

# 膝关节 MRI 替代 X 线检查评估骨骺发育推断骨龄的可行性研究

邓小冬<sup>1</sup>, 成子琦<sup>2</sup>, 林雨山<sup>2</sup>, 范飞<sup>2</sup>, 占梦军<sup>2</sup>, 王廷宏<sup>1</sup>, 向明亮<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 邓振华<sup>2</sup>

(1. 川北医学院基础医学与法医学研究所, 四川 南充 637000; 2. 四川大学基础医学与法医学院, 四川 成都 610041)

**【摘要】目的:** 探讨膝关节 MRI 替代 X 线片评估膝关节骨骺发育推断骨龄的可行性。**方法:** 采用《法庭科学汉族青少年骨龄鉴定技术规程》和 Schmeling 与 Kellinghaus 联合分级法回顾性分析 123 例 11~25 岁中国汉族青少年 3.0 T 膝关节矢状位 T1-TSE 序列 MRI 和 X 线片股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级, 分析膝关节 MRI 替代 X 线片评估膝关节骨骺发育的一致性、可靠性及重复性。绘制受试者工作特征(ROC)曲线, 根据曲线下面积(AUC)评估膝关节 MRI 与 X 线片骨骺发育等级判别 18 岁年龄节点的判别能力。**结果:** MRI 与 X 线片股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级的一致性较好( $Kappa = 0.926 \sim 1.000$ ), 等级间差异无统计学意义( $P > 0.05$ ); MRI 股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级的可靠性及重复性较好( $Kappa = 0.904 \sim 0.975$ ), 优于 X 线片( $Kappa = 0.894 \sim 0.950$ )。MRI 股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级与年龄相关性较强( $r = 0.714 \sim 0.775$ ), 与 X 线片表现相当( $r = 0.714 \sim 0.767$ )。ROC 曲线显示, MRI 与 X 线片股骨远端、胫骨近端骨骺发育等级均具备较强的 18 岁年龄节点判别能力( $AUC = 0.850 \sim 0.900$ ), MRI 股骨远端骨骺的判别表现优于 X 线片。**结论:** 膝关节 MRI 可替代 X 线片评估骨骺发育等级推断青少年骨龄。

**【关键词】** 法医影像学; 骨龄; 核磁共振成像; 膝关节; 骨骺

**【中图分类号】** R445.1 **【文献标志码】** A

## The feasibility study of knee MRI instead of X-ray in assessing epiphyseal development for bone age estimation

DENG Xiao-dong<sup>1</sup>, CHENG Zi-qi<sup>2</sup>, LIN Yu-shan<sup>2</sup>, FAN Fei<sup>2</sup>, ZHAN Meng-jun<sup>2</sup>, WANG Ting-hong<sup>1</sup>, XIANG Ming-liang<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, DENG Zhen-hua<sup>2</sup>

(1. Institute of Basic Medical Sciences & Forensic Medicine, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000; 2. School of Basic Medical Sciences & Forensic Medicine, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**【Abstract】Objective:** To explore the feasibility of knee MRI instead of X-rays in assessing epiphyseal development for bone age estimation. **Methods:** The grades of distal femoral and proximal tibial epiphysis based on sagittal T1-TSE sequence of 3.0 T knee MRI and knee X-rays from 123 Chinese Han adolescents aged 11~25 years were retrospectively assessed by the 《Technical Regulations for Bone Age Assessment of Han Adolescents in Forensic Science》(GA/T 1583-2019), Schmeling and Kellinghaus joint grading method. The consistency, reliability and repeatability of grades of distal femoral epiphysis and proximal tibial epiphysis based on knee MRI instead of X-rays images were evaluated. Receiver operating characteristic (ROC) curves were plotted, and the ability to distinguish 18-year old by MRI and X-ray epiphysis was evaluated according to the Area Under Curve (AUC). **Results:** There was strong consistency on the grades of distal femoral epiphysis or proximal tibial epiphysis between knee MRI and X-rays images ( $Kappa = 0.926 \sim 1.000$ ). The significant difference of the grades of distal femoral epiphysis or proximal tibial epiphysis were not founded ( $P > 0.05$ ). The intra-observer and inter-observer of Kappa values ( $0.904 \sim 0.975$ ) for evaluating the grades of distal femoral epiphysis and proximal tibial epiphysis based on knee MRI by epiphysis grading method were better than X-rays ( $0.894 \sim 0.950$ ). The grades of distal femoral epiphysis and proximal tibial epiphysis based on knee MRI were positively correlated with age ( $r = 0.714 \sim 0.775$ ) correspond to X-rays ( $r = 0.714 \sim 0.767$ ). ROC curve showed that MRI and X-rays had a strong ability to distinguish 18 years old ( $AUC = 0.850 \sim 0.900$ ), and the identification performance of distal femur epiphysis of MRI was better than X-rays. **Conclusion:** Knee MRI is likely to substitute X-rays for evaluating the grade of knee epiphysis to estimate bone age.

