

基于 CBCT 三维形态分析的中国青少年颈椎骨成熟度定量方法研究

吴 玥, 唐 雯, 张语嫣然, 袁玮煜, 潘逸菲, 陈新宇, 徐海洋, 吕云帆,
IZADIKHAH Iman, 曹 丹, 谢理哲, 严 斌

[摘要] 目的 通过锥形束 CT(CBCT)影像探究颈椎三维形态与骨骼成熟度之间的相关性,并建立基于颈椎三维形态的颈椎骨成熟度(CVM)定量评估模型。方法 共收集 358 例(男 175 例,女 183 例)中国青少年患者的颅颌面 CBCT 影像,随机分为模型建立组(277 例)及验证组(81 例)。定义并测量了 21 个颈椎三维形态学参数,纳入颈椎全部部位,包括颈椎椎体、横突、棘突、椎弓根、椎板、关节突。颈椎骨成熟指数(CVMI)由有经验的正畸医师测定并作为参考标准。采用 Spearman 等级相关系数和多元线性逐步分析确定相关性并构建回归模型。使用验证组数据检验各模型的评估可靠性并应用配对样本 Wilcoxon 符号秩检验比较模型评估值与参考标准。结果 颈椎各部位的三维形态学变化与 CVMI 相关($P<0.05$)。男性和女性模型各包括 6 个三维形态参数,其中 3 个相同。男性模型和女性模型校正 R^2 分别为 0.899 和 0.902,评估准确率分别为 85.0% 和 85.4%。配对样本 Wilcoxon 符号秩检验结果显示两个回归模型与参考标准间均无统计学差异($P>0.05$)。结论 颈椎三维形态与骨骼成熟度相关,本研究建立的 CVM 三维形态学评估方法及相应的回归模型具有良好的可信度,与专家的一致性较高。

[关键词] 骨骼成熟度;颈椎骨成熟指数;三维形态;CBCT

[中图分类号] R783.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-9872(2024)05-0321-08

[doi] 10.13591/j.cnki.kqyx.2024.05.001

Quantitative analysis of cervical vertebral maturation in Chinese adolescents based on three-dimensional morphology of cervical vertebrae

WU Yue, TANG Wen, ZHANG Yuyanran, YUAN Weiyu, PAN Yifei, CHEN Xinyu, XU Haiyang, LYU Yunfan, IZADIKHAH Iman, CAO Dan, XIE Lizhe, YAN Bin. (Department of Orthodontics, The Affiliated Stomatological Hospital of Nanjing Medical University; State Key Laboratory Cultivation Base of Research, Prevention and Treatment for Oral Diseases (Nanjing Medical University); Jiangsu Province Engineering Research Center of Stomatological Translational Medicine, Nanjing 210029, China)

Abstract: **Objective** To investigate associations between three-dimensional (3D) morphology of cervical vertebrae and skeletal maturation by cone-beam computed tomography (CBCT) and establish corresponding regression models for quantitatively evaluating cervical vertebral maturation (CVM). **Methods** The analyzed sample consisted of 358 CBCT images (175 male, 183 female), of which 277 images were randomly selected as the model development group and 81 as the performance test group. Twenty-one 3D morphological parameters were defined and measured, incorporating all parts of the cervical vertebrae, including the cervical vertebral bodies, transverse processes, spinous processes, pedicles, lamina, and articular processes. The cervical vertebral maturation index (CVMI) was determined by experienced orthodontists as reference standard. Spearman's rank correlation coefficient and multivariable stepwise regression analysis were used to identify the associations and build regression models. The performance test group was employed to examine each model's reliability. Paired-samples Wilcoxon signed-rank test compared the CVMI of the model prediction with the reference standard. **Results** Three-dimensional morphological changes in various parts of the cervical vertebrae correlated with CVMI ($P<$

基金项目:国家自然科学基金(82071143,82101079);国家重点研发计划(2022YFC2402103);江苏省卫健委医学科重点研发项目(ZDA2020003);江苏省重点研发计划(BE2022795);江苏省科学技术厅社会发展面上项目(BE2023836)

作者单位:南京医科大学附属口腔医院正畸科,口腔疾病研究与防治国家级重点实验室培育建设点(南京医科大学),江苏省口腔转化医学工程研究中心,江苏南京(210029)

通信作者:严 斌 E-mail:byan@njmu.edu.cn

谢理哲 E-mail:xielizhe@njmu.edu.cn

0.05). Six 3D morphometric parameters were each recognized for male and female models, three of which were identical. The adjusted R^2 was 0.899 for males and 0.902 for females, with corresponding accuracies of 85.0% and 85.4%, respectively. These models showed no difference as compared with the reference standard ($P>0.05$). **Conclusion** New associations were found between 3D morphology of cervical vertebrae and skeletal maturation. The 3D-driven morphometric CVM assessment method and corresponding regression models

exhibited good credibility and high consistency with experts.

