

DOI: 10.20135/j.issn.1006-8147.2024.04.0366

论著

基于压缩感知的全脊柱三维 MRI 对脊柱侧弯的应用初探

孟祥虹,王植,张慧慧,祝凤玲

(天津大学天津医院放射科,天津 300211)

摘要 目的:评价基于压缩感知技术的三维全脊柱 MRI 检查图像质量和对脊柱侧弯患儿病变诊断的准确性。方法:连续纳入 16 岁以下、因脊柱侧弯行全脊柱三维 MRI 检查的患者,统计患儿有无脊椎、脊髓病变和病变类型等。对三维 MRI 图像质量进行评价,将重建矢状位胸椎 T2WI 图像与随机选取的常规胸椎二维图像的信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR)进行比较。结果:本研究共纳入患者 43 例,女性 28 例,男性 15 例,中位年龄 9.5(5.4,14.7)岁,右胸弯者居多。三维 MRI 两段拼接扫描中位时间为 18 min 45 s(16 min 24 s,19 min 5 s),三段拼接扫描中位时间 27 min 16 s(25 min 43 s,28 min 4 s),发现脊椎和脊髓病变病例 12 例。三维 MRI 图像质量平均分为 4.2(3.9,4.5),SNR 为 8.1(7.3,9.4),CNR 为 2.6(0.8,4.3),常规二维胸椎 MRI 图像的 SNR 为 3.7(2.3,4.9),CNR 为 2.2(0.6,3.3),三维 MRI 图像的 SNR 高于常规二维检查($Z=-2.959,P=0.002$),而两者图像的 CNR 无明显差别($Z=-0.624,P=0.569$)。结论:全脊柱三维 MRI 扫描序列检查时间短,可清晰、全景显示脊柱侧弯患儿脊柱脊髓病变。

关键词 脊柱侧弯;全脊柱;压缩感知;磁共振成像

中图分类号 R445.2

文献标志码 A

文章编号 1006-8147(2024)04-0366-05

The application of whole spine three-dimensional MRI based on compressive sensing in scoliosis: a preliminary study

MENG Xianghong, WANG Zhi, ZHANG Huihui, ZHU Fengling

(Department of Radiology, Tianjin Hospital of Tianjin University, Tianjin 300211, China)

Abstract Objective: To evaluate the image quality and diagnostic accuracy for children with scoliosis based on three-dimensional whole spine MRI examination using compressed sensing. **Methods:** Patients with scoliosis under 16 who underwent whole spinal 3D MRI were continuously included. The spinal deformity and myelopathy, and the type of lesions were recorded. The image quality of 3D MRI image was evaluated. The signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) of reconstructed sagittal T2WI images of thoracic vertebrae in whole spine were reported and compared with those of randomly selected conventional 2D images of thoracic vertebrae. **Results:** A total of 43 patients were included in this study, including 28 females and 15 males with an average age of 9.5 (5.4, 14.7) years. The majority of patients had right chest curvature. The average scanning time was 18 min 45 s (16 min 24 s, 19 min 5 s) in the two-segment splicing scan of the whole spine 3D MRI, and the average scanning time was 27 min 16 s (25 min 43 s, 28 min 4 s) in the three-segment splicing scan. A total of 12 patients with spinal and/or myelopathy were found. The average 3D MRI image quality of the whole spine was 4.2 (3.9, 4.5), SNR was 8.1 (7.3, 9.4), CNR was 2.6 (0.8, 4.3). The SNR of conventional 2D thoracic vertebra MRI images was 3.7 (2.3, 4.9), CNR was 2.2 (0.6, 3.3). The SNR of 3D MRI images was higher than that of conventional 2D examinations ($Z=-2.959, P=0.002$), while there was no significant difference in CNR between the two images ($Z=-0.624, P=0.569$). **Conclusion:** The whole spine 3D MRI sequence has a shorter examination time, and can clearly and panoramically show spinal deformity and myelopathy in children with scoliosis.

