 mmHg,灵敏度:2 000 μ V/mmHg;脉音传感器技术参数为电源电压:5~6 VDC,灵敏度:2 000 μ V/mmHg,频率响应:0.1~100 Hz)。见图1。



图1 MYY-1型脉搏脉音智能听诊仪

1.3.2 脉象采集方法 采集时间为上午7:30~10:00。所有受试者于脉象采集前在安静环境中静息至少10 min,且采集前2 h内禁止饮用咖啡、浓茶、酒精类饮品及进行剧烈运动,采集时自述情绪平稳。采集时取正坐位,前臂放松前伸,手心向上,将手腕部置

于脉枕上,肘部约呈120°,保持呼吸平稳,避免身体晃动和说话;采集者寻受试者左侧桡动脉脉搏跳动最强处,调试好采样设备,待波形稳定后采集30 s最佳脉压曲线与脉音曲线。见图2。

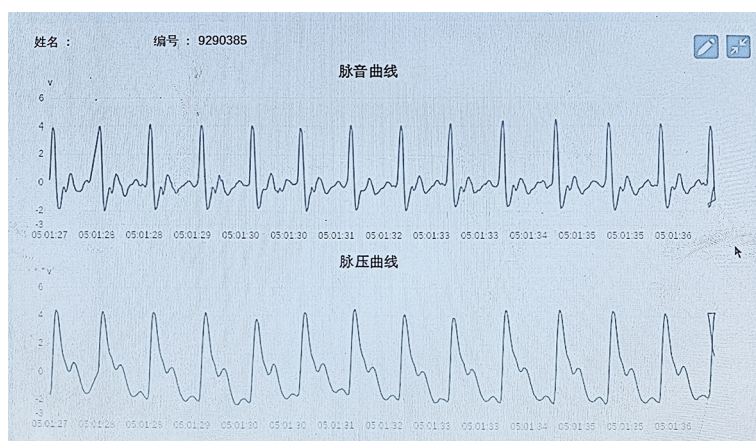
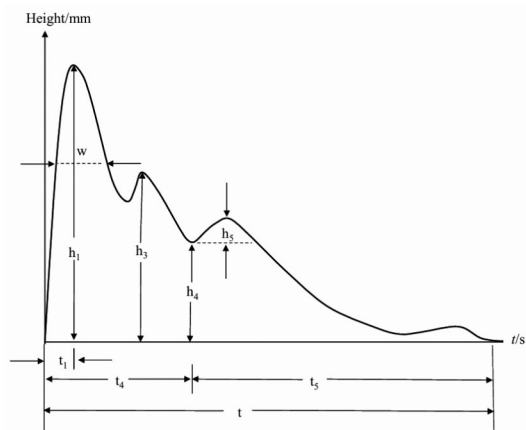


图2 脉象采集波形示意图

1.3.3 脉图分析方法 ①时域分析方法,根据本课题组自主研发的分析系统,时域特征参数参考费兆

馥主编的《现代中医脉诊学》^[14],参数对应的临床意义见图3及表1。②频域分析方法,根据MATLAB程

序计算压力波频域、脉音频域特征,频域特征通过快速傅里叶变换将时域数据转换为频域数据,再进行频域特征的提取,得到时间域参数[近似熵(ApEn)]、能量域参数[信号总能量(E)、总频谱能量(TSEn)]、频率域参数[均方频率(MSF)、均方根频率(RMSF)、频率方差(FV)、频率标准差(FSD)、频谱峰值_频率(PF)和频谱峰值_幅度(PA)],参数意义见表2。③平、滑、弦脉分类标准,参照《现代中医脉诊学》^[14]及团队前期研究成果《平、滑、弦脉的脉图分类参数范围研究》^[15]。



注:Height为脉波幅高。

图3 脉图参数示意图

1.4 统计学方法 本研究数据采用SPSS 25.0软件进行统计分析。在进行描述性统计和结果呈现前,对部分量级较大的指标进行了尺度缩放,如对E、TSEn的原始测量值除以 10^4 。所有统计分析均基于缩放后的数值进行,以保证结果的等效性。计量资料符合正态分布者用 $\bar{x}\pm s$ 表示,两组间比较采用两独立样本 t 检验,多个独立样本间比较采用方差分析及Dunnett's T检验进行多重比较;不满足正态分

表1 脉图参数及意义

分类	参数	意义
幅值	h_1	主波,主要反映大动脉的顺应性和心脏左心室射血功能
	h_3	重搏前波,主要反映动脉血管的弹性功能和外周阻力的状态
	h_4	降中峡,与动脉血管的外周阻力、主动脉瓣关闭功能相关
	h_5	重搏波,与大动脉的顺应性、主动脉瓣功能相关
	t	与左心室的一个心动周期相对应
时值	t_1	与左心室的快速射血期时间相对应
	t_4	与左心室的收缩期时间相对应
	t_5	与左心室的舒张期时间相对应
	h_3/h_1	主要反映外周阻力状况和血管壁的顺应性情况
比值	h_4/h_1	主要反映外周阻力的大小,当外周阻力相对增大, h_4/h_1 增大;反之则变小
	t_4/t_5	主要反映左心室舒张期与收缩期的比值,与心率有一定的关系
	w/t	主动脉内持续高压力的时间在总脉动周期中的比例

布者用 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,组间比较采用Mann-Whitney U检验,三组及以上组间比较采用Kruskal-Wallis H检验及Bonferroni-Dunn检验进行两两间比较。运用相关性分析法分析脉搏压力波时域、频域指标与脉音频域指标的相关性。所有测试均为双尾测试,以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基线资料情况 经过纳入、排除标准筛选后,本研究共收集213例受试者数据,其中青少年组103例,男性22例、女性81例,平均年龄 (16.83 ± 1.55) 岁;青年组110例,男性4例、女性106例,平均年龄 (20.90 ± 1.26) 岁。两组人群性别、年龄差异有统计学意义($P<0.05$)。

