

· 临床论著 ·

单节段 Bryan 颈椎间盘置换远期屈伸旋转中心变化[△]

李传鸿¹, 俞兴^{1*}, 熊洋², 杨永栋¹, 王逢贤¹, 赵赫¹

(1. 北京中医药大学东直门医院骨科, 北京 100700; 2. 清华大学材料学院, 北京 100084)

摘要: [目的] 观察单节段 Bryan 人工颈椎间盘置换术 (artificial cervical disc replacement, ACDR) 远期随访的运动学结果。[方法] 回顾性分析 2010 年 1 月—2013 年 3 月于本院行单节段 Bryan ACDR 且末次随访手术节段活动度 (range of motion, ROM) >5° 的 38 例患者的临床资料。观察临床与影像结果。[结果] 38 例患者均顺利完成手术, 无严重并发症。随访 84~118 个月, 平均 (93.97±9.67) 个月。末次随访时, 患者颈椎病相关症状明显改善, JOA 评分较术前明显升高 ($P<0.05$), NDI 评分、颈痛及上肢痛 VAS 评分较术前显著降低 ($P<0.05$)。至末次随访期时, 所有患者均未出现症状加剧, 无再次入院, 无翻修手术。影像方面, 与术前相比, 末次随访时颈椎整体曲度和手术节段曲度均显著增加 ($P<0.05$), 而颈椎整体 ROM、手术节段 ROM、上邻节段 ROM 和下邻节段 ROM, 以及 COR-X 和 COR-Y 均无显著改变 ($P>0.05$)。相关分析表明, 末次随访时 COR-Y 与手术节段 ROM 呈显著负相关 ($P<0.05$), 与手术节段平移距离呈显著负相关 ($P<0.05$); 此外, 手术节段 ROM 与同节段平移距离呈正相关 ($r=0.772, P<0.05$)。COR-Y 与其他临床和影像指标均无明显相关性 ($P>0.05$), 而 COR-X 与任何指标均无相关性 ($P>0.05$)。[结论] 单节段 Bryan ACDR 7 年以上随访临床疗效与影像结果满意。末次随访时手术节段 COR-Y 与平移、ROM 的关系与正常颈椎节段类似, 这有助于模拟颈椎生理运动模式。

关键词: 人工颈椎间盘置换术, Bryan 颈椎间盘, 旋转中心, 运动学, 临床疗效

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2022) 11-0967-06

Long-term variation of flexion-extension center of rotation secondary to single-segment Bryan cervical disc replacement // Li Chuan-hong¹, Yu Xing¹, Xiong Yang², Yang Yong-dong¹, Wang Feng-xian¹, Zhao He¹. 1. Department of Orthopedics, Dongzhimen Hospital, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100700, China; 2. School of Materials, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: [Objective] To observe the long-term kinematic consequences, especially variation of the center of rotation (COR) of the involved segment, of single-segment Bryan cervical disc replacement (CDR). [Methods] A retrospective study was conducted on 38 patients who received single-segment Bryan CDR in our hospital from January 2010 to March 2013, and had range of motion (ROM) at the affected segment > 5° at the latest follow-up. Clinical and radiographic documents were analyzed. [Results] All the 38 patients had operation performed successfully without serious complications. The follow-up period lasted for 84 to 118 months, with a mean of (93.97±9.67) months. The symptoms related to cervical spondylosis were significantly improved at the latest follow-up. The JOA score significantly increased ($P<0.05$), whereas the NDI score and VAS scores for neck pain and upper limb pain significantly decreased postoperatively compared with those preoperatively ($P<0.05$). By the time of latest follow-up, no exacerbation of symptoms, readmission, or revision surgery had occurred in anyone of the patients. Radiographically, overall cervical curvature and involved segmental curvature significantly increased ($P<0.05$), whereas the overall ROM, involved segmental ROM, upper adjacent ROM and lower adjacent ROM, COR-X and COR-Y remained unchanged at the latest follow-up compared with those before operation ($P>0.05$). As correlation analysis, the COR-Y was significantly negatively correlated with the ROM ($P<0.05$), and the translational distance of the involved segment at the latest follow-up ($P<0.05$). In addition, the ROM was significantly positively correlated with translational distance of the same segment ($r=0.772, P<0.05$). The COR-Y had no significant correlation with other clinical and imaging items ($P>0.05$), while COR-X had no correlation with any parameters ($P>0.05$). [Conclusion] The clinical and radiographic results of single-segment Bryan CDR do still be satisfactory more than 7 years after operation. The relationships between COR-Y, translational displacement and ROM of the involved segment at the last follow-up is similar to that of normal cervical segment, which is conducive to remaining motion in physiologic manner.

