

· 论著 ·



全文二维码

# 中国西南地区 3 ~ 14 岁儿童足部发育状态的横断面研究

陈立淮<sup>1</sup> 杨筱轩<sup>2</sup> 郑强<sup>1</sup> 曹波<sup>1</sup> 张雲鹏<sup>1</sup> 李爽<sup>1</sup> 尤建<sup>1</sup> 谢超兰<sup>1</sup> 白定群<sup>2</sup>  
赵辰<sup>3</sup> 陈静<sup>2</sup> 唐力<sup>2</sup> 李明<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 重庆市潼南区人民医院骨科, 重庆 402660; <sup>2</sup> 重庆医科大学附属第一医院康复科, 重庆 400015; <sup>3</sup> 重庆医科大学附属第一医院骨科, 重庆 400015; <sup>4</sup> 重庆医科大学附属儿童医院骨科 国家儿童健康与疾病临床医学研究中心 儿童发育疾病研究教育部重点实验室 儿科学重庆市重点实验室, 重庆 400015

通信作者: 李明, Email: lm3180@163.com

**【摘要】 目的** 建立中国西南地区 3 ~ 14 岁儿童足部形态的医学参考值范围, 为评估儿童足部发育状态提供参考依据。**方法** 本研究为回顾性研究, 选择中国西南地区 3 ~ 14 岁儿童共 3 476 人作为研究对象, 其中男 1 918 人、女 1 558 人, 均使用“Foot Secret”三维全足扫描仪扫描足部三维轮廓以获得足部参数, 包括负重和非负重状态下的足弓体积、足弓指数及负重状态下的足长, 根据不同状态下的足弓体积计算出足弓柔韧度, 从多维度评估足部发育状态。采用百分位数( $P_{2.5} \sim P_{97.5}$ )分别建立足弓体积、足弓指数、足弓柔韧度、足长的 95% 医学参考值范围。**结果** 3 ~ 14 岁儿童足长与足弓体积随年龄增长而增加, 足弓指数和足弓柔韧度随年龄增长而降低( $P < 0.001$ )。其中, 男性、女性足长参考范围分别从 3 岁时的 146.7 ~ 182.0 mm、143.2 ~ 177.4 mm 增长至 14 岁时的 227.9 ~ 279.7 mm、209.1 ~ 250.2 mm。非负重状态下男性、女性足弓指数参考范围分别从 3 岁时的 0.21 ~ 0.37、0.20 ~ 0.37 降低至 14 岁时的 0.15 ~ 0.33、0.13 ~ 0.33。负重状态下男性、女性足弓指数参考范围分别从 3 岁时的 0.28 ~ 0.37、0.27 ~ 0.37 降低至 14 岁时的 0.21 ~ 0.35、0.20 ~ 0.35。非负重状态下男性、女性足弓体积参考范围分别从 3 岁时的 3 155.4 ~ 15 046.3 mm<sup>3</sup>、2 948.9 ~ 1 1547.0 mm<sup>3</sup> 增长至 14 岁时的 13 998.8 ~ 40 494.1 mm<sup>3</sup>、11 372.3 ~ 36 624.0 mm<sup>3</sup>。负重状态下男性、女性足弓体积参考范围分别从 3 岁时的 1 686.4 ~ 8 163.3 mm<sup>3</sup>、1 801.1 ~ 7 481.7 mm<sup>3</sup> 增长至 14 岁时的 7 043.7 ~ 31 661.1 mm<sup>3</sup>、7 775.9 ~ 24 505.2 mm<sup>3</sup>。男女性足弓柔韧度参考范围分别从 3 岁时的 0.13 ~ 0.71、0.13 ~ 0.74 降低至 14 岁时的 0.05 ~ 0.53、0.06 ~ 0.55。**结论** 本研究建立了中国西南地区 3 ~ 14 岁儿童足部多维度参数的参考值范围, 可为评估儿童足部发育状态提供参考依据。

**【关键词】** 足; 参考值; 外科手术; 儿童

**基金项目:** 潼南区科研项目技术创新与应用发展专项(TK-2022-13)

DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202406005-009

## Cross-sectional study on foot development in children in Southwest China

Chen Liwei<sup>1</sup>, Yang Xiaoxuan<sup>2</sup>, Zheng Qiang<sup>1</sup>, Cao Bo<sup>1</sup>, Zhang Yunpeng<sup>1</sup>, Li Shuang<sup>1</sup>, You Jian<sup>1</sup>, Xie Chaolan<sup>1</sup>, Bai Dingqun<sup>2</sup>, Zhao Chen<sup>3</sup>, Chen Jing<sup>2</sup>, Tang Li<sup>2</sup>, Li Ming<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Orthopedics, People's Hospital of Tongnan District, Chongqing 402660, China; <sup>2</sup> Department of Rehabilitation, First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400015, China; <sup>3</sup> Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400015, China; <sup>4</sup> Department of Orthopedics, Children's Hospital of Chongqing Medical University, National Clinical Research Center for Child Health and Disorders, Ministry of Education Key Laboratory of Child Development and Disorders, Chongqing Key Laboratory of Pediatrics, Chongqing 400015, China

Corresponding author: Li Ming, Email: lm3180@163.com

**【Abstract】 Objective** To establish reference ranges for foot morphology parameters in children aged 3 –

14 years in Southwest China and provide a basis for assessing the developmental status of children's feet.

