

MR超短回波PETRA-FS、T2*Mapping序列评估健康青年膝关节软骨的应用价值

熊天择*, 周锐志, 孙士庆, 杨志涛, 陈海松#

青岛大学附属医院放射科, 山东 青岛

收稿日期: 2024年1月21日; 录用日期: 2024年2月14日; 发布日期: 2024年2月20日

摘要

目的: 运用MR超短回波时间成像径向采集逐点编码时间缩减联合脂肪抑制(pointwise encoding time reduction with radial acquisition combined fat suppression, PETRA-FS)序列及T2*mapping序列, 探讨其在健康青年患者膝关节MR中的应用价值。方法: 收集自2021年8月至2021年10月于青岛大学附属医院接受超短回波时间成像PETRA-FS序列、T2*mapping及FS FSE PDWI序列扫描的健康青年患者22名, 将健康青年膝关节软骨划分为15个小亚区, 共获取645个亚区, 另将其分为承重区和非承重区, 定量记录每个亚区软骨厚度和T2*值, 按性别分组, 应用独立样本t检验, 比较各亚区合并后大部位的厚度及T2*值差异, 总结膝关节整体软骨分布特点。结果: (1) 健康青年膝关节软骨厚度从高到低依次为髌软骨(3.74 mm)、股骨外侧髌(1.94 mm)、股骨外侧滑车(1.71 mm)、股骨内侧髌(1.46 mm)、胫骨内侧髌(1.21 mm)、胫骨外侧髌(1.11 mm)。(2) 健康青年男、女之间膝关节大部区域(除股骨内侧髌、胫骨内侧髌之外)的软骨厚度差异具有统计学意义($P < 0.05$); 健康青年男、女之间膝关节大部区域(除股骨内侧髌、胫骨内侧髌之外)的T2*值差异无统计学意义($P > 0.05$); 承重区和非承重区的T2*值差异具有统计学意义($P < 0.05$)。结论: 在健康青年中, 性别可能是影响膝关节软骨厚度的重要因素, 而软骨的T2*值可能受性别影响较小。本组的研究表明: T2*mapping和超短回波PETRA-FS序列能够较好的评价正常软骨并为其早期异常改变提供正常影像学参照。

关键词

膝关节, 软骨, 超短回波时间成像, PETRA-FS, T2*Mapping

The Application Value of PETRA-FS and T2*Mapping Sequences in Evaluating Knee Cartilage in Healthy Young Adults

Tianze Xiong*, Ruizhi Zhou, Shiqing Sun, Zhitao Yang, Haisong Chen#

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 熊天择, 周锐志, 孙士庆, 杨志涛, 陈海松. MR超短回波PETRA-FS、T2*Mapping序列评估健康青年膝关节软骨的应用价值[J]. 临床医学进展, 2024, 14(2): 3081-3088. DOI: 10.12677/acm.2024.142436

Abstract

Objective: To explore the value of magnetic resonance (MR) ultrashort echo time imaging with pointwise encoding time reduction with radial acquisition combined fat suppression (PETRA-FS) sequence and the T2* mapping sequence in knee MR of healthy young adults. **Methods:** Totally 22 healthy young patients in The Affiliated Hospital of Qingdao University from August 2021 to October 2021 were collected in this study: All subjects underwent FS FSE PDWI sequence scan, ultrashort echo time PETRA-FS sequence and T2* mapping sequence. Articular cartilage of knee was divided into 15 subregions, and a total of 645 subregions were obtained, in which the thickness and T2* values were semi-quantitative recorded in healthy young patients. And it was divided into load-bearing area and non-load-bearing area. All subjects were divided into two groups (13 men and 9 women) according to their gender. By using statistical analysis with t test, compared all subregions which were merged, the thickness distribution characteristics were summarized. **Results:** (1) The average cartilage thickness of knee in healthy young patients from thick to thin in turn was as followings: patellar cartilage (3.74 mm), lateral femoral condyle (1.94 mm), lateral femoral trochlea (1.71 mm), medial femoral condyle (1.46 mm), medial tibia condyle (1.21 mm), lateral tibia condyle (1.11 mm). (2) The thickness of the knee cartilage significantly differed between men and women ($P < 0.05$), besides the parts of medial femoral condyle and medial tibia condyle; The T2* values of the knee cartilage were only significantly differed between men and women in medial femoral condyle and medial tibia condyle ($P < 0.05$). In addition, the T2* values of load-bearing area and non-load-bearing area were with significantly difference ($P < 0.05$). **Conclusion:** In healthy young adults, gender may be an important factor affecting the thickness of knee cartilage, and the T2* value of cartilage may be less affected by gender. T2* mapping and PETRA-FS sequences can provide normal imaging reference.

