

УДК 617.586-007.58+616.748.54-018.38]-053.2-08-039.73

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

Оригинальное исследование



Влияние программы длительного стретчинга трехглавой мышцы голени на угол пеннации ее головок у детей с гипермобильным плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия

Л.В. Горобец^{1, 2}, В.М. Кенис^{1, 3}¹ Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера, Санкт-Петербург, Россия;² Медикал Хоум, Ростов-на-Дону, Россия;³ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Ретракция трехглавой мышцы голени имеет большое значение в патогенезе плоскостопия у детей. Она относится к перистым мышцам, и наклон ее мышечных волокон по отношению к апоневрозу может быть измерен, а полученный угол обозначают как угол перистости или угол пеннации.

Цель — оценка влияния программы длительного стретчинга трехглавой мышцы голени на угол пеннации ее головок у детей с плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия.

Материалы и методы. Обследовано 82 ребенка с гипермобильным плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия. Угол пеннации измеряли при помощи ультразвуковой диагностики. В качестве основного упражнения рекомендовали стретчинг трехглавой мышцы голени длительностью 6 мес. Статистический анализ данных выполняли в программе SPSS v. 26.0.

Результаты. В основную группу вошли 63 ребенка, проводившие стретчинг, в контрольную — 19 детей, не использовавшие стретчинга с необходимой интенсивностью. В основной группе отмечено достоверное улучшение показателя шкалы оценки формы и положения стоп (FPI-6), тогда как в контрольной он не изменился. Исходный угол тыльной флексии стопы у детей основной группы составил $4,84 \pm 0,10^\circ$, в контрольной — $4,81 \pm 0,17^\circ$. Через 6 мес. стретчинга тыльная флексия в основной группе составила $11,34 \pm 0,24^\circ$, в контрольной — $4,85 \pm 0,19^\circ$ ($p < 0,01$). Угол пеннации головок трехглавой мышцы голени достоверно увеличился в медиальной головке икроножной и камбаловидной мышц.

Заключение. Применение длительной программы стретчинга у детей с плоскостопием привело к достоверному увеличению угла тыльной флексии стопы. Эти изменения сопровождались морфологической и функциональной перестройкой мышцы, проявляющейся достоверным увеличением угла пеннации медиальной головки икроножной и камбаловидной мышц. Дальнейшие исследования будут способствовать выявлению механизмов, лежащих в основе анатомической и функциональной перестройки мышцы, а также их влиянию на анатомические параметры стопы при плоскостопии.

Ключевые слова: плоскостопие; трехглавая мышца голени; стретчинг; угол пеннации.

Как цитировать

Горобец Л.В., Кенис В.М. Влияние программы длительного стретчинга трехглавой мышцы голени на угол пеннации ее головок у детей с гипермобильным плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2024. Т. 12. № 4. С. 453–462. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

Original Study Article

Effects of a long-term triceps surae stretching program on the pennation angle of triceps surae heads in children with hypermobile flat foot and Achilles tendon shortening

Leonid V. Gorobets^{1, 2}, Vladimir M. Kenis^{1, 3}¹ H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia;² Medical Home, Rostov-on-Don, Russia;³ North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Triceps surae retraction plays a key role in the pathogenesis of flat feet in children. This is a pennate muscle. The pennation angle is defined as the angle between triceps surae fascicles and aponeurosis.

AIM: The aim of the study was to evaluate the effect of a long-term triceps surae stretching program on the pennation angle of the triceps surae head in children with flat feet and Achilles tendon shortening.

MATERIALS AND METHODS: The study included a total of 82 children with hypermobile flat feet and Achilles tendon shortening. The pennation angle was measured by ultrasound. Triceps surae stretching was recommended for 6 months as a basic exercise. SPSS v.26.0 was used for statistical analysis of data.

RESULTS: The study group included 63 children who performed stretching exercises and the control group included 19 children who did not perform stretching exercises at the required intensity. The study group showed a significant improvement in the Foot Posture Index (FPI)-6, while the control group showed no change. The baseline foot dorsiflexion was $4.84^\circ \pm 0.10^\circ$ in the study group and $4.81^\circ \pm 0.17^\circ$ in the control group. After 6 months of stretching, dorsiflexion was $11.34^\circ \pm 0.24^\circ$ in the study group and $4.85^\circ \pm 0.19^\circ$ in the control group ($p < 0.01$). The pennation angle of the triceps surae heads showed a significant increase in the medial head of the gastrocnemius and soleus muscles.

CONCLUSIONS: A long-term stretching program in children with flat feet resulted in a significant increase in foot dorsiflexion. These changes were associated with morphological and functional muscle restructuring, manifested by a significant increase in the pennation angle of the medial head of the gastrocnemius and soleus muscles. Further research will identify the mechanisms underlying anatomical and functional muscle restructuring and their effects on anatomical foot parameters in flat feet.

Keywords: flat feet; triceps surae; stretching; pennation angle.

