

# 椎体CT值在脊柱外科中的应用研究进展

万江<sup>1</sup>, 刘达<sup>2</sup>, 张映波<sup>1</sup>, 周科<sup>2</sup>

<sup>1</sup>川北医学院附属医院骨科, 四川南充 637000; <sup>2</sup>西部战区总医院骨科, 四川成都 610036

[中图分类号] R681.5 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.2025.0205

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 万江, 刘达, 张映波, 等. 椎体CT值在脊柱外科中的应用研究进展[J]. 解放军医学杂志, 2025, 50(7): 911-916.

[收稿日期] 2024-10-16 [录用日期] 2024-12-10 [上线日期] 2025-02-05

**[摘要]** 随着我国人口老龄化的加剧, 骨质疏松症(OP)患病率急剧攀升。目前OP的诊断主要依赖于骨密度(BMD), 故BMD的精确测量在脊柱外科疾病的诊治中至关重要。近年来, CT检查以其独特的优势在临床诊疗中受到广泛关注。椎体CT值不仅可提高OP的诊断率, 还可有效预测相邻椎体骨折、融合器沉降、椎弓根螺钉松动等术后并发症的发生。本文总结椎体CT值在脊柱外科领域的应用研究进展, 分析其指导脊柱手术的可行性, 以及与脊柱术后并发症的相关性, 同时就CT结合人工智能(AI)辅助疾病诊疗的进展展开论述, 旨在更好地促进椎体CT值的相关临床应用。

**[关键词]** 骨质疏松; 椎体CT值; 骨密度; 脊柱术后并发症; 人工智能

## Research progress of the CT value of the vertebral body in spinal surgery

Wan Jiang<sup>1</sup>, Liu Da<sup>2</sup>, Zhang Ying-Bo<sup>1</sup>, Zhou Ke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Orthopedics, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong, Sichuan 637000, China

<sup>2</sup>Department of Orthopedics, Western Theater Command General Hospital, Chengdu, Sichuan 610036, China

\*Corresponding author, E-mail: liuda313@163.com

This work was supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (2022NSFSC0664), the Military Health Care Project (21BJZ40), and the Scientific Research Project of Traditional Chinese Medicine of Sichuan Province (2024MSS07)

**[Abstract]** With the aggravation of population aging in our country, the prevalence of osteoporosis (OP) has surged dramatically. Currently, the diagnosis of OP primarily relies on bone mineral density (BMD), and the precise measurement of BMD is crucial in the diagnosis and treatment of spinal surgical diseases. In recent years, computed tomography (CT) has gained widespread attention in clinical diagnosis and treatment due to its unique advantages. Vertebral CT values not only enhance the diagnostic rate of OP but also effectively predict the occurrence of postoperative complications such as adjacent vertebral fractures, fusion device subsidence, and pedicle screw loosening. This article summarizes the research progress of vertebral CT value in the field of spine surgery, and discusses its feasibility in guiding spinal surgery and its correlation with postoperative complications of spine. Additionally, it elaborates on the progress of combining CT with artificial intelligence (AI) to assist in disease diagnosis and treatment, aiming to better promote the clinical application of vertebral CT values.

**[Key words]** osteoporosis; CT value, vertebral body; bone density; complications spinal surgery; artificial intelligence

计算机断层扫描(computed tomography, CT)可通过自主选取椎体内的感兴趣区(region of interest, ROI)对皮质骨和松质骨进行测量, 提供椎体整体和局部的骨密度(bone mineral density, BMD)数据。BMD的精确测量在脊柱外科疾病的诊治中至关重要, 大量研究表明, 多种脊柱疾病的发生与BMD降

低密切相关<sup>[1-2]</sup>。目前测量BMD的金标准是双能X射线吸收法(dual-energy X-ray absorptiometry, DXA), 但仅依赖DXA进行BMD评估和骨质疏松筛查存在一定局限性。DXA采用的是平面投影技术, 在腰椎退行性变患者中易受到骨赘形成、脊柱退行性变等因素的影响, 导致BMD测量值假性增高, 从而掩盖骨量

[基金项目] 四川省自然科学基金(2022NSFSC0664); 军队保健专项项目(21BJZ40); 四川省中医药科研项目(2024MSS07)

[作者简介] 万江, 硕士研究生, 主要从事脊柱疾病方面的研究

[通信作者] 刘达, E-mail: liuda313@163.com

的真实变化<sup>[3]</sup>。定量CT(quantitative computed tomography, QCT)因受设备和软件以及较长的学习曲线的限制而无法广泛普及,故临床应用较少。而胸腹部CT及腰椎CT平扫作为常规术前检查,临床使用率高,且不会增加额外的费用和辐射,通过测量椎体CT值,能够准确反映椎体松质骨含量,可为临床提供一个量化、客观的诊断工具。

