

临床论著

伴有椎动脉优势的下颈椎椎弓根形态学的 CT 观察

李 涛, 杨 进, 徐 双, 王高举, 王 清

(西南医科大学附属医院脊柱外科 646000 泸州市)

【摘要】目的:观察存在椎动脉优势(一侧直径较对侧大 0.8mm 以上)的下颈椎椎弓根的形态学特点,探讨其对椎弓根螺钉置钉的影响。**方法:**回顾性分析我科 2016 年 1 月 1 日~2017 年 7 月 1 日因颈椎疾患行椎动脉 CT 造影(CT angiography, CTA)患者的影像学资料。在 CT 三维重建上测量椎动脉直径(vertebral artery diameter, VAD),将存在椎动脉优势患者纳入研究,VAD 较大的一侧为椎动脉优势侧,较小的一侧分为椎动脉非优势侧。共纳入存在椎动脉优势患者 68 例。其中男 42 例,女 26 例,年龄 12~81 岁,平均 56.3±13.0 岁。在 CT 三维重建上测量 C3~C6 椎体双侧的以下参数:VAD、椎弓根宽度(pedicle outer width, POW)、椎弓根外侧壁到椎动脉内侧距离(lateral pedicle border to vertebral artery, LPVA)、横突孔面积(area of transverse foramen, ATF),并计算:椎动脉横截面积(area of vertebral artery, AVA)= $\pi \times (VAD/2)^2$;横突孔占用率(occupation ratio of transverse foramen, ORTF)=AVA/ATF。比较优势侧与非优势侧各参数的差异,分析与椎动脉优势的相关性;统计双侧 POW<4mm 比例,并纵向比较优势侧各椎体参数差异,判断椎弓根螺钉置钉风险。**结果:**存在椎动脉优势患者中,左侧优势占 75%,右侧优势占 25%。VAD 优势侧平均为 3.78±0.49mm,非优势侧为 2.29±0.53mm;POW 优势侧宽度为 5.07±0.98mm,非优势侧为 5.46±0.94mm,LPVA 优势侧与非优势侧分别为 1.04±0.50mm 和 1.18±0.56mm,ATF 优势侧与非优势侧分别为 29.00±6.87mm² 和 20.41±5.40mm²,ORTF 优势侧与非优势侧分别为 (40.5±8.5)% 和 (22.6±8.9)%。优势侧与非优势侧相比,POW、LPVA 及 ATF、ORTF 存在统计学差异($P<0.05$)。POW<4mm 的比例优势侧与非优势侧分别为 9.9%和 4%。优势侧纵向对比,各参数在 C3、C4 较小,C5、C6 较大。**结论:**椎动脉优势侧 POW、LPVA 小于非优势侧,POW<4mm 的比例及 ORTF 大于非优势侧,优势侧椎弓根螺钉置钉风险高于非优势侧。

【关键词】椎动脉优势;椎弓根;形态学

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2018.04.04

中图分类号:R322.7 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2018)-04-0309-06

Cervical pedicle accompanied vertebral artery dominance: morphometric measurement of cervical pedicle and its surrounding structure using 3D-CT/LI Tao, YANG Jin, XU Shuang, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2018, 28(4): 309-314

【Abstract】Objectives: The purpose of this retrospective study was to observe the morphometric characteristics of lower cervical pedicles with dominant vertebral artery (vertebral artery diameter in one side is at least 0.8mm larger than contralateral side) and its surrounding structure, analyze the influence to cervical pedicle screw(CPS) implantation. **Methods:** 166 consecutive patients who underwent cervical 3D-CT angiography were enrolled in this study. Patients who had dominant artery (difference of ≥ 0.8 mm between the widths of two vertebral artery) were selected to perform the measurements. The measurements included long axis diameter of the VA, short axis of the VA, pedicle outer width(POW), lateral pedicle border to vertebral artery(LPVA) and area of transverse foramen(ATF). Vertebral artery diameter (VAD)=(long axis diameter of the VA+short axis of the VA)/2, area of VA(AVA)= $\pi \times (VAD/2)^2$ residuary area of transverse foramen(RATF)=ATF-AVA. Occupation ratio of transverse foramen (ORTF)=AVA/ATF. Differences of all parameters between the two were analyzed. **Results:** The proportion of left VA dominance was 75% and 25% of the right. The mean VAD of dominant side was 3.78±0.49mm, which was 2.29±0.53mm of nondominant side. POW of dominant side and non-domi-

