

基于增强CT门静脉期影像的AI辅助三维影像在肝脏创伤伤情评估中的应用研究

常子越^{1,3}, 张梓怡², 李昊霖^{1,3}, 简子杰^{1,3}, 张晓雨^{1,3}, 张立锦^{1,4}, 王 恺^{1,4}, 贾立静², 吕文平¹

¹解放军总医院肝胆胰外科医学部, 北京 100853; ²解放军总医院急诊科, 北京 100853; ³解放军医学院, 北京 100853; ⁴南开大学医学院, 天津 300071

摘要:背景 二维影像在肝脏创伤伤情评估中存在观察者间差异大、对不规则创伤量化不足等局限。AI辅助的三维影像技术的发展为肝脏创伤的客观量化评估提供了新的可能性, 但其在肝脏创伤诊疗中的应用价值尚未得到系统验证。目的 将AI辅助的三维影像技术纳入肝脏创伤诊疗流程, 从分级准确性、与伤情评分的关联性、预测最终治疗结局的准确性以及量化测量时效性等方面评估其可行性与临床价值。方法 回顾性分析2014年1月1日至2025年9月1日在解放军总医院第一医学中心就诊的109例肝脏创伤患者的临床与影像学资料。所有病例依据2018年美国创伤外科协会(American Association for the Surgery of Trauma, AAST)肝脏创伤分级标准由临床医师基于二维影像及三维影像进行分级, 比较两种方法所形成的AAST分级结果的差异, 以患者的治疗结局为“金标准”, 采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线评估两种方法预测治疗结局的准确性, 采用配对4格表法评估计算预测效能参数, 对比三维重建与二维影像人工勾画在肝体积、创伤体积和腹腔积血量测算中的一致性和时间消耗差异。结果 共纳入肝脏创伤患者109例, 其中男76例(69.7%), 女33例(30.3%), 平均年龄(41.0±15.6)岁, 车祸伤(62.4%)为主要致伤因素, 接受保守治疗78例(71.6%), 手术治疗31例(28.4%)。经二维影像所评估的AAST I~V级分别为22、25、24、28、10例, 三维影像所评估的AAST I~V级分别为22、29、28、18、12例。依据损伤严重程度分类, 三维影像相较于二维影像所评估的重度损伤患者由38例下降至30例, 轻中度损伤患者由71例上升至79例, 三维影像与二维影像中的轻中度损伤与重度损伤患者间的腹部ISS、AIS、Apache II均呈显著差异($P<0.05$)。在治疗结局中, 重度创伤患者中接受手术治疗的例数由44.74%升至63.33%。三维影像AAST分级结果在预测最终治疗结局的准确性方面的曲线下面积(area under the curve, AUC)为0.773, 高于二维影像的0.707。AI辅助三维影像技术的体积测算与二维影像人工勾画保持高度一致, 但时间消耗更低[(29.56±11.46) min vs (57.16±17.32) min, $P<0.001$]。结论 AI辅助三维影像技术能够改善传统二维影像在肝脏创伤伤情评估中的不足, 使分级与实际治疗策略之间的匹配度更高, 同时显著提高量化评估的效率和客观性。三维影像作为一种可行且具有创新性的评估工具, 有望成为肝脏创伤诊疗流程的有益补充。

关键词:肝脏创伤; 三维影像; 二维影像; 计算机断层扫描; 创伤分级; 治疗结局

中图分类号: R657.3+2; R814.42

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2026)01-0051-09

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.25121203

引用本文: 常子越, 张梓怡, 李昊霖, 等. 基于增强CT门静脉期影像的AI辅助三维影像在肝脏创伤伤情评估中的应用研究 [J]. 解放军医学院学报, 2026, 47 (1): 51-59.

Application of AI-assisted three-dimensional imaging based on contrast-enhanced portal venous phase CT in assessment of liver trauma severity

CHANG Ziyue^{1,3}, ZHANG Ziyi², LI Haolin^{1,3}, LIN Zijie^{1,3}, ZHANG Xiaoyu^{1,3}, ZHANG Lijin^{1,4}, WANG Kai^{1,4}, JIA Lijin², LYU Wenping¹

¹Senior Department of Hepato-Pancreato-Biliary Surgery, the First Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China;

²Department of Emergency Medicine, the First Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; ³Chinese PLA Medical School, Beijing 100853, China; ⁴School of Medicine, Nankai University, Tianjin 300350, China

Corresponding author: LYU Wenping. Email: lvwenping301@126.com

Abstract: Background Traditional two-dimensional imaging has limitations in the assessment of liver trauma, such as significant inter-observer variability and insufficient quantification of irregular trauma. The development of AI-assisted three-dimensional imaging technology offers new possibilities for objective and quantitative assessment, yet its application value in the diagnosis and treatment of liver trauma has not been systematically verified. **Objective** To incorporate AI-assisted 3D imaging

