

颈椎后凸畸形截骨相关医源性椎动脉损伤的危险因素及防治进展

Osteotomy-related iatrogenic vertebral artery injury in cervical kyphosis deformity: review of risk factors and management strategies

徐洁涛,王冰,吕国华,蒋彬,李亚伟,李磊,戴瑜亮,郑振中

(中南大学湘雅二医院脊柱外科 410011 长沙市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2019.10.08

中图分类号:R687.3,R619 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2019)-10-0919-06

颈椎后凸畸形是指正常颈段生理前凸消失,出现局部或整体曲度后凸的形态学改变。其病理类型多样,包括退变性、肿瘤性、创伤性、医源性以及强直性脊柱炎引起的炎症性颈椎后凸畸形。后凸严重者可因下颌内收影响患者的正常视野乃至呼吸和吞咽,出现“颌触胸”畸形。随着矫形技术和内固定技术的发展,严重颈椎后凸畸形亦可通过颈椎截骨矫形手术(cervical osteotomy,CO)获得理想的颈椎曲度。然而颈椎后凸畸形病理类型多样,解剖结构复杂,故其截骨难度和风险亦较大。Ames等^[1]依椎体切除及软组织松解范围将颈椎截骨技术分为7级,截骨难度逐级增加。医源性椎动脉损伤(iatrogenic vertebral artery injury, IVAI)为其严重并发症之一,可造成椎动脉假性动脉瘤、迟发性出血、脑、延髓和颈髓梗死,神经功能缺损乃至死亡等灾难性后果。颈椎截骨是 IVAI 的高风险操作之一,但既往研究多关注颈椎手术暴露及置钉操作中 IVAI 的发生。笔者就颈椎后凸畸形截骨相关 IVAI 发生的危险因素、预防措施以及 IVAI 后处理进行综述。

1 IVAI 的发生率

因研究人群、病理类型、手术策略及术者经验不一,既往文献报道颈椎手术中 IVAI 的发生率为 0~8.2%^[2-12]。2014 年国际颈椎研究学会(International Cervical Spine Research Society, CSRS)发布的一项 IVAI 问卷调查研究^[2]显示,颈椎手术中 IVAI 的发生率为 0.07%(111/163324)。其中前路椎体切除(23.4%)是导致 IVAI 最常见的操作之一。目前报道的颈椎后凸畸形手术中,3 级及以下截骨中 IVAI 发生率为 0~1.96%^[3,5-8,10,11],4 级以上截骨因易损伤椎动脉而使用较少,多为个案报道。

2 危险因素

2.1 椎动脉异常

椎动脉是锁骨下动脉的第一分支,分为 4 个区段,即椎前段(V1)、横突段(V2)、枕下段(V3)和颅内段(V4)。V2 段多在 C6 横突孔开始上升(93%)^[13]。Wakao 等^[14]报道正常人群中约 8.1%存在椎动脉变异。Eskander 等^[15]建议修改 Oga 提出的 C1~C7 椎动脉异常分类,以 MRI 作为评估方式对椎动脉异常重新分类:(1)孔内异常,椎动脉中线偏离(midline migration),即椎动脉位于钩椎关节内侧或外侧 1.5mm 以内;(2)孔外异常,椎动脉不包含于 C2~C6 横突孔内;(3)动脉异常,椎动脉开窗畸形、发育不良或缺如。作者认为涉及中线偏离的孔内异常是椎体切除术中 IVAI 的高危因素,其研究显示 7.6%的患者存在椎动脉中线偏离。此前 Eskander 等^[16]曾报道 1 例 C6 椎体次全切除术中出现左侧 IVAI 病例,患者术前 CT 及 MRI 检查显示左侧椎动脉迂曲,中线偏离侵入 C6 椎体,术中高速钻头横向推进时出现左侧椎动脉裂伤。Burke 等^[7]同样认为椎动脉迂曲侵入椎体中是颈椎截骨术中 IVAI 的重要危险因素。

