

青少年特发性脊柱侧弯的发病机制及手术治疗研究进展

田晓娟¹综述, 贺娟²审校

(四川大学华西医院 1.小儿外科; 2.胆道外科 四川 成都 610041)

[摘要] 青少年特发性脊柱侧弯 (Adolescent Idiopathic Scoliosis, AIS) 已成为临床常见脊柱侧弯类型, 对青少年日常生活和身心健康产生严重影响。该疾病致病机制复杂, 与多种因素相关, 目前尚不明确是单一因素引起还是多种因素共同作用, 仍需进一步探索。临床治疗AIS以矫正脊柱畸形为主, 发展至今有多种术式, 可根据患儿个体情况选择符合手术指征的术式, 以获得更好的治疗效果。本文就近年来AIS可能的致病机制及治疗术式进行综述。

[关键词] 青少年; 特发性脊柱侧弯; 发病机制; 手术; 脊柱畸形; 研究进展

[中图分类号] R720.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1008-6455 (2026) 06-0194-04

Research Progress on Pathogenesis and Surgical Treatment of Adolescent Idiopathic Scoliosis

TIAN Xiaojuan¹, HE Juan²

(1.Department of Pediatric Surgery, 2.Division of Biliary Tract Surgery, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Adolescent idiopathic scoliosis (AIS) has become a common clinical type of scoliosis, which has a serious impact on the daily life and physical and mental health of adolescents. The pathogenesis of AIS is complex and related to many factors. At present, it is not clear whether the role mechanism is caused by a single factor or a combination of multiple factors, which still needs further exploration and research. The clinical treatment of AIS is mainly to correct spinal deformity. Up to now, there are many kinds of surgical methods that can be selected according to the individual conditions of children to obtain good therapeutic effects. This paper reviews the possible pathogenesis and treatment of AIS in recent years.

Key words: adolescent; idiopathic scoliosis; pathogenesis; surgery; spinal deformity; research progress

脊柱侧弯依据病理类型分为先天性、神经-肌源性、特发性三类^[1], 其中青少年特发性脊柱侧弯 (AIS) 是临床最常见的发病类型, 占脊柱侧弯的80%^[2]。AIS临床表现为脊柱出现冠状面横向弯曲、矢状面胸腰椎椎体前凸、后肋隆起、各椎骨在横断面出现旋转等复杂的脊柱三维畸形^[3]。该疾病发病早期症状不明显, 等到患儿出现明显高低肩、影响日常生活才易被认出, 此时疾病程度通常已达到中重度, 随着疾病进展可导致患儿胸廓异常^[4], 严重影响患儿身体发育及身心健康。提早进行干预, 不仅有助于纠正患儿脊柱畸形, 还可以改善其心理状况, 减少对其日常生活的影响。目前, AIS的发病机制尚无定论, 有研究表明, AIS发病与多种因素相关^[5]。AIS治疗的基本原则是纠正脊柱三维畸形、恢复脊柱正常解剖序列、重建和维持脊柱平衡, 尽可能多保留脊柱活动节段^[6]。随着临床医学发展, 根据患儿脊柱侧弯严重程度的不同, 发展出多种矫正畸形治疗AIS的方法, 例如中医正骨推拿、电刺激结合训练、手术治疗等。尽管治疗方法多样, 但手术治疗仍是治疗AIS的首选方式, 临床医学的发展也在不断改进AIS矫正术式。本文就AIS发病机制和手术治疗进展综述如下。

1 AIS发病机制

1.1 遗传因素: 白细胞介素-17受体C (IL-17RC) 与骨细

胞形成有关, 该受体位于细胞膜表面, 是一种跨膜转运蛋白, 可以调节细胞内的RANKL信号通路, 调节骨细胞生长^[7]。周松等^[8]研究发现, AIS组rs708567多态性位点GG基因型和G等位基因的分布频率显著高于对照组GG基因型 (90.17% vs. 85.55%) 和G等位基因 (95.1% vs. 92.8%) 的分布频率; 携带GG基因型青少年中AIS的发病率约为携带AG基因型青少年的1.5倍。该实验结果提示AIS与中国汉族人群中IL-17RC基因单核苷酸多态性密切相关。Jennings W等^[9]研究结果显示, LBX1基因在中枢神经系统和骨骼肌中高度表达, 该基因功能缺失与脊柱侧弯相关^[9], 可能导致机体感觉功能障碍。LI YL等^[10]通过对多个民族患儿基因序列研究发现, AIS发生与LBX1基因位点rs1190870相关, 并且不受性别影响。

