

综述

青少年重度腰椎滑脱脊柱-骨盆矢状位平衡的研究进展

Research advance of spino-pelvic sagittal balance in adolescents with severe spondylolisthesis

潘长瑜, 吕国华, 王 冰, 李鑫懿, 李亚伟, 蒋 彬, 王孝宾, 邝 磊

(中南大学湘雅二医院脊柱外科 410011 长沙市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2020.08.11

中图分类号: R681.5 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2020)-08-0740-05

青少年腰椎滑脱是指在骨骼发育成熟前, 头侧椎体相对于相邻尾侧椎体发生移位, 常见于腰骶结合部位的 L5/S1 节段, 可伴有相同节段峡部骨缺损或发育异常^[1-2]。既往研究表明, 青少年腰椎滑脱的发生、发展与脊柱-骨盆矢状位序列之间存在着密切的联系: 一方面, 椎体滑脱造成局部应力改变、干扰腰骶椎形态的正常发育、破坏腰骶部的生理序列, 进而影响脊柱-骨盆矢状位平衡状态; 另一方面, 骶骨-骨盆矢状位序列异常也可加重青少年腰椎滑脱发展^[3-8]。当滑脱率 $\geq 50\%$ 时, 定义为重度腰椎滑脱, 对应着 Meyerding 分型的 III、IV 和 V 度滑脱^[1-2]。青少年重度腰椎滑脱往往引起躯干矢状面的失代偿, 严重影响患者的形体美观和身心健康^[3-4]。尽管手术治疗是解决重度滑脱的有效方式之一, 但是不同手术策略对纠正矢状位畸形方面存在差异, 而且由于手术策略选择、操作不当可能导致术后出现矢状位再次失衡^[9]。笔者回顾以往文献, 对青少年重度腰椎滑脱的脊柱-骨盆矢状位特点进行概述, 并归纳不同手术方式对重度腰椎滑脱患者术后矢状位平衡改变的影响, 以及如何避免和预防术后矢状位失衡的发生。

1 青少年重度腰椎滑脱脊柱-骨盆矢状位特点

1.1 L5/S1 椎体形态改变

与成人腰椎滑脱不同, 青少年腰椎滑脱患者的脊柱和骨盆等骨骼系统仍处于发育过程中, 塑形性较好^[10]。随着腰椎滑脱的进展, L5 椎体相对于 S1 上终板逐渐向前移位, 导致重力线前移、终板接触面积减小, 进而影响应力的分布, 更多的应力集中于 S1 上终板前缘和 L5 下终板后缘; 当滑脱率超过 30% 时, 异常的应力会显著破坏生长板软骨发育, 往往影响 L5 椎体和骶骨形态的正常发育, 伴有 L5 椎体楔形变(椎体后缘/前缘 $<80\%$)以及骶骨拱顶样畸形(S1 上终板高度/长度 $>10\%$)^[11,12]。峡部裂滑脱较非峡部裂滑脱更容易造成椎体向前滑移, 因而局部应力分布明显

不均, 腰骶畸形程度更为严重^[11]。Pawar 等^[13]报道大多数重度腰椎滑脱患者(72.5%)表现为腰骶高度发育不良。杜长志等^[12]发现, 在发育不良性腰椎滑脱患者中, 76.9% 的患者表现为 S1 上终板拱顶样改变, 46.2% 的患者表现为 L5 椎体楔形变, 以上改变导致腰骶部严重不稳和局部后凸畸形(平均腰骶角为 75.9°), 进一步加重腰椎滑脱; 虽然脊柱和骨盆能够发生明显的代偿, 但是患者矢状位失衡的程度仍然很严重, 发育不良组矢状面轴向距离(sagittal vertical axis, SVA) ($46.5 \pm 42.3\text{mm}$) 显著大于正常对照组 ($-25.6 \pm 21.8\text{mm}$)。

