DOI:10.12289/j.issn.2097-4345.24439

·综 述·

影像技术评估便秘患者肠道结构和传输功能的研究进展

郭嘉奇,汤光宇

(同济大学附属第十人民医院放射科,上海 200072)

【摘要】随着医学影像技术的不断发展,其在便秘患者的肠道结构和传输功能评估中的应用逐渐受到关注。本文将综述近年来 X 线、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)、计算机断层扫描(computed tomography, CT)等对便秘患者肠道结构异常和传输功能障碍的研究进展。这些影像技术不仅能够非侵入性地观察肠道解剖结构,还能评估肠道传输功能,为便秘的诊断和治疗提供重要依据。通过对现有文献的梳理,我们发现医学影像学在便秘领域的应用具有广阔的前景和潜力,但仍需进一步优化评估方法和提高诊断准确性。

【关键词】便秘;肠道结构;结肠传输功能;磁共振成像;CT 结肠造影;X 线

【中图分类号】R574.62 【文献标志码】A 【文章编号】2097-4345(2025)06-0936-06

Research progress of imaging technology in evaluating intestinal structure and transit function in patients with constipation

GUO Jiaqi, *TANG Guangyu*

(Department of Radiology, Shanghai Tenth People's Hospital, School of Medicine, Tongji University, Shanghai 200072, China)

【**Abstract**】With the continuous development of medical imaging technology, its application in the evaluation of intestinal structure and transit function in patients with constipation has gradually attracted attention. This article will review the recent research progress in the use of clinical and imaging technologies, such as X-ray, magnetic resonance imaging (MRI), computed tomography (CT), to assess intestinal structural abnormalities and transit dysfunction in patients with constipation. These imaging technologies can not only non-invasively observe the anatomical structure of the intestine, but also evaluate the motor function of the intestine, providing an important basis for the diagnosis and treatment of constipation. By combing through the existing literature, we found that the application of imaging technology in the field of constipation has broad prospects and potential, but further research is needed to optimize evaluation methods and improve diagnostic accuracy.

【**Key words**】constipation; intestinal structure; colonic transit function; magnetic resonance imaging; CT colongraphy; X-ray

慢性便秘作为一种常见的慢性胃肠道疾病,严重影响患者的生活质量。其病因复杂多样,最终涉及肠道结构和传输功能异常两方面。准确评估肠道结构和传输功能对于便秘的诊断、治疗以及病理生理机制的理解至关重要。随着医学影像技术的不断发展,多种影像手段被应用于便秘患者的评估中。

收稿日期:2024-10-31 **录用日期**:2025-02-28
基金项目:上海市科学技术委员会"科技创新行动计划"医学创新研究专项(20Y11911800)
作者简介:郭嘉奇(1999—),男,硕士研究生,E-mail:1368049976@qq.com
通信作者:汤光宇,E-mail:tgy17@126.com

本综述旨在全面深入地探讨这些影像技术在评估便秘患者肠道结构和传输功能方面的研究进展，分析其优势与局限性，为临床实践和进一步研究提供参考依据。

1　慢性便秘的定义、分型及相关评估与病理基础

慢性便秘是一种功能性肠病，核心定义为：反复出现排便次数减少（<3 次/周）、粪便干结、排便费力、排便不尽感或需手法辅助排便（满足任一症状），症状持续≥6 个月，且排除器质性疾病、药物、内分泌代谢异常等明确诱因[1]。其主要分型为功能性便秘（functional constipation，FC），FC 进一步亚分型为正常传输便秘（normal transit constipation，NTC）、慢传输便秘（slow transit constipation，STC）、出口梗阻型便秘（outlet obstructive constipation，OOC）和混合型（STC 和 OOC 同时存在）。FC 是临床最常见的便秘形式，其诊断需要依据罗马Ⅳ标准[2]。便秘的严重程度可通过量表（如 PAC-QOL 问卷或 Wexner 评分表）评定，但这些量表结果准确性易受患者主观因素影响[3]。结肠是长度约 130 cm 的弹性管状器官，盲肠管腔直径约 60～80 mm，乙状结肠逐渐缩小至 25 mm，传输时间为 11～31 h[4]。目前用于评估便秘的检查多具侵入性，特异性和敏感性中等，临床实践中尚无广泛应用的有效、客观、无创评估技术。肠道结构改变与便秘互为因果，如先天性肠道冗长、狭窄或肌肉发育不良等可致便秘，长期便秘也可因粪便积聚引起肠道肌肉肥厚、黏膜炎症、横结肠下垂等结构改变，进而影响传输功能，形成恶性循环[5]。

