

便携式睡眠监测仪在儿童睡眠相关呼吸疾病中的应用现状

朱昭璇, 徐佩茹*

新疆医科大学儿科学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2023年12月8日; 录用日期: 2024年1月2日; 发布日期: 2024年1月10日

摘要

随着科学技术的进步, 目前睡眠监测设备的发展呈现智能化、多样化、简单化, 各类新的便携式设备陆续出现, 这对于儿童睡眠相关呼吸疾病的研究是挑战也是机遇。由于儿童对于多导联监测设备的依从性较差, 为了应用更多的对睡眠干扰少、使用方便的监测方法, 国内外学者们用各种类型便携式设备和标准PSG进行比对分析, 以期找到更加准确、便捷、经济的手段用于儿童睡眠相关呼吸疾病的诊疗。现就近年来国内外各类便携式睡眠监测设备在儿童中的应用现状作一综述。

关键词

儿童, 便携式, 睡眠监测仪

The Application Current Status of Portable Sleep Monitor in Children's Sleep Related Respiratory Diseases

Zhaoxuan Zhu, Peiru Xu*

School of Pediatrics, Xinjiang Medical University, Urumqi Xinjiang

Received: Dec. 8th, 2023; accepted: Jan. 2nd, 2024; published: Jan. 10th, 2024

Abstract

With the progress of science and technology, the development of sleep monitoring equipment is intelligent, diversified and simple, and all kinds of new portable equipment have emerged, which

*通讯作者。

文章引用: 朱昭璇, 徐佩茹. 便携式睡眠监测仪在儿童睡眠相关呼吸疾病中的应用现状[J]. 临床医学进展, 2024, 14(1): 382-389. DOI: 10.12677/acm.2024.141055

is both a challenge and an opportunity for the research of sleep-related respiratory diseases in children. Because children for multiple lead monitoring equipment compliance is poor, in order to apply more interference to sleep less, easy to use the monitoring method, domestic and foreign scholars with various types of portable equipment and standard PSG comparison analysis, in order to find more accurate, convenient and economic means for children sleep related respiratory disease diagnosis and treatment. This paper summarizes the application status of various portable sleep monitoring equipment in children in recent years.

Keywords

Children, Portable, Sleep Monitor

Copyright © 2024 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. 前言

2014年出版的睡眠障碍国际分类(第3版)把睡眠相关呼吸疾病(sleep related breathing disorders, SRBD)分为5类,分别是:阻塞性睡眠呼吸暂停(obstructive sleep apnea disorders, OSA)、中枢性睡眠呼吸暂停(central sleep apnea syndromes, CSA)、睡眠相关低通气症、睡眠相关低氧血症以及单独症候群和正常变异[1]。因儿童特殊的生理、解剖特点以及正处于心肺系统、神经系统、体格、面容等多器官系统生长发育的过程中,导致阻塞性睡眠呼吸暂停(OSA)在儿童群体中是一种发病率较高、并会对其产生长远危害的疾病。而该病的诊治主要依靠睡眠监测检查提供阻塞性呼吸暂停指数(OAI)、呼吸暂停低通气指数(AHI)和血氧饱和度(SaO₂)等数据支持,目前研究并诊断多种睡眠相关呼吸疾病包括OSA的金标准是使用多导睡眠监测仪(polysomnography, PSG) [2]。但是儿童患者对PSG设备依从性差,使用时睡眠效率低下,并且PSG费用昂贵,需要专人整夜值守,大部分医院不能普及。随着技术进步,便携式睡眠监测设备(Portable monitor, PM)被开发出来,PM具有操作简单、经济便捷等优势,作为PSG的替代方法在儿童睡眠相关呼吸疾病的临床应用中越来越重要[3] [4]。有学者比较了2种设备的成功率和患者满意度,结果发现因PM的简单便携,PM组的成功率和患者满意度均高于PSG组[5]。

2. 睡眠监测设备分类

美国睡眠障碍学会(American Sleep Disorders Association and Sleep Research Society, ASDA)在1994年把睡眠监测设备划分为四个等级[6]。

