

寰枢关节运动学研究进展

李明洋, 王欢*, 崔少千, 段景柱, 金国鑫, 阎崇楠, 张磊

中国医科大学附属盛京医院脊柱外科, 辽宁 110004

【关键词】寰椎; 枢椎; 生物力学; 综述文献

【中图分类号】R 681.531 【文献标志码】A 【文章编号】1672-2957(2018)02-0114-06

【DOI】10.3969/j.issn.1672-2957.2018.02.011

Research progress of atlantoaxial kinematics

LI Ming-yang, WANG Huan*, CUI Shao-qian, DUAN Jing-zhu, JIN Guo-xin, YAN Chong-nan, ZHANG Lei

Department of Spinal Surgery, Shengjing Hospital, China Medical University, Shenyang 110004, Liaoning, China

【Key Words】Atlas; Axis; Biomechanics; Review literature

J Spinal Surg, 2018, 16(2): 114-119

胸腰椎由于椎间盘的存在, 在屈伸、侧曲时, 椎间盘受力一侧高度减少, 对侧高度增加, 成楔形, 介导脊柱的形变, 同时髓核向对侧移位, 压迫纤维环增加其张力, 通过髓核-纤维环的协同作用防止过度牵拉, 但是这一结构也限制了胸腰椎的旋转运动。寰枢椎之间没有椎间盘协助运动, 以旋转功能为主, 头颈部约47°的旋转功能及10°的屈伸功能均由寰枢关节完成^[1], 与胸腰椎区别较大, 脊柱三柱理论对其不适用。且寰枢关节骨结构相对纤细, 前、后纵韧带和节段性韧带均较胸腰段薄弱, 稳定性较差, 在儿童头部旋转时寰枢关节分离度可达85%^[2], 是脊柱中较脆弱和易损伤的部位^[3]。有报道称Ⅱ型齿突骨折约占成人颈椎骨折的20%, 占老年颈椎骨折的比例>50%^[4-5]。因此, 寰枢关节运动和损伤一直是脊柱外科领域的研究难点和热点。而且寰枢关节运动学的精确研究也将成为其生物力学分析的基础, 为寰枢关节手术的应用与开展提供必要的参考。本研究从寰枢关节解剖结构方面对其运动学进行分析总结, 并提出“车轮理论”, 对寰枢关节的旋转、屈伸、侧曲、垂直和被动运动进行系统描述, 以期与寰枢关节运动相关疾病的临床诊治、生物力学研究、手术技术开展提供必要的参考依据。

1 寰枢关节解剖结构

寰枢关节解剖结构复杂, 主要由2组关节构成, 一组是寰枢正中关节, 由寰椎前弓中部关节面与枢椎齿突前后关节面及齿突和横韧带之间的滑膜囊构成; 另一组是两侧的寰枢外侧关节, 由寰椎下关节面与枢椎上关节突及相应的滑膜囊和韧带组成^[6]。寰枢关节的特殊结构使其主要以枢椎齿突为轴做旋转运动, 同时可做一定程度的左右前后滑动, 部分运动可能诱发周围组织出现病理变化^[7]。据报道, 12%~19%的人群在椎动脉沟上出现沟环骨桥^[8], 在头颈部旋转时, 沟环可能对其内容神经血管产生压迫或激惹, 刺激交感神经丛引起椎动脉反射性痉挛, 造成脑供血不足性眩晕。

寰枢关节的稳定性主要靠韧带复合体来维持^[9]。附着于寰椎左右侧块内侧的横韧带是维持寰枢关节稳定的重要韧带。横韧带强韧, 可形变, 前屈时向下弯曲, 后伸时向上弯曲, 使寰枢关节运动有一定的弹性。成对的翼状韧带从齿突发出, 起到限制过度旋转与侧曲的作用, 但是抗拉力性能较横韧带弱, 易损伤, 遭受轴向旋转暴力时易断裂。Martin等^[10]将翼状韧带分为2支, 枕翼支连接齿突和枕骨髁, 寰翼支连接齿突和寰椎侧块内侧。Morishita等^[11]提出寰枢关节前方稳定性由横韧带做一级保护, 翼状韧带做二级防护, 后方稳定性则由寰椎前弓跟齿突间的对接维持。其他如覆膜、十字韧带上