Keywords

Knee Joint, Cartilage, Ultrashort Echo Time Imaging, PETRA-FS, T2* Mapping

Copyright © 2024 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. 引言

关节软骨的损伤会促进骨关节炎的发展。关节软骨分为浅层、过渡层、深层和钙化软骨层[1]。软骨深层深部、钙化软骨层及软骨下骨共同构成骨软骨连接处，它与骨关节炎的发病机制相关联，是营养关节、维持关节稳定性的关键[2] [3] [4] [5]。对关节软骨的早期损伤进行明确诊断并及时治疗对延缓骨关节炎的发展具有重要的临床意义。然而，横向弛豫时间在骨软骨连接处很短，经过射频激励后迅速衰减，在采集时，常规序列无法读取信号，因此钙化软骨层和深层深部无法显示[6]。MR超短回波时间(ultrashort echo time, UTE)成像的出现，使短 T2 组织成像成为现实。PETRA-FS 序列是一种短 TE 回波时间序列，其回波时间很短，趋近于零[7]。胡亚雯等[6]研究表明，PETRA-FS 序列可显示包括深层深部在内的非钙

化软骨层。本研究通过 PETRA-FS 序列及 T2*mapping 序列成像,对膝关节软骨进行分区,定点定位测量各亚区 T2*值及厚度,总结健康青年膝关节软骨分布特点及厚度正常值,探讨 PETRA-FS 和 T2*mapping 序列在健康青年膝关节 MR 中的应用价值,为临床诊断评估软骨形态学改变提供正常参照。

