

新生儿颅脑磁共振检查临床实践的专家共识

中国医师协会新生儿科医师分会
中国当代儿科杂志编辑委员会

[摘要] 颅脑磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 技术的迅速发展为新生儿脑发育评估、脑损伤诊断和预后判断提供了客观依据, 临床应用日益广泛。中国医师协会新生儿科医师分会基于国内外现有研究证据, 结合临床实践经验, 为新生儿颅脑MRI的适应证和临床实践规范制定专家共识, 主要内容包括: (1) 疑似新生儿缺氧缺血性脑病、颅内感染、脑卒中, 以及原因不明惊厥者应行颅脑MRI; 颅脑MRI不纳入早产儿常规脑损伤筛查管理, 当颅脑超声筛查有明确损伤证据时应行颅脑MRI进一步评估; 对于颅脑超声未见异常的超早产儿和超低出生体重儿, 建议在纠正胎龄足月时行颅脑MRI; (2) 新生儿颅脑MRI应尽量在非镇静状态下完成; (3) 过程中需密切监测生命体征, 优化检查条件, 保障安全, 危重患儿检查需严格评估检查的必要性, 可应用磁共振兼容的转运培养箱和呼吸机; (4) 目前新生儿颅脑MRI检查可选1.5 T或3.0 T设备, 应用新生儿颅脑专用线圈以提高信噪比; 常规扫描序列选择应遵循: 至少包含轴位T1加权像、轴位T2加权像、弥散加权成像, 以及矢状位T1加权像或T2加权像; (5) 建议采用结构化或分级报告系统, 通过双人审签报告、多中心协作等方式提高报告可靠性。 [中国当代儿科杂志, 2022, 24 (1): 14-25]

[关键词] 脑损伤; 颅脑磁共振; 专家共识; 新生儿

Expert consensus on the clinical practice of neonatal brain magnetic resonance imaging

Neonatologist Society, Chinese Medical Doctor Association; Editorial Board of Chinese Journal of Contemporary Pediatrics (Shi Y, Email: petshi530@163.com)

Abstract: In recent years, magnetic resonance imaging (MRI) has been widely used in evaluating neonatal brain development, diagnosing neonatal brain injury, and predicting neurodevelopmental prognosis. Based on current research evidence and clinical experience in China and overseas, the Neonatologist Society of Chinese Medical Doctor Association has developed a consensus on the indications and standardized clinical process of neonatal brain MRI. The consensus has the following main points. (1) Brain MRI should be performed for neonates suspected of hypoxic-ischemic encephalopathy, intracranial infection, stroke and unexplained convulsions; brain MRI is not considered a routine in the management of preterm infants, but it should be performed for further evaluation when cranial ultrasound finds evidence of brain injury; as for extremely preterm or extremely low birth weight infants without abnormal ultrasound findings, it is recommended that they should undergo MRI examination at term equivalent age once. (2) Neonates should undergo MRI examination in a non-sedated state if possible. (3) During MRI examination, vital signs should be closely monitored to ensure safety; the necessity of MRI examination should be strictly evaluated for critically ill neonates, and magnetic resonance compatible incubator and ventilator can be used. (4) At present, 1.5 T or 3.0 T equipment can be used for neonatal brain MRI examination, and the special coil for the neonatal head should be used to improve signal-to-noise ratio; routine neonatal brain MRI sequences should at least include axial T1 weighted

[收稿日期] 2021-10-08; [接受日期] 2021-12-09

[基金项目] 国家重点研发计划“公共安全风险防控与应急技术装备”重点专项(2019YFC0840700); 中央引导地方科技发展基金专项“不同海拔地区围产新生儿早期发育与主要疾病的多中心创新平台”(2019-2020)。

[通信作者] 史源, 男, 主任医师, 教授, 重庆医科大学附属儿童医院新生儿科/国家儿童健康与疾病临床医学研究中心/儿童发育疾病研究教育部重点实验室/儿科学重庆市重点实验室, Email: petshi530@163.com; 蔡金华, 男, 主任医师, 教授, 重庆医科大学附属儿童医院放射科, Email: caijinhua@hospital.cqmu.edu.cn; 毛健, 男, 主任医师, 教授, 中国医科大学盛京医院儿科, Email: maoj@sj-hospital.org; 封志纯, 男, 主任医师, 教授, 解放军总医院儿科医学部, Email: zhjfengzc@126.com。

image (T1WI), axial T2 weighted imaging (T2WI), diffusion-weighted imaging, and sagittal T1WI or T2WI. (5) It is recommended to use a structured and graded reporting system, and reports by at least two reviewers and multi-center collaboration are recommended to increase the reliability of the report.

[Chinese Journal of Contemporary Pediatrics, 2022, 24(1): 14-25]

Key words: Brain injury; Brain magnetic resonance imaging; Expert consensus; Neonate

新生儿重症监护救治技术的进步使得越来越多危重新生儿得以存活,但脑损伤发生率却未显著降低,约40%胎龄<28周的早产儿在后期存在不同程度的认知、运动等问题^[1-3]。新生儿期脑发育迅速,各种有害因素对处于发育中脑的损伤模式复杂,临床亟需对脑损伤类型和损伤后脑发育进行精细客观评估的方法。近二十年来,磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)技术发展迅速, MRI无电离辐射,对脑组织分辨率佳,并可获得多参数信息,基于新序列还能进行功能和生化代谢分析,为新生儿脑发育评估和脑损伤诊断提供了客观信息,应用日益广泛。然而,新生儿颅脑MRI检查的适应证尚有争议,且因新生儿自身的特点,完成检查和结果报告均存在巨大挑战^[4-5]。中国医师协会新生儿科医师分会基于国内外现有研究证据,结合临床实践经验,为新生儿颅脑MRI检查的适应证、检查时机选择、检查和报告流程规范制定了本共识,检查结果的判读仅略涉及,不作为本共识重点。本共识主要目标人群为新生儿科医生、儿科医生和影像科医生。

1 新生儿颅脑MRI检查的适应证和检查时机

1.1 新生儿缺氧缺血性脑病

新生儿缺氧缺血性脑病(hypoxic-ischemic encephalopathy, HIE)系由围生期急性缺氧所致,可出现意识状态改变、惊厥、喂养困难、中枢性呼吸衰竭、肌张力和反射异常等神经功能障碍表现^[6-7]。

颅脑超声可进行床旁连续观察,提供脑影像和血流动力学信息,但对新生儿HIE诊断敏感性有限;颅脑CT存在射线暴露风险,仅用于有明确产伤史、有贫血或凝血功能障碍的患儿以明确有无颅内出血。颅脑MRI是目前HIE首选影像检查,其中,T1加权成像(T1 weighted imaging, T1WI)、T2加权成像(T2 weighted imaging, T2WI)、弥散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)和磁共振波谱分析(magnetic resonance spectroscopy,

MRS)是目前HIE最常用的检查序列^[8-11]。早期DWI可见丘脑和基底节表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)值减低,氢质子MRS可见乳酸/N-乙酰天冬氨酸的比值增高且持续,常提示预后不良^[12-14]。

由于脑缺氧缺血损伤2周内磁共振(magnetic resonance, MR)影像随时间呈特定变化模式,合理选择检查时机尤为重要。缺氧缺血损伤后伴随二次能量衰竭(energy failure),生后24~72 h脑组织细胞毒性水肿达高峰,此时水分子弥散受限最严重,故生后2~4 d DWI有助于早期发现病变^[15]。疾病初期T1WI、T2WI改变可能不明显,应用价值有限,生后第8~14 d检查结果更为可靠^[10-16]。美国妇产科学会和美国儿科学会(American Academy of Pediatrics, AAP)建议:在生后24~96 h进行早期颅脑MRI检查,生后10 d(时间窗7~21 d)复查。应注意,亚低温治疗可减轻T1WI和T2WI中灰白质异常比例,基底节丘脑区和内囊后肢影像异常对后期神经发育异常预测价值最高^[17]。

专家共识一:HIE患儿首选颅脑MRI检查。早期颅脑MRI检查应在亚低温治疗结束、稳定状态下即可,一般在生后2~4 d,关注DWI和MRS序列;晚期颅脑MRI检查在生后8~14 d,关注T1WI、T2WI序列,晚期检查对预后判断价值较大。

