

4~16岁大前庭导水管综合征患者的宽频声导抗特征研究

吕梦格, 童步升*

安徽医科大学第一附属医院耳鼻咽喉头颈外科, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年5月25日; 录用日期: 2025年6月17日; 发布日期: 2025年6月27日

摘 要

目的: 对比4~16岁大前庭导水管综合征(Large Vestibular Aqueduct Syndrome, LVAS)患耳与听力正常耳的宽频声能吸收率(Wideband Absorbance, WBA)谱, 探讨宽频声导抗测试在大前庭导水管综合征辅助诊断中的应用价值, 为未成年LVAS的诊断和预测提供参考。方法: 本研究收集11例(22耳)大前庭导水管综合征患者的患耳作为实验组, 并选取18例(36耳)正常未成年人作为对照组。实验组和对照组均进行宽频声导抗测试, 进而对两组的共振频率和声能吸收率进行分析和对比。结果: LVAS组在1600 Hz~2900 Hz范围内平均声能吸收率显著低于正常组的声能吸收率, 说明此范围内声能透过率较低, 在5656 Hz~6535 Hz范围内LVAS组的平均声能吸收率显著大于正常组的平均声能吸收率。结论: 大前庭导水管综合症患者在中频和高频段具有显著差异, 共振频率低于正常人, 可作为辅助大前庭导水管综合症的早期听力学检查。

关键词

宽频声导抗, 声能吸收率, 大前庭导水管综合征, 共振频率

Characteristics of Wideband Acoustic Conductance in Patients with Large Vestibular Aqueduct Syndrome between 4 and 16 Years Old

Mengge Lyu, Busheng Tong*

Department of Otolaryngology, Head and Neck Surgery, The First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

Received: May 25th, 2025; accepted: Jun. 17th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 吕梦格, 童步升. 4-16 岁大前庭导水管综合征患者的宽频声导抗特征研究[J]. 临床医学进展, 2025, 15(6): 1716-1724. DOI: 10.12677/acm.2025.1561908

Abstract

Objective: To compare the wideband absorbance (WBA) spectra of large vestibular aqueduct syndrome (LVAS) and normal-hearing ears from 4 to 16 years old, and to explore the application value of the WBA test in the auxiliary diagnosis of LVAS, and to provide a reference for the diagnosis and prediction of LVAS in minors. LVAS diagnosis and prediction. **Methods:** 22 ears of large vestibular aqueduct syndrome group and 36 ears of normal group were collected. All subjects were tested by wideband acoustic immittance test, and the sound energy absorption rates of each group under peak pressure were analyzed and compared. **Results:** The average absorption rate of LVAS group was significantly lower than that of normal group around 1600 Hz~2900 Hz, indicating that the sound energy transmission rate was lower in this range. The average sound energy absorption rate of LVAS group was significantly higher than that of normal group in the range of 5656 Hz~6535 Hz. **Conclusion:** There is a significant difference between middle frequency and high frequency in patients with large vestibular aqueduct syndrome, and the resonant frequency is lower than that in normal subjects, which can be used as an assistant for early audiological examination of large vestibular aqueduct syndrome.

Keywords

Wideband Acoustic Immittance, Energy Absorbance, Large Vestibular Aqueduct Syndrome, Resonance Frequency

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

大前庭导水管综合征(Large Vestibular Aqueduct Syndrome, LVAS)是一种常见的先天性内耳结构发育异常的常染色体隐性遗传病, SLC26A4 是其主要的致病基因, 具体表现为前庭导水管扩大(Enlarged Vestibular Aqueduct, EVA)或内淋巴囊扩大, 可伴或不伴其他内耳畸形[1], 发病率约占儿童及青少年感音神经性聋的 1%~12%。通过新生儿听力筛查发现纯音听阈、声导抗和影像学检查存在花费高、结果震荡和放射性辐射等诸多局限性, 传统的诊断方法难以达到对疾病进行早期精确诊断的目的。所以在前庭导水管综合征疾病的诊断领域, 急需开发一个既无创、又安全可靠的早期诊断辅助方法, 无疑具有重要的临床意义。宽频声导抗(Wideband Acoustic Immittance, WAI)作为一种听力评估手段, 具有迅速、客观、非侵入、无辐射等优点, 是评估中耳和内耳功能的新兴技术。近年来, 该技术已广泛应用于临床, 国内外学术界不断有报道指出宽频声导抗在多种中耳及内耳疾病诊断中的展现出显著价值[2]-[4], 本研究聚焦于探索 LVAS 患者的宽频声导抗特征, 旨在为 LVAS 的早期临床诊断提供一种创新的辅助方法, 推动 LVAS 诊断技术的不断进步和为临床实践提供科学参考依据。