1.2 腰椎滑脱进展与脊柱-骨盆矢状位平衡改变

既往研究表明, 青少年腰椎滑脱患者的腰骶部序列改变常伴随脊柱-骨盆矢状位参数的显著变化, 而脊柱-骨盆矢状位参数同样在腰椎滑脱的发展中产生重要影响^[3-8]。深入理解矢状位参数的变化, 对于评估腰椎滑脱的病理改变和代偿机制、指导手术方案以及预测治疗效果都具有重要意义^[8]。为此, Labelle 等^[13]结合国际脊柱畸形研究组(Spinal Deformity Study Group, SDSG)对 L5/S1 滑脱的研究, 提出了基于脊柱-骨盆矢状位平衡的分型系统。此分型根据滑脱程度、骨盆入射角(pelvic incidence, PI)和脊柱-骨盆矢状位序列, 将腰椎滑脱大致分为两大类, 即轻度滑脱(滑脱率 $<50\%$)与重度滑脱(滑脱率 $\geq 50\%$), 并下设 6 个亚型, 分别评估各自的矢状面形态学特点。

1.2.1 轻度滑脱 滑脱进展的危险因素主要与 PI 值有关; 根据 PI 值的大小, 可分为三种类型, 即 1 型(胡桃夹型, $PI < 45^\circ$)、2 型(正常型, $45^\circ \leq PI \leq 60^\circ$)和 3 型(剪切型, $PI > 60^\circ$)^[3,4]。PI 参与脊柱矢状面序列的调节, 被证实与腰椎前凸(lumbar lordosis, LL)存在明显的相关性, 即 PI 值越大, 腰椎为与之匹配而产生的前凸角度越大, 由此增加了腰椎峡部机械性应力^[14,15]。生物力学试验发现, 青少年的腰椎峡部发育未成熟, 其抗应力的能力薄弱, 容易造成峡部受损^[16]。而且, PI 值增大, 骶骨倾斜角(sacral slope, SS)也随之增加; 根据生物力学分析, 骶骨上终板越倾斜, 平行于椎间隙的剪切力越大, 再加上青少年腰椎滑脱患者周围骨性结构和软组织的保护、维持能力薄弱, 高 PI 容易导致滑

第一作者简介: 男(1992-), 博士研究生在读, 研究方向: 脊柱外科
电话: (0731)85295124 E-mail: 15335452075@163.com

通讯作者: 吕国华 E-mail: spinelv@163.com

脱进展^[14-16]。因此,当轻度滑脱合并剪切型的骶骨-骨盆形态时,滑脱加重的可能性增大,需要定期严密观察^[18]。

1.2.2 重度滑脱 其 PI 值普遍 $>60^\circ$,可能与骨盆形态的异常发育有关^[3]。机体启动不同的代偿机制来维持矢状面的平衡状态;其中,根据骨盆是否发生代偿性后旋,分为平衡型骨盆(4 型)和后倾型骨盆(5 型和 6 型)^[3,4]。平衡型骨盆的骶骨-骨盆矢状位参数未发生明显改变,表现为大的 SS、小的骨盆倾斜角(pelvic tilt,PT);但是,L5/S1 节段仍然存在较大的剪切力,滑脱进展的风险依旧很高^[4,8]。为了阻止 L5 椎体滑脱继续进展和重力线过度前移,骨盆发生代偿性后旋,骶骨由前倾变为垂直,表现为 SS 减少、PT 增加;然而,骨盆的后旋与腰椎未能同步调节,因而形成腰骶的局部后凸畸形^[12,13]。脊柱矢状面也因此发生一系列的代偿改变,如形成曲度过大、节段较长的前凸序列以及形态相对平坦、节段较短的后凸序列^[17]。如果局部后凸畸形继续加重,超过自身的代偿能力,矢状面失衡将会逐步发生;为此,根据矢状面失衡的程度,后倾型骨盆分为平衡型脊柱(5 型,C7 铅垂线位于股骨头后方)和失平衡型脊柱(6 型,C7 铅垂线位于股骨头前方)^[3,4]。长期的腰骶后凸和脊柱矢状面失衡,严重影响患者的生活质量,往往需要手术治疗^[1,2]。