Key words scoliosis; whole spine; compressed sensing; magnetic resonance imaging

脊柱侧弯是小儿骨科常见病、多发病,常发生于儿童及青少年,指在站立位脊柱全长正位 X 光片

基金项目 天津市卫生健康科技项目面上项目(TJWJ2022MS026);天津市医学重点学科(专科)建设项目资助(TJYXZDXK-026A);天津市第二批卫生健康行业高层次人才选拔培养工程入选人才(医学青年新锐,TJSQNYXXR-D2-129)

作者简介 孟祥虹(1985-),女,副主任医师,博士,研究方向:骨肌系统影像诊断;通信作者:王植,E-mail:wz13820256789@163.com。

上 Cobb 角大于 10° ,发病率约为 2%~4%^[1-2],分析脊柱侧弯病因对患者正确治疗和获得良好预后非常关键^[3]。站立位脊柱全长正侧位 X 线是诊断和评价脊柱侧弯、确定治疗方案的最常用方法^[4],但是 X 线对畸形脊椎显示不清,不能发现脊髓病变,病因诊断受到很大限制^[3]。全脊柱 CT 可清晰显示脊椎畸形的部位和类型,辅助制定手术方案,但不能显示脊

髓病变,且辐射剂量较大,不能常规用于患儿随访复查^[4]。全脊柱 MRI 可发现脊柱侧弯患者可能出现的 Chiari 畸形、脊髓栓系、脊髓纵裂、脊髓空洞症等,对患者病因诊断至关重要^[5-6]。然而,目前的全脊柱 MRI 检查多为二维扫描,不能显示侧弯的脊椎全貌,病变容易遗漏,诊断效能有很大不足^[7]。但传统全脊柱三维 MRI 扫描时间过长,达 40 min 甚至 1 h,很难常规应用^[8-9]。压缩感知(compressed sensing,CS)技术是通过利用图像冗余来提高 MRI 成像速度的强大方法,其概念最初由 Donoho 等和 Candes 等在 2006 年提出,并很快被 Lustig 等应用到 MRI。该技术是基于 MRI 图像的稀疏特性,通过有选择性地采集 k 空间内少量重要数据并通过稀疏重建算法进行原始信号的重构,可在不牺牲空间分辨率的同时极大缩短 MRI 检查时间,保证重建图像的质量,对三维 MRI 成像效果更佳^[10-13]。

因此,本研究拟采用基于 CS 技术的三维全脊柱 MRI 检查对脊柱侧弯患儿病变进行检查,评价序列的图像质量和诊断效能,以达到在可接受的检查时间内全面、精确显示脊柱脊髓病变,辅助临床制定个体化治疗方案的目的。

1 对象和方法

1.1 研究对象 本研究连续纳入 2020 年 1 月—2023 年 9 月 16 岁以下、因脊柱侧弯行全脊柱三维 MRI 检查探寻病因的患者,排除既往有脊柱手术、感染、代谢、肿瘤等疾病的患者。本研究遵守《赫尔辛基宣言》,经天津医院伦理委员会批准(批准文号:2021 医伦审 171),全体受试者及监护人均签署了知情同意书。

1.2 MRI 检查 所有患者均进行全脊柱 MRI 检查,检查在 3.0T MRI 扫描仪(Ingenia CX, Philips Healthcare, Best, the Netherlands)上进行。具体参数如下:应用 dS Total Spine 16 通道线圈进行检查。佩戴防噪耳机,仰卧位、头先进,摆位时肩部左右居中,头部正对前方,用楔形软垫固定头部,加放海绵垫。定位中心位于下颌,扫描时患者下颌内收,全程闭眼,使用膝关节支撑垫支撑患者双腿。扫描序列常规为冠状位颈胸段和腰骶段两段扫描,若患儿身高较高,则扫描颈、胸、腰骶椎 3 段,在工作站上完成自动拼接,扫描范围自椎体前缘至棘突后缘,椎体前方组织加用饱和带以去除呼吸、心跳及肠蠕动伪影。具体参数为:冠状位 T1WI:TR 400 ms,TE 10 ms,翻转角 90°,FOV 30 cm×18 cm,体素 0.9,重建体素