**Methods** A total of 3476 children aged 3–14 years (1918 boys and 1558 girls) from Southwest China were enrolled. Foot morphology was evaluated using the “Foot Secret” 3D full-foot scanner, which measured foot parameters, including arch volume, arch index, and foot length in both weight-bearing and non-weight-bearing states. Arch flexibility was calculated from arch volume under different conditions. Percentile ranges ( $P_{2.5}$ – $P_{97.5}$ ) were used to establish 95% reference intervals for arch volume, arch index, arch flexibility, and foot length to assess foot development. **Results** Foot length and arch volume increased with age, while arch index and arch flexibility decreased ( $P < 0.001$ ). Reference ranges for foot length in boys and girls increased from 146.7–182.0 mm and 143.2–177.4 mm at age 3 to 227.9–279.7 mm and 209.1–250.2 mm at age 14, respectively. In the non-weight-bearing state, reference ranges for arch index decreased from 0.21–0.37 (boys) and 0.20–0.37 (girls) at age 3 to 0.15–0.33 (boys) and 0.13–0.33 (girls) at age 14. Under weight-bearing conditions, arch index decreased from 0.28–0.37 (boys) and 0.27–0.37 (girls) at age 3 to 0.21–0.35 (boys) and 0.20–0.35 (girls) at age 14. Arch volume in the non-weight-bearing state increased from 3 155.4–15 046.3 mm<sup>3</sup> (boys) and 2 948.9–11 547.0 mm<sup>3</sup> (girls) at age 3 to 13 998.8–40 494.1 mm<sup>3</sup> (boys) and 11 372.3–36 624.0 mm<sup>3</sup> (girls) at age 14. Under weight-bearing conditions, arch volume increased from 1 686.4–8 163.3 mm<sup>3</sup> (boys) and 1 801.1–7 481.7 mm<sup>3</sup> (girls) at age 3 to 7 043.7–31 661.1 mm<sup>3</sup> (boys) and 7 775.9–24 505.2 mm<sup>3</sup> (girls) at age 14. Arch flexibility in boys and girls decreased from 0.13–0.71 and 0.13–0.74 at age 3 to 0.05–0.53 and 0.06–0.55 at age 14, respectively. **Conclusions** This study established reference ranges for multi-dimensional foot parameters in children aged 3–14 years in Southwest China, providing a valuable reference for assessing pediatric foot development.

**【Key words】** Foot; Reference Values; Surgical Procedures, Operative; Child

**Fund program:** Tongnan District Scientific Research Project on Technological Innovation and Application Development (TK-2022-13)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202406005-009

在骨科、儿科、矫形设计和运动科学等生物学学科中,足型评估是解剖学分析的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>。足型异常不仅与足部疼痛密切相关,还可能导致运动能力下降,并增加运动损伤风险<sup>[4-7]</sup>。儿童时期足部的正常发育对于全身骨骼和运动功能具有深远影响<sup>[8]</sup>。然而,在儿童不同发育阶段,足部形态差异很大,儿童发育期缺乏统一的诊断标准,医师在对儿童足型进行诊断时面临较大挑战,导致大量病例被过度治疗或漏诊<sup>[9]</sup>。因此,建立不同年龄段儿童足型发育的医学参考值范围,并基于此进行儿童足部发育评估,是提高诊疗准确性的关键。

目前的儿童足型发育研究主要集中于平面结构(如足长、足弓高度和中足宽度)以及二维指标(如足弓指数)<sup>[10-12]</sup>。足弓指数通过量化中足面积与足底面积的比值,从二维角度揭示了儿童足型的发育趋势。然而,足部是一个包含内外侧纵弓、横弓的复杂三维支撑结构,足弓指数等二维指标在足部发育评估中无法全面反映其形态学特征<sup>[1,13-15]</sup>。Zhao等<sup>[16]</sup>研究指出,三维参数—足弓体积能从立体视角评估足弓形态。与传统方法(如足弓高度和足弓指

数等一维或二维的测量方法)相比,足弓体积能反映足弓的三维结构,为研究足弓的结构和功能提供更为全面的数据支持。通过比较不同负重条件下足弓体积的变化情况,还可评估足弓柔软程度及抗形变能力。基于此,本研究对3~14岁儿童的足型发育进行横断面研究,建立包括足长、足弓指数、足弓体积和足弓柔韧度在内的多维度医学参考值,为儿童足部健康的临床评估和诊断提供重要依据。

## 资料与方法

### 一、研究对象

本研究为回顾性研究,以西南地区3~14岁儿童为研究对象。纳入标准:健康状况良好,可配合进行三维全足扫描仪检测。排除标准:①有先天性运动系统畸形或已知的遗传性足部疾病(如马蹄足);②有神经、骨骼肌肉系统疾病;③曾经进行过足部手术或有严重足部创伤史;④有使用足部矫形器或其他类似矫形器。本研究已通过重庆市潼南区人民医院伦理委员会审核(TYLL2022-KY001),并与受试儿童的法定监护人签署知情同意书。

本研究最终共纳入有效研究对象 3 476 例,女性 1 558 例、男性 1 918 例。受试者人口学统计数据见表 1。

二、足弓指数、足弓体积以及足弓柔韧度的测量使用“Foot Secret”三维全足扫描仪测量非负重状态(坐姿)和负重状态(站立)时的足部参数(图 1)。该扫描仪采用主动式立体视觉三维技术,采用红外光学三角成像原理,对参与者的眼睛安全无害。输出的足部三维模型采用标准格式(stl/obj/asc)导出到三维设计软件中。



注 A:非负重状态(坐姿); B:负重状态(站立)

