

## · 临床研究 ·

## 能谱 CT 脊髓前动脉造影在颈髓损伤患者中应用价值的初步探讨

朱旻宇<sup>1,2</sup>, 田纪伟<sup>1</sup>, 滕红林<sup>2</sup>, 吴诗阳<sup>2</sup>, 王宇<sup>2</sup>, 王靖<sup>2</sup>, 王镇章<sup>3</sup>

(1. 南京医科大学附属上海一院临床医学院, 上海 200000; 2. 温州医科大学附属第一医院脊柱外科, 浙江 温州 325000; 3. 温州医科大学附属第一医院放射影像科, 浙江 温州 325000)

**【摘要】** 目的:探讨能谱 CT 脊髓前动脉造影在颈髓损伤患者中的应用价值,评价脊髓前动脉血流量改变与术后神经功能恢复的相关性。方法:2014 年 1 月至 2016 年 6 月对 30 例颈髓损伤患者行颈后路单开门椎管成形术治疗,其中男 21 例,女 9 例;年龄 33~59(46.4±9.7)岁;均在伤后 2 周内接受颈后路单开门椎管成形术,其中开门减压 3 节段 8 例,4 节段 18 例,5 节段 4 例。术前 3 d 内及术后 5 d 进行能谱 CT 检查,重建脊髓前动脉并评估其术后血流量改善情况;术前 1 d,术后 5 d 及 1、6、12 个月对患者进行颈椎 JOA 评分,并计算相应随访点术后 JOA 评分改善率。结果:所有患者获得随访,时间 12~30(17.4±7.6)个月。术前术后脊髓前动脉碘含量比值(ASA/VA)分别为 0.75±0.20、0.89±0.02,术后较术前有显著改善( $P<0.01$ ),术后平均 ASA/VA 改善率为(21.05±12.45)%,且血流改善程度与术后 1、6、12 个月 JOA 评分改善程度之间存在线性正相关。结论:能谱 CT 脊髓前动脉造影安全可行,成像满意,可定量评价脊髓前动脉血流量的改善程度;脊髓前动脉血流改善程度与神经功能恢复程度之间存在线性正相关,术后早期的脊髓前动脉血流改善程度或可作为预判患者神经功能恢复的参考指标之一。

**【关键词】** 能谱 CT; 脊髓前动脉; 血管造影术; 脊髓损伤

DOI:10.3969/j.issn.1003-0034.2018.05.006

**Application of Gemstone Spectrum Imaging for anterior spinal artery in patients with cervical spinal injury** ZHU Min-yu, TIAN Ji-wei\*, TENG Hong-lin, WU Shi-yang, WANG Yu, WANG Jing, and WANG Zhen-zhang. \*Shanghai General Hospital of Nanjing Medical University, Shanghai 200000, China

**ABSTRACT Objective:** To discuss the value of Gemstone Spectrum Imaging (GSI) CT anterior spinal artery angiography in the patients with cervical spinal cord injury, and to evaluate the correlation between the change of the blood flow of the anterior spinal artery and the postoperative recovery of nerve function. **Methods:** From January 2014 to June 2016, thirty patients who underwent cervical open door laminoplasty for spinal cord injury were retrospective analyzed and included 21 males and 9 females with an average age of (46.4±9.7) years old ranging from 33 to 59 years. Within 2 weeks after injury, open door laminoplasty was performed through cervical posterior approach. Among them, there were 8 cases of 3 segments of open door decompression, 18 cases of 4 segments, 4 cases of 5 segments. GSI CT were performed at 3 days before operation and 5 days after operation. The anterior spinal artery was reconstructed and evaluated the improvement of blood flow after operation. The cervical JOA score was calculated at 1 day before operation, 5 days after operation and 1, 6 and 12 months after operation, and the JOA score improvement rate of the corresponding follow-up points was calculated. **Results:** All patients were followed up for 12 to 30 months with an average of (17.4±7.6) months. The iodine content ratio (ASA/VA) of the anterior spinal artery before and after operation was 0.75±0.20 and 0.89±0.02 respectively, the postoperative improvement was significantly higher than that before operation ( $P<0.01$ ). The average ASA/VA improvement rate was (21.05±12.45)% after operation. There was a positive linear correlation between the improvement of blood flow and the improvement of JOA score at 1, 6 and 12 months after operation. **Conclusion:** GSI CT anterior spinal artery angiography is safe and feasible, the imaging is satisfactory, it can quantitatively evaluated the blood flow of the anterior spinal artery. There was a positive linear correlation between the improvement of blood flow in anterior spinal artery and the recovery of neurological function. Early postoperative improvement of blood flow in the anterior spinal artery can be used as a reference index for predicting the recovery of neurological function in patients.

