

# 脉冲无线电超宽带雷达技术在成人 OSA 中的应用研究\*

冯晨<sup>1</sup> 张惠栋<sup>1</sup> 韩莹莹<sup>1</sup> 金霄雪<sup>1</sup> 杨飞轮<sup>1</sup> 邹娟娟<sup>1</sup> 王岩<sup>1</sup> 李延忠<sup>1</sup>

**[摘要]** 目的:研究应用脉冲无线电超宽带(IR-UWB)雷达技术对诊断阻塞性睡眠呼吸暂停(OSA)的价值。方法:将79例OSA患者随机分为2组:A组40例患者同时接受PSG和IR-UWB监测,B组39例同时接受微动敏感床垫式睡眠监测设备(MSM)和IR-UWB监测。采用Pearson相关、ROC曲线等对测定的数据进行比较。结果:AHIPSG、AHIMSM与AHIR-UWB显著相关( $r=0.91, P=0.00, r=0.92, P=0.00$ );Bland-Altman分析显示AHIPSG值、AHIMSM值与AHIR-UWB值的结果一致率很高(95.00%、97.44%),其诊断结果一致率很高。AHIR-UWB相对于PSG检出率为敏感性70.40%、特异性89.90%,ROC曲线下面积为0.915。结论:IR-UWB在最低血氧饱和度、平均血氧饱和度、平均中枢型次数、平均混合型次数、平均心率、睡眠效率、REM睡眠时长、平均AHI等方面对于成人OSA有很高的诊断价值,是一种经济实用的客观睡眠评估工具。

**[关键词]** 脉冲无线电超宽带雷达技术;睡眠呼吸暂停,阻塞性;多道睡眠描记术

doi:10.13201/j.issn.2096-7993.2020.07.014

**[中图分类号]** R563.8 **[文献标志码]** A

## Application of impulse-radio ultra-wideband radar as a non-contact portable monitoring device for the diagnosis of obstructive sleep apnea

FENG Chen ZHANG Huidong HAN Yingying JIN Xiaoxue YANG Feilun  
ZOU Juanjuan WANG Yan LI Yanzhong

(Department of Otorhinolaryngology, Qilu Hospital of Shandong University, NHC Key Laboratory of Otorhinolaryngology, Shandong University, Jinan, 250014, China)

Corresponding author: LI Yanzhong, E-mail: liyanzhong@sdu.edu.cn

**Abstract Objective:** To compare the effect of impulse-radio ultrawideband(IR-UWB) radar technology and polysomnography(PSG) in sleep assessment. **Method:** A total of 79 OSA patients were randomly divided into two groups: 40 patients in group A received PSG and IR-UWB, and 39 patients in group B received micromovement sensitive mattress(MSM) and IR-UWB. Pearson correlation and ROC curve were used for statistics. **Result:** AHIPSG and AHIMSM were significantly correlated with AHIR-UWB ( $r=0.91, P=0.00; r=0.92, P=0.00$ ). Bland-Altman analysis showed that AHIR-UWB value was highly consistent with AHIPSG value(95.00%), and AHIR-UWB value(97.44%). The sensitivity and specificity of AHIR-UWB compared with PSG were 70.40% and 89.90%, respectively. The area under ROC curve was 0.915. **Conclusion:** IR-UWB has a high diagnostic value for adult OSA in terms of minimum blood oxygen saturation, average blood oxygen saturation, average number of central sleep apnea, average number of complex sleep apnea, average heart rate, sleep efficiency, REM sleep duration, average AHI, etc. It is an economic and practical sleep evaluation tool.

**Key words** impulse-radio ultrawideband radar technology; sleep apnea, obstructive; polysomnography

阻塞性睡眠呼吸暂停(obstructive sleep apnea,OSA)是一种严重危害人类健康的睡眠呼吸障碍性疾病,其诊断标准为PSG监测,该方法对睡眠监测实验室专业标准要求高,需配置娴熟专业技术人员且费用高昂,难以大规模开展<sup>[1]</sup>。因此许多便携式睡眠监测设备(portable monitoring device, PMD)应运而生,其目标是高诊断价值、低成