I级:标准多导睡眠监测仪(PSG),至少记录包括脑电图(electroencephalogram, EEG)、下颌肌电图(electromyography, EMG)、眼电图(electrooculogram, EOG)、呼吸气流、呼吸运动、动脉血氧饱和度(SaO₂)和心电图(electrocardiogram, ECG)在内的七个指标,必须有专业人员整夜值守,必要时进行相应处理,整个过程需在睡眠室中进行。

II级:全指标便携式多导睡眠监测仪,和标准PSG一样记录上述7个参数,但无需在睡眠室中进行,亦无需专业人员整夜值守。

III级:改良便携式睡眠呼吸暂停检查,至少记录4个参数,分别是2个呼吸的指标(呼吸运动、呼吸气流)、1个心脏的指标(心率或心电图)以及动脉血氧饱和度,无需睡眠室和专业人员值守。

IV 级: 单或双生物指标持续记录, 至少记录 1 个参数(一般为血氧饱和度或呼吸), 亦无需睡眠室和专业人员值守。

随着时代的发展, 科学家们开发出了许多新式睡眠监测设备, 按照上述方法分级后部分属于较低等级, 而对于这些新产品来说单纯根据记录的导联数目评估等级有失公平。比如通过外周动脉张力得到睡眠呼吸事件的 Watch PAT 设备, 该设备主要收集外周动脉张力、脉搏和血氧饱和度等信号, 再通过专利软件处理后得到呼吸数据[7]。有研究显示 Watch PAT 在儿童中得到的 ODI、AHI 以及血氧饱和度等指标和 PSG 设备无显著差别[8] [9]。虽然该设备可以通过计算得到 AHI 等呼吸事件的详细数据, 但因缺少可以直接采集呼吸运动的导联, 所以按照 1994 年的分类属 IV 型便携式监测。

2011 年, 美国睡眠医学学会(AASM)制定了一个更具体并且科学的 PM 分类方案——SCOPER [10], 它从睡眠(sleep)、心血管(cardiovascular)、血氧(oximetry)、体位(position)、呼吸努力(effort)和呼吸(respiration) 6 个方面对设备进行分类评级, 但因此方法使用起来比较复杂, 目前还未在国际上广泛应用。

3. 各类便携式睡眠监测设备在儿童睡眠相关呼吸疾病中的应用

3.1. I 型睡眠监测设备

I 型睡眠监测设备即 PSG 是诊断睡眠呼吸相关疾病的金标准, 收集包括脑电图、眼动图、呼吸气流、呼吸运动在内的 7 种参数, 所以可以获得睡眠结构分期[11] [12], 也可以更准确的判断睡眠呼吸事件[13]。但因导联较多, 使用繁琐, 价格昂贵, 且必须在专门的睡眠实验室内由专人整夜值守, 从而限制了其在临床广泛使用, 加拿大的一项研究显示因 PSG 的昂贵且需在专门的睡眠中心完成, 导致当地只有很少的儿童在做腺扁桃体切除术之前选择完善多导睡眠监测并明确诊断[14]。并且实验室对于第一次检查的患者来说是陌生的睡眠环境, 会引起首夜效应(first night effect, FNE), 有研究显示首夜效应会导致睡眠效率降低、睡眠持续时间缩短、睡眠过程中过度唤醒、睡眠深度较浅等问题, 从而检查结果出现偏差[15] [16]。但不能否认 PSG 因其直接并且全面的导联目前仍是睡眠呼吸相关研究最可靠的监测手段。

3.2. II 型 PM

II 型 PM 记录的参数与 I 型标准 PSG 完全相同, 但无需在睡眠实验室内进行, 且无专业技术人员整夜值守。关于 II 型 PM 国内外相关研究较少, 我国有研究显示其在青少年和成人中一次检查成功率高达 97%, 失败者多因无人值守从而未能及时发现导联脱落, 但总体成功率较高[17]。国外研究者对 81 名疑似患有 OSA 的 6~18 岁儿童分别进行 I 型和 II 型睡眠监测, 得到的结果是二者在觉醒次数、呼吸指数和睡眠阶段的相关性非常高, 但是 II 型表现出较少的 2 期睡眠和较高的睡眠效率, 最后在 OSA 的诊断中显示, 在家进行的 II 型睡眠监测假阳性率为 6.6%, 假阴性率为 3% [18]。总的来说 II 型设备和标准 PSG 在诊断儿童睡眠呼吸障碍性疾病上并无较大差异, 但因其导联一样, 对于儿童来说 II 型 PM 设备和 PSG 同样难以适应, 并且和 PSG 相比又无专人监测, 当夜间出现设备脱落等突发事件不能及时处理, 从而导致记录缺失并影响最终结果。