**KEYWORDS** Spectral CT; Anterior spinal artery; Angiography; Spinal cord injury

Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2018, 31(5):425-430 www.zggszz.com

基金项目:温州市科技局公益性科技计划项目(编号:Y20170082)

Fund program: Science-Technology Program of Wenzhou Municipal Sci-Tech Bureau (No. Y20170082)

通讯作者:田纪伟 E-mail:tjw609@163.com

Corresponding author: TIAN Ji-wei E-mail:tjw609@163.com

脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)是脊柱外科常见疾病,SCI的原发性损伤是不可逆的,其诱发了继发性损伤级联机制,脊髓受压的程度、髓内出血的多少和脊髓肿胀的程度是影响神经功能恢复的不良因素<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着影像技术和设备的进步,CT、MRI等手段在脊髓损伤的诊断、治疗及预后评估中起到越来越重要的作用<sup>[3-4]</sup>,尤其是MRI,被认为是SCI诊断的“金标准”<sup>[5]</sup>。但由于传统的CTA和MRA无法对脊髓血管进行有效的显影<sup>[6-7]</sup>,且无法定量测定血流量,因此脊髓动脉造影及相关研究一直存在较大的局限。颈髓损伤后脊髓动脉是否存在损伤并因此导致脊髓供血不足,减压术后脊髓前动脉血流是否改善,其血流改善是否同术后神经功能的恢复存在关联,这些问题一直存在较大争议。能谱CT自问世以来,在临床各个领域体现了巨大的应用价值,被称为CT发展划时代的技术革新。能谱CT技术应用于颈髓动脉成像目前尚未见相关文献报道,从理论上讲,该技术将更有利于纤细的脊髓动脉的检测和形态观察,且通过局部动脉内碘含量的定量分析,间接计算局部的血流量情况。本研究旨在应用能谱CT技术对颈髓损伤患者进行术前术后脊髓前动脉(anterior spinal artery, ASA)造影,并对碘含量进行定量分析,评价ASA血流量的改善与神经功能恢复之间的相关性。

## 1 资料与方法

### 1.1 病例选择

**1.1.1 纳入标准** 年龄18~60岁;有明确外伤史,诊断明确的SCI,外伤至手术时间不超过2周;获得至少1年的随访。

**1.1.2 排除标准** 心、肝、肾功能不全或碘剂过敏;伴有颈椎骨折或颈椎脱位;伴有严重的复合伤,如颅内损伤、胸腹部外伤或其他部位骨折需要手术;颈髓损伤导致呼吸衰竭,预计预后不佳无法获得随访的患者,或无法配合行能谱CT检查的患者;有颈椎手术史,或受伤之前已有明显的脊髓压迫症状;伴有严重的内科疾病,如糖尿病,冠状动脉粥样硬化,或已明确的全身多发血管硬化、斑块形成的患者,或合并其他神经内科疾病的患者;肿瘤、结核或血肿等疾病导致的颈髓压迫;各种原因导致ASA成像失败者。

### 1.2 临床资料

选择2014年1月至2016年6月因诊断颈髓损伤而行颈后路单开门椎板成形术治疗的患者为研究对象,本研究经医院伦理委员会批准,患者检查前均签署知情同意书。本组共有30例入选,男21例,女9例,年龄33~59(46.4±9.7)岁。致伤因素:车祸伤16例,摔伤12例,击打伤2例。30例患者均在伤后

2周内接受颈后路单开门椎管成形术,其中开门减压3节段8例,4节段18例,5节段4例。本组患者随访时间12~30(17.4±7.6)个月。

### 1.3 能谱CT造影

**1.3.1 造影方法及参数条件** 应用单源双能瞬时kVp切换技术,采用美国GE Discovery能谱CT750 HD CT仪的能谱扫描模式对患者行平扫和动脉期增强两期扫描。扫描范围:上起于枕骨隆突下至C<sub>7</sub>棘突下缘。对比剂选用碘海醇(含碘350 mg/ml),采用Acist型双筒高压注射,以5.0 ml/s流率注射75 ml,随后以相同的速率注射0.9%氯化钠溶液30 ml。先平扫,再延迟25 s获得动脉期图像,两期扫描参数均保持一致,均采用GSI螺旋扫描模式,管电压为80、140 kVp瞬时高速切换,管电流为260 mA,机架转速0.8/r, SFOV为small head,探测器宽度为20 mm,螺距0.969:1,层厚5 mm,层间距5 mm, DFOV=25 cm<sup>2</sup>,矩阵512×512,重建层厚0.625 mm,重建间隔0.625 mm。获得Data file数据,传输至ADW4.6工作站进行MPR、MIP、VR等候处理。所有检查操作均由同一技师完成。