2　常用评估肠道结构和传输功能的影像技术

2.1　X 线摄影技术

包括 X 线结肠传输试验、结肠造影和 X 线排粪造影。其优点是简单易行，但是其为二维影像，解剖结构分辨力差，要求患者依从性高。多次 X 线辐射暴露使 X 线摄影技术在儿童和孕妇便秘中的应用受到限制。

2.1.1　*X 线结肠传输试验*　结肠传输试验是摄入含钡剂胶囊，在设定时间点多次腹部 X 线摄影，观察高密度标志物在结肠的位置进行评估，将结肠分为左半结区（L）、右半结肠区（R）和直肠乙状结肠区（SR）3 个区域，测算 72 h 标记物的排出率，标记物排出率>80%为 NTC，排出率≤80%则进一步计算运输指数（transport index，TI）。TI 值及其诊断分型：TI = SRm/（RCm+LCm+SRm），其中 SRm 为直肠乙状结肠标记物数，RCm 为右半结肠标记物数，LCm 为左半结肠标记物数。TI>0.5 诊断为 OOC，TI<0.5 诊断为 STC，TI = 0.5 诊断混合型便秘[6]。目前，结肠传输试验是诊断 STC 的金标准，具有成本低、易于开展等优点[7]。Jiang 等[8]通过对 180 名健康受试者和 90 例便秘患者进行了结肠传输试验，发现健康中国受试者的平均总结肠传输时间[（20.9±12.26）h]远快于美国、法国、加拿大等国家受试者[9]。Vork 等[9]对 87 例便秘患者和 12 名健康志愿者进行结肠传输试验和结肠测压双中心试验，结肠传输试验对结肠测压正常的阴性预测率为 100%，70 例 STC 患者中 70%的患者结肠测压是异常的。另外，年龄和性别也影响结肠传输试验的结果，与女性相比，男性的结肠传输时间明显增加，仅在男性中观察到结肠传输时间随年龄增长显著增加（P=0.000 6），这一现象可能与女性的肛管直肠压力明显高于男性（P<0.05）有关[10]。

2.1.2　*X 线结肠造影*　结肠造影是经肛门注入含碘造影剂或者钡剂至患者腹胀状态后进行摄影，可以较为整体地观察结肠的形态结构，同时排除器质性病变；它对成人巨结肠、结肠脾曲综合征、横结肠下降和乙状结肠冗长提供准确的诊断依据。Sun 等[11]通过结肠造影发现 125 例 NTC 患者横结肠下降的程度[（93.00±32.57）cm]低于 139 例 STC 患者[（242.27±25.86）cm]，说明横结肠下降程度与 STC 具有较高相关性。Zhou 等[12]认为钡灌肠 24 h 延迟摄影在预测 HSCR 无神经节细胞肠段中具重要临床价值，发现钡灌肠 24 h 延迟摄影预测便秘患者神经病理节段的灵敏度、特异度、阳性预测值和阴性预测值分别为 89.1%、91.5%、91.3%和 89.4%。

2.1.3　*X 线排粪造影*　向肛门注入造影剂后利用 X 线摄影记录排便时盆底与直肠的形态学变化，分别拍摄静止、力排及黏膜相，显示排粪动作时左半结肠、直肠、肛管部的形态变化，测量直肠前突深度、乙齿距、骶直间距、肛上距和肛直角等，排粪造影能显示直肠前突、直肠内脱垂及乙状结肠膨出等的形态变化，是诊断 OOC 的首选影像学检查方法[2]，可了解排便过程中的异常病理生理学改变以及排便运动机制的协调性等。Cosentino 等[13]采用 X 线排粪造影对 24 例结肠转运时间异常的患者进行观察，发现 4 例（17%）因结肠惰性导致排便异常，20 例（83%）