作者简介: 李明洋(1994—), 硕士, 医师; 1075285126@qq.com

*通信作者: 王欢 spinewh@sj-hospital.org

下纵束和齿突尖韧带等也共同参与维持寰椎关节的稳定性^[12]。

2 寰枢关节运动

寰枢关节的运动受其关节面的大小、形状、方向以及韧带复合体弹性影响,可分解为三维空间内3个角变量和3个线变量共6个自由度的复合运动,寰枢关节的运动多为耦合运动,任一维度的运动常常伴随其他维度的改变。Boszczyk等^[13]对寰枢关节的解剖研究指出,寰枢外侧关节是一个双凸关节,关节面覆有软骨,寰椎下关节面和枢椎上关节面仅有极小的关节面相接触;同时还发现,旋转时双凸关节的特殊构象可使寰椎和颅骨缓慢垂直升降。本文结合文献^[14]对上颈椎的描绘,根据寰枢外侧关节面的解剖形态,将其简化作近似圆形,从矢状面对寰枢关节运动进行分析,发现寰椎关节相对于枢椎的运动如同行进的汽车在斜坡上的运动,车轮在坡面上滚动的同时做滑动运动,并且发生高度的变化,车轮在斜坡上的转动亦相当于寰枢关节旋转运动(图1)。

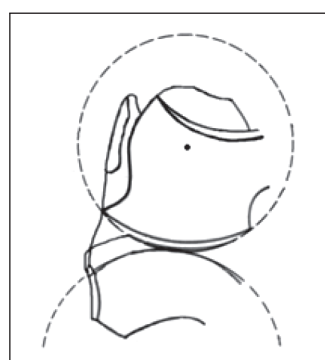
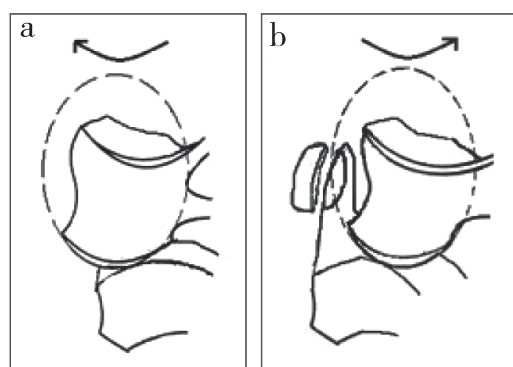


图1 左侧寰枢外侧关节矢状面“车轮理论”示意图

2.1 旋转运动

旋转运动由寰枢正中关节的旋转和寰枢外侧关节的滑动共同形成。如头颈向左旋转时,寰椎与韧带构成的骨韧带环以枢椎齿突为轴做逆时针旋转运动,与此同时,解剖和力学上相联系的寰枢外侧关节也发生运动,寰椎左侧块后移,右侧块前移,寰椎的下关节面沿曲线路径与枢椎上关节面发生相对滑动,反之亦然。由于旋转和滑动,“车轮”矢状面观转为近似椭圆形(图2)。Roche等^[15]研究发现瞬时旋转轴都在齿突内且大多在齿突后方,这或许跟位于齿突后方、对旋转起较大限制作用的翼状韧带相关。虽然左右旋转会使寰椎侧块向椎管内移动导致椎管变窄,但是椎管在寰椎水平最宽,且有

研究表明当旋转 $>64^\circ$ 时才会造成脊髓压迫^[16],而常人寰枢关节的最大轴向旋转角度多 $<60^\circ$ ^[17]。Ishii等^[18]根据头部旋转角度的改变,对上下颈椎相关运动情况进行了近似曲线描绘,发现并非线性,可能是由于各节段对旋转压力的顺应性不同,他们提出颈椎旋转中寰枢椎(上颈椎)先行旋转,随后下颈椎再发生旋转。李浩曦等^[19]的研究也指出,小范围运动时寰枢椎运动与头部旋转呈线性相关,但是当旋转角度达到约 30° 时变为非线性。一般认为,当寰枢椎轻微转动 $<30^\circ$ 时,枢椎相对静止,旋转由寰椎独立完成;当旋转角度增加, $\geq 30^\circ$ 且 $<60^\circ$ 时,寰枢椎同时旋转,但是寰椎旋转幅度相对较大;当旋转角度 $\geq 60^\circ$ 时,其他节段协同寰枢椎完成旋转运动^[20]。



a: 头颈向右旋转,寰椎左侧块向前滑动,右侧块向后滑动 b: 头颈向左旋转,寰椎左侧块向后滑动,右侧块向前滑动

图2 寰枢关节旋转运动示意图(隐去寰枢椎弓)

