

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2026.05.014

乙状窦源性耳鸣机制与诊疗研究进展

Advances in Mechanisms, Diagnosis and Treatment of Sigmoid Sinus Associated Pulsatile Tinnitus

张玉婷 郑昱晓 刘思远 靳琛 李彦仕[#] 左汶奇[#]

ZHANG Yu-ting, ZHENG Yu-xiao, LIU Si-yuan, JIN Chen, LI Yan-shi, ZUO Wen-qi

【摘要】乙状窦源性耳鸣是一种由乙状窦周围血管结构异常或血流动力学改变引发的搏动性耳鸣,其耳鸣节律通常与心跳一致。本文梳理了乙状窦源性耳鸣在临床特征、病因学、治疗方案及疗效、计算流体力学技术和机器学习等方面研究进展。目前,乙状窦源性耳鸣以女性发病为主,右侧发病常见,可伴低频听力损失,同时年轻化更明显。其病因机制呈现多因素协同特征,解剖结构异常、血流动力学改变、脑脊液和颅内压改变等共同参与乙状窦源性耳鸣的发生发展,具体病因之间的关系有待进一步研究。乙状窦源性耳鸣的治疗方案以乳突径路手术治疗为主,主要是乙状窦骨壁重建术及其相关术式,国内外研究在修补材料上存在差异,不同机构的手术方法不同,导致疗效不一,且不能直接比较手术方法的优劣。手术治疗的短期疗效较好,但长期疗效有待进一步研究。近年来,计算流体力学技术在其病理机制和诊疗技术研究方面提供了有力支持,机器学习则在自动识别异常区域和自动化辅助诊断方面有了新进展。今后,可进一步开展多中心、大样本、采用统一标准的前瞻性研究,为乙状窦源性耳鸣的治疗及机制研究提供高质量证据,为自动化诊断提供经验。

【关键词】搏动性耳鸣;乙状窦源性耳鸣;病因学;手术疗效**【中图分类号】** R764.45**【文献标识码】** A**【文章编号】** 1672-4933(2026)05-0524-06

【Abstract】 Sigmoid sinus associated pulsatile tinnitus is a type of pulsatile tinnitus caused by structural abnormalities of the vasculature surrounding the sigmoid sinus or by hemodynamic alterations, with a rhythm typically synchronous with the heartbeat. This review summarizes the current literature on sigmoid sinus associated pulsatile tinnitus with respect to clinical characteristics, etiology, treatment strategies and outcomes, computational fluid dynamics techniques, and machine learning applications. Current evidence indicates a female predominance, a predilection for the right side, and an association with low-frequency hearing loss, with a notably younger age of onset. The underlying pathogenic mechanisms exhibit multifactorial synergistic features, in which anatomical anomalies, hemodynamic changes, and alterations in cerebrospinal fluid and intracranial pressure collectively contribute to the development of sigmoid sinus associated pulsatile tinnitus; however, the interrelationships among these specific etiological factors warrant further investigation. Surgical intervention via the mastoid approach remains the mainstay of treatment, predominantly sigmoid sinus wall reconstruction and its related variants. Differences in grafting materials exist between domestic and international studies, and variations in surgical techniques across different centers have led to heterogeneous outcomes, precluding direct comparisons of the relative efficacy of different surgical methods. Based on current data, short-term surgical outcomes are favorable, but long-term results require further validation. In recent years, computational fluid dynamics has provided robust support for investigating pathological mechanisms and refining diagnostic and therapeutic approaches, while machine learning has advanced the automated identification of abnormal regions and computer-aided diagnosis. Future clinical research should focus on multicenter, large-sample, prospective studies with standardized protocols to generate higher-quality evidence for both treatment and mechanistic exploration of sigmoid sinus associated pulsatile tinnitus, and to accumulate experience for automated diagnostic systems.

【Key words】 Pulsatile tinnitus; Sigmoid sinus associated pulsatile tinnitus; Etiology; Surgical outcomes

搏动性耳鸣(pulsatile tinnitus, PT)是一种重要的耳鸣亚型,其病因复杂,是患者感知与自身心跳或血流同步的节律性声音,又称血管性耳鸣,约占所有耳鸣病例的10%^[1]。静脉源性搏动性耳鸣是常见的搏动性耳鸣,约占

PT的40%^[2]。在静脉源性搏动性耳鸣中,乙状窦源性耳鸣最常见,同时乙状窦区域(包括乙状窦本身、横窦-乙状窦交界处)的血管结构异常被认为是PT常见且可干预的病因之一,其主要病理基础包括乙状窦憩室(sigmoid

基金项目:重庆医科大学研究生人工智能赋能课程建设项目“高级临床听力学”(AI2025003);国家耳鼻咽喉疾病临床医学研究中心开发课题项目“基于大数据的反向传播神经网络机器学习模型在预测突发性耳聋发病率中的价值探讨”(2024KF020)