本且简单易用。本研究主要对2种非接触便携式监测设备即微动敏感床垫式睡眠监测设备(micromovement sensitive mattress, MSM)和脉冲无线电超宽带(impulse-radio ultrawideband, IR-UWB)雷达设备进行比较,探讨IR-UWB在成人OSA中的诊断价值。

### 1 资料与方法

#### 1.1 一般资料

2019-01—2019-10在山东大学齐鲁医院耳鼻咽喉科连续监测了85例OSA疑似患者,均自述有习惯性打鼾和日间嗜睡,有或没有夜间呼吸暂停。排除标准:①植入电子设备患者;②接受或正在接

\*基金项目:山东省重点研发计划项目(No: 2018GSF118001);山东省自然科学基金项目(No: ZR2018MH017)

<sup>1</sup>山东大学齐鲁医院耳鼻咽喉科 国家卫健委耳鼻咽喉重点实验室(济南,250014)

通信作者:李延忠, E-mail: liyanzhong@sdu.edu.cn

受 OSA 治疗的患者;③严重全身疾病患者;④孕妇;⑤严重背痛和脊柱畸形的患者。最终 79 例参与者符合标准。将 79 例患者随机分为 2 组:A 组 40 例患者同时接受 PSG 和 IR-UWB 监测,B 组 39 例同时接受 MSM 和 IR-UWB 监测,并保证各监测无互相干扰。所有患者均填写书面知情同意书,本研究经山东大学齐鲁医院伦理委员会批准。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 PSG 数据采集

整夜 PSG 包括额中枕部脑电图、双侧眼电图、下巴肌肉肌电图、心电图、使用压力传感器的鼻气流、通过热敏电阻口腔气流、胸腹运动、鼾声分析、睡眠姿势、双侧腿部运动和手指脉冲氧饱和度探测器等。由 2 名经验丰富的睡眠技师根据美国睡眠医学学会(AASM 2012)评分标准进行手动数据分析。将呼吸暂停事件定义为至少 10 s 内气流停止 $\geq 90\%$ ,将低呼吸事件定义为至少 10 s 内气流减少 $\geq 30\%$ 且氧饱和度降低 $\geq 3\%$ 。PSG 检测到的  $AHI_{PSG}$  是根据每小时睡眠中呼吸暂停和低呼吸事件的数量计算的。 $AHI_{PSG} 5 \sim < 15$  为轻度 OSA; $AHI_{PSG} 15 \sim < 30$  为中度 OSA; $AHI_{PSG} \geq 30$  为重度 OSA。

### 1.2.2 IR-UWB 数据采集

IR-UWB 检测设备包括检测仪、手指脉冲氧饱和度探测器和一台个人电脑。采用生物雷达技术,利用生物雷达获取人体呼吸信号,然后通过函数模拟构造伴有呼吸暂停的呼吸仿真信号,最后根据能量谱法和小波信息熵谱法的准确率做出综合判断,实现对睡眠呼吸暂停的非接触监测。

### 1.2.3 MSM 数据采集

MSM 监测系统由专门设计的床垫、手指脉冲氧饱和度探测器和一台个人电脑组成。这张特别设计的床垫长 195 cm,宽 90 cm,厚 10 cm。床垫内置微动敏感压力传感器,能够监测到由心跳、呼吸和其他身体运动引起的轻微压力。在患者睡眠一晚收集上述数据后,将数据记录在存储卡上,传输到个人电脑,然后使用定制的分析软件进行分析。呼吸暂停和低呼吸暂停都与呼吸努力程度有关,并需要以微觉醒结束。

## 1.3 统计学处理

所有数据均采用 SPSS 软件(24.0 版)和 MedCalc(12.7.3 版)。用 Pearson 相关对  $AHI_{PSG}$  与  $AHI_{IR-UWB}$ 、 $AHI_{MSM}$  与  $AHI_{IR-UWB}$  相关性进行评价。采用配对样本  $t$  检验评价  $AHI_{PSG}$  与  $AHI_{IR-UWB}$ 、 $AHI_{MSM}$  与  $AHI_{IR-UWB}$  的差异。使用 MedCalc 进行 Bland-Altman 分析,以评估  $AHI_{PSG}$  与  $AHI_{IR-UWB}$ 、 $AHI_{MSM}$  与  $AHI_{IR-UWB}$  之间的相似性。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 患者数据分析