表2 频域参数及意义

分类	参数	英文名称(缩写)	意义
时间域	近似熵	approximate entropy (ApEn)	度量时间序列复杂性。用于评估生理信号的随机性和动态变化
能量域	信号总能量	total energy (E)	信号在时间域内所有采样点的幅值平方和。反映信号的强度或活跃度
	总频谱能量	total spectral energy (TSEn)	信号在频率域内所有频率成分的幅值平方和。反映信号在频率分布上的能量信息
	均方频率	mean square frequency (MSF)	信号频率平方的平均值。反映了信号能量在频率域的分布情况,用来估计信号的平均频率
频率域	均方根频率	root mean square frequency (RMSF)	频率平方的平均值的平方根。用于描述信号的频率集中度
	频率方差	frequency variance (FV)	反映信号频率分布的离散程度
	频率标准差	frequency standard deviation (FSD)	频率方差的平方根。反映信号频率分布的离散程度
	频谱峰值_频率	peak frequencies (PF)	频谱中幅值最高的前3个频率成分
	频谱峰值_幅度	peak amplitudes (PA)	频谱中幅值最高的前3个频率成分其对应的幅值

根据脉象分类标准,将两组人群各分为平脉、滑脉、弦脉 3 类,结果显示两组中滑脉的比例最高,弦脉比例最低;但与青少年组比较,青年组中滑脉的比例有所下降且弦脉比例增加。女性亚组中,青少年组与青年组滑脉比例相当,青少年组弦脉比例较低,青年组弦脉比例增加,见表 3。进一步比较两组女性不同脉象类型之间的年龄差异,结果显示各组内不同脉象类型的年龄均无显著差异($P>0.05$)。

2.2 两组时域、频域指标及女性亚组比较 时域分析结果显示,与青年组相比,青少年组压力波时域指标 h_5 、 t_1/t 、 t_4/t_5 增大($P<0.05$), h_3 、 h_4 、 h_3/h_1 、 h_4/h_1 、 t 、 t_4 、 t_5 减小($P<0.05$)。频域分析结果显示,与青年组相比,青少年组压力波频域 $ApEn$ 、 MSF 、 $RMSF$ 、 FV 、

表 3 两组总体及女性亚组脉象分类[例(%)]

脉象	青少年组		青年组	
	总体 ($n=103$)	女性 ($n=81$)	总体 ($n=110$)	女性 ($n=106$)
平脉	27(26.2)	26(32.1)	40(36.4)	39(36.8)
滑脉	68(66.0)	47(58.0)	47(42.7)	44(41.5)
弦脉	8(7.8)	8(9.9)	23(20.9)	23(21.7)

FSD、PF1 增大,脉音频域 E 、 MSF 、 $RMSF$ 、 FV 、 FSD ($P<0.05$) 增大。女性亚组结果显示,青少年组与青年组的时域、频域指标差异与总体人群趋势一致。见表 4~表 6。男性亚组中,虽因青年男性样本量过小($n=4$)无法进行统计学推断,但青少年男性与青年男性的指标差异趋势与总体结果一致。

表 4 两组总体及女性亚组压力波时域指标比较($\bar{x}\pm s$)

时域参数	青少年组		青年组	
	总体($n=103$)	女性($n=81$)	总体($n=110$)	女性($n=106$)
h_1	17.27±5.19	16.92±5.10	16.65±4.49	16.47±4.44
h_3	7.55±2.62*	7.44±2.61*	8.64±2.98	8.60±3.02
h_4	3.85±1.85*	3.99±1.82*	5.24±1.83	5.21±1.85
h_5	2.30±1.91*	1.97±1.71*	1.02±0.79	0.99±0.70
t	0.76±0.12*	0.77±0.13*	0.85±0.12	0.85±0.12
t_1	0.12±0.01	0.12±0.01	0.12±0.01	0.12±0.01
t_4	0.32±0.03*	0.32±0.03*	0.34±0.03	0.34±0.03
t_5	0.44±0.10*	0.45±0.11*	0.51±0.11	0.51±0.11
h_3/h_1	0.44±0.11	0.45±0.12*	0.52±0.11	0.52±0.11
h_4/h_1	0.23±0.10*	0.24±0.10*	0.31±0.07	0.31±0.07
t_1/t	0.16±0.03*	0.16±0.03*	0.14±0.02	0.14±0.02
t_4/t_5	0.74±0.14*	0.73±0.13*	0.69±0.13	0.69±0.13
w/t	0.14±0.03	0.14±0.03	0.15±0.03	0.15±0.04

注:与青年组同类组别比较,* $P<0.05$ 。

2.3 相同脉象下两组时域、频域指标及女性亚组比较 在相同的脉象下,两组在联合脉音-脉压的时域和频域指标上展现出显著的差异。时域分析结果显示,与青年组比较,青少年组的压力波时域指标 t_4 在平、滑、弦脉中均减小($P<0.05$);在滑脉中 h_4 、 t 、 t_5 、 h_3/h_1 、 h_4/h_1 减小($P<0.05$), h_5 、 t_1/t 增大($P<0.05$);在弦脉中 t 、 t_5 减小($P<0.05$), t_1/t 、 t_4/t_5 增大($P<0.05$)。见表 7。频域分析结果显示,与青年组比较,青少年组的压力波频域指标 MSF 、 $RMSF$ 、 FV 、 FSD 在平、滑、弦脉中皆增大($P<0.05$),在滑脉中 $ApEn$ 、 $PF1$ 、 $PA2$ 、 $PA3$ 增大($P<0.05$),在弦脉中 $ApEn$ 、 $PF1$ 、 $PF2$ 增大($P<0.05$)及 $PF3$ 、 $PA3$ 减小($P<0.05$);脉音频域指标 MSF 、 $RMSF$ 、 FV 、 FSD 在平滑脉中皆增大($P<0.05$),在滑脉中 E 增大($P<0.05$),在弦脉中各指标无显著性差

异($P>0.05$)。见表 8、表 9。女性亚组分析结果显示,青少年组与青年组的时域、频域指标差异与总体人群趋势一致,见表 10~表 12。

2.4 青少年组平、滑、弦脉时域、频域指标比较 青少年组平、滑、弦 3 种脉象压力波时域、频域指标比较差异普遍有统计学意义。时域分析结果显示,与平脉比较,滑脉 h_5 、 t_1 、 t_1/t 增大($P<0.05$)及 h_4 、 t 、 t_4 、 t_5 、 h_3/h_1 、 h_4/h_1 减小($P<0.05$),弦脉 h_4/h_1 、 t_1/t 、 w/t 增大($P<0.05$);与滑脉比较,弦脉 h_4 、 h_3/h_1 、 h_4/h_1 、 w/t 增大($P<0.05$)及 h_5 减小($P<0.05$)。见表 13。压力波频域分析结果显示,与平脉比较,滑脉 $ApEn$ 、 MSF 、 $RMSF$ 、 FV 、 FSD 、 $PF1$ 、 $PA2$ 、 $PA3$ 增大($P<0.05$);与滑脉比较,弦脉 $PF3$ 增大($P<0.05$)及 $PA2$ 、 $PA3$ 减小($P<0.05$)。脉音频域分析结果显示,平脉、弦脉与滑

