

· 综述 ·

儿童骨龄评定与生长预测指导下肢不等长治疗的研究进展



全文二维码

蒋泽熙 梅海波

南华大学儿科学院 湖南省儿童医院骨科 儿童骨科学湖南省重点实验室,长沙 410007

通信作者:梅海波,Email:meihaibo@sohu.com

【摘要】 下肢不等长(leg length discrepancy)是一种由常见骨科疾病导致的症状。通常小于 1 cm 的 LLD 临床表现并不显著,可无需治疗,而大于 1 cm 的 LLD 可能导致步态异常和脊柱畸形,因此需要进行干预。LLD 患者的诊疗流程包括骨龄测定、生长预测以及治疗方式的选择。目前临床上存在多种骨龄评定与生长预测的方法,各有其优点与局限性。本文就骨龄测定方法、生长预测法和 LLD 治疗三个方面的研究进展进行综述。

【关键词】 骨骼年龄测定;生长;预测;下肢不等长;治疗;儿童

基金项目:湖南省儿童肢体畸形临床医学研究中心(2019SK4006);2022 年湖南省卫生适宜技术推广项目(202218015912);儿童骨科学湖南省重点实验室开放课题(2023TP1019)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202312022-015

Research advances in the treatment of leg length discrepancy guided by bone age assessment and growth prediction in children

Jiang Zexi, Mei Haibo

Hunan Provincial Key Laboratory of Pediatric Orthopedics, of Pediatric Orthopedics, Hunan Children's Hospital, Academy of Pediatrics, University of South China, Changsha 410007, China

Corresponding author: Mei Haibo, Email: meihaibo@sohu.com

【Abstract】 Leg length discrepancy (LLD) is a frequent symptom of common orthopedic diseases. The clinical manifestation of LLD smaller than 1 cm is insignificant so that there is no need for intervention. However, LLD larger than 1 cm leading to abnormal gait and spinal deformity should be treated properly. The management process of LLD patients includes bone age determination, growth prediction and selecting treatment options. Currently many methods are available for bone age assessment and growth prediction. Yet each modality has its own advantages and limitations. This review summarized the latest researches of bone age determination, growth prediction and proper treatment of LLD.

【Key words】 Age Determination by Skeleton; Growth; Forecasting; Leg Length Discrepancy; Therapy; Child

Fund program: Hunan Provincial Clinical Medical Research Center for Pediatric Limb Deformities (2019SK4006); Hunan Provincial Health Appropriate Technology Popularization Project in 2022 (202218015912); Open Project of Hunan Provincial Key Laboratory of Pediatric Orthopedics (2023TP1019)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202312022-015

下肢不等长(leg length discrepancy, LLD)是一种由常见儿童骨科疾病导致的症状。据调查统计,只有约 10% 的人双侧下肢长度完全相同,大约 90% 的人肢体长度差异小于 1.0 cm^[1]。小于 1 cm 的 LLD 临床表现并不显著,可无需治疗,而大于 1 cm 的 LLD 可能导致步态异常和脊柱畸形,因此需要进行干预^[2-3]。确定平衡下肢长度所需的治疗量,主要基于准确预测骨骼成熟时的 LLD。为了确定这一点,必须对

患儿下肢的未来增长潜力进行评估。通过综合研究下肢长度、骨骼成熟度以及骨龄和实际年龄之间的关系,可以帮助预测未来下肢长度的增长,从而进行干预。骨龄是对骨骼成熟度的一种解释,能够有效反映个体生长发育水平和成熟程度。通过测评骨龄,有助于了解儿童骨骼发育状态,准确评估患儿的生长潜力^[4]。将骨龄与生长预测方法结合,从而对成熟时下肢的长度做出预测,对 LLD 患儿的治疗有着重要的

指导作用。目前临床上存在多种骨龄评定与生长预测方法,各有其优点与局限性。本文就骨龄测定方法、生长预测法和 LLD 治疗的研究进展进行综述。

一、儿童骨龄评定

生长发育的预测需要对骨骼成熟度进行准确评估。只有约 49% 的男童和 51% 的女童骨龄与年龄相差在 6 个月以内,多达 26% 的人骨龄与年龄相差超过 1 年^[5]。Sanders 等^[6]、Breen 等^[7]的研究表明,在青春发育期开始之前,使用年龄预测肢体最终长度优于骨龄;当儿童进入青春生长发育期之后,使用骨龄能更准确地预测肢体长度。骨龄测定方法大致可分为计数法、图谱法和计分法。

(一)计数法

1926 年,人类学家 Todd 首次通过腕部骨化中心计数推断骨龄。计数法通过计算腕部骨化中心的数量来评定骨龄,计算公式为:骨龄 = 腕部骨化中心的数量 - 1。但是该方法仅适用于学龄前期(3~7 岁)儿童,且误差较大,目前已较少使用。

(二)图谱法

1950 年,Greulich 和 Pyle 首次发明了通过比对标准 X 线片得出骨龄的方法,即 Greulich-Parle 图谱法(简称 GP 法),并出版了《手腕骨发育影像图集》。该图集囊括了不同年龄儿童左手腕部标准 X 线片图谱,通过将儿童手腕 X 线片与图集中各年龄段标准 X 线片进行比较,直接得出骨龄。GP 法依赖于对整体成熟状态的比较,具有直接而快速的特点,容易学习,因此被广泛应用^[8]。

