

足踝复合体本体感觉的测量与评价

冯 亮¹, 张雅飞², 霍洪峰^{1, 3}<https://doi.org/10.12307/2024.356>

投稿日期: 2023-05-08

采用日期: 2023-06-07

修回日期: 2023-07-03

在线日期: 2023-07-26

中图分类号:

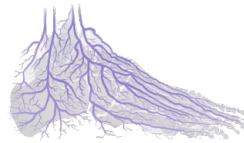
R452; R318; R604

文章编号:

2095-4344(2024)20-03259-06

文献标识码: A

文章快速阅读: 足踝复合体感觉评价

足部感觉评价
(触觉、振动
以及两点辨识)踝关节本体感
觉评价(位置
觉、力量觉、
运动觉)

评价结果:

(1) 足踝复合体是唯一与支撑面直接接触的部位, 在收集体感反馈和调节平衡控制中起重要作用;

(2) 梳理足踝复合体感觉的测量与评价方法, 以期日后的相关研究做出铺垫并提供理论依据。

文题释义:

足踝复合体: 是唯一与支撑面直接接触的部位, 包括足部与踝关节的各部分组织结构, 其在收集体感反馈和调节平衡控制中起重要作用。

足部和踝关节的感觉障碍会导致躯体的平衡和活动问题。

本体感觉: 是通过神经肌肉系统检测和处理刺激, 整合人体所处的环境和位置信息, 并启动反应性输出(运动感觉)的一种能力。不同程度的本体感受信息由皮肤、关节和肌肉机械感受器提供, 并传递到中枢神经系统。足部和踝关节是人体关节机械感受器最为集中的部位, 也是人体获取环境与身体状态信息的第一运动环节。

摘要

背景: 足踝本体感觉的研究对于慢性踝关节不稳、老年疾病的康复治疗以及身体姿势控制、运动表现的提高至关重要。前期的相关研究经常把足部和踝关节的感觉评价分开研究, 对全面且综合地了解其感觉功能存在一定的局限。

目的: 足踝复合体是唯一与支撑面直接接触的部位, 在收集体感反馈和调节平衡控制中起重要作用。文章通过汇总现有关于足部和踝关节本体感觉的调查研究, 梳理足踝复合体感觉的测量与评价方法, 以期日后的相关研究做出铺垫并提供理论依据。

方法: 中文检索词为“(足 OR 足踝关节 OR 踝关节) AND (感觉 OR 本体感觉)”、英文检索词为“(foot OR ankle) AND (feel OR proprioception)”, 在Web of Science、PubMed和中国知网数据库检索相关文献, 了解关于足踝基本概念、研究现状与范畴, 总结并评价足踝的本体感觉评价方法, 最终纳入57篇文献进行综述分析。

结果与结论: ①足踝复合体感觉的评价主要分为对足部的感觉评价和踝关节的本体感觉评价。②足部的感觉评价主要描述其皮肤的感觉以及干预条件下的感觉反馈, 方法主要包括: 压力感觉阈值测试、足(底侧和跖侧)两点辨别能力测试、皮肤振动感觉持续时间测试。③踝关节本体感觉评价着重描述关节位置、运动范围、力值及功能表现, 方法主要分为静态的关节角度重置测试、运动最小阈值测试、力觉重现测试以及动静态的平衡、速度及行走能力的测试。④对量化结果的报道一般以“误差”来表示, 根据报道的需要一般分为: 绝对误差、相对误差和恒定误差等。⑤结果证实, 足踝复合体具备特殊的感知能力, 包括足部感觉和踝关节的本体感觉, 影响人类的生活质量以及运动表现; 足部感觉与踝关节本体感觉的弱化均与人体平衡能力下降相关, 二者联合测量可以全面有效地评价足踝功能; 根据不同的研究需求, 需要选择足部与踝关节的感觉测量方法的组合形式, 并充分考虑环境、情绪以及报道方式等多种影响因素, 提高测量与评价的有效性。

关键词: 足踝复合体; 本体感觉; 测量方法; 等速测试仪; 感觉阈值; 两点辨别能力; 皮肤振动感觉; 运动觉; 位置觉; 力量觉

Measurement and evaluation of proprioception of foot and ankle complexes

Feng Liang¹, Zhang Yafei², Huo Hongfeng^{1, 3}

¹School of Physical Education, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, Hebei Province, China; ²Clinical School of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050017, Hebei Province, China; ³Hebei Province Key Laboratory of Human Sports Biological Information Evaluation, Shijiazhuang 050024, Hebei Province, China

Corresponding author: Huo Hongfeng, Master, Senior experimentalist, School of Physical Education, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, Hebei Province, China; Hebei Province Key Laboratory of Human Sports Biological Information Evaluation, Shijiazhuang 050024, Hebei Province, China

Abstract

BACKGROUND: Research on foot and ankle proprioception is crucial for the rehabilitation of chronic ankle instability and geriatric diseases as well as for the improvement of body posture control and motor performance. Previous studies have often studied the sensory evaluation of the foot and ankle joints

¹河北师范大学体育学院, 河北省石家庄市 050024; ²河北医科大学临床学院, 河北省石家庄市 050017; ³河北省人体运动生物信息测评重点实验室, 河北省石家庄市 050024

第一作者: 冯亮, 男, 1993年生, 黑龙江省绥化市人, 汉族, 硕士, 主要从事运动生物力学方面的研究。

通讯作者: 霍洪峰, 硕士, 高级实验师, 河北师范大学体育学院, 河北省石家庄市 050024; 河北省人体运动生物信息测评重点实验室, 河北省石家庄市 050024

<https://orcid.org/0000-0003-1309-6032>(冯亮); <https://orcid.org/0000-0002-8755-430X>(霍洪峰)

引用本文: 冯亮, 张雅飞, 霍洪峰. 足踝复合体本体感觉的测量与评价 [J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(20):3259-3264.



separately, which has limitations for a comprehensive understanding of their sensory function.