第一作者简介:男(1990-),在读硕士研究生,研究方向:脊柱骨折

电话:(0830)3161222 E-mail:513669722@qq.com

通讯作者:王清 E-mail:wqspine2004@163.com

nant side was $5.1 \pm 1.0\text{mm}$ and $5.5 \pm 0.9\text{mm}$, LPVA was $1.0 \pm 0.5\text{mm}$ and $1.2 \pm 0.6\text{mm}$; ATF was $29.0 \pm 6.9\text{mm}^2$ and $20.4 \pm 5.4\text{mm}^2$; ORTF was $(40.5 \pm 8.5)\%$ and $(22.6 \pm 8.9)\%$, respectively. Parameters comparison between the two sides: POW, LPVA of dominant side was smaller than non-dominant side, ATF and ORTF was opposite, these results was statistically significant ($P < 0.05$). The Pearson correlation coefficient between POW and VAD was -0.094 , ATF and VAD was 0.549 ($P < 0.05$), showing positive correlation between ATF and VAD, but negative correlation between POW and VAD. The proportion of $\text{POW} < 4\text{mm}$ in VA dominant side was higher than non-dominant side. C3 has the most high rate (19.1%) and decrease caudally. Vertical comparison among dominant side shows all parameters were lower at C3, C4 but increase slightly at C5, C6. **Conclusions:** POW and LPVA of dominant side is smaller than those of nondominant side, ORTF and the ratio of $\text{POW} < 4\text{mm}$ are higher in dominant side, the risk of CPS implantation is higher in dominant side.

[Key words] Vertebral artery dominance; Cervical pedicle; Morphology

[Author's address] Department of spine surgery, the Affiliated Hospital of Southwest Medical University, 646000, Luzhou, China

颈椎后路内固定技术繁多,自 Abumi 等^[1]开始应用椎弓根螺钉治疗颈椎损伤后,椎弓根螺钉因其较钩棒系统和侧块螺钉系统具有更优良的生物力学性能^[2-5],应用逐渐增多。目前已成为治疗颈椎骨折脱位、颈椎后凸畸形、颈椎肿瘤切除术后重建等的常用技术。但由于颈椎椎弓根细小,内倾角大,术中显露困难,技术要求高,同时神经血管损伤风险较高而推广受到限制。椎动脉损伤在椎弓根螺钉并发症中虽然较少见^[6-10],但受损后可能出现失血性休克、脑梗死、动静脉瘘等,处理困难,严重者可导致死亡^[11,12]。椎动脉优势 (vertebral artery dominance) 是椎动脉变异的一种,表现为一侧直径较对侧大 (图 1),当存在椎动脉优势时,如果优势侧椎动脉被穿破或严重受压,对侧无法代偿,后果更为严重。据文献报道,椎动脉优势发生率介于 $38.5\% \sim 73\%$ ^[13-15]之间,临床较常见,椎动脉损伤风险与 POW 有密切关系^[16]。因此,本研究通过测量椎动脉和椎弓根、横突孔的一些参数,对存在椎动脉优势的病例,判断其置钉风险,提出预防措施。

1 资料和方法

1.1 一般资料

选取我科 2016 年 1 月 1 日~2017 年 7 月 1 日收治的 166 例因颈椎疾患 (颈椎病、颈椎结核、无骨折脱位颈脊髓损伤、颈椎骨折等) 行椎动脉 CT 造影 (CT angiography, CTA) 患者。

纳入标准: (1) 双侧椎动脉直径差异 $\geq 0.8\text{mm}$; (2) CT 扫描范围包含 C1-C7; (3) 临床及影像资料完善; (4) CT 扫描设备采用 64 排或 256 排 CT。