1962 年,Sauvegrain 等^[9]开发了一种根据肘关节 X 线片确定骨龄的方法,称 Sauvegrain 法(简称 SG 法)。SG 法基于一个 27 分的评分体系,通过评估肘关节 4 个骨化中心(外上髁、滑车、鹰嘴、桡骨头)的发育状态并予以评分,根据总分数,在一个曲线图上找到与之对应的骨龄。SG 法曲线图的骨龄按 6 个月的间隔划分,能更精确地区分骨龄。但由于在青春期前,肘部骨化中心没有表现出显著的形态学特征,SG 法限于青春期生长高峰时期和这一阶段的前一年(女孩 10~13 岁,男孩 12~15 岁)使用。

2005 年,Diméglio^[10]基于 SG 法,根据尺骨鹰嘴的影像学外观开发了一种简化骨龄评定的方法,称简化鹰嘴法。该方法能以 6 个月为间隔方便快速地评估骨龄。通过观察鹰嘴的形态发育,使得骨龄可以在女孩(11~13 岁)和男孩(13~15 岁)中每隔 6 个月确定 1 次,具体描述为:两个骨化核表明女孩骨龄 11 岁,男孩骨龄 13 岁;两个骨化核融合呈半月形图像,提示女孩骨龄 11.5 岁,男孩骨龄 13.5 岁;骨化核呈矩形,提示女孩骨龄 12 岁,男孩骨龄 14 岁;骺端部分融合,提示女孩骨龄 12.5 岁,男孩骨龄 14.5 岁;骺端完全融合,提示女孩骨龄 13 岁,男孩骨龄 15 岁^[11]。仅根据尺骨鹰嘴骨化中心进行骨龄评估是一种简单且在临床实践中非常实用的骨龄测定方法,但当需要进行更彻底和更详细的评估时,建议采用 SG 法。

(三)计分法

最具代表性的计分法是 Tanner-Whitehouse 系列评分法

(简称 TW 法)。TW 法于 20 世纪 30 年代以欧洲白人儿童为样本开发^[12]。TW2 法基于 20 世纪 50 年代和 60 年代的数据,于 1983 年出版,并于 2001 年使用英国儿童的生长数据更新为第 3 版(TW3)。目前最常使用的是 TW3 法。TW3 法使用尺桡骨远端以及第 1、3、5 指的掌骨和指骨骨骺来确定骨龄。对每块骨骼都进行分期和相关评分后得到一个特定的成熟度分数,然后将各个骨骼分数相加,得到总的 Radius-Ulna-Small Bone(简称 RUS)分数。根据总分数,在相应骨骼评分图表上找到与之对应的骨龄。TW3 法可以使骨龄评定的精度在 1 个月内,但该方法至少需要 20 min 才能完成,过程复杂,且容易受到观察者之间误差影响。目前已有研究开发出基于 TW3 法的人工智能骨龄评估系统(TW3-AI),平均图像处理时间为 1.5 秒,能显著缩短骨龄评定时长,提升稳定性,具有重要的发展前景^[13]。

(四)骨龄评定的研究进展

2009 年,Thodberg 等^[14]开发了第一个全自动骨龄测定软件——BoneXpert。该软件从手腕部的 X 线片中自动重建 15 块骨骼的边界,然后计算出 13 块骨骼(桡骨、尺骨和 11 块短骨)中每一块的固有骨龄值,最后将固有骨龄转换为 GP 或 TW 骨龄。由于 BoneXpert 是 100% 自动的,因此评分的变异性为零,去除了观察者之间的误差,提升了测量精确度^[10,15-16]。国内一项研究针对 482 名儿童使用 BoneXpert 软件评估左手骨龄,与人工使用 GP 图谱手动评估的一致率达 94.2%^[17]。国外一项研究纳入了 920 例 2~19 岁健康儿童的左手 X 线片,分别用 BoneXpert 软件与人工使用 GP 法、TW2 和 TW3 方法手动评估骨龄对比,BoneXpert 软件用 3 种方法计算骨龄的均方根误差(root mean squared error, RMSE)均低于人工,且最新版本的 BoneXpert 软件与以前的版本相比,改进了男孩骨龄评估误差大于女孩的不足^[18-19]。

除了应用 X 线片评估外,目前还有超声、磁共振等方法测定骨龄^[20]。其主要优势是后者不会使被测者暴露于电离辐射,这对一些需要接受骨龄连续评估的患者有较大获益^[21]。目前 BonAge 超声测量左手腕部骨龄是应用超声技术进行骨龄测定的一种较为成熟的方法。BonAge 超声测量骨龄稳定性较好,且与手部 X 线片相比,具有良好的准确性。但也有研究显示,BonAge 倾向于高估延迟的骨龄、低估提前的骨龄,认为超声评估骨龄不应被视为放射学评估骨龄的有效替代方案^[22]。