2. 资料与方法

2.1. 研究对象

回顾性研究收集 2023 年 7 月至 2024 年 11 月在安徽医科大学第一附属医院接受人工耳蜗植入的 LVAS 未成年患者为实验组。LVAS 组共 22 耳, 其中男 15 耳, 女 7 耳, 年龄 4~16 岁; LVAS 患者纳入

标准如下: (1) 符合 LVAS 的颞骨 CT 及内听道 MRI 成像诊断标准; (2) 中耳乳突 CT 无炎症改变; (3) 226 Hz 鼓室导抗图均为 A 型; (4) 耳廓、外耳道及中耳发育正常, 耳内镜检查外耳道通畅、无耵聍栓塞及鼓膜完整; (5) 近期上无呼吸道感染。排除标准: (1) 中耳炎病史; (2) 其他内耳疾病病史; (3) 耳毒性药物用药史。同时收集听力正常未成年人共 36 耳作为对照组, 其中男 22 耳, 女 14 耳, 年龄 4~16 岁; 纳入标准: 均无耳科病史, 近期均无上呼吸道感染, 226 Hz 鼓室导抗图均为 A 型, 纯音测听 0.25~8 kHz 各频率气导听阈均 ≤ 25 dB HL。本研究已获得患者知情同意。

2.2. 宽频声导抗测试方法

所有 LVAS 患者术前均行耳镜检查、纯音听力学检查、中耳乳突 CT 和内听道 MRI, 随后行 226 Hz 声导抗和 WAI 检查。对照组按照与 LVAS 组相同的顺序行耳镜检查、纯音测听、226 Hz 声导抗和 WAI 检查。

本研究测试仪器使用丹麦国际听力公司生产的 Titan IMP 440 宽频声导抗测试仪(软件版本号 3.6.1), 均在符合国家相关标准的专用隔声室内进行测试, 隔声室本底噪声 < 30 dB A, 在整个测试过程中受试者处于安静状态, 通过探头尖端的绿光来确定密封是否足够, 在外耳道处于密封状态下进行测试, 确保全程无漏气, 探测音使用 226 Hz~8000 Hz 的混合 click 声, 声音强度为 85 dB SPL, 压力范围+200~-400 daPa, 方向由正到负, 将测试探头放入外耳道, 测得不同压力不同频率下的声能吸收率由软件形成 3D 图像, 通过宽频声导抗科研模块处理后获得共振频率、环境压力与峰值压力条件下的声能吸收率(Energy Absorbance, EA), 选取共振频率、环境压力和峰值压力条件下的声能吸收率数据进行统计学分析研究。

2.3. 统计学方法

使用 SPSS26.0 软件对实验数据进行统计学分析, 计量资料采用均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$), 使用独立样本 t 检验或 Mann-Whitney U 检验。计数资料采用百分率表示, 采用 χ^2 检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

3. 结果

3.1. 人口统计信息

人口统计数据见表 1, LVAS 组女性 7 例(31.8%), 男性 15 例(68.2%), 对照组女性 14 例(38.9%), 男性 22 例(61.1%)。两组患者(年龄 11.23 ± 4.00 , 范围: 4~16 岁 vs 10.21 ± 3.81 , 范围: 4~16, t 检验, $P = 0.805$)、性别($P = 0.779$, 卡方检验)差异无统计学意义。详见表 1。

Table 1. Demographics participating in this study

表 1. 参与本研究的人口统计学

特点	LVAS 组(N = 22)	对照组(N = 36)	P Value
年龄(岁) ^a	11.23 $\pm$ 4.00	10.21 $\pm$ 3.81	0.805
性别(N%) ^b			
男性	15 (68.2%)	22 (61.1%)	0.779
女性	7 (31.8%)	14 (38.9%)	
耳朵(N%) ^b			
左耳	9(40.9%)	18(50%)	0.592
右耳	13(59.1%)	18(50%)	

a: 数据均以平均值 $\pm$ 标准差表示, 统计比较采用独立 t 检验; b: 组间采用卡方检验。

3.2. LVAS 组和对照组的共振频率的差异

LVAS 组共振频率均值为 764.18 ± 192.96 Hz, 对照组共振频率均值 917.08 ± 156.27 Hz, LVAS 组共振频率明显低于对照组, 两组共振频率有显著统计学意义($P = 0.002$)。详见表 2。

Table 2. comparison of resonance frequencies between LVAS group and control group ($\bar{x} \pm s$, Hz)