1.2 颅内感染

新生儿颅内感染临床表现常不典型,早期诊断困难。新生儿颅内感染常累及脑实质(脑膜脑炎),组织病理改变表现多样,脑脊液病原检出率均较低,且脑脊液改变往往与脑实质受累程度不平行^[18]。颅脑MRI检查可评估脑水肿的范围和程度,可明确有无脑沟积脓、脑室管膜炎、脑炎、硬脑膜下积液、脑脓肿、脑囊肿、脑积水等并发症,也可随访疗效,对婴儿颅内感染的早期诊断和预后评估起着重要作用^[19-20]。国内外研究团队回顾性分析结果显示大部分化脓性脑膜炎患儿早期颅脑MR影像即可发现异常,且不同病原所致化脓性脑膜炎表现出不同的影像学特征和并发症模式^[21-22]。对脑电监测有明显单侧电活动异常和背景异常的患儿,应警惕并发脑卒中^[23]。

新生儿细菌性脑膜炎最常见病原为B型溶血链球菌和大肠埃希菌，B型溶血链球菌脑膜炎更常出现脑梗死等血管源性并发症，而大肠埃希菌脑膜炎更常并发脑室管膜炎且早期出现脑积水^[24]。新生儿中枢神经系统真菌感染易并发脑脓肿，早期DWI检查有助于发现病变，对比剂增强MRI可见环形强化^[25]。病毒引起的新生儿颅内感染最常见病理改变是脑膜脑炎，受累部位早期在DWI上即有弥散受限改变^[26-28]，肠道病毒和人副肠孤病毒易累及脑白质^[27, 29-30]，单纯疱疹病毒脑炎常导致严重的脑组织出血性坏死、水肿^[26-31]，先天性巨细胞病毒感染常见脑室周围钙化、多囊性脑软化、脑积水和脑发育落后等。综上，不同病原引起的颅内感染呈现不同的MR影像表现形式，识别不同MR影像有助于疾病和病原诊断，客观评估受累部位和严重程度有助于预后判断。

专家共识二：考虑颅内感染的新生儿，尤其是存在明显脑病表现或脑电监测有明显单侧性电活动异常和背景异常的患儿，应尽早进行颅脑MRI检查，检查序列应包括T1WI、T2WI和DWI，必要时加做增强颅脑MRI以辅助脑脓肿的诊断和鉴别，如疑并发静脉血栓可加做磁共振静脉血管成像(magnetic resonance venography, MRV)，疑有出血灶可加做磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)。

1.3 新生儿脑卒中

成人脑卒中定义是由局灶性脑梗死或出血引起的急性神经系统症状体征，而新生儿期表现常不典型^[32]。新生儿动脉缺血性卒中(neonatal arterial ischemic stroke, NAIS)是其中最主要的病理类型^[33]，系因脑动脉分支发生栓塞导致供血区域缺血坏死，在足月或近足月儿中发生率约1/5 000^[34]，在早产儿中发生率更高^[35]。近年来随着MRI技术的进步，发现大脑静脉窦血栓形成(cerebral sinovenous thrombosis, CSVT)在新生儿脑卒中里也占有相当比例^[36-37]。新生儿脑卒中的危险因素包括：感染和炎症、遗传性凝血功能异常或血管源性疾病、围生期窒息、先天性心脏病，以及母体妊娠期并发症导致母体和胎盘高凝状态等^[32]。因新生儿脑卒中发病隐匿，临床表现无特异性，诊断难度大。2019年美国心脏协会和卒中协会联合提出的新生儿脑卒中管理建议^[32]指出：对新生儿进行血栓形成倾向的评估试验临床意义有限，且可能造成误导，目前颅脑MRI是诊断新

生儿脑卒中最可靠的方法。

NAIS发生后数小时DWI上即可见缺血区域呈高信号，表观弥散系数值明显减低，在病后2~4 d改变最为显著；常规T1WI、T2WI改变较DWI晚，病后1~3 d后逐渐出现异常信号，T1WI先呈低信号，1周后变为高信号，T2WI呈高信号，1周后渐减弱^[38]。磁共振血管成像(magnetic resonance angiography, MRA)无需使用对比剂，能直接显示动脉狭窄和梗塞，是成人脑卒中溶栓前重要检查手段，然而对NAIS诊断敏感性有限^[39]，若发现异常往往提示预后不良^[40]。MRA对NAIS诊断低敏感性可能与新生儿脑动脉相对纤细、血流缓慢有关，且梗塞动脉可能早期发生自动清除^[40]，故MRA是否常规用于NAIS仍有待商榷。此外，动脉自旋标记(arterial spin labeling, ASL)等灌注成像方式近年也有被用于新生儿脑卒中诊断，但不同于成人常见的缺血区呈低灌注，新生儿中可能呈高灌注或低灌注，考虑与卒中后再灌注或惊厥相关的神经营养有关^[41-42]。

SWI和MRV是目前诊断新生儿CSVT的常用序列。发生CSVT后，静脉瘀滞血液中顺磁性的脱氧血红蛋白含量增高，使得SWI呈低信号改变，SWI对新生儿CSVT诊断敏感性良好，但非血栓性淤血可能导致假阳性结果。多种MRV技术也被应用于诊断CSVT，其中最常用的是二维时间飞跃法MRV，其无需对比剂，可显示血流动力学改变，但难以鉴别血栓和缓慢的血流或涡流^[36-43]。因此，实践中需多序列联合以提高对新生儿CSVT诊断的准确性。

专家共识三：颅脑MRI检查有助于新生儿脑卒中早期诊断，明确病变累及范围，疑似新生儿脑卒中的患儿均应行颅脑MRI检查，常规包括T1WI、T2WI和DWI，依据病理性质选择加做MRA、MRV、SWI或ASL，检查时机在起病后2~4 d为佳。

1.4 新生儿惊厥

国际抗癫痫联盟最新的新生儿惊厥分类建议强调了脑电生理检查在新生儿惊厥诊断中的重要价值，该建议将新生儿惊厥分为临床电发作(有临床表现伴脑电图异常)和单纯性电发作(仅有脑电图异常)^[44]。新生儿惊厥病因众多，大多为急性诱发性发作，其中最常见的是HIE，其次是脑梗死和颅内出血，此外颅内感染、脑皮质发育异常、代谢异常或遗传性疾病等也较常见^[44-45]，病因不

同患儿预后相差很大^[46]。颅脑MRI对惊厥的病因诊断具有重要意义^[45]，且对神经系统预后具有重要预测价值^[47]，故国际抗癫痫联盟建议所有原因不明惊厥新生儿均应行颅脑MRI检查^[48]。

我们建议：在检查序列选择上，除了常规T1WI、T2WI序列，对疑似脑血管问题的惊厥患儿可加做MRA、MRV，出血性病灶可加做SWI，对于怀疑遗传代谢病的患儿可加做MRS。在检查时机选择上：对原因不明惊厥患儿，为尽早明确诊断，首次MRI检查应在病情允许下早做，后期根据不同疾病特点制定复查计划。

专家共识四：原因不明惊厥者均应行颅脑MRI检查，除常规T1WI、T2WI序列，可视疑似主要问题加做MRA、MRV、SWI、MRS等；为尽早明确诊断，首次颅脑MRI检查应在病情允许下早做，后期根据不同疾病特点制定复查计划。

1.5 早产儿

脑发育是一个复杂的动态过程，早产儿脑生后仍在迅速发育^[49]，脑损伤的发生导致后续脑发育进一步偏离正常轨迹。早产儿神经影像监测不仅应关注脑损伤病灶，还必须全面评估脑发育成熟度。生后连续颅脑超声检查是早产儿标准化管理中的一部分^[50]，能发现较严重的生发基质-脑室内出血、脑室周围出血性梗死、囊性脑室周围白质软化等；但针对发生率更高的点状白质病变、小脑点状出血等，颅脑超声敏感性不足，且无法对髓鞘化程度等发育成熟度指标进行准确评估，亦无法准确鉴别复杂损伤与畸形^[51-52]。颅脑MRI能提供更详细结构信息，对内囊、小脑等显示清晰，弥补了颅脑超声上述局限性，联合多序列可对早产儿脑损伤和脑发育情况进行全面评价^[52]。在脑发育结局预测效能方面，超声对于早产儿脑性瘫痪预测特异性良好，超声未见显著异常（如3~4级脑室内出血、囊性脑室周围白质软化或局灶性梗死）患儿后期一般无脑性瘫痪^[50]；但超声对脑性瘫痪预测的敏感性仅18%~67%；与之相比，纠正胎龄足月（term equivalent age, TEA）时颅脑MRI检查对脑瘫预测敏感性为60%~92%^[53-55]。MRI常规序列对认知发育结局预测的特异性不高但阴性预测值良好，TEA时MR影像显示严重病变的患儿仅43.8%在5岁时的认知行为评分低于正常，颅脑MRI正常患儿在5岁时92%认知发育正常^[56]。