CT值代表X线通过组织并被吸收后产生的衰减,单位为亨氏单位(Hounsfield unit, HU)。根据其计算公式,CT值仅与人体组织的衰减系数呈正相关,而衰减系数由受测组织的物理特性决定<sup>[4]</sup>。在临床应用中,椎体CT值的测量通常在常规窗(窗宽1500 HU,窗高500 HU)下进行,能准确反映椎体松质骨内骨小梁的密度和骨质含量。国内外研究表明,骨质疏松患者单位骨体积内骨组织含量减少,骨小梁稀疏,并与腰椎椎体松质骨CT值的降低明显相关<sup>[5-6]</sup>。此外,椎体CT平扫具有排除脊椎退变结构、腹部血管钙化灶等干扰的能力,诊断骨质疏松相关疾病的特异度和敏感度较高,近几年已被广泛应用于脊柱术后相关并发症和骨质疏松相关的临床研究,其可靠性和准确性得到了广泛认可<sup>[7]</sup>。本文综述了椎体CT值对脊柱疾病的诊疗和预测价值,旨在更好地推广椎体CT值在临床实践中的应用。

## 1 CT值在脊柱疾病风险评估中的应用

**1.1 评估骨质疏松性骨折的风险** 骨质疏松症(osteoporosis, OP)作为一种常见的全身性骨代谢疾病,以BMD、骨强度降低和骨小梁结构改变为主要特征,可使患者的骨折风险显著增加,生活质量明显降低。据报道,我国65岁及以上人群OP患病率男性为10.7%,女性为51.6%<sup>[8]</sup>。相较于DXA,在脊柱畸形和退行性变患者中,通过测量椎体ROI的CT值能更好地评估椎体骨折风险。郭永杰等<sup>[9]</sup>发现,相较于DXA测量的BMD-T值,选用L<sub>1</sub>椎体CT值预测骨质疏松性骨折更加敏感。Zhan等<sup>[10]</sup>的研究纳入了78例腰椎骨质疏松性骨折患者,通过logistic回归分析发现,平均椎体CT值与骨质疏松性骨折明显相关(OR=0.39, 95%CI 0.29~0.77),并认为CT值对骨质疏松性骨折具有较好的预测价值。

目前已有相关研究将CT值用于评估骨质疏松性骨折的发生风险。有学者认为L<sub>1</sub>椎体CT值≤110 HU是预测OP的最佳阈值<sup>[11]</sup>。Lee等<sup>[12]</sup>通过测量L<sub>1</sub>椎体的CT值来预测骨质疏松和骨质减少,发现CT值≤90 HU时骨折风险将明显增加。在临床上腰椎CT检查不仅可测量定量参数值,还可通过三维重建评估患者腰椎骨折情况。由此可见,术前测量椎体CT值对于评估骨质疏松性骨折风险、制定手术方案具

有一定应用价值。

**1.2 评估退变性腰椎侧凸(degenerative lumbar scoliosis, DLS)的发生风险** DLS是一种常见的脊柱三维畸形,主要特征是腰椎侧凸Cobb角≥10°,严重时可出现冠状位与矢状位的失平衡,导致严重的疼痛和残疾。脊柱侧凸常伴有椎体骨量的降低。Fan等<sup>[13]</sup>发现,腰椎侧凸患者骨质疏松发生率为55.8%。有研究证实,DLS患者病变椎体两侧的BMD不对称,椎体凹侧松质骨的BMD高于椎体凸侧<sup>[14]</sup>。由于DLS不对称的椎体形态,致使基于DXA的BMD评估结果可能不可靠,而采用CT检查则可避开退行性区域,获得各个节段椎体BMD的数据。

程云忠等<sup>[15]</sup>回顾性分析了120例脊柱侧弯患者,根据主弯Cobb角的大小分为轻、中、重度组,分别测量每个椎体的CT值。结果显示,主弯从上至下各椎体的平均CT值与侧弯严重程度明显相关,由此建议若术前检测到显著的不对称BMD,应优先在凹侧牵引椎弓根螺钉来矫正主弯。Wang等<sup>[14]</sup>通过测量椎体CT值证实骨质疏松可增加不对称椎体的退行性变,并提出在矫正腰骶部弯曲时,应优先考虑在凹侧牵引椎弓根螺钉。作为DLS患者术前的常规检查项目,CT能显示椎弓根的异常形态,通过模拟椎弓根螺钉的大小,提高术中椎弓根螺钉置入的准确率及手术安全性,降低螺钉松动的风险<sup>[16]</sup>。

