

## 综述

## 椎动脉损伤的研究进展

## A review of developments on vertebral artery injury research

郭 帅, 贺高乐, 李浩鹏

(西安交通大学第二附属医院骨二科 710004 西安市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2015.11.13

中图分类号: R681.5 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2015)-11-1030-04

椎动脉损伤(vertebral artery injury, VAI)是一种少见但足以致命的疾病,随着汽车的普及和颈椎内固定的应用,外伤性与医源性椎动脉损伤的发生率均有增加。关于椎动脉损伤的检查、治疗手段较多,争议较大,很难说哪种策略预后最佳,处理十分棘手。笔者着重对椎动脉损伤的机制、诊断、处理、预防等方面的研究现状进行综述,以期临床工作提供参考。

## 1 椎动脉损伤的简介

椎动脉发自锁骨下动脉,依次经第六至第二颈椎横突孔上行,穿过枢椎横突孔后向上外弯曲进入寰椎横突孔,行出后由后弓椎动脉沟绕过上关节突,从寰枕后膜弓下方进入椎管,于脑桥下界和对侧椎动脉汇合为基底动脉,沿途分支供应颈髓、脑干及小脑等。椎动脉管径为 0.5~5.5mm,长度为 5.0~35.0cm<sup>[1]</sup>。Chakravorty 等<sup>[2]</sup>认为椎动脉颅内的脊髓分支仅对 C1~C3 段颈髓重要,其余大部分颈髓主要靠根动脉供应。脊髓前动脉在第一根动脉汇入后立即变粗,少数 Y 型脊髓前动脉仅由根动脉分升、降支构成;但因人类通常仅有一条根动脉于 C4~C6 区间汇入脊髓前动脉或于 C4 水平汇入脊髓后动脉,脊髓前、后动脉又缺乏交通,使得椎动脉一旦发生损伤极易导致颈髓缺血,加之脑干、小脑缺血,死亡率很高。

钝器击打、车祸、坠落或枪弹、刀等锐器穿入所致外伤,以及医源性损伤和颈椎退行性变等,均可损伤椎动脉。椎动脉在横突孔前、横突孔内、横突孔后硬膜外、硬膜内的损伤率依次为 5%、26%、55%、14%<sup>[3]</sup>。对 1968 年~2015 年共 31 篇报道汇总分析发现,发生率最高达 75%,最低仅 0.14%,在车祸、坠落、骨折、颅颈部损伤等外伤中发生率较高,寰枢椎骨折相比其他颈椎骨折致伤率更高,手术所致医源性损伤的几率相对较小。提示高能、过屈过伸牵拉等对损伤贡献最大,与椎动脉在横突孔后硬膜外易损相符合,也说明手术治疗颈椎病具有较大的安全性。总体上看,椎动脉损伤还是少见的。

大多数单侧椎动脉损伤并无症状,即便是优势侧急性损伤,也只有 12%~20% 的患者出现椎基底动脉缺血表现,包括四肢麻痹、与已知受损颈髓水平不符的截瘫、头痛、眩晕、呕吐、构音障碍、吞咽困难、共济失调、视力障碍等,有时并不易与颈髓及脑部损伤鉴别。双侧椎动脉损伤更危重,常有意识改变、针尖样瞳孔甚至突然呼吸停止,死亡率很高<sup>[4]</sup>。

