

• 基础研究 • doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.14.002

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240412.1825.008\(2024-04-12\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240412.1825.008(2024-04-12))

绵羊腰椎 CT 纹理参数与骨质疏松关系的体外实验研究^{*}

高玉杰,张伟,姜晓彤,司旭,李雨奇[△]
(赤峰市医院核医学科,内蒙古赤峰 024000)

[摘要] 目的 建立绵羊体外腰椎骨质疏松模型,寻找具有鉴别意义的纹理参数并与双能 X 射线吸收法(DXA)测量的骨密度、骨灰分密度及骨灰度建立回归公式联系。方法 采用乙二胺四乙酸二钠(EDTA-Na₂)溶液(0.4916 mmol/L)浸泡法,对 120 例绵羊腰椎 L₁~L₃ 三联椎体进行浸泡脱钙,去除肌肉及附件骨,随机分成 4 组(A、B、C、D 组),每组 30 例,室温下浸入 10% 甲醛溶液中 24 h 防腐。A、B、C、D 组分别浸入制备好的 EDTA-Na₂ 溶液中脱钙 0、4、9、15 d 制备体外骨质疏松模型。对上述腰椎进行薄层 CT 扫描和 DXA 骨密度测量,并测量每个椎体的体积和椎体干重,之后于马弗炉中 1100 ℃恒温煅烧 6 h,测量骨灰分重量,计算骨灰分密度和骨灰度。采用 MaZda 纹理分析软件对上述 CT 图像椎体骨松质进行纹理分析,分别采用 Fisher 系数、分类错误概率联合平均相关系数、交互信息及三者的联合方法(FPM)进行纹理特征筛选,采用原始数据分析(RDA)、主成分分析(PCA)、线性分类分析(LDA)和非线性分类分析(NDA)对 4 组骨密度进行分类分析。对上述方法筛选的纹理参数分别与骨密度、骨灰度和骨灰分密度行相关分析,寻找与其相关性最强的纹理参数。以相关性最强的纹理参数为自变量,以骨密度、骨灰度和骨灰分密度为因变量进行一元和多元线性回归分析,获得回归方程。结果 随着脱钙时间的延长,CT 图像显示骨皮质逐渐变薄,骨松质密度减低,骨小梁变稀疏。FPM 结合 NDA 的鉴别能力最强,错判率仅为 2.5%。其中灰度共生矩阵中的对比度(Contrast)与骨灰度呈强负相关($r=-0.938$)。灰度共生矩阵中的熵(Entropy)与骨灰分密度($r=-0.927$)和骨密度($r=-0.896$)呈强负相关。一元线性回归方程分别表示为:骨灰度 = 0.692 - 0.002 × Contrast, 骨灰分密度 = 0.802 - 0.121 × Entropy, 骨密度 = 1.301 - 0.200 × Entropy。结论 绵羊腰椎 CT 薄层图像的部分纹理参数与骨密度相关参数间存在明显相关性,可以建立回归公式联系。

[关键词] 纹理分析;骨质疏松;回归方程;绵羊;参数

[中图法分类号] R318

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2024)14-2085-07

In vitro experimental study on relationship between bone texture parameters in sheep lumbar CT and osteoporosis^{*}

GAO Yujie, ZHANG Wei, JIANG Xiaotong, SI Xu, LI Yuqi[△]
(Department of Nuclear Medicine, Chifeng Municipal Hospital,
Chifeng, Inner Mongolia 024000, China)

[Abstract] **Objective** To establish the sheep model of lumbar spine osteoporosis in vitro, and to search the texture parameters with identification significance and establish its regression formula relation with DXA measured bone mineral density, bone ash density and bone ash degree. **Methods** The L₁—L₃ trigeminy vertebral body in 120 sheep conducted the immersion and decalcification by EDTA-Na₂ solution (0.4916 mmol/L) immersion method, the muscles and attachment bone were removed. Then they were randomly divided into 4 groups (group A, B, C and D), 30 cases in each group. They were immersed in 10% formaldehyde solution for anticorrosion. The group A, B, C and D were immersed in the prepared EDTA-Na₂ solution for decalcification 0, 4, 9, 15 d to prepare the in vitro osteoporosis models. Thin-slice CT scan and DXA bone density measurement on the above-mentioned lumbar vertebrae were performed, and the volume and dry weight of each vertebral body were measured, and then calcined at a constant temperature of 1100 ℃ in a muffle furnace for 6 h to measure the weight of ashes. The bone ash weight, bone ash density and bone ash degree were measured. The MaZda texture analysis software was used to conduct the texture analysis on the cancellous substance of the vertebral body in the above CT images, and the texture features were screened by the Fisher coefficient, classi-