值得注意的是,既往研究报道的颈椎截骨术中 86% 的 IVAI 发生于左侧^[7,10,17]。Burke 等^[7]报道的 6 例 IVAI 中 5 例为左侧,作者认为可能由于右侧入路时不对称截骨或远侧过度截骨所致,使左侧更易损伤。而王洪立等^[18]认为因医师多为右利手,导致左侧减压范围更偏向于外侧。笔者猜测亦可能与左侧椎动脉起源有关。当左侧椎动脉直接起源于主动脉弓时,该垂直发出结构在增加椎动脉供血的同时也因主动脉弓较大内压而致椎动脉破裂或形成夹层的风险增加。既往研究表明,人群中椎动脉发育不良的发生率为 11.6%~26.5%^[19,20],当一侧椎动脉细小或发育不良时,另一侧则可代偿性增粗、迂曲;人群中约 50%的个体左椎动脉直径明显大于右侧,左侧常为优势侧^[21,22],亦可增大手术损伤风险。

2.2 病理类型

既往研究并未就颈椎后凸畸形病理类型与 IVAI 的相关性作具体研究。Eskander 等^[16]认为肿瘤等病理状态因其骨质较差,易为迂曲椎动脉侵入,进而出现椎动脉中线偏离,最终发展成为颈椎后凸畸形截骨中 IVAI 最为重要的危险因素之一。继发于肿瘤的骨软化亦可能导致术中钻

第一作者简介:男(1993-),硕士研究生在读,研究方向:脊柱外科
电话:(0731)85295125 E-mail:178212229@csu.edu.cn
通讯作者:王冰 E-mail:bingwang20021972@aliyun.com

孔或截骨操作更易出现 IVAI。神经纤维瘤病 1 型 (neurofibromatosis 1, NF1) 所致颈椎后凸畸形可伴有椎体营养不良、低骨量以及血管异常 (如动脉瘤、狭窄及动静脉畸形), 可增加颈椎截骨术中 IVAI 风险^[23, 24]。除 NF1 外, Marfan 综合征等亦与血管病变相关。而半椎体畸形以及 Klippel-Feil 综合征 (Klippel-Feil syndrome, KFS) 等疾病所致的颈椎后凸畸形常可合并椎动脉走行及位置异常, 如先天性半椎体患者椎动脉穿过半椎体横突孔^[8], Klippel-Feil 综合征伴有椎动脉高位骑跨^[25]或起源异常^[26]等, 均使颈椎后凸畸形截骨面临更大的 IVAI 风险。

退变性颈椎后凸畸形的颈椎序列异常可使椎动脉形成迂曲路径以适应其退行性改变, 进而出现中线偏离等椎动脉异常, 甚至侵入椎体。既往报道多例行椎体切除术中出现 IVAI 的患者均伴有退行性疾病^[7, 10, 11]。其次, 随着颈椎退行性改变, 钩椎关节可因变平而不易识别, 当存在较大骨赘时, 颈椎前路截骨矫形手术中线亦难以识别。Eskander 等^[16]报道 1 例存在可能继发于退行性骨关节炎的椎动脉中线偏离病例, 尽管术中以钩椎关节确定椎体切除宽度, 高速钻头横向推进时仍出现 IVAI。

2.3 截骨等级及截骨位置

从颈椎后凸畸形截骨等级角度考虑, 3 级以下截骨在具备良好矫形功能的同时亦极少损伤椎动脉, 故而使用较多。Konomi 等^[27]报道 1 例伴有单侧椎动脉闭塞的创伤性僵硬颈椎后凸畸形病例, 术者为避免损伤健侧椎动脉, 行 C5 椎体次全切除 (3 级截骨)。4 级以上截骨则会增加 IVAI 风险, 因而其使用也较少。经椎弓根楔形截骨术 (pedicle subtraction osteotomy, PSO) 对中柱压缩明显, 易造成椎动脉的扭曲和受压。Mummaneni 等^[28]介绍一种用于矫正强直性脊柱炎颈胸畸形的颈椎截骨技术, 即 C6 伸展性截骨术 (5 级截骨); Post 等^[29]报道 1 例以 C4 为中心的退行性颈椎后凸畸形病例, 该患者行 C4 PSO (6 级截骨); Kim 等^[30]报道 1 例强直性脊柱炎所致的重度颈椎后凸畸形病例, 该患者行 C6 PSO (6 级截骨) 手术, 术中术后均未出现椎动脉相关并发症。但以上多为个案报道, 缺乏更多的案例报道支持。

