

论 著

MRI 3D mDixon Quant 序列不同加速技术和因子的腰椎椎体骨髓脂肪含量与相邻椎间盘退变关联性分析*

何晓冬* 曾云富 王一雯
宜宾市第一人民医院放射科
(四川 宜宾 644000)

【摘要】目的 通过分析磁共振三维魔镜成像定量技术(MRI 3D mDixon Quant)测量腰椎椎体骨髓脂肪(BMAT)含量,评估其与相邻椎间盘退变(IVDD)的相关性,探讨MRI 3D mDixon Quant测量的BMAT含量在用于评估相邻IVDD工作中的应用价值。**方法** 选取2022年8月至2023年6月期间,对100名慢性下腰痛志愿者进行了腰椎MRI检查,并进行了MRI 3D mDixon Quant成像,采用MRI 3D mDixon Quant技术对BMAT进行测量并评估,选取L1-L3椎体BMAT的平均值,基于X线结合CT的检查结果,绘制受试者的工作特征(ROC)曲线,分析MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量对评估IVDD的临床应用价值。**结果** 通过X线结合CT检查得知病理结果,显示100例慢性下腰痛志愿者中发生IVDD有47例,未发生IVDD有53例;发生IVDD的患者MRI 3D mDixon Quant序列SENSE(SENSE AF=2、CS AF=6、CS AF=8)、CS(SENSE AF=2、CS AF=6、CS AF=8)加速技术和因子测量的BMAT含量高于未发生IVDD患者,差异有统计学意义($P < 0.05$)。ROC曲线分析结果显示,SENSE结合SENSE AF=2、CS AF=6、CS AF=8、CS结合SENSE AF=2、CS AF=6、CS AF=8测量出的BMAT值,敏感度分别为0.981、0.925、0.868、0.906、0.962、0.887。**结论** MRI 3D mDixon Quant序列中SENSE结合SENSE AF=2、SENSE结合CS AF=6、SENSE结合CS AF=8、CS结合SENSE AF=2、CS结合CS AF=6、CS结合CS AF=8测量的BMAT含量对IVDD的发生具有一定的评估价值。

【关键词】 磁共振三维魔镜成像定量技术;
腰椎椎体骨髓脂肪含量; 椎间盘退变

【中图分类号】 R323.3

【文献标识码】 A

【基金项目】 四川省卫生健康委员会
科研课题(20PJ309)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.07.054

Correlation Analysis between Bone Marrow Fat Content of Lumbar Vertebrae and Adjacent Intervertebral Disc Degeneration with Different Acceleration Techniques and Factors of MRI 3D mDixon Quant Sequence*

HE Xiao-dong*, ZENG Yun-fu, WANG Yi-wen.

Department of Radiology, The First People's Hospital of Yibin, Yibin 644000, Sichuan Province, China

ABSTRACT

Objective To analyze the bone marrow fat (BMAT) content of lumbar vertebrae measured by three-dimensional magnetic resonance imaging quantitative technique (MRI 3D mDixon Quant), evaluate its correlation with adjacent intervertebral disc degeneration (IVDD), and explore the application value of BMAT content measured by MRI 3D mDixon Quant in evaluating adjacent IVDD. **Methods** From August, 2022 to June, 2023, 100 volunteers with chronic low back pain were examined by MRI, and the BMAT was measured and evaluated by MRI. Based on the results of X-ray combined with CT, Draw the ROC curve of the subjects, and analyze the BMAT content measured by different acceleration techniques and factors of MRI 3D mDixon Quant sequence to evaluate the clinical application value of IVDD. **Results** The pathological results were obtained by X-ray combined with CT examination. Among 100 volunteers with chronic low back pain, there were 47 cases with IVDD and 53 cases without IVDD. In patients with IVDD, the BMAT content of MRI 3D mDixon Quant sequence SENSE(SENSE AF=2, CS AF=6, CS AF=8), CS(SENSE AF=2, CS AF=6, CS AF=8) accelerated technique and factor measurement was higher than that of patients without IVDD, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). ROC curve analysis results show that BMAT values measured by SENSE combined with SENSE AF=2, CS AF=6, CS AF=8, CS combined with SENSE AF=2, CS AF=6 and CS AF=8 have sensitivities of 0.981, 0.925, 0.868, 0.906, 0.962 and 0.887, respectively, under the curve. **Conclusion** The BMAT content measured in MRI 3D mDixon Quant sequence with SENSE binding SENSE AF=2, SENSE binding CS AF=6, SENSE binding CS AF=8, CS binding SENSE AF=2, CS binding CS AF=6 and CS binding CS AF=8 has certain evaluation value for the occurrence of IVDD.