To cite this article

Gorobets LV, Kenis VM. Effects of a long-term triceps surae stretching program on the pennation angle of triceps surae heads in children with hypermobile flat foot and Achilles tendon shortening. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2024;12(4):453–462. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

Received: 29.11.2024

Accepted: 12.12.2024

Published online: 16.12.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

原创研究

长期牵伸腓肠三头肌计划对儿童高可动性平足及跟腱缩短患者腓肠三头肌纤维羽状角的影响

Leonid V. Gorobets^{1,2}, Vladimir M. Kenis^{1,3}¹ H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia;² Medical Home, Rostov-on-Don, Russia;³ North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia

摘要

背景。腓肠三头肌的收缩在儿童平足的发病机制中具有重要意义。作为一组羽状肌，其肌纤维相对于腱膜的倾斜角度可以被测量，此角度称为羽状角或纤维羽状角。

研究目的。评估长期腓肠三头肌牵伸计划对高可动性平足伴跟腱缩短儿童腓肠三头肌纤维羽状角的影响。

材料与方法。研究包括82名患有高可动性平足及跟腱缩短的儿童。通过超声诊断测量腓肠三头肌纤维的羽状角。主要干预措施为持续6个月的腓肠三头肌牵伸训练。统计分析使用 SPSS v. 26.0 完成。

结果。实验组包括63名参与牵伸计划的儿童，对照组包括19名未按规定强度参与牵伸训练的儿童。足部形态与位置评估量表（FPI-6）：实验组显示显著改善，对照组无变化。足背屈角的变化：初始值：实验组为 $4.84 \pm 0.10^\circ$ ，对照组为 $4.81 \pm 0.17^\circ$ ；6个月后：实验组为 $11.34 \pm 0.24^\circ$ ，对照组为 $4.85 \pm 0.19^\circ$ （ $p < 0.01$ ）。纤维羽状角的变化：腓肠肌内侧头和比目鱼肌的纤维羽状角均显著增加。

结论。在平足儿童中实施长期牵伸计划可显著提高足背屈角。这些变化伴随着肌肉的形态和功能重塑，表现为腓肠肌内侧头和比目鱼肌纤维羽状角的显著增加。进一步研究将有助于揭示肌肉解剖和功能重塑的机制及其对平足解剖参数的影响。

关键词：平足；腓肠三头肌；牵伸；纤维羽状角。

引用本文

Gorobets LV, Kenis VM. 长期牵伸腓肠三头肌计划对儿童高可动性平足及跟腱缩短患者腓肠三头肌纤维羽状角的影响. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2024;12(4):453–462. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

收到: 29.11.2024

接受: 12.12.2024

发布日期: 16.12.2024

背景

伴有跟腱缩短的过度活动性平足症 (Hypermobile Flatfoot with Achilles Tendon Shortening, HFATS) 是儿童骨科领域中一个重要但尚未充分研究的问题。该病理特征表现为足纵弓高度降低以及足背屈受限, 这些特征可以通过临床测试确定。作为平足症的一种特殊形式, 该疾病首次由Harris和Beath于20世纪40年代提出[1]。自此, 对其发病机制、诊断及治疗的研究兴趣持续增长。长期存在的这种改变可能会加剧疼痛综合征, 并引起足部关节的继发性病变, 例如进展性骨关节炎。

小腿三头肌和/或跟腱的挛缩在儿童和平足症患者的发病机制中起重要作用。然而, 目前这一现象的起因和进程仍不明确。跟腱缩短被认为是加重平足症病理变化的危险因素, 其评估是诊断这一病理状态的重要指标。许多研究者认为, 在平足症的手术治疗中, 针对小腿三头肌和/或跟腱的干预是不可或缺的一部分。这些干预措施既包括对腱部分的手术 (如各种方法延长跟腱), 也包括对腓肠肌的操作 (如腱膜切开术、腱膜松解术)。然而, 儿童平足症的手术治疗并非首选方案, 因为与变形程度相比, 其临床表现通常较轻。在大多数关于平足症保守治疗的实践指南中, 提到针对小腿三头肌和跟腱的拉伸训练作为基本的治疗措施。然而, 文献中缺乏系统性研究, 特别是分析长期拉伸计划效果的研究。

除了直接影响足的形状和纵弓高度外, 推测拉伸训练还可能影响所伸展肌肉的形态学参数。明确这些参数有助于揭示在拉伸训练过程中肌腱-肌肉复合体的功能和解剖重构机制。

小腿三头肌属于羽状肌, 其肌纤维并非沿收缩轴排列, 而是以一定角度附着于腱膜部分。这种肌肉的解剖学组织方式根据肌肉收缩生理学理论, 能够更有效地利用收缩力量[2]。肌纤维相对于腱膜的倾斜角可被测量, 这一测量值被称为羽状角或渗透角 (Pennation Angle, PA) [3]。羽状角可以通过肌肉标本的解剖研究[4]、肌肉的磁共振成像 (MRI) [5]测定, 但最常用的是超声检查[6]。近年来, 发表了大量关于评估小腿三头肌羽状角及其各头部在不同生理和病理状

态下变化的研究[7, 8]。大量研究集中在运动医学和生理学领域[9, 10], 描述了羽状角对各种身体训练 (如力量训练、拉伸、不同负荷模式等) 的响应。然而, 不同研究者注意到羽状角对不同训练模式的响应方向并不一致。这可能是因为研究对象的年龄、基础功能状态 (如运动员或志愿者) 不同。此外, 不同研究使用了不同的小腿三头肌训练方案。

在儿童平足症的非手术治疗中, 通常优先采用体育锻炼。在这些方法中, 针对改善平衡的运动显示出积极效果[11]。拉伸训练被认为对平足症具有潜在的积极影响, 但令人惊讶的是, 其效果尚未通过系统性研究加以验证。在其权威专著中, Vincent Mosca [12] 提及了拉伸训练作为保守治疗的主要措施, 并提出了简单的器械使用方法, 但未提供有关该方法效果的系统数据。

我们提出假设, 即针对伴有跟腱缩短的过度活动性平足症儿童的长期拉伸计划, 有助于肌肉适应新的功能条件。这种适应表现为小腿三头肌各头部羽状角的变化。

本研究是针对伴有HFATS儿童进行拉伸训练效果评估的更广泛研究的一部分。识别肌肉组织在这一病理状态下的形态和功能重构标志物, 将有助于开发额外的效果评估标准, 并提出关于拉伸训练对平足症儿童适应性过程的假设。