表 2. LVAS 组和对照组共振频率的比较($\bar{x} \pm s$, Hz)

分组	(n)	共振频率
LVAS	22	764.18 ± 192.96
对照组	36	917.08 ± 156.27
P 值		0.002

3.3. LVAS 组和对照组声导抗在峰压下的全频段吸收率面积的差异

对于 LVAS 组而言, 在峰值压力条件下测得的声能吸收率相对面积均值为 0.565 ± 0.210 ; 相比之下, 对照组 WAI 在同等条件下的均值为 0.465 ± 0.251 。通过对这两组数据实施独立样本 t 检验, 我们发现两者在声能吸收率面积上的差异具有高度的统计学显著性(P 值 = 0.001)。详见表 3。

Table 3. comparison of full-band absorptivity area and peak absorptivity peak between LVAS group and control group under peak pressure ($\bar{x} \pm s$)

表 3. LVAS 组和对照组在峰压下的全频段吸收率面积和吸收率峰值的比较($\bar{x} \pm s$)

分组	(n)	全频段吸收率面积
LVAS	22	0.565 ± 0.210
对照组	36	0.465 ± 0.251
P 值		0.001

3.4. LVAS 组和正常组 WAI 特征

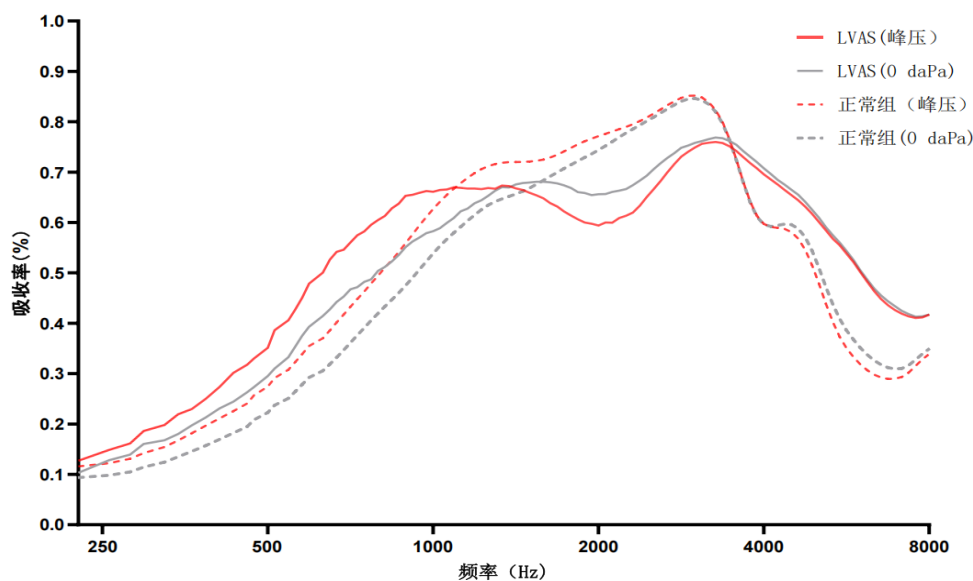


Figure 1. Mean-frequency curve of broadband sound energy absorption in LVAS group and normal group under different external auditory canal pressure