Key words: skeletal maturation; cervical vertebrae maturation index; three-dimensional morphology; cone-beam computed tomography

Stomatology, 2024, 44(5): 321-328

骨骼成熟度,即骨龄,与青少年生长发育状态有着密切联系,是明确正畸诊断、决定颅颌面矫形治疗时机及制定合适诊疗计划的重要因素之一^[1-2]。颈椎骨成熟度(cervical vertebral maturation, CVM)通过观察头颅侧位片上第二到第四颈椎椎体的形态变化来进行评估^[3],近年来广泛应用于正畸临床实践中并验证了其有效性及适用性^[4-5]。

由于不同专业水平的检查者之间存在主观性差异,有学者定义了颈椎椎体二维形态测量参数以对颈椎骨成熟度进行量化评估^[6-8]。但传统基于二维的研究仅描述了矢状向颈椎椎体部分的形态变化与骨骼成熟度的关联,对于颈椎其余部位和水平向、冠状向的颈椎形态变化无法完全揭示。人体发育为三维方向进行,颈椎三维形态的变化与骨骼生长发育相关^[9]。目前关于颈椎三维形态的量化参数与骨骼成熟度的相关性研究未见报道。

此外,二维影像存在的图像重叠变形、投射失真等不足进一步影响了椎体形态分析的准确性和可重复性^[10]。锥形束 CT(cone beam computerized tomography, CBCT)可全面分析颈椎全部部位,其已成为三维研究的主要数据来源^[11]。通过颈椎的三维形态学量化分析,可减少因经验不足及椎体形态相似性造成的判断误差,对于颈椎存在形态变异的患者准确性较好,并避免了另外拍摄手腕骨龄评估 X 线片的额外辐射^[12]。同时,人工智能技术的进步可帮助减轻人员主观性影响和经验性依赖^[13],借助智能模型和客观的、去经验依赖的量化评估技术,使得精确、定量地评估骨骼成熟度成为可能。

因此,本研究基于 CBCT 影像数据和回归模型技术,探究颈椎三维形态与骨骼成熟度之间的相关性,使用颈椎三维形态量化参数建立并验证颈椎骨成熟度评估模型,以期建立一个客观准确地并适用于中国青少年的颈椎骨骼成熟度定量分析方法。

1 资料与方法

1.1 实验对象和仪器

本研究回顾性纳入 2018 年—2022 年于南京医科大学附属口腔医院正畸科就诊的患者 358 例,均

于治疗前采集颅颌面 CBCT 数据,总计男 175 例,女 183 例,平均年龄(12.24 ± 2.46)岁。纳入标准为:①无全身系统性疾病;②无颈椎疾病和外伤史;③颅颌面 CBCT 图像清晰,第二颈椎(the second cervical vertebra, C2)、第三颈椎(the third cervical vertebra, C3)和第四颈椎(the fourth cervical vertebra, C4)轮廓清晰可辨认。将所得图像样本随机分为两组:模型建立组($n=277$,男 135 例,女 142 例)和模型验证组($n=81$,男 40 例,女 41 例)。本研究通过南京医科大学附属口腔医院伦理委员会审查(伦理号: PJ2017-045-001)。

锥形束 CT 图像采用 NewTom 5G CT 系统拍摄(Verona, 意大利),曝光参数为视野 $18 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$,管电压 110 kV, $1 \sim 20 \text{ mA}$,各向同性体素大小 0.3 mm 。拍摄时患者处于最大牙尖交错位,正中矢状面垂直于水平面,眶耳平面与地面平行。

1.2 颈椎骨骼成熟度测定

两名经验丰富的正畸医师依据颈椎骨成熟指数(cervical vertebral maturation index, CVMI)^[3]确定所有样本的颈椎骨骨龄并作为参考标准。CVMI 将骨骼成熟度分为 6 期:起始期、加速期、过渡期、减速期、成熟期和结束期。如果两位正畸医师间判断存在分歧,则第三位正畸医师将对此样本的 CVMI 进行判断并达成一致同意。

1.3 颈椎三维形态参数的定义和测量

基于颈椎三维解剖结构分析的相关文献^[14-16],本研究定义了 21 个基本颈椎三维形态学量化参数(表 1、图 1),C2~C4 纳入的形态分析部位包括颈椎椎体、颈椎横突、颈椎棘突、颈椎椎板、颈椎椎弓根及颈椎关节突。将所有 CBCT 数据导入 Mimics 软件(version 21.0, Materialise, 比利时),使用“阈值分割”“区域生长”模块进行 C2~C4 的图像分割,其中阈值范围为 $327 \sim 4390$,并进一步使用“3D 模型生成”模块进行 C2~C4 颈椎的三维重建(图 2)。在所得各个独立的三维模型上对定义的三维形态学量化参数进行定点及测量,每次测量均在矢状位、冠状位和水平位上进行检查与确认。所有测量均由同一位研究者进行,重复 2 次,间隔为 1 个月。