OBJECTIVE: The foot and ankle complex is the only part in direct contact with the support surface, and plays an important role in the collective sensory feedback and regulation and balance control. By combing the existing investigation and research of foot and ankle ontology, the measurement and evaluation methods of the sensation of the foot and ankle complex are combed, in order to pave the way and provide the theoretical basis for future related studies.

METHODS: Chinese terms “(foot OR foot ankle OR ankle) AND (sensation OR proprioception)” and English terms “(foot OR ankle) AND (feel OR proprioception)” were used as the keywords for retrieving relevant literature in the Web of Science, PubMed, and CNKI. We understood the basic concepts, current status and scope of research on the foot and ankle, summarized and evaluated the proprioceptive evaluation methods of the foot and ankle, and finally included 57 papers for further review.

RESULTS AND CONCLUSION: The evaluation of foot and ankle complex sensation was mainly divided into sensory evaluation of the foot and proprioceptive evaluation of the ankle joint. The sensory evaluation of the foot mainly describes the sensation of the skin and the sensory feedback under the intervention conditions. The methods mainly include the pressure sensory threshold test, the two-point discrimination test of the foot (planar and plantar), and the duration test of skin vibration sensation. Ankle joint proprioception evaluation focuses on the description of joint position, motion range, force value and functional performance. The methods are mainly divided into static joint angle reset test, motion minimum threshold test, force perception reproduction test and dynamic balance, speed and walking ability tests. The report of quantitative results is generally expressed by “an error,” which is generally divided into absolute error, relative error, constant error, etc. To conclude, the foot and ankle complex has specific sensory capabilities, including foot sensation and ankle proprioception, which affect the quality of life and athletic performance of humans. Weakness of both foot sensation and ankle proprioception is associated with reduced human balance, and the combined measurements of the two can comprehensively and effectively evaluate foot and ankle function. The combination of foot and ankle sensory measures is selected according to different research needs and various influencing factors such as environment, emotion and reporting style are fully considered, to improve the validity of measurement and evaluation.

Key words: foot and ankle complex; proprioception; measurement method; isokinetic tester; sensory threshold; two-point discrimination ability; skin vibration sensation; kinesthesia; position perception; power perception

How to cite this article: FENG L, ZHANG YF, HUO HF. Measurement and evaluation of proprioception of foot and ankle complexes. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2024;28(20):3259-3264.

0 引言 Introduction

躯体感觉是存在于皮肤、肌肉和关节中的感受器接受不同刺激后产生的感觉，包括触觉、振动觉、位置觉、运动觉、力觉、温度觉以及疼痛觉等，其中位置觉、运动觉、力觉、触觉和疼痛觉等与人体的日常生活状态和运动训练关系密切，其对特殊人群（脑卒中患者、慢性踝关节不稳患者）的影响更为显著^[1-2]。中枢神经系统需要处理不同刺激引起的感觉输入信息来调节肌肉活动和控制身体的空间位置。视觉、前庭和躯体感觉系统为姿势控制提供这样的感觉输入信息，中枢神经系统处理并整合这些信息。在整合过程中，中枢神经系统通常会权衡感觉输入信息，并优先考虑其中一个系统，以实现针对不同环境的感觉得反馈^[3]。日常姿势控制和运动规划需要组织和整合视觉、前庭和躯体感觉输入，以有效地协调运动动作^[4]。研究表明，当健康的人站在视线充足和稳定平面环境时，通常主要使用躯体感觉作为感觉信息的输入来源。而存在感觉缺失的脑瘫患者在挑战平衡的环境中可能主要依赖视觉和前庭系统的反馈，该人群的姿势控制障碍被归因于姿势对齐的生物力学变化以及中枢神经系统的感觉得处理障碍^[5-6]。

足和踝关节是一个复杂的结构，包括多个节段关节、交叉错综的肌肉以及丰富的感觉受体，承担着身体和地面之间的链接作用。足踝复合体是唯一与支撑面直接接触的部位，在收集本体反馈和调节平衡控制中起重要作用。足部和踝关节的感觉障碍会导致躯体的平衡和活动问题。已有研究表明，脑卒中后的神经肌肉控制能力下降，可能是由于感觉丧失或弱化以及足部和踝关节的相关变化对活动能力的影响^[7-8]。现阶段，对下肢运动问题的研究主要集中在髋关节、膝关节、踝关节和足部的结构和功能进行探究，然而对感觉丧失的研究主要集中在上肢，对下肢尤其是足踝的关注相对不足。并且现有文献大多把足踝描述成一个部分，对其感觉功能的评价仅仅围绕着踝关节的本体感觉，忽略了足部和踝关节感觉的评价各自具有的实际价值。

因此，文章通过梳理现有的关于足部和踝关节本体感觉的调查研究，综合梳理评价足踝复合体感觉的测量与评价方法，以期对日后的相关研究做出铺垫并提供理论依据。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

1.1.1 检索人及检索时间 第一作者在 2023 年 3 月进行检索。

1.1.2 检索文献时限 检索年限为 1990-01-01/2023-04-01。

1.1.3 检索数据库 Web of Science、PubMed 和中国知网数据库。

1.1.4 检索词 中文检索词为“(足 OR 足踝关节 OR 踝关节) AND (感觉 OR 本体感觉)”；英文检索词为“(foot OR ankle) AND (feel OR proprioception)”。