Keywords: Quantitative Technology of Magnetic Resonance Three-Dimensional Magic Mirror Imaging; Bone Marrow Fat Content of Lumbar Vertebrae; Intervertebral Disc Degeneration

腰椎间盘置身于相邻的椎体之间,是由上方与下方的软骨终板、环状的纤维环以及处于中间位置的髓核组织共同构筑而成的富有弹性的胶状构造,其生化构成成分主要涵盖了胶原纤维、弹性纤维以及蛋白聚糖等,隶属于人体内部体积最大的无血管组织^[1]。在功能层面,腰椎间盘不仅需要承担与缓冲人体所产生的重力,而且还需要确保脊柱能够进行弯曲、旋转等活动,直接致使其成为最容易出现脊柱病变的组织。相邻椎间盘退变(IVDD)指的是腰椎间盘伴随着年龄的逐渐增加而逐步产生变性的疾病,是一种常见且容易引发腰痛的骨科病症,其发生通常与多种因素存在关联,诸如机械损伤、营养失调、免疫炎症、细胞凋亡以及基质降解等等^[2]。IVDD在早期主要呈现出生化成分的改变,而到了晚期则会进一步发生形态学方面的变化,涵盖了椎间盘高度的降低、纤维环的撕裂以及髓核的突出等^[3]。腰椎间盘的营养供应主要依赖于相邻椎体内的微血管通过软骨终板进行扩散来加以获取,对于这一途径的任何干扰都有可能致使椎间盘代谢紊乱,进而发生退变的危险因素。骨髓是人体内重要的造血器官,包含造血细胞和脂肪组织。骨髓脂肪(BMAT)是指骨髓中脂肪组织所占的比例,已被证实可导致脊柱的力学性能改变,影响椎间盘的营养供应,进而加速IVDD的发生^[4]。然而,邻近椎体的腰椎椎体骨髓脂肪(BMAT)是否会对腰椎间盘的退变以及软骨终板的变化产生影响尚且并不明确。MRI 3D Dixon Quant序列的不同加速技术和因子的应用可以缩短扫描时间,提高工作效率,提高检查的精准度,目前已在腰椎疾病的诊断和评估中的应用越来越广泛^[5]。目前,针对MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量与IVDD关系的研究相对而言比较少,其是否能有效评估IVDD的发生还尚未可知。基于此,本研究将慢性下腰痛的成人患者当作研究对象,旨在深入剖析MRI 3D mDixon Quant序列中不同加速技术和因子测量的BMAT含量,以及与相邻IVDD之间存在的关联性,探讨MRI 3D mDixon Quant序列中不同加速技术和因子测量的BMAT含量在用于评估相邻IVDD工作中所具有的应用价值,并展开对比分析,为IVDD的诊疗提供更为客观、准确的理论依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取在2022年8月至2023年6月期间,对100名慢性下腰痛志愿者进行了腰椎MRI检查,并进行了MRI 3D mDixon Quant成像,年龄范围在42至59岁之间,平均年龄为(50.39±5.82)岁,其中男性53人,女性47人,体重指数(BMI)为16.21-33.20kg/

*第一作者:何晓冬,男,主管技师,主要研究方向:磁共振扫描技术方面。E-mail: marksim1314@163.com

【通讯作者】何晓冬

m², 平均(23.23±3.22)kg/m²; 身高167.52±5.36cm; 11例合并腰肌劳损; 23例既往有高血压病史, 25例既往有糖尿病病史; 27例从事的工作需要长期坐着办公(坐着时间≥6小时), 32例从事体力劳动强度较大的工作(体力劳动时间≥5小时)。