2 不同手术方式对术后脊柱矢状面平衡改变的影响

2.1 原位融合术后的矢状面形态变化

原位融合手术虽然没有人为改变滑脱椎体的位置关系,但是由于椎间盘的弹性特质可诱导俯卧位时,尤其在麻醉条件下,滑脱椎体可以不借助器械矫正而发生一定程度的自发复位,但是复位效果远远不足^[18,19]。由于原位融合未能改善局部应力分布,因而仍然存在腰骶椎体异常发育的可能,影响骨盆正常形态^[11,20]。原位融合手术的融合区域位于张力侧,且椎间植骨受限、植骨床面积小于复位手术,进而影响了植骨愈合。Longo 等^[19]报道原位融合不融合率(17.8%)要高于复位手术(5.5%);术后可能出现不融合甚至假关节形成,存在滑脱继续进展的风险^[19]。而且,原位融合手术没有进行腰骶后凸的矫正,因而矢状面过度代偿状态未曾缓解;大多数文献报道,无论是脊柱参数还是骨盆参数,术后都没有发生明显的变化^[21-23]。虽然原位融合在术后健康相关的生活质量[如视觉模拟评分(visual analogue score,VAS)、腰痛 Oswestry 功能障碍指数(Oswestry disability index,ODI)、脊柱侧凸研究学会(Scoliosis Research Society,SRS)评分等],与复位手术并没有统计学差异^[23],但是,随着年龄的增加以及机体的退变,脊柱-骨盆代偿能力逐渐下降,不平衡的矢状面序列将显现出来,因而存在危害患者未来生活质量的潜在风险。Hoel 等^[24]报道了一批早年接受原位融合手术的患者,经过数十年后出现了严重的矢状面失衡和腰背疼痛症状,再次手术极具挑战性。此外,重度腰椎滑脱引起躯干异常的重力传导,常合并下肢的代偿,如臀部后翘和髌膝关节屈曲;原位融合未

能改善重力线的传递,长期异常的姿势将影响青少年患者下肢的正常发育^[1]。

2.2 复位手术后的矢状面形态变化

复位手术通常采取后路椎弓根螺钉固定联合椎间融合和后外侧融合的方式,这样既能够重建 L5/S1 的骨性连接、恢复腰骶之间的调节机制,又能起到防止滑脱进一步发展的作用^[25-27]。大多数复位手术效果良好,随着内固定器械和矫形技术水平的提高,重度腰椎滑脱甚至可以达到完全复位^[28-30]。周艺等^[29]回顾性分析了 13 例儿童 L5/S1 重度滑脱患者,滑脱程度由术前的 $(76.01\pm 15.65)\%$ 改善至术后的 $(17.57\pm 16.64)\%$,滑脱复位程度为 $(58.44\pm 16.31)\%$,其中 4 例Ⅲ度滑脱患者实现了完全复位;由于滑脱椎体的有效复位,局部应力得以重新分布,从而防止腰骶部畸形的继续发展。Moreau 等^[31]报道经过复位手术,重度腰椎滑脱患者的腰骶角平均矫正 25° ,由术前 $76^\circ\pm 17^\circ$ 改善至术后 $101^\circ\pm 8^\circ$,几乎能够恢复正常的 L5/S1 前凸序列。腰骶前凸的恢复能够降低融合处的张力,改善生物力学环境,提高植骨融合率^[32,33]。此外,有效复位能够重建脊柱-骨盆矢状面平衡序列,特别是在后倾型骨盆中^[34]。骨盆过度后旋代偿程度明显减轻,部分后倾型骨盆可重新转化为平衡型骨盆^[29]。Sebaaly 等^[35]提出,复位过程中,将 L5 入射角矫正到 61° 以内,术后骶骨-骨盆序列能够恢复正常,而平衡型骨盆的获得则被认为是有效复位的重要目的。随着 PT/SS 恢复到正常,脊柱矢状面平衡情况也将逐步得以改善^[5]。术后 LL 减小、胸椎后凸(thoracic kyphosis,TK)增加,脊柱生理性曲度得以恢复^[6,28,36]。Thomas 等^[28]回顾性分析了 15 例青少年重度腰椎滑脱患者,经过腰骶复位手术,TK 和 LL 分别由术前 $9.27^\circ\pm 9.04^\circ$ 和 $68.80^\circ\pm 17.85^\circ$ 恢复至末次随访 $25.67^\circ\pm 8.10^\circ$ 和 $45.93^\circ\pm 5.19^\circ$,TK/LL 明显改善。而且,复位手术也能够恢复患者脊柱矢状面的整体平衡情况^[29,30];周艺等^[29]报道 7 例矢状面失衡患者,SVA 由术前 $4.6\pm 8.1\text{cm}$ 减小至术后 $0.9\pm 4.8\text{cm}$,躯干前倾的问题得到良好解决,外观形象恢复理想。