显示排便功能障碍。Xie 等[14]回顾性分析275例乙状结肠膨出患者排粪造影的图像及临床资料,发现乙状结肠膨出患者在排便时乙状结肠下降压迫直肠导致粪便无法完全排出,膨出程度严重的患者乙状结肠及直肠中粪便逐渐增多、变硬,进一步影响直肠排空障碍,从而使得便秘加重,在乙状结肠膨出较严重的病例中,95.5%(21/22)出现了该现象。但是,Blackett 等[15]通过排粪造影、直肠肛门测压及球囊排出多中心试验,发现排粪造影与另外二者结果不完全一致,说明排便是一个复杂的过程,排粪造影不能反映便秘的全部。

2.2 CT 结肠造影(CT colongraphy, CTC)

即CT虚拟结肠镜检查,对肠道清洁灌肠准备并充气后行肠道CT扫描并三维重建,通过后处理技术生成虚拟三维内窥镜视角评估肠道。通过口服造影剂,可观察造影剂在肠壁上的涂布范围,其优势是能评估整个结肠结构改变[16],并且可以从三维的角度测量结肠的长度和体积。Utano 等[17]通过对便秘患者及健康人群共295例行结肠造影,通过对结肠长度的三维测量,发现便秘患者结肠长度增加至(158.6±18.3) cm,显著长于健康人群的(147.7±17.9) cm,性别方面女性长于男性结肠[(154.3±18.1) cm *vs* (147.1±18.3) cm; $P=0.022$],尤其是近端结肠。Dilmaghani 等[18]通过CTC测量122例志愿者结肠体积,发现结肠的体积与结肠结构是否存在冗余不具有显著相关性。STC 患者因肠道传输时间过长,CTC 检查时造影剂无法完全涂布整个肠道,不能显示全部肠道,给研究带来困难,且不能评估结肠的传输功能[19]。

2.3 γ 闪烁摄影术

将γ放射性同位素(如^{99}Tc、^{111}In 或^{67}Ga)包裹入不易消化胶囊,口服胶囊后在不同时间点获取多幅γ闪烁扫描图像,通过观察胶囊在结肠移动速度并计算结肠排空率[20]。Nullens 等[21]通过测量升结肠半排空时间和左半结肠及直肠中粪便残余区域实现对便秘的亚分组,升结肠半排空时间可以区分健康对照与 OOC($P=0.006$)和 STC($P<0.001$),并且与便秘相关(DD *vs* STC, $P=0.007$),48 h 的左半结肠及直肠中的同位素粪便残余对 OOC 诊断具有意义,但是γ闪烁摄影术需要专业设备和生产短寿命放射性同位素,且放射性材料因含电离辐射不适合应用于儿童和孕妇,因此,仅在少数专业机构能实施。

2.4 磁共振成像(MRI)

包括 MR 腹部成像、MR 排粪造影、标记法和 MR 电影扫描。具有良好的软组织对比度和无辐射、非侵入性的特点,具有较高的可重复性。不同的图像序列和参数可以提供不同方面的组织特性信息,有助于医生全面评估腹内脏器的健康状况,并发现潜在的病变。MR 腹部平扫不使用造影剂就能获得足够的信息,从而避免了患者对造影剂过敏的风险。且 MRI 具有强大的三维成像能力,可以生成三维重建图像,帮助医生从多个角度观察腹内脏器的结构和病变。