研究目的。评估长期小腿三头肌拉伸训练对伴有跟腱缩短的儿童平足症患者三头肌羽状角 (PA) 变化的影响。

材料与方法

本研究共纳入82名伴有过度活动性平足症与跟腱缩短 (HFATS) 的儿童。诊断依据包括临床检查和足部姿态指数 (Foot Posture Index, FPI-6), 该指标由俄罗斯平足症诊断和治疗共识推荐用于儿童平足症的评估[13]。诊断标准包括以下条件: FPI-6评分 ≥ 8 分; 背屈角度 $< 10^\circ$ (通过 Silver test 测定, 在后足保持中立位、跖骨头排列与肢体轴线垂直的条件下完成)。样本特征: 性别分布: 57%为女孩, 43%为男孩; 年龄分布: 7至17岁, 平均年龄 11.4 ± 2.6 岁。排除标准: 患有其他神经或骨科疾病的患者。

为了测量羽状角 (PA), 使用高级超声设备 Mindray Resona I9 (迈瑞生物医疗电子, 中国) 并配备线性探头 (L14-3Ws) 进行超声诊断。检查时, 受试者取俯卧位, 以确保腓肠肌和比目鱼肌完全放松, 足部自然垂悬于床沿。分别测量腓肠肌内侧头、外侧头以及比目鱼肌的羽状角。将超声探头平行于小腿轴线放置。对于三头小腿肌的每个头部, 首先进行纵向扫描, 然后将探头置于肌肉的中部。羽状角的测量在同一切面上进行, 记录三组不连续肌纤维的角度, 并计算这三次测量的平均值作为最终结果。

作为主要锻炼, 建议进行小腿三头肌的拉伸 (伸展运动)。拉伸方案如下: 详细指导家长和孩子进行以下操作: 初始姿势——患者双脚站在一个长方形木块上 (尺寸: 长30-40厘米, 宽20-30厘米, 高15-30毫米), 脚的前部和中部置于木块上, 脚跟自由下垂。保持背部挺直, 双手扶在支撑物上。为了增加稳定性, 建议患者面对墙壁或桌子站立, 这样在失去平衡时可以借助支撑物。指导孩子缓慢下压脚跟, 直到脚跟接触到支撑面, 从而拉伸小腿三头肌, 直至出现轻微的不适感或疼痛感。此姿势需保持10-15秒, 然后可缓慢返回初始姿势。每次锻炼重复15-20次, 总时长约为15分钟。建议家长和孩子严格按照此方法进行锻炼, 特别强调锻炼的规律性和持续时间。

所有在初次就诊时被诊断为高可动性扁平足伴跟腱缩短 (HFATS) 的患者均被建议参与长期拉伸训练项目。在6个月后, 这些患者被邀请进行复查。本研究纳入了在初次就诊后6个月至9个月之间复查的儿童。在复查时, 所有患者都被询问了有关拉伸训练的规律性和持续时间的问题。

将患者纳入主要组的标准包括以下依从性指标: 每周进行拉伸训练的天数平均不少于4天, 由于各种原因 (假期、考试等) 中断的次数每月不超过1周, 单次拉伸训练的持续时间不少于10分钟。将患者纳入对照组的标准为未遵守拉伸训练建议, 或 (至少满足以下任意一项) 拉伸训练总持续时间不超过1-2个月, 单次训练时间少于5分钟, 或者每周拉伸训练少于3天。实际上, 对照组的大多数儿童未按照建议进行拉伸训练;

而进行拉伸训练的儿童表现出较高的依从性, 而不遵守建议的儿童则表现出相反的趋势——大多数儿童完全未进行拉伸训练, 仅极少数存在部分执行的情况。

调查父母获得的信息与直接从儿童处获取的信息进行了对比。在信息不一致的情况下, 对于7~11岁的儿童, 以父母提供的信息为准; 而对于12~17岁的儿童, 则以儿童提供的信息为准。

数据收集和数据库的建立使用了 MS Excel 2019 程序。数据的统计分析则在 SPSS v. 26.0 (IBM, 美国) 软件中进行。

数据分布检验: 样本量 < 50 使用 Shapiro-Wilk 检验; 样本量 ≥ 50 使用 Kolmogorov-Smirnov 检验。

描述性统计采用均值和标准差 ($M \pm SD$)、中位数和四分位数 (25%和75%) [$Me (Q_1; Q_3)$]、最小值和最大值。独立样本的配对比较分析中, 若样本符合正态分布, 则使用参数检验的 t -Student-Welch 检验; 若样本不符合正态分布, 则使用非参数检验的 U -Mann-Whitney 检验。依赖样本的配对比较分析 (前后对比) 中, 若样本符合正态分布, 则使用参数检验的 t -Student 检验; 若样本不符合正态分布, 则使用非参数检验的 Wilcoxon 检验。

显著性水平: 设为 $p < 0.05$ 。若 $p > 0.05$, 则认为结果无统计学意义。

结果

根据依从性评估标准, 实验组共纳入63名儿童 (平均年龄11.7岁), 对照组19名儿童 (平均年龄11.6岁)。实验组中54%为男孩, 46%为女孩; 对照组中64.7%为男孩, 35.3%为女孩。根据这些数据可以推断, 儿童的年龄和性别对拉伸训练的依从性没有显著影响。两组儿童的初始FPI-6评分无显著差异, 这为后续的组间比较提供了坚实基础。在分析拉伸训练项目的效果时, 实验组的FPI-6评分显著改善, 而对照组的评分无显著变化。