排除标准: (1) 颈椎骨折脱位、椎弓根骨折、弥

漫性特发性骨韧带肥厚症、强直性脊柱炎、颈椎肿瘤; (2) 颈椎先天性畸形,如颅底凹陷、Klippel-Feil 综合征等; (3) 已行颈椎椎弓根螺钉内固定; (4) 椎动脉栓塞、粥样硬化及一侧椎动脉缺如; (5) 有其他可能影响椎弓根及周围结构测量的疾病。

根据纳入及排除标准,共纳入 68 例,其中男 42 例,女 26 例,年龄 $12 \sim 81$ 岁,平均 56.3 ± 13.0 岁。其中脊髓型颈椎病 33 例,神经根型颈椎病 17 例,无骨折脱位颈脊髓损伤 8 例,颈椎结核 6 例,后循环缺血 3 例,寰枢关节旋转固定 1 例。

1.2 影像学测量方法

所有测量均在 CT 机配套工作站 Advantage Workstation (ADW) 4.4 上完成,设定参数:层厚为 0.625mm ,层距 0.625mm ,窗宽 1300HU、窗位 400HU。测量精度:长度精确至 0.1mm 。在 Volume rendering 模式下观察椎动脉起止点和形态,有无椎动脉狭窄、栓塞、缺如;观察椎体、椎弓根有无骨折、骨质破坏等异常,初步判断是否存在椎动脉优势。排除异常后定位 C3、C5 两个节段,在同步显示的横断面上测量椎动脉长轴与短轴长度,取二者平均值为椎动脉直径。若椎动脉直径双侧差异 $< 0.8\text{mm}$,则不进入下一步测量,若差异 $\geq 0.8\text{mm}$,则进行下一步测量,具体如下:采用多平面重建法 (multi-planar reconstruction, MPR) 进行测量,在 Volume rendering 应用程序中,对原始 CT 数据行 MPR,用标点定位至测量椎体,将定位标尺放置于目标椎弓根,调节定位标尺位置,在矢状面上平行于椎弓根长轴,在冠状面上平行于双侧椎弓根。在同步显示的横断面上从上到下逐层调整,可见椎弓根由窄变宽,再由宽变窄,双侧基本对称,选择其中最宽的层面,即为测量层面,调

整显示视野至 9cm, 用系统自带测量工具测量以下参数(图 2)。椎弓根宽度(pedicle outer width, POW):找到椎弓根内侧最狭窄处外侧骨皮质点 A 及内侧骨皮质点 B, 连接 AB, $POW=AB$; 椎动脉直径(vertebral artery diameter, VAD): 椎动脉近似椭圆形, 其长轴与短轴分别标记为 CD 与 EF, $VAD=(CD+EF)/2$ 。椎弓根外侧壁到椎动脉内侧距离(lateral pedicle border to vertebral artery, LPVA):过椎动脉的切点 H 画一条与同侧椎弓根轴线平行的线段, 椎弓根最狭窄处外侧骨皮质为点 G, 连接 GH, $LPVA=GH$; 横突孔面积(area of transverse foramen, ATF): 横突孔类似椭圆形, 椭圆 O 为 ATF。根据所得数据计算以下参数: 椎动脉横截面积 (area of vertebral artery, AVA) $=\pi \times (VAD/2)^2$; 横突孔占用率 (occupation ratio of transverse foramen, ORTF) $=AVA/ATF$ 。

1.3 评价方法

将 POW、LPVA、ATF 及 ORTF 进行双侧对比, 观察椎动脉优势侧与非优势侧的差异。计算 POW 和 ATF 与椎动脉直径之间的 Pearson 相关系数 r , 判断两者与椎动脉直径之间是否存在相关性。据 Abumi 等^[14]的标准, 将 $POW < 4mm$ 定义为椎弓根螺钉置入困难(置入风险较高), 统计各椎 $POW < 4mm$ 的比例, 比较优势侧与非优势侧的差异。若椎动脉优势侧置钉风险较高, 再纵向比较 C3~C6 的 POW、LPVA、ATF 及 ORTF, 比较置钉风