图 1. 不同外耳道压力下 LVAS 组、正常组的宽频声能吸收率均值 - 频率曲线

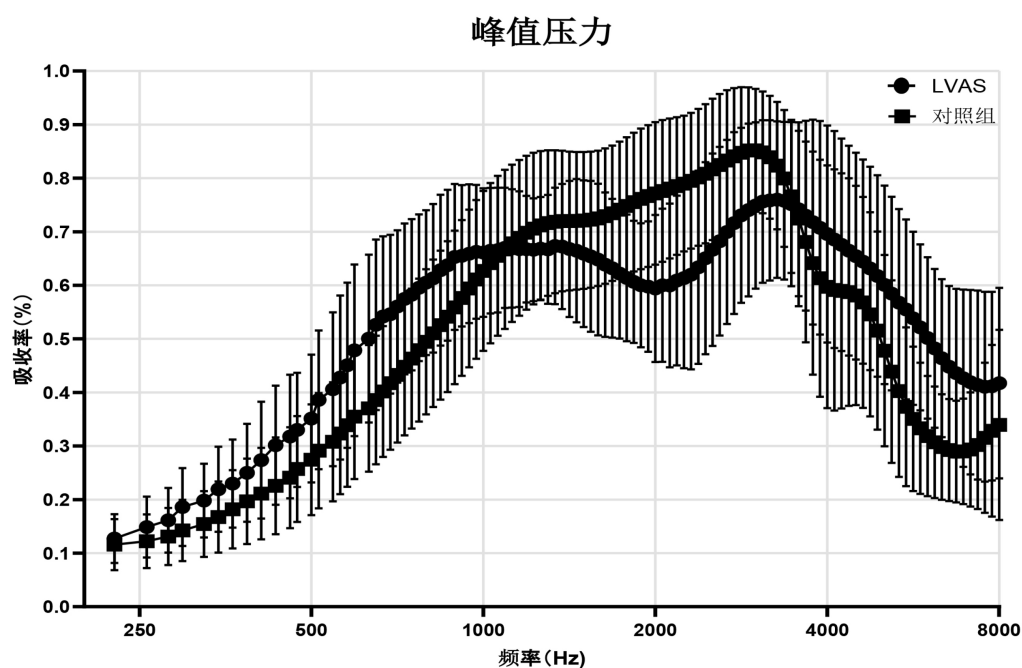


Figure 2. Mean absorbance at peak pressure against frequency for control and LVAS groups

图 2. 峰值压力时 LVAS 组和对照组的宽频声能吸收率均值 - 频率曲线

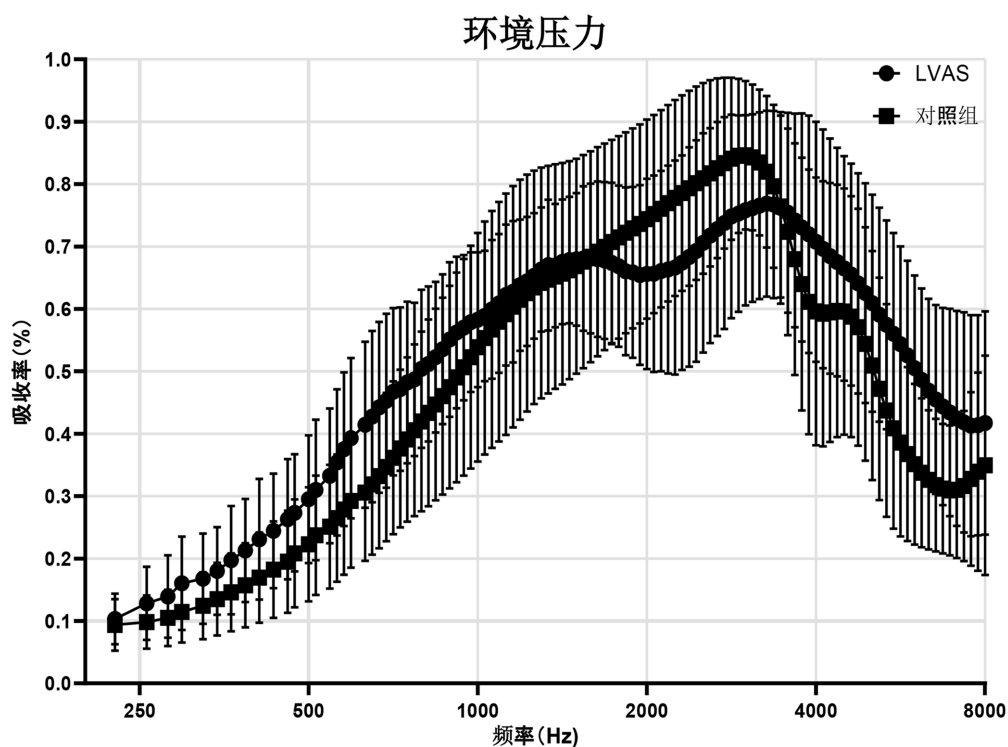


Figure 3. Mean absorbance at ambient pressure against frequency for control and LVAS

图 3. 环境压力时 LVAS 组和对照组的宽频声能吸收率均值 - 频率曲线

LVAS 组和正常组外耳道压力为 0 daPa (即环境压力)和峰压时的频率吸收曲线见图 1, 显示了无论是在峰值压力下或在环境压力下, LVAS 组最大声能吸收率均低于正常组, LVAS 组声能吸收率曲线随着频

率的增加均呈现为先升高后降低、再升高再降低, 约 2000 Hz 时处于波谷, 两个曲线整体呈不对称“M”型。正常组声能吸收率曲线随着频率的增加均呈现为先升高后降低, 约 3000 Hz 时吸收率最高。在 1600 Hz~2900 Hz 频率区间内, LVAS 组的平均声能吸收率相较于正常对照组相比, 呈现出统计学上的显著降低, 说明此范围内声能透过率较小; 在 5656 Hz~6535 Hz 频率区间内, 相较于正常对照组, LVAS 组的平均声能吸收率展现出了统计学上的显著提高($P < 0.05$)。