背屈角度和FPI-6评分的评估结果详见表1。

根据表1的数据, 实验组儿童初始足背屈角度为 $4.84 \pm 0.10^\circ$, 对照组为 $4.81 \pm 0.1^\circ$, 两组

表 1. 主组和对照组在6个月内足部形态与位置指数 (FPI-6) 及背屈角的变化

指标		实验组		对照组		p
		训练前	训练后	训练前	训练后	
FPI-6	M ± SD	9.2 ± 0.8	7.8 ± 0.6	8.8 ± 0.6	8.8 ± 0.5	$p_1 = 0.104$ $p_2 < 0.001^{##}$
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	9 [9; 10]	8 [8; 8]	9 [8.5; 9]	9 [9; 9]	
	Min–Max	8–11	6–9	8–10	8–10	
p (主组和对照组训练前后的差异)		<0.001**		0.954		
背屈角度	M ± SD	4.8 ± 0.8	11.3 ± 1.9	4.8 ± 0.7	4.8 ± 0.7	$p_1 = 0.773$ $p_2 < 0.001^{##}$
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	4.9 [3.9; 5.4]	11.6 [9.2; 12.6]	4.9 [4; 5.4]	5 [4; 5.3]	
	Min–Max	3.7–6.2	8.6–14.4	3.7–6.1	3.8–6.2	
p (主组和对照组训练前后的差异)		<0.001**		0.850		

注释: ** $p < 0.05$ 表示根据 Wilcoxon 检验分析依赖样本的统计学显著差异; # $p < 0.05$ 表示根据 Mann–Whitney U 检验分析独立样本的统计学显著差异; p_1 — 主组和对照组在训练前的差异; p_2 — 主组和对照组在训练后的差异。

表 2. 6个月后实验组和对照组右下肢的羽状角变化

肌肉	指标	羽状角				p
		实验组		对照组		
		训练前	训练后	训练前	训练后	
比目鱼肌	M ± SD	15.9 ± 4.2	18.6 ± 4.9	15.3 ± 3.4	14.3 ± 3.2	p ₁ = 0.543 p ₂ < 0.001 [#]
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	15.3 [12.2; 18.4]	17.9 [14.3; 31.5]	15 [13; 17]	15 [12; 16]	
	Min–Max	8–25.5	9.4–29.8	8–22	8–21	
p（主组和对照组训练前后的差异）		0.002*		0.385		
腓肠肌外侧头	M ± SD	14.7 ± 3.6	14.5 ± 3.5	14.4 ± 4.3	13.2 ± 4.1	p ₁ = 0.283 p ₂ = 0.068
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	14.3 [12.1; 16.3]	14.3 [11.6; 16.3]	14 [11.5; 15]	12 [10; 14]	
	Min–Max	8–23.5	8–22	9–23	8–22	
p（主组和对照组训练前后的差异）		0.717		0.231		
腓肠肌内侧头	M ± SD	22.5 ± 4.6	26.3 ± 5.4	23.7 ± 4.1	21.9 ± 3.6	p ₁ = 0.471 p ₂ = 0.002 ^{##}
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	23.4 [18.2; 25.2]	27.2 [21.3; 29.6]	24 [22.5; 26]	22 [21; 24]	
	Min–Max	13–31.6	15.3–36.7	13–31	12–27	
p（主组和对照组训练前后的差异）		<0.001**		0.071		

注释: * $p < 0.05$ 表示根据 t-Student 检验分析依赖样本的统计学显著差异; ** $p < 0.05$ 表示根据 Wilcoxon 检验分析依赖样本的统计学显著差异; # $p < 0.05$ 表示根据 Welch t-Student 检验分析独立样本的统计学显著差异; ## $p < 0.05$ 表示根据 Mann–Whitney U 检验分析独立样本的统计学显著差异; p_1 — 主组和对照组在训练前的差异; p_2 — 主组和对照组在训练后的差异。

之间的差异无统计学意义 ($p_1 = 0.773$)。在实施拉伸训练计划6个月或更长长时间后,实验组的足背屈角度显著改善至 $11.34 \pm 0.24^\circ$,而对照组几乎没有变化,维持在 $4.85 \pm 0.19^\circ$ ($p_2 < 0.01$)。对照组在训练前后足背屈角度没有显著变化 ($p = 0.850$),而实验组的变化具有显著统计学意义 ($p < 0.01$)。

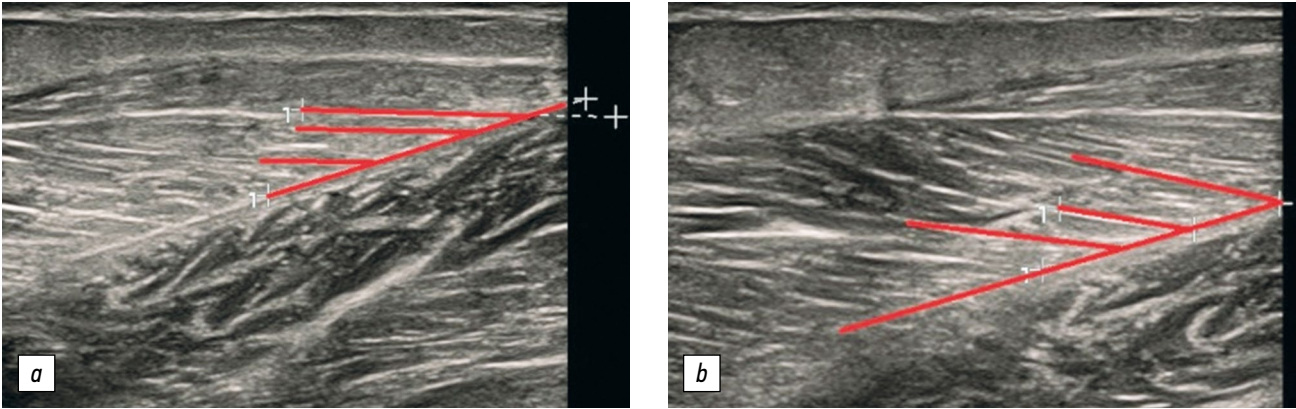
在表 2 和表 3 中分别展示了主组和对照组在经过6个月训练后右下肢的羽状角 (PA) 测量结果。

