

基于两级无监督学习的青少年腰椎骺环发育分期体系的建立

谢思远¹ 李义凯^{1,2△}

[摘要] **目的:**为了克服传统的青少年腰椎骺环成熟度评估方法依赖主观经验规则的局限性,应用数据驱动的方法,建立客观的发育分期新体系,并利用该体系探索中国人群腰椎骺环的发育规律。**方法:**回顾性分析 522 例 6~30 岁健康个体腰椎 CT 影像,采用两级无监督学习框架,*K*-Modes 聚类建立骺环层面的骨骺环成熟(ERM)分期,*K*-Means 聚类建立个体层面的整体成熟度模式。通过与常规方法比较及与年龄的相关性验证效度,并对发育窗口期、成熟路径及头尾侧顺序进行探索。**结果:**成功建立包含 5 个骨骺环成熟分期和 4 种整体成熟度模式的客观体系,新体系与年龄高度相关($\rho=0.890, P<0.001$),并在识别发育亚型方面优于传统方法。量化了两个关键发育窗口期(启动期 Profile A 个体差异最大,融合期 Profile C 持续时间最长);揭示了“同步启动→后方率先→前方收尾”的成熟路径,并证实了从尾侧到头侧的发育顺序($P=0.045$)。**结论:**基于两级无监督学习的新分期体系能客观、精确地评估青少年腰椎成熟度,揭示了复杂发育模式,为临床评估和风险识别提供了更可靠的影像学工具。

[关键词] 骺环;腰椎;脊柱发育;无监督学习;青少年

[中图分类号] R681.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2026)05-0078-05

DOI: 10.20085/j.cnki.issn1005-0205.260511

Establishment of a Staging System for Adolescent Lumbar Vertebral Epiphyseal Ring Development Based on Two-Stage Unsupervised Learning Approach

XIE Siyuan¹ LI Yikai^{1,2△}

¹School of Chinese Medicine, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China;

²Nanfeng Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China.

Abstract Objective: To overcome the limitations of traditional methods for assessing adolescent lumbar epiphyseal ring maturity, which rely on subjective empirical rules, this study aims to apply a data-driven approach to establish an objective new staging system for development and utilize this system to explore the developmental patterns of lumbar epiphyseal rings in the Chinese population. **Methods:** A retrospective analysis was conducted on lumbar CT images from 522 healthy individuals aged 6 to 30 years old. A two-level unsupervised learning framework was employed; *K*-Modes clustering was used to establish the epiphyseal ring maturation (ERM) staging at the epiphyseal ring level, and *K*-Means clustering was used to identify overall maturity patterns at the individual level. The validity was verified by comparing the method with conventional methods and correlating it with age, along with exploratory analyses of developmental windows, maturation paths, and cranio-caudal sequences. **Results:** An objective system comprising 5 ERM stages and 4 overall maturity patterns was successfully established. The new system showed a high correlation with age ($\rho=0.890, P<0.001$) and outper-

formed traditional methods in identifying developmental subtypes. Two key developmental window periods were quantified (initiation period Profile A, greatest individual differences; fusion period Profile C, longest duration). The maturation path of “synchronous initiation → posterior leading → anterior closure” was revealed, and a developmental sequence from caudal to cranial was confirmed ($P=0.045$). **Conclusion:** The new staging system, based on a two-level unsupervised learning approach, can objectively and accurately assess adolescent lumbar maturity, revealing complex developmental patterns

基金项目:国家自然科学基金项目(82274669)

李义凯广东省名中医传承工作室建设项目(粤中医办函[2023]108号)

深圳市“医疗卫生三名工程”资助项目

(SZZYSM202108013)

¹南方医科大学中医药学院(广州,510515)

²南方医科大学南方医院

[△]通信作者 E-mail:ortho@smu.edu.cn

and providing more reliable imaging tools for clinical assessment and risk identification.

