

宽频声导抗在耳科疾病诊断中应用的研究进展

蒲 玲

重庆医科大学附属第一医院耳鼻咽喉头颈外科, 重庆

收稿日期: 2025年2月11日; 录用日期: 2025年3月4日; 发布日期: 2025年3月11日

摘 要

宽频声导抗(Wideband Acoustic Immittance, WAI)是一种新兴的、非侵入性的通过测量中耳对声波的吸收和反射来评估中耳功能的听力检测技术, 其覆盖226~8000 Hz频率范围。相比于传统的226 Hz声导抗检查, WAI能提供中耳更全面、精准的信息。WAI在诊断中耳炎、耳硬化症等疾病中显示出了高敏感性和高特异性, 同时WAI测试结果仍受到多种因素的影响。本文对宽频声导抗在耳科疾病中的应用进展进行了综述。

关键词

宽频声导抗, 吸收率, 敏感性, 特异性

Research Advances in the Application of Wideband Acoustic Immittance in the Diagnosis of Ear Diseases

Ling Pu

Department of Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Feb. 11th, 2025; accepted: Mar. 4th, 2025; published: Mar. 11th, 2025

Abstract

Wideband Acoustic Immittance (WAI) is an emerging, non-invasive hearing test technology that assesses middle ear function by measuring the absorption and reflection of sound waves in the middle ear, covering a frequency range of 226~8000 Hz. Compared to traditional 226 Hz tympanometry, WAI provides more comprehensive and accurate information about middle ear. High sensitivity and specificity of WAI have been shown in diagnosing diseases such as otitis media and otosclerosis. However,

WAI test results may be influenced by various factors. This article is a review of the progress in the application of wideband acoustic immittance in diagnosis of ear diseases.

Keywords

Wideband Acoustic Immittance, Absorption, Sensitivity, Specificity

Copyright © 2025 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. 引言

宽频声导抗(Wideband Acoustic Immittance, WAI)在耳部疾病诊治中逐渐显示出优势。早期研究如 Margolis 等人[1]发现多频测试系统很大程度上不受耳道特性的影响,并且能在更低的声压级别下测试。Feeney 等人[2]也表明 WAI 能在更低的声级下获得反射阈值,且在低频范围内更能体现出声学反射的变化。近年来, WAI 逐渐应用于临床诊治中,如新生儿听力筛查、评估中耳积液的存在、耳硬化症的诊治。本文对目前 WAI 在耳疾病诊断的研究进行综述。

2. WAI 技术原理与设备

WAI 主要是通过测量中耳对声波的吸收和反射来评估中耳功能的新型检测方法。目前 WAI 设备主要是 Interacoustics 公司生产的 Titan 测试平台。设备主要包括探头、能在外耳道内创建不同压力水平的测试软件、用于记录声波的发射率和接收率以及其他参数的系统、用于展示鼓室图和频率-吸收曲线结果的系统构成[3],以及声级校准系统、用于确保声波的接收和反射的准确性以及去除系统和环境噪声以确保信号纯净性和测试准确性的滤波器等。测试主要包括宽频鼓室图(Wideband Tympanometry, WBT)和宽频吸收率(Wideband Absorbance, WBA)测量[4]。宽频鼓室图是测量耳道压力下的中耳声学反射。宽频吸收率是在环境压力和峰值压力下利用宽频声学信号测量中耳对宽频声波的吸收状况,其可帮助识别中耳病变,如分泌性中耳炎、耳硬化症,同时也提供了中耳能量吸收和传导效率的重要信息。

3. WAI 应用于中耳疾病的诊断

3.1. 听力筛查

宽频声导抗技术提高了新生儿听力筛查的精确度,有利于早期发现婴儿语言和认知发展过程中出现的听力损失。Hunter 等人[5]发现,宽频镫骨肌反射阈值在环境压力和鼓室峰值压力(Tympanometric Peak Pressure, TPP)表现出显著差异,表明调整至 TPP 下进行测试可以提升新生儿听力筛查的准确性。另外, Aithal 等人[6]研究了 WBA 在评估儿童咽鼓管功能障碍(Eustachian Tube Dysfunction, ETD)中的可行性,发现 ETD 患者在 0 daPa 的条件下的 WBA 显著低于健康对照组,特别是在 1.25~4 kHz 频率范围内。比较 TPP 和 0 daPa 条件下的 WBA,发现 EDT 患者在 0.6~1.5 kHz 频率范围内的 WBA TPP 比 WBA 0 高 0.29~0.42。表明 WBA 可以作为评估 ETD 的有用工具。