3.3. III 型 PM

III 型 PM 包含的 4 个参数中必须要有 2 个参数体现是否存在呼吸运动, 通过监测口鼻气流和胸腹运动可以对呼吸事件进行分型, 与没有这 2 个参数的 IV 型设备相比可以鉴别出呼吸事件是属于阻塞性还是中枢性的呼吸暂停。国内有研究者对 36 名疑似 OSA 的儿童同时进行 PSG 和 III 型 PM 检查, 以 PSG 作为诊断 OSA 的金标准, 发现 PM 灵敏度为 97.1%, 特异度为 100.0%, 准确率为 97.2% [19]。也有研究者使用某德国产 III 型 PM 设备对 3~14 岁打鼾儿童进行睡眠监测, 同样以 PSG 结果作参考标准, 发现 3~5

岁儿童 PM 的灵敏度为 100%，特异度为 93.75%，准确度 96.55%，而 6~14 岁儿童 PM 和 PSG 监测数据完全一致[20]。在成人中的研究发现当 $AHI \geq 5$ 次/h 时，与 PSG 相比，III 型 PM 具有 98.8% 的敏感度，40.0% 的特异度，当 $AHI \geq 15$ 次/h 时，具有 91.5% 的敏感度，76.5% 的特异度[21]。国外研究者用 III 型 PM 设备对患有睡眠呼吸疾病的儿童进行诊断实验，发现该设备和 PSG 的诊断一致性为 83%，但是针对病情严重程度的分级，病情越轻，两种设备相关性越低[22]。在一项 III 型 PM 与 PSG 在阻塞性睡眠呼吸暂停筛查中的对比研究中发现两者的呼吸指数存在高度相关性，并且 PM 在识别严重 OSA (AHI 大于 30) 时有更高的特异性[23]。总体而言 III 型 PM 设备相较 II 型更加易于操作、儿童患者适应性更好，对于儿童睡眠呼吸障碍性疾病的诊断也有较高的准确性，并且许多研究都证明了 OSA 的严重程度越高诊断的准确度也越高，这一切都表明 III 型 PM 作为 PSG 的替代品用于睡眠呼吸障碍性疾病的筛查和诊治有很好前景。

3.4. IV 型 PM

IV 型 PM 种类多样，每种之间监测的生物指标差异很大，下面分别介绍几种常见类型的临床应用情况。

1) 基于光电容积脉搏波(photoplethysmograph, PPG)的睡眠监测仪：该类设备利用光电信号监测血液容积，得到的波谱中存在与心率和呼吸相关的信号，再使用专有算法生成呼吸波形，从而得到呼吸事件[24][25]。关于此类通过光电容积脉搏波信号得到呼吸事件的技术已经广泛的应用于睡眠呼吸监测。有研究者得到，使用该信号计算呼吸事件的设备在 1~14 岁儿童 OSA 的诊断以及各项参数上与 PSG 的结果有统计学一致性，且相关性良好，其中 AHI 在学龄前期儿童的相关系数 $r = 0.71$ ，学龄期儿童则为 0.83，提示学龄期的结果可能更接近于金标准[26]。而其在成人轻度睡眠呼吸暂停中的敏感性为 95.3%，特异性为 50.0%，中度和重度睡眠呼吸暂停的敏感性分别为 89.7% 和 68.8%，特异性分别为 90.0% 和 97.0% [27]。PPG 技术还可以用于对睡眠阶段进行分类，有研究发现它对二级、三级和四级睡眠阶段分类的总准确率分别为 84.66%、79.62% 和 72.23% [28]。这些结果表明，使用 PPG 技术可以进行医学用途的睡眠呼吸监测，而目前基于 PPG 的监测仪绝大部分为轻便的可穿戴设备，其中不乏大量的腕表式设计，这可以很好地提升使用的舒适度并且有利于进行更加长期的监测，并不局限于一晚。但是 PPG 信号是通过光电传播的体现血液容量变化的信号，所以患者皮肤和指甲的颜色、肢端毛细血管灌注情况在很大程度上会影响实验结果。以上研究也证明了该类设备与 PSG 的一致性会因为年龄和疾病严重程度而改变，但此技术因其经济性、非专业性，仍然是在家中实现自动睡眠监测的主要途径。