**1.3 评估椎间盘退变的风险** 椎间盘退变是腰椎间盘突出症(lumbar discectomy herniation, LDH)发生的主要原因。CT作为目前LDH的主要影像学检查手段之一,不仅具有较高的分辨率,可直接显示椎间盘的改变、椎管及其周围结构伴随的其他异常征象,且对椎间盘退变风险有一定的预测价值。大量研究报道了骨质疏松与椎间盘退变的关联<sup>[17-18]</sup>,但目前二者之间的确切关系仍存在争议。石明亮等<sup>[19]</sup>发现,腰椎BMD、全身BMD及足跟BMD与椎间盘退变呈明显正相关。王辉等<sup>[20]</sup>发现随着椎间盘退变程度的加重,相邻上下椎体的BMD存在递减趋势,而上下椎体松质骨CT值的差值表现为递增趋势,提示椎间盘退变与椎体BMD降低有关。Zheng等<sup>[21]</sup>则进一步证实,较高的终板CT值可加剧椎间盘退变,是预测椎间孔融合术后椎间盘退变发展的重要因子。目前仍需更多临床试验研究CT值对椎间盘退变风险的预测价值。

## 2 CT值指导脊柱手术的相关研究

**2.1 指导并优化椎弓根置钉** 骨质疏松患者椎弓根螺钉的置入在脊柱外科一直是一个难题,而CT在椎弓根螺钉的置入方面具有重要的指导意义:首先,将术前CT引导导航用于椎弓根螺钉置入,能提供进

钉部位、进钉角度、螺钉轨迹等信息,有助于提高置钉的准确性,降低脊髓和血管损伤的风险;第二,通过CT检测椎体BMD或CT值可预测螺钉的稳定性,判断是否需要行抗骨质疏松治疗、制定更合理的内固定方案。

已有研究表明,同一椎体不同层面的BMD存在差异<sup>[22]</sup>;通过测量CT值则能够避开退变明显的区域,选择受骨质疏松影响较小的层面进行置钉。Alqurashi等<sup>[23]</sup>采用术中CT引导导航下椎弓根置钉并与传统方法置钉进行比较。结果显示CT引导导航能促成更高的置钉准确率(100% vs. 86.9%),且无需任何术后翻修。罗晓玲等<sup>[24]</sup>将112例行椎弓根螺钉内固定术的患者分为试验组与对照组,其中试验组患者术前使用CT三维重建确定进钉点及进钉角度,对照组则采用徒手置钉,结果显示,试验组的置钉准确率、术中透视次数及术后恢复情况均明显优于对照组,提示CT三维重建及薄层扫描可有效确定进钉点及进钉角度,提高手术质量,促进术后恢复。姜国正等<sup>[25]</sup>分析了椎体CT值与行骨水泥强化的相关性,结果显示两者呈明显负相关( $P<0.001$ ),表明椎体CT值可用于预测椎弓根螺钉是否需行骨水泥强化固定,并发现L<sub>3</sub>、L<sub>4</sub>和L<sub>5</sub>椎体行骨水泥强化的临界CT值分别为70、95和99 HU,CT值越低,越建议行骨水泥强化。

以上研究结果均表明,椎体CT值在提高椎弓根置钉准确性、稳定性及预测术后螺钉松动风险方面具有一定的价值,值得临床推广应用。基于术前椎体CT值预测术后并发症的发生风险,并采取针对性措施减少术后并发症的发生是当今脊柱外科医师需要关注的重点。目前认为采用统计学方法分析术后并发症与CT值的关联性,并通过受试者操作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线确定相应的阈值是一个较好的方法,如有研究发现,骨质疏松患者L<sub>1</sub>椎体CT值的临界值为110 HU<sup>[11]</sup>。尽管目前对于阈值的确立尚无统一标准,但对明显低于阈值的患者,应在围手术期采取严格的抗骨质疏松治疗。在手术方案的选择上,应尽量选择CT值较高的节段或区域置钉,并在术后定期进行复查和随访。

**2.2 指导经皮椎体成形术(percutaneous vertebroplasty, PVP)** PVP作为治疗骨质疏松伴椎体压缩性骨折较好的微创方法之一,可达到稳定脊柱、有效缓解短期疼痛的目的。骨水泥是PVP主要的填充材料,但其在增强椎弓根螺钉把持力、降低螺钉松动率的同时也带来了骨水泥渗漏、术后翻修困难等问题<sup>[25]</sup>。骨小梁间隙与CT值呈负相关关系,椎体CT值越高,每单位面积的骨小梁间隙越小,表明骨质疏松程度越轻。有报道责任椎体CT值