1.1.5 检索文献类型 实验性研究、调查性研究、综述及荟萃分析。

1.1.6 检索策略 以 PubMed 数据库检索策略为例，见图 1。

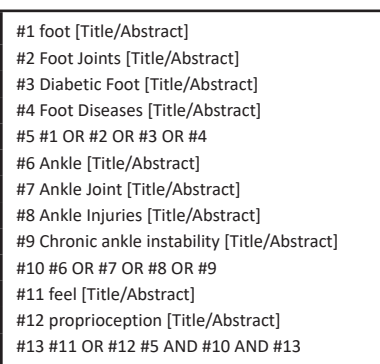


图 1 | PubMed 数据库检索策略图

1.1.7 检索文献量 初步共筛选得到相关文献 2 536 篇，包括 Web of Science 数据库 902 篇，PubMed 数据库 1 570 篇，中国知网数据库 64 篇，中文文献 64 篇，英文文献 2 472 篇。

1.2 入组标准

1.2.1 纳入标准 纳入以足、踝、足踝感觉为研究对象的随机对照试验研究以及试验方法中涉及足踝感觉评价的研究文献，入选文章以中文和英文实验性文章、综述类文章以及书籍为主。

1.2.2 排除标准 ①文献发表时间过早、缺少时效性；②与足踝本体感觉研究内容相差较大；③文献中对于足踝感觉的评价方法缺少效度检验；④文献质量偏低。

1.3 文献质量评估与数据的提取 文献的筛选和纳入过程如图 2 所示。经过层层筛选，最终纳入 57 篇文献。

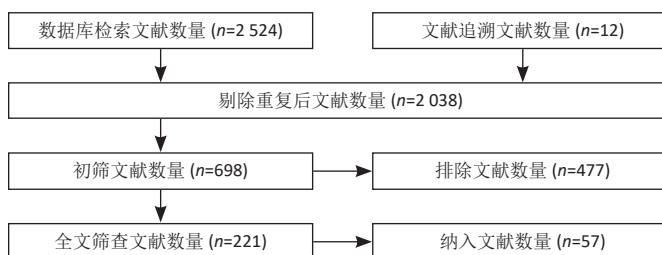
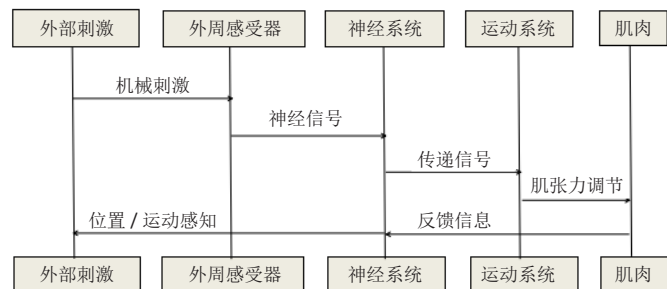


图 2 | 文献筛选流程图

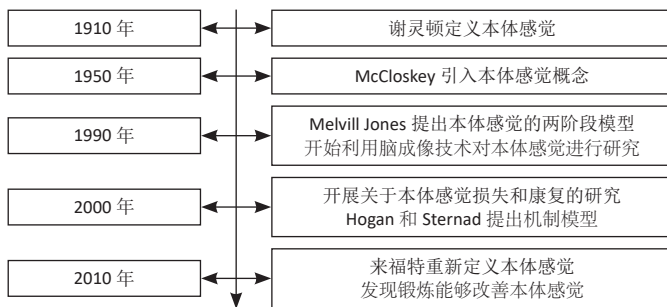
2 结果 Results

通过对纳入文献的阅读与梳理，明晰了本体感觉的研究脉络以及作用机制，见图 3、4。研究重点聚焦到足踝感觉评价方法时发现，对足踝复合体感觉的评价主要分为对足部的感觉评价和踝关节的本体感觉评价^[9-21]，部分研究成果见表 1。足部的感觉评价主要描述其皮肤的感觉，



图注：外周感受器收集外部刺激信息，传入中枢神经系统进行整合，传出信息经过运动系统作用于骨骼肌

图3 | 本体感觉作用机制图



图注：本体感觉相关研究脉络，包括概念的提出、界定、模型提出以及相关实践例证研究

图4 | 本体感觉相关研究时间脉络图

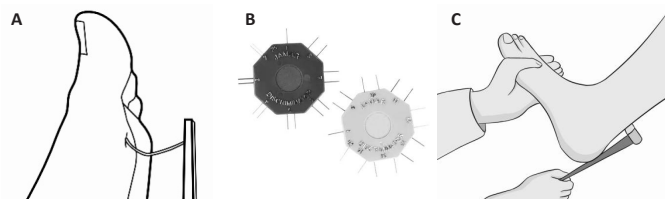
表1 | 足部与踝关节感觉评价方法

感觉评价方法	部位	描述	误差报告
压力感觉阈值测试 ^[9]	足底	测量足底受到不同压力时产生的感觉阈值	绝对误差、相对误差
足底两点辨别能力测试 ^[10]	足底	测量足底受到两点刺激时的辨别能力	绝对误差、相对误差
皮肤振动感觉测试 ^[11]	足底	测量足底受到频率振动时感觉持续的时间	绝对误差、相对误差
静关节角度重置测试 ^[12]	踝关节	测量被动关节角度重置的能力	绝对误差、相对误差
运动最小阈值测试 ^[13]	踝关节	测量能够分辨运动方向的最小角度	绝对误差、相对误差
力觉重现测试 ^[14]	踝关节	测量能够重现被动关节移动的力	绝对误差、相对误差
速度、行走能力的测试 ^[15]	踝关节	测量不同速度行走和不同方向转弯的能力	绝对误差、相对误差

方法主要包括：压力感觉阈值测试、足底两点辨别能力测试、皮肤振动感觉持续时间测试。踝关节本体感觉评价着重描述关节位置、运动范围、力值及功能表现，方法主要分为静态的关节角度重置测试、运动最小阈值测试、力觉重现测试以及动静态平衡、速度、行走能力的测试。对量化结果的报道一般以“误差”来表示，根据报道的需要一般分为：绝对误差 (absolute error, AE)、变量误差 (variable error, VE)、恒定误差 (constant error, CE) 以及归一化绝对误差 (normalized absolute error, NAE) 等。