2) 基于压力传感器的床垫式睡眠监测仪：此类设备通过放置在床垫内部的压力传感器，以一种对人体不施加影响的方式收集睡眠时产生的动态压力，主要包括胸部周期性扩张和收缩产生的压力以及心脏向血管泵血时产生的冲击力[29]。其中胸部周期性舒张得到的压力信号可以转化成呼吸运动的波形。而描记心脏泵血时产生的压力可以得到心冲击图(ballistocardiogram, BCG)，从而得到心率、心率变异性等循环系统的相关数据[30]。国外有研究者对 102 名成年志愿者同时进行 PSG 和某种床垫式睡眠监测，结果显示 35 名参与者呼吸暂停低通气指数(AHI) ≥ 5 ，与 PSG 相比该设备估计 OSA ($AHI \geq 5$) 的准确性、敏感性和特异性分别为 87.3%、85.7% 和 88.1%，说明在估计呼吸暂停和低呼吸事件方面此种设备具有较高的准确性、敏感性和特异性[31]。我国有研究显示：对于已经确诊 OSA 的儿童进行床垫式睡眠监测系统与常规多导睡眠监测(PSG)系统后发现，前者在快动眼睡眠、慢动眼睡眠及苏醒前 30 分钟的血氧饱和度均显著低于后者，而前者的 AI、OAI、HI、睡眠呼吸暂停及夜间周期性腿动发生率则显著高于后者，这说明对于儿童 OSA 使用该床垫睡眠监测系统进行检查能提高对呼吸相关参数的监测敏感度，从而可以更准确地进行诊疗[32]。也有研究者在对 54 名 OSA 儿童分别使用 PSG 以及微动敏感床垫式睡眠监测设备进行睡眠监测后，发现两种监测设备的 $LSaO_2$ 、 $MSaO_2$ 与 ODI 指标差异均无统计学意义，并且不同睡眠监

测方式得到的病情分级情况差异也无统计学意义, 同时发现微动敏感床垫的一次检测成功率为 96.30%, 明显高于多导睡眠监测的 83.33%, 该差异有统计学意义[33]。综上所述, 此类基于压力传感器的床垫式睡眠监测仪在儿童阻塞性睡眠呼吸疾病应用中准确率较高, 并且因为检测手段是对于睡眠无干扰的模式, 所以具有较高的成功率, 适合在专业机构中作为初筛疾病的方法进行推广, 但因其通常体积较大、造价较高以及缺乏专业的消毒, 距离常规使用该设备进行家庭睡眠监测还有一段路程。

