

经后路全脊椎切除术治疗重度僵硬角状脊柱畸形专家共识

通信作者:解京明, E-mail: xiejingming@vip.163.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-2352.2018.23.001

重度僵硬角状脊柱畸形的矫形既往被视为脊柱矫形外科技术难以逾越的困难。尽管脊柱外科医生一直在探索有效的矫形方案,但与各种技术相伴的往往是不理想的矫形效果、极高的神经并发症发生率及大量出血带来的威胁。2002 年经后路全脊椎切除术 (posterior vertebral column resection, PVCR) 矫治重度僵硬脊柱畸形被首次报道^[1], 之后国内有多家脊柱畸形治疗中心相继开展了 PVCR 手术。中国是世界上应用 PVCR 手术矫治此类畸形病例数量最多的国家之一。通过 PVCR 手术可以获得满意的临床疗效和较少的神经并发症。

由于接受 PVCR 手术的患者基础条件较差、畸形情况复杂、手术操作难度大、对外科技术要求高, 限制了 PVCR 手术的临床推广应用。对 PVCR 手术的核心概念和关键技术的认识程度不一, 不同治疗中心之间缺少交流, 甚至在很多方面还存在分歧, 例如重度脊柱畸形的概念、僵硬畸形的概念、PVCR 手术的适应证、PVCR 与其他截骨技术切除范围不同外在矫形理念上的差异、PVCR 手术相关的脊髓风险的危险因素及如何有效控制 PVCR 术中大量出血等。

制定此共识的目的, 即通过汇聚国内具备 PVCR 手术实践经验的专家, 明确不统一的定义, 规范手术策略和技术节点, 推进和提高重度僵硬角状脊柱畸形的矫治水平。首先确定参加会议具有投票权和发言权的专家: 经中国知识基础设施工程 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI)、万方医学网 (Wangfang MED Online)、PubMed 数据库检索, 在重度僵硬角状脊柱畸形 PVCR 矫治方面在国际专业杂志发表文章、在国内专业杂志发表病例系列研究文章、以及国内专业组会议有系列病例报告的国内专家。通过电子邮件协商函、电话或面对面交流的方式联系并确定参会, 在专家组的指导下组建共识工作组。

确定 PVCR 治疗重度僵硬角状脊柱畸形在当前需要关注的主要议题, 包括以下八个方面: ① PVCR 治疗脊柱畸形的适应证及禁忌证; ② 从脊柱截骨矫治脊柱畸形的发展和演变过程看 PVCR 手术; ③ PVCR 手术与脊髓安全; ④ 重度僵硬脊柱畸形 PVCR 手术相关脊髓危象的监测与反馈; ⑤ 伴有呼吸功能障碍的重度僵硬脊柱畸形的肺功能特点及治疗转归; ⑥ 重度僵硬脊柱畸形 PVCR 术中出血的控制; ⑦ 重度僵硬脊柱畸形 PVCR 术中置钉与脊髓安全; ⑧ PVCR 手术治疗重度僵硬脊柱畸形的非神经并发症分析及预防策略。

在会前 3 月起, 每 2~3 位学者组成一个专题组, 负责一个方面的内容, 完成文献检索、专家意见收集和综述撰写, 由专家组成员负责把握专题的学术性和临床定位, 以及与其他专题的一致性。工作组多次召开会议, 集中讨论各专题组的意见和建议, 解决专业方面的问题。在集中阅读并获得大量相关文献证据支持, 并与专家组成员沟通后, 形成了 PVCR 手术治疗重度僵硬角状脊柱畸形共识条目及相关共识初稿。参照 WHO 关于临床指南和专家共识的指导, 采用联合应用 Delphi 法和名义群体法的卫生服务适宜性测量法^[2]作为共识制定的基础方法, 并结合专业及圆桌会议特点略作改良 (图 1)。

重度僵硬角状脊柱畸形 PVCR 治疗共识的圆桌会议于 2016 年 6 月 11 日在昆明召开。论坛按各专题分节的形式依次进行, 每一节的内容包括: ① 专题组负责人介绍专题相关文献证据及共识条目形成背景; ② 由 1~2 名专家组成员对该专题进行解读; ③ 由专家组成员以病例讨论的形式阐述对共识条目的支持或反对意见; ④ 逐条陈述该节的拟共识条目, 专家组对每一条目进行现场讨论, 再次确定共识条目并修订; ⑤ 认可度评分: 采用电子投票器进行投票。根据现场所有专家达成共识的条目及其内容描述要求, 最终形成共识意见。会后由共识工

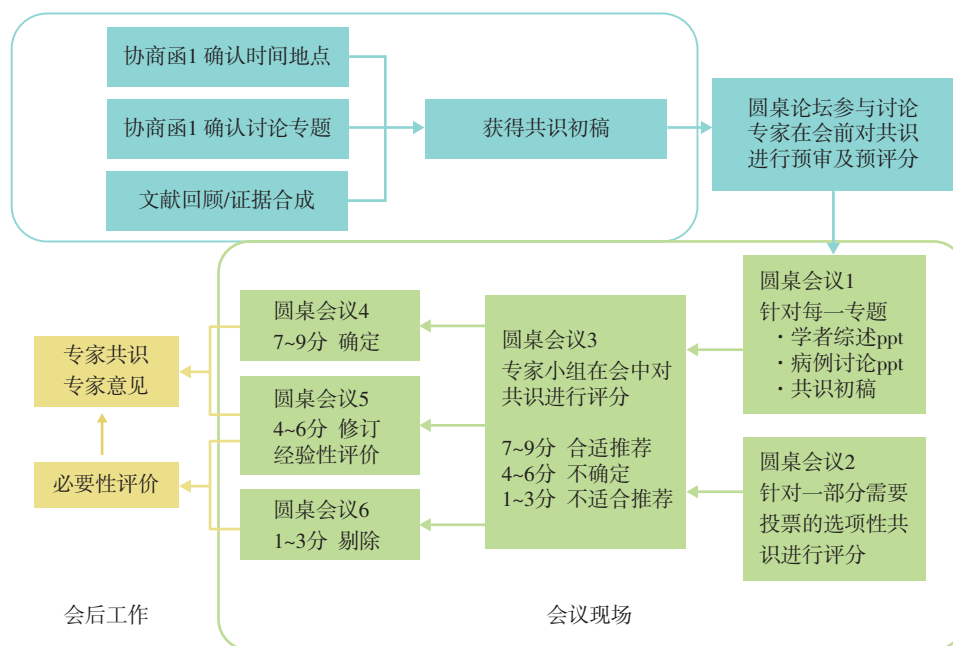


图1 基于兰德公司-美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(RAND-UCLA)专家共识法的昆明共识形成流程图

作组完成共识意见及描述的初步定稿,并印刷成册寄送给每位专家进行再审议,再审议基于专家自身的认可度和推荐强度,以及专家对相关文献回顾的循证医学证据。最终由专题工作组归纳共识意见及推荐强度,并再次查阅及增补最新文献,经工作组集中讨论后完成共识意见及其描述的定稿。共识综合推荐强度评分方式为1~9分法,分数逐渐增加表示专家推荐度的逐渐增强。每条共识的推荐强度以均数±标准差表示。为了具备较好的指导意义,在集中讨论环节删除了所有低于7分推荐强度的条目。

一、PVCR治疗脊柱畸形的适应证及禁忌证

(一) 背景

近十余年来,越来越多的脊柱矫形外科医生应用PVCR手术治疗重度僵硬角状脊柱畸形^[3]。PVCR手术已经取代传统的前后联合入路全脊椎切除术(vertebral column resection, VCR)手术,并能矫正其他传统的矫形技术如Smith-Petersen截骨(Smith-Petersen osteotomy, SPO)、经椎弓根椎体截骨(pedicle subtraction osteotomy, PSO)等难以安全矫治的脊柱畸形,同时获得更好的矫形效果。然而,由于PVCR手术本身技术难度大、手术风险高,给手术医生及患者都带来了巨大的挑战。严格、恰当的PVCR手术适应证及禁忌证,能帮助脊柱矫形外科医生在手术决策时做出正确选择。

(二) 共识

1. PVCR手术常首选于重度僵硬脊柱侧后凸畸形或重度角状畸形患者,及其他截骨技术难以解决的脊柱畸形(推荐强度 7.65 ± 1.57)。

SPO、PSO等技术的矫形通常以矢状面矫形为主,可获得有限的冠状面矫形,但无法安全有效地矫治重度僵硬脊柱侧后凸畸形或重度角状后凸畸形患者。PVCR手术矫形能力高于其他技术,可矫正其他技术难以安全有效完成的脊柱畸形,但其风险也远大于其他手术,因此PVCR手术常适用于其他截骨技术难以解决的脊柱畸形。