一般单侧、非优势侧或代偿良好的椎动脉损伤预后良好,重伤、对侧血供代偿不佳、双侧同时损伤者死亡率高。隐匿性或迟发性神经损伤亦不容忽视<sup>[5]</sup>。

## 2 椎动脉损伤的可能机制

椎动脉损伤的病理学表现包括闭塞、夹层、血栓、内膜损伤、内膜瓣、假性动脉瘤、撕裂、动静脉瘘和横断等,均可继发血管痉挛<sup>[6]</sup>。

颈椎过屈、过伸、牵拉、脱位和骨折是椎动脉损伤的主要机制(如车祸或坠落时)。医源性椎动脉损伤的机制及病理表现有:中心静脉导管置入颈内静脉时,多为动静脉瘘、假性动脉瘤;颈椎手术时,多为撕裂;颈部按摩时,多为夹层,但其因果关系尚存在争议,因为患者可能是因椎动脉夹层致颈部不适后才行颈部按摩;诊断性脑血管造影时,多为夹层;经皮颈部神经阻滞时,多为细小破裂;颈部肿瘤放疗时,由于射线使内膜损伤、外膜纤维化,导致血管壁增厚及过早发生动脉粥样硬化,多在远期引起血管狭窄及闭塞<sup>[7]</sup>。Ebraheim 等<sup>[8]</sup>的解剖研究发现椎动脉和颈神经根在横突孔内被一纤维韧带环包裹,此环附着于钩突及钩椎关节的外侧面,并使椎动脉、颈神经根和钩突形成一复合体,这一解剖关系可以解释切除钩突或钩椎关节骨赘时对椎动脉的撕裂。产伤的机制可能是在分娩时血管内压过高对椎动脉产生撕裂作用,而积血难以消散又产生压迫作用,两者均可导致脑组织缺血<sup>[9]</sup>。运动伤的机制可能是头部持续旋转的运动或日常活动,如游泳、双杠、体操、瑜伽、箭术、骑行、喷涂天花板等,使椎动脉长时间缺血损伤,这类患者常伴有一侧椎动脉发育不全<sup>[10]</sup>。

任何部位颈椎半脱位超过 1cm、骨折波及横突孔、粉碎性横突孔骨折或碎骨侵入横突孔超过 1mm、寰枢椎骨

第一作者简介:男(1990-),博士研究生,研究方向:脊柱外科

电话:(029)87679584 E-mail:xygs\_1990@163.com

通讯作者:李浩鹏 E-mail:llhp-3993@163.com

折、颅底骨折均与椎动脉损伤密切相关。关节面骨折时可能使椎间孔狭窄,加上脱位产生牵拉,碎骨、神经根、椎动脉在狭小空间互相挤压而易产生损伤<sup>[1]</sup>。Oga 等<sup>[2]</sup>认为椎动脉扭曲与颈椎病的发展密切相关,可能与颈椎退行性变刺激有关。

### 3 影像学检查与诊断

#### 3.1 影像学检查

血管造影是指数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA),是诊断椎动脉损伤的“金标准”,可在诊断后立即介入治疗,同时也可观察颅内血管及侧支循环情况,且不受体内金属滞留物的影响,如枪弹伤或穿刺伤时滞留于体内的弹片或金属穿刺物。近年来普遍认为,尽管 DSA 的敏感性与特异性无可比拟,但考虑到其侵入性、高花销和存在约 1% 的并发症,一般仅在根据神经症状强烈怀疑椎动脉损伤或神经放射介入确有必要,或者其他影像学结果模棱两可时才选用<sup>[4]</sup>。

电子计算机 X 线断层扫描血管造影(computed tomography angiography, CTA)是另一种有效的筛查手段,因为可在受伤患者行头颈部 CT 检查时同时获得,而且相比 DSA 无创且应用更少的对比剂<sup>[4]</sup>。但 CTA 的敏感性仍有待提高,约为 53%<sup>[13]</sup>。磁共振血管造影(magnetic resonance angiography, MRA)也常用于筛查与诊断,但强磁场常限制其在依赖众多生命支持设备或携带骨科固定物患者上的应用<sup>[4]</sup>。另外, MRA 的敏感性约为 47%<sup>[13]</sup>,仍有待提高。近年来, Ren 等<sup>[14]</sup>改进的二维飞行时间法磁共振血管造影(2 dimension-time of flight-magnetic resonance angiography, 2D-TOF-MRA)因对椎动脉等慢流速小血管效果更佳,已成为最主要的非侵入性椎动脉损伤检查手段。多普勒超声(Doppler ultra-sound, DUS)虽在颈内动脉损伤中实用,但椎动脉因有骨质保护会干扰成像,一般认为仅在颅椎交界处较有效<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 诊断