表5 两组总体及女性亚组压力波频域指标比较($\bar{x}\pm s$)

频域参数	青少年组		青年组	
	总体($n=103$)	女性($n=81$)	总体($n=110$)	女性($n=106$)
ApEn	0.30±0.05*	0.29±0.05*	0.26±0.03	0.26±0.03
E/10 ⁴	748.00±451.29	716.70±434.72	771.24±467.20	762.05±471.61
TSEn/10 ⁴	374.01±225.64	358.36±217.36	385.63±233.60	381.03±235.81
MSF	5.11±1.49*	4.91±1.44*	3.88±0.82	3.85±0.80
RMSF	2.24±0.32*	2.19±0.31*	1.96±0.21	1.95±0.20
FV	2.24±0.32*	2.19±0.31*	1.96±0.21	1.95±0.20
FSD	3.20±1.13*	3.05±1.08*	2.28±0.59	2.26±0.58
PF1	1.50±0.23*	1.48±0.24*	1.35±0.16	1.34±0.16
PF2	2.75±0.59*	2.71±0.60*	2.46±0.96	2.46±0.98
PF3	3.01±1.77	2.71±1.74	3.00±1.93	3.05±1.92
PA1	10.28±4.06*	10.24±4.12*	11.53±4.51	11.52±4.54
PA2	4.75±2.58*	4.51±2.45*	3.93±2.27	3.88±2.20
PA3	2.57±1.83*	2.32±1.79	2.06±1.38	2.06±1.36

注:ApEn为近似熵,E为信号总能量,TSEn为总频谱能量,MSF为均方频率,RMSF为均方根频率,FV为频率方差,FSD为频率标准差,PF为频谱峰值_频率,PA为频谱峰值_幅度。与青年组同类组别比较,* $P<0.05$ 。

表6 两组总体及女性亚组脉音频域指标比较($\bar{x}\pm s$)

频域参数	青少年组		青年组	
	总体($n=103$)	女性($n=81$)	总体($n=110$)	女性($n=106$)
ApEn	0.34±0.08	0.33±0.08	0.33±0.08	0.33±0.08
E/10 ⁴	3 126.99±6 339.28*	2 262.74±5 277.83*	693.85±478.73	667.84±446.81
TSEn/10 ⁴	335.13±209.51	336.00±207.71	346.92±239.36	333.92±223.41
MSF	29.22±6.43*	29.30±6.70*	25.52±5.69	25.54±5.54
RMSF	5.37±0.59*	5.38±0.61*	5.02±0.56	5.03±0.54
FV	5.37±0.59*	5.38±0.61*	5.02±0.56	5.03±0.54
FSD	24.72±5.93*	24.81±6.18*	21.37±5.22	21.39±5.09
PF1	0.97±0.47	0.98±0.47	0.95±0.39	0.94±0.38
PF2	1.89±0.82	1.89±0.83	1.83±0.84	1.80±0.83
PF3	2.96±1.01	2.94±1.05	2.87±1.08	2.86±1.09
PA1	2.37±2.25	2.44±2.31	2.69±2.41	2.60±2.34
PA2	3.22±2.05	3.21±2.01	3.02±1.62	2.97±1.61
PA3	2.62±1.71	2.57±1.69	2.26±1.27	2.17±1.05

注:ApEn为近似熵,E为信号总能量,TSEn为总频谱能量,MSF为均方频率,RMSF为均方根频率,FV为频率方差,FSD为频率标准差,PF为频谱峰值_频率,PA为频谱峰值_幅度。与青年组同类组别比较,* $P<0.05$ 。

脉在E指标差异皆有统计学意义($P<0.05$)。见表14。

2.5 压力波与脉音时域、频域指标相关性分析 在总体人群、青少年中,压力波时域与频域指标之间呈现出较强的相关性,具体表现:幅值指标(h_1 、 h_3 、 h_5)与频域指标(E、TSEn、MSF、RMSF、FV、FSD、PA1等)呈正相关为主, r 为0.49~0.83。其中, h_1 与E、TSEn的相关性最强(总体人群 $r=0.79$,青少年 $r=0.83$, $P<0.05$)。时值指标(t 、 t_4 、 t_5)与频域指标(MSF、

RMSF、FV、FSD、PF1)呈负相关为主, r 为-0.56~-0.82。其中, t 与PF1的负相关最强(总体人群 $r=-0.82$,青少年 $r=-0.80$, $P<0.05$), t_5 与PF1次之(总体人群 $r=-0.79$,青少年 $r=-0.77$, $P<0.05$)。比值指标(t_1/t 、 t_4/t_5)与PF1呈正相关(r 为0.49~0.69, $P<0.05$),其中 t_1/t 与PF1的相关性较强(总体人群 $r=0.69$,青少年 $r=0.65$, $P<0.05$)。压力波时域与脉音频域之间整体呈负相关,但相关性较弱($|r|<0.3$, $P<0.05$);压力波频域与脉音频域指标之间以正相关为

表 7 两组平、滑、弦脉压力波时域指标比较($\bar{x}\pm s$)

时域参数	青少年组			青年组		
	平脉($n=27$)	滑脉($n=68$)	弦脉($n=8$)	平脉($n=40$)	滑脉($n=47$)	弦脉($n=23$)
h_1	16.69±5.31	17.80±5.29	14.76±2.89	16.87±4.70	17.23±4.54	15.08±3.78
h_3	8.24±2.68	7.08±2.55	9.19±2.03	8.91±2.97	7.77±2.66	9.97±3.15
h_4	4.98±1.88	3.28±1.66*	4.87±0.97	5.44±1.92	4.88±1.81	5.61±1.65
h_5	1.32±1.77	2.87±1.82*	0.81±0.85	0.88±0.66	1.42±0.83	0.45±0.38
t	0.83±0.11	0.74±0.11*	0.71±0.15*	0.89±0.11	0.79±0.10	0.90±0.14
t_1	0.11±0.01	0.12±0.01	0.12±0.01	0.11±0.01	0.12±0.01	0.13±0.01
t_4	0.33±0.02*	0.31±0.03*	0.32±0.04*	0.35±0.02	0.32±0.02	0.36±0.02
t_5	0.50±0.10	0.43±0.10*	0.39±0.12*	0.54±0.10	0.47±0.09	0.54±0.12
h_3/h_1	0.50±0.10	0.40±0.10*	0.62±0.04	0.52±0.07	0.45±0.08	0.65±0.08
h_4/h_1	0.31±0.08	0.19±0.08*	0.34±0.08	0.31±0.05	0.28±0.07	0.37±0.06
t_1/t	0.14±0.02	0.17±0.03*	0.17±0.03*	0.13±0.02	0.15±0.02	0.14±0.03
t_4/t_5	0.69±0.11	0.75±0.14	0.84±0.16*	0.67±0.13	0.71±0.12	0.69±0.14
w/t	0.14±0.03	0.14±0.02	0.20±0.02	0.13±0.02	0.14±0.02	0.20±0.02