0.5,回波链长度 25,压缩因子 15,激励次数 2;T2WI:TR 1500 ms,TE 95 ms,翻转角 90°,FOV 30 cm×18 cm,体素 0.9,重建体素 0.5,压缩因子 15,激励次数 2。扫描完成后,得到全脊柱 T1WI、T2WI 两个三维序列,可在任意方向进行重建,显示脊柱侧弯及脊髓病变全貌。

1.3 全脊柱三维 MRI 图像质量评价与病变诊断 检查完成后,由两名从事骨肌系统影像多年的资深医师和技师将所有患者的全脊柱三维 MRI 图像按照 Likert 5 分法^[14](1:图像不可接受;2:图像质量不佳;3:图像质量中等;4:图像质量良好;5:图像质量极佳)对图像质量进行评价,取两人的平均分。

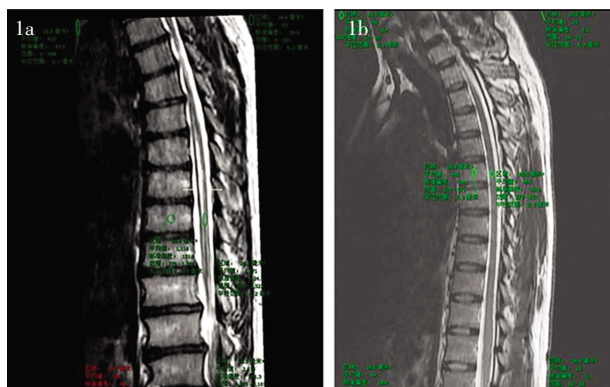
在全脊柱 MRI 图像上诊断患儿颈、胸、腰骶椎椎体及附件有无畸形、破坏、椎间盘有无膨出、突出、脱出及髓核游离,有无脊髓病变,对病变进行诊断。脊髓病变诊断标准如下^[4]:(1)Arnold-Chiari 畸形:小脑扁桃体下缘超过枕骨大孔 5 mm 及以上。(2)脊髓栓系:脊髓圆锥下缘位置低于腰 3 椎体下缘,可伴或不伴(脂肪)脊髓脊膜膨出、隐性脊柱裂、脊髓纵裂、皮毛窦及皮样囊肿等。(3)脊髓纵裂:脊髓或马尾神经被膜性或骨性分隔所分离。(4)脊髓空洞症:脊髓内存在异常液体空腔。

1.4 三维与二维 MRI 图像信噪比(Signal to Noise Ratio,SNR)和对比噪声比(Contrast to Noise Ratio,CNR)比较 因多数脊柱侧弯发生在胸椎,因此,本研究在三维 MRI 图像上重建矢状位胸椎 T2WI 图像,与同时期、同设备随机选取的 30 例常规二维 MRI 胸椎矢状位 T2WI 图像,中位年龄为 29.1(21.5, 43.3)岁的 SNR 和 CNR 进行比较。具体方法为:选取胸椎正中矢状位图像,在胸 7 水平脊髓上手动设定感兴趣区(region of interest,ROI),面积为 20 mm²左右,连续测量 3 次 ROI 内脊髓信号,取平均值作为该 ROI 的信号强度值(signal intensity,SI)。以相同大小 ROI 测量图像周边 4 角的背景噪声标准差(standard deviation,SD)取其平均数,计算脊髓的 SNR。在胸 7 椎体设置 ROI,面积同前,连续测量 3 次取平均值,获得椎体 ROI 信号强度值,d 为层厚,测量椎体与脊髓图像的 CNR,采用如下公式计算图像的 SNR 和 CNR^[15](图 1)。

$$SNR = \frac{0.66 \times SI}{SD} \times \sqrt{\frac{10}{d}}$$

$$CNR = \frac{|SI(\text{椎体}) - SI(\text{脊髓})|}{SD}$$

1.5 统计学处理 应用 SPSS 29.0 软件进行统计学



注:1a:全脊柱 3D MRI T2WI 正中矢状位重建图像测量;1b:常规 T2WI 正中矢状位图像测量

图1 胸椎正中矢状位图像,胸7椎体水平脊髓、椎体信号及图像四角噪声测量

Fig.1 The signal intensity at the level of T7 of spinal cord, vertebral body, and four-corner noise were measured in median sagittal images of thoracic vertebrae