主要需借助于影像学检查,症状与体征仅作为证据提示,依据 Denver 准则实施,包括筛查标准和损伤分级。

筛查标准:任何颈椎骨折、脑成像无法解释的神经症状、颅底骨折并波及破裂孔、LeFort II 型或 III 型骨折、颈部血肿、Horner 征、颈部动脉杂音、缺血性脑卒中、头部损伤且 Glasgow 评分 < 6 分、颈部软组织损伤(如安全带损伤和绞缢)、绞缢致缺氧。满足其中之一时即有必要行血管造影检查。

损伤分级: I 级,血管壁不规则或因夹层、膜内出血致管腔狭窄 < 25%; II 级,血管内血栓或内膜瓣形成或因夹层、膜内出血致管腔狭窄 > 25%; III 级,假性动脉瘤; IV 级,血管闭塞; V 级,血管横断<sup>[15]</sup>。

### 4 处理策略

#### 4.1 保守治疗

在非贯穿性损伤中被广泛应用,即使在手术致伤中也受欢迎。缺点是对于全身可能造成内出血、加剧神经损伤、广泛脑梗等,对于椎动脉可能出现迟发性并发症如假性动脉瘤或动静脉瘘。因此, Burke 等<sup>[16]</sup>建议常规密切观察、佩戴颈托,术后因栓塞出现神经症状时再加用抗凝等治疗,同时预防局部再出血和脑出血。Brunworth 等<sup>[17]</sup>建议对于成人应首选肝素,目标活化部分凝血活酶时间(activated partial thromboplastin time, APTT)为 40~50s,长期治疗时改用华法林,目标国际标准化比率(international normalized ratio, INR)为 2;阿司匹林和氯吡格雷作为肝素禁忌时的二线方案;持续监测,好转后停药。对于新陈代谢多变的儿童,使用相较华法林药代动力学更易掌握的低分子肝素更为适用和安全,阿司匹林则不予使用,以免出现 Reye 综合征。

#### 4.2 填塞

一般出血常可通过局部应用止血剂或球囊压迫控制,此法虽然简便,但单纯使用者出现栓塞、出血、动静脉瘘的风险均较高,远期还可并发脑梗死<sup>[16]</sup>。

#### 4.3 修补

外科修补对术者技术要求高,骨性保护及毗邻的静脉丛也会限制视野及操作,因而应用较少,但血管修补可以保持动脉开放,恢复正常血流并使缺血并发症风险降至最低,且未见术后并发症,是理想的应对策略<sup>[18]</sup>。

#### 4.4 结扎

结扎方式可分为经骨或暴露后结扎,前者指不暴露椎动脉,而直接将丝线穿入横突孔内盲视结扎,简单但易损伤神经根,造成神经根麻痹;后者先显露椎动脉再行结扎,故需切除部分椎体、打开横突孔,操作较困难和费时,但相较而言更推荐后者<sup>[19]</sup>。选择结扎时需同时结扎损伤部位的远近端,因为有证据表明单纯结扎近端的患者,出现远期栓塞、出血、动静脉瘘的风险较高<sup>[16]</sup>。尽管大多数患者单侧结扎后状态良好,但有报道称急性结扎椎动脉的死亡率达 12%,这可能与优势椎动脉现象有关。Bernard 等<sup>[20]</sup>研究了人群中椎动脉变异率,发育不全左右分别为 5.7% 和 8.8%,缺如左右分别为 1.8% 和 3.1%。老年人群还应考虑 Willis 环粥样硬化对代偿的影响。Thomas 等<sup>[21]</sup>认为结扎左侧或右侧椎动脉后的脑梗死的发生率分别为 3.1% 和 1.8%。

#### 4.5 介入治疗

随着介入技术在主动脉、颈内动脉等大血管的应用,越来越多的医生开始将其拓展到椎动脉,介入栓塞椎动脉损伤部位远端被认为可以有效控制出血、假性动脉瘤和动静脉瘘,当顺行远端栓塞不易时,可尝试经对侧逆行栓塞<sup>[22]</sup>,由于可与 DSA 同时进行,特别适合术中突发的椎动脉损伤的急救,但前提是对侧有足够代偿,而且在后路手术中会受患者体位限制。Mei 等<sup>[23]</sup>主张根据形态学和血流动力学特点采用个体化介入治疗,当椎动脉管径大于假性动脉瘤口径时,单纯应用支架即可,反之需在瘤内加用线