表 1 颈椎三维形态测量项目及定义

Tab.1 Definitions of three-dimensional morphological parameters

名称		简写	定义
线性长度	椎体前缘高度	aVBH	椎体前表面上下缘中线垂直距离
	椎体后缘高度	pVBH	椎体后表面上下缘中线垂直距离
	椎体上缘长度	sVBL	椎体上表面前后缘中线前后距离
	椎体下缘长度	iVBL	椎体下表面前后缘中线前后距离
	椎体上缘宽度	sVBW	椎体上表面最大横向距离
	椎体下缘宽度	iVBW	椎体下表面最大横向距离
	椎体下缘表面距离	iVBSL	椎体下表面前后缘最外侧点之间曲线长度
	横突宽度	TPW	横突最大横向距离
	棘突长度	SPL	棘突前缘至最末端距离
	左/右侧椎弓根高度	r/IPH	左/右侧椎弓根上下缘最外侧直径
	双侧椎弓根距离	BPD	双侧椎弓根上表面中心点距离
	左/右侧椎板横向长度	r/ILTL	棘突与上关节面外侧缘沿左/右侧椎板上缘距离
	左/右侧椎板高度	r/ILH	左/右侧椎板上下缘中线垂直距离
	左/右关节突下表面宽度	r/liAPW	左/右关节突下表面最大横向距离
平均长度	椎体前后缘高度均值	apVBH	$(aVBH+pVBH)/2$
	椎体上下缘长度均值	siVBL	$(sVBL+iVBL)/2$
	椎体上下缘宽度均值	siVBW	$(sVBW+iVBW)/2$
	椎弓根左右高度均值	rIPH	$(rPH+IPH)/2$
	椎板左右横向长度均值	rLTL	$(rLTL+ILTL)/2$
	椎板左右高度均值	rLH	$(rLH+ILH)/2$
	关节突左右下表面宽度均值	riAPW	$(riAPW+liAPW)/2$

