

3~10岁儿童颈椎椎弓根CT影像学参数测量研究

陈 虔¹, 阚广澳¹, 冯轶凡¹, 陈 杰¹, 朱泽章^{1,2*}

¹安徽医科大学附属滁州医院骨科, 安徽 滁州

²南京大学医学院附属鼓楼医院脊柱外科, 江苏 南京

收稿日期: 2026年4月26日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月27日

摘 要

背景: 颈椎椎弓根螺钉(cervical pedicle screw, CPS)技术因其优异的生物力学稳定性, 已广泛应用于颈椎管狭窄、颈椎侧后凸畸形等各种颈椎疾患中。然而, 儿童颈椎因骨性结构发育未成熟、解剖变异大、毗邻椎动脉及脊髓等重要结构, 置钉难度显著增加, 且目前缺乏系统的儿童颈椎椎弓根解剖学数据支持。本研究旨在通过高分辨率CT影像精确测量3~10岁儿童颈椎椎弓根的各项解剖学参数, 分析年龄、节段对解剖形态的影响规律, 为儿童颈椎椎弓根螺钉的尺寸选择、置钉点定位及进钉角度规划提供解剖学依据, 以降低置钉相关并发症风险。**方法:** 回顾性分析2018年1月至2024年9月于我院行颈椎CT检查的196例儿童患者的影像学资料, 其中男104例, 女92例, 平均年龄(6.2 ± 2.2)岁。根据年龄分为<5岁组(61例)和5~10岁组(135例)。所有患者均行颈椎螺旋CT薄层扫描(层厚 ≤ 1 mm)及三维重建, 利用Light Speed工作站测量C1~C7各节段椎弓根宽度(pedicle width, PW)、椎弓根轴线长(pedicle axis length, PAL)、椎弓根外倾角(transverse pedicle angle, tPA)及椎弓根头倾角(sagittal pedicle angle, sPA)。采用独立样本t检验比较两组间差异, P < 0.05为差异有统计学意义。**结果:** 儿童颈椎椎弓根参数呈现显著的年龄和节段相关性。(1) 椎弓根宽度: <5岁组各节段PW均显著小于5~10岁组(P < 0.05), 其中C1最宽(<5岁组: 7.8 ± 0.4 mm; 5~10岁组: 9.4 ± 0.7 mm), C3最窄(<5岁组: 4.7 ± 0.4 mm; 5~10岁组: 5.6 ± 0.6 mm), C3~C7呈逐级增宽趋势。(2) 椎弓根轴线长: PAL随节段递增(C1→C7), 且5~10岁组显著大于<5岁组(P < 0.05)。(3) 角度参数: tPA和sPA个体化变异较大(标准差较大), 但C2节段sPA显著大于其他节段, 且C1~C4 sPA为正值(头倾), C5~C7转为负值(尾倾), 与颈椎生理曲度相符。值得注意的是, <5岁组C3节段PW 60%以上测量值 < 5 mm, 提示该年龄段C3置钉存在较高皮质突破风险。**结论:** 3~10岁儿童颈椎椎弓根解剖参数随年龄增长和节段下移呈现规律性变化, 但个体差异显著, 尤其是C3节段狭窄、C2节段头倾角大等特征对置钉技术提出特殊要求。本研究建立的解剖学参数数据库可为儿童颈椎椎弓根螺钉的个体化选择(螺钉直径、长度、进钉点及角度)提供精准参考, 对降低椎动脉损伤、神经根损伤及内固定失效等并发症具有重要临床指导意义。建议5岁以下患儿行CPS固定前必须进行精细化CT评估, 必要时采用计算机辅助导航技术以确保置钉安全。

关键词

儿童, 颈椎, 椎弓根, 解剖学参数, CT测量, 椎弓根螺钉, 个体化置钉

*通讯作者。

Measurement of CT Imaging Parameters of Cervical Pedicles in Children Aged 3 to 10 Years

Qian Chen¹, Guang'ao Kan¹, Yifan Feng¹, Jie Chen¹, Zezhang Zhu^{1,2*}

¹Department of Orthopedics, Chuzhou Hospital Affiliated to Anhui Medical University, Chuzhou Anhui

²Department of Orthopedic Spine Surgery, Drum Tower Hospital Affiliated to Medical School of Nanjing University, Nanjing Jiangsu

Received: April 26, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 27, 2026