**基金项目:** 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1286); 四川省重点研发项目面上项目(2022YFS0530); 证据科学教育部重点实验室(中国政法大学)开放基金资助课题(2021KFKT03); 四川省博士后科研项目特别资助项目(2021-12); 南充市市校科技战略合作专项(22SXQT0177)

**作者简介:** 邓小冬(1988-), 男, 博士, 讲师。E-mail: 857123409@qq.com

**通讯作者:** 邓振华, 教授。E-mail: dengzhenhua@scu.edu.cn

【Key words】Forensic imaging; Bone age; Magnetic resonance imaging; Knee; Epiphysis

骨龄推断在法庭科学、临床医学、竞技体育、移民及难民福利等领域具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。目前主要通过具有放射性影像检查技术(X线或CT)获取单一或多部位联合的骨骼或牙齿影像,基于人工评阅目标骨骼或牙齿影像学特征,推断骨龄<sup>[3]</sup>。尽管单一部位X线片辐射量( $0.1 \mu\text{Sv}$ )微弱,但放射检查辐射危害的潜在风险仍不容忽视,且非诊疗目的的放射性影像检查备受争议,故有必要探寻非放射性检查手段予以替代<sup>[4]</sup>。与传统放射性X线或CT检查相比,MRI具有高分辨率、多参数、多层面、多角度和安全无辐射等优势,可清晰呈现骨骼发育各阶段的形态特征,是评价青少年骨骼发育理想的非放射性影像成像技术,备受国外学者青睐<sup>[5]</sup>。近年来,开展了大量基于四肢长骨、锁骨等部位MRI推断骨龄的研究<sup>[6-9]</sup>;其中,膝关节继发骨化中心出现早,骨骺闭合晚,骨骺发育时间跨度大,有望通过单一部位扩展重要年龄节点判别范围,满足我国司法实践需求,丰富法医学年龄推断研究内容,具有重要的现实意义。既往基于欧洲人群采用不同骨骺分级方法验证了膝关节MRI推断青少年骨龄的潜在价值,认为膝关节MRI有望替代X线检查推断青少年骨龄<sup>[10-14]</sup>。本研究团队前期联合运用Schmeling和Kellinghaus分级法回顾性评估了852例(7~30岁)中国汉族人群膝关节3.0T MRI矢状位T1-TSE序列股骨远端、胫骨近端骨骺发育情况,并建立了年龄预测回归模型,结果表明基于膝关节MRI推断骨龄是一种具有潜在价值的非放射性年龄推断方法<sup>[15]</sup>。但对比分析膝关节MRI替代X线片评估膝关节骨骺发育等级的可行性研究鲜有报道。基于此,本研究拟探讨膝关节MRI替代X线片评估膝关节骨骺发育推断骨龄的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究材料

1.1.1 研究对象 收集2014年9月至2021年7月四川大学华西医院和川北医学院附属医院图像存储与传输系统(picture archiving and communication system, PACS)中11~25岁中国汉族青少年个体同时期(1个月内)拍摄的123例(男性68例,女性55例)膝关节MRI及X线片资料。所有MRI和X线片显示膝关节骨骼发育正常、图像清晰,无影响骨骼生长发育的疾病、外伤史、手术史。对应的实际年龄计算:实际年龄=(拍片日期-出生日期)/365.25。