GP 图谱法评估相对快速,容易学习,因此被广泛使用。然而 GP 图谱法依赖于对 X 线片的主观性判读,并且青春期生长发育加速阶段手和手腕的形态变化不明显,预测精度会降低^[10]。此外,也有研究人员认为,儿童种族不同会影响 GP 法的准确性,但仍需进一步验证^[23-24]。计分法评估骨龄精确,但耗时较长,不利于医师在繁重的工作中高效评估骨龄^[25]。对此,发展计算机自动骨龄评估软件将为解决这一问题提供理论上可靠的解决方法。

二、下肢长度预测

在进行生长预测前,我们首先应当了解骨骼的正常发育

情况。骨骼生长发育经历了 4 个不同的阶段,分别是产前发育(指数型增长)、出生至 5 岁(快速生长)、5 岁至青春期(稳定生长)和青春期。青春期是最后的生长突增期,由 1 年的快速增长期和 1.5 年的缓慢减速期构成。股骨和胫骨在骨骼成熟时分别占下肢总长度的 54% 和 46%。4 个生长板(分别是股骨和胫骨的近端和远端)和足部负责生长,但主要的长度增加发生在膝关节周围(股骨远端和胫骨近端两个生长板)^[26]。

(一) 生长预测方法

1963 年,Anderson 等^[27]发表了包括身高、股骨长度和胫骨长度变化的图表,并创建了 Green-Anderson 生长剩余图。该方法基于 50 个女孩和 50 个男孩在下肢停止生长前 8 年的下肢生长情况,将正常股骨远端和胫骨近端的生长在连续的骨龄水平下以表格和图表的形式呈现,记录平均值、标准差和性别的百分位数分布。将正常腿股骨和胫骨的当前长度与 Anderson 测量值进行比较,根据年龄和性别,在图表上找到适当的百分位数,并从百分位数中读出骨骼成熟时的预测长度。

1966 年,Menelaus^[28]参考了 White 和 Stubbins 的观点,提出了一种快速预测肢体长度不等的方法——White-Menelaus 算数法,它使用实际年龄而非骨龄,假设女孩在 14 岁、男孩在 16 岁停止生长,股骨远端每年增长 0.375 英寸(1 英寸 = 2.54 cm),胫骨近端每年增长 0.25 英寸。算数法的优点是无需用到 X 线片或 GP 图谱,直接通过计算预测成熟时的肢体长度。但如果患者的骨龄和实际年龄之间存在明显差异,则计算可能不准确。

1977 年,Moseley^[29]基于 20 世纪 40 年代和 50 年代获得的生长数据,发表了 Moseley 直线图(M-SLG)。Moseley 通过收集患者正常腿长度、短腿长度和骨龄,将这些数据转换成一个直线表。通过绘制当前腿长和骨龄,可以从图中读出预测的腿长。该方法可用于预测骨骼发育早期肢体长度不均的患者在骨骼成熟期的肢体长度不均和骨外固定的最佳时间点。该方法需要获得至少 3 个骨龄和 3 个腿部 X 线片或扫描图才能完成预测,并需要用到 GP 图谱法来评测骨龄。因此,这是一种耗时的方法,难以在繁忙的临床环境中使用。

1997 年,Beumer 等^[30]基于 1979 年至 1994 年间收集的 182 名荷兰儿童的数据,以 Moseley 直线图法为蓝本开发了 Rotterdam 直线图(R-SLG)。Shahrestani^[31]通过对 76 名接受骨骺固定术治疗的 LLD 患者用两种方法进行预测并比较,结果大多数患者中,鹿特丹直线图等于或优于 Moseley 图,证明更新 M-SLG 所基于的生长数据能改善对最终肢体长度的预测。

2000 年,Paley 等^[32]基于 Anderson 等人的数据,发明了乘法法。作者将骨骼成熟时的股骨和胫骨长度(length of the femur and tibia at skeletal maturity, lm)除以每个百分位组每个年龄的股骨和胫骨长度(length of the femur or tibia, l),结果数称为乘数(multiplier, m),并推导出预测肢体长度差异和剩余生长量的公式: $Lm = L \times M$ 。乘法法仅需测量 1 至 2 次数据就可以快速计算骨骼成熟时预测的肢体长度差异,而无

需绘制图形。该方法也可用于坐高和总肢体长度的预测^[33]。由于乘数在百分位数、民族、世代和种族中保持不变,乘法法可能会被证明比其他不受种族、代际和种族差异影响的预测方法更准确。但是该方法依赖于年龄而不是骨龄,这可能会导致青春期前后青少年的预测准确度降低^[34]。

(二) 不同方法预测的准确性

目前有多位学者对当前常用的几种生长预测方法进行了比较,以确定哪种预测方法的准确性最高。2018 年, Makarov 等^[5]通过回顾 77 名在单中心接受骨骺固定术治疗的患者数据,分别使用 White-Menelaus 算数法、Green-Anderson 生长剩余图、Moseley 直线法和 Paley 乘法法,将预测的双腿长度和成熟期剩余腿长差异与实际结果进行对比,并分别使用年龄和骨龄对预测方法进行比较;每种方法均有约 1 cm 的预测误差,其中算数法的预测误差最小,为 (0.7 ± 0.6) cm,乘法法的预测误差最大,为 (1.1 ± 0.9) cm;同时作者发现,使用骨龄显著降低了每种方法的短腿长度预测误差,并显著降低了算数法和直线法腿长差异的预测误差。2021 年,在该作者的另一项研究中,对 Moseley 和鹿特丹直线图预测成熟期 LLD 准确性的比较结果表明,直线图可以更准确地预测成熟期的腿部长度,鹿特丹直线图等于或优于 Moseley 直线图^[35]。