在总队列( $n=85$ )中,有 6 例患者因为没有经历整夜睡眠而被排除在研究之外。A 组 40 例患者中,男 29 例,女 11 例,年龄 16~60 岁,平均( $38.30 \pm 9.67$ )岁,BMI  $28.72 \pm 4.13$ ;B 组 39 例患者中,男 23 例,女 16 例,年龄 9~79 岁,平均( $42.28 \pm 17.14$ )岁,BMI  $27.17 \pm 5.21$ 。A、B 两组数据均值在最低血氧饱和度(差值 0.73、-2.39)、平均血氧饱和度(差值 -0.32、1.28)、平均中枢型次数(差值 -9.90、3.33)、平均混合型次数(差值 -7.82、3.00)、平均心率(差值 -2.28、-2.87)、睡眠效率(差值 0.40、-5.68)、REM 睡眠时长(差值 5.45、0.95)、平均 AHI(差值 -0.58、2.94)等方面一致率较高,其他如最长低通气时间(差值 0.97、19.38)、平均阻塞型次数(差值 86.40、38.78)、最大心率(差值 -63.23、17.72)、浅睡期时长(差值 -85.32、-30.22)和深睡期时长(差值 40.34、2.20)等数据差值相对较大(表 1)。

A 组中 1 例非 OSA 患者的  $AHI_{PSG}$  为 3.30,  $AHI_{PMD}$  为 2.30;9 例轻度 OSA 患者的  $AHI_{PSG}$  为 5.90~15.00,平均  $AHI_{PSG}$  为  $9.33 \pm 3.06$ ,平均  $AHI_{IR-UWB}$  为  $8.56 \pm 4.90$ ;4 例中度 OSA 患者的  $AHI_{PSG}$  为 17.60~28.10,平均  $AHI_{PSG}$  为  $22.00 \pm 4.47$ ,平均  $AHI_{IR-UWB}$  为  $21.55 \pm 5.81$ ;26 例重度 OSA 患者的  $AHI_{PSG}$  为 31.00~88.70,平均  $AHI_{PSG}$  为  $54.02 \pm 15.35$ ,平均  $AHI_{IR-UWB}$  为  $53.49 \pm 16.58$ 。B 组中 5 例非 OSA 患者的  $AHI_{MSM}$  为 0.80~4.90,平均  $AHI_{MSM}$  为  $3.10 \pm 1.97$ ,平均  $AHI_{IR-UWB}$  为  $4.62 \pm 2.97$ ;6 例轻度 OSA 患者的  $AHI_{MSM}$  为 5.70~14.60,平均  $AHI_{MSM}$  为  $9.73 \pm 2.99$ ,平均  $AHI_{IR-UWB}$  为  $14.50 \pm 10.10$ ;3 例中度 OSA 患者的  $AHI_{MSM}$  为 17.60~25.40,平均  $AHI_{MSM}$  为  $21.97 \pm 3.98$ ,平均  $AHI_{IR-UWB}$  为  $21.90 \pm 8.00$ ;25 例重度 OSA 患者的  $AHI_{MSM}$  为 39.20~91.40,平均  $AHI_{MSM}$  为  $64.34 \pm 14.42$ ,平均  $AHI_{IR-UWB}$  为  $67.50 \pm 11.09$ 。

### 2.2 $AHI_{PSG}$ 值与 $AHI_{IR-UWB}$ 值、 $AHI_{MSM}$ 值与 $AHI_{IR-UWB}$ 值的分析

$AHI_{PSG}$  值与  $AHI_{IR-UWB}$  值(图 1)、 $AHI_{MSM}$  值与  $AHI_{IR-UWB}$  值(图 2)之间存在显著相关性( $r = 0.91$ 、 $P = 0.00$ , $r = 0.92$ 、 $P = 0.00$ ),因此,IR-UWB 评价的 AHI 与 PSG、MSM 评价的 AHI 显著相关。此外,Bland-Altman 分析显示(图 3、4), $AHI_{PSG}$  与  $AHI_{IR-UWB}$  值、 $AHI_{MSM}$  与  $AHI_{IR-UWB}$  值的一致性分别为 95.00%、97.44%,2 种方法诊断