2.2 屈伸、侧曲运动

与股骨髁相对于胫骨平台类似,在屈伸运动中,寰椎侧块下关节面相对于枢椎上关节面同时做滚动运动与滑动运动。如果在屈伸过程中寰椎侧块仅做滚动运动而无滑动运动,上下关节面的接触点将前移或后移,同时寰椎前弓后关节面和齿突前关节面之间的上部或下部间隙将相应增宽;如果在屈伸过程中寰椎侧块仅做滑动运动而无滚动运动,同理寰齿前间隙也将增宽。这种增宽是寰枢关节前脱位的表现,临床上正常人群并未发现此类改变,这是由于横韧带维持稳定的作用。横韧带的牵拉使得寰枢屈伸运动中滚动运动与滑动运动同时存在并相互代偿。

颈椎的侧曲不仅与侧块间的滑动相关联,还伴有轴向旋转运动,但是上、下颈椎在耦合运动方向上存在差别与争议。Ishii等^[21]发现在下颈椎各节段轴向运动与侧曲方向相同,且旋转角度多 $<2^\circ$ 。

侧曲时一侧关节突向腹侧移动, 对侧关节突向背侧移动, 且腹侧移动同时伴有前向移动, 背侧移动同时伴有后向运动。这种一侧前向移动另一侧后向移动的耦合形成了复合轴向旋转运动。于是, 向左侧曲的同时伴随向左的旋转运动, 向右侧曲的同时伴随向右的旋转运动。但是上颈椎的联合运动恰恰相反, 侧曲和旋转运动方向相异, 且寰枢椎相对旋转角度可达 $17.1^{\circ} \pm 7.1^{\circ}$, 远大于其他节段, 可能是为了维持头部水平方向的稳定性, 寰枢关节的一种代偿性运动。Cook 等^[22]对多项研究颈椎运动情况的文献进行了综述分析, 基本证实了这一特点, 并指出二维或三维研究、体内或体外研究可能会影响得出的结论。Panjabi 等^[23]研究发现全颈椎, 包括上下颈椎, 联合运动方向都是相同的, 这种差异可能正是研究方法不同造成的。Panjabi 等^[23]的研究是标本测量, Ishii 等^[21]的研究是活体测量, 由于离体标本年龄较大, 而颈椎相关重要组织退变较早, 故可能会存在一些差异, 有必要进行更合理的方案设计与研究。

2.3 垂直运动

寰枢关节垂直运动是“车轮”构型下的一种微小的伴随运动, 幅度为 2~3 mm。基于上述运动研究, 将位于不同位置和运动状态下的寰椎侧块简化为与枢椎上关节面相切的近似圆形, 可以清楚看到, 当寰枢关节处于中立休息位或称作零旋转位时, 以“O”点为圆心的圆所处位置最高。无论前后移动还是旋转运动, 圆心“O”的位置都会降低。同时由于耦合运动的存在, 非中立位的矢状面观为近椭圆形, 关节面接触点下降的高度 h2 与圆心“O”下降的高度 h1 并不相同(图3)。

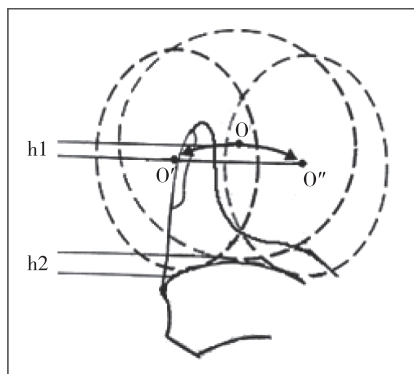


图3 寰枢关节垂直运动示意图

对于寰枢垂直运动的讨论并不多见。Li-jun 等^[24]提出了“浮标理论”, 他们发现寰椎承受轴向压力或

骨折时, 侧块有侧向滑动倾向, 增加了横韧带承受的横向张力, 致其被破坏。但是侧块的滑动减少了寰枢椎的高度, 包括翼状韧带、齿突尖韧带、覆膜等在内的纵向韧带相对松弛, 避免同时被破坏, 保留了防止寰枢椎脱位的第二道防线。然而松弛的韧带注定削弱了其稳定的功能, 寰枢不稳依然存在, 所以通过固定以减少侧块移位、保持寰枢椎高度、重塑纵向韧带张力, 可以长期保持寰枢椎的稳定性。这种现象与浮标相似, 如果水位下降, 连接浮标的绳子会松弛, 致使浮标不稳定, 而水位上涨会使绳子张力增加, 浮标重获稳定。这个理论重点强调了在横韧带损伤时纵向韧带维持上颈椎稳定的能力, 但是也侧面反映出寰枢关节垂直运动的客观存在。