**1.3.2 图像后处理** 将检查所获得的平扫和动脉期的Data file数据经ADW 4.6的高级应用软件Compare打开,均切换成碘基图,在其MPR图像上同步测量特定层面ASA区域及同平面优势侧椎动脉(vertebral artery, VA)的碘含量。

### 1.4 手术方法

手术方式颈后路单开门椎管成形术,麻醉成功后,取俯卧位,头部置于专用头架上,常规术野消毒铺巾后行后正中入路,沿棘突及椎板剥离椎旁肌,暴露开门节段的椎板及侧块,在椎板及侧块交界处用电动磨钻磨出骨槽,门轴侧磨除外侧皮质,开门侧磨除双侧皮质,用椎板掀开钳掀起开门侧椎板后用微型钛板固定,行椎管成形,冲洗止血后置管引流,逐层缝合,无菌包扎。开门节段的选择为术前MRI影像上的狭窄节段,如无明显局部狭窄则选择脊髓信号改变节段;内固定选择统一为AO公司的ARCH钛板;所有手术均由同一组医生完成。

### 1.5 观察项目与方法

**1.5.1 ASA碘含量测定方法及血流量评估** 所有患者需在术前3 d内及术后第5天行ASA的能谱CT造影,定量评估术前术后ASA血流量的改变情况。

在增强期矢状位二维重建图像上,从C<sub>1</sub>-C<sub>7</sub>每个椎节分别等距离选择3个横断面,共21个(图1),在所有21个横断面上找到ASA及优势侧VA位置,并在动脉位置圈定感兴趣区域(region of interest, ROI),由于ASA直径较小,ROI区域取值略小于

其管径,且每个横断面 ROI 大小保持一致(0.09 mm<sup>2</sup>),同时在 VA 区域圈定略小于管径且大小一致的 ROI 区域(0.27 mm<sup>2</sup>)进行测量(图 2),最后取 21 个 ROI 碘含量的均值作为 ASA 及 VA 单次测量结果;测量由 3 位脊柱外科医生分别完成,取 3 人测量结果的均值作为术前 ASA 及 VA 碘含量。术后图像测量时,同一患者选择的横断面位置及 ROI 区域大小与术前保持一致,以减少测量误差,同样取 3 人测量均值作为术后 ASA 及 VA 碘含量。

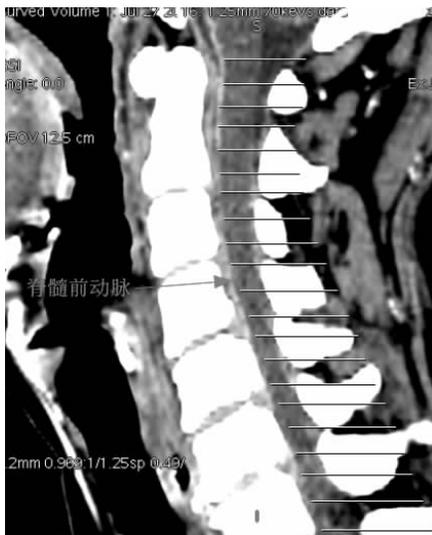


图 1 碘值测量选取横断面示意图,在矢状位重建上显示椎前动脉,从 C<sub>1</sub>-C<sub>7</sub> 每个椎节选取平均分布的 3 个横断面

Fig.1 Point chosen for iodine measurement on a reconstructed saggital section. From C<sub>1</sub> to C<sub>7</sub>, each vertebral segment was divided into three axial line for iodine measurement

为进一步减小个体差异及成像差异带来的误差,用 ASA 血流量比值来间接反映 ASA 血流量情况,ASA 血流量比值=ASA 碘含量/VA 碘含量。术后 ASA 血流量改善情况用 ASA 血流量比值改善率来反映,ASA 血流量比值改善率=[(术后 ASA 血流量比值-术前 ASA 血流量比值)/术前 ASA 血流量比

值]×100%。

**1.5.2 神经功能评估** 采用美国脊柱损伤协会神经功能分级(American Spinal Injury Association Classification, ASIA)<sup>[6]</sup>及改良日本骨科协会评估(Japanese Orthopaedic Association Scores, JOA)<sup>[5]</sup>对神经功能进行观察,分别记录患者术前 1 d,术后 5 d、1、6、12 个月的 ASIA 分级及 JOA 评分,并计算 JOA 评分改善率,JOA 评分改善率=[(术后评分-术前评分)/(17-术前评分)]×100%,以此来评估术后神经功能改善程度。所有评分由同一位医生完成。