从颈椎解剖结构角度考虑, 椎动脉在寰枢椎区域走行弯曲, C3 椎体位置多变^[31], 故而上颈椎截骨 IVAI 风险极大; 正常个体椎动脉于 C6 处进入横突孔, 因此在 C7 或 T1 截骨时外科医生无需在椎动脉周围操作^[6], 可降低直接损伤椎动脉的风险。而较之 C7 PSO, T1 PSO 在允许更大截骨角度的同时脊柱稳定性更高, 可避免椎动脉在截骨闭合过程中的过度扭转, 降低 IVAI 风险^[6]。而对于 C4~C6 截骨, 既往文献提示在一定条件下通过仔细切除横突孔后缘及侧块等进行椎动脉周围减压后, 颈椎截骨亦可在 C4~C6 安全进行^[27-30]。但均缺乏更多的案例报道验证及大样本多中心数据支持。

2.4 手术操作

椎动脉与钩椎关节之间的解剖毗邻关系在颈椎后凸

畸形截骨术中具有重要意义。不同节段之间椎动脉至钩椎关节的横向距离有所不同, 其中 C4/5、C5/6 节段距离相对较小 (约 1.5mm), 且椎动脉至钩椎关节后缘的距离亦较小 (<5mm), 故 C4/5、C5/6 节段侧方过度潜行减压亦可增加 IVAI 风险^[18]。目前认为高速磨钻使用不当, 尤其是其过度横向移动可能是颈椎手术操作中 IVAI 的相关因素^[32-34]。Lee 等^[34]报道颈椎手术中高速磨钻所致的 IVAI 可达 23%, 仅次于螺钉置入 (31%)。

颈椎后凸畸形截骨手术中是否需要切除横突孔值得商榷。一方面, 上颈椎横突孔切除 IVAI 风险极大^[35], 而 C3~C6 椎动脉多于横突孔偏内偏前走行^[18], 颈椎椎弓根的侧面包含横突孔的内侧壁, 切除横突孔则面临直接损伤椎动脉的风险, 同时横突残留骨可间接导致椎动脉损伤^[36]; 另一方面, 整段椎动脉从横突孔中释放可给予外科医生更广操作空间, 同时避免截骨时椎动脉扭伤或直接损伤。上颈椎 PSO 须将侧块和横突孔后缘切除, 除非整个椎动脉从横突孔中释放, 否则极有可能损伤椎动脉^[29]。Ture 等^[31]报道采用侧方入路切除 C3 椎体矫正颈椎后凸畸形, 术中切除 C2~C4 横突使椎动脉 V2 段充分暴露, 以安全切除 C3 椎体, 术中及术后均无相关并发症发生。Ruf 等^[37]采用后-前-后入路切除 C3 半椎体治疗先天性半椎体所致颈椎后凸畸形, 于首次后入路手术中切除横突, 尽管术中未发生椎动脉相关并发症, 但其手术难度及 IVAI 风险仍较大。Wang 等^[8]在此基础上首次报道 2 例椎动脉穿过半椎体横突孔的先天性半椎体患者, 术中采用前-后-前入路切除 C3 半椎体。不同的是, 术者术中并未切除横突, 而将横突及其椎动脉作为一个整体从脊柱中游离, 由此避免横突孔切除面临的 IVAI 风险。

3 预防措施

CSRS 问卷调查研究^[2]显示, 20% (22/111) 的 IVAI 患者存在椎动脉异常, 同时外科医生的经验水平与 IVAI 的发生显著相关, 研究显示脊柱手术例数少于 300 例的医师术中 IVAI 发生率 (0.528%) 显著高于手术例数超过 300 例的医师 (0.074%)。全面的术前评估、个性化手术策略和合理的手术操作在降低颈椎截骨手术 IVAI 的发生中具有举足轻重的作用 (表 1)。

3.1 术前评估

术前影像学评估椎动脉的位置、走行及有无变异对降低椎动脉相关并发症发生风险有重要意义。椎动脉异常发生率在 CT 血管造影 (CT angiography, CTA) 或 MR 血管造影 (magnetic resonance angiography, MRA) 研究中可达 5.1%~11.4%^[13, 14, 38-41], 高于尸体研究 (2.7%)^[42]。术前 CT 成像有助于明确椎动脉在横突孔中的位置及其与周围骨质的毗邻关系。CTA 或 MRA 的评估可突出解剖学特征, 包括椎间孔距离, 椎管宽度以及椎动脉走向^[14, 40, 43-46]。而以 3D-CTA 进行椎动脉的术前评估较之于 MRA 具有记录时间更短、伪影更少以及身体移动对影像学质量影响更低等