垂直运动的发生可能与寰椎侧块相关。内薄外厚的寰椎侧块呈楔形嵌插在枕骨髁和枢椎上关节面之间, 不仅承载着枕部载荷, 将应力传向前后弓及枢椎, 同时还维持着上颈椎的垂直距离^[25]。王鹏等^[26]的研究指出在寰椎环形结构破坏后施加垂直负荷, 分离移位的侧块同时合并前后、上下方向的移位。笔者猜测寰枢关节垂直运动的本质是内部小关节复杂的空间旋转移位。

2.4 被动运动

Bogduk 等^[27]的研究中提到, 鲜有肌肉直接作用于寰椎。提肩胛肌从寰椎横突发出, 但是不作用于寰椎而是肩胛, 上斜肌和头后小直肌同样起于寰椎, 但是作用于颅骨。颈长肌是少有的直接作用于寰椎的肌肉, 可以使之前屈, 但是并无其他肌肉拮抗。所以, 由于缺少肌肉的直接作用, 寰椎的运动常常是被动的, 多受头颈运动的影响。寰椎的被动运动最常见于屈伸运动, 且方向相反, 在颈椎过屈时寰椎是伸展的。这可能因为寰椎在头颈之间, 需平衡寰枢外侧关节的关节面接触点且对抗头颈压力所致。力线在平衡点前, 则前屈; 压力在平衡点后, 则后伸, 与其他节段屈伸状态无关。寰椎的旋转运动则与头夹肌和胸锁乳突肌等对头部的牵拉作用相关。这一特殊运动形式与 Ishii 等^[21]指出的上颈椎联合运动方向相反有关。

寰枢关节滑膜囊内容物在寰枢关节运动中也发生被动的形态变化。Webb 等^[28]认为在寰枢关节内存在一种类似半月板的结构, 是由滑膜折叠形成的滑膜襞, 协助完成寰枢关节的运动。滑膜襞充满由不均匀透明软骨覆盖的关节内部, 可视为一种被动填充物, 根据关节内的空间来调整形态, 静息时充填不均匀的空间, 运动时随关节移动。一般认为滑

膜襞具有保护和润滑关节、增强关节稳定性及承担负重的作用。另外由于滑膜襞内存在神经纤维以及P物质等神经肽,滑膜襞被认为是部分头颈疼痛的潜在来源。

3 邻近结构运动对寰枢关节运动的影响

3.1 寰枕关节运动

寰枕关节与寰枢关节联系密切,常合称为枕寰枢复合体,共同完成颈椎40%的屈伸运动和60%的旋转运动^[29],但是二者的运动方式有很大不同。寰枕关节由枕骨髁和寰椎侧块上关节构成,以屈伸运动为主。前屈时,枕骨髁在寰椎下凹的关节面内向后滚动;屈曲时向前滚动^[7]。枕骨髁在上关节凹的左右侧壁和周围关节韧带的限制下,旋转和滑动运动范围极小。尹一恒等^[30]指出在生理状态下,寰枕关节可完成23.0°~24.5°状态下的左右屈伸运动,2.4°~7.5°的旋转运动以及3.4°~5.5°的侧曲运动。

3.2 其他邻近结构

寰枢运动不仅与其自身独特的关节结构密切相关,同时也受其他邻近结构的影响。Grondin等^[31]研究了颌骨在3种不同位置对上颈椎活动度的影响,指出在牙齿咬合位和舌抵硬腭位上,上颈椎的活动范围较中立休息位有所减少,并建议学者在研究上颈椎活动度时选取颌骨中立休息位测量。Wang等^[32]指出寰椎前脱位患者头颈部易出现前凸消失甚至后凸畸形,下颈椎为了维持头部平衡发生代偿性前凸,表现为“鹅颈”畸形,可见上下颈椎间的联系颇为密切。另外Tsang等^[33]的同类相关系数分析表明,颈部的屈伸、旋转运动中也有胸椎的参与,特别是上胸椎。Kim等^[34]的研究更指出颈椎生理曲度的改变对全脊柱序列都会产生影响。所以脊柱各节段的运动模式各具特点又密切相关,无论在生理还是病理下研究脊柱运动情况和受力情况,都应该注意相邻节段的影响和改变。