1.2 激素与代谢

1.2.1 褪黑素: 褪黑素是一种具有多种生理调节功能的激素。研究发现^[11], 褪黑素能通过刺激骨保护蛋白表达减少骨细胞凋亡, 并抑制软骨细胞分化因子表达。刘合栋等^[12]的研究结果表明褪黑素能通过SIRT1/p66SHC通路降低氧化应激反应对成骨细胞造成的损伤并促进成骨。机体在缺乏褪黑素时, 可能导致褪黑素信号通路受阻、骨密度降低、骨骼生长异常^[13]从而诱发AIS。除此之外, 褪黑素也可能通

过与其他激素相互作用影响ALS发生。QIU S等^[14]研究结果显示,褪黑素能调节基质相互作用分子1/胞质钙升高/细胞外调节蛋白激酶通路,诱发成骨细胞凋亡。

1.2.2 雌激素:相关研究数据显示,AIS在女孩中的发病率高于男孩^[15]。因此,许多学者提出雌激素可能与AIS发病机制相关,研究主要围绕雌激素自身生理作用和雌激素受体(ER)两个方面进行。雌激素在生长发育过程中与其他激素共同影响骨结构形态和脊柱变形,通过影响骨细胞和破骨细胞活性产生作用。徐昊^[16]通过在体外培养小鼠成骨细胞MC3T3-E1,在培养液中添加雌激素进行实验,验证雌激素可能通过激活Smad5/Runx2信号轴的表达,降低氧化应激损伤MC3T3-E1细胞的ROS水平,提高细胞的分化能力。ER是细胞内在蛋白因子,与雌激素特异性结合后发挥生理作用。ER可以调节激素和骨组织间的应答反应,缺乏ER导致应答反应异常,影响骨骼正常生长^[17]。

1.3 骨髓间充质干细胞异常:骨髓间充质干细胞(MSCs)具有向成骨细胞、软骨细胞和脂肪细胞分化的潜能^[18]。研究显示AIS患者骨量减少,MSCs分化途径受阻,提示MSCs功能异常与AIS发病相关^[19]。李静等^[20]通过比较正常人与AIS患者MSCs中miR-181b的表达差异,验证miR-181b抑制MSCs分化,降低AIS患者骨密度。

1.4 生物力学因素:脊柱是冠状面垂直的组织结构,脊柱矢状面呈现颈椎前凸、胸椎后凸、腰骶椎前凸生理弯曲,正常情况下,脊柱呈现力学平衡状态,一旦力学状态失衡就会导致脊椎生长发育不对称,引起AIS。研究表明,棘突旁、椎旁肌肉力量不均,肌纤维、弹性纤维和减员组织含量存在差异,都是诱发AIS的危险因素^[21]。王开乐等^[22]在治疗轻度AIS中通过核心肌群训练改善脊柱平衡,短期治疗效果良好,也验证了力学平衡对AIS的重要性。

1.5 神经因素:神经系统异常与AIS相关报道较为少见。异常体感诱发电位(SEP)是神经生理功能障碍的一种,SEP可被用于检测腰椎管狭窄术后患者危险因素^[23]。高宇等^[24]用SEP作为植物状态(PVS)患者预后的判断标准,提示SEP可能与脊柱损伤有一定关系。而Cheng等^[25]通过对AIS患者组和健康对照组进行SEP检查发现,重度AIS患者躯体感觉通路障碍发生率为27.6%,指出躯体感觉通路障碍与AIS相关,也为神经系统异常与AIS关系提供证据。但两者关联还需要更多实验证明。

综上所述,AIS发病机制复杂且多样,涵盖多方面原因,想要明确AIS发病机制还需要进一步研究。

2 AIS治疗方法

AIS传统治疗方法以手术为主,主要目的是矫正畸形、固定椎体,治疗方法发展至今已经出现多种方案可供选择。手术治疗根据入路方式不同分为前路术式和后路术式,根据固定节段不同可分为全节段固定和选择性节段固定。并且随着电视胸腔镜出现,微创术式快速发展,也