分析。计量资料采取 $M(P25, P75)$ 表示。统计全脊柱三维 MRI 的图像质量和患儿有无脊椎畸形、脊髓病变和病变类型。应用 *Mann-Whitney U* 检验比较三维 MRI 图像上重建的矢状位胸椎 T2WI 图像与二维矢状位胸椎 T2WI 图像的 SNR 及 CNR 有无差别, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 全脊柱三维 MRI 扫描时间和病变类型 本研究共纳入 43 例患者,其中女性 28 例,男性 15 例,中位年龄 9.5(5.4, 14.7)岁,脊柱侧弯主弯为右胸弯者 22 例,左胸弯者 8 例,右胸腰弯者 7 例,左胸腰弯者 4 例,右腰弯者 2 例。采用全脊柱三维 MRI 两段拼接方法成像者共 36 例,扫描中位时间为 18 min 45 s(16 min 24 s, 19 min 5 s),采用三段拼接方法成像共 7 例,扫描中位时间 27 min 16 s(25 min 43 s, 28 min 4 s)。所有患者中共发现脊椎及脊髓病变患者 12 例,其中,胸椎半椎体 3 例,蝴蝶椎 1 例,腰1椎体嗜酸性肉芽肿 1 例,先天性无痛无汗症累及腰椎 1 例,Chiari 畸形 1 例,脊髓空洞症 3 例,脊髓栓系 2 例(图 2~4)。

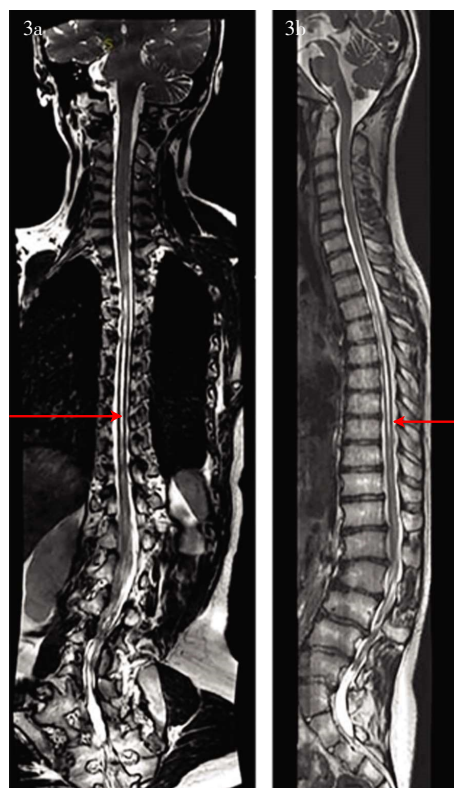
2.2 全脊柱三维 MRI 图像质量 全脊柱三维 MRI 图像质量平均分为 4.2(3.9, 4.5), SNR 为 8.1(7.3, 9.4), CNR 为 2.6(0.8, 4.3),常规二维胸椎 MRI 图像的 SNR 为 3.7(2.3, 4.9), CNR 为 2.2(0.6, 3.3),三维 MRI 图像的 SNR 高于常规二维检查 ($Z = -2.959, P = 0.002$),而两者图像的 CNR 无明显差别 ($Z = -0.624, P = 0.569$)。