2.4.1 MR 腹部成像 常规序列包括轴位呼吸触发快速自旋回波 T2WI 序列、快速梯度回波水-脂同反相位 T1WI 序列及扩散加权成像(DWI)序列,检查时患者无需特殊准备,只需在检查时保持平静状态。T2WI 图像分辨力高,利于观察结肠的长度、走行及结肠袋的形态,包括结肠体积、自由流动的含水量、食糜松弛测定、气体含量和结肠袋液体测量,对判断结肠低垂、冗长及狭窄具有重大意义[22-23],一次屏气即可获得整个腹部影像,有助于避免采集时间过长引起的运动伪影[24]。Klinge 等[25]对 FC 患者、肠易激综合征(irritable bowel syndrome, IBS)患者及健康志愿者开展 MRI 检查并测量结肠体积,结果显示,结肠体积健康志愿者中位数为629(562,868) mL,FC 患者为864(742,940) mL,IBS 患者为520(489,593) mL;FC 患者的结肠体积显著大于健康志愿者,以升结肠为著,且总体结肠体积与肠道传输时间呈正相关。MR 腹部成像的缺点是肠管积粪或者食糜沉积会影响对迂曲走行的肠管结构进行观察。

2.4.2 MR 排粪造影 在特定的设备下将导管插入患者肛门内,通过导管注入造影剂(如钆剂),使直肠、乙状结肠等区域充盈,拔出导管后,患者做排便动作时 MRI 连续采集图像,包括静坐、提肛、力排、排空后的盆底的影像[26],可以观察粪便在肠道中潴留的位置及其排出困难的过程。能提供有关肛门直肠的功能(协同失调排便)和解剖结构(肛门狭窄、肠膨出、直肠肠套叠、直肠脱垂和直肠膨出)信息[27]。Thanaracthanon 等[28]发现 MR 排粪造影诊断排便协调失调(dyssynergic defecation, DD)的灵敏度和特异度分别为79.2%、95.5%,MR 排便造影前瞻性提供的诊断信息在70%的患者中为良好或优秀,为86%接受手术的患者增加了术前临床

信息[29]。其局限性包括：对于肠管结构参数的定量依靠主观评估，重复性差，尚未广泛推广应用。患者在检查时会感到焦虑、尴尬，可能无法充分放松排出造影剂。

2.4.3　MR 标记法　（1）MR 胶囊标记法：患者服用包裹水或造影剂（如钆）的胶囊标记物，在不同时间点多次扫描观察胶囊传输的位置，获得其通过整个肠道的传输时间。Chaddock 等[35]使用 MRI 标记胶囊和 X 线结肠传输试验测量全结肠传输时间分别为 28 h 和 31 h，二者相关性很高（$r=0.85$），说明 MRI 标记法与不透射线标记技术结果高度一致[30]。并且 MR 胶囊标记法检查前不需肠道准备，可评估肠道在生理状态下的结构和传输情况，Zhi 等[31]对 7 例 STC 患者和 9 例健康对照者在正常饮食下行 MR 胶囊标记法成像，发现 STC 患者和健康对照组的结肠传输时间分别为（74.1±7.2）h 和（30.9±15.9）h，差异有统计学意义（$P<0.05$），STC 的结肠传输时间显著长于健康对照，Sharif 等[32]验证了该方法的可行性。但是，肠管积粪或者食糜沉积会影响包埋在粪便中胶囊的检出和定位，肠管结构参数的定量依靠主观评估，重复性差。（2）^{19}F 标记胶囊法：患者服用^{19}F 标记胶囊后，通过专用的接收线圈、多核发射器和接收器硬件进行检测，基于氟的成像方法提供相对良好的灵敏度，结合高分辨率 MRI 解剖扫描，能够准确观察胶囊在肠管内的行程[33]。但是，该技术成本较高。

2.4.4　MR 电影成像（cine-MRI）　是一种能够捕捉腹内脏器动态活动的医学影像技术。在进行检查前，患者需要做好肠道清洁准备工作，并遵循医生的指令进行体位摆放、呼吸配合和动态扫描等步骤，该技术可以动态量化肠道蠕动功能。Pritchard 等[34]对 11 例便秘受试者和 11 名健康对照组进行 MR 电影成像，在摄入聚乙二醇 60 min 后升结肠的蠕动及结肠内水含量显著增加，健康受试者在 60 min（$P<0.002$）和 120 min（$P<0.003$）时间点升结肠内容物运动数明显多于便秘组。Vriesman 等[35]的研究表明，cine-MRI 技术与肛门直肠测压检测到结肠活动时都能记录到高振幅蠕动收缩波，但两者检测结果一致性较低。而且，如果肠道准备不足的情况下，肠壁的可视性较差；所以该技术检查前需要清洁灌肠，不能观察肠道正常生理情况下的传输功能。这些技术的适用范围、优劣势的详细对比见表 1、2。

