# • 协和荟萃 •

# 三维快速自旋回波序列 3.0 T磁共振成像在大鼠脊髓全截断模型中的 应用

郭问<sup>1</sup>,侯波<sup>2</sup>,张健刚<sup>1</sup>,张栋<sup>3</sup>,王峻晨<sup>1</sup>,翟吉良<sup>1</sup>

【摘要】目的:探讨三维快速自旋回波序列(即CUBE序列)3.0 T磁共振成像(MRI)在大鼠脊髓全截断模型中的成像效果。方法: 选取6只Sprague Dawley(SD)大鼠构建T9脊髓全截断实验动物模型,监测术后运动功能,术后第1周和第8周在3.0 T场强下采 用快速自旋回波(FSE)序列和CUBE序列对脊髓截断部位进行扫描,比较两者成像效果,同时计算脊髓缺损体积,并基于CUBE 序列进行脊髓三维重建。结果:与FSE序列(层厚1.00 mm)相比,CUBE序列的层厚更薄(0.20 mm),可在14~18层图像上显示脊 髓截断部位及中央管、神经根等邻近正常脊髓等结构。基于超薄层厚的CUBE序列实现了对脊髓截断节段的三维重建。功能恢 复方面,脊髓缺损体积变化与大鼠术后运动功能恢复情况一致。结论:CUBE序列3.0 T MRI较FSE序列更适用于大鼠脊髓全截 断模型的高分辨率超薄层厚成像和三维重建。

【关键词】脊髓损伤;大鼠;磁共振成像;三维快速自旋回波序列;三维重建

【中图分类号】R651.2;R445.2	【文章编号】2095-9958(2024)06-0497-07
【文献标志码】A	DOI:10.3969/j.issn.2095-9958.2024.06.02

# Application of 3.0 T magnetic resonance imaging with three-dimensional fast-spinecho sequence in a rat model of complete spinal cord transection

GUO Wen<sup>1</sup>, HOU Bo<sup>2</sup>, ZHANG Jiangang<sup>1</sup>, ZHANG Dong<sup>3</sup>, WANG Junchen<sup>1</sup>, ZHAI Jiliang<sup>1</sup>

1. Department of Orthopaedics, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100730, China; 2. Department of Radiology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100730, China; 3. Experimental Animal Center, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100730, China

Corresponding Author: ZHAI Jiliang

GUO Wen and HOU Bo contributed to this article.

**[Abstract] Objective:** To investigate the imaging efficacy of three-dimensional (3D) fast-spin-echo sequence (CUBE sequence) of 3.0 Tesla magnetic resonance imaging (3.0 T MRI) in a rat model of complete spinal cord transection. **Methods:** Six Sprague-Dawley rats were used to establish a T9 complete spinal cord transection model. Postoperative motor recovery was monitored, and a 3.0 T MRI imaging was implemented at the transection site using the fast-spin-echo (FSE) and CUBE sequences at the first and eighth weeks after surgery. The imaging outcomes of the two sequences were compared, the volumes of injured spinal cord segments were calculated, and 3D reconstruction of the spinal cord was conducted based on CUBE sequences. **Results:** Compared with FSE sequences (slice thickness 1.00 mm), CUBE sequences offered a thinner slice thickness (0.20 mm), enabling visualization of the transected areas and adjacent normal myeloid structures such as central canals and neural roots in 14 to 18 slices. Besides, the CUBE sequence with ultra-

【共同第一作者】侯波

<sup>【</sup>基金项目】北京自然科学基金重点项目(Z200025)

<sup>【</sup>作者单位】1. 中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院骨科,北京100730;2. 中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院放射科,北京100730;3. 中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院临研所实验动物平台,北京100730

<sup>【</sup>通信作者】 翟吉良, E-mail: zhaidoctor@126.com

<sup>【</sup>引用格式】郭问, 侯波, 张健刚, 等. 三维快速自旋回波序列 3.0 T磁共振成像在大鼠脊髓全截断模型中的应用[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2024, 17(6): 497-503.

thin slices enabled 3D reconstruction of the transected spinal cord segments. In terms of functional recovery, the volume changes of the defective spinal cord were consistent with the recovery of motor function in rats postoperatively. **Conclusions:** The 3.0 T MRI of the CUBE sequence is superior to the FSE sequence for high-resolution ultra-thin imaging and 3D reconstruction in a rat model of complete spinal cord transection.