注:2a:冠状位 T1WI 图像;2b:矢状位 T1WI 图像

图2 基于压缩感知技术的全脊柱三维 MRI 图像

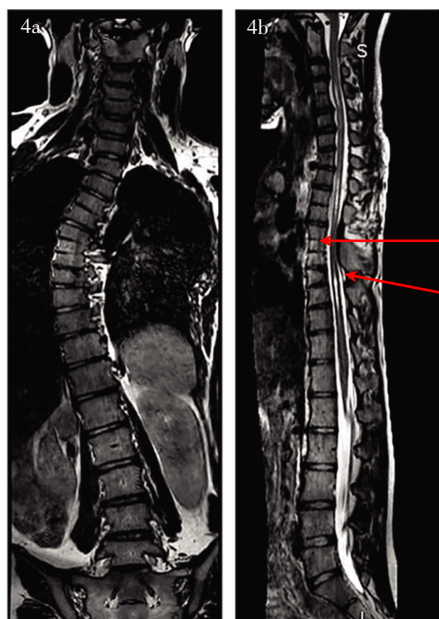
Fig.2 Three-dimensional MRI image of the whole spine based on compressed sensing technology



注:3a:冠状位 T2WI 图像;3b:矢状位 T2WI 图像,清晰显示脊髓空洞范围(箭头)

图3 脊髓空洞症患者全脊柱三维 MRI 图像

Fig.3 Three-dimensional MRI images of the whole spine in patients with syringomyelia



注:4a:冠状位 T2WI 图像;4b:矢状位 T2WI 图像,清晰显示阻滞椎和脊髓空洞症(箭头)

图4 脊柱与脊髓病变患者全脊柱三维 MRI 图像

Fig.4 Three-dimensional MRI images of the whole spine inpatients with spinal deformity and myelopathy

3 讨论

研究表明,基于 CS 技术的全脊柱三维 MRI 检查在可接受的扫描时间内对全脊柱 MRI 图像进行容积采集,可各向同性、沿脊柱侧弯方向任意重建图像,清晰显示脊柱侧弯患儿全部脊椎及脊髓病变。该检查方法图像质量高,可无创、无辐射、精准、全面诊断脊柱侧弯儿童脊椎和脊髓病变,为临床采取正确治疗方法提供影像学支持。

全脊柱 MRI 检查对全面、准确显示脊椎脊髓病变、分析脊柱侧弯病因至关重要,目前多用二维 MRI 进行检查。但是,颈、胸、腰骶椎在二维扫描后进行拼接所产生的图像扫描层厚较厚、层间有间隔、不能进行多平面重建等图像后处理,不能完全显示病变全貌,对脊柱侧弯的病变显示和诊断存在较大缺陷,且扫描时间较长,对于不能坚持检查的患儿往往容易产生运动伪影而降低图像质量^[16-18]。随着磁共振设备软硬件的更新,三维 MRI 检查已越来越多地应用于骨肌系统影像检查,全脊柱三维 MRI 检查为基于可变翻转角的三维容积扫描,扫描完成后可进行各向同性、任意平面图像重建,软组织分辨率高,可全景、清晰显示侧弯脊柱和脊髓病变。但是,三维检查扫描时间长,很多患儿不能坚持而产生运动伪影,严重影响图像质量。而且,国内外学者普遍采用矢状位三维全脊柱 MRI 检查^[19],但对

脊柱侧弯患者而言,矢状位扫描往往不能包括全部侧弯的脊椎,重建后的冠状位和横断位图像有缺失,以致不能全面、正确诊断畸形脊椎和脊髓病变。本研究采用冠状位三维全脊柱 MRI 扫描,扫描范围自椎体前方至棘突后方,左右范围包括全侧弯脊椎,可将患者的脊柱和脊髓完整地进行容积检查,重建后的矢状位和横断位图像也不会有缺损。但是该方法扫描时间过长,达 40~60 min,年龄较小的患者很难配合,常规应用有很大困难。因此,如何在保证图像扫描范围和质量的前提下,缩短检查时间是三维全脊柱 MRI 检查成功的关键所在。