图 1 不同负重状态下三维全足扫描仪检测示意图

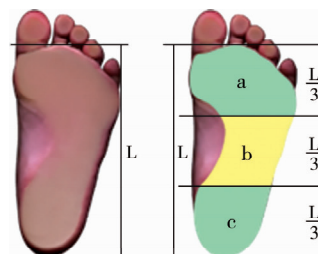
Fig. 1 Illustration of 3D full-foot scanning under different weight-bearing conditions

本研究中,参与者分别在非负重状态(坐姿)和负重状态(站立)下进行足部三维扫描,坐姿体位要求受试者坐在一张高度可调的椅子上,保持髋关节和膝关节弯曲 90 度,踝关节处于中立位置。测量参数包括足长(负重状态)、足弓体积(非负重状态和负重状态)、足弓指数(非负重状态和负重状态)和足弓柔韧度,旨在全面评估儿童足部发育状态。足长作为传统的足部发育指标,通过测量从脚后跟到

最前端脚趾顶端的距离,反映了足部的线性增长,常用于评价儿童整体身体发育情况。足弓指数通过计算中足面积与足底面积(不包括脚趾)的比值来衡量足弓的发育程度(图 2),是判断足弓高度和形态的重要参数,特别是在识别扁平足等足部畸形中具有重要临床意义<sup>[17]</sup>。使用 Geomagic Studio 12 重建每只足的三维模型,并计算出足弓体积。足弓体积定义为足弓投影到地面的区域与足弓之间的三维空间(图 3)<sup>[18]</sup>;其反映了足弓的三维结构,是足弓发育的立体表现<sup>[16]</sup>。足弓柔韧度通过不同体位下足弓体积的差值来评估,其反映了足弓在动态负重条件下的适应性和功能性,是理解足部生物力学特性的重要指标<sup>[19]</sup>。计算公式为:

$$\text{足弓柔韧度} = \frac{\text{非负重足弓体积} - \text{负重足弓体积}}{\text{非负重足弓体积}}$$

上述指标的测量均由同一名经过专业培训的矫形师在标准化条件下完成。



注 沿除脚趾外的足印长度 L(左),将足底平均分为三段(右);中足区域(b)面积与前中后足(a+b+c)区域面积的比值即为足弓指数

图 2 足弓指数示意图

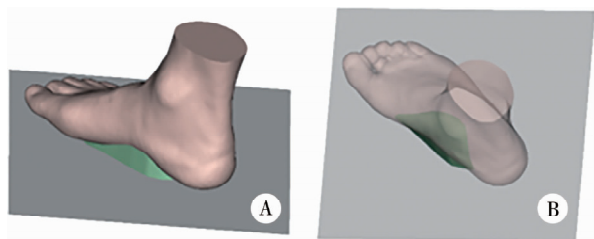
Fig. 2 Illustration of arch index

表 1 中国西南地区 3~14 岁儿童各年龄组受试者人数、身高、体重与 BMI(n=3476)

Table 1 Number of participants, height, weight and BMI across age groups in children aged 3-14 years in Southwest China (n=3476)

年龄 (岁)	例数(例)			体重 ( $\bar{x} \pm s$ , kg)	身高 ( $\bar{x} \pm s$ , cm)	BMI ( $\bar{x} \pm s$ , kg/m <sup>2</sup> )
	男	女	合计			
3	116	74	190	16.3 ± 4.7	100.0 ± 6.0	16.2 ± 3.2
4	141	120	261	18.1 ± 3.5	106.3 ± 5.2	16.0 ± 2.7
5	133	132	265	20.3 ± 3.9	112.5 ± 5.4	16.0 ± 2.4
6	161	93	254	23.3 ± 5.1	119.0 ± 5.6	16.4 ± 2.8
7	173	136	309	25.5 ± 5.6	124.3 ± 6.2	16.4 ± 2.5
8	159	169	328	28.5 ± 6.7	129.5 ± 6.5	16.9 ± 3.0
9	165	142	307	31.9 ± 7.0	135.7 ± 6.2	17.2 ± 3.0
10	203	151	354	36.5 ± 8.3	141.1 ± 6.9	18.2 ± 3.2
11	217	175	392	41.4 ± 9.5	147.8 ± 7.8	18.8 ± 3.2
12	168	164	332	45.5 ± 10.0	152.9 ± 7.3	19.4 ± 3.6
13	155	113	268	50.6 ± 11.4	158.6 ± 7.6	20.0 ± 3.9
14	127	89	216	54.8 ± 12.2	162.6 ± 7.8	20.6 ± 3.9

注 BMI: 身体质量指数



注 A:侧视图; B:俯视图。足弓投影到地面的区域与足弓之间的三维空间即为足弓体积

图3 不同视角下的足弓体积示意图

Fig.3 Illustration of arch volume from different perspectives

### 三、统计学处理

统计分析采用 SPSS 22.0。服从正态分布的计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示;不服从正态分布的计量资料以  $M(Q_1, Q_3)$  表示,采用 Kruskal - Wallis 秩和检验进行组间比较;采用百分位数 ( $P_{2.5} \sim P_{97.5}$ ) 建立各个足部参数的 95% 医学参考值范围。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 结 果

### 一、足长随年龄的增长而增长

随着年龄的增长,3~14 岁儿童的足长呈持续增长趋势( $P < 0.001$ )。在 3 岁组,男性、女性足长参考范围分别为 146.7~182.0 mm 和 143.2~177.4 mm。至 14 岁时,男性、女性足长参考范围分别增长至 227.9~279.7 mm 和 209.1~250.2 mm。见表 2。