$\leq 63$  HU是骨水泥渗漏发生的独立危险因素<sup>[26]</sup>,当责任椎体CT值低于阈值时,发生渗漏的危险性较高。

熊瑛等<sup>[27]</sup>的研究纳入172例骨质疏松性骨折患者,根据术前CT值的不同分为骨质疏松轻、中、重度组,并采取单侧和双侧入路两种不同的治疗方法,观察各组椎体穿刺和骨水泥弥散情况,结果显示,重度骨质疏松患者选择在病变侧行单侧入路PVP时骨水泥弥散较好,而腰椎CT值较高的轻度骨质疏松患者则应考虑双侧入路。由于椎体内部不同区域的CT值存在差异,骨水泥在椎体内的弥散分布情况会对PVP的治疗效果及预后产生一定影响。

关键斌等<sup>[28]</sup>测量了骨质疏松性骨折患者PVP术前伤椎和L<sub>1</sub>椎体不同区域的CT值,发现在高CT值区域注射的骨水泥均为弥散型分布,与低CT值区域相比骨水泥的分布情况更好,表明在高CT值区域进行注射更利于骨水泥在椎体内的均匀弥散,可达到理想的分布状态,从而提供可靠的内固定强度及良好的稳定性。综上,椎体CT值能为PVP提供一定的参考,有助于选择适宜的注射部位和注射技巧,制定更安全的手术方案。

### 3 CT值与脊柱术后并发症的相关性

**3.1 CT值与成人脊柱畸形(adult spinal deformity, ASD)术后并发症的关系** 随着人口老龄化的进展,ASD在脊柱外科中越来越常见。据估计,65岁以上人群30%~60%患有ASD,约20%有症状<sup>[29]</sup>。随着脊柱外科技术的进步和内固定器械的改良,采用脊柱矫形手术治疗该病取得了良好的临床效果,然而其并发症较多,特别是近端交界性脊柱后凸(proximal junctional kyphosis, PJK)占术后并发症的17%~46%<sup>[30]</sup>。值得注意的是,OP和骨质减少是ASD术后并发症增加的危险因素<sup>[31]</sup>。

Yao等<sup>[32]</sup>按术后并发症发生情况将63例ASD患者分为PJK组与无PJK组,分析两组间危险因素与平均CT值的相关性,结果显示,PJK组的平均CT值明显低于无PJK组(109.0 HU vs. 168.7 HU),ROC曲线分析显示,CT值 $<120$  HU提示有较高的PJK发生风险。Yamauchi等<sup>[33]</sup>分析了108例ASD患者,其中30例(27.8%)发生了术后并发症,包括26例PJK;发生并发症患者的CT值明显低于无并发症的患者 $[(113.7\pm 41.1)$  HU vs.  $(137.0\pm 46.8)$  HU,  $P=0.02$ ],表明CT值可用于在术前识别PJK风险较高的ASD患者。

**3.2 CT值与腰椎椎间融合术后融合器沉降的关系** 腰椎椎间融合术是治疗腰椎退行性病变的标准术式,尤其是斜腰椎椎间融合术(oblique lateral interbody fusion, OLIF)因具有失血少、损伤小、融合率高等优点而在临床上广泛应用<sup>[34]</sup>。然而,术后椎间融合

器沉降是其常见的并发症,可导致进行性脊柱畸形、神经功能恶化等不良后果。OP被证实与术后融合器沉降密切相关,是术后融合器沉降的重要危险因素<sup>[35]</sup>。

Zhou等<sup>[36]</sup>纳入76例接受OLIF的患者,发现腰椎平均CT值较低的患者术后发生融合器沉降的风险较高。一项纳入70例接受OLIF患者的病例对照研究发现,有25.7%的患者术后发生了融合器沉降,沉降组椎体整体CT值明显低于非沉降组,证实了椎体CT值与融合器沉降密切相关,CT值越低融合器沉降的可能性越高,预测融合器沉降的CT值阈值为120 HU(敏感度为82.7%,特异度为100.0%)<sup>[37]</sup>。常胜等<sup>[38]</sup>也得出了类似的结论,与融合器直接接触的椎体CT值 $\leq 100.39$  HU是术后椎间融合器沉降发生的危险因素。综上,术前测量椎体CT值有助于预测融合器沉降。对于CT值低于临界值的患者,术前应交待融合器沉降的风险,术中尽可能选择较大的融合器。