1.1.2 医学影像图像相关参数 膝关节MRI来源于美国通用电气公司(General Electric company,

GE) Discovery MR750、Signa Excite、Signa Premier和Signa Architect型号的3.0T磁共振设备。采用矢状位T1加权快速自旋回波序列(T1-weighted image-turbo spin echo, T1-TSE),厚度3~4mm,重复时间(TR)340~780ms,回波时间(TE)7~14ms,视野(FOV)180mm×180mm。膝关节X线片来源飞利浦数字X线成像系统。膝关节MRI和X线片均进行匿名化处理,统一数据格式。采用医学图像处理软件RadiAnt DICOM Viewer(Medixant)进行观察分析。

### 1.2 方法

采用《法庭科学汉族青少年骨龄鉴定技术规范》<sup>[16]</sup>(以下简称《规程》)和Schmeling与Kellinghaus(SK)联合分级法<sup>[17-19]</sup>对骨骼发育进行分级。见图1及图2。

### 1.3 观察指标

由1名长期从事法医学年龄推断的研究人员(观察者A)根据前述膝关节骨骺发育分级标准及原则分别对膝关节X线片和MRI进行评阅,评估股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级。为评估观察者内的重复性,观察者A完成评估任务30d后再次评估股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级。为评估观察者间的可靠性,随机选取膝关节X线片和MRI 62例,由另1名长期从事法医影像学研究的科研人员(观察者B)根据前述膝关节骨骺发育分级标准及原则评估股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级。观察者内、观察者间均按照双盲原则进行独立评阅及分级。

### 1.4 统计学分析

应用SPSS 27.0软件进行数据统计分析。计数资料以频数表示,比较使用配对样本 $\chi^2$ 检验;计量资料以( $\bar{x} \pm s$ )表示,比较使用独立样本 $t$ 检验或Mann-Whitney秩和检验。采用加权Kappa检验评估组间骨骺发育等级变量的一致性。采用Spearman分析骨骺发育等级与实际年龄的相关性。绘制受试者工作特征(ROC)曲线,根据曲线下面积(AUC),评估各骨骺发育分级方法判别18岁年龄节点的判别能力。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 研究对象一般情况

本研究共纳入123例膝关节MRI和X线片,年龄( $19.78 \pm 4.02$ )岁;男性68例,年龄( $20.12 \pm 3.98$ )岁;女性55例,年龄( $19.37 \pm 4.08$ )岁。男性、女性年龄无统计学差异( $P > 0.05$ )。