收稿日期: 2025-12-12

基金项目: 省部级课题

第一作者: 常子越, 在读硕士, 住院医师。Email: changziyue2024@163.com

通信作者: 吕文平, 博士, 主任医师。Email: lvwenping301@126.com

technology into the liver trauma diagnosis and treatment workflow, and evaluate its feasibility and clinical value in terms of grading accuracy, correlation with trauma scores, accuracy in predicting final treatment outcomes, and efficiency of quantitative measurement. **Methods** The clinical and imaging data of 109 liver trauma patients admitted from January 1, 2014, to September 1, 2025 in the First Medical Center of PLA General Hospital were retrospectively analyzed. All cases were graded by clinicians based on both 2D and 3D images according to the 2018 American Association for the Surgery of Trauma (AAST) liver trauma grading standards, and the differences in AAST grading results between the two methods were compared. Using the patient's treatment outcome as the gold standard, the receiver operating characteristic (ROC) curve was employed to evaluate the accuracy of both methods in predicting treatment outcomes, and predictive efficacy parameters were calculated using paired four-fold tables. Additionally, the consistency and time consumption between 3D reconstruction and 2D manual contouring in measuring liver volume, trauma volume, and hemoperitoneum volume were compared. **Results** A total of 109 patients were enrolled, including 76 males (69.7%), 33 females (30.3%), with the mean age of (41.0±15.6) years. Traffic accidents (62.4%) were the main cause of trauma. Seventy-eight (71.6%) patients received conservative treatment, and 31 (28.4%) underwent surgery. The number of cases graded as AAST I-V by 2D imaging were 22, 25, 24, 28, and 10, respectively; while those assessed by 3D imaging were 22, 29, 28, 18, and 12, respectively. Regarding trauma severity classification, compared with 2D imaging, the number of severe trauma patients identified by 3D imaging decreased from 38 to 30, while mild-to-moderate trauma patients increased from 71 to 79. Significant differences were observed in abdominal ISS, AIS, and APACHE II scores between the mild-to-moderate and severe trauma groups in both 3D and 2D imaging ($P<0.05$). Regarding treatment outcomes, the proportion of patients receiving surgical treatment within the severe trauma group increased from 44.74% (based on 2D classification) to 63.33% (based on 3D classification). The area under the curve (AUC) for 3D AAST grading in predicting final treatment outcomes was 0.773, which was higher than the 0.707 for 2D grading. Volume measurement by AI-assisted 3D imaging showed high consistency with 2D manual contouring but required significantly less time ([29.56±11.46] min vs [57.16±17.32] min, $P<0.001$). **Conclusion** AI-assisted 3D imaging technology can improve upon the limitations of traditional 2D imaging in liver trauma assessment, achieving a better match between grading and actual treatment strategies while significantly enhancing the efficiency and objectivity of quantitative assessment. As a feasible and innovative assessment tool, 3D imaging is expected to serve as a beneficial supplement to the liver trauma diagnosis and treatment workflow.

Keywords: liver trauma; three-dimensional imaging; two-dimensional imaging; computed tomography; trauma grading; treatment outcomes

Cited as: Chang ZY, Zhang ZY, Li HL, et al. Application of AI-assisted three-dimensional imaging based on contrast-enhanced portal venous phase CT in assessment of liver trauma severity[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2026, 47(1): 51-59.

肝脏是腹部创伤中最常涉及的实质性脏器之一。由于肝脏体积大且实质脆弱、血管丰富，其创伤不仅在急诊严重腹部创伤患者中最为多见，也是伤者死亡的首要原因^[1-3]。最新流行病学数据显示，尽管治疗手段不断进步，重度肝脏创伤的病死率仍接近66%^[4]，因此，优化其救治策略仍是急诊与创伤外科面临的一项严峻挑战。近年来，随着影像学技术的进步和临床管理理念的演变，肝脏创伤的诊疗策略逐渐从传统的手术治疗 (operative management, OM) 向保守治疗 (non-operative management, NOM) 转变^[5-7]。治疗策略的选择通常基于患者的血流动力学状态和影像学特征，在血流动力学不稳定的患者中，手术治疗应作为首选，而对于血流动力学稳定的患者，则需通过腹部增强CT进行详细评估^[8-11]。

目前，肝脏创伤的诊疗标准主要依赖美国创伤外科协会(American Association for the Surgery of Trauma, AAST)于2018年提出的肝脏创伤分级量表^[12]。该分级系统通过量化创伤的直径、体积、肝脏创伤百分比以及是否存在活动性出血和腹腔积血，帮助指导治疗决策。然而，由于该分级量

表中存在着大量的量化指标，致使其在临床应用中存在内外部观察者差异、伤情分类不准确等缺陷，也因此降低了对肝脏创伤诊疗决策的精准度，影响了实际应用价值^[13-15]。尽管基于临床常用的影像存档及通讯系统 (picture archiving and communication system, PACS) 通过二维影像进行手工勾画的定量分析在准确性方面具有较高可靠性，但由于肝脏创伤对于伤情评估及医疗干预时效性的独特需求，这种方式尚无法在临床中进行实际应用。因此，如何在保证准确性的同时提升肝脏创伤伤情评估与诊疗决策的时效性，已成为当前临床实践中的关键。

随着自动化三维重建技术的应用，基于二维影像的三维重建已逐渐在临床中得到推广，这一技术的引入推动了肝胆外科疾病诊疗的发展，现已被证实可有效实现肿瘤的精准定位、优化手术方案、降低术中出血及术后并发症风险、改善无复发生存期^[16-18]。然而，迄今为止，尚无研究对三维影像相较于传统二维影像在肝脏创伤诊疗中的优势进行系统性分析。因此，本研究拟基于增强CT门静脉期的AI辅助三维影像技术，评估其在肝

脏创伤 AAST 分级的差异、判别最终治疗结局的准确性与评估效率方面的价值,旨在为三维影像在肝脏创伤诊疗中的应用提供理论依据和基础数据。

1 对象与方法

1.1 研究对象

选取2014年1月1日—2025年9月1日因外伤致肝破裂于解放军总医院第一医学中心就诊患者的临床资料。纳入标准:(1)年龄 ≥ 16 岁;(2)经增强CT影像评估后明确诊断为肝脏创伤。排除标准:(1)缺乏临床及影像资料;(2)影像质量不佳;(3)入院行增强CT前已经进行干预(介入栓塞、置管引流、手术干预)。本研究已通过解放军总医院医学伦理委员会的批准(编号:S2024-163-01)。

1.2 影像检查及资料获取

使用163排CT[Brilliance; 飞利浦医疗(Philips Healthcare)]进行增强CT影像检查。患者仰卧位,扫描范围为膈顶至坐骨结节。0.9%氯化钠注射液稀释非离子造影剂(Omnipac, GE Pharmaceuticals Shanghai); 15~20 s注射的总剂量为1.5~2.0 mL/kg。流速为总药量/注射时间(一般为1.0~1.5 mL/s)。管电压为120 kV,电流为100 mAs,切片厚度为5 mm,准直40 mm,螺距为1 mm,矩阵为 512×512 ,动脉期扫描延迟20 s,门静脉期扫描延迟60 s。扫描后,将CT原始数据和重建的冠状、矢状面图像上传到工作站,以DICOM格式保存图像,通过美迪康临床影像系统导出进行手工勾画及三维重建。

