

# 相位对比磁共振电影技术在脑脊液动力学中的应用进展

张 鹏, 张少军, 韩 易

(蚌埠医学院第一附属医院 神经外科, 安徽 蚌埠 233000)

**[摘要]** 相位对比磁共振电影成像技术(cine phase-contrast magnetic resonance imaging, PC-MRI)可以通过对流体运动方向、速度进行测量分析,经数据处理实现对脑脊液流动特点的定量研究。本文对该技术在正常成年人、脑积水、Chiari I 型畸形及蛛网膜囊肿患者脑脊液动力学中的临床应用进行综述。

**[关键词]** 相位对比磁共振电影技术;脑脊液;循环动力学

**[中图分类号]** R651.1 **[文献标志码]** A **文章编号:**1671-7295(2021)02-0171-06

## Advances in application of cine phase-contrast MRI in CSF circulation

ZHANG Peng, ZHANG Shaojun, HAN Yi

(Department of Neurosurgery, the First Affiliated Hospital of Bengbu Medical College, Bengbu 233000, China)

**[Abstract]** Cine phase-contrast MRI can measure and analyze the direction and velocity of fluid movement and achieve the quantitative study of CSF flow characteristics through data processing. This article reviews the clinical application of the technique in CSF dynamics of healthy adults and patients with hydrocephalus, Chiari malformation type I and arachnoid cyst.

**[Keywords]** phase-contrast MRI; CSF; circulation

近年来,随着磁共振影像技术的发展,神经外科对脑脊液动力学的研究逐渐深入,在相位对比磁共振电影成像技术(cine phase-contrast magnetic resonance imaging, PC-MRI)诞生之前,对于人体内流动液体的测量长期依靠多普勒超声、造影等检查,无法适应对于脑脊液动力学的研究。PC-MRI 凭借其无创的特点,不仅优于传统放射性核素脑池造影、颅内压监测等有创检查方式,同时为脑脊液循环动力学研究提供依据,已被越来越多地应用于脑脊液循环障碍的病理评估。

### 1 PC-MRI 的原理

PC-MRI 以磁共振成像的原理为基础,采集双极梯度磁场对流体进行的两次图像编码,流动质子在施加于层面输入及输出梯度间的两个方向相反、大小相等的磁场中产生相位变化,当流体的实际流

动方向与预设编码方向一致时,流动的脑脊液显示为明亮的高信号,相位变化与流体速度呈正相关,且相位位移越大,像素信号越强。实际流动与预设方向相反时,显示为黑色的低信号,流体静止时则无像素信号的改变,白色信号与黑色信号分别代表正向流动和反向流动。脑脊液周期性往返流动与生理性心动周期的关系密不可分,与心电图相结合,得到相位图像即可显示出脑脊液的搏动性流动。最终可获得相关流动液体运动的方向、流速、流量等资料进行临床分析<sup>[1]</sup>。测量中的影响因素众多,包括编码速度的差异,测量层面的选择,不同测量者对感兴趣区域(ROI)的绘制误差,受检者的脑组织顺应性及其呼吸、血压、心率的影响。为保证稳定性,对于能够配合的受检者,在安静休息后,平静呼吸的状态下完成扫描,不能配合者则先予以药物镇静再进行扫描。针对 ROI 的绘制,在幅度图像的选择上应注意

基金项目:蚌埠市科技创新项目(201902)