TEA是早产儿颅脑MRI检查的最佳时间，可评估大脑成熟度和内囊后肢髓鞘形成情况^[51-57]，

也有学者提出可额外在纠正胎龄32周时行1次颅脑MRI有助于更好描绘脑发育轨迹，但此期患儿检查风险更高，临床实践困难^[52]。除了常规T1WI、T2WI，基于弥散张量成像（diffusion tensor imaging, DTI）的各向异性分数指标与髓鞘化程度直接相关，TEA时各向异性分数值与神经系统预后相关性良好，近年来也有越来越多应用^[58-59]；SWI对陈旧性出血灶识别具有优势，也常选用^[60]。

虽然一些医疗中心将颅脑MRI纳入早产儿的常规管理^[54, 61-62]，但目前尚无证据显示在连续颅脑超声基础上颅脑MRI能进一步提高对预后的预测效能。AAP最新更新的关于早产儿脑影像检查的共识不推荐将颅脑MRI纳入早期早产儿脑损伤常规筛查项目，但对于胎龄小于30周的早产儿，可在TEA时在与患儿家属充分沟通后行1次颅脑MRI平扫评估脑发育和脑损伤情况^[63]。然而，Inder等^[52]认为AAP的共识存在局限性，其可能导致一些轻度脑损伤被遗漏，使这部分患儿失去获得神经发育干预的机会；并且，早产儿脑发育轨迹的描述和脑损伤现状的改善也有赖于系统的神经影像研究。

目前，早产儿早期监测应以床旁连续颅脑超声为主，当颅脑超声筛查有明确脑损伤证据时在合适时间行颅脑MRI进一步明确病理损伤性质、评估损伤程度、判定发育状态。对于颅脑超声筛查未见异常的超早产儿（胎龄<28周）和超低出生体重儿（出生体重<1000g）在TEA时行1次颅脑MRI平扫，进行脑发育和脑损伤的精细评估。

专家共识五：不推荐将颅脑MRI纳入早产儿常规的脑损伤筛查管理，当颅脑超声筛查有明确损伤证据时应在合适时间行颅脑MRI进一步明确病理损伤性质、评估损伤程度、判定发育状态；对于颅脑超声筛查未见异常的超早产儿（胎龄<28周）和超低出生体重儿（出生体重<1000g）建议在TEA时行1次颅脑MRI平扫，进行脑发育和脑损伤的精细评估，检查序列建议包括T1WI、T2WI、SWI，可选做DTI。

1.6 先天性心脏病、有体外膜肺氧合或连续性血液净化治疗的新生儿

先天性心脏病是新生儿期最常见的先天性发育异常，复杂型先天性心脏病患儿后期常存在神经发育落后^[64-65]。部分患儿在先天性心脏病术前的颅脑MRI即见脑白质发育不成熟，部分患儿术后出现新发脑白质损伤^[66]。国外研究结果显示围

术前颅脑MRI检查能很好预测复杂型先天性心脏病患儿神经系统预后^[67]，值得注意的是，颅脑MRI所示脑成熟程度对神经发育结局的预测效能优于脑结构损伤情况^[66]。目前，关于先天性心脏病患儿是否需常规行颅脑MRI评估尚有争议，美国心脏协会建议：先心病患儿需注意随访神经发育情况，如果存在异常的神经系统症状体征或者颅脑超声发现脑损伤证据（脑实质出血、颅内出血等）的患儿建议进一步进行颅脑MRI评估^[68]。

体外膜肺氧合（extra-corporeal membrane oxygenation, ECMO）是治疗新生儿严重可逆性呼吸/心脏疾病的最后手段。新生儿由于脑发育尚不成熟，接受ECMO治疗的新生儿神经系统并发症发生率较高，4%出现缺血性脑损伤，13%出现颅内出血^[69]，随访至青少年期，这部分患儿出现语言、视觉空间和工作记忆问题的风险也显著增加^[70]。对有ECMO治疗史的新生儿，颅脑MRI能发现颅脑超声遗漏的出血和梗死^[71]。

近年来，连续性血液净化（continuous blood purification, CBP）已成为新生儿急性肾损伤的重要治疗手段。由于CBP治疗时间较长，肝素等抗凝剂应用总量较大，故易发生颅内出血而出现神经系统后遗症。虽然MRI与ECMO和CBP设备不兼容，但是颅脑MRI可用于撤机后随访^[72]。

专家共识六：罹患复杂型先天性心脏病、有ECMO或CBP治疗史的新生儿有很高的脑损伤风险，建议将颅脑MRI用于其神经发育随访。首次颅脑MRI建议在治疗结束病情稳定后，此后根据首次颅脑MRI结果结合神经发育随访情况决定复查时间。

1.7 其他脑损伤高危儿

对于严重高胆红素血症的患儿，尤其是胆红素水平超过换血标准以上时^[73]，应进行颅脑MRI检查以评估预后。急性胆红素脑病患儿早期（1~3周内）在T1WI上双侧苍白球呈高信号，DWI呈等信号或稍高信号。慢性胆红素脑病，即核黄疸期在T2WI上双侧苍白球呈对称性高信号。若急性期T1WI上呈高信号而对应区域数月后未见T2WI上高信号，常提示预后良好，反之提示预后不良^[74]。

新生儿低血糖也是新生儿中较常见的生化代谢异常，大多为一过性，低血糖使得脑组织失去基本能量来源，有症状的低血糖新生儿后期有很大概率出现神经系统后遗症^[75]，若合并缺氧缺血则损伤更重^[76]。早期颅脑MRI检查比低血糖的严

重程度和持续时间对神经系统预后更有判断价值^[77]，并且，对于反复严重低血糖患儿，颅脑MRI对于垂体柄阻断综合征等疾病具有病因诊断价值^[78]。对于严重低血糖患儿，尤其是出现神经系统症状的低血糖患儿有必要进行颅脑MRI检查。新生儿低血糖脑损伤的易损区是顶枕叶皮质，严重者可累及弥漫性皮质、白质和基底节丘脑区，急性期（3~7 d内）因细胞毒性水肿，在DWI上呈高信号，T1WI呈低信号，T2WI上呈高信号，MRS见病变区域乳酸、脂肪酸峰升高而N-乙酰天冬氨酸峰降低；慢性期颅脑MRI平扫见病变处呈脑萎缩^[79]。

当颅脑超声提示室管膜下囊肿，因绝大多数小囊肿在生后数月自行吸收，故随访即可。首次复查可在1月龄回访时，此后根据复查情况制定后续随访计划。当颅脑超声发现双侧多发性或持续存在6~12个月或有增大趋势的室管膜下囊肿，需行颅脑MRI检查，有助于与其他疾病鉴别。

总之，MRI分辨率高，多种序列能提供丰富的脑结构和功能信息，对于脑损伤高危儿的监测和脑发育评价都有着重要价值，随着技术进步，其在临床适用范围将越来越广泛。

2 新生儿颅脑MRI检查准备和安全管理

2.1 患儿检查前准备（保温、降噪、体位固定和镇静）

由于MRI检查耗时较长，且设备需置于较低环境温度中，新生儿尤其是早产儿的保温尤为重要^[80]。由于MRI检查会产生巨大噪声，可能损害新生儿听力和惊醒患儿，应尽可能采取降噪措施，目前常用的降噪方法为使用耳塞、棉球、耳罩，但降噪效果有限^[80]。颅脑MRI检查需被检者长时间头部保持不动，而新生儿无法主动配合检查，如何控制其头动在一定范围内而获得合格图像也是新生儿MRI检查实践中的重要议题。

目前，许多医疗中心选择在口服10%水合氯醛（25~75 mg/kg）或肌肉注射苯巴比妥钠注射液（5 mg/kg）镇静状态下完成新生儿颅脑MRI检查。水合氯醛作用时间较长，适于MRI这种耗时较长的检查，但镇静深度和时间不易控制^[81]。苯巴比妥常通过静脉或肌肉注射有创给药，也存在镇静深度不易控制的问题。对于新生儿，尤其是早产儿，呼吸中枢发育尚不成熟，镇静可能增加呼吸

暂停的风险,3岁以下儿童的麻醉剂和镇静剂使用还可能存在潜在的神经毒性^[82]。对于需要行颅脑MRI检查的患儿来说,虽然检查益处大于镇静风险,仍应尽可能寻找替代方法,减少镇静剂的使用。国内外现有研究证据表明:大部分新生儿通过充分喂奶、安抚、耳塞耳罩降噪、真空固定器固定、隔音罩等方式联合可在自然睡眠下完成检查^[83-85]。对于个别患儿,尝试了非镇静状态下难以完成检查而需镇静时,镇静前需要禁食,加强气道评估。一些医疗中心尝试使用七氟烷吸入(诱导浓度:7%~8%,维持浓度:1.5%~2%)进行中深度镇静,该方法的镇静深度易控制,苏醒较快,且七氟烷代谢彻底因而并发症少^[86-87]。盐酸右美托咪定与七氟烷有良好协同性,联合应用能减低七氟烷用量^[88-89],故有医疗中心采用盐酸右美托咪定滴鼻(1.0~2.0 μg/kg)诱导睡眠,检查过程中七氟烷吸入(浓度:0.4%~2%)维持镇静深度,效果良好。但此种镇静方式需要影像检查室配备专门的镇静麻醉中心,由麻醉科专科医师进行操作。