如表 2 和表 3 所示,腓肠肌内侧头和比目鱼肌的羽状角显著增加,而腓肠肌外侧头的该指标未发生统计学显著变化。图中展示了患有高活动性扁平足并伴有跟腱缩短的患者在开始拉

表 3. 6个月后实验组和对照组左下肢的羽状角变化

肌肉		羽状角				p
		实验组		对照组		
		训练前	训练后	训练前	训练后	
比目鱼肌	M ± SD	13.6 ± 4.3	15.7 ± 4.7	13.4 ± 3.3	12.1 ± 2.7	p ₁ = 0.873 p ₂ = 0.008 ^{##}
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	12.2 [10.2; 16.1]	14.2 [11.8; 18.7]	14 [10.5; 16]	12 [10; 15]	
	Min–Max	7–26	8.1–29.6	8–20	8–16	
p（主组和对照组训练前后的差异）		0.015**		0.208		
腓肠肌外侧头	M ± SD	15.1 ± 3.7	15 ± 3.6	14.2 ± 3.8	13.1 ± 3.5	p ₁ = 0.331 p ₂ = 0.55
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	15.3 [12.3; 18]	15.3 [12.2; 18]	15 [11.5; 16]	14 [11; 15]	
	Min–Max	8–22.9	8–22.4	8–22	8–20	
p（主组和对照组训练前后的差异）		0.842		0.379		
腓肠肌内侧头	M ± SD	21 ± 4.1	24.3 ± 4.9	21.5 ± 4.8	19.5 ± 4.5	p ₁ = 0.686 p ₂ < 0.001 [#]
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	21.4 [18.4; 23.2]	24.8 [21.2; 26.9]	22 [19; 24]	20 [16; 22]	
	Min–Max	12–30.6	13.9–35.8	12–30	11–27	
p（主组和对照组训练前后的差异）		<0.001*		0.23		

注释: * $p < 0.05$ 表示根据 *t*-Student 检验分析依赖样本的统计学显著差异; ** $p < 0.05$ 表示根据 Wilcoxon 检验分析依赖样本的统计学显著差异; $^{\#}p < 0.05$ 表示根据 Welch *t*-Student 检验分析独立样本的统计学显著差异; $^{##}p < 0.05$ 表示根据 Mann–Whitney U 检验分析独立样本的统计学显著差异; p_1 — 主组和对照组在训练前的差异; p_2 — 主组和对照组在训练后的差异。



图示。高动态扁平足伴跟腱缩短患者腓肠肌内侧头超声图——羽状角增加情况: a – 拉伸训练计划开始前; b – 持续6个月规律训练后的效果

伸训练前及连续6个月训练后的腓肠肌内侧头超声图像。

讨论

三头小腿肌的收缩在扁平足中的具体原因尚不明确,这仍是进一步研究的重点领域。要揭示收缩的潜在原因,需要深入探讨三头小腿肌的解剖和生理变化,这将有助于理解其发生机制。超声检查是研究肌肉最常用的方法之一,可实时评估肌肉组织的多个解剖参数。虽然明显的肌肉

病变(如撕裂、纤维化、萎缩)有相对明确的诊断标准,但在无骨骼、神经或肌肉系统疾病的原发性扁平足儿童中,此类病变极为少见,因此难以被认为是足弓降低的普遍原因。可以推测,三头小腿肌的相关变化具有累积性,并从轻微的偏离正常指标开始逐渐发展。因此,检测扁平足儿童肌肉的早期变化可能有助于揭示此类收缩的基本机制。在描述三头小腿肌状态的量化参数中,羽状角(PA)是研究和讨论的焦点之一。本研究表明,长期三头小腿肌拉伸计划能显著提高患有

HFATS儿童的足背屈角度。超声研究显示,腓肠肌内侧头和比目鱼肌发生适应性形态学变化,表现为羽状角的增大。而在对照组中,未观察到羽状角的显著变化。这表明,拉伸训练不仅对肌肉羽状角参数产生了影响,同时可能进一步改善其功能。

由于三头小腿肌的挛缩被认为是扁平足病理生理机制中的关键环节之一,因此,除了确认足部形态变化外,研究三头小腿肌的适应性机制显得尤为重要。基于此,我们进行了研究,旨在探讨长期拉伸训练对三头小腿肌形态的影响,特别是其头部羽状角(PA)的变化。以往研究表明,无论是急性还是慢性拉伸训练,都可能对三头小腿肌的羽状角大小产生影响,但不同研究者对此的描述存在相互矛盾的结果。我们的研究呈现的这些变化与足部形态变化之间的对比分析将成为后续研究的重点。

尽管扁平足的发病机制并不仅限于三头小腿肌收缩及其后果,但在临床实践中,仍有许多扁平足儿童未发生显著的肌肉收缩。此外,不能排除三头小腿肌收缩是一种适应性机制,旨在应对足弓降低及后足外翻。这些假设尚未被证实,但作为进一步研究的理论基础仍具重要意义。未来的研究(包括定量评估肌肉形态的方法)将有助于更深入地理解这一复杂领域。