第一作者简介:张 鹏(1993-),男,硕士研究生。E-mail:379597665@qq.com

通信作者:韩 易,副主任医师。E-mail:hanyi0552@163.com

流出道中脑脊液与周围组织的对比度和脑脊液流出信号强度,找出最佳截面,绘制 ROI 面积时应尽量贴近流出道管腔壁,同时需避免过度紧靠引起误差。

流速编码是磁共振电影检查的一个关键参数,它直接限制了最大编码速度,预设值偏低会引起信号混杂,导致测量结果不准确,而速度编码过高会导致从流动中获取的信号和信噪比降低,因此,预设的编码速度通常应略高于被研究流体的真实流速,采取牺牲小部分的信噪比来保证测量结果的准确性。Struck AF 等<sup>[2]</sup>研究发现正常人枕骨大孔区脑脊液平均峰流速约为 3.6 cm/s, Korbecki 等<sup>[1]</sup>建议在枕骨大孔区脑脊液的速度编码值设定为 10 cm/s,脑脊液通过中脑导水管的速度编码值设定为 8 cm/s,在某些病理条件下,如中导水管狭窄时,由于狭窄区流速较高,则需要选择高于一般情况下的流速编码值。在国内的报道中,尚华等<sup>[3]</sup>通过研究正常人 C2~3 椎间盘水平脑脊液流动特点,建议针对颈椎管内脑脊液流速的测量,编码流速设置在 15~20 cm/s 最为适宜;车玉英等<sup>[4]</sup>将流速编码设定为 12 cm/s 研究小儿中脑导水管处脑脊液流动,发现 1 个心动周期内,其脑脊液在收缩期峰流速位于 5.18~10.02 cm/s 间,舒张期峰流速位于 6.04~10.46 cm/s 间。

PC-MRI 技术常用于血流动力学研究,为评估临床治疗预后效果及指导治疗方案提供了日趋重要的参考信息,如对先天性心脏病异常分流情况、心脏瓣膜缩窄及冠脉管腔狭窄的评估。因其无创及敏感性高的优点在临床上也逐步应用于脑脊液循环中的流体测量。包括正常脑脊液流动特点及脑积水、Chiari 畸形 I 型等异常的脑脊液流体动力学分析,在指导手术方案的选择和评估预后上都具有重要的意义。

## 2 PC-MRI 的临床应用

### 2.1 正常脑脊液循环的 PC-MRI 研究

最早关于脑脊液动力学的研究源于 20 世纪 40 年代,研究者们应用不同对比剂进行造影,对脑脊液循环有了初步的认识。Feinberg 等<sup>[5]</sup>于 1986—1987 年首次展开应用电影相位对比技术进行针对活体的脑脊液流速测量的研究,为 PC-MRI 技术的发展打开了崭新的大门。而后 Enzermann 等<sup>[6]</sup>通过 PC-MRI 技术发现脑脊液的循环具有搏动性,他认为脑脊液在中脑导水管的流动与心动周期紧密相关,在颅骨完好的前提下,心脏收缩时,颅脑动脉血

流量增加,脑组织随之膨胀位移,而颅内总容量恒定不变,因而脑室系统受压,引起脑脊液经过中脑导水管呈足向流动来缓解升高的颅内压;心脏舒张期则相反,正是这种脑脊液的规律性循环运动维持了颅内压的稳定。随着 PC-MRI 技术的成熟, Silverberg 等<sup>[7]</sup>通过对比不同年龄、性别的人群脑脊液流动,发现其循环过程在人成年后会发生改变,包括生成量及流出量的减少从而引起整体参与循环的脑脊液量的减少,而性别对结果并未造成影响,之后在 Oner 等<sup>[8]</sup>的研究中也证实了这一点。Unal 等<sup>[9]</sup>研究发现,14 岁以上人群的脑脊液峰流速低于 14 岁以下者。而对于椎管内脑脊液运动研究,尚华等<sup>[3]</sup>通过测量 60 例健康志愿者椎管内脑脊液在不同颈椎间盘平面的流动特点,提出脑脊液在一个心动周期内表现为震荡运动,收缩期呈足向流动舒张期流动方向朝头端,而舒张期流速明显小于收缩期,因此表现为头向足方向的净流动,且年龄低于 14 岁组无论舒张期还是收缩期,其脑脊液在椎管内峰流速、流量均高于其他各年龄组。Lokosso 团队<sup>[10]</sup>通过研究衰老过程中脊柱 C2~3 水平及中脑导水管处脑脊液流动与动脉搏动的相关性,证明无论年龄大小,颅内的血流搏动性都低于颅外且老年人的动脉和静脉搏动高于年轻人,老年人脊髓脑脊液净流量较年轻人显著增加,而中脑导水管脑脊液净流量则随年龄增长而保持不变。