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2022.11.02

[△]基金项目: 潍坊奥精仿生骨多中心临床研究项目 (编号: 601111)

作者简介: 李传鸿, 在读博士研究生, 研究方向: 脊柱外科, (电话) 15811101082, (电子信箱) chuanchuan19921111@163.com

* 通信作者: 俞兴, (电话) 010-84013324, (电子信箱) yuxing34@sina.com

Key words: artificial cervical disc replacement, Bryan cervical disc, center of rotation, kinematics, clinical outcome

人工颈椎间盘置换术 (artificial cervical disc replacement, ACDR) 作为颈椎病前路椎间减压后运动功能重建的一种选择, 近期、中远期随访临床疗效与融合术相似, 因保留了手术节段的运动功能, 可减少相邻节段应力负荷、延缓邻近节段退变的发生^[1, 2]。目前绝大部分研究仅关注颈椎整体 (C₂~C₇)、手术节段及邻近节段的活动度 (range of motion, ROM), 少有涉及具体运动模式的报道, 而符合生理状态的运动模式可延长假体寿命、减少关节突关节应力、改善邻近节段生物力学环境并影响 ACDR 长期疗效^[3, 4], 人工颈椎间盘在体运动学研究逐渐受到关注^[5]。由于缺乏精确评价颈椎三维运动模式的方法, 研究多以屈伸活动评价颈椎运动^[6]。目标节段屈伸旋转中心 (center of rotation, COR) 是根据屈伸侧位 (动力位) X 线片测量获得的运动中心^[6], 测量方法相对简便, 易于分析与对比。屈伸 COR 涵盖目标节段矢状面的复合运动信息, 可反映椎间运动模式^[7], 被逐渐用于 ACDR 术后运动学评价^[8]。

Bryan 假体是目前临床应用最广泛、具有仿生生理运动设计的一款人工颈椎间盘, 中长期随访获得较为满意的临床疗效^[2], 但鲜有 Bryan ACDR 远期随访运动学评价的文献。本研究采用中垂线法测量颈椎屈伸活动时手术节段的 COR, 对比术前与末次随访屈伸 COR 的位置, 并将屈伸 COR 与其他临床影像资料进行相关性分析, 探索末次随访时影响手术节段屈伸 COR 的因素, 现将研究结果报告如下。

1 资料与方法

1.1 纳入与排除标准

纳入标准: (1) 单节段神经根型和/或脊髓型颈椎病, 保守治疗 6 周以上无效, 行单节段 Bryan ACDR; (2) 年龄 30~60 岁; (3) 以椎间盘突出等软性压迫为病因, 手术节段尚有较好的 ROM 和椎间高度; (4) 随访 7 年以上, 末次随访手术节段 ROM > 5°^[9]; (5) 临床影像资料完整。

排除标准: (1) 椎体前后缘巨大骨赘, 后纵韧带、黄韧带骨化; (2) 先天性颈椎管狭窄, 颈椎节段性不稳或严重后凸畸形; (3) 颈椎骨折脱位、肿瘤、感染性疾病; (4) 曾接受其他颈椎手术。