优势,同时可获得椎动脉和周围骨结构的可视化^[46,47]。带血管颈椎 3D 打印模型可直观观察颈椎横突孔及椎动脉解剖毗邻关系,降低术中 IVAI 风险^[8]。值得一提的是,颈椎截骨矫形对于单侧椎动脉闭塞患者风险极大,因而其风险评估及管理更为重要^[27,29]。Konomi 等^[27]报道 1 例伴有单侧椎动脉闭塞的僵硬颈椎后凸畸形病例,术者一期行前路松解及椎间盘切除,二期行后路矫形,同时于一期和二期手术后均行 CTA 及 MRA 以评估椎动脉闭塞侧有无进展以及椎动脉优势侧有无损伤,该患者术中及术后均无椎动脉相关并发症发生。

3.2 手术策略

术前评估椎动脉周围骨质情况(有无退变、骨赘及骨软化等病理状态)以及与周围骨质的毗邻关系,同时综合影像学及临床表现以制定个性化的手术策略(表 1),如截骨等级、截骨位置、矫形程度以及是否需要切除横突孔。颈椎后凸畸形 4 级以上截骨及上颈椎截骨需谨慎考虑,术前应全面评估。此外,Konomi 等^[27]主张对存在 IVAI 高危因素、严重或僵硬性颈椎后凸畸形应适度矫形,以避免椎动脉痉挛、破裂。尽管可能遗留局部后凸畸形,但在解除平视障碍的同时可有效保护椎动脉。Mummaneni 等^[28]介绍的 C6 伸展性截骨术建议将椎动脉从横突孔释放,以避免截骨时椎动脉扭伤或损伤,同时依靠前柱牵引实现大部分畸形矫正,避免可能危及椎动脉的外侧椎弓根和椎体广泛切除。Wang 等^[8]建议 C3 半椎体切除时可尝试整体游离横突

及椎动脉,以避免横突孔切除面临的 IVAI 风险。

3.3 术中操作

椎体中线与钩椎关节是术中评估横向暴露和椎体切除范围的重要解剖标志,保持椎体中线方向是避免 IVAI 的关键,因此,术中使用高速磨钻应注意椎体中线与钩椎关节位置,以钩椎关节确定椎体切除宽度,避免过度横移。Segar 等^[48]认为在颈椎后凸畸形矫正中,可使用骨凿切除钩突。此外,术中避免钻孔穿透骨皮质可降低 IVAI 风险^[7],可在椎体切除后以刮匙或咬骨钳仔细剥离而留下薄层骨壁,待明确血管解剖结构后,再选择性去除骨壁。

颈椎后凸畸形截骨闭合时椎动脉扭曲或间接损伤亦是颈椎截骨术中应预先考虑的重要问题,屈伸位 X 线片可用于判断颈椎后凸顶点,确定后凸是否适合闭合复位^[29]。如前所述,T1 PSO 截骨因其更高的稳定性可避免椎动脉在截骨闭合过程中的过度扭转^[6];其次,椎动脉周围减压释放可避免截骨时椎动脉扭伤或直接损伤^[29];在椎体切除术中不对称减压可使截骨闭合时出现 IVAI^[7],将患者在头架上对称稳定的放置有助于避免不对称减压^[49]。而一旦颈椎处于前凸位置,椎动脉则可处于较小的张力和更大的空间下。目前文献支持在椎动脉及周围骨质无异常时,可考虑双侧切除 C6 横突孔前后,以防止截骨闭合时动脉扭曲或间接损伤^[28,50]。因此,术前评估除判断椎动脉有无异常外,同样应关注 CT 影像中椎动脉周围骨质情况、在横突孔中的位置及其与椎弓根的解剖关系。