2. 重度脊柱畸形是指主弯角度:冠状面 $>90^\circ$ 和(或)矢状面 $>90^\circ$ (推荐强度 7.80 ± 1.32)。

3. 僵硬脊柱畸形是指主弯柔韧度 $<20\%$ (推荐强度 7.22 ± 2.35)。

重度僵硬脊柱畸形通常指畸形角度大、柔韧度差的脊柱畸形。文献中对“重度”、“僵硬”的使用较为混乱。随着外科器械发展及矫形技术的进步,脊柱外科医生对重度、僵硬的界定也在不断更新,界定的畸形角度越来越大、柔韧度越来越小。目前,“重度”畸形通常是指畸形角度在 80° 甚至 100° 以上;而“僵硬”则通常指柔韧度小于 30% 甚至小于 10% (图2)^[4-5]。对重度、僵硬定义的共识将为PVCR手术的临床应用及交流提供基线。

4. 角状脊柱畸形是指:①畸形呈尖锐的弯曲且顶椎区脊椎结构有显著异常;②参与组成这个畸形的椎体数较少;③MRI可发现顶椎区脊髓有明显成

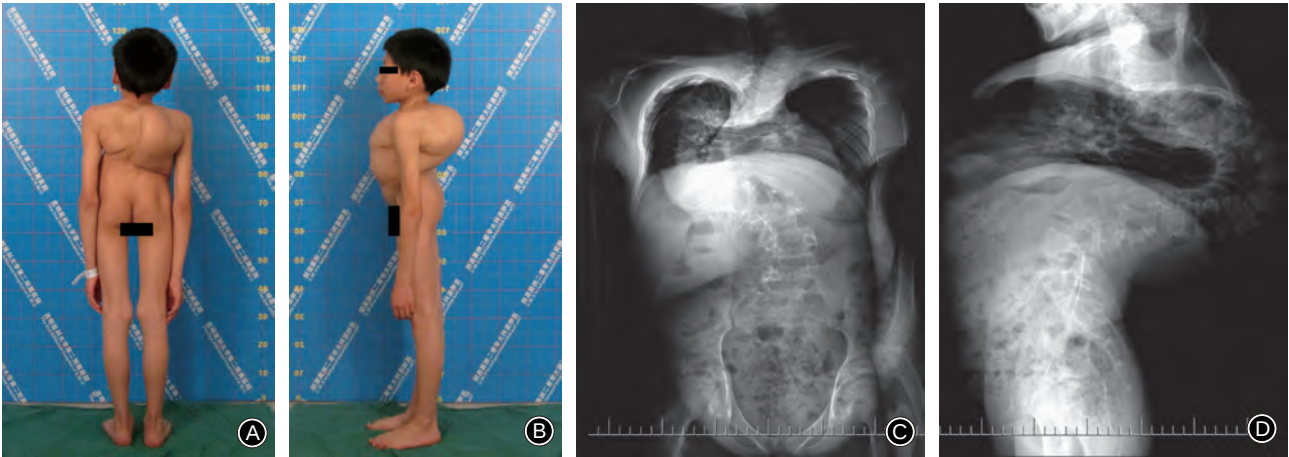


图2 男,16岁,重度僵硬侧后凸脊柱畸形 a,b 术前站立正侧位外观像,示重度僵硬侧后凸脊柱畸形 c,d 术前站立正侧位X线片示术前测量主弯冠状面Cobb角160°,矢状面后凸Cobb角180°

角(推荐强度7.50±1.37)。

用“角状”一词来描述脊柱畸形已有一个世纪的历史,通常用于描述呈尖锐的弯曲并仅有较少椎体组成的脊柱畸形(图3)^[6],常用于描述有此特点的后凸畸形,也有的用于描述有此特点的侧凸畸形,这些畸形的顶椎区域脊椎结构常存在显著异常。对这样的畸形我们通常更多地关注于骨性的角状畸形而忽视了椎管内脊髓成角,而脊髓成角畸形才是制定治疗策略及威胁脊髓安全的重要因素。

5. 单纯半椎体导致的小角度脊柱畸形,手术仅行半椎体切除,不属于PVCR手术(推荐强度7.45±1.97)。

对单纯半椎体所致小角度脊柱畸形行矫形时,术中半椎体切除后脊柱稳定性并未完全丧失;矫形仅通过闭合半椎体切除间隙即可获得。无论从矫形理念、矫形手段、脊髓风险、手术创伤和手术复杂程度来看,该类手术均不应归为PVCR手术^[4]。

6. PVCR手术禁忌证:①绝对禁忌证:患者基本身体条件差,出现心功能衰竭、Ⅱ型呼吸衰竭;患者及家属不能接受PVCR手术可能带来的任何风险和并发症。②相对禁忌证:切除脊椎邻近节段椎弓根发育差,切除脊椎邻近头、尾侧节段无法置入足够数量椎弓根螺钉以维持全脊椎切除后的脊柱稳定性;Ⅰ型呼吸衰竭;患者营养状况差,不足以承受PVCR手术创伤;术者不熟悉或不能熟练完成该手术(推荐强度7.32±1.39)。

对于重度僵硬角状脊柱畸形,PVCR手术虽然有强大的矫形能力,但手术风险也同样大,因此它应作为重度僵硬脊柱畸形的最后的治疗选择。脊柱矫形外科医生术前要明确能否在术中确保患者的生命安全及脊髓安全,必须认真权衡施行该手术的必要性。患者的基本条件差,包括合并心衰、严重的限制性通气功能障碍、呼吸衰竭、营养状况差等,均会增加围手术期并发症的发生,甚至导致患

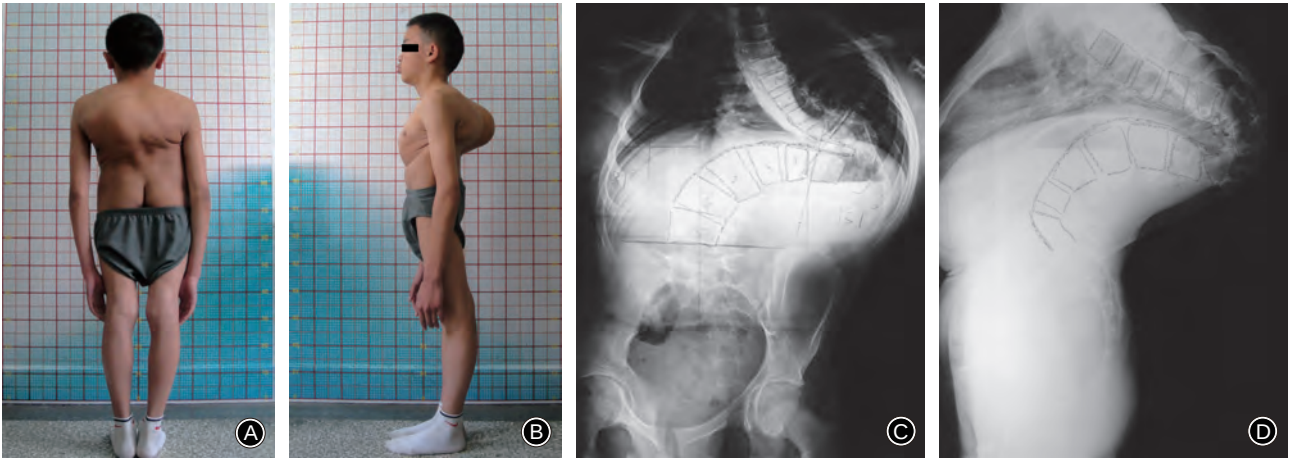


图3 男,17岁,重度僵硬角状后凸脊柱畸形 a,b 术前正侧位外观像,示重度僵硬角状后凸脊柱畸形 c,d 术前站立正侧位X线片示术前测量主弯冠状面Cobb角157°,矢状面后凸Cobb角180°

者死亡。术中如无法在切除椎邻近头、尾侧节段置入足够数量的椎弓根螺钉以稳定全脊椎切除后的脊柱,会给脊髓安全带来严峻挑战。必须清楚地认识到当术者不熟悉或不能熟练完成PVC R手术时,或者缺乏一个配合良好的矫形与麻醉团队时,不应盲目进行该手术。在患者及其家属不能接受PVC R手术潜在的巨大风险及并发症时不宜施行该手术。

二、从脊柱截骨矫治脊柱畸形的发展和演变过程看PVC R手术

(一) 背景

重度僵硬脊柱畸形不但角度大,而且缺乏采用器械矫形所需的脊柱柔韧度,很难单纯通过脊柱矫形器械直接获得安全矫治。因此,在重度僵硬脊柱畸形的矫治中,通过脊椎附件和(或)椎体切除让僵硬的脊柱按照矫形所需进行移动,成为了矫治该类畸形的发展方向 and 出路,脊柱截骨术由此发展演变而来。1945年,Smith-Petersen等^[7]首次将SPO应用于强直性脊柱炎后凸畸形的矫治,之后相继出现了PSO、PVC R等脊柱截骨矫形技术,使重度僵硬脊柱畸形的矫治获得不断突破与进步^[1,8-10]。每一种截骨术都是为解决其他矫形技术的不足而诞生,但随着临床应用也会发现还有该技术所不能矫治的更具挑战性的患者,即重度僵硬角状脊柱侧后凸畸形。不断尝试矫治更为困难的脊柱畸形的同时,也伴随着截骨术相关并发症的增加。