纳入标准包括: 均有慢性下腰痛(持续12个星期以上); 接受腰椎常规MRI、X线、CT等影像学检查, 影像质量良好。排除标准包括: 有磁共振检查禁忌症者, 比如体内有非核磁安全性的植入物、幽闭恐惧症者; 有可能导致脊柱或椎间盘病变的其它相关病史, 如肿瘤、脊柱滑脱、腰椎侧凸、腰椎外伤或骨折、手术、脊柱感染性疾病、血液病、代谢性骨病等; 检查过程中由于各种原因导致成像数据不完整或图像质量差的研究资料; 患有代谢性疾病者; 使用糖皮质激素等影响骨代谢药物者。

1.2 方法 在3.0TMRI扫描仪(Philips Ingenia3.0T, the Netherlands)上采用3D mDixon Quant序列并使用不同加速技术(SENSE和CS)结合不同加速因子(SENSE AF=2、4)和(CS AF=2、3、4、5、6、7、8)对志愿者行全腰椎扫描并进行MRI图像数据采集以测量BMAT含量。以32通道椎体表面相控线圈, 对患者进行腰椎扫描。患者采用仰卧位, 身体与床体保持平行, 扫描部位尽可能接近主磁场和线圈中心, 膝部放置海绵垫, 以控制腰椎静止。参数设置: 矢状位T2WI-TSE序列: TR2500ms, TE107ms, 层厚3mm, 层间距0.8mm, 采集次数2次; 矢状面mDixon-Quant序列: TR5.6ms, TE0.95ms, FOV400mm×350mm, 矩阵368×214, 翻转角3°, 层厚3mm, 层间距0, 扫描时间17s。

在使用MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量腰椎椎体骨髓脂肪含量来判定椎间盘退变(IVDD)时, 可能会参考以下标准: (1)脂肪含量的变化: 与正常腰椎椎体的骨髓脂肪含量进行比较。(2)区域性差异: 观察不同腰椎节段的骨髓脂肪含量差异。(3)阈值判断: 设定一个脂肪含量的阈值, 超过该阈值可能提示IVDD。(4)结合其他影像学表现: 如椎间盘高度的变化、信号强度等。(5)纵向比较: 对同一患者进行多次测量, 观察脂肪含量的变化趋势。(6)与临床症状的相关性: 结合患者的症状来判断。(7)正常参考值范围: 根据年龄段和性别确定正常的骨髓脂肪含量范围。

1.3 统计学方法 运用SPSS 26.0统计软件, 对采集到的数据进行处理与分析, 计量资料均经Shapiro-Wilk正态性检验, 符合正态分布的资料以均值标准差表示, 计数资料用频数及百分比表示。通过运用受试者工作特征(ROC)曲线, 分析MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量对评估IVDD的临床应用价值。

2 结果

2.1 X线结合CT检查结果 通过X线结合CT检查得知, 显示100例慢性下腰痛志愿者中发生IVDD有47例, 未发生IVDD有53例(P>0.05)。

2.2 发生IVDD的患者与未发生IVDD患者的一般资料对比 两组患者一般资料对比无差异(P>0.05)。见表1。

表1 发生IVDD的患者与未发生IVDD患者的一般资料对比

一般资料	X线结合CT检查结果		统计值	P
	发生IVDD(n=47)	未发生IVDD(n=53)		
年龄(岁)	56.39±5.26	58.45±6.38	1.748	0.084
性别	男 28	25	0.559	0.455
	女 19	28		
体重指数(kg/m ²)	29.21±10.39	27.61±8.98	0.826	0.411
身高(cm)	165.52±8.63	168.89±10.26	1.765	0.081
合并腰肌劳损	是 5	6	0.004	0.948
	否 42	47		
高血压病史	是 10	13	0.055	0.815
	否 37	40		
糖尿病病史	是 12	13	0.005	0.945
	否 35	40		
工作需要长期坐着办公 (坐着时间≥6小时)	是 15	12	0.378	0.539
	否 32	41		
从事体力劳动强度较大的工作 (体力劳动时间≥5小时)	是 11	21	1.142	0.285
	否 36	32		