Abstract

Objective: Cervical pedicle screw (CPS) fixation, renowned for its excellent biomechanical stability, has been widely employed in various cervical pathologies including cervical spinal stenosis and cervical kyphoscoliotic deformities. However, the application of CPS in pediatric patients remains technically demanding due to immature osseous development, substantial anatomical variability, and the close proximity to critical neurovascular structures such as the vertebral artery and spinal cord. Furthermore, systematic anatomical data regarding pediatric cervical pedicles remain scarce. This study aims to precisely measure the anatomical parameters of cervical pedicles in children aged 3~10 years using high-resolution CT imaging, and to analyze the influence of age and vertebral level on morphological characteristics, thereby providing anatomical evidence for screw dimension selection, entry point localization, and trajectory planning in pediatric cervical pedicle screw fixation, ultimately reducing the risk of screw-related complications. **Methods:** We retrospectively analyzed cervical CT images of 196 children (104 males, 92 females; mean age 6.2 ± 2.2 years) who underwent thin-slice CT scanning (slice thickness ≤ 1 mm) with three-dimensional reconstruction at our center from January 2018 to September 2024. Patients were divided into two groups: <5 years ($n = 61$) and 5~10 years ($n = 135$). Using the Light Speed workstation, we measured pedicle width (PW), pedicle axis length (PAL), transverse pedicle angle (tPA), and sagittal pedicle angle (sPA) at C1~C7 levels. Independent sample t-tests were used for between-group comparisons, with $P < 0.05$ considered statistically significant. **Results:** Pediatric cervical pedicle parameters showed significant age- and level-dependent patterns. (1) Pedicle width: The <5 -year group demonstrated significantly smaller PW values than the 5~10-year group at all levels ($P < 0.05$). C1 exhibited the largest PW (<5 y: 7.8 ± 0.4 mm; 5~10 y: 9.4 ± 0.7 mm), while C3 was the narrowest (<5 y: 4.7 ± 0.4 mm; 5~10 y: 5.6 ± 0.6 mm), with gradual widening from C3 to C7. (2) Pedicle axis length: PAL increased progressively from C1 to C7 in both groups, with significantly greater values in the 5~10-year group ($P < 0.05$). (3) Angular parameters: Both tPA and sPA showed considerable interindividual variability. Notably, C2 demonstrated significantly greater sPA compared to other levels. Additionally, sPA values were positive at C1~C4 (cephalad inclination) but negative at C5~C7 (caudad inclination), consistent with cervical physiological curvature. Importantly, over 60% of C3 measurements in the <5 -year group were <5 mm, indicating high risk for cortical perforation during screw placement. **Conclusions:** Anatomical parameters of cervical pedicles in children aged 3~10 years demonstrate regular patterns with age and vertebral level, though individual variation remains substantial. The narrow C3 pedicle and large C2 sagittal angle pose specific technical challenges for screw insertion. The established anatomical database provides precise guidance for individualized CPS selection (screw diameter, length, entry point, and trajectory) and offers important clinical implications for reducing complications such as vertebral artery injury, nerve root damage, and fixation failure. We recommend meticulous preoperative CT evaluation PW for children under 5 years, with consideration of computer-assisted navigation techniques when necessary to ensure screw placement safety.

Keywords

Children, Cervical Spine, Pedicle, Anatomical Parameters, CT Measurement, Pedicle Screw, Individualized Fixation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

颈椎在脊柱所有节段中体积最小,但灵活度最大、活动频率也最高,一旦损伤会导致患者出现截瘫、四肢瘫等严重情况,甚至危及生命,即使患者得以保全性命,但在后续的诊疗过程中仍存在极高的风险,以及预后不良等相关问题。椎弓根作为脊柱三柱理论中的关键力学传导单元,承担着连接前柱与中后柱、维持整体结构稳定的核心功能。自 20 世纪 70 年代椎弓根螺钉技术首次应用于成人腰椎内固定以来,历经逾 50 年的临床验证与技术迭代,该技术体系已日趋成熟,而颈椎尝试椎弓根螺钉内固定也不过 20 余年[1]。颈椎椎弓根解剖形态纤细且变异显著,毗邻椎动脉、脊髓、神经根及食管等重要结构,空间关系错综复杂,使得置钉操作的技术难度与手术风险显著增高,术中稍有不慎即可导致灾难性并发症。因此,颈椎椎弓根螺钉内固定技术的临床应用始终处于高风险、高要求的特殊地位,对术者的解剖学认知、影像学判读能力及手术操作精度均提出了极高要求。

近 20 余年来,颈椎椎弓根螺钉(cervical pedicle screw, CPS)技术已广泛应用于颈椎管狭窄、颈椎侧后凸畸形等各种颈椎疾患中。既往文献报道[2],CPS 相比于常规的侧块螺钉其生物力学更好,椎弓根螺钉的远期松动率显著低于侧块螺钉,且抗拔出强度更优(1214 N vs 332 N)。因此,对于颈椎畸形等螺钉把持力要求更高的手术,精准置入的椎弓根螺钉不仅能提供更强的即刻力学稳定性,还能有效维持长期矫正效果,降低术后矫正丢失风险[3]。然而,颈椎椎弓根具有内聚角大、骨性结构纤细、毗邻椎动脉、神经根及脊髓等重要神经血管结构的特点,导致椎弓根螺钉的植入难度大、风险高。另外,儿童颈椎并非成人颈椎的简单等比例缩小,其独特的解剖学与生物力学特征构成了显著的临床挑战。儿童头部与躯干的相对比例较成人更大,加之韧带、软骨及小关节等结构具有更高的弹性模量,导致其颈椎活动的力学支点位置上移,整体活动度显著增加。且儿童颈椎小关节面倾角相对平缓,且肌肉、韧带及关节囊等稳定结构发育未臻成熟,对节段性移位的生物力学抵抗能力远低于成人,使得脊柱在屈伸活动中更易发生向前滑移[4]。此外,儿童颈椎椎体及椎弓根尺寸更为细小,骨性标志辨识度低,这显著增加了螺钉置入的技术难度与损伤风险[5]。尤为值得关注的是,传统透视引导下置钉需反复进行术中 X 线透视或摄片,并依赖克氏针多次预定位以确认轨迹,这一过程不仅延长手术时间,更使患儿暴露于累积性电离辐射危害之下,而儿童放射敏感性远高于成人,潜在致癌风险及甲状腺、性腺等敏感器官的辐射损伤不容忽视。因此,儿童颈椎内固定手术对精准性、安全性及辐射防护均提出了更为严苛的要求。