结果一致率很高。AHI<sub>PSG</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 值、AHI<sub>MSM</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 值的平均差异为 0.58 ± 7.57、-2.95 ± 8.07, 差异无统计学意义 (P = 0.62)。AHI<sub>PSG</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 的 Bland-Altman 分析显示对 IR-UWB 的异常值只有 2 (5.00%) 个、AHI<sub>MSM</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 的 Bland-Altman 分析显示对 IR-UWB 的异常值只有 1 (2.56%) 个, IR-UWB 测得的大部分数据都在 PSG 与 IR-UWB、MSM 与

IR-UWB 均值的 2 个标准差内, 表明 AHI<sub>PSG</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub>、AHI<sub>MSM</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 之间的差异在合理范围内。

### 2.3 结果的敏感性和特异性

ROC 曲线分析评估了 IR-UWB 作为 OSA 诊断工具的临床应用价值。结果表明, AHI<sub>IR-UWB</sub> 相对于 PSG 检出率为敏感性 70.40%、特异性 89.90%, AUC=0.915, P=0.00。见图 5。

表 1 A、B 组部分数据均值对比

不同测量指标	A 组			B 组		
	PSG	IR-UWB	差值	MSM	IR-UWB	差值
最低血氧饱和度/%	72.88±13.73	73.61±11.75	0.73	72.44±10.80	70.05±15.90	-2.39
平均血氧饱和度/%	94.25±2.37	93.93±2.53	-0.32	91.44±3.46	92.72±3.38	1.28
最长低通气时间/s	72.66±26.59	73.63±18.02	0.97	53.44±20.70	72.82±12.66	19.38
平均阻塞型次数/次	199.40±103.88	285.80±192.01	86.40	328.50±233.19	367.28±230.85	38.78
平均中枢型次数/次	34.05±52.66	24.15±8.23	-9.90	9.77±16.72	13.10±22.28	3.33
平均混合型次数/次	32.05±35.63	24.23±8.36	-7.82	6.08±7.16	9.08±16.87	3.00
最大心率/次	161.78±35.89	98.55±10.05	-63.23	93.87±12.50	111.59±31.35	17.72
最小心率/次	48.58±6.65	47.50±4.98	-1.08	57.69±7.16	46.56±5.73	-11.13
平均心率/次	69.58±10.12	67.30±9.13	-2.28	72.13±11.04	69.26±11.51	-2.87
睡眠效率/%	88.58±8.24	88.98±7.85	0.40	92.52±4.48	86.84±9.42	-5.68
REM 睡眠时长/min	84.69±33.51	90.14±32.29	5.45	95.96±23.34	96.91±33.19	0.95
浅睡期时长/min	302.52±113.46	217.20±63.22	-85.32	255.63±57.77	225.41±58.50	-30.22
深睡期时长/min	86.94±67.06	127.28±43.95	40.34	137.72±37.43	139.92±56.20	2.20
平均 AHI	39.49±23.87	38.91±24.56	-0.58	44.83±29.14	47.77±28.71	2.94