2.3 发生IVDD的患者与未发生IVDD患者经MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量对比 发生IVDD的患者MRI 3D mDixon Quant序列SENSE(SENSE AF=2、CS AF=6、CS AF=8)、CS(SENSE AF=2、CS AF=6、CS AF=8)加速技术和因子测量的BMAT含量高于未发生IVDD患者, 差异有统计学意义(P<0.05)。见表2。

2.4 MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量对评估IVDD的临床应用价值 将IVDD的发生情况作为状态变量(发生IVDD=1, 未发生IVDD=0), 将MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术结合不同加速因子测量BMAT含量作为检验变量, 绘制ROC曲线(见图1), 结果显示, MRI 3D mDixon Quant序列中SENSE结合SENSE AF=2、SENSE结合CS AF=6、SENSE结合CS AF=8、CS结合SENSE AF=2、CS结合CS AF=6、CS结合CS AF=8测量的BMAT含量对评估IVDD发生具有较高的价值。

表2 发生IVDD的患者与未发生IVDD患者经MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量对比

MRI 3D mDixon Quant序列不同 加速技术结合不同加速因子	X线结合CT检查结果		统计值	P
	未发生IVDD(n=53)	发生IVDD(n=47)		

SENSE	SENSE AF=2	30.75±8.19	36.59±9.86	3.234	0.002
	SENSE AF=4	30.13±3.03	32.25±7.12	1.976	0.051
	CS AF=2	30.45±9.10	30.75±8.12	0.173	0.863
	CS AF=3	29.59±8.18	30.14±8.78	0.324	0.747
	CS AF=4	32.85±7.99	30.75±8.12	1.302	0.196
	CS AF=5	33.75±8.13	30.65±8.96	1.814	0.073
	CS AF=6	30.12±2.12	34.55±6.12	4.948	0.001
	CS AF=7	29.58±5.63	30.27±7.89	0.508	0.613
CS	SENSE AF=2	30.22±2.03	35.66±6.82	5.540	0.001
	SENSE AF=4	29.98±6.88	30.27±7.65	0.200	0.842
	CS AF=2	30.26±6.52	30.98±7.68	0.507	0.613
	CS AF=3	30.26±6.33	31.56±7.25	0.957	0.341
	CS AF=4	29.87±6.24	31.98±7.31	1.557	0.123
	CS AF=5	30.12±5.26	31.24±6.35	0.964	0.337
	CS AF=6	30.74±1.52	36.91±7.12	6.156	0.001
	CS AF=7	30.88±4.96	31.02±5.98	0.128	0.899
	CS AF=8	29.95±2.13	35.85±6.82	5.981	0.001

表3 MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的
BMAT含量对评估IVDD的临床应用价值的ROC曲线分析

指标		AUC	95%CI	P值	灵敏度	约登指数
SENSE	SENSE AF=2	0.631	0.521-0.740	0.025	0.981	0.386
	CS AF=6	0.742	0.643-0.842	0.000	0.925	0.225
	CS AF=8	0.746	0.644-0.848	0.000	0.868	0.321
CS	SENSE AF=2	0.728	0.622-0.834	0.000	0.906	0.264
	CS AF=6	0.814	0.725-0.903	0.000	0.962	0.487
	CS AF=8	0.801	0.707-0.895	0.000	0.887	0.562