逐渐被应用于AIS治疗中。无论何种术式都致力于保证AIS患者脊柱力学平衡,改善三维层面畸形,但手术对患者造成的创伤不可避免,每种术式的手术适应证也不同。因此,需要根据手术适应证选择对应术式。除此之外,患者的身体状况、发育情况、心肺功能也是决定术式的重要判断指标。

2.1 前路术式:前路术式发展历史悠久,常被用于治疗胸腰段或腰段脊柱侧弯,该术式能提高椎体融合的成功率,缩短融合节段长度,能够减少对神经组织的损伤,降低术后并发症发病率。前路术式适用于胸弯+腰弯、胸腰弯或柔性较好的患者,也可以结合后路术式,对严重僵直的脊柱侧凸患者进行前路松懈,更有利于达到理想矫正效果。前路术式根据入路途径可以分为胸主弯手术入路和腰主弯手术入路。胸主弯入路手术主要选择上端至下段椎为融合节段,切除融合节段的椎间盘突出组织和肋头,松解严重侧凸的椎体韧带,平行于椎板置入螺钉,安装内固定棒后进行调整,矫正矢状平面,最后完成固定,可在尾端切除椎间盘置入材料,预防远端交界性后凸(DJK)发生。腰主弯手术入路常沿第10肋做切口,在肋骨下方切断肌肉组织,保护重要脏器,打开腹膜,进行手术,手术操作与胸主弯手术一致。除了入路方式,融合阶段与术后患者生活质量也密切相关。减少融合节段,为患者保留更多可以自由活动的椎体能明显减少患者术后远期腰痛和椎间盘退变发生^[26]。前路术式较传统后路术式,减少了脊髓损伤风险,可以避免曲轴现象发生,但该术式操作难度较大,由于从前路进入需要打开胸腔,可能会引起肺功能损伤,并且该术式对脊椎矢状面畸形矫正效果有限,术后内植物断裂可能性较大。随着临床医学的发展,前路术式的内固定系统不断改善。Olgun ZD等^[27]改善了前路术式,降低内植物断裂植钉失败率,同时提升患者的心肺功能,使脊椎在三维立体面恢复正常。Hariharan AR等^[28]对行后路术式和前路术式患者进行长期随访,对比两种术式术后并发症,研究结果显示,后路术式并发症总发生率为9.7%,低于前路术式的10.3%,其中后路术式肺部并发症发生率为16%,明显低于前路术式肺部并发症发生率44%。而Gu H等^[29]的研究表明,前路术式较后路术式手术难度更高,耗时更长,后路术式具有更稳定的长期疗效,并发症发病率更低。因此,临床治疗AIS后路术式成为公认常用术式。

2.2 后路术式:后路固定术的出现,改变了前路术式在脊椎矢状面矫正畸形效果不佳的现状。后路固定术通过使用金属固定物对脊柱侧弯凸出部位施加压力达到矫正畸形的目的。后路脊柱融合术主要针对主胸椎侧凸、双侧胸凸及脊柱出现两个及以上数量结构性弯曲的AIS患者。该术式延伸融合节段至弯曲顶端椎体的上一椎体,可帮助患者稳定肩部平衡,且术后稳定性高,并发症发生率较低,矫正效果良好,已成为目前治疗AIS的标准术式。后路术式根据选择融合节段不同可分为全节段椎弓根固定术和选择性节段