近十余年来,脊柱矫形外科医生在追求单维矫形率提高的同时,也在追求多维空间的平衡及更加完美的矫形效果,并力图降低脊髓神经风险。由此,闭合-开放楔形截骨术(closing-opening wedge osteotomy, COWO)^[11]、非对称性经椎弓根截骨术(asymmetrical pedicle subtraction osteotomy, APSO)^[12]、脊柱去松质骨截骨术(vertebral column decancellation, VCD)^[13]、后路多椎体截骨术(posterior multilevel vertebral osteotomies, PMVO)^[14]、PVC R^[1]等脊柱截骨技术被相继报道。

COWO的出现已摒弃PSO中“Bone-on-Bone”的理念,力图从机制上降低PSO技术潜在的脊髓神经风险的部分原因,提高了矫形率和融合率。但该技术矫治重度僵硬脊柱侧后凸畸形仍存在诸多不足,PVC R技术随之发展而来。PVC R技术的出现使重度僵硬脊柱畸形的三维矫形成为可能,成为重度僵硬脊柱畸形目前治疗的最后选择。

(二) 共识

7. PSO与PVC R有不同的矫形理念与矫形机

制,其最佳适应证也不同(推荐强度 7.96 ± 1.19)。

PSO常适用于矢状面畸形为主的脊柱畸形,通过闭合经椎弓根楔形截骨间隙获得一定的矢状面矫形,但冠状面矫形能力有限。基于脊髓神经风险的考虑,PSO多应用于胸腰段及腰段截骨,改善躯干矢状面失衡,或直接矫正部分角状后凸畸形。PVC R适用于重度僵硬脊柱侧后凸畸形或重度角状畸形。

8. 从切除范围来看,PVC R切除一个或一个以上的全脊椎,包括相邻的椎间盘,人为制造了一个矫形空间;脊柱间仅有脊髓相连,脊柱的稳定性完全由内固定维持;在满足矫形及脊髓神经安全的前提下,PVC R脊椎切除范围与畸形严重程度相关(推荐强度 8.25 ± 0.85)。

PVC R手术需彻底切除一个或一个以上全脊椎及头尾侧相邻椎间盘,从而实现环脊髓 360° 彻底减压,任何残留的椎间盘及骨性结构均可能导致矫形时脊髓神经的卡压。PVC R全脊椎切除后人为制造了一个矫形空间,有利于矫形过程中脊髓张力的观察、判断和掌控。在满足矫形及脊髓神经安全的前提下,应尽可能减少全脊椎的切除数量。矫形后残留的空间过大会影响重建、融合及远期疗效等。

9. PVC R术中每次短缩以降低脊髓张力,目的不仅为了直接获得矫形,更重要的是为了确保脊髓在适度低张状态下的进一步矫形(推荐强度 8.09 ± 1.35)。

与PSO不同,PVC R手术矫形开始时首先要短缩脊柱,不仅是为了直接矫形,更重要的是为了实现脊髓低张状态下的安全矫形。术中根据脊髓和硬脊膜张力变化的需要,可多次反复脊柱短缩的操作,始终保持矫形过程中脊髓处于低张状态。PVC R矫形结束时,建议尽可能有矫形空间的保留。

PVC R矫形结束时始终保留环绕脊髓 360° 彻底减压的矫形空间的意义在于:①有利于矫形过程中截骨断端不会对脊髓和硬脊膜产生直接卡压;②减少脊髓和硬脊膜的过度堆积;③矫形过程中一旦发生截骨断端移位,为脊髓能够随之发生顺应性变化预留出缓冲空间;④有利于利用此空间进行有效、可靠的前中柱支撑和重建。

10. PVC R手术中全脊椎和椎间盘切除过程需小心谨慎,尤其在重度僵硬侧后凸畸形中,凹侧椎弓根的显露与切除是手术困难之一(推荐强度 7.32 ± 1.58)。

PVC R手术矫治重度僵硬侧后凸畸形时,由于

顶椎区脊椎旋转较重,凹侧关节突常有硬化,椎弓根常发育畸形,致使凹侧椎弓根的显露及切除困难,此过程需谨慎细致操作。

11. PVCR 手术矫形完成后残存矫形空间需要结构性重建,对预防术后内植物失败和矫形丢失的发生有重要意义(推荐强度 7.80 ± 1.85)。

PVCR 手术矫形结束时,残留的矫形空间尽可能结构性植骨重建:如空间 >10 mm,推荐钛网结构性植骨;如空间 <10 mm,也可采用自体骨结构性植骨;并利用结构性植骨后的残存空间尽可能增加植骨面积和密度^[4]。

12. 在所有截骨矫形技术中,PVCR 技术要求高、手术难度大,应用过程具有较大的风险与挑战,因此对 PVCR 手术的选择需谨慎(推荐强度 8.75 ± 0.44)。

尽管 PSO 和 PVCR 手术均涉及脊柱三柱结构,但从脊柱截骨术的发展史可发现,与 PSO 及各种经椎体截骨技术相比,PVCR 切除椎节的范围大、矫形机制复杂、手术难度和技术要求高。2011 年美国国际侧凸研究协会(Scoliosis Research Society, SRS)的患病率与致死率报告显示,SPO、PSO、VCR 手术总体并发症(神经与非神经并发症)发生率依次为:28.1%、39.1%和 61.1%^[15]。因此,PVCR 手术作为重度僵硬脊柱侧后凸畸形矫形的最后选择,其应用将面临着较其他截骨矫形技术更大的风险与挑战。

三、PVCR 矫形机制与脊髓安全

(一) 背景

脊柱截骨术是脊髓神经高风险手术,应用脊柱截骨术矫治脊柱畸形时需要面对的核心问题之一就是脊髓神经安全。脊柱截骨术应用范围由最初的单纯弧状后凸畸形逐步扩大至重度僵硬脊柱侧后凸角状畸形;切除范围从早期的单纯后柱切除逐步延伸至脊柱三柱结构的部分或完整切除^[16-17]。然而,伴随切除范围的扩大和应用病例的畸形越来越严重,脊柱截骨矫形技术面临着更大的脊髓神经风险。在三柱截骨术中,PSO 的神经不良事件的发生率达 7.0%~14.3%^[15, 18],而 PVCR 手术高达 5.7%~27%^[19-20]。

从矫形机制来看,无论是 SPO 还是 PSO,都是通过后方闭合截骨间隙实现矫形。对这两种截骨矫形技术而言,实现更大的矫形角度需要扩大切除范围,当闭合后方扩大的截骨间隙时会导致后柱过度短缩,增加脊髓堆积并威胁脊髓安全。这样的矫形理念和矫形手段如果用于重度脊柱侧后凸畸形,脊

髓风险将不可避免。COWO 通过三柱结构的完整切除及钛网植入提供中柱支撑,减少了由于脊柱过度短缩造成的脊髓过度堆积,同时也获得了更好的矢状面矫形效果^[21]。可以认为,COWO 是 PSO 向 PVCR 过渡的阶段。

脊柱截骨术中威胁脊髓安全的因素可源于诸多方面^[22]:从病因到畸形的形态学特点,从术中内植物置入到椎体切除,从矫形到重建,每个步骤都面临着潜在的脊髓神经风险。原发性因素包括病因、畸形形态学特征及角度大小、顶椎位置、是否伴发椎管内发育异常等;医源性因素则可源于手术操作过程中的方方面面。对脊柱截骨术脊髓风险的掌控将有助于规避灾难性神经并发症的发生。

(二) 共识

13. 脊柱截骨术中脊髓风险主要源于:置钉、矫形导致的脊髓高张、矫形导致的脊髓过度低张、截骨断端移位、术前脊髓神经功能障碍、畸形形态学特点、主弯角度、椎管内发育异常、矫形手段、脊髓缺血、节段血管损害、切除脊椎位置和数量等。

14. PVCR 手术是通过全脊椎切除后获得的空间来进行重度僵硬脊柱侧后凸畸形矫形,矫形时常发生该空间内脊髓张力升高,术者可通过多次脊柱短缩实现矫形时始终保持脊髓适度低张。让脊髓始终在适度低张状态下进行矫形,有助于 PVCR 术中的脊髓安全(推荐强度 8.14 ± 0.65)。