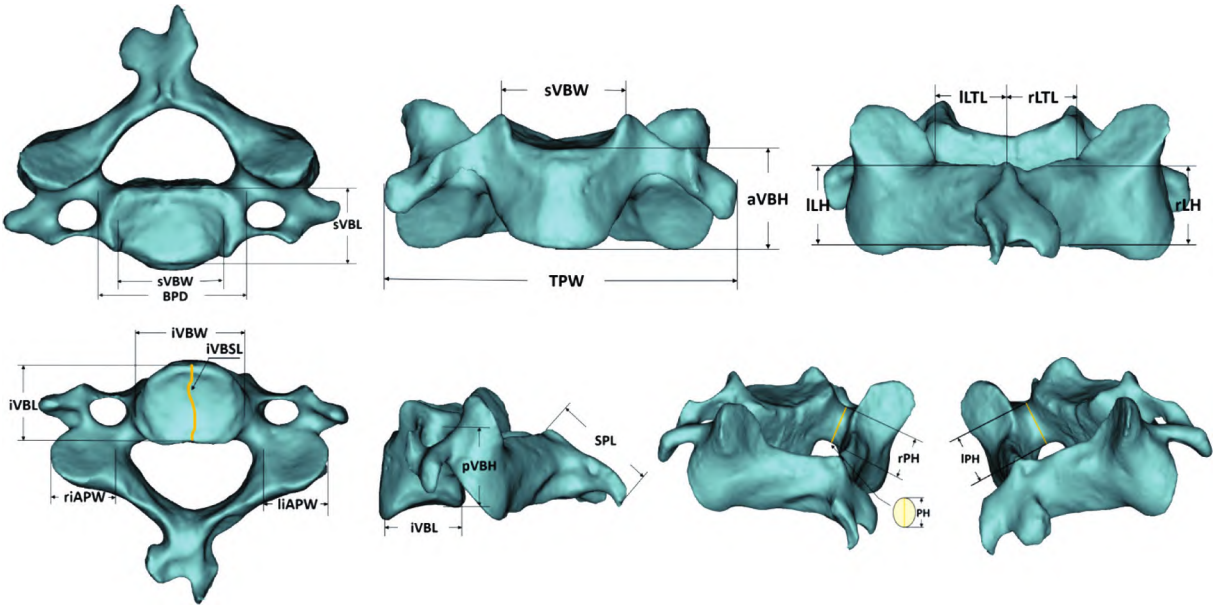


图 1 颈椎三维形态测量项目示意图

Fig.1 Illustration of three-dimensional morphological parameters

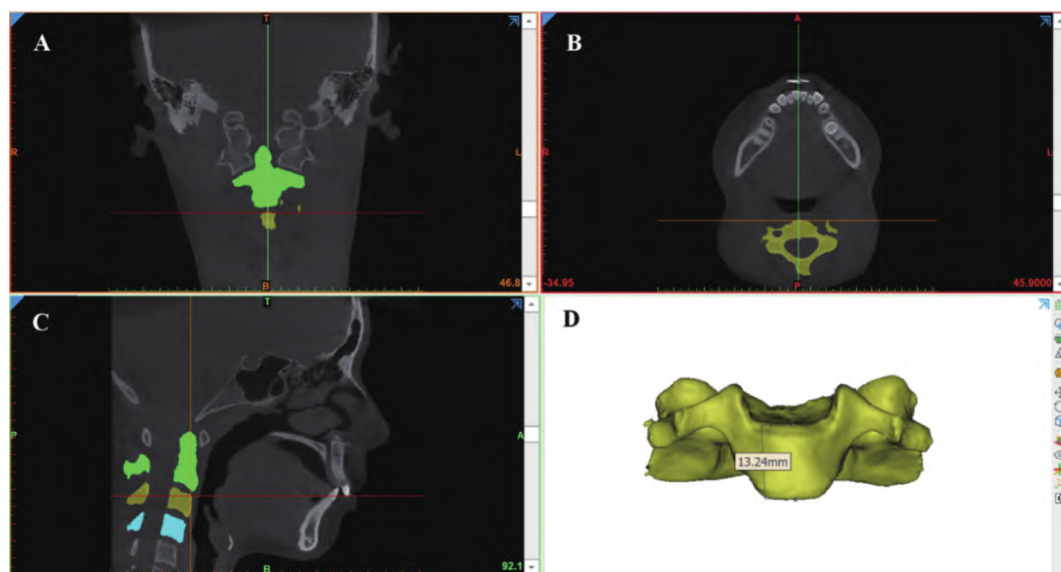
1.4 统计学分析

使用 SPSS 软件 (version 26.0, 美国) 进行统计分析, α 值设置为 0.05。计算 2 次颈椎参数测量值的组内相关系数 (intraclass correlation coefficient, ICC) 以评估研究者自身测量的可靠性。采用 Shapiro-Wilk 检验数据分布的正态性, 并依据正态性检验结果采用 Spearman 等级相关系数 (CC) 分析各

参数与 CVMI 的相关性。

1.5 多元线性回归模型的建立与验证

使用模型建立组的样本作为建立骨骼成熟度评估模型的数据来源。以颈椎骨成熟指数为因变量, 各颈椎三维形态参数标准化值为自变量, 应用多元线性逐步回归分析检验各参数对骨骼成熟度的影响 (进入水准 $\alpha=0.05$, 剔除水准 $\beta=0.10$) 并对参数进



A、B、C:冠状面、水平面和矢状面上 C2~C4 骨组织阈值分割及区域生长示意图;D:C3 三维模型示意图。

图 2 Mimics 软件测量过程示意图

Fig.2 Process of measurements using Mimics software

行筛选,建立评估颈椎骨成熟度回归模型。采用方差膨胀系数(variance inflation factor, VIF)进行最小二乘法回归分析以监测模型的多重共线性问题。

将模型验证组样本的颈椎三维形态学参数数据代入上述所得性别特异性回归模型,可得该样本采用模型评估的骨骼成熟度分期。应用配对样本 Wilcoxon 符号秩检验比较模型评估值与参考标准, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

根据公式(1)计算回归模型(A_m)的准确率,其中 n 表示样本量(女 41 例;男 40 例), q 为模型评估的骨骼成熟度分期与参考标准一致的个数。

$$A_m = q/n \times 100 \quad (1)$$

实验方法流程图如图 3 所示。

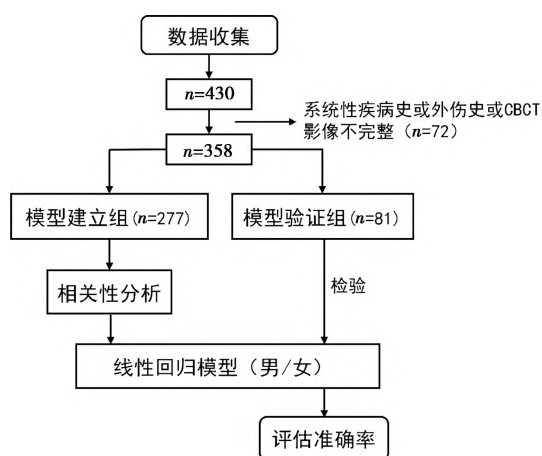


图 3 方法流程图

Fig.3 Flow chart of the present study

2 结果

2.1 参数变量分析

颈椎各参数 2 次测量值的 ICC 范围为 0.951 ~ 0.999, 表明研究者自身测量具有较高的可重复性。Spearman 秩相关系数分析结果显示颈椎各部位的三维形态变化与 CVMI 相关(表 2): 女性分析结果中, 共有 44 个参数具有显著相关性并纳入回归分析 ($P < 0.05$), 男性分析结果则显示共纳入 41 个参数。参数自变量的分析结果可见与颈椎椎体有关的参数与 CVMI 具有强相关性, 其相关性系数均超过 0.8。所有三维参数中椎体前后缘高度均值(apVBH)的相关性系数最高, 女性中数值为 0.907, 男性中数值为 0.924。C2~C4 的横突宽度(TPW)和棘突长度(SPL)均与 CVMI 显著相关($P < 0.05$), 椎板左右高度均值(rLH)同样也表现出显著形态学相关性。不同的是, 椎板左右横向长度均值(rLTL)的相关性结果表现出明显的性别差异, 其在男性中与 CVMI 无明显相关($P > 0.05$), 而在女性中相反($P < 0.05$)。参数的性别差异性同样也体现在 C2 下缘表面距离比值参数仅在与女性中表现出相关性($P < 0.05$)。双侧椎弓根距离(BPD)与 CVMI 的相关性与性别无关, 但仅表现在 C3、C4 中。