本研究通过全面精确测量儿童颈椎椎弓根的 CT 解剖学参数,目的是为儿童颈椎疾病行 CPS 内固定提供重要的解剖学依据,从而降低儿童颈椎椎弓根螺钉置钉不良的风险。且本研究采用高分辨率 CT 扫描结合多平面重建技术进行参数测量,这种方法具有无创、精确度高、可重复性好等优点。与既往的尸体解剖研究相比,CT 影像学测量能够更好地反映活体状态下的解剖结构,为临床手术规划提供更直接的参考。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料

回顾性分析 2018 年 1 月~2024 年 6 月南京鼓楼医院就诊的 3~10 岁儿童, 纳入标准: (1) 有颈椎 CT 薄层平扫及三维重建等影像学资料, 包含 C1~C7 椎体全部; (2) CT 显示颈椎无畸形、骨折及脱位等。排除标准: (1) 既往有颈椎外伤史的患者; (2) 有颈椎先天性异常的患者; (3) 有颈椎手术史的患者; (4) 有马凡综合征、神经纤维瘤病等可影响脊柱发育病史的患者。最终, 共 196 例患者纳入本研究(男 104 例、女 92 例), 平均(6.2 ± 2.2 岁)。按照 <5 岁、5~10 岁对患者进行分组, 其中 <5 岁(A 组) 61 人, 平均(4.18 ± 0.8 岁)、5~10 岁(B 组) 135 人, 平均(8.22 ± 1.68 岁)。

2.2. CT 参数测量

参考既往文献报道[6] [7]中颈椎相关结构的测量方法如下:

(一) 椎弓根宽度(PW)椎弓根在轴位平面上的最窄外皮质尺寸

测量方法: 在颈椎的轴位 CT 图像上, 测量椎弓根在横断面上的最窄宽度(图 1(A));

(二) 椎弓根轴线长(PAL)从椎板皮质通过椎弓根中心到椎体前壁的距离

测量方法: 在颈椎的轴位 CT 图像上, 从椎体前壁到椎板后缘沿椎弓根长轴的距离(图 1(A));

(三) 椎弓根外倾角(tPA)椎弓根轴线与椎体中线之间的夹角

测量方法: 在颈椎的轴位 CT 图像上, 测量椎弓根轴线与矢状面之间的夹角(图 1(B));

(四) 椎弓根头倾角(sPA)椎弓根轴线与水平面之间的夹角

测量方法: 在颈椎的矢状位 CT 图像上, 测量椎弓根轴线与水平面之间的夹角(图 1(C))。

2.3. 统计学处理

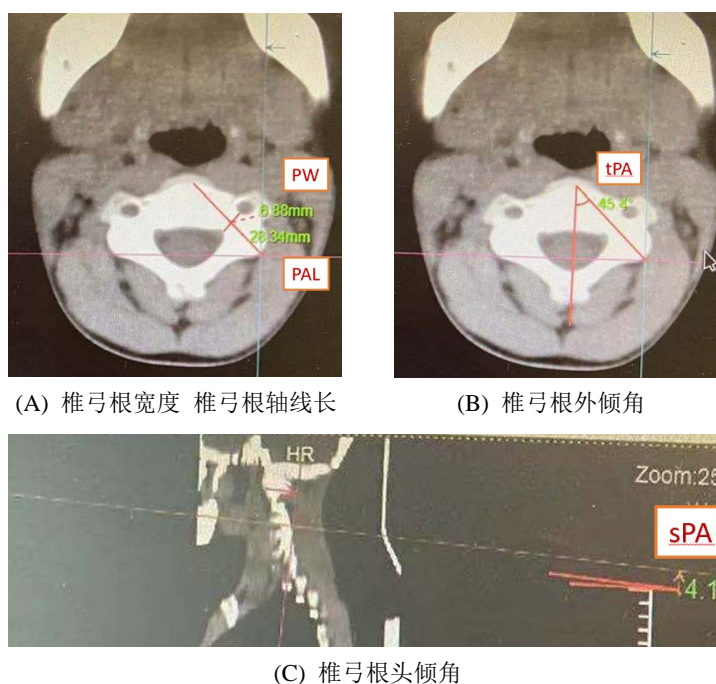


Figure 1. Measurement methods of pedicle width, pedicle axial length, pedicle lateral inclination angle, and pedicle cranial inclination angle

图 1. 椎弓根宽度、椎弓根轴线长、椎弓根外倾角、椎弓根头倾角测量方法

采用 SPSS26.0 (SPSS 公司, 美国)统计软件包对测得数据进行统计分析。计量资料结果用($\bar{x} \pm s$)表示。两组数值变量间的比较采用独立样本 t 检验, 当 $P < 0.05$ 时认为具有统计学差异, 最后由结果绘制相关图表。

3. 结果

3.1. 椎弓根宽度(PW)

从节段比较来看, C1 节段拥有颈椎中最宽的椎弓根宽度, 而 C3 节段在颈椎节段中最为狭窄, C3 之后的节段, 椎弓根宽度呈现逐级增宽的趋势(表 1)。从年龄比较来看, 各节段椎弓根宽度总体呈现随年龄逐渐增宽的趋势。按年龄分组 A 组与 B 组比较中, 亦可直观发现, 年龄与椎弓根宽度呈现明显正相关(表 3、图 2)。

3.2. 椎弓根轴线长(PAL)

从节段比较来看, 椎弓根轴线长总体随节段逐渐增大(表 2); 而从年龄比较来看, 尤其在以 A 组与 B 组比较中, 整体依旧表现出年龄与椎弓根轴线长的正相关(表 4、图 2)。

3.3. 椎弓根外倾角(tPA)和椎弓根头倾角(sPA)