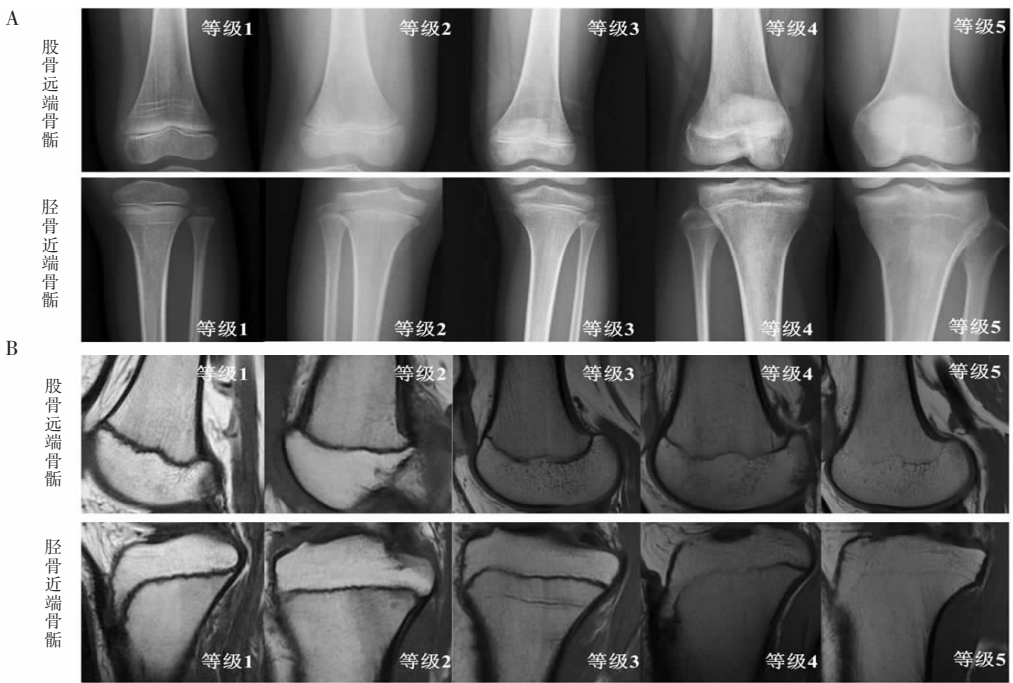


图 1 《规程》评估膝关节 X 线片与 MRI 股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育的分级图。

A. X 线片;B. MRI。等级 1:干、骺未开始闭合,骺软骨间隙清晰,未见骨小梁通过;等级 2:干、骺开始闭合,骺软骨间隙变模糊,可见骨小梁通过;等级 3:干、骺部分闭合,闭合范围未达 1/2,骺软骨间隙较前变窄;等级 4:干、骺大部分闭合,闭合范围达 1/2 以上;干、骺一侧或两侧尚留有间隙;等级 5:干、骺全部闭合,骺线残留或消失。

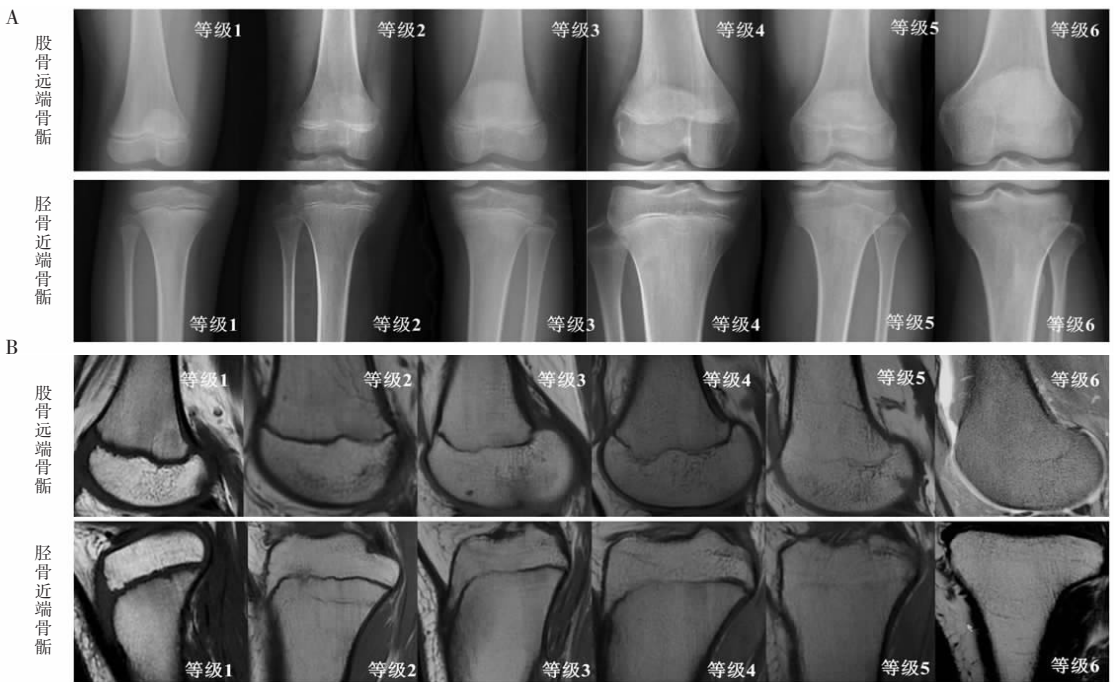


图 2 SK 联合分级法评估膝关节 X 线片与 MRI 股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育的分级图。