3.2. 中耳炎

WAI 在评估中耳炎及其对听力的影响有重要作用。近年来, Aithal 等人[7]和 Shahnaz 等人[8]都通过

测量宽频吸收率(Wideband Absorbance, WBA)以研究儿童中耳积液(Otitis Media with Effusion, OME),发现中耳积液会导致 WBA 在特定频率降低。其中, Aithal 等人[7]的研究结果表明, OME 显著降低了 0.3~2 kHz、1~2 kHz 和 2~8 kHz 频段的吸收率, 强调了 OME 对听力的负面影响。另外, Merchant 人[9]的研究发现, 随着中耳积液量的增加, 吸收率会降低, 特别是在 1~5 kHz 最明显, 将耳朵分类为有积液或无积液的准确率达到 100%, 其中将有积液的耳朵再分类为部分积液和完全积液的准确率也是 100%, 而将无积液耳朵分类为正常对照组和有中耳积液病史但目前无积液耳朵的准确率为 75%, 说明 WAI 可以非常准确地识别出患有渗出性中耳炎的耳朵, 并且能区分出是否有积液及积液的程度。而 Sanford 等人[4]则通过宽频吸收率测量, 分析了中耳炎和不同类型积液对吸收率的影响, 发现对于存在中耳炎和存在粘稠积液的左耳, 宽频声导抗吸收率在低到中频率降低, 无论是调整到环境压力下还是峰值压力下, 吸收率结果都没有差异, 说明中耳劲度可能没有显著变化。对于存在中耳负压或者存在稀薄积液的右耳, 在低频率下, 环境压力下的吸收率与左耳模式相似, 但测得的吸收率存在显著改善, 说明尽管右耳也存在中耳问题, 但其对低频声音的传递能力有所改善。因此, 通过宽频吸收率下降的程度可以区分中耳积液的严重程度。

此外, 随着技术的进步, WAI 除了评估是否存在 OME, 还能评估其所导致的传导性听力下降(Conductive Hearing Loss, CHL)。Merchant 等人[10]利用平均 WBA 和基于听骨链阻尼模型组件建立的模型来估算渗出性中耳炎引起的 CHL, 发现两种方法估计的听力损失和纯音听阈有很好的相关性, 分别是 87% 和 81%。另外, Aithal 等人[11]探讨了 WBA 与儿童 CHL 中的气骨导差(Air-Bone Gap, ABG)之间的关系, 发现在特定频率下(1~4 kHz), WBA 与 ABG 之间存在明显的线性关系, 显示出 WBA 的预测价值。WAI 联合纯音听阈等其他检测手段有助于评估患者中耳状态, 有望于评估中耳手术后的恢复情况。

3.3. 耳硬化症

在耳硬化症的诊治过程中, 宽频声导抗技术展现了显著的临床价值。通过分析患者在不同频率下的能量反射(Energy Reflectance, ER)和其他 WAI 参数, 研究人员能够更精确地评估中耳的声学特性。Wang 等人[12]的研究发现, 在低中频率范围(小于 4000 Hz)下, 耳硬化症患者的 ER 显著高于对照组, 在高频率范围(大于 4000 Hz)时则低于对照组, 可能是耳硬化症导致中耳劲度增加, 从而降低了低频声音的传导效率。Karuppannan 等人[13]比较了成年人中耳硬化症和听骨链断裂(ossicular chain discontinuity, OCD)患者的宽频吸收图谱。发现耳硬化症组在 1000 Hz 以下吸收减少, OCD 组在 750 Hz 后吸收逐渐减少。Feeney 等人[14]则发现, 耳硬化症组在环境压力和鼓室峰值压力下的吸收率和吸收功率较低, 尤其在 0.71 kHz 的环境压力下, 吸收功率的 AUC 为 0.81, 显示出最高的分类准确性。因此, 耳硬化症在低频率范围内的吸收率下降有助于鉴别诊断。