脊柱截骨矫形过程中,脊髓神经安全的保护关键在于术者主动掌控截骨端的移位和维持脊髓适度的低张状态。PVCR 术中伴随矫形的深入和畸形角度的减小,尤其是重度僵硬侧后凸畸形患者,脊柱常发生截骨断端移位、骨性压迫、脊髓牵张等,由此造成脊髓张力升高,威胁脊髓安全。PVCR 手术通过完整切除脊椎后人制造出的充分的矫形空间,能够掌控脊髓张力,不闭合截骨空间,并始终维持矫形空间的存在,为矫形过程中脊髓的位移预留充足的缓冲空间,增加了脊髓在矫形时的顺应性和安全性。脊髓高张是一个相对的概念,难以通过仪器或客观指标获得量化,PVCR 术中需及时并反复通过触、视手段动态评估硬膜囊张力的变化。

15. 以脊髓作为矫形虚拟铰链点的 PVCR 手术,能较好地控制脊椎切除后矫形时发生的断端异常移位,有效减少脊髓风险(推荐强度 7.15 ± 2.77)。

脊柱截骨术中铰链点的意义在于强调矫形过程中矫形力的施加均需围绕该中心完成。PSO 以椎体前缘作为铰链点,而 PVCR 手术则以脊髓为虚拟

铰链点,通过可接受的脊髓成角、旋转等位移方式换取矫形。PVCR手术以脊髓作为铰链点的优势还在于能有效掌控脊髓张力的变化。铰链点的差异,决定了其矫形过程中矫形手段的差异,更决定了手术难度和脊髓风险的差异。

16. 截骨断端移位是PVCR手术矫形中面临的问题;侧后凸畸形更易发生截骨断端间移位,且移位可在三维空间内的任何维度发生。矫形时准确预判和有效控制断端移位方向将有助于预防脊髓神经损伤(推荐强度 8.47 ± 0.84)。

PVCR术中截骨断端移位源于脊柱稳定性的完全丧失,也可源于不恰当的矫形力的施加所导致的矫形时铰链点转移;当以单维矫形力矫正三维畸形时,将面临截骨断端移位问题。因此,截骨断端移位是PVCR术中威胁脊髓安全的重要危险因素之一。建议在脊柱稳定性完全丧失前积极使用临时固定棒,稳定全脊椎切除后的脊柱;矫形时准确预判和有效控制断端移位方向将有助于预防脊髓神经损伤。尽管有时断端移位不可避免,在确保足够的矫形空间存在和脊髓低张状态下,脊髓在该矫形空间内冠状面、矢状面成角 $<20^\circ$ 及旋转 $<30^\circ$ 是可以接受的。

17. PVCR术中为了保障脊髓安全,推荐临时固定棒的积极使用,矫形采用原位折棒和(或)交替换棒技术作为主要的矫形方法更安全(推荐强度 8.32 ± 1.38)。

PVCR术中的悬臂梁技术、横向平移技术等矫形手段容易导致不可控的脊柱断端移位。而原位折棒技术和交替换棒技术能够在矫形过程中实现始终以脊髓为虚拟铰链点,有效预防铰链点转移导致的截骨断端移位。因此,建议以原位折棒和(或)交替换棒技术作为PVCR术的主要矫形手段。由于反复的原位折棒和(或)交替换棒必然导致棒的机械强度降低,终末固定时应该换棒。

18. 对部分重度僵硬脊柱畸形患者术前牵引不仅可减小畸形角度、降低手术难度,还有助于预判脊髓功能状态,对预估矫形过程中脊髓对张力变化的耐受能力具有积极意义(推荐强度 7.05 ± 2.84)。

现有影像学技术仅能在术前提示椎管内结构和脊髓是否存在结构异常,而无法评估和预测脊髓对矫形过程中张力变化的耐受潜力;伴有或者不伴有椎管内发育异常的重度僵硬脊柱畸形,脊髓将处于濒临失代偿的高风险状态,手术矫形易导致脊髓功能失代偿,威胁脊髓安全。而通过术前牵引可以

安全、有效地评估患者的脊髓功能状态以及脊髓对矫形过程中张力变化的耐受潜力。

19. PVCR术中节段血管结扎数量的增多将增加脊髓风险(推荐强度 8.37 ± 1.12)。

脊髓节段血管是脊髓血供的重要来源,PVCR术中节段血管的结扎是控制出血的重要手段,但会降低脊髓血供而导致脊髓神经损害。PVCR术中结扎节段血管数量越多,脊髓风险越大。PVCR术中应慎重处理节段血管。

四、重度僵硬脊柱畸形PVCR手术相关脊髓危象的监测与反馈

(一) 背景

每一项脊柱矫形领域的技术进步都提高了矫形率,扩大了手术适应证,但却并未降低手术相关脊髓损害的发生率^[23]。为了早期鉴别神经结构的缺血或损伤,为采取措施减少或逆转这种影响提供可能,除唤醒试验外,神经电生理监测以其实时、连续及敏感的特点而被广泛使用。目前临床提倡联合的神经电生理监测。近期有临床研究结果提示,在脊柱畸形手术中联合应用运动诱发电位监测、感觉诱发电位监测和肌电图监测,其监测神经功能异常的敏感度达92.9%,特异度达99.4%^[24-25]。但有监测假阳性的可能,监测假阳性可导致手术时间延长,也可能导致矫形效果达不到最佳状态^[26]。而另一方面,监测假阴性更令人担心,极有可能让术者忽略了严重的神经并发症。

在《北美对特发性脊柱侧凸手术相关神经损伤的评估和处理指南》中,对脊髓危象的反馈措施包括:①排除监测设备异常;②改善脊髓灌注;③决定并实施唤醒试验;④及时评估是否有螺钉位置异常;⑤调整脊髓张力;⑥探查椎管内有无机械性卡压;⑦对椎管内血肿的评估;⑧甲基泼尼松龙的冲击治疗^[27]。此外,尽管术后迟发性脊髓损伤较少见,但也必须引起足够重视,包括继发于脊髓牵张的进展性脊髓缺血及椎管内血肿等情况。

由于接受PVCR手术的患者绝大多数为重度且僵硬的脊柱畸形,脊髓常处于“病态或高危”的状态,而手术本身带来的大量出血、手术对脊柱稳定性的影响,以及更关键的手术本身需要切除椎体(破坏脊柱的稳定性)及畸形矫形(截骨断端异常移位和脊髓移位),因此术中发生神经监测异常的情况非常多见。有必要在采用PVCR治疗重度僵硬脊柱畸形的手术中,建立一套积极应对脊髓危象的有效反馈机制。

(二) 共识

20. 在重度脊柱畸形 PVCR 术中使用神经电生理监测有助于警示有无神经并发症,但不能以此作为判别脊髓危象的唯一指标;电生理异常时建议行术中唤醒试验(推荐强度 8.81 ± 0.40)。

在重度脊柱畸形矫形术中建议采用联合多模式神经电生理监测(感觉诱发电位和运动诱发电位)及唤醒试验。需要关注监测信号有一定的假阳性与假阴性发生率。对发生于矫形过程中的监测信号变化甚至预警,应该结合手术操作动态进行观察,并据此指导下一步操作。当监测信号异常时,需要鉴别是否来自于手术操作所导致的脊髓可耐受的一过性骚扰。当监测信号异常或不能获得监测信号时,唤醒试验尤为重要。推荐在良好的麻醉管理下配合多次唤醒试验,包括置钉完成和矫形结束时。PVCR 术后迟发性脊髓神经损害也是一个不容忽视的问题,至少在术后 24 h 内应密切观察患者的感觉和运动功能的变化。

21. 重度僵硬脊柱畸形 PVCR 术中发生脊髓危象的风险较高(推荐强度 8.81 ± 0.40)。

神经电生理监测信号异常达预警值且维持一定时间,提示脊髓危象。重度僵硬脊柱畸形术中的脊髓危象可在显露置钉过程、减压及骨或椎体切除过程、矫形过程中发生。由于脊柱失稳、截骨断端异常移位、脊髓的机械性压迫、脊髓张力或血供的变化等情况常出现在矫形过程中,该过程发生脊髓危象的风险尤高。

22. 对重度僵硬脊柱畸形矫形术中发生脊髓危象的患者,及时采用相应反馈手段有利于减少脊髓损伤,特别是永久性脊髓损伤的发生率(推荐强度 8.31 ± 0.63)。

及时发现术中的脊髓危象并采取恰当的反馈措施是关键因素。“及时”是指发现脊髓危象的时间越早,干预越迅速,则脊髓发生不可逆损害的可能性就越小。需要排除监测技术和麻醉变量对监测信号的影响,并注意调整患者的血流动力学和氧交换指标。除了鉴别脊髓可耐受的一过性骚扰导致的监测信号异常之外,还包括通过唤醒试验检验可能的假阴性。“恰当”是指需要建立一套积极应对脊髓危象的有效反馈机制。除了对患者生理状况的调整、使用合理的药物(甲基泼尼松龙)、提高血压增加脊髓灌注等,还包括合理的外科技术的应用。