**[Key words]** Spinal Cord Injury; Rats; Magnetic Resonance Imaging; Three-dimensional Fast-spin-echo Sequence; Three-dimensional Reconstruction

脊髓损伤是指各种原因引起脊髓受损的神经病 理状态,具有发病率高、致残率高的特点,但目前临 床尚无有效的治疗方法凹。临床前研究中最常使用 大鼠脊髓损伤模型进行相关病理过程和新型疗法的 探索四。然而由于大鼠脊髓较细,现有大鼠模型的影 像学评估常依赖于超高场强(≥7.0 T)磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI),但这类仪器价格 昂贵,难以广泛应用<sup>[3-4]</sup>。可变翻转角(variable flip angle)技术采集效率高且具有各向同性的高分辨率, 目前在临床上广泛应用于头颅、血管、胰胆管、膝关 节成像等時。本研究将该技术应用于大鼠脊髓全截 断模型中,利用美国GE公司的三维快速自旋回波序 列 (3D fast spin echo with an extended echo train acquisition,即CUBE序列)实现大鼠脊髓全截断模 型的高分辨率成像和三维重建,为脊髓损伤的临床 前研究提供参考。

# 1 材料与方法

#### 1.1 实验动物

6只6周龄雄性Sprague Dawley(SD)大鼠,购自 斯贝福(北京)生物技术有限公司,体重(250±30)g。 本动物实验研究经北京协和医院实验动物福利伦理 委员会批准(XHDW-2023-035)。

### 1.2 仪器和药品

3%戊巴比妥钠注射液(美国Merk公司);青霉素钠 注射液(北京Solarbio公司);生理盐水;医用碘伏;75%乙 醇溶液。3.0 T MRI(Discovery MR750 w;美国GE 公司)。

#### 1.3 大鼠脊髓全截断模型的构建

大鼠称重后,腹腔注射3%戊巴比妥钠注射液 (1.0~1.5 mL/kg)麻醉。麻醉满意后以T9为中心备 皮,碘伏消毒,暴露T8~T10,剪去椎板,暴露T9脊髓, 然后全截断T9脊髓,长度约2 mm。术后第1周每日 腹腔内注射1 mL 0.9%生理盐水以维持组织灌注压, 注射 0.5 mL青霉素钠注射液(100 U/mL)以抗感染。 术后每日按压大鼠膀胱排尿2次至恢复自主排尿, 75%乙醇溶液清洁尿道口。

#### 1.4 大鼠运动功能检测

每周由2位实验人员根据Basso-Beattie-Bresnahan 运动评分(即BBB评分)<sup>60</sup>对大鼠运动功能进行评价 (21分制)。

#### 1.5 MRI扫描和三维重建

术后第1周和第8周对大鼠进行称重,腹腔注射 3%戊巴比妥钠(1.0~1.5 mL/kg)麻醉。麻醉满意后, 将大鼠以仰卧位固定在16通道柔性线圈内进行MRI 扫描:采用快速自旋回波(fast spin echo, FSE)序列扫 描矢状位 T2WI,采用 CUBE 序列扫描矢状位 T2WI 和冠状位 T1WI,所有序列均设置脂肪抑制,参数如 表1所示。

使用GEAdvantageWorkstation后处理工作站对 CUBE序列进行三维重建。使用ITK-SNAK软件在 矢状位T2CUBE序列中手动勾画T8~T10脊髓轮廓 及脊髓缺损区域轮廓,基于手动勾画数据,得出 T8~T10脊髓总体积和脊髓缺损体积。为校正大鼠自 身生长的误差及不同大鼠之间的差异性,本研究定 义大鼠脊髓缺损体积标准化值计算公式为:脊髓缺

表1 MRI序列参数

序列	FOV(mm)	层厚(mm)	层间距(mm)	TR(ms)	TE(ms)	矩阵	
矢状位T2 FSE序列	120	1.0	0.3	3 100.0	80.0	352×320	
矢状位T2 CUBE序列	110	0.4	-0.2	3 240.0	90.0	352×288	
冠状位T1 CUBE序列	110	0.6	-0.3	500.0	最小值	352×256	