注:与青年组同类脉象比较,* $P<0.05$ 。

表 8 两组平、滑、弦脉压力波频域指标比较($\bar{x}\pm s$)

频域参数	青少年组			青年组		
	平脉($n=27$)	滑脉($n=68$)	弦脉($n=8$)	平脉($n=40$)	滑脉($n=47$)	弦脉($n=23$)
ApEn	0.27±0.03	0.31±0.05*	0.28±0.05*	0.26±0.02	0.28±0.03	0.25±0.03
$E/10^4$	655.80±415.71	800.61±479.27	612.02±215.27	772.94±527.15	833.12±461.84	641.85±342.28
$TSEn/10^4$	327.91±207.86	400.31±239.64	306.02±107.64	386.47±263.58	416.57±230.92	320.93±171.14
MSF	4.00±0.84*	5.64±1.39*	4.40±1.75*	3.60±0.60	4.39±0.76	3.32±0.64
RMSF	1.99±0.21*	2.36±0.28*	2.06±0.40*	1.89±0.16	2.09±0.18	1.81±0.17
FV	1.99±0.21*	2.36±0.28*	2.06±0.40*	1.89±0.16	2.09±0.18	1.81±0.17
FSD	2.37±0.61*	3.59±1.07*	2.63±1.31*	2.09±0.43	2.66±0.56	1.84±0.44
PF1	1.38±0.17	1.53±0.23*	1.59±0.29*	1.31±0.13	1.41±0.15	1.29±0.16
PF2	2.56±0.39	2.79±0.64	3.02±0.55*	2.48±1.33	2.61±0.56	2.13±0.80
PF3	2.65±1.98	3.44±1.48	0.67±1.34*	2.77±1.94	3.33±1.64	2.72±2.39
PA1	10.78±3.98	10.02±4.26	10.84±2.35	11.77±4.40	11.68±4.65	10.80±4.55
PA2	3.58±1.31	5.40±2.85*	3.10±0.92	3.44±2.60	4.35±1.91	3.93±2.25
PA3	1.98±1.53	3.03±1.79*	0.44±0.86*	1.89±1.38	2.29±1.28	1.89±1.56

注:ApEn为近似熵,E为信号总能量,TSEn为总频谱能量,MSF为均方频率,RMSF为均方根频率,FV为频率方差,FSD为频率标准差,PF为频谱峰值_频率,PA为频谱峰值_幅度。与青年组同类脉象比较,* $P<0.05$ 。

主,但相关性同样较弱($r<0.3$, $P<0.05$)。见图 4、图 5。

3 讨论

中医诊断学的现代研究在继承传统四诊的基础上,持续推动理论深化与技术创新。学者们积极引入现代科学技术,尤其是信息技术,提升诊断的灵活性和准确性。在这一过程中,青少年时期的独特性得到了特别的关注,此时期是“先天之本”与“后天之气”相互作用最为显著的阶段,也是个体生长发育的关键时期。此时肾气逐渐充盛,天癸开始

萌发,身体迅速成长,但脏腑功能尚处于不断完善和成熟之中。因此,对青少年时期的健康进行全面评估,对于及时发现和纠正生长发育中的偏差,以及早期疾病的预警,具有极其重要的意义。

本研究通过对青少年与青年脉象进行对比分析,旨在深入探讨不同年龄阶段脉象特征差异。研究结果显示,青少年组的心输出量较高、血管弹性较好,表现为脉搏幅度较大、频域能量指标更高,呈现“高能量、快传导”的特征。为评估性别对上述结论的影响,本研究进一步按性别分组进行亚组分

表 9 两组平、滑、弦脉脉音频域指标比较($\bar{x}\pm s$)

频域参数	青少年组			青年组		
	平脉($n=27$)	滑脉($n=68$)	弦脉($n=8$)	平脉($n=40$)	滑脉($n=47$)	弦脉($n=23$)
ApEn	0.32±0.07	0.34±0.07	0.38±0.10	0.30±0.08	0.33±0.08	0.37±0.09
E/10 ⁴	555.37±290.04	4 444.19±7 479.74 [*]	610.10±414.57	681.32±381.62	808.94±548.28	480.45±415.41
TSEn/10 ⁴	277.69±145.02	361.48±228.10	305.05±207.29	340.66±190.81	404.47±274.14	240.22±207.70
MSF	31.24±5.23 [*]	28.49±6.62	28.68±7.76	26.19±4.70	25.28±6.28	24.84±6.13
RMSF	5.57±0.48 [*]	5.30±0.60	5.31±0.76	5.10±0.46	4.99±0.61	4.95±0.60
FV	5.57±0.48 [*]	5.30±0.60	5.31±0.76	5.10±0.46	4.99±0.61	4.95±0.60
FSD	26.61±4.79 [*]	24.01±6.12	24.40±7.10	21.93±4.30	21.15±5.78	20.85±5.63
PF1	0.88±0.39	0.99±0.49	1.07±0.49	0.89±0.33	1.04±0.42	0.88±0.38
PF2	1.66±0.72	1.97±0.85	2.02±0.82	1.64±0.62	1.99±0.80	1.83±1.17
PF3	2.68±0.93	3.07±1.02	2.99±1.17	2.76±0.94	3.04±1.09	2.73±1.27
PA1	2.07±2.03	2.42±2.29	2.97±2.78	2.29±2.21	3.15±2.51	2.43±2.50
PA2	2.74±1.32	3.39±2.25	3.40±2.20	2.97±1.24	3.21±1.79	2.71±1.83
PA3	2.14±1.06	2.85±1.94	2.32±0.95	2.07±0.97	2.56±1.54	2.00±1.02