合理的外科技术包括:①消除导致脊髓功能异常的机械性卡压;②利用反向的原位折棒、节段去

旋转等技术有可能纠正截骨断端的异常移位;③纠正过高或过低的脊髓张力(加压或撑开截骨空间);④扩大椎板切除范围,必要时增加邻近节段的全椎切除,扩大后的截骨空间有利于改善脊髓的转折角度,改善脊髓危象,减少或避免永久性脊髓损害^[28-29]。

五、伴有呼吸功能障碍的重度僵硬脊柱畸形的肺功能特点及转归

(一) 背景

脊柱畸形常并发肺功能障碍,在改善畸形的同时,改善肺功能也是治疗的重要目的。但患者的年龄、主弯大小、顶椎位置、畸形形态等因素对术前肺功能有不同程度的影响,更影响到治疗时机、手术方式及术后肺功能恢复的程度和趋势。重度僵硬脊柱畸形对肺功能的影响尤为突出,此类患者极差的肺功能让生命安全成为手术中不可回避的极大挑战。准确的评估术前肺功能,能帮助术者正确评估患者手术耐受程度,并选择恰当的治疗时机,做好充分的术前准备,制定正确的手术方案。

(二) 共识

23. 重度僵硬脊柱畸形患者肺功能基础差,常伴有重度、极重度限制性通气功能障碍。多为 I 型呼吸衰竭且营养状况差(推荐强度 8.22 ± 1.00)。

脊柱畸形患者大多有限制性通气功能障碍,且肺功能减退程度与畸形角度显著相关。随着 Cobb 角增大,患者肺功能水平呈下降趋势。Cobb 角 $\geq 90^\circ$ 患者的肺功能损害程度远高于 $< 90^\circ$ 的患者^[30]。重度脊柱畸形会增加肺功能障碍或呼吸衰竭的发生(I 型呼吸衰竭和 II 型呼吸衰竭)。Cobb 角 $> 100^\circ$ 的患者可有劳力性呼吸困难,Cobb 角 $> 120^\circ$ 患者可伴有慢性呼吸衰竭^[31]。

24. 重度僵硬脊柱畸形患者肺功能评价应以计划行 PVCR 手术时入院首次肺功能为基础,基础肺功能为 I 型呼吸衰竭为相对手术禁忌证,II 型呼吸衰竭为绝对手术禁忌证。通过肺功能锻炼及牵引后,肺功能评价如仍有呼吸衰竭应为绝对手术禁忌证(推荐强度 8.00 ± 1.33)。

对重度僵硬脊柱畸形患者,术前用力肺活量低于正常预测值的 40%,或低于 25 ml/kg 体重,增加了术后延长拔管的可能性^[31]。术前伴有极重度呼吸功能障碍(肺活量 $< 20\%$)的患者中有接近 75% 伴有呼吸衰竭,以往认为此类患者属于矫形手术的禁忌证,但通过术前呼吸功能锻炼肺功能得到改善后可行 PVCR 手术。

25. 重度僵硬脊柱畸形患者术前牵引对肺功能的改善有积极意义。除牵引外术前增加肺功能储备的措施包括:①肺功能锻炼(吹气球、呼吸操、咳嗽练习、体力锻炼);②无创呼吸机;③营养支持(肠内、外营养)(推荐强度 8.06 ± 1.30)。

通过各种术前呼吸康复训练可增强呼吸肌动力,提高呼吸效率,增加通气量,缓解气道塌陷,利于肺泡气体排出,改善通气功能及血氧交换;术前无创呼吸机的使用可以改善脊柱畸形患者的肺泡换气不足、血氧不足、呼吸性和代谢性酸中毒,并提高患者的运动耐量^[32];术前牵引的意义不仅仅在于减少脊髓风险,对重度僵硬角状脊柱畸形通过术前牵引改善肺功能储备、增加手术耐受更是保障生命安全的重要措施。

26. 伴有呼吸功能障碍的重度僵硬脊柱畸形PVCR术后肺功能的变化趋势是:青少年肺功能的恢复优于成人,肺功能恢复至术前或优于术前水平平均需要2年左右(推荐强度 7.50 ± 2.15)。

对伴有呼吸功能障碍的重度僵硬脊柱畸形患者,PVCR手术不仅能有效改善脊柱畸形,还能明显改善肺功能。12~18岁年龄段进行PVCR手术干预能获得更好的肺功能改善。不同年龄段患者术后2年肺功能改善明显优于术前,术后5年随访肺功能仍有不同程度改善^[33-35]。

六、重度僵硬脊柱畸形PVCR术中出血的控制

(一)背景

脊柱矫形手术中的大量失血是手术的主要困难之一^[3],尤其在PVCR这样手术时间长、创面大、技术复杂的手术中,其潜在伴发的创伤性凝血病是脊柱矫形外科医生必须面对的严峻挑战。大量的失血、输血和创伤性凝血病的发生显著增加了手术的并发症。手术团队应联合应用多种手段及技术来应对创伤性凝血病,并安全有效地减少PVCR术中失血及输血以确保手术安全。

(二)共识

27. PVCR手术是一个耗时长、创面大、技术复杂的手术,术中失血量明显大于其他脊柱矫形手术,其大量失血及大量输血已成为威胁患者手术安全的重要因素(推荐强度 8.59 ± 0.51)。

PVCR手术时间可长达近十小时,融合节段常需从上胸段到下腰段,术中还需行全脊椎切除。术中来源于大创面、椎管内小动静脉、椎体切除及植骨床骨创面的大量失血甚至可达患者自身血容量的2倍以上,术中需大量输血^[1]。大量失血及输血

会导致相关并发症及医疗费用的明显增加。

28. 在PVCR术中如不积极采取有效措施,大量失血及大量输血将不可避免地使患者发生创伤性凝血病。创伤性凝血病的凝血功能障碍、纤溶亢进、凝血因子缺乏及并存的低体温、酸中毒等多种因素严重威胁患者安全(推荐强度 8.31 ± 0.87)。

创伤性凝血病是由于严重创伤或大手术等导致的组织损伤引起机体出现以凝血功能障碍为主要表现的临床综合征。PVCR手术的大创面和大量出血是引起创伤性凝血病的病理基础。大创面及广泛血管内皮损伤引起的纤溶亢进、大量失血及大量补液导致的凝血因子缺乏、组织酸中毒及低体温^[36],这些因素的存在促成了创伤性凝血病的发生、发展甚至进入恶性循环。因此,PVCR术中若不积极干预上述危险因素,必然导致创伤性凝血病的发生、发展,使并发症发生率增高,严重威胁手术安全。

29. 需要积极采用适当的措施预防和控制PVCR术中创伤性凝血病的发生、发展,避免凝血功能障碍进入恶性循环。血栓弹力图检测是一项监测PVCR术中凝血功能的有效方法,可使手术安全性提高并减少相关并发症的发生(推荐强度 8.56 ± 0.62)。

血栓弹力图可以有效地帮助外科医生诊断PVCR术中的凝血功能异常。积极进行抗纤溶治疗、早期补充凝血因子、维持体温及纠正酸碱失衡可以有效应对PVCR术中创伤性凝血病,从而维持凝血功能。在围手术期全程,外科医生应联合应用多种手段及技术来应对创伤性凝血病,确保手术的安全并减少并发症发生。

30. PVCR术中失血主要来自于:①大创面渗血;②椎管内小动静脉出血;③骨创面出血,包括全脊椎切除的骨创面和植骨床(推荐强度 8.47 ± 0.80)。

PVCR手术的早期失血主要来自于大创面渗血。当开始进行全脊椎切除时主要的失血来自于椎管内小动静脉的出血,其次为椎体切除骨创面的渗血,常可表现为短时间内大量出血。手术后期植骨床的出血也是术中失血的来源之一。随着PVCR手术的开始,手术创伤及失血逐渐增加,创伤性凝血病也随之启动并不断进展。失血量随手术时间延长而显著增加,手术后期创伤性凝血病所致的凝血功能紊乱尤为突出。此时创面渗血成为术中失血的主要来源,大量失血已转变为创伤性凝血病的必然结果。

31. 目前, PVCR 术中应用氨甲环酸等抗纤溶药物可有效应对创伤性凝血病及纤溶亢进, 从而安全有效地减少手术失血及输血 (推荐强度 8.22 ± 1.06)。

创伤性凝血病及纤溶亢进在 PVCR 手术失血中扮演着重要角色, 积极的抗纤溶治疗是减少 PVCR 术中失血、输血并应对创伤性凝血病的关键。上世纪 90 年代开始尝试使用抗纤溶药物减少手术失血, 抑肽酶被禁用后氨甲环酸成为研究热点。氨甲环酸是一种合成的抗纤溶氨基酸, 通过与纤维蛋白溶解酶及纤维蛋白溶解酶原可逆性结合形成复合物, 阻止纤维蛋白溶解酶及纤维蛋白溶解酶原溶解纤维蛋白以达到止血的目的。目前在脊柱外科领域, 氨甲环酸已成为广泛应用、效果明确的抗纤溶药物, 同时氨甲环酸的安全性也获得广泛认可^[37]。