1.2 一般资料

回顾性分析 2010 年 1 月—2013 年 3 月于本院行

单节段颈椎手术的患者, 共 38 例符合上述标准, 纳入本研究。其中, 男 18 例, 女 20 例; 年龄 34~59 岁, 平均 (46.86±6.91) 岁; 脊髓型颈椎病 24 例, 神经根型颈椎病 7 例, 混合型 7 例; 手术节段: C_{3/4} 节段 1 例, C_{4/5} 节段 15 例, C_{5/6} 节段 21 例, C_{6/7} 节段 1 例。本研究获得本院医学伦理委员会批准, 批准号: 2021DZMEC-082-02, 所有患者均签署知情同意书。

1.3 手术方法

全麻, 患者取仰卧位。行颈前右侧长约 5 cm 横行切口。自右侧颈动脉鞘与甲状腺鞘间隙分离, 进入咽后间隙, 显露椎前筋膜与颈长肌。手术椎间隙置入定位针, C 形臂 X 线机透视确认。切开纤维环, 用髓核钳、刮匙彻底去除椎间盘, 球形磨钻去除椎体前缘骨赘。撑开椎间隙至 8.5 mm 后, 定位椎体前缘横向中点, 安放矢状位楔形定位器及双通道磨钻钻套。根据术前 CT 与术中测量确定假体直径, 平行椎间隙角度精确打磨终板, 小刮匙与超薄型椎板咬骨钳去除椎体后缘与钩椎关节骨赘, 彻底减压至硬膜囊膨起、搏动。生理盐水冲洗椎间隙、充分止血后置入 Bryan 假体。C 形臂 X 线机透视确定假体位置满意后, 再次冲洗、止血, 放置引流管, 逐层关闭切口。

术后静滴抗生素 3 d 预防感染, 口服非甾体抗炎药 2 周, 应用脱水剂、营养神经类药物。术后 24 h 拔除引流管, 佩戴颈托下地活动。术后第 3 d 拍摄颈椎正侧位 X 线片评估假体位置, 术后 1 周拆线出院, 嘱患者佩戴颈托至术后 2 周, 积极进行颈肩部功能锻炼。

1.4 评价指标

记录围手术期资料。采用日本骨科协会 (Japanese Orthopaedic Association, JOA) 颈椎评分、疼痛视觉模拟评分 (visual analogue scale, VAS)、颈椎功能障碍指数 (neck disability index, NDI) 评估临床效果。改善率计算方式: JOA 评分: $[(\text{术后总分}-\text{术前总分}) / (17-\text{术前总分})] \times 100\%$; NDI、VAS 评分: $[(\text{术前总分}-\text{术后总分}) / \text{术前总分}] \times 100\%$ 。

行影像检测, 中立位侧位 X 线片测量颈椎总体曲度, 即 C₂~C₇ 的 Cobb 角; 测量手术节段曲度, 即局部 Cobb 角, 夹角开口向前为正值, 开口向后为负值。在过伸-过屈侧位 X 线片同法测量, 两种体位测量值的差即为活动度 (range of motion, ROM), 包括颈椎整体 (C₂~C₇) ROM、手术节段 ROM、上相邻节段 ROM 和下相邻节段 ROM。动力位 X 线片上测量假体上终板

前下角在下终板切线方向上移动的距离为手术节段矢状面平移距离^[10]。采用 Mimics 17.0 软件自动配准叠加颈椎动力位片中手术节段下位椎体，连接两个上位椎体上对应的 3 组标志点，连线的中垂线相交点为屈伸 COR^[9, 11]，测量方法见图 1。按 Amevo 等^[12]的方

法建立直角坐标系，C₆椎体下终板切线为 X 轴，后缘骨皮质影切线为 Y 轴，屈伸 COR 在 X、Y 轴上的投影点分别为 X2 与 Y2，OX1、OY1 分别为 C₆椎体的宽度和高度。屈伸 COR 的位置表述为：COR-X=(OX2/OX1)×100%，COR-Y=(OY2/OY1)×100%。