注:ApEn为近似熵,E为信号总能量,TSEn为总频谱能量,MSF为均方频率,RMSF为均方根频率,FV为频率方差,FSD为频率标准差,PF为频谱峰值_频率,PA为频谱峰值_幅度。与青年组同类脉象比较,* $P<0.05$ 。

表 10 女性亚组平、滑、弦脉压力波时域指标比较($\bar{x}\pm s$)

时域参数	青少年组			青年组		
	平脉($n=26$)	滑脉($n=47$)	弦脉($n=8$)	平脉($n=39$)	滑脉($n=44$)	弦脉($n=23$)
h_4	4.85±1.79	3.36±1.71 [*]	4.87±0.97	5.44±1.94	4.80±1.82	5.61±1.65
h_5	1.32±1.80	2.53±1.56 [*]	0.81±0.85	0.88±0.67	1.36±0.65	0.45±0.38
t	0.83±0.12 [*]	0.74±0.12 [*]	0.71±0.15 [*]	0.89±0.11	0.79±0.10	0.90±0.14
t_4	0.33±0.02 [*]	0.31±0.02 [*]	0.32±0.04 [*]	0.35±0.02	0.32±0.02	0.36±0.02
t_5	0.50±0.10	0.43±0.10	0.39±0.12 [*]	0.54±0.10	0.47±0.09	0.54±0.12
h_3/h_1	0.51±0.10	0.39±0.10 [*]	0.62±0.04	0.52±0.07	0.45±0.08	0.65±0.08
h_4/h_1	0.31±0.08	0.19±0.08 [*]	0.34±0.08	0.31±0.05	0.28±0.07	0.37±0.06
t_1/t	0.14±0.02 [*]	0.16±0.03 [*]	0.17±0.03 [*]	0.13±0.02	0.15±0.02	0.14±0.03
t_4/t_5	0.69±0.11	0.74±0.12	0.84±0.16 [*]	0.67±0.13	0.71±0.13	0.69±0.14

注:仅展示有差异指标。与青年组同类脉象比较,* $P<0.05$ 。

表 11 女性亚组平、滑、弦脉压力波频域指标比较($\bar{x}\pm s$)

频域参数	青少年组			青年组		
	平脉($n=26$)	滑脉($n=47$)	弦脉($n=8$)	平脉($n=39$)	滑脉($n=44$)	弦脉($n=23$)
ApEn	0.27±0.03	0.31±0.05 [*]	0.28±0.05 [*]	0.25±0.02	0.28±0.03	0.25±0.03
MSF	4.00±0.86 [*]	5.50±1.36 [*]	4.40±1.75 [*]	3.57±0.57	4.37±0.75	3.32±0.64
RMSF	1.99±0.21 [*]	2.33±0.28 [*]	2.06±0.40 [*]	1.88±0.15	2.08±0.18	1.81±0.17
FV	1.99±0.21 [*]	2.33±0.28 [*]	2.06±0.40 [*]	1.88±0.15	2.08±0.18	1.81±0.17
FSD	2.37±0.62 [*]	3.49±1.03 [*]	2.63±1.31 [*]	2.06±0.41	2.65±0.55	1.84±0.44
PF1	1.38±0.18	1.52±0.25 [*]	1.59±0.29 [*]	1.30±0.13	1.41±0.16	1.29±0.16
PF2	2.57±0.39	2.74±0.68	3.02±0.55 [*]	2.48±1.35	2.62±0.56	2.13±0.80
PF3	2.61±2.01	3.11±1.37	0.67±1.34 [*]	2.84±1.91	3.42±1.61	2.72±2.39
PA2	3.51±1.27	5.30±2.81 [*]	3.10±0.92	3.46±2.64	4.22±1.69	3.93±2.25
PA3	1.80±1.25	2.90±1.85	0.44±0.86 [*]	1.94±1.36	2.27±1.24	1.89±1.56

注:仅展示有差异指标。ApEn为近似熵,MSF为均方频率,RMSF为均方根频率,FV为频率方差,FSD为频率标准差,PF为频谱峰值_频率,PA为频谱峰值_幅度。与青年组同类脉象比较,* $P<0.05$ 。

表 12 女性亚组平、滑、弦脉脉音频域指标比较($\bar{x}\pm s$)

频域参数	青少年组			青年组		
	平脉($n=26$)	滑脉($n=47$)	弦脉($n=8$)	平脉($n=39$)	滑脉($n=44$)	弦脉($n=23$)
MSF	31.11±5.28*	28.41±7.14*	28.68±7.76	25.87±4.32	25.61±6.24	24.84±6.13
RMSF	5.56±0.48*	5.29±0.64*	5.31±0.76	5.07±0.43	5.03±0.60	4.95±0.60
FV	5.56±0.48*	5.29±0.64*	5.31±0.76	5.07±0.43	5.03±0.60	4.95±0.60
FSD	26.49±4.84*	23.95±6.61	24.40±7.10	21.65±3.94	21.46±5.74	20.85±5.63

注:仅展示有差异指标。MSF 为均方频率,RMSF 为均方根频率,FV 为频率方差,FSD 为频率标准差。与青年组同类脉象比较,* $P<0.05$ 。

表 13 青少年组平、滑、弦脉压力波时域指标比较($\bar{x}\pm s$)

时域参数	平脉($n=27$)	滑脉($n=68$)	弦脉($n=8$)
h_1	16.69±5.31	17.80±5.29	14.76±2.89
h_3	8.24±2.68	7.08±2.55	9.19±2.03
h_4	4.98±1.88	3.28±1.66*	4.87±0.97#
h_5	1.32±1.77	2.87±1.82*	0.81±0.85#
t	0.83±0.11	0.74±0.11*	0.71±0.15
t_1	0.11±0.01	0.12±0.01*	0.12±0.01
t_4	0.33±0.02	0.31±0.03*	0.32±0.04
t_5	0.50±0.10	0.43±0.10*	0.39±0.12
h_3/h_1	0.50±0.10	0.40±0.10*	0.62±0.04**
h_4/h_1	0.31±0.08	0.19±0.08*	0.34±0.08**
t_1/t	0.14±0.02	0.17±0.03*	0.17±0.03*
t_4/t_5	0.69±0.11	0.75±0.14	0.84±0.16
w/t	0.14±0.03	0.14±0.02	0.20±0.02**