3~10 岁儿童各年龄组间及各颈椎节段(C1~C7)的 tPA 和 sPA 值均未呈现显著的递增或递减趋势(表 4、表 5)。C2 节段的头倾角显著大于其他节段。此外, 椎弓根头倾角的值在 C1~C4 节段为正值, 而在 C5~C7 节段转为负值, 这恰与颈椎的生理曲度相符。

Table 1. Pedicle width (PW) distribution of each vertebral segment by age from 3 to 10 years old ($\bar{x} \pm s$, mm)

表 1. 3~10 岁各年龄各节段椎弓根宽度 PW 分布情况($\bar{x} \pm s$, mm)

	椎弓根宽度(PW)							
	3 y	4 y	5 y	6 y	7 y	8 y	9 y	10 y
C1	7.7 ± 0.3	8.0 ± 0.4	9.6 ± 0.2	9.6 ± 0.4	8.9 ± 0.1	9.1 ± 0.4	9.7 ± 1.2	9.4 ± 0.6
C2	6.3 ± 1.1	6.7 ± 1.1	7.7 ± 1.2	7.6 ± 0.9	7.1 ± 1.4	7.2 ± 2.0	7.3 ± 0.6	6.9 ± 0.1
C3	4.7 ± 0.2	4.7 ± 0.6	5.5 ± 0.3	5.3 ± 0.6	5.6 ± 0.3	5.7 ± 0.5	5.6 ± 1.0	5.8 ± 0.1
C4	5.1 ± 0.3	5.0 ± 0.2	5.5 ± 0.6	5.7 ± 0.4	5.6 ± 0.7	5.8 ± 0.6	5.8 ± 0.9	6.0 ± 0.5
C5	5.2 ± 0.1	5.7 ± 0.3	6.3 ± 0.8	6.0 ± 0.1	5.9 ± 0.5	6.0 ± 0.8	6.0 ± 1.0	6.4 ± 0.6
C6	5.3 ± 0.3	5.4 ± 0.9	5.7 ± 0.1	5.9 ± 0.3	6.0 ± 0.5	6.1 ± 0.8	6.3 ± 1.1	6.3 ± 1.4
C7	6.0 ± 0.2	5.9 ± 0.3	6.1 ± 0.3	6.3 ± 0.1	6.2 ± 0.7	6.4 ± 0.5	6.5 ± 0.3	6.8 ± 1.0

Table 2. Average values and standard deviations of Pedicle Axial Length (PAL) by age and spinal segment ($\bar{x} \pm s$, mm)

表 2. 各年龄各节段椎弓根轴线长 PAL 平均值及标准差($\bar{x} \pm s$, mm)

	椎弓根轴线长(PAL)							
	3 y	4 y	5 y	6 y	7 y	8 y	9 y	10 y
C1	25.7 ± 2.1	26.1 ± 1.7	26.9 ± 1.6	27.4 ± 1.9	27.3 ± 2.2	27.1 ± 0.6	27.4 ± 0.9	27.6 ± 0.9
C2	25.3 ± 1.1	26.4 ± 1.5	26.9 ± 1.1	26.8 ± 0.9	27.4 ± 1.6	28.1 ± 0.7	27.2 ± 2.0	27.2 ± 1.5
C3	26.4 ± 1.4	27.2 ± 1.7	27.6 ± 0.3	27.1 ± 0.6	27.3 ± 1.8	28.0 ± 1.5	27.4 ± 0.5	27.6 ± 1.4
C4	26.7 ± 0.4	27.5 ± 0.8	28.5 ± 0.9	27.6 ± 1.0	28.5 ± 1.8	28.3 ± 0.9	27.9 ± 1.5	28.9 ± 1.6

续表

C5	26.8 ± 1.4	28.0 ± 0.5	28.3 ± 0.9	28.2 ± 0.1	28.2 ± 1.6	28.5 ± 0.9	28.2 ± 0.3	28.5 ± 1.1
C6	27.3 ± 0.5	28.4 ± 1.3	28.6 ± 1.0	27.5 ± 0.2	30.0 ± 0.3	29.0 ± 0.6	28.1 ± 0.5	30.3 ± 0.2
C7	27.8 ± 0.8	28.4 ± 0.7	28.2 ± 0.2	28.4 ± 0.6	29.4 ± 0.9	29.2 ± 0.6	28.9 ± 2.2	30.1 ± 3.4

Table 3. Average values and standard deviations of PW and PAL in children aged <5 years and 5~10 years ($\bar{x} \pm s$, mm)**表 3.** <5 岁组和 5~10 岁组 PW 与 PAL 平均值及标准差($\bar{x} \pm s$, mm)

	PW		PAL	
	<5	5~10	<5	5~10
C1	7.8 ± 0.4*	9.4 ± 0.7*	25.9 ± 1.9	27.3 ± 1.8
C2	6.5 ± 1.2	7.4 ± 1.3	25.7 ± 1.2*	27.2 ± 1.7*
C3	4.7 ± 0.4*	5.6 ± 0.6*	26.7 ± 1.6	27.5 ± 2.1
C4	5.1 ± 0.3	5.7 ± 0.8	27.1 ± 0.6*	28.3 ± 1.8*
C5	5.5 ± 0.3	6.2 ± 0.8	27.3 ± 1.0*	28.3 ± 1.1*
C6	5.4 ± 0.5	6.1 ± 0.9	27.8 ± 0.9	28.9 ± 1.3
C7	6.0 ± 0.2*	6.5 ± 0.6*	28.1 ± 0.8*	29.1 ± 1.6*