4 寰枢关节运动评价指标

4.1 寰齿前间隙(ADI)

ADI是最早也是目前最常用的评价寰枢关节稳定性的指标。Liu等^[35]对700名正常成年人研究发现,中立位ADI范围为0.71~3.12 mm,且与年龄呈线性负相关,同时与性别无关。目前国内多以成人ADI>3 mm,儿童>4 mm时怀疑寰枢关节不稳,但确诊仍需结合临床查体及其他检查。

4.2 寰齿侧间隙(LADI)

LADI同样应用较早,目前在临床上多用于比较对称性,不做距离测量,但是部分学者指出LADI不对称的情况较为常见。Lee等^[36]在发育正常的研究对象中发现,有54% LADI不对称,并提出可能与寰椎侧块、枢椎齿突形态上的解剖变异有关。正常情况下,枢椎是由2块平行的骨骺生长发育而来,任何一块发育不对称都可能造成齿突形态变异,导致LADI不对称,所以总体来讲该指标单独诊断意义不大,临床上必须结合其他影像学指标。

4.3 寰枢椎相对旋转角

寰枢椎相对旋转角也是一个重要参考指标。头部在旋转过程中,寰枢椎并非同步旋转,从而形成了旋转角度差,即为相对旋转角。测量方法主要为Dvorak等^[37]提出的CT二维平面图像测量法,通过分别测量矢状面上寰、枢椎中心线与颅骨中心线的夹角,再计算差值,间接测得寰枢椎相对旋转角。这种方法在实际测量过程中误差较大,但是尚未见有其他方法大范围应用的报道,如何合理简便地测量相对旋转角,并确定病理、生理诊断标准,值得更深入的研究。

4.4 寰枢关节中性区

临床上通过颈椎活动范围来判断寰枢关节运动情况比较常见,但是Panjabi^[38]提出用中性区的比例来判断寰枢关节的稳定性比单纯用运动范围判断更为灵敏。他将寰枢关节的运动范围分为中性区和弹性区,中性区是指在中立位椎间运动仅受微弱的脊柱被动阻力抵抗的区域,弹性区是从弹性位移起点开始受韧带牵拉阻力的余下区域。中性区范围变大提示脊柱损伤或肌肉韧带力量减弱,可能会导致寰枢关节不稳;中性区范围减小,可能有骨赘形成、手术固定融合、肌肉韧带力量增强等情况。研究指出,正常情况下寰枢关节中性区占活动范围的比例在前屈位约为27.8%,后伸位约为29.4%,侧曲位约为17.9%,旋转时约为76.1%。黄菊英等^[39]的研究发现中性区的比例在屈伸位约为51%,轴位约为78%,与Panjabi^[38]的结果相似,侧曲位比例约为59%,还有待进一步论证。

5 展 望

寰枢关节运动学是颈椎乃至整个脊柱运动学中十分独特的一项研究。寰枢椎的解剖结构决定了其与众不同的运动基础。寰枢关节运动的本质主要是寰枢关节内部的运动,肉眼很难观察到各种状态下

的运动差异^[40]。在研究方法上,活体测量比标本测量更能准确地表达躯体运动的真实情况,越来越多的学者尝试将新技术应用到活体颈椎的研究之中,如三维动态X线技术^[41]、双平面成像技术^[42]、双荧光透视影像技术^[43]等。但是这些先进的影像技术应用于寰枢椎的报道较为少见,或者受辐射影响应用于寰枢椎的样本量较小。而且目前对寰枢关节运动的研究大多仍局限于对运动范围的研究,未来在更先进的影像技术、测量设备和有限元分析的帮助下,寰枢关节运动的本质可以得到更精确更完备的解释,寰枢关节内小关节的特殊构型、韧带和肌肉对运动的影响、运动或不同体位时寰枢关节的变化等方面都需要更先进的理论支持,是未来寰枢关节运动学研究的重点方向。在临床和病理研究持续火热的同时,寰枢关节运动学可以成为新的突破点和增长点,并且为生物力学的研究以及手术技术的开展与改进提供更多帮助,值得更为深入的研究与探索。