Keywords: epiphyseal ring;lumbar spine;spinal development;unsupervised learning;adolescent

骺环(Epiphyseal Ring, ER)是环绕椎体上下面边缘发育的次级骨化中心,其构成了纤维环外层纤维锚定至椎体骨性终板的关键结构^[1]。在青少年快速生长发育期,骺环经历从软骨到骨化并最终与椎体融合的复杂过程,此过程的顺利完成对于维持脊柱的生物力学稳定性至关重要^[2]。多项研究已证实,骺环的发育状态与青少年特发性脊柱侧凸、休门氏症等脊柱畸形的发生发展相关,其异常发育可能参与了这些疾病的进展过程^[3-5]。因此,精确评估骺环的成熟度,对于理解青少年脊柱疾病的病理机制、预测生长潜能及制定临床干预策略具有重要意义。

目前,临床上评估青少年骨骼成熟度的方法主要包括 Risser^[6]、Sanders^[7]、PHOS^[8]标准等。然而,这些方法并非直接评估脊柱的骨骺,其发育节律与脊柱本身并非完全同步,因而可能无法精确反映脊柱自身的成熟状态^[9-10]。为了更直接地评估脊柱成熟度,部分研究者开始转向对骺环本身进行影像学分期研究,其中以 Costa 等^[11-12]的研究为代表,他们提出了一套基于经验规则的分期系统^[9,13]。尽管此类分期方法为骺环研究奠定了基础,但其存在根本的局限性:分期标准依赖于研究者根据影像特征和既往经验进行的主观预设,这种“经验驱动”的模式虽然直观,但可能导致分级过于简化,无法完全捕捉发育过程中具有复杂生物学意义的中间状态。因此,需要构建一种更客观的“数据驱动”的方法,来发现并定义骺环发育的内在规律。

本研究旨在提出并应用一种全新的两级无监督学习框架,以数据驱动的方式客观地建立青少年腰椎骺环的成熟度分期新体系。1)在骺环层面,应用 K-Modes 聚类算法发现并定义客观的骨骺环成熟(Epiphyseal Ring Maturation, ERM)分期;2)在此基础上,通过 K-Means 聚类在个体层面识别腰椎整体成熟度模式;3)通过与年龄的相关性分析验证新体系的科学效度,并与经典的常规规则分期方法进行直接比较;4)最终,利用这一新体系探索中国人群腰椎骺环的发育

规律,以期为我国青少年脊柱健康的临床评估和科学研究提供更精确、更客观的影像学依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究为一项回顾性横断面研究。回顾性收集了 2013 年 1 月至 2023 年 12 月南方医科大学南方医院影像数据库中接受腰椎 CT 扫描的个体影像资料。本研究方案经南方医科大学南方医院伦理委员会批准(批准号为 NFEC-2024-126),研究仅对匿名化影像数据进行回顾性分析,未经患者知情同意。最终,共纳入 522 例健康个体(男女各 261 例)的影像资料。

1.2 纳入标准

1)年龄在 6~30 岁之间;2)腰椎 CT 影像清晰,骺环及椎体终板等解剖标志可辨。

1.3 排除标准

1)椎体存在明显旋转;2)存在腰椎损伤、畸形、肿瘤或感染等病史;3)有生长激素治疗史、腰椎手术史或影响骨骼发育的内分泌及遗传性疾病史。

1.4 影像评估与数据采集

所有影像数据以 DICOM 格式导入 RadiAnt DICOM Viewer 软件。参照 Costa 等^[11]的研究方法(见图 1),在重建的正中矢状面和正中冠状面上,对每个腰椎椎体的上下骺环分别评估其前、后、左、右四个区域的发育阶段(Phase),分级标准如下。1)阶段 0(P0):软骨期,CT 影像上无法观察到骺环的骨化信号。2)阶段 1(P1):骨化期,可见骨化的骺环,但尚未与椎体发生融合。3)阶段 2(P2):融合期,骺环开始与椎体融合,但两者间仍存在未完全闭合的间隙。4)阶段 3(P3):成熟期,骺环与椎体完全融合,骨皮质边缘连续。