32. 合适剂量方案的氨甲环酸是安全有效地减少 PVCR 手术失血与输血的关键之一。当手术时间长、创面大、手术创伤大时, 现有临床经验证实大剂量氨甲环酸是一个可供选择的方案 (推荐强度 7.94 ± 1.56)。

氨甲环酸应用于脊柱外科领域用于减少手术失血及输血的安全性及有效性已被广泛认可^[37]。目前氨甲环酸的剂量方案众多, 在脊柱外科领域小剂量方案的有效性仍存在争议, 而大剂量方案被证明能有效减少手术失血^[38]。近期的随机对照试验证明在脊柱矫形手术中大剂量方案较小剂量方案能更有效地减少手术失血及输血而并发症无明显增高^[39]。针对 PVCR 手术的研究也证明, 大剂量氨甲环酸方案能有效减少 PVCR 手术的术中失血及输血^[40]。

33. 积极维持体温和及时纠正酸中毒是有效控制 PVCR 术中失血的有效措施 (推荐强度 8.35 ± 0.79)。

严重低体温和酸中毒均可降低血小板、凝血因子的功能和促进纤溶。低体温往往与酸中毒、凝血功能障碍相辅相成构成患者的“死亡三角”, 因此维持体温和纠正酸中毒是预防和治疗创伤性凝血病及减少术中失血的重要措施之一^[41]。

34. 早期积极的补充凝血因子能有效减少 PVCR 术中失血, 并可防止出凝血功能紊乱进入恶性循环 (推荐强度 8.31 ± 1.30)。

早期积极补充被消耗的、丢失的及稀释的凝血因子, 如新鲜冰冻血浆、冷沉淀和纤维蛋白原等的使用对恢复正常凝血功能非常重要, 也是应对创伤性凝血病的重要环节。

35. 熟练的脊柱外科技术尤其是椎管内止血技术能有效辅助控制椎管内动静脉出血 (推荐强度 8.56 ± 0.62)。

椎管内动静脉出血是 PVCR 手术全脊椎切除过程中的主要出血来源, 往往在短时间内造成大量失血。椎管内血管丛压受平均动脉压影响有限, 药物对椎管内动静脉出血的控制效果同样有限。熟练的外科技术是解决椎管内血管丛出血的主要手段, 也是减少 PVCR 手术失血的重要环节。

36. PVCR 术中使用长时间使用控制性低血压会严重影响组织器官的灌注, 且控制性低血压对骨创面及椎管内出血控制有限, 可能会增加并发症的发生 (推荐强度 8.11 ± 1.02)。

控制性低血压用于脊柱外科手术已有数十年历史, 可有效减少创面渗血。然而椎管内小动静脉压及骨内压受平均动脉血压的影响有限, 因此控制性低血压并不能减少 PVCR 术中椎管内小动静脉及骨创面的出血。长时间使用控制性低血压可能导致脊髓、脑等重要器官灌注不足, 同时俯卧位的控制性低血压是患者术后失明的重要因素^[42]。因此不推荐在 PVCR 术中使用长时间使用控制性低血压。

七、重度僵硬脊柱畸形 PVCR 术中置钉与脊髓安全

(一) 背景

重度僵硬角状脊柱畸形在矫形术中发生脊髓、神经损伤的原因, 与螺钉相关的医源性因素达 30% 以上, 在各种原因中占最大比例。包括应对术中检测异常时螺钉误置或位置不良的排除也是重要因素。究其原因, 畸形的椎弓根是主要原因。约 22.5% 的特发性脊柱畸形患者的椎弓根为异常椎弓根, 其中 94.7% 位于 $T_2 \sim T_{10}$; 椎弓根异常主要集中于顶椎区域, 其余区域发生率为 5.8%; 而在大于 70° 的脊柱畸形患者中, 畸形椎弓根的发生率更高。近年来出现的量化分型提示, 椎弓根直径与置钉成功率密切相关, 畸形椎弓根螺钉误置率为正常椎弓根的 3 倍。重度僵硬脊柱畸形应用 PVCR 进行矫形时, 脊髓安全的保证、稳定的维持、矫形手段的实施、矫形的获得以及坚强融合的获得与螺钉置入的密度呈正相关, 因此术前对椎弓根的评估非常重要。

(二) 共识

37. 畸形椎弓根在重度僵硬脊柱畸形中常见。PVCR 术中畸形椎弓根所致螺钉位置不良是导致脊髓神经并发症的因素之一 (推荐强度 8.65 ± 0.49)。

既往对椎弓根的研究多围绕椎弓根径线的测量,较少有影响置钉成功率的因素研究。重度僵硬脊柱畸形PVCR术中畸形椎弓根髓腔直径小或无髓腔,是导致螺钉位置不良的主要因素。伴随外科技的飞速进展,脊柱畸形的矫形率得以提高,但新发神经损害的比例与20年前比较并无明显改善。无论是由术后X线、CT评价,还是术中监测及监测异常时的反馈因素,螺钉误置均占比例较大,是发生脊髓神经并发症的重要原因之一^[43]。

38. 重度僵硬脊柱畸形的PVCR手术,在截骨区域足够的螺钉置入是手术实施的必要条件(推荐强度 8.50 ± 0.73)。

截骨区域高密度的螺钉置入对此类患者而言是获得较高矫形率的前提。PVCR手术是矫治重度僵硬脊柱畸形的最有效手段。在整个手术过程中,脊髓安全的保证、截骨断端移位的控制、矫形手段的实施、前中柱的重建,以至于融合的获得、减少后期内植物的损耗及矫形角度的丢失,均依靠尽可能多的螺钉置入,尤其是在全脊椎切除区域^[4]。

39. PVCR手术矫治重度僵硬脊柱畸形时,切除脊椎上、下邻近节段无法连续置入足够数量椎弓根螺钉以维持脊柱稳定视为相对手术禁忌证(推荐强度 8.56 ± 0.51)。

PVCR术中,在脊柱稳定性完全丧失前需要临时固定棒的固定,矫形时交替换棒。脊柱短缩降低脊髓张力以及矫形时对断端移位的控制,均依靠靠近脊椎切除区域足够数量的椎弓根螺钉维持。

40. 术前对拟置钉节段行椎弓根CT评估其径线、形态及旋转度是必要的。椎弓根髓腔内径决定螺钉能否置入及置钉的安全性,外径的大小影响置入螺钉的直径,椎弓根最窄部髓腔水平位最小宽度过小将增加置钉难度及风险(推荐强度 8.75 ± 0.45)。

术前对拟置钉节段椎弓根进行评估有利于确定能否置入螺钉、置钉风险及置钉难易程度,有利于手术方案的制定。CT评价是公认的较为有效的手段。椎弓根最窄部加密扫描显示骨性髓腔水平位最小宽度小于1 mm或无髓腔,则螺钉置入难度及风险倍增,甚至不能置入螺钉。但螺钉能否置入及置钉的安全性取决于椎弓根髓腔最小内径,最大外径影响置入螺钉的直径^[44-47]。

八、PVCR手术治疗重度僵硬脊柱畸形非神经并发症的分析及预防

(一)背景

PVCR手术可以获得较PSO更高的矫形率,但

来自全球的大宗病例数据显示PVCR面临较高的并发症发生率($34.3\%\sim64.3\%$),其中非神经并发症发生率为 $18.75\%\sim40\%$ ^[8,19-20,48]。非神经并发症涉及多系统、多器官及围手术期各个方面,严重影响患者的生命安全。在关注脊髓安全的同时,也需要采取多种预防措施减少非神经并发症的发生。

(二)共识

41. PVCR手术矫治重度僵硬脊柱畸形非神经并发症发生率高,严重时影响患者生命安全,需给予更多关注(推荐强度 8.63 ± 0.50)。

PVCR手术非神经并发症包括:①呼吸系统并发症:肺炎、胸腔积液、肺栓塞、胸膜穿破、血气胸、呼吸衰竭;②手术切口感染:浅部感染、深部感染;③大量出血并发创伤性凝血病;④心血管系统并发症:心脏停搏、心衰、心律失常、低血压、心肌梗死;⑤内植物损耗:断钉、断棒、螺钉松动;⑥消化系统并发症:肠梗阻、肠系膜上动脉综合征;⑦椎管内血肿;⑧深静脉血栓;⑨硬脊膜撕裂;⑩其他:视力损伤、高热、死亡等。非神经并发症涉及生命安全的方方面面,严重影响患者的生命安全。