参考文献

- [1] Aryan HE, Newman CB, Nottmeier EW, et al. Stabilization of the atlantoaxial complex via C₁ lateral mass and C₂ pedicle screw fixation in a multicenter clinical experience in 102 patients: modification of the Harms and Goel techniques[J]. J Neurosurg Spine, 2008, 8(3): 222-229.
- [2] Villas C, Arriagada C, Zubieta JL. Preliminary CT study of C₁-C₂ rotational mobility in normal subjects[J]. Eur Spine J, 1999, 8(3): 223-228.
- [3] Goel A. Craniovertebral junction instability: a review of facts about facets[J]. Asian Spine J, 2015, 9(4): 636-644.
- [4] Ardeschiri A, Asgari S, Lemonas E, et al. Elderly patients are at increased risk for mortality undergoing surgical repair of dens fractures[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2013, 115(10): 2056-2061.
- [5] Dugailly PM, Sobczak S, Lubansu A, et al. Validation protocol for assessing the upper cervical spine kinematics and helical axis: an *in vivo* preliminary analysis for axial rotation, modeling, and motion representation[J]. J Craniovertebr Junction Spine, 2013, 4(1): 10-15.
- [6] 刘静文, 黄菊英, 营凤增. 寰枢关节脱位病因及其相关作用机制研究[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2017, 17(3): 228-231.
- [7] 齐伟, 李一鸣, 张艳美, 等. 寰枢关节紊乱对椎动脉供血的影响[J]. 长春中医药大学学报, 2015, 31(5): 1065-1067.
- [8] Hong JT, Lee SW, Son BC, et al. Analysis of anatomical variations of bone and vascular structures around the posterior atlantal arch using three-dimensional computed tomography angiography[J]. J Neurosurg Spine, 2008, 8(3): 230-236.
- [9] 韩应超, 潘杰, 王善金, 等. 上颈椎韧带对寰枢椎稳定性影响的生物力学研究[J]. 中华骨科杂志, 2013, 33(6): 628-634.
- [10] Martin MD, Bruner HJ, Maiman DJ. Anatomic and biomechanical considerations of the craniovertebral junction[J]. Neurosurgery, 2010, 66(3 Suppl): 2-6.
- [11] Morishita Y, Falakassa J, Naito M, et al. The kinematic relationships of the upper cervical spine[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2009, 34(24): 2642-2645.
- [12] Debernardi A, D'Aliberti G, Talamonti G, et al. The craniovertebral junction area and the role of the ligaments and membranes[J]. Neurosurgery, 2015, 76(Suppl 1): S22-32.
- [13] Boszczyk BM, Littlewood AP, Putz R. A geometrical model of vertical translation and alar ligament tension in atlanto-axial rotation[J]. Eur Spine J, 2012, 21(8): 1575-1579.
- [14] 卡潘德吉. 骨关节功能解剖学(下卷): 脊柱、骨盆带与头部[M]. 顾冬云, 戴魁戎, 译. 北京: 人民军医出版社, 2011.
- [15] Roche CJ, King SJ, Dangerfield PH, et al. The atlanto-axial joint: physiological range of rotation on MRI and CT[J]. Clin Radiol, 2002, 57(2): 103-108.
- [16] Mazzara JT, Fielding JW. Effect of C₁-C₂ rotation on canal size[J]. Clin Orthop Relat Res, 1988(237): 115-119.
- [17] Salem W, Lenders C, Mathieu J, et al. *In vivo* three-dimensional kinematics of the cervical spine during maximal axial rotation[J]. Man Ther, 2013, 18(4): 339-344.
- [18] Ishii T, Mukai Y, Hosono N, et al. Kinematics of the upper cervical spine in rotation: *in vivo* three-dimensional analysis[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2004, 29(7): E139-144.
- [19] 李浩曦, 陈兆雄, 刘涛, 等. 正常成年人寰枢椎直立主动旋转运动特征的研究[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2017, 32(9): 897-900.
- [20] 陶宗贵, 翟所席, 刘桂东, 等. 寰枢关节的功能性CT解剖研究[J]. 中国医学创新, 2014, (8): 70-72.
- [21] Ishii T, Mukai Y, Hosono N, et al. Kinematics of the cervical spine in lateral bending: *in vivo* three-dimensional analysis[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2006,