**1.6 统计学处理**

采用 SPSS 24.0 统计学软件对数据进行统计学分析。手术前后 ASA 血流量比值之间和 JOA 评分之间的比较均采用配对资料 *t* 检验;术后 ASA 血流量比值改善率与 JOA 评分改善率之间相关性的分析采用回归与相关分析。检验水准 α=0.05。

**2 结果**

所有患者顺利完成检查,未出现过敏、肾功能损害等不良事件。术前 ASA 均获满意显影,其中仅 1 例无明显局部血管狭窄,该患者术前颈椎 MRI 影像表现为脊髓水肿,但未见明显局部颈髓压迫,其余 29 例均有不同程度局部血管狭窄,其中 23 例 MRI 表现有明显脊髓压迫,6 例无明显压迫但存在明显颈髓损伤信号。术后 5 d 复查,内植物伪影对 ASA 的显影和测量均未造成影响,显影满意,且较术前均有不同程度的碘含量增加,其中 19 例患者术后影像无明显局部血管狭窄,显影连续,11 例患者显影较术前改善,但仍有不同程度的局部血管狭窄征象。典型病例见图 3。

术前及术后 5 d 的 VA 碘含量分别为(16.18±1.20)、(16.18±1.15) mg/ml,两者差异无统计学意义(*P*>0.05);术前及术后 5 d 的 ASA 碘含量分别为(12.01±3.14)、(14.32±3.09) mg/ml,术后较术前显著改善(*P*<0.01);手术前后平均 ASA 碘含量比值(ASA/VA)分别为 0.75±0.20、0.89±0.02,术后较术前

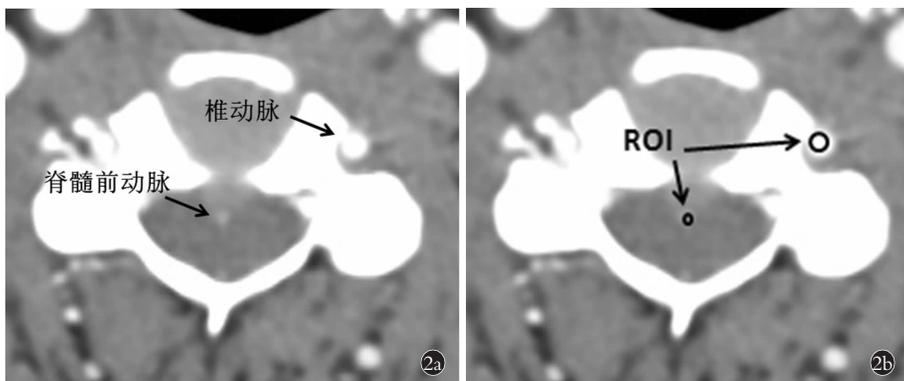


图 2 ROI 选取示意图 2a. 在 CT 横断面上找到 ASA 和 VA 2b. 在动脉范围内圈定略小于动脉面积的圆形为 ROI 区域

Fig.2 ROI selection diagram 2a. Find ASA and VA on the cross section of CT 2b. The circle which is slightly smaller than the artery area in the artery range is ROI area