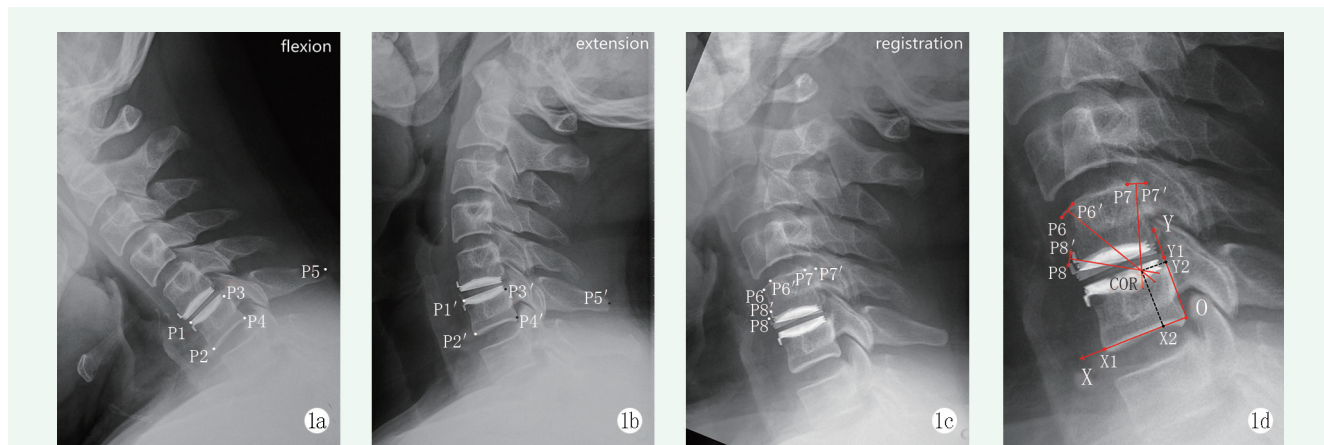


图 1 患者，男，36 岁，C_{5/6}椎间盘突出致脊髓型颈椎病，行单节段 Bryan ACDR 术后 89 个月，颈椎动力位 X 线片测量手术节段屈伸 COR 1a: 影像导入 Mimics 17.0，在前屈位 C₆椎体前上角、前下角、后上角、后下角与棘突尖端分别以 P1~P5 标记 1b: 同理在后伸位标出点 P1'~P5' 1c: 借助 P1~P5 与 P1'~P5' 的对应关系，使用软件的自动配准功能，将动力位 X 线片中的 C₆椎体及附件重叠。以 P6、P7 及 P8 标记前屈位 C₅椎体前上角、后上角及假体上终板前方凸缘的尖端，同理在后伸位标出点 P6'、P7' 及 P8' 1d: 连接 P6 与 P6'、P7 与 P7'、P8 与 P8'，分别作三条连线的中垂线，中垂线的交点即屈伸 COR。按 Amevo 等^[12]的方法建立直角坐标系，屈伸 COR 的位置表述为：COR-X=(OX2/OX1)×100%，COR-Y=(OY2/OY1)×100%

1.5 统计学方法

采用 SPSS 20.0 软件进行统计学分析。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，资料呈正态分布时，采用配对 *T* 检验；资料呈非正态分布时，采用 Wilcoxon 检验。屈伸 COR 测量结果与其他资料行 Pearson 或 Spearman 相关分析。*P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 临床结果

38 例患者均顺利完成手术，术中未发生神经、血管、食管损伤等并发症。手术时间 96~145 min，平均 (120.72±14.19) min，术中失血量 20~55 ml，平均 (36.17±11.03) ml，术后引流量 10~35 ml，平均 (20.69±6.23) ml。

38 例患者均获随访，随访时间 84~118 个月，平均 (93.97±9.67) 个月。患者临床评分结果见表 1，与术前相比，末次随访时 JOA 评分显著升高 (*P*<0.05)，平均改善率为 (84.12±13.84)%；NDI 评分、颈痛及上肢痛 VAS 评分显著降低 (*P*<0.05)，平均改善率分别为 (80.71±16.29)%、(84.94±12.04)%和