险。

1.4 误差控制

本研究的测量工作由作者及另一名脊柱外科高年资医师完成。将所有病例用 Excel 2010 软件随机编号, 编号后发给两位医师独立测量, 按编号由小到大依次测量, 左右侧测量不分先后。采用组内相关系数 (intraclass correlation coefficient, ICC) 来评价两位测量者之间的一致性。

1.5 统计学方法

所得数据用均数 $\pm$ 标准差表示, 用数据统计软件 SPSS 19.0 进行统计分析。正态齐性检验采用 Kolmogorov-Smirnov 检验, 计量资料关联性分析采用 Pearson 相关系数, 双侧 POW、LPVA、ATF 及 ORTF 的比较采用配对 t 检验, 纵向比较采用单因素方差分析。检验水准 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 一般结果

重复测量信度结果 ICC 为 0.81, 表明可重复性较好, 故将两次测量结果合并计算。两组间性别及年龄分布见表 1。不同性别间无统计学差异 ($P > 0.05$)。右侧椎动脉走行异常, 4 例从 C5 进入横突孔, 未测量右侧 C6 层面的 LPVA、ATF。横突孔不完整在 C3 层面 2 例, C4 层面 1 例, C5 层面 4 例, C6 层面 5 例, 未测量 ATF。

2.2 测量参数结果

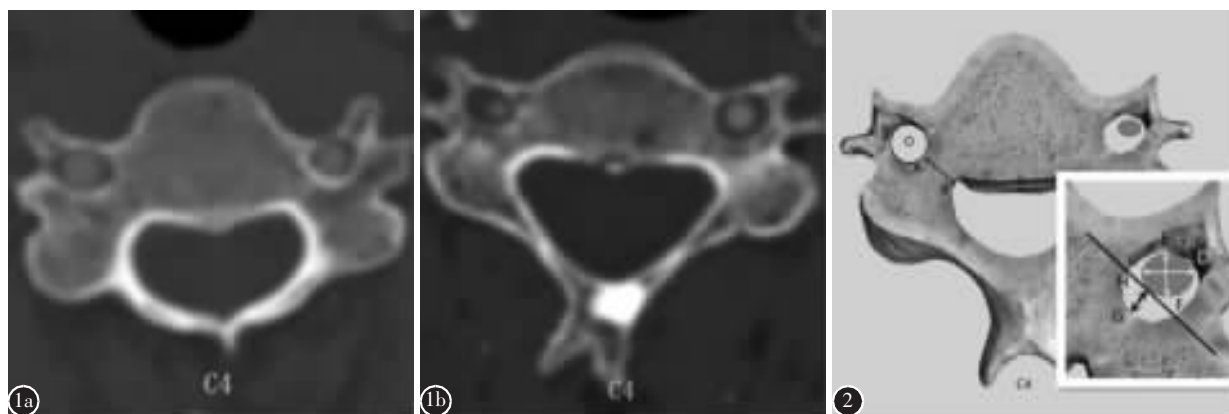


图 1 椎动脉优势 CT 横断面 a 47 岁男性, 右侧侧椎动脉较左侧宽 1.0mm b 41 岁女性, 左侧椎动脉较右侧宽 1.8mm
图 2 颈椎形态学参数测量示意图。测量均为双侧测量。AB=POW; CD=椎动脉长轴长度, EF=椎动脉短轴长度, $VAD=(CD+EF)/2$; GH=LPVA; 圆 O=ATF

Figure 1 CT images of vertebral dominance a 47-year-old male, the right vertebral artery was 1.0mm larger than left side b 41-year-old female, the left vertebral artery was 1.8mm larger than right side **Figure 2** Illustration of cervical morphological measurements; all measurements were performed bilaterally. AB=POW; CD=long axis length of VA, EF=short axis length of VA, $VAD=(CD+EF)/2$; GH=LPVA; circle O=ATF