### 二、足弓指数随年龄的增长逐渐趋于稳定

不同性别儿童的足弓指数随着年龄的增长而逐渐降低( $P < 0.001$ )。在非负重状态下,3 岁男性儿童的足弓指数参考范围为 0.21~0.37,3 岁女性儿童的足弓指数参考范围为 0.20~0.37。随着年龄的增长,这一数值逐渐降低。至 14 岁时,男性儿童非负重状态下足弓指数参考范围为 0.15~0.33,女性儿童非负重状态下足弓指数参考范围为 0.13~0.33。负重状态下,3 岁男性儿童足弓指数参考范围为 0.28~0.37,女性儿童足弓指数参考范围为 0.27~0.37。至 14 岁时,男性儿童负重状态下足弓指数参考范围降低至 0.21~0.35,女性儿童足弓指数参考范围降低至 0.20~0.35。见表 3。

### 三、足弓体积随年龄的增长而持续增加

不同负重条件下,男性、女性儿童足弓体积随年龄增长保持增加趋势( $P < 0.001$ )。在非负重状态下,3 岁男性足弓体积参考范围为 3 155.4~15 046.3 mm<sup>3</sup>。3 岁女性足弓体积参考范围为 2 948.9~11 547.0 mm<sup>3</sup>。至 14 岁时,男性足弓体积参考范围增长至 13 998.8~40 494.1 mm<sup>3</sup>,女性足弓体积参考范围增长至 11 372.3~36 624.0 mm<sup>3</sup>。负重状态下,3 岁男性足弓体积参考范围为 1 686.4~8 163.3 mm<sup>3</sup>,3 岁女性足弓体积参考范围为 1 801.1~7 481.7 mm<sup>3</sup>。至 14 岁时,男性足弓体积参考范围增长至 7 043.7~31 661.1 mm<sup>3</sup>,女性足弓体积参考范围增长至 7 775.9~24 505.2 mm<sup>3</sup>。见表 4。

表 2 不同年龄、性别儿童足长的中位数与参考范围

Table 2 Median and reference range of foot length in children of different genders across age groups

年龄 (岁)	例数(例)		足长 [ $M(Q_1, Q_3)$ , mm]		参考范围 [ $(P_{2.5} \sim P_{97.5})$ , mm]	
	男	女	男	女	男	女
3	232	148	161.6(155.8, 166.1)	158.1(153.1, 164.3)	146.7~182.0	143.2~177.4
4	282	240	170.9(164.4, 175.3)	168.0(162.0, 175.2)	151.5~185.6	150.2~188.1
5	266	264	178.4(172.5, 184.9)	176.8(170.1, 183.7)	156.3~196.3	159.9~195.4
6	322	186	188.8(181.7, 194.3)	187.8(179.3, 193.3)	167.1~209.4	166.2~203.2
7	346	272	194.5(187.9, 202.1)	193.2(187.2, 199.7)	173.6~220.3	175.5~215.6
8	318	338	204.2(195.1, 212.6)	201.1(193.1, 207.1)	179.7~229.8	182.4~223.2
9	330	284	214.8(206.3, 222.1)	208.8(202.5, 217.1)	192.0~237.8	190.0~238.6
10	406	302	219.2(211.7, 228.4)	220.2(211.6, 227.2)	199.9~246.2	199.2~241.2
11	434	350	231.5(219.4, 241.2)	227.2(218.6, 233.8)	202.9~259.0	208.8~247.6
12	336	328	238.7(229.3, 250.0)	230.5(224.4, 235.9)	205.6~264.9	210.9~246.1
13	310	226	245.9(238.4, 255.1)	231.7(225.5, 237.6)	219.9~273.6	214.8~251.6
14	254	178	252.7(244.5, 260.0)	233.9(226.5, 240.4)	227.9~279.7	209.1~250.2
H 值			3 235.600	2 546.300		
P 值			<0.001	<0.001		

表 3 不同年龄、性别、负重状态下儿童足弓指数的中位数与参考范围

Table 3 Median and reference range of arch index in children of different genders across age groups under different weight-bearing conditions

年龄 (岁)	例数(例)		非负重			
			足弓指数[ $M(Q_1, Q_3)$ ]		参考范围( $P_{2.5} \sim P_{97.5}$ )	
	男	女	男	女	男	女
3	232	148	0.30(0.27,0.33)	0.29(0.26,0.31)	0.21~0.37	0.20~0.37
4	282	240	0.29(0.26,0.31)	0.28(0.24,0.30)	0.22~0.35	0.18~0.35
5	266	264	0.29(0.26,0.31)	0.26(0.23,0.28)	0.19~0.36	0.16~0.33
6	322	186	0.27(0.25,0.30)	0.25(0.23,0.28)	0.17~0.34	0.10~0.36
7	346	272	0.27(0.24,0.31)	0.24(0.21,0.27)	0.15~0.35	0.12~0.33
8	318	338	0.26(0.23,0.29)	0.24(0.21,0.26)	0.12~0.34	0.10~0.32
9	330	284	0.25(0.23,0.29)	0.24(0.21,0.27)	0.14~0.34	0.10~0.33
10	406	302	0.25(0.22,0.28)	0.23(0.21,0.26)	0.14~0.34	0.13~0.32
11	434	350	0.25(0.23,0.28)	0.24(0.21,0.26)	0.13~0.34	0.13~0.32
12	336	328	0.25(0.23,0.28)	0.23(0.20,0.25)	0.13~0.35	0.11~0.33
13	310	226	0.25(0.23,0.29)	0.23(0.21,0.25)	0.18~0.34	0.10~0.31
14	254	178	0.26(0.23,0.28)	0.24(0.22,0.26)	0.15~0.33	0.13~0.33
H 值			410.340	365.180		
P 值			<0.001	<0.001		