注:与平脉比较,* $P<0.05$;与滑脉比较,# $P<0.05$ 。

析。结果显示,女性亚组中青少年组时域、频域指标均显著优于青年组,与总体结论一致。需要注意

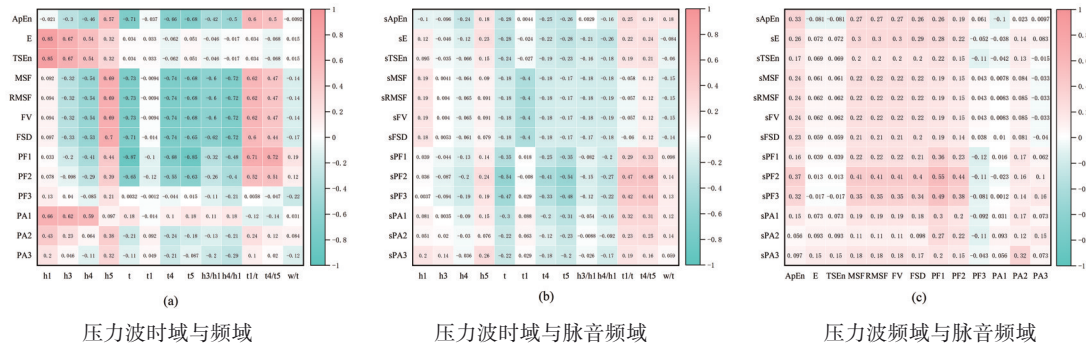
的是,男性亚组中,青年男性样本量严重不足(仅 4 例),无法满足统计学推断的基本条件,导致男性群体从青少年到青年的年龄演变趋势无法有效评估。因此,本研究的主要结论“青少年脉象优于青年”实际上主要是基于女性群体的数据分析,该结论向男性群体的应用需谨慎。后续研究应扩大男性样本,特别是青年男性样本,以能够排除性别对脉象年龄演变的影响,并进一步验证本研究结论的普适性。

根据脉图形态与特征,本研究将两组脉象归纳为平脉、滑脉及弦脉 3 种主要类型。平脉多见于健康常态,滑脉反映气血流畅,弦脉则多与紧张、血管硬化或弹性下降等病理状态相关。本研究中,滑脉在青少年组更为常见,弦脉则较少,这与青少年时期心血管系统的生长发育特征相吻合。青少年时期,心脏和血管系统正处于关键发育阶段,此时气血旺盛,脉象表现为气血充实有力;进入青年期后,心血管系统的发育已趋于成熟,加之工作、学习压力或生活责任的加重,或存在缺乏体育锻炼、饮食

表 14 青少年组平、滑、弦脉频域指标比较($\bar{x}\pm s$)

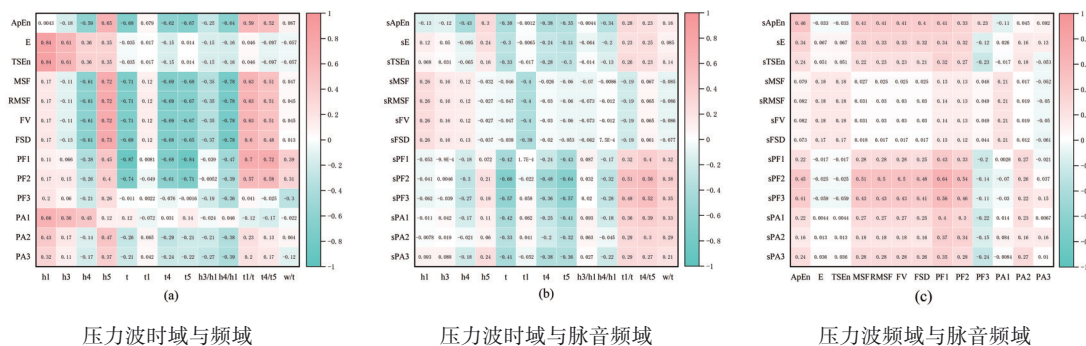
频域参数	压力波			脉音		
	平脉($n=27$)	滑脉($n=68$)	弦脉($n=8$)	平脉($n=27$)	滑脉($n=68$)	弦脉($n=8$)
ApEn	0.27±0.03	0.31±0.05*	0.28±0.05	0.32±0.07	0.34±0.07	0.38±0.10
$E/10^4$	655.80±415.71	800.61±479.27	612.02±215.27	555.37±290.04	4 444.19±7479.74*	610.10±414.57#
$TSEn/10^4$	327.91±207.86	400.31±239.64	306.02±107.64	277.69±145.02	361.48±228.10	305.05±207.29
MSF	4.00±0.84	5.64±1.39*	4.40±1.75	31.24±5.23	28.49±6.62	28.68±7.76
RMSF	1.99±0.21	2.36±0.28*	2.06±0.40	5.57±0.48	5.30±0.60	5.31±0.76
FV	1.99±0.21	2.36±0.28*	2.06±0.40	5.57±0.48	5.30±0.60	5.31±0.76
FSD	2.37±0.61	3.59±1.07*	2.63±1.31	26.61±4.79	24.01±6.12	24.40±7.10
PF1	1.38±0.17	1.53±0.23*	1.59±0.29	0.88±0.39	0.99±0.49	1.07±0.49
PF2	2.56±0.39	2.79±0.64	3.02±0.55	1.66±0.72	1.97±0.85	2.02±0.82
PF3	2.65±1.98	3.44±1.48	0.67±1.34#	2.68±0.93	3.07±1.02	2.99±1.17
PA1	10.78±3.98	10.02±4.26	10.84±2.35	2.07±2.03	2.42±2.29	2.97±2.78
PA2	3.58±1.31	5.40±2.85*	3.10±0.92#	2.74±1.32	3.39±2.25	3.40±2.20
PA3	1.98±1.53	3.03±1.79*	0.44±0.86#	2.14±1.06	2.85±1.94	2.32±0.95

注:ApEn 为近似熵,E 为信号总能量,TSEn 为总频谱能量,MSF 为均方频率,RMSF 为均方根频率,FV 为频率方差,FSD 为频率标准差,PF 为频谱峰值_频率,PA 为频谱峰值_幅度。在同类信号组别内,与平脉比较,* $P<0.05$;与滑脉比较,# $P<0.05$ 。