作者单位:重庆医科大学附属第一医院耳鼻咽喉头颈外科 重庆 400016

作者简介:张玉婷 硕士在读;研究方向:听力学

通讯作者:左汶奇, E-mail: zuowenqi@163.com

李彦仕, E-mail: 1272870675@qq.com

[#] 为共同通讯作者

sinus diverticulum, SSD)、乙状窦骨壁缺损(sigmoid sinus wall dehiscence/defect, SSWD)及乙状窦狭窄等。乙状窦裂开和乙状窦憩室被认为是PT常见的病因,导致约20%的PT病例发生^[3],同时也是静脉PT的常见原因,占有病例的86.4%^[4]。因此,深入了解乙状窦源性耳鸣的临床特征、病因机制、诊疗技术及其疗效,有重要意义。

1 临床特点

乙状窦源性耳鸣具有显著的人口学倾向性,以女性为主、右侧发病、年轻化及身体质量指数(body mass index, BMI)偏高为主要特点。Cass等^[5]通过病例对照研究发现,搏动性耳鸣队列明显更年轻、身高更矮、女性患者比例更高,同时乙状窦壁异常(sigmoid sinus wall anomalies, SSWA)和乙状窦憩室的发生率更高。搏动性耳鸣和乙状窦憩室的大多数病例涉及女性、右侧,这种倾向可能与脑静脉系统的右侧优势有关^[6]。针对接受SSWA手术治疗患者的研究进一步佐证了上述特征,89.4%的患者为女性且平均BMI超过30^[7]。上述流行病学特征提示,性别、解剖偏侧性、年龄及体重指数可能与乙状窦源性耳鸣的发生发展及易感性相关,进一步探究女性发病率高原因是未来的研究重点。

低频听力损失(low-frequency hearing loss, LFHL)是搏动性耳鸣患者的客观标志之一^[8],也是乙状窦源性耳鸣患者的临床表现之一。SSWA患者通常在术前出现低频感音神经性听力损失,手术干预后会得到纠正^[7]。Liu等^[9]进一步揭示了乙状窦壁异常患者患侧耳与对侧耳在125 Hz、250 Hz及500 Hz频率的阈值存在显著差异。两者均证实低频听力在乙状窦源性耳鸣中的参与作用。

2 病因学研究

颅内压增高(idiopathic intracranial hypertension, IIH)与乙状窦源性耳鸣存在密切联系。在IIH合并PT患者中,SSWA的发生率较高,表明SSWA是IIH患者搏动性耳鸣的促成因素^[10]。在乙状窦源性耳鸣患者中,高颅内压发生率达62.1%^[11]。颅内压增高组SSWD-PT患者的脑脊液(cerebrospinal fluid, CSF)平均流量明显低于对照组,反流分数明显升高^[12]。Chen等^[13]对比了SSWD-PT合并IIH患者与正常对照组的CSF血流动力学和体积变化,发现该组峰值流速、平均流速和平均流量降低,反流分数和脑脊液体积增加。因此,在乙状窦源性耳鸣患者中,评估颅内压和脑脊液改变非常重要。IIH、SSWA异常、CSF动力学异常三者可能共同参与PT的发生,未来可进一步研究四者之间的潜在联系。

血流动力学改变是乙状窦源性耳鸣产生的直接物理

基础,高速血流、涡流及特定解剖结构是乙状窦源性耳鸣产生的关键因素。有研究者使用4D flow MRI评估SSWAs引起的单侧PT患者横窦—乙状窦交界区中的血流特性,发现所有患者均出现高速血流^[14]。Tian等^[15]进一步探讨SSWD、静脉窦畸形和高静脉流速三者的作用,发现3种情况对放大静脉声响均有作用,其中,SSWD致病性最高,高静脉血流速度可能会降低乙状窦壁重建手术的效果,而静脉窦畸形则可能加重由SSWD引起的耳鸣强度。因此,SSWA(尤其是SSWD)通过改变局部血流模式(产生涡流、射流)和增加血流速度,成为引发PT的核心血流动力学因素,静脉窦形态和整体血流速度起协同放大作用。

在病因探索中,关于乙状窦源性耳鸣产生的传导机制有新发现。Park等^[16]提出乙状窦源性耳鸣的空气搏动传导机制,认为耳鸣不仅来源于血流湍流,更由于缺损处乙状窦自身搏动经中耳腔空气传导引起鼓膜振动所致。此外,乙状窦憩室引起的搏动性耳鸣可能与茎突压迫对侧颈内静脉有关^[17],但是该推论需要更多数据积累验证。

综上,乙状窦源性耳鸣的发病机制呈现多因素协同特征,SSWA是关键解剖基础,高流速是重要的动力学诱因,静脉窦畸形起放大效应,颅内压及CSF动力学异常参与病理机制调节,探究各种病因之间的关系形成共识很有必要。