(86.85±11.46)%。

至末次随访期时，所有患者均未出现症状加剧，无再次入院，无翻修手术。

表 1 38 例患者术前和末次随访时临床评分结果 ($\bar{x} \pm s$) 与比较

指标	术前	末次随访	<i>P</i> 值
JOA 评分 (分)	13.77±2.71	16.74±0.51	<0.001
颈痛 VAS 评分 (分)	4.69±2.46	0.54±0.66	<0.001
上肢痛 VAS 评分 (分)	4.34±2.34	0.46±0.56	<0.001
NDI 评分 (分)	17.51±9.76	2.91±2.45	<0.001

2.2 影像测量结果

影像测量结果见表 2。与术前相比，末次随访时颈椎整体曲度和手术节段曲度均显著增加 (*P*<0.05)，而颈椎整体 ROM、手术节段 ROM、上邻节段 ROM 和下邻节段 ROM 均无显著改变 (*P*>0.05)。与术前相比，末次随访时 COR-X 和 COR-Y 均无显著改变 (*P*>0.05)。

2.3 末次随访时屈伸 COR 与其他指标的相关性分析

末次随访时屈伸 COR 与其他指标的相关性分析结果见表 3。末次随访时 COR-Y 与手术节段 ROM 呈显著负相关 ($P<0.05$)，末次随访时 COR-Y 与手术节段平移距离呈显著负相关 ($P<0.05$)。此外，手术节段 ROM 与同节段平移距离呈正相关 ($r=0.772$, $P<0.05$)。COR-Y 与其他临床和影像指标均无明显相关性 ($P>0.05$)，COR-X 与任何指标均无相关性 ($P>0.05$)。

3 讨论

屈伸 COR 是可靠稳定的脊柱运动质量参数，可间接反映目标节段生物力学环境^[4, 13]，在 ROM 正常时能发现脊柱功能单位 (functional spinal unit, FSU) 异常的运动模式^[14]，广泛用于颈椎运动功能异常的评估。Penning^[15]最早用中垂线法测量屈伸 COR。

随后 Amevo 等^[11, 12]引入描述屈伸 COR 位置的坐标系，将屈伸 COR 坐标归一化为占下位椎体宽度和高度的百分比，增加数据的可比性。随着医学图像处理软件的发展，可自动叠加颈椎动力位片原始影像并测量^[9]，极大提高了测量精度。

表 2 38 例患者术前和末次随访时影像测量结果 ($\bar{x} \pm s$) 与比较

指标	术前	末次随访	P 值
颈椎整体曲度 (°)	11.29±7.51	18.44±9.62	<0.001
颈椎整体 ROM (°)	44.26±12.95	46.68±11.93	0.398
手术节段曲度 (°)	3.18±4.60	5.64±4.50	0.036
手术节段 ROM (°)	8.73±4.12	10.24±3.45	0.161
上邻节段 ROM (°)	11.88±4.69	11.83±4.02	0.944
下邻节段 ROM (°)	7.22±3.75	8.29±4.85	0.426
COR-X (%)	39.76±17.94	43.24±16.55	0.639
COR-Y (%)	70.16±16.33	77.19±22.54	0.070

表 3 末次随访时屈伸 COR 与临床影像资料的 Pearson 和 Spearman 相关分析结果

指标	COR-X (%)		COR-Y (%)	
	r 值	P 值	r 值	P 值
年龄	0.244	0.201	-0.276	0.147
随访时间	0.003	0.989	0.038	0.845
JOA 评分	-0.266	0.163	0.213	0.268
颈痛 VAS 评分	0.036	0.853	0.025	0.897
上肢痛 VAS 评分	0.167	0.388	0.042	0.831
NDI 评分	0.277	0.146	-0.083	0.668
JOA 评分改善率	-0.279	0.143	0.184	0.340
颈痛 VAS 评分改善率	0.001	0.998	-0.068	0.726
上肢痛 VAS 评分改善率	-0.143	0.461	-0.032	0.868
NDI 评分改善率	-0.354	0.060	-0.075	0.699
颈椎整体 ROM	-0.003	0.987	-0.182	0.346
颈椎整体曲度	-0.108	0.577	-0.002	0.991
手术节段曲度	0.162	0.402	0.132	0.495
手术节段 ROM	-0.014	0.942	-0.622	<0.001
上邻节段 ROM	0.150	0.438	-0.078	0.688
下邻节段 ROM	-0.046	0.811	-0.269	0.157
手术节段平移距离	0.263	0.169	-0.767	<0.001