3) 基于鼾声的睡眠监测设备: 打鼾是阻塞性睡眠呼吸疾病最常见的症状, 许多研究表明对于鼾声的分析与可以帮助诊断和评估睡眠呼吸障碍性疾病, 而目前对于鼾声的测量方法有许多, 包括麦克风(测量打鼾的声音)、压电传感器(测量鼾声振动)等, 但由于研究者和临床医生在声音的强度和频率等变量方面没有共同的参考值, 测量打鼾的客观方法和打鼾相关概念在不同研究中存在差异, 关于如何测量和利用鼾声, 目前尚未达成共识[34] [35]。因其尚未成熟的检查手段, 以及不同年龄段儿童鼾声频率、分贝等难以统一标准, 国内外专门针对儿童进行的基于鼾声的睡眠监测研究较为罕见。并且该类技术的难点往往在于如何准确分辨环境杂音和检查所需的呼吸音, 国外有学者使用大规模记录音频数据的方法训练神经网络模型, 以区分呼吸声和环境噪声, 随后通过训练好的模型得到睡眠声音信号中的呼吸音, 从而在潜在患者中识别阻塞性睡眠呼吸暂停综合征患者。使用该技术在 132 名潜在 OSA 患者中进行诊断实验, 发现在不同呼吸暂停低通气指数和性别的患者中, 其准确率可达到 81.63%~77.22% [36]。在一项夜间睡眠研究中, 记录了打鼾呼吸的分贝和次数并且测量了呼吸暂停低通气指数(AHI), 最后采用回归模型确定打鼾和阻塞性睡眠呼吸暂停综合征(AHI ≥ 5 次/h)客观指标之间的关系, 发现打鼾强度和频率是 OSA 的独立预测因素[37]。也有研究者提出了一种更有效的基于鼾声分析的 OSA 筛查方法, 通过与 XGBoost 相结合的声学特征、与卷积神经网络相结合的 Mel 时频谱、与残差神经网络相结合的 Mel 时频谱, 把这三个模型进行融合, 估计受试者的呼吸暂停低通气指数(AHI), 提出的融合模型的准确率达到 83.44%, 预测的 AHI 与 PSG 的 Pearson 相关系数为 0.913 ($r = 0.834, p < 0.001$) [38]。以上研究结果虽然证明了基于鼾声分析预测 AHI 的有效性, 并显示出在家中无干扰睡眠监测的巨大潜力, 但关于儿童患者的临床应用还有一段距离。

4) 基于生物雷达的睡眠监测设备: 生物雷达可以通过发送在频域中的宽带信号穿透一定范围内的非金属材料, 从而监测呼吸和身体运动[39]。国内有研究者分别使用标准 PSG 和生物雷达设备对 56 名疑似 OSA 的 5~14 岁患儿进行睡眠监测, 该设备主要通过生物雷达技术无接触的监测患儿的呼吸运动, 继而可以得到患儿呼吸事件的数据, 最终 PSG 得到的 AHI 为 17.5 ± 8.01 , 生物雷达得到的 AHI 为 18.8 ± 8.81 , 结论是此种生物雷达技术筛查仪与 PSG 的 AHI 指数呈正相关($r = 0.938, p < 0.05$), 与 PSG 设备相比具有一致性, 但该设备无法得到睡眠时氧饱和及口鼻气流的具体情况, 导致了筛查特异性降低[40]。国外研究者对 32 名 2 个月到 14 岁儿童同时使用 PSG 和超频宽带雷达测量夜间睡眠时的身体运动和呼吸数据, 再从原始雷达信号获得的数据中计算出各项睡眠指标, 发现与标准 PSG 相比该设备清醒和睡眠分类的总准确率为 89.8%, 对觉醒、快速眼动睡眠和非快速眼动睡眠进行分类的 Kappa 值为 0.47, 准确率为 72.9%, 对觉醒、快速眼动睡眠、轻度睡眠和深度睡眠分类 Kappa 值为 0.43, 准确率为 58.0% [41]。以上数据说明了虽然生物雷达现阶段在儿童睡眠监测方向上的性能还不足以用于临床, 但这种可以完全达到无接触式检查并且理论上监测精度极高的生物雷达系统是一种很有前途的儿童便携式睡眠监测设备。只是目前相比于其他便携式睡眠监测仪, 该技术在成人及儿童睡眠监测中的应用仍属于较新的领域, 国内外临床研究较少, 暂时缺乏大样本量的研究, 今后还需要进一步的开发。

4. 总结与展望

总的来说, 随着今后医务工作者和广大家长对于儿童睡眠相关呼吸疾病的重视以及相关研究的进展,

睡眠监测设备的市场需求将与日俱增, 而各类便携式睡眠监测仪因其应用场景多样, 可以完成各年龄段儿童的居家睡眠监测, 虽然不能完全替代 PSG 等多导联设备在临床上的应用, 但作为初筛工具大大促进了 OSA 等疾病的早发现、早治疗, 又因为睡眠研究的特殊性, 为了避免首夜效应, 穿戴式以及无接触式的家庭睡眠监测技术具有更加广泛的应用前景。