3 治疗方案及疗效分析

目前,乙状窦源性耳鸣的治疗方法主要有血管内介入治疗和乳突径路手术治疗^[18]。乳突径路手术治疗包括乙状窦骨壁重建术(sigmoid sinus wall resurfacing, SSWR)、乙状窦还纳术和乙状窦缩窄术等相关术式,不同机构、同一术式的具体操作不同。笔者整理了近5年手术治疗乙状窦源性耳鸣的文献,具体手术方法见表1。

不同手术方法有以下特征:①填充和修补材料不同:主要有自体组织、骨替代材料和生物胶两类材料。国内主要以自身骨粉覆盖缺损部位为主,自体骨粉取材方便,无免疫排斥风险,但易移位,仍需配合耳脑胶/纤维蛋白胶混合使用。国外考虑使用骨替代材料进行缺损部位的覆盖和重建,但可能会导致血栓和炎症。②对憩室的处理方式不同:保留憩室、直接消除/切除憩室或还纳憩室等,具体方法也不相同。③乙状窦血管壁和骨壁之间如何重建。④是否进行气房共鸣腔处理,有研究开放或消除乳突窦及周围气房,以阻断声音经气房传导通路,避免术后耳鸣残留;另有研究未专门描述气房处理步骤。这些差异可能在一定程度上影响手术疗效。乙状窦源性耳鸣手术治疗的术后疗效见表2。

表1 乙状窦源性耳鸣的手术方法

研究者	手术方式	具体方法
徐洪等 ^[19]	乙状窦骨壁重建术	切除憩室,再用颞肌筋膜修补,骨粉填塞术腔,将肌骨膜瓣回填复位
江远明等 ^[20]	乙状窦骨壁重建术	将乳突皮质骨塑型后回填至缺损处,再用自体骨粉结合生物蛋白胶加固回填骨片
Hsieh等 ^[21]	经颞骨骨血管重建术	用手术胶水涂抹的凝固明胶海绵固定于鼓室和气房,隔绝声音传导,优先修复乙状窦骨板及鼓室/气房,若未能消除PT,则行乙状窦腔外压迫术
Dai等 ^[22]	乙状窦骨壁重建术	用颞肌筋膜及自体骨粉由内向外修补缺损区域,并用医用粘合剂固定,最后用带蒂骨膜瓣覆盖乳突
Ettyreddy等 ^[7]	经乳突乙状窦表面重建术	用 Otomimix 或 HydroSet 骨替代材料直接覆盖缺损区,无需电凝,未放置筋膜、真皮替代物或填塞材料
Ian等 ^[23]	经乳突乙状窦表面重建术	憩室先减压后双极电凝,鼓室填塞明胶海绵,Hydroxyapatite 骨替代材料覆盖乙状窦表面进行重建
Jac等 ^[24]	经乳突表面重建/重塑术	手动将憩室压平至邻近乙状窦壁的水平(缺损患者使用自体材料对优势侧乙状窦进行轻柔减压),随后于血管腔外放置颞肌筋膜及 Mimix™ hydroxyapatite 骨替代材料重建
Wang等 ^[25]	改良乙状窦骨壁重建术	用大小合适的耳甲腔软骨自外部压迫乙状窦,用自体骨粉加固骨缺损区,骨粉表面依次覆盖颞肌筋膜及明胶海绵颗粒,最后用带蒂的黏膜骨膜瓣覆盖乳突腔
安飞等 ^[26]	乙状窦缩窄术	用滴水双极电凝灼缩窄乙状窦,然后用洗净的自体骨粉覆盖乙状窦表面,用纤维蛋白胶滴于骨粉表面,封闭骨板缺损部位,余骨粉填充术腔
Lim等 ^[27]	乙状窦表面重建术	用骨膜瓣闭塞憩室,使用自体骨屑及骨替代材料覆盖加固乙状窦壁
孙瑜宁等 ^[28]	乙状窦回纳+窦壁重建术	用湿润的骨粉覆盖乙状窦或横窦表面,用纤维蛋白胶滴于骨粉表面,封闭骨板缺损部位,再用骨蜡加固并将憩室回纳
闫艳等 ^[29]	乙状窦骨壁盖帽法重建术	用骨蜡均匀覆盖暴露的乙状窦血管壁,不加压,将洗净的自体骨粉与耳脑胶混合后覆盖骨蜡表面,均匀压实于乙状窦壁表面形成帽状覆盖
李莉等 ^[30]	乙状窦憩室封闭+缩窄+重建术等	以止血纱布与骨蜡的混合物封闭憩室,若缺失前方有气房,先行气房开放消除共鸣腔,术前要观察对侧乙状窦发育情况,若对侧乙状窦狭小,则行乙状窦缩窄时应慎重,不可过度缩窄
Hsieh等 ^[31]	憩室隔离法与临时通道法	去除憩室表面及乙状窦板缺损区(存在)的气房,采用隔音材料紧贴乙状窦壁并覆盖乳突室及气房,最后在憩室表面涂一层凝固的明胶海绵
周裔翠等 ^[32]	乙状窦骨壁重建术	在乙状窦血管壁和骨壁之间填塞可吸收明胶海绵小球,还纳缩窄乙状窦,再覆盖颞肌筋膜,表面加封骨蜡或耳后筋膜
曹玮等 ^[33]	乙状窦缩窄+软骨重建术	使用滴水双极电凝缩窄乙状窦,放置耳甲腔软骨于乙状窦与周围骨壁之间,并使其嵌顿,表面置适量骨粉加固,再用预留的乳突肌骨膜瓣覆盖
曹玮等 ^[33]	乙状窦(骨蜡)还纳术	用骨蜡适当塑形后将乙状窦向颅内还纳,冲洗术腔后,用预留的乳突肌骨膜瓣覆盖