* 基金项目:内蒙古自治区卫生健康委员会医疗卫生科技计划项目(202201545)。 △ 通信作者,E-mail:13722161932@139.com。

fication error probability combined with average correlation coefficient, interactive information and the three combined method. The 4 groups of bone mineral density conducted the classification analysis by the original data analysis (ODA), principal component analysis (PCA), linear discriminant analysis (LDA) and nonlinear discriminant analysis (NDA). The correlation analysis between the texture parameters screened by the above method with the bone density, bone grey degree and bone ash density for searching the texture parameters with strongest correlation. The texture parameters with strongest correlation served as the independent variables, the bone density, bone grey degree and bone ash density as the dependent variables, and the unitary and binary linear regression analyses were performed for obtaining the regression equation. **Results** With the prolongation of decalcification time, the CT images showed that the bone cortex gradually thinned, the cancellous bone density was decreased, and the trabecular bone became sparse. The identification ability of FPM combined with NDA was strongest, and the false judgment rate was only 2.5%. Among them, the contrast in the gray symbiosis matrix had strongly negative correlation with the bone gray degree ($r = -0.938$). The entropy in the gray co-occurrence matrix had strongly negative correlation with the bone ash density and bone mineral density ($r = -0.927, -0.896$). The unitary linear regression equation was expressed as bone grey degree = $0.692 - 0.002 \times \text{Contrast}$, bone ash density = $0.802 - 0.121 \times \text{Entropy}$, bone density = $1.301 - 0.200 \times \text{Entropy}$. **Conclusion** The significant correlation exists between some texture parameters and bone mineral density related parameters in thin slice CT images of sheep lumbar spine, which could establish a regression formula relationship.

[Key words] texture analysis; osteoporosis; regression equations; sheep; parameters

骨质疏松症被世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 定义为一种系统性骨骼疾病, 主要表现为骨量减少和微结构恶化, 骨骼脆弱性和骨折风险增加, 该定义同样重视骨骼的重量和质量^[1]。纹理分析是目前用于骨质疏松症研究的主要手段, 利用 X 射线、CT、MRI 等成像技术产生的图像, 获取丰富的纹理参数, 是一种无创的研究方法。CHAPPARD 等^[2]、LESPESSAILLES 等^[3] 利用 X 射线和 CT 图像, 展示了纹理分析在确定骨骼脆性、质量和微结构方面的出色效果, 以及纹理分析在临床骨质疏松症诊断方面的能力。本研究预通过建立绵羊腰椎三联椎体骨质疏松体外模型, 分析薄层 CT 腰椎骨的 MaZda 纹理, 筛选能够反映骨质疏松的相关纹理参数, 并与实验测量的骨质疏松参数建立回归方程联系, 以弥补双能 X 射线吸收法 (dual-emission X-ray absorptiometry, DXA) 骨密度测量对早期骨质疏松诊断灵敏度低, 并受肥胖、脊柱侧弯、骨质增生和血管钙化等因素影响的不足, 探讨腰椎 CT 纹理参数分析对骨质疏松早期诊断的可行性。

1 材料与方法

1.1 材料

收集 1.5 岁龄新鲜雄性绵羊 (小尾寒羊, 体重 50~60 kg, 体长 1.2 m, 身高 70 cm) L₁~L₃ 腰椎三联椎体共 120 例, 除去椎体周围的肌肉及附件骨, 保留椎间盘及周围纤维连接, 大量清水冲洗后备用。本研究动物实验过程遵照我国实验动物相关法律法规条例要求进行。

1.2 仪器与试剂

实验仪器: (1) 64 排螺旋 CT (Siemens Biograph mCT, 德国西门子公司); (2) 温控式马弗炉 (SX2-4-10A, 上海皓钛机械制造有限公司); (3) 电热鼓风干燥箱 (XY-GZL-400B, 上海昕仪器仪表有限公司); (4) DXA 骨密度仪 (Medlink MEDIX-90, 法国奥斯托公司); (5) 全自动小型锯骨机 (J120, 浙江丽水万友机械制造有限公司); (6) 电子天平 (BSM-120.4, 上海卓精电子科技有限公司)。试剂药品包括乙二胺四乙酸二钠 (EDTA-Na₂)、氢氧化钠、10% 甲醛溶液, 配置成 0.491 6 mmol/L 的 EDTA-Na₂ 溶液 (pH 值 ≈ 7)。