A. X 线片;B. MRI。等级 1:骨化中心大部分或完全骨化,干、骺尚未开始闭合;等级 2:干、骺开始闭合,闭合范围未达 1/3;等级 3:干、骺闭合范围达 1/3~2/3;等级 4:干、骺闭合范围超过 2/3;等级 5:干、骺完全闭合,骺线存留;等级 6:干、骺完全融合,骺线消失。

2.2 膝关节 MRI 与 X 线片骨骺发育的一致性分析  
膝关节 MRI 与 X 线片股骨远端骨骺、胫骨近端骨

骺发育等级的一致性较好,加权 Kappa 值均 >0.9,等级间差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。见表 1 及表 2。

表1 膝关节MRI与X线片股骨远端骨骺发育等级的一致性分析(例)

发育等级 (MRI/X线片)	MRI					合计
	等级1	等级2	等级3	等级4	等级5	
X线片						
等级1	1/3					1/3
等级2		6/11				6/11
等级3		0/3	17/8			17/11
等级4		0/1	1/0	5/4		6/5
等级5				4/4	89/89	93/93
合计	1/3	6/15	18/8	9/8	89/89	123
加权 Kappa 值	0.951/0.926					
P 值	0.082/0.056					

表2 膝关节MRI与X线片胫骨近端骨骺发育等级的一致性分析(例)

发育等级(MRI/X 线片)	MRI					合计
	等级1	等级2	等级3	等级4	等级5	
X线片						
等级1	1/3					1/3
等级2		6/8				6/8
等级3		0/1	9/4			9/5
等级4				15/15		15/15
等级5					92/92	92/92
合计	1/3	6/9	9/4	15/15	92/92	123
加权 Kappa 值	1.000/0.990					
P 值	1.000/0.317					

### 2.3 膝关节MRI替代X线片的可靠性及重复性评价

膝关节MRI股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级的观察者内、观察者间加权 Kappa 值均  $> 0.9$  ( $P < 0.05$ ), 其可靠性及重复性较好, 优于 X 线片。《规程》评估膝关节MRI股骨远端骨骺发育等级的

可靠性及重复性总体优于 SK 联合分级法。见表3。

表3 股骨近端和胫骨近端骨骺发育等级的观察者内、观察者间一致性分析

分级方法	加权 Kappa 值(MRI/X线片)			
	股骨近端骨骺		胫骨近端骨骺	
	观察者内	观察者间	观察者内	观察者间
《规程》	0.975/0.894	0.975/0.947	0.974/0.923	0.974/0.949
SK 联合分级法	0.904/0.898	0.928/0.949	0.974/0.925	0.974/0.950

### 2.4 膝关节MRI与X线片骨骺发育等级与年龄的相关性

膝关节MRI股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级与年龄呈正相关, 相关性较强, ( $r = 0.714 \sim 0.775$ ), 与 X 线片表现相当( $r = 0.714 \sim 0.767$ ), 差异无统计学意义( $P < 0.05$ )。

### 2.5 膝关节MRI与X线片骨骺发育等级判别18岁年龄节点的情况

观察发现, 男性、女性MRI和X线片股骨远端、胫骨近端骨骺完全闭合、骺线残留均发生在14~16岁, 且25岁之前未检见骺线消失的影像学特征。因此, 仅根据最小年龄原则, 采用《规程》和SK联合分级方法评估MRI或X线片股骨远端或胫骨近端骨骺发育等级, 不能判别18岁年龄节点。为进一步了解膝关节MRI或X线片股骨远端、胫骨近端骨骺发育等级判别18岁年龄节点的具体判别能力, 本研究绘制了ROC曲线。结果提示MRI与X线片股骨远端、胫骨近端骨骺发育等级均具备较强的18岁年龄节点判别能力( $AUC = 0.850 \sim 0.900$ ), 能兼顾较好的特异度和敏感度, MRI股骨远端骨骺的判别表现优于X线片( $P < 0.05$ )。见图3。