表 1 颈椎后凸畸形截骨术中 IVAI 风险及其预防措施

作者	年份	研究类型	年龄(岁)	性别	病理类型	手术方式	危险因素	IVAI 预防措施
Ture 等 ^[31]	2003	病例报告	16	女	颈椎后凸畸形	侧方入路 C3 椎体切除	C3 为后凸顶点	术中切除 C2~C4 横突暴露椎动脉 V2 段
Yamazaki 等 ^[51]	2010	病例报告	46	男	颈椎后凸畸形	C3~C6 后路椎板切除减压,C2~C7 后路内固定矫形	单侧椎动脉进入 C7 横突孔;C4~C6 后纵韧带骨化	切除 C7 椎板的头侧部分;超声探头探查左侧 C7 椎弓根内侧壁
Tobin 等 ^[6]	2017	病例报告	65	女	医源性椎板切除术后颈椎后凸畸形	一期 T1/2 PSO,二期前路自体骨移植截骨闭合	C1/2 不稳;巨大的楔形截骨缺损,难以正常闭合	T1 截骨;二期前路自体骨移植避免截骨闭合时椎动脉扭伤
			49	女	创伤性颈椎后凸畸形	T1 PSO	—	T1 截骨
			77	女	炎症性脊柱关节病颈椎后凸畸形	T1 PSO	退行性改变	T1 截骨
			45	女	创伤性颈椎后凸畸形	T1 PSO	—	T1 截骨
Shah 等 ^[23]	2018	病例报告	28	男	神经纤维瘤病颈椎后凸畸形	一期前路椎体次全切除及假关节切除,二期后路松解,C4/5 椎板切除侧块固定	神经纤维瘤病椎体营养不良	分期手术;单节段环形截骨矫形
Konomi 等 ^[27]	2018	病例报告	73	男	创伤性僵硬颈椎后凸畸形	一期前路松解及椎间盘切除,二期行前后路矫形	单侧椎动脉闭塞	分期手术;适度矫形;术后行 CTA 及 MRA
Wang 等 ^[8]	2018	病例报告	12	男	先天性 C3 半椎体畸形	前路截骨联合后路椎体次全切除加节段内固定	右侧椎动脉穿过半椎体横突孔	术前 CTA;3D 打印模型;术中横突及椎动脉整体游离
			12	女	先天性 C3 半椎体畸形	前路截骨联合后路椎体次全切除加节段内固定	右侧椎动脉穿过半椎体横突孔	术前 CTA;3D 打印模型;术中横突及椎动脉整体游离
Bednar 等 ^[35]	2019	病例报告	75	女	齿状突基底骨折不愈合所致角状后凸	C2 PSO	寰枢外侧关节、寰齿关节、寰枕关节强直	保留 C2/3 钩椎关节

注:—,原文未提及;PSO,经椎弓根楔形截骨术;CTA,CT 血管造影;MRA,磁共振血管造影;以上均未发生椎动脉相关并发症

4 IVAI 处理

IVAI 的临床后遗症包括假性动脉瘤、迟发性出血、血栓形成、栓塞和脑缺血等。一旦发生 IVAI, 外科医生必须迅速采取补救措施, 治疗目标包括控制局部出血, 预防缺血和栓塞, 并尽量降低术后栓塞并发症的风险。除液体复苏治疗以维持脏器灌注压之外, 外科医生可采取的措施包括填塞止血、手术结扎、经皮血管内栓塞以及血管重建等。

一旦出现 IVAI, 首要措施应为直接填塞止血(明胶海绵、骨蜡、止血剂乃至充气气囊等), 但直接填塞止血有椎动脉再次损伤而导致迟发性出血和假性动脉瘤的风险^[52], 既往研究报道急诊止血填塞后假性动脉瘤的发生率高达 48%^[53]; 若填塞失败, 同时患者无椎动脉发育异常且对侧可代偿(可临时尝试性阻断损伤侧以评估对侧代偿能力), 则可考虑手术结扎或血管内栓塞。Lu 等^[11]报道 1 例椎体次全切除术中出现 IVAI 的患者行结扎止血后未遗留后遗症。手术结扎可降低迟发性出血风险, 但椎动脉结扎死亡率高达 12%^[54], 不应作为首选。且椎动脉结扎及血管内栓塞与小脑梗死和偏瘫等后遗症显著相关。Eskander 等^[16]报道的 1 例 IVAI 病例术中行介入栓塞, 术后 MRI 显示左侧延髓外侧梗死。Bilbao 等^[10]报道的 1 例椎体次全切除术中出现 IVAI 患者行栓塞后遗留小脑和幕上缺血性梗死。若患者存在健侧椎动脉发育不良或不足以代偿时, 则应考虑血管重建, 如血管缝合、断端吻合、颈总动脉-椎动脉搭桥术以及支架置入等, 在控制出血的同时可恢复正常血流和大脑供血, 但手术技术要求较高^[55]。因此, 多学科综合诊疗模式(multi-disciplinary team, MDT), 无论是术前集中分析评估、拟定治疗方案及应对预案, 抑或是 IVAI 后应急协助处理如术中协助血管重建等等, 皆是颈椎后凸畸形截骨手术 IVAI 预防和处理的措施。