参考国外婴幼儿MRI扫描准备程序^[90],在新生儿充分喂奶后,待其自然入睡,内层用棉被包裹,外层用真空固定器包裹,包裹松紧程度以不增加呼吸阻力且一定程度限制四肢活动为宜,平躺放入设置好的转运暖箱中,放置降噪耳罩、罩好双耳,进一步转运至MR室进行扫描。检查过程中尽量不使用镇静剂,必须使用时,应禁食,加强气道评估,镇静剂的选用视各医疗中心经验选定,如需要静脉给药应在检查前准备好静脉通道。

专家共识七:新生儿颅脑MRI检查应尽量通过充分喂奶、安抚、耳罩降噪、真空固定器固定等方式联合使其在自然睡眠下完成检查,尽可能减少镇静剂的使用;对于个别患儿,尝试了非镇静状态下难以完成检查而需镇静时,需禁食,加强气道评估,应尽可能选用呼吸抑制小、代谢彻底、深度可控的镇静剂,具体视患儿病情、检查需求、各医疗中心经验选定。

2.2 检查过程中安全监测和危重病人安全管理

因MR检查室内有强磁场,MR检查绝对禁忌证为患儿携带心脏起搏器、金属支架等铁磁性物质,检查前必须严格与家长及患儿主管医生确认患儿无绝对禁忌证,且所有铁磁性设备、仪器或其他物品均不能带入MR室。MR检查的相对禁忌证为病情危重或有镇静禁忌证的新生儿,例如有

呼吸暂停、惊厥发作、严重的肝肾疾病和肌肉疾病等。随着MR兼容的呼吸支持等技术的进步,相对禁忌证可放宽。

对于检查过程中的安全监测,我们参考AAP儿童检查镇静指南^[91]提出以下建议:患儿需连接好磁共振兼容的血氧、心电监护仪,保证其在检查过程中正常工作,各监测设备的导丝应避免缠绕,各探头放置应尽可能远离磁共振线圈以避免热损伤,扫描过程中,至少1名儿科医生或麻醉科医生严密观察患儿情况,早产儿和危重患儿检查需至少有富有经验的1名医生和1名护士共同陪同完成。若遇婴儿哭闹、呕吐、呼吸暂停等意外情况,立即终止扫描,并进行相应处理。镇静患儿检查完成后应转至观察室内密切观察,观察室需配置供氧设备,持续监测患儿生命体征,直至患儿完全苏醒后方可转运回新生儿病房。

早产儿因呼吸中枢发育不成熟,镇静药物的呼吸抑制效应可能增加检查风险^[92],应尽量非镇静状态完成检查,若使用镇静剂应延长检查后观察时间。早产和其他危重患儿检查前需严格评估检查必要性,且准备好常用抢救药物和抢救器材。目前新生儿颅脑MRI检查可依托磁共振兼容的转运培养箱,其内置新生儿专用线圈,可通过该箱转运后在箱内完成检查。该培养箱提供了一个温度、湿度适宜的相对稳定的检查环境,并一定程度减低噪声,研究示其可缩短检查时间,减少镇静剂使用;这为病情尚不稳定的新生儿进行MRI检查提供了可能^[93-95]。对于需要呼吸支持的危重患儿,需连接好磁共振兼容的呼吸机,全程密切监测患儿通气、换气情况和生命体征,以保障患儿安全。

专家共识八:新生儿颅脑MRI检查过程需密切监测生命体征,优化检查条件,保障安全,危重患儿检查需严格评估检查必要性,可应用磁共振兼容的转运培养箱,呼吸功能尚不稳定且必须检查时需要呼吸支持可应用磁共振兼容呼吸机。

3 新生儿颅脑MRI检查设备选择和扫描参数设置

现临床常用MR设备的磁场强度为1.5 T或3.0 T。其中,场强较高的3.0 T MR设备在信噪比、空间分辨率、波谱分辨率等方面都优于1.5 T,而且可以进行某些1.5 T设备上无法进行的成像^[96]。

然而, 3.0 T设备更容易产生伪影, 并伴随着更高的射频辐射, 但研究显示其并未引起被检新生儿体温升高, 证明这种热效应累积在安全范围内^[97]。因新生儿脑体积远小于成人, 故在数据采集时, 需使用新生儿专用线圈以提高信噪比^[98]。临床实践中应根据检查目的和医疗机构条件选择适宜设备。随着技术的进步, 未来可能开展床旁新生儿颅脑MRI检查。

孕晚期和生后前2年是脑灰质和白质体积增加最迅速的时期, 这期间皮质表面积也呈指数级增长, 皮质折叠使得脑大体形态结构逐渐复杂化^[99]。脑发育伴随着脑组织含水量的减少, 随着髓鞘化进程, 脑组织信号强度在发育过程中逐渐变化。新生儿时期仅部分脑区如小脑中央区、脑干背侧、内囊后肢及中央沟附近开始出现髓鞘化, 表现为T1WI高信号/T2WI低信号, 而其他大部分脑白质尚未出现髓鞘化, 因含水量较多而表现为T1WI低信号/T2WI高信号, 之后脑白质髓鞘化的区域会逐渐扩展, 至1.5~2岁时, 脑灰白质信号对比基本接近成人^[100]。T1WI上这种脑发育过程中不同脑区所呈现的髓鞘化异步性, 导致脑部MRI信号的不均匀性。因此, 临床实践中需结合不同场强、检查目的和新生儿脑发育特点, 对采集序列的参数进行调整以适应该阶段新生儿脑组织对比特征。

与其他成像方法相比, MRI具有多平面(主要是轴位、矢状位和冠状位)、多序列成像的特点, 不同序列组合方案决定了MRI检查的诊断效能^[101]。由于不同厂家来源的MR设备序列名称和预置参数不同, 且设备和序列都在快速更迭, 同一序列在不同型号设备上参数亦不同, 罗列起来非常复杂, 也不具实用性, 故本共识未提供具体参数, 仅阐明参数设置的原则。

我们建议: 新生儿成像方案的选择应结合新生儿脑部发育特点, 根据新生儿疾病诊断的需要, 并充分利用MRI多平面、多组织对比的优势, 常规应至少包含轴位T1WI、轴位T2WI、DWI、矢状位T1WI或T2WI 4个序列, T1WI可采用3D容积扫描, DWI采用回波平面成像, 梯度磁场从X、Y、Z轴3个方向施加, 弥散敏感因子b值一般在800~1 200 s/mm², 高b值可能有助于一些肿瘤的鉴别诊断。除上述常规序列外, 还可根据不同疾病诊断的需要, 选择性地应用SWI、ASL、DTI和MRS等序列。具体扫描参数的设置需根据不同厂家、不同型号的机器, 由设备工程师、放射科医师与技

师、新生儿科医师共同制定。此外, 因增强对比剂存在潜在肾毒性, 除非必要(如化脓性脑膜炎或肿瘤诊断及评估), 新生儿原则上不做对比剂增强MRI检查。

专家共识九: 目前新生儿颅脑MRI检查可选择1.5 T或3.0 T设备, 需使用新生儿头颅专用线圈以提高信噪比。常规扫描序列的选择应遵循的原则是: 至少包含轴位T1WI、轴位T2WI、DWI、矢状位T1WI或T2WI 4个序列, T1WI可采用3D容积扫描, 根据不同疾病诊断的需要, 可选择性地应用SWI、ASL、DTI和MRS等序列, 具体扫描参数根据不同设备、新生儿脑发育特点和疾病诊断需要而定; 新生儿原则上不做对比剂增强MRI检查。

4 颅脑MRI结果的分析和报告

围生期和生后的病史对于新生儿颅脑MRI报告的解读至关重要。为了使MR影像尽可能提供有用的辅助诊断信息, 临床医师需在检查申请表中提供以下信息给影像科医师: 胎龄、目前日龄、校正胎龄、起病时间、临床主要表现特征、重要辅助检查结果(包括颅脑超声主要发现等)、临床团队考虑的鉴别诊断。影像医师与临床医师应密切沟通。