注: *: <5 岁组、5~10 岁组两组相比较有统计学差异(P < 0.05)。

Table 4. The average value and standard deviation of the transverse pedicle angle (tPA) for each age group and each segment in children aged 3~10 years ($\bar{x} \pm s$, °)**表 4.** 3~10 岁各年龄各节段椎弓根外倾角 tPA 的平均值和标准差($\bar{x} \pm s$, °)

	椎弓根外倾角(tPA)							
	3 y	4 y	5 y	6 y	7 y	8 y	9 y	10 y
C1	34.5 ± 1.1	35.3 ± 3.8	36.3 ± 1.9	35.7 ± 0.9	34.3 ± 1.2	36.7 ± 0.5	36.0 ± 1.6	37.7 ± 0.5
C2	42.9 ± 2.4	43.5 ± 1.4	41.2 ± 1.6	41.5 ± 1.5	45.7 ± 3.1	43.7 ± 2.9	46.3 ± 5.0	48.0 ± 4.2
C3	41.5 ± 0.4	43.0 ± 1.0	45.4 ± 1.8	45.5 ± 1.2	44.7 ± 3.8	44.7 ± 2.9	47.5 ± 2.1	46.5 ± 2.6
C4	42.6 ± 2.2	45.5 ± 0.6	44.1 ± 3.9	45.0 ± 2.9	45.7 ± 0.5	44.5 ± 1.5	46.5 ± 3.4	44.7 ± 3.1
C5	41.9 ± 0.7	45.5 ± 1.3	45.5 ± 2.6	43.0 ± 3.8	46.3 ± 2.7	45.5 ± 1.5	47.0 ± 2.9	44.7 ± 3.1
C6	41.8 ± 0.9	42.1 ± 0.9	46.3 ± 3.4	44.5 ± 0.5	45.8 ± 0.8	44.0 ± 0.9	46.3 ± 4.0	45.7 ± 2.4
C7	42.5 ± 0.5	43.3 ± 2.4	42.3 ± 1.2	43.0 ± 1.0	42.0 ± 0.8	45.7 ± 2.6	44.5 ± 2.1	42.7 ± 4.6

Table 5. The mean and standard deviation of the sagittal pedicle angle (sPA) for each vertebral segment across different age groups in children aged 3~10 years ($\bar{x} \pm s$, °)**表 5.** 3~10 岁各年龄各节段椎弓根头倾角 sPA 的平均值和标准差($\bar{x} \pm s$, °)

	椎弓根头倾角(sPA)							
	3 y	4 y	5 y	6 y	7 y	8 y	9 y	10 y
C1	1.5 ± 0.4	1.5 ± 0.5	1.8 ± 0.8	1.3 ± 0.4	2.3 ± 0.8	2.0 ± 0.7	2.3 ± 0.4	1.8 ± 0.8
C2	14.8 ± 0.6	13.0 ± 1.9	11.5 ± 0.9	13.5 ± 3.3	14.8 ± 3.3	16.0 ± 1.9	15.3 ± 2.7	13.0 ± 2.5
C3	8.3 ± 1.3	10.5 ± 1.1	8.5 ± 1.1	10.0 ± 1.9	12.5 ± 3.3	10.3 ± 2.5	11.5 ± 1.5	10.8 ± 1.9
C4	4.5 ± 2.1	4.3 ± 1.9	3.5 ± 1.8	3.3 ± 0.4	4.0 ± 1.9	4.8 ± 1.1	3.0 ± 1.2	3.8 ± 1.9

续表

C5	-1.5 ± 1.1	-1.3 ± 0.4	-1.8 ± 1.1	-1.3 ± 0.8	-1.0 ± 0.7	-1.5 ± 1.1	-1.8 ± 1.1	-1.8 ± 1.0
C6	-2.8 ± 0.8	-3.8 ± 1.1	-3.3 ± 0.8	-3.3 ± 0.4	-3.1 ± 1.0	-3.5 ± 1.1	-3.8 ± 1.1	-4.0 ± 0.7
C7	-5.0 ± 0.9	-5.3 ± 0.4	-6.3 ± 0.8	-6.0 ± 0.7	-5.3 ± 0.8	-6.5 ± 1.1	-6.3 ± 1.8	-6.8 ± 1.3

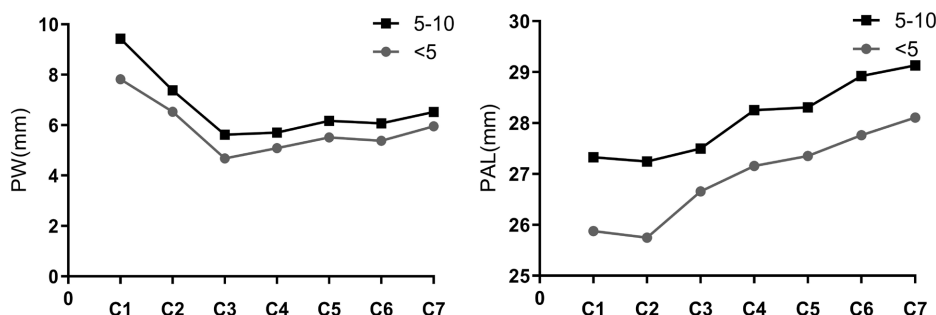


Figure 2. Line graphs showing the pedicle width (PW) and pedicle axis length (PAL) of each cervical vertebral segment in the <5 years group and the 5~10 years group