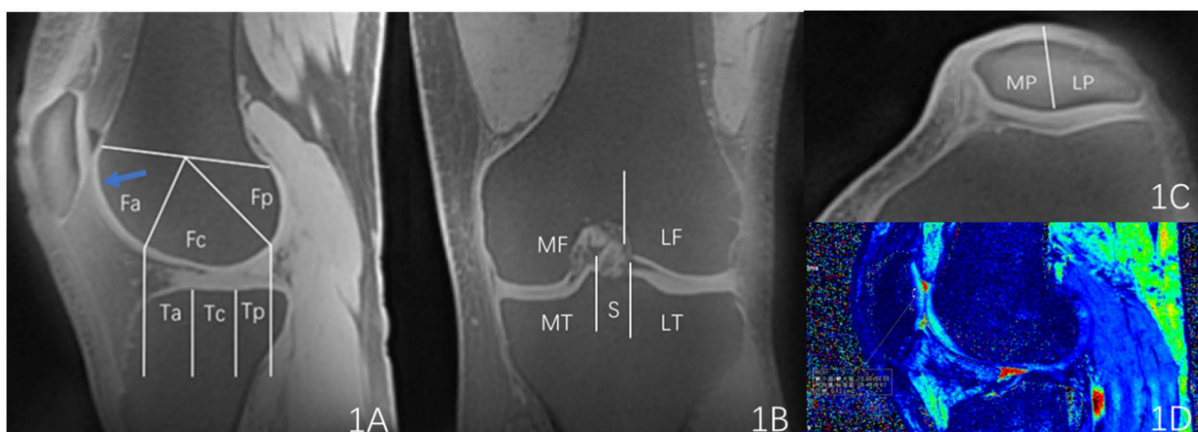
2. 资料与方法

2.1. 研究对象

收集自 2021 年 8 月至 2021 年 10 月于我院行超短回波时间成像 PETRA-FS 序列、T2*mapping 及 FS FSE PDWI 序列扫描的健康青年患者 22 名,左膝 21 例,右膝 22 例,共 43 个膝关节,其中男 13 例,女 9 例,年龄 22~35 岁,平均年龄(25 ± 2.98)岁。排除标准:既往有膝关节疼痛史、外伤史、手术史者;类风湿关节炎者;具有 MRI 检查禁忌证者。本研究经本院伦理委员会批准,患者均知情同意。

2.2. 扫描序列与参数

采用 Siemens Prisma 3.0T MR 超导磁共振(Magnetom Prisma; Siemens Healthineers, Erlangen, Germany)对健康青年患者行矢状位 FS FSE PDWI 序列,横轴位 PETRA-FS 序列及矢状位 T2* mapping 序列扫描。病人体位采用仰卧位足先进。FS FSE PDWI 序列扫描参数:重复时间(TR) 2200 ms,回波时间(TE) 33 ms,层厚 4 mm,视野(FOV) 170 mm × 170 mm,采集时间(TA) 1 min 24 s。PETRA-FS 序列扫描参数:重复时间(TR) 3.32 ms,回波时间(TE) 0.07 ms,层厚 0.8 mm,视野(FOV) 250 mm × 250 mm,采集时间(TA) 6 min 51 s。T2* mapping 序列扫描参数:重复时间(TR) 808 ms,回波时间(TE) 4.36~34.52 ms,层厚 3 mm,视野(FOV) 160 mm × 160 mm,采集时间(TA) 2 min 46 s。



A. 矢状位图像将股骨和胫骨内外侧分为前(Fa 和 Ta)、中(Fc 和 Tc)、后(Fp 和 Tp) 3 个亚区,股骨外侧滑车部软骨显示良好,计作 FLT 区(蓝色箭头所示); B. 冠状位图像以股骨凹外侧缘将股骨分为内侧(MF)、外侧(LF)亚区,胫骨分为内侧(MT)、外侧(LT)亚区,嵴下区(S)为无软骨覆盖的中区; C. 轴位图像以髁骨嵴为界将髁骨分为内侧(MP)、外侧(LP)区; D. 矢状位 T2*mapping 勾画感兴趣区。

Figure 1. Processing and analysis of PETRA-FS, T2*mapping images

图 1. PETRA-FS、T2*mapping 图像的处理和分析

2.3. 图像处理和分析

所有 MRI 图像传至西门子 syngo.via 图像后处理工作站,获得 PETRA-FS 和 T2*mapping 序列图像。参照 Hayashi [8]等 WORMS 测量方法,将股骨、胫骨平台及髁骨软骨分为 14 个亚区,另参考董宝明[9]等分区方法,将股骨外侧滑车部纳入分区,记作 FLT 区,共计 15 个亚区(图 1(A)~(C))。另将其分为承重

区和非承重区, 承重区为胫骨内、外侧髁, 股骨内侧髁中部和股骨外侧髁中部。余为非承重区。于 PETRA-FS 序列图像上手动测量各亚区关节软骨厚度, 15 亚区共计 15 个相对固定测量点。(1) 图像窗宽窗位一致, 每个测量点测量 3 次, 取平均值。(2) 最后将股骨内外侧髁、胫骨内外侧髁各自亚区的 3 点测量值的均值计作该部位的软骨平均厚度值。另在 T2*mapping 序列图像上手工勾画各个亚区感兴趣(ROI) 并记录 T2*值(图 1(D))。

2.4. 统计学分析

应用 SPSS25.0 统计软件进行分析, 定量资料采用均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 对软骨厚度值、T2* 值进行正态性检验, 如符合正态分布, 两组间比较采用独立样本均数的 t 检验; 如不符合, 则采用校正的 t 检验 $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。