表 2 Spearman 相关系数分析结果
Tab.2 Results of Spearman's rank correlation coefficients

参数	相关系数		参数	相关系数		参数	相关系数		参数	相关系数	
	男性	女性		男性	女性		男性	女性		男性	女性
aVBH3	0.905 **	0.897 **	iVBW4	0.238 **	0.251 **	siVBW3	0.097	-0.148	aVBH4/iVBL4	0.810 **	0.849 **
aVBH4	0.886 **	0.885 **	TPW2	0.693 **	0.620 **	siVBW4	0.173	0.150	iVBSL2/iVBL2	0.057	0.285 **
pVBH3	0.911 **	0.880 **	TPW3	0.644 **	0.627 **	rLPH3	0.704 **	0.468 **	iVBSL3/iVBL3	0.392 **	0.258 **
pVBH4	0.872 **	0.890 **	TPW4	0.747 **	0.616 **	rLPH4	0.738 **	0.534 **	iVBSL4/iVBL4	0.216 *	-0.211 *
sVBL3	0.350 **	0.430 **	SPL2	0.659 **	0.432 **	rLTL2	0.140	0.243 **	rLPH3×rLH3	0.795 **	0.657 **
sVBL4	0.451 **	0.261 **	SPL3	0.543 **	0.691 **	rLTL3	0.123	0.368 **	rLPH4×rLH4	0.810 **	0.733 **
iVBL2	0.462 **	0.315 **	SPL4	0.351 **	0.588 **	rLTL4	0.111	0.301 **	rLH2×SPL2	0.717 **	0.575 **
iVBL3	0.519 **	0.528 **	BPD3	0.485 **	0.300 **	rLH2	0.587 **	0.532 **	rLH3×SPL3	0.691 **	0.750 **
iVBL4	0.566 **	0.515 **	BPD4	0.369 **	0.336 **	rLH3	0.757 **	0.684 **	rLH4×SPL4	0.642 **	0.705 **
sVBW3	0.007	-0.153	apVBH3	0.924 **	0.904 **	rLH4	0.782 **	0.760 **	TPW3/siVBW3	0.447 **	0.586 **
sVBW4	0.010	0.018	apVBH4	0.908 **	0.907 **	rliAPW3	0.441 **	0.484 **	TPW4/siVBW4	0.508 **	0.377 **
iVBW2	-0.064	-0.163	siVBL3	0.458 **	0.502 **	rliAPW4	0.398 **	0.444 **	iVBL2/iVBL3	-0.304 **	-0.113
iVBW3	0.133	-0.020	siVBL4	0.527 **	0.427 **	aVBH3/iVBL3	0.860 **	0.862 **			

** : $P<0.01$; * : $P<0.05$ 。

2.2 模型建立

由于多重共线性影响,椎体前后缘高度(aVBH,pVBH)没有被纳入回归分析。男性和女性均各有6个变量进入各自回归模型($P<0.05$):男性模型中自变量参数为apVBH3、rliAPW3、TPW2、iVBW4、BPD3和iVBSL4/iVBL4,女性为apVBH3、rLH2×SPL2、rLTL3、aVBH4/iVBL4、iVBSL4/iVBL4和BPD3(表3、图4)。其中apVBH3、BPD3和iVBSL4/iVBL4为两个模型中的相同参数。女性和男性模型的调整 R^2 分别为0.902和0.899。VIF结果

($VIF<10$)表明模型自变量之间不存在显著共线性。建立的颈椎骨骼成熟度定量评估模型如下公式(2)及公式(3)所示,其中 Y_m 表示男性模型的CVMI数值, Y_f 表示女性模型的CVMI数值。

颈椎骨成熟度分期(cervical vertebral maturational stage, CVMS)根据上述回归模型所得CVMI数值由“误差平方和最小”原则确定其分期范围^[17],最终结果如公式(4)及公式(5)所示,其中 $CVMS_m$ 表示男性模型的颈椎骨成熟度分期, $CVMS_f$ 表示女性模型的颈椎骨成熟度分期。

$$Y_m = 3.445 + 1.536 \times \text{apVBH3} - 0.307 \times \text{rliAPW3} + 0.2 \times \text{TPW2} - 0.224 \times \text{iVBW4} + 0.167 \times \text{BPD3} + 0.152 \times \frac{\text{iVBSL4}}{\text{iVBL4}} \quad (2)$$

$$Y_f = 3.6 + 0.926 \times \text{apVBH3} + 0.328 \times \text{rLH2} \times \text{SPL2} + 0.226 \times \text{rLTL3} + 0.41 \times \frac{\text{aVBH4}}{\text{iVBL4}} - 0.17 \times \frac{\text{iVBSL4}}{\text{iVBL4}} - 0.164 \times \text{BPD3} \quad (3)$$

$$CVMS_m = \begin{cases} \text{I}, & Y_m \in (0, 1.69) \\ \text{II}, & Y_m \in [1.69, 2.59) \\ \text{III}, & Y_m \in [2.59, 3.58) \\ \text{IV}, & Y_m \in [3.58, 4.53) \\ \text{V}, & Y_m \in [4.53, 5.64) \\ \text{VI}, & Y_m \in [5.64, 7) \end{cases} \quad (4)$$

$$CVMS_f = \begin{cases} \text{I}, & Y_f \in (0, 1.50) \\ \text{II}, & Y_f \in [1.50, 2.66) \\ \text{III}, & Y_f \in [2.66, 3.57) \\ \text{IV}, & Y_f \in [3.57, 4.48) \\ \text{V}, & Y_f \in [4.48, 5.50) \\ \text{VI}, & Y_f \in [5.50, 7) \end{cases} \quad (5)$$

2.3 模型检验

依据模型验证组样本的颈椎三维形态学参数数据得到其对应的模型评估的CVMI,进一步根据数值所在范围确定该样本对应的颈椎骨成熟度分期。配对样本Wilcoxon符号秩检验比较模型所得颈椎