VAD: 从 C3~C6, 椎动脉平均直径为 $3.06 \pm 0.90\text{mm}$; VAD 优势侧平均为 $3.81 \pm 0.47\text{mm}$, 非优势侧为 $2.31 \pm 0.53\text{mm}$. 优势侧与非优势侧差异平均为 $1.49 \pm 0.48\text{mm}$ ($0.80 \sim 2.64\text{mm}$). 优势侧 POW 及 LPVA 较小, 而 ATF 和 ORTF 优势侧较大, 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$, 表 2)。POW 与 VAD 之间的 Pearson 相关系数为 -0.094 , 且 $P < 0.05$, 提示 POW 与 VAD 呈负相关, 而 ATF 与 VAD 的相关系数为 0.549 , $P < 0.05$, 表明 ATF 与 VAD 呈正相关。POW $< 4\text{mm}$ 的比例优势侧与非优势侧分别为 9.9% 和 4% , 优势侧 POW $< 4\text{mm}$ 的比例显著高于非优势侧, C3~C6 均有此特点 (表 3)。

2.3 优势侧各项参数的纵向对比

优势侧 POW 的平均值从头侧至尾侧逐渐增大, 方差分析提示 C3 与 C4、C5 与 C6 之间无显著性差异, 但 C3、C4 分别与 C5、C6 之间差异明显 ($F = 17.32$, $P < 0.05$), 表明 POW 在 C5、C6 大于 C3、C4。优势侧各个椎体 LPVA 的平均值差异较小, 均在 1mm 左右, 但 C3、C4 与 C5、C6 之间差异仍有显著性 ($F = 11.06$, $P < 0.05$), LPVA 在 C5、C6 稍大。ATF 方面, C3、C4、C5 之间差异无显著性, 而 C6 大于 C3、C4、C5 ($F = 12.05$, $P < 0.05$)。ORTF 组间差异不显著 ($F = 1.95$, $P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 椎动脉优势与 POW

椎动脉优势是指一侧椎动脉直径明显大于对侧, 但国内外研究对于椎动脉优势的判断有不同标准, Grasso 等^[13]在尸体解剖研究后发现左侧椎动脉较右侧大至少 0.8mm , 并将此现象称作椎动脉优势; Hong 等^[14]用 CTA 测量椎动脉直径, 将椎动脉优势定义为一侧较对侧 $\geq 0.3\text{mm}$ 。Songur 等^[15]通过标本测量提出椎动脉优势的标准为双侧差异大于 1mm 。Ergun 等^[18]比较了不同的判断标准后

认为 0.8mm 和 1mm 具有较好的一致性, 故本研究采用了 0.8mm 的判断标准。人群中有超过 50% 存在椎动脉优势, 其中约 50% 为左侧椎动脉优势, 约 25% 为右侧椎动脉优势^[19]。本研究测得的椎动脉优势也以左侧为主, 与以往的结论相似。本次

表 2 优势侧与非优势侧各项测量参数的比较
Table 2 All measurements on both dominant side and nondominant side

	优势侧 Dominant side		非优势侧 Non-dominant side	
	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range
POW (mm)				
总体 Overall	5.07 ± 0.98	2.2~8.2	5.46 ± 0.94 ^①	3.0~8.6
C3 (n=68)	4.66 ± 0.92	2.2~7.1	5.02 ± 0.69 ^①	3.9~7.1
C4 (n=68)	4.70 ± 0.76	2.4~6.7	5.15 ± 0.85 ^①	3.0~6.9
C5 (n=68)	5.43 ± 0.93	3.4~8.2	5.56 ± 0.89	3.6~8.6
C6 (n=68)	5.50 ± 0.97	2.6~7.5	6.11 ± 0.93 ^①	4.1~8.4
LPVA (mm)				
总体 Overall	1.04 ± 0.50	0.3~4.2	1.18 ± 0.56 ^①	0.3~3.2
C3 (n=68)	0.98 ± 0.41	0.3~2.8	1.17 ± 0.61 ^①	0.3~2.9
C4 (n=68)	0.85 ± 0.39	0.3~1.8	0.99 ± 0.47 ^①	0.3~2.4
C5 (n=68)	1.30 ± 0.48	0.3~2.9	1.25 ± 0.50	0.3~2.6
C6 (n=62)	0.94 ± 0.64	0.3~4.2	1.20 ± 0.68 ^①	0.3~3.2
ATF (mm ²)				
总体 Overall	29.00 ± 6.87	6.3~66.3	20.41 ± 5.40	10.2~42.2
C3 (n=66)	27.70 ± 5.36	18.1~46.3	19.89 ± 4.76 ^①	11.9~32.4
C4 (n=67)	27.28 ± 5.50	16.8~41.6	18.49 ± 4.00 ^①	10.2~28.2
C5 (n=64)	28.68 ± 6.18	16.9~47.5	20.97 ± 5.36 ^①	5.0~32.2
C6 (n=59)	32.62 ± 11.18	6.3~66.3	22.54 ± 6.65 ^①	10.8~42.2
ORTF (%)				
总体 Overall	40.5 ± 8.5	15.4~85.6	22.6 ± 8.9 ^①	3.6~61.2
C3 (n=66)	39.6 ± 7.1	25.8~57.8	20.4 ± 7.7 ^①	5.8~40.2
C4 (n=67)	41.7 ± 10.0	18.6~74.5	23.0 ± 9.3 ^①	6.2~47.2
C5 (n=64)	41.9 ± 8.0	25.3~60.2	22.0 ± 9.8 ^①	4.4~55.9
C6 (n=59)	38.9 ± 10.4	15.4~85.6	21.7 ± 9.9 ^①	3.6~61.2