**3.3 CT值与PVP术后相邻椎体骨折的关系** PVP是一种治疗骨质疏松性压缩性骨折的微创技术,可有效减轻疼痛并加固骨折的椎体。然而,在骨质疏松患者中,由于PVP骨水泥灌注后使骨折椎体的刚度增加,加剧了椎体间应力传导的不平衡,常诱发邻近椎体的骨折<sup>[39]</sup>。Cheng等<sup>[40]</sup>纳入了247例接受PVP的患者,其中23例(9.3%)术后出现了新的椎体压缩性骨折,多变量回归分析显示,低CT值是术后新发骨折的独立危险因素。Gong等<sup>[41]</sup>分析了44例PVP术后新发骨折的患者,发现与对照组相比,相邻椎体骨折患者的骨折段CT值明显降低 $[(28.7\pm 16.7)$  HU vs.  $(61.3\pm 14.7)$  HU,  $P<0.05$ ]; ROC曲线分析提示,当患者相邻椎体CT值 $<43$  HU时,预测相邻椎体骨折的敏感度为80%,特异度为88.9%。Cheng等<sup>[42]</sup>研究发现,PVP术后邻椎再骨折的临界CT值为65.15 HU。上述研究均表明,术前椎体CT值较低与PVP术后邻椎再骨折密切相关,笔者建议对于低于临界CT值的患者,围手术期应采取严格的抗骨质疏松治疗。

**3.4 CT值与腰椎内固定术后椎弓根螺钉松动的关系** 腰椎退行性疾病是中老年人群的常见疾病,而腰椎内固定术是治疗严重腰椎退行性疾病的有效方法。椎弓根螺钉内固定术具有可靠的内固定强度和稳定性,一直是腰椎融合手术中的主要内固定方法之一<sup>[43]</sup>。然而,骨质的严重丢失会造成骨质疏松椎体内椎弓根螺钉的固定强度明显降低,容易造成椎弓根螺钉松动,并引发严重并发症,常导致患者腰背部持续性疼痛。据统计,骨质疏松患者术后螺钉松动率高达60%<sup>[44]</sup>。目前越来越多的学者通过测量椎体的CT值来预测椎弓根螺钉松动的风险。

Zou等<sup>[45]</sup>测量了503例行腰椎螺钉固定融合术患

者 $L_1-L_4$ 椎体的CT值,并通过回归分析确定了术前较低的椎体CT值是椎弓根螺钉松动的独立危险因素。Zhang等<sup>[46]</sup>将103例接受 $L_{4/5}$ 椎弓根螺钉固定的患者分为螺钉松动组与未松动组,发现螺钉松动组的平均CT值较低,仅为110 HU,与骨质疏松患者的平均CT值非常接近; Logistic回归分析显示,椎弓根的HU值是螺钉松动的独立危险因素( $P<0.001$ )。Shin等<sup>[47]</sup>认为 $L_4$ 的CT衰减能准确预测螺钉松动,并确定了不同条件下预测 $L_4$ 螺钉松动的CT衰减临界值。由此推测,术前较低的CT值与螺钉松动的风险增加明显相关。当术前椎体CT值低于临界值时,预测螺钉松动的风险增加,建议使用膨胀螺钉、皮质骨螺钉、骨水泥强化螺钉等手段增加椎弓根螺钉的固定强度,当前不同研究中的临界CT值不尽相同,需要进一步深入开展大样本研究,尤其是针对不同疾病和不同内固定节段进行深入探讨。

综上,术前较低的CT值与融合器移位、术后螺钉松动、相邻节段骨折和植骨不融合等术后并发症密切相关,严重影响了手术疗效和患者功能的恢复。有研究指出,较低的椎体CT值是OP相关并发症的独立预测因素( $OR=0.005$ , 95%CI 0.0001~0.1713,  $P=0.001$ ),平均CT值每降低25个百分点,OP相关并发症的发生概率增加1.7倍<sup>[48]</sup>。因此,对OP患者应在术前进行骨骼健康评估,测量责任椎体的CT值,以便及时进行骨质疏松的早期治疗,制定更合适的治疗方案,预防腰椎内固定融合术后相关并发症的发生。

## 4 CT值与人工智能(artificial intelligence, AI)结合的相关研究

**4.1 辅助筛查骨质疏松** 近年来随着AI技术的快速发展,特别是深度学习在放射诊断工作中的临床应用越来越广泛, AI技术与医学影像结合已经成为研究热点。将机器学习算法和AI技术与椎体CT值结合可实现高危人群的大规模筛查,对OP的诊断及其骨折风险预测阈值的确立具有重要意义<sup>[49]</sup>。AI将术前腰椎CT值与QCT数据结合,建立机器学习模型,该模型仅通过测量常规CT值即可预测T-score和骨质疏松椎体。焦自梅等<sup>[50]</sup>纳入377例患者,分别使用AI QCT辅助诊断系统和QCT测量 $L_{1/2}$ 椎体的体积骨密度,结果显示二者呈明显正相关( $r=0.977$ ,  $P<0.05$ ),由此认为AI QCT辅助诊断系统在腰椎BMD测量方面具备与QCT相当的能力。AI技术提高了操作的可重复性,并节约了大量的人力成本,使得基于CT图像的大规模回顾性腰椎BMD自动测量成为现实。