年龄 (岁)	负重			
	足弓指数[ $M(Q_1, Q_3)$ ]		参考范围( $P_{2.5} \sim P_{97.5}$ )	
	男	女	男	女
3	0.34(0.32,0.36)	0.34(0.32,0.35)	0.28~0.37	0.27~0.37
4	0.34(0.32,0.35)	0.32(0.29,0.34)	0.26~0.37	0.24~0.37
5	0.33(0.31,0.35)	0.30(0.28,0.33)	0.24~0.37	0.21~0.36
6	0.32(0.29,0.33)	0.30(0.27,0.33)	0.24~0.37	0.21~0.36
7	0.32(0.28,0.34)	0.29(0.26,0.32)	0.23~0.37	0.21~0.35
8	0.30(0.27,0.33)	0.27(0.25,0.30)	0.20~0.36	0.19~0.35
9	0.29(0.26,0.32)	0.27(0.25,0.32)	0.22~0.37	0.18~0.36
10	0.28(0.25,0.32)	0.26(0.24,0.29)	0.20~0.37	0.19~0.35
11	0.28(0.25,0.32)	0.26(0.24,0.29)	0.21~0.37	0.20~0.35
12	0.28(0.25,0.31)	0.26(0.24,0.28)	0.21~0.37	0.19~0.36
13	0.27(0.25,0.30)	0.26(0.24,0.28)	0.22~0.36	0.14~0.35
14	0.27(0.25,0.30)	0.26(0.24,0.29)	0.21~0.35	0.20~0.35
H 值	845.860	633.830		
P 值	<0.001	<0.001		

四、随年龄增长,足部逐渐由柔软状态发育至坚硬状态

随年龄增长,男性、女性足弓柔韧度持续降低( $P<0.001$ )。足部由柔软状态逐渐坚硬,抗形变能力逐渐增强。在 3 岁儿童中,男性、女性足弓柔韧度参考范围分别为 0.13~0.71 和 0.13~0.74。到 14 岁时,男性、女性足弓柔韧度参考范围分别降低至 0.05~0.53 和 0.06~0.55。见表 5。

讨 论

由于足部姿势指数可重复性差,耗时长,影像学方法(如 X 线片)在检测儿童足部时显影困难,无法广泛应用于大样本儿童的足部筛查中。三维扫描技术具有快速、准确的特点,成为了足部筛查的有效工具,已被广泛应用于足部检测等各个领域<sup>[20-22]</sup>。足型三维检测可以获得二维测量无法反



表 4 不同年龄、性别、负重状态下儿童足弓体积的中位数与参考范围

Table 4 Median and reference range of arch volume in children of different genders across age groups under different weight-bearing conditions

年龄 (岁)	例数(例)		非负重			
			足弓体积[ $M(Q_1, Q_3)$ , mm <sup>3</sup> ]		参考范围[( $P_{2.5} \sim P_{97.5}$ ), mm <sup>3</sup> ]	
	男	女	男	女	男	女
3	232	148	6 294.2(4 901.6, 7 732.5)	6 391.0(5 133.1, 7 708.4)	3 155.4 ~ 15 046.3	2 948.9 ~ 11 547.0
4	282	240	7 397.4(5 950.7, 8 948.4)	7 548.8(6 204.9, 9 228.8)	3 782.5 ~ 13 805.4	3 742.6 ~ 14 980.5
5	266	264	8 471.9(6 571.7, 10 324.1)	8 883.5(7187.0, 11 079.1)	4 061.6 ~ 15 836.3	5 273.2 ~ 16 902.3
6	322	186	10 546.2(8 591.9, 12 543.9)	10 220.9(7 983.6, 12 799.1)	5 760.1 ~ 18 375.8	4 997.3 ~ 17 937.9
7	346	272	10 918.2(8 557.2, 13 952.8)	11 795.5(9 664.9, 14 313.4)	5 120.8 ~ 21 401.2	5 520.3 ~ 21 448.1
8	318	338	13 287.0(10 401.2, 16 616.0)	13 514.2(11 273.4, 16 403.0)	6 364.8 ~ 25 580.4	7 667.3 ~ 25 104.2
9	330	284	15 596.5(12 259.5, 18 930.2)	15 334.4(12 402.5, 18 644.1)	7 635.6 ~ 25 926.6	7 952.5 ~ 26 328.8
10	406	302	17 079.2(13 986.7, 21 934.8)	17 792.2(14 305.4, 21 798.1)	7 826.8 ~ 29 681.0	8 983.8 ~ 29 978.0
11	434	350	19 286.6(14 927.3, 23 253.7)	19 257.9(16 157.3, 22 892.8)	8 520.7 ~ 32 372.3	9 891.0 ~ 31 364.9
12	336	328	21 269.7(16 660.3, 25 411.0)	20 119.3(16 986.8, 23 295.0)	8 885.6 ~ 36 148.4	9 790.3 ~ 33 405.3
13	310	226	21 976.2(17 395.2, 26 988.0)	21 042.1(18 064.3, 24 814.2)	10 512.3 ~ 37 726.5	11 046.4 ~ 34 830.1
14	254	178	23 802.8(19 338.4, 27 564.6)	20 184.7(17 460.3, 24 676.4)	13 998.8 ~ 40 494.1	11 372.3 ~ 36 624.0
H 值			2268.300		1810.900	
P 值			<0.001		<0.001	