进一步研究发现在峰值压力下, LVAS 组在 1090 Hz~3563 Hz 频率附近吸光度低于对照组, 表明声能透过率降低, 在 1090 Hz 以下和 3563 Hz 以上高于对照组。特别是在 577.68 Hz~793.70 Hz、1681.79 Hz~2911.31 Hz、5339.36 Hz~7127.19 Hz 波段, 两组间的声能吸收率具有统计学意义($P < 0.05$), 见图 2。

在环境压力下, LVAS 组在 1542 Hz~3462 Hz 频率附近低于对照组, 1542 Hz 以下和 3462 Hz 以上吸光度高于对照组。特别是在 5656.85 Hz~6535.66 Hz 频率段, 两组间的声能吸收率具有统计学意义($P < 0.05$), 见图 3。

4. 讨论

宽频声导抗是一种新兴的听力检查方法, 主要指标包括声能吸收率、峰压、共振频率、声顺等, 与传统的 226 Hz 声导抗相比, 可以获取更多信息, 且 WAI 可记录 226 Hz~8000 Hz 频率区间内的声能数据, 可更全面地反映更多中耳及内耳生理状态。根据 Kaya 等[5]、Tanno 等[6]和 Eberhard 等[7]研究表明, WAI 相较传统的声导抗技术在检测中耳及内耳疾病方面展现出了更高的灵敏性, 具有较高的临床价值, 因此 WAI 能够辅助临床医生对复杂的中耳及内耳疾病进行更为精准的评估, 然而, 当前, 针对各类内耳病变所开展的宽频声导抗吸收率特征研究尚不充分。本研究从共振频率、全频段吸收率面积、峰值压力下的 EA 值及环境压力下的 EA 值深入探讨宽频声导抗在大前庭导水管综合征患者和正常人之间的差异。

共振频率乃中耳系统劲度阻抗与质量阻抗相等时的特定频率点, 其中劲度与共振频率呈正相关, 而质量与共振频率则呈负相关。中耳系统劲度或质量阻抗的任何变动, 均将引起共振频率的相应调整[5][8][9]。近来随着医学研究的不断深入, 共振频率在内耳疾病的诊断领域中的科学价值及应用潜力逐渐得到认可与重视[10]。本研究中正常组的共振频率平均值为 917.08 ± 156.27 Hz, 与刘绮明等[11]报道的中耳共振频率正常值多位于 800 Hz~1200 Hz 相符, 也与 Downing 等[12]的研究结果相符。我们的研究结果显示 LVAS 组与正常组的共振频率存在显著差异。共振频率不仅受中耳传输系统的质量和劲度的影响, 还受耳蜗的机械阻抗影响[13]-[15]。Sato 等人[14]研究表明共振频率与内淋巴管和囊的体积有关, 共振频率会随着内淋巴管和囊的体积的增加而下降。由于大前庭导水管的内淋巴管和囊的体积增加, 导致内耳压增加, 共振频率也随之降低, Darrouzet 等[13]用动物实验证明内耳压力增加会导致共振频率下降。LVAS 患耳共振频率下降的潜在机制与内耳里液体的体积增加导致镫骨底板的机械阻抗降低有关, 也可能与“第三窗效应”相关联。“第三窗”作为耳蜗内压力释放的一个重要途径, 与卵圆窗、圆窗共同构成耳蜗内的压力释放体系。具体而言, “第三窗”涵盖了前庭导水管、耳蜗水管和耳蜗内部的血管神经通道。当前庭导水管发生扩张时, 这会导致“第三窗”的压力释放点的功能增加, 进而促使内耳的机械阻抗减小, 最终引发共振频率的下降。在本研究中 LVAS 组共振频率平均值为 764.18 ± 192.96 Hz, 显著低于正常组。Sato 等[14]和 Nakashima 等[16]也发现大前庭导水管患耳的中耳共振频率明显低于正常人。本研究中, 同样也发现 LVAS 患耳的共振频率要明显小于正常组, 这可能是另一个诊断大前庭导水管综合征的辅助指标。

LVAS 的听力损失特点为进行性、波动性听力下降, 主要以高频听力损失为主并且在低频处出现气骨导差。本研究发现 LVAS 组无论是在峰值压力下或在环境压力下, 最大声能吸收率均低于正常组, LVAS 组 WBA 曲线随着频率的增加均呈现为先升高后降低、再升高再降低, 约 2000 Hz 时处于波谷, 两个曲线整体呈不对称“M”型。Arjmand 和 Wabber[17]对 19 例 LVAS 患儿研究发现, 患儿听力曲线主要为高