**4.2 指导螺钉轨迹自动规划** 基于CT图像的导航

引导技术可提高椎弓根螺钉置入的准确性,但目前大部分螺钉轨迹均为医师手动规划,过程繁琐且耗时。近年来已有越来越多的研究采用机器学习的方法进行椎弓根螺钉自动规划。di Angelo等<sup>[51]</sup>采用拓扑图像分析相关技术,将脊椎细分为多个感兴趣子结构,并基于形态学特征自动规划椎弓根螺钉通道,取得了良好的效果。刘嘉斌等<sup>[52]</sup>提出了一种基于CT值的脊柱椎弓根螺钉软件自动规划方法,发现与人工规划螺钉轨迹相比,自动规划的轨迹可获得更高的CT值 $[(245.52\pm 38.30)\text{HU vs. } (190.14\pm 45.17)\text{HU}, t=7.496, P<0.05]$ 。尽管AI技术应用于医学研究的特定领域具有更加专业化的特点,能提高临床医师的诊断效能和工作效率,但AI技术在国内医院尚未得到普及,且缺乏相关技术人员。目前仍需要关注AI技术应用于不同类型患者的差异,以确保更好地辅助临床诊疗工作。

## 5 总结与展望

椎体CT扫描作为常规术前检查在临床的使用率较高,通过测定椎体CT值可实现骨质疏松及其骨折的筛查,反映患者的真实骨量水平及其变化,且不增加额外的费用及辐射。CT在脊柱外科应用广泛,术前较低的CT值往往提示融合器移位、术后螺钉松动、相邻节段骨折等并发症的发生风险增加,需要临床医师更加注重围手术期的抗骨质疏松治疗、制定更合理的治疗方案或脊柱内固定方案。CT值对手术方案的制订和术后并发症的预防有一定指导意义,在提高椎弓根置钉准确性、稳定性及优化PVP骨水泥分布形态、降低骨水泥渗漏方面具有独特的优势。但应用常规CT筛查目前尚无统一标准,且最佳筛查椎体也尚未确定,仍需要扩大样本量来进一步统计和分析。近年来AI和机器人技术的飞速进展使脊柱外科不断向精准化、微创化和数字化的方向发展,结合AI预测骨质疏松及其骨折风险是未来具有潜力的发展方向,而以深度神经网络为代表的AI技术则具有广阔的应用前景,但目前其在临床中进一步的推广仍需临床医师、影像科医师及专业技术人员的共同努力。

## 【参考文献】

- [1] Kim HJ, Dash A, Cunningham M, *et al.* Patients with abnormal microarchitecture have an increased risk of early complications after spinal fusion surgery[J]. *Bone*, 2021, 143: 115731.
- [2] Haffer H, Muellner M, Chiapparelli E, *et al.* Bone microstructure and volumetric bone mineral density in patients with global sagittal malalignment[J]. *Eur Spine*, 2023, 32(6): 2228-2237.
- [3] Muraki S, Yamamoto S, Ishibashi H, *et al.* Impact of degenerative spinal diseases on bone mineral density of the lumbar spine in elderly women[J]. *Osteoporosis Int*, 2004, 15(9): 724-728.
- [4] Schreiber JJ, Anderson PA, Rosas HG, *et al.* Hounsfield units for assessing bone mineral density and strength: a tool for osteoporosis management[J]. *Bone Joint Surg Am*, 2011, 93(11): 1057-1063.
- [5] 王晓文, 招文华, 颜先伟, 等. 腰椎椎弓根对应横断面椎体骨质骨CT值与BMD值、T值的相关性[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2022, 28(10): 1465-1471.
- [6] Li C, Lai XM, Liu N, *et al.* Correlation analysis of the vertebral compression degree and CT HU value in elderly patients with osteoporotic thoracolumbar fractures[J]. *Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 457.
- [7] Mi J, Li K, Zhao X, *et al.* Vertebral body compressive strength evaluated by dual-energy X-ray absorptiometry and Hounsfield units *in vitro*[J]. *J Clin Densitom*, 2018, 21(1): 148-153.
- [8] 夏维波. 骨质疏松症高骨折风险患者的识别与防治策略[J]. *中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志*, 2020, 13(6): 493-498.
- [9] 郭永杰, 赵振江, 蒋巧玲, 等. 河南地区健康成人定量CT测量腰椎骨密度的分析[J]. *实用医学影像杂志*, 2021, 22(5): 442-444.
- [10] Zhan S, Ma H, Duan X, *et al.* The quality of bone and paraspinal muscle in the fragility osteoporotic vertebral compression fracture: a comprehensive comparison between different indicators[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25(1): 471.
- [11] Majumdar SR, Leslie WD. Conventional computed tomography imaging and bone mineral density: opportunistic screening or "incidentaloporosis"?[J]. *Ann Intern Med*, 2013, 158(8): 630-631.
- [12] Lee SJ, Graffy PM, Zea RD, *et al.* Future osteoporotic fracture risk related to lumbar vertebral trabecular attenuation measured at routine body CT[J]. *Bone Miner Res*, 2018, 33(5): 860-867.
- [13] Fan ZQ, Yan XA, Li BF, *et al.* Prevalence of osteoporosis in spinal surgery patients older than 50 years: a systematic review and meta-analysis[J]. *PLoS One*, 2023, 18(5): e0286110.
- [14] Wang H, Zou D, Sun Z, *et al.* Hounsfield unit for assessing vertebral bone quality and asymmetrical vertebral degeneration in degenerative lumbar scoliosis[J]. *Spine*, 2020, 45(22): 1559-1566.
- [15] 程云忠, 杨宏浩, 海涌, 等. CT值评估特发性脊柱侧凸严重程度与椎体骨密度不对称丢失的相关性研究[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2022, 15(9): 675-682.
- [16] Brink RC, Homans JF, de Reuver S, *et al.* A computed tomography-based spatial reference for pedicle screw placement in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine Deform*, 2020, 8(1): 67-76.
- [17] Geng J, Wang L, Li Q, *et al.* The association of lumbar disc herniation with lumbar volumetric bone mineral density in a cross-sectional chinese study[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11(6): 938.
- [18] Li X, Xie Y, Lu R, *et al.* Q-Dixon and GRAPPATINI T<sub>2</sub> mapping parameters: a whole spinal assessment of the relationship between osteoporosis and intervertebral disc degeneration[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2022, 55(5): 1536-1546.
- [19] 石明亮, 谢栋, 杨立利. 不同部位骨密度与椎间盘退变的因果关联[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2024, 30(5): 673-678.
- [20] 王辉, 李朝辉, 刘庆涛, 等. 基于CT HU值的单节段腰椎间盘突出症患者腰椎椎体骨密度分布的研究[J]. *中华解剖与临床杂志*, 2022, 27(6): 379-384.
- [21] Zheng HL, Li B, Song SK, *et al.* High endplate hounsfield units value indicate intervertebral disc degeneration following transforaminal lumbar interbody fusion surgery[J]. *Orthop Surg*, 2023, 15(9): 2291-2299.