骨成熟度分期与参考标准,结果显示建立的回归模型评估结果与参考标准间差异无统计学意义(男性: $P=0.983$,女性: $P=0.406$),表明两个模型的可信度较好。计算得回归模型的准确率为男性85.0%、女性85.4%。

表 3 颈椎骨成熟指数的多元逐步线性回归结果

Tab.3 Results of stepwise multivariable linear regression of CVMi

模型	常量与自变量	偏回归系数	标准误	<i>t</i>	<i>P</i>	调整 R^2	方差膨胀系数
男性	常量	3.445	0.052	66.815	0.000	0.899	—
	apVBH3	1.536	0.074	20.899	0.000		2.151
	riAPW3	-0.307	0.066	-4.673	0.000		1.679
	TPW2	0.200	0.089	2.239	0.027		3.141
	iVBW4	-0.224	0.057	-3.922	0.000		1.285
	BPD3	0.167	0.069	2.413	0.018		1.974
	iVBSL4/iVBL4	0.152	0.067	2.260	0.026		1.029
女性	常量	3.600	0.047	77.038	0.000	0.902	—
	apVBH3	0.926	0.097	9.577	0.000		4.521
	rLH2×SPL2	0.328	0.050	6.516	0.000		1.246
	rLTL3	0.226	0.052	4.350	0.000		1.252
	aVBH4/iVBL4	0.410	0.090	4.572	0.000		3.676
	iVBSL4/iVBL4	-0.170	0.051	-3.299	0.001		1.167
	BPD3	-0.164	0.053	-3.123	0.002		1.284

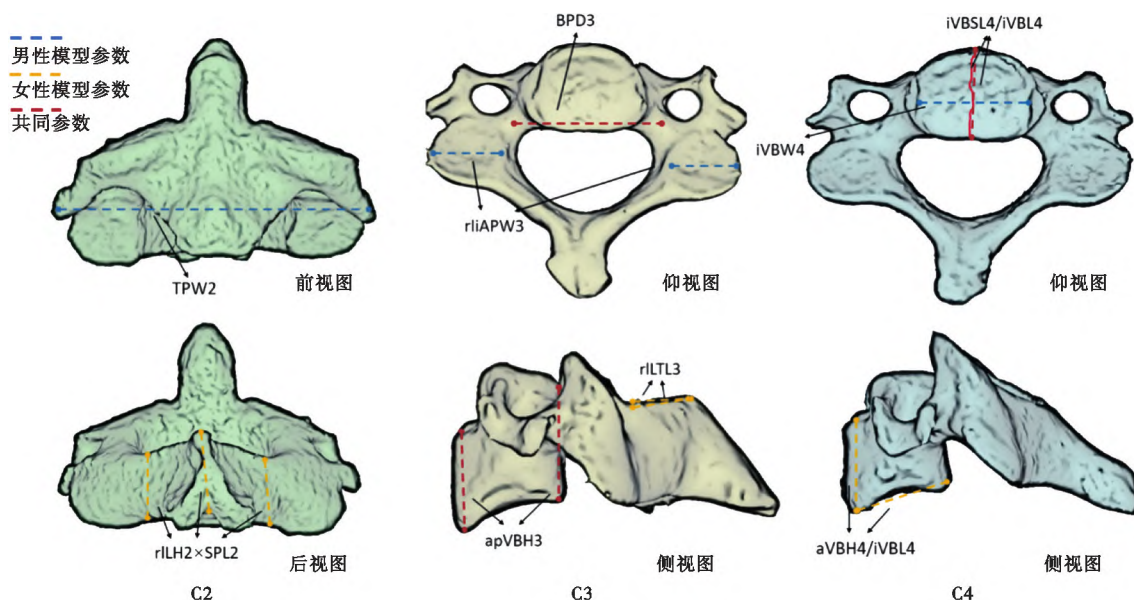


图 4 颈椎骨成熟度评估模型包含的三维参数示意图

Fig.4 Three-dimensional parameters in regression models

3 讨论

颈椎骨发育成熟过程呈现三维方向上的生长变化^[9],颈椎形态的影像学改变是骨骼成熟度评价的有用指标^[4-5]。以往研究探究了颈椎椎体矢状面向上的形态变化与颈椎骨成熟度的相关性^[6-8],但对于除椎体外的其余部位和发生在冠状向、水平向的生长变化未考虑在内。同时对于经验不足的检查者来说,二维影像的成像误差影响了对骨骼成熟度的准确判断^[18]。CBCT的成像精准性和图像重建能力^[19]为深入探究三维方向的形态分析创造了更多可能。因此,本研究中基于CBCT影像,使用颈椎三维形态定量参数对颈椎骨发育成熟过程进行评估与测量,将颈椎椎体、颈椎横突、颈椎棘突、颈椎椎板、颈椎椎弓根及颈椎关节突部位均纳入分析,深入探