1.3 方法

1.3.1 实验方案

将 120 个绵羊腰椎三联椎体随机分成 4 组 (A、B、C、D 组), 每组 30 个, 上述椎体均在室温下浸入 10% 甲醛溶液中 24 h 以防止腐败, 然后将 B、C、D 组椎体浸入上述制备好的 EDTA-Na₂ 溶液 (0.491 6 mmol/L) 中脱钙, 对 B、C、D 组标本分别于浸泡第 4、9、15 天进行薄层高分辨率 CT (层厚 0.625 mm) 扫描及 DXA 骨密度测量。DXA 骨密度测量利用 3 块约 6 cm 厚猪肚腹肉作为模拟体模, 上面 2 块, 下面 1 块, 绵羊腰椎骨夹于其中进行测量。骨灰化测定: (1) 根据阿基米德定律, 各组标本采用酸式滴定管分别精确测量每个椎体的体积; (2) 将椎体放入恒温干燥箱, 105 °C 干燥 1 h 后秤干重; (3) 将处理好的椎体分别放置于坩埚中, 每个椎体 1 个坩埚, 每个坩埚均做好标记, 然后将坩埚放置于马弗炉中 1100 °C 恒温煅烧 6 h, 再将完全灰化的每一块椎骨的骨灰迅速放入干燥箱内进行冷却, 装入做好标记的小塑料袋中, 用精密电子天平称

重,得出灰分重量(骨矿盐质量);(4)计算骨灰分密度(骨矿盐密度)和骨灰度,骨灰分密度=骨灰分重量/椎体体积,骨灰度=骨灰分重量/椎体干重。

1.3.2 纹理分析及特征筛选

每组椎体 CT 扫描图像均以 DICOM 格式导出至电脑,采用开源纹理分析软件 MaZda4.6 分别对每个椎体骨松质进行纹理分析。选择椎体的中心位置,尽量避开血管沟,用直径为 1 cm 的球形,球形壁不接触骨皮质,手动勾画感兴趣区(region of interest, ROI),分别采用 Fisher 系数、分类错误概率联合平均相关系数(classification error probability combined with average correlation coefficients, POE+ACC)、交互信息(mutual information, MI) 及三者的联合方法(Fisher+POE+ACC+MI, FPM),筛选具有鉴别 4 组意义的纹理特征,共 200 余种纹理特征。采用 MaZda4.6 自带的 B11 软件对上述筛选的纹理特征进行原始数据分析(raw data analysis, RDA)、主成分分析(principal component analysis, PCA)、线性分类分析(linear discriminant analysis, LDA) 和非线性分类分析(nonlinear discriminant analysis, NDA)。对 4 组浸泡时间不同的骨密度进行鉴别,以错判率(mis-

classified rate, MCR) 评价其鉴别能力。

1.4 统计学处理

采用 SPSS22.0 软件进行数据处理。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用单因素方差分析。计数资料以例数或百分比表示。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。对于上述方法筛选的具有鉴别意义的 CT 纹理参数,分别与骨密度、骨灰度和骨灰分密度进行 Spearman 相关分析,寻找与其相关性最强的纹理参数。以相关性最强的纹理参数为自变量,以骨密度、骨灰度和骨灰分密度为因变量进行一元或多元线性回归分析。

2 结 果

2.1 4 组椎体组间各测量参数比较

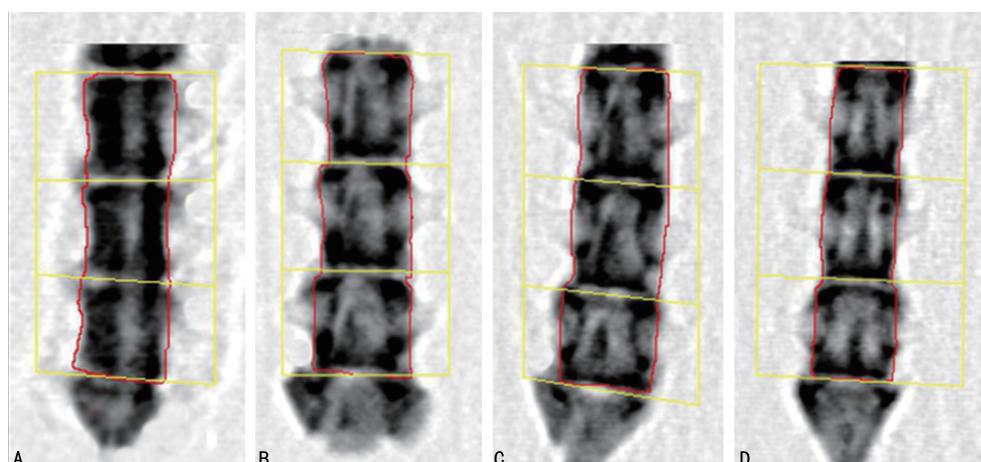
4 组间椎体体积比较差异无统计学意义($P > 0.05$);椎体干重 A、B 组间比较差异无统计学意义($P = 0.673$),其余组间比较差异有统计学意义($P < 0.05$),见表 1。4 组羊脊骨对应的骨密度,见图 1。