### 2.2 脑积水的 PC-MRI 研究

脑积水是指因过多分泌、吸收障碍或者循环受阻而引起的脑脊液在颅内积聚过多。脑室系统与蛛网膜下腔不能充分联通,循环通路不畅,按梗阻部位可分为非交通性脑积水与交通性脑积水。交通性脑积水存在脑室系统普遍扩张的特点,其梗阻部位位于脑室系统外<sup>[11]</sup>。Luetmer 等<sup>[12]</sup>通过 PC-MRI 技术研究发现交通性脑积水患者脑脊液在中脑导水管处的流速比正常人明显增快,且流量增加。后续研究有学者认为流速增快的原因是扩大的脑室系统引起颅内压增高,在心脏收缩期,受压的脑组织向内侧形变反作用于侧脑室及三脑室,因此脑脊液足向流速增加且流量增多<sup>[13-14]</sup>。梗阻性脑积水脑脊液循环受阻部位在第四脑室以上,常引起颅内压增高,通过磁共振检查可确定引起梗阻的占位性病变,但对于中脑导水管狭窄粘连所引起的梗阻难以辨别,而 PC-MRI 技术通过直观而精确地显示出脑脊液循环过程,对于这部分患者可进行无创鉴别。对脑脊液定向测速,可发现其中脑导水管处出现随着心动周期产生的双向流动减弱或者形成湍流甚至消

失<sup>[15]</sup>。

治疗脑积水目前最常用的方法是脑室颅外分流,主要包括脑室-腹腔分流术、脑室-脊髓蛛网膜下腔分流术和脑室-心房分流术,而脑室心房分流常增加心血管疾病的并发风险,蛛网膜下腔脑室分流仅适合应用于交通性脑积水,目前首选的手术方式仍是脑室-腹腔分流<sup>[1]</sup>。分流系统阻塞是手术最常见的并发症<sup>[16-17]</sup>,张鸿日等<sup>[18]</sup>通过 PC-MRI 技术测量脑积水分流术后患者分流管内脑脊液流动情况后发现,分流系统阻塞患者脑脊液流速及流量明显降低,为判断分流装置是否梗阻提供临床新思路。凭借低死亡率、高成功率等优势<sup>[19-20]</sup>,神经内镜辅助下三脑室底造瘘术逐渐进入广大学者的视野,对于手术效果的评价,通常应用术前、术后脑室系统的变化及神经系统症状的改变。有报道指出仅少部分患者术后出现脑室系统缩小,且脑室大小的改变与症状体征的变化缺乏相关性,单纯观察脑室形态具有局限性。近年来,通过 PC-MRI 对三脑室造瘘口脑脊液动力学监测为评价手术效果提供可能性<sup>[21-22]</sup>。Lev 等<sup>[23]</sup>研究认为患者造瘘术后脑脊液在第三脑室底的平均流速明显快于正常对照组的相应位置。Bargallo 等<sup>[21]</sup>报道部分患者术后短期复查一个心动周期内瘘口区脑脊液流量足向大于头向,表现为净流量朝向头部,后期复查部分前期表现异常者脑脊液净流量方向恢复正常,并提出这种短期异常可能与脑脊液流经瘘口区形成湍流有关。国内学者岳云龙等<sup>[24]</sup>通过将 15 例行三脑室底造瘘手术患者与正常志愿者对比发现脑脊液在瘘口区流动情况与正常中脑导水管相似。

### 2.3 Chiari I 型畸形的 PC-MRI 研究

“Chiari 畸形”(以病理学家 Hans Chiari 命名)术语多指 I 型畸形,它是一组异质性疾病,枕骨大孔区脑脊液循环受阻是其共同特点,最新研究表明其中合并脊髓空洞症的患者约占 50%~70%<sup>[25]</sup>。小脑扁桃体疝出枕骨大孔下缘,引起脑脊液循环异常,同时受到压迫,引起一系列症状、体征,临床表现与脑脊液循环受影响的严重程度密切相关<sup>[26]</sup>。对于 Chiari I 型畸形患者,脑脊液动力学监测可为其病理生理、发病机制的探索提供更直观的证据,其脑脊液在颅颈区仍呈双向性流动,但具有较大的差异,且前后流动不均衡,而由于该区域脑脊液流出道狭窄引起的管道效应使得脑脊液平均峰流速明显高于正常人,但仍难以代偿受挤压缩窄的横截面积,因此脑脊液的流出量依旧是降低的<sup>[27-28]</sup>。手术是治疗 Chiari I 型畸形的唯一有效方式,而改善脑脊液循