注: ①与优势侧相比 $P < 0.05$
Note: ①Compared with dominant side group, $P < 0.05$

表 3 颈椎椎弓根小于 4mm 的例数及百分比

Table 3 The proportion of PD $< 4\text{mm}$		
	优势侧 (n=27) Dominant side	非优势侧 (n=17) Non-dominant side
C3	13 (19.1%)	3 (4.4%)
C4	8 (11.8%)	5 (7.4%)
C5	3 (4.4%)	2 (2.9%)
C6	3 (4.4%)	0 (0%)

表 1 存在椎动脉优势病例年龄及性别例数
Table 1 The gender and age of cases with vertebral artery dominance

	总体 (n=68) Overall	男性 (n=42) Male	女性 (n=26) Female
年龄 (岁) Age	56.3 ± 13.0	57.7 ± 13.1	53.9 ± 13.0
左侧优势 (例) Left dominant side	51	29	22
右侧优势 (例) Right dominant side	17	13	4

研究发现,椎动脉优势侧椎弓根较对侧细小,横突孔较对侧大,POW 与 VAD 呈负相关,ATF 与 VAD 呈正相关,提示 POW 与横突孔大小与椎动脉有关。针对该现象目前有两种理论:第一种为“发育论”^[20],认为与椎动脉和横突孔的发育过程相关,椎动脉先于横突孔发育,横突孔随椎动脉的发育而发育,发育过程受到椎动脉阻碍作用,在本次测量中发现无椎动脉通过的 C6 横突孔几乎完全闭塞,可以佐证该理论。第二种为“骨重建论”,该理论认为该现象与椎动脉对骨组织的侵蚀有关,骨的改建持续终身,在椎动脉搏动对骨的作用力下,椎弓根、横突孔逐渐改建以适应椎动脉的形态。多位学者报道了扭曲的椎动脉对骨结构造成侵蚀的现象^[21-23],而椎动脉的扭曲并非先天的,而是逐渐加重的^[18],这些现象也可以佐证该观点。故我们认为以上两种理论均有其合理之处,可能因为椎动脉优势可以是先天的,也可能是后天逐渐形成的。