但是, 大部分的便携式睡眠监测仪对于人体各项生物指标的采集较标准 PSG 明显减少, 这会导致最终结果出现偏差, 所以并不能常规用于临床诊断, 并且目前对于各种新型生物信号的采集, 并没有统一的标准, 采集后如何判断呼吸事件不同研究者也有自己的看法, 希望随着国内外学者进一步的研究以及 AI、材料学、声学等相关技术的进步, 未来在儿童便携式睡眠监测研究上能有所突破, 开发出兼具准确性、便捷性、经济性的并对睡眠无干扰的新型设备。

参考文献

- [1] 聚焦新版睡眠相关呼吸疾病的国际分类[J]. 中华医学信息导报, 2015, 30(1): 18.
- [2] 中国儿童 OSA 诊断与治疗指南制订工作组, 中华医学会耳鼻咽喉头颈外科学分会小儿学组, 中华医学会儿科学分会呼吸学组, 等. 中国儿童阻塞性睡眠呼吸暂停诊断与治疗指南(2020) [J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2020, 55(8): 729-747.
- [3] Aikebaier, T., Zehua, L., Jie, C. and Chen, X. (2023) Can Portable Sleep Monitors Replace Polysomnography for Diagnosis of Pediatric OSA: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, **280**, 4351-4359. <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08095-6>
- [4] Xian, Z.X., Wang, X., Chen, Y.C. and Teng, Y.S. (2023) Preliminary Assessment of Portable Sleep Monitoring for Diagnosis of Obstructive Sleep Apnea in Children. *Sleep & Breathing*. <https://doi.org/10.1007/s11325-023-02919-9>
- [5] 石悦颖, 于爱云, 崔玮, 等. 便携式睡眠监测仪对阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征诊断的方便性研究[J]. 河北医药, 2020, 42(22): 3449-3451, 3455.
- [6] Ferber, R., Millman, R., Coppola, M., Fleetham, J., Murray, C.F., Iber, C., McCall, W.V., Nino-Murcia, G., Pressman, M. and Sanders, M. (1994) Portable Recording in the Assessment of Obstructive Sleep Apnea. *Sleep*, **17**, 378-392. <https://doi.org/10.1093/sleep/17.4.378>
- [7] 王宁宇, 张娟. 便携式睡眠监测仪发展现状[J]. 中国医学文摘(耳鼻咽喉科学), 2010, 25(6): 302-304.
- [8] Tanphaichitr, A., Thianboonsong, A., Banhiran, W., Vathanophas, V. and Ungkanont, K. (2018) Watch Peripheral Arterial Tonometry in the Diagnosis of Pediatric Obstructive Sleep Apnea. *Otolaryngology—Head and Neck Surgery*, **159**, 166-172. <https://doi.org/10.1177/0194599818768215>
- [9] Choi, J.H., Lee, B., Lee, J.Y. and Kim, H.J. (2018) Validating the Watch-PAT for Diagnosing Obstructive Sleep Apnea in Adolescents. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, **14**, 1741-1747. <https://doi.org/10.5664/jcsm.7386>
- [10] Collop, N.A., Tracy, S.L., Kapur, V., Mehra, R., Kuhlmann, D., Fleishman, S.A. and Ojile, J.M. (2011) Obstructive Sleep Apnea Devices for Out-of-Center (OOC) Testing: Technology Evaluation. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, **7**, 531-548. <https://doi.org/10.5664/JCSM.1328>
- [11] Hejazi, N.S., Farmer, C.A., Oppenheimer, M., Falodun, T.B., Park, L.T., Duncan Jr., W.C. and Zarate Jr., C.A. (2022) The Relationship between the HDRS Insomnia Items and Polysomnographic (PSG) Measures in Individuals with Treatment-Resistant Depression. *Journal of Psychiatric Research*, **148**, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychemes.2022.01.022>
- [12] 张一彤, 李青香, 石争浩, 等. 阻塞性睡眠呼吸暂停儿童睡眠结构研究及睡眠结构判读模型建立[J/OL]. 山东大学耳鼻喉眼学报, 2023: 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1437.R.20231108.1321.004.html>, 2023-11-29.
- [13] Markun, L.C. and Sampat, A. (2020) Clinician-Focused Overview and Developments in Polysomnography. *Current Sleep Medicine Reports*, **6**, 309-321. <https://doi.org/10.1007/s40675-020-00197-5>
- [14] Radhakrishnan, D., Knight, B., Gozdyra, P., Katz, S.L., Maclusky, I.B., Murto, K. and To, T.M. (2021) Geographic Disparities in Performance of Pediatric Polysomnography to Diagnose Obstructive Sleep Apnea in a Universal Access Health Care System. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, **147**, Article ID: 110803. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2021.110803>
- [15] Mayeli, A., Janssen, S.A., Sharma, K. and Ferrarelli, F. (2022) Examining First Night Effect on Sleep Parameters with hd-EEG in Healthy Individuals. *Brain Science*, **12**, Article 233. <https://doi.org/10.3390/brainsci12020233>
- [16] 李焕, 陈琪, 房芳. 首夜效应在睡眠障碍相关疾病中的研究进展[J]. 中国医药, 2022, 17(5): 772-775.