基于 CS 技术的 MRI 检查首先将核磁信号进行空间变换,使其成为稀疏或可压缩信号,再利用一个与变换基本不相干的测量矩阵,将变换所得高维信号投影至一个低维空间,并对所获取的少量测量值进行解凸优化,从而实现信号的精确重构^[12,20-21]。其中,信号稀疏性和不相干性采样是消除欠采样后产生的混叠伪影和保证图像准确重建的必要条件,而且提高信号的稀疏性不仅可以获得更高的加速因子,还可以在在一定程度上改善重建后的图像质量。CS 技术已被国内外学者广泛应用于全身各部位的 MRI 检查,如腹部、内耳、四肢骨关节等部位^[12,22],在保证图像质量的同时,极大缩短了检查时间。本研究设计的基于 CS 技术的冠状位三维全脊柱 MRI 检查克服了检查时间较长的不足,将大部分患儿的扫描时间缩短至 18 min 左右,并且保留了良好的图像质量,信噪比和对比噪声比佳,可常规应用于脊柱侧弯患儿的影像检查。

本研究尚有一些不足:(1)纳入的患者数量尚有不足,因此脊髓病变者的数量和种类较少,不能进行亚组分析,未来本研究将继续扩大样本量,增加脊髓病变的患者数量以探讨三维 MRI 对病变的诊断是否清晰、全面、准确。(2)没有直接比较同一患者三维和二维全脊柱 MRI 图像质量和扫描时间,只是间接比较了三维和二维图像的 SNR 和 CNR,因为这两种检查均需要较长时间,患者无法坚持,且扫描时间过长会造成特殊吸收率过高而对受检者身体造成不良影响。

本研究设计的基于 CS 技术的冠状位全脊柱三维 MRI 扫描序列检查时间短,可清晰、全景显示脊柱侧弯患儿脊椎畸形和脊髓病变,为患者病因诊断、制定正确治疗方案和随访复查提供影像学支持。

参考文献:

- [1] ALTAFF F, GIBSON A, DANNAWI Z, et al. Adolescent idiopathic

- scoliosis[J]. *BMJ*, 2013, 346: f2508.
- [2] CHOUDHRY M N, AHMAD Z, VERMA R. Adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Open Orthop J*, 2016, 10: 143–154.
- [3] KUZNIA A L, HERNANDEZ A K, LEE L U. Adolescent idiopathic scoliosis: common questions and answers[J]. *Am Fam Physician*, 2020, 101(1): 19–23.
- [4] HORNE J P, FLANNERY R, USMAN S. Adolescent idiopathic scoliosis: diagnosis and management[J]. *Am Fam Physician*, 2014, 89(3): 193–198.
- [5] WAJCHENBERG M, ASTUR N, KANAS M, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: current concepts on neurological and muscular etiologies[J]. *Scoliosis Spinal Disord*, 2016, 11: 4.
- [6] QIU Y, ZHU F, WANG B, et al. Clinical etiological classification of scoliosis: report of 1289 cases[J]. *Orthop Surg*, 2009, 1(1): 12–16.
- [7] QIU J, LIU J, BI Z, et al. An investigation of 2D spine magnetic resonance imaging (MRI) with compressed sensing (CS)[J]. *Skeletal Radiol*, 2022, 51(6): 1273–1283.
- [8] FRITZ J. Musculoskeletal 3D MRI: a decade of developments and innovations coming to fruition[J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2021, 25(3): 379–380.
- [9] NARAGHI A, WHITE L M. Three-dimensional MRI of the musculoskeletal system[J]. *Am J Roentgenol*, 2012, 199(3): W283–W293.
- [10] GEETHANATH S, REDDY R, KONAR A S, et al. Compressed sensing MRI: a review[J]. *Crit Rev Biomed Eng*, 2013, 41(3): 183–204.
- [11] YE J C. Compressed sensing MRI: a review from signal processing perspective[J]. *BMC Biomed Eng*, 2019, 1: 8.
- [12] JASPAN O N, FLEYSHER R, LIPTON M L. Compressed sensing MRI: a review of the clinical literature[J]. *Br J Radiol*, 2015, 88(1056): 20150487.
- [13] 李烁, 王效春. 压缩感知磁共振成像技术的临床应用进展[J]. *磁共振成像*, 2023, 14(12): 198–202.
- [14] JAMIESON S. Likert scales: how to (ab)use them[J]. *Med Educ*, 2004, 38(12): 1217–1218.
- [15] CONSTANTINIDES C D, ATALAR E, MCVEIGH E R. Signal-to-noise measurements in magnitude images from NMR phased arrays[J]. *Magn Reson Med*, 1997, 38(5): 852–857.
- [16] ADDAI D, ZARKOS J, BOWEY A J. Current concepts in the diagnosis and management of adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Childs Nerv Syst*, 2020, 36(6): 1111–1119.
- [17] LAO L F, CHEN Z G, QIU G X, et al. Whole-spine magnetic resonance imaging study in healthy Chinese adolescents[J]. *Orthop Surg*, 2013, 5(3): 164–170.
- [18] NUDELMAN B, MITTAL A, ROSINSKI A, et al. Whole-spine magnetic resonance imaging: a review of suggested indications[J]. *JBJS Rev*, 2021, 9(7): e20.00267.
- [19] SAHR M, TAN E T, SNEAG D B. 3D MRI of the spine[J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2021, 25(3): 433–440.
- [20] FENG L, BENKERT T, BLOCK K T, et al. Compressed sensing for body MRI[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 45(4): 966–987.
- [21] YANG J, JIN T, XIAO C, et al. Compressed sensing radar imaging: fundamentals, challenges, and advances[J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(14): 3100.
- [22] ZHU L, WU X, SUN Z, et al. Compressed-sensing accelerated 3-dimensional magnetic resonance cholangiopancreatography: application in suspected pancreatic diseases[J]. *Invest Radiol*, 2018, 53(3): 150–157.