表 1　影像技术在评估肠道结构方面的对比

Tab. 1　Comparison of imaging technologies in evaluating intestinal structure

检查技术	适用范围	优点	缺点
X 线结肠造影	诊断结肠结构变异、器质性病变筛查	简单易行、低成本，整体观察结肠形态	二维影像，对重叠肠袢分辨力差，需肠道准备，辐射暴露
X 线排粪造影	评估盆底及直肠、肛管形态及功能	简单易学，诊断 OOC 的首选影像学检查方法	二维影像，直肠肛管细微结构显示不清，辐射暴露
CT 结肠造影	筛查结肠器质性病变	三维成像，能评估整个结肠结构改变，测量结肠长度和体积	不能评估结肠传输功能，辐射暴露，肠道准备要求高
MR 腹部成像	发现结肠的肿瘤、炎症及其他器质性病变	无辐射，良好的软组织对比度，可反复随访，提供结肠内结构及功能的诸多参数	肠壁结构观察依赖于肠道清洁状况，MRI 胶囊需专门制作
MR 排粪造影	评估肛门直肠的功能和解剖结构	无辐射，提供肛门直肠的功能和解剖结构信息	定量评估依赖主观判断，患者可能感到不适，尚未广泛推广

表 2　影像技术在评估肠道传输功能方面的对比

Tab. 2　Comparison of imaging technologies in evaluating intestinal transit function

检查技术	适用范围	优点	缺点
不透 X 射线标志物法	测量结肠传输时间，便秘亚分型	诊断慢传输便秘的金标准，成本低，易于开展	二维影像，分辨力差，需多次 X 线辐射暴露，不适用于儿童和孕妇
γ 闪烁摄影术	评估结肠排空功能	计算结肠排空率，区分便秘亚型	有电离辐射，不适用于儿童和孕妇，需专业设备和短半衰期放射性同位素
MR 胶囊标记法	评估肠道传输时间	无辐射，可评估肠道在生理状态下的传输情况	肠管积粪或食糜沉积可能影响胶囊的检出和定位，定量评估依赖主观判断
MR 电影成像	动态量化肠道蠕动功能	无辐射，动态观察肠道蠕动功能	检查前需清洁灌肠，不能观察肠道正常生理情况下的传输功能

3 展　望

FC是临床最常见的慢性功能性便秘类型,其诊断标准和严重程度评估多为主观指标,重复性差,客观评估肠道结构和传输功能的技术有待完善。MRI因无电离辐射、多参数成像优势,逐渐取代CT成为无创评估肠道结构和传输功能的技术。AI在医学影像中的应用日趋成熟,可对肠道图像进行特征提取、模型训练及优化算法,实现图像自动识别、分割,实现结肠结构参数定量有助于便秘患者分类[18];AI可以快速、准确地分割结肠区域,减少医生手动分割的时间和误差。通过精确分割,AI可以帮助识别结肠息肉、肿瘤等早期病变,提升结肠癌筛查的效率和准确性。结肠的自动化分割使得能够进行大规模的临床研究,比较不同饮食干预对结肠内容物的影响。通过量化不同消化系统疾病中的气体和非气体结肠内容物,可以获得关于结肠体积与腹部症状之间关系的独特信息[36]。然而目前,基于MRI的自动分割方法无法区分结肠壁本身的体积、粪便体积和结肠内的气体。在T2加权MRI中,升结肠因含水量较高可能更亮,自动分割有时难以与小肠区分;由于结肠与肝脏、肌肉等组织信号相似,全自动分割存在困难[26]。AI与MRI结合有望成为高精度、便利地评估肠道结构和功能的主要影像学技术。

利益冲突声明　所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献说明　郭嘉奇:负责文献检索与筛选,完成综述初稿的撰写;汤光宇:提出本综述的研究方向与核心框架,指导文献筛选标准的制订及内容逻辑的优化,对初稿进行全面审核与修改,把控综述的学术质量与临床价值,同时负责基金项目的对接及最终文稿的定稿。

【参考文献】

[1] CAMILLERI M, FORD A C, MAWE G M, et al. Chronic constipation[J]. Nat Rev Dis Primers, 2017, 3: 17095.