3. 结果

3.1. 健康青年患者基本资料

22 例健康青年患者中, 男 13 例, 女 9 例, 年龄 22~35 岁, 平均年龄(25 ± 2.98)岁。

3.2. 健康青年患者膝关节 15 亚区软骨厚度及特征

健康青年患者膝关节同一亚区软骨厚度因人而异, 15 亚区平均软骨厚度值依次为见表 1。

为了方便比较和临床使用, 对 15 亚区软骨厚度进行合并为髌软骨、股骨外侧滑车、股骨外侧髁、股骨内侧髁、胫骨内侧髁、胫骨外侧髁 6 部分, 健康青年患者膝关节软骨厚度平均值从高到低依次为髌软骨(3.74 mm)、股骨外侧髁(1.94 mm)、股骨外侧滑车(1.71 mm)、股骨内侧髁(1.46 mm)、胫骨内侧髁(1.21 mm)、胫骨外侧髁(1.11 mm)(表 2)。

FS FSE PDWI 序列图像示正常膝关节软骨, 软骨呈均匀一致中高信号(图 2(A))。PETRA-FS 序列图像可显示软骨分层(图 2(B)), 浅层呈中高信号, 对应 FS FSE PDWI 序列图像所示软骨信号; 深层呈高信号, FS FSE PDWI 序列图像上呈现极低信号, 与软骨下骨分界不清, 无法区分。

对软骨厚度值、T2*值进行正态性检验, 结果显示均符合正态分布, 因此采用独立样本 t 检验进行 2 组间比较。膝关节股骨内侧髁、股骨外侧髁、胫骨内侧平台、胫骨外侧平台、股骨外侧滑车及髌骨 6 个区域中, 健康青年男、女之间膝关节大部区域(除股骨内侧髁、胫骨内侧髁之外)的软骨厚度差异具有统计学意义(P 值 < 0.05); 健康青年男、女之间膝关节大部区域(除股骨内侧髁、胫骨内侧髁之外)的 T2*值差异无统计学意义(P 值 > 0.05); (表 3、表 4)。承重区和非承重区的 T2*值差异具有统计学意义(P 均 < 0.05 , 表 5)。

Table 1. Cartilage thickness in 15 subregions of knee in healthy young adults (mm)

表 1. 健康青年患者膝关节 15 亚区软骨厚度(mm)

	膝关节数	最小值	最大值	平均值	标准差
髌骨内侧	43	1.70	5.17	3.49	0.85
髌骨外侧	43	2.50	6.17	3.98	0.78
股外侧髁前部	43	1.07	6.40	2.47	1.11
股外侧髁中部	43	1.00	3.10	1.84	0.52
股外侧髁后部	43	0.80	3.90	1.51	0.54
股外侧滑车部	43	0.83	3.20	1.71	0.64

续表

股内侧髌前部	43	0.87	2.17	1.31	0.30
股内侧髌中部	43	0.83	2.30	1.49	0.32
股内侧髌后部	43	1.00	3.37	1.57	0.46
胫内侧髌前部	43	0.70	1.93	1.18	0.27
胫内侧髌中部	43	0.80	2.93	1.30	0.35
胫内侧髌后部	43	0.67	1.63	1.16	0.25
胫外侧髌前部	43	0.63	1.53	1.07	0.24
胫外侧髌中部	43	0.70	1.93	1.12	0.25
胫外侧髌后部	43	0.73	2.00	1.13	0.26

(1) 髌骨外侧软骨厚于内侧。(2) 股骨外侧髌软骨厚度表现为从前往后逐渐减小, 股骨内侧髌软骨厚度表现为从前往后逐渐增加。(3) 胫骨内侧髌软骨, 中间略厚, 前后薄。胫骨外侧髌软骨, 从前往后逐渐增加。(4) 股骨外侧滑车部软骨厚度较厚。

Table 2. Cartilage thickness in 6 parts of knee in healthy young adults (mm)

表 2. 健康青年患者膝关节 6 部位软骨厚度(mm)