一旦发生 IVAI, 无论采取何种措施处理 IVAI, 患者生命体征平稳后均应进行常规椎动脉 CTA 和/或 MRA 以确定止血效果、血管重建的通畅程度以及侧支循环是否足够。其他治疗选择包括无症状患者的密切观察, 肝素抗凝, 抗血小板药物等, 以降低血栓形成导致的神经系统后遗症的风险。

综上所述, 颈椎后凸畸形截骨手术虽能获得满意的冠状面和矢状面重建, 但 IVAI 风险不容忽视。鉴于 IVAI 后果的严重性, 预防策略应居首位。术前应重点评估椎动脉及其周围骨质有无异常, 制定合理而个性化的手术策略; 术中对于高速磨钻的使用和横突孔的处理应更为谨慎。全面的术前评估、个性化手术策略、合理的手术操作、完善的应对预案以及 IVAI 后恰当及时的处理对于降低 IVAI 和遗留并发症具有重要意义。

5 参考文献

- Ames CP, Smith JS, Scheer JK, et al. A standardized nomenclature for cervical spine soft-tissue release and osteotomy for deformity correction: clinical article [J]. J Neurosurg Spine, 2013, 19(3): 269-278.

- Lunardini DJ, Eskander MS, Even JL, et al. Vertebral artery injuries in cervical spine surgery [J]. Spine, 2014, 14 (8): 1520-1525.
- Oni P, Schultheiß R, Scheufler KM, et al. Radiological and clinical outcome after multilevel anterior cervical discectomy and/or corpectomy and fixation[J]. J Clin Med, 2018, 7(12): pii: E469.
- Neo M, Sakamoto T, Fujibayashi S, et al. A safe screw trajectory for atlantoaxial transarticular fixation achieved using an aiming device[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2005, 30(9): 236-242.
- Park JH, Lee JB, Kim IS, et al. Transdiscal C7 pedicle subtraction osteotomy with a strut graft and the correction of sagittal and coronal imbalance of the cervical spine[J]. Oper Neurosurg(Hagerstown), 2019, Epub ahead of print.
- Tobin MK, Birk DM, Rangwala SD, et al. T-1 pedicle subtraction osteotomy for the treatment of rigid cervical kyphotic deformity: report of 4 cases[J]. J Neurosurg Spine, 2017, 27 (5): 487-493.
- Burke JP, Gerszten PC, Welch WC, et al. Iatrogenic vertebral artery injury during anterior cervical spine surgery[J]. Spine J, 2005, 5(5): 508-514.
- Wang S, Li J, Lu G, et al. Cervical hemivertebra resection and torticollis correction: report on two cases and literature review[J]. Eur Spine J, 2018, 27(Suppl 3): 501-509.
- Madawi AA, Casey AT, Solanki GA, et al. Radiological and anatomical evaluation of the atlantoaxial transarticular screw fixation technique[J]. J Neurosurg, 1997, 86(6): 961-968.
- Bilbao G, Duarte M, Aurrecoechea JJ, et al. Surgical results and complications in a series of 71 consecutive cervical spondylotic corpectomies[J]. Acta Neurochir(Wien), 2010, 152 (7): 1155-1163.
- Lu J, Wu X, Li Y, et al. Surgical results of anterior corpectomy in the aged patients with cervical myelopathy [J]. Eur Spine J, 2008, 17(1): 129-135.
- Neo M, Fujibayashi S, Miyata M, et al. Vertebral artery injury during cervical spine surgery: a survey of more than 5600 operations[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2008, 33(7): 779-785.
- Bruneau M, Cornelius JF, Marneffe V, et al. Anatomical variations of the V2 segment of the vertebral artery[J]. Neurosurgery, 2006, 59(1 Suppl 1): 20-24.
- Wakao N, Takeuchi M, Kamiya M, et al. Variance of cervical vertebral artery measured by CT angiography and its influence on C7 pedicle anatomy [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2014, 39(3): 228-232.
- Eskander MS, Drew JM, Aubin ME, et al. Vertebral artery anatomy: a review of two hundred fifty magnetic resonance imaging scans[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2010, 35(23): 2035-2040.