注:FOV为视野;TR为重复时间;TE为回波时间。

损体积标准化值=脊髓缺损体积/T8~T10脊髓总体 积;术后8周内脊髓缺损体积自身修复的程度定义为 恢复指数,计算公式为:恢复指数=(术后第8周脊髓 缺损体积标准化值-术后第1周脊髓缺损体积标准化 值)/术后第1周脊髓缺损体积标准化值×100%,恢复 指数越高代表脊髓缺损自身修复的程度越高。

### 2 结果

#### 2.1 大鼠手术及术后恢复情况

6只大鼠手术及术后恢复顺利,均存活至实验结束。术中未出现大出血、死亡等(表2)。术前6只大鼠运动正常,术后即刻BBB评分均降为0分,提示脊髓全截断模型构建成功,大鼠完全失去双后肢运动功能。

由于T9脊髓截断,术后大鼠出现截瘫、尿潴留、 泌尿系统感染、血尿等并发症。血尿方面,3号大鼠 术后血尿时间稍长为6d,而其余大鼠术后血尿持续 3~4d。尿潴留方面,1号大鼠恢复自主排尿时间最短 为8d,而6号大鼠直至实验结束仍无法自主排尿,其 余大鼠术后第2~3周恢复自主排尿。

随着时间的推移,大多数大鼠的运动功能得到 不同程度的恢复,但6号大鼠BBB评分始终为0分。 1~5号大鼠BBB评分逐渐上升至平台期,此时BBB 评分稳定在某一水平不再上升。BBB评分最早到达 平台期的为4号大鼠,术后第2周稳定在3分;而BBB 评分最晚到达平台期的为1号大鼠,术后第6周稳定在 8分。其余2号、3号、5号大鼠BBB评分术后第4~5周 分别到达5分、7分、4分的平台期(图1)。

总体来说,对于T9脊髓全截断且能恢复自主排 尿的大鼠,随着时间的推移,瘫痪的双下肢可恢复一 定的运动功能,但均无法达到负重及以上的程度(即 BBB评分9分及以上)。

#### 2.2 MRI 扫描结果

分别在术后第1周和第8周使用冠状位T1

CUBE序列和矢状位 T2 CUBE序列进行 MRI 扫描, 可见正常脊髓节段中,脊髓、中央管、神经根显示清 晰,各大鼠脊髓截断处可见正常脊髓结构消失,代之 以空洞在内的多种损伤改变(图2)。在冠状位 T1 CUBE序列中,脊髓截断节段区域信号混杂,以等信 号为主,脊髓缺损范围形状不规则,与周围组织分界 不明显。术后第8周与术后第1周相比,MRI图像变 化明显,脊髓缺损部位与周围组织分界清晰,可见机 化瘢痕组织。矢状位 T2 CUBE序列中,脊髓缺损部 位呈短 T2 信号,正常脊髓呈稍高信号;术后第1周术野 区域被不规则的高信号渗出影所覆盖;而术后第8周 可见术野渗出基本吸收,使得正常脊髓与脊髓缺损 部位的分界更加明显。

术后第8周选取1号大鼠在同一仪器上进行矢 状位T2FSE序列和CUBE序列MRI,截取可见脊髓 缺损部位的所有平面并进行对比(图3)。矢状位T2 FSE序列仅1层图像可见脊髓缺损部位及邻近脊髓 组织;相比之下,矢状位T2CUBE序列多达14层图 像可见脊髓缺损部位及邻近脊髓组织,可以更完整 地显示脊髓缺损部位及脊髓损伤情况。

6只大鼠CUBE序列与FSE序列MRI成像的对比如表3所示。CUBE序列的主要优势在于实现超薄层厚扫描,使得可见脊髓缺损部位的层数明显增加,脊髓缺损部位的观察更完整,不易遗漏信息。

#### 2.3 三维重建结果及脊髓缺损体积测算

由于 CUBE 序列可得到多层 MRI 图像,使得三 维重建成为可能,从而实现脊髓缺损部位的可视化。 以1号大鼠为例,术后第1周和第8周基于 CUBE 序 列进行三维重建,结果如图4所示,图中显示缺损部 位附近脊髓节段,缺损部位以空白形式呈现。三维 重建后可以更直观地观察脊髓缺损部位形态,并进 行不同时段的对比。