	股骨内侧髌	股骨外侧髌	股外侧滑车部	胫骨内侧髌	胫骨外侧髌	髌骨
平均值	1.460	1.941	1.713	1.213	1.108	3.735
标准差	0.273	0.531	0.638	0.234	0.218	0.742
最大值	2.367	3.033	3.200	2.144	1.633	5.317
最小值	1.011	1.078	0.833	0.722	0.700	2.483

软骨厚度由厚到薄, 依次为髌软骨、股骨外侧髌、股骨外侧滑车、股骨内侧髌、胫骨内侧髌、胫骨外侧髌。

Table 3. Comparison of knee cartilage thickness between male and female healthy young adults ($\bar{x} \pm s$, mm)

表 3. 健康青年患者男、女之间膝关节软骨厚度比较($\bar{x} \pm s$, mm)

分组	股骨内侧髌	股骨外侧髌	股骨外侧滑车	胫骨内侧髌	胫骨外侧髌	髌骨
男(n=13)	1.504 ± 0.023	2.124 ± 0.047	1.876 ± 0.066	1.254 ± 0.018	1.166 ± 0.019	3.964 ± 0.075
女(n=9)	1.391 ± 0.033	1.66 ± 0.051	1.469 ± 0.055	1.148 ± 0.029	1.019 ± 0.023	3.412 ± 0.062
P 值	0.224	0.004	0.040	0.147	0.029	0.019

健康青年男、女之间膝关节大部区域(除股骨内侧髌、胫骨内侧髌之外)的软骨厚度差异具有统计学意义(P 值 < 0.05) 健康青年男性膝关节软骨厚度大于女性。

Table 4. Comparison of T2* values of knee cartilage between male and female healthy young adults ($\bar{x} \pm s$, ms)

表 4. 健康青年患者男、女之间膝关节软骨 T2*值比较($\bar{x} \pm s$, ms)

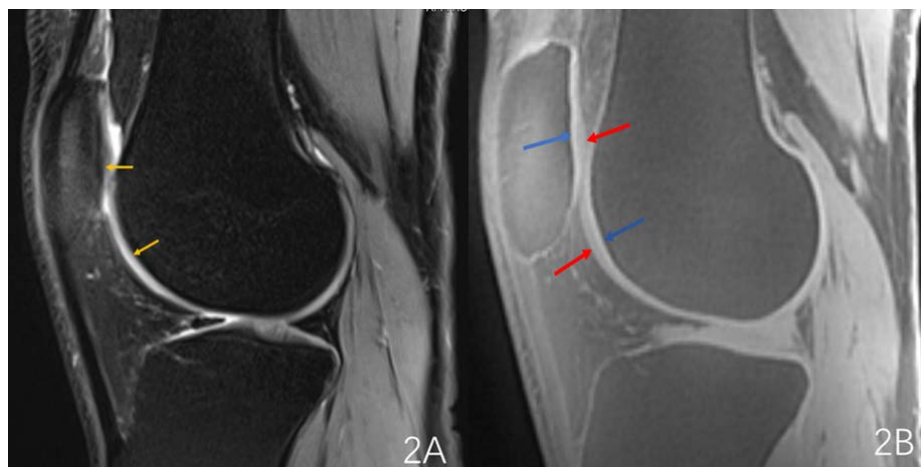
分组	股骨内侧髌	股骨外侧髌	胫骨内侧髌	胫骨外侧髌	髌骨
男(n=13)	27.066 ± 2.28	31.682 ± 3.491	25.669 ± 3.101	28.622 ± 3.949	28.536 ± 3.479
女(n=9)	24.753 ± 2.697	29.562 ± 4.091	22.334 ± 2.505	27.504 ± 4.063	26.386 ± 3.474
P 值	0.004	0.076	0.001	0.375	0.054

健康青年男、女之间膝关节大部区域(除股骨内侧髌、胫骨内侧髌之外)的 T2*值差异无统计学意义(P 值 > 0.05)。

Table 5. Comparison of T2* values of load-bearing area and non-load-bearing area in healthy young adults
表 5. 健康青年患者膝关节软骨承重区及非承重区 T2*值比较