本研究表明,对于患有 HFATS的儿童,长期三头小腿肌拉伸计划具有显著的治疗效果。坚持执行该计划可显著增加足背屈角度,从 5° 增加至 11° 。超声研究显示,这些功能改善伴随着肌肉形态的同步变化,表现为三头小腿肌头部羽状角的增加,这客观反映了肌肉对新功能条件的适应性。

关于羽状角与三头小腿肌收缩的关系,目前的研究仅限于个别针对脑瘫儿童的研究。例如,T.A. Wren及其同事[14]报告指出,具有固定或动态马蹄足的儿童羽状角差异不大,但接受手术治疗的儿童羽状角显著高于未治疗者。这一研究为进一步探讨羽状角与扁平足病理关系提供了有价值的线索。

关于羽状角(PA)的生理意义,文献中已有广泛讨论。然而,迄今为止,关于该指标对肌肉收缩能力及其他功能参数的直接影响,尚无统一

观点。大多数研究者认为,PA的增加与收缩能力的提高和有效收缩力的增强相关,但部分研究者基于实验数据提出相反观点。这些分歧可能与PA与肌肉组织长度-力曲线的机制相关。根据该机制,肌肉的收缩力在一定拉伸范围内会增加,但超过该范围后会下降[15]。

因此,尽管PA可能并不是普遍适用的肌肉收缩能力指标,但其变化可以反映肌肉对特定机械条件的适应性。在现有文献中,尚未发现针对儿童扁平足的PA变化研究。例如,M. Nakamura等人在研究健康成年志愿者时,采用了标准拉伸协议(每组拉伸3次,每次60秒,间隔30秒,每周3次,持续4周),但未观察到PA的显著变化[16]。相反,T. Mizuno的研究显示,健康成年志愿者在静态拉伸或静态拉伸结合电刺激的8周训练后,PA有所增加,但变化幅度接近统计学显著性边界[17]。此外,I. Panidi等人研究了13岁左右从事体育运动的青少年,发现腓肠肌外侧头的PA减少,但内侧头未发生变化[18]。S.R. Freitas和P. Mil-Homens在八周高强度拉伸训练后,观察到股二头肌PA的下降[19]。

R.W.-I. Miskowiec研究了健康成年志愿者拉伸的短期效果,发现PA有所增加[2]。L.G. Dennis研究了静态拉伸的直接效果,并观察到腓肠肌内侧头和外侧头PA的增加[20]。

本研究分别测量了左右足的PA,结果表明:腓肠肌内侧头和比目鱼肌的PA显著增加;腓肠肌外侧头的PA未发生显著变化。左右下肢PA的差异符合以往研究结论,即可能与主导腿的存在有关[21]。尽管判断主导下肢的方法在儿童中的准确性较低,本研究强调了下肢PA的非对称性,这与扁平足的常见不对称性相吻合,需在后续研究中进一步探索。

本研究还显示,患者对拉伸治疗的依从性较低。分析发现,患儿的年龄和性别对拉伸练习的规律性无显著影响。未来研究应探索其他可能影响依从性的因素,例如家长的教育水平、家庭经济状况和社会背景。在依从性较高的实验组中,超过一半的儿童定期从事体育运动,而对照组中几乎所有儿童均未参加运动。这一现象值得进一步研究,以便更好地理解体育运动与保守治疗的相互关系。

针对HFATS儿童的门诊或预防检查中,通常推荐进行跟腱拉伸练习。然而,在实践中,该方法的效果有限,许多患者未见显著改善,这可能成为手术治疗的指征之一。本研究表明,系统执行长期拉伸计划的患者在足背屈角度、功能适应性及三头小腿肌的形态适应(PA变化)方面均有所改善。因此,建议医生向家长 and 患者详细解释拉伸练习的重要性,并强调练习的规律性和持续时间的充分性,以提高HFATS儿童治疗的整体效果。

结论

本研究表明,针对HFATS儿童的长期腓肠肌三头肌拉伸计划显著提高了足背屈角度。这些变化伴随着肌肉的形态和功能重塑,具体表现为腓肠肌内外侧头及比目鱼肌的羽状角(PA)增加。PA作为拉伸效果监测的指标具有应用潜力,因为在对照组中未发现类似的变化。后续研究将进一步揭示肌肉解剖和功能重塑的具体机制及其对扁平足解剖参数的影响。