根据矢状位T2 CUBE序列可以得到大鼠脊髓缺

大鼠编号	术中大出血(例)	术前BBB评分(分)	术后即刻BBB评分(分)	血尿时间(d)	恢复自主排尿时间(d)
1号	0	21	0	3	8
2号	0	21	0	3	21
3号	0	21	0	6	17
4号	0	21	0	3	23
5号	0	21	0	4	13
6号	0	21	0	3	未能恢复

表2 6只大鼠手术及术后恢复情况



图1 大鼠术后运动功能的恢复情况

损体积标准化值和恢复指数(表4)。1号大鼠术后第 8周脊髓缺损体积明显小于术后第1周,其恢复指数 为50.16%,提示1号大鼠术后脊髓缺损体积明显恢 复。而其余大鼠术后脊髓缺损体积略有增加,其中 4~6号大鼠脊髓缺损体积增加程度相对最高,恢复指 数为-14%左右。

# 3 讨论

脊髓损伤可以从多方面进行评估,包括脊髓功能、免疫组织化学染色及影像学表现等<sup>[7,8]</sup>。影像学方面,MRI可评估脊髓损伤的不同表现如出血、水肿、创伤后囊腔形成等,具有重要的诊断意义<sup>[9-10]</sup>。动物成像方面,大鼠是构建脊髓损伤模型的常用动物,但由于其脊髓直径较细,且脊髓与周围空气、骨组织、肌肉组织形成不均质磁场,因而较低场强MRI往



冠状位T1 CUBE序列(A)及矢状位T2 CUBE序列(B),截取病灶面积最大平面,比例尺为5.0 mm,星号示脊髓缺损部位,细箭头示中央管,粗实心箭头示正常脊髓,粗空心箭头示神经根。

图2 大鼠术后第1周和第8周CUBE序列MRI图像



A. 矢状位 T2 FSE 序列仅1层图像可见脊髓缺损部位;B. 矢状位 T2 CUBE 序列14层图像均可见脊髓缺损部位;比例尺为5.0 mm。 图31号大鼠术后第8周常规 FSE 序列和 CUBE 序列 MRI 图像

表3 6只大鼠FSE序列与CUBE序列MRI成像的对比

项目	图像层厚	可见脊髓缺损部位的层数	伪影	脊髓缺损区域观察	神经根	中央管边缘	周围组织损伤
矢状位T2 CUBE序列	0.20 mm	14~18层	有	显示清晰,更完整	显示清晰	显示清晰	显示较清晰
矢状位T2 FSE序列	1.00 mm	1~3层	无	显示较差,不完整	显示清晰	显示清晰	显示较清晰

往无法满足成像需求,超高场强MRI及功能MRI更 为常用<sup>[4,11-12]</sup>;然而,与常规场强MRI相比,超高场强 MRI的设备成本及运行成本昂贵<sup>[13]</sup>。本研究利用可 变翻转角技术,实现常规场强(3.0 T)下大鼠脊髓损 伤模型的高分辨率成像和三维重建。

可变翻转角技术是指在回聚脉冲中使用可变翻 转角的设计,克服传统序列T2回波链的限制引起的 快速衰减,从而实现更高分辨率的成像效果[14-15]。可 变翻转角技术已被证明可应用于多种器官、组织的 MRI。研究发现,在人中枢和周围神经系统包括脊 髓、神经根、脑脊液、臂丛等成像中,基于可变翻转角 序列的成像效果优于普通序列[16-18];但在大鼠脊髓成 像方面暂无相关应用的报道。本研究证明,CUBE序 列可在常规场强下对大鼠脊髓区域进行超薄成像, 便于相关临床前研究的开展。一方面,与常规FSE序 列相比,CUBE序列的层厚更薄,可通过三维重建技 术实现病灶的可视化;另一方面,层厚变薄意味着对 病损体积的测量会更加准确。由于使用大鼠脊髓全 切断模型,脊髓缺损部位逐渐被瘢痕组织代替[19];而 瘢痕组织的信号与脂肪信号相当,因此在T2压脂序 列上,脊髓缺损部位的信号显著低于正常脊髓部位, 因此脊髓缺损体积的变化可以在一定程度上反映脊髓 缺损自身修复的程度。由于大鼠脊髓直径仅2~3 mm, 层厚1.00 mm的FSE序列无法满足体积测量的精度 要求,而层厚0.20 mm的CUBE序列对病灶大小的测 量更加准确。