2.1 足部的感觉评价 压力感觉阈值测试是通过评价参与者在每个测量部位的3次试验中正确识别2次的单丝压力阈值来完成的。测试中使用单丝试剂盒在每只脚足底侧的第一和第五跖骨头和脚跟进行触压^[22-23]，通过识别的精准度来衡量足底部的感觉阈值，见图5。感受阈值越小，表明足底皮肤感觉的敏感程度越高，在生活行为与运动训练中，可以提供更多的足底输入性信息。美国医师学会在2007年发布的糖尿病足部护理临床指南，已经将单丝测试应用于反映测试部位敏感性 (是/否答案) 的测试方法。

两点辨别能力测试通过使用触觉测量仪对足底前足和足跟进行两点辨别能力评估^[22, 24]，并将2个刺激点之间的最小距离 (mm) 作为得分，在每个位置的3次试验中2次被正确地识别距离为测量结果。每种条件下进行3次试验 (两点刺激、一点刺激、假试验) 和位置随机进行，并



图注：图A为足底压力感觉阈值测试；B为两点辨别能力测试；C为皮肤振动感觉持续时间测试

图5 | 足部感觉测试展示图

要求受试者报告刺激的数量 (即2个, 1个, 或没有)。该程序首先测试最大距离 (50 mm)，以确保受试者识别两种不同刺激的能力。如果受试者正确地识别出这一点，将继续进行最小的测试距离 (10 mm)，并增加5 mm的增量，直到45 mm，直到达到阈值。两点辨别阈值定义为2个刺激点之间的最小距离，以毫米为单位。

皮肤振动感觉持续时间测试是一种可靠有效的临床工具，用于评估振动感知障碍^[25-26]。使用128 Hz音叉评估双侧第一跖骨头和内踝的振动感觉^[27]。评估人员在参与者脚旁的橡胶垫表面敲击音叉，以引起音叉尖部的剧烈运动。然后，音叉被垂直放置在预定的骨头突起或皮肤上。振动刺激的持续时间由精密计时器记录下来，从音叉的激活时间开始，直到参与者报告他/她感觉不到它，用于分析的是每个部位3次试验的平均时间 (s)。

2.2 踝关节本体感觉的静态评价

2.2.1 关节角度重置测试 受试者仰卧位姿势在测试平台上，要求受试者戴眼罩、塞软耳塞或戴播放有电磁干扰声的耳麦，将优势侧足放于充气套中再与等速测力计装置的测试臂通过绑带固定；先确定好受试者的踝关节跖屈背屈的完整运动幅度 (角度°)，随后在运动范围内从0°向跖屈和背屈方向每隔5°选取一个角度，预设为目标角度。分别让受试者感受目标角度，并识记目标角度之后进行复现。正式复现时每一角度测试3次，被动运动角速度5 (°)/s。比较2次角度的差异，判断测试结果精确度采用2次角度的绝对误差表示^[28]。

2.2.2 运动最小阈值测试 在告知受试者开始测试后的3-10 s内，随机开始利用等速动力装置提供持续而缓慢的关节被动运动，被动运动角速度0.5 (°)/s，起始角度为踝关节0°向跖屈和背屈方向每隔5°选取一个角度，预设为目标角度，每个角度顺时针和逆时针方向各运动测试3次，测量关节能够感知到的被动运动的运动阈值，即测量起始时运动的关节角度与受试者能够觉察到运动时的关节角度。比较2次角度的差异，判断测试结果精确度采用2次角度的绝对误差表示^[29]。

2.2.3 力量重现法 等速测力装置设定为等长肌力测试模式，见图6。首先进行受试者最大自主等长收缩测试，获得最大自主等长收缩肌力 (maximal voluntary isometric contraction, MVIC)；各关节角度进行3次5 s的等长伸展肌力测试，次间休息5 s，组间休息300 s，去除疲劳影响，变异系数 (coefficient of variance, CV) 要求控制在15%以下。休息30 min后，以MVIC的50%作为目标力值^[31]，要求受试者保持这个目标力值 (在电脑屏幕上目标力值处画线，受试者通过视觉反馈控制发力大小)，同时让受试者注意感受此时用力的大小；在此之后，要求受试者闭上眼睛，产生5 s相同大小力量输出并记录为实测力值。计算目标力值与实测力值的差异采用2次测试结果的绝对误差表示^[30]。



图注：该图片为踝关节的本体感觉测量，包括位置觉、力量觉以及运动觉图6 | 应用等速肌力测试仪进行踝关节位置觉、力量觉以及运动觉测试图

2.3 踝关节本体感觉的动态评价以及间接评价 对踝关节本体感觉的动态评价以及间接评价也是非常重要的测评方法：主动运动程度辨别评估 (Active Movement and Extension Discrimination Assessment, AMEDA) 来