2.3 局部截骨术在复位手术中的优势

对于高度发育不良的患者,复位前可先行 S1 拱顶平台切除及 L5 椎体下部截骨^[30]。Gutman 等^[11]认为腰骶椎畸形的产生是由于局部应力分布异常、导致腰骶部生长板应力性骨折,继而干扰生长板软骨的正常发育。病理学研究证明,骶骨拱顶样改变其实是一种骨软骨炎现象,生长板的成骨功能由此受到抑制^[37]。截骨术能够切除受损的生长板,避免异常的终板继续发育造成腰骶畸形进展,以降低局部不稳因素。另外,局部截骨术能够提供平整的接触面,去除骶骨顶部的阻挡,无需椎间撑开,即可获得相对充足的椎间高度,有利于滑脱椎体的良好复位^[38];同时术后腰骶部节段缩短,避免 L5 神经根过度牵拉而造成损伤^[25,39]。王正光等^[30]报道 10 例行后路 S1 截骨、L5~S1 短节段内固定复位术的高度发育不良性腰椎滑脱患者,滑脱率由 $(78\pm 17.5)\%$ 减至 $(4.5\pm 4.2)\%$,复位效果远好于既往报道的未截

骨复位手术。此外,截骨手术也能够重塑骶骨平台,恢复正常的解剖结构,降低局部剪切力、保护内置物,继而减少术后内固定失败的发生率^[25,30,39]。Min 等^[25]和王正光等^[30]共报道了 25 例实施截骨复位术的重度腰椎滑脱患者,长期随访均无内固定失败的发生;而 Moreau 等^[31]对 50 例重度腰椎滑脱患者仅行复位术、未行局部截骨,术后 7 例患者(14%)因内固定失败而需要再次手术。局部截骨术也能够充分矫正腰骶后凸畸形,减轻机体的过度代偿,进而更好地恢复矢状面平衡^[25,30,39]。王正光等^[30]报道术前 10 例后倾型骨盆不平衡型脊柱患者,经过截骨复位手术,术后全部转变为平衡型脊柱,前移的重力线恢复至骶骨后角与股骨头之间;脊柱-骨盆矢状面曲线也得到明显的改善,LL/TK 和 PT/SS 更接近正常青少年人群。

3 术后矢状面失衡的危险因素及其预防

手术治疗是解决重度腰椎滑脱的有效方式,能够不同程度地恢复患者脊柱-骨盆矢状位的平衡序列,并相应地改善术后的生活质量^[19,21-23,30-39]。但是,由于青少年腰椎滑脱存在特殊的病理机制和发育问题、以及不恰当的手术操作,术后容易出现假关节、内固定失败、持续性滑脱或畸形进展以及邻近节段退变等并发症,进一步导致术后矢状面失衡而需要再次进行手术干预^[9]。术后矢状面失衡常见的危险因素与相应的预防措施如下。