究了颈椎三维形态学特征与骨骼成熟度的相关性,并依此运用多元线性回归模型技术建立临床可靠的颈椎骨成熟度评估模型。

在相关性研究结果中发现,椎体高度与骨骼成熟度之间具有强相关性,与以往二维研究的结论一致^[8,20],验证了三维形态分析方法的可靠性。这种三维方向上的高度测量较二维避免了椎体上缘生长弯曲的影响,所得参数结果更加符合实际。本研究进一步发现由椎体下缘表面距离与椎体下缘长度比值表示的C2和C4椎体下缘凹陷程度的形态变化具有显著敏感性。有学者认为颈椎下缘凹陷程度是评估骨骼成熟度的最佳形态学参数,但生长发育是一个持续的过程,对于不同阶段的临界情况很容易混淆^[21-22]。因此,本研究中通过三维参数对椎体下缘实际凹陷程度进行量化,可作为二维研究的进一

步补充,从而帮助有效识别不同发育关键阶段,可解决评估者经验不足的问题。同时我们注意到,仅在三维视图中可见的椎体下缘宽度(iVBW)参数结果中,仅 C4 椎体下缘宽度具有相关性,提示椎体宽度生长可能在生长发育的早期阶段已基本完成^[23]。

在除椎体外的其余颈椎三维形态学参数中,本研究新发现颈椎横突、棘突、椎板、椎弓根与下关节突的生长反映了颈椎骨的发育成熟,其三维形态学变化均与骨骼成熟度相关。其中横突宽度与关节突下表面宽度均仅在男性中与 CVMI 呈中度相关。两者均被纳入男性最终回归模型,是男性评估颈椎骨成熟度的关键参数。而在女性的参数分析结果中,棘突长度、椎板高度和椎板横向长度对评估颈椎骨成熟度至关重要。这些差异验证了女性椎体软骨发育闭合和发育完成相对更早这一观点^[24],也更加说明了建立性别特异性评估模型的重要性。可进行进一步深入的三维形态学研究和纵向研究来验证新的颈椎三维形态参数对于生长发育评估的贡献。

本研究建立的男性及女性回归模型结果共包含 9 个参数自变量,其中 apVBH3, BPD3, iVBSL4/iVBL4 为男性和女性模型共同参数, rliAPW3, TPW2, iVBW4 为男性模型性别特异性参数, rLH2×SPL2, rLTL3, aVBH4/iVBL4 为女性模型性别特异性参数。本研究是基于颈椎三维形态学的研究方法,与以往使用二维图像的研究模型相比存在较大不同,但此次研究的重点不在于归纳或分析不同方法之间的优劣或可靠性差异,而是基于三维形态研究的准确性和全面性优势来探究新的三维颈椎骨成熟度评估方法并建立相应回归模型。由于颈椎形态和大小的性别差异会导致检查者对患者骨成熟度评估的可靠性较差^[25-27],因而三维形态学参数有助于从与以往不同的视角性别特异性地显示其与骨骼成熟度的关联,并有助于精确量化分析。此外,评估模型验证中配对样本 Wilcoxon 符号秩检验结果和准确率结果表明了所得回归模型的临床可信度和应用可靠性。

随着三维成像技术的成熟和影像辐射剂量的降低,CBCT 的临床应用可为三维形态分析和外部验证提供大量数据^[28],样本数据的增加有利于进一步提高分析的精准性。因此,本研究具有一定前瞻性。且借助于智能模型,可使得骨龄评估结果更加准确客观,不依赖于医师经验水平和减少患者性别差异影响,促进精准医疗^[29]。需要注意的是,本研究并不表示推荐将 CBCT 仅用于颈椎骨成熟度评估,而是对于已基于临床适应证采集了相关影像资料的患

者,此评估模型可有效辅助医生进行骨龄判断。

本研究局限性在于由于研究对象是中国青少年人群,而生长发育存在种族差异^[30],所建立模型的外部适用性需要进一步验证。同时可进一步深入探究本研究中显示出的性别差异并完善针对不同性别的临床治疗指南。

综上所述,研究表明颈椎椎体、横突、棘突、椎板、椎弓根与关节突的三维形态变化与骨骼成熟度相关,建立的回归模型具有良好的可信度和较高的准确性,所得到的评估结果与专家医师的一致性较高,有助于减少对专业经验的依赖。除口腔正畸学领域外,本研究所用方法及研究发现还可为其他领域,如脊椎外科、法医学、儿童内分泌学等,提供临床帮助与新的启发。

[参 考 文 献]