人口统计学特征、格拉斯哥昏迷评分(Glasgow coma scale, GCS)、创伤严重程度评分(injury severity score, ISS)、简明损伤定级标准(abbreviated injury scale, AIS)、急性生理与慢性健康评分(acute physiology and chronic health evaluation, Apache II)均从电子病历及护理记录系统中提取。

1.3 影像学创伤指标定义

本研究依照现有标准^[15,19]选用可提供肝实质峰值强化效果及最佳的实质破损可视性增强CT的门静脉期图像进行肝脏及创伤区域的勾画和三维重建。

(1)腹腔积血(hemoperitoneum)定义为腹膜腔内出现CT值 ≥ 30 HU的高密度游离液体或血块,不呈动脉样强化,主要分布于肝肾隐窝、脾肾隐窝、结肠旁沟、肠系膜及盆腔等腹膜腔潜在间隙。

(2)创伤肝体积(trauma volume, TV)定义为在

同一期门静脉期增强CT上,所有肝实质创伤区域(包括裂伤、挫伤、实质内血肿及缺血/失灌注区)经逐层勾画后合成的三维体积。

(3)肝体积(liver volume, LV)定义为在门静脉期增强CT上,自膈顶至肝下缘逐层勾画肝脏外轮廓(包括肝内血管在内)的总体积,下腔静脉、门静脉主干及其主要分支、胆囊均被排除在感兴趣区域之外。

1.4 二维 AAST 人工评估方法

由一位具有3年以上腹部创伤外科资历的临床医师在经过1个月的系统学习后将所有患者的Dicom格式影像导入RadiAnt DICOMViewer 2023.1中进行审阅,依据2018 AAST肝脏创伤分级标准进行伤情评估。为降低观察者偏倚,二维影像及三维影像分级时不提供患者最终治疗方式及结局信息,分级结果完成记录后锁定保存。其中,依据2020世界急诊外科协会共识^[8]将AAST I~III级的划分为轻-中度创伤组,AAST IV~V级划分为重度创伤组。

1.5 人工勾画方法

二维AAST人工评估时需进行人工勾画。其方法是:使用3D Slicer 5.8.1(勾画软件)从109例中以7:3分层抽样原则随机从AAST I~III级(轻-中度创伤组)与AAST IV~V级(重度创伤组)中随机选取50例进行勾画,严格依据1.3中对各创伤在CECT门静脉期的定义标准采用画笔工具逐层沿肝脏创伤区域、肝脏及腹腔积血的边缘进行勾画,将最终感兴趣区域导入3D Slicer中的Model部分自动通过逐层累加获得总体积,最终测算结果以nrrd格式保存。在勾画的同时以第一笔勾画为起点直至最后一笔勾画结束为时间记录区间,采用桌面计时器进行计时并拍照记录。

1.6 基于增强CT门静脉期数据的AI辅助三维影像技术的三维重建方法

本研究采用基于增强CT门静脉期DICOM数据的AI辅助三维影像技术进行三维重建。三维重建过程在一图智能公司协助开发的三维重建程序中完成,该程序基于AI分割实现肝脏、肝创伤及腹腔积血的半自动三维重建:(1)肝脏分割通过AI自动完成,修正超出边界的部分并填充缺失区域,最终使用曲面分割微调,确保与影像数据完全吻合。(2)肝创伤区域的分割通过设定阈值范围提取,使用种子点方法提取创伤区域并去除干扰,结合布尔运算限定创伤区域,进一步通过裁切、闭运

算和表面平滑工具修正。腹腔积血的重建首先使用单步分割提取区域,通过裁切和布尔运算去除干扰,确保出血区域无孔洞,再用曲面分割调整边界。需要说明的是,本研究所称的AI辅助三维重建主要指AI算法在肝脏及肝创伤区域的初步识别与分割中的辅助作用,三维重建结果经由人工校正与确认后获得,并非全流程自动化重建。

1.7 治疗结局及其他分析指标

本研究以患者住院期间的最终治疗结局作为伤情评估的临床金标准。在本中心对于肝脏创伤患者治疗方案的选择不单纯依赖AAST分级,而是由高年资创伤外科医师根据患者的生理状态、实验室检验及影像学指标共同决策。依据指南共识^[8],对于入院血流动力学患者的初始治疗均以NOM为主。本研究通过查阅电子病历及护理记录,对最终治疗结局定义如下:(1)OM:指在病程中因各种原因(如持续出血、血流动力学不稳定、保守治疗失败等)导致必须进行外科手术干预的患者。(2)NOM:指在严密监护下接受药物治疗、穿刺引流或血管介入栓塞等非手术干预手段后,病情得到有效控制的患者。

1.8 样本量估计

本研究以治疗方式为二分类结局,比较二维影像AAST分级与三维影像AAST分级判别最终治疗方式的准确性的能力。样本量按两条受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线的曲线下面积(area under the curve, AUC)差异的Z检验估算,并采用Hanley - McNeil方法近似AUC方差。查阅文献^[20-22],AUC差值设定为0.15(三维AUC=0.85,二维AUC=0.70),检验水准取双侧 $\alpha=0.05$,把握度 $1-\beta=0.80$ 。研究对象按手术:保守=1:2纳入,计算得到至少需纳入81例。

1.9 统计学方法

所有的统计分析均在GraphPad Prism 10中进行,其中计量资料符合正态分布以 $\bar{x}\pm s$ 表示,组间比较采用两样本独立t检验;非正态分布参数以M(IQR)表示,组间比较采用Mann-Whitney秩和检验。计数资料组间比较采用 χ^2 检验或Fisher精确检验。采用斯皮尔曼相关性分析判断二维影像与三维影像对肝脏创伤影像参数的测算结果的相关性。采用ROC曲线计算模型的AUC,并以配对四格表预测价值分析法,对比二维影像AAST分级与三维影像AAST分级的伤情评估的能力。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 纳入资料的基本情况