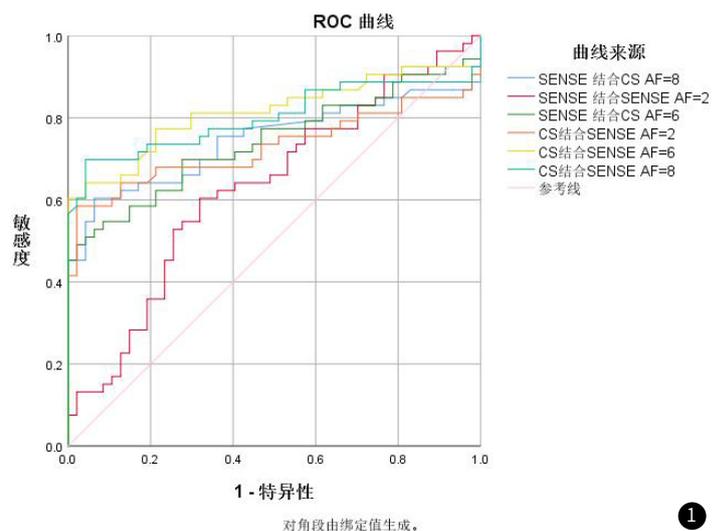


图1 MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量对评估IVDD的临床应用价值的ROC曲线。

3 讨论

腰椎间盘退行性改变(IVDD)实则为腰椎自然而然出现老化、逐步退化的生理病理进展流程,其关键在于IVDD及其继发的病理改变会波及周围的关节软骨、韧带等组织结构,从而引发腰腿痛、坐骨神经痛等一系列症状^[6]。此种病症属于脊柱外科疾病中发病率居于首位的疾病类型,是由椎间盘的基质代谢失衡所诱发,基质金属蛋白酶等细胞因子和炎症介质参与到了病变的整个过程之中,能够致使椎间盘的生物力学、生物化学以及病理解剖均发生改变,进一步导致椎间盘产生退变,进而引发下腰痛的情况^[7-9]。椎间盘作为人体之中最大的无血管性组织,其所需的营养物质主要来源于终板,营养会经由椎体内通过软骨终板输送到椎间盘之中。正因如此,终板软骨损伤、椎间盘周围脂肪组织减少被看作是IVDD产生的重要因素。腰椎退行性疾病的发展进程同样也是腰椎稳定性逐步丧失的过程。腰椎参与控制着人体的躯干运动,承担着大部分身体运动所带来的压力与负荷,椎旁肌作为维持腰椎稳定的关键要素,其形态结构以及组织成分的改变也会促使腰椎退行性变的进程加快,成为近些年来重点研究对象^[9-11]。

当下已有的研究主要聚焦于椎旁肌对于腰椎稳定性的维持作用,以及在腰椎相关疾病中椎旁肌的组织学变化情况。如何利用先进的影像学检查手段,从多个角度去了解椎旁肌在退行性疾病中所发生的改变,达成无创、便捷、全面地评估腰椎退行性疾病的目标,从而助力临床实现早期的发现与预防显得尤为关键,对IVDD的早期诊断、准确分级和量化评估对于临床的诊治和预后都具有十分重要的意义^[12]。

腰椎椎体BMAT含量是用以评估腰椎健康状况的一项指标,其具备着如下作用^[13]:其一,评估骨骼的健康状况,能够反映出骨代谢的具体情况;其二,辅助进行疾病的诊断,有利于发现部分骨骼方面的疾病;其三,反映出骨骼衰老的程度,伴随着年龄的不断增长,BMAT含量则产生相应的变化。故而对腰椎椎体BMAT含量加以了解,能够为骨骼的健康提供一定的参考依据。

伴随着影像学技术的发展,MRI技术拥有卓越的软组织分辨能力,在骨关节系统中具备更大的优势,能够让骨关节、软骨、韧带等层次分明,明显优于常规的CT检查,但单纯的MRI检查对

诊断IVDD无法全面反映椎间盘的功能状态,无法实时监测椎间盘的变化过程,且易受到患者运动、呼吸等因素的干扰,影响检查的准确性^[14-16]。MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子扫描属于新发展的MRI成像技术,通过获取腰椎间盘感兴趣区的T2*值以及上、下位椎体脂肪分数(FF)值,进而达成对患者椎间盘生化改变的定量分析。

MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子乃是近年来所提出的一种用于对人体组织成分之中的脂肪含量进行评估的核磁共振成像(MRI)技术,属于测量脏器、FF的主要手段之一^[17]。此技术基于多回波Dixon技术的变体,借由测量不同回波时间下的信号强度,以实现脂肪和水的信号予以区分的目的,能够提供和组织中脂肪含量相关的定量信息,对于评估脂肪分布、代谢疾病以及其他和脂肪存在关联的状况极其有用。与传统的Dixon技术相较而言,MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子具备更高的分辨率以及准确性,其不仅能够提供三维的脂肪含量图,而且还可以在单次扫描中同步评估多个切片^[18]。本次研究显示,发生IVDD的患者经MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量比未发生IVDD的患者的BMAT含量要高,说明BMAT含量与是否IVDD成正相关。MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量出现差异性的原因可能包括以下几点^[19]:(1)加速技术差异:不同的加速技术可能对信号采集和处理方式有所不同,从而影响测量结果;(2)因子设置:加速因子的不同设置可能导致数据采集和处理的差异;(3)磁场均匀性:磁场的均匀性会影响信号的强度和质量;(4)患者个体差异:包括体型、生理状态等因素。

国内外研究表明^[20],MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子在骨科疾病中具有以下应用价值:(1)提高诊断准确性:帮助医生更准确地识别和评估骨科疾病。(2)评估疾病进展:监测疾病的发展过程,为治疗提供依据。(3)指导治疗方案:辅助医生制定更个性化的治疗计划。(4)预测治疗效果:为预测疾病的预后提供参考。(5)缩短扫描时间:提高检查效率,减少患者的不适。(6)降低辐射剂量:对患者更加安全。(7)提高图像质量:提供更清晰、详细的图像信息。(8)评估骨骼健康:包括骨密度、骨髓情况等。(9)早期发现病变:有助于在疾病早期进行干预。(10)监测术后恢复:了解手术效果及术后恢复情况。(11)研究疾病机制:为深入了解骨科疾病的发病机制提供帮助。(12)促进个性化医疗:根据患者的具体情况提供更精准的诊断和治疗。

此外,本研究还经ROC证实,SENSE结合SENSE AF=2、CS AF=6、CS AF=8、CS结合SENSE AF=2、CS AF=6、CS AF=8测量出的BMAT值,曲线下面积分别为0.631、0.742、0.746、0.728、0.814、0.801,其测量的BMAT含量对预测IVDD是否发生具有较高的评估价值。说明MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量对IVDD的发生具有一定的评估价值。究其原因,MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子在对腰椎椎体BMAT含量展开评估时具有如下诸多优点:其一,高分辨率:其可提供极为清晰的三维图像,有利于更加准确地对脂肪分布情况予以评估;其二,定量分析:能够精确地测量出BMAT含量;其三,全面评估:具备同时对多个腰椎椎体进行评估的能力。MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子在对腰椎椎体BMAT含量对IVDD的发生具有一定的评估价值,但其仍具有一定的局限性,首先,成本相对较高:无论是设备还是检查的费用,都处于较高的水平,部分患者承担能力有限;其次,对运动较为敏感:患者的运动有可能对图像的质量产生影响;最后,特定人群的适用性存在限制:在某些特定的情况下,可能并不适合某些特定的患者。

MRI 3D mDixon Quant序列和相邻椎间盘退变的关联性分析有着重大的临床意义。借由该分析能够:(1)深度知晓椎间盘退变的缘由与机制。对骨髓脂肪含量和椎间盘退变之间关系的了解,有助于揭示椎间盘退变的潜在因素。(2)给疾病的诊断提供更多资讯。定量评估骨髓脂肪含量,并结合椎间盘退变的实际状况,能够更为全面地判断腰椎的健康情形。(3)指引治疗方案的拣选。依据关联性分析的结果,医生能够更具针对性地拟定治疗规划。

(4)预测疾病的进展走向。有利于对椎间盘退变的发展趋势进行预判,为患者提供个性化的预防和保健建议。

综上所述,MRI 3D mDixon Quant序列不同加速技术和因子测量的BMAT含量对IVDD的发生具有一定的评估价值,临床不仅可定量评估BMAT含量,并结合IVDD的实际状况,能够更为全面地判断腰椎的健康情形,能够更具针对性地拟定治疗规划,还可预测疾病的进展走向,利于对IVDD的发展趋势进行预判,为患者提供个性化的预防和保健建议。