圈稳定血流,这是由于此时血流对瘤壁冲击力较大,易造成瘤破裂;对于动静脉瘘,如果血流平缓可以单用胶体,若流速快,应在使用胶体前利用球囊或线圈减慢流速;血管狭窄则使用支架避免阻塞。

#### 4.6 椎动脉重建

椎动脉近端的重建可通过锁骨下动脉-椎动脉吻合或颈内动脉-椎动脉吻合,远端的重建可通过颈总动脉-椎动脉吻合、颈内动脉-椎动脉吻合或锁骨下动脉-椎动脉吻合,椎动脉在横突孔内段不易重建<sup>[1]</sup>。此法虽然有效,但术式复杂,对手术设施和人员能力要求较高,如不具备足够条件,企图重建椎动脉是不可能的。一般可将其作为修补法的补充。

总体来说,治疗目的是消除损伤、保留正常血供,具体而言就是要控制局部出血,预防椎基底动脉缺血和脑血管并发症。选择处理方法前,应先评估对侧椎动脉血流情况,当没有 DSA 资料时,很难预测牺牲一侧椎动脉后的结局,故不应盲目实施永久栓塞或结扎。无症状者多保守治疗。对于术中椎动脉损伤应优先填塞控制出血,然后修补或术后介入防治并发症,出血不能控制时,再考虑介入栓塞、支架、结扎等方式<sup>[24]</sup>,同时避免对侧椎动脉受压缺血。对于合并颈椎病的患者,因其对侧椎动脉常不足以代偿,栓塞法应尽量避免<sup>[25]</sup>。螺钉固定所致的损伤,一般常用螺钉或骨蜡填塞钻孔,偶尔结扎,很少直接修补,也有术后用介入法栓塞的,同时对侧应使用更安全的固定方式,推荐寰椎侧块螺钉联合枢椎椎弓根螺钉固定,根据椎动脉的走行可用寰椎椎板钩代替寰椎侧块螺钉。螺钉位置不正也会压迫椎动脉,此时是否去除螺钉尚有争议<sup>[26]</sup>。

#### 5 预防措施

任何时候,防患于未然都是最佳治疗。对于颈椎手术,术前需明确椎动脉是否扭曲、膨大或被肿瘤、炎症侵袭并采取结扎、缝合等预防措施<sup>[19]</sup>。对对侧正常椎动脉应优先探查保护。切除钩突或钩椎关节骨赘前需将横突孔内的纤维韧带带彻底剥离<sup>[8]</sup>。椎骨切除减压时,由于去除椎骨和椎间盘时偏离中线、去除范围过宽、忽略侧块因炎症或肿瘤发生的病理性软化均可损伤椎动脉,因此保持中线操作是成功完成减压并避免椎动脉损伤的关键<sup>[6]</sup>。前路手术可应用未牵拉的颈长肌内缘中点定位操作区域中线,各节段切除骨质时侵入颈长肌内缘不要超过 3mm,这样既可以保证减压顺利实施,也可以使操作距椎动脉至少预留 5mm,保持前后垂直取出骨块及椎间盘,适度向两侧扩展,小心清理椎管侧窝即可<sup>[19]</sup>。但 Peng 等<sup>[27]</sup>认为颈长肌定位中线虽值得推荐,但用以确定减压边界却不准确,因为颈长肌间距从 C3 到 C6 逐渐增宽,使用固定间距会造成骨质去除及减压不充分。实用的界限标记是钩椎关节,去骨范围在两侧钩椎关节内缘之间,向外不超过 5~6mm 多可以保证安全。后路切除寰椎后弓侧界距中线不应超过 8~12mm<sup>[8]</sup>。