环则是手术的关键,相位对比磁共振电影的应用通常也作为评估 Chiari I 型畸形患者手术效果的手段之一<sup>[29-31]</sup>。Quon 等<sup>[32]</sup>通过对比研究 18 例 CM-I 患者术前术后脑脊液动力学变化,发现临床症状的缓解与枕大池的扩大以及脑脊液循环改善具有相关性。对于伴有脊髓空洞症的病人,最常见于 C2~3、C3~4 椎间盘处,Linge 等<sup>[33]</sup>研究推测其引起脊髓空洞的主要原因在于该颈椎间盘水平脑脊液压力梯度相差最大。陆笑非等<sup>[34]</sup>通过探索 30 例 Chiari I 型畸形伴脊髓空洞症的患者枕大池成形手术前后脑脊液动力学改变,发现解除小脑扁桃体对硬膜的压迫后,不仅临床症状得到改善,脊髓空洞明显变小,且脑脊液流速较术前明显降低且流量增加,特别是 C2~3 水平。据此推断,枕骨大孔区的不完全阻塞是脊髓空洞形成的重要病因。

### 2.4 蛛网膜囊肿的 PC-MRI 研究

蛛网膜囊肿是一种先天性畸形,其囊内容物与脑脊液相同,通过常规 CT 及磁共振检查即可确诊,治疗上以手术为主,但手术指征的把控尚无定论<sup>[35-36]</sup>。Ros 等<sup>[37]</sup>认为对于已经出现临床症状的蛛网膜囊肿患者的囊肿腔不与蛛网膜下腔沟通,应积极手术,如果蛛网膜下腔与囊肿存在沟通,则只需定期随访。利用示踪剂进行脑室或脑池造影,可以判断囊肿与外界是否存在沟通,但其无法辨别囊肿与周围组织关系,为有创性检查,风险高,耗时长<sup>[38]</sup>。魏巍等<sup>[39]</sup>通过 PC-MRI 研究发现患者蛛网膜下腔脑脊液流速与囊肿内液体流速明显不同,在后续的研究中,向葵等<sup>[40]</sup>以 CT 及磁共振造影为标准,对 18 例蛛网膜囊肿患儿进行脑脊液电影成像检查,造影确诊沟通性囊肿 16 例,应用 PC-MRI 技术确诊 14 例,并指出存在偏差的原因可能是此 2 例患者囊肿和蛛网膜下腔之间脑脊液流出道相对狭窄,流速缓慢,对于不同流速的通路预先予以编码同一流速,引起脑脊液在流速较慢的通路中无法显示。由此可见,PC-MRI 对于蛛网膜囊肿的鉴别与诊断具有重要价值。

## 3 PC-MRI 技术的局限性

PC-MRI 应用于脑脊液动力学研究的局限性主要存在以下几点:(1)被检者的体位局限于仰卧位。而对于如 Chiari I 型畸形的患者而言,站立位时脑脊液流动通畅性远低于卧位患者,PC-MRI 成像的结果不能明确表现出此种变化<sup>[41]</sup>。(2)无法动态地体现患者脑脊液循环变化。不同的被检时间与测量点所测得的结果均不同,这就导致测量结果与患者

的实际病变情况可能有所差异<sup>[42]</sup>。(3)难以预测合适的脑脊液相位对比成像的参数。PC-MRI 检测需根据患者实际年龄、病情调整相对应的参数值,自出生至 20 岁,人类脑脊液的流速逐年降低,之后便趋于平稳,但由于各种病理原因,患者脑脊液流速或高或低,与正常的流速值有很大出入,医务人员在调整监测参数时缺乏可靠依据,遂难以为患者提供最佳的扫描条件。