2019 年,Birch 等^[36]通过回顾 221 例在单中心接受骨骺固定术治疗的 LLD 患者数据,比较了 White-Menelaus 算数法和 Anderson-Green 生长剩余图法预测股骨远端、胫骨近端剩余生长的准确性,算数法的预测误差最小为 (0.65 ± 0.52) cm,生长剩余图法的预测误差最大为 (1.51 ± 1.29) cm。同时作者发现从女孩的 10 岁骨龄和男孩的 11 岁骨龄开始,股骨和胫骨节段分别按比例增长,这一发现验证了 White 和 Stubbins 的结论,并表明 White-Menelaus 法比 Anderson-Green 生长剩余图更准确。

2019 年,Burger 等^[37]通过回顾 50 名接受永久骨骺固定术(Canale's 技术)以矫正特发性 LLD 患者的数据,用 Green-Anderson 和乘法法在成熟期骨外固定最终效果方面进行统计分析,结果表明两种方法的预期效果在术后成熟期骨性融合的最终效果上没有显著差异($P = 0.096$ 、 $P = 0.051$);在生长预测方面,使用骨龄的 Green-Anderson 剩余图比使用年龄的乘法法更准确。

(三) 影响预测结果的其他因素

在对下肢不等长患者进行差异预测时,了解下肢长度差异的进展模式有助于增加预测的准确性。Shapiro^[38]描述了肢体长度不等患者的 5 种不同生长模式,其中 I 型线性生长模式是下肢长度差异随着时间的推移以相同比例不断发展和增加,为目前多数预测方法的预设前提,如 White-Menelaus 算数法、乘法法和直线图法。如患者为其他生长模式时,使用这些预测方法的准确性将会降低。先天性 LLD 患者的肢体遵循 I 型线性生长模式,而后天性创伤导致的 LLD 则需考虑受伤生长板的部位及骨龄,最终差异等于受损生长板的年增长量乘以剩余生长时间。

初潮时间与预测准确性有关,月经初潮发生在青春期缓慢减速期的开始,通常发生在高峰身高速度之后。Aird 等^[39]在一项研究中对生理年龄[实际年龄 - (初潮年龄 - 研究队列的初潮平均年龄)]在预测中的影响进行了评估,作者用生理年龄代替实际年龄,以考察月经初潮对乘数法预测最终腿长准确性的影响,结果发现使用生理年龄进行 50% 年龄校正后最终计算的准确性和一致性提高了 28%,证明乘数与月经初潮之间存在关系。

预测时年龄越小,预测结果越不准确。Aird 在 2017 年的研究中同样对乘数法预测腿长的有效性进行了评估,误差从 7 岁的 2.2 cm 到 14 岁的 1.8 cm 不等,因此作者认为预测的平均误差取决于评估时的年龄,年龄越小越不准确^[39]。

三、下肢不等长的治疗

LLD 的治疗方式从使用鞋垫增高到各种外科手术方式,包括骨骺融合术、骨骺阻滞术、肢体延长术等^[40]。有学者建议将 LLD 分为三类:0 ~ 20 mm 无需治疗,20 ~ 60 mm 可通过鞋垫或骨骺固定长腿侧,60 ~ 200 mm 则需要短侧肢体延长^[41]。Vitale 等^[42]也提出了类似的细分:当预计成熟时差异小于 2 cm,可无需手术;而在骨骼未发育成熟的患者中,成熟期差异介于 2 ~ 4 cm 之间,可以通过长腿侧骨骺固定术来平衡腿长;当预测的差异大于 4 cm 时,通常建议进行下肢延长手术。因此,可以将 LLD 治疗分为保守治疗和手术治疗两种。

(一) 下肢不等长的治疗方法

大多数非严重 LLD 患者的主要治疗目标是减轻日常活动中的腿长缺陷,因此穿戴鞋垫来平衡腿长是首选方案。一般来说,通过使用鞋垫,大部分 2 cm 内的腿长差异可以得到纠正。Jankaew 等^[43]通过对 20 名轻度 LLD 患者调整鞋底高度前后的步行数据进行对比,发现调整鞋底高度后,患者的最大肩高差和最大躯干旋转角度均显著降低,证实这是一种改善 LLD 患者步行能力的简单且廉价的方法。但如果患者短肢存在不可接受的成角畸形,则需要手术治疗以恢复肢体的适当机械力学对线。