- [17] 沈文富, 王强, 蒋冬兰. 无人值守整夜多导睡眠图评估睡眠呼吸暂停低通气综合征患者 300 例[J]. 中国临床康复, 2005, 9(27): 138-165.
- [18] Withers, A., Maul, J., Rosenheim, E., O'Donnell, A., Wilson, A. and Stick, S. (2022) Comparison of Home Ambulatory Type 2 Polysomnography with a Portable Monitoring Device and In-Laboratory Type 1 Polysomnography for the Diagnosis of Obstructive Sleep Apnea in Children. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, **18**, 393-402. <https://doi.org/10.5664/jcsm.9576>
- [19] 黄龙, 秦江波, 常玮, 等. 便携式睡眠监测仪应用于儿童 OSAHS 诊断的临床分析[J]. 中国耳鼻咽喉颅底外科杂志, 2020, 26(4): 448-451.
- [20] 滕以书, 冼志雄, 韩赛红, 等. 便携式睡眠监测在儿童 OSAHS 临床诊断中的应用初探[J]. 中国耳鼻咽喉颅底外科杂志, 2018, 24(5): 409-412.
- [21] 温永飞, 常远, 许力月, 等. III 型便携式睡眠呼吸监测仪对阻塞性睡眠呼吸暂停患者的诊断价值[J]. 中华医学杂志, 2019, 99(38): 2994-2999.
- [22] Bandla, H.P., Hordvik, N.L. and Bojanski, R. (2009) The Concordance of Sleep Disorder Diagnoses in Children Post Type III Portable Monitoring Device vs In-Laboratory Polysomnography. *American Thoracic Society 2009 International Conference*, San Diego, 15-20 May 2009, A1756. https://doi.org/10.1164/ajrccm-conference.2009.179.1_MeetingAbstracts.A1756
- [23] Driver, H.S., Pereira, E.J., Bjerring, K., Toop, F., Stewart, S.C., Munt, P.W. and Fitzpatrick, M.F. (2011) Validation of the MediByte[®] Type 3 Portable Monitor Compared with Polysomnography for Screening of Obstructive Sleep Apnea. *Canadian Respiratory Journal*, **18**, Article ID: 760958. <https://doi.org/10.1155/2011/760958>
- [24] 邹滋润, 陈真诚, 朱健铭. 基于光电容积脉搏波的呼吸波提取[J]. 中国生物医学工程学报, 2013, 32(4): 508-512.
- [25] 周晶晶, 叶继伦, 张旭. 基于光电容积脉搏波的呼吸信号提取及其系统的研制[J]. 中国医疗器械杂志, 2021, 45(2): 136-140. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2021.02.004>
- [26] 蔡慧琳. 便携式睡眠监测诊断儿童阻塞性睡眠呼吸暂停综合征的应用价值[D]: [硕士学位论文]. 温州: 温州医科大学, 2019.
- [27] Li, Y., Gao, H. and Ma, Y. (2017) Evaluation of Pulse Oximeter Derived Photoplethysmographic Signals for Obstructive Sleep Apnea Diagnosis. *Medicine*, **96**, e6755. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000006755>
- [28] Motin, M.A., Karmakar, C., Palaniswami, M., Penzel, T. and Kumar, D. (2023) Multi-Stage Sleep Classification Using Photoplethysmographic Sensor. *Royal Society Open Science*, **10**, Article ID: 221517. <https://doi.org/10.1098/rsos.221517>
- [29] Qi, P., Gong, S., Jiang, N., Dai, Y., Yang, J., Jiang, L. and Tong, J. (2023) Mattress-Based Non-Influencing Sleep Apnea Monitoring System. *Sensors*, **23**, Article 3675. <https://doi.org/10.3390/s23073675>