3.1 腰骶发育不良

文献报道,腰骶发育不良通常表现为 L5 椎体楔形变及骶骨拱顶样畸形,造成椎间隙高度相对不足,从而影响复位操作^[25,38,39];李子恢等^[38]报道腰骶发育不良组复位率 $[(77.7\pm 14.3)\%]$ 明显低于峡部裂组 $[(91.4\pm 13.2)\%]$ 。复位效果不足,术后矢状面矫形能力欠缺,局部不稳定性因素仍然存在,将不利于植骨愈合以及内固定的维持,因而术后容易再次发生矢状面失衡^[26]。对此,手术复位前可先行局部截骨,并结合有效的椎间支撑,不仅可以扩大椎间相对高度、有利于更好地复位,并且在改善腰骶后凸畸形、恢复腰椎前凸、减少术后机械性并发症等方面具有明显优势^[26,39]。此外,腰骶的异常发育会影响骨盆形态,其 PI 值普遍大于正常人群^[42];高 PI 值会引起腰椎过度前凸,若术后腰椎节段的曲度不合理,会导致生物学力线不能恢复,后方邻近节段的小关节应力被动增加而发生退变,并对内固定的稳定性产生影响^[40]。根据以往文献报道,LL 主要受骨盆形态的影响,因而可以利用骨盆参数预测理想的 LL 值,如 $LL=PI\pm 9^\circ$ 、 $LL=0.888\times PI-2.667$ 、 $LL=SS+20^\circ$;术者可参考以上公式设计相对合理的腰椎曲度,以恢复符合生物力学的生理序列^[14,15,41]。

3.2 植骨方式不当

植骨愈合效果不佳,可以导致术后假关节形成,并最终引起矫形失败和术后矢状面失衡的发生^[9,42]。一方面原因是植骨量不足、植骨材料未充分填充植骨区域,另一方面原因是植骨方式的不当^[43]。青少年重度腰椎滑脱患者常

伴 L5 横突发育不良,横突较小甚至缺如^[13],且椎板减压切除后植骨床面积不足,复位后如果单纯行横突间后外侧融合,融合率会降低^[25];此外,滑脱节段椎间盘大多存在退变,残留椎间盘组织可能是术后疼痛的一个潜在因素^[44,45]。因而,当实施复位手术时,后外侧融合应该联合前方的椎间融合,并取用足量的髂骨作为自体骨进行植骨,以实现牢固的环形融合^[30,39,46];同时,椎间融合器的置入,不仅有助于与植骨面贴合,而且对脊柱前中柱提供有效的支撑,增强生物力学稳定性,提高植骨融合率,进而减少内置物相关并发症的发生^[25,39,45]。Liu 等^[45]通过 Meta 分析发现,环形融合的融合率(94.4%)高于单纯后外侧融合(86.5%),术后内固定失败发生的风险和再次手术率也相应降低。

3.3 融合节段选择不当

融合节段选择不当是造成手术后内固定失败和邻近节段退变的重要原因之一,将会导致术后矢状面失衡的发生^[1,25]。由于小儿骨质脆弱,尤其对于发育不良性腰椎滑脱患者,大多数 L5 椎弓根发育欠缺,如果单纯进行 L5/S1 融合,可能导致 L5 椎弓根螺钉固定不够牢固、把持力不足,容易造成螺钉的松动或拔出^[13,47]。而且,部分患者 L4/5 小关节发育异常,若只进行 L5/S1 的固定,L4/5 潜在退变的概率也将增加^[25]。Ruf 等^[48]对 27 例高度发育不良腰椎滑脱患者采取单节段复位融合手术,术后 4 例患者(15%)发生了 L4/5 节段的退变,其中 2 例患者再行 L4/5 的融合手术。Min 等^[25]和 Mehdian 等^[49]也认为,对于重度腰椎滑脱患者,单纯 L5/S1 固定可能不够稳定,术后 L4 再滑脱的风险较高;L4~S1 节段固定能够分散内固定的矫形力,避免 L5/S1 单节段应力过度集中,同时也有利于滑脱的复位和矢状面序列的恢复。因而,术前应该结合 CT 及 MRI 等多种检查,准确评估受累的椎体及周围小关节的发育情况;当重度腰椎滑脱合并严重发育不良时,应推荐 L4~S1 内固定融合,以保护内置物、避免术后平衡序列的丢失。

3.4 其他

术前脊柱-骨盆矢状面严重失衡、重力线过度前移,会造成矫形困难,内固定的生物力学环境差,不利于稳定融合,术后容易出现内固定失败和假关节形成,加重矢状面失衡的程度^[19,50]。其次,术中过度损伤腰背部肌肉组织以及破坏神经支配而发生肌肉失神经改变,将引起肌肉功能退化,加之手术也可能对后方邻近的小关节过度损坏。以上因素将共同影响邻近节段的稳定性,并以此发生不同程度的退变,将不利于术后矫形序列的维持^[30,51]。另外,术后保护措施不足,如不能合理佩戴支具、过早进行腰部剧烈活动以及不良的姿势习惯等,也可能影响术后矢状面矫形的效果,需要引起患者的重视。