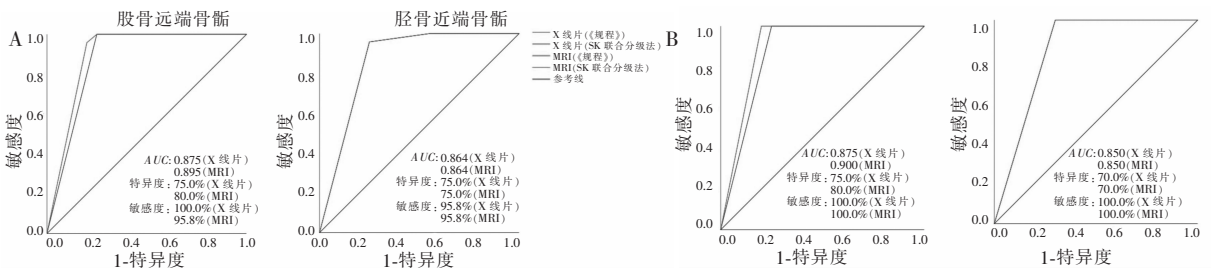


图3 膝关节MRI与X线片骨骺发育等判别18岁年龄节点的ROC曲线图

A. 男性; B. 女性。

## 3 讨论

本研究采用《规程》和SK联合分级法评估了123例11~25岁膝关节MRI和同时期拍摄的膝关

节X线片股骨远端骨骺、胫骨近端骨骺发育等级, 分析了MRI与X线片评估骨骺发育的一致性。研究表明《规程》和SK联合分级法评估膝关节MRI与X线片股骨远端骨骺或胫骨近端骨骺发育等级

的一致性较好,无显著等级差异。本研究在 Fan 等<sup>[20]</sup>研究基础上,进一步纳入《规程》标准,验证了膝关节 MRI 替代 X 线片评估膝关节骨骺发育等级的可行性。其次,研究发现骨骺发育分级方法评估膝关节 MRI 或 X 线片股骨远端骨、胫骨近端骨骺发育等级与年龄呈正相关,相关性较强,其中 MRI 表现优于 X 线片,为膝关节 MRI 替代 X 线检查推断青少年年龄提供了可靠依据。

为评价各骨骺发育分级方法评估膝关节 MRI 股骨远端、胫骨近端骨骺发育等级的可靠性和重复性,本研究随机选取 62 例膝关节 MRI 和 X 线片,由两位长期从事法医学年龄推断或法医影像学研究的资深研究人员,按照双盲原则,采用上述两种骨骺发育分级方法独立评估股骨远端、胫骨近端骨骺发育等级。结果显示,各骨骺发育分级方法评估膝关节 MRI 股骨远端、胫骨近端骨骺发育等级的观察者内、观察者间的一致性较强,总体表现优于 X 线片,表明采用各骨骺发育分级方法人工阅片的可靠性和重复性好,进一步说明采用膝关节 MRI 评估骨骺发育等级推断骨龄具有可操作性和普及价值。