共收集109例临床患者资料,其中男76例(69.7%),女33例(30.3%),平均年龄(41.0 \pm 15.6)岁,主要致伤类型为车祸伤(62.4%),保守治疗78例(71.6%),手术治疗31例(28.4%)。见表1。

表1 肝脏创伤患者一般资料

Tab. 1 General characteristics of patients with liver trauma

指标	数据
年龄/(岁, $\bar{x}\pm s$)	41.0 \pm 15.6
性别/(例, %)	
男	76(69.7)
女	33(30.3)
致伤因素/(例, %)	
车祸伤	68(62.4)
钝性伤	18(16.5)
其他	23(21.1)
治疗方案/(例, %)	
保守治疗	78(71.6)
手术治疗	31(28.4)

2.2 二维影像及三维影像的AAST分级及不同级别间基线特征比较

在109例患者的影像评估中,二维影像所评估的AAST I~V级分别有22、25、24、28、10例,三维影像所评估的AAST I~V级分别有22、29、28、18、12例。图1展示了二维影像及三维影像AAST的分级结果及流向,其中二维影像与三维影像在AAST I级的分级结果一致。与二维影像相比,三维影像AAST分级在总体分布上2级与3级病例数增加(分别由25例增至29例、由24例增至28例),4级病例数减少(由28例降至18例),5级病例数小幅增加(由10例增至12例)。

依据创伤是否严重分类,与二维影像相比,三维影像评估下重度创伤病例数减少8例(38例降至30例),对应比例下降7.4个百分点(34.9%降至27.5%);轻-中度创伤病例数相应增加8例(71例增至79例),比例上升7.4个百分点(65.1%增至72.5%)。见图2。

表2呈现了依据损伤严重程度分组的二维影像及三维影像进行AAST分级后的基线特征,在二维影像AAST分级中,重度创伤(AAST IV~V级)患者为38例,轻-中度创伤(AAST I~III级)患者为71例,重度损伤患者与轻-中度损伤患者在年龄、性别及GCS方面差异均无统计学意义($P>0.05$)。两

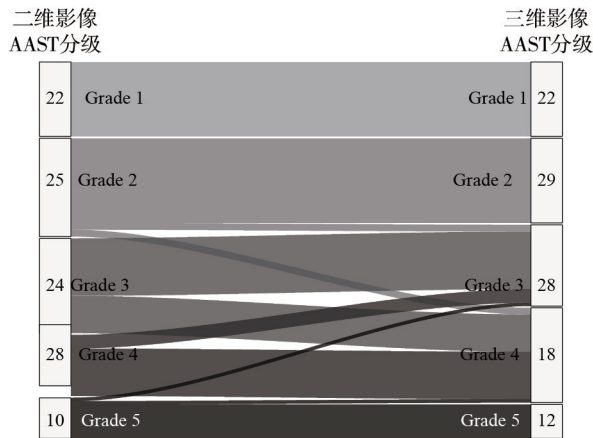


图1 二维影像及三维影像 AAST 的分级流向图

Fig. 1 Sankey diagram of AAST grading based on two-dimensional and three-dimensional imaging

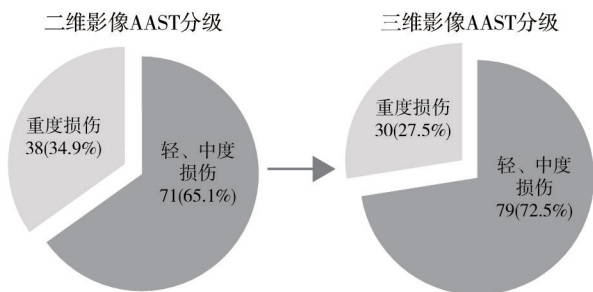


图2 严重程度的人数分布变化

Fig. 2 Changes in the distribution of patient number by injury severity

组间腹部 AIS 分级差异有统计学意义 ($P=0.024$)。重度创伤(AAST IV ~ V级)患者的 ISS ($P=0.041$)及 APACHE II 评分 ($P=0.026$)显著高于轻-重度创伤组。在三维影像评估中,重度创伤(AAST IV ~ V级)患者为 30 例,轻-中度创伤(AAST I ~ III级)患者为 79 例,年龄、性别及 GCS 评分差异仍无统计学意义 ($P>0.05$)。腹部 AIS ($P<0.001$)、ISS ($P=0.013$)及 APACHE II ($P=0.008$)组间仍有显著差异。在治疗决策方面,经三维校准后重度创伤组中最终接受手术治疗的 比例由 44.74% 进一步提升至 63.33%。见表 2。

2.3 二维影像与三维影像的 AAST 分级判断最终治疗结局能力

以 AAST IV ~ V 级(重度创伤)最终接受 OM 作为阳性事件 ($n=31$),以 AAST I ~ III 级(轻-中度创伤)最终接受 NOM 作为阴性事件 ($n=78$),分别对二维影像及三维影像 AAST 分级进行 ROC 分析。二维影像 AAST 分级的 AUC (95% CI) 为 0.707 (0.604 ~ 0.810),三维影像 AAST 分级的 AUC (95% CI) 为 0.773 (0.673 ~ 0.873)。见图 3。

再以配对 4 格表法评估计算各效能参数。二维

影像 AAST 分级的灵敏度、特异度、准确度分别为 0.548 (17/31)、0.731 (57/78)、0.679 (74/109)。阳性预测值和阴性预测值分别为 0.447 (17/38) 和 0.803 (57/71),约登指数为 0.279。而三维影像 AAST 分级的灵敏度、特异度分别为 0.613 (19/31)、0.859 (67/78)、0.789 (86/109),其阳性预测值提升至 0.633 (19/30),阴性预测值提升至 0.848 (67/79),约登指数也升至 0.472。在一致性检验方面,三维影像与最终治疗决策的一致性系数 (Kappa=0.477) 虽属中等强度,但明显优于二维影像 (Kappa=0.261)。见表 3。统计推断显示,二维和三维影像所决策的 AAST 分级判定结果,均显著关联于结局事件(最终治疗方式)(关联性检验 $P<0.05$),但二维影像对结局事件的发现相较于三维影像呈现显著劣势(优势特性检验 $P<0.05$)。