- [30] Sadek, I., Biswas, J. and Abdulrazak, B. (2019) Ballistocardiogram Signal Processing: A Review. *Health Information Science and Systems*, **7**, Article No. 10. <https://doi.org/10.1007/s13755-019-0071-7>
- [31] Ding, F., Cotton-Clay, A., Fava, L., Easwar, V., Kinsolving, A., Kahn, P., Rama, A. and Kushida, C. (2022) Polysomnographic Validation of an Under-Mattress Monitoring Device in Estimating Sleep Architecture and Obstructive Sleep Apnea in Adults. *Sleep Medicine*, **96**, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2022.04.010>
- [32] 罗向前, 杨李强, 钟建文, 等. 微动敏感床垫与可穿戴设备在儿童阻塞性睡眠呼吸暂停睡眠初筛中的应用[J]. 中国医学创新, 2018, 15(20): 92-95.
- [33] 杨帆, 刘燕, 屈建强. 微动敏感床垫睡眠监测应用于儿童阻塞性睡眠呼吸暂停综合征的价值[J]. 临床医学研究与实践, 2018, 3(19): 75-76. <https://doi.org/10.19347/j.cnki.2096-1413.201819036>
- [34] Abdel Kebir, S. and Sandrine, L. (2022) Tracheal Sound Analysis. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, **1384**, 265-280.
- [35] Kim, S.G., Cho, S.W., Rhee, C.S. and Kim, J.W. (2023) How to Objectively Measure Snoring: A Systematic Review. *Sleep & Breathing*.
- [36] Luo, J., Liu, H., Gao, X., Wang, B., Zhu, X., Shi, Y., Hei, X. and Ren, X. (2020) A Novel Deep Feature Transfer-Based OSA Detection Method Using Sleep Sound Signals. *Physiological Measurement*, **41**, Article ID: 075009. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/ab9e7b>
- [37] Sowho, M., Sgambati, F., Guzman, M., Schneider, H. and Schwartz, A. (2020) Snoring: A Source of Noise Pollution and Sleep Apnea Predictor. *Sleep*, **43**, zsz305. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsz305>
- [38] Song, Y.J., Sun, X.R., Ding, L., et al. (2023) AHI Estimation of OSAHS Patients Based on Snoring Classification and Fusion Model. *American Journal of Otolaryngology*, **44**, Article ID: 103964. <https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2023.103964>

-
- [39] 阮露露. 新型睡眠监测设备对 OSAHS 诊断价值的研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏医科大学, 2022. <https://doi.org/10.27258/d.cnki.gnxyc.2021.000169>
- [40] 杭金国, 张燕, 孙颖, 等. 超宽带生物雷达技术在儿童阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征诊断中的应用[J]. 现代实用医学, 2020, 32(2): 192-193.
- [41] de Goederen, R., Pu, S., Silos Viu, M., Doan, D., Overeem, S., Serdijn, W.A., Joosten, K.F.M., Long, X. and Dudink, J. (2021) Radar-Based Sleep Stage Classification in Children Undergoing Polysomnography: A Pilot-Study. *Sleep Medicine*, **82**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2021.03.022>