42. PVCR手术患者心肺功能及储备差、营养状况差、手术创伤大、手术时间长是导致非神经并发症发生的重要原因(推荐强度 8.63 ± 0.50)。

从患者的情况而言,重度脊柱畸形让患者的心肺功能及储备、营养状况、生理活动等均受到明显削弱;严重的肺功能损害,导致肺通气和血氧交换障碍,甚至造成呼吸衰竭,延长术后气管拔管时间和住院时间;营养状况差使机体组织修复能力和免疫力低下,增加术后感染率和植骨不融合率;PVCR手术在畸形获得矫形的同时,其胸廓、心脏大血管、呼吸器官等结构的位置和彼此间的关系在较短时间内发生显著改变,也会影响相关功能^[20,35]。从PVCR手术本身的特点而言,手术显露的范围较大、繁杂的操作程序、漫长的手术时间、大量的手术出血,决定了该术式极大的手术创伤,对患者的机体内环境、心肺功能会产生巨大影响。患者自身特点和手术特点是导致非神经并发症发生率高的主要原因。

43. 需要采用多种预防措施减少PVCR手术非神经并发症的发生(推荐强度 8.63 ± 0.50)。

非神经并发症的预防策略包括:①围手术期积极的肺功能锻炼和营养支持;②术前行心脏超声多普勒、动态心电图检查,排除潜在心血管疾病;③行术前牵引,减小畸形角度,降低手术难度;④使用多

种外科技术和止血药物,减少术中出血;⑤使用钛网或自体骨行前柱结构性植骨,增大截骨间隙的植骨面积和密度,使用粗棒、钴铬棒等器械,有利于降低术后内植物损耗相关并发症^[49];⑥术后积极的全身支持治疗;⑦PVCR 术后深部感染对患者和术者均是灾难性的,抗生素的积极使用是必要的。

九、总结

以上内容通过不同角度对 PVCR 手术进行了阐述与讨论,结合工作组和专家组的共识,我们认为有必要较全面地对 PVCR 手术进行概述。

44. 应该从手术适应证、全脊椎切除的部位和范围、矫形理念、矫形效率以及脊髓风险的防范机制等各个方面去审视 PVCR 手术。

PVCR 通过彻底切除一个或一个以上全脊椎及相邻附属结构,将脊柱的完整性和稳定性完全破坏,创造足够大、环绕脊髓 360° 的矫形空间;利用该空间短缩脊柱,降低脊髓张力,实现僵硬脊柱畸形的三维矫形;利用该空间增加脊柱发生相对移位时脊髓的顺应性;矫形结束时利用该空间进行前中柱的可靠有效重建。不同于其他截骨术,PVCR 手术创造的矫形空间大小、形态与畸形严重程度相关。PVCR 手术是一个高效、有力和高风险的畸形脊柱重塑术,首选于其他截骨技术不能矫正的重度僵硬脊柱畸形。

参 考 文 献

- [1] Suk SI, Kim JH, Kim WJ, et al. Posterior vertebral column resection for severe spinal deformities[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2002, 27(21): 2374 - 2382. DOI: 10.1097/01.BRS.0000032026.72156.1D.
- [2] Fitch K, Bernstein S, Aguilar M, et al. The RAND/UCLA appropriateness method user's manual[M]. Santa Monica: RAND, 2001: 1-109.
- [3] Smith JS, Wang VY, Ames CP. Vertebral column resection for rigid spinal deformity[J]. Neurosurgery, 2008, 63(3 Suppl): S177 - 182. DOI: 10.1227/01.NEU.0000320429.32113.85.
- [4] Xie JM, Wang YS, Zhao Z, et al. Posterior vertebral column resection for correction of rigid spinal deformity curves greater than 100°[J]. J Neurosurg Spine, 2012, 17(6): 540-551. DOI: 10.3171/2012.9.SPINE111026.
- [5] Lenke LG, O'Leary PT, Bridwell KH, et al. Posterior vertebral column resection for severe pediatric deformity: minimum two-year follow-up of thirty-five consecutive patients[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34(20): 2213-2221. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181b53cba.
- [6] Miladi L. Round and angular kyphosis in paediatric patients[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2013, 99(1 Suppl): S140-149. DOI: 10.1016/j.otsr.2012.12.004.
- [7] Smith-Petersen MN, Larson CB, Aufranc OE. Osteotomy of the spine for correction of flexion deformity in rheumatoid arthritis[J]. J Bone Joint Surg Am, 1945, 27: 1-11.
- [8] Thomasen E. Vertebral osteotomy for correction of kyphosis in ankylosing spondylitis[J]. Clin Orthop Relat Res, 1985(194): 142-152.
- [9] 解京明, 王迎松, 张颖, 等. 经后路全椎体切除矫正僵硬性脊柱后凸或侧后凸的初期临床报道[J]. 脊柱外科杂志, 2008, 2(6): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2957.2008.01.001.
Xie JM, Wang YS, Zhang Y, et al. Posterior total vertebral resection correct rigid kyphosis or kyphoscoliosis-clinical report of initial stage[J]. J Spine Surg, 2008, 2(6): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2957.2008.01.001.
- [10] Yang C, Zheng ZZ, Liu H, et al. Posterior vertebral column resection in spinal deformity: a systematic review[J]. Eur Spine J, 2016, 25(8): 2368-2375. DOI: 10.1007/s00586-015-3767-7.
- [11] Kawahara N, Tomita K, Baba H, et al. Closing-opening wedge osteotomy to correct angular kyphotic deformity by a single posterior approach[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26(4): 391-402.
- [12] Bridwell KH. Decision making regarding Smith-Petersen vs. pedicle subtraction osteotomy vs. vertebral column resection for spinal deformity[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2006, 31(19 Suppl): S171 - 178. DOI: 10.1097/01.brs.0000231963.72810.38.
- [13] 王岩, 张永刚, 郑国权, 等. 脊柱去松质骨截骨治疗僵硬性脊柱侧凸的有效性 & 安全性分析[J]. 中华外科杂志, 2010, 48(22): 1701-1704. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2010.22.007.
Wang Y, Zhang YG, Zheng GQ, et al. Vertebral column decancellation for the management of rigid scoliosis: the effectiveness and safety analysis[J]. Chin J Surg, 2010, 48(22): 1701 - 1704. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2010.22.007.
- [14] Suh SW, Modi HN, Yang J, et al. Posterior multilevel vertebral osteotomy for correction of severe and rigid neuromuscular scoliosis: a preliminary study[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34(12): 1315-1320. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181a028bc.
- [15] Smith JS, Sansur CA, Donaldson WF, et al. Short-term morbidity and mortality associated with correction of thoracolumbar fixed sagittal plane deformity: a report from the Scoliosis Research Society Morbidity and Mortality Committee[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36(12): 958-964. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181eabb26.
- [16] Gao R, Wu J, Yuan W, et al. Modified partial pedicle subtraction osteotomy for the correction of post-traumatic thoracolumbar kyphosis[J]. Spine J, 2015, 15(9): 2009 - 2015. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.04.047.
- [17] Chen ZQ, Zeng Y, Li WS, et al. Apical segmental resection osteotomy with dual axial rotation corrective technique for severe focal kyphosis of the thoracolumbar spine[J]. J Neurosurg Spine, 2011, 14(1): 106-113. DOI: 10.3171/2010.9.SPINE10257.
- [18] Kim YJ, Bridwell KH, Lenke LG, et al. Results of lumbar pedicle subtraction osteotomies for fixed sagittal imbalance: a minimum 5-year follow-up study[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2007, 32(20): 2189-2197. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31814b8371.