[2] VRIESMAN M H, KOPPEN I J N, CAMILLERI M, et al. Management of functional constipation in children and adults[J]. Nat Rev Gastroenterol Hepatol, 2020,17(1): 21-39.

[3] JIANG Y, TANG Y R, LIN L. Clinical characteristics of different primary constipation subtypes in a Chinese population[J]. J Clin Gastroenterol, 2020, 54(7): 626-632.

[4] HEITMANN P T, VOLLEBREGT P F, KNOWLES C H, et al. Understanding the physiology of humandefaecation and disorders of continence and evacuation[J]. Nat Rev Gastroenterol Hepatol, 2021,18(11): 751-769.

[5] NYGAARD I E, SHAW J M. Physical activity and the pelvic floor[J]. Am J Obstet Gynecol, 2016,214(2): 164-171.

[6] BOUCHOUCHA M, DEVROEDE G, BON C, et al. How many segments are necessary to characterize delayed colonic transit time? [J]. Int J Colorectal Dis, 2015,30(10): 1381-1389.

[7] BHARUCHA A E, ANDERSON B, BOUCHOUCHA M. More movement with evaluating colonic transit in humans[J]. Neurogastroenterol Motil, 2019,31(2): e13541.

[8] JIANG Y X, KONG H, CHANG T M, et al. Modified colonic transit test in healthy subjects and constipated patients: a triple-phase, two-center prospective study [J]. J Gastroenterol Hepatol, 2021,36(4): 959-967.

[9] VORK L, VAN AVESAAT M H P, VAN HOBOKEN E A, et al. Normal colonic transit time predicts the outcome of colonic manometry in patients with chronic constipation—an exploratory study[J]. Int J Colorectal Dis, 2019,34(10): 1819-1822.

[10] TRIADAFILOPOULOS G, GARDNER J D. Relationship of age and gender to motility test results and symptoms in patients with chronic constipation[J]. Dig Dis Sci, 2024,69(4): 1302-1317.

[11] SUN K L, XIE X Y, HU J X, et al. Degree of transverse colon ptosis: an alternative surrogate for evaluation of slow transit constipation[J]. Quant Imaging Med Surg, 2023,13(9): 5664-5675.

[12] ZHOU B Y, WANG D, CHEN K, et al. The utility of the 24-h delayed film of barium *Enema* for detecting the dysganglionic bowel segment in Hirschsprung's disease[J]. Front Pediatr, 2022,10: 979149.

[13] COSENTINO M, BEATI C, FORNARI S, et al. Defaecography and colonic transit time for the evaluation of female patients with obstructed defaecation[J]. Radiol Med, 2014,119(11): 813-819.

[14] XIE H X, SUN K L. A novel perspective on constipation secondary to sigmoidocele: a retrospective study [J]. Abdom Radiol, 2024,49(1): 249-257.

[15] BLACKETT J W, GAUTAM M, MISHRA R, et al.

Comparison of anorectal manometry, rectal balloon expulsion test, and defecography for diagnosing defecatory disorders[J]. Gastroenterology, 2022, 163(6): 1582-1592.

[16] RENGO M, TIBERIA F, VICINI S, et al. CT colonography: can we achieve an adequate bowel preparation without diet restriction? [J]. Eur Radiol, 2023,33(7): 5184-5192.

[17] UTANO K, NAGATA K, HONDA T, et al. Bowel habits and gender correlate with colon length measured by CT colonography[J]. Jpn J Radiol, 2022,40(3): 298-307.

[18] DILMAGHANI S, LUPIANEZ-MERLY C, FETZER J, et al. Colon volume by computed tomography and scintigraphic colonic transit in constipated patients with or without redundant colon[J]. Clin Gastroenterol Hepatol, 2024,22(11): 2327-2329.