测试踝关节本体感觉^[32]。AMEDA测试是通过向参与者展示不同程度的主动运动来进行的,区分这些程度的能力被视为他们的感官灵敏度。在每次实验中,参与者主动进行脚踝的反转,以达到目标角度;跌落着陆测试中的脚踝本体感觉(ankle inversion and dorsiflexion assessment of the landing, AIDAL)用于测试下降着陆期间的脚踝本体感觉^[33]。着陆测试平台有4个角度:10°, 12°, 14°和16°,按从小到大的顺序编号为1, 2, 3, 4。参与者赤脚站在跳跃平台上,双手放在髌峰的上边缘,并保持头部和眼睛向前。在每次测试中,参与者在测试者的指导下从起跳平台跳到测试平台,要求参与者自然弯曲臀部和膝盖,同时脚落地。在正式测试之前,参与者被要求熟悉三轮(12次试验)的4个脚踝反转着陆姿势。在正式测试期间,随机出现了4个角度的着陆测试平台,总共进行了40次试验(每次脚踝翻转10次试验)。参与者被要求对着陆后脚踝反转的角度作出绝对判断,并立即给出一个数字。此过程不应该向参与者提供正确和错误的反馈。一些研究人员将“平衡感”纳入本体感觉的定义中。遵循这一逻辑,平衡任务可以作为替代方法,以(间接)评估使用非意识本体感觉(以保持平衡状态)的功能能力,特别是在视觉信息被消除的情况下(即参与者被蒙住眼睛)。静态平衡是指在支撑基础内保持身体质量中心的能力,可以通过专业的静态平衡测试平台完成,通过分析压力中心轨迹的长度、轨迹变化速率、包络面积以及偏移方向对静态平衡做出评价;而动态平衡需要用适当的反应来处理外部扰动,除了使用专业的动态平衡测试平台测试外,还可以使用便捷式的Y形人体动态平衡测试,通过评分来反映结果^[33]。

3 讨论 Discussion

3.1 足踝复合本体感觉功能的理论基础 中枢神经系统需要外周输入信息来调节肌肉活动和姿势控制。视觉、前庭和躯体感觉系统提供外周输入信息,中枢神经系统处理并整合这些信息。在整合过程中,中枢神经系统通常会权衡感觉输入,并优先考虑其中一个系统,以实现不同环境的感测反馈^[3]。研究表明,本体感觉缺失人群在对平衡具有挑战性的环境中可能主要依赖视觉和前庭系统的反馈来维持平衡^[34]。感觉输入对神经系统的发育至关重要,刺激大脑发展适当突触组织。躯体感觉信息对早期身体发展阶段的运动学习尤为关键,为获得更复杂的行为技能提供了基础^[35]。外周输入信息对中枢神经系统监测和调节姿势控制至关重要^[36]。

中枢神经系统结合视觉、前庭和躯体感觉输入,通过3种感觉系统之间的相互作用来调节平衡,在不同条件下选择适当的外周输入^[37]。中枢神经系统处理和选择合适的感觉输入源的能力被称为“感觉加权”,这对在不同条件下保持平衡很重要(例如在黑暗中)^[38]。某个感觉系统的损伤会导致对其他系统选择的依赖,并限制人体合理平衡和稳定策略的选择,因此本体感觉系统的改变可能会影响平衡能力。躯体感觉系统对身体平衡、姿势控制以及运动状态的调节至关重要,也为躯体制定适当的前馈预期和调节反馈提供信息^[39]。足部感觉系统的结构、姿势、知觉、力量或柔韧性的改变可能会导致足部和踝关节感受运动与环境信息变化的能力受损。

足部感觉、踝关节本体感觉与姿势摇摆和平衡有关,因此对足踝复合体的本体感觉的测量和评价尤为重要。足部对支撑面感觉信息获取减少或下肢位置意识知觉能力的下降,会削弱躯体应对失衡的反映能力和控制能力。这些感觉变化在老年人中很常见,在患有足部感觉病理性丧失的成年人中可能会更加明显,并增加了跌倒和受伤的风险。当健康的人站在稳定平面和光照良好的环境时,他们通常主要使用躯体感觉来获取环境信息^[40-41]。

3.2 足部感觉和踝关节本体感觉的联动关系 足踝复合体的概念倾向于把足部和踝关节之间的结构和功能联动的考虑到一起。足部和踝关节两者之间的关系十分密切,其本体感觉的描述与评价也具有很强的联动关系。足底皮肤和踝关节本体感觉障碍可能导致躯体姿势控制和行动障碍的观点得到了相当数量研究的支持^[42]。临床研究与实践也提示一套完整的足踝感觉测试是重要的,也发现现有的单一测量方式无法全面描述足踝复合体的感觉功能^[43]。

足部感觉的不同测试结果,可以解释人体不同的生理学和行为学的现象。较高的轻触压阈值与患有感觉缺失幼儿、老年人的平衡能力差有

关^[44-45],但结果仅仅适用6 min以内较短的运动。一种可能的解释是,在步行以及跑步等动态活动中,足部负载响应可能相当于个体体质量的几倍,与涉及较低水平足底压力的简单平衡任务(如在姿势转换时发生的保持站立平衡)相比,足底机械感受受体的阈值更有可能达到完全激活的状态,从而实现外周感觉信息的获取与反馈。足底侧的两点辨别能力与静态站立时压力中心摇摆面积显著相关^[46]。具体来说,两点刺激之间的距离越大,躯体姿势控制的表现越差。对两点辨别的足部特定部位的调查中发现,前脚掌和脚跟区域观察到的距离变大的结果,均与较差的平衡表现相关。这些发现表明,足底有限的空间和时间的触觉信息来自脚的前和后支撑区,如果该区域存在感觉问题,可能导致躯体无法触发适当的代偿反应以维持稳定的直立站立。

足底振动感觉与压力中心摇摆面积有显著关系^[47],当儿童能够感知振动感觉的时间较长时,会表现出功能稳定性降低、代偿性姿态反应受损以及动态和静态稳定性缺陷。发现,皮肤振动感觉的持续时间也随着年龄的增长而增加,原因是神经纤维的退化和作为皮肤振动感觉主要机械感受器的帕西尼小体的恶化。有证据表明,足部的振动触觉刺激激活帕西尼小体,但也可以调节踝关节本体感觉,从而表明触觉和本体感觉输入之间的相互作用,两者都有助于姿势控制。较长时间的振动感觉可能表明中枢神经系统对传入的振动信息的处理和整合的异常,从而导致平衡控制受损。足底振动感觉是与大多数临床运动评估显著相关的唯一感觉方式。特别是,较长的振动感知持续时间与大肌肉运动和行走功能受损、功能性移动能力受损以及足底屈肌强度相关^[48]。这些发现暗示了来自足底的振动感觉输入,由位于皮下组织、骨膜和关节韧带的帕西尼小体的刺激提供,对静态和动态姿势控制至关重要^[49]。