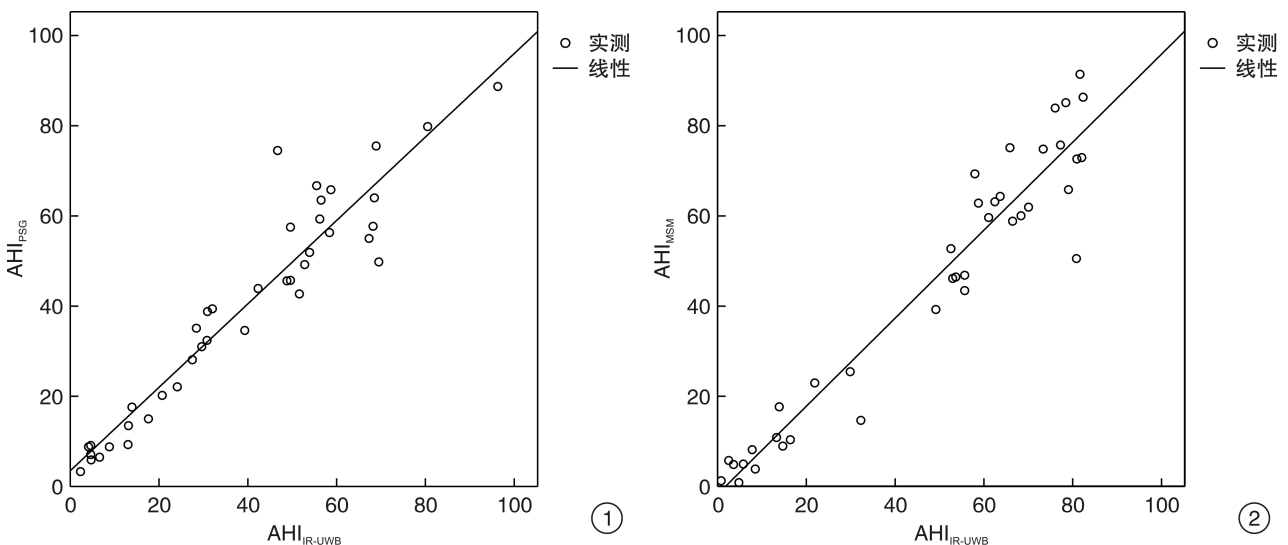


图 1 Pearson 相关系数对 AHI<sub>PSG</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 的相关性分析; 图 2 Pearson 相关系数对 AHI<sub>MSM</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 的相关性分析

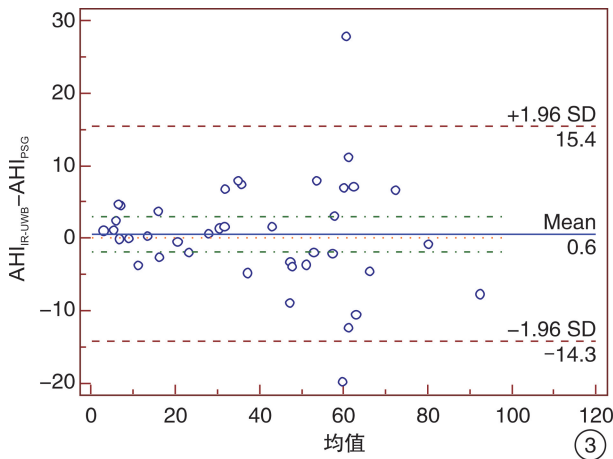


图 3 Bland-Altman 分析;