本研究发现，末次随访手术节段屈伸 COR 较术前无明显差异，说明置入 Bryan 假体未改变手术节段原有运动模式，保证了手术节段运动质量的长期稳定。4 个研究团队共随访了 82 例 (86 个节段) 接受 Bryan ACDR 的患者，随访时间 1~5 年不等^[3, 8, 16, 17]，末次随访时同样未发现屈伸 COR 较术

前出现统计学变化。

相关性分析表明，末次随访手术节段 COR-Y 与该节段平移距离呈负相关，屈伸 COR 随平移距离增大而下移。Koller 等^[18]在随访单节段 Discover ACDR 后也发现类似结果。此外，本研究发现手术节段 COR-Y 与该节段 ROM 也呈负相关，ROM 越大则屈

伸 COR 越靠下。颈椎 FSU 屈伸运动时存在平移与旋转两种椎间运动形式^[10, 19]。生理状态下,若椎间旋转与平移发生变化, COR-Y 随之改变, 平移增加导致屈伸 COR 下移, 旋转增加导致屈伸 COR 上移^[20]。这与本研究结果一致, 在以旋转为主要椎间运动形式的手术节段, 屈伸 COR 位于椎间盘内(图 2a), 而平移增加后屈伸 COR 下移(图 2b, 2c)。平

移为弧形滑移^[15], 会造成相邻椎体成角的变化, 故 FSU 的 ROM 定义为上位椎体相对下位椎体旋转与平移运动所产生的倾斜角之和^[21]。作者发现末次随访时手术节段平移距离与 ROM 呈正相关, 伴随着平移距离增加会出现 ROM 增大及屈伸 COR 下移(典型病例见图 2), 因此手术节段 ROM 越大则屈伸 COR 越靠下, 二者呈负相关。