年龄 (岁)	负重			
	足弓体积[ $M(Q_1, Q_3)$ , mm <sup>3</sup> ]		参考范围[( $P_{2.5} \sim P_{97.5}$ ), mm <sup>3</sup> ]	
	男	女	男	女
3	3 521.2(2 952.8, 4 461.9)	3 652.1(2 880.8, 4 457.0)	1 686.4 ~ 8 163.3	1 801.1 ~ 7 481.7
4	4 133.8(3 297.8, 5 399.8)	4 941.7(3 664.3, 6 375.4)	2 110.4 ~ 8 349.1	2 042.0 ~ 9 268.1
5	5 077.9(3 843.5, 6 484.4)	5 771.9(4 543.4, 7 524.7)	2 215.3 ~ 10 938.5	2 730.4 ~ 12 507.4
6	6 646.1(5 128.7, 8 265.2)	6 680.4(5 084.8, 8 519.3)	3 243.7 ~ 12 585.9	3 060.1 ~ 12 919.6
7	7 003.1(5 093.1, 9 451.3)	7 880.3(6 208.9, 10 485.4)	3 179.7 ~ 14 597.3	3 312.6 ~ 16 863.0
8	8 785.8(6 702.0, 11 877.5)	9 478.5(7 323.9, 12 108.9)	3 902.8 ~ 19 265.9	4 300.8 ~ 19 371.6
9	10 598.5(7 635.0, 13 469.5)	10 874.2(7 999.7, 13 620.4)	4 097.1 ~ 20 345.6	4 071.4 ~ 20 258.8
10	12 170.5(8 27.5, 15 611.2)	13 324.1(10 109.4, 16 995.6)	4 586.4 ~ 23 275.5	5 042.9 ~ 25 441.0
11	13 449.7(9 619.9, 17 406.8)	14 919.8(11 202.8, 17 924.6)	5 133.1 ~ 25 243.7	5 374.9 ~ 26 306.5
12	15 232.9(10 994.1, 19 980.0)	15 151.4(11 976.5, 18 039.8)	5 354.1 ~ 29 828.3	5 292.9 ~ 24 780.6
13	17 260.5(13 158.9, 21 466.1)	15 761.3(12 563.8, 19 283.6)	6 155.7 ~ 30 733.6	5 699.0 ~ 26 728.8
14	18 115.1(13 732.9, 22 012.5)	15 877.1(12 259.9, 19 190.6)	7 043.7 ~ 31 661.1	7 775.9 ~ 24 505.2
H 值	2 243.200		1 684.600	
P 值	<0.001		<0.001	

表 5 不同年龄、性别、负重状态下儿童足弓柔韧度的中位数与参考范围

Table 5 Median and reference range of arch flexibility in children of different genders across age groups

年龄 (岁)	例数(例)		足弓柔韧度[ $M(Q_1, Q_3)$ ]		参考范围[( $P_{2.5} \sim P_{97.5}$ )]	
			男	女	男	女
3	232	148	0.39(0.28, 0.50)	0.40(0.30, 0.48)	0.13 ~ 0.71	0.13 ~ 0.74
4	282	240	0.39(0.29, 0.51)	0.34(0.23, 0.45)	0.12 ~ 0.71	0.06 ~ 0.69
5	266	264	0.37(0.26, 0.48)	0.32(0.24, 0.43)	0.13 ~ 0.61	0.07 ~ 0.59
6	322	186	0.36(0.25, 0.45)	0.32(0.24, 0.42)	0.07 ~ 0.61	0.10 ~ 0.60
7	346	272	0.35(0.26, 0.44)	0.31(0.21, 0.38)	0.10 ~ 0.62	0.08 ~ 0.56
8	318	338	0.30(0.22, 0.41)	0.29(0.20, 0.39)	0.07 ~ 0.63	0.05 ~ 0.59
9	330	284	0.32(0.21, 0.42)	0.29(0.20, 0.39)	0.09 ~ 0.60	0.06 ~ 0.61

续上表

年龄 (岁)	例数(例)		足弓柔韧度[ $M(Q_1, Q_3)$ ]		参考范围[ $(P_{2.5} \sim P_{97.5})$ ]	
	男	女	男	女	男	女
10	406	302	0.29(0.19,0.41)	0.25(0.18,0.34)	0.06~0.64	0.06~0.56
11	434	350	0.28(0.20,0.38)	0.23(0.15,0.33)	0.07~0.59	0.03~0.56
12	336	328	0.25(0.16,0.34)	0.25(0.17,0.34)	0.05~0.57	0.04~0.59
13	310	226	0.21(0.15,0.29)	0.25(0.17,0.34)	0.03~0.51	0.06~0.56
14	254	178	0.22(0.15,0.32)	0.24(0.17,0.33)	0.05~0.53	0.06~0.55
H 值			456.050	236.380		
P 值			<0.001	<0.001		

映的足部立体形态变化,足部三维检测技术的运用将为足部力学与形态分析提供新的参考依据<sup>[23]</sup>。本研究中,我们使用高精度的三维全足扫描仪获得 3 476 例儿童在不同负重状态下的足部形态模型,从二维、三维多维度对儿童足部的发育情况进行分析。