4. WAI 应用于内耳疾病的诊断

4.1. 梅尼埃病

除了诊断中耳疾病外, 近年在诊断梅尼埃病(Meniere's Disease, MD)方面, WAI 提供了新的思路。Demir 等人[15]的研究发现, MD 患者的平均共振频率显著低于对照组, 且在较低频率(0.25、0.5、0.75 和 1 kHz)的吸收率显著低于健康对照组, 而在 1.5 kHz 及以上频率则无显著差异, 提示在低频范围内 MD 患者的中耳功能可能存在异常。Meng 等人[16]进一步探讨了 WBT 在 MD 中的潜在价值, 尤其是在评估患者的咽鼓管功能障碍方面。研究还指出, 虽然使用吸收率积分面积(Integral Area of the Absorbance, IAA)作为诊断指标仍存在争议, 但是 MD 患者的共振频率和吸收率降低是该病的特征之一。此外, WBT 在 MD 的急性发作期间可能不具备诊断效力, 表明该技术在不同病程状态下的应用可能有限。WAI 作为 MD 的辅助诊断具有一定的临床意义, 但其局限性不能忽视。

4.2. 大前庭水管综合征

Zhang 等人[17]的研究指出,大前庭水管综合征(Large Vestibular Aqueduct Syndrome, LVAS)的患者在特定频率范围内的吸收率显著不同于健康对照组。特别是在 472~866 Hz 和 6169~8000 Hz 频率下, LVAS 患者的吸收率显著高于健康个体($p < 0.05$),而在 1122~2520 Hz 频率下显著低于对照组($p < 0.05$)。Li 等人[3]也发现, LVAS 的平均最大吸收率为 0.542 ± 0.087 , 显著高于对照组的 0.455 ± 0.087 。在峰值压力下,两组的频率-吸收曲线均先增加后减少。LVAS 组在 2828 Hz 以下的频率范围内吸收率高于对照组。最近的研究, Jiang 等人[18]则发现, LVAS 儿童的宽频吸收率无论是在环境压力还是在峰压下,在中频范围(1259~2000 Hz)低于正常儿童对照组,而在高频范围(4000~6349 Hz)高于正常儿童对照组。总而言之, WAI 对于 LVAS 的诊断变异性较大,由于前庭水管的扩大,导致中耳劲度的增加,阻碍了低中频声音的传导。

4.3. 其他内耳疾病

Kaya 等人[19]研究了宽频声学测量在诊断完全性迷路未发育(Complete Labyrinthine Aplasia, CLA)中的应用,指出在更广泛的频率范围内显示出较低的吸收率,尤其是在 1681~4361 Hz 之间。CLA 组的平均宽频鼓室图测量曲线最平坦,与所有其他组有显著差异,这强调了中频范围内吸收率变化有助于诊断 CLA。

综上所述, WAI 不同频率范围内吸收率变化能区别不同内耳结构畸形,但是对于最具有特征的频率点,还需要更详细的分组,比如在特征频率范围内选取不同的频率点作为对照组,分析出最具有意义的频率点,可能是未来诊断内耳疾病的方向。

5. WAI 联合其他技术的应用

最近的研究表明, WAI 联合其他新兴技术,可以显著提升诊断的准确性和效率,特别是在婴儿和儿童中。Myers 等人[20]开发了一种基于宽频吸收率的序数预测模型,用于诊断 10~16 个月大婴儿的中耳功能障碍。该模型使用从 1000~5657 Hz 的吸收率作为预测变量,与单变量模型相比,多变量模型显示出更优的诊断效果。另外, Sackmann 等人[21]通过使用有限元模型模拟的耳声学吸收结果和已经发表的人耳测量数据相比,模拟数据与实际测量数据有一致性,但缺乏个体测量的详细特征。说明有限元模型可以有效模拟中耳声学特性。Grais 等人[22]进一步发现,卷积神经网络的性能略优于其他模型,并发现宽频吸收阻抗数据中的关键区域。在频率从 1090~2310 Hz 之间,压力从-40 到+90 daPa,大约占整个 WAI 图像的 5%。在关键区域内,正常耳朵的平均吸收值为 0.59,而 OME 耳朵的平均吸收值为 0.33。在最显著的 5%区域内,正常耳朵的平均吸收值为 0.53, OME 耳朵的平均吸收值为 0.28。说明 WAI 联合其他技术可以有效地区分正常耳与 OME 耳朵,诊断准确率较高。