考虑到新生儿MR图像信号和对比度不同于成人, 应使用专门的工具进行图像后处理^[5]。影像科医师应在高质量的成像显示器上详细检查图像, 特别详细说明可能具有诊断和预后判断价值的特征(例如获得性实质性病变的位置、与特定中枢神经系统畸形一致的特征、先天性感染或神经代谢紊乱相关特征、提示预后不良的损伤模式等), 可考虑使用结构化或分级报告系统, 以确保不遗漏重要信息。报告基本内容应包括: 基本扫描条件(扫描设备、序列、是否应用对比剂等)和患儿一般信息; 病变位置和信号特征的描述; 脑发育成熟度评估(包括髓鞘化、脑回结构等); 诊断建议。建议由至少2名影像科医师共同阅片并提供协商一致的报告, 双人审签报告不仅可提高报告正确率, 也有助于增加相关人员的经验^[102]。如果医疗中心缺乏具备适当专业知识的影像科医师, 可通过跨区域联网, 请富有经验的第三方医疗单位出具报告, 第三方医疗单位需对图像采集技术提供指导和建议。

专家共识十: 影像科医师应注意与临床医师

密切沟通,了解病史,采用结构化或分级报告系统,详细说明可能具有诊断和预后判断价值的特征,通过双人审签报告、多中心协作等方式提高报告可靠性。

5 结语

新生儿颅脑MRI对于新生儿神经系统疾病的诊断和预后预测具有重要意义,但由于新生儿本身的特点,检查的安全完成和结果报告均具有挑战性,整个过程需要有经验的专业团队密切协作,严格评估检查适应证,权衡利弊,优化检查环境和检查参数,提高诊断效能。应用于新生儿病房内的小型颅脑MRI设备近年也有报道,其应用规范和诊断效能有待研究^[103]。本共识的制定以当前国内外颅脑MRI在新生儿中应用经验为基础,期待在未来临床实践中进一步更新和完善。

执笔者:马雪玲(重庆医科大学附属儿童医院新生儿科);史源(重庆医科大学附属儿童医院新生儿科);蔡金华(重庆医科大学附属儿童医院放射科);毛健(中国医科大学盛京医院儿科);封志纯(解放军总医院儿科医学部)。

编写专家委员会(排名不分先后):解放军总医院儿科医学部(封志纯、李秋平、黄柳明);北京大学第三医院(童笑梅);北京朝阳区妇幼保健院(刘敬);中国医科大学盛京医院(毛健);复旦大学附属儿科医院(陈超、周文浩);浙江大学医学院附属儿童医院(俞惠民);广东省人民医院(何少茹);四川大学华西第二医院(母得志、唐军);西安交通大学第一附属医院(刘俐);首都儿科研究所附属儿童医院(李莉);解放军总医院第五医学中心(张雪峰);中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院(李正红);首都医科大学附属北京儿童医院(黑明燕);天津市中心妇产科医院(郑军);解放军联勤保障部队第九八〇医院(刘芳);山西省儿童医院(刘克战);内蒙古医科大学附属医院(梅花);吉林大学第一医院(严超英);哈尔滨医科大学附属第一医院(王竹颖);上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心(孙建华);上海交通大学医学院附属新华医院(何振娟);上海市儿童医院上海交通大学附属儿童医院(裘刚);南京医科大学附属儿童医院(周晓玉);南京医科大学附属妇产医院南京市妇幼保健院(韩树萍);温州医科大学附属第二医院/育英儿童

医院(林振浪);福建省厦门市妇幼保健院(林新祝);山东大学齐鲁医院(卢究梅);济南市儿童医院(李晓莺);郑州大学第一附属医院(程秀永);湖北省妇幼保健院(夏世文);武汉儿童医院(刘汉楚);中南大学湘雅医院(岳少杰);湖南省儿童医院(高喜容);南方医科大学珠江医院(王斌);暨南大学附属第一医院(宋元宗);广州市妇女儿童医疗中心(周伟);广东省妇幼保健院(杨杰);中山大学附属第八医院(付雪梅);南方医科大学深圳市妇幼保健院(杨传忠);重庆医科大学附属儿童医院(史源、蔡金华、徐颖、张先红、马雪玲);成都市妇女儿童中心医院(巨容);贵阳市妇幼保健院(刘玲);昆明医科大学附属儿童医院(李杨方);西北妇女儿童医院(李占魁);甘肃省妇幼保健院(易彬);银川市第一人民医院(陈彦香);新疆医科大学第一附属医院(李明霞);杨于嘉(中国当代儿科杂志编辑委员会)

利益冲突声明:所有作者声明不存在利益冲突。

[参 考 文 献]

- [1] 新生儿神经重症监护单元建设专家共识工作组,中华医学会儿科学分会新生儿学组.新生儿神经重症监护单元建设专家共识[J].中国循证儿科杂志,2018,13(4):241-247. DOI:10.3969/j.issn.1673-5501.2018.04.001.
- [2] Younge N, Goldstein RF, Bann CM, et al. Survival and neurodevelopmental outcomes among periviable infants[J]. N Engl J Med, 2017, 376(7): 617-628. PMID: 28199816. PMCID: PMC5456289. DOI: 10.1056/NEJMoa1605566.
- [3] Jarjour IT. Neurodevelopmental outcome after extreme prematurity: a review of the literature[J]. Pediatr Neurol, 2015, 52(2): 143-152. PMID: 25497122. DOI: 10.1016/j.pediatrneurol.2014.10.027.
- [4] O'Muircheartaigh J, Robinson EC, Pietsch M, et al. Modelling brain development to detect white matter injury in term and preterm born neonates[J]. Brain, 2020, 143(2): 467-479. PMID: 31942938. PMCID: PMC7009541. DOI: 10.1093/brain/awz412.
- [5] Barkovich MJ, Li Y, Desikan RS, et al. Challenges in pediatric neuroimaging[J]. Neuroimage, 2019, 185: 793-801. PMID: 29684645. PMCID: PMC6197938. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2018.04.044.
- [6] The American College of Obstetricians and Gynecologists Women's Health Care Physicians. Executive summary: neonatal encephalopathy and neurologic outcome, second edition. Report of the American College of Obstetricians and Gynecologists' Task Force on Neonatal Encephalopathy[J]. Obstet Gynecol, 2014, 123(4): 896-901. PMID: 24785633.