2.4 三维影像重建时间对比二维影像人工勾画时间

在 50 例肝脏创伤 CECT 影像学创伤指标的容积测量中,三维影像重建所需中位时间为 26.00 (IQR: 19.00 ~ 38.50) min,临床医师勾画中位时间为 59 (IQR: 41.75 ~ 70.50) min,三维重建与临床医师时间消耗均值差异(均值差 \pm 标准差)达 (27.60 \pm 2.94) min,三维影像重建所需时间相较于临床医师手工勾画时间明显更短 ($P<0.001$)。见表 4。

2.5 三维影像重建与二维影像人工勾画的肝体积等数据的差异比较及相关关系

三维影像重建与二维影像人工勾画在创伤肝体积、肝体积及腹腔积血量的测算结果差异均无显著意义 ($P>0.05$),对比两者的均值差异,其中肝体积 (24.90 \pm 82.94) mL、创伤肝体积 (12.70 \pm 41.02) mL、腹腔积血量 (82.89 \pm 101.4) mL。见表 5。经斯皮尔曼线性相关性分析显示,肝体积 ($R^2=0.9441$, $P<0.001$)、创伤肝体积 ($R^2=0.889$, $P<0.001$)、腹腔积血量 ($R^2=0.884$, $P<0.001$),即均呈显著相关性。见图 4。

3 讨论

肝脏是腹部创伤中最常受累的实质性器官,也是导致创伤患者死亡的主要原因之一^[1,2,8,23]。随着损伤控制外科理念的普及和影像技术的进步,非手术治疗(non-operative management, NOM)已成为血流动力学稳定患者的首选方案,即便对于部分严重肝外伤患者,NOM 也能取得良好的预后^[24-26]。然而,严重肝创伤(特别是 AAST III ~ V

表 2 二维影像对比三维影像 AAST 分级的基线特征

Tab. 2 Baseline characteristics of injury grade comparing AAST grading based on two-dimensional versus three-dimensional imaging

指标	二维影像 AAST 分级		P 值	三维影像 AAST 分级		P 值
	I ~ III级(n=71)	IV ~ V级(n=38)		I ~ III级(n=79)	IV ~ V级(n=30)	
年龄/(岁, $\bar{x}\pm s$)	41.3 ± 14.2	40.5 ± 18.1	0.819	41.6 ± 15.2	39.4 ± 16.9	0.679
性别/(例, %)			0.510			0.057
女	23(32.4)	10(26.3)		28(35.4)	5(16.7)	
男	48(67.6)	28(73.7)		51(64.6)	25(83.3)	
腹部 AIS/(例, %)			0.024			<0.001
1	0(0)	0(0)		0(0)	0(0)	
2	16(22.5)	1(2.6)		17(21.5)	0(0)	
3	17(23.9)	8(21.1)		22(27.9)	3(10.0)	
4	20(28.2)	15(39.5)		19(24.1)	16(53.3)	
5	18(25.4)	14(36.8)		21(26.6)	11(36.7)	
ISS 评分/($\bar{x}\pm s$)	21.63 ± 10.53	26.37 ± 12.58	0.041	21.73 ± 10.72	27.37 ± 12.49	0.013
GCS 评分/(例, %)			0.725			0.738
13-15	49(69.0)	25(65.8)		55(69.6)	19(63.3)	
9-12	20(28.2)	11(29.0)		21(26.6)	10(33.3)	
6-8	1(1.4)	0(0)		1(1.3)	0(0)	
3-5	1(1.4)	2(5.3)		2(2.5)	1(3.3)	
ApacheII/($\bar{x}\pm s$)	13.97 ± 5.21	16.34 ± 5.25	0.025	13.97 ± 5.43	16.97 ± 4.398	0.008
治疗决策/(例, %)			0.006			<0.001
NOM	57(80.3)	21(55.3)		67(84.8)	11(36.7)	
OM	14(19.7)	17(44.7)		12(15.2)	19(63.3)	

手术治疗:OM(operative management);保守治疗:NOM(non-operative Management)。

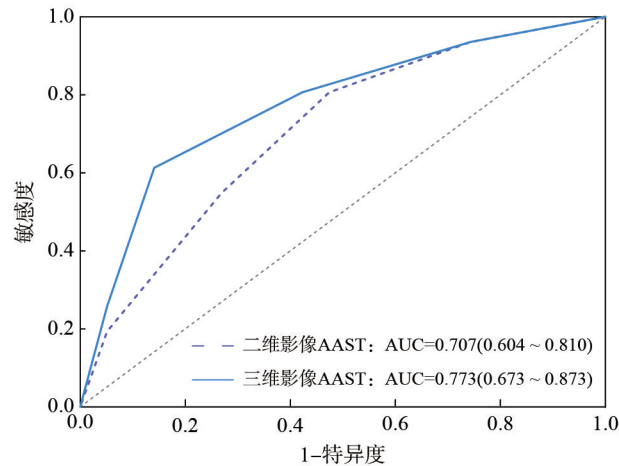


图 3 三维影像与二维影像 AAST 分级的 ROC 曲线对比

Fig. 3 Comparison of ROC curves for AAST grading based on three-dimensional versus two-dimensional imaging

级)往往伴随高出血风险和胆道并发症,精准的伤情评估对于早期识别高危患者、制定合理的干预策略(如血管栓塞或手术)至关重要^[27-29]。目前,创伤外科医师在临床实践中通常基于二维影像并依据 AAST 分级标准评估肝脏创伤程度。然而,该过程不仅要求医师熟练掌握多项影像判定要点,还

表 3 二维影像与三维影像的 AAST 分级对最终治疗结局的预测结果

Tab. 3 Treatment-decision prediction results using AAST grading from 2D and 3D imaging