4 总结

青少年腰椎滑脱与脊柱-骨盆矢状面之间存在着密切的关系,滑脱可以干扰腰骶椎形态的发育以及腰骶部的生理曲度,进而影响脊柱-骨盆矢状面的平衡序列;同时,

骶骨-骨盆矢状面形态也在滑脱进展的过程中起重要作用。手术治疗是解决重度腰椎滑脱的有效方式,但是,不同术式对脊柱-骨盆矢状位平衡的改善是不一致的,复位手术较原位融合能够更好地恢复患者脊柱-骨盆矢状面的生理序列;若合并腰骶畸形,可先行局部截骨术,有利于良好的复位和矢状面失衡的纠正。由于青少年腰椎滑脱特殊的病理机制以及手术操作问题,术后可能出现矢状位失衡;为此,术者应该合理评估患者的脊柱-骨盆矢状位序列,同时综合考虑受累椎体及周围结构的发育情况,制定最佳的手术治疗方案,从多个角度出发最大可能地减少术后矢状位失衡的发生。

5 参考文献

1. Violas P, Lucas G. L5/S1 spondylolisthesis in children and adolescents[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2016, 102(1 Suppl): S141-S147.
2. Gagnet P, Kern K, Andrews K, et al. Spondylolysis and spondylolisthesis: a review of the literature[J]. J Orthop, 2018, 15(2): 404-407.
3. Labelle H, Mac-Thiong JM, Roussouly P. Spino-pelvic sagittal balance of spondylolisthesis: a review and classification[J]. Eur Spine J, 2011, 20(Suppl 5): 641-646.
4. Hresko MT, Labelle H, Roussouly P, et al. Classification of high-grade spondylolistheses based on pelvic version and spine balance: possible rationale for reduction[J]. Spine, 2007, 32(20): 2208-2213.
5. 吕国华. 青少年腰椎滑脱脊柱-骨盆参数评估的意义[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2015, 25(5): 385-386.
6. 吕国华, 王正光, 王冰, 等. 重度腰椎滑脱患者脊柱-骨盆参数改变与症状的关系[J]. 中华医学杂志, 2013, 93(15): 1133-1137.
7. Zhao J, Xiao Y, Zhai X, et al. Difference of sagittal alignment between adolescents with symptomatic lumbar isthmic spondylolisthesis and the general population[J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 10956.
8. 王华东, 侯树勋. 深入理解腰椎滑脱与骨盆矢状位参数的关系[J]. 中国骨与关节杂志, 2018, 7(6): 401-406.
9. Nielsen E, Andras LM, Siddiqui AA, et al. 40% reoperation rate in adolescents with spondylolisthesis [J]. Spine Deform, 2020, doi: 10.1007/s43390-020-00121-5.
10. 王智伟, 刘臻, 王渭君, 等. 正常汉族青少年骨盆矢状面形态的影像学研究[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2012, 22(10): 919-924.
11. Gutman G, Silvestre C, Roussouly P. Sacral doming progression in developmental spondylolisthesis: a demonstrative case report with two different evolutions[J]. Eur Spine J, 2014, 23(Suppl 2): 288-295.
12. 杜长志, 孙旭, 王斌, 等. 青少年 L5/S1 发育不良性滑脱患者的骶骨矢状面形态[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2016, 26(11): 991-998.
13. Pawar A, Labelle H, Mac-Thiong JM. The evaluation of lumbosacral dysplasia in young patients with lumbosacral spondylolisthesis: comparison with controls and relationship with the severity of slip [J]. Eur Spine J, 2012, 21 (11): 2122-2127.