通过对表2数据分析可见,尽管SSWR及相关术式疗效存在一定差异,但总体有效率可达80%以上,证明手术干预的可靠性。不同研究的痊愈率存在较大差异(32.6%~90.9%),原因可能为:①手术方式不同:乙状窦骨壁重建术、乙状窦缩窄术和乙状窦还纳术等具体操作不同、窦壁重建使用的具体材料、手术适应证等均可能影响结果。②疗效评价标准不统一:国内研究大部分采用刘蓬等制定的耳鸣疗效评定标准,存在部分国内研究未提及疗效的评价标准或使用其他评价标准,国外研究有采用VAS评分评价标准,有以患者估计耳鸣至少缓解70%为标准,以及未明确提及疗效的评价标准,同时部分研究仅报告有效率,数据不完整。③随访时间不同:短期疗效往往优于远期疗效,在2年随访期内,一般没有出现大量术后无效情况,而超过2年的随访,易出现无效和复发情况,如闫艳等^[29]最长随访时间82.8个月,术后无效率16.3%;周裔翠等^[32]最长随访时间68个月,术后无效率22.45%;Ahanotu等^[34]术后5年随访成功率由短期的97.3%降低为83.8%。④患者筛

选标准不同,合并IIH、横窦狭窄与否可能影响手术效果,样本量不统一也会导致差异。因此,未来研究应统一疗效评价标准,延长随访周期,针对不同病因亚型开展分层研究。

采用骨替代材料研究中均未报道术后出现明显并发症。Wang等^[25]报道1例患者术后出现耳闷胀感,约术后1周消失,且在长期随访过程中未观察到任何患者发生静脉窦血栓、大出血、耳聋或头痛等重大并发症。闫艳等^[29]报道1例患者术后出现耳闷耳堵症状,1例患者术后自觉唱歌时可感受到鼓膜震动,以及1例患者反映术后每逢下雨天出现头昏沉感。李莉等^[30]指出,1例患者侧乙状窦狭窄,术后出现头痛,查眼底无视乳头水肿,术后3天头痛消失。曹玮等^[33]发现在接受乙状窦还纳术的患者中,1例出现术后头痛、视物模糊,考虑为乙状窦还纳过度,经脱水降颅压治疗1个月后好转。周裔翠等^[32]报道少数患者术后出现耳后发麻、耳闷症状,但在长期随访过程中未出现头痛、脑膜静脉窦血栓等并发症。Ahanotu等^[34]发现,8.6%的患者术后5年以上确诊为特发性颅内高压(IIH)。除个别研究报

表2 乙状窦源性耳鸣的手术治疗及术后疗效

纳入研究	样本量	手术方式	疗效评价标准	随访时间(月)	痊愈(%)	显效(%)	有效(%)	无效(%)
Wang等 ^[25]	11	乙状窦骨壁重建术	5级李克特量表	25.1±1.2	100	0	0	0
孙渝宁等 ^[28]	7	乙状窦回纳 +窦壁重建术	刘蓬等制定的耳鸣疗 效评定标准	12	71.4	14.3	14.3	0
闫艳等 ^[29]	43	乙状窦骨壁盖帽法 重建术	同上	3~82.8	32.6	41.9	9.3	16.2
徐洪等 ^[19]	58	乙状窦骨壁重建术	同上	3~44	70.69	17.24	5.17	6.90
周裔翠等 ^[32]	49	乙状窦骨壁重建术	同上	15~68	46.94	18.37	12.24	22.45
李莉等 ^[30]	50	乙状窦憩室封闭+缩 窄+重建术等	同上	6~12	74	6	4	8
江远明等 ^[20]	6	乙状窦骨壁重建术	刘辛迪等所用术后疗 效标准	6~29	66.67	16.67	16.66	0
Lim等 ^[27]	26	乙状窦骨壁重建术	VAS评分标准	13.2±8.3	53.8	26.9	19.23	0
Ahanotu ^[34]	35	乙状窦骨壁重建术	耳鸣至少缓解70%	5年以上	/	/	83.8	16.2
安飞等 ^[26]	11	乙状窦缩窄术	THI量表的评分标准	12	90.9	/	9.1	0
Hsieh等 ^[21]	33	策略性经颞骨血管 重建术	未提及	0.5-13	87.88	/	/	12.12
Ian等 ^[23]	6	经乳突乙状窦表面 重建术	未提及	3.6~40.2	86	/	14	/
Ettyreddy等 ^[7]	19	乙状窦骨壁重建术	未提及	1~57.4	84.2	/	10.5	5.3
曹玮等 ^[33]	15	乙状窦缩窄 +软骨重建术	未提及	6	93	/	7	0
	16	乙状窦(骨蜡) 还纳术	未提及	6	50	/	44	6