2.2 4 组羊脊骨 CT 扫描三维重建情况比较

随着脱钙时间的延长,CT 三维重建图像可见骨皮质逐渐变薄及不光滑,薄层轴位图像可见骨松质密度减低,其内骨小梁变稀疏,见图 2。

表 1 4 组椎体组间各测量参数比较($\bar{x} \pm s$)

组别	椎体体积(cm^3)	椎体干重(g)	骨灰分重量(g)	骨灰度	骨灰分密度	骨密度(g/cm^2)
A 组	103.55±7.15	104.61±7.73	67.87±4.96	0.649±0.007	0.656±0.219	1.095±0.064
B 组	107.29±7.48	105.53±6.48	61.89±3.66	0.587±0.005	0.578±0.028	0.903±0.062
C 组	107.88±8.65	99.21±9.46	52.96±4.84	0.534±0.007	0.491±0.023	0.741±0.046
D 组	104.71±7.72	93.95±9.60	42.72±4.17	0.455±0.010	0.408±0.026	0.686±0.051
F	2.118	12.184	183.148	3.292.631	563.184	322.061
P	0.102	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001



A:A 组;B:B 组;C:C 组;D:D 组。

图 1 4 组羊脊骨骨密度测量图

2.3 不同纹理特征筛选方法结合数据分析方法鉴别骨密度的 MCR 比较

FPM 结合 NDA 的 MCR 最小(2.5%),见表 2。

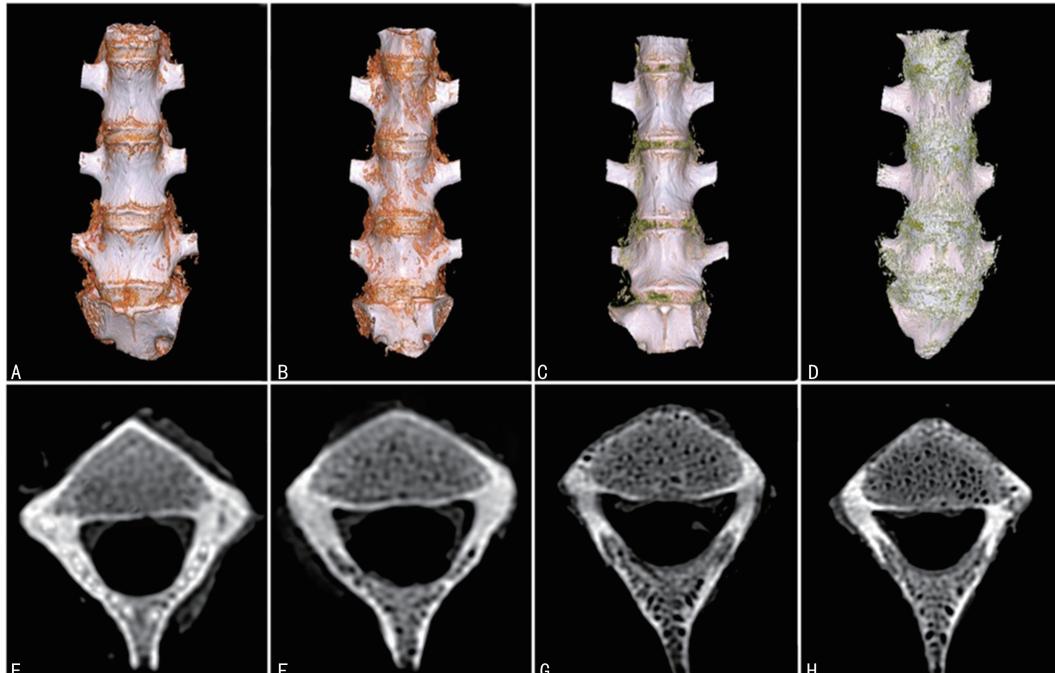
2.4 骨密度相关参数与纹理参数相关性强的前 6 位

相关系数

对 2.3 中采用 FPM 联合 NDA 筛选出的 30 个 CT 图像纹理特征参数分别与对应椎体的骨灰度、骨灰分密度及骨密度进行 Spearman 相关分析。灰度共生矩阵中的对比度(Contrast)与骨灰度呈强负相关($P<0.05$)，灰度共生矩阵中的熵(Entropy)与骨灰分密度和骨密度均呈强负相关($P<0.05$)，与 3D 方差(Variance 3D)均呈负相关($P<0.05$)；骨密度相关参数与灰度共生矩阵中的角秒矩(angular second moment, AngScMom)和逆差矩(inverse difference moment, InvDfMom)及与游程矩阵中的行程长度不均匀性(run length nonuniformity, RLNonUni)均呈正相关($P<0.05$)，见表 3。