注:单元格内数字为 r 值。红色代表正相关,绿色代表负相关,颜色越深代表相关系数绝对值越大。图b、图c脉音频域指标以加s与压力波频域指标区分。

图4 总体人群时域、频域指标相关性($n=213$)



注:单元格内数字为 r 值。红色代表正相关,绿色代表负相关,颜色越深代表相关系数绝对值越大。图b、图c脉音频域指标以加s与压力波频域指标区分。

图5 青少年时域、频域指标相关性($n=103$)

不节、吸烟和饮酒等不良习惯,心血管负荷逐渐增加,脉象流利度降低。需要说明的是,青少年阶段心率较快是其正常的生理特征。从生理学角度看,心率会随年龄增长而逐渐减慢:新生儿脉搏120~140次/min,五六岁的幼儿脉搏90~110次/min,至青年期逐渐稳定在60~80次/min^[16]。青少年处于生长发育高峰期,基础代谢率高,心输出量相对较大,心率稍快正是气血旺盛的表现,属于正常生理脉象。因此,在相同脉象类型下,青少年组表现出更优的左心室射血功能、更好的大动脉顺应性与血管弹性,更低的外周阻力,其脉搏信号在频域中具有更高的频率成分和能量水平,即“高能量、快传导”,提示青少年心血管系统更为活跃且调节能力较好。上述相同脉象下的年龄比较同样因男性样本量过少而主要基于女性样本(男性群体的适用性有待后续扩大样本进一步验证)。

在相同脉象类型压力波频域指标比较中,弦、滑脉的PF与PA指标展现出显著的差异性,说明频域指标中弦、滑脉的频谱频率峰值与幅度可能为其特异性指标,特别是弦脉的PF3、PA3。而在脉音频

域指标方面,弦脉虽未显示出统计学意义,但从数值趋势来看,其PF3、PA3与压力波频域结果相反,这可能源于压力信号与声波信号在采集原理上的差异。这也表明,脉音-脉压联合特征分析能够较为全面地反映脉象信息,有助于辨识“同脉异龄”的细微差异。此外,滑脉对比中,青少年组脉音频域能量值(E)显著升高,这可能与处于生理发育旺盛阶段,心血管功能较好、心脏泵血率较高有关。为进一步排除性别与脉象类型的混杂影响,本研究在相同脉象类型下对女性亚组进行了单独分析。结果显示,青少年女性亚组时域、频域指标均显著优于相同脉象类型的青年女性,与总体结论一致,即在相同脉象类型下,青少年女性优于青年女性。基于本次数据结果,在同时控制性别与脉象类型后,“青少年女性的脉象优于青年女性”的结论依然成立,但因本研究青少年组弦脉样本量较少,后续需扩大样本量进一步验证结论。

由于青少年这一群体的生理特性决定了弦脉较少,本次研究也印证了这一现象,因此本研究重点探讨平脉与滑脉。结果表明,青少年滑脉的心输

出量较大,大动脉顺应性和血管弹性较好,外周阻力较小,其次是平脉,最后是弦脉,这与团队前期研究发现一致^[15]。青少年压力波时域参数的差异主要体现在 h_3/h_1 、 h_4/h_1 及 w/t 等指标上。压力波频域方面,平脉和滑脉的能量和频率波动更为显著,与此相对,弦脉在较高频段上的能量降低,PF3、PA3等指标低于平、滑脉,甚至缺乏显著能量,可能反映血管弹性的降低,这些指标或可作为亚健康状态的潜在标志。脉音频域指标主要体现在MSF、RMSF、FV、FSD上。滑脉的脉象复杂度较高、高频成分更多,表明在青少年不同脉象中,滑脉对应更活跃的能量代谢与气血运行状态。根据中医脉诊理论,平脉为“常脉”,反映气血调和、脏腑功能正常;滑脉则圆滑流利,多为气血充盈之象,常见于运动员、青年人和孕妇等^[16]。两者的区别在于滑脉可能伴随痰湿等特殊状态。脉音-脉压联合特征分析能清晰地展现平脉与滑脉在气血和能量上的异同:平脉趋于平和稳定,滑脉则更显活跃,可能与青少年的生理特点或某些特殊状态(如痰湿)相关。上述差异不仅有助于判断机体的生理或病理状态,也为中医辨证施治提供了客观、量化的依据,体现了联合分析在深化中医脉诊理论、推动其现代化进程中的重要作用。

本研究对总体人群和青少年的脉象信号时域、频域指标分别进行了相关性分析,旨在揭示不同信号特征之间的内在联系。结果发现,压力波信号的双指标主要表现为幅值上的强相关,这主要源于压力波信号本质上反映了血管壁的机械运动特性,如血管弹性和外周阻力,这些特性是心脏泵血过程中血管内压力变化的直接体现。与此同时,压力波信号的时域与脉音信号的频域相关性较弱,而压力波信号与脉音信号在频域指标上则表现出基本的正相关趋势,这种差异的根本原因在于压力波信号和脉音信号在生理来源和物理机制上的显著不同。压力波信号主要反映的是血管壁的机械运动,而脉音信号则是由血液流动与血管壁振动产生的声波,其频谱特性与血流动力学参数(如流速、涡流)以及局部组织的共振特性紧密相关。由于这些生理和物理的差异,两种信号的时域、频域特征在关联性上自然表现出较弱的趋势。尽管压力波与脉音频域参数的相关性较弱,但也进一步说明脉音-脉压联合特征分析能够全面反映青少年心血管功能状态。

既往研究已经揭示了脉象声波信号特征在疾

病诊断中的潜在价值^[17-19]。在青少年中,不同的健康行为方式表现出显著的个体差异,这些差异往往与体质类型紧密相关。根据中医的辨证论治原则,我们可以针对青少年的不同体质,如气虚质、阳虚质、痰湿质等,制定个性化的干预方案,旨在有效纠正体质偏颇,促进阴阳平衡,保障青少年的身心舒适和健康^[6]。