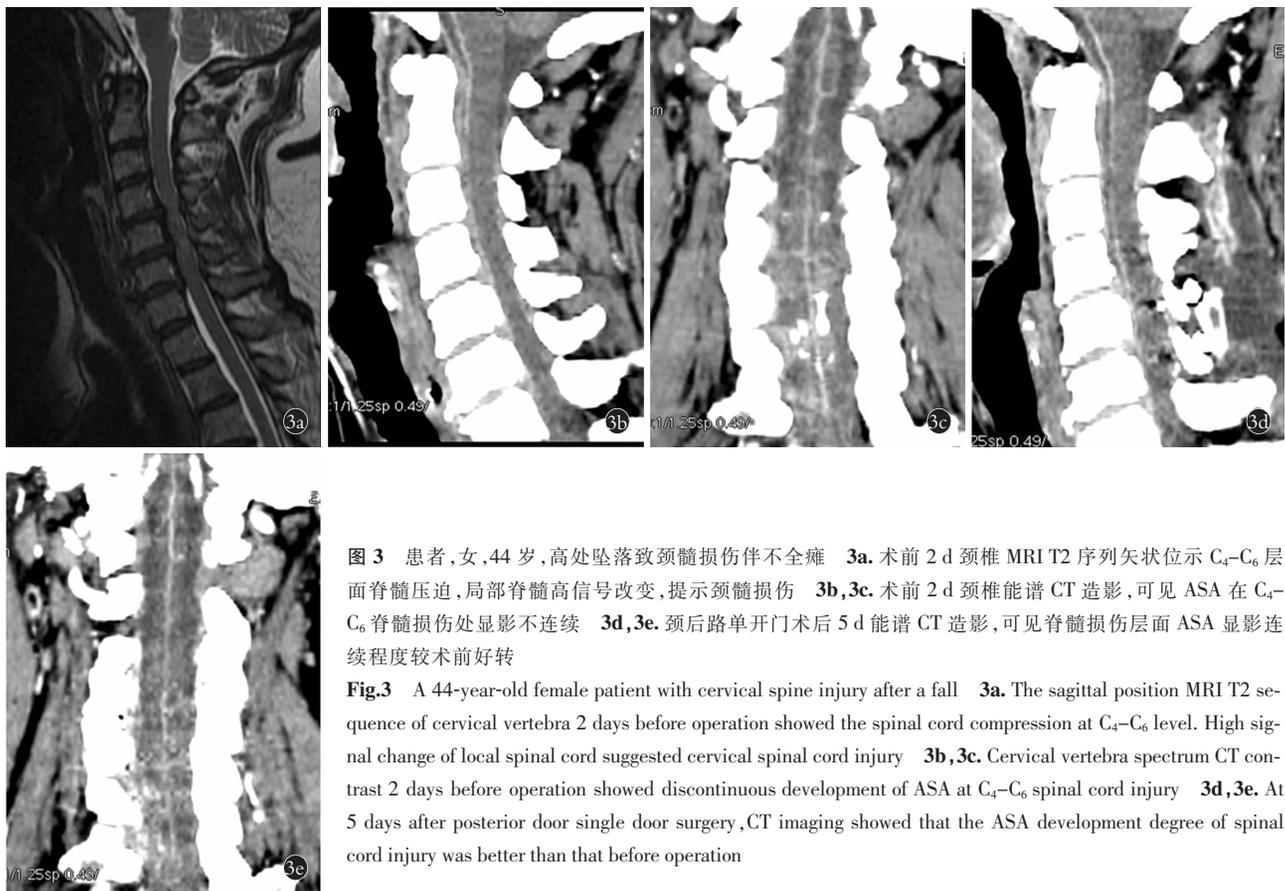


图 3 患者,女,44 岁,高处坠落致颈髓损伤伴不全瘫 3a. 术前 2 d 颈椎 MRI T2 序列矢状位示 C<sub>4</sub>-C<sub>6</sub> 层面脊髓压迫,局部脊髓高信号改变,提示颈髓损伤 3b,3c. 术前 2 d 颈椎能谱 CT 造影,可见 ASA 在 C<sub>4</sub>-C<sub>6</sub> 脊髓损伤处显影不连续 3d,3e. 颈后路单开门术后 5 d 能谱 CT 造影,可见脊髓损伤层面 ASA 显影连续程度较术前好转

Fig.3 A 44-year-old female patient with cervical spine injury after a fall 3a. The sagittal position MRI T2 sequence of cervical vertebra 2 days before operation showed the spinal cord compression at C<sub>4</sub>-C<sub>6</sub> level. High signal change of local spinal cord suggested cervical spinal cord injury 3b,3c. Cervical vertebra spectrum CT contrast 2 days before operation showed discontinuous development of ASA at C<sub>4</sub>-C<sub>6</sub> spinal cord injury 3d,3e. At 5 days after posterior door single door surgery, CT imaging showed that the ASA development degree of spinal cord injury was better than that before operation

表 1 颈髓损伤 30 例患者手术前后 ASA 及 VA 碘含量情况 ( $\bar{x}\pm s$ )

Tab.1 Iodine content of VA and ASA of 30 patients with spinal cord injury before and after operation ( $\bar{x}\pm s$ )

项目	术前	术后 5 d	t 值	P 值
ASA 碘含量(mg/ml)	12.01±3.14	14.32±3.09	11.571	0.000
VA 碘含量(mg/ml)	16.18±1.20	16.18±1.15	0.291	0.773
ASA 血流量比值(ASA/VA)	0.75±0.20	0.89±0.02	11.479	0.000
ASA 血流量比值改善率(%)	-	21.05±12.45	-	-