固定术。

2.2.1 全节段椎弓根螺钉固定术：后路固定术中经常使用的固定系统可分为钩棒系统、钉-钩-棒系统和钉棒系统。临床研究显示，钩棒固定系统术后脱钩和断棒不良事件发生率较高^[30]，且术中出血量较多，手术时间也较长^[31]。有研究^[32]对比三种内固定系统临床治疗特发性脊柱侧凸的效果，钉棒内固定系统围术期指标明显优于其他两种内固定系统，并且钉棒系统在矫正脊柱冠状面和矢状面畸形方面效果好于其他两种内固定系统，断棒、假关节等不良事件发生率也明显低于其余两种系统。因此，钉棒内固定系统被广泛应用于治疗AIS的术式中。杨利斌等^[33]比较常规后路钉棒法和后路凹侧双棒全椎弓根螺钉法治疗AIS的临床效果，发现相较于常规后路钉棒法，凹侧双棒全椎弓根螺钉法矫正效果更好，手术时间、术中出血量和住院时间也明显低于常规组，研究者对患者进行为期1年的随访后发现凹侧双棒组的侧弯Cobb角和顶椎偏移量明显小于常规组，表明凹侧双棒全椎弓根螺钉法长期矫正效果良好。但全节段椎弓根螺钉固定术对患者机体造成的创伤较大，多节段弓根钉的置入导致脊髓损伤风险增加，且手术产生的费用较高，普通家庭可能难以承担。因此需要寻找新方法降低脊髓损伤风险的同时降低医疗费用。

2.2.2 选择性节段置钉固定术：经过几年的研究探索，有学者提出选择性节段置钉固定术，认为该术式能减少术中出血量，降低医疗费用的同时能取得和全节段椎弓根螺钉固定术相同的矫正效果。胡资兵等^[34]比较两种固定术治疗前后AIS患者前胸主弯Cobb角和胸腰弯/腰弯Cobb角，结果显示两种固定术矫正率比较差异无统计学意义，并且减少弓根钉的数量可以减轻手术造成的创伤，降低患者的负担。邹一鸣等^[35]比较不同置钉密度对Lenke I型AIS患者的矫正效果，根据AIS患者术后2周矫正率、术后2年矫正率结果比较发现，针对柔韧性较好的Lenke I型AIS患者，减少置钉数量对患者术后近期和中期矫正效果无显著影响。而朱欢叶等^[36]在研究中也发现，对于柔韧性较好的Lenke I型AIS患者，相较于近端固定至上端椎，延伸固定锥段至弯曲阶段前一椎体不仅能减少术中出血量和手术时间，近期矫正的治疗效果也无明显差异，围术期和随访期间均未发生神经损伤、内固定物断裂等不良事件。以上研究均说明选择性节段置钉在治疗后短期和中期均能获得满意的矫正效果。

2.3 微创手术：随着医学发展，患者对AIS治疗的要求提高，不仅要求治疗后有矫正效果，还希望能减轻手术带来的创伤，缩短患者治疗后住院时间，尽快恢复其活动能力。微创手术的出现使得患者的期望成为可能，利用电视辅助进行胸腔外科手术（VATS）被广泛应用于临床。VATS采用前路松解行内固定术，因此要求行该手术者为单胸弯患者，出现明显后弯弯曲、胸椎后凸异常的患者不宜采用此术式。但该术式术后可能会引发多种并发症，例如大出

血、肺损伤、渗出性胸膜炎等，对患者预后影响较大，并且由于微创手术要求尽可能减少对机体的创伤，所以针对AIS治疗采用的内固定术内植物操作难度大，对手术医生技巧要求较高，因此在治疗AIS方面未能广泛推广。

3 小结和展望

AIS由于其致病机理复杂，已成为除青少年肥胖、抑郁之外的第三类重要疾病。由于目前尚不清楚AIS致病机制是由基因、激素紊乱、代谢失调等原因单一导致还是相互作用引起，所以治疗AIS只能秉承矫正脊柱三维形态、保持脊柱平衡的治疗原则。手术治疗是临床治疗的标准方法，治疗术式的选择需要根据患者自身性别、年龄、身体情况和严重程度进行评估后慎重选择。随着现代医学技术的不断进步和科研成果的持续积累，AIS治疗趋势将更加注重精准化与微创化，期待在有效矫正畸形的同时最大程度保留脊柱活动度，进一步提升患者的生活质量。

[参考文献]