- [22] Kennedy OD, Brennan O, Rackard SM. Variation of trabecular microarchitectural parameters in cranial, caudal and mid-vertebral regions of the ovine L<sub>3</sub> vertebra[J]. *J Anat*, 2009, 214(5): 729-735.
- [23] Alqurashi A, Alomar SA, Bakhaidar M, et al. Accuracy of pedicle screw placement using intraoperative CT-guided navigation and conventional fluoroscopy for lumbar spondylosis[J]. *Cureus*, 2021, 13(8): e17431.
- [24] 罗晓玲, 刘榆勤, 李兰, 等. CT三维重建及薄层扫描在特发性脊柱侧弯矫正手术中的应用[J]. *河北医学*, 2024, 30(5): 824-829.
- [25] 姜国正, 冯宁宁, 俞兴, 等. 腰椎椎体CT值与可灌注骨水泥螺钉注入强化剂加强固定的相关性研究[J]. *实用骨科杂志*, 2022, 28(9): 769-773, 836.
- [26] 葛绍勇, 黄干, 汪洋, 等. 骨质疏松性椎体压缩骨折患者经皮椎体成形术骨水泥渗漏的危险因素及Nomogram模型建立[J]. *山东医药*, 2019, 59(22): 57-60.
- [27] 熊瑛, 钟灵心, 冯安明. 腰椎定量CT对老年骨质疏松性腰椎压缩性骨折行PVP治疗的指导价值[J]. *影像技术*, 2022, 34(4): 55-59.
- [28] 关键斌, 冯宁宁, 俞兴, 等. 椎体分区CT值与经皮椎体成形后骨水泥分布的相关性[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(30): 4757-4762.
- [29] Safaee MM, Ames CP, Smith JS. Epidemiology and socioeconomic trends in adult spinal deformity care[J]. *Neurosurgery*, 2020, 87(1): 25-32.
- [30] Sardar ZM, Kim Y, Lafage V, et al. State of the art: proximal junctional kyphosis-diagnosis, management and prevention[J]. *Spine deformity*, 2021, 9(3): 635-644.
- [31] Mugge L, Debacker DD, Caras A, et al. Osteoporosis as a risk factor for intraoperative complications and long-term instrumentation failure in patients with scoliotic spinal deformity[J]. *Spine*, 2022, 47(20): 1435-1442.
- [32] Yao YC, Elysee J, Lafage R, et al. Preoperative hounsfield units at the planned upper instrumented vertebrae may predict proximal junctional kyphosis in adult spinal deformity[J]. *Spine*, 2021, 46(3): E174-E180.
- [33] Yamauchi I, Nakashima H, Ito S, et al. Preoperative low Hounsfield units in the lumbar spine are associated with postoperative mechanical complications in adult spinal deformity[J]. *Eur Spine J*, 2024, 33(7): 2824-2831.
- [34] Chang MC, Kim GU, Choo YJ, et al. Transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) versus oblique lumbar interbody fusion (OLIF) in interbody fusion technique for degenerative spondylolisthesis: a systematic review and meta-analysis[J]. *Life (Basel)*, 2021, 11(7): 696.
- [35] Oh KW, Lee JH, Lee JH, et al. The correlation between cage subsidence, bone mineral density, and clinical results in posterior lumbar interbody fusion[J]. *Clin Spine Surg*, 2017, 30(6): E683-E689.
- [36] Zhou J, Yuan C, Liu C, et al. Hounsfield unit value on CT as a predictor of cage subsidence following stand-alone oblique lumbar interbody fusion for the treatment of degenerative lumbar diseases[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 960.
- [37] Ran L, Xie T, Zhao L, et al. Low hounsfield units on computed tomography are associated with cage subsidence following oblique lumbar interbody fusion (OLIF)[J]. *Spine J*, 2022, 22(6): 957-964.