2.5 骨灰度、骨灰分密度和骨密度线性回归分析

骨灰度与 Contrast 行一元线性回归分析, $R^2=0.909$, 调整后的 $R^2=0.908$, 回归模型差异有统计学意义 [$F(1,118)=1182.223, P<0.001$]。回归方程: 骨灰度 = $0.692 - 0.002 \times \text{Contrast}$, 拟合直线见图 3A。骨灰分密度与 Entropy 行一元线性回归分析, $R^2=0.882$, 调整后的 $R^2=0.881$, 回归模型差异有统计学意义 [$F(1,118)=882.652, P<0.001$]。回归方程: 骨灰分密度 = $0.802 - 0.121 \times \text{Entropy}$, 拟合直线见图 3B。骨密度与 Entropy 行一元线性回归分析, $R^2=0.780$, 调整后的 $R^2=0.778$, 回归模型差异有统计学意义 [$F(1,118)=418.022, P<0.001$]。回归方程: 骨密度 = $1.301 - 0.200 \times \text{Entropy}$, 拟合直线见图 3C。



A: A 组三维重建图; B: B 组三维重建图; C: C 组三维重建图; D: D 组三维重建图; E: A 组轴位图; F: B 组轴位图; G: C 组轴位图; H: D 组轴位图。

图 2 4 组羊脊骨 CT 扫描三维重建图及对应的轴位图

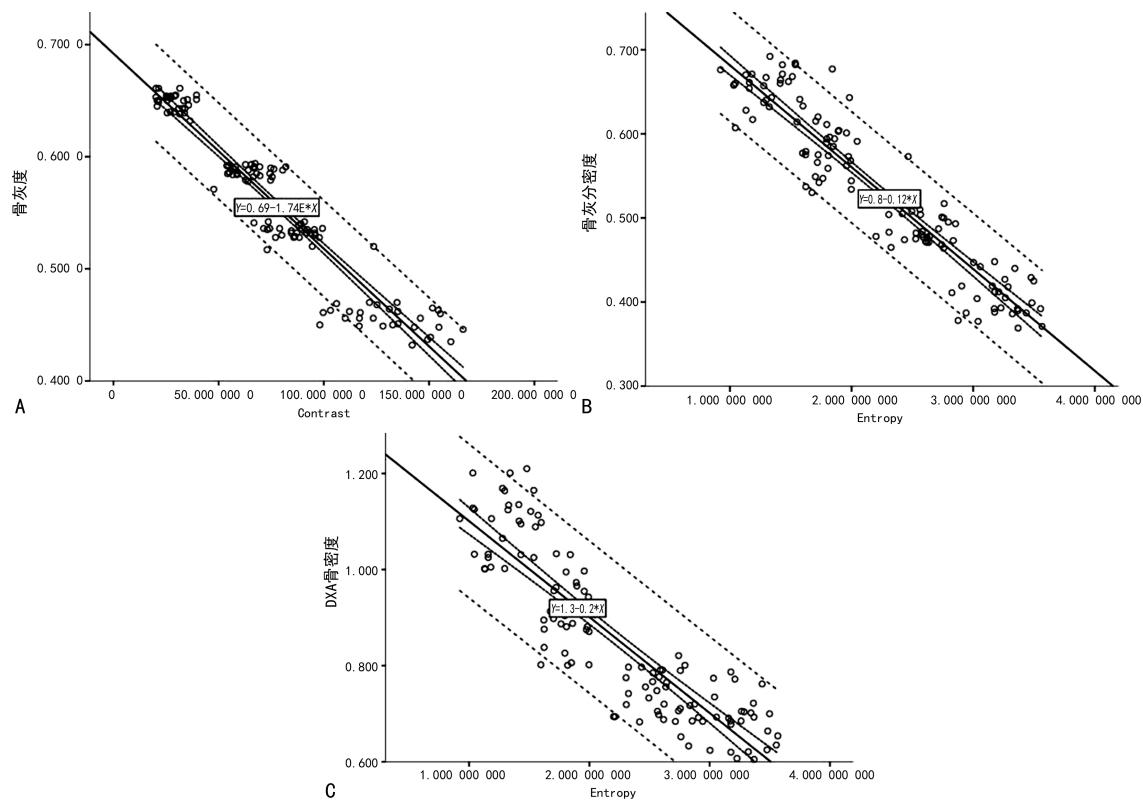
表 2 不同纹理特征筛选方法结合数据分析方法鉴别骨密度的 MCR 比较[%(n/n)]

项目	RDA	PCA	LDA	NDA
Fisher	42.50(51/120)	43.33(52/120)	20.00(24/120)	53.33(64/120)
POE+ACC	42.50(51/120)	43.33(52/120)	18.33(22/120)	53.33(64/120)
MI	42.50(51/120)	43.33(52/120)	18.33(22/120)	54.17(65/120)
FPM	5.00(6/120)	10.83(13/120)	77.50(93/120)	2.50(3/120)