- DOI: 10.1097/01.AOG.0000445580.65983.d2.
- [7] Douglas-Escobar M, Weiss MD. Hypoxic-ischemic encephalopathy: a review for the clinician[J]. *JAMA Pediatr*, 2015, 169(4): 397-403. PMID: 25685948. DOI: 10.1001/jamapediatrics.2014.3269.
- [8] 中国医师协会新生儿科医师分会. 新生儿缺氧缺血性脑病磁共振诊断与损伤类型的分类建议[J]. *中国当代儿科杂志*, 2017, 19(12): 1225-1233. PMID: 29237520. PMCID: PMC7389802. DOI: 10.7499/j.issn.1008-8830.2017.12.001.
- [9] Ment LR, Bada HS, Barnes P, et al. Practice parameter: neuroimaging of the neonate: report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology and the Practice Committee of the Child Neurology Society[J]. *Neurology*, 2002, 58(12): 1726-1738. PMID: 12084869. DOI: 10.1212/wnl.58.12.1726.
- [10] Barkovich AJ, Miller SP, Bartha A, et al. MR imaging, MR spectroscopy, and diffusion tensor imaging of sequential studies in neonates with encephalopathy[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2006, 27(3): 533-547. PMID: 16551990. PMCID: PMC7976955.
- [11] 尤嘉, 刘俐, 张明, 等. T₁WI信号强度与¹H MRS在新生儿缺氧缺血性脑病诊断中的价值[J]. *中国当代儿科杂志*, 2011, 13(2): 107-110. PMID: 21342617.
- [12] Groenendaal F, de Vries LS. Fifty years of brain imaging in neonatal encephalopathy following perinatal asphyxia[J]. *Pediatr Res*, 2017, 81(1-2): 150-155. PMID: 27673422. DOI: 10.1038/pr.2016.195.
- [13] Oz G, Alger JR, Barker PB, et al. Clinical proton MR spectroscopy in central nervous system disorders[J]. *Radiology*, 2014, 270(3): 658-679. PMID: 24568703. PMCID: PMC4263653. DOI: 10.1148/radiol.13130531.
- [14] Alderliesten T, de Vries LS, Benders MJNL, et al. MR imaging and outcome of term neonates with perinatal asphyxia: value of diffusion-weighted MR imaging and ¹H MR spectroscopy[J]. *Radiology*, 2011, 261(1): 235-242. PMID: 21828190. DOI: 10.1148/radiol.11110213.
- [15] McKinstry RC, Miller JH, Snyder AZ, et al. A prospective, longitudinal diffusion tensor imaging study of brain injury in newborns[J]. *Neurology*, 2002, 59(6): 824-833. PMID: 12297561. DOI: 10.1212/wnl.59.6.824.
- [16] Rutherford M, Biarge MM, Allsop J, et al. MRI of perinatal brain injury[J]. *Pediatr Radiol*, 2010, 40(6): 819-833. PMID: 20432000. DOI: 10.1007/s00247-010-1620-z.
- [17] Cheong JLY, Coleman L, Hunt RW, et al. Prognostic utility of magnetic resonance imaging in neonatal hypoxic-ischemic encephalopathy: substudy of a randomized trial[J]. *Arch Pediatr Adolesc Med*, 2012, 166(7): 634-640. PMID: 22751877. DOI: 10.1001/archpediatrics.2012.284.
- [18] 毛健. 新生儿期常见的中枢神经系统感染磁共振成像评价的重要性[J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2016, 31(14): 1052-1058. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-428X.2016.14.004.
- [19] Oliveira CR, Morriss MC, Mistrot JG, et al. Brain magnetic resonance imaging of infants with bacterial meningitis[J]. *J Pediatr*, 2014, 165(1): 134-139. PMID: 24726712. PMCID: PMC6855593. DOI: 10.1016/j.jpeds.2014.02.061.
- [20] 张丹, 富建华, 薛辛东, 等. MRI早期评估新生儿化脓性脑膜炎的临床应用价值[J]. *中国小儿急救医学*, 2011, 18(3): 217-219. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4912.2011.03.008.
- [21] 张静, 毛健, 李娟, 等. 新生儿不同病原菌化脓性脑膜炎在磁共振影像学上的特点[J]. *中国当代儿科杂志*, 2012, 14(7): 489-495. PMID: 22809598.
- [22] Jaremko JL, Moon AS, Kumbla S. Patterns of complications of neonatal and infant meningitis on MRI by organism: a 10 year review[J]. *Eur J Radiol*, 2011, 80(3): 821-827. PMID: 21067879. DOI: 10.1016/j.ejrad.2010.10.017.
- [23] Low E, Mathieson SR, Stevenson NJ, et al. Early postnatal EEG features of perinatal arterial ischaemic stroke with seizures[J]. *PLoS One*, 2014, 9(7): e100973. PMID: 25051161. PMCID: PMC4106759. DOI: 10.1371/journal.pone.0100973.
- [24] Kralik SF, Kukreja MK, Paldino MJ, et al. Comparison of CSF and MRI findings among neonates and infants with *E coli* or group B streptococcal meningitis[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40(8): 1413-1417. PMID: 31320464. PMCID: PMC7048479. DOI: 10.3174/ajnr.A6134.
- [25] 毛健, 李娟, 陈丹, 等. 磁共振成像在早产儿白色念珠菌感染脑脓肿诊断中的意义[J]. *中国当代儿科杂志*, 2011, 13(8): 621-626. PMID: 21849109.
- [26] Bajaj M, Mody S, Natarajan G. Clinical and neuroimaging findings in neonatal herpes simplex virus infection[J]. *J Pediatr*, 2014, 165(2): 404-407.e1. PMID: 24929330. DOI: 10.1016/j.jpeds.2014.04.046.
- [27] Sarma A, Hanzlik E, Krishnasarma R, et al. Human parechovirus meningoencephalitis: neuroimaging in the era of polymerase chain reaction-based testing[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40(8): 1418-1421. PMID: 31272964. PMCID: PMC7048476. DOI: 10.3174/ajnr.A6118.
- [28] Renard D, Nerrant E, Lechiche C. DWI and FLAIR imaging in herpes simplex encephalitis: a comparative and topographical analysis[J]. *J Neurol*, 2015, 262(9): 2101-2105. PMID: 26092520. DOI: 10.1007/s00415-015-7818-0.
- [29] Wu T, Fan XP, Wang WY, et al. Enterovirus infections are associated with white matter damage in neonates[J]. *J Paediatr Child Health*, 2014, 50(10): 817-822. PMID: 24910173. DOI: 10.1111/jpc.12656.
- [30] Nakamura R, Chong PF, Haraguchi K, et al. Disseminated cortical and subcortical lesions in neonatal enterovirus 71 encephalitis[J]. *J Neurovirol*, 2020, 26(5): 790-792. PMID: 32671810. DOI: 10.1007/s13365-020-00843-2.
- [31] Kidokoro H, de Vries LS, Ogawa C, et al. Predominant area of brain lesions in neonates with herpes simplex encephalitis[J]. *J Perinatol*, 2017, 37(11): 1210-1214. PMID: 28726789. DOI: 10.1038/jp.2017.114.
- [32] Ferriero DM, Fullerton HJ, Bernard TJ, et al. Management of stroke in neonates and children: a scientific statement from the American Heart Association/American Stroke Association[J]. *Stroke*, 2019, 50(3): e51-e96. PMID: 30686119. DOI: 10.1161/STR.0000000000000183.

- [33] Dunbar M, Kirton A. Perinatal stroke[J]. *Semin Pediatr Neurol*, 2019, 32: 100767. PMID: 31813521. DOI: 10.1016/j.spn.2019.08.003.
- [34] Saliba E, Debillon T, Recommendations accident vasculaire cérébral (AVC) néonatal, et al. Neonatal arterial ischemic stroke: review of the current guidelines[J]. *Arch Pediatr*, 2017, 24(2): 180-188. PMID: 28011082. DOI: 10.1016/j.arcped.2016.11.005.
- [35] Benders MJNL, Groenendaal F, Uiterwaal CSPM, et al. Maternal and infant characteristics associated with perinatal arterial stroke in the preterm infant[J]. *Stroke*, 2007, 38(6): 1759-1765. PMID: 17495219. DOI: 10.1161/STROKEAHA.106.479311.
- [36] 孙婧, 陈丹, 毛健. 新生儿脑静脉(窦)血栓性疾病研究进展[J]. *中国当代儿科杂志*, 2021, 23(8): 860-866. PMID: 34511178. PMCID: PMC8428911. DOI: 10.7499/j.issn.1008-8830.2105146.
- [37] Rossor T, Arichi T, Bhate S, et al. Anticoagulation in the management of neonatal cerebral sinovenous thrombosis: a systematic review and meta-analysis[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2018, 60(9): 884-891. PMID: 29675941. DOI: 10.1111/dmcn.13760.
- [38] Husson B, Durand C, Hertz-Pannier L. Recommendations for imaging neonatal ischemic stroke[J]. *Arch Pediatr*, 2017, 24(9S): 9S19-9S27. PMID: 28867033. DOI: 10.1016/S0929-693X(17)30327-5.
- [39] 付佳博, 富建华, 薛辛东. 新生儿脑梗死 47 例磁共振成像分析[J]. *中华新生儿科杂志*, 2020, 35(4): 281-285. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2096-2932.2020.04.009.
- [40] Husson B, Hertz-Pannier L, Adamsbaum C, et al. MR angiography findings in infants with neonatal arterial ischemic stroke in the middle cerebral artery territory: a prospective study using circle of Willis MR angiography[J]. *Eur J Radiol*, 2016, 85(7): 1329-1335. PMID: 27235881. DOI: 10.1016/j.ejrad.2016.05.002.
- [41] De Vis JB, Petersen ET, Kersbergen KJ, et al. Evaluation of perinatal arterial ischemic stroke using noninvasive arterial spin labeling perfusion MRI[J]. *Pediatr Res*, 2013, 74(3): 307-313. PMID: 23797533. DOI: 10.1038/pr.2013.111.
- [42] Watson CG, Dehaes M, Gagoski BA, et al. Arterial spin labeling perfusion magnetic resonance imaging performed in acute perinatal stroke reveals hyperperfusion associated with ischemic injury[J]. *Stroke*, 2016, 47(6): 1514-1519. PMID: 27143277. DOI: 10.1161/STROKEAHA.115.011936.
- [43] Lee S, Mirsky DM, Beslow LA, et al. Pathways for neuroimaging of neonatal stroke[J]. *Pediatr Neurol*, 2017, 69: 37-48. PMID: 28262550. DOI: 10.1016/j.pediatrneurol.2016.12.008.
- [44] Pressler RM, Cilio MR, Mizrahi EM, et al. The ILAE classification of seizures and the epilepsies: modification for seizures in the neonate. Position paper by the ILAE Task Force on Neonatal Seizures[J]. *Epilepsia*, 2021, 62(3): 615-628. PMID: 33522601. DOI: 10.1111/epi.16815.
- [45] Weeke LC, Groenendaal F, Toet MC, et al. The aetiology of neonatal seizures and the diagnostic contribution of neonatal cerebral magnetic resonance imaging[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2015, 57(3): 248-256. PMID: 25385195. DOI: 10.1111/dmcn.12629.
- [46] 马思敏, 杨琳, 周文浩. 新生儿惊厥诊断和治疗进展[J]. *中国循证儿科杂志*, 2015, 10(2): 126-135. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5501.2015.02.009.
- [47] Osmond E, Billetope A, Jary S, et al. Neonatal seizures: magnetic resonance imaging adds value in the diagnosis and prediction of neurodisability[J]. *Acta Paediatr*, 2014, 103(8): 820-826. PMID: 24494791. DOI: 10.1111/apa.12583.
- [48] Wilmshurst JM, Gaillard WD, Vinayan KP, et al. Summary of recommendations for the management of infantile seizures: Task Force Report for the ILAE Commission of Pediatrics[J]. *Epilepsia*, 2015, 56(8): 1185-1197. PMID: 26122601. DOI: 10.1111/epi.13057.
- [49] Volpe JJ. Dysmaturation of premature brain: importance, cellular mechanisms, and potential interventions[J]. *Pediatr Neurol*, 2019, 95: 42-66. PMID: 30975474. DOI: 10.1016/j.pediatrneurol.2019.02.016.
- [50] De Vries LS, Van Haastert ILC, Rademaker KJ, et al. Ultrasound abnormalities preceding cerebral palsy in high-risk preterm infants[J]. *J Pediatr*, 2004, 144(6): 815-820. PMID: 15192633. DOI: 10.1016/j.jpeds.2004.03.034.
- [51] de Vries LS, Volpe JJ. Value of sequential MRI in preterm infants [J]. *Neurology*, 2013, 81(24): 2062-2063. PMID: 24212397. DOI: 10.1212/01.wnl.0000437309.22603.0a.
- [52] Inder TE, de Vries LS, Ferriero DM, et al. Neuroimaging of the preterm brain: review and recommendations[J]. *J Pediatr*, 2021, 237: 276-287.e4. PMID: 34146549. DOI: 10.1016/j.jpeds.2021.06.014.
- [53] Mirmiran M, Barnes PD, Keller K, et al. Neonatal brain magnetic resonance imaging before discharge is better than serial cranial ultrasound in predicting cerebral palsy in very low birth weight preterm infants[J]. *Pediatrics*, 2004, 114(4): 992-998. PMID: 15466096. DOI: 10.1542/peds.2003-0772-L.
- [54] de Vries LS, Benders MJ, Groenendaal F. Imaging the premature brain: ultrasound or MRI?[J]. *Neuroradiology*, 2013, 55 Suppl 2: 13-22. PMID: 23839652. DOI: 10.1007/s00234-013-1233-y.
- [55] Skiöld B, Vollmer B, Böhm B, et al. Neonatal magnetic resonance imaging and outcome at age 30 months in extremely preterm infants[J]. *J Pediatr*, 2012, 160(4): 559-566.e1. PMID: 22056283. DOI: 10.1016/j.jpeds.2011.09.053.
- [56] Setänen S, Haataja L, Parkkola R, et al. Predictive value of neonatal brain MRI on the neurodevelopmental outcome of preterm infants by 5 years of age[J]. *Acta Paediatr*, 2013, 102(5): 492-497. PMID: 23398524. DOI: 10.1111/apa.12191.
- [57] Tam EWY, Rosenbluth G, Rogers EE, et al. Cerebellar hemorrhage on magnetic resonance imaging in preterm newborns associated with abnormal neurologic outcome[J]. *J Pediatr*, 2011, 158(2): 245-250. PMID: 20833401. PMCID: PMC3010295. DOI: 10.1016/j.jpeds.2010.07.049.
- [58] Parikh MN, Chen M, Braimah A, et al. Diffusion MRI microstructural abnormalities at term-equivalent age are