- [38] 常胜, 相宏飞, 魏嘉豪, 等. 腰椎单纯斜外侧入路椎间融合术后椎间融合器沉降的影响因素分析[J]. *精准医学杂志*, 2024, 39(3): 252-256.
- [39] Tang B, Chen X, Cui L, et al. The closer vicinity to treated vertebrae in percutaneous vertebroplasty, the higher rate of new vertebral compression fractures at follow-up[J]. *World Neurosurg*, 2024, 187: e749-e758.
- [40] Cheng Y, Cheng X, Wu H. Risk factors of new vertebral compression fracture after percutaneous vertebroplasty or percutaneous kyphoplasty[J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2022, 13: 964578.
- [41] Gong K, Song M, Shang C, et al. Risk factors for new adjacent and remote vertebral fracture after percutaneous vertebroplasty[J]. *World Neurosurg*, 2024, 182: e644-e651.
- [42] Cheng Y, Li Y, Cheng X, et al. Incidence and risk factors of adjacent vertebral fracture after percutaneous vertebroplasty or kyphoplasty in postmenopausal women: a retrospective study[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 17999.
- [43] Xu WX, Xu B, Ding WG, et al. Feasibility of anterior pedicle screw fixation in lumbosacral spine: a radiographic and cadaveric study[J]. *Ann Transl Med*, 2021, 9(12): 968.
- [44] Bredow J, Boese CK, Werner CM, et al. Predictive validity of preoperative CT scans and the risk of pedicle screw loosening in spinal surgery[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2016, 136(8): 1063-1067.
- [45] Zou D, Muheremu A, Sun Z, et al. Computed tomography hounsfield unit-based prediction of pedicle screw loosening after surgery for degenerative lumbar spine disease[J]. *J Neurosurg Spine*, 2020, 32(5): 716-721.
- [46] Zhang Q, Zhao F, Zhang Y, et al. Longitudinal study on pre- and post-operation CT imaging for predicting pedicle screw loosening in patients with lumbar degenerative disease[J]. *Ther Clin Risk Manag*, 2024, 20: 185-194.
- [47] Shin HK, Koo HW, Kim KH, et al. The usefulness of trabecular CT attenuation measurement at L<sub>4</sub> level to predict screw loosening after degenerative lumbar fusion surgery: consider number of fused levels and postoperative sagittal balance[J]. *Spine*, 2022, 47(10): 745-753.
- [48] St Jeor JD, Jackson TJ, Xiong AE, et al. Average lumbar hounsfield units predicts osteoporosis-related complications following lumbar spine fusion[J]. *Global Spine J*, 2022, 12(5): 851-857.
- [49] Ong W, Liu RW, Makmur A, et al. Artificial intelligence applications for osteoporosis classification using computed tomography[J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(12): 1364.
- [50] 焦自梅, 王曦, 刘钦鹏, 等. 人工智能辅助机会性测量腰椎骨密度研究:与定量CT比较[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2024, 22(5): 161-163.
- [51] di Angelo L, di Stefano P, Guardiani E. An automatic method for feature segmentation of human thoracic and lumbar vertebrae[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2021, 210: 106360.
- [52] 刘嘉斌, 夏桂锋, 左睿, 等. 基于CT值的脊柱椎弓根螺钉轨迹自动规划在骨质疏松患者中的应用价值研究[J]. *中国医学装备*, 2022, 19(2): 58-63.

(责任编辑: 纪方方)