踝关节本体感觉的描述主要是对其位置觉、力觉和运动觉的评价。关于踝关节本体感觉的评价存在两种基本的认识。其一,使用一种特定的方法对踝关节的本体感觉作出描述,并认定是值得推广的结果,此种评价方法显然不满足踝关节本体感觉所包含的范畴。事实上,本体感觉的评价具有关节特异性与方法特异性的特点。不同关节本体感觉测试结果之间并没有报告明显的相关性。身体两侧的不同关节之间存在很强的相关性,但不同关节之间没有相关性。其二,全面描述踝关节的位置觉、力觉和运动觉,并且同时包含动态与静态的全面评价。一项对位置觉、力觉以及运动觉之间相关性的研究表明,单独使用一种测试方法描述本体感觉是片面的。踝关节的本体感受器中,高尔基腱器官主要感受关节的力量变化,肌梭主要反馈运动觉相关的信息,而位置觉则需要由二者共同作为信息输入源,因此,踝关节不同感觉信息的描述结果反映不同的结构问题^[50]。

3.3 足踝本体感觉测量的结果与报道 足部皮肤、距离和振动感觉与踝关节运动觉、位置觉和力觉等都是适当的人体姿势控制不可或缺的能力。足部感觉和踝关节本体感觉的测量结果应该如何评分是一个重要的问题。本体感觉的量化评价的主要方式是感觉“复现”^[51],而复现的结果一般以“误差”表示。现有的误差类型,包括变量误差(VE)^[52]、绝对误差(AE)^[53]、归一化绝对误差(NAE)和恒定误差(CE)^[47]。变量误差表示误差在多次试验中的可变性,是指误差评分的标准偏差(指示围绕恒定误差的分散)^[54],从而表示性能的精度水平;绝对误差是对总体误差的度量,是总体参考值和复现值之间的平均绝对差异;而常数误差是对误差方向性(欠调或过调)的度量,指有符号差异(判断中的指示系统偏差)。为了评估误差为MVIC百分比,计算AE,并将误差归一化到最大的自愿等距收缩以产生归一化绝对误差。文章使用方程式来计算这些参数:

$$VE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (R_i - R)^2}{3}}, (i = 1, 2, 3)$$

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^3 |R_i - T|}{3}, (i = 1, 2, 3)$$

$$NAE = \frac{\sum_{i=1}^3 |R_i - T|}{3 \cdot MVIC} \times 100\%, (i = 1, 2, 3)$$

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^3 (R_i - T)}{3}, (i = 1, 2, 3)$$

上述方程中 R_i 表示感觉复现值、 T 表示目标值、 R 表示复现值的平均值。

然而,绝对误差提供了关于总体误差大小的见解。相反,持续的误差对应于误差的方向性,这样一来,确定一个人是否持续地高估或低估了一个给定的力是可能的^[55]。变量误差对应于多个测试上的误差变化,因此可以作为精度的度量标准^[56]。文献中无明确一致意见,应该如何对这些测试进行评分;甚至各种指数之间的相关性也很少被报告。从更实际的角度来看,使用多个指数往往使各种研究结果的比较变得不可能。

效度检验:对踝关节力感的研究发现,VE和AE的组内相关系数均大于0.75^[57],尽管在测量CE时这些值均低于0.75^[33]。在第一次测试和重新测试之间存在不同的一系列实验因素(包括记忆、学习和疲劳等)会影响给定实验的整体可靠性。感觉记忆和感觉学习得存在一定的默认特征,在测试中第一阶段的测试流程和测试感觉会在实验条件完全一致的情况下在第二阶段测试中得到改善。相关研究证明与第一阶段相比,在第二阶段中观察到50 N和100 N目标力水平下的AE值略有改善,这可能表明学习对研究结果产生了一定的影响。因此,向研究参与者呈现的目标力的顺序随机化,进一步限制这种与重新测试时间差异相关的学习的影响。此外,为了更好地控制疲劳和学习对研究结果的影响,将测试时间间隔开了7 d,因为先前的研究已经证实,较长的测试时间间隔可能会提高重新测试的可靠性。

足踝复合本体感觉的准确性评价包含很多方面的,踝关节的主动与被动的位觉、运动中的轨迹、速度以及范围、力觉感受的阈值与准确以及足部皮肤的触感及振动等。如何确定合适的评价方案,需要结合具体的研究需要进行制定。在特定的人群中的研究中,研究人员和从业者应考虑足踝复合感觉评价结果与其肢体或关节的运动能力、运动范围和肌肉力量的需求调整测试,同时展开对结果的理论分析时,也要结合其行为特征。此外,在选择适当的测试时,还应考虑其他重要因素。一些测试本质上需要参与者的积极贡献(例如努力复现和辨别,放松并保持肌肉松弛)。

3.4 结论 足踝复合具备特殊的感知能力,包括足部感觉和踝关节的本体感觉,影响人类的生活质量以及运动表现。足部感觉与踝关节本体感觉的弱化均与人体平衡能力下降相关,二者联合测量可以全面有效地评价足踝功能。根据不同的研究需求,选择足部与踝关节的感觉测量方法的组合形式,并充分考虑环境、情绪以及报道方式等多种影响因素,提高测量与评价的有效性。

3.5 局限性及展望 研究内容主要梳理了现在的足部和踝关节的感觉测量,但是并没有梳理到具体同时使用多种方法综合描述足踝复合体的相关研究。后续的相关研究中,需要根据具体的研究目的,以足踝复合体为研究对象,综合使用多种方法评价其本体感觉。

作者贡献:文章设计及审校者为霍洪峰。资料收集、数据分析及成文者为冯亮。

利益冲突:文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明:这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让:文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范:文章撰写遵守了《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA声明)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- [1] CHEN Z, HAN J, WADDINGTON G, et al. Somatosensory perception sensitivity in voluntary postural sway movements: age, gender and sway effect magnitudes. *Exp Gerontol*. 2019;122:53-59.
- [2] KUNKEL D, POTTER J, MAMODE L. A cross-sectional observational study comparing foot and ankle characteristics in people with stroke and healthy controls. *Disabil Rehabil*. 2017;39(12):1149-1154.
- [3] WITCHALLS J, BLANCH P, WADDINGTON G, et al. Intrinsic functional deficits associated with increased risk of ankle injuries: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2012;46(7):515-523.