注:疗效结果的判定依据文献原文进行;若文献明确报告“痊愈”、“显效”、“有效”和“无效”则依次录入;对于未明确区分“显效”、“有效”和“痊愈”的研究以及仅描述为“改善”“缓解”或“好转”,相关数据均按有效计入

道外,手术治疗并发症总体较轻,是乙状窦源性耳鸣的主要治疗手段,未来应进一步探究并发症的发生机制及预防策略。

对于乙状窦憩室患者,血管内治疗(endovascular treatment,EVT)是常见方案,血管内介入方案包括弹簧圈栓塞、支架植入术、支架辅助弹簧圈栓塞等。Abdalkader等^[35]研究23名乙状窦憩室血管内治疗患者,发现术后3个月,88.5%的患者PT完全消退,11.5%PT部分消退;术后1年,91.0%的患者完全缓解,8.6%的患者实现部分缓解,但2名IIH患者因对侧狭窄出现对侧耳鸣。有研究就血管内治疗和手术治疗的有效性和安全性进行系统分析^[36],发现在接受血管内治疗的26例乙状窦憩室患者中,搏动性耳鸣完全或接近完全消退,并发症发生率为3.7%,2个月后恢复至基线水平,未见永久性并发症;手术治疗组完全消退率为77.6%,不完全消退率11.2%,无效率11.2%,发生严重并发症达9.3%。尽管现有数据初步支持血管内治疗的优越性,但要明确其是否优于手术治疗,仍有赖于更多高质量的前瞻性对比研究。

4 计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)技术在机制研究与诊疗中的应用

CFD技术可对SSWA区域进行高保真建模和模拟血流动力学环境,为揭示乙状窦源性耳鸣的机制和优化诊疗策略提供有力证据。Wang等^[37]利用CFD技术系统揭

示了横窦—乙状窦振动声源、流体声源及其位移特性。CFD技术结合耳后彩色编码多普勒超声技术,可分析乙状窦内血流与憩室涡流的声学特性^[38]。Liu等^[39]使用CFD技术发现憩室的直径变化显著影响乙状窦的压力和血流速度分布,该研究利用粒子图像测速(particle Image velocimetry,PIV)验证了CFD模型的准确性。Mu等^[40]结合CFD技术发现85%的患者血流冲击血管壁的位置与SSWD区位置一致,该区域的平均壁面压力和壁面剪切应力显著高于周围区域。利用CFD技术重建患者模型时,模型选择不当可能导致高估病理风险,对临床应用具有重要警示意义^[41]。因此,在利用CFD技术重建患者模型时,需要选择合适的模型。为提高模拟结果的准确性,未来可进一步加大样本量探究适合乙状窦源性耳鸣研究的专属流体模型。

CFD技术的术后疗效评估中也发挥了重要作用。Mu等^[42]分析了8例接受乙状窦重建术患者,发现康复组和非康复组患者术前术后的壁面平均压力变化幅度有显著差异,而涡量差异不明显。Li等^[43]分析8例患者,发现非康复组乙状窦内涡量显著高于康复组,但壁面压力分布无统计学差异。两者的研究结果存在差异,首先,可能因为前研究涉及合并横窦狭窄患者,研究的纳排标准不一致;其次,两研究的样本数量均较少,易存在较大误差。此外,Huang等^[44]通过CFD构建不同憩室重建程度模型,初步得出术中憩室重建须达到某一阈值时(该研究为憩

室重建程度至少应达到原始憩室的60%),才能显著改善PT情况。该研究虽然仅有1例患者影像数据,但构建了3种不同憩室程度模型,为临床手术治疗提供了重要参考,但具体重建程度还需研究。