参考文献

- [1] Xin J, Wang Y, Zheng Z, et al. Treatment of intervertebral disc degeneration[J]. *Orthop Surg*, 2022, 14(7): 1271-1280.
- [2] Kirnaz S, Capadona C, Wong T, et al. Fundamentals of intervertebral disc degeneration[J]. *World Neurosurg*, 2022, 157: 264-273.
- [3] Francisco V, Pino J, González-Gay MÁ, et al. A new immunometabolic perspective of intervertebral disc degeneration[J]. *Nat Rev Rheumatol*, 2022, 18(1): 47-60.
- [4] Jin P, Xing Y, Xiao B, et al. Diabetes and intervertebral disc degeneration: a mendelian randomization study[J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2023, 14: 1100874.
- [5] Krut Z, Pelled G, Gazit D, et al. Stem cells and exosomes: new therapies for intervertebral disc degeneration[J]. *Cells*, 2021, 10(9): 2241.
- [6] Xing H, Zhang Z, Mao Q, et al. Injectable exosome-functionalized extracellular matrix hydrogel for metabolism balance and pyroptosis regulation in intervertebral disc degeneration[J]. *J Nanobiotechnology*, 2021, 19(1): 264.
- [7] Kamali A, Ziadlou R, Lang G, et al. Small molecule-based treatment approaches for intervertebral disc degeneration: Current options and future directions[J]. *Theranostics*, 2021, 11(1): 27-47.
- [8] Geng Z, Wang J, Chen G, et al. Gut microbiota and intervertebral disc degeneration: a bidirectional two-sample Mendelian randomization study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 601.
- [9] Roh EJ, Darai A, Kyung JW, et al. Genetic therapy for intervertebral disc degeneration[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(4): 1579.
- [10] Luo R, Li G, Zhang W, et al. O-GlcNAc transferase regulates intervertebral disc degeneration by targeting FAM134B-mediated ER-phagy[J]. *Exp Mol Med*, 2022, 54(9): 1472-1485.
- [11] Wang Y, Kang J, Guo X, et al. Intervertebral disc degeneration models for pathophysiology and regenerative therapy -benefits and limitations[J]. *J Invest Surg*, 2022, 35(4): 935-952.
- [12] Li XC, Luo SJ, Fan W, et al. Macrophage polarization regulates intervertebral disc degeneration by modulating cell proliferation, inflammation mediator secretion, and extracellular matrix metabolism[J]. *Front Immunol*, 2022, 13: 922173.
- [13] Liao Z, Liu H, Ma L, et al. Engineering extracellular vesicles restore the impaired cellular uptake and attenuate intervertebral disc degeneration[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(9): 14709-14724.
- [14] Zhang Y, Han S, Kong M, et al. Single-cell RNA-seq analysis identifies unique chondrocyte subsets and reveals involvement of ferroptosis in human intervertebral disc degeneration[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2021, 29(9): 1324-1334.
- [15] Kang L, Zhang H, Jia C, et al. Epigenetic modifications of inflammation in intervertebral disc degeneration[J]. *Ageing Res Rev*, 2023, 87: 101902.
- [16] Li L, He J, Zhang G, et al. Role of caspase family in intervertebral disc degeneration and its therapeutic prospects[J]. *Biomolecules*, 2022, 12(8): 1074.
- [17] Chen Z, Song J, Xie L, et al. N6-methyladenosine hypomethylation of circGPATCH2L regulates DNA damage and apoptosis through TRIM28 in intervertebral disc degeneration[J]. *Cell Death Differ*, 2023, 30(8): 1957-1972.
- [18] Li G, Zhang W, Liang H, et al. Epigenetic regulation in intervertebral disc degeneration[J]. *Trends Mol Med*, 2022, 28(10): 803-805.
- [19] Silwal P, Nguyen-Thai AM, Mohammad HA, et al. Cellular senescence in intervertebral disc aging and degeneration: molecular mechanisms and potential therapeutic opportunities[J]. *Biomolecules*, 2023, 13(4): 686.
- [20] Zhang H, Yao S, Zhang Z, et al. Network pharmacology and experimental validation to reveal the pharmacological mechanisms of liuwei dihuang decoction against intervertebral disc degeneration[J]. *Drug Des Devel Ther*, 2021, 15: 4911-4924.

(收稿日期: 2024-04-26)

(校对编辑: 姚丽娜、翁佳鸿)