分组	例数	T2*值/ms
承重区	172	25.035 ± 4.418
非承重区	215	30.192 ± 7.294
P 值		0.001

承重区和非承重区的 T2*值差异具有统计学意义, P 均 < 0.05。非承重区 T2*值大于承重区。



男, 25 岁, 健康膝关节软骨。A. FS FSE PDWI 序列图像显示软骨为均匀一致的中高信号(黄色箭头), 未见异常软骨信号及形态。B. PETRA-FS 序列图像显示膝关节软骨分两层, 浅层呈现中高信号(蓝色箭头所示); 深层呈现高信号(红色箭头所示), FS PDWI 序列呈极低信号, 与软骨下骨分界不清。

Figure 2. Display of healthy knee cartilage with FS FSE PDWI, PETRA-FS sequences
图 2. FS FSE PDWI、PETRA-FS 序列对健康膝关节软骨的显示

4. 讨论

关节软骨附着在关节骨的表面, 由软骨细胞和细胞外基质组成。水、胶原纤维及蛋白多糖组成了细胞外基质。组织学表示, 当软骨发生早期损伤时, 蛋白多糖减少而水含量增加, 胶原纤维进行性破坏, 晚期时, 蛋白多糖进一步丢失, 水含量减少[10]。

磁共振(MRI)作为一种无创性的检查方法, 已成为评估关节软骨形态的首选。常规 MRI 序列的层厚较厚, 回波时间较长, 然而, 骨软骨连接处 T2 时间短, 常规序列读取信号失败, 因此无法明确显示软骨的深层深部和钙化软骨层。PETRA-FS 序列的回波时间很短, 仅为 0.07 ms, 其本质是基于 UTE 技术的三维径向投影[11], 对短 T2 组织显像较好, 可以显示软骨的深层深部, 因此, 对于软骨的显示优于 MR 常规序列。PETRA 序列在以往已应用于颅脑[12]、神经[13]及骨皮质成像[14]。

本文的结果表明健康青年患者膝关节软骨厚度分布特点如下:(1) 软骨厚度由厚到薄, 依次为髌软骨、股骨外侧髌、股骨外侧滑车、股骨内侧髌、胫骨内侧髌、胫骨外侧髌。(2) 髌骨外侧软骨厚于内侧。(3) 股骨外侧髌软骨厚度表现为从前往后逐渐减小, 股骨内侧髌软骨厚度表现为从前往后逐渐增加。(4) 胫骨内侧髌软骨, 中间略厚, 前后薄, 胫骨外侧髌软骨, 从前往后逐渐增加。(5) 股骨外侧滑车部软骨厚度较厚。董宝明等[9]分析原因可能是由于周围滑车沟内结构空虚, 前后左右无明显受压, 软骨空间较大受到保护。

本研究结果显示, 股骨内侧髌软骨厚度从前往后逐渐增加, 与孙英彩等[15]的研究结果一致。此外,

对于股骨内外侧髌的软骨厚度比较, 本研究结果表明, 健康青年志愿者股骨外侧髌的平均软骨厚度为 1.93 mm, 内侧为 1.44 mm, 郭世萍[16]等对 5 例尸体膝关节进行局部解剖, 测量其内外侧厚度分别为 2.3 mm 和 2.4 mm, 证实了股骨外侧髌的软骨厚度大于内侧。但与他们的软骨实际测量值相较, 本研究结果偏小, 原因是本研究未包含钙化软骨层的厚度。

本研究显示, 健康青年男、女之间软骨厚度存在差异, 健康青年男性的软骨厚度大于健康青年女性。这可能与运动量多少相关。由于缺乏血管和淋巴管, 滑液弥散是关节软骨获取营养的方式。通过关节的运动挤压, 滑液渗透关节基质, 从而营养细胞。由于男性的运动量高于女性, 在运动时关节运动挤压次数多, 关节软骨获取营养相应增加。因此, 运动量的提高可能与软骨厚度的增加存在关联。