足弓指数是目前运用最为广泛的足型分类方式<sup>[24]</sup>。研究发现,足弓指数随着年龄的增长而逐渐减小,提示儿童足部正在经历快速发育过程。尤其是负重状态下 3~5 岁足弓指数快速减小,在 6 岁以后,男女性足弓指数持续降低并逐渐趋于稳定。这也证实了先前的研究结果,Hennig 等<sup>[25]</sup>指出,足弓在 2~6 岁快速发育;Staheli 等<sup>[26]</sup>发现,足弓在 6 岁时成熟。值得注意的是,非负重与负重状态下女性足弓指数在 13~14 岁时出现反向趋势,即足弓指数上升,足弓降低。这提示单纯采用二维参数足弓指数不足以界定三维足弓状态;且由于足弓指数仅通过足底不同区域面积的比例获得,无法反映足部三维结构<sup>[9,27-28]</sup>。因此,需要引入三维检测指标进一步对足弓形态进行全面评估。

足弓体积作为一种三维评估指标,不仅可以反映不同负重条件下足弓高度的变化,还可反映足弓长度和宽度。2022 年,Zhao 等<sup>[16]</sup>研究提出,足弓体积是一个能够反映足部形态学变化的三维指标,具有很好的特异度、灵敏度和可重复性,并可提供不同负重条件下足部形变的比例差异。本研究发现,足弓体积在儿童足部发育过程中产生了明显的变化,随年龄增长而持续快速增加,足弓三维形态逐渐成熟。非负重状态下的足弓体积,代表足部骨性结构的状态;负重状态下的足弓体积则反映了足部软组织与骨性结构的状态。通过对比不同负重条件下足弓体积变化情况,定量反映足弓柔韧性发育状态。研究显示,足弓柔韧度随着年龄的增长而逐渐表现出更高的僵硬程度,与 3 岁时足弓柔韧度相比,14 岁时男女性足弓柔韧度分别降低 43% 和 40%。

柔韧度不足可能提示足部结构僵硬,足部缓冲能力较弱,增加损伤风险,并对步态和下肢运动链产生不良影响<sup>[5]</sup>。另一方面,柔韧度过大可能与足弓结构的潜在不稳定性相关,提示可能存在柔软性扁平足等发育问题。因此,足弓柔韧度的测量和分析在早期识别足部力学等功能性能力方面具有显著的临床价值,帮助医生在患者出现症状前做出干预决策。

通过对足弓指数、足弓体积、足弓柔韧度进行综合分析,发现 3~14 岁前儿童足部形态学结构得到快速发育,这与 Chang 等<sup>[19]</sup>以及 Bosch 等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。此外,本研究还发现,随年龄的增长,足部力学结构同样快速发育,由 3 岁时的柔软状态发育至 14 岁时的僵硬状态。因此,我们认为对儿童的足部发育评估需要结合二维、三维参数以及柔韧度进行综合性评定。

由于缺乏统一的发育期儿童足部临床诊断标准,尤其是在足弓发育相关的细化指标方面,导致本研究存在一些潜在偏倚。尽管我们已排除严重足部骨骼和关节畸形的儿童(如垂直距骨),但对于扁平足和高弓足等常见足部问题,无法准确区分正常与异常发育状态。由于这一限制,本研究中可能包含了部分发育异常的儿童个体,进而影响了医学参考值的精准度。随着发育期儿童足部临床诊断标准的完善,未来的研究应扩大样本量,进行更精细的人群筛选,以便更准确地描述正常儿童足部发育的生理范围,为临床诊断和干预提供更为可靠的依据。

本研究通过对 3~14 岁中国西南地区儿童的足部发育进行系统分析,首次建立了包括足弓指数、足弓体积和足弓柔韧度在内的医学参考值。这一成果为儿童足部发育的评估提供了参考,可用于筛查和区分正常发育与潜在的病理状态,对儿童足部健康的临床评估具有重要意义。