通过手术矫正 LLD 必须在仔细计算预计的剩余生长之后进行。手术目的是使两条腿的长度相同或残存的 LLD 小于 1 cm,并使膝关节的屈伸轴达到相同高度。当下肢长度差异大于 2 cm 时,有学者建议在充分评估患儿生长潜力后进行骨骺固定术治疗。该术式原理是在骺端实现暂时或永久的生长停止,是一种阻止骨生长的手术方法。由 Stevens 设计的“8 字钢板”,目前广泛用于儿童 LLD 和成角畸形的治疗,具有损伤小、技术难度低、并发症发生率低的优点,得到了国内外临床医师与学者的广泛认可。然而由于其矫正能力有限,术前应充分评估患儿肢体生长情况^[44]。健侧肢体短缩截骨也是治疗 LLD 的一种方式,可以实现最多 5 cm 的长度变化,适用于年龄较大而不宜行骨骺阻滞的患儿^[45]。当腿长差值达 5 cm 时,可以通过外固定架矫正畸形并伴随逐渐延长而进行矫治。最常用的外固定装置之一是 Ilizarov 系统,可以显著增加骨长度 150 mm 以上^[47]。自 Curran

等^[46]报道应用骨延长术成功纠正肢体畸形以来,骨延长术逐渐被许多学者广泛应用于矫正肢体不等长、先天性和后天性畸形等。然而,Bue 等^[47]的研究显示,使用外固定器治疗与针道感染、瘢痕形成和患者不适有关。目前较为流行的髓内延长手术可以减少和避免这些不良反应^[48-50]。Laufer 等^[51]的研究表明,髓内延长手术联合半骨骺阻滞术能有效矫正 LLD 合并成角畸形。但是,使用髓内钉延长股骨会增加并发症的发生率,因此最好在骨骼成熟的患者中进行,以保留股骨远端生长板,避免过早关闭部分生长板,从而避免复发 LLD 或畸形^[52]。

由于国内大多数人希望拥有更高的身高,而骨骺阻滞或短缩截骨术会导致身高降低,这是大部分家长不愿接受的,因此目前多数人更愿意接受肢体延长术治疗 LLD。但对于 LLD 患儿的手术治疗,应综合考虑预测最终差异、术后恢复时间、相关并发症等多方面因素后选择最适合患儿的手术方式。

(二) 骨龄与生长预测指导下肢不等长的治疗

在手术治疗 LLD 患儿前,首先要准确预测患儿骨骺成熟时双下肢最终差异。LLD 的病因可分为先天性肢体缺陷和创伤后生长障碍。在先天性肢体差异中,相对差异在整个生长过程中保持不变,因此在骨骼生长过程中缩短的百分比保持不变。例如,根据 Paley 乘数法,最终差异可以计算为当前差异乘以当前年龄和性别的乘数^[38]。而创伤后的腿长差异应该通过估计受损生长板上剩余的生长量和骨龄来计算。患儿年龄越小,对双下肢最终差异的预测误差越大,而一旦进入青春期(男孩骨龄 13 岁、女孩骨龄 11 岁),与成长有关的不确定性将会消失,此时预测结果最准确。当预测双下肢最终差异在 2 cm 以内时,可选择保守治疗;最终差异在 5 cm 以内时,优先选择相对简单且风险较小的骨骺固定术,而骨骺固定术最重要的是把握好手术时机^[53]。

根据 White-Menelaus 的简化方法,从青春期开始,膝关节处年生长量为 1.5 cm,3 年共有 4.5 cm 的生长量。与 Menelaus 不同的是,Dimeglio 等^[54]计算出青春期开始后剩余的生长时间为 2.5 年,最终预测的膝关节处剩余生长结果大致相同(2 cm × 2.5 年 = 5 cm)。因此,从青春期开始,通过对膝关节周围两处骺板进行骨骺固定预计能实现最大 5 cm 的 LLD 矫治。

根据 Dimeglio 等^[54]的研究结果,在进行骨骺固定矫治 LLD 时有 4 种常见的情况,其手术时机分别为:预测最终 LLD 差异为 5 cm 时,在女孩骨龄 11 岁、男孩骨龄 13 岁时行股骨远端和胫骨近端的骨骺固定;LLD 差异为 4 cm 时,在女孩骨龄 11.5 岁、男孩骨龄 13.5 岁时行股骨远端和胫骨近端的骨骺固定;差异为 3 cm 时,在女孩骨龄 11 岁、男孩骨龄 13 岁时,只行股骨远端骨骺固定;LLD 差异为 2 cm 时,在女孩骨龄 12 岁、男孩骨龄 14 岁时,仅行股骨远端骨骺固定。需要注意的是,青春期开始后膝盖的剩余生长中有 2.6 cm 发生在第 1 年,即快速增长期。因此对于 LLD 差异较大的患者,应选择在青春期开始之前进行骨骺固定手术,以实现更大程度的差异纠正。

对于骨骼尚未发育成熟的 LLD 患者,需要定期随访,并进行仔细的临床和放射学评估。从 5 岁到青春开始有一段缓慢而稳定的增长期,因此可以对患者每年随访一次,直至 9 岁,之后每 6 个月随访一次,直至骨骼成熟。为了确保增长预测的准确性,可同时使用多种方法进行预测^[55]。