本研究显示, PETRA-FS 序列图像可显示软骨分层, 浅层软骨呈中高信号, 与 FS FSE PDWI 序列图像所示软骨信号相对应; 深层软骨呈高信号, 在 FS FSE PDWI 序列图像上呈现极低信号, 与软骨下骨分界不清, 无法区分。PETRA-FS 序列可显示包括深层深部在内(FS FSE PDWI 序列呈极低信号)的非钙化软骨层, 与胡亚雯等研究结果一致。

T2 mapping 技术采用多回波自旋回波序列, 经后处理形成伪彩图, 通过测量感兴趣区得出 T2 值, 继而形成其空间分布图, 反映软骨内水含量及水分子和胶原纤维的相互关系[17]。既往研究表明, 伴随软骨退变程度的加重, T2 值逐渐升高。然而, 由于 T2 值受到年龄、体质量指数(BMI)及运动量大小的影响, 且部分胶原纤维排列方向与稳定磁化矢量夹角会产生魔角效应[18]。因此, T2 mapping 序列在对关节软骨损伤进行评估方面存在一定的局限性。

T2*mapping 采用多回波梯度回波序列, T2*值的改变也同样反映了软骨内水含量和胶原纤维的改变。T2*值与水含量呈正相关, 与胶原纤维含量呈负相关。陈静等[10]研究发现, 膝关节软骨损伤早期 T2*值升高。原因可能是, 在关节软骨损伤早期, 胶原纤维被破坏, 胶原成分减低, 而水含量增加[19]。相较 T2 mapping 序列, T2*mapping 技术的优势在于其拥有更快的成像速度, 更高的图像分辨率, 因此, 在对关节软骨早期损伤的诊断方面更加敏感。

本研究显示, 健康青年男、女之间 T2*值基本不存在差异, 这与 Khandelwal 等[20]研究结果类似。此外, 健康青年患者膝关节内外侧髌软骨承重区和非承重区的 T2*值存在差异, 也与膝关节的解剖、承重特点有关。本文的研究表明: 在健康青年患者中, 性别可能是影响膝关节软骨厚度的重要因素, 而软骨的 T2*值可能受性别影响较小。T2*mapping 和超短回波 PETRA-FS 序列能够较好的评价正常软骨并为其早期异常改变提供正常影像学参照。

参考文献

- [1] Shah, A.J. and Patel, D. (2021) Imaging Update on Cartilage. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, **22**, Article ID: 101610. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2021.101610>
- [2] Das Gupta, S., Finnilä, M.A.J., Karhula, S.S., et al. (2020) Raman Microspectroscopic Analysis of the Tissue-Specific Composition of the Human Osteochondral Junction in Osteoarthritis: A Pilot Study. *Acta Biomaterialia*, **106**, 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.02.020>
- [3] Hargrave-Thomas, E.J. and Thambyah, A. (2021) The Micro and Ultrastructural Anatomy of Bone Spicules Found in the Osteochondral Junction of Bovine Patellae with Early Joint Degeneration. *Journal of Anatomy*, **239**, 1452-1464. <https://doi.org/10.1111/joa.13518>
- [4] Yu, X., Qi, Y., Zhao, T., et al. (2019) NGF Increases FGF2 Expression and Promotes Endothelial Cell Migration and Tube Formation through PI3K/Akt and ERK/MAPK Pathways in Human Chondrocytes. *Osteoarthritis and Cartilage*, **27**, 526-534. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2018.12.007>
- [5] Van Eegher, S., Perez-Lozano, M.L., Toillon, I., et al. (2021) The Differentiation of Prehypertrophic into Hypertrophic Chondrocytes Drives an OA-Remodeling Program and IL-34 Expression. *Osteoarthritis and Cartilage*, **29**, 257-268. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2020.10.013>
- [6] Hu, Y., Xu, J., Zhou, R., et al. (2023) The Value of Magnetic Resonance Ultrashort Echo Time Imaging to Evaluate