- [4] KNOX MF, CHIPCHASE LS, SCHABRUN SM, et al. Anticipatory and compensatory postural adjustments in people with low back pain: a systematic review and meta-analysis. *Spine J*. 2018;18(10):1934-1949.
- [5] ASSLANDER L, PETERKA RJ. Sensory reweighting dynamics in human postural control. *J Neurophysiol*. 2014;111(9):1852-1864.
- [6] UETA Y, MATSUGI A, OKU K, et al. Gaze stabilization exercises derive sensory reweighting of vestibular for postural control. *J Phys Ther Sci*. 2017;29(9):1494-1496.
- [7] JULIE B, KATHRYN SH, GERT K, et al. Agreed definitions and a shared vision for new standards in stroke recovery research: the stroke recovery and rehabilitation roundtable taskforce. *Int J Stroke*. 2017;12(5):444-450.
- [8] COLLETT J, FLEMING MK, MEESTER D, et al. Dual-task walking and automaticity after Stroke: Insights from a secondary analysis and imaging sub-study of a randomised controlled trial. *Clin Rehabil*. 2021;35(11):1599-1610.
- [9] TESARZ J, EICH W, TREEDE R, et al. Altered pressure pain thresholds and increased wind-up in adult patients with chronic back pain with a history of childhood maltreatment: a quantitative sensory testing study. *Pain*. 2016;157(8):1799-1809.
- [10] DELLON AL, MUSE VL, SCOTT ND, et al. A positive Tinell sign as predictor of pain relief or sensory recovery after decompression of chronic tibial nerve compression in patients with diabetic neuropathy. *J Reconstr Microsurg*. 2012;28(4):235-240.
- [11] GILMAN S. Joint position sense and vibration sense: anatomical organisation and assessment. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2002;73(5):473-477.
- [12] LJL, JI ZQ, LI YX, et al. Correlation study of knee joint proprioception test results using common test methods. *J Phys Ther Sci*. 2016;28(2):478-482.
- [13] ROBERT JS, EMMA K. Motion perception in the ageing visual system: minimum motion, motion coherence, and speed discrimination thresholds. *Perception*. 2006;35(1):9-24.
- [14] MINOO KZ, BAHRAM A, ASGHAR R, et al. Measurement of force sense reproduction in the knee joint: application of a new dynamometric device. *J Phys Ther Sci*. 2016;28(8):2311-2315.
- [15] VAN HEDEL HJ, WIRZ M, DIETZ V. Assessing walking ability in subjects with spinal cord injury: validity and reliability of 3 walking tests. *Arch Physical Med Rehabil*. 2005;86(2):190-196.
- [16] JAMES RA, WILLIAM JP, WILLIAM GC. Arthroscopy of the ankle: technique and normal anatomy. *Foot Ankle*. 1985;6(1):29-33.
- [17] CHARIS M, KENNEETH R. Assessing mobility in elderly people. A review of performance-based measures of balance, gait and mobility for bedside use. *Rev Clin Gerontol*. 1995;5(4):615.
- [18] BOYLE J, NEGUS V. Joint position sense in the recurrently sprained ankle. *Aust J Physiother*. 1998;44(3):159-163.
- [19] YOU SH. Joint position sense in elderly fallers: a preliminary investigation of the validity and reliability of the SENSERite measure. *Arch Physical Med Rehabil*. 2005;86(2):346-352.
- [20] KATHY L, JOSEPH G, ERIK W, et al. mining the diagnostic accuracy of dynamic postural stability measures in differentiating among ankle instability status. *Clin Biomech*. 2013;28(2):211-217.
- [21] ELANGO VAN N, HERRMANN A, KONCZAK J. Assessing proprioceptive function: evaluating joint position matching methods against psychophysical thresholds. *Phys Ther*. 2014;94(4):553-561.
- [22] MEYERB C, LYDEN PD. The modified national institutes of health stroke scale: its time has come. *Int J Stroke*. 2009;4(4):267-273.
- [23] CRUZ-ALMEIDA Y, BLACK ML, CHRISTOU EA, et al. Site-specific differences in the association between plantar tactile perception and mobility function in older adults. *Front Aging Neurosci*. 2014;6:68.
- [24] PATEL AT, DUNCAN PW, LAI SM, et al. The relation between impairments and functional outcomes poststroke. *Arch Phys Med Rehabil*. 2000;81(10):1357-1363.
- [25] MENZ HB, TIEDEMANN A, KWAN MM, et al. Reliability of clinical tests of foot and ankle characteristics in older people. *J Am Podiatr Med Assoc*. 2003;93(5):380-387.