评估由两名经过统一培训的研究者独立完成,采用 Cohen's Kappa 系数(κ)评估观察者间一致性。通过此步骤,每个骺环均被量化为一个四维分类数据向量 $[P_{前}, P_{后}, P_{左}, P_{右}]$ 。

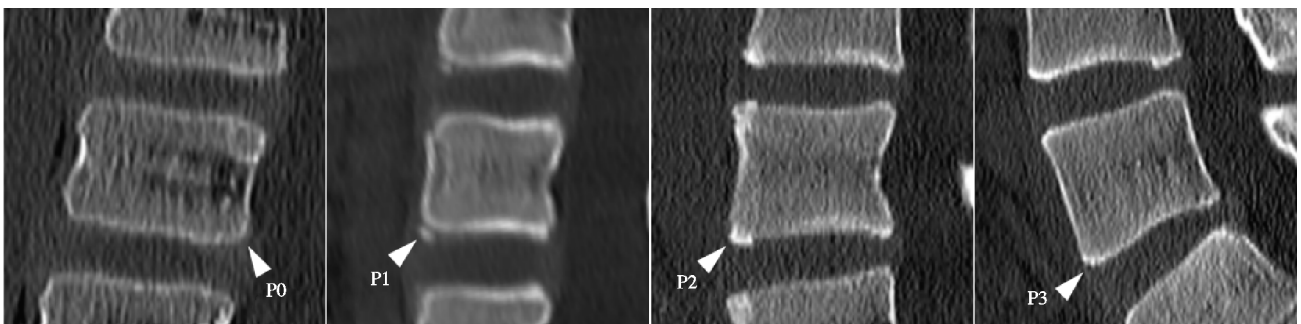


图 1 骺环四象限发育阶段评估方法

1.5 两级无监督学习框架

为客观地识别发育模式,本研究构建了一个两级无监督学习框架。

1.5.1 第一级 基于 *K*-Modes 聚类的骨骺环成熟分期。在骺环层面,采用处理分类数据的 *K*-Modes 聚类算法。首先,通过肘部法则确定最佳聚类数,迭代计算不同 *K* 值下的聚类总成本,并选择图线拐点最明显处对应的 *K* 值(最佳 *K* 值)作为最佳聚类数。随后,使用最佳 *K* 值对所有骺环的四维阶段向量进行最终拟合,将每个骺环归入一个聚类。最后,通过分析每个聚类内部最常见的阶段组合模式,为客观发现的阶段赋予具有生物学意义的名称,建立骨骺环成熟分期系统(Stage 1~5)。

1.5.2 第二级 基于 *K*-Means 聚类的个体整体成熟度模式。为了在个体层面客观地发现人群中存在的整体成熟度模式,首先将每名受试者的腰椎状态,通过统计其 10 个骺环分别处于骨骺环成熟 Stage 1~5 的数量,转换为一个 5 维的分期构成向量。随后,采用 *K*-Means 聚类算法,对所有受试者的向量进行聚类,通过肘部法则确定最佳聚类数。最终,将所有受试者客观归入 *n* 种(*n* 为最佳聚类数)主要的整体成熟度模式中,并根据每个模式的平均构成特征进行命名(Profile A~D)。

1.6 用于对比的常规规则分期方法

为评估本研究提出的数据驱动方法的优越性,同时采用了一种参照 Costa 等^[11]研究的常规规则分期方法(Stage 分期)作为对比。该方法根据以下规则对每个骺环进行分级。1) Stage 0:所有 4 个区域均为阶段 0。2) Stage 1:1 至 3 个区域为阶段 1。3) Stage 2:所有 4 个区域均为阶段 1。4) Stage 3:1 至 4 个区域为阶段 2 和/或 1 至 3 个区域为阶段 3。5) Stage 4:所有 4 个区域均为阶段 3。