在T1 CUBE序列中,正常脊髓为等信号,脊髓截 断区域可见信号不连续,若出现空洞则为低信号,周 围损伤区域为不规则的低至中信号改变;此序列更 利于脊髓缺损部位及周围损伤组织全貌的观察。而 在T2 CUBE序列中,正常脊髓为等信号;术后1周, 损伤区域(包括截断节段及周围肌肉组织)呈现高信 号改变,为手术损伤引起的炎症反应;术后8周,正常 脊髓邻近截断脊髓的断端信号更高,而截断脊髓区 域为低信号,且周围损伤区域炎性物质被大量吸收, 进入机化和瘢痕形成的阶段,因此,该序列更利于脊 髓损伤区域修复过程的观察。

本研究根据T2 CUBE序列进行脊髓截断区域的 勾画和测量,并通过恢复指数判断脊髓缺损部位自 我修复的程度,恢复指数越高,代表脊髓缺损体积恢 复程度越高。在本实验中,尽管6只大鼠恢复指数各 有不同,但大致与术后并发症及运动功能恢复情况 相一致。6号大鼠自主排尿功能和后肢运动功能完 全未恢复,BBB评分始终为0分,而其恢复指数也较



术后第1周(A)和术后第8周(B)可见T9脊髓缺损节段及邻近脊髓的多角度图像。 图4 1号大鼠基于CUBE序列的脊髓三维重建图像

大鼠 — 编号	术后第1周						
	T8~T10体积 (mm <sup>3</sup> )	脊髓缺损体积 (mm <sup>3</sup> )	脊髓缺损体积 标准化值	T8~T10体积 (mm <sup>3</sup> )	脊髓缺损体积 (mm <sup>3</sup> )	脊髓缺损体积 标准化值	恢复指数(%)
1号	82.89	17.92	0.216 2	83.67	9.02	0.107 8	50.16
2号	76.47	13.81	0.180 6	80.59	16.02	0.198 8	-10.07
3号	81.89	17.3	0.211 3	79.86	17.59	0.220 3	-4.26
4号	113.86	27.26	0.239 4	149.75	40.65	0.271 5	-13.38
5号	81.92	12.59	0.153 7	92.44	16.29	0.176 2	-14.66
6号	169.87	29.47	0.173 5	159.74	31.74	0.198 7	-14.53

低,为-14.53%;对比之下,1号大鼠术后血尿时间及 自主排尿恢复时间均为最短,术后第8周该大鼠也达 到了相对最高的BBB评分(8分),提示其运动功能恢 复效果最好,其恢复指数亦最高(50.16%)。此外,4号 大鼠恢复自主排尿的时间仅次于6号,而且该大鼠运 动功能恢复较差,从第2周起BBB评分即稳定在3分 不再升高,这可能是由于其手术损伤较重而机体状 态较差,导致神经自我修复较早停止或由于关节挛 缩等术后并发症被迫终止。关节挛缩是脊髓损伤术 后常见并发症之一<sup>[20]</sup>;对于大鼠模型来说,关节挛缩 在脊髓损伤后数周内即可发生,主要与痉挛性肌张 力升高有关<sup>[21]</sup>,关节挛缩的出现将使得运动功能的恢 复进程强行终止。与较差的运动功能恢复情况相 似,4号大鼠恢复指数也较低,为-13.38%。与4号大 鼠相反,1号大鼠BBB评分最晚到达平台期,这一事 实也从侧面提示1号大鼠运动功能恢复情况最好,神 经自我修复时间较长,且术后并发症较轻,最终达到 更好的自我修复效果。

本研究的局限性:①大鼠数量较少且均为脊髓截断损伤,存在系统误差影响实验结果;②恢复指数的计算依赖于特定脊髓区域的勾画,读片时存在偶然误差;③由于脊髓全截断模型大鼠关节会逐渐僵直,恢复后期BBB评分难以准确反映神经恢复结果。