图 2. <5 岁组和 5~10 岁组颈椎各节段 PW、PAL 折线图

4. 讨论

4.1. 儿童不同年龄段颈椎椎弓根解剖学参数特点分析

形态学测量数据显示(图 1, 表 3), 5 岁以下组各颈椎节段的椎弓根宽度和椎弓根轴线长均显著小于 5~10 岁组($P < 0.05$)。尽管部分节段的组间差异未达统计学显著性($P > 0.05$), 但椎弓根宽度和椎弓根轴线长参数整体呈现与年龄增长正相关的趋势(表 1, 表 2)。这一发现提示临床医师在选择椎弓根螺钉尺寸和制定手术方案时, 必须充分考虑患者年龄因素的影响。Kanna 等[8]的研究为此提供了佐证, 其结果表明: 82.5% ($n = 310$)的测量节段椎弓根宽度超过 4 mm (可容纳 3 mm 直径螺钉), 且 5 岁时 75%的椎弓根已达到成人尺寸; 10 岁后椎弓根参数不再发生显著变化。

4.2. 解剖学参数评估儿童 CPS 置入节段优势

根据 Ludwig 等人[9]的解剖学研究, 颈椎椎弓根皮质穿破风险存在明确的解剖学分布特征: 外侧壁(毗邻椎动脉)穿破风险最高(发生率 42.3%), 其次分别为上外侧壁(22.1%)、上壁(毗邻上位神经根, 18.4%)、下壁(毗邻下位神经根, 12.7%)和内侧壁(4.5%)。这种解剖学特点决定了椎弓根螺钉(CPS)置入不良可能引发神经血管并发症(主要为椎动脉损伤, 文献报道发生率 1.2%~4.7%); 神经根损伤(表现为相应皮节/肌节功能障碍, 发生率 3.8%~7.2%); 脑脊液漏(0.8%~2.1%)、内固定失效(螺钉松动 3.5%~6.3%, 断裂 1.2%~2.8%)以及畸形丢失(2.4%~5.6%)等严重并发症。根据既往文献[10] [11], 椎弓根螺钉置入过程穿孔发生率为 1.1%~29.8%。颈椎椎弓根直径小、内侧成角陡、椎动脉(外侧皮质)方向的椎弓根皮质较薄, 这给置入带来了胸椎或腰椎所没有的挑战。儿童相较成人, 椎弓根更窄更薄, 椎弓根螺钉的置入难度相对更大, 神经血管等相关并发症的发生率也相对更高。因此, CPS 置入节段的选择就显得尤为重要。上颈椎中, C2 节段有其独特的置钉优势。根据本研究结果, C2 节段头倾角明显大于其他节段(详见表 5), 且上颈椎结构通常依赖于 C2 的牢固固定, 即使是年龄较小的儿童, 这块骨头也往往足够大, 可以锚定稳定的螺钉。Ludwig 等[12]有结论, C2 手术过程中螺钉尺寸选择和置钉相对安全, 且很少出现神经血管并发症。这与本研究测量 C2 的 PW、sPA 数值很大的结果相符。Savage 等[13]有类似结论, C2 椎板内螺钉的优势即损伤椎动脉的风险低和螺钉置入面积大。而从本研究结果对比所有节段各项数据中, 较危险的置钉节段当

属 C3 (详见表 1、表 3), 儿童 C3 节段拥有全颈椎节段中最窄的椎弓根宽度, 这给螺钉尺寸选择和置入带来极大的挑战。Kanna 等[8]与此研究结果吻合, 60%的 C3 椎弓根较小, 容易造成椎弓根破损和神经血管损伤, 除 C3 外, 其他水平椎弓根大小不影响 CPS 置入, Lee 等[14]也有类似结论。根据测量结果, 儿童人群中的 C3 椎弓根同样比其他级别的椎弓根要明显偏小, 在计划进行 C3 椎弓根螺钉固定之前, 应通过适当的术前 CT 评估, 做到格外小心谨慎。而从图 1 不难看出, 下颈椎 PW、PAL 呈现逐级增加的趋势, 虽 C3 节段不具备良好的置钉条件, 但其余节段已逐渐可以安全的置入 CPS。不光只 C3 节段, 考虑到儿童出现相关并发症带来的严重后果, 儿童颈椎更薄更窄的椎弓根以及 tPA、sPA 较大标准差而导致的个体化差异, 置钉前都应根据 CT 影像学、相关辅助技术, 充分了解患者相关解剖学参数, 选择优势置钉节段, 保证置钉过程的准确性, 有效降低由于置钉不当导致的并发症。

4.3. 从不同置钉方式穿孔率分析解剖学参数对置钉准确性的影响

现今, 较为常见的置钉方式主要是两类, 一是徒手置钉, 二是辅助置钉。徒手置钉是术者凭经验主观选择进钉点和进钉角度, 常见的置钉方法为 Abumi 法[1]、Jeanneret 法[15]、miller 法[16]等; 而辅助置钉是由影像、机器人引导等进行置钉操作(辅助置钉本质正是以患者椎弓根的客观解剖学参数为依据确定螺钉尺寸、进钉点和进钉角度)。Grag B 等[17]对 8 名儿童患者进行了徒手置钉操作(下颈椎), 术后评估准确率为 83.78% (31/37)。Kovanda 等[18]通过基于 CT 的术中三维立体定向图像导航为 7 名 10 岁及以下患者置入共 14 枚椎弓根螺钉, 其中 5 枚 C2 椎弓根螺钉全部按预期轨迹嵌入骨皮质内, 未发生直接并发症。Ishikawa 等[19]在 O 臂机导航下精准置钉, 仅有着 8.3%的 CPS 轻微穿孔、2.8%的严重穿孔。Hu 等[20]在机器人导航下总置钉 960 枚, 置入准确率达 98.9% (949/960)。由此可见, 以患者椎弓根客观解剖学参数为依据的辅助置钉技术相较术者主观个人经验的徒手置钉拥有更高的准确性; 同时在解剖学参数允许的情况下, 辅助置钉能在同样的患者椎弓根下置入尽可能更大的螺钉, 可提供更好的机械稳定性。而当某些患者因外伤急诊入院急需手术时, 导航辅助技术往往并不能及时处理, 这时, 还是需要 CT 下, 术者对解剖学参数进行测量, 指导手术置钉过程。因此测量儿童颈椎椎弓根解剖学参数在颈椎椎弓根螺钉置入过程中拥有重要的指导意义。