REFERENCES

- Harris RI, Beath T. Hypermobility flat-foot with short tendo achillis. *J Bone Joint Surg Am.* 1948;30A(1):116–140.
- Miskowiec RWI. The acute effects of stretching on pennation angle and force production [dissertation abstract]. 2012. 30 p. doi: 10.31390/gradschool_theses.2322
- Masenko VL, Kokov AN, Grigorieva II, et al. Radiology methods of the sarcopenia diagnosis. *Research and Practical Medicine Journal.* 2019;6(4):127–137. EDN: VIXNRI doi: 10.17709/2409-2231-2019-6-4-13
- Wu IT, Hyman SA, Norman MB, et al. Muscle architecture properties of the deep region of the supraspinatus: a cadaveric study. *Orthop J Sports Med.* 2024;12(10):23259671241275522. doi: 10.1177/23259671241275522
- Zhang Y, Herbert RD, Bilston LE, et al. Three-dimensional architecture of the human subscapularis muscle *in vivo*. *J Biomech.* 2023;161:111854. doi: 10.1016/j.jbiomech.2023.111854
- Jiang W, Chen C, Xu Y. Muscle structure predictors of vertical jump performance in elite male volleyball players: a cross-sectional study based on ultrasonography. *Front Physiol.* 2024;15:1427748. doi: 10.3389/fphys.2024.1427748
- Wang R, Fu S, Huang R, et al. The diagnostic value of musculoskeletal ultrasound in the quantitative evaluation of skeletal muscle in chronic thyrotoxic myopathy: a single-center study in China. *Int J Gen Med.* 2024;17:3541–3554. doi: 10.2147/IJGM.S472442
- Fu H, Wang L, Zhang W, et al. Diagnostic test accuracy of ultrasound for sarcopenia diagnosis: A systematic review and meta-analysis. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2023;14(1):57–70. doi: 10.1002/jcsm.13149
- Moeskops S, Oliver JL, Radnor JM, et al. Effects of neuromuscular training on muscle architecture, isometric force production, and stretch-shortening cycle function in trained young female gymnasts. *J Strength Cond Res.* 2024;38(9):1640–1650. doi: 10.1519/JSC.0000000000004856
- Radnor JM, Oliver JL, Waugh CM, et al. Muscle architecture and maturation influence sprint and jump ability in young boys: a multistudy approach. *J Strength Cond Res.* 2022;36(10):2741–2751. doi: 10.1519/JSC.0000000000003941
- Dimitrieva AY, Kenis VM. Medium-term results of body balance trainings in primary school-aged children with generalized joint hypermobility and symptomatic mobile flat foot: cohort study. *Pediatric Pharmacology.* 2021;18(5):347–358. EDN: YVHYML doi: 10.15690/pf.v18i5.2326
- Mosca VS. *Principles and management of pediatric foot and ankle deformities and malformations.* Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2014.
- Dimitrieva AY, Kenis VM, Klychkova IYu. Results of the first russian delphi survey on the diagnosis and treatment of flatfoot in children. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery.* 2023;11(1):49–66. EDN: CAHOCE doi: 10.17816/PTORS112465
- Wren TA, Cheatwood AP, Rethlefsen SA, et al. Achilles tendon length and medial gastrocnemius architecture in children with cerebral palsy and equinus gait. *J Pediatr Orthop.* 2010;30(5):479–484. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181e00c80

附加信息

研究资助来源。本研究是在课题《基于运动水平、临床影像、生物力学参数及骨骼和肌肉组织生物标志物的综合评估,监测运动及非运动儿童的骨骼系统状况》(注册号 1023030700030-9-3.2.10)框架下完成的。

利益冲突声明。作者声明,本文发表不存在明确或潜在的利益冲突。

伦理委员会批准。本研究涉及儿童的研究方案已获俄罗斯卫生部 FGBOU “Turner 国家儿童创伤与骨科研究中心”伦理委员会批准(会议记录编号24-4-2,日期2024年11月19日)。

知情同意。受访者确认同意处理和发布 去识别化数据。

作者贡献声明。所有作者对研究的开展和文章的撰写做出了重要贡献,并阅读和认可了最终版本。

主要贡献分配如下: L.V. Gorobets – 材料的收集、分析和处理,文章文本的撰写; V.M. Kenis – 研究概念的开发,文献的搜索和分析,文章文本的撰写。

15. Moo EK, Leonard TR, Herzog W. The sarcomere force-length relationship in an intact muscle-tendon unit. *J Exp Biol.* 2020;223(Pt 6):jeb215020. doi: 10.1242/jeb.215020
16. Nakamura M, Yoshida R, Sato S, et al. Comparison between high- and low-intensity static stretching training program on active and passive properties of plantar flexors. *Front Physiol.* 2021;12:796497. doi: 10.3389/fphys.2021.796497
17. Mizuno T. Combined effects of static stretching and electrical stimulation on joint range of motion and muscle strength. *J Strength Cond Res.* 2019;33(10):2694–2703. doi: 10.1519/JSC.0000000000002260
18. Panidi I, Bogdanis GC, Terzis G, et al. Muscle architectural and functional adaptations following 12-weeks of stretch-

- ing in adolescent female athletes. *Front Physiol.* 2021;12:701338. doi: 10.3389/fphys.2021.701338
19. Freitas SR, Mil-Homens P. Effect of 8-week high-intensity stretching training on biceps femoris architecture. *J Strength Cond Res.* 2015;29(6):1737–1740. doi: 10.1519/JSC.0000000000000800
20. Dennis, Lacey G, The effects of static stretching on pennation angle and muscle power production in the triceps surae complex. *Honors College Theses.* 2017.
21. Manal K, Roberts DP, Buchanan TS. Optimal pennation angle of the primary ankle plantar and dorsiflexors: variations with sex, contraction intensity, and limb. *J Appl Biomech.* 2006;22(4):255–263. doi: 10.1123/jab.22.4.255