6. WAI 的敏感性及特异性

6.1. 敏感性

WAI 在初步诊断和特定疾病(如耳硬化症、中耳积液和梅尼埃病)的检测中展现出较高的敏感性,尤其是在特定频率范围内。近期研究, Kelava 等人[23]发现,在 0.5~1 kHz 频率范围内, WBA 区分耳硬化症和正常听力的敏感性为 45.71%,但在 4~8 kHz 范围内,敏感性提升至 65.71%。说明在高频范围内使用 WBA 进行耳硬化症的诊断更有效。在梅尼埃诊治中, WAI 仍有一定优势。Demir 等人[15]发现,对于梅尼埃病,在 0.75 kHz 频率下,吸收率低于 36%时,敏感性为 81%,特异性为 57.8%,说明了低频率下的 WBA 对梅尼埃病患者诊断具有较高的敏感性。

6.2. 特异性

WAI 在不同频率范围下也体现出诊断的特异性。在 Kim 等人[24]的研究中, 707 Hz 频率下的特异性为 0.67, 虽然不是极高, 但在区分鼓膜穿孔和听骨链问题上仍然有实际应用价值。此外, Kelava 等人[23]则发现, 在频率范围大于 0.5~1 kHz 时, 区分耳硬化症及正常听力人群的特异性为 85.71%, 而大于 4~8 kHz 的频率范围, 特异性提高至为 88.57%。而 Demir 等人[15]则发现, 在 1 kHz 频率下, 吸收率低于 46% 时, 诊断出 MD 的敏感性为 71.5%, 特异性为 66.7%。

总的来说, 在高频范围内, WAI 对于诊断耳硬化症的敏感性和特异性都较高, 低频范围内, WAI 诊断 MD 是有意义的。

7. 影响 WAI 的因素

7.1. 中耳病理状态

影响 WAI 的因素众多, 且这些因素对测量结果的影响程度和性质各异。首先中耳本身的病理状态及手术会影响测量结果。Won 等人[25]的研究表明, 中耳积液的类型和积液量显著影响 WAI 测量结果。粘液型积液在某些频率范围内(从 2.74 kHz 到 4.73 kHz、从 2.77 kHz 到 4.66 kHz、从 3.68 kHz 到 5.25 kHz)显示较低的吸收率。Eberhard 等人[26]则发现, 使用筋膜移植重建的鼓膜在 1 kHz 以下与正常鼓膜的吸收率相似, 但在 1~4kHz 范围内显著低于正常耳。另外, 中耳压力也会影响 WAI 测量, Shahnaz 等人[8]的研究发现, 中耳负压状态显著影响宽频能量反射, 因为中耳负压导致整个中耳系统的劲度增加, 从而阻碍了低中频声音的传导。

7.2. 年龄

年龄对测量结果影响也有显著差异, Hunter 等人[27]指出, 吸收变量显示出高度显著的年龄效应, 特别是峰值压力在 1 个月大时最低, 随着年龄的增长变得接近 0 或者正值。低频率下的平均吸收率在新生儿出生后的六个月内随着年龄的增长而发生变化。而在高频率下, 平均吸收率的变化出现在新生儿出生后的第一个月内。Stuppert 等人[28]发现, 不同年龄段的儿童在中耳的病理变化检测上表现不同。尤其是在 1000 Hz 和 2000 Hz 的频率下, 吸收率显著下降。