显著改善( $P<0.01$ ), 术后 ASA 血流量比值改善率为  $(21.05\pm 12.45)\%$ , 见表 1。

术前 1 d 神经功能 ASIA 分级:A 级 0 例,B 级 4 例,C 级 17 例,D 级 9 例,E 级 0 例,颈椎 JOA 评分  $7.73\pm 0.92$ ; 术后所有患者神经功能均有不同程度改善, 术后 5 d、1、6、12 个月 JOA 评分分别为  $7.98\pm 0.90$ 、 $9.93\pm 1.04$ 、 $12.47\pm 1.78$ 、 $12.75\pm 1.95$ , 平均 JOA 改善率分别为  $(2.71\pm 3.04)\%$ 、 $(23.34\pm 3.10)\%$ 、 $(50.01\pm 21.08)\%$ 、 $(53.02\pm 23.11)\%$ , 术后各随访点的 JOA 评分较术前均有显著改善( $P<0.05$ ), 且随访时间延长 JOA 评分进一步提高; 术后 6 个月神经功能 ASIA 分级, A 级 0 例, B 级 0 例, C 级 3 例, D 级 11 例, E 级 16 例; 术后 12 个月时平均 JOA 评分与术后 6 个月差异无统计学意义( $P>0.05$ ), 见表 2。仅有 1 例患者 ASIA 分级从 6 个月的 C 级改善到 D 级, 其余患者

分级无变化, 见表 3。

术后 5 d 患者 ASA 血流量比值改善率与 JOA 评分改善率之间无线性相关( $P>0.05$ ), 而在术后 1、6、12 个月时两者之间呈线性正相关( $P<0.05$ ), 见表 2。

### 3 讨论

#### 3.1 传统脊髓血管的研究方法及其局限性

急性脊髓损伤基本病理改变包括原发性的物理性损伤和继发性的脊髓组织出血、水肿、微循环障碍、炎症介质和氧自由基释放等过程。而脊髓缺血改变曾被认为是带来继发性脊髓病理改变的始动因素, 但因为脊髓损伤的神经功能恢复影响因素众多, 包括个体差异、致伤因素、颈髓压迫的性质和时间长短、减压是否及时彻底等, 因此脊髓的血供改善与神经功能的恢复之间属否有关联, 关联程度大小仍存在较大争议。

表 2 颈髓损伤 30 例患者手术前后 ASA 血流量比值改善率与 JOA 评分改善率之间的相关性

Tab.2 Correlation between improvement rate of ASA blood flow ratio and improvement rate of JOA score in 30 patients with cervical spinal cord injury before and after operation

时间	JOA 评分( $\bar{x}\pm s$ ,分)	与术前比较 $t$ 值	与术前比较 $P$ 值	JOA 改善率( $\bar{x}\pm s$ ,%)	与 ASA/VA 改善率相关系数	相关性 $P$ 值
术前	7.73±0.92	-	-	-	-	-
术后 5 d	7.98±0.90	4.785	0.000	2.7±3.0	0.190	0.313
术后 1 个月	9.933±1.04	10.554	0.000	23.3±3.0	0.898	0.000
术后 6 个月	12.47±1.78	12.181	0.000	50.0±21.0	0.847	0.000
术后 12 个月	12.75±1.95	11.838	0.000	53.0±23.0	0.846	0.000

表 3 颈髓损伤 30 例患者术前后神经功能 ASIA 分类(例)

Tab.3 ASIA classification of nerve function in 30 patients with cervical spinal cord injury before and after operation (case)

时间	A 级	B 级	C 级	D 级	E 级
术前	0	4	17	9	0
术后 5 d	0	4	16	10	0
术后 1 个月	0	3	10	15	2
术后 6 个月	0	0	3	11	16
术后 12 个月	0	0	2	12	16

脊髓的血供主要来源于脊髓前动脉、脊髓后动脉和根动脉,在颈髓部位、脊髓后动脉和根动脉较细,侧支血管网丰富,而脊髓前动脉较粗,主要供应脊髓前 2/3 组织的血供,对脊髓的供血具有重要作用<sup>[8]</sup>。在既往研究中,脊髓损伤的动物模型中脊髓前动脉的血流量与脊髓损伤的恢复存在一定的关系<sup>[9]</sup>。临床上对于动脉灌注的观察最经典的方法是数字剪影血管造影(DSA),但由于其为有创检查,尤其对于脊髓动脉造影,需要多处脊髓节段动脉的导管置入,且造影剂用量较大,从而可能出现动脉损伤、栓塞、脊髓缺血、肾衰竭等并发症。另外,DSA 也无法研究脊髓动脉与邻近组织之间的关系。MRA 和 CTA 皆为无创血管检测技术,相比较而言,MRA 避免了 X 线辐射,且造影剂的剂量要远小于 CTA,剪影后不受椎体骨骼的干扰;而 CTA 则扫描较快,范围较大,在空间三维分辨能力上更好。然而,由于脊髓动脉十分纤细,MRA 和普通多层螺旋 CTA 对脊髓动脉的检出率并不高,另外由于两者只能提供影像图像进行定性观察研究,而无法对血流灌注进行定量检测,无法开展进一步的精确的统计分析和研究<sup>[6-7]</sup>,因此既往脊髓动脉血供的相关研究存在很大的局限性。