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harris R.I., Beath T. Hypermobility flat-foot with short tendo achillis // *J Bone Joint Surg Am.* 1948. Vol. 30A, N 1. P. 116–140.
2. Miskowicz R.W.I. The acute effects of stretching on pennation angle and force production [dissertation abstract]. 2012. 30 p. doi: 10.31390/gradschool_theses.2322
3. Масенко В.Л., Коков А.Н., Григорьева И.И., и др. Лучевые методы диагностики саркопении // *Исследования и практика в медицине.* 2019. Т. 6, № 4. С. 127–137. EDN: VIXNRI doi: 10.17709/2409-2231-2019-6-4-13
4. Wu I.T., Hyman S.A., Norman M.B., et al. Muscle architecture properties of the deep region of the supraspinatus: a cadaveric study // *Orthop J Sports Med.* 2024. Vol. 12, N 10. ID: 23259671241275522. doi: 10.1177/23259671241275522
5. Zhang Y., Herbert R.D., Bilston L.E., et al. Three-dimensional architecture of the human subscapularis muscle in vivo // *J Biomech.* 2023. Vol. 161. ID: 111854. doi: 10.1016/j.jbiomech.2023.111854
6. Jiang W., Chen C., Xu Y. Muscle structure predictors of vertical jump performance in elite male volleyball players: a cross-sectional study based on ultrasonography // *Front Physiol.* 2024. Vol. 15. ID: 1427748. doi: 10.3389/fphys.2024.1427748
7. Wang R., Fu S., Huang R., et al. The diagnostic value of musculoskeletal ultrasound in the quantitative evaluation of skeletal muscle in chronic thyrotoxic myopathy: a single-center study in China // *Int J Gen Med.* 2024. Vol. 17. P. 3541–3554. doi: 10.2147/IJGM.S472442
8. Fu H., Wang L., Zhang W., et al. Diagnostic test accuracy of ultrasound for sarcopenia diagnosis: a systematic review and meta-analysis // *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2023. Vol. 14, N 1. P. 57–70. doi: 10.1002/jcsm.13149
9. Moeskops S., Oliver J.L., Radnor J.M., et al. Effects of neuromuscular training on muscle architecture, isometric force production, and stretch-shortening cycle function in trained young female gymnasts // *J Strength Cond Res.* 2024. Vol. 38, N 9. P. 1640–1650. doi: 10.1519/JSC.0000000000004856
10. Radnor J.M., Oliver J.L., Waugh C.M., et al. Muscle architecture and maturation influence sprint and jump ability in young boys: a multistudy approach // *J Strength Cond Res.* 2022. Vol. 36, N 10. P. 2741–2751. doi: 10.1519/JSC.0000000000003941
11. Димитриева А.Ю., Кенис В.М. Среднесрочные результаты тренировок баланса тела у детей младшего школьного возраста с генерализованной гипермобильностью суставов и симпто-

- матическим мобильным плоскостопием: когортное исследование // *Педиатрическая фармакология.* 2021. Т. 18, N 5. P. 346–358. EDN: YVHYML doi: 10.15690/pf.v18i5.2326
12. Mosca V.S. Principles and management of pediatric foot and ankle deformities and malformations. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2014.
13. Димитриева А.Ю., Кенис В.М., Клычкова И.Ю., и др. Результаты первого российского Дельфийского консенсуса по диагностике и лечению плоскостопия у детей // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста.* 2023. Т. 11, № 1. С. 49–66. EDN: CAHOCE doi: 10.17816/PTORS112465
14. Wren T.A., Cheatwood A.P., Rethlefsen S.A., et al. Achilles tendon length and medial gastrocnemius architecture in children with cerebral palsy and equinus gait // *J Pediatr Orthop.* 2010. Vol. 30, N 5. P. 479–484. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181e00c80
15. Moo E.K., Leonard T.R., Herzog W. The sarcomere force-length relationship in an intact muscle-tendon unit // *J Exp Biol.* 2020. Vol. 223, Pt 6. ID: jeb215020. doi: 10.1242/jeb.215020
16. Nakamura M., Yoshida R., Sato S., et al. Comparison between high- and low-intensity static stretching training program on active and passive properties of plantar flexors // *Front Physiol.* 2021. Vol. 12. ID: 796497. doi: 10.3389/fphys.2021.796497
17. Mizuno T. Combined effects of static stretching and electrical stimulation on joint range of motion and muscle strength // *J Strength Cond Res.* 2019. Vol. 33, N 10. P. 2694–2703. doi: 10.1519/JSC.0000000000002260
18. Panidi I., Bogdanis G.C., Terzis G., et al. Muscle architectural and functional adaptations following 12-weeks of stretching in adolescent female athletes // *Front Physiol.* 2021. Vol. 12. ID: 701338. doi: 10.3389/fphys.2021.701338
19. Freitas S.R., Mil-Homens P. Effect of 8-week high-intensity stretching training on biceps femoris architecture // *J Strength Cond Res.* 2015. Vol. 29, N 6. P. 1737–1740. doi: 10.1519/JSC.0000000000000800
20. Lacey G.D. The effects of static stretching on pennation angle and muscle power production in the triceps surae complex // *Honors College Theses.* 2017.
21. Manal K., Roberts D.P., Buchanan T.S. Optimal pennation angle of the primary ankle plantar and dorsiflexors: variations with sex, contraction intensity, and limb // *J Appl Biomech.* 2006. Vol. 22, N 4. P. 255–263. doi: 10.1123/jab.22.4.255

AUTHOR INFORMATION

Leonid V. Gorobets, MD, PhD student;
ORCID: 0000-0001-9424-3713;
e-mail: gorobetsleonid@gmail.com

*** Vladimir M. Kenis**, MD, PhD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
address: 64-68 Parkovaya str., Pushkin,
Saint Petersburg, 196603, Russia;
ORCID: 0000-0002-7651-8485;
eLibrary SPIN: 5597-8832;
e-mail: kenis@mail.ru

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

ОБ АВТОРАХ

Леонид Владимирович Горобец, аспирант;
ORCID: 0000-0001-9424-3713;
e-mail: gorobetsleonid@gmail.com

*** Владимир Маркович Кенис**, д-р мед. наук, профессор;
адрес: Россия, 196603, Санкт-Петербург,
Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68;
ORCID: 0000-0002-7651-8485;
eLibrary SPIN: 5597-8832;
e-mail: kenis@mail.ru