研究发现,采用《规程》评估膝关节 MRI 股骨远端骨骺发育等级的可靠性及重复性总体优于 SK 联合分级法。目前,骨骺发育分级主要基于继发骨化中心发育程度、骺板形态以及骨骺闭合状态进行等级划分。最早,三分级法是最简单、最原始的骨骺发育分级法,即骨骺未开始闭合、骨骺部分闭合、骨骺完全闭合。Jopp 等<sup>[21]</sup>采用骨骺发育三分级法评阅膝关节 MRI 推断年龄,发现该分级方法能快速、准确评估膝关节 MRI 骨骺发育等级,分级简单、易操作,但该分级法过于粗略简单,不能充分反应骨骺发育随年龄变化规律,导致各等级年龄跨度大,准确性差,适用性不强,故本研究未纳入骨骺发育三分级法进行评价。Schmeling 等<sup>[18]</sup>细化了三分级法等级 1 (骨骺未开始闭合)和等级 3 (骨骺完全闭合),纳入了继发骨化中心的形态变化和骺板闭合后骺线残留与否等细节,进一步完善了骨骺分级方法,形成了五分级法,即 Schmeling 分级法。Daghighi 等<sup>[11]</sup>采用 Schmeling 分级法评阅了膝关节 MRI,发现青少年骨骺发育特点主要集中在骺板形态变化,而不是继发骨化中心,认为该分级方法并不适用于青少年骨龄研究。2010 年,Kellinghaus 等<sup>[17]</sup>进一步细化了继发骨化中心和骺板形态变化,将继发骨化中心和骨骺闭合状态分为三等份,即  $<1/3$ 、 $1/3 \sim 2/3$  及  $\geq 2/3$ ,其他分级原则同 Schmeling 分级,形成了 Schmeling 与 Kellinghaus(SK)联合分级法。SK 联合分级法通过细化继发骨化中心和骨骺闭合特征,兼顾了骨骺

发育分级的科学性和可操作性,是目前应用最广泛的骨骺发育分级方法。《规程》是我国法医学领域第一部关于汉族青少年骨龄鉴定标准,标准中涉及膝关节骨骺发育分级方法是在三分级法基础上,将骨骺部分闭合细化为开始闭合、闭合未达  $1/2$  和闭合达  $1/2$  以上,其他分级原则同三分级法<sup>[16]</sup>。《规程》保留了三分级法分级简单、易操作的特点,又细化了骺板发育特征,可进一步反应骨骺发育随年龄变化的规律,增加了年龄推断的科学性和准确性,又较 SK 联合分级法操作性更强,更利于推广应用,未来需在更多大样本、多种族研究中予以证实。

在法庭科学领域,青少年法医学骨龄推断的重点和难点在于判断个体是否达到与法律条文规定的年龄节点。本研究发现,男性、女性 MRI 和 X 线片股骨远端、胫骨近端骨骺完全闭合、骺线残留均发生在 14~16 岁,且 25 岁之前未检见骺线消失的影像学特征。因此,根据最小年龄原则,采用《规程》和 SK 联合分级法不能判别 18 岁年龄节点。为进一步了解膝关节 MRI 或 X 线片股骨远端、胫骨近端骨骺发育等级判别 18 岁年龄节点的具体判别能力,本研究绘制了 ROC 曲线。结果提示 MRI 与 X 线片股骨远端、胫骨近端骨骺发育等级均具备较强的 18 岁年龄节点判别能力,能兼顾较好的特异度和敏感度,且 MRI 股骨远端骨骺的判别表现优于 X 线片。然而,本研究样本量相对有限,尚不足以全面评估膝关节 MRI 或 X 线片评估骨骺发育判别重要年龄节点的潜力,未来需加大样本量,验证上述基于最小年龄原则判别重要年龄节点的研究发现。同时,有必要进一步构建数学模型,深入挖掘各骨骺发育分级方法评估膝关节 MRI 骨骺发育等级推断青少年年龄的潜在价值。

综上,与传统 X 线或 CT 检查相比,MRI 具有先天优势,是评价骨骼发育特征较为理想的非放射性影像学技术。然而,针对中国人群的研究数据较少,鲜有系统评价各骨骺发育方法评估各目标骨骼 MRI 判别重要年龄节点或预测个体年龄的研究报道,可能与 MRI 检查在国内普及性较低有关,限制了研究者收集大量 MRI 相关数据用于研究探讨。筛选适合本民族青少年人群的骨骺发育分级方法及 MRI 参数更是未来需要进一步解决的关键问题。

#### 参考文献

- [1] Schmeling A, Geserick G, Reisinger W, et al. Age estimation[J]. Forensic Science International, 2007, 165(2-3): 178-181.
- [2] 邓振华. 法医学年龄推断[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [3] Cummaudo M, De Angelis D, Magli F, et al. Age estimation in the living: a scoping review of population data for skeletal and dental