3.2 椎弓根螺钉置钉及其安全性

椎弓根螺钉内固定技术已经证实比其他颈椎内固定技术有更强的生物力学稳定性^[2-5],临床应用广泛。但椎弓根外侧为椎动脉,且椎弓根外侧壁最薄^[16,24,25],穿破率为 6.7%~30%^[6-10],故椎动脉在置钉过程中容易损伤,文献报道行椎弓根螺钉置入椎动脉损伤几率为 0.15%,高于其他下颈椎内固定技术^[26]。因此,行颈椎椎弓根螺钉置入需要对椎弓根及外侧结构(椎动脉、横突孔)有更加细致的了解。我们通过测量 POW、LPVA、ORTF 来判断椎动脉损伤的风险,POW 是判断椎动脉损伤风险的主要参数^[16],POW 越小,椎弓根穿破风险越大,椎动脉损伤风险越高。LPVA 是椎弓根与椎动脉之间的距离,在这个距离范围内,即使椎弓根螺钉穿破椎弓根,也不会损伤椎动脉。ORTF 用于评估横突孔的储备空间,椎动脉在横突孔内有一定活动空间,置钉过程中穿破椎弓根外壁的螺钉可将椎动脉向外侧推挤,不至于损伤或压迫椎动脉。根据 POW、LPVA、ORTF 这三个指标,术者可个体化评估椎弓根螺钉造成椎动脉损伤的风险。在本研究中我们发现,在存在椎动脉优势的病例中,椎动脉周围结构有明显差异,优势侧的椎弓根较细小,POW<4mm 的比例明显较高,表明优势侧椎弓根外壁穿破的风险更高,同时 LPVA 也更小,表示椎弓根穿破后更容易损伤椎动脉,优势侧 ATF 虽更

大,但是 ORTF 却显著高于非优势侧,意味着同样穿破椎弓根外侧壁 2mm,优势侧椎动脉损伤风险更高。综合 POW、LPVA 以及 ORTF 三个参数,结论为优势侧椎动脉损伤风险较高。C3~C6 优势侧纵向比较,C3、C4 段的各项参数均为最小,椎弓根穿破风险、椎动脉损伤风险均最高。侧块螺钉具有更高的置钉安全性^[27,28],且固定强度足够^[29,30],因此,在椎动脉优势侧置钉时,若 POW<4mm,可以根据情况选用侧块螺钉,必要时可加行前路固定,若必须行椎弓根螺钉固定时,需要仔细的术前风险评估和术中的精准置钉,尤其是 C3、C4 椎弓根。

3.3 本研究的局限性

本研究为单中心、非随机的影像学测量,数据存在一定局限性。测量只是在一个代表性层面上进行,不能反映椎动脉在横突孔内的所有行程。本研究只是影像学测量,仅作为临床椎弓根螺钉技术的应用提供一定的影像解剖学基础,但椎弓根螺钉的应用和具体术中实施必须个体化。

4 参考文献

1. Abumi K, Itoh H, Taneichi H, et al. Transpedicular screw fixation for traumatic lesions of the middle and lower cervical spine: description of the techniques and preliminary report[J]. J Spinal Disord, 1994, 7(1): 19-28.
2. Johnston TL, Karaikovic EE, Lautenschlager EP, et al. Cervical pedicle screws vs. lateral mass screws: uniplanar fatigue analysis and residual pullout strengths[J]. Spine J, 2007, 7(3): 384.
3. Jones EL, Heller JG, Silcox DH, et al. Cervical pedicle screws versus lateral mass screws. Anatomic feasibility and biomechanical comparison[J]. Spine, 1997, 22(9): 977-982.
4. Kothe R, Rüther W, Schneider E, et al. Biomechanical analysis of transpedicular screw fixation in the subaxial cervical spine[J]. Spine, 2004, 29(17): 1869-1875.
5. Ito Z, Higashino K, Kato S, et al. Pedicle screws can be 4 times stronger than lateral mass screws for insertion in the midcervical spine: a biomechanical study on strength of fixation[J]. J Spinal Disord Tech, 2014, 27(2): 80-85.
6. Abumi K, Shono Y, Ito M, et al. Complications of pedicle screw fixation in reconstructive surgery of the cervical spine[J]. Spine, 2000, 25(8): 962-969.
7. Yukawa Y, Kato F, Ito K, et al. Placement and complications of cervical pedicle screws in 144 cervical trauma patients using pedicle axis view techniques by fluoroscope[J]. Eur Spine J, 2009, 18(9): 1293-1299.
8. Kast E, Mohr K, Richter HP, et al. Complications of