16. Eskander MS, Connolly PJ, Eskander JP, et al. Injury of an aberrant vertebral artery during a routine corpectomy: a case report and literature review[J]. *Spinal Cord*, 2009, 47(10): 773-775.
17. Molinari R, Bessette M, Raich AL, et al. Vertebral artery anomaly and injury in spinal surgery [J]. *Evid Based Spine Care J*, 2014, 5(1): 16-27.
18. 王洪立, 姜雷, 吕飞舟, 等. 健康成人颈椎前路术中椎动脉损伤风险的影像学评估[J]. *中华骨科杂志*, 2017, 55(3): 198-202.
19. Jeng JS, Yip PK. Evaluation of vertebral artery hypoplasia and asymmetry by color-coded duplex ultrasonography [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2004, 30(5): 605-609.
20. Park JH, Kim JM, Roh JK, et al. Hypoplastic vertebral artery: frequency and associations with ischaemic stroke territory[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2007, 78(9): 954-958.
21. Nishikata M, Hirashima Y, Tomita T, et al. Measurement of basilar artery bending and elongation by magnetic resonance cerebral angiography: relationship to age, sex and vertebral artery dominance[J]. *Arch Gerontol Geriatr*, 2004, 38(3): 251-259.
22. Cosar M, Yaman M, Eser O, et al. Basilar artery angulation and vertigo due to the hemodynamic effect of dominant vertebral artery[J]. *Med Hypotheses*, 2008, 70(5): 941-943.
23. Shah KC, Gadia A, Nagad P, et al. Buckling collapse of midcervical spine secondary to neurofibromatosis [J]. *World Neurosurg*, 2018, 114: 228-229.
24. Oderich GS, Sullivan TM, Bower TC, et al. Vascular abnormalities in patients with neurofibromatosis syndrome type I: clinical spectrum, management, and results[J]. *J Vasc Surg*, 2007, 46(3): 475-484.
25. Tian Y, Fan D, Xu N, et al. "Sandwich deformity" in Klippel-Feil syndrome: a "Full-spectrum" presentation of associated craniovertebral junction abnormalities [J]. *J Clin Neurosci*, 2018, 53: 247-249.
26. Fontecha CG, Navarro CE, Soldado F, et al. Severe Sprengel deformity associated with Klippel-Feil syndrome and a complex vascular abnormality that determined the corrective surgery technique[J]. *J Pediatr Orthop B*, 2014, 23(6): 589-593.
27. Konomi T, Suda K, Matsumoto S, et al. Two-stage corrective surgery for severe rigid cervical kyphotic deformity with unilateral vertebral artery occlusion after old blunt trauma: a case report[J]. *Spinal Cord Ser Cases*, 2018, 4: 18.
28. Mummaneni PV, Mummaneni VP, Haid RW Jr, et al. Cervical osteotomy for the correction of chin-on-chest deformity in ankylosing spondylitis: technical note[J]. *Neurosurg Focus*, 2003, 14(1): E9.
29. Post N, Naziri Q, Cooper CS, et al. Pedicle reduction osteotomy in the upper cervical spine: technique, case report and review of the literature[J]. *Int J Spine Surg*, 2015, 9: 57.
30. Kim KT, Lee SH, Son ES, et al. Surgical treatment of "chin-on-pubis" deformity in a patient with ankylosing spondylitis: a case report of consecutive cervical, thoracic, and lumbar corrective osteotomies[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2012, 37(16): 1017-1021.
31. Ture U, Ozek M, Pamir MN. Lateral approach for resection of the C3 corpus: technical case report [J]. *Neurosurgery*, 2003, 52(4): 977-981.
32. Peng CW, Chou BT, Bendo JA, et al. Vertebral artery injury in cervical spine surgery: anatomical considerations, management, and preventive measures[J]. *Spine J*, 2009, 9(1): 70-76.
33. Khan SA, Coulter I, Marks SM, et al. Iatrogenic vertebral artery injury secondary to vessel tortuosity in a grossly degenerate cervical spine[J]. *Br J Neurosurg*, 2014, 28(3): 423-425.
34. Lee CH, Hong JT, Kang DH, et al. Epidemiology of iatrogenic vertebral artery injury in cervical spine surgery: 21 multicenter studies[J]. *World Neurosurg*, 2019, 126: 1050-1054.
35. Bednar DA. C2 vertebral corpectomy for kyphosis malunion of remote dens fracture with atlantoaxial ankylosis and myelopathy: a case report at 15 years of follow-up[J]. *JBJS Case Connect*, 2019, 9(2): 86.
36. Nagata K, Chikuda H, Inokuchi K, et al. Direct damage to a vertebral artery better predicts a vertebral artery injury than elongation in cervical spine dislocation [J]. *Acta Med Okayama*, 2017, 71(5): 427-432.
37. Ruf M, Jensen R, Harms J. Hemivertebra resection in the cervical spine[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2005, 30(4): 380-385.
38. Hong JT, Park DK, Lee MJ, et al. Anatomical variations of the vertebral artery segment in the lower cervical spine: analysis by three-dimensional computed tomography angiography[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2008, 33(22): 2422-2426.
39. Uchino A, Saito N, Takahashi M, et al. Variations in the origin of the vertebral artery and its level of entry into the transverse foramen diagnosed by CT angiography[J]. *Neuroradiology*, 2013, 55(5): 585-594.
40. Hong JT, Kim IS, Kim JY, et al. Risk factor analysis and decision-making of surgical strategy for V3 segment anomaly: significance of preoperative CT angiography for posterior C1 instrumentation[J]. *Spine J*, 2016, 16(9): 1055-1061.
41. Kim JT, Lee HJ, Kim JH, et al. Quantitative analysis of unusual entrance of the vertebral artery into the cervical foramen (V2 segment) and its clinical implications[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(12): 4188-4194.
42. Curylo LJ, Mason HC, Bohlman HH, et al. Tortuous course of the vertebral artery and anterior cervical decompression: a cadaveric and clinical case study[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2019, 44(1): 10-15.