### 3.2 能谱 CT 造影的优势及临床应用

能谱 CT 被称为 CT 发展划时代的技术革新,它是测量 X-线高低两种能量高速的切换,能够测量出

物质的 X-线衰减系数,并进一步将这种衰减转化为能产生同样衰减的两种物质的密度,这样的过程称之为物质组成分析与物质的分离。需要强调的是,物质组成分析并不是确定物质组成,而是通过给定的两种基础物质来产生相同的衰减效应对物质组成进行有效分类,以此提供新的信息。因此这种技术具有巨大的潜力,用来精确检测和量化造影剂,从而区分不同组织<sup>[10]</sup>。相较传统 CT,它不但能获取更高的成像质量,有效消除伪影,而且基于多能量扫描、物质分离、定量分析的能力,在临床微小病灶检出,甲状腺碘浓度测定,血管斑块成分分析,结石成分分析,骨密度精确测定,肿瘤定位、定性、分级诊断等方面都获得了良好的应用。

在动脉成像造影方面,目前能谱 CT 已较多的应用于对于肺动脉栓塞、肺动脉高压检测、冠脉狭窄评估,脑动脉瘤、动静脉漏诊断分析,外周动脉疾病诊断和评估等方面<sup>[11-13]</sup>。而对于脊髓动脉,目前尚未见相关文献报道,但理论上讲,能谱 CT 将更有利于纤细的脊髓动脉的检测和形态观察,且通过局部动脉内碘含量的测定,间接计算局部的血流情况,从而进行更精确的统计学分析比较。因此,笔者应用能谱 CT 将颈髓损伤患者的 ASA 进行造影,对血流量进行定量分析,验证该方法的可行性,并评价血流量改善程度与神经功能恢复程度之间是否存在相关。

### 3.3 能谱 CT 脊髓动脉造影的初步探索

手术减压能减轻水肿,恢复脊髓血供,改善微环境<sup>[14]</sup>,促进神经修复<sup>[15]</sup>;既往的影像学诊断手段,由于水肿等多因素影响,脊髓损伤患者的脊髓前动脉无法得到良好的显影<sup>[6-7]</sup>,但能谱 CT 造影能降低水肿、伪影等一系列干扰因素对血管成像的影响<sup>[16]</sup>。通过本实验发现,应用能谱 CT 的颈髓血管造影成像满意,脊髓前动脉均能清晰成像,但脊髓后动脉和根动脉仍无法很好的成像,可能跟这些动脉过于纤细有关,鉴于前动脉的脊髓血供范围最大,因此将其纳为研究对象,而后动脉及根动脉暂不在研究范围。本组资料中有 23 例患者的 MRI 表现有颈髓压迫、椎管

狭窄,并均排除急性椎间盘突出,因此这些患者的颈髓前动脉在外伤前即可能由于长期的压迫造成狭窄,导致血流减少,而损伤后由于脊髓水肿及血管壁的水肿,血流可能进一步减少;而另 7 例无明显椎管狭窄的脊髓水肿患者,有 6 例术前颈髓前动脉造影也显示有不同程度的狭窄,进一步提示无压迫的单纯脊髓损伤也可能导致脊髓动脉血流的改变。而术后由于椎管压力的释放,脊髓前动脉的碘含量显著增加,间接反映其血流量明显改善,可定量评估是目前其他血管造影方法无法实现的,这一优势或使能谱 CT 造影在今后更多的应用于临床研究。从本实验结果中还发现,术后 ASA 血流量的改善程度与术后神经功能的恢复程度之间存在一定的相关性,在术后 1、6、12 个月随访时,两者均呈线性正相关,因此可以认为,术后神经功能的恢复程度与术后早期 ASA 血流量改善程度存在相关,计算术后 ASA 血流量比值改善率或有助于预判神经功能恢复程度。

### 3.4 能谱 CT 造影的局限性及本研究存在的不足

尽管能谱 CT 造影有上述特点及优势,但该检查也有局限性,对疾病准确完善的评估仍需结合 X 线片及 MRI 等其他影像学资料。能谱 CT 造影属于有创检查,并且造影剂的使用存在一定的禁忌证,其应用范围受到了一定的限制。另外,能谱 CT 造影属于放射性检查,对于辐射剂量的控制成为了检查安全性的重中之重。在前期预实验中,将单次辐射总剂量控制于 7.0 mSv,术前后总辐射剂量不高于 13.5 mSv,低于国家标准,符合国家规定,并通过了医院伦理委员会审查,尽管如此,仍然尽量避免让患者在 1 年内检查超过 2 次,因此尚无法进一步动态观察 ASA 的血流改善情况。