5 机器学习在乙状窦源性耳鸣中的应用

近年来,人工智能和机器学习已成为自动辅助医学诊断的研究热点,也被应用在乙状窦源性耳鸣的自动诊断。田山等^[45]根据搏动性耳鸣患者和无耳鸣人群的CT影像横截面图,研究出自动标注高致病区域的神经网络模型。Li等^[46]针对乙状窦和颈静脉球区域骨壁缺失检测中面临的异常样本稀少、类别不均衡、类间差异微小等问题,提出了一种子特征正交解耦模型,并进行实验验证,研究证实即使在少量异常样本条件下,深度学习仍能有效捕捉乙状窦源性耳鸣的关键骨质缺损特征。未来,随着多中心大样本数据库的建立和算法的不断优化,基于深度学习的自动化诊断模型将逐步走向临床实践,帮助医生快速定位骨壁缺损、颞骨气化异常等高致病区域,为术后疗效预测提供量化依据,辅助建立术后疗效预测模型。尽管目前相关研究仍处于探索阶段,但随着算法可解释性的提升和临床验证的完善,人工智能有望成为乙状窦源性耳鸣精准诊疗的重要辅助工具。

6 总结与展望

乙状窦源性耳鸣主要与乙状窦解剖结构异常、颅内高压所致脑脊液动力学异常、SSWD或静脉窦畸形所致血流动力学紊乱和乙状窦壁异常所致空气传导路径有关,然而,关于孰因孰果以及各因素贡献权重的确切关系,学界仍有争议。全面阐明其机制,需要更多结合解剖学、血流动力学和颅内压的综合研究。在治疗方面,国外研究考虑采用骨替代材料修补缺损,而国内主要以自体骨粉修补缺损部位。国内主要以乙状窦重建术为主要手段,取得了较好的短期疗效,但从长期来看,治疗效果仍存在一定争议,需要更多临床随访和数据积累加以验证。与此同时,目前关于乙状窦源性耳鸣的疗效研究,大多停留在单一机构的回顾性分析,缺乏多中心、大样本、统一标准的前瞻性研究,导致结论的普适性和可靠性受到限制。未来有必要建立多中心合作,制定统一的诊断与评估体系,以确保研究结果的科学性和准确性。此外,对于术后效果不佳、耳鸣复发或出现严重并发症的患者,需要开展深入研究。合理利用CFD技术,对大样本的疗效异常数据进行分析,模拟乙状窦内血流情况,分析术前与术后差异,找到异常原因,帮助临床医生减少和预防预后不佳情况的发生。基于现有研究数据,结合机器学习建立

完善的自动化诊断模型及构建术后疗效预测模型,是未来研究的关键。

参考文献

- [1] Liyanage SH, Singh A, Savundra P, et al. Pulsatile tinnitus[J]. J Laryngol Otol, 2006, 120(2): 93-97.
- [2] Han Y, Xia J, Jin L, et al. Computational fluid dynamics study of the effect of transverse sinus stenosis on the blood flow pattern in the ipsilateral superior curve of the sigmoid sinus[J]. Eur Radiol, 2021, 31(8): 1-9.
- [3] Liu Z, Dong C, Wang X, et al. Association between idiopathic intracranial hypertension and sigmoid sinus dehiscence/diverticulum with pulsatile tinnitus: a retrospective imaging study[J]. Neuroradiology, 2015, 57(7): 747-753.
- [4] Dong C, Zhao PF, Yang JG, et al. Incidence of Vascular Anomalies and Variants Associated with Unilateral Venous Pulsatile Tinnitus in 242 Patients Based on Dual-Phase Contrast-Enhanced Computed Tomography [J]. Chin Med J (Engl), 2015, 128(5): 581-585.
- [5] Cass ND, Lindquist NR, Patro A, et al. Radiographic Sigmoid Sinus Wall Abnormalities and Pulsatile Tinnitus: A Case-Control Study[J]. Otol Neurotol, 2023, 44(4): 353-359.
- [6] Schoeff S, Nicholas B, Mukherjee S, et al. Imaging Prevalence of Sigmoid Sinus Dehiscence among Patients with and without Pulsatile Tinnitus[J]. Otolaryngol Head Neck Surg, 2014, 150(5): 841-846.
- [7] Ettayreddy AR, Shew MA, Durakovic N, et al. Prevalence, Surgical Management, and Audiologic Impact of Sigmoid Sinus Dehiscence Causing Pulsatile Tinnitus[J]. Otol Neurotol, 2021, 42(1): 82-91.
- [8] Jeon HW, Kim SY, Choi BS, et al. Pseudo-low Frequency Hearing Loss and Its Improvement After Treatment May Be Objective Signs of Significant Vascular Pathology in Patients With Pulsatile Tinnitus[J]. Otol Neurotol, 2016, 37(9): 1344-1349.
- [9] Liu X, Hsieh YL, Wang Y, et al. Spontaneous otoacoustic emission as a novel method to screen pulsatile tinnitus caused by sigmoid sinus wall abnormalities: a prospective study[J]. Eur Arch Otorhinolaryngol, 2025, 282(6): 1-9.
- [10] Kline NL, Angster K, Archer E, et al. Association of pulse synchronous tinnitus and sigmoid sinus wall abnormalities in patients with idiopathic intracranial hypertension[J]. Am J Otolaryngol, 2020, 41(6): 102675.
- [11] 陈澜月, 马晓博, 周梦迪, 等. 不同颅内压状态下乙状窦源性耳鸣患者的临床特征分析[J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2023, 30(12): 772-775.
- [12] 陈澜月, 李薇, 马晓博, 等. 不同颅内压状态下乙状窦沟骨板缺损性耳鸣的脑脊液流场及体积变化特征[J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2025, 32(2): 94-99.
- [13] Chen L, Li W, Ma X, et al. Cerebrospinal fluid flow dynamics and volume changes are related with sigmoid sinus wall dehiscence-pulsatile tinnitus with idiopathic intracranial hypertension[J]. Magn Reson Imaging, 2024, 117: 110315.
- [14] Qiu X, Zeng R, Zhao P, et al. Blood flow changes in the transverse-sigmoid sinus junction following effective surgical reconstruction for unilateral pulsatile tinnitus with sigmoid sinus wall anomalies: a four-dimensional flow magnetic resonance imaging analysis[J]. Quant Imaging Med Surg, 2025, 15(3): 2376-2384.
- [15] Tian S, Chen L, Huang C, et al. An in vitro experimental study on the