- transpedicular screw fixation in the cervical spine [J]. *Eur Spine J*, 2006, 15(3): 327-334.
9. Yoshimoto H, Sato S, Hyakumachi T, et al. Spinal reconstruction using a cervical pedicle screw system[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2005, 431(431): 111-119.
 10. Neo M, Sakamoto T, Fujibayashi S, et al. The clinical risk of vertebral artery injury from cervical pedicle screws inserted in degenerative vertebrae[J]. *Spine*, 2005, 30(24): 2800-2805.
 11. Smith MD, Emery SE, Dudley A, et al. Vertebral artery injury during anterior decompression of the cervical spine. A retrospective review of ten patients[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1993, 75(3): 410-415.
 12. Shintani A, Zervas NT. Consequence of ligation of the vertebral artery[J]. *J Neurosurg*, 1972, 36(4): 447-450.
 13. Grasso G, Alafaci C, Passalacqua M, et al. Landmarks for vertebral artery repositioning in bulbar compression syndrome: anatomic and microsurgical nuances[J]. *Neurosurgery*, 2005, 56(1 Suppl): 160-164.
 14. Hong JM, Chung CS, Bang OY, et al. Vertebral artery dominance contributes to basilar artery curvature and perivertebralbasilar junctional infarcts[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2009, 80(10): 1087-1092.
 15. Songur A, Gonul Y, Ozen OA, et al. Variations in the intracranial vertebrobasilar system[J]. *Surg Radiol Anat*, 2008, 30(3): 257-264.
 16. Panjabi MM, Duranceau J, Goel V, et al. Cervical human vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy of the middle and lower regions[J]. *Spine*, 1991, 16(8): 861-869.
 17. Abumi K, Ito M, Sudo H. Reconstruction of the subaxial cervical spine using pedicle screw instrumentation[J]. *Spine*, 2012, 37(5): E349.
 18. Ergun O, Gunes TI, Birgi E, et al. Evaluation of vertebral artery dominance, hypoplasia and variations in the origin: angiographic study in 254 patients[J]. *Folia Morphol*, 2016, 75(1): 33-37.
 19. Yokoyama Y, Fujimoto S, Toyoda K, et al. Relationships between vertebral artery diameter and dissecting aneurysm formation[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2005, 25(Suppl 1): S148-S148.
 20. 闫明, 王超, 王圣林. 正常椎动脉解剖特点及其变异概况[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2012, 22(2): 171-174.
 21. Anderson RE, Shealy CN. Cervical pedicle erosion and rootlet compression caused by a tortuous vertebral artery[J]. *Radiology*, 1970, 96(3): 537-538.
 22. Hyyppä SE, Laasonen EM, Halonen V. Erosion of cervical vertebrae caused by elongated and tortuous vertebral arteries [J]. *Neuroradiology*, 1974, 7(1): 49-51.
 23. Burnett KR, Staple TW. Case report 132. Tortuous vertebral artery causing erosive defect of C2[J]. *Skeletal Radiol*, 1981, 6(1): 51-53.
 24. 石锐, 刘浩, 袁元, 等. 不同节段椎弓根内部结构的测量和比较[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2005, 23(5): 458-462.
 25. Misenhimer GR, Peek RD, Wiltse LL, et al. Anatomic analysis of pedicle cortical and cancellous diameter as related to screw size[J]. *Spine*, 1989, 14(4): 367-372.
 26. Yoshihara H, Passias PG, Errico TJ. Screw-related complications in the subaxial cervical spine with the use of lateral mass versus cervical pedicle screws: a systematic review[J]. *J Neurosurg Spine*, 2013, 19(5): 614-623.
 27. Sekhon LH. Posterior cervical lateral mass screw fixation: analysis of 1026 consecutive screws in 143 patients [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2005, 18(4): 297-303.
 28. Katonis P, Papadakis SA, Galanakis S, et al. Lateral mass screw complications: analysis of 1662 screws [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2011, 24(7): 415-420.
 29. Ebraheim N, Toledo OH. Posterior lateral mass screw fixation: anatomic and radiographic considerations [J]. *Univ Pa Orthop J*, 1999, 12: 66-72.
 30. Gill K, Paschal S, Corin J, et al. Posterior plating of the cervical spine. A biomechanical comparison of different posterior fusion techniques[J]. *Spine*, 1988, 13(7): 813-816.
- (收稿日期:2017-10-29 末次修回日期:2018-03-02)
(英文编审 刘美彤/贾丹彤)
(本文编辑 姜雅浩)