- [1]吴加弘,袁空军. 青少年脊柱侧弯诱发因素、筛查方法及干预手段的研究进展[J]. 中国慢性病预防与控制, 2025,33(3):236-240.
- [2]郭尚玉,王达辉. 结合人工智能诊断青少年特发性脊柱侧弯的新思路[J]. 临床小儿外科杂志, 2024,23(1):89-92.
- [3]王培鑫,赵军,王兴盛,等. 青少年特发性脊柱侧弯与椎旁肌肉失衡相关性的研究进展[J]. 临床小儿外科杂志, 2024,23(9):898-900.
- [4]杨林,付高勇. 青少年脊柱侧弯筛查研究新进展[J]. 现代诊断与治疗, 2024,35(22):3358-3360,3366.
- [5]唐烨,蒋林,蒋成明,等. 青少年特发性脊柱侧弯患者肩部失衡的美学评估特征及其评价标准探析[J]. 中国美容医学, 2024,33(10):97-100.
- [6]陈立艺,刘冲,莫森,等. 青少年特发性脊柱侧弯矫形术后矢状面平衡的研究进展[J]. 广西医科大学学报, 2019,36(12):2020-2024.
- [7]高军胜,张陆,刘志昂,等. IL-6基因多态性与青少年特发性脊柱侧凸易感性及支具矫形疗效的相关性研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2018,32(6):678-684.
- [8]周松,朱泽章,邱勇,等. 汉族人群白介素17受体C基因单核苷酸多态性与青少年特发性脊柱侧凸的相关性[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2013,23(2):161-165.
- [9]Jennings W, Hou M, Perterson D, et al. Paraspinal muscle ladybird homeobox 1 (LBX1) in adolescent idiopathic scoliosis: A cross-sectional study[J]. Spine J, 2019,19(12):1911-1916.
- [10]Li Y L, Gao S J, Xu H, et al. The association of rs1190870 near LBX1 with the susceptibility and severity of AIS, a meta-analysis[J]. Int J Surg, 2018,54(Pt A):193-200.
- [11]Liu H, Liu Z, Man C W, et al. The effect of exogenous melatonin on reducing scoliotic curvature and improving bone quality in melatonin-deficient C57BL/6J mice[J]. Sci Rep, 2019,9(1):6202.
- [12]刘合栋,任茂贤,李杨,等. 褪黑素对H₂O₂诱导的成骨细胞氧化应激损伤的保护作用[J]. 中国骨质疏松杂志, 2022,28(8):1093-1098.
- [13]黄成伟,潘翱. 褪黑素对去卵巢大鼠细胞因子水平和