1.7 统计学方法

所有数据分析均采用 Python 3.9 及相关的科学计算库(Pandas, Scikit-learn, KModes)完成。采用 Spearman 秩相关分析检验骨骺环成熟分期、Stage 分期与年龄的相关性,以评估其效度。采用交叉分析表对骨骺环成熟分期方法与 Stage 分期方法的分类结果进行直接比较。*L*₁ 与 *L*₅ 椎体平均骨骺环成熟分期的差异采用配对样本 *t* 检验,以分析头尾侧发育顺序。通过计算各整体成熟度模式下年龄的四分位距(IQR)和变异系数(CV)来量化风险窗口期的动态特征。所有统计检验的显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 数据驱动的腰椎骨骺环成熟分期系统建立

对 522 个骺环样本的四象限发育模式进行 *K*-Modes 无监督聚类分析,通过肘部法则确定最佳聚类数量为 $K=5$ 。建立了包含 5 个阶段的骨骺环成熟分期系

统,每个阶段的构成特征及定义见表 1。与 Stage 分期相比,该系统客观地识别出了一个具有明确生物学意义的非对称发育阶段,即 Stage 3(后方主导融合期)。

表 1 骨骺环成熟分期系统定义

分期名称	核心特征(主要发育模式)
Stage 1(软骨期)	绝大多数(73.6%) 样本为 [0, 0, 0, 0], 代表软骨期
Stage 2(融合启动期)	以 [2, 2, 2, 2](50.1%) 为主, 代表融合过程全面、同步启动
Stage 3(后方主导融合期)	以 [2, 3, 2, 2](67.3%) 为主, 后方率先完成融合, 呈现非对称模式
Stage 4(广泛融合期)	以 [2, 3, 3, 3](64.6%) 为主, 大部分区域已融合, 仅剩前方在收尾
Stage 5(成熟期)	绝大多数(89.5%) 样本为 [3, 3, 3, 3], 代表完全成熟

2.2 新分期系统的效度与方法学比较

为验证新系统的科学性,将骨骺环成熟分期与常规 Stage 分期进行比较。Spearman 相关性分析显示,数据驱动的骨骺环成熟分期与年龄呈现极强的正相关性($\rho=0.890, P < 0.001$),与 Stage 分期($\rho=0.884, P < 0.001$)的效度相当。

新旧分期方法对比交叉分析表见表 2,揭示了两种方法在发育细节捕捉上的显著差异,结果显示:被常规方法笼统划归为 Stage 3 的样本,在骨骺环成熟分期下被精确地识别为 Stage 1 至 Stage 5 的多种不同发育状态,其中以 Stage 2(30.1%)、Stage 4(28.1%)和 Stage 5(15.9%)为主,这表明数据驱动方法能够识别出被传统经验法则所忽略的、更精细的发育亚型。

表 2 新旧分期方法对比交叉表(%)

常规分期 (Stage 分期)	ERM Stage 1	ERM Stage 2	ERM Stage 3	ERM Stage 4	ERM Stage 5
S0	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S3	14.68	30.06	11.27	28.08	15.91
S4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

2.3 个体腰椎整体成熟度模式的识别与性别差异

在个体层面,本研究通过对 522 名受试者的骨骺环成熟分期构成向量进行二次 *K*-Means 聚类,客观地识别出 4 种主要的整体成熟度模式(Profile A~D),其定义见表 3。为探究整体成熟度的性别差异,详细的年龄分布统计见表 4,结果显示:在发育早期的 Profile A 和 B 阶段,女性的中位年龄均低于男性;而在 Profile C 阶段,女性的中位年龄(17.0 岁)略高于男性(16.0 岁),提示男女发育节奏存在非线性差异。