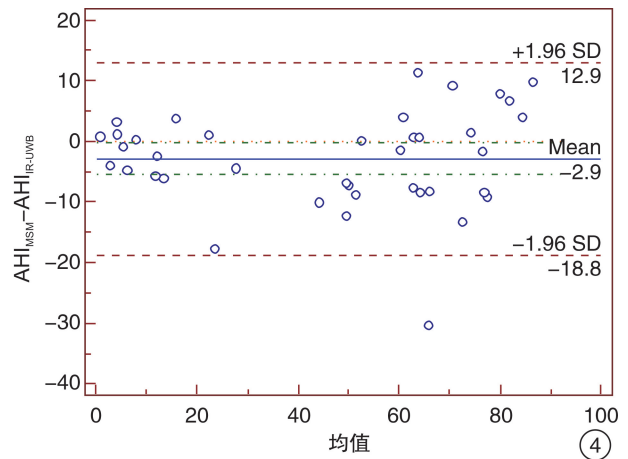


图 4 Bland-Altman 分析

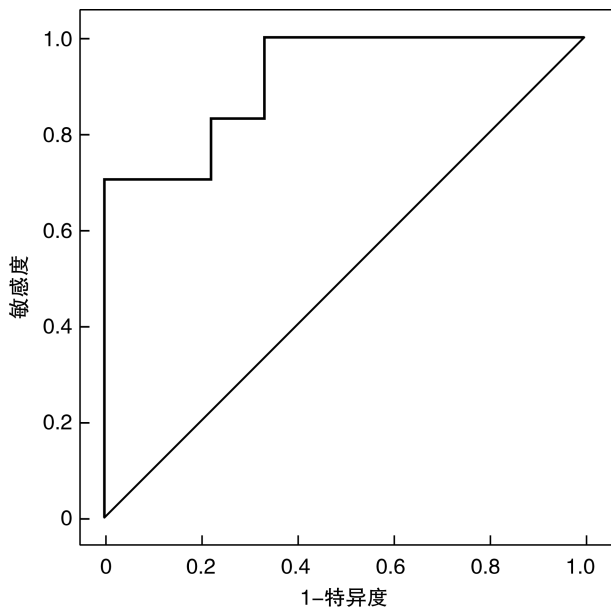


图 5 ROC 曲线

### 3 讨论

OSA 在普通人群中的发病率为 2%~4%<sup>[2]</sup>, 并随着全世界肥胖率的增加而增加<sup>[3]</sup>。大部分未确诊的 OSA 患者因不了解其危害而未寻求治疗<sup>[4]</sup>。近年来便携式睡眠监测技术发展迅速, 并被认为是适当条件下可替代 PSG<sup>[5]</sup>。便携式监测技术主要有接触式和非接触式 2 种: 接触式监测设施通过压力传感器、心电监测等构件与人体接触从而获得受检者睡眠呼吸信号, 典型代表有外周动脉张力测量技术和心肺耦合分析技术; 非接触式监测设备则通过床垫下压力传感器或微波传感器, 非接触地检测目标对象睡眠呼吸信号, 典型代表有 MSM 和 IR-UWB<sup>[1]</sup>。Rosa 等<sup>[6-7]</sup>研究证实 MSM 与 PSG 相比在 OSA 的诊断中具有较高的准确性。

我们目前应用研究结果表明, 相对于金标准

PSG, IR-UWB 是一种经济实用的客观睡眠评估工具, 在最低血氧饱和度、平均血氧饱和度、平均中枢型次数、平均混合型次数、平均心率、睡眠效率、REM 睡眠时长、平均 AHI 等方面有很高的诊断价值。本研究中, Pearson 相关系数分析结果显示, AHI<sub>PSG</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 值、AHI<sub>MSM</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 值存在相关关系。此外, Bland-Altman 分析为 AHI<sub>PSG</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 值、AHI<sub>MSM</sub> 与 AHI<sub>IR-UWB</sub> 值的结果一致性提供了证据。

本研究使用的 IR-UWB 雷达系统是一种无创诊断设备, 主要优点如下: ①舒适, 不影响睡眠; ②适用于怀疑患有 OSA 而不愿接受有连接传感器的 PSG 的患者; ③配备了一个无线脉冲血氧指环。不足在于: ①平均阻塞型次数数值与 PSG、MSM 相差较大, 但平均 AHI 相差不大, 与 IR-UWB 设备不能区分阻塞型睡眠呼吸事件相关, IR-UWB 将低通气事件与完全阻塞型睡眠暂停事件融合, 导致数值上与能区分的 PSG、MSM 相差悬殊, 但最终未能影响整体 AHI 数值; ②最大心率、浅睡期时长和深睡期时长与 PSG、MSM 相差较大, 但平均心率、REM 睡眠时长相差不大, 数据分析后怀疑与 IR-UWB 雷达放置位置有关, 需放置在远离床的固定距离处和固定方向上。

本研究有以下局限性, 需要在以后的研究中解决: ①相对较少的参与者可能会对结果产生误差, 因此, 以后评估临床应用的 IR-UWB 雷达系统需要在多个睡眠中心和社区医院进行; ②本研究以中国汉族人群为研究对象, 因此确认 IR-UWB 雷达系统在其他人群中的准确性也至关重要; ③应该系统地评估 IR-UWB 雷达系统在特定亚群中的诊断准确性, 如在极端肥胖个体和儿童中; ④IR-UWB 雷达需在远离床的固定距离处和固定方向上, 为了