- Non-Calcified Cartilage of the Knee Joint and Its Damage. *Heliyon*, **9**, e14120. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14120>
- [7] Ilbey, S., Jungmann, P.M., Fischer, J., *et al.* (2022) Single Point Imaging with Radial Acquisition and Compressed Sensing. *Magnetic Resonance in Medicine*, **87**, 2685-2696. <https://doi.org/10.1002/mrm.29156>
- [8] Hayashi, D., Felson, D.T., Niu, J., *et al.* (2014) Pre-Radiographic Osteoarthritic Changes Are Highly Prevalent in the Medial Patella and Medial Posterior Femur in Older Persons: Framingham OA Study. *Osteoarthritis and Cartilage*, **22**, 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2013.10.007>
- [9] 董宝明, 张蕾, 孔延亮, 等. 基于磁共振 MERGE 序列膝关节软骨厚度的定量研究[J]. 实用放射学杂志, 2016, 32(1): 75-79.
- [10] 陈静, 王斌, 杨献峰. 3.0T 磁共振 T2~*mapping 成像分区评估膝关节软骨的应用价值[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2021, 27(5): 436-440.
- [11] Grodzki, D.M., Jakob, P.M. and Heismann, B. (2012) Ultrashort Echo Time Imaging Using Pointwise Encoding Time Reduction with Radial Acquisition (PETRA). *Magnetic Resonance in Medicine*, **67**, 510-518. <https://doi.org/10.1002/mrm.23017>
- [12] Heo, Y.J., Jeong, H.W., Kim, D., *et al.* (2021) Usefulness of Pointwise Encoding Time Reduction with Radial Acquisition Sequence in Subtraction-Based Magnetic Resonance Angiography for Follow-Up of the Neuroform Atlas Stent-Assisted Coil Embolization for Cerebral Aneurysms. *Acta Radiologica*, **62**, 1193-1199. <https://doi.org/10.1177/0284185120952784>
- [13] Getzmann, J.M., Huber, F.A., Nakhostin, D., *et al.* (2022) Impact of Acceleration on Bone Depiction Quality by Ultrashort Echo Time Magnetic Resonance Bone Imaging Sequences in Medication-Related Osteonecrosis of the Jaw. *European Journal of Radiology Open*, **9**, Article ID: 100421. <https://doi.org/10.1016/j.ejro.2022.100421>
- [14] Kaza, E., Lee, C.Y., King, M.T., *et al.* (2022) First Pointwise Encoding Time Reduction with Radial Acquisition (PETRA) Implementation for Catheter Detection in Interstitial High-Dose-Rate (HDR) Brachytherapy. *Brachytherapy*, **21**, 501-510. <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2022.01.003>
- [15] 孙英彩, 崔建岭, 李石玲, 等. MRI 测量正常人膝关节软骨厚度[J]. 实用放射学杂志, 2004, 20(11): 1007-1010.
- [16] 郭世萍, 马兆龙, 张晓卫, 等. 膝关节矢状断层影像解剖学[J]. 局解手术学杂志, 2004, 13(3): 145-148.
- [17] 姜艳丽, 令潇, 张静. MR T2~*mapping 诊断关节软骨早期病变的临床价值[J]. 中华介入放射学电子杂志, 2017, 5(1): 20-23.
- [18] 袁慧书, 刘丽思. 肌骨关节系统磁共振成像临床应用及进展[J]. 磁共振成像, 2015, 6(2): 81-85.
- [19] 梁学恒, 杨全, 余洁, 等. T2~*mapping 定量评估早期骨关节炎半月板与软骨的相关性[J]. 海南医学, 2017, 28(16): 2631-2634.
- [20] Khandelwal, R., Kharat, A., Botchu, R., *et al.* (2022) High Resolution T2* Mapping in Assessment of Knee Articular Cartilage on 3T MRI. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, **27**, Article ID: 101823. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2022.101823>