- RANKL/OPG 比值及骨密度的影响[J]. 中国骨质疏松杂志, 2020,26(12):1797-1801.
- [14] Qiu S, Tao Z B, Tao L, et al. Melatonin induces mitochondrial apoptosis in osteoblasts by regulating the STIM1/cytosolic calcium elevation/ERK pathway[J]. Life Sci, 2020,248:117455.
- [15] 颜思琪, 钟卫权. 中西医康复治疗对青少年特发性脊柱侧弯疗效的研究进展[J]. 徐州医科大学学报, 2022,42(10):776-780.
- [16] 徐昊. 雌激素对小鼠成骨细胞MC3T3-E1氧化应激损伤的保护作用及机制探究[J]. 中国实验动物学报, 2020,28(6):824-830.
- [17] Lin X Z, Li L, Wu S L, et al. Activation of GPR30 promotes osteogenic differentiation of MC3T3-E1 cells: An implication in osteoporosis[J]. IUBMB life, 2019,71(11):1751-1759.
- [18] 何建伟, 晏春艳, 杨宗树, 等. TGF- β 1通过组蛋白修饰调控人骨髓间充质干细胞成骨分化的表观基因学研究[J]. 中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志, 2024,17(2):123-130.
- [19] 赵志蓉, 陈涛, 陈焕雄. Osteonectin促进骨髓来源间充质干细胞成骨分化的机制及其与青少年特发性脊柱侧凸的相关性研究[J]. 转化医学杂志, 2024,13(2):177-182.
- [20] 李静, 李娜, 庄乾宇, 等. miR-181b抑制骨髓间充质干细胞成骨分化可能参与青少年特发性脊柱侧弯骨密度降低[J]. 基础医学与临床, 2019,39(6):832-839.
- [21] Villemure I, Aubin C E, Dansereau J, et al. Biomechanical simulations of the spine deformation process in adolescent idiopathic scoliosis from different pathogenesis hypotheses[J]. Eur Spine J, 2020,29(1):83-90.
- [22] 王开乐, 周佳华, 李李佳, 等. 核心肌群训练纠正轻度青少年特发性脊柱侧弯[J]. 中国矫形外科杂志, 2024,32(17):1613-1617.
- [23] 汪红亮, 轩冲, 周捷, 等. 基于腰椎管狭窄术中体感诱发电位基线不足危险因素分析[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2024,39(5):477-480.
- [24] 高宇, 杨晶, 马琳琳, 等. 体感诱发电位、脑干听觉诱发电位和P300检测对持续植物状态患者预后判定的应用价值[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2019,26(5):412-415.
- [25] Cheng J C, Guo X, Shera H, et al. Correlation between curve severity, somatosensory evoked potentials, and magnetic resonance imaging in adolescent idiopathic scoliosis[J]. Spine, 2021,46(16):1679-1684.
- [26] Ruf M, Drumm J, Jeszszky D. Anterior instrumented fusion for adolescent idiopathic scoliosis[J]. Ann Transl Med, 2020,8(2):31.
- [27] Olgun Z D, Yazic M. Posterior instrumentation and fusion[J]. J Child Orthop, 2013,7(1):69-76.
- [28] Hariharan A R, Shah S A, Petfield J, et al. Complications following surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis: A 10-year prospective follow-up study[J]. Spine Deform, 2022,10(5):1097-1105.
- [29] Gu H, Li Y, Dai Y, et al. Anterior versus posterior approach in Lenke type 1 adolescent idiopathic scoliosis: A comparison of long-term follow-up outcomes[J]. Ann Transl Med, 2022,10(7):405.
- [30] Crawford A H, Lykissas M G, Gao X, et al. All-pedicle screw versus hybrid instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis surgery: A comparative radiographical study with a minimum 2-Year follow-up[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2013,38(14):1199-1208.
- [31] Jaquith B P, Chase A, Flinn P, et al. Screws versus hooks: Implant cost and deformity correction in adolescent idiopathic scoliosis[J]. J Child Orthop, 2012,6(2):137-143.
- [32] 郝定均, 贺宝荣, 宋宗让, 等. 3种内固定系统矫正特发性脊柱侧凸的疗效分析[J]. 陕西医学杂志, 2009,38(2):191-193.
- [33] 杨利斌, 赵恩典, 王善坤, 等. 两种固定方式矫正特发性脊柱侧弯的比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2021,29(7):660-663.
- [34] 胡资兵, 曾荣, 魏波, 等. 选择性与完全性置钉内固定术矫治AIS的比较[J]. 国际医药卫生导报, 2015,21(3):356-359.
- [35] 邹一鸣, 陈锴, 赵检, 等. 不同置钉密度选择性置钉法对Lenke I型青少年特发性脊柱侧凸后路矫形效果的影响[J]. 第二军医大学学报, 2019,40(6):614-618.
- [36] 朱欢叶, 李波, 简月奎, 等. Lenke I型青少年特发性脊柱侧弯矫形术中不同近端固定椎的疗效分析[J]. 中国修复重建外科杂志, 2019,33(1):41-48.

[收稿日期]2025-06-05

本文引用格式: 田晓娟, 贺娟. 青少年特发性脊柱侧弯的发病机制及手术治疗研究进展[J]. 中国美容医学, 2026,35(6):194-197.

· 告作者和读者 ·

有关作者署名的要求

作者姓名在文题下按序排列, 排序应在投稿时确定, 在编排过程中不应再作变动; 作者单位名称及邮政编码排于作者姓名下方。作者应是: ①参与选题和设计, 或参与资料的分析 and 解释者; ②起草或修改论文中关键性理论或其他主要内容者; ③能对编辑部的修改意见进行核修, 在学术界进行答辩, 并最终同意该文发表者。以上三条均需具备。仅参与收集资料者不能列为作者, 仅对科研小组进行一般管理者也不宜列为作者。对文章中的各主要结论, 均必须至少有一位作者负责, 集体署名的文章必须明确对该文负责的关键人物; 其他对该研究有贡献者应列入致谢部分。作者中如有外籍作者, 应征得本人同意, 并有证明信。