基于以上数据及讨论可见,脉音信号是声音的一种特殊形式,其强弱反映人体气血功能的状态,能够从血流动力学和振动特性角度揭示青少年的生理健康状态。本研究所观察到的青少年“高能量、快传导”脉象特征,正是其气血旺盛、心血管系统活跃的正常生理体现。脉音-脉压联合特征分析不仅能够加深我们对脉象信号特征多维度的理解,也突显了联合特征分析在中医脉诊现代化中的重要作用,为构建更为全面和精准的脉诊体系提供了重要的理论依据和实践指导。本研究因青年男性样本量不足,重点讨论女性群体,男性群体的应用则需进一步研究。课题组在后续研究中将着力扩大男性样本,以完整揭示性别对脉象年龄演变的影响。同时,考虑到青少年机体的活跃性和个体差异的广泛性,我们计划在未来的研究中对青少年进行长期脉音追踪,分析其随年龄、季节或生活习惯变化的动态规律,建立个体化健康基线,利用机器学习算法提取跨模态特征,进一步探讨脉音-脉压联合特征分析在青少年时期健康评估中的意义,以期更准确地把握青少年健康状况,为他们的健康成长提供更为科学的指导。同时,也为中医脉诊的现代化研究提供新的范式。

参考文献:

- [1] 万雪娇,张彭跃,黄培冬,等.中医人工智能体质辨识的管理与运用[J].中国民间疗法,2023,31(18):120-124.
- [2] 哈凯婷,胡晓娟,董致臻,等.脉音客观化研究进展[J].时珍国医国药,2025,36(8):1523-1529.
- [3] 钱烨.基于腕部声学传感器的心率和血压监测系统研究[D].西安:西安理工大学,2024.
- [4] 崔骥,许家佗.中医脉诊现代化研究述评[J].中华中医药杂志,2023,38(2):463-469.
- [5] 崔骥,许家佗.人工智能信息技术在中医四诊现代化研究中的应用现状与展望[J].上海中医药杂志,2025,59(1):7-12.
- [6] 王枫,刘琰,王馨苑,等.基于潜在类别分析法探究青少年中医体质分布特征[J].西部中医药,2024,37(6):57-61.
- [7] 陈承立.中医体质辨识在青少年身心健康干预中的应用效果探究[J].黑龙江中医药,2022,51(6):60-62.
- [8] 潘锋.中医药助力儿童青少年健康成长[J].妇儿健康导刊,

- 2025, 4(13): 6-9.
- [9] 崔骥,屠立平,张建峰,等.1720例不同健康状态及年龄梯度人群脉图特征研究[J].上海中医药杂志,2018,52(4):15-23.
- [10] 黄婧禹,贾凤霞,刘飞,等.利用脉诊仪研究中医体质与人体五脏健康的关系[J].科学咨询,2023(9):99-101.
- [11] 石茗茗.增强学生体质健康中人工智能技术应用价值分析[J].文体用品与科技,2024(21):107-109.
- [12] 国家卫生与计划生育委员会.学龄儿童青少年超重与肥胖筛查[EB/OL].(2018-03-29)[2026-0210].<http://www.nhc.gov.cn/wjw/pqt/201803/a7962d1ac01647b9837110bfd2d69b26.shtml>.
- [13] 世界卫生组织.衡量青少年健康全球行动建议的青少年健康指标[EB/OL].(2024-11-06)[2025-12-12].<https://www.who.int/zh/publications/i/item/9789240092198>.
- [14] 费兆馥.现代中医脉诊学[M].北京:人民卫生出版社,2003:163-165.
- [15] 崔骥,费兆馥,张志枫,等.平、滑、弦脉的脉图分类参数范围研究[J].上海中医药杂志,2016,50(12):15-17.
- [16] 邓铁涛.中医诊断学[M].上海:上海科学技术出版社,2013:61-67.
- [17] 王倩.健康女大学生行经期与经前期寸口脉声波特征的临床研究[D].济南:山东中医药大学,2022.
- [18] 于文君.非酒精性脂肪性肝病的现代脉学中涩脉类低频可闻声波表现的临床研究[D].济南:山东中医药大学,2021.
- [19] 高梦琦.腰椎间盘突出症的现代脉学中涩脉类声波的临床研究[D].济南:山东中医药大学,2022.

编辑:马丽亚

收稿日期:2025-07-03

(上接第51页)

- [8] 吴玲玉,宋咏梅.李东垣阴火学说及其现代临床应用探讨[J].南京中医药大学学报,2024,40(8):765-770.
- [9] 李想,谷建军.论李东垣“至而不至,是为不及”思想[J].北京中医药大学学报,2024,47(12):1675-1680.
- [10] 胡冰冰,岳仁宋,周建龙.李东垣伤饮伤食学术思想探析[J].现代中医药,2016,36(6):89-91.
- [11] 赵大鹏,唐宇,初贺明,等.李延运用疏肝化瘀法辨治特发性水肿经验[J].上海中医药杂志,2020,54(3):39-41.
- [12] 欧阳雪,杨雅淋,郑欣.中药治疗特发性水肿分析[J].实用中医药杂志,2022,38(8):1432-1434.
- [13] 谭华儒,朱奎华,李良明.五苓散治疗特发性水肿60例临床观察[J].时珍国医国药,2008,19(9):2288-2289.
- [14] 张远梅,周毅.从脾肾论治特发性水肿验案[J].中国民间疗法,2025,33(11):93-96.
- [15] 王定康.参苓白术散合五苓散加减治疗特发性水肿41例[J].实用中医药杂志,2018,34(6):665-666.
- [16] 石青松,李亚好,朱其苹,等.升阳益胃法辨治特发性水肿56例临床观察[J].中国中医急症,2013,22(12):2090-2091.
- [17] 阙嘉露,庞彩霞,李方园,等.五苓散临床应用及现代机理研究进展[J].亚太传统医药,2025,21(6):227-233.
- [18] 宋瑞芳.《内经》关于便秘的认识[J].现代中医药,2021,41(1):106-110.
- [19] 乔美林,杨敏,方志娥.枳术丸及其衍变方临床应用研究新进展[J].中国医院用药评价与分析,2025,25(7):891-896.
- [20] 戚椿林,廖陈敏,王文凤,等.枳术丸调节肥大细胞活化及PAR-2/CGRP通路治疗慢传输型便秘脾虚证小鼠的机制研究[J].湖南中医药大学学报,2025,45(8):1413-1419.
- [21] 吕继宏,段玉红,张效科,等.香砂六君子汤治疗糖尿病胃轻瘫脾胃气虚兼痰湿气滞型临床研究[J].陕西中医药大学学报,2023,46(4):44-50.
- [22] 毕莲.吴光炯从脾胃论治代谢综合征的学术思想及经验总结[D].成都:成都中医药大学,2016:38.
- [23] 高建忠.浅谈李东垣的内伤学说[J].广州医科大学学报,2025,53(1):61-76.

编辑:严林

收稿日期:2025-11-04