后路手术常在钻孔、攻丝、插入螺钉时损伤椎动脉,所以应用螺钉固定时,需熟悉颈椎侧块的解剖,螺钉的进钉点、角度、轨迹也需精确控制。比如钻孔时不要将深部骨皮质穿透,取出钻头后用一细小刮匙刮破<sup>[16]</sup>。又比如螺钉的选择,寰枢椎经关节螺钉致伤率显著高于枢椎椎弓根螺钉,尤其是存在高跨椎动脉(high-riding vertebral artery)时<sup>[28]</sup>。椎动脉走行异常,不宜使用寰枢椎经关节螺钉和枢椎椎弓根螺钉的患者还可选择经枢椎交叉椎板螺钉联合寰椎侧块螺钉固定<sup>[29]</sup>。对于下颈椎,Peng 等<sup>[26]</sup>推荐使用较安全的侧块螺钉。Xu 等<sup>[30]</sup>还比较了经皮前路或后路寰枢椎经关节螺钉固定和标准开放方法,认为前者具有缩短手术时间、减少出血等优势,对其前景十分看好。精确钻入螺钉的技巧也很多,如寰枢椎经关节螺钉的安全轨迹应从枢椎峡部的后内侧部分进入,避免向外损伤椎动脉。下颈椎椎弓根螺钉置钉可采用 Abumi 等的技巧,即从侧块外缘稍向内处插入椎弓根开路器,在横断面上与正中夹角为 35°。计算机辅助导航系统的出现极大地提高了螺钉钻入的精度,Ludwig 等<sup>[31]</sup>报道应用 Abumi 法、Ludwig 法、计算机辅助导航时穿入横突孔的发生率分别为 87.5%、55%、24%。实际上即便偏入横突孔也很少损伤椎动脉,因为椎动脉占据横突孔的截面积比例一般较小,从 8%~85%不等,平均只有 34%。当然,考虑到椎动脉损伤后的严重后果,精确钻入仍需保障。

#### 6 总结与展望

由于椎动脉损伤很少见且有致命性,进行高级别证据的随机对照研究(randomized controlled trial, RCT)是困难和不现实的,目前只能通过个案报道、病例分析、临床经验等对其进行粗略的研究,当然也获得了一些有价值的结果,比如:损伤一般因外伤时颈部的过伸过屈、牵拉或手术等引发,病理变化包括闭塞、夹层、血栓、内膜损伤、内膜瓣、假性动脉瘤、撕裂、动静脉瘘、横断和血管痉挛等,严重颈椎脱位、横突孔骨折或有碎骨、枕颈部骨折与椎动脉损伤关系最密切等,血管造影是诊断的“金标准”,无症状者多保守治疗,术中损伤则首选修补法等。但相关研究仍需继续,以求在深入了解损伤机制及病理的基础上,将更加高效无创的检查和简便可靠的治疗手段应用于临床,使椎动脉损伤的患者受益。

#### 7 参考文献

1. Carney AL. Vertebral artery surgery: historical development, basic concepts of brain hemodynamics, and clinical experience of 102 cases[J]. Adv Neurol, 1981, 30: 249-282.
2. Chakravorty BG. Arterial supply of the cervical spinal cord and its relation to the cervical myelopathy in spondylosis [J]. Ann R Coll Surg Engl, 1969, 45(4): 232-251.
3. Alterman DM, Heidel RE, Daley BJ, et al. Contemporary outcomes of vertebral artery injury[J]. J Vasc Surg, 2013, 57