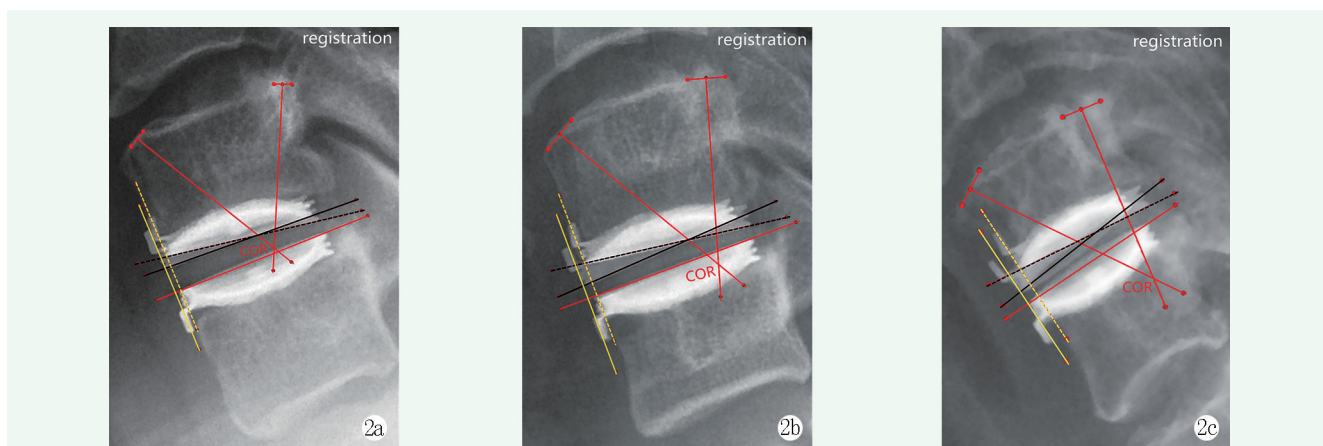


图2 手术节段平移与 ROM、COR-Y 相关性的典型病例, 黄实线与黄虚线间的距离为平移距离, 黑实线与黑虚线的夹角为 ROM 2a: 患者, 女, 49 岁, 随访时间 88 个月, 手术节段 C_{5/6}, 平移距离=0.4 mm, ROM=6.21°, COR-Y=102.86% 2b: 患者, 男, 36 岁, 随访时间 89 个月, 手术节段 C_{5/6}, 平移距离=1.1 mm, ROM=10.05°, COR-Y=90.63% 2c: 患者, 女, 51 岁, 随访时间 93 个月, 手术节段 C_{5/6}, 平移距离=1.6 mm, ROM=12.34°, COR-Y=62.23%

手术节段屈伸活动时, Bryan 假体上终板可沿双凸形髓核表面弧形滑移, 模拟生理状态下的椎间平移。作者推测, Bryan 假体置入后, 根据生理需要, 在软组织配合下, 可自动调整假体上终板相对下终板平移的距离, 从而获得适宜的 ROM, 并调节屈伸 COR 在上-下方向上处于最佳位置, 最终模拟术前屈伸 COR 及 ROM。此外, 上述椎间运动形式变化限定在正常范围内, 本研究测得的平移、ROM、屈伸 COR 都处于既往研究确定的生理范围^[11, 14, 22], 对比 White 标准^[23], 术后无颈椎不稳。

本研究存在一些局限: 椎间盘退变后屈伸 COR 会发生变化, 术前屈伸 COR 可能无法代表生理状态下的屈伸 COR^[24]; 仅对比术前和末次随访的资料不能反映变化趋势; 未观察到手术节段 COR-X 的影响因素, COR-X 可能与平移距离呈正相关^[20], 术中假体置入位置也可能影响 COR-X^[25]。

综上所述, 单节段 Bryan ACDR 术后 7 年以上随访取得了满意的临床疗效与影像结果, 保证了颈椎的运动学与生物力学稳定。Bryan 假体可在体内复制出生理状态下平移、ROM、COR-Y 的关系, 从而模拟

颈椎生理运动模式。

参考文献

- [1] Findlay C, Ayis S, Demetriades AK. Total disc replacement versus anterior cervical discectomy and fusion: a systematic review with meta-analysis of data from a total of 3160 patients across 14 randomized controlled trials with both short- and medium- to long-term outcomes [J]. *Bone Joint J*, 2018, 100-B (8): 991-1001.
- [2] Lavelle WF, Riew KD, Levi AD, et al. Ten-year outcomes of cervical disc replacement with the BRYAN cervical disc: results from a prospective, randomized, controlled clinical trial [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2019, 44 (9): 601-608.
- [3] Powell JW, Sasso RC, Metcalf NH, et al. Quality of spinal motion with cervical disk arthroplasty: computer-aided radiographic analysis [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2010, 23 (2): 89-95.
- [4] Mo Z, Zhao Y, Du C, et al. Does location of rotation center in artificial disc affect cervical biomechanics [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2015, 40 (8): E469-E475.
- [5] Sang H, Cui W, Sang D, et al. How center of rotation changes and what affects these after cervical arthroplasty: a systematic review and meta-analysis [J]. *World Neurosurg*, 2020, 135 (3): e702-e709.
- [6] Guo Z, Cui W, Sang DC, et al. Clinical relevance of cervical kine-