- synergistic pathogenicity analysis of pulsatile tinnitus involving venous flow velocity, sigmoid sinus wall dehiscence and sinus malformation[J].*Med Eng Phys*,2024,134:104257.
- [16] Park SN, Han JS, Mee Park J, et al. A novel water occlusion test for disorders causing pulsatile tinnitus: Our experience in 32 patients[J].*Clin Otolaryngol*,2020,45(2):280-285.
- [17] Lou ZC. The styloid process and the formation of sigmoid sinus diverticulum: is there a link? [J].*Braz J Otorhinolaryngol*, 2019, 87: 545-549.
- [18] 刘坤,王国鹏,曾嵘,等.乙状窦相关性搏动性耳鸣的手术治疗研究进展[J].*中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*,2020,55(1):63-67.
- [19] 徐洪,谢静,刘坤,等.乙状窦憩室相关静脉源性搏动性耳鸣的手术疗效分析[J].*临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*,2020,34(12):1079-1083.
- [20] 江远明,李春丽,何婷,等.手术治疗乙状窦骨壁缺损引起搏动性耳鸣的临床疗效分析[J].*中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*,2020,26(3):288-291.
- [21] Hsieh YL, Xu X, Wu Y, et al. Evidence of air-conduction transmission pathway and strategized transtemporal operative techniques for venous pulsatile tinnitus: Combining water occlusion test and operative sensing applications[J].*Laryngoscope Investig Otolaryngol*,2021,6(6): 1436-1448.
- [22] Dai C, Zhao P, Wang G, et al. Morphological remodeling of the repaired sigmoid sinus bone wall in patients with pulsatile tinnitus after successful surgical reconstruction: an ultra-high-resolution CT study[J].*Acta Radiol*, 2024,65(12):1506-1514.
- [23] Ian N, Julie H, Alvin D, et al. Transmastoid Hydroxyapatite Resurfacing for Sigmoid Sinus Wall Anomalies Causing Pulsatile Tinnitus[J].*Ann Otol Rhinol Laryngol*,2021,130(8):885-891.
- [24] Lee SJ, Lee SY, Choi BY, et al. Preoperative Significance of Ipsilateral Manual Neck Compression in Patients With Pulsatile Tinnitus Secondary to Sigmoid Sinus Dehiscences and Diverticula[J].*Front Neurol*,2022,13:869244.
- [25] Wang D, Zhao Y, Tong B, et al. Treatment of pulsatile tinnitus caused by anomalies of the sigmoid sinus wall via combined internal and external sigmoid sinus wall reconstruction with 3D temporal bone CT guidance [J].*Eur Arch Otorhinolaryngol*,2020,277(9):2439-2445.
- [26] 安飞,刘伟,马贤,等.乙状窦缩窄术治疗搏动性耳鸣[J].*中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*,2021,27(2):201-204.
- [27] Lim JH, Han JS, Aliyeva A, et al. Surgical Outcomes of Sigmoid Sinus Resurfacing for Pulsatile Tinnitus: Predictive Value of Water Occlusion Test and Imaging study[J].*Clin Exp Otorhinolaryngol*, 2023, 16(3): 244-250.
- [28] 孙瑜宁,孙茂钢,张恩东.乙状窦还纳及窦壁重建术治疗搏动性耳鸣的疗效分析[J].*中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*,2023,29(5):91-95.
- [29] 闫艳,韩嘉为,张森,等.回流优势侧乙状窦相关性血管搏动性耳鸣的外科技术与疗效[J].*临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*,2024,38(8):743-746.
- [30] 李莉,韩月臣,孙鹏程,等.乙状窦异常搏动性耳鸣50例临床病例分析[J].*中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*,2024,59(8):792-796.
- [31] Hsieh YL, Gao X, Chen X, et al. Resurfacing Dehiscence(s) Without Reducing Diverticulum Effectively Silences Pulsatile Tinnitus: Novel Surgical Techniques for Diverticulum and Intraoperative Microphone Monitoring[J].*Otol Neurotol*,2023,45(2):154-162.