综上所述,LLD 患者的诊疗流程包括骨龄评定、生长预测和治疗方式选择。目前骨龄评定最常用的方法是根据手腕部 X 线片进行评定,G-P 图谱法能快速估计骨龄,计分法是最精确的方法。未来可期待建立我国的多中心、大样本骨龄数据库,设计出更适合骨龄评定的计算机软件。对于生长预测方法,目前已有多位学者对当前常用的几种生长预测方法进行了比较,但哪种方式的预测结果最为准确尚未形成统一观点,还有待进一步的探索研究。因此,建议同时使用多个预测方法,综合判断以获得更高的预测精度。根据预测得出的最终腿长差异,结合患儿青春早期生长发育特点,对于指导手术治疗 LLD、确定手术时机有着重要的指导作用。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Gordon JE, Davis LE. Leg length discrepancy; the natural history (and what do we really know) [J]. J Pediatr Orthop, 2019, 39 (6, Supplement 1): S10-S13. DOI: 10.1097/BPO.0000000000001396.
- [2] Applebaum A, Nessim A, Cho W. Overview and spinal implications of leg length discrepancy; narrative review [J]. Clin Orthop Surg, 2021, 13(2): 127-134. DOI: 10.4055/cios20224.
- [3] Waibel FWA, Berndt K, Jentzsch T, et al. Symptomatic leg length discrepancy after total hip arthroplasty is associated with new onset of lower back pain [J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2021, 107 (1): 102761. DOI: 10.1016/j.otsr.2020.102761.
- [4] Boeyer ME, Sherwood RJ, Deroche CB, et al. Early maturity as the new normal; a century-long study of bone age [J]. Clin Orthop Relat Res, 2018, 476(11): 2112-2122. DOI: 10.1097/CORR.0000000000000446.
- [5] Makarov MR, Jackson TJ, Smith CM, et al. Timing of epiphysiodesis to correct leg-length discrepancy; a comparison of prediction methods [J]. J Bone Joint Surg Am, 2018, 100(14): 1217-1222. DOI: 10.2106/JBJS.17.01380.
- [6] Sanders JO, Howell J, Qiu X. Comparison of the Paley method using chronological age with use of skeletal maturity for predicting mature limb length in children [J]. J Bone Joint Surg Am, 2011, 93(11): 1051-1056. DOI: 10.2106/JBJS.J.00384.
- [7] Breen AB, Steen H, Pripp A, et al. Comparison of different bone age methods and chronological age in prediction of remaining growth around the knee [J]. J Pediatr Orthop, 2023, 43(6): 386-391. DOI: 10.1097/BPO.0000000000002397.
- [8] Chaumoitre K, Saliba-Serre B, Adalian P, et al. Forensic use of the Greulich and Pyle Atlas: prediction intervals and relevance [J]. Eur Radiol, 2017, 27(3): 1032-1043. DOI: 10.1007/s00330-016-4466-4.
- [9] Sauvegrain J, Nahum H, Bronstein H. Study of bone maturation of the elbow [J]. Ann Radiol (Paris), 1962, 5: 542-550.
- [10] Diméglio A, Charles YP, Daures JP, et al. Accuracy of the Sauvegrain method in determining skeletal age during puberty [J]. J Bone Joint Surg Am, 2005, 87(8): 1689-1696. DOI: 10.2106/JBJS.D.02418.
- [11] Greene JD, Yu K, Li DT, et al. The relationship of olecranon apophyseal ossification and sanders hand scores with the timing of peak height velocity in adolescents [J]. J Bone Joint Surg Am, 2021, 103(16): 1543-1551. DOI: 10.2106/JBJS.20.01856.
- [12] Fry EI. Tanner-Whitehouse and Greulich-Pyle skeletal age velocity comparisons [J]. Am J Phys Anthropol, 1971, 35(3): 377-380. DOI: 10.1002/ajpa.1330350313.
- [13] Zhou XL, Wang EG, Lin Q, et al. Diagnostic performance of convolutional neural network-based Tanner-Whitehouse 3 bone age assessment system [J]. Quant Imaging Med Surg, 2020, 10(3): 657-667. DOI: 10.21037/qims.2020.02.20.
- [14] Thodberg HH, Kreiborg S, Juul A, et al. The BoneXpert method for automated determination of skeletal maturity [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2009, 28(1): 52-66. DOI: 10.1109/TMI.2008.926067.
- [15] Breen AB, Steen H, Pripp A, et al. A comparison of 3 different methods for assessment of skeletal age when treating leg-length discrepancies; an inter-and intra-observer study [J]. Acta Orthop, 2022, 93: 222-228. DOI: 10.2340/17453674.2021.1133.
- [16] Koc U, Taydaş O, Bolu S, et al. The Greulich-Pyle and Gilsanz-Ratib Atlas method versus automated estimation tool for bone age; a multi-observer agreement study [J]. Jpn J Radiol, 2021, 39(3): 267-272. DOI: 10.1007/s11604-020-01055-8.
- [17] Zhang J, Lin FQ, Ding XY. Automatic determination of the Greulich-Pyle bone age as an alternative approach for Chinese children with discordant bone age [J]. Horm Res Paediatr, 2016, 86(2): 83-89. DOI: 10.1159/000446434.
- [18] Oza C, Khadilkar AV, Mondkar S, et al. A comparison of bone age assessments using automated and manual methods in children of Indian ethnicity [J]. Pediatr Radiol, 2022, 52(11): 2188-2196. DOI: 10.1007/s00247-022-05516-2.
- [19] Maratova K, Zemkova D, Sedlak P, et al. A comprehensive validation study of the latest version of BoneXpert on a large cohort of Caucasian children and adolescents [J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2023, 14: 1130580. DOI: 10.3389/fendo.2023.1130580.
- [20] 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 Sci Int, 2021, 319: 110654. DOI: 10.1016/j.forsciint.2020.110654.
- [21] Prokop-Piotrkowska M, Marszałek-Dziuba K, Moszczyńska E, et al. Traditional and new methods of bone age assessment-an overview [J]. J Clin Res Pediatr Endocrinol, 2021, 13(3): 251-262. DOI: 10.4274/jcrpe.galenos.2020.2020.0091.
- [22] Khan KM, Miller BS, Hoggard E, et al. Application of ultrasound for bone age estimation in clinical practice [J]. J Pediatr, 2009, 154(2): 243-247. DOI: 10.1016/j.jpeds.2008.08.018.
- [23] Yuh YS, Chou TY, Tung TH. Bone age assessment; large-scale comparison of Greulich-Pyle method and Tanner-Whitehouse 3 method for Taiwanese children [J]. J Chin Med Assoc, 2023, 86(2): 246-253. DOI: 10.1097/JCMA.0000000000000854.
- [24] Yuh YS, Chou TY, Chow JC. Applicability of the Greulich and Pyle bone age standards to Taiwanese children; a Taipei experience [J]. J Chin Med Assoc, 2022, 85(7): 767-773. DOI: 10.1097/JCMA.0000000000000747.
- [25] Gao CC, Qian Q, Li YS, et al. A comparative study of three bone age assessment methods on Chinese preschool-aged children [J]. Front Pediatr, 2022, 10: 976565. DOI: 10.3389/fped.2022.976565.
- [26] Kelly PM, Diméglio A. Lower-limb growth: how predictable are predictions? [J]. J Child Orthop, 2008, 2(6): 407-415. DOI:

10. 1007/s11832-008-0119-8.
- [27] Anderson M, Green WT, Messner MB. Growth and predictions of growth in the lower extremities[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1963, 45-A;1-14.
- [28] Menelaus MB. Correction of leg length discrepancy by epiphysal arrest[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1966, 48(2):336-339.
- [29] Moseley CF. A straight-line graph for leg-length discrepancies [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1977, 59(2):174-179.
- [30] Beumer A, Lampe HI, Swierstra BA, et al. The straight line graph in limb length inequality. A new design based on 182 Dutch children[J]. *Acta Orthop Scand*, 1997, 68(4):355-360. DOI: 10. 3109/17453679708996177.
- [31] Shahrestani S, Makarov MR, Jo CH, et al. Comparison of Moseley and Rotterdam straight-line graphs in predicting leg lengths and leg-length discrepancy at maturity[J]. *J Child Orthop*, 2019, 13(5):536-542. DOI: 10. 1302/1863-2548. 13. 190086.
- [32] Paley D, Bhave A, Herzenberg JE, et al. Multiplier method for predicting limb-length discrepancy[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2000, 82(10):1432-1446. DOI: 10. 2106/00004623-200010000-00010.
- [33] Jauregui JJ, Hlukha LP, McClure PK, et al. Multiplier method for predicting the sitting height growth at maturity: a database analysis [J]. *Children (Basel)*, 2022, 9(11):1763. DOI: 10. 3390/children9111763.
- [34] Sanders JO, Karch LE, Cai XY, et al. Height and extremity-length prediction for healthy children using age-based versus peak height velocity timing-based multipliers[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2021, 103(4):335-342. DOI: 10. 2106/JBJS. 20. 00040.
- [35] Birch JG, Makarov MR, Sanders JO, et al. Lower-extremity segment-length prediction accuracy of the sanders multiplier, Paley multiplier, and White-Menelaus formula[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2021, 103(18):1713-1717. DOI: 10. 2106/JBJS. 20. 01923.
- [36] Birch JG, Makarov MA, Jackson TJ, et al. Comparison of Anderson-Green growth-remaining graphs and White-Menelaus predictions of growth remaining in the distal femoral and proximal tibial physes[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2019, 101(11):1016-1022. DOI: 10. 2106/JBJS. 18. 01226.
- [37] Burger K, Farr S, Hahne J, et al. Long-term results and comparison of the Green-Anderson and multiplier growth prediction methods after permanent epiphysodesis using Canale's technique [J]. *J Child Orthop*, 2019, 13(4):423-430. DOI: 10. 1302/1863-2548. 13. 190024.
- [38] Shapiro F. Developmental patterns in lower-extremity length discrepancies[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1982, 64(5):639-651.
- [39] Aird JJ, Cheesman CL, Schade AT, et al. Validation of the multiplier method for leg-length predictions on a large European cohort and an assessment of the effect of physiological age on predictions [J]. *J Child Orthop*, 2017, 11(1):71-76. DOI: 10. 1302/1863-2548-11-160084.
- [40] Vogt B, Gosheger G, Wirth T, et al. Leg length discrepancy-treatment indications and strategies [J]. *Dtsch Arztebl Int*, 2020, 117(24):405-411. DOI: 10. 3238/arztebl. 2020. 0405.
- [41] Gurney B. Leg length discrepancy [J]. *Gait Posture*, 2002, 15(2):195-206. DOI: 10. 1016/s0966-6362(01)00148-5.
- [42] Vitale MA, Choe JC, Sesko AM, et al. The effect of limb length discrepancy on health-related quality of life: is the '2 cm rule' appropriate? [J]. *J Pediatr Orthop B*, 2006, 15(1):1-5. DOI: 10. 1097/01202412-200601000-00001.