表 3 骨密度相关参数与纹理参数相关性强的前 6 位相关系数(r)

项目	Contrast	Entropy	Variance3D	AngScMom	InvDfMom	RLNonUni
骨灰度	-0.938	-0.932	-0.611	0.724	0.732	0.723
骨灰分密度	-0.914	-0.927	-0.598	0.717	0.729	0.719
骨密度	-0.888	-0.896	-0.654	0.772	0.720	0.712

上述纹理参数与骨密度相关参数均明显相关, $P<0.05$ 。



A:骨灰度与 Contrast 线性回归分析;B:骨灰分密度与 Entropy 线性回归分析;C:骨密度与 Entropy 线性回归分析。

图 3 骨灰度、骨灰分密度和骨密度线性回归分析

3 讨 论

随着我国人口的老龄化,骨质疏松症已成为严重威胁老年人群身体健康的慢性疾病之一。到 2035 年,骨质疏松症性骨折的数量和治疗费用将翻一番,而到 2050 年,将会有 600 万例的骨质疏松性骨折^[4],骨质疏松症已然成为我国公共卫生事业需要面对的重大问题。然而,骨质疏松症患者早期可无任何不适,因此骨质疏松症被称为“无声杀手”。世界卫生组织推荐使用 DXA 测量骨密度来诊断骨质疏松症。尽管 DXA 被认为是诊断骨质疏松症的“金标准”,然而,DXA 测量的面骨矿物质密度存在固有的局限性。骨质疏松症在表现出明显皮质骨减少前,首先会出现松质骨骨小梁结构的变化。因此,骨密度不能用于骨质疏松的早期诊断。DXA 还受口服对比剂、含钙或其他矿物质食物或添加剂的影响。因此,本研究除应用骨密度作为是否存在骨质疏松的参考标准外,还对绵羊腰椎骨进行了称干重和骨灰化处理,得到的骨灰度和骨灰分密度可作为骨质疏松程度的“金标准”。

临床需要替代 DXA 的成像技术来改善患者骨密度评价的准确性,定量 CT 是在 CT 扫描数据的基础上,经过定量 CT 体模校准和专业软件分析,对人体骨骼进行骨密度测量的方法。定量 CT 采用的是 CT 三维容积数据进行分析,测量的是真正的体积骨密度。鉴于定量 CT 的技术优势和 CT 技术的快速发展,近年来,定量 CT 在各国的骨质疏松研究和临床应用领域越来越受到重视^[5]。定量 CT 使用转换方程将

Hounsfield 单位(HU)转换为骨密度,显示出与骨密度良好的相关性和足够的可重复性^[6]。SHEPHERD 等^[7]的研究显示,DXA 无论在腰椎或髋部骨质疏松的检出率均明显低于定量 CT。然而定量 CT 较 DXA 价格昂贵,在我国的装机量较少,且其检查时间长,放射剂量较 DXA 大,并不能适用于大规模人群的骨质疏松筛查。本研究受定量 CT 启发,推测骨松质的某些纹理特征能够反映骨小梁数量的减少和间隔变细等,进而建立纹理参数与骨密度之间的方程联系,作为一种可替代骨密度检测的可行性方案。

目前已有多 种建立体外骨质疏松模型的方法,包括盐酸模型、过氧化氢模型、EDTA-Na₂ 模型、细胞模型和计算机三维有限元模型等。本研究采用 EDTA-Na₂ 溶液浸泡方法,结果显示 EDTA-Na₂ 溶液可以使离体的骨质脱钙,随着浸泡时间的延长,椎体体积无明显变化,骨密度及骨矿物质含量均随浸泡时间的延长逐渐减少;椎体干重除 A、B 组间无明显差异外,C、D 组逐渐减轻,原因可能是 B 组浸泡脱钙液时间较短所致,这也间接说明 B 组可代表早期骨质疏松。绵羊属于脊椎动物亚门,椎骨的发育与人具有较高的相似性,但其行走方式与人完全不同,故而其骨小梁分布和力线方向不尽相同,本研究获得的纹理参数与骨密度之间的方程联系是否可应用于人体尚需进一步研究。