2.4 腰椎骺环发育过程的探索性分析

2.4.1 发育风险窗口期的量化 为探索不同整体成熟度模式在时间上的动态特征,对各整体成熟度模式的年龄分布进行量化分析(见表 5)。采用年龄的四分位距来估算经历该阶段的时间跨度,并采用变异系

表 3 个体整体成熟度模式定义

模式名称	核心特征解读(平均 10 个骺环的构成)
Profile A (早期骨化型)	绝大多数(9.3 个)处于 Stage 1
Profile B (融合启动型)	绝大多数(7.3 个)处于 Stage 2
Profile C (晚期混合融合型)	Stage 3/4/5 高度混合,异质性最高
Profile D (完全成熟型)	绝大多数(9.2 个)处于 Stage 5

表 4 整体成熟度模式下不同性别的年龄分布统计表

模式名称	性别	样本量/例	中位年龄/岁	持续时间估算/年
Profile A	男	58	8.5	3.0
	女	51	8.0	2.5
Profile B	男	27	13.0	1.0
	女	28	12.0	2.0
Profile C	男	36	16.0	3.0
	女	47	17.0	4.0
Profile D	男	140	24.0	6.0
	女	135	24.0	6.0

表 5 发育风险窗口期量化分析结果

模式名称	样本量 /例	中位年龄 /岁	持续时间 估算/年	发育变异 系数
Profile A	109	8.0	3.0	0.210
Profile B	55	12.0	1.0	0.121
Profile C	83	16.0	3.0	0.143
Profile D	275	24.0	6.0	0.169

数来衡量发育规律的个体差异性。分析结果识别出两个关键窗口期:Profile A 表现出所有动态发育阶段中最高年龄变异系数(0.210),表明这是个体发育规律差异最大的时期;Profile C 则表现出最长的发育持续时间(3.0 年),表明这是人群经历时间最长的动态变化阶段。

2.4.2 骺环内部成熟路径 为探究骺环从不成熟到成熟是否遵循固定的模式,对处于动态发育阶段(ERM Stage 2/3/4)的 1 300 个骺环样本进行了二次 K-Modes 聚类分析,结果识别出三种主要的成熟路径。1)路径 A:此路径以四个区域普遍、同步地进入融合状态(阶段 2)为核心特征,最主要的发育模式为 [2,2,2,2]。2)路径 B:表现为后方区域率先完成融合(阶段 3),形成非对称模式,最主要的发育模式为 [2,3,2,2]。3)路径 C:以后方和两侧区域均已成熟、仅剩前方区域在进行最后融合为特征,最主要的发育模式为 [2,3,3,3]。此结果表明腰椎骺环的融合过程主要遵循“同步启动→后方率先成熟→前方最终收尾”的顺序模式。

2.4.3 腰椎头尾侧发育顺序 为检验腰椎整体是否存在从上到下或从下到上的发育顺序,对每个受试者的 L₁ 与 L₅ 椎体平均骨骺环成熟分期进行配对样本 t 检验,结果显示:L₅ 椎体的平均成熟度显著高于 L₁ 椎

体($t = -2.01, P = 0.045$),表明腰椎骺环的发育存在从尾侧到头侧的、具有统计学意义的发育梯度。

3 讨论

本研究应用两级无监督学习框架,以数据驱动的方式客观地建立了青少年腰椎骺环的成熟度分期新体系。该体系不仅在宏观上准确地反映了随年龄增长的发育规律,更在微观层面揭示了传统方法所无法识别的、具有重要临床意义的发育模式和规律。

本研究通过与传统方法进行直接对比,清晰地展示了传统方法的局限性。交叉分析结果显示,被常规方法笼统划归为 S3 的样本,实际上包含了从 Stage 1 到 Stage 5 的多种不同生物学状态,这证明传统方法可能因其简化规则而掩盖了发育过程的复杂性。相比之下,本研究的数据驱动方法,特别是通过聚类客观识别出的 Stage 3(后方主导融合期),为骺环发育存在非对称性提供了直接的影像学证据,证明了机器学习在发现精细生物学模式上的优势。