本研究仍存在较大不足,如样本数较小,随访时间较短,且没有将完全脊髓损伤病例纳入,下一步需要更大样本量的长期随访进行更为深入的探讨,以进一步阐述能谱 CT 造影在脊髓血管相关研究中的应用价值。另外对血管 ROI 的测量不可避免会有一些误差,对结果产生影响,从而影响临床可行性,需要研究更精确的测量方法以减小测量误差。

### 3.5 能谱 CT 脊髓动脉造影的临床应用展望

应用能谱 CT 造影进行 ASA 成像效果满意,术后早期的 ASA 血流量改善程度与患者神经功能恢复程度之间存在一定的线性正相关,ASA 血流量改善程度或可作为预判患者术后神经功能恢复的参考指标之一,但该结论有待进一步研究论证;其定量分析的能力也为今后脊髓动脉的进一步深入研究提供了新的方法。

### 参考文献

- [1] Miyajiri F, Furlan JC, Aarabi B, et al. Acute cervical traumatic spinal cord injury: MR imaging findings correlated with neurologic outcome-prospective study with 100 consecutive patients[J]. *Radiology*, 2007, 243(3): 820-827.
- [2] Tator CH. Experimental and clinical studies of the pathophysiology and management of acute spinal cord injury[J]. *J Spinal Cord Med*, 1996, 19(4): 206-214.
- [3] Chang Y, Jung TD, Yoo DS, et al. Diffusion tensor imaging and fiber tractography of patients with cervical spinal cord injury[J]. *J Neurotrauma*, 2010, 27(11): 2033-2040.
- [4] Facon D, Ozanne A, Fillard P, et al. MR diffusion tensor imaging and fiber tracking in spinal cord compression[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2005, 26(6): 1587-1594.
- [5] Mulcahey MJ, Gaughan J, Betz RR, et al. The international standards for neurological classification of spinal cord injury: reliability of data when applied to children and youths[J]. *Spinal Cord*, 2007, 45(6): 452-459.
- [6] Cheran S, Shanmuganathan K, Zhuo J, et al. Correlation of MR diffusion tensor imaging parameters with ASIA motor scores in hemorrhagic and nonhemorrhagic acute spinal cord injury[J]. *J Neurotrauma*, 2011, 28(9): 1881-1892.
- [7] Duhamel G, Callot V, Cozzone PJ, et al. Spinal cord blood flow measurement by arterial spin labeling[J]. *Magn Reson Med*, 2008, 59(4): 846-854.
- [8] Komiyama M. Functional vascular anatomy of the spine and spinal cord[J]. *No Shinkei Geka*, 2013, 41(6): 481-492.
- [9] Holtz A, Nystrom B, Gerdin B. Spinal cord blood flow measured by I<sup>125</sup>-iodoantipyrine autoradiography during and after graded spinal cord compression in rats[J]. *Surg Neurol*, 1989, 31(5): 350-360.
- [10] Schlonka JP, Roessl E, Dorscheid R, et al. Experimental feasibility of multi-energy photon-counting K-edge imaging in pre-clinical computed tomography[J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(15): 4031-4047.
- [11] Danad I, Fayad ZA, Willeminck MJ, et al. New applications of cardiac computed tomography: dual-energy, spectral, and molecular CT imaging[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015, 8(6): 710-723.
- [12] Cormode DP, Roessl E, Thran A, et al. Atherosclerotic plaque composition: analysis with multicolor CT and targeted gold nanoparticles[J]. *Radiology*, 2010, 256(3): 774-782.
- [13] Iwanczyk JS, Nygard E, Meirav O, et al. Photon counting energy dispersive detector arrays for X-ray imaging[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2009, 56(3): 535-542.
- [14] van Middendorp JJ, Barbagallo G, Schuetz M, et al. Design and rationale of a prospective, observational European multicenter study on the efficacy of acute surgical decompression after traumatic spinal cord injury: the SCI-POEM study[J]. *Spinal Cord*, 2012, 50(9): 686-694.
- [15] Fehlings MG, Perrin RG. The role and timing of early decompression for cervical spinal cord injury: update with a review of recent clinical evidence[J]. *Injury*, 2005, 36 Suppl 2: B13-26.
- [16] Duan X, Wang J, Yu L, et al. CT scanner X-ray spectrum estimation from transmission measurements[J]. *Med Phys*, 2011, 38(2): 993-997.