纹理分析是一种先进的图像分析技术,基于纹理的定量特征用于表征图像中的均匀性、随机性和重复

模式。本质上,纹理分析提供了图像中灰度值的空间和异质性信息,是一种客观、定量的分析像素或体素灰度分布和关系的方法^[8-9]。常用的纹理特征包括一阶、二阶和高阶特征,包括基于灰度共生矩阵(gray-level co-occurrence matrix, GLCM)的二阶特征和基于灰度游程矩阵(gray level run-length matrix, GLRLM)的高阶特征。SHIRVAIKAR 等^[10] 使用了 6 例不同年龄男性的 13 个圆柱形松质骨标本研究骨小梁基于 GLCM 提取的二维投影图像统计参数与骨力学间的联系,结果显示,当对 GLCM 的能量、Entropy、Contrast、均匀性、相关和自相关参数取平均值时,其集群阴影与骨小梁的微结构和力学性能密切相关。KAWASHIMA 等^[11]发现,利用头部 CT 平扫检查的纹理特征差异可以鉴别骨质疏松和非骨质疏松患者。MOOKIAH 等^[12] 基于从常规增强 CT 图像中提取的纹理特征进行机会性筛查健康和骨质疏松性骨折个体,分类准确率为 83%。也有报道,采用低剂量胸部 CT 进行骨质疏松筛查具有可行性^[13-15]。VAL-ENTINITSCH 等^[16] 利用胸腰椎 CT 图像获得的三维纹理特征和区域体积骨密度进行机会性骨质疏松筛查,使用随机森林分类器,在识别患有和不患有骨质疏松症的个体时,曲线下面积为 0.88。有研究利用人体腰椎 CT 放射组学特征,采用机器学习的方法鉴别正常与低骨量或骨质疏松个体,结果令人鼓舞^[17-19]。上述研究均说明 X 射线和 CT 纹理参数在鉴别骨质疏松、低骨量和非骨质疏松个体方面都具有潜在价值,但都未生成简单、具体的公式计算方法。另外,以往研究采用的图像大部分未进行归一化处理,研究结论是否可普遍用于其他 CT 机型的图像尚不可知,需要进一步验证,建议后续放射组学研究可以先对影像图像进行统一标准的归一化处理。本研究结果显示,绵羊腰椎诸多纹理参数与骨密度相关参数具有强相关性,其中反映骨松质均匀性和异质性的 Contrast 和 Entropy 具有强负相关,说明骨质疏松椎体的 Contrast 增加,可能是由于松质骨内骨小梁稀疏、紊乱导致骨小梁缺失区与骨小梁聚集区两极分化。此外,本研究尝试建立了纹理参数与骨密度参数之间的方程联系,方法简单、实用,使今后应用于人体成为可能。

纹理分析用于骨质疏松的研究在 MRI 上也显示出较好的应用价值。ZAWORSKI 等^[20] 通过对比有脆性骨折和无脆性骨折的绝经后妇女腰椎 MRI 纹理特征,发现骨折患者的骨小梁更具有异质性,均匀性小。骨折患者的 Contrast 增加了 76% ($P = 0.005$), Entropy 增加了 10% ($P = 0.005$)。骨折患者的平均 AngScMom 和 InvDfMom 分别降低了 50% ($P = 0.005$) 和 22% ($P = 0.003$),这与本研究结果相似。

本研究存在局限性。本研究选择脊柱动物羊作为实验对象,腰椎松质骨骨小梁的排列方式与人类不尽相同,在条件允许的情况下可采用与人类更接近的

灵长类动物作为研究对象;本研究每组实验对象仅为 30 例,样本量较少,后续需进一步扩大样本量进行研究验证。

参考文献

- [1] LI T,WU S,XU Z,et al. Rabbiteye blueberry prevents osteoporosis in ovariectomized rats[J]. J Orthop Surg Res,2014,9(1):56.
- [2] CHAPPARD D,PASCARETTI-GRISON F,GALLOIS Y,et al. Medullar fat influences texture analysis of trabecular microarchitecture on X-ray radiographs[J]. Eur J Radiol,2006,58(3):404-410.
- [3] LESPESSAILLES E,GADOIS C,KOUSIGNIAN I,et al. Clinical interest of bone texture analysis in osteoporosis: a case control multi-center study[J]. Osteoporos Int,2008,19(7):1019-1028.
- [4] SI L,WINZENBERG T M,JIANG Q,et al. Projection of osteoporosis-related fractures and costs in China: 2010-2050[J]. Osteoporos Int,2015,26(7):1929-1937.
- [5] ENGELKE K. Quantitative computed tomography-current status and new developments[J]. J Clin Densitom,2017,20(3):309-321.
- [6] BURNS J E,YAO J,SUMMERS R M. Vertebral body compression fractures and bone density: automated detection and classification on CT images [J]. Radiology,2017,284(3):788-797.
- [7] SHEPHERD J A,SCHOUSBOE J T,BROY S B,et al. Executive summary of the 2015 ISCD position development conference on advanced measures from DXA and QCT: fracture prediction beyond BMD[J]. J Clin Densitom,2015,18(3):274-286.
- [8] LUBNER M G,SMITH A D,SANDRASEGARAN K,et al. CT texture analysis: definitions, applications, biologic correlates, and challenges [J]. Radiographics,2017,37(5):1483-1503.
- [9] CORRIAS G,MICHELETTI G,BARBERINI L,et al. Texture analysis imaging “what a clinical radiologist needs to know”[J]. Eur J Radiol,2022,146:110055.
- [10] SHIRVAIKAR M,HUANG N,LIANG X,et al. The measurement of bone quality using gray level co-occurrence matrix textural features [J]. J Med Imaging Health Inform,2016,6(6):1357-1362.
- [11] KAWASHIMA Y,FUJITA A,BUCH K,et al.