#### 4 三维相衬技术(4D flow)的应用前景

随着三维相衬技术的出现,可显示出脑脊液多方向的运动,具有更高的空间分辨率,其潜在的应用可能有助于分析中枢神经系统疾病的特征<sup>[43-44]</sup>,测量脑脊液压力梯度<sup>[45]</sup>,预测鞘内药物分布情况<sup>[46]</sup>等。目前其评估脑脊液流动的准确度仍处于验证阶段,Heidari 等<sup>[47]</sup>通过建立体外模型和与数值模拟的比较来评估颈椎中脑脊液动力学的 4D flow 检测的准确性,发现在收缩期和舒张期峰值脑脊液流速附近,其能够准确地测量脑脊液流速和分布,但在低流速下对脑脊液运动评估不够精确。而对于脑脊液动力学的研究,有文献指出应用术中多普勒超声对脑脊液流动进行监测,通过适当调节信号,也可以显示其随心脏搏动形成的周期性双向流动,获取脑脊液的流速信息<sup>[48]</sup>。

#### 5 展 望

脑脊液循环是一个动态的且具有复杂的转运及吸收机制的过程,依然是目前研究的热点主题,因其多功能性特点,在很多病理条件下都会发生变化。PC-MRI 作为一门新兴的非侵入性技术,它的应用拓宽了我们对脑脊液病理生理学的现有认识,对疾病的诊断治疗及预后评估具有开创性意义。一项新技术从出现,到进入临床实际应用,必须有大量的研究进行验证,三维相衬技术在伴随磁共振硬件设备的更新及后处理软件的开发提升,必将进一步推动脑脊液循环动力学研究,在临床上为制定最佳的诊疗方案提供依据。

#### 参考文献:

[1] Korbecki A, Zimny A, Podgórski P, et al. Imaging of cerebrospinal fluid flow: fundamentals, techniques, and clinical applications of phase-contrast magnetic resonance imaging[J]. *Pol J Radiol*, 2019, 84: e240-e250. DOI: 10.5114/pjr.2019.86881.

[2] Struck AF, Haughton VM. Idiopathic syringomyelia: phase-contrast MR of cerebrospinal fluid flow dynamics

at level of foramen magnum[J]. *Radiology*, 2009, 253(1): 184-190. DOI:10.1148/radiol.2531082135.

[3] 尚华, 刘怀军, 闫乐卡, 等. MR 电影相位对比成像定量研究不同年龄颈椎管内脑脊液运动[J]. *中国医学影像技术*, 2011, 27(3): 491-494. DOI:10.13929/j.1003-3289.2011.03.048.

[4] 车英玉, 付汪星, 杨子涛, 等. 磁共振中脑导水管脑脊液流动成像在正常小儿的研究分析[J]. *中华小儿外科杂志*, 2016, 37(3): 181-185. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3006.2016.03.005.

[5] Feinberg DA, Mark AS. Human brain motion and cerebrospinal fluid circulation demonstrated with MR velocity imaging[J]. *Radiology*, 1987, 163(3): 793-799. DOI:10.1148/radiology.163.3.3575734.

[6] Enzmann DR, Pelc NJ. Normal flow patterns of intracranial and spinal cerebrospinal fluid defined with phase-contrast cine MR imaging[J]. *Radiology*, 1991, 178(2): 467-474. DOI: 10.1148/radiology.178.2.1987610.

[7] Silverberg GD, Mayo M, Saul T, et al. Alzheimer's disease, normal-pressure hydrocephalus, and senescent changes in CSF circulatory physiology: a hypothesis[J]. *Lancet Neurol*, 2003, 2(8): 506-511. DOI:10.1016/S1474-4422(03)00487-3.

[8] Oner Z, Sagir Kahraman A, Kose E, et al. Quantitative evaluation of normal aqueductal cerebrospinal fluid flow using phase-contrast cine MRI according to age and sex[J]. *Anat Rec (Hoboken)*, 2017, 300(3): 549-555. DOI:10.1002/ar.23514.