数据属性	指标/参数	二维影像判断	三维影像判断
		IV ~ V/I ~ III(n)	(IV ~ V/I ~ III)(n)
金标准	+(OM, n=31)	17/14	19/12
	-(NOM, n=78)	21/57	11/67
预测效能	诊断阈值	AAST≥4	AAST≥4
参数	灵敏度(n/N)	0.548(17/31)	0.613(19/31)
	特异度(n/N)	0.731(57/78)	0.859(67/78)
	准确度(n/N)	0.679(74/109)	0.789(86/109)
	约登指数	0.279	0.472
	阳性预测值(n/N)	0.447(17/38)	0.633(19/30)
	阴性预测值(n/N)	0.803(57/71)	0.848(67/79)
	一致性系数 Kappa	0.261	0.477
统计推断	关联性检验/ χ^2, P	6.433, 0.011	22.453, <0.001
	优势性检验/ χ^2, P	41.694, <0.001	25.713, <0.001

需要在二维切面基础上完成对三维解剖结构的主观重构,并选择合适的测量层面与方向进行判断。因此,该评估高度依赖个人经验,易产生观察者差异,尤其在工作负荷过重、经验不足或疲劳状

表4 三维影像重建时间对比二维影像人工勾画的时间消耗

Tab. 4 Comparison of time consumption between three-dimensional image reconstruction and manual delineation based on two-dimensional imaging

变量	三维影像	二维影像人工勾画	P值
时间消耗/(min, $\bar{x}\pm s$)	29.56 ± 11.46	57.16 ± 17.32	<0.001

表5 三维影像重建与二维影像人工勾画的肝体积等数据的差异比较 (mL, $\bar{x}\pm s$)

Tab. 5 Comparison of differences in liver volume and related metrics between 3D image reconstruction and manual 2D image segmentation (mL, $\bar{x}\pm s$)

变量	三维影像	二维影像人工勾画	P值
肝体积	1 549.0±427.3	1 524.0±401.7	0.765
创伤肝体积	266.8±214.9	254.1±194.8	0.758
腹腔积血	514.1±501.2	431.2±513.1	0.416

态下更可能出现伤情评估偏差^[30-31]。传统三维影像可视化技术虽可实现病变的精准定位与量化,但在创伤诊疗领域尚缺乏客观比较研究,相关证据仍有限。基于此,本研究采用AI辅助三维重建技术,对肝脏、创伤区域及腹腔积血进行整体重建与定量测算,并从分级变化及差异、伤情评估准确性以及治疗结局预测能力三个临床维度进行分析,同时比较该技术的时间消耗与准确性,以评估其在急症场景中的潜在应用价值。

在本研究中,首先基于二维影像对109例肝脏创伤患者按2018版AAST肝脏创伤分级标准进行评估,其次依据三维影像的定量化结果以相同标准进行重新分级。结果显示,共有20例(18.35%)患者的AAST等级发生改变。进一步按创伤严重程度分类后发现,有8例(7.34%)患者在三维影像重新评估后由重度创伤调整为轻-中度创伤。就治疗结局预测而言,三维影像对重度创伤患者中接受

OM的治疗结果占比由44.74%提高至63.33%,ROC分析AUC由0.707提升至0.773。需要指出的是,即便在三维影像评估的重度创伤患者中,未接受OM的患者占比仍为36.67%,这可能与AAST肝脏创伤分级标准本身的适用边界有关;Piper等^[32]亦发现,在重度创伤人群中仍可能存在约三分之一患者适用于NOM。这一现象深刻反映了AAST标准作为一种纯形态学分级系统的局限性:它仅精确描述了脏器的解剖损伤程度,却无法涵盖决定治疗策略的关键生理指标,即血流动力学稳定性。这也合理解释了本研究中三维影像虽具有极高的特异度(0.859)和显著的统计学关联,但与最终手术结局的一致性系数(Kappa=0.477)仍未达到高度一致的原因。即在损伤控制外科理念下,影像学判定的重度损伤并不完全等同于临床上的绝对手术指征,只要患者生命体征平稳,即便三维影像证实存在高级别损伤,保守治疗仍是合理的选择。

综上所述,三维影像应用于伤情评估时,在反映局部器官创伤严重度与全身创伤负荷方面表现出更好的分层能力^[33],也因此进一步识别出了真正需要进行OM的患者。现有研究也证实,基于深度学习的自动化容积测量模型在区分肝脏创伤严重程度方面具有极高的准确性(AUC>0.94)^[34],且相较于传统二分类法能更有效地预测血管栓塞等干预需求^[15]。从评估过程进一步分析,导致伤情严重程度判断差异的关键指标之一为“创伤体积是否超过肝体积的25%”。在二维影像条件下,该阈值往往只能凭经验于不同层面以创伤面积占比进行近似推断,易受观察者主观因素影响而导致误判;而三维影像通过精准定量的优势,将该分界条件由主观估计转化为可重复的客观量

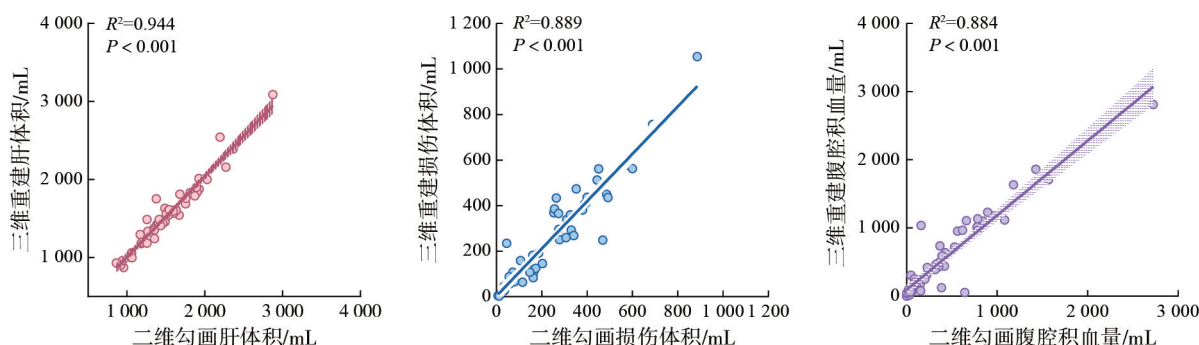


图4 三维影像重建与二维影像人工勾画的各参数的相关性比较

Fig. 4 Comparison of correlation among parameters between three-dimensional image reconstruction and manual delineation based on two-dimensional imaging