- [32] 周裔翠,侯晓燕,刘梦秋,等.乙状窦骨壁重建术治疗搏动性耳鸣的临床疗效分析[J].*中华耳科学杂志*,2025,23(7):853-857.
- [33] 曹玮,吴喆晨,赵益,等.乙状窦缩窄+软骨重建术与乙状窦还纳术治疗乙状窦相关搏动性耳鸣的疗效比较[J].*临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2025,39(9):854-860.
- [34] Ahanotu AE, Oslin K, Rasooly M, et al. Long-Term Outcomes of Sigmoid Sinus Wall Reconstruction for Pulsatile Tinnitus Due to Sigmoid Sinus Wall Anomalies[J].*Otol Neurotol*, 2024, 45(10): 1148-1152.
- [35] Abdalkader M, Klein P, Setty B, et al. Endovascular treatment of sigmoid Sinus diverticulum in patients with pulsatile tinnitus[J].*Interv Neuroradiol*, Published online May 21, 2025.
- [36] Sathya A, Nguyen TN, Klein P, et al. Endovascular vs surgical treatment of sigmoid sinus diverticulum causing pulsatile tinnitus: A systematic review[J].*Interv Neuroradiol*, 2026,32(4):1627-1636.
- [37] Wang X, Hsieh YL, Xu X, et al. Influence of sigmoid plate and dura mater on vascular wall displacement, vibroacoustic/hydroacoustic sources characteristics, and frequency-loudness assessments of venous pulsatile tinnitus: A coupled-computational fluid dynamics study combining transcanal recording investigation[J].*Front Bioeng Biotechnol*,2022,10:948230.
- [38] Gao X, Hsieh YL, Wang X, et al. Retroauricular/Transcranial Color-Coded Doppler Ultrasound Approach in Junction With Ipsilateral Neck Compression on Real-Time Hydroacoustic Variation of Venous Pulsatile Tinnitus[J].*Front Hum Neurosci*,2022,16:862420.
- [39] Liu J, Huang S, Hu Z, et al. Effect of diverticulum entrance diameter on sigmoid sinus hemodynamics: a CFD and PIV experimental validation study[J].*Comput Methods Biomech Biomed Engin*, Published online September 10, 2025.
- [40] Mu Z, Li X, Zhao D, et al. Hemodynamics study on the relationship between the sigmoid sinus wall dehiscence and the blood flow pattern of the transverse sinus and sigmoid sinus junction[J].*J Biomech*,2022, 135:111022.
- [41] Mu Z, Liu B, Han Y, et al. Effect of non-Newtonian rheological models on pulsatile hemodynamics in patients-specific venous models of pulsatile tinnitus[J].*Biocybern Biomed Eng*,2025,45(4):630-641.
- [42] Mu Z, Qiu X, Zhao D, et al. Hemodynamic study on the different therapeutic effects of SSWD resurfacing surgery on patients with pulsatile tinnitus[J].*Comput Methods Programs Biomed*, 2020, 190: 105373.
- [43] Li Z, Jin L. Study on the correlation between hemodynamic status of the transverse sinus-sigmoid sinus and the clinical efficacy of sigmoid sinus wall reconstruction[J].*Interv Neuroradiol*,2021,28(6):687-697.
- [44] Huang S, Li X, Xue X, et al. Hemodynamic study of the therapeutic effects of the different degrees of sigmoid sinus diverticulum reconstruction on patients[J].*Med Eng Phys*,2020,86:8-15.
- [45] 田山,王治文,曹学鹏,等.基于CT影像搏动性耳鸣识别及高致病区域[J].*北京航空航天大学学报*,2025,51(2):625-632.
- [46] Li X, Zhou Y, Yin H, et al. Sub-features orthogonal decoupling: Detecting bone wall absence via a small number of abnormal examples for temporal CT images[J].*Comput Med Imaging Graph*, 2024, 115: 102380.

收稿日期 2026-03-30

修回日期 2026-08-03

录用日期 2026-08-15

责任编辑 蒋 春