- [26] CORNWALL MW, MCPHILL TG, LEBEC M, et al. Reliability of the modified foot posture index. *J Am Podiatr Med Assoc.* 2008;98(1):7-13.
- [27] AULD ML, BOYD R, MOSELEY G L, et al. Tactile function in children with unilateral cerebral palsy compared to typically developing children. *Disabil Rehabil.* 2012;34(17):1488-1494.
- [28] 尹彦. 功能性踝关节不稳者动态姿势稳定性评价方法及其影响因素的研究 [D]. 北京: 北京体育大学, 2016.
- [29] HORVATH A, FERENTZI E, SCHWARTZ K, et al. The measurement of proprioceptive accuracy: a systematic literature review. *J Sport Health Sci.* 2023;12(2):219-225.
- [30] 张秋霞, 花秀琴, 施永健. 踝关节本体感觉的测量方法研究与应用 [J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2011,15(35):6619-6623.
- [31] 李林, 纪仲秋, 李艳霞, 等. 关节角度重置法、运动最小阈值测量法和力量重现法的相关性研究 [J]. *天津体育学院学报*, 2016,31(1):36-40.
- [32] YANG N, ADAMS R, WADDINGTON G, et al. Ankle complex proprioception and plantar cutaneous sensation in older women with different physical activity levels. *Exp Brain Res.* 2022;240(3):981-989.
- [33] LIU Y, SONG Q, ZHOU Z, et al. Effects of fatigue on balance and ankle proprioception during drop landing among individuals with and without chronic ankle instability. *J Biomech.* 2023;146:111431.
- [34] PAPPAS E, HAGINS M, SHEIKHZADEH A, et al. Biomechanical differences between unilateral and bilateral landings from a jump: gender differences. *Clin J Sport Med.* 2007;17(4):263-268.
- [35] LESINSKI M, HORTOBAGYI T, MUEHLBAUER T, et al. Effects of balance training on balance performance in healthy older adults: a systematic review and meta-analysis. *Sports medicine (Auckland, N.Z.).* 2015;45(12):1721-1738.
- [36] 朱婷, 安丙辰, 梁贞文, 等. 认知对姿势控制能力影响的研究进展 [J]. *中华老年病研究电子杂志*, 2015,2(1):35-38.
- [37] KANDEL ER. *Principles of Neural Science. Psychological Medicine.* McGraw-Hill Medical. 2001.
- [38] KLOUS M, MIKULIC P, LATASH ML. Two aspects of feedforward postural control: anticipatory postural adjustments and anticipatory synergy adjustments. *J Neurophysiol.* 2011;105(5):2275-2288.
- [39] BERGQUIST R, WEBER M, SCHWENK M, et al. Performance-based clinical tests of balance and muscle strength used in young seniors: a systematic literature review. *BMC Geriatrics.* 2019;19(1):1471-2318.
- [40] 杨凯, 黄万红, 杨禹珺, 等. 传统导引对慢性踝关节不稳干预研究 [J]. *湖北医药学院学报*, 2021,40(4):378-381,390.
- [41] NEILSON LJ, MACASKILL LA, LUK J, et al. Children's school-day nutrient intake in ontario: a cross-sectional observational study comparing students' packed lunches from two school schedules. *Nutrients.* 2022;14(9):104-110.
- [42] PETERSEN BA, SPARTO PJ, FISHER LE. Clinical measures of balance and gait cannot differentiate somatosensory impairments in people with lower-limb amputation. *Gait Posture.* 2023;99:104-110.
- [43] SIRAGY T, NANTEL J. Quantifying dynamic balance in young, elderly and parkinson's individuals: a systematic review. *Front Aging Neurosci.* 2018; 10:387.
- [44] BERGINP S, BRONSTEIN AM, MURRAY NM, et al. Body sway and vibration perception thresholds in normal aging and in patients with polyneuropathy. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 1995;58(3):335-340.
- [45] LORD SR, CLARKR D, WEBSTER IW. Postural stability and associated physiological factors in a population of aged persons. *J Gerontol.* 1991; 46(3):M69-M76.
- [46] HELEN MB, NILS AH, MARKUS DJ, et al. The effects of a fatiguing lifting task on postural sway among males and females. *Hum Mov Sci.* 2018;59: 193-200.
- [47] LI L, LI Y, WANGH, et al. Effect of force level and gender on pinch force perception in healthy adults. *Iperception.* 2020;11(3):2041669520927043.
- [48] DUZGUN I, KANBUR NO, BALTACI G, et al. Effect of Tanner stage on proprioception accuracy. *J Foot Ankle Surg.* 2011;50(1):11-15.
- [49] PETERS RM, MCKEOWN MD, CARPENTER MG, et al. Losing touch: age-related changes in plantar skin sensitivity, lower limb cutaneous reflex strength, and postural stability in older adults. *J Neurophysiol.* 2016;116(4): 1848-1858.
- [50] 张鹏, 张琳, 李向哲, 等. 以头眼运动为主的感觉运动整合训练对脑卒中偏瘫患者平衡及步行功能的影响 [J]. *中国康复医学杂志*, 2023,38(1): 98-100.
- [51] KOO TK, LI MY. A Guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *J Chiropr Med.* 2016;15(2):155-163.
- [52] HOPKINS WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med.* 2000;30(1):1-15.
- [53] RANKIN G, STOKES M. Reliability of assessment tools in rehabilitation: an illustration of appropriate statistical analyses. *Clin Rehabil.* 1998;12(3): 187-199.
- [54] WEIR JP. Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. *J Strength Cond Res.* 2005;19(1):231-240.
- [55] AGEBERG E, FLENHAGEN J, LJUNG J. Test-retest reliability of knee kinesthesia in healthy adults. *BMC Musculoskelet Disord.* 2007;8:57.
- [56] ELLISON PH, SPARKS SA, MURPHY PN, et al. Determining eye-hand coordination using the sport vision trainer: an evaluation of test-retest reliability. *Res Sports Med.* 2014;22(1):36-48.
- [57] AANDSTAD A, SIMON EV. Reliability and validity of the soccer specific INTER field test. *J Sports Sci.* 2013;31(13):1383-1392.

(责任编辑: LCH, WJ, ZN, WL)