化结果,从而有望降低分级的观察者差异并提高一致性^[14]。

尽管三维影像技术在既往研究中多用于肝胆肿瘤的术前规划,被认为有助于理解肿瘤与肝内血管、胆管的空间关系,优化切除范围与术式选择,并可能降低术中出血、缩短手术时间或住院时间^[16,35],但上述应用通常发生于相对稳定的择期场景:影像质量更可控、术前准备时间充足,且团队可进行多轮方案推演与沟通。与之相比,肝脏创伤属于典型的急症快速决策场景,其核心挑战在于如何在有限时间内以尽可能客观一致的信息完成分级与处置选择。因此,三维影像在创伤领域的价值不再局限于更精细的解剖展示,而更强调“时效性与可用性”:即在急诊流程内快速生成可落地的量化信息,为决策提供直接支持。

本研究结果显示,基于AI辅助的三维重建技术与人工勾画结果高度一致的前提下,将平均时间消耗由59 min缩短至26 min。结合AI与算法辅助的创伤区域测算能够更快识别创伤范围,尤其在不规则创伤、星芒状创伤以及游离于肠间隙内的腹腔积血等情形中,可显著优化测算时间。本研究所采用的三维重建方法并未进行预训练,因此仍需最终人工校准;已有研究尝试利用深度学习实现肝实质与创伤区域的三维自动分割^[15,34],但如何实现多指标同步分割并进一步提升时效性与准确性,仍需在更大样本与多中心数据上持续探索。

在临床转化路径方面,三维影像技术可以通过自动化处理流程嵌入现有急诊创伤诊疗路径中。急诊CT检查后,系统可以自动触发AI辅助分割与三维重建,进而完成肝脏及创伤区域的三维模型生成,并输出相关量化数据。这些信息可以通过结构化报告回传至PACS或电子病历系统,供创伤外科、放射科和介入团队在同一界面快速查看和讨论。为保证急诊场景下的可用性与一致性,上述流程宜在尽量不增加一线操作负担的前提下实现半自动或自动化输出,并设置简洁的质控环节以应对分割失败或边界误差等情况。培训可侧重于量化指标的临床解释、阈值判读与常见误差识别;资源增量主要来自计算与系统对接及值班质控的人力安排,其可行性仍需在真实急诊流程中评估其对周转效率与决策质量的综合收益。

将三维影像可视化技术整合入急诊创伤诊疗路径,其意义已超越单纯工具引入的范畴。在影

像判读层面,三维重建可提升肝脏创伤评估的客观性与流程化程度,推动由传统定性分析向定量分析转变。三维影像提供的空间量化数据,可与生命体征、检验结果及其他影像特征共同作为多模态输入,构建机器学习预测模型,从而为肝脏创伤的精准诊断与个体化治疗提供支撑。

本研究亦存在一定局限性。首先,本研究为回顾性分析,可能存在选择偏倚及数据缺失。其次,治疗方式可能受到影像评估影响,仍存在一定循环论证风险;未来可通过独立专家共识分级,并结合术中所见或随访影像建立更客观的参考标准,开展前瞻性验证研究。第三,在时效性与准确性对比中未纳入高年资创伤外科医师及专业创伤影像科医生进行比较,未来可进一步评估不同经验层次医师在三维影像辅助下的收益差异。最后,尽管本研究验证了三维影像分级的准确性与决策支持效率,但仍需在前瞻性研究中进一步探讨这些改进能否转化为更优的临床结局。

综上,AI辅助三维重建技术在肝脏创伤评估中具有显著优势。通过提供客观量化的创伤占比、积血量等指标,可减少分级过程中的主观差异,提高治疗结局预测的准确性,并缩短获取关键指标的时间。随着技术进一步成熟与推广,三维影像有望成为肝脏创伤快速决策体系中的重要组成部分。

作者贡献 常子越:数据分析、影像处理、论文撰写;张梓怡:数据分析、论文撰写;李昊霖:数据收集、数据分析;蔺子杰:数据分析、审读和修订;张晓雨:审读和修订;张立锦:影像收集、数据分析;王恺:影像、数据收集;贾立静:审读和修订;吕文平:审读和修订, 监督指导;

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

数据共享声明 本论文相关数据可依据合理理由从作者处获取, Email: Changziyue2024@163.com。

参考文献

- 1 Villegas W, Vaughan J. Trends in reduction of mortality in liver trauma [J]. Crit Care Nurs Clin North Am, 2022, 34 (3): 351-359.
- 2 Pillai AS, Kumar G, Pillai AK. Hepatic trauma interventions [J]. Semin Intervent Radiol, 2021, 38 (1): 96-104.
- 3 彭钊, 王明达, 沈锋. 《2020年世界急诊外科学会指南: 肝创伤的分类与管理》摘译 [J]. 临床肝胆病杂志, 2020, 36 (6): 1234-1240.
- 4 Obaid O, Torres-Ruiz T, Rady E, et al. Contemporary epidemiologic overview of adult liver trauma management across