7.3. 性别

性别也是影响 WAI 测量结果的重要因素, 但对于存在差异的频段和吸收率, 争论不一。Polat 等人[29]的研究发现, 在 3100~6900 Hz 的频率范围内, 男性和女性之间的吸收值存在显著差异。同时, 男性和女性受试者的共振频率和耳道体积之间的差异也是显著的。另外, Mazlan 等[30]也发现, 中年男性在 500~790 Hz 频率范围内吸收率高于女性。

7.4. 种族

不同种族也会影响声音在中耳的传导, Shahnaz 等人[31]发现, 白人在低频区间(469~1500 Hz)传递更多能量, 而中国人在高频区间(3891~6000 Hz)传递更多。但 Beers 等人[32]的研究表明, 在特定频率(2000 Hz 和 6000 Hz)下, 中国儿童的能量反射值低于白人儿童。因此, 在诊断中耳疾病, 需要充分考虑年龄、种族、性别这些影响因素, 以提供更精确的诊疗计划。

8. 结论

8.1. 技术优势与挑战

综上所述, 宽频声导抗在多个方面都优于传统声导抗, 除了提供更广泛的测试频率, 还能提供更多

的中耳状态信息, 比如吸收率、反射率等, 在诊断中耳甚至内耳疾病方面更敏感、更准确, 尤其是对中耳积液及耳硬化症疾病的诊断。此外, 其测试速度快、客观、可重复且非侵入性的特点, 特别适合儿童使用, 比如新生儿听力筛查。但是 WAI 诊断耳部疾病仍有局限性。比如, 虽然吸收率可以诊断相关疾病, 但是很难确定最优特征的频率点, 限制了宽频声导抗作为独立的诊断工具, 需要联合其他听力学诊断工具。以及探头插入的深度不同可能导致吸收率出现较大的变异性, 目前仍然缺乏年龄相关的标准数据, 需要更大的样本量及更详细的分组来研究。

8.2. 未来发展方向

WAI 需要进一步发展和完善, 需要增加样本量以及多中心的临床数据来验证其有效性和在日常临床实践的实用性。由于 WAI 提供的数据量较大, 处理和解释较单一鼓室图复杂, 需要将测量和解释的方法标准化, 以便在临床实践中更广泛的应用。同时, 未来可以尝试开发 WAI 的新的辅助技术及设备, 同时改进数据处理和分析的方法, 以提高 WAI 测试的便捷性、可靠性和精准性。