- [1] Lee YS, Choi SH, Kim KH, *et al.* Evaluation of skeletal maturity in the cervical vertebrae and hand-wrist in relation to vertical facial types[J]. *Korean J Orthod*, 2019, 49(5):319-325.
- [2] Baccetti T, Franchi L, Jr McNamara JA. An improved version of the cervical vertebral maturation(CVM) method for the assessment of mandibular growth[J]. *Angle Orthod*, 2002, 72(4):316-323.
- [3] Hassel B, Farman AG. Skeletal maturation evaluation using cervical vertebrae[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 1995, 107(1):58-66.
- [4] Cericato GO, Bittencourt MAV, Paranhos LR. Validity of the assessment method of skeletal maturation by cervical vertebrae: A systematic review and meta-analysis[J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2015, 44(4):20140270.
- [5] Ferrillo M, Curci C, Rocuzzo A, *et al.* Reliability of cervical vertebral maturation compared to hand-wrist for skeletal maturation assessment in growing subjects: A systematic review[J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2021, 34(6):925-936.
- [6] Byun BR, Kim YI, Yamaguchi T, *et al.* Quantitative assessment of cervical vertebral maturation using cone beam computed tomography in Korean girls[J]. *Comput Math Methods Med*, 2015, 2015: 405912.
- [7] Byun BR, Kim YI, Yamaguchi T, *et al.* Quantitative skeletal maturation estimation using cone-beam computed tomography-generated cervical vertebral images: A pilot study in 5-to 18-year-old Japanese children[J]. *Clin Oral Investig*, 2015, 19(8):2133-2140.
- [8] Chen LL, Xu TM, Jiang JH, *et al.* Quantitative cervical vertebral maturation assessment in adolescents with normal occlusion: A mixed longitudinal study[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2008, 134(6):720. e1-720720. e7;discussion 720-721.
- [9] Altan M, NebioğluDalcı Ö, İşeri H. Growth of the cervical vertebrae in girls from 8 to 17 years. A longitudinal study[J]. *Eur J Orthod*, 2012, 34(3):327-334.
- [10] Echevarría-Sánchez G, Arriola-Guillén LE, Malpartida-Carrillo V,

- et al.* Reliability of cephalograms derived of cone beam computed tomography versus lateral cephalograms to estimate cervical vertebrae maturity in a Peruvian population: A retrospective study [J]. *Int Orthod*, 2020, 18(2):258-265.
- [11] Pauwels R, Araki K, Siewerdsen JH, *et al.* Technical aspects of dental CBCT: State of the art[J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2015, 44(1):20140224.
- [12] Gandini P, Mancini M, Andreani F. A comparison of hand-wrist bone and cervical vertebral analyses in measuring skeletal maturation[J]. *Angle Orthod*, 2006, 76(6):984-989.
- [13] Khanagar SB, Al-Ehaideb A, Maganur PC, *et al.* Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry-A systematic review[J]. *J Dent Sci*, 2021, 16(1):508-522.
- [14] Ezra D, Masharawi Y, Salame K, *et al.* Demographic aspects in cervical vertebral bodies' size and shape (C3-C7): A skeletal study[J]. *Spine J*, 2017, 17(1):135-142.
- [15] Saluja S, Patil S, Vasudeva N. Morphometric analysis of sub-axial cervical vertebrae and its surgical implications[J]. *J Clin Diagn Res*, 2015, 9(11):AC01-AC04.
- [16] Panjabi MM, Duranceau J, Goel V, *et al.* Cervical human vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy of the middle and lower regions[J]. *Spine*, 1991, 16(8):861-869.
- [17] Lazakidou AA. Handbook of research on informatics in healthcare and biomedicine[M]. Pennsylvania IGI Global, 2006.
- [18] Gabriel DB, Southard KA, Qian F, *et al.* Cervical vertebrae maturation method: Poor reproducibility[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2009, 136(4):478. e1-478. e7;discussion 478-480.
- [19] Dai XB, Bai JN, Liu TL, *et al.* Limited-view cone-beam CT reconstruction based on an adversarial autoencoder network with joint loss[J]. *IEEE Access*, 2018, 7: 7104-7116.
- [20] Mito T, Sato K, Mitani H. Cervical vertebral bone age in girls[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2002, 122(4):380-385.
- [21] San Román P, Palma JC, Oteo MD, *et al.* Skeletal maturation determined by cervical vertebrae development[J]. *Eur J Orthod*, 2002, 24(3):303-311.
- [22] McNamara JA Jr, Franchi L. The cervical vertebral maturation method: A user's guide[J]. *Angle Orthod*, 2018, 88(2):133-143.
- [23] Wang JC, Nuccion SL, Feighan JE, *et al.* Growth and development of the pediatric cervical spine documented radiographically[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2001, 83(8):1212-1218.
- [24] Miller CA, Hwang SJ, Cotter MM, *et al.* Developmental morphology of the cervical vertebrae and the emergence of sexual dimorphism in size and shape: A computed tomography study[J]. *Anat Rec*, 2021, 304(8):1692-1708.
- [25] Miller CA, Hwang SJ, Cotter MM, *et al.* Cervical vertebral body growth and emergence of sexual dimorphism: A developmental study using computed tomography[J]. *J Anat*, 2019, 234(6):764-777.
- [26] Gray S, Bennani H, Kieser JA, *et al.* Morphometric analysis of cervical vertebrae in relation to mandibular growth[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2016, 149(1):92-98.
- [27] Nestman TS, Marshall SD, Qian F, *et al.* Cervical vertebrae maturation method morphologic criteria: Poor reproducibility[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2011, 140(2):182-188.
- [28] Jain S, Choudhary K, Nagi R, *et al.* New evolution of cone-beam computed tomography in dentistry: Combining digital technologies[J]. *Imaging Sci Dent*, 2019, 49(3):179-190.
- [29] Filipp FV. Opportunities for artificial intelligence in advancing precision medicine[J]. *Curr Genet Med Rep*, 2019, 7(4):208-213.
- [30] Zhang AF, Sayre JW, Vachon L, *et al.* Racial differences in growth patterns of children assessed on the basis of bone age[J]. *Radiology*, 2009, 250(1):228-235.

(收稿日期:2023-12-01)

(本文编辑:曹 丹)