验证其在个人使用中的方便性和通用性,IR-UWB 雷达需要在各种环境下进行测试。

采用 MSM 监测结果具有较高的准确度,然而很难将这些方法视为非接触方法,因为传感器就在患者的下方。IR-UWB 雷达利用一段无线电波来识别一定距离内物体的位置和运动,超宽频段具有分辨率高、多路电阻、穿透性好、硬件结构简单等优点。IR-UWB 雷达已经在许多领域进行了研究,如室内监视、目标跟踪或穿墙成像<sup>[8-9]</sup>。根据美国联邦通信委员会相关指南<sup>[10]</sup>,该雷达对人体无害,因其使用的功率小于 Wi-Fi。由于这些优点,IR-UWB 雷达已被引入作为一种潜在的生命体征监测仪。Pallesen 等<sup>[11-12]</sup>对 IR-UWB 雷达系统进行了 OSA 的心率和呼吸速率等的验证,具有相当高的准确性;还有报道使用 IR-UWB 可以准确识别心房颤动患者的心率等<sup>[13]</sup>。

基于慢病防治和国情现状,在严格掌握 PMD 适应证以及规范化诊断流程的前提下,临床推广应用 PMD 对减缓各级医疗机构 PSG 检查压力、保障 OSA 患者及时得到诊治具有重要意义。5G 时代的到来,将 PMD 与动态血压、心电、血糖等多种生理参数多组块集成,利用 5G 时代的高速数据传输技术,实时传输患者睡眠时信息,构建远程监护终端,让上级医师随时监测患者病情,为其制定个性化诊疗方案,让更多患者得到及时诊治,从而推动 OSA 的预防、初筛及诊疗体系一站式建设<sup>[1]</sup>。

本研究采用的非限制性、非侵入性 IR-UWB 雷达系统诊断 OSA 具有较高的敏感性和特异性,但需要进一步的基于社区的更大样本量的研究来确定 IR-UWB 雷达系统是否适合作为 PSG 监测诊断 OSA 的替代。

#### 参考文献

- [1] 卢迷,房芳,魏永祥. 便携式监测设备在成人阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征诊断中的临床应用[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志,2019,54(6):477-480.
- [2] Young T, Palta M, Dempsey J, et al. The occurrence of sleep-disordered breathing among middle-aged adults[J]. N Engl J Med, 1993, 328(17):1230-1235.
- [3] Peppard PE, Young T, Barnet JH, et al. Increased

- prevalence of sleep-disordered breathing in adults[J]. Am J Epidemiol, 2013, 177(9):1006-1014.
- [4] Strollo PJ, Rogers RM. Current concepts: Obstructive sleep apnea[J]. N Engl J Med, 1996, 334(2): 99-104.
- [5] Collop NA, Anderson WM, Boehlecke B, et al. Clinical guidelines for the use of unattended portable monitors in the diagnosis of obstructive sleep apnea in adult patients[J]. J Clin Sleep Med, 2007, 3(7):737-747.
- [6] Rosa T, Bellardi K, Viana A, et al. Digital health and sleep-disordered breathing: A systematic review and meta-analysis[J]. J Clin Sleep Med, 2018, 14(9): 1605-1620.
- [7] Meng LL, Xu HJ, Guan J, et al. Validation of a novel sleep-monitoring system for diagnosing obstructive sleep apnea: A comparison with polysomnography[J]. Exp Ther Med, 2016, 12(5):2937-2941.
- [8] Kim BH, Han SJ, Kwon GR, et al. Signal processing for tracking of moving object in multi-impulse radar network system[J]. Int J Distrib Sens N, 2015, 11(10):1-12.
- [9] Huang Q, Qu LL, Wu BH, et al. Uwb through-wall imaging based on compressive sensing (vol 48, pg 1408, 2010)[J]. IEEE T Geosci Remote, 2010, 48(3): 1634-1634.
- [10] Lampe L, Witrisal K. Challenges and recent advances in ir-uwband system design[J]. IEEE Int Symp Circ S, 2010, pp:3288-3291.
- [11] Pallesen S, Gronli J, Myhre K, et al. A pilot study of impulse radio ultra wideband radar technology as a new tool for sleep assessment[J]. J Clin Sleep Med, 2018, 14(7):1249-1254.
- [12] Kang S, Lee Y, Lim YH, et al. Validation of non-contact cardiorespiratory monitoring using impulse-radio ultra-wideband radar against nocturnal polysomnography[J]. Sleep Breath, 2019, [Epub Ahead of Print]
- [13] Lee Y, Park JY, Choi YW, et al. A novel non-contact heart rate monitor using impulse-radio ultra-wideband (ir-uwband) radar technology[J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 13053.

(收稿日期:2019-10-22)