(2024-01-11 收稿)

(上接第 331 页)

- chemotherapy in adjuvant treatment of high risk non-muscle invasive bladder cancer[J]. *Arch Esp Urol*, 2021, 74(9): 875–882.
- [14] FREY B, WEISS E M, RUBNER Y, et al. Old and new facts about hyperthermia-induced modulations of the immune system[J]. *Int J Hyperthermia*, 2012, 28(6): 528–542.
- [15] GILL R S, AL-ADRA D P, NAGENDRAN J, et al. Treatment of gastric cancer with peritoneal carcinomatosis by cytoreductive surgery and HIPEC: a systematic review of survival, mortality, and morbidity[J]. *J Surg Oncol*, 2011, 104(6): 692–698.
- [16] MAGALHÃES J C, SOUSA M, BASTO R, et al. Adjuvant hyperthermic intravesical chemotherapy in intermediate- and high-risk non-muscle invasive bladder cancer[J]. *Cureus*, 2023, 15(9): e45672.
- [17] GUERRERO-RAMOS F, GONZÁLEZ-PADILLA D A, GONZÁLEZ-DÍAZ A, et al. Recirculating hyperthermic intravesical chemotherapy with mitomycin C (HIVEC) versus BCG in high-risk non-muscle-invasive bladder cancer: results of the HIVEC-HR randomized clinical trial[J]. *World J Urol*, 2022, 40(4): 999–1004.
- [18] LUO J, GUO L, CHEN L, et al. Efficacy and safety of HIVEC versus ETFT in non-muscle-invasive bladder cancer: a systematic review and meta-analysis[J]. *Asian J Surg*, 2024, 47(1): 665–668.
- [19] PIGNOT G, BABOUDJIAN M, LEBACLE C, et al. Efficacy of hyperthermic intravesical chemotherapy (HIVEC) in patients with non-muscle invasive bladder cancer after BCG failure[J]. *World J Urol*, 2023, 41(11): 3195–3203.
- [20] CERRATO C, ROUPRET M, MIR M C. Results from HIVEC- II for intermediate-risk non-muscle-invasive bladder cancer: is this a dead end for mitomycin C hyperthermia[J]. *Eur Urol*, 2023; 83(6): 505–507.

(2024-01-03 收稿)