- methods[J]. *Forensic Science International*, 2021, 320:110689.
- [4] Berlin L. Shared decision-making: is it time to obtain informed consent before radiologic examinations utilizing ionizing radiation? legal and ethical implications[J]. *Journal of the American College of Radiology*, 2014, 11(3):246–251.
- [5] Dietsch V, Wabitsch M, Denzer C, *et al.* Applicability of magnetic resonance imaging for bone age estimation in the context of medical issues[J]. *RoFo: Fortschritte Auf Dem Gebiete Der Rontgenstrahlen Und Der Nuklearmedizin*, 2021, 193(6):692–700.
- [6] Lu T, Qiu LR, Ren B, *et al.* Forensic age estimation based on magnetic resonance imaging of the proximal humeral epiphysis in Chinese living individuals[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2021, 135(6):2437–2446.
- [7] De Tobel J, van Wijk M, Alberink I, *et al.* The influence of motion artefacts on magnetic resonance imaging of the clavicles for age estimation[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2020, 134(2):753–768.
- [8] Witek T, Genet P, Ehammer T, *et al.* Bone age estimation with the Greulich-Pyle atlas using 3T MR images of hand and wrist[J]. *Forensic Science International*, 2021, 319:110654.
- [9] Lu T, Shi L, Zhan MJ, *et al.* Age estimation based on magnetic resonance imaging of the ankle joint in a modern Chinese Han population[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2020, 134(5):1843–1852.
- [10] Auf der Mauer M, Säring D, Stanczus B, *et al.* A 2-year follow-up MRI study for the evaluation of an age estimation method based on knee bone development[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2019, 133(1):205–215.
- [11] Daghighi MH, Pourisa M, Javanpour-Heravi H, *et al.* Application of knee MRI in forensic age estimation: a retrospective cohort[J]. *Radiography*, 2021, 27(1):108–114.
- [12] Ekizoglu O, Er A, Bozdog M, *et al.* Forensic age estimation via magnetic resonance imaging of knee in the Turkish population: use of T1-TSE sequence[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2021, 135(2):631–637.
- [13] Chitavishvili N, Papageorgiou I, Malich A, *et al.* The distal femoral epiphysis in forensic age diagnostics: studies on the evaluation of the ossification process by means of T1- and PD/T2-weighted magnetic resonance imaging[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2023, 137(2):427–435.
- [14] Uygun B, Kaya K, Köse S, *et al.* Applicability of magnetic resonance imaging of the knee in forensic age estimation[J]. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 2021, 42(2):147–154.
- [15] Deng XD, Ke JL, Chen TY, *et al.* ERCC1 polymorphism and its expression associated with ischemic stroke in Chinese population[J]. *Frontiers in Neurology*, 2023, 13:998428.
- [16] 中华人民共和国公安部. 法庭科学 汉族青少年骨龄鉴定技术规程:GA/T 1583—2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
- [17] Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, *et al.* Enhanced possibilities to make statements on the ossification status of the medial clavicular epiphysis using an amplified staging scheme in evaluating thin-slice CT scans[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2010, 124(4):321–325.
- [18] Schmeling A, Schulz R, Reisinger W, *et al.* Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2004, 118(1):5–8.
- [19] Deng XD, Lu T, Liu GF, *et al.* Forensic age prediction and age classification for critical age thresholds via 3.0T magnetic resonance imaging of the knee in the Chinese Han population[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2022, 136(3):841–852.
- [20] Fan F, Zhang K, Peng Z, *et al.* Forensic age estimation of living persons from the knee: comparison of MRI with radiographs[J]. *Forensic Science International*, 2016, 268:145–150.
- [21] Jopp E, Schröder I, Maas R, *et al.* Proximale tibiaepiphyse im magnetresonanztomogramm[J]. *Rechtsmedizin*, 2010, 20(6):464–468.

(收稿日期:2023-02-25

修回日期:2023-04-24)