- 2000, 25(22): 2860–2864.
43. Tomasino A, Parikh K, Koller H, et al. The vertebral artery and the cervical pedicle: morphometric analysis of a critical neighborhood[J]. *J Neurosurg Spine*, 2010, 13(1): 52–60.
44. Hagedorn JC, Emery SE, France JC, et al. Does CT angiography matter for patients with cervical spine injuries [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2014, 96(11): 951–955.
45. Xu S, Ruan S, Song X, et al. Evaluation of vertebral artery anomaly in basilar invagination and prevention of vascular injury during surgical intervention: CTA features and analysis[J]. *Eur Spine J*, 2018, 27(6): 1286–1294.
46. Vanek P, Bradac O, De Lacy P, et al. Vertebral artery and osseous anomalies characteristic at the craniocervical junction diagnosed by CT and 3D CT angiography in normal Czech population: analysis of 511 consecutive patients[J]. *Neurosurg Rev*, 2017, 40(3): 369–376.
47. Yamazaki M, Okawa A, Furuya T, et al. Anomalous vertebral arteries in the extra- and intraosseous regions of the craniovertebral junction visualized by 3-dimensional computed tomographic angiography: analysis of 100 consecutive surgical cases and review of the literature [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(22): E1389–1397.
48. Segar AH, Riccio A, Smith M, et al. Total uncinectomy of the cervical spine with an osteotome: technical note and intraoperative video[J]. *J Neurosurg Spine*, 2019, Epub ahead of print.
49. Schroeder GD, Hus WK. Vertebral artery injuries in cervical spine surgery[J]. *Surg Neurol Int*, 2013, 4(Suppl 5): 362–367.
50. Mummaneni PV, Dhall SS, Rodts GE, et al. Circumferential fusion for cervical kyphotic deformity[J]. *J Neurosurg Spine*, 2008, 9(6): 515–521.
51. Yamazaki M, Okawa A, Furuya T, et al. Cervical kyphosis with myelopathy and anomalous vertebral artery entry at C7 treated with pedicle screw and rod fixation [J]. *Acta Neurochir(Wien)*, 2010, 152(7): 1263–1264.
52. Choi JW, Lee JK, Moon KS, et al. Endovascular embolization of iatrogenic vertebral artery injury during anterior cervical spine surgery: report of two cases and review of the literature[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2006, 31(23): E891–894.
53. Guan Q, Chen L, Long Y, et al. Iatrogenic vertebral artery injury during anterior cervical spine surgery: a systematic review[J]. *World Neurosurg*, 2017, 106: 715–722.
54. Shintani A, Zervas NT. Consequence of ligation of the vertebral artery[J]. *J Neurosurg*, 1972, 36(4): 447–450.
55. Belykh E, Xu DS, Yagmurlu K, et al. Repair of V2 vertebral artery injuries sustained during anterior cervical discectomy[J]. *World Neurosurg*, 2017, 105: 796–804.
- (收稿日期:2019-07-14 末次修回日期:2019-09-27)
(本文编辑 卢庆霞)