[9] Unal O, Kartum A, Avcu S, et al. Cine phase-contrast MRI evaluation of normal aqueductal cerebrospinal fluid flow according to sex and age[J]. *Diagn Interv Radiol*, 2009, 15(4): 227-231. DOI:10.4261/1305-3825.DIR.2321-08.1.

[10] Lokossou A, Metanbou S, Gondry-Jouet C, et al. Extracranial versus intracranial hydro-hemodynamics during aging: a PC-MRI pilot cross-sectional study[J]. *Fluids Barriers CNS*, 2020, 17(1): 1. DOI:10.1186/s12987-019-0163-4.

[11] Orešković D, Radoš M, Klarica M. New concepts of cerebrospinal fluid physiology and development of hydrocephalus[J]. *Pediatr Neurosurg*, 2017, 52(6): 417-425. DOI:10.1159/000452169.

[12] Luetmer PH, Huston J, Friedman JA, et al. Measurement of cerebrospinal fluid flow at the cerebral aqueduct by use of phase-contrast magnetic resonance imaging: technique validation and utility in diagnosing idiopathic normal pressure hydrocephalus[J]. *Neurosurgery*, 2002, 50(3): 534-543; discussion543-4. DOI:

10.1097/00006123-200203000-00020.

- [13] Bradley WG Jr. Intracranial pressure versus phase-contrast MR imaging for normal pressure hydrocephalus [J]. *Am J Neuroradiol*, 2015, 36 (9): 1631-1632. DOI:10.3174/ajnr.A4507.
- [14] Oliveira LM, Nitrini R, Román GC. Normal-pressure hydrocephalus: a critical review [J]. *Dement Neuropsychol*, 2019, 13(2): 133-143. DOI:10.1590/1980-57642018dn13-020001.
- [15] Battal B, Kocaoglu M, Bulakbasi N, et al. Cerebrospinal fluid flow imaging by using phase-contrast MR technique [J]. *Br J Radiol*, 2011, 84(1004): 758-765. DOI:10.1259/bjr/66206791.
- [16] Mizrahi CJ, Spektor S, Margolin E, et al. Ventriculoperitoneal shunt malfunction caused by proximal catheter fat obstruction [J]. *J Clin Neurosci*, 2016, 30: 120-123. DOI:10.1016/j.jocn.2015.11.029.
- [17] Dobran M, Nasi D, Mancini F, et al. Relationship between the location of the ventricular catheter tip and the ventriculoperitoneal shunt malfunction [J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2018, 175: 50-53. DOI:10.1016/j.clineuro.2018.10.006.
- [18] 张鸿日, 彭静华, 李小潘. 相位对比法脑脊液电影磁共振成像在诊断脑室-腹腔分流装置梗阻中的应用 [J]. *中国临床神经外科杂志*, 2017, 22(7): 467-469. DOI:10.13798/j.issn.1009-153X.2017.07.007.
- [19] Bruscella S, Solari D, Somma T, et al. Predicting endoscopic third ventriculostomy success in adult hydrocephalus: preliminary assessment of a modified ETV success score for adults (ETVSS-A) in a series of 47 patients [J]. *J Neurosurg Sci*, 2019. DOI:10.23736/S0390-5616.19.04712-X.
- [20] Demerdash A, Rocque BG, Johnston J, et al. Endoscopic third ventriculostomy: a historical review [J]. *Br J Neurosurg*, 2017, 31 (1): 28-32. DOI:10.1080/02688697.2016.1245848.
- [21] Bargalló N, Olondo L, Garcia AI, et al. Functional analysis of third ventriculostomy patency by quantification of CSF stroke volume by using cine phase-contrast MR imaging [J]. *Am J Neuroradiol*, 2005, 26(10): 2514-2521.