- matic quality parameters in planar movement [J]. *Orthop Surg*, 2019, 11 (2): 167-175.
- [7] Anderst W, Baillargeon E, Donaldson W, et al. Motion path of the instant center of rotation in the cervical spine during in vivo dynamic flexion-extension: implications for artificial disc design and evaluation of motion quality after arthrodesis [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2013, 38 (10): E594-E601.
- [8] Pickett GE, Rouleau JP, Duggal N. Kinematic analysis of the cervical spine following implantation of an artificial cervical disc [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2005, 30 (17): 1949-1954.
- [9] Liu B, Liu Z, VanHoof T, et al. Kinematic study of the relation between the instantaneous center of rotation and degenerative changes in the cervical intervertebral disc [J]. *Eur Spine J*, 2014, 23 (11): 2307-2313.
- [10] Reitman CA, Mauro KM, Nguyen L, et al. Intervertebral motion between flexion and extension in asymptomatic individuals [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29 (24): 2832-2843.
- [11] Amevo B, Worth D, Bogduk N. Instantaneous axes of rotation of the typical cervical motion segments: a study in normal volunteers [J]. *Clin Biomech*, 1991, 6 (2): 111-117.
- [12] Amevo B, Worth D, Bogduk N. Instantaneous axes of rotation of the typical cervical motion segments: II. Optimization of technical errors [J]. *Clin Biomech*, 1991, 6 (1): 38-46.
- [13] Li Y, Zhang Z, Liao Z, et al. Finite element analysis of influence of axial position of center of rotation of a cervical total disc replacement on biomechanical parameters: simulated 2-level replacement based on a validated model [J]. *World Neurosurg*, 2017, 106: 932-938.
- [14] Bogduk N, Mercer S. Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics [J]. *Clin Biomech*, 2000, 15 (9): 633-648.
- [15] Penning L. Differences in anatomy, motion, development and aging of the upper and lower cervical disk segments [J]. *Clin Biomech*, 1988, 3 (1): 37-47.
- [16] Lazaro BC, Yucesoy K, Yuksel KZ, et al. Effect of arthroplasty design on cervical spine kinematics: analysis of the Bryan Disc, ProDisc-C, and Synergy disc [J]. *Neurosurg Focus*, 2010, 28 (6): E6.
- [17] Ryu WH, Kowalczyk I, Duggal N. Long-term kinematic analysis of cervical spine after single-level implantation of Bryan cervical disc prosthesis [J]. *Spine J*, 2013, 13 (6): 628-634.
- [18] Koller H, Meier O, Zenner J, et al. In vivo analysis of cervical kinematics after implantation of a minimally constrained cervical artificial disc replacement [J]. *Eur Spine J*, 2013, 22 (4): 747-758.
- [19] Nowitzke A, Westaway M, Bogduk N. Cervical zygapophyseal joints: geometrical parameters and relationship to cervical kinematics [J]. *Clin Biomech*, 1994, 9 (6): 342-348.
- [20] Bogduk N, Amevo B, Pearcey M. A biological basis for instantaneous centres of rotation of the vertebral column [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 1995, 209 (3): 177-183.
- [21] White AR, Panjabi MM. The basic kinematics of the human spine. A review of past and current knowledge [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1978, 3 (1): 12-20.
- [22] Yue JJ, Bertagnoli R, McAfee PC, et al. Motion preservation surgery of the spine: advanced techniques and controversies [M]. Philadelphia: Saunders Elsevier, 2008: 85-96.
- [23] White AR, Johnson RM, Panjabi MM, et al. Biomechanical analysis of clinical stability in the cervical spine [J]. *Clin Orthop*, 1975, 109 (109): 85-96.
- [24] Muhlbauer M, Tomasch E, Sinz W, et al. In cervical arthroplasty, only prosthesis with flexible biomechanical properties should be used for achieving a near-physiological motion pattern [J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15 (1): 391.
- [25] Duggal N, Bertagnoli R, Rabin D, et al. ProDisc-C: an in vivo kinematic study [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2011, 24 (5): 334-339.

(收稿:2021-07-01 修回:2021-12-03)
(同行评议专家: 孙永生 刘 浩)
(本文编辑: 郭秀婷)