频下降型, 占 50% (13/26), 其次为“中频-峰型”(峰值在 1 kHz 或 2 kHz, 比相邻低频和高频听力损失至少低 15 dB), 占 31% (13/32); 卢肖慧等[18]和刘佳星等[19]的研究提示 75.56% LVAS 患者表现为高频下降型的听力曲线。本研究认为 LVAS 的听力曲线在 2000 Hz 处于波谷, 吸收率的最低原因与 2000 Hz 时存气骨导差相关联, LVAS 组在高频的吸收率显著大于正常组可能与大前庭主要以高频听力下降具有相关性。LVAS 的 WAI 的特征反映的中耳和内耳功能状态, LVAS 的听力损伤程度和进展可能与内耳的功能状态有关, 听力损失程度和进展与 WAI 的相关性还需要进一步研究。

频率-吸收率曲线反映了 226 Hz~8000 Hz 声频范围内的吸收率, 比传统 226 Hz 传统鼓室图包含更多信息, 本研究通过对比大前庭导水管综合征患者与正常人发现, 在峰值压力下, 两组间的吸收率面积展现出显著差异, 具体而言, LVAS 组全频段吸收率面积明显大于对照组。丁璐等[20]研究同样指出, LVAS 患者的声导抗峰值值所对应的鼓膜吸收率相对面积, 相较于正常人有所增大。与本文研究结果一致。我们分析 LVAS 吸收率面积增加的原因可能是内淋巴管和淋巴囊上皮对淋巴液吸收减少, 前庭分泌过多的淋巴液, 导致膜迷路扩大[21], 内淋巴液体积增加, 声能在通过液体时吸收率也会增加, 导致 LVAS 的吸收率面积大于正常人。本文纳入的研究样本量较少, 上述结果也需要更多病例对照研究, 进行临床验证。

本项研究针对 LVAS 患者, 对比分析了不同外耳道压力条件下宽频声能吸收率(Wideband Absorbance, WBA)的差异。研究结果显示, 两种外耳道压力下的 WBA 均值-频率曲线走势具有高度的一致性, 这与 Zhang 等[1]研究结论相吻合尽管在不同年龄组内, 同一频率下的 WBA 值存在变异, 但整体而言, 这些变异并未改变 WBA 随频率变化的总体趋势。针对 WBA 值随频率变化的特征, 我们估计这可能与内耳及中耳在处理不同频率声信号时的传输效率差异相关联。

我们观察到 LVAS 患者中频吸光度低于正常人, 低频和高频显著高于正常人, 在其他 LVAS 的研究中我们也观察到类似的结果。本文研究发现在环境压力和峰值压力下 LVAS 组的最大声能吸收率均低于正常组, 在 1681 Hz~2911 Hz 附近平均吸吸收率显著小于正常组, LVAS 组在 5656 Hz~6535 Hz 区间内的平均声能吸收率大于正常组。Jiang 等[22]研究 6~11 岁 LVAS 患儿的宽频声能吸收率, 发现在峰值压力和环境压力下, LVAS 组在 1259 Hz~2000 Hz 区间内的声能吸收率普遍低于健康对照组, 而在 4000 Hz~6349 Hz 范围内均显著高于正常儿童。Zhang 等[23]研究发现成年 LVAS 患者在环境压力和峰值压力下 1000 Hz~2500 Hz 频率附近的平均吸收率显著低于对照组, 在 1000 Hz 以下和 6000 Hz 以上显著高于对照组。Zhang 等[1]发现 LVAS 儿童在环境压力和峰值压力下, 4000 Hz 以上的吸光度高于标准值。以上研究结果与本文研究结果一致。本研究分析中频段的吸收率低于正常组的原因可能是 LVAS 患者的前庭导水管扩大, 无法缓冲颅内压力变化, 可能会造成耳蜗不同部位压力不平衡, 破坏膜迷路导致耳蜗内瘘, 内淋巴液与外淋巴液混合, 导致内耳压力上升, 与内耳相连的镫骨底板表现出机械阻抗变化, 该机械阻抗与内耳液体质量成反比关系[24], 进而导致而引起镫骨底板机械阻抗的减小, 致使在特定频率范围内的宽频声能吸收特性减弱。此外, “第三窗”作为除前庭窗和圆窗之外的又一内耳通道, 也参与了耳蜗压力的调节。膜迷路积水可能会促使第三窗发生病理性扩大, 增强其释放压力功能, 进而减小内耳的机械阻抗, 最终造成宽频声能吸收特性的进一步降低。而高频段的吸光度高于正常组, 可能与中耳腔的驻波效应和高频的波长有关, 驻波效应可能会使高频段声能吸收率增加[25]。