参考文献

- [1] Margolis, R.H., Saly, G.L. and Keefe, D.H. (1999) Wideband Reflectance Tympanometry in Normal Adults. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **106**, 265-280. <https://doi.org/10.1121/1.427055>
- [2] Feeney, M.P. and Keefe, D.H. (1999) Acoustic Reflex Detection Using Wide-Band Acoustic Reflectance, Admittance, and Power Measurements. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, **42**, 1029-1041. <https://doi.org/10.1044/jslhr.4205.1029>
- [3] Li, A., Du, H., Gao, J., Xu, Y., Zhao, N., Gao, S., et al. (2023) Characteristics of Large Vestibular Aqueduct Syndrome in Wideband Acoustic Immittance. *Frontiers in Neuroscience*, **17**, Article 1185033. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1185033>
- [4] Sanford, C.A., Brockett, J.E., Aithal, V. and AlMakadma, H. (2023) Implementation of Wideband Acoustic Immittance in Clinical Practice: Relationships among Audiologic and Otologic Findings. *Seminars in Hearing*, **44**, 65-83. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1763295>
- [5] Hunter, L.L., Keefe, D.H., Feeney, M.P. and Fitzpatrick, D.F. (2016) Pressurized Wideband Acoustic Stapedial Reflex Thresholds: Normal Development and Relationships to Auditory Function in Infants. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, **18**, 49-63. <https://doi.org/10.1007/s10162-016-0595-3>
- [6] Aithal, S., Aithal, V., Kei, J., Anderson, S. and Liebenberg, S. (2019) Eustachian Tube Dysfunction and Wideband Absorbance Measurements at Tympanometric Peak Pressure and 0 daPa. *Journal of the American Academy of Audiology*, **30**, 781-791. <https://doi.org/10.3766/jaaa.18002>
- [7] Aithal, V., Aithal, S., Kei, J., Anderson, S. and Wright, D. (2020) Predictive Accuracy of Wideband Absorbance at Ambient and Tympanometric Peak Pressure Conditions in Identifying Children with Surgically Confirmed Otitis Media with Effusion. *Journal of the American Academy of Audiology*, **31**, 471-484. <https://doi.org/10.3766/jaaa.19012>
- [8] Shahnaz, N., Aithal, S. and Bargen, G.A. (2023) Wideband Acoustic Immittance in Children. *Seminars in Hearing*, **44**, 46-64. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1763294>
- [9] Merchant, G.R., Al-Salim, S., Tempero, R.M., Fitzpatrick, D. and Neely, S.T. (2021) Improving the Differential Diagnosis of Otitis Media with Effusion Using Wideband Acoustic Immittance. *Ear & Hearing*, **42**, 1183-1194. <https://doi.org/10.1097/aud.0000000000001037>
- [10] Merchant, G.R. and Neely, S.T. (2022) Conductive Hearing Loss Estimated from Wideband Acoustic Immittance Measurements in Ears with Otitis Media with Effusion. *Ear & Hearing*, **44**, 721-731. <https://doi.org/10.1097/aud.0000000000001317>
- [11] Aithal, S., Aithal, V. and Kei, J. (2023) Wideband Absorbance Predicts the Severity of Conductive Hearing Loss in Children with Otitis Media with Effusion. *Ear & Hearing*, **45**, 636-647. <https://doi.org/10.1097/aud.0000000000001455>
- [12] Wang, S., Hao, W., Xu, C., Ni, D., Gao, Z. and Shang, Y. (2019) A Study of Wideband Energy Reflectance in Patients with Otosclerosis: Data from a Chinese Population. *BioMed Research International*, **2019**, Article ID: 2070548. <https://doi.org/10.1155/2019/2070548>
- [13] Karuppannan, A. and Barman, A. (2021) Wideband Absorbance Pattern in Adults with Otosclerosis and Ossicular Chain Discontinuity. *Auris Nasus Larynx*, **48**, 583-589. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2020.10.019>