- [19] Lenke LG, Newton PO, Sucato DJ, et al. Complications after 147 consecutive vertebral column resections for severe pediatric spinal deformity: a multicenter analysis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2013, 38(2): 119-132. DOI: 10.1097/BRS.0b013e318269fab1.
- [20] Wang YS, Xie JM, Zhao Z, et al. Perioperative Major Non-neurological Complications in 105 Patients Undergoing Posterior Vertebral Column Resection Procedures for Severe Rigid Deformities [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2015, 40(16): 1289-1296. DOI: 10.1097/BRS.0000000000000995.
- [21] Qian BP, Wang XH, Qiu Y, et al. The influence of closing-opening wedge osteotomy on sagittal balance in thoracolumbar kyphosis secondary to ankylosing spondylitis: a comparison with closing wedge osteotomy[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(16): 1415-1423. DOI: 10.1097/BRS.0b013e318250dc95.
- [22] Xie JM, Zhang Y, Wang YS, et al. The risk factors of neurologic deficits of one-stage posterior vertebral column resection for patients with severe and rigid spinal deformities[J]. *Eur Spine J*, 2014, 23(1): 149-156. DOI: 10.1007/s00586-013-2793-6.
- [23] Hresko MT. Clinical practice. Idiopathic scoliosis in adolescents [J]. *N Engl J Med*, 2013, 368(9): 834-841. DOI: 10.1056/NEJMcip1209063.
- [24] 杨兴华, 王传峰, 朱晓东, 等. 体感诱发电位监测在脊柱畸形 Ponte 截骨矫形手术中的应用[J]. *中国矫形外科杂志*, 2012, 20(11): 986-989. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.11.08.
Yang XH, Wang CF, Zhu XD, et al. Application of somatosensory evoked potential monitoring in surgical correction of spinal deformities[J]. *Orthop J Chin*, 2012, 20(11): 986-989. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.11.08.
- [25] Feng B, Qiu GX, Shen JX, et al. Impact of multimodal intraoperative monitoring during surgery for spine deformity and potential risk factors for neurological monitoring changes[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2012, 25(4): E108-114. DOI: 10.1097/BSD.0b013e31824d2a2f.
- [26] 孙春会, 尹庆水, 吴增晖, 等. 脊柱侧弯矫形术中体感运动诱发电位联合监测假阳性 1 例并原因分析[J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19(11): 962-963. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2011.11.23.
Sun CH, Ying QS, Wu ZH, et al. Use of somatosensory evoked potentials and transcranial electric motor evoked potentials in surgical correction of scoliosis: one case of false positive report and reason analysis[J]. *Orthop J Chin*, 2011, 19(11): 962-963. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2011.11.23.
- [27] Pahys JM, Guille JT, D'Andrea LP, et al. Neurologic injury in the surgical treatment of idiopathic scoliosis: Guidelines for assessment and management[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2009, 17(7): 426-434.
- [28] Xie J, Li T, Wang Y, et al. Change in Cobb angle of each segment of the major curve after posterior vertebral column resection (PVCr): a preliminary discussion of correction mechanisms of PVCr[J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(4): 705-710. DOI: 10.1007/s00586-011-1985-1.
- [29] Xie JM, Wang YS, Shi ZY, et al. Proper responding strategies to neuromonitoring alerts during correction step in posterior vertebral column resection patients with severe rigid deformities can reduce postoperative neurologic deficits[Z]. Paper presented at: Scoliosis Research Society 50th Annual Meeting & Course, Minneapolis, 2015.
- [30] 邱勇. 重视对脊柱侧凸伴呼吸功能障碍患者的肺功能评估和围手术期处理[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2011, 21(4): 265-267. DOI: 10.3969/j.issn.1004-406X.2011.04.01.
Qiu Y. The importance of pulmonary function evaluation and perioperative management in the patients with scoliosis associated with respiratory dysfunction[J]. *Chin J Spine Spin Cord*, 2011, 21(4): 265-267. DOI: 10.3969/j.issn.1004-406X.2011.04.01.
- [31] Koumbourlis AC. Scoliosis and the respiratory system[J]. *Paediatr Respir Rev*, 2006, 7(2): 152-160. DOI: 10.1016/j.prrv.2006.04.009.
- [32] Vila B. Noninvasive ventilatory assistance during exercise for patients with kyphoscoliosis: a pilot study[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2007, 86(8): 672-677. DOI: 10.1097/PHM.0b013e31806dd2c8.
- [33] 毕尼, 解京明, 王迎松, 等. 经后路全脊椎切除对伴有呼吸功能障碍的严重僵硬脊柱畸形患者肺功能的影响研究[J]. *中国骨与关节杂志*, 2014, 3(12): 901-905. DOI: 10.3969/j.issn.2095-252X.2014.12.005.
Bi N, Xie JM, Wang YS, et al. Research on the effects of posterior vertebral column resection on pulmonary function in the patients with severe rigid spinal deformity accompanied by respiratory dysfunction[J]. *Chin J Bone Joint*, 2014, 3(12): 901-905. DOI: 10.3969/j.issn.2095-252X.2014.12.005.
- [34] Bumpass DB, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Pulmonary function improvement after vertebral column resection for severe spinal deformity[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2014, 39(7): 587-595. DOI: 10.1097/BRS.0000000000000192.
- [35] Xie JM, Bi N, Wang YS, et al. The effect of PVCr on pulmonary function improvement in severe rigid spinal deformity patients with respiratory dysfunction[Z]. Paper presented at: Scoliosis Research Society 47th Annual Meeting & Course, Chicago, 2012.
- [36] Spahn DR, Bouillon B, Cerny V, et al. Management of bleeding and coagulopathy following major trauma: an updated European guideline[J]. *Crit Care*, 2013, 17(2): R76. DOI: 10.1186/cc12685.
- [37] Cheriyan T, Maier SP 2nd, Bianco K, et al. Efficacy of tranexamic acid on surgical bleeding in spine surgery: a meta-analysis[J]. *Spine J*, 2015, 15(4): 752-761. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.01.013.
- [38] Xie JM, Lenke LG, Li T, et al. Preliminary investigation of high-dose tranexamic acid for controlling intraoperative blood loss in patients undergoing spine correction surgery[J]. *Spine J*, 2015, 15(4): 647-654. DOI: 10.1016/j.spinee.2014.11.023.
- [39] Li T, Xie JM, Wang YS, et al. Different dose regimens of tranexamic acid reduces perioperative blood loss and blood transfusion in adolescent idiopathic scoliosis patients: a prospective, randomized control study[Z]. Paper presented at: Scoliosis Research Society 50th Annual Meeting & Course, Minneapolis, 2015.

- [40] Li T, Xie JM, Zhang Y, et al. High dose of tranexamic acid reduces intraoperative blood loss in patients undergoing posterior vertebral column resection: a clinical comparative study of 89 consecutive patients[Z]. Paper presented at: Scoliosis Research Society 49th Annual Meeting & Course, Anchorage, 2014.
- [41] 田兆嵩. 创伤性凝血病与输血[J]. 中国输血杂志, 2012, 25(10): 926-927.
Tian ZS. Coagulopathy of trauma and transfusion[J]. Chin J Blood Transfusion, 2012, 25(10): 926-927.
- [42] Tse EY, Cheung WY, Ng KF, et al. Reducing Perioperative blood loss and allogeneic blood transfusion in patients undergoing major spine surgery[J]. J Bone Joint Surg Am, 2011, 93(13): 1268-1277. DOI: 10.2106/JBJS.J.01293.
- [43] Hamilton DJ, Smith JS, Sansur CA, et al. Rates of new neurological deficit associated with spine surgery based on 108, 419 procedures[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36(15): 1218-1228. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181ec5fd9.
- [44] 邱勇, 殷刚, 王斌, 等. 青少年特发性胸椎侧凸患者胸椎椎弓根横径的分型及其临床意义[J]. 中华外科杂志, 2010, 48(5): 353-357. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2010.05.010.
Qiu Y, Yin G, Wang B, et al. Classification of thoracic pedicle according to the transverse diameters in thoracic idiopathic scoliosis patients and its clinical significance[J]. Chin J Surg, 2010, 48(5): 353-357. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2010.05.010.
- [45] 张颖, 解京明, 王迎松, 等. 胸椎椎弓根髓腔内径 CT 分型在严重僵硬性脊柱畸形矫形中的临床意义[J]. 中国修复重建外科杂志, 2012, 26(3): 257-260.
Zhang Y, Xie JM, Wang YS, et al. Clinical significance of thoracic pedicle classification by inner cortical width of pedicles on CT images in posterior vertebral column resection for treatment of rigid and severe spinal deformities[J]. Chin J Reparat Reconstr Surg, 2012, 26(3): 257-260.
- [46] Zhang Y, Xie JM, Wang YS, et al. Thoracic pedicle classification determined by inner cortical width of pedicles on computed tomography images: its clinical significance for posterior vertebral column resection to treat rigid and severe spinal deformities -- a retrospective review of cases[J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2014, 15: 278. DOI: 10.1186/1471-2474-15-278.
- [47] Xie J, Wang Y, Zhao Z, et al. The safe placement of upper and middle thoracic pedicle screws in pediatric deformity[J]. J Spinal Disord Tech, 2011, 24(1): 55-59. DOI: 10.1097/BSD.0b013e3181d4c877.
- [48] Chang DG, Yang JH, Lee JH, et al. Congenital scoliosis treated with posterior vertebral column resection in patients younger than 18 years: Longer than 10-year follow-up[J]. J Neurosurg Spine, 2016, 25(2): 225-233. DOI: 10.3171/2015.11.SPINE151099.
- [49] Smith JS, Shaffrey CI, Ames CP, et al. Assessment of symptomatic rod fracture after posterior instrumented fusion for adult spinal deformity[J]. Neurosurgery, 2012, 71(4): 862-867. DOI: 10.1227/NEU.0b013e3182672aab.

(收稿日期: 2017-10-10)

(本文编辑: 马宝意)

制定共识专家名单

解京明 陈仲强 沈健雄 张雪松 杨 操 郑召民 钱邦平 曾效祖 田慧中 李 超
伍 骥 吴增晖 丁文元 马 原 杜世新 白玉树 王迎松 刘立岷 杨 华 周焯家
谢世明 曹 奇 杨 召