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突

**作者贡献声明** 陈立淮和杨筱轩负责本研究的设计、实施和起草文章;郑强、曹波、张雲鹏、李爽、尤建、谢超兰、白定群、赵辰、陈静负责数据收集及分析;陈立淮、唐力、李明负责研究实施,并对文章知识性内容进行审阅

## 参 考 文 献

- [1] Domjanic J, Fieder M, Seidler H, et al. Geometric morphometric footprint analysis of young women[J]. J Foot Ankle Res, 2013, 6(1): 27. DOI: 10.1186/1757-1146-6-27.
- [2] Mauch M, Grau S, Krauss I, et al. Foot morphology of normal, underweight and overweight children[J]. Int J Obes (Lond), 2008, 32(7): 1068-1075. DOI: 10.1038/ijo.2008.52.
- [3] Tomassoni D, Traini E, Amenta F. Gender and age related differences in foot morphology[J]. Maturitas, 2014, 79(4): 421-427. DOI: 10.1016/j.maturitas.2014.07.019.
- [4] Takabayashi T, Edama M, Inai T, et al. Differences in rearfoot, midfoot, and forefoot kinematics of normal foot and flatfoot during running[J]. J Orthop Res, 2021, 39(3): 565-571. DOI: 10.1002/jor.24877.
- [5] Sheikh Taha AM, Feldman DS. Painful flexible flatfoot[J]. Foot Ankle Clin, 2015, 20(4): 693-704. DOI: 10.1016/j.fcl.2015.07.011.
- [6] Hösl M, Böhm H, Multerer C, et al. Does excessive flatfoot deformity affect function? A comparison between symptomatic and asymptomatic flatfeet using the Oxford Foot Model[J]. Gait Posture, 2014, 39(1): 23-28. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2013.05.017.
- [7] Kim HY, Shin HS, Ko JH, et al. Gait analysis of symptomatic flatfoot in children: an observational study[J]. Clin Orthop Surg, 2017, 9(3): 363-373. DOI: 10.4055/cios.2017.9.3.363.
- [8] Lin CJ, Lai KA, Kuan TS, et al. Correlating factors and clinical significance of flexible flatfoot in preschool children[J]. J Pediatr Orthop, 2001, 21(3): 378-382.
- [9] Uden H, Scharf-billig R, Causby R. The typically developing paediatric foot: how flat should it be? A systematic review[J]. J Foot Ankle Res, 2017, 10(1): 37. DOI: 10.1186/s13047-017-0218-1.
- [10] Wong CK, Weil R, de Boer E. Standardizing foot-type classification using arch index values[J]. Physiother Can, 2012, 64(3): 280-283. DOI: 10.3138/ptc.2011-40.
- [11] Woźniacka R, Oleksy Ł, Jankowicz-Szymańska A, et al. The association between high-arched feet, plantar pressure distribution and body posture in young women[J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 17187. DOI: 10.1038/s41598-019-53459-w.
- [12] Escalona-Marfil C, Prats-Puig A, Ortas-Deunosajut X, et al. Children's foot parameters and basic anthropometry-do arch height and midfoot width change? [J]. Eur J Pediatr, 2023, 182(2): 777-784. DOI: 10.1007/s00431-022-04715-1.
- [13] Razeghi M, Batt ME. Foot type classification: a critical review of current methods[J]. Gait Posture, 2002, 15(3): 282-291. DOI: 10.1016/s0966-6362(01)00151-5.
- [14] Xiong SP, Goonetilleke RS, Witana CP, et al. Foot arch characterization: a review, a new metric, and a comparison[J]. J Am Podiatr Med Assoc, 2010, 100(1): 14-24. DOI: 10.7547/1000014.
- [15] Keijsers NLW, Stolwijk NM, Louwerens JWK, et al. Classification of forefoot pain based on plantar pressure measurements[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2013, 28(3): 350-356. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2013.01.012.
- [16] Zhao C, Chen J, Deng Y, et al. Arch volume: a new method for medial longitudinal arch measurement[J]. Foot Ankle Surg, 2022, 28(7): 962-967. DOI: 10.1016/j.fas.2022.01.007.
- [17] Wang JW, Tang L, Tang J, et al. The typically developing pediatric foot-The data of the 1744 children in China[J]. Foot Ankle Surg, 2022, 28(3): 347-353. DOI: 10.1016/j.fas.2021.04.005.
- [18] Meneses J, Gharbi T, Cornu JY. Three-dimensional optical high-resolution profiler with a large observation field; foot arch behavior under low static charge studies[J]. Appl Opt, 2002, 41(25): 5267-5274. DOI: 10.1364/ao.41.005267.
- [19] Chang HW, Lin CJ, Kuo LC, et al. Three-dimensional measurement of foot arch in preschool children[J]. Biomed Eng Online, 2012, 11(1): 76. DOI: 10.1186/1475-925X-11-76.
- [20] Chen MJL, Chen CPC, Lew HL, et al. Measurement of forefoot varus angle by laser technology in people with flexible flatfoot[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2003, 82(11): 842-846. DOI: 10.1097/01.PHM.0000087455.38062.79.
- [21] Windisch G, Odehnal B, Reimann R, et al. Contact areas of the tibiotalar joint[J]. J Orthop Res, 2007, 25(11): 1481-1487. DOI: 10.1002/jor.20429.
- [22] Witana CP, Xiong SP, Zhao JH, et al. Foot measurements from three-dimensional scans: a comparison and evaluation of different methods[J]. Int J Ind Ergon, 2006, 36(9): 789-807. DOI: 10.1016/j.ergon.2006.06.004.
- [23] Jelen K, Tetkova Z, Halounova L, et al. Shape characteristics of the foot arch: dynamics in the pregnancy period[J]. Neuro Endocrinol Lett, 2005, 26(6): 752-756. DOI: .
- [24] Cavanagh PR, Rodgers MM. The arch index: a useful measure from footprints[J]. J Biomech, 1987, 20(5): 547-551. DOI: 10.1016/0021-9290(87)90255-7.
- [25] Hennig EM, Staats A, Rosenbaum D. Plantar pressure distribution patterns of young school children in comparison to adults[J]. Foot Ankle Int, 1994, 15(1): 35-40. DOI: 10.1177/107110079401500107.
- [26] Staheli LT, Chew DE, Corbett M. The longitudinal arch. a survey of eight hundred and eighty-two feet in normal children and adults[J]. J Bone Joint Surg Am, 1987, 69(3): 426-428.
- [27] Morrison SC, McCarthy D, Mahaffey R. Associations between obesity and pediatric foot dimensions[J]. J Am Podiatr Med Assoc, 2018, 108(5): 383-389. DOI: 10.7547/16-172.
- [28] Morrison SC, McClymont J, Price C, et al. Time to revise our dialogue: how flat is the paediatric flatfoot? [J]. J Foot Ankle Res, 2017, 10(1): 50. DOI: 10.1186/s13047-017-0233-2.
- [29] Bosch K, Gerss J, Rosenbaum D. Development of healthy children's feet-nine-year results of a longitudinal investigation of plantar loading patterns[J]. Gait Posture, 2010, 32(4): 564-571. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2010.08.003.

(收稿日期: 2024-06-03)

**本文引用格式:** 陈立淮, 杨筱轩, 郑强, 等. 中国西南地区 3~14 岁儿童足部发育状态的横断面研究[J]. 临床小儿外科杂志, 2025, 24(1): 45-52. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202406005-009.

**Citing this article as:** Chen LW, Yang XX, Zheng Q, et al. Cross-sectional study on foot development in children in Southwest China [J]. J Clin Ped Sur, 2025, 24(1): 45-52. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202406005-009.