- [14] Feeney, M.P., Keefe, D.H., Hunter, L.L., Fitzpatrick, D.F., Putterman, D.B. and Garinis, A.C. (2020) Effects of Otosclerosis on Middle Ear Function Assessed with Wideband Absorbance and Absorbed Power. *Ear & Hearing*, **42**, 547-557. <https://doi.org/10.1097/aud.0000000000000968>
- [15] Demir, E., Celiker, M., Aydogan, E., Balaban, G.A. and Dursun, E. (2019) Wideband Tympanometry in Meniere's Disease. *Indian Journal of Otolaryngology and Head & Neck Surgery*, **72**, 8-13. <https://doi.org/10.1007/s12070-019-01709-8>
- [16] Meng, X., Zhu, K., Yue, J. and Han, C. (2022) The Role of Wideband Tympanometry in the Diagnosis of Meniere's Disease. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 808921. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.808921>
- [17] Zhang, L., Wang, J., Grais, E.M., Li, Y. and Zhao, F. (2022) Three-Dimensional Wideband Absorbance Immittance Findings in Young Adults with Large Vestibular Aqueduct Syndrome. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, **8**, 236-244. <https://doi.org/10.1002/lio2.988>
- [18] Jiang, W., Li, X., Mu, Y., Zhang, H., Konduru, N., Qiao, Y., *et al.* (2024) Predictive Accuracy of Wideband Absorbance in Children with Large Vestibular Aqueduct Syndrome: A Single-Center Retrospective Study. *Heliyon*, **10**, e33776. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33776>
- [19] Kaya, Ş., Çiçek Çınar, B., Özbal Batuk, M., Özgen, B., Sennaroğlu, G., Genç, G.A., *et al.* (2020) Wideband Tympanometry Findings in Inner Ear Malformations. *Auris Nasus Larynx*, **47**, 220-226. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2019.09.001>
- [20] Myers, J., Kei, J., Aithal, S., Aithal, V., Driscoll, C., Khan, A., *et al.* (2019) Diagnosing Middle Ear Dysfunction in 10- to 16-Month-Old Infants Using Wideband Absorbance: An Ordinal Prediction Model. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, **62**, 2906-2917. https://doi.org/10.1044/2019_jslhr-h-19-0055
- [21] Sackmann, B., Dalhoff, E. and Lauxmann, M. (2019) Model-Based Hearing Diagnostics Based on Wideband Tympanometry Measurements Utilizing Fuzzy Arithmetic. *Hearing Research*, **378**, 126-138. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2019.02.011>
- [22] Grais, E.M., Wang, X., Wang, J., Zhao, F., Jiang, W., Cai, Y., *et al.* (2021) Analysing Wideband Absorbance Immittance in Normal and Ears with Otitis Media with Effusion Using Machine Learning. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 10643. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89588-4>
- [23] Kelava, I., Ries, M., Valent, A., Ajduk, J., Trotić, R., Košec, A., *et al.* (2020) The Usefulness of Wideband Absorbance in the Diagnosis of Otosclerosis. *International Journal of Audiology*, **59**, 859-865. <https://doi.org/10.1080/14992027.2020.1785644>
- [24] Kim, S.Y., Han, J.J., Oh, S.H., Lee, J.H., Suh, M., Kim, M.H., *et al.* (2019) Differentiating among Conductive Hearing Loss Conditions with Wideband Tympanometry. *Auris Nasus Larynx*, **46**, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2018.05.013>
- [25] Won, J., Monroy, G.L., Huang, P., Hill, M.C., Novak, M.A., Porter, R.G., *et al.* (2019) Assessing the Effect of Middle Ear Effusions on Wideband Acoustic Immittance Using Optical Coherence Tomography. *Ear & Hearing*, **41**, 811-824. <https://doi.org/10.1097/aud.0000000000000796>
- [26] Eberhard, K.E., Masud, S.F., Knudson, I.M., Kirubalingam, K., Khalid, H., Remenschneider, A.K., *et al.* (2021) Mechanics of Total Drum Replacement Tympanoplasty Studied with Wideband Acoustic Immittance. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, **166**, 738-745. <https://doi.org/10.1177/01945998211029541>
- [27] Hunter, L.L., Keefe, D.H., Feeney, M.P., Fitzpatrick, D.F. and Lin, L. (2016) Longitudinal Development of Wideband Reflectance Tympanometry in Normal and At-Risk Infants. *Hearing Research*, **340**, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2015.12.014>
- [28] Stuppert, L., Nospe, S., Bohnert, A., Läßig, A.K., Limberger, A. and Rader, T. (2019) Clinical Benefit of Wideband-Tympanometry: A Pediatric Audiology Clinical Study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, **276**, 2433-2439. <https://doi.org/10.1007/s00405-019-05498-2>
- [29] Polat, Z., Bas, B., Hayir, D., Bulut, E. and Atas, A. (2015) Wideband Tympanometry Normative Data for Turkish Young Adult Population. *The Journal of International Advanced Otolaryngology*, **11**, 157-162. <https://doi.org/10.5152/iao.2015.809>
- [30] Mazlan, R., Kei, J., Ya, C.L., Yusof, W.N.H.M., Saim, L. and Zhao, F. (2015) Age and Gender Effects on Wideband Absorbance in Adults with Normal Outer and Middle Ear Function. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, **58**, 1377-1386. https://doi.org/10.1044/2015_jslhr-h-14-0199
- [31] Shahnaz, N. and Bork, K. (2006) Wideband Reflectance Norms for Caucasian and Chinese Young Adults. *Ear and Hearing*, **27**, 774-788. <https://doi.org/10.1097/01.aud.0000240568.00816.4a>
- [32] Beers, A.N., Shahnaz, N., Westerberg, B.D. and Kozak, F.K. (2010) Wideband Reflectance in Normal Caucasian and Chinese School-Aged Children and in Children with Otitis Media with Effusion. *Ear & Hearing*, **31**, 221-233. <https://doi.org/10.1097/aud.0b013e3181c00eae>