基于这一新体系,本研究对青少年腰椎骺环的发育规律进行了更深层次的分析。首先,在个体层面,本研究客观地识别出四种主要的整体成熟度模式,从而将对个体的评估从简单的平均数或中位数升级为一种更具临床意义的模式。本研究还发现了男女发育节奏的非线性差异,即虽然女性在发育早期(Profile A/B)整体领先于男性,但在发育晚期的混合阶段(Profile C),女性的中位年龄反而略高于男性。

此外,本研究对发育过程中的空间规律进行了探索。通过对处于动态发育阶段样本的二次聚类,量化并证实了腰椎骺环的融合主要遵循“同步启动→后方率先成熟→前方最终收尾”的顺序模式,这一发现的价值在于对骺环发育的评估从静态的时间点的判断,转变为动态的过程预测。这意味着不仅可以通过影像资料来回答一个儿童的骺环当下的发育情况,同时可以基于其所处的路径模式,对其下一步的演变做出预判。这种从诊断到预测的转变,在评估如青少年特发性脊柱侧凸等病理队列时可能尤为重要,因为对于这些患者,关键问题不仅在于他们的发育阶段是否延迟,还在于其发育过程是否偏离了正常的路径^[11]。

同时,本研究还发现了一个具有统计学意义的、从尾侧到头侧(L₅→L₁)的发育顺序,这可能与生物力学负荷相关。作为连接活动度较大的腰椎与相对固定的骨盆的过渡枢纽,L₅ 承受着最大且最复杂的机械负荷^[14],其不仅需要支撑躯干、上肢和头部的全部重力(约占总体重的三分之二)^[15],还要应对行走、弯腰、旋转等日常活动中产生的巨大剪切力和弯矩。根据 Hueter-Volkman 原理,这可能刺激并加速了其成熟过程。

本研究的另一个重要临床意义在于为识别青少年脊柱发育的风险窗口期提供了客观的量化工具,分析

识别出两个具有不同特征的关键发育窗口期。Profile A 是个体发育节奏差异最大的时期,这一时期位于青春期生长高峰之前,其高度的个体变异性表明,不同个体进入生长突增期时的腰椎骺环基线成熟度存在较大差异。对于那些进入青春期时脊柱成熟度较低的个体,当他们遭遇脊柱侧凸的诱发因素(如遗传易感性、结缔组织松弛或神经肌肉失衡)时^[16],就更容易发生侧凸。而 Profile C 则是持续时间最长、内部结构最不稳定的动态变化阶段,这一阶段对应了青少年脊柱在快速生长和负荷增加的背景下,生物力学特性最不稳定、对不良应力最敏感的时期,同时也是脊柱侧凸恶性循环的活跃阶段^[17]。这一发现为临床制定青少年脊柱侧凸进展风险的精准筛查和分期干预策略,提供了客观化的影像学依据。

本研究也存在一定的局限性:首先,作为一项回顾性研究,可能存在选择偏倚;其次,本研究基于单中心数据,其结论在外周人群中的普适性有待多中心研究的进一步验证;最后,本研究依赖于有电离辐射的 CT 影像,限制了其在健康人群大规模筛查中的直接应用。

综上所述,本研究通过构建一种两级无监督学习框架,成功建立了客观的青少年腰椎骺环发育分期新体系。该体系不仅在效度上与传统方法相当,更在发育细节捕捉上表现出显著优势,能够识别出发育过程中的关键模式、非线性性别差异以及空间顺序。此外,本研究量化了两个潜在的风险窗口期,为青少年脊柱健康的临床管理和科学研究提供了一个客观工具和新角度。未来的研究方向包括:纳入颈椎、胸椎以及其他次级骨化中心等更全面的脊柱发育数据,进一步探究发育规律;将此方法应用于青少年特发性脊柱侧凸(AIS)等疾病人群,以探究其发育模式是否存在特异性改变;探索将此分析框架应用 MRI 等辐射更低的影像技术,以增强其临床应用潜力。

参考文献

[1] 谢思远,李义凯. 骺环的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2024, 34(11): 1201-1205.