- [22] Atsumi H, Horie T, Kajihara N, et al. Simple identification of cerebrospinal fluid turbulent motion using a dynamic improved motion-sensitized driven-equilibrium steady-state free precession method applied to various types of cerebrospinal fluid motion disturbance [J]. *Neurol Med Chir (Tokyo)*, 2020, 60(1): 30-36. DOI:10.2176/nmc.oa.2019-0170.
- [23] Lev S, Bhadelia RA, Estin D, et al. Functional analysis of third ventriculostomy patency with phase-contrast MRI velocity measurements [J]. *Neuroradiology*, 1997, 39(3): 175-179. DOI:10.1007/s002340050387.
- [24] 岳云龙, 刘洪亮, 金延方, 等. 第三脑室底造瘘术后瘘口区脑脊液流动的 MRI 定量研究 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2011, 16(7): 294-298.
- [25] Hofkes SK, Iskandar BJ, Turski PA, et al. Differentiation between symptomatic Chiari I malformation and asymptomatic tonsillar ectopia by using cerebrospinal fluid flow imaging: initial estimate of imaging accuracy [J]. *Radiology*, 2007, 245 (2): 532-540. DOI:10.1148/radiol.2452061096.
- [26] Holly LT, Batzdorf U. Chiari malformation and syringomyelia [J]. *J Neurosurg Spine*, 2019, 31(5): 619-628. DOI:10.3171/2019.7.SPINE181139.
- [27] Fakhri A, Shah MN, Goyal MS. Advanced imaging of chiari 1 malformations [J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2015, 26(4): 519-526. DOI:10.1016/j.nec.2015.06.012.
- [28] Zakaria R, Kandasamy J, Khan Y, et al. Raised intracranial pressure and hydrocephalus following hind-brain decompression for Chiari I malformation: a case series and review of the literature [J]. *Br J Neurosurg*, 2012, 26(4): 476-481. DOI:10.3109/02688697.2011.650738.
- [29] Caffo M, Cardali SM, Caruso G, et al. Minimally invasive posterior Fossa decompression with duraplasty in Chiari malformation type I with and without syringomyelia [J]. *Surg Neurol Int*, 2019, 10: 88. DOI:10.25259/SNI-70-2019.
- [30] D'Urso PI. Minimally invasive posterior Fossa decompression in Chiari I malformation [J]. *Surg Neurol Int*, 2019, 10: 138. DOI:10.25259/SNI-347-2019.
- [31] Kumar A, Devi BI. Do we need to perform duroplasty and tonsillar resection in the surgical treatment for patients with chiari 1 malformation? [J]. *World Neurosurg*, 2019, 125: 537. DOI:10.1016/j.wneu.2018.12.140.
- [32] Quon JL, Grant RA, DiLuna ML. Multimodal evaluation of CSF dynamics following extradural decompression for Chiari malformation Type I [J]. *J Neurosurg Spine*, 2015, 22 (6): 622-630. DOI:10.3171/2014.10.SPINE1433.
- [33] Linge SO, Mardal KA, Helgeland A, et al. Effect of craniovertebral decompression on CSF dynamics in Chiari malformation type I studied with computational fluid dynamics: laboratory investigation [J]. *J Neurosurg Spine*, 2014, 21 (4): 559-564. DOI:10.3171/2014.6.SPINE13950.