4.4. CPS 置钉技术的发展与展望

颈椎后路内固定技术早年为钢丝、钢板、luque 环和棒等[17] [21], 但因其固定强度不够、适用性差等缺点已逐渐被淘汰。到如今, 钉板和钉棒固定技术因其独特的生物力学稳定性和更广泛的适用性, 已成为绝大多数情况使用的内固定技术。螺钉置入从开始的依赖术者经验的徒手置钉, 逐渐发展为实时影像引导的计算机辅助导航, 再到可实现术前规划、术中精准定位的机器人辅助置钉。本研究测量的解剖学参数(PW、PAL、tPA、sPA)为后两个阶段提供了关键的数据基础。颈椎螺钉的选择, 也因辅助导航技术的发展, 由侧向螺钉转向了椎弓根螺钉。Johnston 等[22]的结果表明, 椎弓根螺钉相较侧向螺钉松动率很小, 稳定性更高, 颈椎椎弓根螺钉的拉出强度明显更高(1214 N VS 332 N), 40%的失败是由于椎弓根断裂而非螺钉拉出。C3 节段虽拥有颈椎节段中最狭窄的椎弓根宽度, 但选用 3.5 mm CPS 基本均能获得良好的固定效果及安全性[23]。而一直困扰颈椎椎弓根螺钉发展的置入不当导致并发症的问题, 也因辅助导航技术的应用而逐渐减少。以上原因致使椎弓根螺钉逐渐成为颈椎相关疾病最有效的内固定置钉手段。由于儿童颈椎相较于成人的特殊性, 在针对儿童颈椎内固定计算机导航、机器人辅助置钉以及基于年龄相关儿童颈椎参数预测模型的开发中, 本研究相关数据能够提供一定指导和参考。

4.5. 本研究的局限性

- ① 由于技术限制, CT 图像的本身缺陷, 测得数据较实际椎弓根测得数据可能存在误差, 该误差难

以通过多次测量的方式避免；② 儿童椎弓根解剖学参数的相关影响因素除年龄外，还应考虑营养状况和身高的影响，本研究并未讨论该方面的影响。③ 缺乏多中心数据支持。

5. 结论

综上所述，本研究的发现对于儿童颈椎外科手术具有重要的指导意义。首先，在选择内固定方式时，应充分考虑患儿年龄和椎弓根发育情况。对于 5 岁以下的患儿，由于椎弓根尺寸相对较小，可能需要选择更为保守的治疗方案或采用其他固定技术。儿童颈椎 C2 椎弓根宽度及头倾角的优势，置钉时不易出现穿破椎弓根的情况。C3 节段椎弓根宽度最小，置钉需格外谨慎。椎弓根轴线长随年龄和节段增加总体呈增大趋势。此研究结果对儿童颈椎疾病椎弓根螺钉的尺寸选择，置钉角度的个体化选择有指导作用，是减少颈椎椎弓根螺钉置入不当所致相关并发症的重要依据和保障。