14. Pan C, Wang G, Sun J. Correlation between the apex of lumbar lordosis and pelvic incidence in asymptomatic adult [J]. Eur Spine J, 2020, 29(3): 420-427.
15. Le Huec JC, Thompson W, Mohsinaly Y, et al. Sagittal balance of the spine[J]. Eur Spine J, 2019, 28(9): 1889-1905.
16. Kajiura K, Katoh S, Sairyo K, et al. Slippage mechanism of pediatric spondylolysis: biomechanical study using immature calf spines[J]. Spine, 2001, 26(20): 2208-2212.
17. Vialle R, Ilharreborde B, Dauzac C, et al. Is there a sagittal imbalance of the spine in isthmic spondylolisthesis? a correlation study[J]. Eur Spine J, 2007, 16(10): 1641-1649.
18. Bollini G, Jouve JL, Launay F, et al. High-grade child spondylolisthesis: a custom-made cannulated screw to treat the so-called double instability [J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2011, 97(2): 179-185.
19. Longo UG, Loppini M, Romeo G, et al. Evidence-based surgical management of spondylolisthesis: reduction or arthrodesis in situ[J]. J Bone Joint Surg Am, 2014, 96(1): 53-58.
20. Sairyo K, Katoh S, Ikata T, et al. Development of spondylolytic olisthesis in adolescents[J]. Spine J, 2001, 1(3): 171-175.
21. Joelson A, Danielson BI, Hedlund R, et al. Sagittal balance and Health-Related Quality of Life Three Decades after in situ arthrodesis for high-grade isthmic spondylolisthesis[J]. J Bone Joint Surg Am, 2018, 100(16): 1357-1365.
22. Inage K, Orita S, Yamauchi K, et al. Long-term outcomes of in situ fusion for treating dysplastic spondylolisthesis [J]. Asian Spine J, 2017, 11(2): 213-218.
23. Jiang G, Ye C, Luo J, et al. Which is the optimum surgical strategy for spondylolisthesis: reduction or fusion in situ? a Meta-analysis from 12 comparative studies [J]. Int J Surg, 2017, 42: 128-137.
24. Hoel RJ, Brenner RM, Polly DW Jr. The challenge of creating lordosis in high-grade dysplastic spondylolisthesis [J]. Neurosurg Clin N Am, 2018, 29(3): 375-387.
25. Min K, Liebscher T, Rothenfluh D. Sacral dome resection and single-stage posterior reduction in the treatment of high-grade high dysplastic spondylolisthesis in adolescents and young adults[J]. Eur Spine J, 2012, 21(Suppl 6): S785-S791.
26. Martikos K, Gregg T, Faldini C. High grade isthmic spondylolisthesis; can reduction always re-align the unbalanced pelvis[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2019, 20(1): 499.
27. Schar RT, Sutter M, Mannion AF, et al. Outcome of L5