丁璐等[20]研究发现低于 1000 Hz 的峰压下的声能吸收率范围显著高于对照组。与本研究结果一致。Li 等[26]研究发现峰值时 LVAS 组在 3886 Hz~6727 Hz 范围内声能吸收率低于对照组, 在小于 2828 Hz 的频率范围内吸收率高于对照组, 尤其在 343 Hz~1124 Hz、1943 Hz~2448 Hz 频率段差异最显著。本研究发现在峰值压力下, LVAS 组在 1090~3563 Hz 频率附近吸收率低于对照组, 表明声能透过率降低, 在 1090 Hz 以下和 3563 Hz 以上吸收率高于对照组。特别是在 577.68 Hz~793.70 Hz、1681.79 Hz~2911.31 Hz、

5339.36 Hz~7127.19 Hz 频率段差异最显著, Li 等[26]与本研究的不同之处是本研究在 1090~3563 Hz 频率附近吸光度低于对照组, 在 3563 Hz 以上高于对照组。分析本研究与 Li 等[26]研究结果不同的原因可能与年龄分布有关, 6 岁之前儿童的外中耳功能暂未发育完善, 随诊年龄的增长, 需要到 6 岁时中耳、乳突及咽鼓管才能发育成人水平, 有学者认为不同年龄段在不同频率的 WBA 值具有差异, 汪玮等[27]研究发现 3~5 岁儿童在 4000 Hz~5040 Hz 范围内环境压力下的吸收率显著高于 6~11 岁组, 中低频率段和 8000 Hz 3~5 岁组显著低于 6~11 岁组。Srikanta 等[28]通过对比不同年龄组环境压力下的宽频声导抗发现在 2000 Hz~4000 Hz 范围内, 随着年龄的增长声能吸收率显著降低。因此, 频率相关的吸收率差异考虑与年龄分布有关, 年龄会影响声能吸收率, 本研究的局限性在于样本量较小, 未能对不同年龄段进行分组, 未来的研究需要扩大样本量, 以便将 LVAS 患儿与年龄匹配的对照组进行比较, 以提供更可靠的证据, 提高 WAI 对 LVAS 诊断的准确性和可靠性。

总之, 本研究显示大前庭导水管的声能吸收率与正常人相比在中频和高频范围内具有显著差异, 且共振频率小于正常人, 因此 WAI 对大前庭导水管综合症的诊断具一定提示价值, 由于样本量较小无法建立公认的诊断标准, 尚需要扩大样本量一步研究。

声 明

该病例报道已获得病人的知情同意。

参考文献

- [1] Zhang, L., Wang, J., Zhao, F. and Li, Y. (2020) Inner Ear Pressure Evaluation Using Wideband Tympanometry in Children with Large Vestibular Aqueduct Syndrome (LVAS): A Pilot Study. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, **128**, Article ID: 109690. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2019.109690>
- [2] Lauxmann, M., Viehl, F., Priwitzer, B. and Sackmann, B. (2024) Preliminary Results of Classifying Otosclerosis and Disarticulation Using a Convolutional Neural Network Trained with Simulated Wideband Acoustic Immittance Data. *Heliyon*, **10**, e32733. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32733>
- [3] Zhao, Z., Ren, C., Fan, X., Zha, D. and Lin, Y. (2024) Study on Characteristics of Wideband Acoustic Immittance in Patients with Inner Ear Malformations. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, **176**, Article ID: 111802. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2023.111802>
- [4] 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>
- [5] 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>
- [6] Tanno, G.A.Y., Santos, M.A.D.O., Sanches, M.T.D., Durante, A.S., Almeida, K.D., Gameiro, M.S., et al. (2022) Analysis of Wideband Tympanometry in Ménière's Disease. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, **88**, 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2020.05.029>
- [7] Eberhard, K.E., Merchant, G.R., Nakajima, H.H. and Neely, S.T. (2024) Toward Automating Diagnosis of Middle- and Inner-Ear Mechanical Pathologies with a Wideband Absorbance Regression Model. *Ear & Hearing*, **45**, 1241-1251. <https://doi.org/10.1097/aud.0000000000001516>
- [8] Aithal, V., Aithal, S., Kei, J. and Manuel, A. (2019) Normative Wideband Acoustic Immittance Measurements in Caucasian and Aboriginal Children. *American Journal of Audiology*, **28**, 48-61. https://doi.org/10.1044/2018_aja-18-0065
- [9] Miehe, J., Mogensen, S., Lyhne, N., Skals, R. and Hougaard, D.D. (2021) Wideband Tympanometry as a Diagnostic Tool for Meniere's Disease: A Retrospective Case-Control Study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, **279**, 1831-1841. <https://doi.org/10.1007/s00405-021-06882-7>
- [10] Iacovou, E., Vlastarakos, P.V., Ferekidis, E. and Nikolopoulos, T.P. (2012) Multi-Frequency Tympanometry: Clinical Applications for the Assessment of the Middle Ear Status. *Indian Journal of Otolaryngology and Head & Neck Surgery*, **65**, 283-287. <https://doi.org/10.1007/s12070-011-0470-9>
- [11] 刘绮明, 马钊恩, 翟锦明, 等. 不同类型鼓室图患者中耳共振频率分析[J]. 山东大学耳鼻喉眼学报, 2011, 25(4): 29-31.