## 4 结论

CUBE序列3.0TMRI可用于大鼠脊髓全截断模型的高分辨率超薄层厚成像和三维重建。与常规FSE序列相比,CUBE序列提供了更加丰富的影像学

信息,且超薄层厚使得病损相关体积的测量更加 精确。

【利益冲突】所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- Hu X, Xu W, Ren Y, et al. Spinal cord injury: molecular mechanisms and therapeutic interventions[J]. Signal Transduct Target Ther, 2023, 8(1): 245.
- [2] Verstappen K, Aquarius R, Klymov A, et al. Systematic evaluation of spinal cord injury animal models in the field of biomaterials[J]. Tissue Eng Part B Rev, 2022, 28(6): 1169-1179.
- [3] Barry RL, Vannesjo SJ, By S, et al. Spinal cord MRI at 7 T[J]. Neuroimage, 2018, 168: 437-451.
- [4] Geldschläger O, Bosch D, Avdievich NI, et al. Ultrahighresolution quantitative spinal cord MRI at 9.4 T[J]. Magn Reson Med, 2021, 85(2): 1013-1027.
- [5] Mugler JR. Optimized three-dimensional fast-spin-echo MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2014, 39(4): 745-767.
- [6] Basso DM, Beattie MS, Bresnahan JC. A sensitive and reliable locomotor rating scale for open field testing in rats[J]. J Neurotrauma, 1995, 12(1): 1-21.
- [7] Kjell J, Olson L. Rat models of spinal cord injury: from pathology to potential therapies[J]. Dis Model Mech, 2016, 9 (10): 1125-1137.
- [8] Hubertus V, Meyer L, Roolfs L, et al. In vivo imaging in experimental spinal cord injury-techniques and trends[J]. Brain Spine, 2022, 2: 100859.
- [9] 张峻,季欣然,唐佩福.脊髓损伤的影像学研究进展[J].中 国骨与关节杂志,2016,5(8):593-595.
- [10] Freund P, Seif M, Weiskopf N, et al. MRI in traumatic spinal cord injury: from clinical assessment to neuroimaging biomarkers[J]. Lancet Neurol, 2019, 18(12): 1123-1135.
- [11] Lee SY, Schmit BD, Kurpad SN, et al. Acute magnetic reso-

nance imaging predictors of chronic motor function and tissue sparing in rat cervical spinal cord injury[J]. J Neurotrauma, 2022, 39(23-24): 1727-1740.

- [12] Stroman PW, Wheeler-Kingshott C, Bacon M, et al. The current state-of-the-art of spinal cord imaging: methods[J]. Neuroimage, 2014, 84: 1070-1081.
- [13] Nikpanah M, Willoughby W, Campbell-Washburn A, et al. Low versus ultra-high field MRI: how to select your MRI fleet[J]. Appl Radiol, 2023, 52(1): 28-41.
- [14] 李国斌, 张卫军. 三维快速自旋回波成像技术——SPACE
  [J]. 磁共振成像, 2010, 1(4): 295-298.
- [15] Zhou Y, Wang H, Liu C, et al. Recent advances in highly accelerated 3D MRI[J]. Phys Med Biol, 2023, 68(14).
- [16] Chokshi FH, Sadigh G, Carpenter W, et al. Diagnostic quality of 3D T2-SPACE compared with T2-FSE in the evaluation of cervical spine MRI anatomy[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2017, 38(4): 846-850.
- [17] Gad DM, Hussein MT, Omar NNM, et al. Role of MRI in the diagnosis of adult traumatic and obstetric brachial plexus injury compared to intraoperative findings[J]. Egyptian J Radiol Nucl Med, 2020, 51(1): 195.
- [18] 李星,苏晋生,申双,等.3.0 T磁共振成像单次激发快速自 旋回波序列联合可变翻转角成像序列在临床诊断神经根型 颈椎病的应用研究[J].实用医技杂志,2017,24(7):716-718.
- [19] Hellenbrand DJ, Quinn CM, Piper ZJ, et al. Inflammation after spinal cord injury: a review of the critical timeline of signaling cues and cellular infiltration[J]. J Neuroinflammation, 2021, 18(1): 284.
- [20] Dragojlovic N, Romanoski NL, Verduzco-Gutierrez M, et al. Prevalence and treatment characteristics of spastic hypertonia on first-time admission to acute inpatient rehabilitation[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2022, 101(4): 348-352.
- [21] Moriyama H, Ozawa J, Yakuwa T, et al. Effects of hypertonia on contracture development in rat spinal cord injury[J]. Spinal Cord, 2019, 57(10): 850-857.

【收稿日期:2024-3-5】 【本文编辑:曹静】