- radiculopathy after reduction and instrumented transforaminal lumbar interbody fusion of high-grade L5-S1 isthmic spondylolisthesis and the role of intraoperative neurophysiological monitoring[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(3): 679-690.
28. Thomas D, Bachy M, Courvoisier A, et al. Progressive restoration of spinal sagittal balance after surgical correction of lumbosacral spondylolisthesis before skeletal maturity[J]. *J Neurosurg Spine*, 2015, 22(3): 294-300.
 29. 周艺, 郭昭庆, 齐强, 等. 儿童发育不良性重度腰椎滑脱手术复位后脊柱-骨盆矢状位序列改变[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2015, 25(5): 395-399.
 30. 王正光, 王冰, 吕国华. 经后路 S1 截骨短节段固定联合 360° 环形融合治疗青少年重度峡部发育不良性滑脱[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2016, 26(3): 211-217.
 31. Moreau S, Lonjon G, Guigui P, et al. Reduction and fusion in high-grade L5-S1 spondylolisthesis by a single posterior approach: results in 50 patients[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2016, 102(2): 233-237.
 32. Gandhoke GS, Kasliwal MK, Smith JS, et al. A multicenter evaluation of clinical and radiographic outcomes following highgrade spondylolisthesis reduction and fusion [J]. *Clin Spine Surg*, 2017, 30(4): E363-E369.
 33. Mac-Thiong JM, Hresko MT, Alzakri A, et al. Criteria for surgical reduction in high-grade lumbosacral spondylolisthesis based on quality of life measures[J]. *Eur Spine J*, 2019, 28(9): 2060-2069.
 34. Labelle H, Roussouly P, Chopin D, et al. Spino-pelvic alignment after surgical correction for developmental spondylolisthesis[J]. *Eur Spine J*, 2008, 17(9): 1170-1176.
 35. Sebaaly A, El Rachkidi R, Grobost P, et al. L5 incidence: an important parameter for spinopelvic balance evaluation in highgrade spondylolisthesis[J]. *Spine J*, 2018, 18(8): 1417-1423.
 36. Wang Z, Wang B, Yin B, et al. The relationship between spinopelvic parameters and clinical symptoms of severe isthmic spondylolisthesis: a prospective study of 64 patients [J]. *Eur Spine J*, 2013, 23(3): 560-568.
 37. Sakamaki T, Sairyo K, Katoh S, et al. The pathogenesis of slippage and deformity in the pediatric lumbar spine: a radiographic and histologic study using a new rat in vivo model[J]. *Spine*, 2003, 28(7): 645-650.
 38. 李子恢, 陈曦, 孙旭, 等. 青少年 L5/S1 滑脱后路内固定复位术后即刻复位效果及其影响因素 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2015, 25(5): 389-394.
 39. Ferrero E, Ilharreborde B, Mas V, et al. Radiological and functional outcomes of high-grade spondylolisthesis treated by intrasacral fixation, dome resection and circumferential fusion: a retrospective series of 20 consecutive cases with a minimum of 2 years follow-up[J]. *Eur Spine J*, 2018, 27(8): 1940-1948.
 40. Hashimoto K, Aizawa T, Kanno H, et al. Adjacent segment degeneration after fusion spinal surgery: a systematic review [J]. *Int Orthop*, 2019, 43(4): 987-993.
 41. Pesenti S, Lafage R, Stein D, et al. The amount of proximal lumbar lordosis is related to pelvic incidence[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2018, 476(8): 1603-1611.
 42. Seuk JW, Bae J, Shin SH, et al. Long-term minimum clinically important difference in Health-Related Quality of Life scores after instrumented lumbar interbody fusion for low-grade isthmic spondylolisthesis [J]. *World Neurosurg*, 2018, 117: e493-e499.
 43. Sleem A, Marzouk A. Transforaminal lumbar interbody fusion with local bone graft alone for single-level isthmic spondylolisthesis[J]. *Int J Spine Surg*, 2018, 12(1): 70-75.
 44. Roca J, Ubierna MT, Caceres E, et al. One-stage decompression and posterolateral and interbody fusion for severe spondylolisthesis: an analysis of 14 patients[J]. *Spine*, 1999, 24(7): 709-714.
 45. Liu XY, Wang YP, Qiu GX, et al. Meta-analysis of circumferential fusion versus posterolateral fusion in lumbar spondylolisthesis[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2014, 27(8): E282-293.
 46. D'Souza M, Macdonald NA, Gendreau JL, et al. Graft materials and biologics for spinal interbody fusion [J]. *Biomedicines*, 2019, 7(4): 75.
 47. Randall RM, Silverstein M, Goodwin R. Review of pediatric spondylolysis and spondylolisthesis [J]. *Sports Med Arthrosc Rev*, 2016, 24(4): 184-187.
 48. Ruf M, Koch H, Melcher RP, et al. Anatomic reduction and monosegmental fusion in high-grade developmental spondylolisthesis[J]. *Spine*, 2006, 31(3): 269-274.
 49. Mehdian SH, Arun R. A new three-stage spinal shortening procedure for reduction of severe adolescent isthmic spondylolisthesis[J]. *Spine*, 2011, 36(11): E705-E711.
 50. Ilharreborde B. Sagittal balance and idiopathic scoliosis: does final sagittal alignment influence outcomes, degeneration rate or failure rate[J]. *Eur Spine J*, 2018, 27(Suppl 1): 48-58.
 51. Kim JY, Ryu DS, Paik HK, et al. Paraspinal muscle, facet joint, and disc problems: risk factors for adjacent segment degeneration after lumbar fusion[J]. *Spine J*, 2016, 16(7): 867-875.

(收稿日期:2020-05-25 修回日期:2020-06-09)

(本文编辑 李伟霞)