声 明

本研究获得南京鼓楼医院伦理委员会批准(审批号：2021-398-01)。

参考文献

- [1] Abumi, K., Itoh, H., Taneichi, H. and Kaneda, K. (1994) Transpedicular Screw Fixation for Traumatic Lesions of the Middle and Lower Cervical Spine: Description of the Techniques and Preliminary Report. *Journal of Spinal Disorders*, **7**, 19-28. <https://doi.org/10.1097/00002517-199407010-00003>
- [2] Venkata Ramakrishna, T., Kuniyoshi, A. and Manabu, I. (2018) A Review of the Historical Evolution, Biomechanical Advantage, Clinical Applications, and Safe Insertion Techniques of Cervical Pedicle Screw Fixation. *Spine Surgery and Related Research*, **3**, 126-135.
- [3] Verma, S.K., Singh, P.K., Kumar, A., Sawarkar, D., Laythalling, R.K., Chandra, P.S., et al. (2023) Correction of Pediatric Cervical Kyphosis with Standalone Posterior Approach—A Single-Center Experience of Seven Cases. *Child's Nervous System*, **39**, 239-247. <https://doi.org/10.1007/s00381-022-05697-z>
- [4] Francis, M.F. and Robert, L. (1989) The Pediatric Cervical Spine: Developmental Anatomy and Clinical Aspects. *The Journal of Emergency Medicine*, **7**, 133-142.
- [5] Pratt, H., Davies, E. and King, L. (2007) Traumatic Injuries of the c1/c2 Complex: Computed Tomographic Imaging Appearances. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, **37**, 26-38.
- [6] Faghih-Jouibari, M., Moazzeni, K., Amini-Navai, A., et al. (2016) Anatomical Considerations for Insertion of Pedicular Screw in Cervicothoracic Junction. *Iranian Journal of Neurology*, **15**, 228-231.
- [7] Kumar, S., Saini, N.K., Singh, D., Chadha, M. and Mehrotra, G. (2021) Computed Tomographic Analysis of Cervical Spine Pedicles in the Adult Indian Population. *Surgical Neurology International*, **12**, 68. https://doi.org/10.25259/sni_926_2020
- [8] Kanna, P.R., Shetty, A.P. and Rajasekaran, S. (2011) Anatomical Feasibility of Pediatric Cervical Pedicle Screw Insertion by Computed Tomographic Morphometric Evaluation of 376 Pediatric Cervical Pedicles. *Spine*, **36**, 1297-1304. <https://doi.org/10.1097/brs.0b013e3181fb3c17>
- [9] Ludwig, S.C., Kramer, D.L., Balderston, R.A., Vaccaro, A.R., Foley, K.F. and Albert, T.J. (2000) Placement of Pedicle Screws in the Human Cadaveric Cervical Spine: Comparative Accuracy of Three Techniques. *Spine*, **25**, 1655-1667. <https://doi.org/10.1097/00007632-200007010-00009>
- [10] Kast, E., Mohr, K., Richter, H.P. and Börm, W. (2006) Complications of Transpedicular Screw Fixation in the Cervical Spine. *European Spine Journal*, **15**, 327-334. <https://doi.org/10.1007/s00586-004-0861-7>
- [11] Neo, M., Sakamoto, T., Fujibayashi, S. and Nakamura, T. (2005) The Clinical Risk of Vertebral Artery Injury from Cervical Pedicle Screws Inserted in Degenerative Vertebrae. *Spine*, **30**, 2800-2805. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000192297.07709.5d>
- [12] Ludwig, S.C., Kramer, D.L., Vaccaro, A.R. and Albert, T.J. (1999) Transpedicle Screw Fixation of the Cervical Spine. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **359**, 77-88. <https://doi.org/10.1097/00003086-199902000-00009>
- [13] Savage, J.G., Fulkerson, D.H., Sen, A.N., Thomas, J.G. and Jea, A. (2014) Fixation with C-2 Laminar Screws in Occipitocervical or C1-2 Constructs in Children 5 Years of Age or Younger: A Series of 18 Patients. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, **14**, 87-93. <https://doi.org/10.3171/2014.3.peds13626>
- [14] Lee, H., Hong, J.T., Kim, I.S., Kim, M.S., Sung, J.H. and Lee, S.W. (2014) Anatomic Feasibility of Posterior Cervical

- Pedicle Screw Placement in Children: Computerized Tomographic Analysis of Children under 10 Years Old. *Journal of Korean Neurosurgical Society*, **56**, Article 475. <https://doi.org/10.3340/jkns.2014.56.6.475>
- [15] Jeanneret, B., Gebhard, J.S. and Magerl, F. (1994) Transpedicular Screw Fixation of Articular Mass Fracture-Separation: Results of an Anatomical Study and Operative Technique. *Journal of Spinal Disorders*, **7**, 222-229. <https://doi.org/10.1097/00002517-199407030-00004>
- [16] Miller, R.M., Ebraheim, N.A., Xu, R. and Yeasting, R.A. (1996) Anatomic Consideration of Transpedicular Screw Placement in the Cervical Spine: An Analysis of Two Approaches. *Spine*, **21**, 2317-2322. <https://doi.org/10.1097/00007632-199610150-00003>
- [17] Garg, B. and Mehta, N. (2020) Safety and Feasibility of Cervical Pedicle Screw Insertion in Pediatric Subaxial Cervical Spine without Navigation: A Retrospective Cohort Study. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, **41**, 119-126. <https://doi.org/10.1097/bpo.0000000000001694>
- [18] Kovanda, T.J., Ansari, S.F., Qaiser, R. and Fulkerson, D.H. (2015) Feasibility of CT-Based Intraoperative 3D Stereotactic Image-Guided Navigation in the Upper Cervical Spine of Children 10 Years of Age or Younger: Initial Experience. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, **16**, 590-598. <https://doi.org/10.3171/2015.2.peds14556>
- [19] Ishikawa, Y., Kanemura, T., Yoshida, G., Matsumoto, A., Ito, Z., Tauchi, R., *et al.* (2011) Intraoperative, Full-Rotation, Three-Dimensional Image (O-Arm)-Based Navigation System for Cervical Pedicle Screw Insertion. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **15**, 472-478. <https://doi.org/10.3171/2011.6.spine10809>
- [20] Hu, X., Ohnmeiss, D.D. and Lieberman, I.H. (2012) Robotic-Assisted Pedicle Screw Placement: Lessons Learned from the First 102 Patients. *European Spine Journal*, **22**, 661-666. <https://doi.org/10.1007/s00586-012-2499-1>
- [21] 刘景堂, 刘兴炎, 葛宝丰, 等. 两种长度的颈椎椎弓根螺钉与侧块螺钉拔出试验比较[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2005, 15(3): 177-179.
- [22] Johnston, T.L., Karaikovic, E.E., Lautenschlager, E.P. and Marcu, D. (2006) Cervical Pedicle Screws Vs. Lateral Mass Screws: Uniplanar Fatigue Analysis and Residual Pullout Strengths. *The Spine Journal*, **6**, 667-672. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2006.03.019>
- [23] 朱奕同, 李松, 马彦宇, 等. O-arm 导航辅助下儿童颈椎椎弓根螺钉置钉的精确性及安全性评估[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2025, 35(8): 785-792+799.