- [12] Downing, C., Kei, J. and Driscoll, C. (2022) Measuring Resonance Frequency of the Middle Ear in School-Aged Children: Potential Applications for Detecting Middle Ear Dysfunction. *International Journal of Audiology*, **62**, 1076-1083. <https://doi.org/10.1080/14992027.2022.2135033>
- [13] Darrouzet, V., Dulon, D. and Franco-Vidal, V. (2006) Multifrequency Immittanceometry in Experimentally Induced Stapes, Round Window and Cochlear Lesions. *Audiology and Neurotology*, **12**, 85-100. <https://doi.org/10.1159/000097795>
- [14] Sato, E., Nakashima, T., Lilly, D.J., Fausti, S.A., Ueda, H., Misawa, H., *et al.* (2002) Tympanometric Findings in Patients with Enlarged Vestibular Aqueducts. *The Laryngoscope*, **112**, 1642-1646. <https://doi.org/10.1097/00005537-200209000-00021>
- [15] Demir, E., Afacan, N.N., Celiker, M., Celiker, F.B., İncikli, M.F., Terzi, S., *et al.* (2019) Can Wideband Tympanometry Be Used as a Screening Test for Superior Semicircular Canal Dehiscence? *Clinical and Experimental Otorhinolaryngology*, **12**, 249-254. <https://doi.org/10.21053/ceo.2018.01137>
- [16] Nakashima, T., Ueda, H., Furuhashi, A., *et al.* (2000) Air-Bone Gap and Resonant Frequency in Large Vestibular Aqueduct Syndrome. *American Journal of Otolaryngology*, **21**, 671-674.
- [17] Arjmand, E.M. and Webber, A. (2004) Audiometric Findings in Children with a Large Vestibular Aqueduct. *Archives of Otolaryngology—Head & Neck Surgery*, **130**, 1169-1174. <https://doi.org/10.1001/archotol.130.10.1169>
- [18] 卢肖慧, 季永红, 袁勇. 大前庭水管综合征患儿听力学相关检查结果及其特点[J]. 中国听力语言康复科学杂志, 2017, 15(6): 422-425.
- [19] 刘佳星, 黄丽辉, 傅新星, 等. 大前庭水管综合征患儿听力学检测特点分析[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2016, 30(21): 1702-1705, 1709.
- [20] 丁璐, 王晨露, 史文迪. 大前庭水管综合征患者鼓膜吸收率特征初探[J]. 中华耳科学杂志, 2021, 19(1): 16-20.
- [21] Ito, T., Nishio, A., Wangemann, P. and Griffith, A.J. (2015) Progressive Irreversible Hearing Loss Is Caused by Stria Vascularis Degeneration in an Slc26a4-Insufficient Mouse Model of Large Vestibular Aqueduct Syndrome. *Neuroscience*, **310**, 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2015.09.016>
- [22] 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>
- [23] 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>
- [24] Shahnaz, N., Aithal, S. and Bargaen, G.A. (2023) Wideband Acoustic Immittance in Children. *Seminars in Hearing*, **44**, 46-64. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1763294>
- [25] Ajmal, H., Sharif, F., Shakeel, H., *et al.* (2021) Berg Balance Scale as a Clinical Screening Tool to Check Fall Risk among Healthy Geriatric Community. *Rawal Medical Journal*, **46**, 209-211.
- [26] 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>
- [27] 汪玮, 王璐, 陈向平, 等. 听力正常儿童宽频鼓室图声能吸收率[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2020, 28(3): 262-266.
- [28] Mishra, S.K., Dinger, Z. and Renken, L. (2017) Maturation of Middle Ear Transmission in Children. *Hearing Research*, **344**, 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.10.029>