[19] MISTRETTA F, DAMIANI N, CAMPANELLA D, et al. Effect of dose splitting of a low-volume bowel preparation macrogol-based solution on CT colonography tagging quality[J]. Radiol Med, 2022,127(8): 809-818.

[20] CAMILLERI M. Scintigraphic biomarkers for colonic dysmotility[J]. Clin Pharmacol Ther, 2010,87(6): 748-753.

[21] NULLENS S, NELSEN T, CAMILLERI M, et al. Regional colon transit in patients with dys-synergic defaecation or slow transit in patients with constipation [J]. Gut, 2012,61(8): 1132-1139.

[22] GOELEN J, ALEXANDER B, WIJESINGHE H E, et al. Quantification of fluid volume and distribution in the paediatric colon *via* magnetic resonance imaging [J]. Pharmaceutics, 2021,13(10): 1729.

[23] MARK E B, BØDKER M B, GRØNLUND D, et al. MRI analysis of fecal volume and dryness: Validation study using an experimental oxycodone-induced constipation model[J]. J Magn Reson Imaging, 2019, 50(3): 733-745.

[24] ORELLANA B, MONCLÚS E, BRUNET P, et al. A scalable approach to T2-MRI colon segmentation[J]. Med Image Anal, 2020,63: 101697.

[25] KLINGE M W, KROGH K, MARK E B, et al. Colonic volume in patients with functional constipation or irritable bowel syndrome determined by magnetic resonance imaging[J]. Neurogastroenterol Motil, 2022,34(9): e14374.

[26] RAMAGE L, SIMILLIS C, YEN C, et al. Magnetic resonance defecography versus clinical examination and fluoroscopy: a systematic review and meta-analysis [J]. Tech Coloproctol, 2017,21(12): 915-927.

[27] KOBI M, FLUSBERG M, PARODER V, et al. Practical guide to dynamic pelvic floor MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2018,47(5): 1155-1170.

[28] THANARACTHANON P, SASIWIMONPHAN K, SUNTHORNRAM A, et al. Diagnostic performance of dynamic MR defecography in assessment of dyssynergic defecation[J]. Abdom Radiol, 2023, 48(11): 3458-3468.

[29] COLARIETI A, STUTO A, CELLERINO P, et al. Clinical value of MR defecography: What additional knowledge is provided by the radiologist to the surgeon? [J]. Eur J Radiol, 2024,181: 111760.

[30] CHADDOCK G, LAM C, HOAD C L, et al. Novel MRI testsof orocecal transit time and whole gut transit time: studies innormal subjects [J]. Neurogastroenterol Motil, 2014,26(2): 205-214.

[31] ZHI M, ZHOU Z, CHEN H, et al. Clinical application of a gadolinium-based capsule as an MRI contrast agent in slow transit constipation diagnostics[J]. Neurogastroenterol Motil, 2017,29(9): e13020.

[32] SHARIF H, ABREHART N, HOAD C L, et al. Feasibility study of a new magnetic resonance imaging minicapsule device to measure whole gut transit time in paediatric constipation[J]. J Pediatr Gastroenterol Nutr, 2020,71(5): 604-611.

[33] HAHN T, KOZERKE S, SCHWIZER W, et al. Visualization and quantification of intestinal transit and motor function by real-time tracking of ^{19}F labeled capsules in humans[J]. Magn Reson Med, 2011,66(3): 812-820.

[34] PRITCHARD S E, PAUL J, MAJOR G, et al. Assessment of motion of colonic contents in the human colon using MRI tagging[J]. Neurogastroenterol Motil, 2017,29(9): e13091.

[35] VRIESMAN M H, DE JONGE C S, KUIZENGA-WESSEL S, et al. Simultaneous assessment of colon motility in children with functional constipation by cine-MRI and colonic manometry: a feasibility study[J]. Eur Radiol Exp, 2021,5(1): 8.

[36] ORELLANA B, MONCLÚS E, NAVAZO I, et al. End to end colonic content assessment: ColonMetry application[J]. Diagnostics, 2023,13(5): 910.