- 31(2): 155-160.
- [22] Cook C, Hegedus E, Showalter C, et al. Coupling behavior of the cervical spine: a systematic review of the literature[J]. J Manipulative Physiol Ther, 2006, 29(7): 570-575.
- [23] Panjabi MM, Crisco JJ, Vasavada A, et al. Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2001, 26(24): 2692-2700.
- [24] Li-Jun L, Ying-Chao H, Ming-Jie Y, et al. Biomechanical analysis of the longitudinal ligament of upper cervical spine in maintaining atlantoaxial stability[J]. Spinal Cord, 2014, 52(5): 342-347.
- [25] 李小峰, 覃俊杰, 李强, 等. 掌骨重建钢板模拟单节段固定修复寰椎骨折: 体外三维运动生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(39): 5819-5824.
- [26] 王鹏, 孟春玲, 余新光, 等. 寰椎环形结构完整性和继发性颅底陷入关系的有限元分析[J]. 解放军医学院学报, 2012, 33(11): 1167-1170.
- [27] Bogduk N, Mercer S. Biomechanics of the cervical spine. I: normal kinematics[J]. Clin Biomech(Bristol, Avon), 2000, 15(9): 633-648.
- [28] Webb A, Darekar A, Rassoulian H. The influence of age, anthropometrics and range of motion on the morphometry of the synovial folds of the lateral atlantoaxial joints: a pilot study[J]. Eur Spine J, 2011, 20(4): 542-549.
- [29] 童杰, 朱青安. 上颈椎内固定后路锚定方式的研究进展[J]. 脊柱外科杂志, 2016, 14(3): 175-180.
- [30] 尹一恒, 余新光, 王鹏, 等. 寰枕融合下的颅颈交界区有限元生物力学分析[J]. 中华外科杂志, 2015, 53(3): 211-214.
- [31] Grondin F, Hall T, von Piekartz H. Does altered mandibular position and dental occlusion influence upper cervical movement: a cross-sectional study in asymptomatic people[J]. Musculoskelet Sci Pract, 2017, 27: 85-90.
- [32] Wang S, Passias PG, Cui L, et al. Does atlantoaxial dislocation influence the subaxial cervical spine? [J]. Eur Spine J, 2013, 22(7): 1603-1607.
- [33] Tsang SM, Szeto GP, Lee RY. Normal kinematics of the neck: the interplay between the cervical and thoracic spines[J]. Man Ther, 2013, 18(5): 431-437.
- [34] Kim JH, Park JY, Yi S, et al. Anterior cervical discectomy and fusion alters whole-spine sagittal alignment[J]. Yonsei Med J, 2015, 56(4): 1060-1070.
- [35] Liu K, Xie F, Wang D, et al. Reference ranges for atlantodental interval in adults and its variation with age and gender in a large series of subjects on multidetector computed tomography[J]. Acta Radiol, 2015, 56(4): 465-470.
- [36] Lee S, Joyce S, Seeger J. Asymmetry of the odontoid-lateral mass interspaces: a radiographic finding of questionable clinical significance[J]. Ann Emerg Med, 1986, 15(10): 1173-1176.
- [37] Dvorak J, Hayek J, Zehnder R. CT-functional diagnostics of the rotatory instability of the upper cervical spine. Part 2. An evaluation on healthy adults and patients with suspected instability[J]. Spine(Phila Pa 1976), 1987, 12(8): 726-731.
- [38] Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part II. Neutral zone and instability hypothesis[J]. J Spinal Disord, 1992, 5(4): 390-397.
- [39] 黄菊英, 聂庆斌, 王兴文, 等. 颅颈交界区的不稳对寰枢侧方关节生物力学的影响[J]. 中华神经外科杂志, 2015, 31(4): 345-349.
- [40] 李小峰, 覃俊杰, 李强, 等. 掌骨重建钢板模拟单节段固定修复寰椎骨折: 体外三维运动生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(39): 5819-5824.
- [41] Inokuchi H, Tojima M, Mano H, et al. Neck range of motion measurements using a new three-dimensional motion analysis system: validity and repeatability[J]. Eur Spine J, 2015, 24(12): 2807-2815.
- [42] Anderst WJ, Donaldson WF 3rd, Lee JY, et al. Continuous cervical spine kinematics during *in vivo* dynamic flexion-extension[J]. Spine J, 2014, 14(7): 1221-1227.
- [43] 魏冬, 夏群, 苗军, 等. 生理载荷下健康成人寰枢椎三维瞬时运动的特点[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(17): 24486-24492.

(收稿日期: 2017-07-12)

(本文编辑: 张建芬)