- associated with neurodevelopmental outcomes at 3 years of age in very preterm infants[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2021, 42(8): 1535-1542. PMID: 33958330. PMCID: PMC8367615. DOI: 10.3174/ajnr.A7135.
- [59] Choi YH, Lee JM, Lee JY, et al. Delayed maturation of the middle cerebellar peduncles at near-term age predicts abnormal neurodevelopment in preterm infants[J]. *Neonatology*, 2021, 118(1): 37-46. PMID: 33503618. PMCID: PMC8117383. DOI: 10.1159/000512921.
- [60] Albayram MS, Smith G, Tufan F, et al. Frequency, extent, and correlates of superficial siderosis and ependymal siderosis in premature infants with germinal matrix hemorrhage: an SWI study[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2020, 41(2): 331-337. PMID: 31919140. PMCID: PMC7015196. DOI: 10.3174/ajnr.A6371.
- [61] Filan PM, Inder TE, Anderson PJ, et al. Monitoring the neonatal brain: a survey of current practice among Australian and New Zealand neonatologists[J]. *J Paediatr Child Health*, 2007, 43(7/8): 557-559. PMID: 17635686. DOI: 10.1111/j.1440-1754.2007.01136.x.
- [62] Smyser CD, Kidokoro H, Inder TE. Magnetic resonance imaging of the brain at term equivalent age in extremely premature neonates: to scan or not to scan? [J]. *J Paediatr Child Health*, 2012, 48(9): 794-800. PMID: 22970674. PMCID: PMC3595093. DOI: 10.1111/j.1440-1754.2012.02535.x.
- [63] Hand IL, Shellhaas RA, Milla SS, et al. Routine neuroimaging of the preterm brain[J]. *Pediatrics*, 2020, 146(5): e2020029082. PMID: 33106343. DOI: 10.1542/peds.2020-029082.
- [64] Jakab A, Meuwly E, Feldmann M, et al. Left temporal plane growth predicts language development in newborns with congenital heart disease[J]. *Brain*, 2019, 142(5): 1270-1281. PMID: 30957841. DOI: 10.1093/brain/awz067.
- [65] Mebius MJ, Kooi EMW, Bilardo CM, et al. Brain injury and neurodevelopmental outcome in congenital heart disease: a systematic review[J]. *Pediatrics*, 2017, 140(1): e20164055. PMID: 28607205. DOI: 10.1542/peds.2016-4055.
- [66] Beca J, Gunn JK, Coleman L, et al. New white matter brain injury after infant heart surgery is associated with diagnostic group and the use of circulatory arrest[J]. *Circulation*, 2013, 127(9): 971-979. PMID: 23371931. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.112.001089.
- [67] Peyvandi S, Chau V, Guo T, et al. Neonatal brain injury and timing of neurodevelopmental assessment in patients with congenital heart disease[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 71(18): 1986-1996. PMID: 29724352. PMCID: PMC5940013. DOI: 10.1016/j.jacc.2018.02.068.
- [68] Marino BS, Lipkin PH, Newburger JW, et al. Neurodevelopmental outcomes in children with congenital heart disease: evaluation and management: a scientific statement from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2012, 126(9): 1143-1172. PMID: 22851541. DOI: 10.1161/CIR.0b013e318265ee8a.
- [69] Polito A, Barrett CS, Wypij D, et al. Neurologic complications in neonates supported with extracorporeal membrane oxygenation. An analysis of ELSO registry data[J]. *Intensive Care Med*, 2013, 39(9): 1594-1601. PMID: 23749154. DOI: 10.1007/s00134-013-2985-x.
- [70] Madderom MJ, Schiller RM, Gischler SJ, et al. Growing up after critical illness: verbal, visual-spatial, and working memory problems in neonatal extracorporeal membrane oxygenation survivors[J]. *Crit Care Med*, 2016, 44(6): 1182-1190. PMID: 26937861. DOI: 10.1097/CCM.0000000000001626.
- [71] Wien MA, Whitehead MT, Bulas D, et al. Patterns of brain injury in newborns treated with extracorporeal membrane oxygenation[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2017, 38(4): 820-826. PMID: 28209579. PMCID: PMC7960244. DOI: 10.3174/ajnr.A5092.
- [72] 王乐, 程国强. 新生儿体外膜肺氧合期间的神经监护和评估[J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2020, 35(14): 1113-1116. DOI: 10.3760/cma.j.cn101070-20190717-00654.
- [73] American Academy of Pediatrics Subcommittee on Hyperbilirubinemia. Management of hyperbilirubinemia in the newborn infant 35 or more weeks of gestation[J]. *Pediatrics*, 2004, 114(1): 297-316. PMID: 15231951. DOI: 10.1542/peds.114.1.297.
- [74] Coskun A, Yikilmaz A, Kumandas S, et al. Hyperintense globus pallidus on T1-weighted MR imaging in acute kernicterus: is it common or rare?[J]. *Eur Radiol*, 2005, 15(6): 1263-1267. PMID: 15565320. DOI: 10.1007/s00330-004-2502-2.
- [75] Arhan E, Öztürk Z, Serdaroglu A, et al. Neonatal hypoglycemia: a wide range of electroclinical manifestations and seizure outcomes[J]. *Eur J Paediatr Neurol*, 2017, 21(5): 738-744. PMID: 28623069. DOI: 10.1016/j.ejpn.2017.05.009.
- [76] Basu SK, Ottolini K, Govindan V, et al. Early glycemic profile is associated with brain injury patterns on magnetic resonance imaging in hypoxic ischemic encephalopathy[J]. *J Pediatr*, 2018, 203: 137-143. PMID: 30197201. PMCID: PMC6323004. DOI: 10.1016/j.jpeds.2018.07.041.
- [77] Burns CM, Rutherford MA, Boardman JP, et al. Patterns of cerebral injury and neurodevelopmental outcomes after symptomatic neonatal hypoglycemia[J]. *Pediatrics*, 2008, 122(1): 65-74. PMID: 18595988. DOI: 10.1542/peds.2007-2822.
- [78] Parks JS. Congenital hypopituitarism[J]. *Clin Perinatol*, 2018, 45(1): 75-91. PMID: 29406008. DOI: 10.1016/j.clp.2017.11.001.
- [79] Kim SY, Goo HW, Lim KH, et al. Neonatal hypoglycaemic encephalopathy: diffusion-weighted imaging and proton MR spectroscopy[J]. *Pediatr Radiol*, 2006, 36(2): 144-148. PMID: 16284763. DOI: 10.1007/s00247-005-0020-2.
- [80] Arthurs OJ, Edwards A, Austin T, et al. The challenges of neonatal magnetic resonance imaging[J]. *Pediatr Radiol*, 2012, 42(10): 1183-1194. PMID: 22886375. DOI: 10.1007/s00247-012-2430-2.
- [81] Finemore A, Toulmin H, Merchant N, et al. Chloral hydrate sedation for magnetic resonance imaging in newborn infants[J]. *Paediatr Anaesth*, 2014, 24(2): 190-195. PMID: 24387147. DOI: 10.1111/pan.12264.
- [82] Parad RB. Non-sedation of the neonate for radiologic procedures[J].