- (3): 741-746.
4. Inamasu J, Guiot BH. Vertebral artery injury after blunt cervical trauma: an update[J]. *Surg Neurol*, 2006, 65(3): 238-246.
  5. Auer RN, Krcek J, Butt JC. Delayed symptoms and death after minor head trauma with occult vertebral artery injury[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 1994, 57(4): 500-502.
  6. Desouza RM, Crocker MJ, Haliasos N, et al. Blunt traumatic vertebral artery injury: a clinical review [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(9): 1405-1416.
  7. Inamasu J, Guiot BH. Iatrogenic vertebral artery injury [J]. *Acta Neurol Scand*, 2005, 112(6): 349-357.
  8. Ebraheim NA, Lu J, Haman SP, et al. Anatomic basis of the anterior surgery on the cervical spine: relationships between uncus-artery-root complex and vertebral artery injury[J]. *Surg Radiol Anat*, 1998, 20(6): 389-392.
  9. Yates PO. Birth trauma to the vertebral arteries[J]. *Arch Dis Child*, 1959, 34(177): 436-441.
  10. Tramo MJ, Hainline B, Petito F, et al. Vertebral artery injury and cerebellar stroke while swimming: case report [J]. *Stroke*, 1985, 16(6): 1039-1042.
  11. 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.
  12. Oga M, Yuge I, Terada K, et al. Tortuosity of the vertebral artery in patients with cervical spondylotic myelopathy. Risk factor for the vertebral artery injury during anterior cervical decompression[J]. *Spine*, 1996, 21(9): 1085-1089.
  13. Miller PR, Fabian TC, Croce MA, et al. Prospective screening for blunt cerebrovascular injuries: analysis of diagnostic modalities and outcomes[J]. *Ann Surg*, 2002, 236(3): 386-395.
  14. Ren X, Wang W, Zhang X, et al. Clinical study and comparison of magnetic resonance angiography (MRA) and angiography diagnosis of blunt vertebral artery injury [J]. *J Trauma*, 2007, 63(6): 1249-1253.
  15. Cothren CC, Moore EE, Zent RM, et al. Blunt vertebral artery injury leading to cervical fracture diagnosis [J]. *J Trauma*, 2007, 62(1): 262.
  16. Burke JP, Gerszten PC, Welch WC. Iatrogenic vertebral artery injury during anterior cervical spine surgery[J]. *Spine J*, 2005, 5(5): 508-514.
  17. Brunworth LS, Cothren CC, Kimm GE, et al. Pediatric blunt vertebral artery injury: case report and treatment plan[J]. *J Pediatric Surg*, 2009 44(3): e5-9.
  18. 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*, 2006, 31(23): E891-894.
  19. 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.
  20. Bernard G, Claude L. The Vertebral Artery Pathology and Surgery[M]. Berlin: Springer Vienna, 1987. 6-17.
  21. Thomas GI, Anderson KN, Hain RF, et al. The significance of anomalous vertebral-basilar artery communications in operations on the heart and great vessels: an illustrative case with review of the literature[J]. *Surgery*, 1959, 46(4): 747-757.
  22. Gantwerker BR, Baaj AA, Maughan PH, et al. Vertebral artery injury during cervical discectomy and fusion in a patient with bilateral anomalous arteries in the disc space: case report[J]. *Neurosurgery*, 2010, 67(3): E874-875.
  23. Mei Q, Sui M, Xiao W, et al. Individualized endovascular treatment of high-grade traumatic vertebral artery injury [J]. *Acta neurochirurgica*, 2014, 156(9): 1781-1788.
  24. Park HK, Jho HD. The management of vertebral artery injury in anterior cervical spine operation: a systematic review of published cases[J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(12): 2475-2485.
  25. Devin CJ, Kang JD. Vertebral artery injury in cervical spine surgery[J]. *Instr Course Lect*, 2009, 58: 717-728.
  26. Guo Q, Liu J, Ni B, et al. C2 laminar screw and C1-2 transarticular screw combined with C1 laminar hooks for atlantoaxial instability with unilateral vertebral artery injury [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2011, 131(9): 1207-1210.
  27. 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.
  28. Yeom JS, Buchowski JM, Kim HJ, et al. Risk of vertebral artery injury: comparison between C1-C2 transarticular and C2 pedicle screws[J]. *Spine J*, 2013, 13(7): 775-785.
  29. Wright NM, Lauryssen C. Vertebral artery injury in C1-2 transarticular screw fixation: results of a survey of the AANS/CNS section on disorders of the spine and peripheral nerves[J]. *J Neurosurgery*, 1998, 88(4): 634-640.
  30. Xu H, Chi YL, Wang XY, et al. Comparison of the anatomic risk for vertebral artery injury associated with percutaneous atlantoaxial anterior and posterior transarticular screws [J]. *Spine J*, 2012, 12(8): 656-662.
  31. Ludwig SC, Kramer DL, Balderston RA, et al. Placement of pedicle screws in the human cadaveric cervical spine: comparative accuracy of three techniques[J]. *Spine*, 2000, 25(13): 1655-1667.

(收稿日期:2015-09-07 修回日期:2015-09-25)

(本文编辑 卢庆霞)