- Using texture analysis of head CT images to differentiate osteoporosis from normal bone density[J]. Eur J Radiol, 2019, 116: 212-218.
- [12] MOOKIAH M, ROHRMEIER A, DIECKMEYER M, et al. Feasibility of opportunistic osteoporosis screening in routine contrast-enhanced multi detector computed tomography (MDCT) using texture analysis [J]. Osteoporos Int, 2018, 29(4): 825-835.
- [13] CHEN Y C, LI Y T, KUO P C, et al. Automatic segmentation and radiomic texture analysis for osteoporosis screening using chest low-dose computed tomography[J]. Eur Radiol, 2023, 33(7): 5097-5106.
- [14] WANG S, TONG X, FAN Y, et al. Combining deep learning and radiomics for automated, objective, comprehensive bone mineral density assessment from low-dose chest computed tomography[J]. Acad Radiol, 2024, 31(3): 1180-1188.
- [15] TONG X, WANG S, ZHANG J, et al. Automatic osteoporosis screening system using radiomics and deep learning from low-dose chest CT images[J]. Bioengineering, 2024, 11(1): 50.
- [16] VALENTINITSCH A, TREBESCHI S, KAESMACHER J, et al. Opportunistic osteoporosis

(上接第 2084 页)

- RSTON L, et al. Peer-supported self-management for people discharged from a mental health crisis team: a randomised controlled trial [J]. Lancet, 2018, 392(10145): 409-418.
- [26] ROSE L, ISTANBOULIAN L, CARRIERE L, et al. Program of integrated care for patients with chronic obstructive pulmonary disease and multiple comorbidities (PIC COPD⁺): a randomised controlled trial[J]. Eur Respir J, 2018, 51(1): 1701567.
- [27] SAMUELS E A, KELLEY L, PHAM T, et al. "I wanted to participate in my own care": evaluation of a patient navigation program [J]. West J Emerg Med, 2021, 22(2): 417-426.
- [28] SEABERG D, ELSEROAD S, DUMAS M, et al. Patient navigation for patients frequently visiting the emergency department: a randomized, controlled trial[J]. Acad Emerg Med, 2017, 24(11): 1327-1333.

screening in multi-detector CT images via local classification of textures[J]. Osteoporos Int, 2019, 30(6): 1275-1285.

- [17] XUE Z, HUO J, SUN X, et al. Using radiomic features of lumbar spine CT images to differentiate osteoporosis from normal bone density [J]. BMC Musculoskeletal Disord, 2022, 23(1): 336.
- [18] CHENG L, CAI F, XU M, et al. A diagnostic approach integrated multimodal radiomics with machine learning models based on lumbar spine CT and X-ray for osteoporosis[J]. J Bone Miner Metab, 2023, 41(6): 877-889.
- [19] CHEN B, CUI J, LI C, et al. Application of radiomics model based on lumbar computed tomography in diagnosis of elderly osteoporosis [EB/OL]. [2023-09-11]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38245854/>.
- [20] ZAWORSKI C, CHEAH J, KOFF M F, et al. MRI-based texture analysis of trabecular bone for opportunistic screening of skeletal fragility [J]. J Clin Endocrinol Metab, 2021, 106(8): 2233-2241.

(收稿日期:2023-10-13 修回日期:2024-03-29)

(编辑:张苋捷)

- [29] TAYLOR S P, MURPHY S, RIOS A, et al. Effect of a multicomponent sepsis transition and recovery program on mortality and readmissions after sepsis: the improving morbidity during post-acute care transitions for sepsis randomized clinical trial[J]. Crit Care Med, 2022, 50(3): 469-479.
- [30] KIDD S A, VIRDEE G, MIHALAKAKOS G, et al. The welcome basket revisited: testing the feasibility of a brief peer support intervention to facilitate transition from hospital to community [J]. Psychiatr Rehabil J, 2016, 39(4): 335-342.
- [31] SCANLAN J N, HANCOCK N, HONEY A. Evaluation of a peer-delivered, transitional and post-discharge support program following psychiatric hospitalisation [J]. BMC Psychiatry, 2017, 17(1): 307.

(收稿日期:2023-12-15 修回日期:2024-03-22)

(编辑:冯甜)