[2] RODRIGUES S A, THAMBYAH A, BROOM N D. How maturity influences annulus-endplate integration in the ovine intervertebral disc: a micro- and ultra-structural study[J]. *Journal of Anatomy*, 2017, 230(1): 152-164.

[3] PALAZZO C, SAILHAN F, REVEL M. Scheuermann's disease: an update[J]. *Joint Bone Spine*, 2014, 81(3): 209-214.

[4] MAKINO T, KAITO T, SAKAI Y, et al. Asymmetrical ossification in the epiphyseal ring of patients with adolescent idiopathic scoliosis: a retrospective review[J]. *The Bone & Joint Journal*, 2016, 98-B(5): 666-671.

[5] PENG Y, WANG S R, QIU G X, et al. Research progress on the etiology and pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Chinese Medical Journal*, 2020, 133(4): 483-

493.

[6] MAGNIDE E, TCHAHA G W, JONCAS J, et al. Automatic bone maturity grading from EOS radiographs in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2021, 136: 104681.

[7] CHEUNG P W H, CHEUNG J P Y. Does the use of Sanders staging and distal radius and ulna classification avoid mismatches in growth assessment with Risser staging alone? [J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2021, 479(11): 2516-2530.

[8] JULIÁN C, RICARDO D N, RODRIGO R, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: is there a relationship between Risser staging and the proximal humerus ossification system? [J]. *Spine Deformity*, 2024, 12(3): 629-633.

[9] UYS A, BERNITZ H, PRETORIUS S, et al. Age estimation from anterior cervical vertebral ring apophysis ossification in South Africans[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2019, 133(6): 1935-1948.

[10] CARDOSO H F V, RÍOS L. Age estimation from stages of epiphyseal union in the presacral vertebrae[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2011, 144(2): 238-247.

[11] COSTA L, VAN LANGE A, SEEVINCK P R, et al. Maturation of the vertebral ring apophysis is delayed in girls with adolescent idiopathic scoliosis compared to the normal population[J]. *Spine Deformity*, 2024, 12(6): 1631-1637.

[12] COSTA L, DE REUVER S, KAN L, et al. Ossification and fusion of the vertebral ring apophysis as an important part of spinal maturation[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2021, 10(15): 3217.

[13] WOO T D, TONY G, CHARRAN A, et al. Radiographic morphology of normal ring apophyses in the immature cervical spine[J]. *Skeletal Radiology*, 2018, 47(9): 1221-1228.

[14] KONDRATIEV A, SMETANKINA N, STAUDE V. Biomechanical analysis of stress-strain distribution in the lumbar spine-sacrum-pelvis system with emphasis on sacroiliac joint dysfunction[J]. *Prosthesis*, 2024, 7(1): 4.

[15] JEAN B, ANDRÉ B. Spinal biomechanics concepts of pediatric scoliosis and trunk shift applied to daily tasks and sports [J]. *Journal of Musculoskeletal Disorders and Treatment*, 2021, 7(4): 106.

[16] JINNAH A H, LYNCH K A, WOOD T R, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: advances in diagnosis and management[J]. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 2025, 18(2): 54-60.

[17] STOKES I A F, BURWELL R G, DANGERFIELD P H. Biomechanical spinal growth modulation and progressive adolescent scoliosis—a test of the “vicious cycle” pathogenetic hypothesis: summary of an electronic focus group debate of the IBSE[J]. *Scoliosis*, 2006, 1: 16.

(收稿日期: 2025-10-20)