- the United States: Analysis of the American College of Surgeons Trauma Quality Improvement Program database [J]. *Surgery*, 2025, 183: 109390.
- 5 Ahmed N, Vernick JJ. Management of liver trauma in adults [J]. *J Emerg Trauma Shock*, 2011, 4 (1): 114-119.
 - 6 Brooks A, Reilly JJ, Hope C, et al. Evolution of non-operative management of liver trauma [J]. *Trauma Surg Acute Care Open*, 2020, 5 (1): e000551.
 - 7 Suen K, Skandarajah AR, Knowles B, et al. Changes in the management of liver trauma leading to reduced mortality: 15-year experience in a major trauma centre [J]. *ANZ J Surg*, 2016, 86 (11): 894-899.
 - 8 Coccolini F, Coimbra R, Ordonez C, et al. Liver trauma: WSES 2020 guidelines [J]. *World J Emerg Surg*, 2020, 15 (1): 24.
 - 9 Kaptanoglu L, Kurt N, Sikar HE. Current approach to liver traumas [J]. *Int J Surg*, 2017, 39: 255-259.
 - 10 Saleh AF, Al Sageer E, Elheny A. Management of liver trauma in *Minia* University hospital, Egypt [J]. *Indian J Surg*, 2016, 78 (6): 442-447.
 - 11 于英蛟, 刘春鹤, 贺焱. 超声与CT比较诊断对肝脾创伤诊断的临床应用价值 [J]. *临床医药文献电子杂志*, 2018, 5 (77): 153.
 - 12 Kozar RA, Crandall M, Shanmuganathan K, et al. Organ injury scaling 2018 update: Spleen, liver, and kidney [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2018, 85 (6): 1119-1122.
 - 13 Field X, Crichton J, Kong V, et al. AAST grade of liver injury is not the single most important consideration in decision making for liver trauma [J]. *Injury*, 2024, 55 (9): 111526.
 - 14 Farzaneh N, Stein EB, Sorousmehr R, et al. A deep learning framework for automated detection and quantitative assessment of liver trauma [J]. *BMC Med Imaging*, 2022, 22 (1): 39.
 - 15 Dreizin D, Chen TN, Liang YY, et al. Added value of deep learning-based liver parenchymal CT volumetry for predicting major arterial injury after blunt hepatic trauma: a decision tree analysis [J]. *Abdom Radiol*, 2021, 46 (6): 2556-2566.
 - 16 Zeng XJ, Tao HS, Dong YC, et al. Impact of three-dimensional reconstruction visualization technology on short-term and long-term outcomes after hepatectomy in patients with hepatocellular carcinoma: a propensity-score-matched and inverse probability of treatment-weighted multicenter study [J]. *Int J Surg*, 2024, 110 (3): 1663-1676.
 - 17 Zanframundo C, Gjoni E, Germini A, et al. The impact of 3D reconstruction technology on liver surgery in changing the pathway of surgical maneuvers: A case report [J]. *Int J Surg Case Rep*, 2024, 120: 109886.
 - 18 Guo D, Zhu XY, Han S, et al. Evaluating the use of three-dimensional reconstruction visualization technology for precise laparoscopic resection in gastroesophageal junction cancer [J]. *World J Gastrointest Surg*, 2024, 16 (5): 1311-1319.
 - 19 Iacobellis F, Fraum TJ, Romano L, et al. Imaging of blunt hepatic and biliary injuries [M] //Atlas of Emergency Imaging from Head-to-Toe. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025: 313-325.
 - 20 Marmery H, Shanmuganathan K, Alexander MT, et al. Optimization of selection for nonoperative management of blunt splenic injury: comparison of MDCT grading systems [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2007, 189 (6): 1421-1427.
 - 21 Dreizin D, Champ K, Dattwyler M, et al. Blunt splenic injury in adults: Association between volumetric quantitative CT parameters and intervention [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2023, 94 (1): 125-132.
 - 22 Koca B, Karabulut K, Ozbalci GS, et al. Is it possible to use transaminases for deciding on surgical or non-operative treatment for blunt liver trauma? [J]. *Wien Klin Wochenschr*, 2015, 127 (23): 954-958.
 - 23 Coccolini F, Montori G, Catena F, et al. Liver trauma: WSES position paper [J]. *World J Emerg Surg*, 2015, 10: 39.
 - 24 Alghamdi HM. Management of liver trauma [J]. *Saudi J Med Med Sci*, 2017, 5 (2): 104-109.
 - 25 Boese CK, Hackl M, Müller LP, et al. Nonoperative management of blunt hepatic trauma: A systematic review [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2015, 79 (4): 654-660.
 - 26 Schembari E, Sofia M, Latteri S, et al. Blunt liver trauma: effectiveness and evolution of non-operative management (NOM) in 145 consecutive cases [J]. *Updates Surg*, 2020, 72 (4): 1065-1071.
 - 27 Hetherington A, Cardoso FS, Lester ELW, et al. Liver trauma in the intensive care unit [J]. *Curr Opin Crit Care*, 2022, 28 (2): 184-189.
 - 28 Yu WY, Li QJ, Gong JP. Treatment strategy for hepatic trauma [J]. *Chin J Traumatol*, 2016, 19 (3): 168-171.
 - 29 Lada NE, Gupta A, Anderson SW, et al. Liver trauma: hepatic vascular injury on computed tomography as a predictor of patient outcome [J]. *Eur Radiol*, 2021, 31 (5): 3375-3382.
 - 30 Li FJ, Gao QY, Wang NY, et al. Mixed reality guided root canal therapy [J]. *Healthc Technol Lett*, 2024, 11 (2/3): 167-178.
 - 31 Dong JH, Ai DN, Fan JF, et al. Local-global active contour model based on tensor-based representation for 3D ultrasound vessel segmentation [J/OL]. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/abfc92>.
 - 32 Piper GL, Peitzman AB. Current management of hepatic trauma [J]. *Surg Clin North Am*, 2010, 90 (4): 775-785.
 - 33 Hermans S, Hu ZX, Ball RL, et al. RSNA 2023 abdominal trauma AI challenge: review and outcomes [J]. *Radiol Artif Intell*, 2025, 7: e240334.
 - 34 Huang SG, Zhou ZY, Qian XS, et al. Automated quantitative assessment of pediatric blunt hepatic trauma by deep learning-based CT volumetry [J]. *Eur J Med Res*, 2022, 27 (1): 305.
 - 35 Banchini F, Capelli P, Hasnaoui A, et al. 3-D reconstruction in liver surgery: a systematic review [J]. *Hpb*, 2024, 26 (10): 1205-1215.

(责任编辑:潘越,施晓亚)