- Pediatr Radiol, 2018, 48(4): 524-530. PMID: 29550867.
DOI: 10.1007/s00247-017-4002-y.
- [83] Dong SZ, Zhu M, Bulas D. Techniques for minimizing sedation in pediatric MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2019, 50(4): 1047-1054. PMID: 30869831. DOI: 10.1002/jmri.26703.
- [84] Edwards AD, Arthurs OJ. Paediatric MRI under sedation: is it necessary? What is the evidence for the alternatives?[J]. Pediatr Radiol, 2011, 41(11): 1353-1364. PMID: 21678113. DOI: 10.1007/s00247-011-2147-7.
- [85] 沈晓霞, 刘婷婷, 高福生, 等. 真空固定器联合喂奶方式在新生儿头颅磁共振成像中的应用——前瞻性随机对照研究[J]. 中国当代儿科杂志, 2020, 22(5): 435-440. PMID: 32434637. PMCID: PMC7389395. DOI: 10.7499/j.issn.1008-8830.2001047.
- [86] De Sanctis Briggs V. Magnetic resonance imaging under sedation in newborns and infants: a study of 640 cases using sevoflurane[J]. Paediatr Anaesth, 2005, 15(1): 9-15. PMID: 15649157. DOI: 10.1111/j.1460-9592.2005.01360.x.
- [87] Lei H, Chao L, Miao T, et al. Serious airway-related adverse events with sevoflurane anesthesia via facemask for magnetic resonance imaging in 7129 pediatric patients: a retrospective study[J]. Paediatr Anaesth, 2019, 29(6): 635-639. PMID: 30729614. DOI: 10.1111/pan.13601.
- [88] He L, Wang X, Zheng S. Effects of dexmedetomidine on sevoflurane requirement for 50% excellent tracheal intubation in children: a randomized, double-blind comparison[J]. Paediatr Anaesth, 2014, 24(9): 987-993. PMID: 24823715. DOI: 10.1111/pan.12430.
- [89] Lee JR, Joseph B, Hofacer RD, et al. Effect of dexmedetomidine on sevoflurane-induced neurodegeneration in neonatal rats[J]. Br J Anaesth, 2021, 126(5): 1009-1021. PMID: 33722372. DOI: 10.1016/j.bja.2021.01.033.
- [90] Copeland A, Silver E, Korja R, et al. Infant and child MRI: a review of scanning procedures[J]. Front Neurosci, 2021, 15: 666020. PMID: 34321992. PMCID: PMC8311184. DOI: 10.3389/fnins.2021.666020.
- [91] Coté CJ, Wilson S, American Academy of Pediatrics, et al. Guidelines for monitoring and management of pediatric patients before, during, and after sedation for diagnostic and therapeutic procedures[J]. Pediatrics, 2019, 143(6): e20191000. PMID: 31138666. DOI: 10.1542/peds.2019-1000.
- [92] Coté CJ, Zaslavsky A, Downes JJ, et al. Postoperative apnea in former preterm infants after inguinal herniorrhaphy. A combined analysis[J]. Anesthesiology, 1995, 82(4): 809-822. PMID: 7717551. DOI: 10.1097/00000542-199504000-00002.
- [93] Rona Z, Klebermass K, Cardona F, et al. Comparison of neonatal MRI examinations with and without an MR-compatible incubator: advantages in examination feasibility and clinical decision-making[J]. Eur J Paediatr Neurol, 2010, 14(5): 410-417. PMID: 20471292. DOI: 10.1016/j.ejpn.2010.03.005.
- [94] Bekiesińska-Figatowska M, Helwich E, Rutkowska M, et al. Magnetic resonance imaging of neonates in the magnetic resonance compatible incubator[J]. Arch Med Sci, 2016, 12(5): 1064-1070. PMID: 27695498. PMCID: PMC5016588. DOI: 10.5114/aoms.2016.61913.
- [95] 刘莲, 张鹏, 夏红萍, 等. 磁共振转运培养箱用于新生儿头颅磁共振检查的多中心前瞻性随机对照研究[J]. 中国当代儿科杂志, 2020, 22(12): 1251-1255. PMID: 33327993. PMCID: PMC7735921. DOI: 10.7499/j.issn.1008-8830.2007081.
- [96] Scarabino T, Popolizio T, Giannatempo GM, et al. 3.0-T morphological and angiographic brain imaging: a 5-years experience[J]. Radiol Med, 2007, 112(1): 82-96. PMID: 17310288. DOI: 10.1007/s11547-007-0123-y.
- [97] Cawley P, Few K, Greenwood R, et al. Does magnetic resonance brain scanning at 3.0 Tesla pose a hyperthermic challenge to term neonates? [J]. J Pediatr, 2016, 175: 228-230. e1. PMID: 27318382. DOI: 10.1016/j.jpeds.2016.05.014.
- [98] Keil B, Alagappan V, Mareyam A, et al. Size-optimized 32-channel brain arrays for 3 T pediatric imaging[J]. Magn Reson Med, 2011, 66(6): 1777-1787. PMID: 21656548. PMCID: PMC3218247. DOI: 10.1002/mrm.22961.
- [99] Dubois J, Alison M, Counsell SJ, et al. MRI of the neonatal brain: a review of methodological challenges and neuroscientific advances[J]. J Magn Reson Imaging, 2021, 53(5): 1318-1343. PMID: 32420684. PMCID: PMC8247362. DOI: 10.1002/jmri.27192.
- [100] Dubois J, Dehaene-Lambertz G, Kulikova S, et al. The early development of brain white matter: a review of imaging studies in fetuses, newborns and infants[J]. Neuroscience, 2014, 276: 48-71. PMID: 24378955. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.12.044.
- [101] Saunders DE, Thompson C, Gunny R, et al. Magnetic resonance imaging protocols for paediatric neuroradiology[J]. Pediatr Radiol, 2007, 37(8): 789-797. PMID: 17487479. PMCID: PMC1950216. DOI: 10.1007/s00247-007-0462-9.
- [102] Bruno MA, Walker EA, Abujudeh HH. Understanding and confronting our mistakes: the epidemiology of error in radiology and strategies for error reduction[J]. Radiographics, 2015, 35(6): 1668-1676. PMID: 26466178. DOI: 10.1148/rg.2015150023.
- [103] Tkach JA, Li Y, Pratt RG, et al. Characterization of acoustic noise in a neonatal intensive care unit MRI system[J]. Pediatr Radiol, 2014, 44(8): 1011-1019. PMID: 24595878. PMCID: PMC4241776. DOI: 10.1007/s00247-014-2909-0.

(本文编辑: 王颖)