- [43] Jankaew A, Chen SJ, Lin CC, et al. Impact of bilateral motion control shoes with outsole adjustment on gait asymmetry in individuals with mild leg length discrepancy[J]. *Gait Posture*, 2023, 103:80-85. DOI: 10. 1016/j. gaitpost. 2023. 04. 023.
- [44] 徐平, 宁波, 陈宇凡, 等. 8 字钢板临时阻滞在儿童下肢不等长中的应用效果分析[J]. *临床小儿外科杂志*, 2020, 19(1):59-62. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-6353. 2020. 01. 012.
- Xu P, Ning B, Chen YF, et al. Efficiency of temporary hemiepiphysodesis with eight-plate in children with lower limb discrepancy[J]. *J Clin Ped Sur*, 2020, 19(1):59-62. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-6353. 2020. 01. 012.
- [45] Koczewski P, Zaklukiewicz A, Rotter I. Leg length discrepancy treatment with subtrochanteric shortening osteotomy and blade plate fixation[J]. *Ortop Traumatol Rehabil*, 2014, 16(4):371-380. DOI: 10. 5604/15093492. 1119614.
- [46] Curran AR, Kuo KN, Lubicky JP. Simultaneous ipsilateral femoral and tibial lengthening with the Ilizarov method[J]. *J Pediatr Orthop*, 1999, 19(3):386-390.
- [47] Bue M, Bjarnason AÓ, Rölfling JD, et al. Prospective evaluation of pin site infections in 39 patients treated with external ring fixation [J]. *J Bone Jt Infect*, 2021, 6(5):135-140. DOI: 10. 5194/jbji-6-135-2021.
- [48] Hafez M, Nicolaou N, Offiah A, et al. Femoral lengthening in children-a comparison between magnetic intramedullary lengthening nails and external fixators [J]. *J Pediatr Orthop*, 2022, 42(3):e290-e294. DOI: 10. 1097/BPO. 0000000000002039.
- [49] Radler C, Mindler GT, Stauffer A, et al. Limb lengthening with Precice intramedullary lengthening nails in children and adolescents[J]. *J Pediatr Orthop*, 2022, 42(2):e192-e200. DOI: 10. 1097/BPO. 0000000000002016.
- [50] Nasto LA, Coppa V, Riganti S, et al. Clinical results and complication rates of lower limb lengthening in paediatric patients using the PRECICE 2 intramedullary magnetic nail: a multicentre study [J]. *J Pediatr Orthop B*, 2020, 29(6):611-617. DOI: 10. 1097/BPB. 0000000000000651.
- [51] Laufer A, Frommer A, Gosheger G, et al. Antegrade intramedullary femoral lengthening and distal temporary hemiepiphysodesis for combined correction of leg length discrepancy and coronal angular deformity in skeletally immature patients[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(8):3022. DOI: 10. 3390/jcm12083022.
- [52] Calder PR, McKay JE, Timms AJ, et al. Femoral lengthening using the Precice intramedullary limb-lengthening system: outcome comparison following antegrade and retrograde nails[J]. *Bone Joint J*, 2019, 101-B(9):1168-1176. DOI: 10. 1302/0301-620X. 101B9. BJJ-2018-1271. R1.
- [53] Duffy KA, Davidson RS, Kalish JM. Understanding syndromic leg length discrepancy [J]. *J Pediatr*, 2021, 234:16-18. DOI: 10. 1016/j. jpeds. 2021. 01. 076.
- [54] DiMeglio A, Canavese F, Charles YP. Growth and adolescent idiopathic scoliosis: when and how much? [J]. *J Pediatr Orthop*, 2011, 31(1 Suppl):S28-S36. DOI: 10. 1097/BPO. 0b013e318202c25d.
- [55] Willegger M, Schreiner M, Kolb A, et al. Epiphysodesis for the treatment of tall stature and leg length discrepancy[J]. *Wien Med Wochenschr*, 2021, 171(5/6):133-141. DOI: 10. 1007/s10354-021-00828-8.

(收稿日期:2023-12-10)

本文引用格式: 蒋泽熙, 梅海波. 儿童骨龄评定与生长预测指导下肢不等长治疗的研究进展[J]. *临床小儿外科杂志*, 2024, 23(6):589-594. DOI: 10. 3760/cma. j. cn101785-202312022-015.

Citing this article as: Jiang ZX, Mei HB. Research advances in the treatment of leg length discrepancy guided by bone age assessment and growth prediction in children[J]. *J Clin Ped Sur*, 2024, 23(6):589-594. DOI: 10. 3760/cma. j. cn101785-202312022-015.