- [34] 陆笑非, 舒建, 杨述根, 等. PC-MRI 在 I 型 Chiari 畸形伴脊髓空洞症患者枕大池成形术中的应用[J]. 中国医学影像技术, 2017, 33(5): 688-692. DOI: 10.13929/j.1003-3289.201609145.
- [35] Nonaka M, Asai A. Treatment of arachnoid cysts: endoscopic fenestration or cyst-peritoneal shunt? [J]. No Shinkei Geka, 2019, 47(1): 39-48. DOI: 10.11477/mf.1436203894.
- [36] Chen B, Miao Y, Hu Y, et al. Rare Intracellular Arachnoid Cyst Distinguishing From Other Benign Cystic Lesions and its Surgical Strategies[J]. J Craniofac Surg, 2019, 30(5):30-32.
- [37] Ros López B, Martín Gallego Á, Iglesias Moroño S. Arachnoid cysts of the central nervous system. Algorithms and recommendations for management [J]. Neurocirugia (Astur), 2016, 27(2): 67-74. DOI: 10.1016/j.neucir.2015.02.002.
- [38] 谭震, 赵彩蕾, 臧冬东, 等. 钆喷酸葡胺 MRI 脑池造影在儿童颅内蛛网膜囊肿的诊断价值[J]. 中国微侵袭神经外科杂志, 2015, 20(5): 200-203. DOI: 10.11850/j.issn.1009-122X.2015.05.003.
- [39] 魏巍, 刘志坚, 王嵘, 等. 磁共振动态脑脊液流速测定技术在蛛网膜囊肿诊治中的应用[J]. 中华神经外科杂志, 2010, 26(8): 712-715. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-2346.2010.08.017.
- [40] 向葵, 干芸根, 赵彩蕾, 等. MR 相位对比电影成像技术在儿童颅内蛛网膜囊肿检查中的应用[J]. 广东医学, 2016, 37(9): 1314-1316. DOI: 10.13820/j.cnki.gdyx.2016.09.006.
- [41] Wang CS, Wang X, Fu CH, et al. Analysis of cerebrospinal fluid flow dynamics and morphology in Chiari I malformation with cine phase-contrast magnetic resonance imaging[J]. Acta Neurochir (Wien), 2014, 156(4): 707-713. DOI: 10.1007/s00701-013-1958-8.
- [42] Kahlon B, Annertz M, Ståhlberg F, et al. Is aqueductal stroke volume, measured with cine phase-contrast magnetic resonance imaging scans useful in predicting outcome of shunt surgery in suspected normal pressure hydrocephalus? [J]. Neurosurgery, 2007, 60(1): 124-129; discussion 129-130. DOI: 10.1227/01.NEU.0000249208.04344.A3.
- [43] Bunck AC, Kroeger JR, Juettner A, et al. Magnetic resonance 4D flow analysis of cerebrospinal fluid dynamics in Chiari I malformation with and without syringomyelia[J]. Eur Radiol, 2012, 22(9): 1860-1870. DOI: 10.1007/s00330-012-2457-7.
- [44] Clarke EC, Fletcher DF, Stoodley MA, et al. Computational fluid dynamics modelling of cerebrospinal fluid pressure in Chiari malformation and syringomyelia[J]. J Biomech, 2013, 46(11): 1801-1809. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2013.05.013.
- [45] Hayashi N, Matsumae M, Yatsushiro S, et al. Quantitative analysis of cerebrospinal fluid pressure gradients in healthy volunteers and patients with normal pressure hydrocephalus[J]. Neurol Med Chir (Tokyo), 2015, 55(8): 657-662. DOI: 10.2176/nmc.oa.2014-0339.
- [46] Hsu Y, Hettiarachchi HD, Zhu DC, et al. The frequency and magnitude of cerebrospinal fluid pulsations influence intrathecal drug distribution: key factors for interpatient variability[J]. Anesth Analg, 2012, 115(2): 386-394. DOI: 10.1213/ANE.0b013e3182536211.
- [47] Heidari Pahlavian S, Bunck AC, Thyagaraj S, et al. Accuracy of 4D flow measurement of cerebrospinal fluid dynamics in the cervical spine: an in vitro verification against numerical simulation [J]. Ann Biomed Eng, 2016, 44(11): 3202-3214. DOI: 10.1007/s10439-016-1602-x.
- [48] 高上, 孙涛, 陈鹏飞, 等. 术中 B 超监测在 Chiari I 畸形手术治疗中的应用[J]. 宁夏医科大学学报, 2016, 38(1): 18-20, 29, 117. DOI: 10.16050/j.cnki.issn1674-6309.2016.01.005.

(收稿日期: 2020-05-26; 修回日期: 2021-03-12)

## 欢迎关注《大连医科大学学报》微信公众号

《大连医科大学学报》2016 年 1 月已开通微信公众号, 定期推送本刊精选的学术论文。请在公众号中输入“大连医科大学学报”或“j\_dlmedu”搜索并关注。

《大连医科大学学报》编辑部